

Om vätgas och dess roll i elsystemet

Syntesrapport från IVAs projekt
Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle

TEMA :
KLIMAT - RESURSER - ENERGI

JUNI 2022



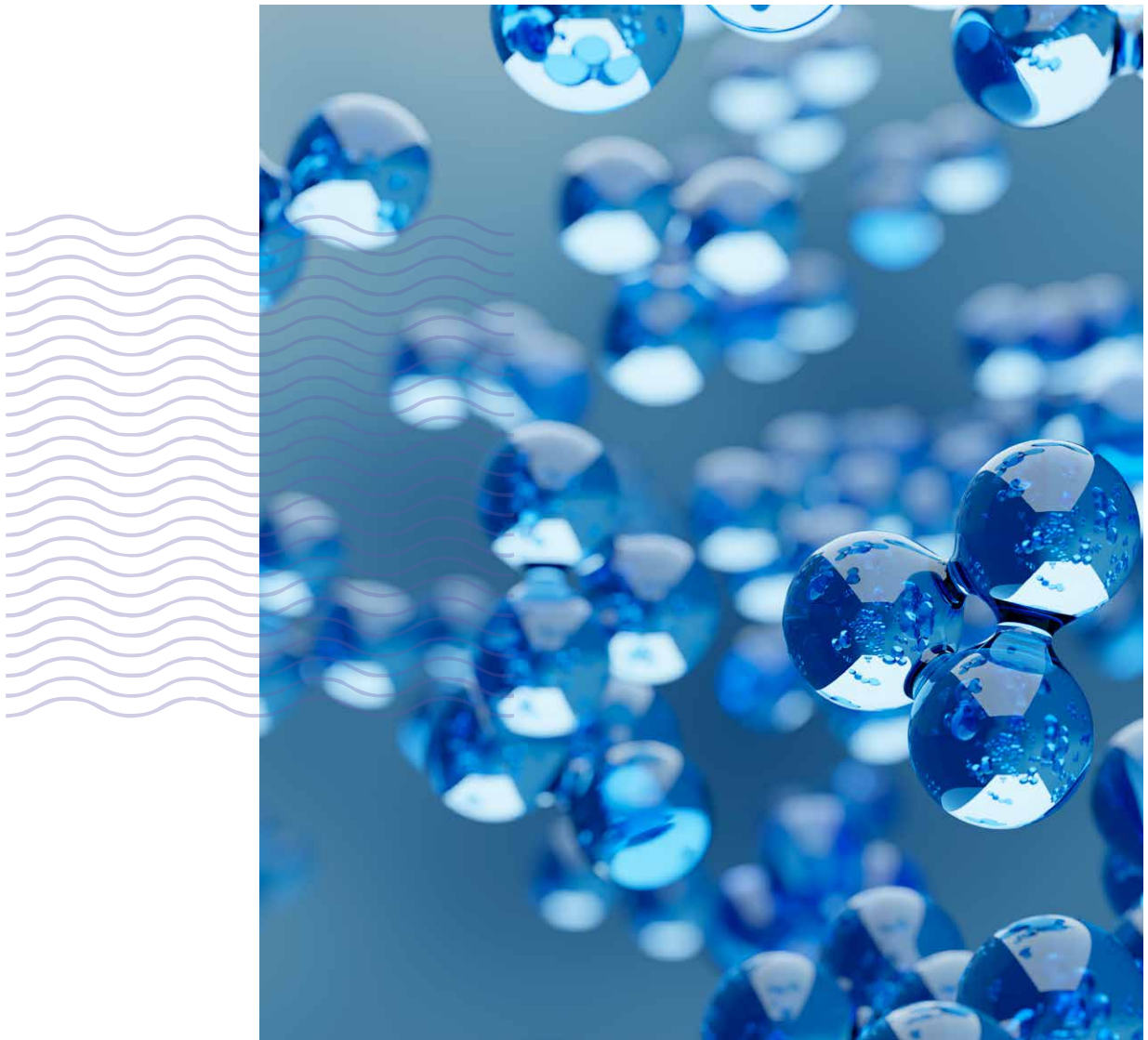
Kungl. Ingenjörsvetenskaps
Akademien

Innehåll

Förord	4
Observationer kring vätgasens roll i energisystemet	6
Rekommendationer för utveckling av en vätgasmarknad	12
Bakgrund	16
Introduktion till vätgasens roll i elsystemet	18
Drivkrafter för utveckling av en vätgasmarknad	22
Det finns en premiemarknad för fossilfritt stål	26
Förväntad efterfrågan på vätgas	28
Metoder för produktion, lagring och transport av vätgas	30
Kan försäljning av biprodukterna syrgas och spillvärme bidra till lönsam vätgasproduktion?	34
Lagring och transport av vätgas	36
Hur påverkar vätgasen elsystemet?	40
Vätgasens bidrag till flexibilitet i elsystemet	41
Hybrids påverkan på elsystemet	45
Produktion av el med vätgas för balansering av elsystemet	47
Alternativ till vätgas för flexibilitet i elsystemet	50
Kommer tillgången på el att kunna möta det ökade elbehovet?	51
Vad kännetecknar ett elsystem med en stor andel vindkraft?	52
Hur mycket el kan behöva lagras?	54
Olika strategier för vätgasproduktion	60
Kontinuerlig produktion av vätgas med el från nätet	61
Variabel produktion av vätgas	61
Produktion av vätgas i dedikerad vindkraftpark	63
Sverige bör vara mer aktiva i EU	64
Bilagor	68

FAKTARUTOR

Dagens elanvändning.....	19
Elproduktion.....	20
Elnät och elområden.....	21
Dagens produktion och användning av vätgas.....	23
Basfakta om vätgas.....	24
Säkerhetsaspekter.....	24
Elektrobränslen.....	25
Tekniker för framställning av vätgas.....	31
Ångreformering.....	31
Förgasning eller partiell oxidation.....	32
Elektrolys.....	32
Högtemperaturelektrolys.....	32
Miljöpåverkan vid vätgasproduktion med elektrolysörer.....	35
Elanvändning.....	35
Vattenanvändning.....	35
Användning av främmande och sällsynta material.....	35
Vätgasläckage kan bidra till ökad växthuseffekt.....	35
Lagring av vätgas.....	36
Transport av vätgas.....	36
Kostnader.....	37
Kostnad för elektrolys.....	37
Kostnaden för lager.....	38
Kostnader för transport av vätgas.....	38
Värdet av vätgasen.....	39
Omställningen av elsystemet.....	41
Hur mycket kommer el- och effektbehovet att öka?.....	41
Ökad elproduktion och andel vindkraft.....	44
Vad kännetecknar ett leveranssäkert elsystem?.....	47
Vad finns det för andra möjligheter att lagra el?.....	47
Hybrid.....	47
Flexibilitet i vätgasbaserade stålproduktionen – exempel från modelleringsstudie.....	49
Vad kan vara begränsande för utbyggnad av vindkraft?.....	53
Vilka faktorer påverkar elpriset?.....	54
Vindkraftens variation påverkar elpriset.....	56
Kostnader för ny elproduktion.....	58
Kort om styrmedel för vätgas.....	65
Om definitioner och additionalitetskrav i EU-rätten.....	66
EU-lagstiftning med bäring på Vätgas.....	66



Förord

»Rapporten analyserar hur en storskalig produktion av vätgas påverkar elsystemet.«

Intresset för vätgas har ökat kraftigt under senare år. Fossilfri vätgas ses som en möjlighet att fasa ut fossila bränslen och nå klimatmålen. Det gäller dels där vätgas kan användas som råvara, dels för processer och verksamheter där direktelektrifiering är svårt. I Sverige tog vätgasintresset fart genom några stora industrisatsningar i Norrland så sent som 2016 för att ersätta kol med vätgas för framställning av fossilfritt stål. Fler branscher tittar nu på möjligheten att använda fossilfri vätgas i sina processer eller som drivmedel i fordon. Eftersom såväl Sveriges som EUs klimatpolitik samt de flesta industrisatsningar pekar på att vätgasen främst är tänkt att framställas genom vattenelektrolys kommer en storskalig vätgasproduktion även att kräva stora mängder el och därmed ha en stor påverkan på elsystemet.

Det har under de senaste åren publicerats ett flertal rapporter inom vätgasområdet, internationellt och i Sverige. EU tog fram en vätgasstrategi 2020, Fossilfritt Sverige lanserade en vätgasstrategi i januari 2021 och Energimyndigheten presenterade sitt förslag på nationell vätgasstrategi i november 2021. IVA vill bidra med underlag genom att fokusera på några frågeställningar där en fördjupad analys kan behövas. Därför startade IVA under våren 2021 projektet *Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle*.

Syftet med projektet är att belysa på vilket sätt vätgas kan bidra till ökad effektivitet och hållbarhet i det svenska energisystemet, och hur det i förlängningen kan bidra till stärkt konkurrenskraft för svensk industri. Projektet fokuserar på två frågeställningar; 1. hur en storskalig produktion av vätgas genom vattenelektrolys påverkar elmarknaden, med en särskild diskussion kring vindkraftens förutsättningar, samt 2. vilken roll vätgas kan spela för tunga vägtransporter i fjärrtrafik. Den senare presenteras i en separat rapport, *Vätgasens roll för tunga vägtransporter*. (1) Föreliggande rapport fokuserar på elsystemet.

Rapporten har tagits fram under hösten 2021 till och med våren 2022.

Följande personer har deltagit i arbetet:

Karl Bergman, ordförande, Ledamot avd II Elektroteknik, Vattenfall

Karin Byman, projektledare, IVA

Emelie Algebrant, Tekniska verken

Karin Boman Röding, Uniper

Maria Bratt Börjesson, Ledamot avd IX Ekonomi, VTI

Rikard Gebart, Luleå tekniska universitet (LTU)

Michael G:son Löw, Ledamot avd IX Ekonomi, fd Preem

Maria Hagberg, Ramberg Advokater

Jonathan Hallinder, E.on.

Elna Holmberg, Ledamot avd II Elektroteknik, Volvo

Filip Johnson, Ledamot avd II Elektroteknik, Chalmers Tekniska Högskola

Per Kågeson, Ledamot avd IX Ekonomi

Stefan Lundmark, Ledamot avd IV Kemiteknik, Perstorp

Mikael Nordlander, Vattenfall

Staffan Rödjedal, Volvo

Staffan Sandblom, Fortum

Henrik Thunman, Ledamot avd IV Kemiteknik, Chalmers Tekniska Högskola

Anna Wallentin, Energigas Sverige

Per Wassén, Ledamot avd VI Företagande och ledarskap

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

Projektet har finansierats av Tekniska verken, Uniper, E.on., Fortum, Vattenfall och Volvo.



Observationer kring vätgasens roll i energisystemet

»Vätgas kan spela en viktig roll för att vi ska nå klimatmålen. Att få fram tillräckligt mycket fossilfri vätgas är en utmaning.«

I denna rapport går vi igenom en rad aspekter med bäring på vätgasens roll i det framtida energisystemet med fokus på hur elsystemet kan påverkas av elektrolysbaserad vätgasproduktion. Vätgasen förväntas främst användas som insatsvara i industrin och som bränsle för tunga transporter där direktelektrifiering blir för kostsamt eller tekniskt svårt. Rapportens fokus ligger på en diskussion och analys av förutsättningarna för vätgasens roll i perspektivet fram till år 2030, men med en utblick mot år 2045 då Sverige ska ha nettonollutsläpp av växthusgaser. Att vi i perioden fram till 2030 inte finner vissa tekniska lösningar som konkurrenskraftiga betyder inte att dessa kan uteslutas på längre sikt. I denna kontext har vi gjort ett antal observationer som sammanfattas nedan.

1. Det är en betydande utmaning att få fram den el som behövs för storskalig produktion av vätgas i Sverige.

Om all befintlig och ny vätgas ska produceras genom vatten-elektrolys kommer detta kräva stora mängder el. En övergripande utmaning för att få till stånd en så stor vätgasmarknad är att elektrifieringen av industrin och transportsektorn förväntas resultera i ett uppmot fördubblat elbehov till 2045. Det ökade elbehovet kommer inom det närmaste decenniet att mötas av icke-planerbar elproduktion, främst i form av vindkraft, vilket i sin tur innebär utmaningar vid balansering av elsystemet.

2. Utmaningarna för att få fram den el som krävs är främst av icke-teknisk karaktär, i form av långa tillståndprocesser och bristande social acceptans.

Utbyggnaden av elproduktionen för samhällets elektrifiering, inklusive för vätgasproduktion, förutsätter lokal acceptans och kommunal tillstyrkan, inte minst för vindkraft och nya överföringsförbindelser. För att uppnå detta krävs bättre samverkan med lokalsamhällena och att kommunerna ges ekonomiska incitament för att möjliggöra utbyggnaden.

Det gäller inte minst i södra Sverige där befolkningstätheten är hög och där behovet av ny elproduktion just nu är extra stort. Det måste också säkerställas att Svenska Kraftnät och övriga nätägare kan bygga ut nätet i den takt som krävs för att kunna möta marknadens behov.

3. Indirekt elektrifiering med vätgas ger möjligheter trots sämre verkningsgrad än direkt elektrifiering.

El är den högst förädlade energiformen vi har och bör användas så effektivt som möjligt. Produktion av vätgas med el medför en förlust av högvärdig energi med cirka 30–40 procent. El kommer därför i första hand att användas direkt där det är möjligt. Elektrolysbaserad vätgas kan ändå komma att spela en roll där direktelektrifiering inte är möjlig. Vätgas kan lagras, även storskaligt, vilket gör att den kan bidra till flexibilitet i elanvändningen och passar på så sätt väl in i ett elsystem med stora mängder icke-planerbar el, och speciellt då från vindkraft. Vätgaslagring kan därmed höja värdet på den icke-planerbara elproduktionen och bidra till att mindre el behöver spillas. Vätgaslager utgör därmed ett komplement till energilagring med batterier. Batterier passar bättre för kortare variationer, för att till exempel balansera dygnsvariationer i elanvändningen eller variationer från solcellsel, medan vätgaslager kan balansera vindkraftens variation över ett par veckor. Idag, och under överskådlig tid, utgör vattenkraften den viktigaste reglerresursen i det svenska/nordiska elsystemet.

4. Vätgas kan bidra till förädling av svenska råvaror och stora minskningar av utsläpp av växthusgaser.

En viktig del i Sveriges välstånd bygger på förädling av svenska naturresurser (malm och skog) med hjälp av el från vattenkraft och kärnkraft. Ytterligare elektrifiering är en brygga in i ett fossilfritt samhälle. Vätgas framställd med fossilfri el utgör en möjlighet att ställa om industrier där vätgasen kan användas som insatsvara för framställning av koldioxidfria material, som exempelvis stål och polymerer av

olika slag. Förbränning av vätgas kan även vara motiverat för högtemperaturprocesser där värmeenergin till dessa är enklare att skapa än direkt från el. Det som i praktiken avgör när vätgas kommer att användas är kostnaden för en framtida vätgaslösning jämfört med andra koldioxidfria alternativ som direktelektrifiering, byte till bioråvara/-bränsle eller koldioxidavskiljning och lagring (CCS).

5. Det råder osäkerhet om hur stor efterfrågan på vätgas faktiskt kommer att bli.

Hur stor efterfrågan på vätgas kommer att bli beror på hur alternativen utvecklas. Alla bedömningar om framtida vätgasbehov är därför behäftade med stor osäkerhet. I Sverige styrs efterfrågan framför allt av de projekt som planeras inom stål- och fordonsindustrin med starka värdekedjor "från gruva till lastbil".

För petrokemi- och raffinaderiindustrierna är osäkerheterna ännu större avseende hur stort vätgasbehovet kan bli då det beror på tillgången på biomassa, vilka produkter som kan komma att efterfrågas, graden av elektrifiering av processer och transporter, samt om CCS blir ett alternativ. Nyligen har ett par projekt presenteras där vätgas ska användas för produktion av flygbränsle. Flyget är ett exempel på en sektor där direktelektrifiering inte kan förväntas över överskådlig tid annat än för mindre plan och kortare distanser.

Baserat på de projekt som presenterats hittills, är en grov uppskattning inom detta arbete att det till år 2030 finns en potentiellt ökad efterfrågan på vätgas med cirka 20–25 TWhH₂. Om all vätgas produceras med el motsvarar det 30–40 TWh.

6. Vätgas kan framställas från naturgas, biomassa eller fossilfri el – samtliga metoder kan komma att användas under överskådlig tid.

Idag produceras så gott som all vätgas via ångreformering av fossila bränslen, exempelvis naturgas eller nafta. Förhoppningen är att all vätgas i framtiden ska framställas ur

fossilfri el. Vätgas kan även framställas genom förgasning av biomassa eller ur biogas. Det kan under en övergångsperiod bli nödvändigt att använda fossilbaserad vätgas där kolinnehållet avskiljs och lagras, så kallad "blå vätgas". Vätgas kan även framställas via pyrolys av naturgas, vilket ger ett fint kolpulver som biprodukt. Slutlagring av ett kolpulver är betydligt enklare och billigare än lagring av koldioxid men ger stora energiförluster då kolpulverflödet bortföres.

Det förväntas bli en ökad konkurrens om både el och biomassa i takt med att trycket i omställningen ökar. Därför kan samtliga tre sätt att producera vätgas (elektrolys, ur biomassa, blå vätgas) komma att realiseras beroende på lokala förutsättningar men där blå vätgas kan göra en snabbare omställning möjlig. Framför allt för industrierna på Västkusten kan blå vätgas komma att vara ett alternativ.

7. Industrin driver utvecklingen av ny teknik för vätgasbaserade processer.

Fram till 2030 bedömer vi att det främst är industrin som kommer att driva utvecklingen av vätgas. Övriga satsningar kommer sannolikt främst att utgöras av spinn-off effekter av industriprojekten, eller ett intresse av att bibehålla och utveckla värden i befintliga anläggningar, exempelvis gasinfrastruktur, gasturbiner eller ett kraftvärmsystem. I Sverige kan industrikluster med storskalig produktion och infrastruktur för vätgas även öka tillgängligheten för vätgas som drivmedel i transportsektorn.

8. Investeringarna drivs av möjligheten till en premiemarknad för fossilfria material.

Förädlingsvärdena blir högre för "vätgas till material" än för vätgas som energiprodukt. Det finns segment eller nischer där det redan i dagsläget går att få mer betalt för ett klimatneutralt alternativ än för motsvarande alternativ med dagens utsläpp. Många tillverkare av konsumentprodukter och fordon har satt upp mål om klimatneutralitet längs hela sin värdekedja, vilket innebär att de behöver köpa upp klimatneutrala material till sina produkter, vilket bidrar till att driva efterfrågan på vätgas.



9. Biprodukterna från vattenelektrolys – syre och värme – kan ge ett bidrag på marginalen men kommer inte att bygga affären.

Alla resurser bör tas tillvara så effektivt som möjligt, så även det syre som bildas, och den värme som alstras, i en elektrolysör. Vid elektrolys av vatten bildas, i vikt räknat, åtta gånger så mycket syre som vätgas. Även om det finns en marknad för syrgas kommer volymerna lokalt bli så stora att priserna sannolikt kommer att pressas så kraftigt att endast mindre mängder kan tas tillvara. Spillvärmens är i vissa fall tillräckligt högvärdig för att kunna utnyttjas för lokaluppvärmning eller i ett fjärrvärmesystem. Vilken nytta den kan göra styrs av lokaliseringen, prissättning på värmen samt viktet värmebehov det är frågan om. Produktion av syre och spillvärme kommer inte vara avgörande för investeringen i en elektrolysör, utan det är i huvudsak vätgasen som måste bära investeringen.

