

Fossilfritt, förnybart, flexibelt

Rapport

Framtidens hållbara energisystem



Naturskyddsföreningen

Ge oss kraft att förändra
PG 90 1909-2

Författare: Kristina Östman
Layout: Espmark & Espmark
Omslagsbild: Erik Espmark/Kristina Östman
ISBN: 978-91-558-0211-0
Naturskyddsföreningen november 2019

Innehåll

	Förord	4
	Sammanfattning	5
1	Inledning	
	1.1 Var är vi i dag?	7
	1.2 Vart är vi på väg?	8
	1.3 Energiomställningens drivkrafter	8
	1.4 Avgränsningar och syfte	9
2	El- och värmeproduktion	
	2.1 Den svenska elproduktionen i dag	13
	2.2 Den svenska uppvärmningssektorn i dag	13
	2.3 Framtidens el- och värmeproduktion	14
	2.4 Flexibilitetsresurser	23
	2.5 Samlad potential i framtidens el- och värmeproduktion	28
3	Biobränslen	
	3.1 Den svenska bioenergin i dag	31
	3.2 Är biobränslen alltid hållbara?	31
	3.3 Den hållbara biobränsleanvändningen	33
4	Bostäder och service	
	4.1 Energianvändningen i bostäder och service i dag	38
	4.2 Framtidens bostäder och service	38
	4.3 Energianvändningen i framtidens bostäder och service	42
5	Transporter	
	5.1 Den svenska transportsektorn i dag	44
	5.2 Framtidens transportsystem	45
	5.3 Energianvändningen i framtidens transportsystem	55
6	Industri	
	6.1 Den svenska industrisektorn i dag	57
	6.2 Framtidens industrisektor	57
	6.3 Energianvändningen i den framtida industrisektorn	60
7	Framtidens energisystem	
	7.1 Elsystemet	63
	7.2 Fjärrvärmesystemet	65
	7.3 Biobränslen	65
	7.4 Det hållbara, förnybara energisystemet	66
	Ordlista	68
	Litteraturförteckning	71
8	Bilagor	77

Förord

Senast 2030 måste de globala utsläppen av växthusgaser halveras för att världen ska ha en chans att nå 1,5-gradersmålet. Alla världens energisystem måste ställas om och fossila bränslen fasas ut. Ett land som Sverige, rikt på resurser och med höga historiska utsläpp, behöver gå före i omställningen och fasa ut fossila bränslen redan till år 2030. Men att fasa ut fossila bränslen är inte tillräckligt för att energisystemet ska bli hållbart.

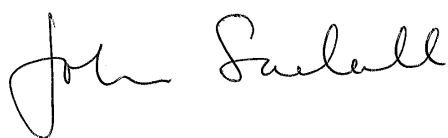
För att omställningen ska bli hållbar, och samhället ska hållas inom de så kallade planetära gränserna, måste hänsyn tas till biologisk mångfald och resursanvändning. Det går inte att fortsätta som i dag, samhället måste förändras i grunden.

I den här rapporten visar Naturskyddsföreningen hur ett hållbart, förnybart energisystem kan se ut i Sverige år 2040, när energiöverenskommelsens mål om ett helt förnybart elsystem ska vara uppnått.

Förändringar kommer att krävas inom alla sektorer. Energianvändningen behöver effektiviseras och bli smartare, förnybar elproduktion behöver fortsätta byggas ut och nya flexibilitetsresurser som efterfrågefleksibilitet behöver införas. Genom energieffektivisering inom samtliga sektorer kan energianvändningen nästan halveras. Energin som används kommer från förnybara, hållbara källor – vatten, vind, sol och hållbar biomassa. Stora delar av samhället har ställts om från bilberoende och stadsmiljöerna har blivit mer levande. Industrin har effektiviserats, elektrifierats och övergått till hållbara biobränslen.

Energisystemet är fyllt av målkonflikter som kräver varsam hantering. I den här rapporten visar vi en möjlig vision av hur energipusslet går ihop – där el- och värmeproduktionen är hållbar, energianvändningen smartare och mer effektiv och hållbara, svenska biobränslen används där de gör mest nytta.

Politiken har kommit en god bit på vägen genom energiöverenskommelsen och det klimatpolitiska ramverket, men nu är det dags att gå från ord till handling. Tiden är knapp och omställningen behöver trappas upp på allvar redan i dag.



Johanna Sandahl,
ordförande Naturskyddsföreningen

Sammanfattning

Världen står inför en enorm utmaning. För att undvika katastrofala klimatförändringar behöver energisystem ställas om och fossila utsläpp upphöra. Sverige har unikt goda förutsättningar – med tillgång till reglerbar vattenkraft och goda vindlägen. Samtidigt är Sverige ett till ytan stort land, med tung fordonsflotta och energiintensiv industri.

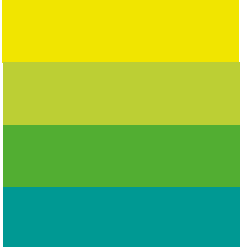
Den här rapporten presenterar Naturskyddsföreningens vision för Sveriges energisystem 2040. Redan till 2030 behöver all fossil energi-användning vara utfasad i Sverige, men genom att ta sikte på 2040, när riksdagens mål om ett förnybart elsystem ska nås, kan ett 100 procent förnybart, hållbart energisystem beskrivas.

Genom att studera en hållbar el- och värmeproduktion och samtidigt undersöka hur nödvändig energieffektivisering kan ske inom bostäder och service, transport och industri läggs det nya energipusslet. För att elsystemet alltid ska vara i balans presenteras nya flexibilitetsresurser, som vätgasproduktion och efterfrågeflexibilitet. Behovet av biobränslen kan mötas av hållbara, svenska resurser.

För att omställningen ska vara möjlig krävs förändringar i hur vi i Sverige lever, reser, bor och konsumerar. Energitillförseln minskar med nära hälften i det skisserade energisystemet till 2040. Kärnkraften är då avvecklad, energieffektivisering inom samtliga sektorer genomförd och majoriteten av fordonsflottan elektrifierad. Den största effektiviseringen sker inom väg- och lufttrafik.

Elsystemet 2040 består av 90 TWh vindkraft, 68 TWh vattenkraft, 15 TWh solceller och 3 TWh kraftvärme. Elproduktionen ökar från 161 TWh till 176 TWh och nettoexporten ökar från 19 TWh till 22 TWh. Fjärrvärmesystemet har krympt något genom energieffektivisering och består av 9 TWh kraftvärme, 8 TWh solvärme, 9 TWh värmepumpar och 13 TWh spillvärme. Alla fossila bränslen är utfasade. Genom energieffektivisering och elektrifiering minskar biobränsleanvändningen från 142 TWh till 106 TWh. Totalt används 132 TWh svensk biomassa för energisyfte, men eftersom förädlingen sker i Sverige uppstår omvandlingsförluster.

I ett fossilt energisystem finns inga synliga begränsningar för hur mycket energi som kan användas. Genom att använda ändliga resurser kan en skenbart oändlig konsumtion möjliggöras. I ett hållbart system sätts yttre ramar – för hur mycket el som kan användas, för hur mycket biobränslen som kan produceras. Då tvingas hela samhället till anpassning och energin används där den behövs som mest. Genom att ställa om på ett hållbart sätt är det möjligt att behålla en hög levnadsstandard och välbefinnande, utan att riskera katastrofala klimatförändringar eller utarmning av biologisk mångfald.



Inledning

1

Energisystemet måste förändras i grunden. Utan omställning av hela samhället har vi ingen chans att undvika katastrofala klimatförändringar. Omställningen har redan börjat i olika sektorer runt om i världen. Fossila energikällor byts ut mot förnybara, energianvändningen effektiviseras och föråldrade kärnkraftverk avvecklas. Tidigare helt fossildrivna sektorer som transporter och industri elektrifieras, och biobränslen används på nya sätt och i nya processer. Överföringen av el mellan länder ökar och nya tekniska lösningar gör att kunder kan anpassa sin energianvändning för att matcha tillgången på hållbar elproduktion.

Samtidigt hörs röster som säger att vi omöjligt kan skapa ett helt förnybart energisystem, att vi är beroende av såväl kärnkraft som fossila bränslen för att behålla leveranssäkerhet och levnadsstandard. Andra säger att vi enkelt kan lösa klimatomställningen genom att elektrifiera och ersätta fossila bränslen med biobränslen men i övrigt fortsätta som i dag. Genom att ta sikte på 2040, när energiöverenskommelsens mål om ett förnybart elsystem ska nås, visar den här rapporten att ett helt förnybart energisystem är både möjligt och nödvändigt, men att det kräver förändring inom alla sektorer. Omställningen måste intensifieras och utfasningen av fossila bränslen påbörjas omedelbart.

För att underlätta läsningen finns ordlista med återkommande begrepp och förkortningar i slutet av rapporten på sida 68.

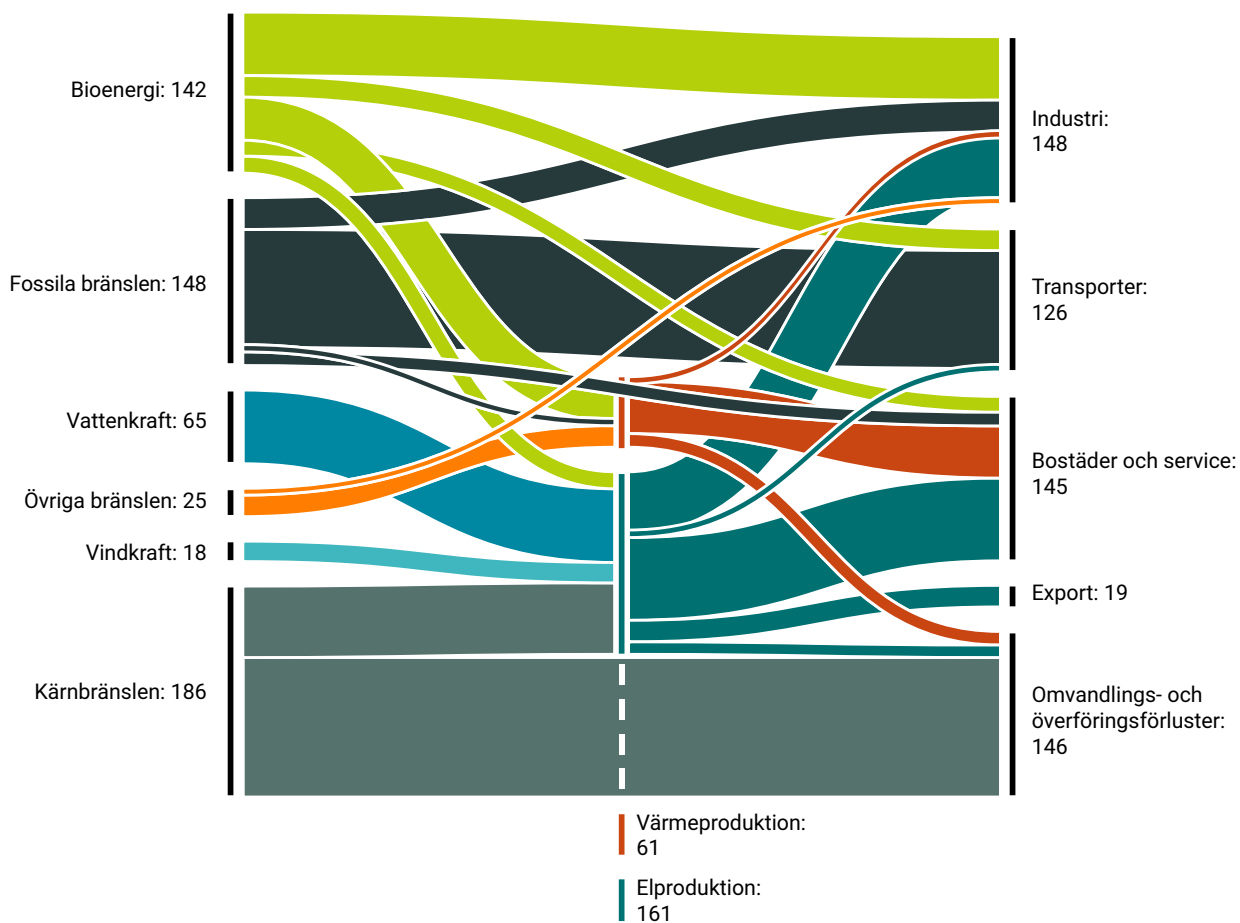
1.1 Var är vi i dag?

Energisystemet består av alla energikällor, omvandlingen till exempelvis el eller värme och den slutliga energianvändningen. Det inkluderar el, värme och bränslen, inklusive drivmedel, och används inom bostäder och service, transport och industri.

Beroende på vilken energi som används uppstår olika stor miljö- och klimatpåverkan. Elsektorn i Sverige har till exempel väldigt låga utsläpp av koldioxid, men höga nivåer av radioaktivt avfall, medan transportsektorn har höga utsläpp av koldioxid eftersom den huvudsakligen använder fossila bränslen. I framtiden kommer dessa olika delar i energisystemet vara betydligt mer sammankopplade än de är i dag.

2017 användes 378 TWh energi per år i Sverige, 416 TWh om utrikes transport inkluderas (Energimyndigheten, 2019a). Hela det svenska energisystemet år 2017 visas i Figur 1 som ett så kallat Sankey-diagram. Energin går att dela upp i var den kommer ifrån, hur den omvandlas och vad den används till. För att få en bild av hela energisystemet inkluderas samtliga förluster, export och energin som bunkras i Sverige för utrikes sjö- och luftfart. Diagrammet visar att 142 TWh biobränslen används framför allt inom industrin och i värmeproduktion för bostäder och service. Det visar att den svenska elproduktionen är 161 TWh och huvudsakligen kommer från vattenkraft och kärnkraft, samt att den största delen av de 148 TWh fossila bränslen används till transporter. Slutligen visar det tydligt hur ineffektiv kärnkraften är på grund av dess stora omvandlingsförluster.

Alla komponenter i det svenska energisystemet behöver förändras i framtiden. Till 2040 kommer biobränsleanvändningen utvecklas, de gamla kärnkraftverken avvecklas, vind- och solkraft byggs ut kraftigt och fossila bränslen försvinna helt. På användarsidan krävs kraftig effektivisering för att minska den totala energimängden och mer flexibilitet i hur energin används. Genom att gå igenom energisystemet komponent för komponent målas en ny bild av det framtida energisystemet upp i rapporten.



Figur 1. Sankey-diagram över Sveriges energianvändning 2017, i TWh. Diagrammet visar flöden av energi från insatt bränsle eller produktionslag, eventuell omvandling och slutlig användning. Den totala energianvändningen och -produktionen, inklusive förluster, är 584 TWh. Energin som bunkras i Sverige för utrikes sjö- och luftfart inkluderas i transporter. Inom övriga bränslen för värmeproduktion inkluderas fossilt avfall, torv samt 5 TWh spillvärme från industrin och 5 TWh el från elpannor och värmepumpar. För att underlätta illustrationen visas dessa som insatta bränslen, istället för flöden från elproduktion och industrin. Utformat med data från (Energimyndigheten, 2019a).

I en granskning av effektiv energiomställning runt om i världen rankas Sverige som etta för andra året i rad (World Economic Forum, 2019). Resultatet beror framför allt på de låga koldioxidutsläppen från den svenska elproduktionen och de legala ramverk som finns genom klimatlagen. Samtidigt har Sverige näst högst elanvändning per capita i EU och tionde högst i världen (Central Intelligence Agency, 2019). Omställningen i av det svenska energisystemet har alltså bara börjat.

1.2 Vart är vi på väg?

Till 2040 ska Sverige enligt riksdagens energiöverenskommelse ha ställt om till

ett helt förnybart elsystem. För att detta ska vara hållbart måste ramarna sättas utifrån de planetära gränserna. Den fossila energin måste fasas ut inom samtliga sektorer redan till 2030 och Sveriges utsläpp minimeras, genom såväl beteendeförändringar som tekniska lösningar. Den totala energianvändningen måste minska och samhället bli mer resurseffektivt. På så sätt kan Sveriges höga livskvalitet och välstånd bibehållas, utan att det behöver gå ut över klimat och miljö.

1.3 Energiomställningens drivkrafter

Omställningen är avgörande för att minimera riskerna för katastrofala klimat-

förändringar. Rapporter från FN:s klimatpanel, IPCC, visar att den globala uppvärmningen riskerar att passera 1,5 grad redan till 2030 (IPCC, 2018). Tiden är knapp och omställningen behöver aktivt trappas upp.

Av de svenska territoriella växthusgasutsläppen på 53 miljoner ton 2017 kom 17 miljoner ton från transportsektorn, 17 miljoner ton från industrisektorn, 7 miljoner ton från jordbrukssektorn, 5 miljoner ton från energisektorn och 6 miljoner ton från övriga källor (Naturvårdsverket, 2018a). Utöver de territoriella utsläppen orsakas utsläpp på 11 miljoner ton per år från energi för utrikes sjö- och luftfart som bunkras i Sverige (Naturvårdsverket, 2018b).

I den svenska elsektorn är utsläppen betydligt lägre än i andra länder, men där finns istället ett ohållbart beroende av kärnkraft. Kärnkraft är en gammal teknik som inte har någon roll att spela i ett modernt energisystem, som kräver brytning av uran och orsakar radioaktivt avfall. När uranmalm bryts frigörs radioaktiva gaser och radioaktivt damm, och radioaktiva sönderfallsprodukter som blir kvar i gruvavfallet riskerar att läcka ut. Brytningen sker ofta på platser med mycket tveksamma arbetsförhållanden. De svenska kärnkraftverken är dessutom gamla och nödvändiga investeringar för livstidsförlängningar har visat sig vara olönsamma, varför vissa svenska reaktorer redan nu avvecklas ekonomiska skäl.

I juni 2016 slöts den så kallade energiöverenskommelsen mellan Socialdemokraterna, Moderaterna, Miljöpartiet, Centerpartiet och Kristdemokraterna. Överenskommelsen utgör en gemensam färdplan med mål om 100 procent förnybar elproduktion från 2040, utan att sätta ett stoppdatum för kärnkraft (Energikommissionen, 2017). Kärnkraft utgör i dag ungefär 40 procent av Sveriges elpro-

duktion men kommer redan 2020 vara mindre efter att Ringhals 1 och 2 läggs ner på grund av bristande lönsamhet. De nyaste svenska kärnkraftverken är från 1985 och för att kärnkraften ska finnas kvar efter 2040 krävs en livslängd på åtminstone 55 år. Stängningen av Ringhals 1 och 2 sker efter 44 år, istället för 50 år som planerat, och det finns ingenting som talar för att kärnkraftens lönsamhet skulle öka på sikt. Redan i dag finns det enighet inom energibranschen om att ny kärnkraft är olönsam (se till exempel NEPP (2019) och Energimyndigheten (2018a)) och även utan politiska beslut är det sannolikt att den svenska kärnkraften är avvecklad till 2040.

1.4 Avgränsningar och syfte

Rapportens syfte är att presentera en möjlig bild av ett helt förnybart energisystem i Sverige år 2040, det år som energiöverenskommelsen har som mål. All energianvändning i Sverige inkluderas, inklusive den som bunkras i Sverige för internationell sjö- och luftfart.

Genom att å ena sidan beskriva potentialen för hållbar el-, värme- och biobränsleproduktion; och å andra sidan en hållbar efterfrågan inom varje användningsområde framträder bilden av ett nytt, förnybart energisystem. Rapporten börjar med den historiska utvecklingen och de framtida möjligheterna på produktionssidan och går därefter in på den historiska och framtida energianvändningen inom bostäder och service, transport och industri. Möjligheterna att använda nya flexibilitetsresurser, som kan användas för att hantera variationer i elsystemet, studeras i detalj. För att säkerställa att omställningen är hållbar, och inte bara förnybar, läggs betydande fokus på hur el och värme produceras, samt vilka biobränslen som används.

Elproduktionen analyseras under ett helt år, efter installerad kapacitet samt under

två ansträngda timmar under året. Eftersom energianvändningen varierar kraftigt under året behöver elsystemet dimensioneras för att klara av även de kallaste timmarna med högst elanvändning. I det helt förnybara systemet är den mest ansträngda timmen en mycket kall vinterdag med låg vindkraftsproduktion. I ett system med stor andel solex kan även varma sommardagar med hög produktion

utgöra utmaningar för systemet och studeras därför utöver tillgänglig effekt under en kall vinterdag.

Eftersom rapporten fokuserar på energianvändningen behandlas inte de utsläpp av växthusgaser som uppstår i industriella processer eller jordbruket, förutom från fossil energianvändning inom dessa sektorer.



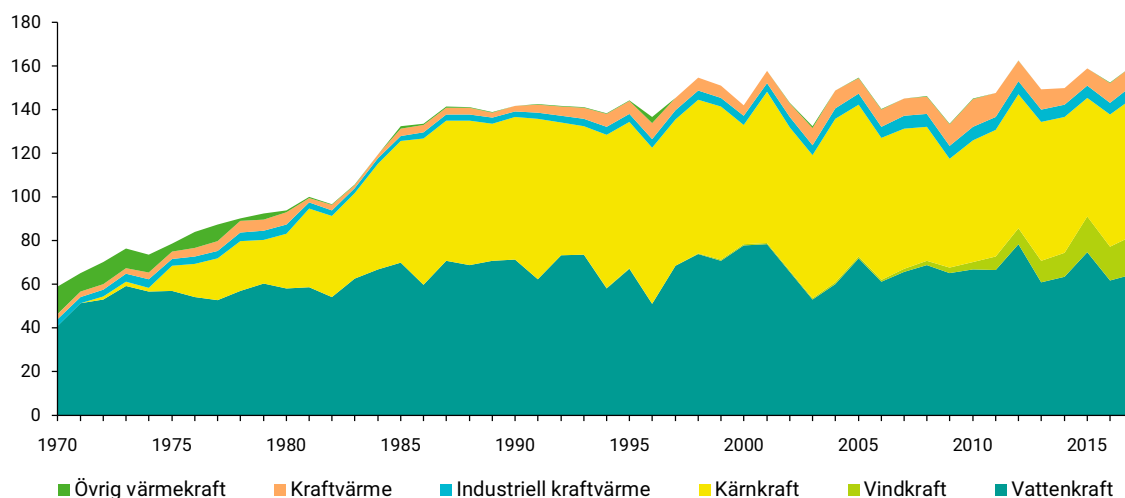
Foto: Robert O Akerman



El- och värmeproduktion

2

Elproduktion (netto) per kraftslag, 1970-2017, TWh



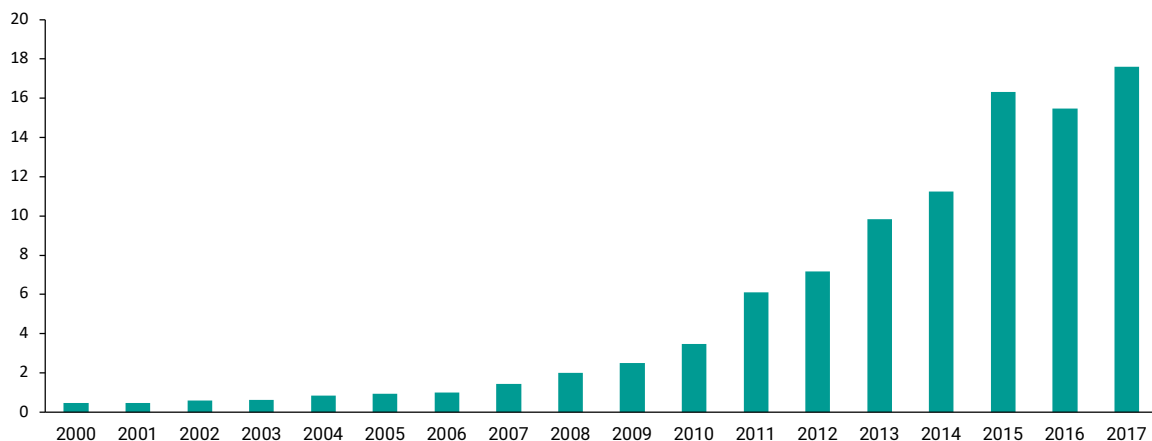
Figur 2. Elproduktion i Sverige; 1970-2017 (Energimyndigheten, 2019a).

Rapporten tar avstamp i den svenska el- och värmeproduktionen, historiskt och till 2040. Varje förnybart kraftslag presenteras med för- och nackdelar, samt potential till 2040. Dessutom presenteras andra flexibilitetsresurser som kan användas för att balansera den ökade andelen variabel elproduktion. Även på uppvärmningssidan presenteras nya lösningar för att maximera nyttan av de hållbara bioenergiressurerna.

All elproduktion har viss negativ påverkan på klimat och miljö och den mest hållbara elen är den som inte produceras. Även för-

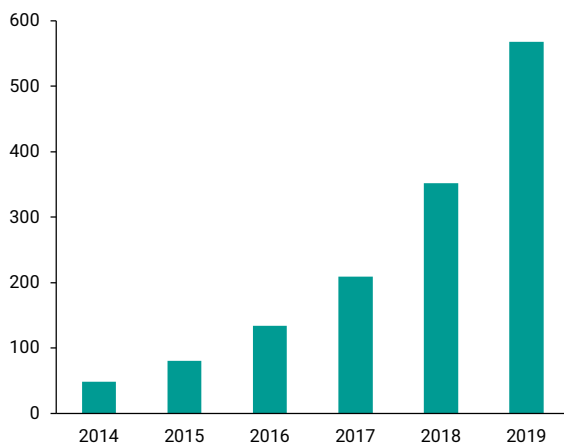
nybar elproduktion påverkar klimatet, framför allt genom tillverkningen, och lokalmiljön, genom lokaliseringen. De totala livscykelutsläppen för olika produktionsslag kan ses i Bilaga 1. Utöver utsläppen från produktionen ger även transmission och distribution av el upphov till miljö- och klimatpåverkan. Avgörande i ett hållbart, förnybart elsystem är alltså en effektiv energianvändning där elen används där den verkligen behövs. Hur detta kan ske diskuteras i kommande kapitel om bostäder och service, transporter och industri.

Elproduktion från vindkraft, 2000-2017, TWh



Figur 3. Elproduktion från vindkraft i Sverige; 2000-2017 (Energimyndigheten, 2019a).

Elproduktion från sol, 2000-2017, MWh



Figur 4. Elproduktion från sol i Sverige; 2014-2019, prognos för 2018 och 2019 (Energimyndigheten, 2018b)

2.1 Den svenska elproduktionen i dag

Omställningen av den svenska elproduktionen har redan börjat, som Figur 2 visar. Vattenkraften har haft en stadig produktionskapacitet sedan början av 1990-talet och variationerna beror framför allt på mängden vatten som har funnits tillgängligt. Kärnkraften byggdes ut på 1970-talet och har sedan dess bidragit med ungefär 40 procent av den svenska elproduktionen. Dessa kraftverk börjar nå slutet av sin livstid och redan 2019 och 2020 avvecklas Ringhals 1 och 2, med en samlad installerad kapacitet på 1 765 MW.

Produktionen från vindkraft har ökat kraftigt de senaste 20 åren och kan ses i detalj i Figur 3. Även elproduktionen från solkraft har ökat kraftigt, även om den fortfarande är för låg för att synas i den övergripande figuren. Den kan ses i detalj i Figur 4.

Även om den svenska elproduktionen står inför en enorm omställning de kommande årtiondena visar ovanstående utveckling på potentialen till anpassning efter nya förutsättningar. Elproduktionen från sol har nästan dubblats varje år sedan 2014 och vindkraften har ökat med 30 procent per år de senaste tio åren.

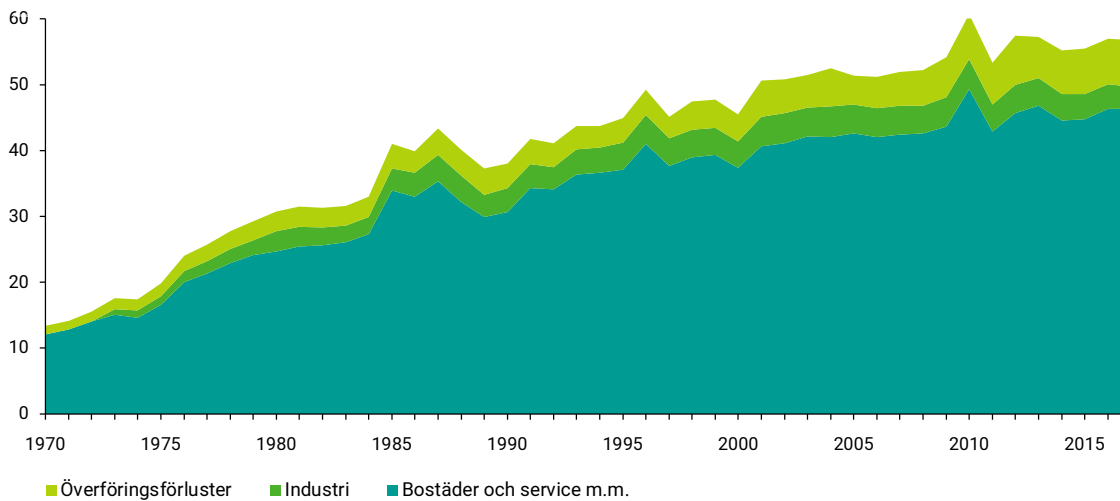
2.2 Den svenska uppvärmningssektorn i dag

Uppvärmningssektorn i Sverige använder ungefär 100 TWh energi per år (Fossilfritt Sverige, 2018a). Utsläppen av fossil koldioxid från den svenska uppvärmningssektorn har minskat med 90 procent de senaste 40 åren. Från att ha dominerats av eldningsolja både i hushållen och fjärrvärmerna är värmeproduktionen i dag huvudsakligen baserad på förnybar fjärrvärme, värmepumpar, elvärme och biobränsle. Den omställning som lett till den största minskningen av fossila koldioxidutsläpp är att oljeeldning för uppvärmning av bostäder och lokaler i stor utsträckning har ersatts av biobränslebaserad fjärrvärme (Naturvårdsverket, 2018c). Även övergången till elvärme och värmepumpar har bidragit till ett minskat fossilberoende för uppvärmningssektorn.