10. Vätgasbaserade elektrobränslen eller material kan bli konkurrenskraftiga även om de är energikrävande att framställa.

Elektromaterial och elektrobränslen kan produceras med koldioxid som kolkälla, tillsammans med vätgas. Processen är energikrävande men kan vara ett intressant alternativ beroende på lokala förutsättningar för produktion av vätgas och vilka koldioxidströmmar som finns att tillgå. För att elektrobränslen ska kunna anses förnybara måste koldioxiden härröra från biomassa, eller på längre sikt, möjligen infångad direkt från luften,¹ vilket i bägge fallen är förenat med hög energitågång.

Ett mindre energikrävande sätt att framställa bränslen eller byggstenar för kemiindustrin från biomassa än att utgå från koldioxid, är att förgasa biomassan (till exempel skogsavfall) till en syntesgas (kolmonoxid, koldioxid, vätgas). Därefter tillförs förnybar vätgas till syntesgasen, en process som



möjliggör att allt kol i den ingående biomassan kan omvandlas till högvärdiga produkter. Energin som lagras i dessa bränslen och material kommer till drygt 50 procent från el, resterande från biomassan.

11. Det är inte troligt att el kommer att lagras som vätgas för ny produktion av el.

Vätgas kan användas för att producera el, antingen i en bränslecell eller i en vätgaseldad turbin. Eftersom såväl vätgasproduktionen som den senare produktionen av el från vätgasen medför energiförluster ligger den totala systemverkningsgraden på cirka 30 procent. Det vill säga, förlusterna av högvärdig energi uppgår till cirka 70 procent.

Att göra el av vätgas kan fortfarande bli ett alternativ under kortare perioder när annan flexibilitet i elsystemet inte räcker

er till och betalningsviljan är hög. Från ett systemperspektiv visar studier att det kan bli kostnadseffektivt kring 2045 när utsläppen av växthusgaser ska vara noll eller nära noll. Sannolikt kommer det i så fall också krävas en elmarknadslösning som premierar detta, det vill säga någon form av effektmarknad. Även industrin skulle i vissa fall kunna bidra till sådan elproduktion. I de fall en industri av andra skäl investerar i en vätgasprocess och ett större lager,² kan el lagras och åter framställas i kostnadsparitet med de äldre oljekondenskraftverk som idag används som effektreserv i elsystemet.

12. Produktion av vätgas kan bidra till en ökad priselasticitet på elmarknaden.

De industriella aktörer som investerar i vätgasproduktion analyserar också möjligheterna att dra nytta av elprisets variation. Om den industriella processen är beroende av

ett kontinuerligt vätgasflöde, behöver de även investera i viss överkapacitet i elektrolysörerna och komplettera anläggningen med ett vätgaslager. Det ger en högre investeringskostnad som kan motiveras av möjligheten att undvika höga elpriser samt redundans i vätgasförsörjningen till processen. Det i sin tur skapar en ökad priselasticitet på elmarknaden.

13. Elsystemet i södra Sverige begränsar möjligheterna för en omställning i befintlig industri.

Vätgas används i stora mängder vid produktion av drivmedel och vissa kemikalier. Raffinaderierna producerar idag större delen av sin vätgas från sin egen råvara, men beroende på pris och behov kompletteras denna med produktion från importerad naturgas. Vid en ökad produktion av biodrivmedel kommer vätgasbehovet kraftigt att öka. För den kemiindustri som är kopplad till en ångkrackeranläggning som använder etan, gasol eller nafta som råvara, genereras det i dessa anläggningar ett stort vätgasöverskott. Ett överskott som i dag används för att täcka processernas värmebehov, samtidigt som den begränsar koldioxidutsläppen. Här kan en ökad användning av vätgas reducera dessa industriernas koldioxidutsläpp ytterligare.

Ska raffinaderier och kemiindustri bli klimatneutrala med hjälp av vätgas från elektrolys kommer det krävas mycket stora mängder el i södra Sverige, något som dagens elsystem inte kan leverera. Alternativen är att förse befintliga processer med CCS eller att importera vätgas, till exempel i form av ammoniak. Import av vätgas, som gas eller ammoniak, skulle ge raffinaderierna och kemiindustrierna en möjlighet att säkerställa sitt vätgas- och energibehov.

14. Ledningsinfrastruktur är kostnadseffektivt för transport av vätgas.

Ledningsinfrastruktur är ett kostnadseffektivt sätt att transportera vätgas redan vid relativt små volymer. Därför kan det vara mer kostnadseffektivt att transportera vätgas från elektrolysanläggningar lokaliserade nära kraftproduktionen

än att transportera elektriciteten till en elektrolysanläggning nära vätgasanvändaren. Sannolikt kommer därför en ledningsinfrastruktur för vätgas att byggas för att tillgodose industrins behov. Inledningsvis är det troligt att lokala nät byggs, följt av regionala nät som kopplar samman de lokala, och efter 2030, möjligen ett nationellt (och internationellt) stamnät. En sådan infrastruktur möjliggör också avlastning av flaskhalsar i elnätet genom en optimering av var elektrolysanläggningar lokaliseras relativt tillgänglig kraftproduktion och elnätskapacitet.

15. Det saknas idag en samlad bild av hur nuvarande regelverk påverkar utvecklingen av en vätgasmarknad.

Det har gjorts ett antal relativt översiktliga kartläggningar av vilka regelverk som gäller för vätgas (produktion, distribution, lagring och användning), utförda av bland annat myndigheter, organisationer och konsultbolag. Det saknas dock en fullständig kartläggning av nuvarande regelverk. En sådan kartläggning är nödvändig för att kunna göra justeringar och kompletteringar av nuvarande regelverk så att dessa inte hindrar utbyggnaden av vätgassystem.

16. Elbaserad vätgas kan behöva produceras från ny, tillkommande förnybar el för att klassas som förnybar.

Enligt en delegerad akt från EU-kommissionen (ej beslutad i skrivande stund, juni 2022) framgår att vätgas som produceras med hjälp av el från nätet måste produceras från ny, tillkommande förnybar el för att klassas som förnybar. Ett undantag är de fall när produktionen av förnybar vätgas sker i ett elområde där den genomsnittliga andelen förnybar el översteg 90 procent föregående kalenderår. Det är därför troligt att den nya elproduktionen som krävs för att klara elektrifieringen, inklusive vätgasproduktion, kommer att behöva baseras på tillkommande vindkraft, särskilt i södra Sverige där andelen förnybar elproduktion inte är så hög.



Rekommendationer för utveckling av en vätgasmarknad

»Norden kan bli ledande inom vätgas i Europa baserat på gemensamma klimatambitioner och stor andel fossilfri energi.«

Baserat på de observationer vi har gjort i projektet listar vi nedan ett antal rekommendationer till politiker och andra beslutsfattare. Även om det i huvudsak är marknaden som bäst avgör vilka tekniker och system som passar för att etablera vätgas i energiomställningen så är en gemensam nämnare för flera av punkterna nedan att staten har en viktig roll att fylla för att säkerställa att marknadens aktörer inte hindras i omställningen mot etablering av en vätgasmarknad.

De flesta är överens om att energiomställningen måste ha kommit en bra bit fram till år 2030, året som är fokus i denna rapport, och därmed behöver flera av de åtgärder som vi pekar på nedan hanteras skyndsamt. Omställningen har redan börjat med ett antal pilotprojekt, men det finns flera icke-tekniska hinder som måste undanröjas, och där staten har en viktig roll för att omställningen ska komma vidare.

1. Säkerställ tillgången på el, eleffekt och nätinфраstruktur.

Det har skett ett paradigmskifte på elmarknaden där vi nu ser ett kraftigt ökade elbehov de kommande åren. Det behövs därför stora investeringar i ny elproduktion och ersättningsinvesteringar för att ersätta äldre kraftverk. Fram till år 2030 kommer det främst ske investeringar i vindkraft, och det finns också ett stort behov av investeringar i elöverföringskapacitet. Utbyggnaden av nätkapacitet och elproduktion, inklusive den el som vätgasproduktionen kräver, förutsätter lokal acceptans och kommunal tillstyrkan. För att uppnå detta krävs bättre samverkan med lokalsamhällena och att kommunerna måste ges ekonomiska incitament för att möjliggöra utbyggnaden.

Det är också viktigt att planerbara kraftslag kan utvecklas gynnsamt. För att det ska ske behöver dagens elmarknad modifieras så att det skapas incitament för planerbar elproduktion, till exempel i form av en kapacitetsmarknad. Det behövs även kraftfulla investeringar i både transmissionsnät och regional-/lokalt nät för att möta de ökade elbehoven. Här kan också lokal elproduktion bidra till att minska behovet av lokalnätstärkningar och det är därför viktigt att sådan inte missgynnas.

2. Skapa incitament så att flexibla resurser i elsystemet möjliggör mer sol och vindkraft.

För att hantera de utmaningar vi ser på elmarknaden måste Sverige utnyttja hela den potential till flexibilitet som finns inom befintliga och nya system, inklusive möjligheter till en mer aktiv integrering av elsystemet med övriga sektorer. Tekniskt sett finns redan många flexibilitetsresurser som inte utnyttjas, och som tillsammans kan ge betydande bidrag till flexibilitet på olika tidsskalor, exempelvis smart styrning av värmepumpar, smart laddning av elbilar och stationära batterier. På sikt kan även flexibel produktion av vätgas med vätgaslager, inklusive lagring av mellanprodukter, bidra. Det bör undersökas hur incitament kan skapas som främjar att alla dessa potentiella flexibilitetsresurser kan tas till vara och att elmarknaden kan utvecklas så att alla möjligheter till flexibilitet används på ett kostnadseffektivt sätt.

3. Det bör skyndsamt fastställas vilka regler som ska gälla för vätgas.

Det behöver göras en fullständig utredning (till exempel i form av en SOU) av vilka regelverk som ska gälla för vätgas (produktion, distribution, lagring och användning). Utredningen bör utgöra grund för de justeringar och kompletteringar av regelverket som krävs för att säkerställa att etablering av en vätgasmarknad inte hindras av avsaknad av ett tillräckligt tydligt regelverk. Speciellt kan redan nu konstateras behov av följande två justeringar avseende det rättsliga regelverket:

- Koncessionsplikt och intäktsreglering. Det är viktigt att gå den snabbaste vägen fram för att åstadkomma en koncessionsplikt för överföringsledning för vätgas. Naturgaslagen (SFS 2005:403) kan snabbt och enkelt ändras så att även överföring av vätgas inkluderas i denna lag. För att hanteringen ska gå så snabbt och effektivt som möjligt bör dock koncession beslutas av Energimarknadsinspektionen i stället för av regeringen.
- Regler till skydd mot brand och explosion. Som stöd för den kommunala tillståndsprövningen behöver det finnas tydliga regler om skydd mot brand och explosion. För att möjliggöra investeringar och kunna genomföra projekt utan fördröjning behöver lagstiftningen om brandfarliga och explosiva varor, och då särskilt MSBs föreskrifter om produktion, överföring och användning av vätgas, snarast förtydligas.

4. Det behövs både riktade stöd och konkurrensneutrala styrmedel.

Det kan behövas riktade stöd för såväl teknikutveckling som för att få igång nya vätgasmarknader. Det förstnämnda kan per definition inte vara teknikneutrala, medan stöd till marknadsintroduktion bör utformas så att de inte gynnar ett koldioxidneutralt alternativ framför ett annat. Det gäller även utformningen av eventuell beskattning. Ett nuvarande problem i det senare avseendet är att el som tillförs batterier för närvarande är föremål för en hög energiskatt, medan vätgas som används i bränsleceller är skattefritt.

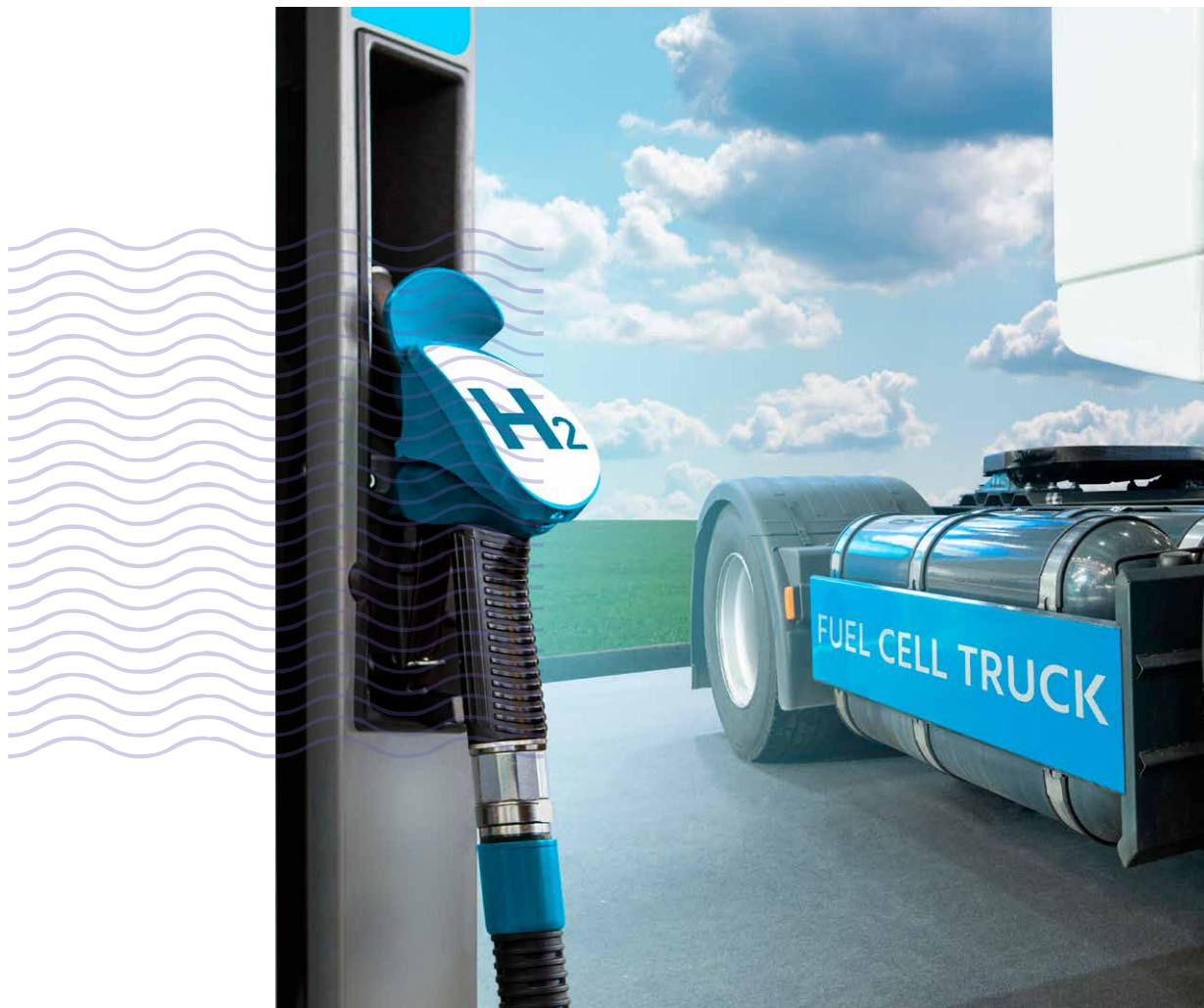
5. Sverige måste ta en aktiv roll i Fit for 55.

Det är fundamentalt att Sverige har ett helhetsperspektiv på de olika regelverken inom Fit for 55. Detta för att säkerställa konkurrensförutsättningar för fossilfri vätgas men också för att förhindra att regelverken begränsar utvecklingen av ny teknik. Det är därför viktigt att Sverige fortsätter att vara aktiva i EU-förhandlingar som kan tänkas påverka förutsättningar för vätgasmarknaden så att Sveriges nationella förutsättningar, med en redan i stort sett fossilfri elproduktion, tas till vara. Definitioner av vätgas med olika ursprung, regelverk etcetera bör formuleras så att Sveriges väl utbyggda fossilfria energiproduktion, med mycket vind-, vatten- och kärnkraft, blir en fördel. Genom att vara delaktiga tidigt i lagstiftningsprocessen, ha fokus på helheten och söka samsyn med andra EU-länder kan Sveriges intressen tas tillvara.

6. Intensifiera det nordiska samarbetet.

Vi föreslår att Regeringen verkar för ett ökat samarbetet mellan de nordiska länderna då detta med största sannolikhet skulle gynna vätgasutvecklingen i Norden men också stärka vår position i EU. Norden är idag redan sammanlänkad, med samarbetsprojekt kring ökad transmission mellan norra Sverige och norra Finland, samtidigt som vindkraftsutbyggnaden har kommit olika långt i de nordiska länderna. Det tas också initiativ för att möjliggöra ett vätgaskluster i bland annat Bottenviken. De nordiska länderna har flera gemensamma nämnare, såsom höga klimatambitioner, tillgång till stor andel fossilfri energi och tillgång till biomassa från skog. Genom att de nordiska länderna intensifierar samarbetet inom vätgasområdet kan Norden sannolikt utvecklas som en region i framkant inom vätgasutvecklingen i Europa.





Bakgrund

»Vätgas kan spela en viktig roll för att nå klimatmålen men det pågår även en utveckling inom parallella teknikspår.«

Vätgas är en etablerad insatsvara inom industrin. I den omställning som nu pågår, mot ett fossilfritt energisystem och en klimatneutral industri och transportsektor, kan vätgasen spela en viktig roll. Men för att detta ska ske krävs nya förutsättningar vad gäller tekniska lösningar, ekonomi och marknad.

En storskalig produktion av vätgas med el kommer att ha en stor påverkan på elmarknaden, men det finns fler faktorer som påverkar elsystemets utveckling. Vi försöker därför att isolera vår analys till vätgasen men samtidigt sätta de förändringar en storskalig produktion av vätgas för med sig i ett större sammanhang.

Den marknadsutveckling vi ser framför oss kommer att kännetecknas av disruptiva förlopp. Indirekt elektrifiering via vätgas med ny teknik och nya aktörer utgör en viktig del i ett sådant förlopp och kommer därmed förändra den logik vätgasmarknaden har idag. Aktörerna står i sin tur inför strategiska val. Parallellt med utvecklingen av vätgasmarknaden fortsätter, som exempel på ett par närliggande och konkurrerande alternativ, utvecklingen av batterier och biodrivmedel. Det finns i dagsläget inga givna svar på vilken teknik som blir dominerande inom vilka användningsområden eller i vilket tidsperspektiv.

Bränslebyte, koldioxidavskiljning och elektrifiering med fossilfri el är tre viktiga åtgärder för att minska växthusgasutsläppen från transporter och industrier. Därtill krävs energieffektivisering och beteendeförändringar som omfattar en bred palett av åtgärder, speciellt inom transportsektorn (stadsplanering, ökat kollektivt resande och nya transporttjänster).

Indirekt elektrifiering kan åstadkommas genom att vätgas, eller annat elektrobränsle baserat på vätgas, framställs med

fossilfri el. Vätgas kan användas på två sätt; som insatsvara eller som energibärare. Är direktelektrifiering möjlig är det generellt sett ett mer energieffektivt alternativ än att gå via vätgas. Det bör också noteras att vätgasanvändning endast är en av många åtgärder för att uppnå klimatmålen och att alla dessa bör samverka på ett hållbart och kostnadseffektivt sätt.

Även om vätgas har identifierats som en möjlighet till indirekt elektrifiering och ett flertal vätgasprojekt diskuteras just nu, finns ännu ingen storskalig implementering av dessa projekt. Det finns dock en stor vilja bland företag långt ut i värdekedjorna – nära kunden – att erbjuda fossilfria produkter. Flera företag har satt upp mål om klimatneutralitet som inkluderar hela värdekedjan vilket innebär att fossilfria insatsvaror kommer att behövas, exempelvis fossilfritt stål som i sin tur möjliggörs med vätgasbaserad stålproduktion. En springande punkt är tillgången på fossilfri el och ett leveranssäkert elsystem. Finns inte tillräckliga mängder fossilfri el kan projekten inte genomföras, alternativt blir de beroende av vätgas från andra källor, exempelvis från naturgas med koldioxidavskiljning och lagring eller från reformering av biogas eller förgasning av biomassa.

Allt pekar på att ett framtida elsystem kommer att innehålla en betydande andel väderberoende elproduktion, i Sverige till stor del i form av vindkraft. Det kommer medföra perioder med stor tillgång på el när det blåser mycket, och begränsad tillgång på el när motsatsen råder. Därför kommer behovet av att kunna lagra el att öka. Oberoende av om elektrifieringen är direkt eller indirekt via vätgas kräver båda alternativen energilagring. Det finns andra sätt att lagra el, men i denna rapport talar vi i huvudsak om batterier eller vätgaslager. Exempel på andra lagringalternativ är pumpvattenkraft, komprimerad tryckluft och svänghjul. (2)



Introduktion till vätgasens roll i elsystemet

»Produktion av vätgas kan leda till ett kraftigt ökat elbehov. Men förhoppningen är att vätgas ska underlätta för mer vindkraft.«

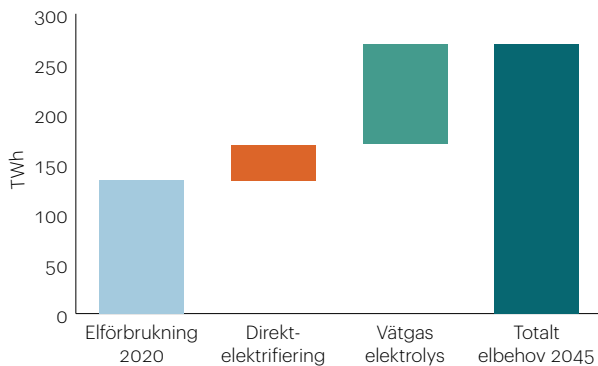
En av de viktigaste åtgärderna för att fasa ut fossila bränslen och klara klimatmålen är elektrifiering med fossilfri el. Det kan vara direktelektrifiering eller indirekt elektrifiering. Den senare avser produktion av vätgas med el, där vätgasen i sin tur kan förädlas vidare. Den elektrifiering som nu pågår bedöms leda till att Sveriges elförbrukning kan fördubblas till år 2045, från dagens cirka 140 TWh per år till 280 TWh per år. Merparten, cirka 60–70 procent av ökningen, bedöms elbaserad vätgasproduktion stå för.³

Vindkraft är, med rimliga antaganden avseende investeringar och finansiering, idag det billigaste kraftslaget och går fortast att bygga, givet att alla tillstånd kommer på plats. Därtill kan tilläggas att EU i skrivande stund (juni 2022) diskuterar under vilka omständigheter vätgas⁴ ska betraktas som förnybar. En utgångspunkt är att vätgasen måste produceras från tillkommande, förnybar elproduktion (se kapitel *Sverige bör vara mer aktiv i EU*). Sammantaget gör det troligt att den ökade efterfrågan på el i stor utsträckning kommer att mötas med ny vindkraft, det vill säga variabel,

icke-planerbar elproduktion. Det i sin tur kommer att ställa krav på mer flexibel elanvändning och ökade möjligheter att lagra el.

Vindkraftsproduktionen kan komma att uppgå till i storleksordningen 100 TWh (3) vilket innebär en installerad effekt på cirka 30 GW. Idag har vindkraften en effektvariation på 3–4 GW på några timmar (nationell nivå) vilket i stor utsträckning balanseras av vattenkraften som har motsvarande amplitud i sin variation. I ett kraftsystem med 100 TWh vindkraft blir utslagen betydligt större, i storleksordningen 15–20 GW. Dessa amplituder kan inte enbart regleras med vattenkraften, som har en total installerad effekt på 16 GW.

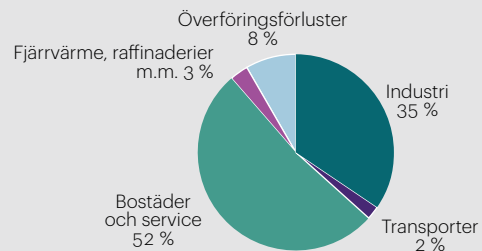
Figur 1: Illustration av vad som driver ökad elanvändning i Sverige fram till 2045. Produktion av vätgas kan stå för så mycket som tre fjärdedelar av den ökade elförbrukningen. Källa: IVAs projekt Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle, bearbetning av Energiforsk Efterfrågan på fossilfri el, högnivåscenario, 2022.



Dagens elanvändning

Den svenska elanvändningen mer än fördubblades mellan 1970 och 1990, då den ökade från 60 TWh till 140 TWh per år. Elektrifieringen bidrog till att Sverige kunde halvera sin oljeanvändning under samma period. Därefter har elanvändningen varit relativt stabil kring 140 TWh. 2020 användes till 135 TWh el, och den fördelades på olika sektorer enligt Figur 2. (31)

Figur 2: Sveriges elanvändning 2020 uppgick till 135 TWh och fördelades på olika sektorer enligt diagrammet. Källa: Energiläget i siffror, Energimyndigheten 2022.



Elproduktion

Elproduktionen i Sverige uppgick år 2020 till 159 TWh, och år 2021 till 166 TWh (se Tabell 1). På tio år har vindkraftens andel av elproduktionen ökat från 2 till 17 procent. Den producerar nu närmare 30 TWh per år och förväntas fortsätta öka. Trots stängningen av fyra kärnkraftreakto-

Tabell 1: Sveriges elproduktion 2011, 2020 och 2021.
Källa: Energiföretagen 2022.

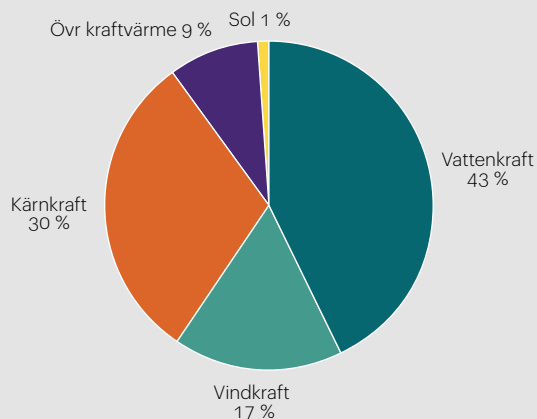
TWh	2011	%	2020	%	2021	%
Vattenkraft	66,2	46 %	71,2	45 %	71,2	43 %
Vindkraft	3,5	2 %	27,6	17 %	27,5	17 %
Kärnkraft	55,6	38 %	47,3	30 %	50,5	30 %
Kraftvärme, övrigt**)	19,8	14 %	12,7	8 %	14,9	9 %
Solkraft	0	-	1,1	1 %	1,5*)	1 %
Totalt	145,1	100 %	158,8	100 %	165,6	100 %
Nettoexport	-2,1		25,0		25,3	

* Preliminär siffra (mars 2022).

** Kraftvärme i fjärrvärmesystem, industriell kraftvärme och övrig värmekraft.

rer sedan 2017³¹ producerade kärnkraften år 2021 drygt 50 TWh. Elproduktionens storlek och fördelning mellan olika kraftslag år 2011, 2020 och 2021 framgår av Tabell 1 och Figur 3. Observera att vattenkraften producerar cirka 65 TWh under ett normalår och att de variationer som framgår av tabellen beror på skillnader i nederbörd.

Figur 3: Sveriges elproduktion 2021, totalt 166 TWh. Fördelning på olika kraftslag, procent. Källa: Energiföretagen 2022.



Av hydrologiska och tekniska skäl får man inte köra mer än drygt 13 GW, i praktiken ännu mindre. Det innebär en flexibilitetsutmaning skulle kunna vara dubbelt så stor som hela vattenkraftens reglerbara installerade effekt.

Samtidigt är det viktigt att notera att ett framtida vindkraftssystem kommer ha betydligt större andel havsbaserad vindkraft och modernare vindturbiner vilket kommer öka antalet fullasttimmar för varje vindturbin betydligt vilket kommer att minska svängningarna. En vindkraftsproduktion på i storleksordningen 100 TWh per år kommer ändå att ställa stora krav på flexibilitet i elsystemet och att vi kan lagra el för att jämna ut effektoppar och -dalar.

Förhoppningen är att en flexibel vätgasproduktion kombinerat med vätgaslager ska bidra till effektiv integration av vindkraft. Vätgas har sämre verkningsgrad än batterier men kan lagra större mängder el under längre perioder. Batterier passar bättre för dygnsvariationer, medan vätgas kan överbrygga vindkraftens svängningar i tidsperioder om veckor. Dessutom gynnas vätgasen av att den inte i första hand ska omvandlas tillbaka till el (vilket ger låg totalverkningsgrad) utan användas som insatsvara till industrin i form av exempelvis vätgasbaserad stålproduktion samt inom raffinaderi- och petrokemiindustrin. Att använda vätgasen som reglerresurs genom att återigen göra el av vätgasen är troligtvis något som endast kan vara intressant på längre sikt i ett system med nära nollutsläpp och då under få timmar,

Elnät och elområden

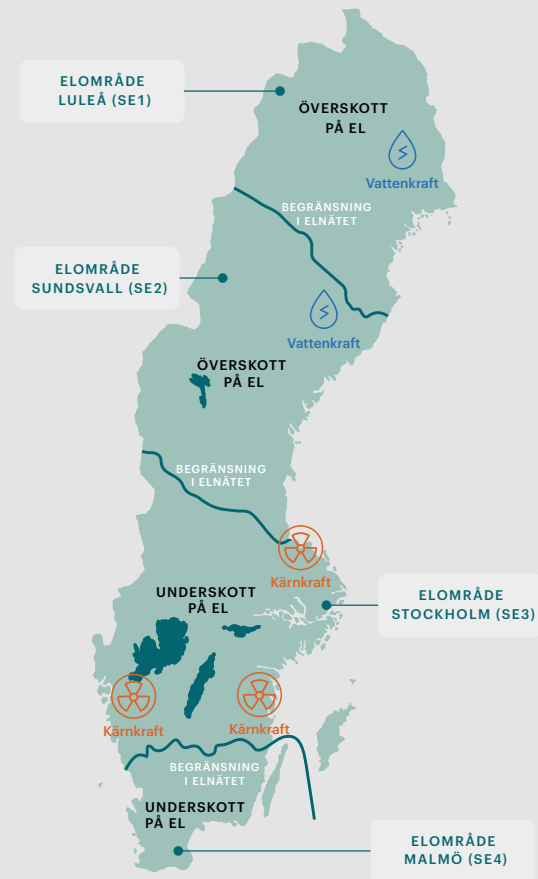
Det svenska elnätet är indelat i transmissionsnät, regionalnät och lokalnät. Sverige har även utlandsförbindelser med Norge, Finland, Danmark, Tyskland, Polen och Litauen.

Sedan år 2011 är Sverige indelat i fyra elområden för att kunna hantera begränsningar i överföringskapacitet mellan norra och södra Sverige. Det har lett till att elpriserna ofta är högre i södra Sverige än i norra eftersom det råder elöverskott i Norrland och underskott i söder. Södra Sverige påverkas också i större utsträckning av elpriserna på kontinenten, vilket är tydligt nu när gaspriserna är mycket höga (maj 2022). I Figur 4 visas den installerade effekten i olika kraftslag i respektive elområde, samt hur indelningen i elområden fördelas över landet.

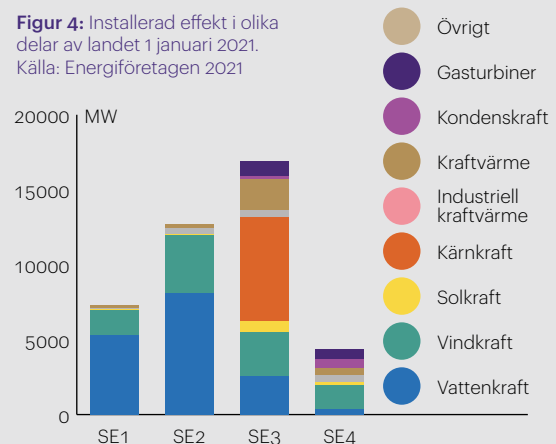
Det finns även flaskhalsar mellan överliggande nät och lokalnät för några storstadsregioner (bland annat Stockholm, Malmö och Uppsala). Det skulle kunna avhjälpas genom att förstärka näten eller öka elproduktionen lokalt, exempelvis i ett kraftvärmeverk.

Idag kan vi konstatera att:

- Marginalerna för effektbrist på nationell nivå har minskat kraftigt de senaste åren, och sedan några år tillbaka är Sverige inte självförsörjande på el den kallaste vintertimmen, även under normala omständigheter. (32)
- Det finns flaskhalsar i elsystemet som gör att tillgänglig elproduktionskapacitet i norra Sverige inte kan transporteras när den behövs i södra Sverige.
- Det råder både energi- och effektbrist i södra Sverige.
- Ju större andel vindkraft vi får in i systemet, desto större flexibilitet/variabilitet behöver vi få in i användarledet eller i kompletterande reglerbara kraftverk.
- Det finns även kapacitetsbrist i överföring in till flera tätorter.
- De investeringar som sker i ny kraftproduktion idag är inriktade mot vindkraft och, i mindre skala, solkraft. Det sker knappt några nya investeringar i planerbar kraft.
- Det finns en stor potential för havsbaserad vindkraft i Sverige, och många planer, men det krävs någon form av samsyn om en utökad havsplan för att dessa ska kunna realiserars.



Figur 4: Installerad effekt i olika delar av landet 1 januari 2021.
Källa: Energiföretagen 2021





Drivkrafter för utveckling av en vätgasmarknad

»En efterfrågan på klimatneutralitet från råvara till slutprodukt driver efterfrågan på vätgas.«

I Sverige är det främst industrin som driver utvecklingen av vätgas. Övriga satsningar är spinoff-effekter av industriprojekten eller ett intresse av att bibehålla och utveckla värden i befintliga anläggningar, exempelvis i gasinfrastruktur, gasturbiner eller ett kraftvärmsystem. I Sverige kan industrikluster med storskalig produktion och infrastruktur för vätgas även öka tillgängligheten för vätgas som drivmedel i transportsektorn. Det finns även initiativ för att framställa flygbränsle med vätgas.

Den svenska industrin kan lite förenklat delas in två grupper avseende vätgasanvändning; kemi- och petroleumindustri/raffinaderier i södra Sverige, som är traditionella användare av vätgas, och järn- och stålindustrier i norra Sverige, som nu utvecklar nya processer baserade på vätgas. Fler industriella satsningar på vätgas exemplifieras i bilaga 2.

I dagsläget är det de senare som främst gett upphov till det nya intresset för vätgas, och då speciellt behovet av att minska klimatpåverkan från stålframställning. Därför utvecklas nya processer för reduktion av järnmalm där vätgas ersätter kol. Alternativet hade kunnat vara att förse den konventionella masugnsmasugnbaserade stålprocessen med koldioxidavskiljning och lagring (CCS-teknik). Det hade dock inneburit en "end-of-pipe"-lösning med fortsatt beroende av fossilt kol. För vätgasbaserat stål är planen att vätgasen ska framställas genom elektrolys av vatten. I norra Sverige är elbalansen god och produktionen av vindkraft förväntas att öka. Ytterligare en drivkraft för att satsa på elbaserad vätgasproduktion är bedömningen att denna medför en bättre rådighet över de produktionsfaktorer och insatsvaror som används i stålprocessen.

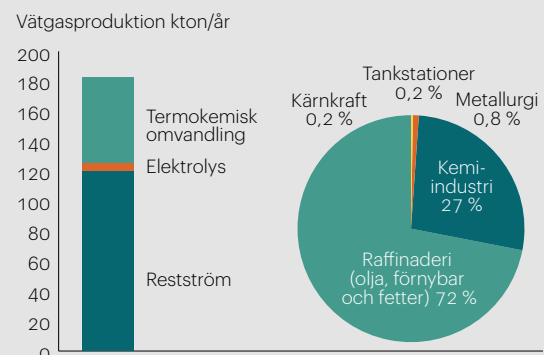
Det är dyrare att framställa stål baserat på vätgas, men det finns starka drivkrafter genom hela värdekedjan i vilken stål

Dagens produktion och användning av vätgas

Vätgas är en etablerad industriråvara som främst används som råvara inom kemiindustrin, i metallurgiska processer och i raffinaderier. Globalt används cirka 120 miljoner ton vätgas, varav 70 miljoner ton är specifikt producerad medan resterande härrör från olika industriella restströmmar. (9) Den vätgas som produceras härrör till 76 procent från naturgas och 23 procent från kol (främst i Kina). Endast cirka 2 procent framställs idag genom vattenelektrolys. (11)

I Sverige används cirka 180 000 ton vätgas per år, vilket motsvarar 6 TWh. Av detta har 67 procent fossilt ursprung och 3 procent framställs via elektrolys (2020). Resterande är i form av restströmmar inom kemisk industri.

Figur 5: Produktion och användning av vätgas i Sverige 2020. Källa: Strategi för fossilfri konkurrenskraft, Fossilfritt Sverige 2021.



Basfakta om vätgas

Vätgas (H₂) är det lättaste och vanligaste grundämnet i universum. På jorden förekommer vätgas främst i bunden form som i vatten (H₂O) och i olika kolväten. Vätgas är en färg-, smak- och doftlös gas. Gasen är inte giftig, men i blandning med luft eller syre är den explosiv. Genom dess låga molekylvikt har vätgas den högsta diffusions- och effusionsförmågan³² av alla grundämnen och tränger lätt igenom olika material. Det innebär en utmaning vid lagring och transport av vätgas och kräver i praktiken att vätgas alltid måste hanteras vid höga tryck.

Nedan anges två olika "energiinnehåll" för vätgasen. Det ena avser den mängd energi som utvecklas vid förbränning av en viss mängd bränsle. I praktiken avgår energi med rökgaser och i askan.³³ Den andra, det "kalorimetiska värmeverdet" (teoretiska värmeverdet) kan utnyttjas om bränslet används som insatsvara i en kemisk process, exempel som reduktionsmedel i en stålprocess.