Fjärrvärme är den vanligaste uppvärmningsformen i Sverige. Som Figur 5 visar sker majoriteten av användningen i bostäder och service. Som Figur 6 visar har det skett ett bränslebyte i fjärrvärmeproduktionen, från 98 procent petroleumprodukter 1970 till 6 procent petroleumprodukter, fossilgas och kol i dag. Under motsvarande period har biobränslen ökat från 2 procent till 62 procent. Utöver det används 15 procent övriga bränslen, inklusive fossilt avfall och torv.

Mycket av den svenska fjärrvärmerna produceras i kraftvärmeverk, som producerar både el och värme. Jämfört med värmekraftverk, som bara producerar värme, och kondenskraftverk, som bara producerar el, är effektiviteten väldigt högt i kraftvärmeverk. I dag står industriell kraftvärme och kraftvärme för 6 TWh respektive 9 TWh elproduktion i Sverige (Energimyndigheten, 2019a).

Användning av fjärrvärme, 1970-2017, TWh



Figur 5. Användning av fjärrvärme i Sverige; 1970-2017 (Energimyndigheten, 2019a).

2.3 Framtidens el- och värmeproduktion

I dag finns det en koppling mellan el- och värmeproduktion genom kraftvärmeverken, men i framtiden kommer det finnas fler synergier än så. El och värme är i viss mån utbytbara produkter, tack vare värmepumpar i fastigheter. Värme kan dessutom lagras och användas för att balansera variabiliteten i ett helt förnybart elsystem, både lokalt genom efterfrågefleksibilitet och genom säsongslagring i fjärrvärmenätet.

Utbyggnaden av förnybar elproduktion i Sverige är hög och kommer öka ytterligare den kommande tiden. Redan i dag är både vind- och solel ofta billigare än konventionella energislag och de blir allt billigare (Energimyndigheten, 2018a).

Sverige har tillgång till stora mängder förnybara energiresurser – redan utbyggd vattenkraft, goda vindlägen på land och till havs, bioråvara och solinstrålning. För att avgöra hur det framtida, förnybara energisystemet ska se ut måste ställning tas till hur dessa energiresurser kan nyttjas på ett hållbart sätt. I dessa energislag finns sammantaget en tek-

nisk potential som vida överstiger efterfrågan och fokus bör alltså inte ligga på om, utan hur, det hållbara energisystemet kan byggas. I den här delen presenteras för- och nackdelar med varje produktionslag samt potentialen för hållbar utbyggnad framöver.

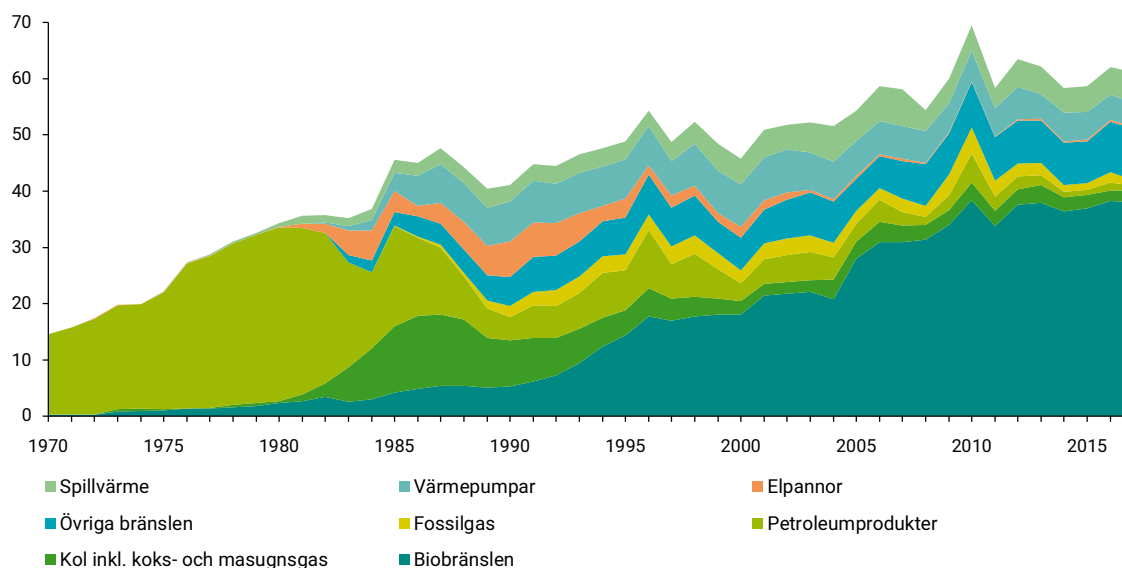
Exakt hur mycket respektive kraftslag kommer bidra med beror på ett flertal faktorer, som teknisk utveckling, styrsignaler och prisutveckling. Den här rapporten syftar inte till att ge en fullständig bild av hur el- och värmeproduktionen kommer se ut 2040, utan att beskriva en möjlig bild.

Vattenkraft

Vattenkraft är en av grundbultarna i det svenska elsystemet. I nuläget står den för ungefär 40 procent av Sveriges elproduktion och har de senaste 20 åren producerat 68 TWh per år i genomsnitt (Energimyndigheten, 2019a).

Vattenkraften svarar även för viktig reglerkraft som kan balansera variationer i efterfrågan på el under året och dygnet. I energiöverenskommelsen från 2016 slogs det fast att svenska vattenkraftverk ska ha moderna miljötillstånd och att ut-

Tillförd energi för fjärrvärmeproduktion, 1970-2017, TWh



Figur 6. Tillförd energi för fjärrvärmeproduktion; 1970-2017 (Energimyndigheten, 2019a).

byggnad av vattenkraft framför allt ska ske genom effekthöjning i befintliga verk.

Vattenkraften har liten klimatpåverkan men orsakar allvarliga skador på ekosystemen i rinnande vatten. Många rödlistade vattenlevande organismer hotas och den biologiska mångfalden minskar då viktiga livsmiljöer för strömlevande arter försvinner. Dammkonstruktioner och torrlagda älvfåror hindrar fisk och andra vattenorganismer från att vandra fritt. Fiskar dödas i kraftverkens turbiner. Även ekosystem längs stränderna drabbas hårt då vattendragens naturliga flödesregim och årstidsväxlingar helt sätts ur spel. Förutom de biologiska och hydrologiska effekterna påverkas vattensystemet som helhet eftersom sedimenttransporter, vattenkemi och vattentemperatur förändras då strömmande vatten däms upp och vattenflödet styrs om till kanaler och tunnlar.

Ramdirektivet för vatten – det så kallade vattendirektivet – är EU:s rättsliga ramverk för inlandsvatten. Vattendirektivets mål är att alla EU:s vatten ska uppnå god miljöstatus. För att leva upp till direktivets krav införde Sverige en ny lagstiftning 2019 som innebär

att tillstånden för alla vattenkraftverk ska omprövas så att anläggningarna kan förses med moderna miljövillkor. Omprövningen ska ske enligt en nationell plan där hänsyn tas till både vattenmiljön och tillgången på vattenkraftsel.

När mer variabel elproduktion, som sol- och vindkraft, införs i elsystemet ökar behovet av flexibilitet. Vattenkraft som kan lagra över 30 TWh mellan säsonger har stor potential att bidra till en långsiktig balansering av elsystemet. Samtidigt har vattenkraften möjlighet att balansera elsystemet även inom timmen. Vattenkraftens förmåga att bidra med snabb, varierad reglerkraft gör den till en viktig resurs i framtidens mer variabla elsystem. Avvecklingen av kärnkraft kan innebära att vattenkraften på sikt behöver ersätta kärnkraftens roll som basproduktion av el vilket skulle leda till minskad reglerförmåga (Energimyndigheten, Svenska kraftnät & Havs- och vattenmyndigheten, 2016). Med stor tillgång på nya flexibilitetsresurser, som efterfrågeflexibilitet och batterilagring, finns det dock goda möjligheter att hantera det i framtidens energisystem.

Av Sveriges cirka 2 000 vattenkraftverk står 255 stycken för 98 procent av den installerade kapaciteten. De 1 667 minsta vattenkraftverken svarar tillsammans för endast 0,7 procent av den installerade kapaciteten och bidrar med cirka en procent av vattenkraftens samlade reglerkraft (Energimyndigheten, Svenska kraftnät & Havs- och vattenmyndigheten, 2016). Det finns alltså förutsättningar att miljöanpassa eller till och med riva ut vissa mindre kraftverk och därmed låta vattnet flöda fritt och fiskarna vandra igen med endast marginell påverkan på de nationella el- och reglerkrafttillgångarna.

För att skydda djur- och växtliv i rinnande vatten och gynna den biologiska mångfalden i vattendrag där kraftverken är nödvändiga för att upprätthålla en stabil elproduktion och reglerkraft på nationell nivå är det avgörande att alla möjliga miljöåtgärder vidtas, till exempel genom restaurering av biflöden och anläggning av fiskvandringvägar, för att uppnå en så god miljöstatus som möjligt.

Vattenkraften i Sverige har under de senaste hundra åren byggts ut för att kunna leverera så mycket energi som möjligt. I ett framtida energisystem, med större behov av reglering, skulle vattenkraften istället kunna användas för att leverera så mycket effekt som möjligt. Vid renoveringar av existerande vattenkraftverk skulle justeringar kunna göras för att maximera effekten istället för energin. Sådana renoveringar behöver dock ta hänsyn till miljöpåverkan innan de kan godkännas.

Naturskyddsföreningens bedömning är att svensk vattenkraft i framtiden kommer att kunna förse systemet med lika mycket förnybar el och flexibel reglerkraft som i dag, 68 TWh årlig elproduktion med en installerad kapacitet på 16 300 MW. Eventuella effektökningar får inte ha negativa miljöeffekter utan ska ske genom

teknikförbättringar som till exempel effektivare turbiner.

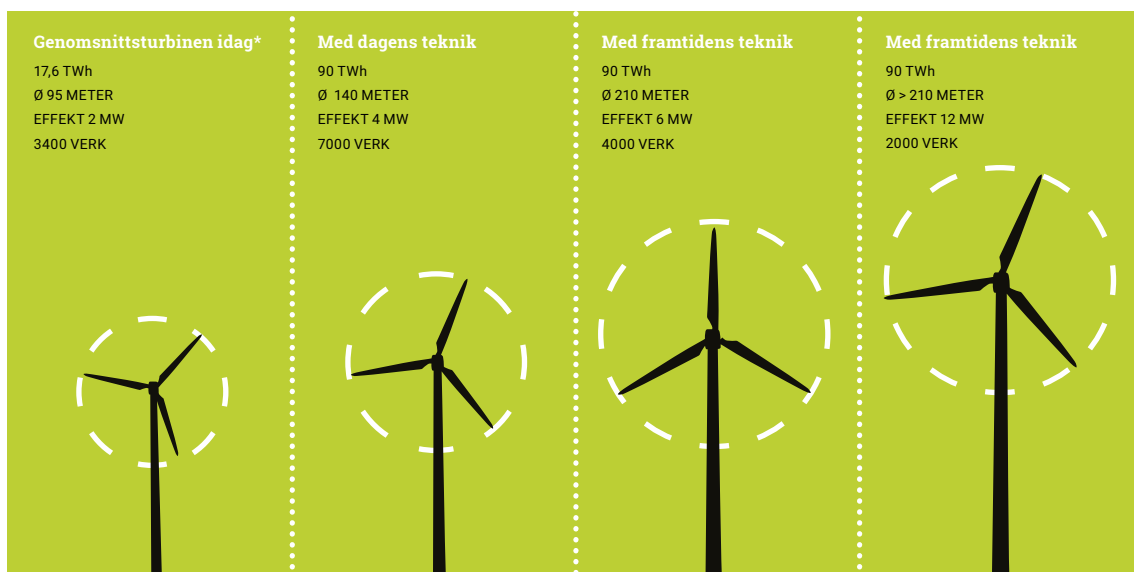
Naturskyddsföreningen förväntar sig att de nya miljötillstånden för svenska vattenkraftverk tar stor hänsyn till miljön och att verksamhetsutövarna utkrävs större ansvar för att motverka negativa miljöeffekter.

Vindkraft

Med sin ökning från nära 0 till 18 TWh per år har vindkraft de senaste 20 åren blivit en betydande energikälla i Sverige (se Figur 3). Vindkraft är det just nu mest konkurrenskraftiga energislaget i Sverige och förväntas stå för majoriteten av den nya elproduktionen som behöver byggas ut. Bara perioden 2018 till 2022 bedöms vindkraften öka från 17 TWh till 37 TWh per år (Energimyndigheten, 2019b). När Energimyndigheten studerar olika scenarier för ett helt förnybart framtida elsystem 2045 är scenariot med mest vind, 90 TWh, det som bedöms mest sannolikt (Energimyndigheten, 2019c). Samtidigt kommer många av de existerande vindkraftverken behöva monteras ned då de stått sin fulla livslängd eller inte längre är ekonomiskt lönsamma. I många av dessa fall kan de ersättas med nya, mer effektiva vindkraftverk.

Genom Sveriges geografiska förutsättningar, med stora obebyggda ytor, långa kuststräckor och höga medelvindhastigheter, är den tekniska potentialen för vindkraft stor. Potentialen för svensk vindkraft på land bedöms vara hundratal TWh och till havs tusentals TWh (Energimyndigheten, 2018a). Det är alltså inte den tekniska potentialen som begränsar vindkraftens bidrag till det framtida energisystemet.

Med dagens teknik skulle 7 000 vindkraftverk behövas för att producera 90 TWh. Det sker dock en snabb teknikutveckling för nya vindkraftverk och de blir allt större och mer effektiva. Större vind-



Figur 7. Antal vindkraftverk som krävs för att producera 90 TWh med olika turbintekniker. *Baserad på statistik över drifttagna turbiner år 2007-2017 (Energimyndigheten, 2019c).

kraftverk har både en högre installerad kapacitet och högre tillgänglighet, vilket betyder att de producerar en större andel av sin installerade kapacitet. Det gör att färre vindkraftverk behövs för att nå samma produktion. För att nå en produktion på 90 TWh med framtidens teknik behövs istället 2 000 till 4 000 verk, med en installerad kapacitet på 24 000 MW, som visas i Figur 7 (Energimyndigheten, 2019c). 2017 producerades 17 TWh av 3 500 vindkraftverk i Sverige.

Den snabba teknikutvecklingen för vindkraftverk gör att ytan som behövs för att producera en viss mängd el från vindkraft hela tiden minskar. Tyskland, med tio gånger så hög befolkningstäthet som Sverige, har mest installerad vindkapacitet i Europa med nära 50 000 MW (Energimyndigheten, 2019c), vilket innebär en täthet på 140 kW per kvadratkilometer. Motsvarande siffra för Sverige är 15 kW per kvadratkilometer i dag och 50 kW vid 90 TWh vindkraft. Som Figur 7 visar kan ett framtida vindkraftverk ha en installerad kapacitet på 12 MW och om alla skulle vara så stora skulle vara ett vindkraftverk per 230 kvadratkilometer i genomsnitt. Sveriges stora yta medger också en

sammanlagring mellan vindkraftens områdesvisa variationer, vilket innebär att samma vindförhållanden sällan råder samtidigt i norra och södra Skandinavien (IVA, 2019). Det gör att vindkraftsproduktionen kan bli något jämnare om vindkraften är utspridd än om all vindkraft var koncentrerad på ett litet område.

En betydande utmaning för vindkraftsutbyggnad i Sverige är Försvarsmaktens restriktionsområden – riksintressen för totalförsvaret. Fram till 2018 täckte Försvarsmaktens restriktionsområden en tredjedel av Sveriges yta, men efter ett beslut om förnyad redovisning av riksintressen 2018 ökade ytan med 16 procentenheter (Svensk Vindenergi, 2018). Områdena innefattar bland annat skjut- och övningsfält, flygplatser, sjöövningsområden, tekniska system och anläggningar (Försvarsmakten, 2019). Inom dessa områden måste alla ärenden som rör objekt högre än 20 eller 45 meter skickas på remiss till Försvarsmakten. Restriktionsområdena täcker nästan halva Sveriges yta och saknar motstycke i Europa.

En ytterligare utmaning för vindkraftsutbyggnad är det så kallade kommunala vetot. För att vindkraft ska etableras i en kommun måste kommunen ge sin tillstyrkan innan tillstånd kan prövas. Beslutet från kommunen kan inte överklagas, behöver inte motiveras och krav saknas för vad det ska baseras på. Tillstyrkans beslutet kan bero på "politiska ställningstaganden" och förhandlingar som helt saknar koppling till vindkraftsetableringen (Naturvårdsverket, 2017c). Naturskyddsföreningen anser att lagstiftningen bör ändras så att kommunal tillstyrkan endast krävs vid vindkraftsetablering i skyddade naturområden.

För en hållbar etablering av vindkraft är det avgörande att den placeras på platser som inte skadar hotade arter eller skyddsvärd natur. Vindkraftverks påverkan på fåglar kan delas in i tre kategorier – (1) kollisioner med vindkraftverk där fåglar dör eller skadas, (2) biotopförluster och fragmentering där habitat för störningskänsliga arter förloras och splittras, och (3) barriäreffekter där vindkraftverk utgör fysiska hinder för förbipasserande fåglar (Naturvårdsverket, 2017a).

Frekvensen av fågelkollisioner varierar kraftigt beroende på var vindkraften byggs, men i genomsnitt dör mellan fem och tio fåglar per år per vindkraftverk i Europa och Nordamerika (Naturvårdsverket, 2017a). Även med en utbyggnad till 90 TWh skulle detta leda till betydligt färre dödsfall än vad fönster- och kraftledningskollisioner orsakar varje år. Även om vindkraften utgör en liten risk för fågelfaunan i stort kan den få negativa konsekvenser för små fågelpopulationer, genom att dödligheten i populationer i närheten av vindkraftverk adderas till andra hot mot populationerna. Därför är det viktigt att ta hänsyn till att frekvensen av kollisioner varierar kraftigt mellan olika lokaliseringar av vindkraftverk. På vissa platser, framför allt våt-

marksområden, i kustnära lägen, på bergstoppar, bergskammar och andra platser med stora höjdskillnader är siffrorna betydligt högre (Naturskyddsföreningen, 2014). Vid lokaliseringen av vindkraft bör fågellivet i området inventeras och tas hänsyn till, till exempel genom att upprätta buffertzoner för att skydda häcknings- och födosöksplatser (Naturvårdsverket, 2017a).

Även fladdermöss påverkas av vindkraftverk. I Europa och Nordamerika dör i genomsnitt tio till femton fladdermöss per år och vindkraftverk (Naturvårdsverket, 2017a). Vindkraftverk nära skogar har högre olycksfrekvens. Den viktigaste åtgärden för att skydda fladdermöss är att låta vindkraftverken stå stilla under de tider och väderförhållanden då fladdermössen är som mest aktiva. Detta kan göras automatiskt med mjukvara som finns tillgänglig redan i dag. Dödsfallen sker framför allt under sensommar och höst, under nätter med svaga vindar. Precis som med fåglar drabbas fladdermöss även av annan mänsklig aktivitet, framför allt biltrafik. En kilometer starkt trafikerad motorväg kan döda lika många fladdermöss som ett vindkraftverk i ett område med medelhög kollisionsrisk (Naturvårdsverket, 2011). Fladdermöss förekommer dock generellt i små populationer och har långsam reproduktionstakt, vilket gör att de är jämförelsevis känsliga för ökad dödlighet.

Landlevande däggdjur påverkas av vindkraft på olika sätt beroende av art. Hjortdjur, varg och järv har visat sig lämna vindkraftsområden under etablering men återkommer ofta (Vindval, 2012). Vindkraftparkernas utbyggnadsfas har också negativ effekt på renar. Däremot har de svenska studier som har undersökt effekterna i driftfasen gett olika indikationer och forskarna är osäkra på om renar undviker området enbart på grund av störningar från mänsklig ak-

tivitet i vindkraftsområdet eller från vindkraften som sådan (Naturvårdsverket, 2018d).

Precis som för landbaserad vindkraft finns flera målkonflikter som behöver hanteras varsamt för havsbaserad vindkraft. 2018 producerade havsbaserad vindkraft 0,6 TWh el i Sverige och stod för ungefär tre procent av den installerade vindkraftskapaciteten (Energimyndigheten, 2019d). Även om havsbaserad vindkraft står för en liten andel av vindkraften i dag kommer den öka på sikt – flera parker planeras eller har redan fått tillstånd att byggas. Etablering av vindkraft till havs medför olika typer av ingrepp och påverkan på den marina miljön och de organismer som lever där. Graden av miljöpåverkan beror på vilka arter som berörs i det specifika området, vilka miljöförhållanden som råder samt vilken typ av fundament verket etableras med. Skyddade områden med bevarandevärden som är känsliga för etablering eller drift av vindkraft, till exempel för tumlare eller sjöfåglar, är inte lämpliga för vindkraftsetableringar och bör helt undvikas. För att tillräcklig miljöhänsyn ska tas i tillståndsprocesser för havsbaserad vindkraft i eller i närheten av Natura 2000-områden ska en Natura 2000-prövning enligt 7 kap. 28 a § miljöbalken alltid genomföras.

För däggdjur och fisk är det anläggningsfasen som har störst påverkan av havsbaserad vindkraft, medan vissa fåglar trängs undan även under drift (Naturvårdsverket, 2017b). För att ta hänsyn till marina arter under anläggning och avveckling av havsbaserad vindkraft är det viktigt att undvika känsliga perioder, såsom reproduktionstider för olika arter. Ljud i samband med pålning har påvisats ha en negativ effekt på marina däggdjur, inklusive tumlare som kan få både sämre hörsel och stört beteende. Detta kan minimeras genom att successivt öka kraf-

ten och ljudet vid pålning, så att större djur som fisk, säl och tumlare skräms och lämnar området. För att motverka den negativa effekten från pålning kan alternativa fundament som gravitationsfundament användas där det är möjligt. Vid vindkraftsetablering i känsliga marina områden bör åtgärder vidtas för att inte påverka bevarandevärden negativt. Till viss del kan vindkraftparker även ha en lokal positiv inverkan på djurlivet genom att utestänga bottentrålning och att fundamenten kan utgöra konstgjorda revmiljöer som lockar till sig fiskarter (Naturvårdsverket, 2017b).

Naturskyddsföreningen anser att vindkraften i Sverige bör byggas ut kraftigt för att säkerställa ett helt förnybart energisystem, men att lokaliseringen ska ta hänsyn till den biologiska mångfalden. Vindkraftverk bör etableras i lägen där de inte hotar höga natur- eller miljövärden. För att säkerställa att vindkraften med Naturskyddsföreningens märkning Bra Miljöval inte byggs i skyddsvärda områden finns en lista med stoppområden, dessa hittas i Bilaga 2.

Potentialen för svensk vindkraft bedöms till 90 TWh, i linje med Energimyndighetens mest sannolika scenario för ett 100 procent förnybart elsystem (Energimyndigheten, 2019c). För att detta ska ske till 2040 krävs en genomsnittlig utbyggnad på runt 3,5 TWh per år, vilket är lägre än genomsnittet under perioden 2018 till 2022 (Energimyndigheten, 2019b). För att maximera klimatnyttan bör utbyggnaden ske så snart som möjligt, eftersom även den europeiska elmixen förväntas bli mer och mer fossilfri på sikt och det därför finns en nytta med ökad elexport i närtid. För att vindkraften ska vara så resurseffektiv som möjligt bör verken vara utspridda över hela Sverige, istället för att koncentreras i norr. Genom att utnyttja hela landet kan de miljömässiga konsekvenserna minimeras samtidigt som

utbyggnaden av stamnätet kan begränsas. Redan i dag råder stora flaskhalsar i nordsydlig riktning på stamnätet, på grund av vattenkraften i norr och användningen i söder, vilket inte bör förstärkas av vindkraftsutbyggnaden.

Solel

Solel står än så länge för en liten andel av den svenska elproduktionen, men som Figur 4 visar har den ökat kraftigt de senaste åren. Med en fortsatt dubbling från år till år skulle den bidra med 10 TWh redan 2025. I likhet med vindkraft begränsas inte den tekniska potentialen för solel av solinstrålning utan av lokalisering och påverkan på elsystemet.

Potentialen för solel på existerande tak i Sverige har i flera rapporter uppskattats till 40-50 TWh (Blomqvist & Unger, 2018) (Energimyndigheten, 2018b).

Solel har flera fördelar jämfört med andra energislag vad gäller lokalisering. Genom att den kan placeras där elen används, som bostäder och industrier, minskar överföringsförluster och behov av att bygga ut transmissions- och distributionskapacitet samt vägar och annan infrastruktur. Det gör inte minst att lokaliseringskonflikter undviks.

Tillförseln av solel har bra överensstämmelse med elanvändningen på dygnsbasis, eftersom den är hög på dagtid, men sämre på årsbasis, eftersom den är låg på vintern. Detta är i motsats till vindkraften och på så sätt kan solel och vindkraft komplettera varandra (Energimyndigheten, 2016a). På grund av den begränsade elproduktionen under vintertid lyfts ofta risker för effektbrist vid kraftigt utbyggd solel. Denna farhåga har dock visats vara onödigt stor. I en simulering av hur olika mängder solel påverkar risken för effektbrist framkommer att risken är ungefär lika stor vid 1 TWh solel som 25 TWh solel, vilket beror på Sveriges goda tillgång på vattenkraft samt samman-

kopplingen med andra länders elnät (Energimyndigheten, 2016b). Risken med en kraftig utbyggnad av solel är dock att nollpriser eller negativa priser uppstår på sommaren, vilket sker när produktionen överstiger användningen inklusive exportmöjligheten. När elsystemet har simulerats med 25 TWh solelproduktion uppstår ett stort antal timmar med nollpriser, framför allt i södra Sverige (Energimyndigheten, 2019c). Simuleringen har dock gjorts med nuvarande mönster för elanvändning och tar inte hänsyn till ny teknik som elbilsladdning, värmepumpar i fjärrvärmesystemet, vätgasproduktion eller efterfrågefleksibilitet.

Solel orsakar inga utsläpp av koldioxid under driftskedet, men ger upphov till miljöskador under tillverkningen. Kiselbaserade solceller, som är vanligast förekommande, består av en dopad halvledarkristall med kisel som bas. De produceras av mycket ren kisel som framställs från kiseldioxid i en energikrävande process. Även andra sällsynta material som koppar, silver och de dopningsmaterial som används i solcellerna framställs i energiintensiva processer. För koppar och silver krävs malmbrytning och metallproduktion som kan ge upphov till utsläpp av näringsämnen och tungmetaller i form av lakvatten från slagghögar (Energimyndigheten, 2016a). Det vanligaste alternativet till kiselbaserade solceller är tunnfilmssolceller, där en halvledare appliceras som en tunn film på glas, plast eller stål. Exempel på tunnfilmssolceller är CIGS (copper indium gallium selenide) och CdTe (cadmium tellur). Dessa metaller och halvmetaller är ovanliga och vissa är potentiellt toxiska (Energimyndigheten, 2016a). Produktion av tunnfilmssolceller är dock mindre energikrävande än kiselbaserade solceller. Om solceller monteras på existerande byggnader, till exempel hustak, uppkommer ingen ytterligare miljöskada på grund av lokaliseringen.

För att minimera solcellers miljöpåverkan är det avgörande att hanteringen av uttjänta solceller fungerar och att avfallet återvinns. Eftersom solceller innehåller många farliga ämnen finns det stora risker med dålig avfallshantering (Energimyndigheten, 2016a). I ett framtida energisystem med betydligt fler solceller globalt ökar behovet av cirkularitet. På grund av de sällsynta material som används finns det stora vinster både ekonomiskt och miljömässigt av att återvinna och återanvända material från solceller som är energikrävande att producera. För att undvika att solceller blir till avfall krävs metodutveckling för att återanvända och reparera solceller, till exempel utbildning av installatörer och utveckling av utbytbara komponenter (Energimyndigheten, 2016a).

Naturskyddsföreningen anser att solen bör spela en allt större roll i det framtida elsystemet och bidraget till 2040 uppskattas till 15 TWh. Potentialen är långt större än så och med större förändringar i elanvändningen skulle en högre siffra vara relevant. Allt eftersom solcellstekniken utvecklas och solceller kan sättas på fasader och i glas blir utmaningen med nollpriser mindre och ett större bidrag skulle möjliggöras.

Biobränslebaserade kraftvärmeverk

I ett kraftvärmeverk produceras el och värme samtidigt. Eftersom värmen tas tillvara blir verkningsgraden hög, jämfört med vid endast elproduktion. Framtidens kraftvärmeverk måste vara helt förnybara och drivas med hållbara biobränslen. Kraftvärmeverk kan vara ett bra komplement till variabel produktion i ett helt förnybart elsystem, eftersom de har möjlighet att producera el och värme under de kallaste effekttopparna. Eftersom både el och värme kan genereras genom andra processer, med mindre klimatpåverkan och utan att belasta de begränsade hållbara bioresurserna, kan dock kraftvärmekomma att minska i framtiden.

Avfall utgör i dag en förhållandevis stor del av bränslet i kraftvärmeverken. Avfallet består av osorterat hushållsavfall, sorterade restfraktioner, plast från förpackningsinsamlingen, träavfall och importerade sopor, ofta i kombination med biobränslen. Det fossila kolinnehållet i det eldade avfallet beräknades år 2018 till cirka en tiondel av avfallets vikt (Statens offentliga utredningar, 2017). I ett förnybart energisystem är den fossila delen av avfallet noll, vilket förutsätter mer återvinning och hantering av den insamlade plasten men också en kraftigt minskad plastanvändning och ökad cirkularitet i samhället.

Hur mycket kraftvärmeverk kan och bör bidra till den framtida el- och värmeproduktionen beror på avvägningar mellan andra användningsområden för den hållbara bioenergin och möjligheter att generera el och värme från andra källor. Tack vare de alternativ som finns för såväl el som värmeproduktion minimeras kraftvärmeanvändningen i den här rapporten. Kraftvärmens används huvudsakligen för att komplettera övrig värmeproduktion som presenteras i nästa kapitel.

Potentialen för hållbar kraftvärmeproduktion till 2040 antas vara 3 TWh el och 9 TWh värme, med en biobränsleanvändning på 13,3 TWh. Med en installerad effekt på 1 000 MW el skulle kraftvärmeverken användas 3000 timmar per år, jämfört med 3 300 för dagens kraftvärmeverk (Energimyndigheten, 2019a). Kraftvärmeverken antas ha en tillgänglighet på 90 procent och skulle kunna bidra med 900 MW till effekttoppen.

Lagring i fjärrvärmesystemet

Synergierna mellan el- och värmeproduktion skulle kunna bli ännu större i framtiden än vad de är i dag. Genom att använda överskottsproduktionen från framför allt sol- och vindkraft, tillsammans med storskaliga värmelager, kan

resursanvändningen effektiviseras kraftigt. Utöver kraftvärmeproduktion kan värmepumpar av olika storlekar användas tillsammans med förnybar el, solvärme och storskaliga värmelager för att leverera hållbar värme året runt.

En möjlighet är att använda säsongslagrad solvärme i fjärrvärmenätet. På så sätt kan existerande infrastruktur användas samtidigt som de begränsade biobränsleresurserna används där de behövs mest. Sverige har varit ett föregångsland när det gäller solvärme i fjärrvärmesystemet och på 1990-talet byggdes anläggningar som var större än vad som byggts i något annat land (Värmemarknad Sverige, 2014). För att solvärmens ska kunna användas i fjärrvärmesystemet behöver lagret vara stort, eftersom stora lager har mindre procentuella värmeförluster än mindre.

Säsongslagring av värme är därför främst aktuellt i stor skala, istället för i enskilda fastigheter. Utan säsongslagring kan solvärme stå för 10 till 30 procent av fjärrvärmens, men med säsongslagring kan den nå 100 procent (Nielsen & Sorensen, 2017). Danmark har tack vare en storsatsning på solvärme gjort att den redan i dag är utbredd i det danska fjärrvärmesystemet, med en installerad effekt på 947 MW solvärme (Solar district heating, 2019).

Potentialen för solvärme kan delvis uppskattas från hur stor andel av fjärrvärmen som används under sommarhalvåret. Som ett exempel användes 32 procent av den årliga värmeproduktionen under april till september 2013 i Uppsala (Uppsala kommun, 2015). Med säsongslagring kan en betydligt större andel än så vara möjlig. För att undvika ett för ambitiöst antagande antas solvärme kunna bidra med 20 procent av den svenska fjärrvärmens 2040. Med ett uppskattat behov på 39 TWh fjärrvärme skulle 8 TWh utgöras av solvärme.

Utöver solvärme skulle storskaliga värmelager kunna kombineras med industriella värmepumpar som samlar energin från berggrund, luft eller sjöar. Värmepumpar står i dag för 4,3 TWh av den svenska fjärrvärmens (Energimyndigheten, 2019a).

Genom att använda överskottsel i systemet, när tillgången är hög och efterfrågan är låg, beräknas värmepumpar kunna öka till 9 TWh 2040. Det innebär en elanvändning på 3 TWh, eftersom resterande värmetas från omgivningen.

Ett resurseffektivt tillskott i fjärrvärmesystemen är spillvärme, som kan definieras som "värme som har blivit över sedan en industriell process har blivit (termodynamiskt) optimerad" (Energimyndigheten, 2008). Spillvärmens kan komma från exempelvis industriella processer, datahallar och reningsverk. Även spillvärme från vätgasproduktion skulle kunna användas i ett framtida fjärrvärmesystem (IVA, 2019). Som ett exempel står spillvärme från en datahall i den finska kommunen Mäntsälä redan i dag för 80 procent av kommunens fjärrvärme (Smart Energy Transition, 2018). Potentialen i Sverige har skattats så högt som till 21 TWh (IVA, 2019). I den här rapporten antas en ökning av 5 TWh elanvändning från datahallar till 2040 och av den energimängden kan en del återvinnas som energi genom spillvärme. Även vätgasproduktionen kommer öka kraftigt i systemet. Naturskyddsföreningen uppskattar den totala potentialen för industriell spillvärme i fjärrvärmens till 13 TWh 2040, jämfört med dagens 5 TWh. För att potentialen ska kunna realiseras kan krav behöva ställas på att datahallar och andra industrier lokaliseras i anslutning till existerande fjärrvärmesystem.

En viktig effektiviseringsåtgärd är att sänka temperaturen i fjärrvärmenätet. Lågtempererad fjärrvärme är mer energieffektiv än vanlig fjärrvärme och underlättar upptaget av spillvärme som inte

håller tillräckligt hög temperatur. Bland annat genom att sänka temperaturen i fjärrvärmesystemet antas förlusterna kunna sänkas från dagens 13 procent till 10 procent (Energimyndigheten, 2019a).

Sammanfattningsvis antas 8 TWh solvärme, 9 TWh från värmepumpar (som använder 3 TWh el) och 13 TWh spillvärme bidra till fjärrvärmesystemet 2040. Genom att utnyttja dessa resurser kan fjärrvärmesystemet bli helt förnybart och med en begränsad användning av biobränslen. En lägre andel bioenergi i fjärrvärmesystemet minskar dessutom omvandlingsförlusterna.

2.4 Flexibilitetsresurser

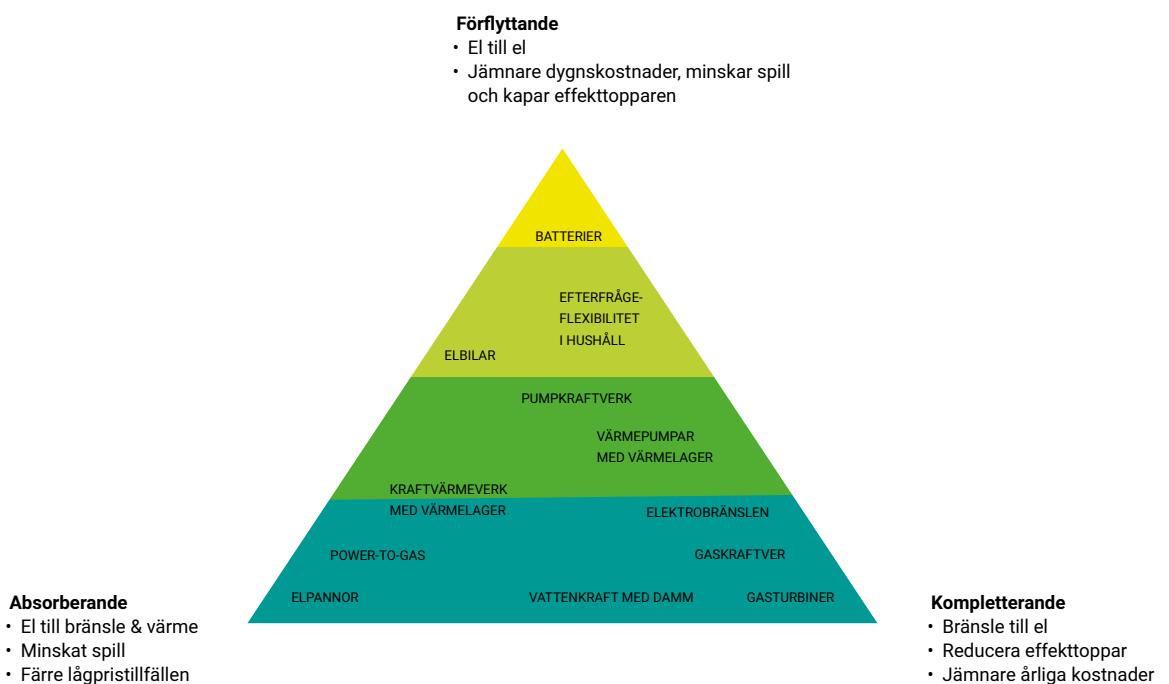
I ett helt förnybart elsystem med en stor andel variabel elproduktion ökar behovet av flexibilitetsresurser. Det traditionella elsystemet har byggts upp med ett överskott av styrbar produktionskapacitet, vilket gör att produktionen helt har kunnat styras efter efterfrågan. I framtiden, med en större andel variabel elproduktion, behövs nya flexibilitetsresurser för att hantera variationerna i både produk-

tion och användning av el. Som komplement till flexibiliteten från vattenkraft, kraftvärme och övrig fjärrvärme läggs fokus här på nya flexibilitetsresurser som kan behövas i framtidens elsystem.

Flexibilitetsresurserna kan bidra med olika sorters variationshantering, där olika tekniker används för att förflytta, absorbera eller komplettera elanvändningen. Några exempel på sådana tekniker visas i Figur 8.

Efterfrågefleksibilitet

Mer flexibel elanvändning är nyckeln i omställningen till ett helt förnybart elsystem. I framtidens elsystem, med en hög grad variabel elproduktion, kommer användningen behöva anpassas efter produktionen. Detta kallas efterfrågefleksibilitet och kan definieras som en frivillig ändring av efterfrågad elektricitet från elnätet under kortare eller längre period, till följd av någon typ av incitament (Energimarknadsinspektionen, 2016). Efterfrågefleksibilitet kan delas in i elanvändning som flyttas från hög- till lågpristid, minskad elan-



Figur 8. Exempel på variationshantering i ett helt förnybart elsystem (IVA, 2019).

Nuvarande potential för efterfrågeflexibilitet för olika kunder i Sverige, MW

Hushåll	Fastigheter och service	Elintensiv industri	Övrig industri
5 500 – vinter	200 (ventilation fastigheter)	1 700 (effektreduktion eller övergång till egen elproduktion, framför allt i skogsindustrin)	300 (effektreduktion inom lätt industri, t ex livsmedels- och verkstadsindustri)
3 000 – vår			
1 500 – sommar	300 (reservaggregat)		
4 500 höst (uppvärmning)			
300 (hushållsel)			

Tabell 1. Nuvarande potential för efterfrågeflexibilitet för svenska kundgrupper. Utformad med data från Energimarknadsinspektionen, 2016

vändning vid höga priser eller ökad elanvändning vid låga priser.

De olika typerna av efterfrågeflexibilitet lämpar sig för olika sorters elanvändning. En flyttad elanvändning är den vanligaste formen och tillämpas enkelt där energi används oregelbundet, som vid laddning av elfordon, eller som har en termisk tröghet och lång stilleståndstid, som värmepumpar (IVA, 2019). En minskad elanvändning utan återvändande last är mer lämplig för energiintensiv industri som kan minska produktionen under en kort period med väldigt höga elpriser. En ökad elanvändning utan motsvarande minskning skulle kunna vara en kund som har tillgång till olika energislag för uppvärmning.

Elektrifiering av transport- och industri-sektorn ökar potentialen för efterfrågeflexibilitet, men som Tabell 1 visar är den väsentlig redan i dag. Den högsta potentialen finns hos småhus med eluppvärmning, vilket gör att den varierar med säsong (Energimarknadsinspektionen, 2016). När effektbehovet är som högst för hela elsystemet är potentialen som högst för efterfrågeflexibilitet. Potentialen för efterfrågeflexibilitet bara hos hushållen under vintertid motsvarar drygt 20 procent av det maximala effektbehovet för hela Sverige¹. Om efterfrågeflexibiliteten

skulle nyttjas fullt ut skulle det maximala effektbehovet kunna minska avsevärt.

En förutsättning för att efterfrågeflexibilitet ska tillämpas brett är att det kan ske utan komfort- eller produktionsminskning för kunden. Det kräver automatisering och korrekta prissignaler. För en korrekt styrning behövs prissignaler från både elhandeln och elnätet. Genom att använda elproduktion och elnät på ett effektivt sätt kan de totala kostnaderna minska, både för samhället och enskilda kunder. Exempel på efterfrågeflexibilitet utan komfortminskning är elbilsladdning som sker när elpriset är som lägst, med villkoret att batteriet är tillräckligt laddat en förutbestämd tid, och värmepumpar som stängs av under perioder när elpriset är högt för att sedan startas innan inomhustemperaturen hinner påverkas.

En studie från Storbritannien har undersökt kostnaderna för att ställa om till ett fossilfritt elsystem med olika nivåer av efterfrågeflexibilitet. I studien undersöks fyra typer av efterfrågeflexibilitet: smart elbilsladdning, vehicle-to-grid (inmatning av el till nätet från elbilsbatterier), smart uppvärmning, samt 5 kW-batterier på hushållsnivå. Studien visar att kostnaderna för hela systemet blir sju miljarder pund lägre om den potentiella efterfrågeflexibiliteten nyttjas fullt (OVO Energy; Imperial College London, 2018).

¹ Vintern 2018/2019 var den svenska elanvändningen som högst 25 200 MWh/h (Svenska kraftnät, 2019a).

Efterfrågefleksibilitet framhävs som en avgörande komponent i ett helt förnybart elsystem i flera analyser. Svenska kraftnät lyfter det som en nödvändig lösning för att trygga svensk elförsörjning i sin årliga utvärdering av den svenska kraftbalansen (Svenska kraftnät, 2019a). Även i analyser av vattenkraftens framtida reglerbidrag lyfts efterfrågefleksibilitet som det mest troliga bidraget till att lösa det framtida reglerbehovet (Energimyndigheten, Svenska kraftnät & Havs- och vattenmyndigheten, 2016). När uppvärmningsbranschen beskriver hur de ska nå fossilfrihet till 2040 framhäver de sitt bidrag till efterfrågefleksibilitet genom styrning av uppvärmningen (Fossilfritt Sverige, 2018a).

Potentialen för efterfrågefleksibilitet bedöms vara ungefär 25 procent av effekttoppen, i linje med uppskattningarna från Energimarknadsinspektionen (Energimarknadsinspektionen, 2016). I praktiken bör den kunna vara ännu högre i framtiden med en ökad elektrifiering av industri- och transportsektorn. Mer om hur dessa sektorer kan bidra med efterfrågefleksibilitet finns i senare kapitel.

Batteri- och vätgaslagring

Utöver efterfrågefleksibilitet finns flera andra flexibilitetsresurser som kommer öka i framtiden. De höga potentialerna som redovisas här kommer sannolikt inte realiseras allihop, men visar på möjligheten till variationshantering genom olika lösningar.

Det finns en stor potential för batterier att bidra med flexibilitet på olika nivåer i elsystemet. Genom att installera 10 kWh- respektive 3 kWh-batterier i villor respektive lägenheter skulle det maximala effektuttaget kunna sänkas med 40 till 60 procent (Power Circle, 2016). Batterierna skulle kunna leverera över 30 000 MW under sex timmar, vilket väl överskrider det maximala effektuttaget i dag (IVA, 2019).

En annan möjlig flexibilitetsresurs är elbilsbatterier som används för att mata in el i elnätet vid höga elpriser. Den tillgängliga batterikapaciteten kan uppgå till mellan 14 000 MW och 83 000 MW för 3,8 miljoner elbilar (Statens offentliga utredningar, 2018). Omräknat till antalet elbilar som antas vara i drift 2040 i rapporten är potentialen 9 000 MW till 52 000 MW. Elbilsbatterier har potential att balansera nätet på såväl timbasis som över flera dygn (IVA, 2019). Dagens bilar står parkerade mer än 95 procent av tiden, vilket gör att batterierna skulle kunna bidra till elsystemet utan att körningen påverkas. Elbilars övriga möjligheter att bidra till balansering av effekttoppar diskuteras i kapitel 5 Transport.

Vätgas är en annan möjlighet till energilagring. Överskottsel kan användas för att producera vätgas genom elektrolys, som sedan kan användas som drivmedel i bränslecellsfordon eller för att ersätta kolbaserade processer inom industrin. Vätgas kan också användas för att producera el i bristsituationer. Detta har en låg verkningsgrad, runt 50 procent, men om alternativet är att el spills vid vissa tillfällen och effekttoppar inte kan mötas kan det vara effektivt (IVA, 2019). Redan i dag finns en potential för 3 300 MW vätgaslagring i existerande gaslager i Sverige, men potentialen kommer öka kraftigt när vätgas blir en del av fler industriella processer (IVA, 2019).

Nätutbyggnad och sammankoppling

Sammankopplingen av det svenska elsystemet både inom landet och med övriga Norden och Europa kan ses som en kraftfull flexibilitetsresurs. Sverige är en nettoexportör av el och exporterar runt 20 TWh el mer än vad som importeras per år (Energimyndigheten, 2019a). Det ger en flexibilitet i det svenska systemet och bidrar också med en stor klimatnytta. Export av svensk el ersätter ofta icke-förnybar elproduktion i Europa, eftersom

den förnybara elen är billigare än den fossila. Hur stor klimatnyttan är beror på överföringskapacitet och elmix. Om svensk elexport ersätter kolkraft i kraftvärmeverk, kolkraft i kondenskraftverk och fossilgas i kraftvärmeverk i lika stor utsträckning skulle en exporterad TWh minska utsläppen utanför Sverige med 760 000 ton koldioxid². Även elen som exporteras har dock viss klimatpåverkan och om det är vindkraft, som släpper ut 15 g CO₂/kWh, blir nettominskningen 745 000 ton koldioxid per TWh export. Nettoexporten på 20 TWh motsvarar då en årlig klimatnytta på knappt 15 miljoner ton, jämfört med Sveriges årliga territoriella utsläpp på 53 miljoner ton koldioxid 2017.

Inom Norden finns en gemensam elmarknad och elen flödar fritt mellan länderna på samma sätt som inom länderna. Dessutom finns det gränsöverskridande elkablar från Sverige till Tyskland (615 MW), Polen (600 MW) och Litauen (700 MW). Det är framför allt dessa kablar som möjliggör ovanstående klimatnytta. Trots att det svenska elsystemet har en fysiskt god sammankoppling med det europeiska är det inte alltid möjligt att exportera eller importera. Kapaciteten på ledningarna till Tyskland har under flera års tid begränsats för att hantera tyska överföringsbegränsningar, vilket hindrar svensk el från att exporteras (Energimarknadsinspektionen, 2017). I ett framtida energisystem med en ökad andel variabel produktion, både i Sverige och resterande Europa, ökar behovet av gränsöverskridande, tillgänglig kapacitet.

Den gränsöverskridande handeln bidrar med en flexibilitet på runt 10 000 MW i det svenska elsystemet. För att inte begränsa klimatnyttan från den svenska

elexporten anser Naturskyddsföreningen att nettoexporten ska bibehållas eller ökas i framtiden.

I dag finns stora flaskhalsar på det svenska elnätet, vilket förhindrar såväl utbyggd vindkraft som nyanslutning till elnätet i storstadsregionerna. För att omställningen till ett förnybart energisystem ska vara möjlig krävs stora investeringar i elnätet. En del av kapacitetsbristen kan sannolikt lösas med till exempel efterfrågefleksibilitet, men en utbyggd infrastruktur är nödvändig. Begränsningarna i elnätet bör beaktas när nya produktionsanläggningar byggs och när kärnkraften läggs ner bör ny vindkraft lokaliseras i närliggande regioner, istället för bara i norra Sverige vilket skulle ställa högre krav på transmissionskapacitet. Vindkraft till havs såväl som på land bedöms därmed i viss mån kunna motverka kapacitetsbristen på stamnätet.

Marknad och styrsignaler

Genom att ändra hur elmarknaden är utformad kan de nya flexibilitetsresurserna användas på ett effektivt sätt. Precis som det fysiska elsystemet är dagens elmarknad utformad för konventionell elproduktion med stora centraliserade produktionsanläggningar som anpassar produktionen efter användningen.

En förutsättning i det förnybara systemet är att flexibilitet lönar sig. I dag betalar kunden ofta lika mycket för elen oavsett när den används, vilket motverkar en effektiv styrning av elanvändningen. Om både elpriset och nättariffen reflekterade den reella elproduktionskostnaden och begränsningarna i elnätet skulle kunden kunna styra användningen, antingen själv eller genom ett energitjänsteföretag. Eftersom elpriset sätts efter det dyraste produktionsslaget som aktiveras varje timme skulle korrekta priser både sänka kostnader och minska miljöpåverkan. I ett framtida elsystem med en större andel variabel elproduktion förväntas el-

² Beräkningen baseras på att kolkraft i kondenskraftverk släpper ut 1000 g CO₂/kWh, kolkraft i kraftvärmeanläggningar släpper ut 781 g CO₂/kWh och fossilgas i kraftvärmeverk släpper ut 503 g CO₂/kWh (Nätverket Vindkraftens klimatnytta, 2019).

priserna bli mer rörliga (Energimyndigheten, 2019c), vilket ökar möjligheterna för efterfrågefleksibilitet. Även elnätstariffen skulle kunna ge bättre prissignaler genom att till exempel variera i tid.

För att efterfrågefleksibilitet ska få brett genomslag kommer det sannolikt behövas aktörer som styr användningen åt kunderna, så kallade aggregatorer eller energitjänsteföretag. En aggregator är en marknadsaktör som kombinerar flera kunders elanvändning eller elproduktion för försäljning, köp eller auktionering på elmarknaden (Energimarknadsinspektionen, 2016). För att aggregatorn ska kunna erbjuda sina tjänster krävs affärsmöjligheter, antingen genom pris skillnader för elhandel och elnät eller genom möjlighet att sälja den aggregerade elanvändningen till elnätsföretag eller på marknaden.

För att underlätta för både flexibel användning och produktion behöver tidsupplösningen på marknaden förkortas. Handel sker huvudsakligen per timme i dag, vilket kan skapa utmaningar både för efterfrågefleksibilitet som bara kan begränsa användningen under en kortare period och för variabel elproduktion som kan ge mer exakta prognoser för kortare tidsperioder. Att gå över till kvartsupplösning gör också att skarvarna mellan tidsperioderna blir mindre vilket begränsar de obalanser som uppstår.

För att elsystemet ska kunna drivas leveranssäkert krävs stödtjänster. Det kan handla om reaktiv effekt som används för att behålla rätt spänning i elnätet och reglertjänster som snabbt hjälper till att balansera hela elsystemet. Dessa stödtjänster utgör en liten volym av all el som i dag säljs, men eftersom de är värdefulla för systemet har de en egen prissättning. Marknaderna för stödtjänster är uppbyggda för vattenkraft. För att nya resurser som vindkraft, efterfrågefleksibilitet

och batterier ska kunna hjälpa till att stabilisera elnätet behöver marknaderna för stödtjänsterna anpassas.

Svängmassa

En av de stödtjänster som krävs för ett leveranssäkert elsystem är svängmassa. I ett konventionellt elsystem finns många sammankopplade synkrona anläggningar som kan bidra med tröghet, så kallad svängmassa, för att balansera systemet. Svängmassa kan beskrivas som "mekanisk tröghet i kraftsystemets roterande delar" (IVA, 2016). Genom att snabbt kunna leverera eller ta emot energi bidrar svängmassan med att upprätthålla balansen i elsystemet. Svängmassan kan komma från turbiner eller generatorer i vatten- eller kärnkraftverk. Trögheten gör att de roterande delarna fortsätter snurra även om kraftverket faller ifrån, vilket dämpar frekvensvariationerna i nätet. Frekvensen i elsystemet representerar den momentana balansen mellan elanvändning och elproduktion. När dessa är i balans är frekvensen precis 50 Hz och tack vare svängmassan kan balansen återställas snabbt vid avvikelser.

Genom den stora mängden vattenkraft i Sverige skulle även ett helt förnybart elsystem ha tillgång till svängmassa. Till skillnad från vind- och solkraft bidrar vattenkraft till tröghet i systemet, vilket är en del av Sveriges unikt goda förutsättningar att ställa om till ett helt förnybart elsystem. Utöver vattenkraften kan även kraftvärmeverk bidra med svängmassa.

I framtiden kan även syntetisk svängmassa från till exempel vindkraft användas. Genom att tillfälligt öka motståndet hos generatoren i ett vindkraftverk kan en högre effekt matas ut i nätet. Den här tekniken tillämpas bland annat i Quebec i Kanada, där transmissionsnätsföretaget kräver att alla vindkraftsproducenter bidrar med svängmassa (Energiforsk, 2015). I Sverige genomför Svenska kraftnät ett

pilotprojekt om hur vindkraft kan bidra med syntetisk svängmassa för att balansera elsystemet.

Även batterier kan bidra med syntetisk svängmassa. Genom frekvensomriktare kan de snabbt leverera och ta emot energi beroende på behov och därmed bidra med den efterfrågade bufferten i elsystemet (IVA, 2016). Eftersom batterier inte är synkrona bidrar de inte omedelbart, men när de aktiveras kan de öka sin produktion snabbare än synkrona anläggningar (Everoze, 2017). Tekniken har bland annat studerats av transmissionsnätoperatörerna på Irland, som visade att 360 MW batterier skulle kunna ersätta 3 000 MW synkrona fossilgaskraftverk och säkerställa balans i elsystemet (Everoze, 2017).

Den minskade trögheten i det framtida elsystemet kan också hanteras genom att utnyttja likströmsförbindelser till andra synkrona områden för att dela på trögheten. Detta sker redan i dag på befintliga likströmsledningarna, men kan utökas i framtiden (IVA, 2016).

Reservkraft

För att klara förbrukningstoppar under kalla vintrar upphandlar Svenska kraft-

nät reservkraft. Det är en strategisk reserv som skapas genom att Svenska kraftnät avtalar med antingen elproducenter om att ställa ytterligare produktionskapacitet till förfogande eller med elanvändare om att minska sin elanvändning. Av den installerade produktionskapaciteten i Sverige finns i dag reservkraft i form av 1 577 MW gasturbiner och 913 MW kondenskraft (Energimyndigheten, 2019a). Den strategiska reserven kan i framtiden i större utsträckning bestå av neddragen elanvändning, men gasturbinerna kan ställas om till biogas och kvarstå som reservkraft även 2040.

2.5 Samlad potential i framtidens el- och värmeproduktion

El- och värmeproduktionen måste förändras i grunden till 2040. Genom omställningen som beskrivits i föregående delar presenteras här ett helt nytt energisystem, där elen i högre utsträckning produceras efter väder och flera nya flexibilitetsresurser tillkommer. Kärnkraften har avvecklats helt och sol- och vindkraft har ökat kraftigt. Vattenkraft är kvar på dagens nivå och kraftvärmens har minskat. Totalt produceras 176 TWh el per år, jämfört med 161 TWh 2017. Av elproduktionen kommer 68 TWh från vattenkraft, 90 TWh

Produktionsslag	Installerad kapacitet, MW	Årsproduktion, TWh	Effekt ansträngd vintertimme, MW	Effekt ansträngd sommartimme, MW
Vattenkraft	16 300	68	13 500	1 800
Vindkraft	26 000	90	4160	13 000
Solel	16 500	15	0	13 200
Kraftvärme	1 000	3	900	0

Tabell 2. Installerad effekt, årsproduktion samt effekt för en eventuell bristsituation på vintern och en eventuell överskottssituation på sommaren. Vindkraften bedöms ha en tillgänglighet på som sämst 16 procent på vintern och för den varma sommardagen sätts den till 50 procent för att göra systemet så påfrestat som möjligt. Den lägsta nivån för vattenkraftsproduktion är 1 800 MW på grund av gällande vattendomar (IVA, 2019). Solelen bedöms inte bidra till effekttoppen på vintern och som mest med 80 procent till effekttoppen på sommaren. Tillgängligheten för kraftvärmens antas vara 90 procent.

från vindkraft, 15 TWh från solel och 3 TWh från kraftvärme.

För att förstå hur framtidens el- och värmeproduktion kommer se ut räcker det inte att titta på årsproduktion, utan också installerad kapacitet och tillgänglig effekt under årets mest ansträngda situationer. Det allra mest ansträngda tillfället är en kall, vindstilla vinterdag när elanvändningen är hög och elproduktionen låg. Med en kraftigt utbyggd solelsproduktion kan nya utmaningar uppstå även på sommaren, när elproduktionen är hög och elanvändningen låg. Hur elsystemet går ihop under dessa tillfällen studeras i detalj i kapitel 7 Framtidens energisystem, men installerad kapacitet, årsproduktion, tillgänglig effekt en ansträngd vintertimme och levererad effekt en ansträngd sommartimme presenteras i Tabell 2. De mest begränsade timmarna under sommar och vinter beskrivs för att visa hur elsystemet kan hantera det högsta effektuttaget under vintern samt en solig dag med hög produktion och låg användning på sommaren. Redan utan att jämföra med elanvändning under respektive timme är det tydligt att tabellen ovan presenterar utmaningar. Till exempel är

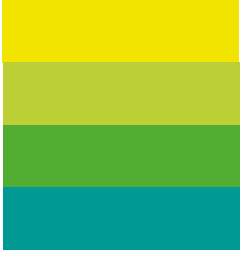
den tillgängliga effekten den ansträngda vintertimmen, när elanvändningen är hög, betydligt lägre än den levererade effekten den varma sommardagen, när elanvändningen är låg.

För att systemet ska gå ihop behövs därför flexibilitetsresurser. Utöver elproduktion kommer systemet 2040 ha tillgång till flera flexibilitetsresurser, som kan bidra med effekt när det finns ett underskott och absorbera effekt när det finns ett överskott. Vissa av dessa, som export och import samt efterfrågefleksibilitet, är tillgängliga redan i dag. Potentialerna för de flexibla resurserna finns i Tabell 3.

Trots kraftigt minskad tillgänglig effekt under de kallaste vintertimmarna och kraftigt ökad under de soligaste sommardagarna visar ovanstående tabell att potentialen för flexibilitet vida överskrider behovet. Potentialerna i tabellen kommer inte alla realiseras, men de visar på den sammantaget stora potentialen att undvika överskotts- eller bristsituationer i det helt förnybara elsystemet. Hur efterfrågan möter produktion studeras i detalj i det sammanfattande kapitlet i slutet av rapporten.