Egenskaper hos vätgas jämfört med metan (naturgas eller uppgraderad biogas)

	Enhet	Vätgas	Metan
Densitet (0 C, 1 bar)	kg/m ³	0,089	0,84
Energiinnehåll ³⁴	kWh/1 000 m ³	3 000	11 048
Energiinnehåll	kWh/kg	33,6	13,9
Kalorimetriska värmeverdet ³⁵	kWh/kg	39,4	15,4
Antändningsintervall ³⁶	Volymprocent i luft	4-77 %	5-15 %
Kokpunkt	Temperatur, °C	-253 °C	-162 °C

Säkerhetsaspekter

Hantering av vätgas i stor skala är inget nytt inom industrin. Sedan många decennier hanteras tiotals miljoner ton vätgas per år i exempelvis raffinaderier och konstgödselindustri. Det finns med andra ord mycket erfarenhet. Säkerhetsaspekterna måste ändå vägas in och vätgas måste hanteras med omsorg, något som blir särskilt viktigt om utvecklingen går emot att vätgasen får en mer utbredd användning. Det finns regelverk kring användning av brandfarliga ämnen och gaser under högt tryck såsom bensin, diesel, biogas och olika industrigas (till exempel acetylen). I detta perspektiv bör det vara fullt möjligt att uppnå en för samhället godtagbar säkerhet för hantering av vätgas. Vätgasen framhålls ofta som speciell på grund av att den är antändbar i ett stort spann av luftinblandning (4-77 procent), men även acetylen har ett brett brännbarhetsområde (2,3-100 procent) och hanteras med stor spridning i samhället idag. Det ger ingen anledning att minska respekten för potentiella risker med vätgas, men ger perspektiv på frågan.

ingår. Det gäller inte minst fordonsindustrin som i många fall satt upp mål om att vara klimatneutral längs hela värdekedjan. Det innebär att även de material som bilarna byggs av måste vara klimatneutrala, inklusive stålet. Det har bidragit till att flera stora industrisatsningar för fossilfritt stål kommit till stånd, såsom Hybrit, H2 Green Steel och LKABs satsning på fossilfri järnsvamp.

Vätgas är en etablerad industriråvara i raffinaderier och kemiindustrin i södra Sverige. Idag tillverkas vätgasen ur naturgas eller härrör från restströmmar i kemiska processer.

I raffinaderier framställs vätgas främst ur naturgas samt egenproducerad nafta eller butan. Vilken metod man använder beror till stor del på priset på importerad gas jäm-

fört med egenproduktion ur raffinaderiets råvara. Då är det priset på råolja som styr, med andra ord, kostnaden för importerad gas kontra kostnaden för råolja.

För att ta bort koldioxidutsläppen från vätgasen måste antingen produktionen ur naturgas förses med koldioxidavskiljning och lagring (CCS) vilket ger det som brukar kallas för blå vätgas, eller så måste vätgasen framställas genom elektrolys. Blå vätgas kommer inte att vara helt klimatneutral då all koldioxid inte kommer att kunna avskiljas. Vanligen antas att 90 procent av koldioxiden ska kunna avskiljas för att hålla kostnaderna nere. Som tidigare nämnts kräver elektrolysbaserad vätgasframställning stora mängder el, och det är i dagsläget oklart när elsystemen i södra Sverige kommer att kunna leverera det som krävs. Ett alternativ är att importera vätgas från andra marknader. Då blir det den gasens pris och klimatpåverkan som styr.

I Lysekil bedriver Preem och Vattenfall en förstudie för produktion av vätgas för biodrivmedel där vätgas från vatten elektrolys ska användas för att öka utbytet av drivmedel från bioråvara. Bioråvaran utgörs av olika produkter med biogent ursprung. Produktion av biodrivmedel kräver mer vätgas per energienhet än fossila drivmedel eftersom bioråvaran innehåller mer syre än fossil olja.⁵ Genom reduktionsplikten, som går ut på att andelen biodrivmedel successivt ska öka i all bensin och diesel, kommer efterfrågan på biodrivmedel att öka och därmed även behovet av vätgas. Preem har också genomfört lyckade pilottester med koldioxidavskiljning på sin vätgasproduktion.

Det pågår flera initiativ för produktion av elektrobränslen som drivmedel för flyg och sjöfart. Det kan vara svårt att räkna hem de satsningarna om inte de fossila alternativen blir betydligt dyrare. Tekniken finns för framställning av dessa bränslen, men det kommer att kräva stora mängder el och stora investeringar.

Om det går att hitta hållbara värdekedjor där fler aktörer går in och delar på riskerna, i kombination med att styrmedlen anpassas, kan elektrobränslen bli en ekonomiskt hållbar lösning. Men med tanke på den stora energiåtgången vid produktion av elektrobränslen (där man utgår från koldioxid) är även förgasning av skogsavfall och

Elektrobränslen

Elektrobränslen är ett samlingsnamn för drivmedel och kemikalier gjorda av el, vatten och koldioxid eller kväve. I korthet framställs elektrobränslen genom att vätgas, som produceras genom elektrolys av el och vatten, kombineras med koldioxid eller kväve. Koldioxiden kan ha olika källor; den kan komma från rökgaser, produktion av flytande biodrivmedel, uppgradering av biogas eller, i ett framtidsscenario, infångas från luft. Kväve fångas in från luften.

Elektrobränslen är särskilt intressanta för sektorer som sjöfart och flyg som är svåra att elektrifiera och där flytande bränslen med hög energitäthet är svåra att ersätta.

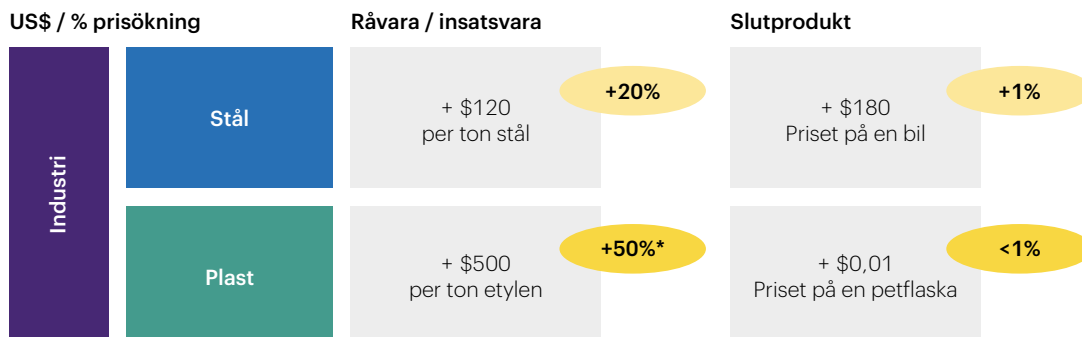
De största utmaningarna för elektrobränslen är deras låga energiomvandlingseffektivitet och höga produktionskostnader. Eftersom elektrobränslen som koncept är ganska nytt, och vissa produktionssteg fortfarande utvecklas, är kostnadsberäkningar osäkra. Produktionskostnaderna i litteraturen varierar stort och beror bland annat på olika antaganden för priset på el.

produktion av syntesgas (koldioxid och vätgas) ett alternativ som, tillsammans med ytterligare tillförd vätgas, kan omvandla allt kol i ingående skogsråvara till byggstenar för olika drivmedel eller material. Då biomassa är en begränsad resurs är det viktigt att denna främst används där substitutionsmöjligheterna från fossila bränslen eller insatsråvaror är begränsade, till exempel för långväga flyg eller sjöfart. Ska klimatmålen nås är det viktigt att klimatpolitiken blir tillräckligt kraftfull även för dessa transportslag. Även om Sverige jämfört med andra länder har gynnsamma förutsättningar för förnybar energi i form av ett utvecklat skogsbruk och bra vindlägen kommer det att bli konkurrens om både den förnybara elen och biomassa från skogen. Därför är det svårt att bedöma vilka alternativ som kommer att tillämpas, men ett troligt scenario är att vätgas kommer att framställas på flera olika sätt beroende på industriella och regionala förutsättningar.

Alternativ till vätgas för att klara klimatmålen för olika industriella processer exemplifieras i bilaga 2.

Figur 6: För fossilfritt stål finns det en premiemarknad och ekonomiskt hållbara värdekedjor med etablerade intressenter. Fossilfri plast har inte nått dit ännu. För båda fallen illustreras hur liten påverkan ett fossilfritt råmaterial har på slutprodukten, bil respektive petflaska. Källa: SYSTEMIQ analysis for the Energy Transitions Commission, 2018.

Prispåverkan för fossilfrihet i senare led



Det finns en premiemarknad för fossilfritt stål

Utvecklingen av vätgasbaserade processer drivs av klimatpolitiken, vilken i sin tur ger upphov till en premiemarknad för koldioxidneutrala produkter.

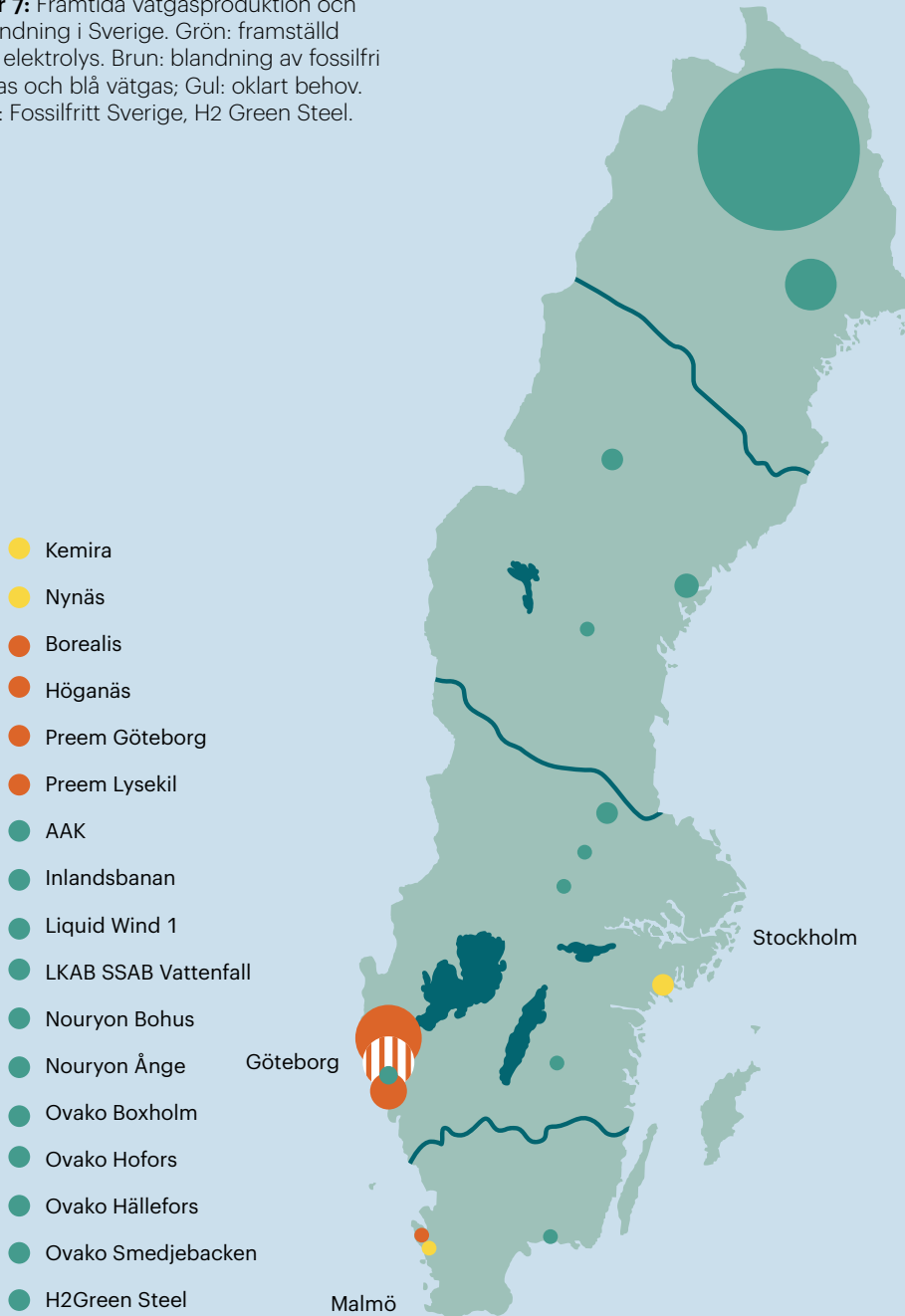
Det går redan i dag att få tillräckligt bra betalt för de första tonnen fossilfritt stål på en världsmarknad. Exempelvis har Volvo och Peab uttryckt en avsikt att köpa stål från Hybrit. Det är svårare för drivmedel som har betydligt kortare värdekedjor, exempelvis för HVO (biodiesel) som i nuläget inte kan bli dubbelt så dyr utan att tappa marknadsandelar. Här krävs andra styrmedel och att de fossila alternativen blir tillräckligt dyra. Om inte, riskerar vi en situation där biodrivmedel blir helt avhängigt statliga subventioner under lång tid.

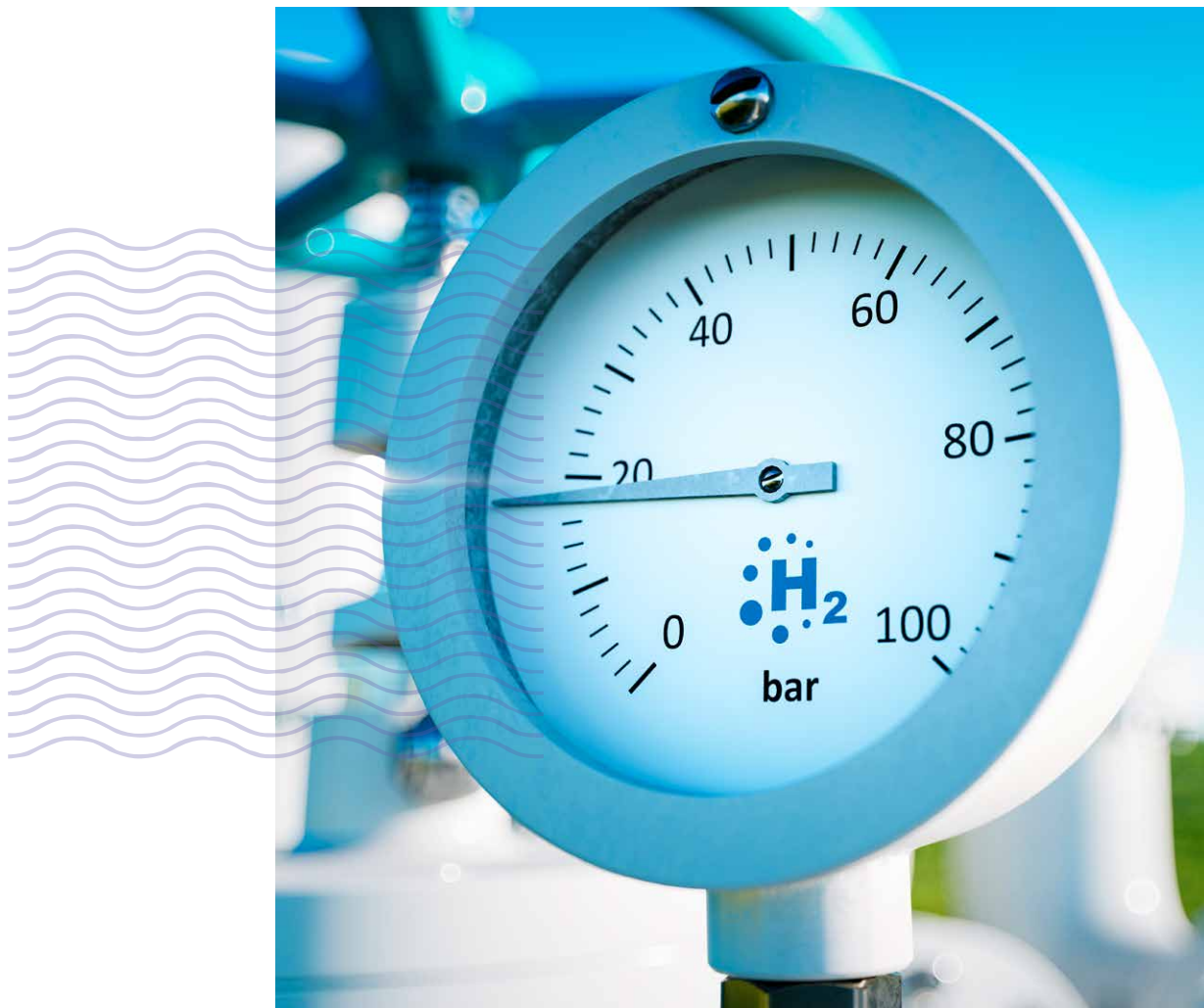
Det viktiga är att skapa en efterfrågan på klimatneutralitet genom hela värdekedjan, från råvara till slutprodukt. I Figur 6 illustreras hur kostnadsökningar i producentledet på grund av teknikbyte till koldioxidfri produktion av basmaterial, här exemplifierat med stål och plast, blir relativt

marginella i slutprodukten, i exemplet en bil eller petflaska. Om man kan skapa en betalningsvilja från slutkonsument kan det finansiera nödvändiga investeringar uppströms. (4) (5) (6)

Att satsa på att ta fram klimatneutrala produkter kan ge en påverkan på hela värdekedjan som är stark nog att bidra till de investeringar som krävs för att ta fram klimatneutrala basmaterial och insatsvaror. Detta underlättas dessutom av att kostnadsökningen för en slutprodukt som använder dessa material alltså blir marginell. Det finns därmed goda utsikter till att kunna ta ut en prispremie som täcker de extra kostnaderna. Satsas dessutom på lättare konstruktioner är det möjligt att kostnaden (och därmed priset) för en klimatneutral produkt inte alls behöver bli högre än motsvarande konventionella produkt.

Figur 7: Framtida vätgasproduktion och användning i Sverige. Grön: framställd med elektrolys. Brun: blandning av fossilfri vätgas och blå vätgas; Gul: oklart behov. Källa: Fossilfritt Sverige, H2 Green Steel.

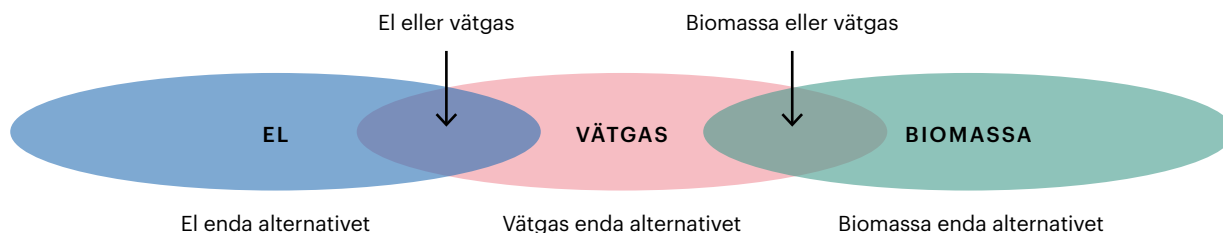




Förväntad efterfrågan på vätgas

»Det är osäkert hur stor efterfrågan på vätgas kommer att bli. En grov uppskattning för 2030 är 20–25 TWh vätgas.«

Figur 8: Hur stor efterfrågan på vätgas faktiskt blir beror också på förutsättningarna för alternativen.



Vätgasens roll kommer att utvecklas och förändras över tid, i takt med teknikutveckling och energisystemets omställning. Det går inte att idag fastställa vilka tekniker som kommer att vara den bästa lösningen för att nå klimatmålen på längre sikt. För att illustrera att det finns många tekniskspår visas i bilaga 2 alternativa tekniska lösningar till vätgas i olika industriprocesser.