Flexibilitetsresurs	Potential, MW
Efterfrågefleksibilitet	2 500 – 5 400
Batterier i hushåll	30 000
Elbilsbatterier (V2G)	9 000 – 52 000
Vätgasproduktion	3 300
Import/export	10 000

Tabell 3. Uppskattade potentialer för flexibilitetsresurser. Potentialen för efterfrågefleksibilitet uppskattas till 25 procent av effekttoppen och varierar under året. Potentialen för vehicle to grid (V2G), tvåvägladdning av elbilar, är uträknad med rapportens antagande om 2,4 miljoner elbilar i drift till 2040. Potentialen för vätgaslagring är beräknad utifrån befintligt gaslager i Sverige (IVA, 2019). Gaslagren kommer öka kraftigt i volym i framtiden, inte minst på grund av industrins vätgasplaner.



Biobränslen

3

Biobränslen spelar en avgörande roll i ett förnybart energisystem, men är inte alltid den enkla lösning som de ibland porträtteras som i debatten. Vissa hävdar att biobränslen kan ersätta samtliga fossila bränslen och att inga beteendeförändringar krävs – privatbilismen kan öka, flyget kan öka och industrin kan använda biobränslen i alla sina processer. Det här kapitlet visar att det tyvärr inte alltid stämmer. Inte alla biobränslen kan räknas som hållbara, det är konkurrens om de begränsade resurserna och även hållbara biobränslen kan orsaka klimatpåverkan på kort sikt.

I det här kapitlet presenteras den svenska bioenergianvändningen idag, utmaningar med hållbarhet och klimatpåverkan från biobränslen och uppskattningar av hur svenska, hållbara biobränslen kan möta behovet av biobränslen som uppskattas i de olika sektorerna till 2040.

3.1 Den svenska bioenergin i dag

Sveriges klimatpolitik har, genom införandet av koldioxidskatten och styrmedel för bränslebyte på transportområdet, med framgång ersatt fossila bränslen med biobränslen inom flera områden. Sedan 1983 har den producerade bioener-

gin ökat mer än trefaldigt. Framför allt har biobränslen i dag en viktig betydelse i skogsindustri, uppvärmning, kraftvärme och transporter.

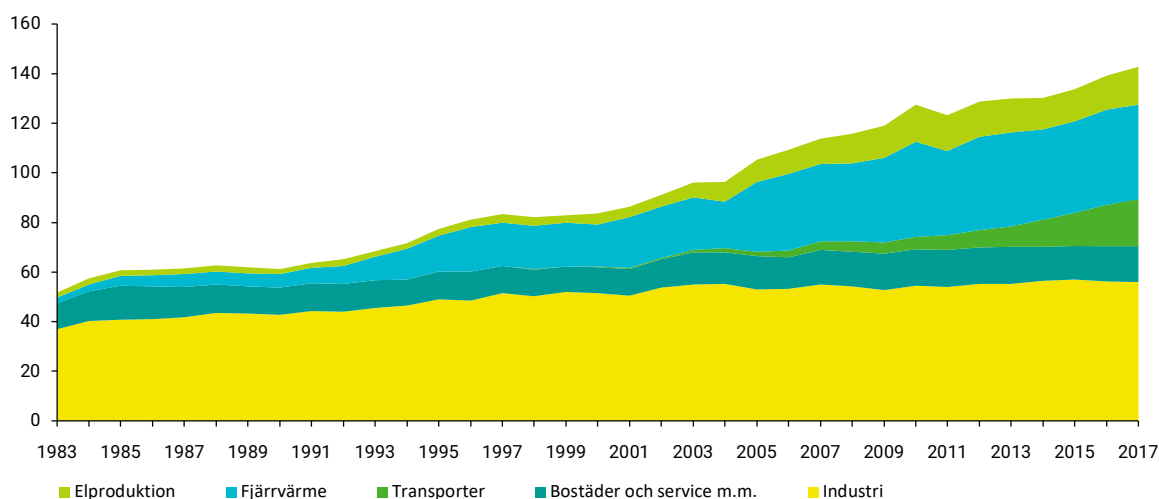
Bioenergin är väldigt diversifierad och innefattar alla energislag där förbränning av biomassa sker. Biodrivmedel kan ersätta fossila drivmedel i transportsektorns befintliga färdmedel med ingen eller relativt liten modifikation.

Biobränsleanvändningen går att anpassa efter väderlek och energibehov och biobränslen går att lagra för liten kostnad, vilket gör dem till en viktig tillgång i ett förnybart energisystem.

3.2 Är biobränslen alltid hållbara?

IPCC uppmärksammar i en rapport från 2019 att hållbar biomassa är en viktig men väldigt knapp resurs som delvis tävlar om markanvändning med naturskog, matproduktion, våtmarker och andra ekosystem. Rest- och avfallsbaserade biobränslen finns, men på global nivå är tillgängligheten och skalbarheten begränsade jämfört med behovet. För att undvika en situation där användning av biomassa för energiändamål minskar möjligheten att nå de globala hållbarhetsmålen menar IPCC att hänsyn behöver tas till potentiella mål-

Användning av biobränsle per sektor fr.o.m. 1983, TWh



Figur 9. Användning av biobränslen per sektor, 1983-2017 (Energimyndigheten, 2019a).

konflikter. Potentialen för hållbart biobränsle överskattas enligt IPCC i många fall (IPCC, 2019).

Sverige har globalt sett väldigt goda förutsättningar för produktion av hållbara biobränslen, men även här är tillgängligheten av hållbara råvaror begränsad jämfört med vad olika branscher sammantaget anser sig behöva framöver (Sweco, 2019) (IVA, 2019). Därför bör också målkonflikter i Sverige identifieras och hanteras. I ett hållbart energisystem ska den knappa bioenergin utnyttjas på de mest effektiva sätten och inom sektorer där den behövs mest. Den här rapporten visar att biobränslen i framtiden i första hand kommer att behövas inom industri, flyg och sjöfart, även efter en kraftig effektivisering.

Biobränslen beräknas enligt IPCC:s bokföringsprinciper "ha noll utsläpp vid förbränning", då "de utsläpp som uppkommit vid produktionen rapporteras för respektive sektor". Det innebär att utsläppen rapporteras inom till exempel industrisektorn för raffinaderier och transportsektorn för råvarutransporter (Statens offentliga utredningar, 2019). Enligt IPCC bör dessutom biobränslenas utsläpp och påverkan på upptag bokföras fullt ut inom markanvändningssektorn (LULUCF, Land Use, Land Use Change and Forestry)³. Om efterfrågan på biobränslen ändrar markanvändningen bör dessutom noggrann hänsyn tas till indirekta utsläpp från förändrad markanvändning (ILUC – Indirect Land Use Change). För att uppskatta biobränslets klimatpåverkan bör påverkan på flöden av fossilt och biogent

3 "The IPCC Guidelines do not automatically consider biomass used for energy as "carbon neutral," even if the biomass is thought to be produced sustainably."... "The IPCC approach of not including these [bioenergy] emissions in the Energy Sector total should not be interpreted as a conclusion about the sustainability or carbon neutrality of bioenergy." Från IPCC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories: se: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/faq/faq.html>, sektion Q2-10.

kol utvärderas noggrant. Enligt EU-förordningen för LULUCF-bokföring ska påverkan på utsläpp och upptag av biobränslen bokföras " trovärdigt och robust" och effekterna på kolförråd och -sänka beaktas fullt ut (EUR-Lex, 2018). LULUCF-påverkan analyseras dock ibland bristfälligt. I Sverige antas ofta biobränslen härstamma endast från skogsindustrins restprodukter och rester från skogen, vilka anses sakna betydande klimatkonsekvenser på medellång eller lång sikt (Repo, o.a., 2012). Förbränning av biobränslen medför betydande klimatkonsekvenser på markanvändningsområdet som varken EU:s förnybarhetsdirektiv eller den svenska lagstiftningen beaktar i styrmedlen på energiområdet, vilket enligt forskare kan leda till suboptimering (Tufvesson, Lantz, & Börjesson, 2013).

För att kunna göra en korrekt utvärdering av biobränslenas klimatprestanda bör nettonyttan för klimatet analyseras varje råvara och produktionskedja för sig.

Uttag av avverkningsrester, skadat virke eller stubbar påverkar skogens kolförråd och måste beaktas när klimatkonsekvenser av biobränslen beräknas. När stubbar eller avverkningsrester förbränns i energisyfte, är det biomassa som i annat fall skulle ha brutits ned i skogen över lång tid.

Stubbar är ett exempel på bioenergiråvara som inte har tillräcklig klimatprestanda för att kunna anses hållbar. Över 30 procent av stubbarnas kolförråd finns kvar i skogen 100 år efter avverkning, vilket innebär att återbetalningstiden för stubbar som energiråvara är väldigt lång ur ett klimatperspektiv, då förbränning innebär att stubbarnas kolinnehåll snabbt släpps ut i atmosfären. Dessutom påverkar stubbrytning markens kolförråd negativt. Av grenar, ris och toppar är nästan 10 procent av kolinnehållet kvar efter 100 år. Detta betyder att det även i detta fall finns en återbetalningstid men

att den är betydligt kortare än för stubbar. För levande biomassa är klimatprestandan i allmänhet betydligt sämre än för avverkningsrester (Repo, o.a., 2012).

Många biobränslen kan alltså betraktas som koldioxidneutrala endast över väldigt långa tidsramar. Ett ökat uttag av biobränslen höjer koldioxidhalten innan motsvarande mängd koldioxid bundits i landskapet jämfört med en situation där levande träd eller avverkningsrester inte tagits ut för att användas som biobränslen. Den temporärt ökade halten av koldioxid efter förbränning kan öka koldioxidhalten i atmosfären under flera decennier, vilket förstärker den globala uppvärmningen och ökar trycket på till exempel arktiska områden och marina ekosystem. Biobränslen från levande träd eller avverkningsrester, som endast är koldioxidneutrala på lång sikt, kan därmed inte anses vara klimatneutrala på grund av en temporär uppvärmande effekt. Dessa biobränslen bör utvärderas utifrån vilken energi de ersätter.

3.3 Den hållbara biobränsleanvändningen

Hållbara biobränslen behövs i ett förnybart energisystem, men jämfört med andra förnybara energikällor är de sällan det bästa alternativet för klimatet. Biobränslen har bättre klimatprestanda än fossila bränslen men oftast sämre än till exempel vind- eller vattenbaserad el och därför bör de främst användas där effektiviseringsåtgärder redan utnyttjas till fullo och där elektrifiering eller andra lösningar inte är möjliga.

I denna rapport beaktas endast de biobränslesurser som ger betydande klimatnytta inom några decennier och som kan utnyttjas utan stora negativa miljöeffekter i övrigt. Även dessa används i rapporten endast i den utsträckning som behövs för att fasa ut mer ohållbara energislag. På grund av att de flesta skal-

bara biobränslen inte har lika bra klimatprestanda som övriga förnybara energislag prioriterar denna rapport användning av de senare framför de förra. Den totala användningen av bioenergi blir därmed mer begränsad än i de scenarier för bioenergis utveckling som presenterats i flera andra nyligen utkomna rapporter, som Börjesson (2016) och IVA (2019).

Rapporten utgår från att den svenska användningen av biobränslen år 2040 inte ska överskrida den inhemska produktionen. Dels för att det är rimligt att anta att även andra länder behöver sin egen bioenergiråvara för att fasa ut fossila bränslen till dess, dels för att Sverige genom vår stora tillgång till andra förnybara energikällor kan ställa om utan att ta andra länders bioenergiråvara i anspråk. Om en omställning ska vara möjlig globalt bör den vara möjlig i Sverige baserat på inhemska råvaror.

I den här delen presenteras Naturskyddsföreningens uppskattning av vilka biobränslen som kan möta behovet till år 2040, mot bakgrund av ovanstående resonemang. Som sammanställningen i Tabell 4 visar finns de hållbara biobränslena främst inom skogs- och jordbruk samt vissa biogena avfall för bioenergiändamål. För det svenska energisystemet uppskattar rapporten ett bioenergibehov på 106 TWh 2040. Eftersom en stor del av behovet är förädlad bioenergi, som biodrivmedel, uppstår omvandlingsförluster och det totala behovet av biomassa är 132 TWh. Detta är 7 procent mindre biomassa än vad som används för energisyfte i Sverige i dagsläget, men 5 procent mer än den svenska bioenergiproduktionen i dag.

Användningsområdena kommer emellertid att ändras. År 2040 kommer den allra största delen av bioenergin behövas i transportsektorn och inom industrin, till skillnad från i dag då en betydande del även används inom bostäder och ser-

vice. Bioenergin kommer i större utsträckning användas som drivmedel och i mindre utsträckning till el- och värmeproduktion. De hållbara biobränslena som uppskattas till 2040 kommer både ersätta fossila bränslen och ohållbara biobränslen som används i dag, exempelvis PFAD från palmolja i transportsektorn. Behovet av biobränslen inom transportsektorn har i rapporten uppskattats till 27 TWh och måste 2040 helt mötas av inhemska, hållbara biobränslen.

Rapporten har inte studerat den fullständiga potentialen av hållbara biobränslen i Sverige, utan hur det uppskattade behovet inom bostäder och service, transporter och industri kan mötas av hållbara, inhemska resurser. Naturskyddsföreningen uppskattar att skogsbrukets restprodukter kan bidra med 80TWh av efterfrågan 2040. Det begränsade uttaget, jämfört med andra uppskattningar, bedöms öka möjligheten att nå miljömålet Levande skogar, öka skogens kollager i linje med Parisavtalet samt ge ett betydande additionellt bidrag till klimatpolitiska ramverkets krav på negativa utsläpp och samtidigt anpassa skogslandskapet till ett föränderligt klimat (Naturskyddsföreningen, 2019).

Det finns goda möjligheter att i större utsträckning använda grenar, ris och toppar (GROT) för energislyfte. Den totala GROT-användningen uppskattas öka med över 80 procent till 20 TWh per år, vilket i rapporten bedöms vara en hållbar ekologisk och ekonomisk volym om askåterföring blir mer utbrett (de Jong, Akselsson, Egnell, Löfgren, & Olsson, 2017). Det är en relativt blygsam användning jämfört med vad som uppskattats i andra studier (till exempel Börjesson (2016)). Uttaget har uppskattats utifrån att GROT vid gallring helt lämnas i skogen för att trygga näringstillförsel samt övrig miljöhänsyn (de Jong, Akselsson, Egnell, Löfgren, & Olsson, 2017).

Naturskyddsföreningen anser inte att fossil kvävegödsling är en hållbar lösning för att återinföra näring till skogen och uttaget av GROT blir därför mindre än i uppskattningar som antar att näringsuttaget av GROT kan kompenseras med utbredd kvävegödsling. (de Jong, Akselsson, Egnell, Löfgren, & Olsson, 2017) (Black-Samuelsson S, 2017).

Stubbar används endast i liten utsträckning för energiändamål i dag, men i flera rapporter om hållbar bioenergi-potential inkluderas en betydande stubbrytning (Börjesson, 2016) (de Jong, Akselsson, Egnell, Löfgren, & Olsson, 2017). Grövre träd av olika trädslag utan förädlingsvärde men med högt ekologiskt värde används i dag delvis för energiändamål. Träd med stor diameter har liknande eller sämre klimatprestanda än stubbar. För att energiomställningen ska styra mot de mest hållbara energiresurserna bör stubbrytning och stamvedsflis baserat på träd med stor diameter, som även påverkar kolförrådet i mark och död ved, upphöra helt som storskalig energiråvara (Repo, o.a., 2012). Död ved i skogslandskapet kan dessutom stärka den biologiska mångfalden i skogen, vilket i sin tur stärker skogens resiliens.

För att minska klimatpåverkan inom andra sektorer kan materiell substitution av resurser så som betong, stål och kemikalier krävas till 2040, vilket kan öka behovet av sågvirke, limträ, ligninbaserade produkter och tallolja. Som en följd av ökad materiell substitution uppskattas tillgängligheten av biobränslen från industrin minska något. Användning av svartlut, tallolja och andra industriella avlutar för energiändamål uppskattas minska något från dagens 47 TWh till 40 TWh per år. Bark och sågspån minskar också cirka 10 procent till 20 TWh år 2040, baserat på en uppskattning av det framtida skogsbruket (Börjesson, 2016).

Det sammanlagda bidraget från biogent avfall, jordbruksrester och grödor samt övriga restprodukter för biogasproduktion uppskattas till 32 TWh. Eftersom Naturskyddsföreningen eftersträvar att öka arealen ekologiskt odlade grödor uppskattas bidraget från jordbrukets bidrag försiktigt till 15 TWh, enligt diskussion från Börjesson (2016). Biogasproduktionen bedöms kunna stärkas avsevärt genom en till fullo utnyttjad potential från rötning av stallgödsel, matsvinn och -avfall samt jordbrukets restprodukter. Detta innebär att avfallsförbränningen av biomassa minskar och biogasproduktionen ökar för att även maximera materiell återvinning och cirkulär ekonomi. Hållbara rötresten från till exempel halm, vall och stallgödsel kan

användas för att ersätta fossil gödsling i jordbruket.

Grödbaserade råvaror erbjuder i allmänhet mindre effektiva energilösningar än restprodukter, bland annat på grund av stort energibehov för produktion samt lustgasavgång från gödslade marker (Soimakallio, 2014). Intressanta processer finns där grödbaserade råvaror används i energisyfte genom synergier med andra industrier. En intressant möjlighet är bioenergi baserat på vallproduktion, vilket kan kombineras med förbättrad växtföljd. En något utökad biogasproduktion från vall i växtföljden främjar ett hållbart jordbruk och kan bidra till något större biologisk mångfald och högre kolinlagring i landskapet, i synnerhet om vallbaserad

Råvara	Produktion 2017, TWh	Produktion 2040, TWh
GROT och träddelesflis	8,5	20
Skogsindustrins avlutar (inkl. tallolja)	47,2	40
Bark, sågspån och flis från industri	23,3	20
Stubbar	0,1	0
Stamvedsflis av rundved	6,3	4
Övriga fasta biobränslen (t.ex. återvunnet trädbränsle, torrflis, import)*	4,5	4
Förädlat trädbränsle inkl. import* (pellets, briketter)	8,5	8
Brännved	9,6	4
Biogent avfall, jordbruksrester (halm, stallgödsel) och -grödor inklusive vall och övriga restprodukter (avfall, slam)	18,1	32
Nettoimport biodrivmedel	16,9	0
TOTALT	143	132

Tabell 4. Uppskattad produktion av biobränslen för att möta rapportens bioenergiebehov till 2040. Produktionen för 2017 är från Energimyndigheten, 2019a. *Import gäller endast för 2017

djurhållning i Sverige minskar något eller om vall odlas något mer än i dagsläget.

Av den totala bibränsleproduktionen finns en stor flexibilitet mellan användning i olika sektorer. Bidraget från biogas kan år 2040 med rätt styrmedel antas vara 10 till 20 TWh medan skogsbrukets restprodukter kan utnyttjas för till exempel kraftvärme eller biodrivmedel.

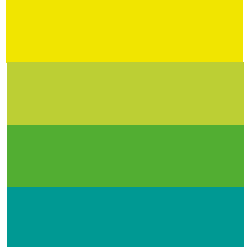
Jordbrukets restprodukter och vall kan bidra med cirka 15 TWh och bioavfallsbaserade energikällor i en cirkulär ekonomi med cirka 10 TWh, främst baserat på matsvinn, restprodukter från livsmedelsindustri och produkter från skogsindustrin som inte går att återvinna. Antagandena baseras på att lösningarna skapar effektiva synergier, där till exempel spillvärmerna av biodrivmedelsproduktion utnyttjas effektivt (Soimakallio, 2014).

Produktion av biodrivmedel från oförädlad biomassa leder till energiförluster. I nuläget importeras redan förädlade biodrivmedel till Sverige, vilket innebär att omvandlingsförlusterna sker utanför landet. Om Sverige ska vara självförsörjande på biobränslen 2040 behöver dock

omvandlingen ske här. Den totala omvandlingskostnaden för att producera biodrivmedel antas försiktigt vara 40 procent år 2040, baserat på Börjesson (2016). Det uppskattade drivmedelsbehovet på 27 TWh kommer därför kräva 45 TWh biomassa. I övrigt antas en omvandlingsförlust på 8 TWh för resterande bioenergi. Av de 132 TWh biomassa som används för energisyfte kan alltså 106 TWh användas som biobränslen, vilket är rapportens uppskattade behov till 2040.

Hållbara biobränslen är avgörande för att ersätta fossila bränslen där alternativ inte är tillgängliga. Den begränsade tillgången på hållbara, högkvalitativa biobränslen gör dock att användningen behöver prioriteras till sektorer där behovet är störst. Ett förnybart energisystem med begränsad biobränsleanvändning ger ökad klimatnytta jämfört med ett system med en kraftig biobränsleanvändning, på grund av minskade indirekta utsläpp och en större kolsänka och ett större kolförråd i skogen. Därför bör energibesparing, energieffektivisering och elektrifiering prioriteras och biobränslen användas för att täcka resterande energibehov.





Bostäder och service

4

För att klara omställningen till ett helt förnybart energisystem är det inte tillräckligt att ändra var energin kommer ifrån, utan även hur den används. Den här delen av rapporten diskuterar hur energianvändningen inom bostäder och service behöver ändras för att klara av ett helt förnybart, hållbart energisystem.

4.1 Energianvändningen i bostäder och service i dag

Bostäder och service står för ungefär 40 procent av Sveriges totala energianvändning och har legat relativt stadigt under de senaste decennierna. Som Figur 10 visar har det dock skett en tydlig förändring under perioden i vilka energislag som används. Eluppvärmning och fjärrvärme har båda sett en kraftig ökning samtidigt som petroleumprodukter, framför allt oljepannor, har fasats ut.

Trots att den totala energianvändningen inom bostäder och service har legat relativt stadigt under de senaste decennierna har en betydande energieffektivisering skett inom uppvärmning. Som Figur 11, Figur 12 och Figur 13 visar har energianvändningen för småhus, flerbostadshus och lokaler minskat under perioden.

Inom hela bostadssektorn har energianvändningen minskat med över 30 procent samtidigt som den uppvärmda ytan har ökat med 25 procent sedan början av 1980-talet (Energikommissionen, 2017). Den minskade energianvändningen kan förklaras med energibesparande åtgärder som ökad isolering samt en övergång till värmepumpar.

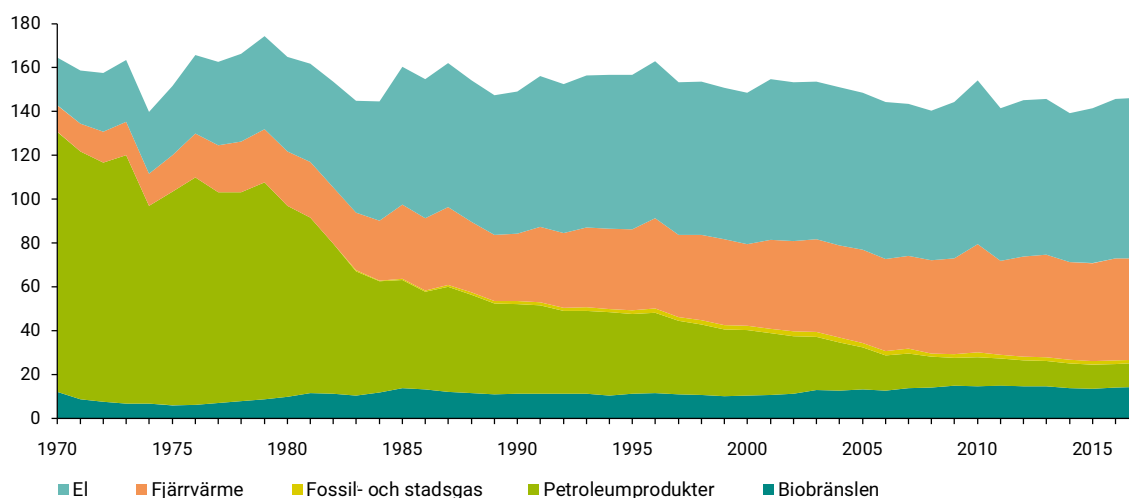
4.2 Framtidens bostäder och service

Energieffektivisering är utgångspunkten i bostads- och servicesektorns omställning. Den effektivisering som påbörjats under de senaste årtiondena behöver trappas upp ordentligt och genomsyra såväl energipolitik som bostadsbyggande.

Energieffektivisering ska här tolkas i bred bemärkelse, både genom tekniska lösningar som isolering och värmepumpar; och genom beteendeförändringar. Framtidens bostäder behöver bli både mer yt- och energieffektiva och vårt fastighetsbestånd måste nyttjas på ett bättre sätt än i dag. Vi behöver bo på mindre ytor, utan att det leder till trångboddhet.

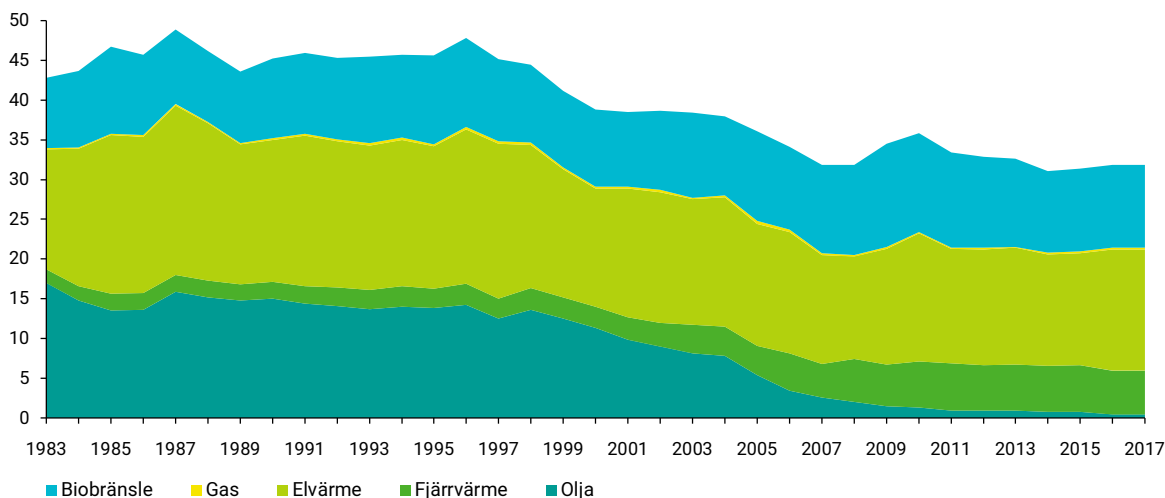
En utmaning med att uppskatta energianvändningen inom bostäder och service

Slutlig energianvändning i bostäder och service m.m. per energibärare, fr.o.m. 1970, TWh



Figur 10. Slutlig energianvändning i bostäder och service per energibärare; 1970-2017 (Energimyndigheten, 2019a).

Energianvändningen för uppvärmning och varmvatten i småhus, fr.o.m. 1983, TWh



Figur 11. Energianvändning för uppvärmning och varmvatten i småhus (Energimyndigheten, 2019a).

till 2040 är den osäkra befolkningsutvecklingen. Enligt SCB:s befolkningsprognos ökar Sveriges befolkning till 11,5 miljoner 2040, jämfört med 10,3 miljoner 2019 (SCB, 2019a). Genom mer energisnåla bostäder, passivhus som klarar sig nästan utan tillförd värme och ett mer effektivt utnyttjande av det existerande bostadsbeståndet skulle en frikoppling kunna ske mellan befolkningstillväxt och energianvändning i bostäder och service. På så sätt kan vi behålla en fortsatt hög livskvalitet men med en annan

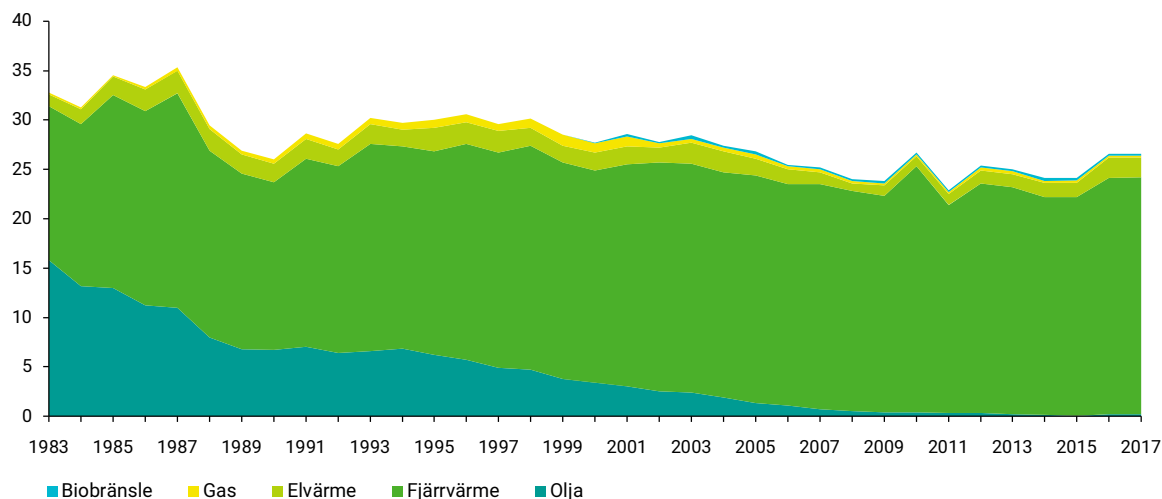
boendestandard och en minskad energianvändning.

Utöver energieffektivisering har bostads- och servicesektorn goda möjligheter att bidra med efterfrågefleksibilitet, för att balansera ett helt förnybart elsystem. Eftersom det redan har diskuterats som en flexibilitetsresurs tidigare behandlas det inte vidare här.

Energieffektivisering

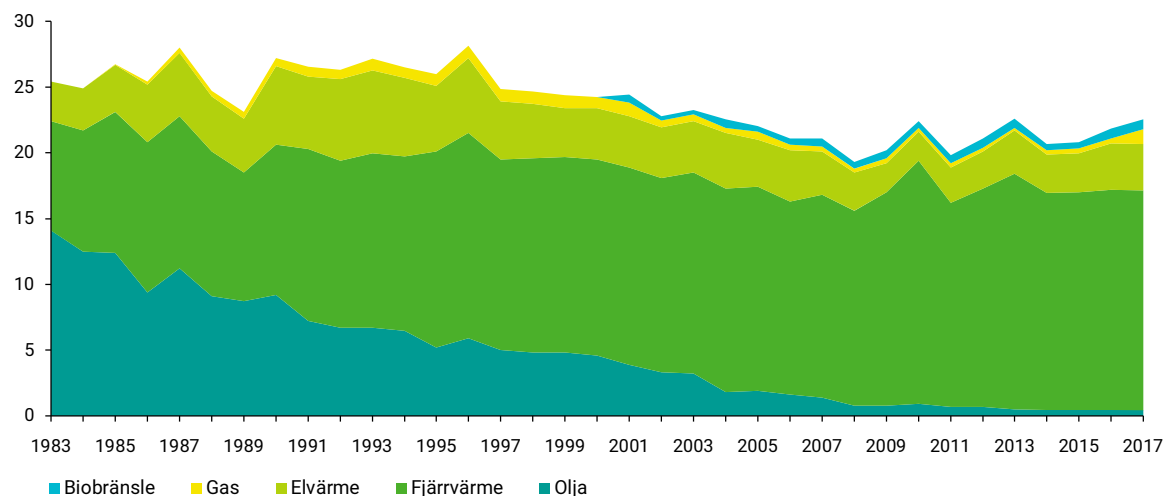
Det finns en stor orealiserad effektivise-

Energianvändning för uppvärmning och varmvatten i flerbostadshus, fr.o.m. 1983, TWh



Figur 12. Energianvändning för uppvärmning och varmvatten i flerbostadshus (Energimyndigheten, 2019a).

Energianvändning för uppvärmning och varmvatten i lokaler, fr.o.m. 1983, TWh



Figur 13. Energianvändning för uppvärmning och varmvatten i lokaler (Energimyndigheten, 2019a).

ringspotential inom bostäder och service. Detta beror på ett så kallat energieffektiviseringsgap, ett marknadsmisslyckande som innebär att ekonomiskt lönsamma energieffektiviserande åtgärder inte alltid genomförs. För att hantera detta krävs politiska styrmedel. Ett möjligt styrmedel är vita certifikat, som syftar till en kostnadseffektiv energieffektivisering genom ett samspel mellan energibolag, energitjänsteföretag och energianvändare för att genomföra energieffektiviserande åtgärder. Utgångspunkten för vita certifikat är ett kvotpliktsystem, likt de gröna certifikat som används i Sverige i dag, där de kvotpliktiga är skyldiga att uppnå ett bestämt antal certifikat. Det kan vara elhandelsbolagen eller elnätsföretagen som är kvotpliktiga. Certifikat kan genereras för åtgärder som antingen minskar energi- eller effektuttag, beroende på önskad styrning.

Energianvändningen påverkas av en rad olika faktorer, såväl politiska som tekniska. Energianvändningen kan påverkas direkt av skatter på el, byggnormer och ekodesignkrav. Det saknas dock riktade styrmedel för energieffektivisering vilket gör att potentialen är fortsatt stor för politiken att bidra till en minskad elanvändning.

En löpande teknikutveckling som haft stor påverkan på elanvändningen är energieffektivisering av vitvaror. Dessa har blivit 60 procent mer energieffektiva bara under det senaste årtiondet. Ett teknikgenombrott är LED-belysning som minskar elanvändningen med 85 till 90 procent (Energikommissionen, 2017). En ökad medvetenhet om klimatpåverkan samt ändrad lagstiftning gör att dessa teknikskiften och strukturförändringar förväntas vara en fortsatt stor drivkraft i att minska elanvändningen i Sverige.

Det finns många uppskattningar om hur den svenska energianvändningen kommer utvecklas i framtiden. Energikommissionen bedömde att elanvändningen inom bostäder och service skulle öka något till 2030, från 70 TWh i dag till 71 TWh (Energikommissionen, 2017). Som ett underlag till färdplanen för fossilfri el har NEPP (North European Energy Perspectives Project) uppskattat elanvändningen inom bostäder och service till 81,7 TWh 2045, inklusive 4 TWh till datahallar (NEPP, 2019). Energimyndigheten har tagit fram fem olika scenarier för energianvändningen till 2050 i bostäder och service som ligger på mellan 139 TWh och 144 TWh, inklusive 8 TWh för datahallar i den högsta (Energi-

myndigheten, 2019e). I Energimyndighetens visionära framtider för energisystemet uppskattas bostäder och service använda mellan 100 och 141 TWh energi 2050 (Energimyndigheten, 2016b).

En studie från 2019 visar att det finns en privatekonomiskt lönsam potential för energieffektivisering på 18 TWh nettovärme för Sveriges två miljoner småhus till 2040 (Besmå, 2019). Småhusen har i dag en årlig energianvändning på 44 TWh, varav 32 TWh är för uppvärmning och varmvatten och 12 TWh är hushållsel. Av den köpta energin för uppvärmning är ungefär 16 TWh el och 16 TWh fjärrvärme. Eftersom elen för uppvärmning huvudsakligen används under vintern kan energieffektivisering av småhus kraftigt minska effekttoppen. Om energieffektiviseringen på 7 TWh el sker under de tre kallaste månaderna uppstår en minskning av effekttoppen på drygt 3 000 MW. Det skulle kunna bidra med att sänka dagens effekttopp från 25 000 MW till 22 000 MW. Det är i linje med resultaten i en studie som studerar värmepumpars påverkan på effektbalansen, där den svenska effekttoppen bedöms kunna minska med 3 000 MW genom energieffektivisering och konvertering från elvärme till värmepumpar i småhus, flerbostadshus och lokaler (Profu, 2018). Även den statliga utredningen *Mindre aktörer i energilandskapet – förslag med effekt* föreslår ett mål om 3 000 MW för minskningen av effekttoppen till 2040 (Statens offentliga utredningar, 2018).

Den höga effektiviseringspotentialen missas ofta i prognoser för framtida energianvändning och kan sannolikt motsvaras av liknande besparingspotential inom andra delar av sektorn. Studien från Besmå visar på en effektiviseringspotential på drygt 30 procent för el och drygt 40 procent för fjärrvärme. Potentialen för energieffektivisering bedöms vara högre i småhus än inom resten av bostads- och servicesektorn. Naturs-

kyddsföreningen uppskattar därför en effektiviseringspotential på 25 procent för el och 30 procent för uppvärmning inom bostäder och service. Detta motsvarar en effektivisering på 1,25 procent per år för el och 1,5 procent per år för värme baserat på dagens nivå.

Ytterligare ett sätt att effektivisera energianvändningen i bostäder och service är att ersätta en del av dagens direkta bioenergianvändning om 14 TWh med värmepumpar. På så sätt kan de begränsade hållbara bioresurserna användas där de är svårare att ersätta, som inom industrin och transportsektorn. Av den resterande biobränsleanvändningen efter effektiviseringen på 30 procent antas 4 TWh kvarstå som bioenergi och 6 TWh ersättas av värmepumpar, som använder 2 TWh el.

Utfasning av fossila bränslen

Av den direkta energianvändningen i bostäder och service är 12 TWh fossil i dag, uppdelat på 11 TWh petroleumprodukter och 1 TWh fossilgas (Energimyndigheten, 2019a). Av petroleumprodukterna används majoriteten inom jordbruk, skogsbruk och fiske samt byggverksamhet. Fossilgasen finns framför allt i gasnätet på västkusten. Även denna energianvändning kan effektiviseras och rapporten bedömer det totala energibehovet till 10 TWh 2040, jämfört med 12 TWh i dag. Effektiviseringen motsvarar 1 procent per år från dagens nivå. En viss potential för elektrifiering bedöms finnas inom dessa sektorer, men det huvudsakliga skiftet är till biobränslen. De fossila bränslena som används i dag uppskattas därför ersättas av 3 TWh el och 7 TWh biobränslen.

Datahallar

Utöver ovanstående energianvändning inom bostäder och service väntas en ökning inom nya servicesektorer, bland annat datahallar. Elanvändningen antas därför öka med 5 TWh efter att ovanstående effektiviseringspotential har realiserats.

4.3 Energianvändningen i framtidens bostäder och service

Energianvändningen för bostäder och service till 2040 bedöms till 65 TWh el, 32 TWh fjärrvärme och 11 TWh biobränslen. Den totala energianvändningen på 108 TWh är i linje med Energimyndighetens explorativa scenarier för framtidens energisystem (Energimyndigheten, 2016b).

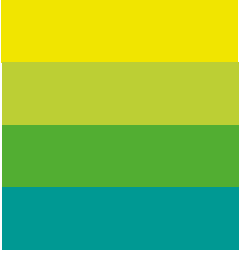
Dagens avsaknad av direkta styrmedel för energieffektivisering, i kombination med låga elpriser gör att en stor effektiviseringspotential står ounyttjad och att ovanstående höga mål är möjliga. Detta

kommer dock kräva en storsatsning på energieffektivisering, både med politiska styrmedel och en fortsatt teknikutveckling. Effektiviseringen är särskilt viktig med tanke på befolkningsökningen.

Energieffektivisering inom bostäder och service är en effektiv åtgärd att minska effekttoppen, eftersom den högsta energiförbrukningen uppstår när det är som kallast och effekttoppen är allra högst. Genom den energieffektivisering som antagits i detta kapitel bedöms effekttoppen kunna kapas 3 000 MW, jämfört med dagens nivå på 25 000 MW.



Foto: Johanna Lakso



Transporter

5

För att klara av omställningen till ett helt förnybart energisystem krävs radikal förändring även på transportområdet. Det är inte tillräckligt att elektrifiera och ställa om till förnybara bränslen, en omställning av hela transportsystemet är nödvändig. Samhällsplaneringen behöver förändras för att gynna cyklister, fotgängare och kollektivtrafik och för att minska privatbilismen i tillräcklig utsträckning. Godstrafik måste effektiviseras och ställas om. Det här kapitlet går igenom hur transportsektorn ser ut i dag, vilka lösningar som finns att tillgå och hur den kan bidra till en hållbar omställning av hela energisystemet.

Rapporten inkluderar vägtrafik, bantrafik, sjöfart och lufttrafik för inrikes transporter, samt energin för utrikes sjö- och luftfart som bunkrats i Sverige.

5.1 Den svenska transportsektorn i dag

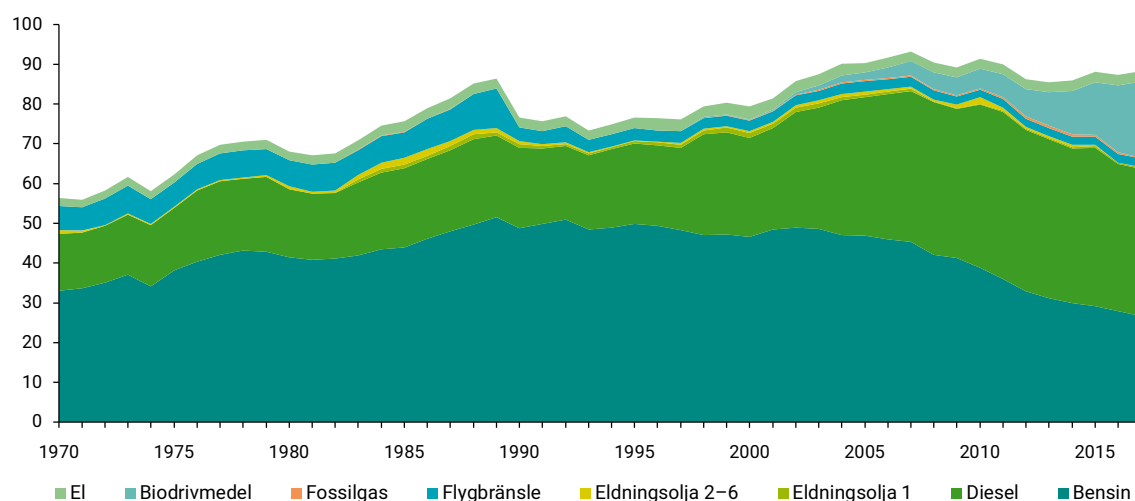
Svensk inrikes transport har haft en relativt stadig energianvändning på knappt 90 TWh per år de senaste åren (Energimyndigheten, 2019a). Energianvändningen är huvudsakligen fossil, vilket kan ses i Figur 14. Utsläppen från svensk inrikes

transport är 17 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år, motsvarande 32 procent av de territoriella utsläppen (Naturvårdsverket, 2018a). Utsläppen kan delas upp i 11 miljoner ton för persontransporter på väg, 5 miljoner ton för godstransporter på väg och 1 miljon ton för övriga transporter (Naturvårdsverket, 2018a). Till detta tillkommer 11 miljoner ton koldioxidekvivalenter från bränsle som bunkras i Sverige för utrikes luft- och sjöfart (Naturvårdsverket, 2018b).

Energianvändningen uppdelat per trafikslag kan ses i Figur 15 och består huvudsakligen av vägtrafik.

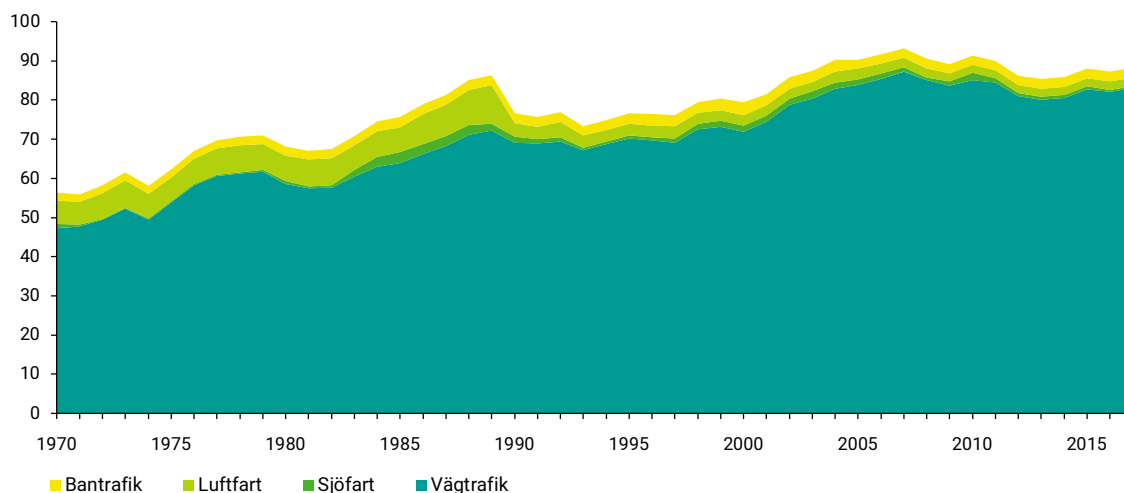
Det svenska transportsystemet uppdelat per person och transportslag kan ses som genomsnittliga resesträckor i Figur 16. Som figuren visar är personbil det dominerande trafikslaget, även om en viss minskning har skett sedan 2006. Genom att studera energianvändningen i transportsektorn tillsammans med genomsnittliga resesträckor går det att utläsa en viss effektivisering mellan 2006 och 2018, eftersom energianvändningen har minskat något samtidigt som resesträckan per capita varit stadig.

Slutlig energianvändning i transportsektorn per energibärare, inrikes, 1970-2017, TWh



Figur 14. Slutlig energianvändning i svensk inrikes transportsektor; 1970-2017 (Energimyndigheten, 2019a).

Slutlig energianvändning i transportsektorn, per trafikslag, inrikes, fr.o.m. 1970, TWh



Figur 15. Slutlig energianvändning för inrikes transporter per trafikslag; 1970-2017 (Energimyndigheten, 2019a).

5.2 Framtidens transportsystem

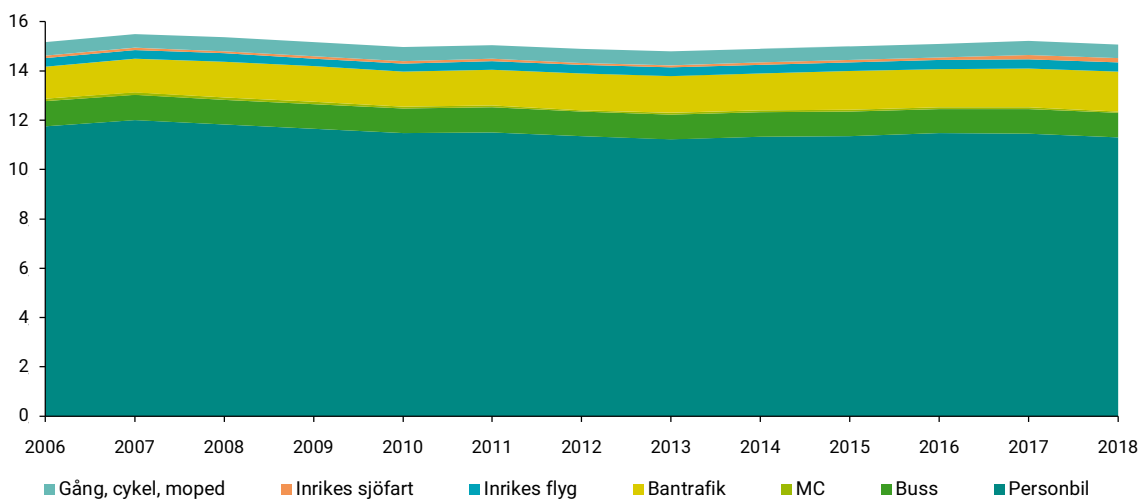
För att uppnå ett hållbart, förnybart energisystem är omställningen av transportsektorn avgörande. Den fossila energianvändningen inom transportsektorn måste minska från dagens 104 TWh till 0.

Transportsektorn har i dag en mycket ineffektiv energianvändning vilket gör att det finns en omfattande potential till transporteffektivisering. Transporteffektivisering handlar om hur energiät-

gången för vägtrafik kan minskas, utan att byta bil eller bränsle. Det består av tre delar:

Effektivisera bort trafik. Trafikmängden, även kallat trafikarbete, är ett mått på hur långt alla fordon rullar och inget mått på vad som egentligen blir uträttat. Färre transporter kan ge samma nytta. Ett exempel på styrmedel är trängselavgifter som minskar trafiken men ökar framkomligheten.

Genomsnittlig resesträcka per person, 1000 km/capita



Figur 16. Genomsnittlig resesträcka per capita för olika transportslag (1000 km/capita) (2030-sekretariatet, 2019).

Styr till effektiva transportformer. Transportslag som för människor och saker dit de ska med minimal energiförbrukning ska uppmuntras. Ett exempel är byte från bil till spårtrafik som spar energi.

Gynna effektiv framdrift. Minimera den specifika transportens energiförbrukning. Ett exempel är sparsam medveten bilkörning som tar bilen dit den ska men minskar bränsleförbrukningen.

Den energiförbrukning som återstår efter transporteffektiviseringen ska tillgodoses med förnybar energi så som förnybar el eller hållbara biobränslen (Klimatpolitiska rådet, 2019).

Vägtrafik

Den huvudsakliga energianvändningen inom transportsektorn sker inom vägtrafiken. Mycket av dessa utsläpp härstammar från ohållbara livsval och konsumtion. Dagens privatbilism är ohållbar på grund av de höga utsläppen som orsakas, men också vad gäller ytanvändning i städer. Det framtida, hållbara samhället måste vara betydligt mer transporteffektivt än dagens, för att skapa levande stadsmiljöer och minska resursåtgången. I dag är varannan bilresa som görs i Sverige är kortare än 5 km. Korta resor står för tre procent av körsträckorna men orsakar 26 procent av avgasutsläppen (Energi- och klimatrådgivningen, 2016). De korta resorna skulle i de flesta fall kunna ersättas av gång eller cykel, med fördelar för såväl klimat som hälsa och stadsmiljö (Trafikverket, 2014a). Detta kan dessutom öka framkomligheten för den vägtrafik som är nödvändig. Växande e-handel, med fria returer och överbeställningar, är ett exempel på ohållbar konsumtion som sätter högt tryck på godstransporter, både inom och utanför landet. Genom beteendeförändringar på dessa områden kan transportsektorn effektiviseras.

Den här delen går igenom potentialen för transporteffektivisering genom att effektivisera bort trafik, styra till effektiva transportformer och gynna effektiv framdrift. I nästa skede sker ytterligare en effektivisering, när mycket av den resterande vägtrafiken elektrifieras.

Nyckeln i omställningen av transportsystemet är ett mer transporteffektivt samhälle, där tillgängligheten bibehålls eller förbättras samtidigt som trafiken minskar. I den statliga utredningen

*Fossilfrihet på väg*⁴ från 2013 uppskattas potentialen för effektivisering av trafikarbetet för personbil till 10-21 procent år 2030 och 20-35 procent år 2050 (Statens offentliga utredningar, 2013). För 2040 som den här rapporten tar sikte på bedöms potentialen till 15-28 procent, med ett antagande om linjär utveckling. Den största potentialen finns inom hållbar stadsutveckling, som inkluderar:

- ökad täthet av boende, arbetsplatser och service i städerna
- ökad funktionsblandning med tillgång till service nära bostäder och arbetsplatser
- utformning och hastighet på gator utifrån gående och cyklisters villkor istället för bilens
- en fungerande marknad där parkering inte subventioneras.

För lastbil är potentialen för effektivisering av trafikarbetet 5-16 procent 2030 och 11-28 procent 2050 (Statens offentliga utredningar, 2013). För 2040 bedöms po-

4 Den så kallade FFF-utredningen (Fossilfrihet på väg) kan fortfarande, sex år efter publikation, ses som den mest heltäckande analysen av omställningen av den svenska transportsektorn. Potentialerna för energibesparing, genom borteffektivisering av trafik, styrning till effektiva transportformer och effektiv framdrift används i hela den här delen.

tentialen därför till 8-22 procent. Den största besparingspotentialen finns inom ruttoptimering och ökad fyllnadsgrad i godstransporter. För lastbilstransporter finns dessutom möjligheten att minska behovet av transporter, genom att minska ohållbar konsumtion. Det går också att optimera leveranserna genom att samfrakta varor som ska till samma mottagare samt skapa hubbar med in- och utlämningsboxar, till exempel i anslutning till knutpunkter för kollektivtrafiken.

För transporter som inte kan effektiviseras bort finns möjligheten att byta till mer effektiva trafikslag, som cykel och kollektivtrafik för persontrafik och bantrafik för godstrafik, för att kraftigt minska utsläppen. I städer finns stor potential för överflyttning av persontransporter genom:

- medvetna satsningar på god framkomlighet för gång- och cykel
- förbättrad tillgänglighet med kollektivtrafik till arbetsplatser, service och fritidsaktiviteter
- stadsutveckling längs kollektivtrafikstråk (Statens offentliga utredningar, 2013).

Det totala trafikarbetet har ökat kraftigt i Sverige, både för person- och godstransporter. Trafikarbetet för personbilar har ökat från 14 miljarder fordonskilometer 1960 till 68 miljarder fordonskilometer 2018 (Trafikanalys, 2019). Mellan 1960 och 2011 minskade andelen kollektivtrafikresor från hälften av persontransportarbetet till mindre än 20 procent (Statens offentliga utredningar, 2013). Med ökad tillgänglighet och ekonomisk styrning skulle utvecklingen kunna vändas och andelen kollektivtrafik öka kraftigt. Trafikarbetet för lastbilar har ökat från 5 miljarder fordonskilometer 1960 till 14 miljarder fordonskilometer 2018 (Trafikanalys, 2019).

Potentialen för minskad personbilstrafik genom ett skifte från bil till kollektivtrafik och andra effektivare trafikslag, har uppskattats till 9 procent 2030 och 12 procent till 2050 (Statens offentliga utredningar, 2018). Med en linjär utveckling är potentialen 10,5 procent till 2040. Potentialen för minskat transportarbete för godstrafik på väg, genom ett skifte till järnväg eller sjöfart, har uppskattats till 4-13 procent 2030 och 10-21 procent till 2050 (Statens offentliga utredningar, 2013). För 2040 är potentialen 7-15,5 procent.

En mer effektiv framdrift av fordon kan bidra till minskad energianvändning inom transportsektorn och öka möjligheten att ställa om till ett helt förnybart transportsystem. Effektiv framdrift innebär ett sparsamt körsätt, lägre hastigheter och vägytor som minskar energianvändningen. Sänkt hastighet ger flera fördelar utöver klimatnyttan, som minskade bullernivåer och färre olyckor. Det kan också bidra till en bättre gång- och cykelmiljö.

Potentialen för energibesparing genom effektiv framdrift är 15 procent för såväl lätta som tunga fordon (Statens offentliga utredningar, 2013). Besparingsåtgärderna finns inom hastighetsbegränsning på landsväg, hastighetsövervakning, tekniska hjälpmedel och sparsam körning samt mer effektiv utformning av vägar och vägytor.

Potentialen för minskad energianvändning genom minskad vägtrafik, mer effektiva transportslag och mer effektiv framdrift är 35 till 45 procent för personbil och 27 till 44 procent för godstrafik till 2040 enligt *Fossilfrihet på väg*. Trafikverket har gjort bedömningen att biltrafiken kan minska med 27 till 40 procent redan till 2030 utan att tillgängligheten försämras (Klimatpolitiska rådet, 2019). För att åstadkomma en fullständig omställning till ett förnybart

transportsystem inom planetens gränser behöver den fulla effektiviseringspotentialen realiseras.

Naturskyddsföreningen sätter därför ett mål om en energieffektivisering på 50 procent för såväl personbil som godstrafik till 2040. Av effektiviseringen beror 15 procent på mer effektiv framdrift, så minskningen i körsträckor är ungefär 40 procent till 2040, motsvarande 2 procent per år jämfört med dagens nivå.

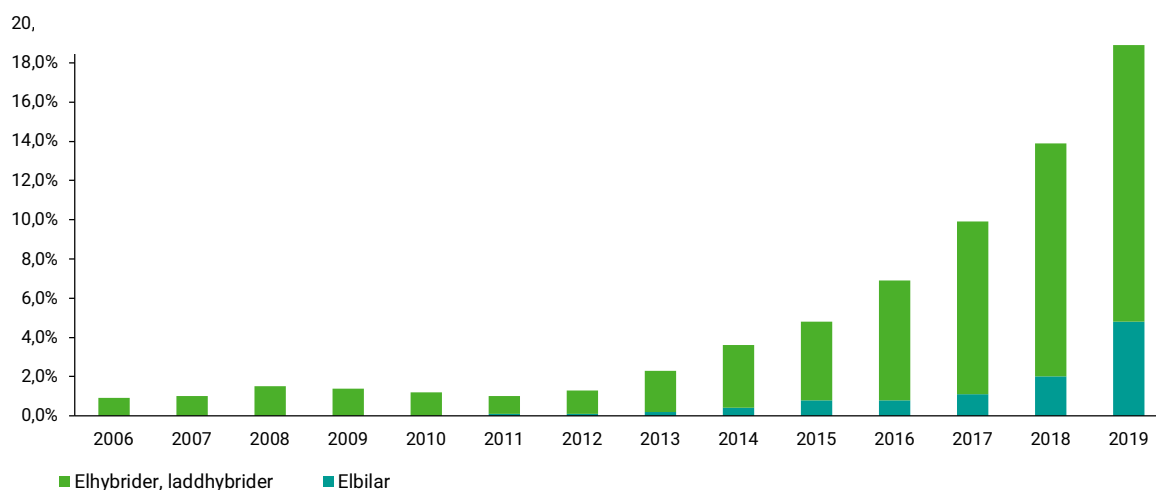
Energianvändningen, innan effektiviseringen som uppstår vid övergång till elbilar, blir alltså 42 TWh för vägtrafik 2040, jämfört med dagens 83 TWh (Energimyndigheten, 2019a).

Det höga målet innebär att en ännu större omställning av transportsektorn måste ske än den som utredningen *Fossilfrihet på väg* förutsåg. Det innebär ett kraftigt minskat bilberoende, där privatbilism inte längre är norm, genom utbyggd kollektivtrafik med hög tillgänglighet, täta städer med närhet till service och tjänster, mer distansarbete och en mer lokal livsstil. Det innebär också ett lägre tryck på godstrafiken, genom effektiva transporter såväl som en kraftig minskning av ohållbar konsumtion. Minskningen i energianvänd-

ning för vägtrafik kommer dock variera kraftigt mellan stad och land. I storstäder kommer minskningar långt över 50 procent vara nödvändiga, medan platser som saknar kollektivtrafik kan åstadkomma mindre minskningar. För att effektiviseringen ska kunna realiseras behöver kostnadsminskningen som uppstår genom övergången till elbilar eventuellt balanseras av andra avgifter.

Efter att den nödvändiga effektiviseringen har skett inom transportsektorn behöver det kvarvarande trafikarbetet ske helt och hållet med en hållbar energitillförsel. Med en stor tillgång på förnybar el kan elektrifiering vara det mest hållbara alternativet. Tack vare hög verkningsgrad i elbilar innebär elektrifiering en stor effektivisering, även med bibehållen körning. Av energin som matas in i en förbränningsmotor blir 62 procent värme, 15 procent förloras i tomgång och 5 procent i drivlineförluster (Emobility, 2019). Endast 18 procent av tillförd energi används för att föra bilen framåt. I en elbil används istället 83 procent till att driva bilen framåt. Elfordon är alltså fyra gånger mer effektiva än fossilbilar.

Andel elbilar och övriga laddbara fordon av nybilsförsäljningen, 2006-2019



Figur 17. Andel el-, elhybrid- och laddhybridbilar av nyregistrerade personbilar 2006-2019. Siffror till och med juli 2019 (SCB, 2019b).

Omställningen till elbilar har redan börjat. Andelen el-, elhybrid- och laddhybridbilar låg stadigt runt en procent av alla nyregistrerade personbilar från 2006 till 2011, men har sedan ökat år för år och ligger 2019 på 18 procent (SCB, 2019b). Utvecklingen kan ses i Figur 17. Under perioden januari till juli 2019 var andelen el-, elhybrid- och laddhybridbilar störst i Hällefors, Piteå och Örkelljunga, med andelar på över 40 procent av nybilsförsäljningen. I Energimyndighetens kortsiktsprognos antas elanvändningen i elbilar fyrdubblas under perioden 2018 till 2022 (Energimyndigheten, 2019b).