Fossilfritt Sverige har i sin strategi⁶ gjort en sammanställning över hur stor den totala efterfrågan på vätgas kan bli år 2030 respektive 2045 och landar i denna på 12 TWh till år 2030. Med tillägg för en ökad efterfrågan för transporter och inom övriga sektorer kan efterfrågan på vätgas ligga på drygt 60 TWh år 2045. Sedan de gjorde sin sammanställning har ytterligare initiativ tillkommit, främst H2 Green Steel. Det potentiella industriella vätgasbehovet hos svenska raffinaderier (Preems båda raffinaderier samt St1s raffinaderi) och petrokemi (Stenungsundsindustrierna) är osäkert på grund av att det ännu är oklart vilka utvecklingsvägar som kommer att följas och vilken grad av direkt och indirekt elektrifiering dessa kommer att innehålla.

Energimyndigheten har lagt fram ett förslag på ett planeringsmål för installerad effekt i elektrolysörer på 5 GW till

2030 och totalt 15 GW till 2045. De diskuterar hur stor elanvändning det kan leda till beroende på vilken utnyttjningsgrad elektrolysörerna kommer att få, och utgår då från en kapacitetsfaktor mellan 50 och 95 procent. Till 2030 innebär det en ökad elförbrukning på mellan 22–42 TWh, och till 2045, 66–126 TWh. I vätgas motsvarar det cirka 15–30 TWhH₂ respektive 40–80 TWhH₂. (7)

Av de projekt som aviserats är det inte säkert att alla kommer att realiseras fram till år 2030, samtidigt som fler kan tillkomma. Det kan också finnas alternativ till vätgas som uppfattas som mer energi- och kostnadseffektiva.

Sammanfattningsvis är det svårt att med säkerhet säga hur stor användningen av vätgas kan vara i Sverige 2030, men överslagsmässigt skulle vätgasbehoven kunna uppgå till cirka 20–25 TWh i Sverige 2030⁷ inklusive dagens användning. Rysslands invasion av Ukraina gör kan takten i omställningen mot mer förnybar energi kan komma att öka, vilket EUs satsning RePower Europe⁸ ger ett uttryck för. Det är dock för tidigt att säga vad effekten kommer bli och hur det kommer påverka marknaden för klimatneutral vätgas.



Metoder för produktion, lagring och transport av vätgas

»Vätgas kan framställas ur vätgasrika material såsom vatten, biomassa eller fossila bränslen. Varierande förutsättningar i olika regioner och industrier avgör vilken teknik som väljs.«

De industriprojekt som har initierats i framför allt norra Sverige planerar att producera vätgasen till sina processer genom elektrolys baserad på ny vindkraft. Sverige har, till skillnad från många andra länder, goda förutsättningar för att tillhandahålla i det närmaste fossilfri el till relativt konkurrenskraftiga priser. Det ger Sverige en fördel jämfört med andra länder. Samtidigt finns det ett motstånd mot den utbyggnad av vindkraft som behövs för att möta de kraftigt ökade elbehoven.

Utbyggnaden av elproduktionen för samhällets elektrifiering, inklusive för vätgasproduktion, förutsätter lokal acceptans och kommunal tillstyrkan (inte minst för vindkraft), och nya överföringsförbindelser. Det kräver bättre samverkan med lokalsamhällena, samtidigt som kommunerna ges ekonomiska incitament för att möjliggöra utbyggnaden. Det gäller inte minst i södra Sverige där befolkningstätheten är hög och där behovet av ny elproduktion just nu är extra

stort. Det måste också säkerställas att Svenska Kraftnät och övriga nätägare kan bygga ut nätet i den takt som krävs för att möta marknadens behov.

Vätgas kan också framställas genom förgasning av biomassa (till exempel skogsavfall) vilket ger en syntesgas (en blandning av koldioxid, kolmonoxid och vätgas) som kan omvandlas till en större andel ren vätgas och koldioxid genom tillförsel av högtemperaturånga i en katalytisk process. Det vanligaste sättet att framställa vätgas idag är genom ångreformeringsprocess av naturgas. Det svenska naturgassystemet innehåller idag en blandning av naturgas och biogas. År 2021 uppgick biogasandelen till 34 procent, och ambitionen är att den andelen ska öka successivt till 100 procent 2050. (8) Förutsatt att det lyckas, innebär det att även vätgas som framställs ur metangas från det svenska gassystemet blir fossilfri i motsvarande grad.

TEKNIKER FÖR FRAMSTÄLLNING AV VÄTGAS

Vätgas kan framställas ur vätgasrika material, såsom fossila bränslen, biomassa eller vatten.

Ångreformeringsprocess

Ångreformeringsprocess av naturgas är den vanligaste metoden att framställa vätgas. Reaktionen är endoterm, vilket innebär att den kräver tillförd energi. Vid framställning av vätgas genom ångreformeringsprocess blandas naturgas (eller annat gasformigt kolväte) med het vattenånga i en reaktor. Arbetstemperatur ligger på 400–800. (23) Vätgas utvinns både ur vattnet (H₂O) och metanet (CH₄). Om man ska använda kol eller biomassa måste den förgasas innan

den kan användas för framställning av vätgas, alternativt kan man använda biogas som är framställd genom rötning eller jäsning. Ångreformeringsprocess av naturgas har en energiverkningsgrad på 70–85 procent.³⁷

För att göra vätgas som producerats genom ångreformeringsprocess av naturgas "klimatneutral", kan processen förses med koldioxidavskiljning och lagring (CCS). Närmare 90 procent av koldioxiden kan avskiljas från befintliga anläggningar. Kostnaden varierar beroende på teknik och i vilket processteg gasen avskiljs. Vätgasen kan också göras "grön" genom att naturgasen byts ut mot biogas. Tillgången på biogas kan dock vara begränsad.



Förgasning eller partiell oxidation

Förgasning eller "partiell oxidation" är till skillnad från ångreformerning en exoterm reaktion (avger energi). Kolvävet oxideras delvis till en syntesgas som består av kolmonoxid (CO) och vätgas (H₂). Vanligen används fossila bränslen, men även biomassa eller biogena avfall är möjliga. Arbetstemperaturen ligger på 900–1 100 grader Celsius. (23) Förutom att utvinna vätgas, kan även andra bränslen eller kemikalier framställas ur syntesgasen.

Vätgas kan även framställas via pyrolys av naturgas, vilket ger ett fint kolpulver som biprodukt. Denna metod har väckt en hel del intresse på senare tid eftersom slutlagring av ett kolpulver är betydligt enklare och billigare än lagring av koldioxid. Dock går även energin i kolpulvret förlorad, vilket betyder att energiverkningsgraden från naturgas till vätgas blir 30–40 procent lägre än att producera vätgasen via ångreformerning.

Elektrolys

Vid elektrolys används el för att spjälka upp vatten (H₂O) i väte (H₂) och syre (O₂). Elektrolysprocessen är endoterm vilket innebär att energi måste tillföras för att spjälkningen ska kunna ske. Verkningsgraden i en elektrolysör, inklusive den kringutrustning som behövs, ligger idag på 60–70 procent. För varje kilo väte som bildas, bildas även 8 kilo syre som helst också bör kunna nyttiggöras. De elektrolysörer som är kommersiella idag håller en arbetstemperatur på 20–80 grader Celsius, vilket gör att även spillvärmen i vissa fall kan tas tillvara. Det höjer då totalverkningsgraden för anläggningen.

Det finns tre olika tekniker för elektrolys av vatten och de befinner sig i olika utvecklingsstadiet; alkalisk elektrolys, PEM-elektrolys³⁸ och SOEC.³⁹

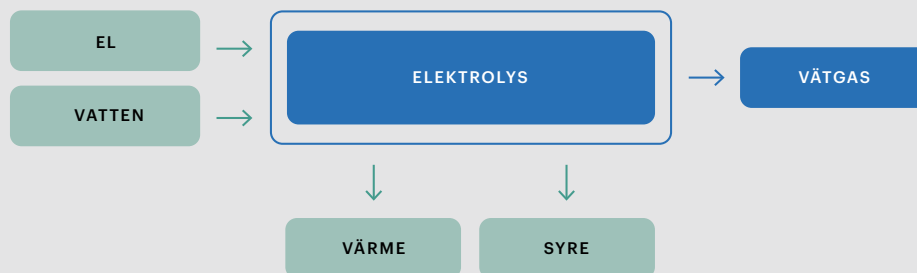
Gemensamt för de olika teknikerna är att de består av samma huvudkomponenter; elektroder, elektrolyt och någon typ av membran. Alkalisk elektrolys, som är den enklaste tekniken, ligger till grund för utvecklingen av PEM- och SOEC-elektrolys. Alkalisk elektrolys är mogen och kommersiellt tillgänglig teknik. PEM-tekniken är kommersiell och har funnits på marknaden i 5–10 år medan SOEC-elektrolysörer är nya på marknaden och delvis fortfarande under utveckling. (24) Se även nedan.

Eftersom vi inte rör oss på den detaljnivån i denna rapport talar vi fortsättningsvis endast om "elektrolysörer" med den kommersiella teknik som används idag.

Högtemperaturolektrolys

I SOEC tillförs vattnet i form av vattenånga och processen arbetar vid mycket höga temperaturer mellan 600–1 000 grader Celsius vilket innebär att man kan nå en betydligt högre elverkningsgrad. (24). Ångan måste dock produceras vilket också kräver energi. Det pågår utvecklingsprojekt där man tittar på möjligheterna att producera vätgas med kärnkraft, där en del av ångan som bildas i kärnkraftverket avleds till elektrolysören. Det minskar elverkningsgraden i reaktorn, men ger totalt sett en effektivare vätgasproduktion. Totalt sett minskar energibehovet för produktion av vätgas med 20 procent.⁴⁰

En dedikerad kärnkraftsreaktor kan också producera vätgas konstant. Vätgasproduktion med kärnkraft tar också betydligt mindre markyta i anspråk än motsvarande produktion med vindkraft. I närtid är en sådan lösning ej aktuell i Sverige, men diskuteras i andra länder, exempelvis Frankrike.⁴¹



Att producera vätgas genom elektrolys eller ångreforming av naturgas i kombination med CCS (så kallad blå vätgas) är två helt olika affärsupplägg. Elektrolysören är modular, vilket gör att man kan börja i liten skala och sen bygga ut sin anläggning efter hand. Det finns idag inga tydliga skalfördelar för elektrolysörer, även om ett större uppköp sannolikt renderar ett lägre styckepris. För att klara svängningar i elpriset eller tillgång på el kan elektrolysören kompletteras med ett lager. För vätgaslager finns det skalfördelar, då större bergrumslager får en lägre lagerkostnad per kilo vätgas, men i gengäld ökar den totala investeringen.

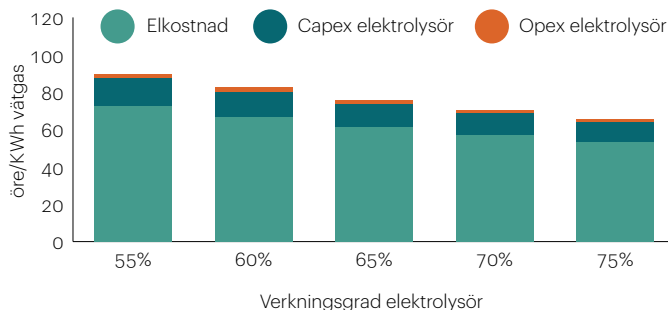
Vätgasproduktion medelst ångreforming av naturgas, kompletterad med CCS, kräver en betydligt större investering för att nå skalfördelar. Den inkluderar avskiljning, transport och lagring av koldioxid. Närmast till hands ligger att lagra den avskilda koldioxiden i Norge. Det är dock inte klart var koldioxiden kommer att avskiljas, det vill säga om den kommer avskiljas direkt, i samband med naturgasutvinningen och/eller ångreformen till vätgas och vätgasen sedan transporteras till kunden, eller om naturgasen först transporteras till kunden där koldioxiden sedan avskiljs i samband med reformeringen till vätgas. Oavsett var, blir det alltid en lägre specifik kostnad per kilo koldioxid ju större avskiljningsanläggningen är. Det är också möjligt att transportera vätgasen i form av en annan förening, exempelvis ammoniak eller metanol.

Kan blå vätgas erbjudas marknaden till ett konkurrenskraftigt pris är det ett alternativ för aktörer som inte kan eller vill investera i egen vätgasproduktion genom elektrolys, och där kunderna i senare led kan acceptera vätgas som inte är helt fossilfri. Det är också en lösning för att få fram vätgas med låg klimatpåverkan, utan att öka belastningen på elsystemet.

Perioden som denna rapport främst avser, fram till år 2030, kommer att kännetecknas av en uppbyggnad av vätgasinfrastruktur främst driven av de industriprojekt som tidigare nämnts och det troliga är att den kommer innefatta både elektrolysbaserad vätgas och vätgas från ångreforming av naturgas (blå vätgas). Import av blå vätgas kan bli ett komplement och en back-up till de anläggningar som är beroende av ett jämnt flöde av vätgas för sina processer. Inte minst petrokemiindustrierna och raffinaderierna på Västkusten kan komma att se blå vätgas som ett alternativ, från Norge, alternativt framställd från naturgasen på Västkusten.

Elpriset utgör den största kostnaden vid produktion av vätgas med elektrolys. Förbättrad verkningsgrad hos elektrolysörerna har endast en marginell inverkan på produktionskostnaden. På motsvarande sätt har priset på naturgas en stor betydelse för vätgaskostnaden. Se Figur 9 nedan.

Figur 9: Illustration av hur elektrolysörens verkningsgrad slår på produktionskostnaden för vätgas, öre/kWh. Indata: 8 Mkr/MW för elektrolysör inkl. kringutrustning, elpris 50 öre/kWh, kalkylränta 6 % och avskrivningstid 20 år. Källa: IVAs projekt Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle, egna beräkningar.





Kan försäljning av biprodukterna syrgas och spillvärme bidra till lönsam vätgasproduktion?

Alla resurser bör tas tillvara så effektivt som möjligt, så även det syre som bildas vid elektrolysbaserad vätgasproduktion samt värmen som alstras i elektrolysören. Ekonomiskt kan det ge ett bidrag på marginalen, kanske mer om omständigheterna är gynnsamma, men det kommer inte att vara avgörande för kostnaden för vätgasen.

Spill-/överskottsvärme från en elektrolysör kan hålla en temperatur uppemot 60–80 grader Celsius beroende på vilken teknik som används. Det skulle vara tillräckligt för att värma lokaler och eventuellt kunna nyttiggöras i ett fjärrvärmesystem.

Möjligheten att ta tillvara spillvärmens beror på dess och fjärrvärmens temperaturer och flöden samt avståndet mellan elektrolysör och fjärrvärmesystem. Bäst förutsättningar har de elektrolysörer där spillvärmens kan tas tillvara direkt på fjärrvärmesystemet, utan att behöva höja spillvärmens temperatur med till exempel en värmepump. Prissättningen av spillvärme ser olika ut för olika fjärrvärmebolag och beror på vilka bränslekostnader som minskar vid nyttjandet av spillvärmens. Om värmeverken själva äger elektrolysören, tar vara på värmen och säljer vätgas kan förutsättningar-

na för att nyttiggöra spillvärme bli bättre. Detta då lokaliseringen och dimensioneringen av elektrolysören kan anpassas efter behoven i ett fjärrvärmesystem och därmed även kunna bidra till att man undviker andra nödvändiga investeringar för att alstra värme, exempelvis genom förbränning i en värmepanna.

För varje kilo vätgas som produceras ur vatten bildas 8 kilo syre. Genom informella samtal med olika aktörer har vi fått uppfattningen att syrgas idag kan betinga ett värde på 700–800 kronor per ton flytande syre vid en leverans till en storskalig förbrukare, exempelvis till en stålindustri.⁹ Ska en anläggning, exempelvis Hybrit, producera 7 TWh (2045) vätgas per år motsvarar det 200 kiloton vätgas och det kommer följaktligen att bildas 1,7 megaton syrgas per år. Priset på syrgas kommer då att pressas, och sannolikt kommer man inte att få avsättning för all syrgas som bildas och mycket kommer därför att behöva ventileras bort. Kan samproduktion ske i en process, eller med närliggande process, som både kräver vätgas och syrgas och relationerna är rimliga, det vill säga 1:8, så kan man få avsättning för syrgasen. Syrgasen kan exempelvis användas för att effektivisera förbränningsprocesser vilket höjer temperaturen och kan i vissa fall minska mängden kväveoxid i rökgaserna. Syrgasproduktionen kan även vara intressant i en framtid där oxyfuelförbränning används som CCS-teknik vilket kräver stora mängder syrgas vilket annars måste produceras i energikrävande luftseparationsprocesser.

MILJÖPÅVERKAN VID VÄTGASPRODUKTION MED ELEKTROLYSÖRER

Miljöpåverkan från elektrolysörer och elektrolysprocessen kan indelas i produktion och drift, samt skrotning eller återvinning av dessa. För driften styrs miljöpåverkan av vilken el som används och hur tillgången på sötvatten ser ut regionen.

Elanvändning

För varje kilo vätgas som framställs går det åt cirka 50 kWh el. För att bidra till minskad klimatpåverkan bör vätgas från elektrolys framställas med fossilfri el. Idag finns fossila bränslen i större eller mindre grad i de flesta elsystem. Det nordiska elsystemet har låga utsläpp av växthusgaser. Den svenska elmixen släpper ut cirka 20 gram koldioxid per kilowattimme⁴² el, medan det europeiska systemet släpper ut cirka 340 gram koldioxid per kilowattimme el. Genomsnittet inom OECD är cirka 430 gram per kilowattimme el. (15) Om EU-kommissionens förslag till förändring av EU ETS går igenom kommer EUs utsläpp från elproduktion uppgå till 0 gram koldioxid per kilowattimme el år 2040. I Figur 23 illustreras hur stora koldioxidutsläppen blir från vätgas producerad med dagens teknik ur naturgas, med elektrolys på kontinenten (tysk elmix) och dagens svenska elmix.

Vattenanvändning

Under elektrolysörens livstid är användningen av vatten betydande eftersom det går åt 9 kilo vatten för att tillverka 1 kilo vätgas. I områden med riklig tillgång på sötvatten, till exempel Norrbotten, utgör detta inget stort problem. Generellt sett är tillgången på sötvatten i yt-vattentäkter god i Sverige, men det finns platser där färskvatten är en bristvara, framför allt i södra Sverige. Avsaltning av havsvatten är ett alternativ, men det är energikrävande och man har att hantera stora mängder salt på ett ansvarsfullt sätt, beroende på salthalten i havet.

Användning av främmande och sällsynta material

För att nå en låg energiförbrukning vid elektrolys använder man i alla typer av elektrolysörer katalytiskt aktiva elektroder. I alkaliska elektrolysörer används nickel, som också används i elfordon, något som kan leda till

utmaningar med tillgång på nickel när elektrolys- och bilindustrin samtidigt ska skalas upp. Miljöpåverkan från utvinning av nickel är påtaglig (29) och behöver beaktas.