Laddbara fordon bidrar inte bara till att minska utsläppen i transportsektorn, utan kan också vara en del i att möjliggöra ett helt förnybart elsystem. Genom att endast ladda bilarna när elanvändningen är låg eller det finns god tillgång på förnybar el kan de motverka överskottssituationer och helt undvika nya eller förstärkta effekttoppar. För att detta ska ske krävs styrmedel, som tidsdifferentierade elpriser och nättariffer eller särskilda avtal, men det finns inga tekniska hinder. En ny studie från Norge visar att smart laddning, där elbilar laddas på natten istället för eftermiddag och kväll, skulle möjliggöra en fordonsflotta med nära 100 procent elbilar med obefintliga eller mycket små investeringar i elnätet (DNV GL; Pöyry Management Consulting, 2019).

Med teknikutveckling skulle elbilar även kunna bidra till att mata in el i nätet vid underskottssituationer. Med så kallad vehicle to grid-teknik kan elbilar laddas när elpriset är lågt och tillgången hög, för att sedan mata in i elnätet när priset är högt och tillgången låg. För att det ska vara möjligt krävs dock teknikutveckling och även om alla laddbara fordon inte kan bidra är potentialen hög. Med 2,4 miljoner elbilar skulle en batterikapacitet på mellan 9 000 och 52 000 MW tillgängliggöras,

med potential att balansera nätet på såväl timbasis som över flera dygn (Statens offentliga utredningar, 2018). Om endast en liten del av detta realiserades skulle det ha stor påverkan på balansen av elsystemet.

Den huvudsakliga miljöpåverkan från en elbil kommer från batteritillverkningen. Under hela sin livstid sparar dock en liten elbil totalt 60-70 procent av växthusgasutsläppen jämfört med motsvarande fossildriven bil i Sverige (PowerCircle, 2019). Batteritillverkningen kan medföra stora påfrestningar på miljö och människor, främst vid mineralbrytning av till exempel kobolt och litium. Koboltbrytning sker bland annat i Demokratiska republiken Kongo, där flera exempel på brott mot mänskliga rättigheter och allvarliga miljöförsummelse uppgavs i koppar- och koboltgruvor (SOMO, 2016). Även litiumbrytning orsakar betydande skador för miljö och människor, framför allt på grund av vattenföroreningar och luftutsläpp av giftiga ämnen (World economic forum, 2017). Batteritillverkningen är också energikrävande, vilket gör att elmixen där tillverkningen sker spelar stor roll. I ett förnybart elsystem minskar klimatpåverkan från tillverkningen avsevärt. Utvecklingen av batteritekniken går snabbt, men generellt består ett litiumjonbatteri för elbilar av kolmaterial som grafit och mineraler som litium, nickel, mangan och kobolt (PowerCircle, 2019). För att öka hållbarheten hos elbilar måste batteriåtervinningen öka.

Genom att använda bränsleceller kan elbilar även drivas med vätgas, vilket möjliggör eldrift utan att belasta elsystemet vid tidpunkten för laddning. Eftersom vätgas kan lagras kan den produceras när det finns ett överskott av förnybar el och sedan användas i transportsektorn vid behov. Den vanligaste tekniklösningen i vätgasdrivna bilar är att ett batteri och en

bränslecell kompletterar varandra. Bränslecellssystemet är ungefär dubbelt så energieffektivt som en förbränningsmotor.

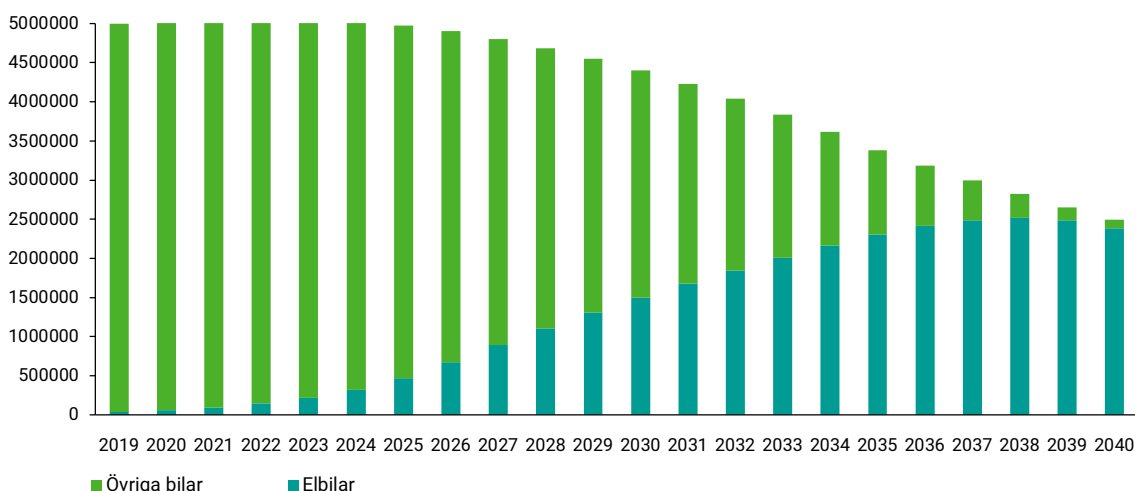
Med nuvarande politik bedöms elbilar kunna utgöra omkring sex procent av hela fordonsflottan till 2030 (Klimatpolitiska rådet, 2019). Om prognosen istället görs utifrån data över elbilsutvecklingen från biltillverkare, konsumentundersökningar, politiker och prognosinstitut landar den på 2,5 miljoner laddbara bilar till 2030, jämfört med dagens 5 miljoner personbilar i trafik (Power Circle, 2018).

Genom elbilars prissättning, med höga inköpspriser och låga körkostnader, är de väl lämpade för bilpooler. Genom att elbilar delas av flera personer eller företag kan kostnaden hållas nere samtidigt som miljönyttan maximeras. Eftersom elbilars miljöpåverkan huvudsakligen sker under produktionsfasen finns en stor nytta med att ha få bilar som körs mycket istället för många som körs lite. Det kan också finnas behov av nya affärsmodeller för att dimensionera elbilsbatterierna, eftersom miljöpåverkan påverkas av bat-

teriets storlek. Eftersom en del av resorna även i ett transporteffektivt samhälle sannolikt kommer vara korta finns ingen anledning att dimensionera samtliga elbilsbatterier för att kunna köra 60 mil. Istället går det att föreställa sig affärsmodeller där en bil har ett relativt litet batteri (exempelvis en räckvidd på 30 mil), men att kunden har möjlighet att byta upp sig till en bil med större batteri vid behov. På så sätt kan en mer effektiv batterianvändning åstadkommas och miljöpåverkan minimeras.

Effektivisering av transportsektorn, i kombination med en kraftig ökning av nya tjänster för bildelning, gör att antalet personbilar kan minska kraftigt till 2040. Med ett antagande om att andelen elbilar bland nybilsförsäljningen ökar med 50 procent varje år, från dagens fem procent, och planar ut på 95 procent av nybilsförsäljningen, nås en maximal andel elbilsförsäljning redan 2027. Den uppskattade andelen elbilar av nyförsäljningen är i linje med Volvos ambition om att hälften av bilarna de säljer ska vara eldrivna till 2025 (Volvo cars, 2019). Om personbilflottan antas krympa genom att nybilsförsäljningen minskar med fem procent

Antal personbilar, varav elbilar, i trafik till 2040



Figur 18. Möjlig utveckling av antalet personbilar i trafik till 2040, inklusive elbilar enligt rapportens antaganden om nybilsförsäljning etc. Övriga bilar drivs av helt förnybara bränslen senast från år 2030.

per år och avregistreringarna ökar med två procent per år skulle 2,4 miljoner personbilar av 2,5 miljoner totalt vara eldrivna till 2040. Siffrorna kan jämföras med Power Circles prognos om 2,5 miljoner elbilar i drift redan 2030 (Power Circle, 2018). Minskningen av fordonsflottan kan förutom ett minskat trafikarbete möjliggöras av nya tjänster för bildelning och samordnade transporter.

För godstrafik på väg finns det större utmaningar med elektrifiering än för persontrafiken. Godstrafiken är i dag nästan helt fossilberoende, men mycket talar för att elektrifierade lastbilar kan ta betydande marknadsandelar till 2040. För lokala godstransporter finns goda möjligheter att elektrifiera redan till 2030, medan längre tid kommer behövas för regionala och långväga godstransporter (Kloo & Larsson, 2019). För elfordon på längre avstånd krävs antingen bränsleceller för vätgasdrift eller elvägar. Ett väl utbyggt elvägssystem på stora transportstråk i kombination med bränsleceller eller batterier som räckviddsförlängare skulle vara den mest energieffektiva, och eventuellt mest ekonomiska, lösningen på sikt (Kloo & Larsson, 2019).

Tack vare elfordons resurseffektivitet i kombination med möjligheten att balansera produktionen i ett helt förnybart elsystem ser Naturskyddsföreningen att elfordon skulle kunna vara det mest hållbara alternativet i framtiden. Omsättningen av fordonsflottan går dock långsamt och bilar i Sverige har en genomsnittlig livslängd på 18 år (Klimatpolitiska rådet, 2019). Med kraftiga styrmedel bedöms dock en potential för elfordon att utgöra 80 procent av trafikarbetet till 2040.

Den höga verkningsgraden gör att endast 25 procent av energin används i elfordon jämfört med förbränningsmotorer.

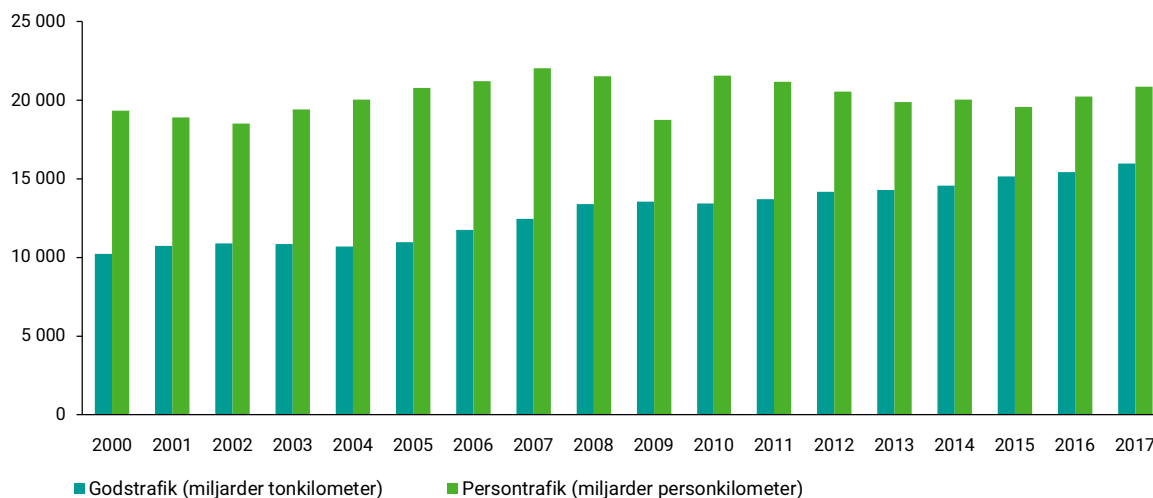
Elfordon, som utgör 80 procent av trafikarbetet, skulle därmed använda 8,4 TWh el 2040. Siffran är sammanslagen för person- och godstrafik men andelen kommer sannolikt vara högre för persontrafik och lägre för godstrafik. I exemplet i Figur 18 utgör elbilar 96 procent av personbilarna i drift 2040.

Den återstående vägtrafik som inte kan elektrifieras behöver drivas med biobränslen. Eftersom hållbara biobränslen är en begränsad resurs ska dessa användas med försiktighet och på sikt fasas ut ytterligare. Vilka sorters biobränslen som används beror på teknikutveckling, men sannolikt en kombination av biogas och hållbar biodiesel.

För att täcka 20 procent av energianvändningen i vägtrafiken, som återstår efter elektrifieringen, är behovet av biobränslen 8,4 TWh. Detta är en kraftig minskning jämfört med dagens 19 TWh. På kort sikt kan biobränslen dock behöva spela en betydligt större roll, för att möjliggöra en fullständig utfasning av fossila bränslen inom transportsektorn till 2030.

Förutom el- och biobränsle drivna fordon kan framtidens transportsystem använda elektrobränslen, även kallat syntetisk bensin. Elektrobränslen skulle kunna ersätta olja med dagens infrastruktur och i samtliga transportslag, även flyg och sjöfart (Grahn, Taljegård, Ehnberg, & Karlsson, 2014). En fördel med elektrobränslen är att de kan användas för att lagra överskottsel från sol eller vind under längre perioder och utgör därför ett bra komplement i ett helt förnybart energisystem. Elektrobränslen produceras i tre steg: elektricitet används för att splittra vatten till vätgas och syrgas genom elektrolys, koldioxid fångas in från olika källor, vätgas och koldioxid blandas i en reaktor för att bilda olika ämnen (Grahn, Taljegård, Ehnberg, & Karlsson, 2014). För att elektrobränslena ska räknas som

Trafikarbete bantrafik 2000-2017



Figur 19. Trafikarbete inom bantrafik 2000-2017 (Naturvårdsverket, 2019a), (Naturvårdsverket, 2019b).

hållbara krävs att den infångade koldioxid är biogen och att vätsgasen produceras med förnybar el.

Eftersom elektrobränslen är en framtids-teknik bedöms inte en specifik potential till 2040, men beroende på teknik- och prisutveckling har den en roll att spela. Det skulle i så fall bidra till en ökad elanvändning och en minskad bio-bränsleanvändning inom transportsektorn.

Bantrafik

En stor del av den nödvändiga effektiviseringen inom vägtrafiken innebär en övergång till bantrafik. Bantrafiken är ett effektivt transportslag, för såväl person- som godstrafik, och kommer behöva öka i framtiden. Elanvändningen inom bantrafik har legat stadigt på 2,6 TWh de senaste fyra åren (Energimyndigheten, 2019a). I Energimyndighetens korttidsprognos antas elanvändningen för bantrafik öka med i genomsnitt 0,8 procent per år mellan 2018 och 2022.

Det totala trafikarbetet inom bantrafik kan ses för perioden 2000 till 2017 i Figur 19. De senaste fyra åren har ökningen

varit tre procent i genomsnitt för persontrafik och en procent för godstrafik.

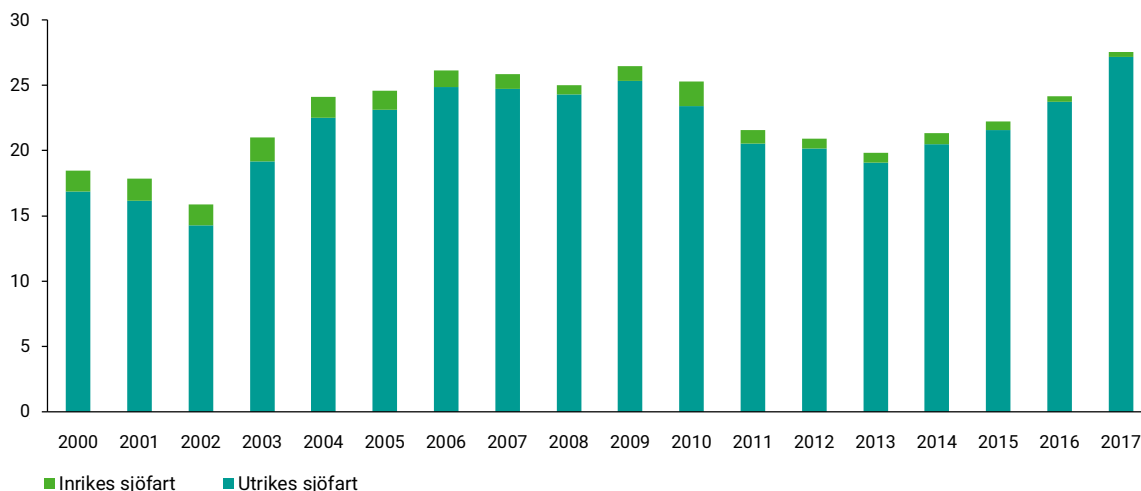
För att effektivisering av hela transportsektorn ska vara möjlig antas en ökning av elanvändningen med tre procent per år för bantrafik. Bantrafikens elanvändning 2040 blir då 4,8 TWh. För att de antagna ökningarna i bantrafiken ska vara möjliga krävs stora investeringar i bantrafiken. Redan i dag råder kapacitetsbrist på många delar av järnvägsnätet och en ökad trafik kräver på många ställen infrastrukturinvesteringar.

Sjöfart

Energianvändningen har minskat för inrikes sjöfart men ökat för utrikes sjöfart de senaste åren, som Figur 20 visar. 2017 var energianvändningen 0,4 TWh för inrikes sjöfart och 27,2 TWh för utrikes sjöfart (Energimyndigheten, 2019a). Utsläppen för inrikes sjöfart var 312 000 ton 2017 och 7 841 000 ton för utrikes sjöfart (Naturvårdsverket, 2019c).

För att sjöfarten ska bli förnybar krävs ett mer transporteffektivt samhälle, energieffektivisering och övergång till förnybara bränslen (Energimyndigheten, 2017).

Energianvändning för in- och utrikes sjöfart, TWh



Figur 20. Energianvändning för in- och utrikes sjöfart, 2000-2017. Energianvändningen för utrikes sjöfart gäller den som bunkrats i Sverige (Energimyndigheten, 2019a).

Redan i dag finns många tekniska lösningar för att överge fossilberoendet inom sjöfarten, som gasdrift på LBG (liquified biogas), batteridrift, biodiesel och metanol (Fossilfritt Sverige, 2018b). Utmaningen är tillgången på hållbara, förnybara bränslen med låg klimatpåverkan, vilket delvis kan hanteras genom användning av elektrobränslen producerade med förnybar el. Batteridrift kan i dag endast användas för kortare sträckor, men med teknikutveckling har de en större roll att spela. Ny teknik och investeringar som möjliggör bland annat drivmedelsbyte, skroptimering och optimering av drivlinan kan redan i dag bidra till att minska utsläppen av koldioxid med 50 procent (Fossilfritt Sverige, 2018b). Det finns även tekniska lösningar för att ta tillvara på vindens kraft som komplement till energiförsörjningen på fartyg (Fossilfritt Sverige, 2018b).

Sjöfarten är ett effektivt transportslag framför allt för godstrafik och den beräknas ligga på en relativt stadig nivå till 2040. Genom energieffektivisering och vissa beteendeförändringar bedöms dock energianvändningen kunna minska med

20 procent, motsvarande 1 procent per år från dagens nivå. Det minskade trafikarbetet för sjöfart är framför allt kryssningsfartyg och viss godstransport på grund av övergång till en mer cirkulär ekonomi. Den resterande energianvändningen på 22 TWh kommer sannolikt även i framtiden förses med flytande bränslen och en övergång till biobränslen är därför att vänta. Genom en satsning på ny teknik kan dock både batterier och elektrobränslen bidra med en betydande del. Precis som för bilar är verkningsgraden högre för batterier än förbränningsmotorer i båtar, vilket gör att elektrifieringen innebär en viss effektivisering.

Sammanfattningsvis bedöms 15 TWh biobränslen och 4 TWh el behövas till sjöfarten till 2040.

Luftfart

Utsläppen från inrikes luftfart har de senaste åren varit relativt oförändrade och stod 2017 för 553 000 ton koldioxidekvivalenter per år, motsvarande 3 procent av utsläppen från inrikes transporter (Naturvårdsverket, 2019c). Däremot har utsläppen för utrikes luftfart ökat de se-

naste åren och ligger i dag på 2 791 000 ton koldioxidekvivalenter per år (Naturvårdsverket, 2018b).

Flygets klimatpåverkan är dock ännu högre än siffrorna visar, på grund av höghöjdseffekten. Utsläpp på hög höjd har en större klimateffekt än utsläpp som sker på marknivå, framför allt på grund av utsläpp av kväveoxider och vattenånga högt upp i atmosfären. Förbränning av fossila bränslen på hög höjd uppskattas leda till nästan dubbla klimateffekten jämfört med om förbränningen sker närmare marknivå. Även förbränning av biobränslen ger en avsevärd höghöjdseffekt, så klimateffekten kan inte raderas genom övergång till biobränslen.

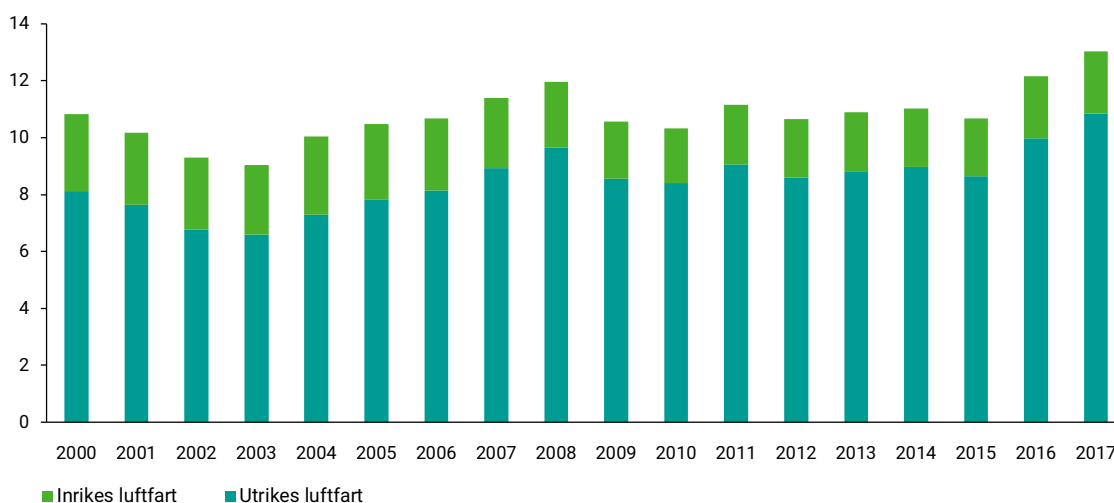
Energianvändningen har legat relativt stadigt för inrikes luftfart, men ökat kraftigt för utrikes luftfart, som Figur 21 visar. 2017 var energianvändningen 10,8 TWh för utrikes luftfart och 2,2 TWh för inrikes luftfart (Energimyndigheten, 2019a).

Flyg kan inte bli hållbart endast genom tekniska lösningar, på grund av höghöjds-

effekten, konkurrensen om hållbara biobränslen och avsaknad av batterilösningar som kan skalas upp i tillräcklig omfattning. Därför behöver flyget minska kraftigt. En minskning av flyget har redan börjat och i augusti 2019 hade inrikes flygresorna minskat med 11 procent jämfört med augusti 2018 (Swedavia, 2019).

Om flyget, som i dag är kraftigt subventionerat, betalade sina fulla miljökostnader skulle det minska ytterligare. Den ökade medvetenheten om att flyg i de flesta fall är ett ohållbart transportslag leder till en betydande beteendeförändring och minskning av flygandet. Samtidigt finns sträckor och resor som även fortsättningsvis kommer trafikeras med flyg. För att möjliggöra dessa resor, och använda tåg för andra, sätter Naturskyddsföreningen ett mål om en minskad energianvändning för flygtrafik med 70 procent till 2040. Detta kan ske med en kombination av kraftigt minskat flyg och energieffektivisering. Om det endast skulle ske genom minskat flygande skulle det minska 3,5 procent per år, vilket är betydligt mindre än den pågående minskningen av inrikes flyg. Energi-

Energianvändning för in- och utrikes luftfart, TWh



Figur 21. Energianvändning för in- och utrikes luftfart, 2000-2017. Energianvändningen för utrikes luftfart är den som bunkras i Sverige (Energimyndigheten, 2019a).

användningen 2040 blir då 4 TWh och tillgodoses helt av biobränslen.

5.3 Energianvändningen i framtidens transportsystem

Omställningen till ett helt förnybart och transporteffektivt samhälle skulle enligt ovanstående antaganden kräva 17 TWh el och 27 TWh biobränslen, inklusive energi för internationella transporter som bunkras i Sverige. Energianvändningen för vägtransporter skulle bli 16 TWh, jämnt fördelat mellan el och biobränslen, vilket är en enorm effektivisering jämfört med 83 TWh i dag.

Den största besparingen har åstadkomits genom att effektivisera bort 50 procent av vägtrafikens energiförbrukning till 2040. Det sker genom att minska trafik genom exempelvis avgifter, styra till kollektivtrafik och gynna en effektiv framdrift av fordonen.

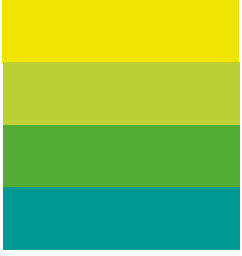
Uppskattningarna för energianvändning för vägtrafiken är efter elektrifieringens effektivisering i linje med Trafikverkets antagande om att minskad trafik tillsammans med elektrifiering av personbilar

och lastbilar kan leda till en energianvändning på 34 TWh, varav 5 TWh utgörs av el, inom transportsektorn år 2030 (Trafikverket, 2014b).

Elektrifiering av transportsektorn kräver smart laddning för att kunna vara en del av ett hållbart energisystem. Trots en hög andel elektrifiering bedöms därför bidraget till effekttoppen vara nära noll för persontrafik på väg. Den elanvändning som skulle bidra till effekttoppen är bantrafik och godstrafik på väg, med eventuella elvägar och löpande trafik. Elanvändningen från den nytillkomna bantrafiken samt godstrafiken på väg är 3,2 TWh och med en konstant elanvändning under samtliga timmar dagtid skulle de bidra med 730 MW till effekttoppen, som i dag är 25 000 MW.

Med konsekventa, medvetna och kraftfulla åtgärder skulle de fossila utsläppen från den svenska transportsektorn kunna minska från dagens 28 miljoner ton koldioxid per år till 0 år 2040. Siffrorna är inklusive utsläpp från bränslen som bunkrats i Sverige för utrikes sjö- och luftfart.





Industri

6

Den energiintensiva industrin i Sverige står för en betydande del av både klimatutsläpp och fossil bränsleanvändning. För att minska de svenska utsläppen och ställa om till ett helt förnybart energisystem krävs stora förändringar även inom industrin. Den här delen går igenom industrisektorns energianvändning och klimatpåverkan i dag, samt dess möjligheter att ställa om och bidra till ett hållbart energisystem.

6.1 Den svenska industrisektorn i dag

Av de svenska årliga utsläppen på 53 miljoner ton 2017 kom 17 miljoner ton från industrisektorn, precis som för transportsektorn. Av detta var 15 miljoner ton från svenska anläggningar inom EU:s system för utsläppshandel. Utsläppen från industrin omfattar direkta utsläpp från industrins tillverkningsprocesser, utsläpp från förbränning av fossila bränslen inom industrin samt diffusa utsläpp. De största utsläppen kommer från järn- och stålindustrin på 6,3 miljoner ton koldioxid per år, mineralindustrin (cement och betong) på 3,2 miljoner ton

koldioxid per år och raffinaderier på 2,9 miljoner ton koldioxid per år (Naturvårdsverket, 2018e).

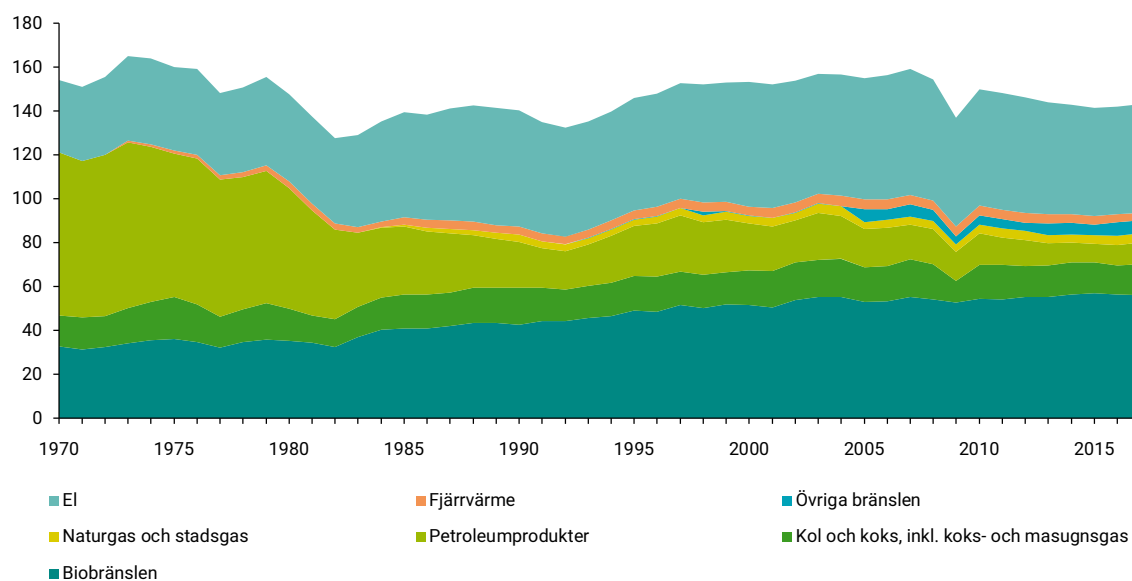
Utsläppen från svensk industri minskade med 17 procent mellan 1990 och 2017. De processrelaterade utsläppen har minskat i mindre utsträckning än utsläppen från energianvändning, eftersom de inte påverkas av traditionella åtgärder för att minska klimatutsläpp som bränslebyten och energieffektiviseringsåtgärder (Naturvårdsverket, 2018e). Eftersom den här rapporten tar sikte på ett förnybart energisystem ligger fokus framför allt på utsläppen från förbränning av fossila bränslen.

Den slutliga energianvändningen i industrin var 143 TWh 2017, varav 34 TWh kom direkt från fossila bränslen. Den totala energianvändningen inom industrisektorn kan ses uppdelat per energibärare i Figur 22 och uppdelat per bransch i Figur 23.

6.2 Framtidens industrisektor

Som en del av regeringens initiativ *Fossilfritt Sverige* har stora delar av

Slutlig energianvändning per energibärare i industrisektorn, 1970-2017, TWh



Figur 22. Energinvändningen per energibärare i industrisektorn, 1970-2017 (Energimyndigheten, 2019a).

svensk industri tagit fram färdplaner för hur de ska nå fossilfrihet till 2045. Dessa färdplaner ger flera bra inspel till hur den svenska industrin i framtiden kan bli en del av ett helt förnybart energisystem. Som en del av varje färdplan har en uppskattning gjorts av respektive bransch för hur mycket deras el- och bibränslebehov kommer öka till 2045. Eftersom dessa är gjorda från varje branschs perspektiv tar de inte hänsyn till den sammantagna effekten av el- och bibränsleökningen. Om samtliga färdplaner genomfördes enligt branschernas förslag skulle industrins samlade behov av el öka med 20 TWh och av bibränsle med 23 TWh till 2045 (Sweco, 2019).

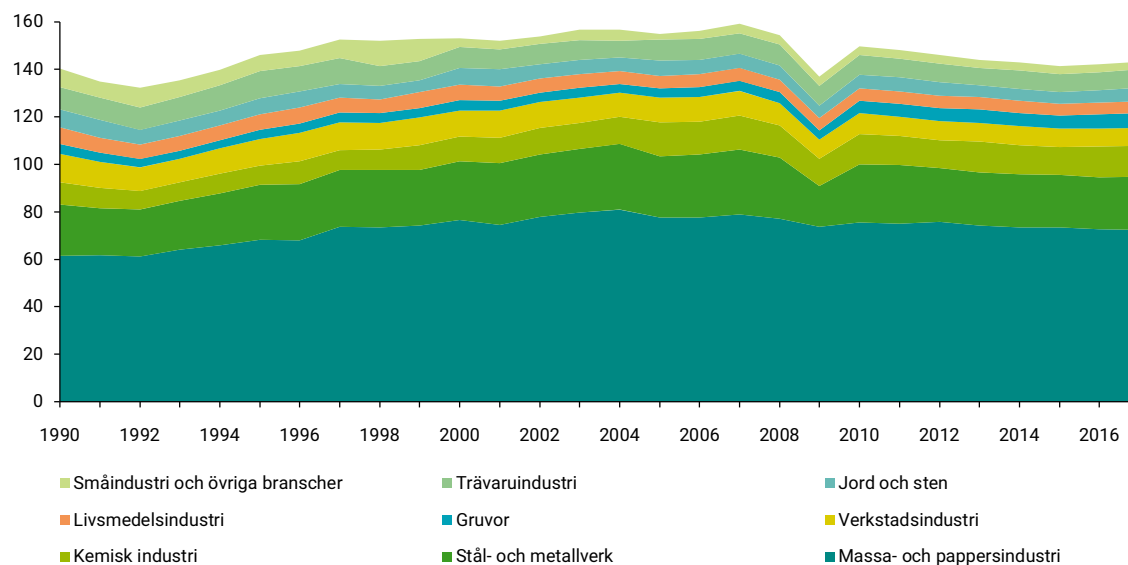
En utgångspunkt i färdplanerna är att varje bransch ska behålla den produktionsnivå de hade 2016. Från ett branschperspektiv är det en given hållning, med en önskan om tillväxt inom varje bransch, men sammanställningen visar att det är svårörenligt med en hållbar resursanvändning. All energianvändning ger upphov till en viss negativ miljö- och klimatpåverkan. Även i ett helt förnybart

elsystem sker en påverkan på miljö och klimat, dock marginell jämfört med de fossila motsvarigheterna. Den största utmaningen med branschernas färdplaner är dock inte den höga elanvändningen, utan biobränsleanvändningen där hög konkurrens råder mellan de mest hållbara resurserna.

För att klara av omställningen som krävs för att minimera riskerna för katastrofala klimatförändringar och samtidigt bevara biologisk mångfald krävs förändringar i hela samhället. Vi behöver förändra hur vi lever, reser, konsumerar och producerar. Produktionen av nya material behöver minska och övergå till cirkularitet. Materialåtervinning är en grundpelare i omställningen och produktion av nya material måste minimeras. De sektorer som i dag orsakar störst utsläpp behöver anpassa sig mest. Även med en omställning till förnybar energi kan vissa branscher behöva minska sin produktion för att åstadkomma hållbarhet.

Den här rapporten kan omöjliggen förutspå hur respektive bransch ska utvecklas i

Slutlig energianvändning per bransch i industrisektorn, 1990-2017, TWh



Figur 23.

framtiden, men med mot bakgrund av utmaningen vi står inför är "business as usual" inte ett alternativ. Därför tar rapporten avstamp i den sammantagna effekten av alla branschers färdplaner, men gör antaganden om effektivisering därför. Med undantag för delen om energieffektivisering, där fler källor används, kommer siffror redovisas i den avslutande delen, istället för under nedanstående delar.

Energieffektivisering

För att industrin ska vara en del av ett hållbart, förnybart energisystem är energieffektivisering en självklar utgångspunkt. En förutsättning för att energieffektivisera är ekonomiska incitament. Den svenska industrin har lägst elpriser, inklusive skatter och nätavgifter, i hela EU (European Commission, 2019). Detta kan vara en anledning till att en absolut energieffektivisering har uteblivit under senare år. Med en korrekt prissättning kan industriell energieffektivisering leda till betydande kostnadsbesparingar, vilket i sin tur ökar konkurrenskraften för företagen.

Precis som inom bostads- och service-sektorn finns ett betydande energieffektiviseringsgap inom den svenska industrisektorn, vilket innebär att lönsamma energieffektiviserande åtgärder inte alltid genomförs (Rasmussen, 2016). Flera hinder har identifierats för företag att genomföra lönsamma investeringsåtgärder och exempel är brist på finansiering, andra prioriteringar för investeringar, långsamma återbetalningsperioder och fokus på huvudverksamheten (Rasmussen, 2016). Genom att undanröja dessa skulle en betydande energieffektiviseringspotential kunna realiseras.

När Energimyndigheten studerar explorativa scenarier för det framtida energisystemet antas en stor potential för energieffektivisering inom industrin. I det

mest ambitiösa scenariot har industrins energianvändning minskat från 143 TWh i dag till 120 TWh 2050 (Energimyndigheten, 2016b). Det är möjligt tack vare stora omstruktureringar inom industrin och en ökad styrning mot kretsloppstänkande, där användningen av råvaror och uppkomsten av avfall minskar. Restvärme från industrin används i såväl egna processer som i fjärrvärmenätet. Alla fossila bränslen inom industrin har fasats ut och den del av cementindustrin som inte har kunnat ställa om sin produktion fasas ut.

Potentialen för energieffektivisering inom industrin studerades också i Energikommissionens arbete. Som ett uppdrag sammanställde WSP potentialbedömningar för energieffektivisering inom industrin från olika källor (WSP, 2016). De bedömda potentialerna beror på olika antaganden och landar i ett brett spann:

- 10-25 procent energieffektivisering 2014 till 2050
- 25 procent energieffektivisering 2014 till 2050
- 50 procent energieffektivisering 2013 till 2050

Elektrifiering

Elektrifiering är en gemensam nämnare i industrins omställning, även om processerna skiljer sig åt mellan branscher. Med ett helt förnybart elsystem kommer el vara den mest hållbara energibäraren även inom industrin. Där det finns ett val mellan elektrifiering och biobränsle i omställningen bör alltså elektrifiering premieras. Ett sådant exempel finns inom cementindustrin, där Cementa undersöker möjligheten till elektrifiering av ugnar. I ett sådant fall skulle elanvändningen uppgå till 4-5 TWh, istället för motsvarande mängd biobränslen (Sweco, 2019).

Exempel på elektrifiering från andra industrier finns bland annat inom gruv- och mineralnäringen, där den fossila användningen i brytningsstegen huvudsakligen kan lösas genom elektrifiering. Detta är möjligt genom att samtliga arbetsmaskiner som används för gruvbrytning kan vara elektrifierade till 2045 (Sweco, 2019). Även inom raffinaderier skulle elektrifiering kunna ersätta naturgas i produktionen av vätgas.

Biobränslen

Där elektrifiering inte är möjligt behövs hållbara biobränslen för att ersätta fossila bränslen inom industrin. Bland annat antas biobränslen som bioolja eller träpellets ersätta fossila bränslen i massa-, papper- och träindustri och biobaserad gas ersätta fossila bränslen för värmning och värmebehandling inom stålindustrin (Sweco, 2019). En stor mängd bioenergi krävs också för att ersätta fossila råvaror i kemiindustrin.

HYBRIT

Ett exempel på en pågående omställning inom industrin är projektet HYBRIT, som syftar till att leverera fossilfritt stål i Sverige till 2035. Projektet är ett samarbete mellan SSAB, LKAB och Vattenfall och går ut på att utveckla en processteknik som använder väte för att reducera järnmalm till järn, vilket innebär att koldioxidutsläppen elimineras och biprodukten blir vatten. Elektrifiering av stålproduktionen skulle leda till ett ökat elbehov om 15 TWh (Jernkontoret, 2018). Eftersom vätgasen kan lagras under längre perioder är den höga användningen av vätgas för framtida fossilfri stålproduktion ett bra komplement i ett helt förnybart elsystem. Kostnadsstrukturen för vätgas, med dyr produktion och billig lagring, gör att stålindustrins elanvändning kan bidra med en direkt variationshantering genom att fylla ett stort vätgaslager (fyra dagar till en vecka) för att sedan tömma det under en kortare tid (två till

tre dagar) när elsystemet är belastat och elpriserna är höga (Göransson, 2018). På så sätt kan vätgasförsörjningen till stålindustrin ske med minimal påverkan på effekttoppen, trots en betydande elanvändning.

Stålproduktion står i dag för 10 procent av koldioxidutsläppen i Sverige och något mindre globalt.

6.3 Energianvändningen i den framtida industrisektorn

För att bedöma energianvändningen i framtidens industrisektor har Swecos kvantifiering av åtgärderna i klimatfärdplanerna använts som utgångspunkt. När samtliga färdplaner för fossilfrihet räknades samman för de granskade sektorerna blev den ökade årliga el- och biobränsleanvändningen 25 TWh respektive 18 TWh (Sweco, 2019), efter att elektrifiering har prioriterats framför biobränslen inom cementsektorn. I kvantifieringen har flera antaganden och avgränsningar gjorts. Bland annat har bibehållen produktion inom samtliga industrisektorer antagits. Sweco har också utelämnat åtgärder för mer effektivt resursutnyttjande och ökad energieffektivitet, eftersom dessa är komplexa att kvantifiera (Sweco, 2019).

För att industrin ska kunna bli en del av det hållbara energisystemet antas en effektivisering på 25 procent, motsvarande 1,25 procent av dagens nivå per år till 2040. Detta kan ske genom en kombination av energieffektivisering och ändrade produktionsprocesser, återvinning, urban mining, produktionsminskningar eller övergång till mer cirkulära system.

Energieffektivisering är i vissa fall en direkt följd av omställningen, till exempel inom stålproduktion. I dag används 5 826 kWh energi för att producera ett ton stål i Sverige och efter HYBRIT beräknas 4 090 kWh energi behövas, motsvarande en effektivisering på 30 procent (HYBRIT, 2018).

I dag används 56 TWh bioenergi, 50 TWh el och 3,4 TWh fjärrvärme inom industrin. Dessutom används 34 TWh fossil energi, som förväntas ersättas av ovanstående siffror för el och biobränsle. Efter effektiviseringen på 25 procent blir energianvändningen i framtidens industri sektor 55 TWh bioenergi, 56 TWh el och 2,6 TWh fjärrvärme. Totalt minskar energianvändningen i industrisektorn från 143 TWh till 114 TWh, vilket är precis under den lägsta nivån i Energimyndighetens explorativa scenarier (Energimyndigheten, 2016b). Skillnaden består i förändrade konsumtions- och produktionsmönster och ett mer resurseffektivt samhälle.

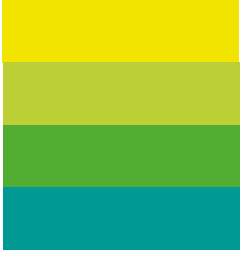
Energieffektiviseringen inom industrisektorn gör att elanvändningen år 2040 endast ökar med 6 TWh el, vilket är min-

dre än den väntade elanvändningen för vätgasproduktion. Eftersom vätgas kan lagras i längre perioder påverkar inte vätgasproduktion effekttoppen. Industrisektorns bidrag till effekttoppen bedöms därför kunna minska till 2040 jämfört med i dag. Om vätgasproduktionen för industrin kräver 15 TWh kvarstår 41 TWh el som används direkt inom industrin, vilket är en minskning med 9 TWh jämfört med i dag. Om den skulle användas löpande under hela året, för ett försiktigt antagande, skulle det minska industrins bidrag till effekttoppen med 1 000 MW.

För att den antagna effektiviseringen ska vara möjlig inom industrin krävs kraftiga stöd och styrmedel. Även om effektivisering kan vara lönsamt på sikt kommer riktade stöd behövas för att möjliggöra industrisektorns fortsatta omställning.



Foto: Ann-Margrethe Iseklint



Framtidens energisystem

7

Förändringen av energisystemet har börjat men det är långt kvar innan det är hållbart. I det här sammanfattande kapitlet presenteras det nya energipusslet och hur det går ihop, bit för bit. Slutsatserna från de olika sektorerna presenteras först var för sig och sedan som ett sammantaget system.

7.1 Elsystemet

För att undersöka hur elsystemet går ihop behöver timmarna med högst effektuttag och lägst vindkraftsproduktion studeras. Det högsta årliga effektuttaget i det svenska elsystemet har varit 25 020 MW i genomsnitt mellan 2012 och 2019, med den högsta effekten på 26 072 MW (Svenska kraftnät, 2019b). Den årliga effekttoppen uppskattas därför till 25 000 MW i dag.

Genom förändringarna som beskrivs i rapporten kommer såväl elproduktion som elanvändning ändras drastiskt. Produktionen kommer bli mer variabel, användningen mer flexibel och nya flexibilitetsre-

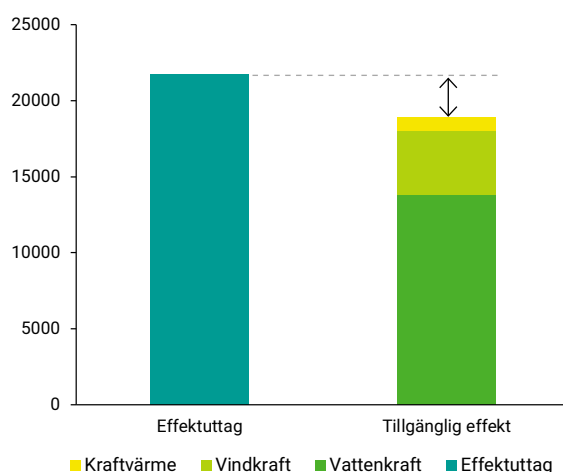
surser tillkommer. Jämfört med dagens högsta effekttopp tillkommer en ökning på 730 MW från transportsektorn, en minskning på 3 000 MW från bostäder och service och en minskning på 1 000 MW från industrin. Minskningarna är på grund av energieffektivisering, som inom bostäder och service får allra störst genomslag under effekttoppen.

Den nya beräknade effekttoppen på 21 730 MW är betydligt lägre än en del andra prognoser för det framtida effektuttaget, till exempel NEPP som i sitt underlag till färdplanen för fossilfri el antar en effekttopp på 31 600 MW till 2040 (NEPP, 2019). I ett status quo-system, utan politisk styrning, är det sannolikt att effekttoppen blir så hög, men den här rapporten visar att den inte behöver bli det. Vi får då ett energisystem som är både billigare och mer resurseffektivt, och undviker onödiga investeringar i såväl överföringskapacitet som spetslast som endast nyttjas enstaka timmar per år.

Den nya effekttoppen kan hanteras med förnybar elproduktion tillsammans med flera nya flexibilitetsresurser. Som Figur 24 visar är den tillgängliga elproduktionen otillräcklig under ovanstående förutsättningar, med maximalt effektuttag och minimal vindkraftsproduktion. Potentialen för flexibilitetsresurserna är dock långt högre än de 2 800 MW som saknas. När flexibilitetsresurserna inkluderas, i Figur 25, är situationen en helt annan, med en teoretisk överskottseffekt på 77 000 MW.

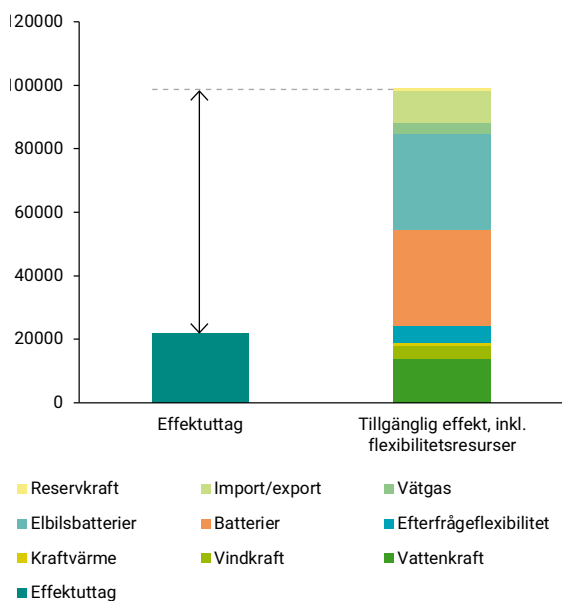
Alla dessa flexibilitetsresurser kommer inte att realiseras och endast ett fåtal kommer sannolikt nå sin fulla potential, men figuren visar tydligt att de med goda marginaler helt kan motverka risken för effektbrist. Det skulle räcka om 3,5 procent av flexibilitetsresurserna på 80 100 MW aktiverades för att hela effektbehovet skulle kunna mötas. Av flexibilitets-

Effektuttag och tillgänglig effekt, årets kallaste timme, MW



Figur 24. Effektuttag och tillgänglig effekt för årets mest ansträngda vintertimme, med hög elanvändning och låg vindkraftsproduktion. Vindkraften har en tillgänglighet på 16 procent, vattenkraften 85 procent och kraftvärmens 90 procent. Pilen visar hur mycket effekt som saknas om bara användning och produktion tas i beaktan. Underskottet, innan flexibilitetsresurser tagits i beaktan, är 2 800 MW.

Effektuttag och tillgänglig effekt, inklusive flexibilitetsresurser, årets kallaste timme, MW



Figur 25. Effektuttag och tillgänglig effekt, inklusive samtliga flexibilitetsresurser, för årets mest ansträngda vintertimme. Den teoretiska överskottseffekten är 77 000 MW.

resurserna är import och export samt efterfrågeflexibilitet tillgängliga redan i dag utan vidare teknikutveckling. Endast dessa är mer än tillräckliga för att effektbehovet ska mötas.

För att effektuttaget ska mötas av elproduktion under den mest ansträngda vintertimmen skulle det räcka om 37 procent av vindkraften var tillgänglig, jämfört med 16 procent som antas i det mest ansträngda läget. Med vindkraft utspjutt i hela landet är det mer osannolikt med samma vindförhållanden överallt och produktion kan därför möta efterfrågan vid fler tillfällen än om vindkraften är koncentrerad i vissa områden.

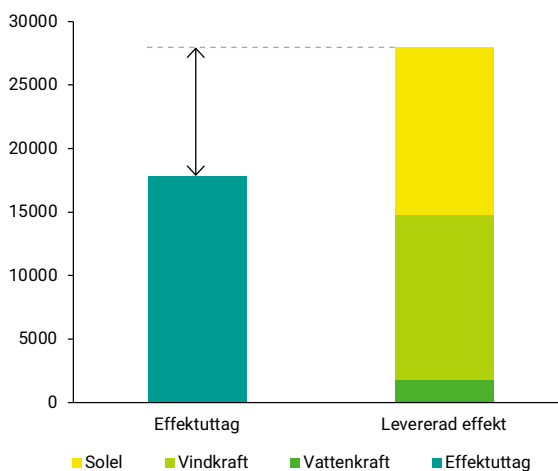
I ett system med mycket solex kan nya utmaningar uppstå på sommartid, när det finns en stor tillgång på el men låg efterfrågan. I dag är det lägsta effektuttaget på dagtid runt 11 000 MW, vilket uppstår på varma dagar under semestertider (Svenska kraftnät, 2019b). I systemet 2040 väntas elanvändningen öka kraftigt under låg-

pristider, genom elbilsladdning, vätgasproduktion, elektrifiering av industriella processer och värmepumpar i fjärrvärmesystemet. Om den ökade elanvändningen inom transportsektorn sker löpande dagtid är det ökade effektuttaget 3 300 MW.

Eftersom den ansträngda situationen på sommaren medför låga priser kan vätgasproduktionen antas vara maximerad, vilket skulle kunna öka effektuttaget med 7 000 MW. Dagen med lägst effektuttag infaller dock under semestertid och det är sannolikt att industrins bidrag inte kan maximeras. Om hälften användes blir det totala ökade effektuttaget från transport- och industrisektorn 6 800 MW. Det totala effektuttaget och levererad effekt kan ses i Figur 26.

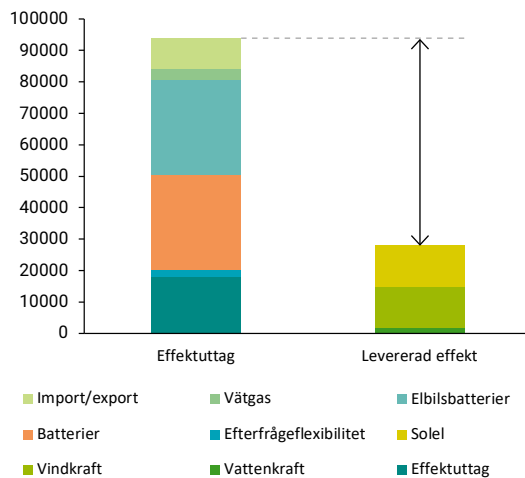
På sommaren är det relevant att prata om levererad effekt istället för tillgänglig effekt, eftersom utmaningen ligger i för hög, snarare än för låg, elproduktion. För att undersöka ett maximalt ansträngt system antar vi en tillgänglighet på 50 procent för vindkraft och 80 procent för

Effektuttag och levererad effekt, solig sommardag, MW



Figur 26. Effektuttag och levererad effekt en ansträngd sommardag, med låg elanvändning och hög solexproduktion. Vattenkraften levererar 1 800 MW, vindkraften har en tillgänglighet på 50 procent och solexen en tillgänglighet på 80 procent. Överskottseffekten är 10 100 MW.

Effektuttag, inklusive flexibilitetsresurser, och levererad effekt, solig sommardag, MW



Figur 27. Effektuttag inklusive flexibilitetsresurser och levererad effekt en ansträngd sommardag. Det tidigare överskottet är nu ersatt med ett teoretiskt underskott på 66 000 MW.

solel, även om det är osannolikt att dessa inträffar samtidigt. Då uppstår ett produktionsöverskott på 10 100 MW, något mer än vad som kan exporteras, och flexibilitetsresurser behövs för att öka uttaget. Om alla flexibilitetsresurser skulle aktiveras uppstår istället ett teoretiskt underskott på 66 000 MW, som kan ses i Figur 27.

Figuren visar tydligt att flexibilitetsresurserna räcker mer än väl för att absorbera den levererade effekten. Även här är det osannolikt att alla flexibilitetsresurser finns tillgängliga, och av flexibilitetsresurserna på 77 200 MW skulle det räcka att 13 procent aktiverades för att absorbera hela överskottet. El kan dessutom absorberas genom värmepumpar anslutna till fjärrvärmesystemet, som inte är inkluderade som flexibilitetsresurser. Med ett allt varmare klimat är det också sannolikt att elanvändningen ökar dagtid på sommaren för att kyla ner bostäder och fastigheter, men det kvantifieras inte i den här analysen.

Med resterande kärnkraft i systemet skulle situationen på sommaren bli än

mer pressad, eftersom kärnkraft inte heller är en resurs som kan anpassas efter behov. På vintern skulle den kunna bidra med en jämn produktion, men som figurerna visar kan den helt ersättas av kraftigt utbyggd vindkraft och flexibilitetsresurser. Att hävda att kärnkraft är ett nödvändigt inslag i det svenska elsystemet även på sikt är alltså rent felaktigt. Elsystemet kan mer än väl tillgodoses med helt förnybar produktion.

7.2 Fjärrvärmesystemet

Fjärrvärmesystemet är något mindre 2040 än vad det är i dag, tack vare energieffektivisering inom bostäder och service samt inom industrin. Även här har det skett en stor omställning på produktionssidan, där en stor del av kraftvärmen har ersatts av spillvärme, värmepumpar och solvärme som möjliggörs genom storskaliga energilager i fjärrvärmesystemen. Detta bidrar till att minska trycket på de begränsade bioresurserna, som är svårare att byta ut inom andra sektorer som transporter och industri, och minskar samtidigt klimatpåverkan från fjärrvärmesektorn. Samtidigt gör det att omvandlingsförlusterna inom fjärrvärmesystemet minskar.

7.3 Biobränslen

En begränsning i det hållbara energisystemet är den knappa tillgången på hållbara biobränslen med låg klimatpåverkan. Biobränslen lyfts ofta som en enkel lösning för att ersätta alla fossila bränslen. Om hållbara biobränslen fanns i överflöd skulle det kunna stämma. I själva verket är det endast en del av alla biobränslen som Naturskyddsföreningen anser vara hållbara och eftersom även hållbara biobränslen inte är klimatneutrala på kort sikt har uttaget anpassats efter behovet på 106 TWh till 2040. Eftersom samtliga biobränslen är inhemska 2040 sker förädlingen här, vilket innebär att omvandlingsförluster uppstår. Dessa uppskattas till 26 TWh

och uttaget av biomassa för energisyfte är 132 TWh.

Den hållbara mängden biobränslen har fördelats utifrån vilka användningsområden där de enligt rapporten anses vara mest nödvändiga, efter att energieffektivisering och elektrifiering har tagits i beaktan. Den största användningen av biobränslen 2040 sker inom industri och transporter. Även om 106 TWh bedöms som en hållbar användning till 2040 bör användningen minska ytterligare på sikt, allteftersom alternativ blir tillgängliga och ytterligare processer kan elektrifieras. Eftersom bioresurser för biobränslen ofta konkurrerar med annan användning och inte alltid kan ses som klimatneutrala på kort tid bör användningen minimeras på sikt.

7.4 Det hållbara, förnybara energisystemet

Sammanfattningsvis presenterar rapporten ett energisystem som går ihop, där efterfrågan kan mötas vid samtliga tillfällen och där livskvalitet och välbefinnande behålls samtidigt som de planetära gränserna inte överskrids. Hela energisystemet för 2040 kan ses i ett Sankey-diagram enligt Figur 28. Jämfört med 2017 har en energieffektivisering åstadkommit på 252 TWh och samtliga icke-förnybara bränslen har fasats ut.

Energianvändningen har minskat med 37 procent från 419 TWh till 266 TWh. Elproduktionen har ökat, medan värmeproduktionen och användningen av biobränslen har minskat något.

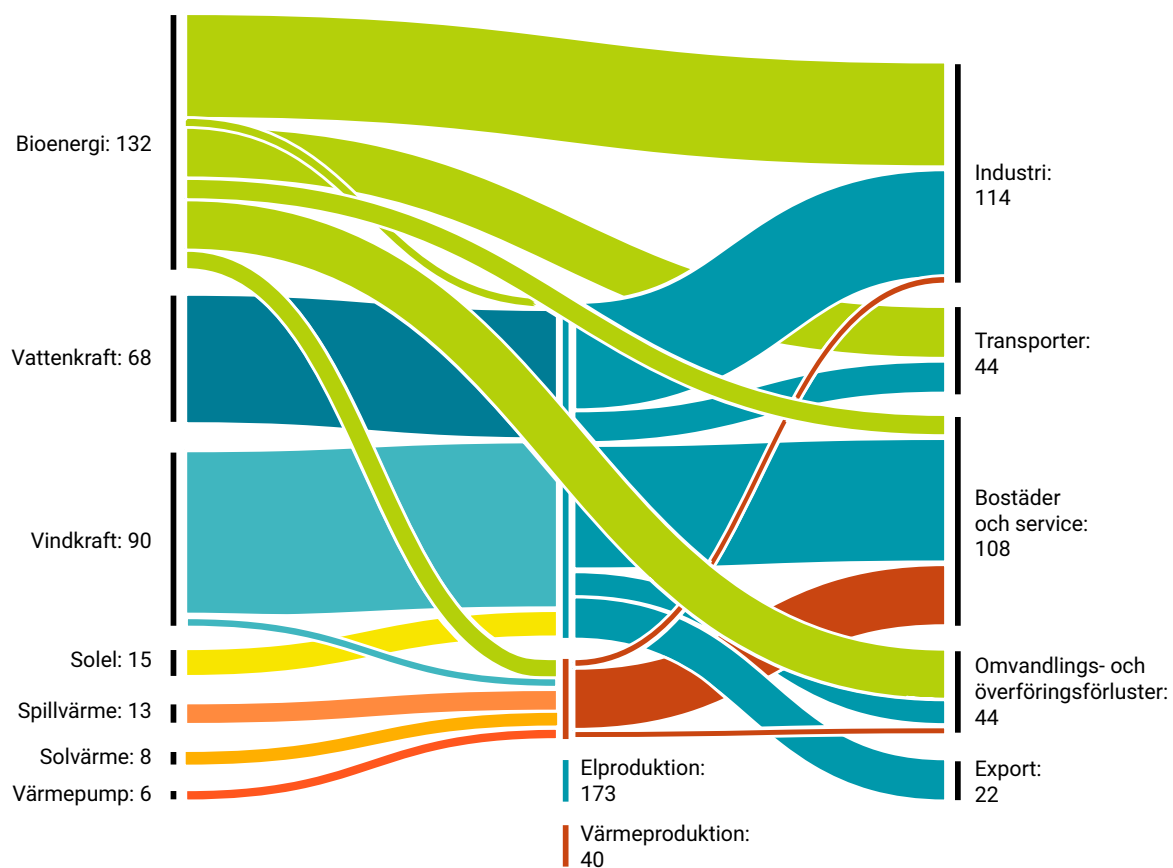
Omvandlingsförluster har uppstått från bioenergin, eftersom förädlingen av biobränslen sker i Sverige. Transportsektorn har effektiviserats till drygt en tredjedel av energianvändningen 2017. Nettoexporten av el har ökat från 19 TWh till 22 TWh, vilket bidrar till en ökad klimatnytta även utanför Sveriges gränser. Under en period fram tills kärnkraften avveck-

las kommer nettoexporten vara ännu högre, vilket medför ytterligare klimatnytta. Desto större nettoexport i närtid, innan resten av Europas elmix ställer om till förnybart, desto större klimatnytta skapas.