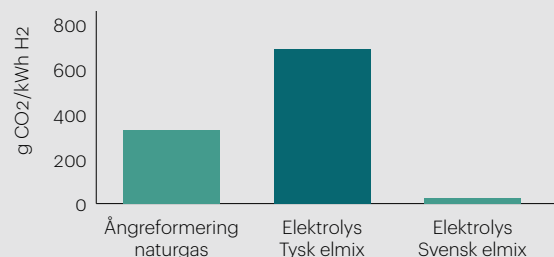
Även PEM-elektrolysörer har utmaningar kopplade till de material som används. I elektroderna används ett antal ovanliga metaller, bland annat iridium och platina. Tillgången på de metaller som krävs är begränsad och kan bli en bristvara.

En annan utmaning för PEM-elektrolysörer är att de membran som används måste ha speciella egenskaper för att de ska fungera på avsett sätt.⁴³ De kemikalier⁴⁴ som används är så kallade "evighetskemikalier" som inte bryts ned i naturen. Mycket forskning ägnas åt att hitta mindre problematiska typer av membranmaterial och åt att hitta destruktionsmetoder som inte ger några farliga restprodukter.

Vätgasläckage kan bidra till ökad växthuseffekt

Vätgasläckage har en indirekt påverkan på klimatet genom att vätgasen kan reagera med andra ämnen i atmosfären och på så sätt påverka dess växthusegenskaper. Den läckta vätgasen kommer att reagera med OH-radikaler i troposfären som i annat fall skulle kunna reagera med metan och reducera dess halt i atmosfären. Den uteblivna minskningen av metan, som är en mycket kraftfull växthusgas, ger samma effekt på global uppvärmning som om metanhalten i atmosfären hade ökat. Om vätgasläckaget kan hållas på en låg nivå, några få procent, kan man dock försumma vätgasens växthusgaspåverkan jämfört med påverkan från de fossila bränslen som vätgasen ersätter. (30)

Figur 10: Koldioxidutsläpp från olika metoder att framställa vätgas. Källa: Hydrogen generation in Europe: Overview of costs and key benefits, Jan Cihlar, Guidehouse, European Commission, 2021, IVA.



Lagring och transport av vätgas

Idag sker de stora energiflödena i Sverige genom den transport av el som sker från överskottsområden med mycket vattenkraft i norra Sverige, till södra Sverige där elkonsumtionen är som störst. Utan denna obalans skulle transmissionsledningarna inte behövas, utan elen skulle i större utsträckning konsumeras där den producerades. När det nu planeras att byggas anläggningar för vätgasproduktion kommer dessa troligtvis att uppföras i nära anslutning till den plats där vätgasen ska användas. Nya elintensiva anläggningar förläggs också i huvudsak i norra Sverige där tillgången på el är god. En storskalig landstäckande energiinfrastruktur för vätgas, motsvarande den Sverige har för el, kommer därför sannolikt inte bli aktuell under överskådlig tid. Däremot kan det mycket väl etableras lokala och regionala vätgasledningar som drivs av de vätgaskluster som nu diskuteras i norra Sverige, runt Bottenviken, Gävleborg och Dalarna samt kemiklustren i Västsverige. (9)

I april 2022 lanserade gasinfrastrukturföretagen Nordion Energy och Gasgrid Finland initiativet Nordic Hydrogen Route. De avser att bygga en vätgasinfrastruktur i Bottenviksregionen som ska stå klar år 2030. Det skapar också en marknadslösning då ledningsnätet binder samman producenter och kunder från hela regionen. Gasledningen ska följa kustlinjen utmed Bottenviken, med förgreningar till efterfrågecentra som Gällivare och Kiruna. Ledningens slutliga längd planeras bli 1000 kilometer. (10)

I de fall elektrolysören inte kan placeras i direkt anslutning till förbrukaren av vätgasen är en rörtransport av vätgasen till förbrukaren det billigaste alternativet. (11); (12). Till exempel planerar Hybrit-projektet en vätgasledning på 3 kilometer utanför Luleå, från en pilotanläggning för vätgasproduktion till anläggningen för direktreduktion av järnmalm till järn. Det finns även en vätgasledning i Sandviken som är ett par kilometer lång, mellan Linde Gas, där vätgasen tillverkas genom elektrolys, och Sandviks industriområde. I de fall det finns flaskhalsar i elsystemet och vätgasen inte kan produceras i anslutning till användningen, kan vätgasledningar bidra till att avlasta elsystemet. Det mest kostnadseffektiva sättet att transportera mindre mängder vätgas längre sträckor i Sverige idag är i gasflaskor på lastbil.

Lagring av vätgas

Det finns olika metoder att lagra vätgas, från mindre tryckkärl och tankar, till saltgruvor och metallinkapslade berggrum. På grund av vätgasens låga densitet behöver lagringen ske vid ett högt tryck. Vätgas kan även lagras i form av väterika föreningar i form av ammoniak eller metanol. Mindre tryckkärl används främst vid transport av vätgas eller som vätgastankar i fordon (då under tryck på upp till 700 bar) och blir kostsamma vid en storskalig lagring av vätgas. Geologiska förutsättningar i Sverige utesluter saltgruvor.

Idag planeras för ett storskaligt vätgaslager i Sverige i form av ett metallinkapslat berggrum inom Hybrit-projektet.

Ett sådant lager testas nu i anslutning till Hybrits projektets pilotanläggning. Det planeras för ett storskaligt vätgaslager som ska rymma 120 000 kubikmeter vätgas vid ett tryck på 200–250 bar. Energimässigt kommer det att motsvara cirka 100 GWh. Lagret laddas under längre tid, men ska kunna klara 5 dygns stålproduktion, det vill säga på en tidsskala som är anpassad för förväntade variationer i vindkraftsproduktion.

Transport av vätgas

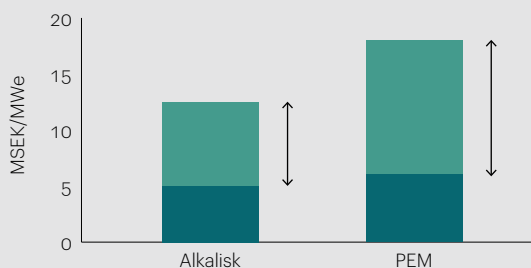
Vätgas kan transporteras på olika sätt; i gasform under högt tryck (200–700 bar) i tankar, tuber, eller gasflaskor via rörledningssystem, eller i flytande form i välisolerade kryotankar. (11) Vätgas kan också omvandlas till, och transporteras i form av, en väterik förening, exempelvis ammoniak eller metanol. Vilken transportform som väljs beror på avstånd och vilka volymer som ska transporteras. Även ändamålet för vilket gasen ska användas spelar roll.

Idag lagras och transporteras vätgas främst i komprimerad eller flytande form. Ungefär 85 procent av all vätgas används lokalt där den framställs och ungefär 15 procent transporteras med lastbil eller pipeline. (11) Globalt finns det totalt 4 500 kilometer vätgasledningar⁴⁵ där de flesta är några kilometer långa och den längsta är 500 kilometer. (12) För transporter mellan kontinenter är det mer kostnadseffektivt med fartygstransporter där vätgasen transporteras i form av ammoniak.

KOSTNADER

I andra kapitel i denna rapport diskuterar vi verkningsgrader och hur effektivt energiutnyttjandet blir då man producerar vätgas med el. Verkningsgraden kanske inte alltid talar till vätgasens fördel, men det finns andra värden som bör beaktas, exempelvis vilka andra alternativ som finns tillgängliga för att fasa ut fossila bränslen. I slutändan är det ekonomin för systemet som är styrande, och då inte bara investeringarnas storlek utan även andra delar av systemets kostnader.

Figur 11: Illustration av inom vilket prisspann de vanligaste elektrolysörerna befinner sig enligt den offentliga litteraturen. Källa: Rise Studie över elektrolysteknologier idag och i framtiden.

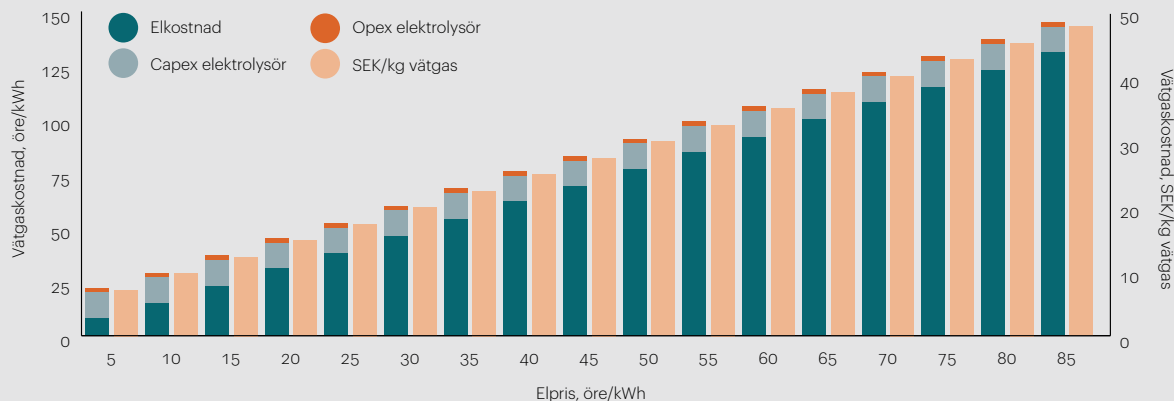


Kostnad för elektrolys

Det finns många litteraturstudier och sammanställningar av kostnader för elektrolysörer, varav många pekar på samma källor. Här utgår vi därför från en aktuell sammanställning från Rise (24). I stället för att ange siffror, visar vi inom vilket prisspann de vanligaste elektrolysörerna befinner sig enligt den officiella litteraturen. Den faktiska kostnaden bestäms mellan kund och leverantör. Driftkostnaderna bedöms ligga på cirka 1,5 procent av kapitalkostnaden (11).

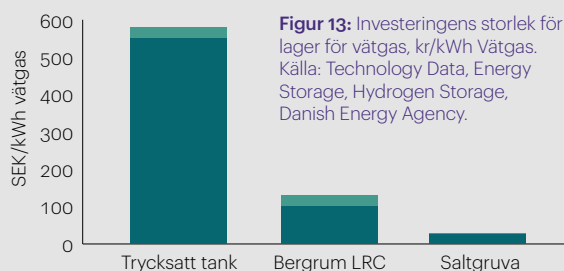
Med ett varierande elpris och ett stort teoretiskt prisspann på elektrolysörer går det inte att ge någon entydig uppgift på vad vätgasen kommer att kosta, men räkneexempel ges nedan och i kapitlet *Olika strategier för vätgasproduktion*. Elpriset har stor betydelse för priset på vätgasen, vilket visats tidigare, men även systemets uppbyggnad och dess utformning har stor betydelse.

Figur 12: Räkneexempel för vad kostnaden på vätgas blir vid olika elprisnivåer, anges i öre/kWh respektive kr/kg vätgas. Indata; 8 Mkr/MWe för elektrolysör inkl. kringutrustning, 6 % kalkylränta och en avskrivningstid på 20 år. Beräkningen inkluderar inte något lager. Källa: IVAs projekt Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle, egna beräkningar.



Kostnaden för lager

Kostnaden för lagring av vätgas varierar stort med typ av lager. Dyrast per kilo vätgas är mindre trycksatta vätgastankar och tuber, medan större lager i form av metallinkapslade bergtrum, exempelvis det lager Hybrit testar nu, eller vätgaslagring i saltgruvor. Det senare finns inte förutsättningar för i Sverige. Det är svårt att hitta någon entydig källa för vad ett vätgaslager kostar. Nedanstående är hämtat från danska energimyndigheten. (26)



Kostnader för transport av vätgas

Vad det kostar att transportera vätgas beror på många olika faktorer, såsom volym, avstånd, transportkärl eller pipeline.

Vid transport med lastbil tillkommer, förutom själva vätgaslagringen, lön till chaufför, drivmedel och kostnad för fordon. Avstånd och volym vätgas har stor betydelse för den genomsnittliga transportkostnaden, där större volymer och kortare avstånd leder till lägre kostnader. RISE har räknat på körsträckor upp till 500 kilometer och som mest 8 000 kilo vätgas per dag, och landar på

1–20 kronor per kilo vätgas för distribution av trycksatt vätgas via lastbil. (27) Ur den matris över kostnader de presenterar i sin rapport kan utläsas att kostnaderna i de flesta fall ligger på 5–10 kronor per kilo vätgas. Det är svårt att ge någon entydig uppgift över vad det kostar att transportera vätgas, då det är många faktorer som spelar in.

Lagring och transport av flytande vätgas är mer kostnadseffektivt än trycksatt vätgas, eftersom flytande vätgas tar mindre plats. Själva distributionskostnaden blir därför lägre för flytande väte än komprimerad. Kostnaden för transport av flytande vätgas enligt samma avstånd och volymer som ovan, landar i mellan 1 och 12 kronor per kilo vätgas för distribution av flytande vätgas via lastbil (27). Ur den matris Rise presenterar kan utläsas att kostnaderna i de flesta fall ligger mellan 2 och 6 kronor per kilo vätgas, vilket inte inkluderar kostnaden för kondensering (övergång från gasfas till vätskefas) av vätgasen.

En annan metod att transportera vätgas är trycksatt via en pipeline. Kostnaden för att lägga en rörledning styrs av markens beskaffenhet och värde. Det är dyrare i urban miljö än på landsbygd, och det är dyrare om man måste spränga sig igenom berg än om det räcker med att gräva ett dike. Utifrån olika källor har Rise landat i att ett rimligt antagande är att en pipeline kostar 10 miljoner kronor per kilometer. Även här har avstånd och volym gas stor betydelse för vad gastransporten kostar. För att komma under 1 krona per kilo vätgas, krävs att minst 4 000 kilo vätgas transporteras per dag. Det motsvarar 132 MWh gas per dag. (27) Här har säkert lokala förutsättningar stor betydelse.

För vätgas transporter under 10 ton per dag och avstånd kortare än 200 kilometer är sannolikt transport av komprimerad vätgas med lastbil eller tåg det mest ekonomiskt fördelaktiga alternativet. För små volymer på långa avstånd kan det vara mer lönsamt med flytande vätgas. (13)

Mindre mängder vätgas kan även blandas in i naturgas och transporteras i befintliga naturgasledningar. Hur mycket

wätagas som kan blandas in i naturgasen styrs både av ledningsnätets tekniska förutsättningar, kvalitetskrav på gasen och gaskundernas anläggningar, det vill säga möjlighet att använda den uppblandade gasen.

Enligt EU-kommissionens förslag på Tredje Gaspaketet ska systemansvariga för överföringssystemen i naturgasnätet godta gasflöden med en vätagashalt på upp till 5 volympro-

cent vid sammanlänkningspunkter mellan unionens medlemsstater i naturgasnätet. Det innebär dock att andelen vätgas kan komma att variera upp till och med 5 procent vilket är ett problem för de industrier som använder metan som insatsråvara i sina produkter.

Det går även att bygga om naturgasledningar för ren vätgastransport. Om det kan göras på ett kostnadseffektivt sätt kan delar av naturgasnätet dedikeras till vätgas när volymerna blir tillräckligt stora. Det är inte troligt att det svenska naturgassystemet kommer att konverteras till vätgas under överskådlig tid då industrierna längs ledningen

fortsatt kommer att ha ett behov av metan, främst biogas, vars andel i det svenska naturgassystemet idag ligger på 34 procent. (8) Gasnätet ligger i Sydvästsverige, och även om det uppstår en efterfrågan på vätgas i regionen ligger det närmare till hands att eventuella elektrolysörer förläggs i anslutning till förbrukningen. I Kontinentaleuropa, där gasnät är väl utbyggda och etablerade, kan befintlig gasinfrastruktur spela en större roll än i Sverige.

Värdet av vätgasen

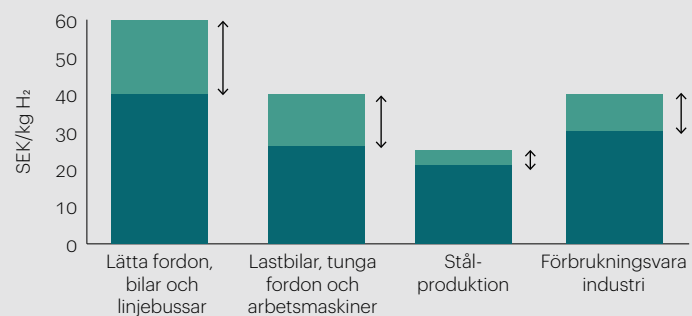
Det är inte kostnaden i sig som avgör om en satsning på vätgasteknik är lönsam, utan alternativkostnaden för respektive anläggning att uppnå sina klimatmål samt huruvida vätgas är en mer kostnadseffektiv lösning relativt andra tekniska alternativ. Rise har i sin rapport "Vätgasens potentiella värde som bränsle för framdrift av fordon samt andra industriella processer" (27) försökt värdera vätgasen för olika tillämpningsområden.

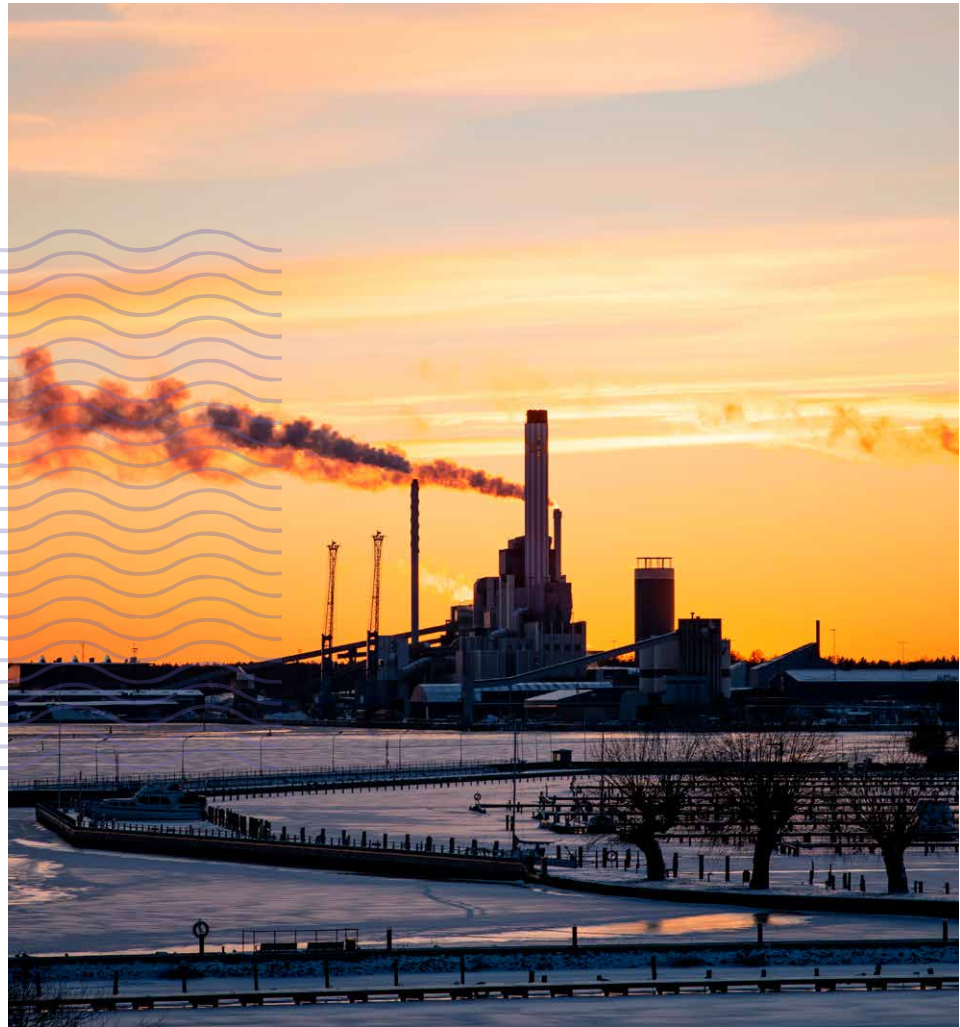
Vätgasens värde som fordonsbränsle utgår från den kostnad på vätgas som ger samma totalkostnad för fordonet över dess hela livstid som om den hade körts på bensin eller diesel. Lättare fordon konkurrerar med

batterifordon som sannolikt är mer konkurrenskraftiga för körning kortare sträckor. För tunga fordon är bränslepriset av större betydelse, och värdet på vätgasen blir lägre. Däremot har vätgasen fördelar relativt elektrifiering för tunga fordon. Värdet på vätgas i industriella processer diskuteras och uppskattas på liknande sätt. I Figur 14 återges kortfattat några resultat.

För en mer utförlig beskrivning hänvisas till Rises rapport. Notera att vätgasens värde alltid är relativt. Likväl som dagens bränslepriser varierar kraftigt finns det inte heller något entydigt fast värde för vätgas. Figuren anger alltså den bedömda alternativkostnad som vätgasen har att konkurrera med.

Figur 14: Illustration av värdet på vätgas i olika tillämpningar. Källa: Rise, Vätgasens potentiella värde som bränsle för framdrift av fordon samt andra industriella tillämpningar, 2022.





Hur påverkar vätgasen elsystemet?

»Produktion av vätgas kan leda till en kraftigt ökad elanvändning men också till en ökad flexibilitet i elsystemet.«

Produktion av vätgas påverkar elsystemet primärt på två sätt; elanvändningen ökar och vätgasproduktionen kan bidra med viss flexibilitet. Hur mycket elanvändningen kommer att öka är svårt att säga med säkerhet i dagsläget. I kapitlet *Förväntad efterfrågan på vätgas* diskuterar vi hur stor efterfrågan på vätgas kan bli och en grov uppskattning är 20–25 TWh vätgas 2030, inklusive dagens användning. Om den framställs med el kan det innebära ett ökat elbehov på 30–40 TWh till 2030. Vad utfallet de facto blir beror på hur stor efterfrågan på vätgas kommer att bli och i vilken utsträckning vätgasen produceras med el.

Eftersom elbaserad produktion av vätgas är förknippad med relativt stora förluster av högvärdig energi, kan alternativa tekniker med direktelektrifiering eller biomassa komma att konkurrera ut delar av de vätgasprojekt man skissar på idag. Då ökar inte efterfrågan på el lika mycket. Se exempel på alternativa processer i bilaga 2.

Det spelar också roll var i elsystemet efterfrågan ökar. I norra Sverige är elbalansen fortfarande positiv medan situationen i södra Sverige är mer ansträngd. Om inte ny elproduktionskapacitet kommer på plats i tillräcklig omfattning i södra Sverige måste vätgasen produceras eller tillföras på annat sätt. Alternativt får andra lösningar tillgripas för att nå klimatmålen.

Vätgasens bidrag till flexibilitet i elsystemet

Det finns stora förväntningar på att vätgas ska kunna bidra till en ökad flexibilitet i elsystemet och därmed till integrationen av mer vindkraft. I vilken utsträckning det kan ske beror på flexibiliteten i de processer som ska använda vätgasen, alternativt om vätgasen kan produceras mot buffertlager. Många processindustrier går i kontinuerlig drift och kommer därför sannolikt att behöva ett jämnt flöde av vätgas. För att säkerställa driften och samtidigt möjliggöra en flexibel produktion av vätgas kan man därför behöva investera i vätgaslager. Som nämnts tidigare innebär det också att

Omställningen av elsystemet

Elsystemet är under omställning. Drivkrafterna för detta är en omfattande elektrifiering av industri- och transportsektorn med målsättningen att fasa ut fossila bränslen. Det innebär också att elen måste produceras från förnybara eller fossilfria källor. Under de närmaste 10–15 åren kommer det ökade elbehovet främst att mötas med ny vindkraft då vindkraften i nuläget har lägst kostnader per producerad kilowattimme elenergi. Vindkraften kompenserar också för bortfall i elproduktion från kärnkraftverk och fossileldade kraftverk som har lagts ned. Det kommer också att krävas ersättningsinvesteringar för äldre vindkraftverk när de tas ur bruk.

Utveckling av elsystemet är i dagsläget förenad med betydande osäkerheter. Framför allt osäkerhet i tillståndsprövningar och social acceptans, speciellt gällande utbyggnad av vindkraft och dragning av stamnätsledningar. På senare tid har även diskussionen om ny kärnkraft tagit fart i Sverige.

Hur mycket kommer el- och effektbehovet att öka?

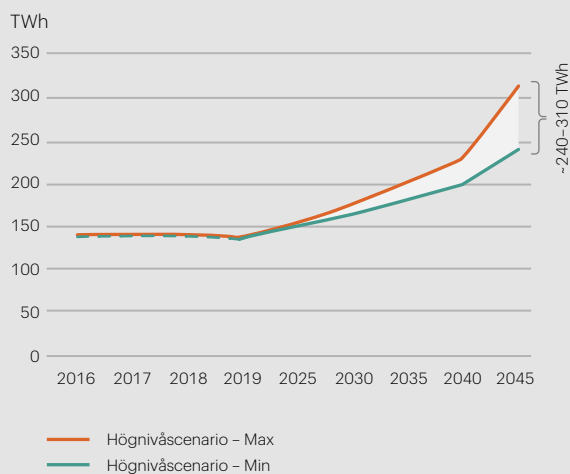
Den svenska elanvändningen har legat på ungefär samma nivå, cirka 140 TWh, sedan 1990-talet, och tills för bara några år sedan var bedömningen att elanvändningen inte skulle öka nämnvärt.

För att klara klimatmålen och fasa ut fossila bränslen är vi nu inne i en ny elektrifieringsvåg. Elektrifieringen av transporter och industri kommer ge ett kraftigt ökat elbehov. Dagens prognoser pekar mot en upp till fördubblad elanvändning år 2045.

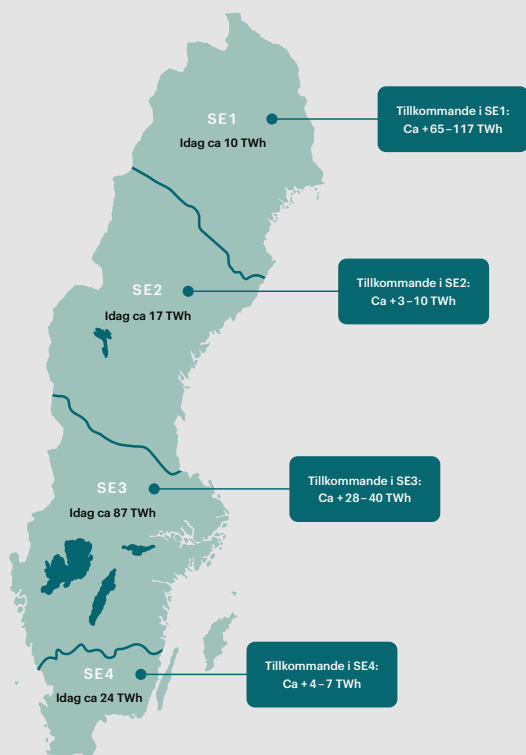
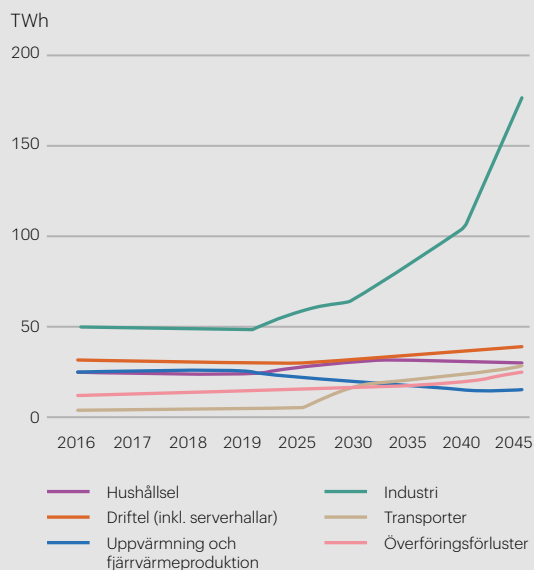
Hur mycket elanvändningen kan komma att öka kan ingen säga med säkerhet i dagsläget, men om alla de nu aviserade projekten genomförs kan den totala elförbrukningen i ett högnivåscenario öka till 175 TWh år 2030, och mellan 240 och 310 TWh år 2045. (34) Störst ökning står industrin för, och en stor andel av det ökade elbehovet beror på produktion av vätgas med elektrolys för framställning av fossilfritt stål i norra Sverige.

Figur 15: Elanvändningen kan komma att öka kraftigt de närmaste decennierna. I diagrammen visas hur elanvändningen kan komma att öka om alla de nu aviserade satsningarna på elektrifiering genomförs. Framställning av vätgas står för en stor andel av ökningen. OBS Alla bedömningar är behäftade med stor osäkerhet. Källa: Efterfrågan på fossilfri el, analys av högnivåscenario, Energiforsk 2021.

Högnivåscenario (totalt)



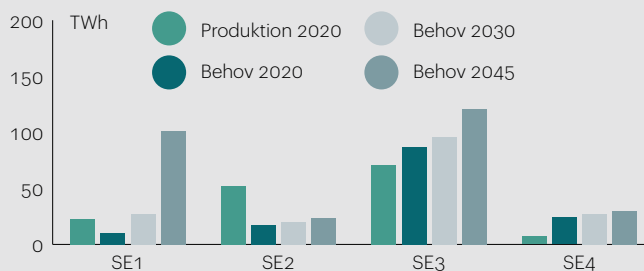
Högnivåscenario - Max (per sektor)



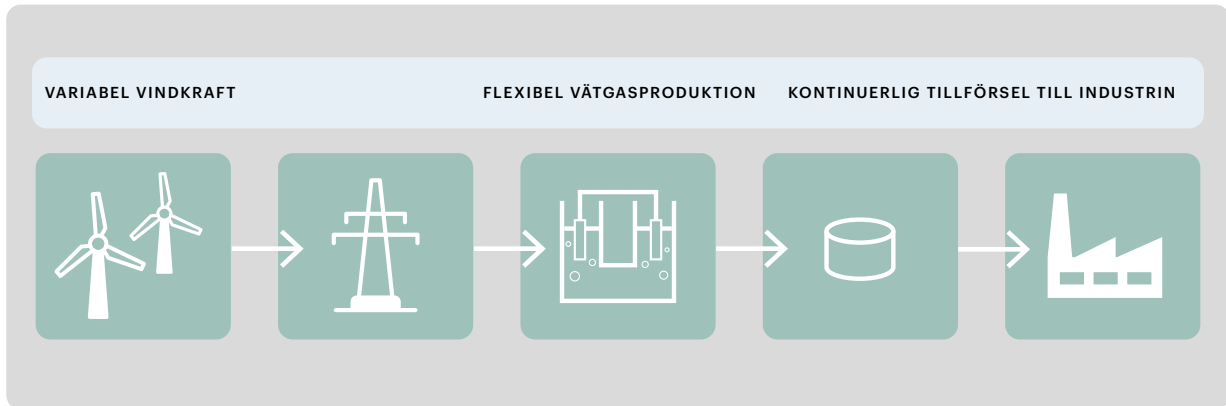
I Figur 16 visas elproduktionen och elförbrukningen per elområde år 2020, samt uppskattat elbehov per elområde år 2045. En del av det ökade elbehovet beror inte på produktion av vätgas utan elektrifiering av andra skäl.

Figur 16 (till vänster): Ungefärliga uppskattningar av hur elbehovet kan komma att förändras inom olika elområden till 2045 i ett högnivåscenario. Källa: Efterfrågan på fossilfri el, analys av högnivåscenario, Energiforsk 2021.

Figur 17 (nedan): Elproduktion per elområde 2020, elförbrukning 2020 och uppskattat elbehov 2030 och 2045 per elområde. Källa: Svenska kraftnät, Energiforsk, IVA.



Figur 18: Illustration av kedjan variabel vindkraft, flexibel vätgasproduktion mot lager, och kontinuerlig tillförsel till en processindustri.



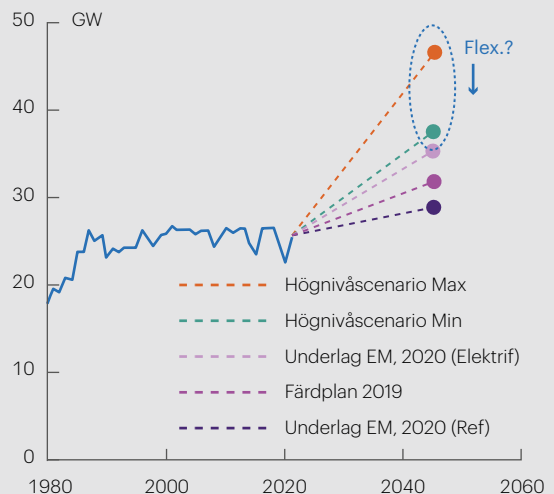
elektrolysörerna måste ha viss överkapacitet jämfört med kontinuerlig vätgasproduktion. Det finns ingen exakt gräns för när det lönar sig att investera i ett vätgaslager utan det beror på elprisvariationernas karaktär.

Att beskriva vilket vätgaspris som erhålls från elektrolys i ett system där flertalet sektorer är sammankopplade via elsystemet är inte helt trivialt, i synnerhet inte om systemet till stor del består av variabel elproduktion. Elpriset har stor betydelse, men forskning från Chalmers påvisar att flera andra parametrar också påverkar priset på vätgas vid olika perioder under året. (14)

För att undvika att producera vätgas de timmar när elpriset är högt, och istället dra nytta av perioder med låga elpriser, blir den kostnadsoptimala lösningen att investera i en överdimensionerad elektrolyskapacitet och ett vätgaslager för att tillgodose vätgasbehovet till lägsta möjliga kostnad. En sådan lösning innebär emellertid att både elektrolysör- och lagringskapaciteten kommer att vara begränsande.

Elektrolyörkapaciteten kommer att begränsa vätgasproduktionen under vissa perioder och sätta ett marginalpris på vätgasen eftersom en ökad produktion skulle kräva ytterligare investeringar i elektrolyörkapacitet. Samma sak gäller för vätgaslagret. Under vissa perioder kommer det att vara begränsande för vätgasproduktionen och där-

Figur 19: Toppeffektbehovet i elsystemet kan komma att öka till 36–47 GW, från dagens 26 GW, 2045. Det är en kraftig ökning jämfört med tidigare, nyligen genomförda bedömningar. Källa: Energiforsk Efterfrågan på fossilfri el, analys av högnivåscenario, 2021-04-23.



Även effektbehovet påverkas av elektrifieringen. Precis som för elanvändningen i energitermer har topplasteffekten i det svenska elsystemet legat relativt stabil under lång tid. De projekt som nu planeras kan komma

att öka högsta effektbehovet från dagens 26 GW till närmare 40 GW år 2045. (34) Införande av flexibilitetsåtgärder och sammanlagring gör att effektbehovet inte kommer att öka i samma grad som elenergianvändningen. Industrins ökade behov av el kommer att vara relativt stabilt över året, med långa utnyttningstider. Vätgasproduktion mot lager kan bidra till att jämna ut effekttoppar. Elektrifierade transporter kan förses med smart laddning och kan därmed begränsa topeffektbehovet.

Notera att detta gäller effekttoppar som normalt inträffar den kallaste vinterdagen. Sommartid ligger effekt-nivåerna med dagens elförbrukning kring 10 GW. Även lägsta nivån kommer sannolikt öka, men det är inte lika dramatiskt.

Ökad elproduktion och andel vindkraft

Sedan 2020 har tre stora scenario-analyser presenterats för Sveriges framtida kraftförsörjning av respektive Energi-myndigheten (EM) (3), Svenska kraftnät (Svk) (35) och Svenskt näringsliv (SNL) (36). (37) Scenarierna sträcker sig till 2045/2050, men de redovisar också 2030/2035, och

målar med "breda penseldrag". Samtliga dessa analyser pekar på en kraftigt ökad produktion av vindkraft, bibehållen vattenkraft och kraftvärme, samt kärnkraft i varierande grad.

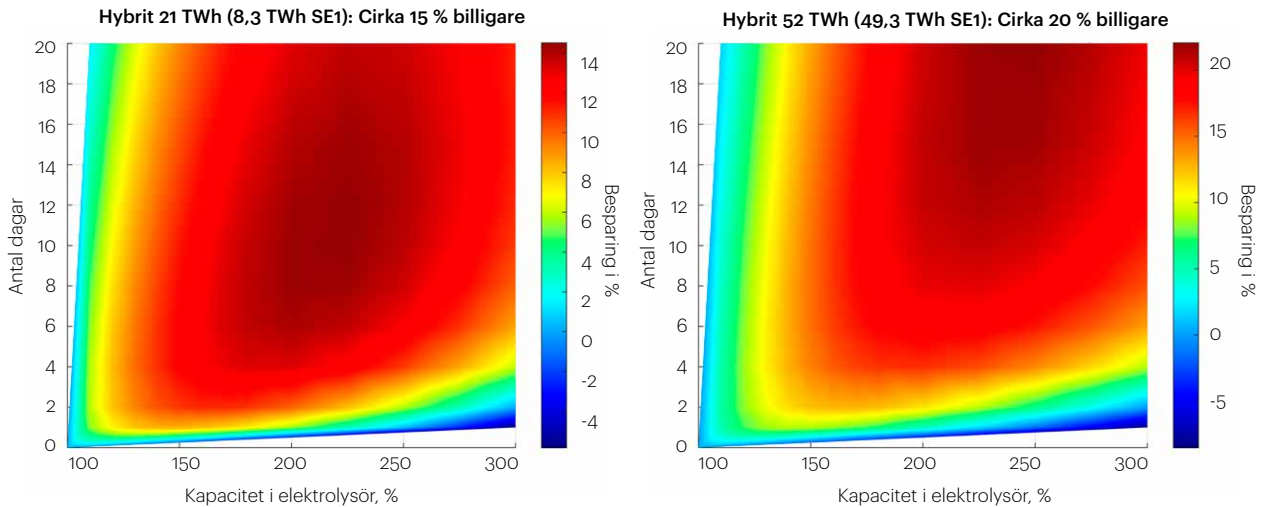
I Tabell 2 visas elproduktionen i Sverige för 2015 och 2020 samt Energimyndighetens bedömningar för 2030 och 2050 (3). Intervallet speglar två scenarier, ett EU-scenario som används för utsläppsberäkningar till EU-kommissionen (det vill säga är Sveriges officiella rapportering till EU) och ett (den högre nivån) som speglar en högre elektrifieringsgrad, inklusive vid tidpunkten kända vätgasprojekt.⁴⁶

Vi har inom detta arbete inte kunnat göra en egen analys av hur elproduktionen kan komma att utvecklas, men vi delar den allmänna bilden av att vindkraft, som är det mest konkurrenskraftiga produktionsslaget just nu, kommer att få möta den ökade efterfrågan på el det närmaste decenniet (se kostnader för ny elproduktion på sid 58). Det innebär att behovet av flexibilitetsresurser för att möta vindkraftens variation kommer att öka, vilket i sin tur innebär ökade kostnader för att hantera detta. Hur elsystemet kan eller bör utvecklas på längre sikt får bli föremål för en annan studie.