I IPCC:s specialrapport om 1,5 graders uppvärmning lyfts energieffektivisering som avgörande för att begränsa uppvärmningen och de efterlyser "aggressiva" styrmedel för energieffektivisering (IPCC, 2018). I IPCC:s enda scenario som inte gör sig beroende av ännu oprövade tekniker för koldioxidinfångning och -lagring för att nå 1,5-gradersmålet krävs en minskning av total energianvändning på 15 procent till 2030 och 32 procent till 2050 (IPCC, 2018). Energianvändningen per capita i Sverige är bland världens högsta och minskningen behöver vara större än IPCC:s krav. Rapportens minskning av energianvändning med 37 procent bedöms därför vara i linje med IPCC:s scenario.

Rapporten visar att ett hållbart, helt förnybart energisystem till 2040 är möjligt. IPCC visar att det är nödvändigt. Omställningen kommer dock inte ske av sig själv – med några få undantag kommer allt som rapporten beskriver kräva politiska styrmedel och modiga beslut i näringslivet. En verkligt styrande politik krävs för energi- och transporteffektivisering, flexibilitetsresurser och utfasning av fossila bränslen till 2030. Tydliga spelregler och ansvarsfördelning krävs för att alla aktörer ska kunna bidra till omställningen.

Energiöverenskommelsen och det klimatpolitiska ramverket är en bra början, men för att klimat- och energiomställningen ska genomföras krävs handling. Tiden är knapp och modiga beslut krävs nu. Den här rapporten visar vart vi är på väg, nu måste politiker och näringsliv se till att vi når fram.



Figur 28. Sankey-diagram över energisystemet 2040, i TWh. Diagrammet visar flöden av energi från insatt bränsle eller produktionslag, eventuell omvandling och slutlig användning. Den totala energianvändningen och -produktionen är 332 TWh, inklusive export och förluster. Energin som kommer till fjärrvärmesystemet via värmepumpar är uppdelat i 3 TWh el, här illustrerat direkt från vindkraft som det största produktionslaget, och 6 TWh värme från kringliggande värmekällor, som berggrund eller luft beroende på vilken värmepump som används. Det gör att elproduktionen ser ut att vara 173 TWh, istället för 176 TWh som är fallet. Spillvärmerna kommer delvis från industrin, men ses här som ett bränsle för att underlätta illustrationen.

Ordlista

Avlutar: den största bioenergi-källan från skogen, används enbart internt inom massaindustrin. Avlutar bildas när träflis kokas till pappersmassa.

Biobränsle: bränslen som har organiskt ursprung och kommer från växter som finns nu. Kan delas in i trädbränslen, avlutar, åkerbränslen och bränslen från avfall.

Bioenergi: energin som finns lagrad i biobränslen.

Cirkulär ekonomi: ekonomiska modeller som syftar till kretslopp, genom att återanvända resurser för att minska avfall och skapa mer värde.

Effekt: energi per tidsenhet. Mäts i enheten watt (W), där 1 MW = 1 000 W. Om en watt används under en timme är energi-användningen 1 wattimme (Wh).

Effektbrist: en situation när elproduktionen, inklusive import, är lägre än efterfrågan på el. För att effektbrist ska uppstå krävs väldigt hög elanvändning, ofta på grund av extremt kallt väder, och låg tillgång på elproduktion och importmöjlighet.

Effekttopp: det högsta effektuttaget som uppstår i elsystemet, till exempel under ett år. Det är den sammantagna elanvändningen under ett visst tillfälle för alla elanvändare. Eftersom elproduktion och elanvändning alltid måste vara i balans används effekttoppen för att dimensionera hela elsystemet.

Efterfrågefleksibilitet: en frivillig ändring av efterfrågad elektricitet från elnätet under kortare eller längre period, till följd av någon typ av incitament. Genom att använda efterfrågefleksibilitet kan elan-

vändningen anpassas efter elproduktionen, istället för att elproduktionen alltid anpassas efter elanvändningen.

Elektrobränslen: syntetiska bränslen från vattenelektrolys och infångad koldioxid. Kan produceras när det finns elöverskott och användas av alla transportslag.

Energi: finns i många olika former, som el, värme och rörelse. Kan räknas ut som produkten av effekt och tid. Mäts i enheten Wh, där 1 TWh är 1 000 000 kWh och 1 kWh är 1 000 Wh.

Energisystem: innefattar all omvandling, distribution och användning av energi, som el- och värmeproduktion, biobränslen, energianvändning inom samtliga sektorer och överförings- och omvandlingsförluster.

Energibärare: något som används för att lagra och förflytta energi, till exempel el eller biobränsle.

Energieffektivisering: minskad energi-användning, antingen genom en mer effektiv process, till exempel en elbil istället för en förbränningsmotor, eller en ändring i användning, till exempel en lägre körhastighet.

Flexibilitetsresurser: flexibilitetsresurser kan användas för att hantera variationer i elsystemet, exempelvis ökad elanvändning eller minskad vattenkraftsproduktion. Flexibilitetsresurserna kan flytta elanvändning från en tidpunkt till en annan, som efterfrågefleksibilitet, absorbera överskottsel, som vätgasproduktion, eller bidra med mer el, som inmatning från elbilsbatterier.

Fossila bränslen: energibärare som består av organiska kol- och väte-föreningar, som kol, olja och fossilgas (även kallad naturgas).

GROT: grenar, ris och toppar, biomassa som kan tas ut vid skogsavverkning. GROT kan flisas för att producera el och värme i kraftvärmeverk.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, FN:s klimatpanel. IPCC:s uppdrag är att förse världen med ett tydligt vetenskapligt perspektiv över det rådande kunskapsläget vad gäller klimatförändring och dess miljömässiga och sociala konsekvenser.

Kolförråd: kol som lagras i till exempel långlivade skogsprodukter, levande träd eller i dött organiskt material och jorden. Så länge kolet är bundet bidrar det inte till växthuseffekten och kan därför ses som ett förråd. Förändringen av kolförråd under ett år definieras som kolsänka i klimatbokföringen.

Kolsänka: ett växande kolförråd, till exempel växande vegetation eller mark. Genom att fånga upp kol bidrar kolsänkorna till att koldioxidkoncentrationen i atmosfären minskar. Motsatsen till en kolsänka är ett utsläpp.

Kraftvärmeverk: en anläggning som förbränner fossila bränslen eller biobränslen för att producera el och värme.

LULUCF: land use, land use change and forestry (markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk), benämningen för markanvändningssektorn i klimatbokföringen. Markanvändningssektorn (LULUCF) kan bidra till upptag eller utsläpp av växthusgaser genom förändringar i kolförråden.

MW: megawatt.
1 MW = 1 000 kW = 1 000 000 W.

Nettoexport: hur mycket mer el som exporteras än importeras under ett år. Till exempel hade Sverige en nettoexport på 19 TWh 2017, vilket betyder att 19 TWh

mer el exporterades än importerades under året.

Nollpriser: när elproduktionen är högre än elanvändningen inklusive export går elpriset ner till noll och blir i förlängningen negativt. Elproducenter som producerar el de tiderna får inte någon ersättning och om de uppstår ofta gör det att investeringarna i elproduktionen inte är lönsamma.

Omvandlings- och överföringsförluster: energi som förloras när energi omvandlas från en form till en annan eller överförs från en plats till en annan. Sker både vid el-, värme- och biobränsleproduktion och vid överföring i transmissions-, distributions- och lokalnäten.

Reservkraft: strategisk reserv som Svenska kraftnät upphandlar för att garantera balans mellan elanvändning och elproduktion under mycket kalla vinterdagar. Reserven består av producenter med reservkraftanläggningar som kan producera mer el och elanvändare som kan minska sin elanvändning.

Sankey-diagram: diagram där energiflöden visas med hjälp av flödespilar vars storlek motsvarar energimängder. I rapporten används diagrammet för att illustrera det svenska energisystemet 2017 och det skisserade energisystemet 2040.

Spillvärme: värme som har blivit över sedan en industriell process har blivit (termodynamiskt) optimerad. Överflödigt värme från till exempel industriella processer eller datahallar som kan användas i fjärrvärmesystemet.

Svängmassa: mekanisk tröghet i kraftsystemets roterande delar. Behövs i ett elsystem för att säkerställa balans mellan elproduktion och elanvändning vid alla tillfällen.

Säsongsvariation: både elanvändning och elproduktion kan variera under säsongen. Variabel elproduktion från till exempel sol eller vind varierar under både året och dagen beroende på väderförhållande. Elanvändningen varierar beroende på hur mycket el som behövs vid ett visst tillfälle, till exempel på grund av utomhustemperatur och tid på dygnet.

Tillgänglighet: hur mycket av installerad kapacitet som ett visst energislag kan producera vid ett visst tillfälle. Produktionslag som är styrbara, till exempel vattenkraft och kraftvärme har hög tillgänglighet, medan produktionslag som är variabla, till exempel vindkraft har lägre tillgänglighet.

TWh: terrawattimme.

1 TWh = 1 000 GWh = 1 000 000 MWh =
1 000 000 000 kWh = 1 000 000 000 000 Wh.

Variationshantering: anpassning av elanvändning eller elproduktion för att få en bättre matchning mellan de två. Exempel på variationshantering i ett helt förnybart elsystem är efterfrågefleksibilitet och vehicle to grid.

Vehicle to grid: tvåvägsladdning av elbilsbatterier, så att de kan laddas när det finns gott om el i elsystemet och sedan tömmas när det finns ett underskott. På så sätt kan de hjälpa till att balansera elsystemet.

Verkningsgrad: ett mått på hur effektiv en energiomvandlingsprocess är eller hur väl energin utnyttjas i en omvandling, till exempel i ett kraftvärmeverk.

Värmepump: en teknisk konstruktion som använder el för att överföra energi från en kall till en varm plats. En värmepump utvinner energi från till exempel marken, luften eller berggrunden för uppvärmning. Verkningsgraden i en värmepump kan därför vara flera hundra procent.

Litteraturförteckning

- 2030-sekretariatet.** (den 18 augusti 2019). *Indikatorer för fossiloberoende transporter år 2030*. Hämtat från <http://2030.miljobarometern.se/nationella-indikatorer/beteendet/resestrackor-i-olika-transportslag-b3a/> den 3 september 2019
- Besmä.** (2019). *Förstudie: Potential för energieffektivisering i småhus*. Stockholm.
- Black-Samuelsson S, E. H.** (2017). *Bioenergi på rätt sätt. Skogsstyrelsens rapport 2017/10 av Skogsstyrelsen, Energimyndigheten, Jordbruksverket och Naturvårdsverket*. Skogsstyrelsen.
- Blomqvist, P., & Unger, T.** (2018). *Teknik-ekonomisk kostnadsbedömning av solceller i Sverige*. Profu.
- Börjesson, P.** (2016). *Potential för ökad tillförsel av inhemsk biomassa i en växande svensk bioekonomi*.
- Central Intelligence Agency.** (2019). *The World Factbook*. Hämtat från <https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/> den 21 augusti 2019
- de Jong, J., Akselsson, C., Egnell, G., Löfgren, S., & Olsson, B. A.** (2017). *Realizing the energy potential of forest biomass in Sweden – How much is environmentally sustainable? Forest Ecology and Management, Vol. 383, 3-16*.
- DNV GL; Pöyry Management Consulting.** (2019). *Kostnader i stromnettet - vinster ved koordinert ladning av elbiler. No 51/2019*.
- Emobility.** (2019). *Elbilens andra fördelar*. Hämtat från <http://emobility.se/startside/elfordon/elbilens-andra-fordelar/> den 30 augusti 2019
- Energi- och klimatrådgivningen.** (2016). *Res klimatsmart*. Hämtat från <https://energiradgivningen.se/klimat/res-klimatsmart> den 18 oktober 2019
- Energiforsk.** (2015). *Synthetic inertia to improve frequency stability and how often it is needed (Report 2015:224)*.
- Energikommissionen.** (2017) *Kraftsamling för framtidens energi. Betänkande av Energikommissionen. SOU 2017:2*.
- Energimarknadsinspektionen.** (2016). *Åtgärder för ökad efterfrågefleksibilitet i det svenska elsystemet (Ei R2016:15)*.
- Energimarknadsinspektionen.** (2017). *Reduced capacity on German-Nordic interconnectors. Regulatory framework and socioeconomic effects on the European electricity market*.
- Energimyndigheten.** (2008). *Styrmedel för industriell spillvärme*.
- Energimyndigheten.** (2016a). *Vad styr och vad bromsar solen i Sverige?*
- Energimyndigheten.** (2016b). *Fyra framtider - Energisystemet efter 2020*.
- Energimyndigheten.** (2017). *Sjöfartens omställning till fossilfrihet. ER 2017:10*.
- Energimyndigheten.** (2018). *Vattenkraft*. Hämtat från <http://www.energimyndigheten.se/fornybart/vattenkraft/> den 25 mars 2019
- Energimyndigheten.** (2018a). *Vägen till ett 100 procent förnybart elsystem. Delrapport 1: Framtidens elsystem och Sveriges förutsättningar (ER 2018:16)*.
- Energimyndigheten.** (2018b). *Nätanslutna solcellsanläggningar 2017 - Statistik, analys och prognoser. ER 2018:22*.

Energimyndigheten. (2019a). *Energiläget i siffror*. Hämtat från <http://www.energi-myndigheten.se/statistik/energilaget/>

Energimyndigheten. (2019b). *Kortsiktsprognos sommaren 2019 - Energianvändning och energitillförsel år 2018-2022*.

Energimyndigheten. (2019c). *100 procent förnybar el. Delrapport 2 - Scenarier, vägval och utmaningar*.

Energimyndigheten. (2019d). *Vindkraftsstatistik 2018 - Nationell-, länsvis- och kommunal statistik (ER 2019:10)*.

Energimyndigheten. (2019e). *Scenarier över Sveriges energisystem 2018. ER 2019:07*.

Energimyndigheten, Svenska kraftnät & Havs- och vattenmyndigheten. (2016). *Vattenkraftens reglerbidrag och värde för elsystemet. ER 2016:11*.

EUR-Lex. (2018). Regulation (EU) 2018/841 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework.

European Commission. (2019). *Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions: Energy prices and costs in Europe*.

Everoze. (2017). *Batterier: Beyond the spin. The dawning era of digital inertia on the Island of Ireland*.

Fjärrens. (2013). *Säsongslagrad solvärme via fjärrvärmesystemet. Rapport 2013:4*.

Fossilfritt Sverige. (2018a). *Färdplan för fossilfri konkurrenskraft: Uppvärmningsbranschen*.

Fossilfritt Sverige. (2018b). *Färdplan för fossilfri konkurrenskraft: Sjöfartsnäringen*.

Försvarmakten. (2019). *Vindkraftverk och andra höga objekt*. Hämtat från <https://www.forsvarsmakten.se/sv/information-och-fakta/forsvarsmakten-i-samhället/samhallsplanering/vindkraft/> den 23 oktober 2019

Grahn, M., Taljegård, M., Ehnberg, J., & Karlsson, S. (2014). *Nyttiggörande av överskottsel: Fallet elektrobränslen*. i B. Sandén, & M. Odenberger, *Perspektiv på förnybar energi*.

Göransson, L. (2018). *Från timmar till årtionden - hur påverkar variationer i last och produktion sammansättningen av Sveriges och Europas framtida elsystem?*

HYBRIT. (2018). *Summary of findings from HYBRIT pre-feasibility study 2016-2017*.

IPBES. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem service*.

IPCC. (2018). *Special report: Global warming of 1.5 C*.

IPCC. (2019). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Geneva: IPCC.

IVA. (2016). *Svängmassa i elsystemet - En underlagsstudie (IVA-projektet Vägval el)*. Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien.

IVA. (2019). *Så klarar det svenska energisystemet klimatmålen - En delrapport inom IVAs projekt Vägval för klimatet*.

- Jernkontoret.** (2018). *Klimatfärdplan - För en fossilfri och konkurrenskraftig stålin-
dustri i Sverige.*
- Klimatpolitiska rådet.** (2019). *2019
Klimatpolitiska rådets rapport.*
- Kloo, H., & Larsson, M.-O.** (2019).
*Jämförelse av tekniker för klimatsmarta
tungta godstransporter.*
- Koffi, B., Cerutti, A., Duerr, M. Iancu, A.,
Kona, A., & Janssens-Maenhout, G.** (2017).
*CoM Default Emission Factors for the
Member States of the European Union:
Dataset Version 2017.* European
Commission, Joint Research Centre (JRC).
- Naturskyddsföreningen.** (2014). *Vindkraft
på rätt plats.*
- Naturskyddsföreningen.** (2019). *Från
mångfald till enfald - en vitbok över den
svenska modellen för skogsbruk.*
- Naturvårdsverket.** (2011). *Vindkraftens
effekter på fåglar och fladdermöss - en
syntesrapport.*
- Naturvårdsverket.** (2017a). *Vindkraftens
påverkan på fåglar och fladdermöss.*
- Naturvårdsverket.** (2017b).
Kontrollprogram för vindkraft i vatten.
- Naturvårdsverket.** (2017c). *Kommunal till-
styrkan av vindkraft - Hur fungerar det idag?*
- Naturvårdsverket.** (2018a). *Territoriella
utsläpp och upptag av växthusgaser.*
Hämtat från <http://www.naturvardsverket.se/klimatutslapp> den 12 augusti 2019
- Naturvårdsverket.** (2018b). *Utsläpp av
växthusgaser från utrikes sjöfart och flyg.*
Hämtat från [https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/
Vaxthusgaser-utslapp-fran-utrikes-
sjofart-och-flyg/](https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-utrikes-sjofart-och-flyg/) den 30 september 2019
- Naturvårdsverket.** (2018c). *Utsläpp av
växthusgaser från uppvärmning av bostä-
der och lokaler.* Hämtat från [http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/
Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-
fran-uppvarmning-av-bostader-och-lo-
kaler/](http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-uppvarmning-av-bostader-och-lokaler/) den 14 augusti 2019
- Naturvårdsverket.** (2018d). *Vindkraft och
renar - En kunskapssammanställning.*
- Naturvårdsverket.** (2018e). *Utsläpp av
växthusgaser från industrin.* Hämtat från
[https://www.naturvardsverket.se/Sa-
mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-
utslapp-fran-industrin/](https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-industrin/) den 20 augusti
2019
- Naturvårdsverket.** (2019a).
Persontransporter per transportslag.
Hämtat från [https://www.naturvardsver-
ket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/
Persontransporter-per-transportslag/](https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Persontransporter-per-transportslag/)
den 18 september 2019
- Naturvårdsverket.** (2019b).
Godstransporter per transportslag.
Hämtat från [https://www.naturvardsver-
ket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/
Godstransporter-per-transportslag/](https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Godstransporter-per-transportslag/) den
18 september 2019
- Naturvårdsverket.** (2019c). *Utsläpp från
växthusgaser från inrikes transporter.*
Hämtat från [https://www.naturvardsver-
ket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/
Vaxthusgaser-utslapp-fran-inrikes-
transporter/](https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-inrikes-transporter/) den 18 september 2019
- NEPP.** (2015). *Scenarier för den framtida
elanvändningen, En underlagsstudie
(IVA-projektet Vägval el).*
- NEPP.** (2019). *Färdplan fossilfri el - ana-
lysunderlag. En analys av scenarier med
en kraftigt ökad elanvändning.*

- Nielsen, J. E., & Sorensen, P. A.** (2017). Renewable district heating and cooling technologies with and without seasonal storage. i G. Stryi-Hipp, *Renewable heating and cooling - Technologies and applications* (ss. 197-220).
- Nätverket Vindkraftens klimatnytta.** (2019). *Svensk vindkraft kan minska klimatutsläppen med 50 procent.*
- OVO Energy; Imperial College London.** (2018). *Blueprint for a post-carbon society: How residential flexibility is key to decarbonising power, heat and transport.*
- PlanEnergi.** (2018). *Solar district heating trends and possibilities - Characteristics of ground-mounted systems for screening of land use requirements and feasibility.* IEA SHC.
- Power Circle.** (2016). *Slutrapport - Potentialen för lokala energilager i distribution.*
- Power Circle.** (2018). *Elbilsläget 2018.*
- PowerCircle.** (2019). *Batteriers miljöpåverkan - Faktablad från PowerCircle.*
- Profu.** (2018). *Värmepumpars påverkan på effektbalansen - Idag och i framtiden.*
- Rasmussen, J.** (2016). *The investment process for capital investments - The case of industrial energy-efficiency investments and non-energy benefits.* Linköping universitet.
- Repo, A., Känkänen, R., Tuovinen, J.-P., Antikainen, R., Tuomi, M., Vanhala, P., o.a.** (2012). Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. *Global Change Biology Bioenergy*, ss. 202-212.
- SCB.** (2018). *Tillförsel och användning av el.* Hämtat från <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/energi/tillforsel-och-anvandning-av-energi/arligen-energi-statistik-el-gas-och-fjarrvarme/pong/tabell-och-diagram/tillforsel-och-anvandning-av-el-gwh/> den 25 Mars 2019
- SCB.** (2019a). *Befolkningsprognos för Sverige.* Hämtat från <https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/manniskorna-i-sverige/befolkningsprognos-for-sverige/> den 17 september 2019
- SCB.** (2019b). *Fordonsstatistik januari 2006 till juli 2019.* Hämtat från <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/transporter-och-kommunikationer/vagtrafik/fordonsstatistik/> den 30 augusti 2019
- Schlömer, S. T.** (2014). 2014: Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. i O. R.-M. Edenhofer, *Climate Change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press.
- Smart Energy Transition.** (2018). *Clean district heating - how can it work?*
- Soimakallio, S.** (2014). Toward a more comprehensive greenhouse gas emissions assessment of biofuels: the case of forest-based fischer-tropsch diesel production in Finland. *Environment Science and Technology*, 48(5):3031-8.
- Solar district heating.** (2019). *Ranking list of European large scale solar heating plants.* Hämtat från <https://www.solar-district-heating.eu/en/plant-database/> den 16 september 2019
- SOMO.** (2016). *Cobalt blues - Environmental pollution and human rights violations in Katanga's copper and cobalt mines.*

- Statens offentliga utredningar.** (2013). *Fossilfrihet på väg - Del 1. Betänkande av utredningen om fossilfri fordonstrafik.*
- Statens offentliga utredningar.** (2017). *Brännheta skatter. Bör avfallsförbränning och utsläpp av kväveoxider från energi-produktion beskattas? SOU 2017:83.*
- Statens offentliga utredningar.** (2018). *Mindre aktörer i energilandskapet - förslag med effekt (SOU 2018:76).*
- Statens offentliga utredningar.** (2019). *Biojet för flyget SOU 2019:11.*
- Stendahl, J., Repo, A., & Liski, J.** (2017). *Climate impact assessments of forest bio-energy affected by decomposition modeling – comparison of the Q and Yasso models.* IEA Bioenergy.
- Sweco.** (2019). *Klimatneutral konkurrenskraft - Kvantifiering av åtgärder i klimatfärdplaner.*
- Swedavia.** (den 9 september 2019). *Swedavias trafikstatistik för augusti 2019.* Hämtat från <https://www.swedavia.se/om-swedavia/presskontakt/swedavias-trafikstatistik-for-augusti-2019/> den 23 september 2019
- Svensk Vindenergi.** (2018). *Försvarsmakten måste förbereda sig på mer vindkraft.* Hämtat från <https://svenskvindenergi.org/debattinlagg/forsvarsmakten-maste-forbereda-sig-pa-mer-vindkraft> den 23 oktober 2019
- Svenska kraftnät.** (2015). *Anpassning av elsystemet med en stor mängd förnybar elproduktion.*
- Svenska kraftnät.** (2019a). *Kraftbalansen på den svenska elmarknaden.*
- Svenska kraftnät.** (2019b). *Statistik.* Hämtat från Förbrukning och tillförsel per timme (i normaltids): <https://www.svk.se/aktorsportalen/elmarknad/statistik/?tab=document&limit=20&category=126&ort=date#documentx> den 29 september 2019
- Trafikanalys.** (2019). *Trafikarbete på svenska vägar.* Hämtat från Trafikarbete på svenska vägar 1990-2018: <https://www.trafa.se/vagtrafik/trafikarbete/> den 27 september 2019
- Trafikverket.** (2014a). *Resor till och från skolan.* Hämtat från <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/planera-person-och-godstransporter/Planera-persontransporter/Hallbart-resande/Resor-till-och-fran-skolan/> den 22 september 2019
- Trafikverket.** (2014b). *Trafikverkets kunskapsunderlag och klimatscenario för energieffektivisering och begränsad klimatpåverkan.*
- Trafikverket.** (2019). *Transportsektorns utsläpp.* Hämtat från Transportsektorns utsläpp av växthusgaser 1990-2017: <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/energi-och-klimat/Transportsektorns-utslapp/> den 27 september 2019
- Tufvesson, L., Lantz, M., & Börjesson, P.** (2013). *Environmental performance of biogas produced from industrial residues including competition with animal feed – life-cycle calculations according to different methodologies and standards.* *Journal of Cleaner Production*, Vol. 53: 214-223.
- Uppsala kommun.** (2015). *Underlagsrapport: Energisystem 2050 i Uppsala kommun (Underlag till arbetet med Översiktsplan för Uppsala kommun).*

Vindval. (2012). *Vindkraftens påverkan på landlevande däggdjur.*

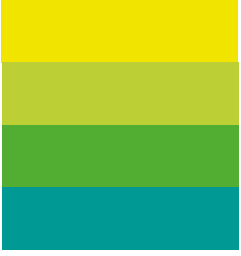
Volvo cars. (2019). *Framtiden är elektrisk.*
Hämtat från <https://www.volvocars.com/se/om-volvo/innovation/elektrifiering>
den 18 oktober 2019

World economic forum. (2017). *Batteries can be part of the fight against climate change - if we do these five things.*
Hämtat från <https://www.weforum.org/agenda/2017/11/battery-batteries-electric-cars-carbon-sustainable-power-energy/>
den 23 oktober 2019

World Economic Forum. (2019). *Fostering effective energy transition - 2019 edition.*

WSP. (2016). *Bedömningar och resonemang kring potential för energieffektivisering.*

Värmemarknad Sverige. (2014).
Värmemarknaden i Sverige - en samlad bild.



Bilagor

8

Bilaga 1:

Livscykelutsläpp av växthusgaser från elproduktion

Livscykelutsläpp av växthusgaser från elproduktion från olika tekniker (inklusive albedoeffekter), gram CO₂ eq/kWh

Energikällor för elproduktion	Minimum	Median	Maximum
Kolpulver	740	820	910
Gaskombi	410	490	650
Bioenergi - sameldning med fossilt	620	740	890
Bioenergi - renodlad	130	230	420
Geotermisk energi	6	38	79
Vattenkraft	1	24	2200
Kärnkraft	3,7	12	110
Koncentrerad termisk solkraft	8,8	27	63
Solceller - småskaliga anläggningar	26	41	60
Solceller - storskaliga anläggningar	18	48	180
Vindkraft på land	7	11	56
Vindkraft till havs	8	12	35

Tabell 5. Livscykelutsläpp av växthusgaser från elproduktion (Schlömer, 2014).

Bilaga 2:

Stoppområden för vindkraft i BraMiljöval

För att kunna godkännas inom ramarna för Bra Miljöval får vindkraftsanläggningar inte vara placerade inom områden i denna bilaga. Områdena är uppdelade i grupperna A, B och C.

Grupp A: Områden som är skyddade av lagstiftning i respektive land eller internationella konventioner

- Ramsarområden
- Natura 2000-områden
- Nationalparker
- Naturreservat
- Djur- och växtskyddsområden
- Naturvårdsområden
- Naturminnen
- Biotopskyddsområden
- Objekt i nationalparksplanen
- Områden med naturvårdsavtal
- Riksintresse obrutna fjäll
- Objekt med skydd för landskapsbild

Grupp B: Områden som ingår i nationella utredningar av särskild värdefull natur och som inte ingår i kategori A ovan

- Värdefulla hagmarker identifierade i Jordbruksverkets TUVAs-databas
- Objekt i den nationella myrskyddsplanen
- Statliga Naturskogar och Urskogsartade Skogar (SNUS-objekt) Sveaskogs ekoparker
- Nyckelbiotoper
- Objekt med naturvärde

Grupp C: Viktiga fågel- och fladdermusområden samt värdefulla skogsområden som inte ingår i kategori A eller B ovan

- Områden utpekade som viktiga fågelområden, IBA, av Birdlife International
- Viktiga flyttfågelområden, fågelrastplatser och fladdermusområden, som i dag inte utgör IBA-område. Dessa områden utses av Naturskyddsföreningen.
- Skyddsvärda skogsområden identifierade på Naturskyddsföreningens skogskarta.

Naturskyddsföreningen är en ideell miljöorganisation med kraft att förändra. Vi sprider kunskap, kartlägger miljöhot, skapar lösningar samt påverkar politiker och myndigheter såväl nationellt som internationellt. Föreningen har ca 226 000 medlemmar och finns i lokalföreningar och länsförbund över hela landet. Välkommen att bli medlem, skänka en gåva eller bli företagssponsor.

PG 90 19 09-2

Åsögatan 115
Box 4625, SE-116 91
Stockholm, Sweden

+46 (0)8 702 65 00
www.naturskyddsforeningen.se



Naturskyddsföreningen