Tabell 2: Sveriges elproduktion 2015 totalt 159,4 TWh; 2020, totalt 159,9 TWh; samt Energimyndighetens bedömningar för 2030 resp. 2050. Källa: Energiföretagen 2021, Energimyndigheten Scenarier över Sveriges framtida energisystem 2020, ER 2021:6.

Energimyndighetens scenarier ⁴⁷	2015		2020		2030	2050
	TWh	Procent	TWh	Procent	TWh	TWh
Vattenkraft	74,9	47 %	71,2	45 %	67	68
Vindkraft	16,6	10 %	27,6	17 %	49–60 ⁴⁸	94–126
Solkraft	0,1	0 %	1,0	1 %	1,2	10–11
Kärnkraft	54,3	34 %	47,3	30 %	52	28–60
Industriell kraftvärme	5,6	4 %	6,1	4 %	5–6	4
Kraftvärme	7,3	5 %	5,7	4 %	10–11	13
Övrig värmekraft	0,6	0 %	1,0	1 %	0	0
Totalt produktion	159,4	100 %	159,9	100 %	185–197	217–282
Nettoexport	22,6		25		28–35	39–47
Elförbrukning inom landet	136,8		134,9		157–162	178–234

Figur 20: Optimering av elektrolysör och lager för en flexibel elanvändning, vid en elförbrukning på 21 TWh resp. 52 TWh, i elområde 1. Elen produceras med ny vindkraft. Källa: Hybrit/Vattenfall, 2021-03-18.



med även begränsa nyttjandet av lågkostnadsel. Sammantaget innebär det betydande variationer i kostnaden för att producera vätgas över året, inte helt olik produktionskostnaden för el. Finns det dessutom en flexibilitet i den industriella processen ger det ytterligare en dimension då det innebär en alternativ kostnad gällande hur industrin ska köra sin anläggning.

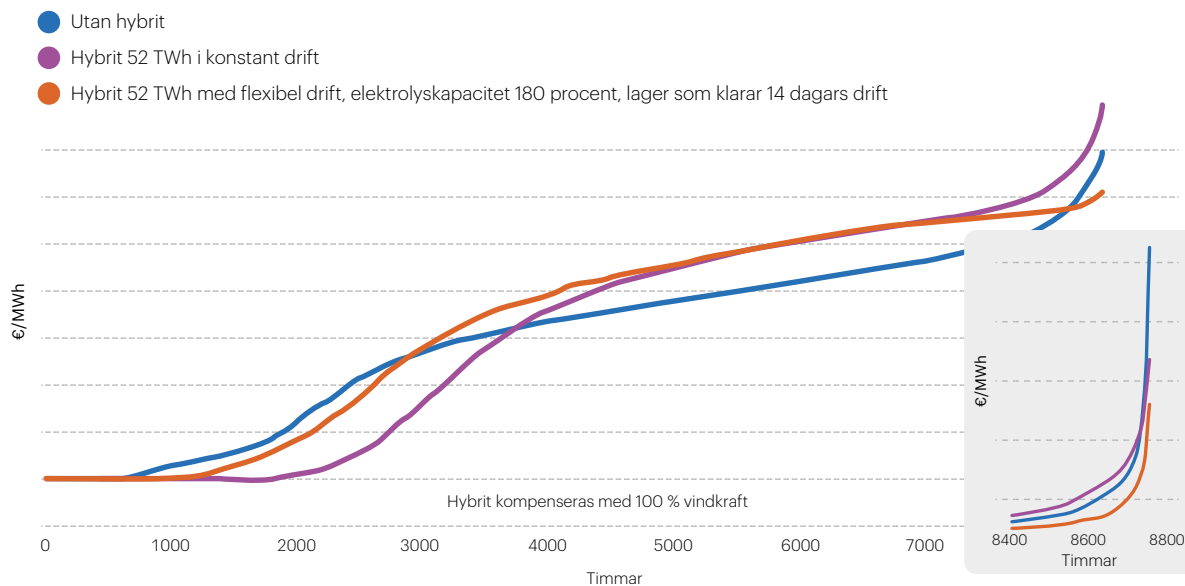
Hybrits påverkan på elsystemet

Figur 20 ovan visar en analys från Hybrit-projektet där en optimering av elektrolysör och lager har gjorts för en elförbrukning på 21 TWh respektive 52 TWh, baserad på ny vindkraft inom elområde 1 i norra Sverige (SE1). Av diagrammen framgår att det lönar sig med en överkapacitet i elektrolysören motsvarande den dubbla installerade effekten, samt ett lager som klarar 10–20 dagars driftstid i processen. I Hybrits fall har man räknat på ett storskaligt bergumslager där kostnaden per kilo vätgas blir betydligt

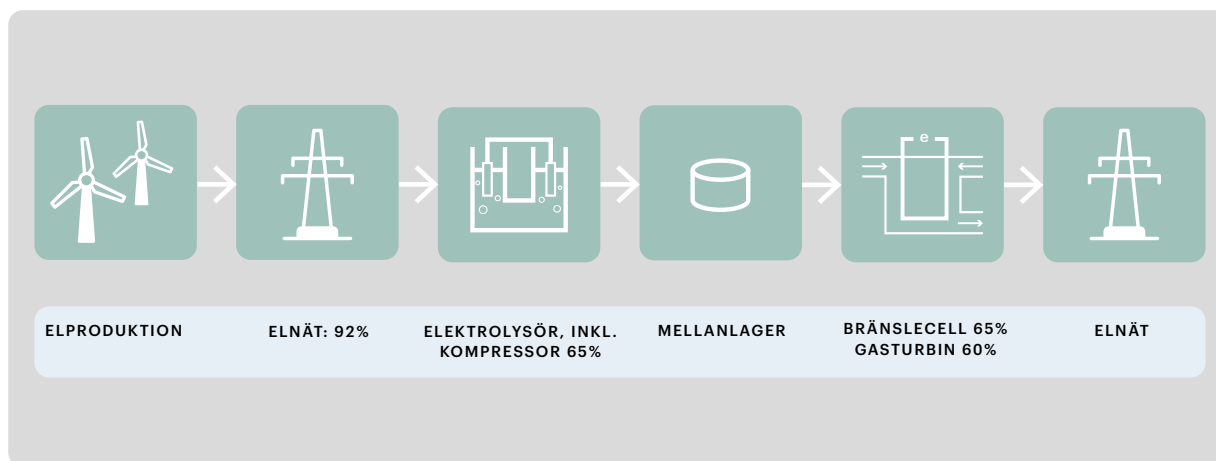
lägre än för mindre lager i gastuber eller tankar. Den exakta kostnaden för bergumslager är inte känd, men officiella uppgifter indikerar att ett bergumslager kan kosta drygt 100 kr/kWh vätgas, jämfört med knappt 600 kr/kWh för en trycksatt ståltank.

Optimeringen bygger på ett variabelt elpris. En anläggning av Hybrits skala kommer att ha en återkopplande påverkan på elpriset, vilket visas i diagrammet i Figur 21. Tre olika prisfall redovisas för SE1: utan Hybrit; Hybrit i kontinuerlig drift med en elförbrukning på 52 TWh som har kompenseras med 100 procent ny vindkraft; och dito men med flexibel drift, en elektrolyskapacitet på 180 procent och ett lager som klarar 14 dagars vätgasbehov. Av diagrammet framgår att kontinuerlig drift skapar större volatilitet och fler tillfällen med låga respektive höga elpriser, medan en flexibel drift jämnar ut priscurvan relativt ett fall utan Hybrit. Ett vätgaslager kommer alltså att höja värdet på den icke-planerbara elproduktionen vilken främst förväntas bestå av vindkraft.

Figur 21: Analys för hur Hybrit påverkar elpriset inom elområde 1, vid en förbrukning på 52 TWh och där elförbrukningen kompenseras med ny, tillkommande vindkraftsproduktion. Källa: Hybrit/Vattenfall 2021-03-18.



Figur 22: Illustration av hur vätgas kan användas som en flexibilitetsresurs i elsystemet. Totalverkningsgraden blir cirka 30 procent. Elen kan produceras antingen i en bränslecell eller i en gasturbin. Källa: IVAs projekt Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle, 2022.



Produktion av el med vätgas för balansering av elsystemet

Förutom att bidra till flexibilitet (ned- och uppreglering) kan vätgas bidra till effekt i elsystemet om producerad vätgas lagras och används för att producera el när läget på elmarknaden är mer ansträngt. Förfarandet är dock förknippat med stora förluster av högvärdig energi (exergi), vilket illustreras i Figur 22 och Figur 23. Eftersom såväl produktion av vätgas som produktion av el från vätgas innebär förluster landar den totala systemverkningsgraden på cirka 30 procent. Det vill säga, förlusterna uppgår till 70 procent.¹⁰ Energiförlusterna avgår i form av värme. I vissa fall kan den

nyttiggöras och då höjs systemverkningsgraden, men om det krävs en eldriven värmepump för att nyttiggöra värmen förbrukas ytterligare el.

Det innebär att elpriset måste variera med en faktor på minst 3 enbart för att täcka den rörliga kostnaden. För att täcka de fasta investeringskostnaderna måste prisvariationerna vara betydligt större, och beror på vilka driftstider över året som anläggningen kan utnyttjas. Överslagsberäkningar för driftstider på 2000 timmar per år visar på att skillnaden i elpris in och priset på försåld el kan behöva vara tiofaldig för att även täcka de fasta kostnaderna.¹¹

Vad kännetecknar ett leveranssäkert elsystem?

Elsystemet ska vara tillräckligt och säkert. Med tillräcklighet avses att det ska finnas tillräckligt med elenergi, eleffekt och elnät för att elbehoven ska kunna tillgodoses i hela landet under årets alla timmar. Med ett säkert elsystem menas att det ska vara robust nog att klara störningar, såsom stormar, åska och sabotage samt att det har tillräcklig motståndskraft mot händelser som stör effektbalansen. Idag ser vi en utveckling med minskad leveranssäkerhet i elsystemet, främst vad avser effekt och tillräckligt med elnät, men även förmågan att stå emot störningar (38)

Läs mer i IVAs rapport: Leveranssäkerhet inom elförsörjningen, 2017.

Vad finns det för andra möjligheter att lagra el?

Ur ett internationellt perspektiv är de vanligaste teknikerna för energilagring idag pumpkraftverk, batterier, tryckluft och svänghjulslagring. Olika tekniker för energilagring har olika möjligheter att tillämpas i energisystemet. Kapacitet, kostnader, energitäthet, effektivitet och teknisk respektive ekonomisk livslängd avgör vilken teknik som bör tillämpas var.

Batteritekniken utvecklas snabbt. Batterier kan användas liten skala, för hushåll i och i bilar, men också sättas samman i större moduler. (2) Eftersom tillverkningen är småskalig är tröskeln låg för en bred marknadsutveckling, vilket vi redan nu ser hända. Vätgaslager har som enskilda anläggningar större förutsättningar att lagra mer energi än ett enskilt batterilager.

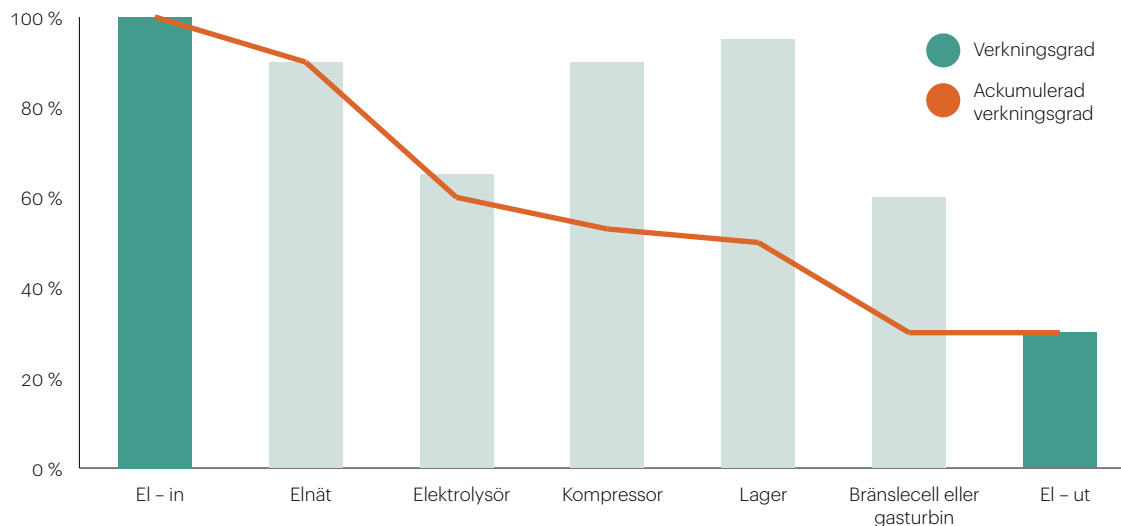
Globalt är en av de vanligaste metoderna att lagra el idag pumpkraftverk (2). När tillgången på el är god pumpas vatten upp i en reservoar, och vattnets lägesenergi utnyttjas sedan för elproduktion när elen behövs. Kraftverket drivs som en pumpstation när överskottsel finns tillgänglig, för att sedan fungera som ett vanligt kraftverk när elen behövs. I Sverige finns det ett par pumpkraftverk som är i drift, men det normala är att man sparar på vatten i vattenkraftdamarna innan man har producerat elen. Anläggande av nya pumpkraftverk har påverkan på miljön (hydrologi och biologisk mångfald). Pumpkraftstekniken används för effektbalansering inom 24 timmar. Det pågår också utveckling av pumpkraftverk där gamla nedlagda gruvor utnyttjas och den övre reservoaren alltså ligger i markplan.⁴⁹

Se mer om olika tekniker för lagring av elenergi i IVAs rapport Energilagring, Teknik för lagring av el som togs fram inom projektet Vägval el 2015–2016.

Hybrit

Inom Hybritprojektet planeras för en demonstrationsanläggning för 1,35 miljoner ton fossilfri järnsvamp per år som ska tas i drift 2026. Till denna kommer behövas en vätgasanläggning på cirka 500 MW. I full drift kommer vätgasproduktionen behöva cirka 3–4 TWh per år. Demonstrationsanläggningen är första steget för att gradvis konvertera all LKABs järnmalmsproduktion till fossilfritt järn, något som fullt utbyggt kommer att behöva cirka 70 TWh el per år 2050.

Figur 23: Illustration över exergiförluster (högvärdig energi) vid lagring av el i form av vätgas.
Källa: IVAs projekt Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle, 2022.



Det finns främst två tekniker för att konvertera vätgas till elektricitet; bränsleceller och gasturbiner. Den senare har visat sig mer ekonomiskt konkurrenskraftig baserat på existerande uppskattningar om framtida investeringskostnader. Här tas dock inte hänsyn till bränsleceller i en konsumentnära installation, där elen som produceras från bränslecellen inte belastas med nätavgift.

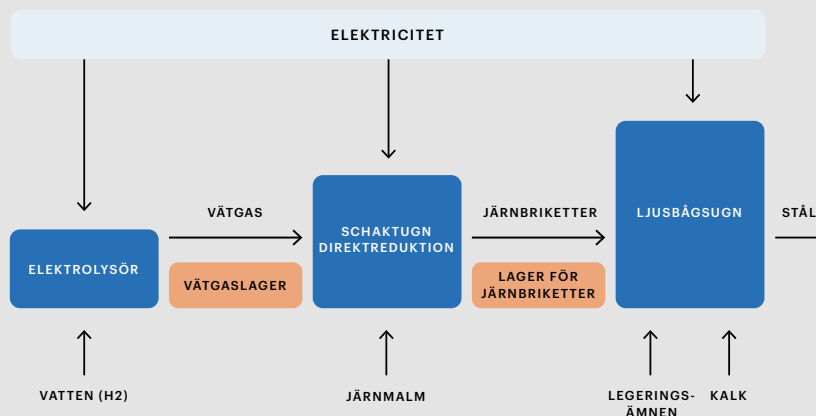
Balansering av elsystemet med hjälp av vätgas kan, trots energiförluster, ha en positiv påverkan på elpriset, men först fram emot år 2045 när utsläppen av växthusgaser ska vara noll. I ett scenario med ett framtida energisystem utan koldioxidutsläpp, där hela transportsektorn är elektrifierad och industrin använder en betydande mängd vätgas, kan en balansering med vätgas sänka de genomsnittliga elpriserna i södra Sverige, enligt modellsimuleringar genomförda av Chalmers. (14)

Modellen inkluderar alla de skandinaviska länderna samt norra Tyskland, vilket innebär att modelleringen inkluderar elhandel med närliggande regioner. Att systemets elpris påverkas gynnsamt av vätgasbalansering betyder dock inte att det kommer implementeras av enskilda aktörer på elmarknaden utan incitament. För att investeringar ska ske i elproduktion med få eller mycket få drifttimmar kan någon form av kapacitetsmarknad vara nödvändig.

Med tanke på detta är det inte troligt att det i närtid kommer att byggas anläggningar enkom för att reglera elsystemet och tillhandahålla effekt. I de fall en industri av andra skäl investerar i en vätgasprocess och ett större lager,¹² kan el lagras och återframställas i kostnadsparitet med de äldre oljekondenskraftverk som idag används som effektreserv i elsystemet. Det förutsätter dock att man även investerar i en gasturbin eller bränslecell.

Flexibilitet i vätgasbaserade stålproduktionen – exempel från modelleringsstudie

Figur 24: Schematisk illustration av vätgasbaserad stålproduktion ("H-DR process"). Källa: Artikel: Design of Clean Steel Production with Hydrogen: Impact of Electricity System Composition, Alla Toktarova, Lisa Göransson, Filip Johnsson, Chalmers Tekniska Högskola, 2021.



Den masugnsbaserade stålindustrin släpper ut stora mängder koldioxid och är en av de mest energikrävande industrierna i Europa och globalt. Branschen måste genomgå en betydande omställning för att vi ska kunna nå de globala utsläppsminskningarna. Vätgasbaserad stålproduktion har potential att skapa stålproduktion med noll- eller nära-nollutsläpp av koldioxid, förutsatt att elproduktionen för vätgasproduktionen är klimatneutral. Figur 24 visar en schematisk bild av processen för vätgasbaserad direktreduktion av järnmalm (H-DR⁵⁰). Processen består av elektrolysörsbaserad vätgasproduktion, produktion av järnbriketter (HBI⁵¹) i en schaktugn med direktreduktion (DR) följt av stålproduktion i en elektrisk ljusbågsugn (EAF⁵²).

Under järnproduktionssteget reduceras järnmalm spellet till direktreducerat järn (DRI⁵³) genom att tillsätta väte som reduktionsmedel i en schaktugn. För att undvika återoxidation komprimeras det direktreducerade järnet till järnbriketter. I stålproduktionssteget omvandlas järnbriketterna till flytande stål i en elektrisk ljusbågsugn. Elektrolysatorn och ljusbågsugnen är driftflexibla, det vill säga dessa enheter kan stoppas och startas relativt snabbt och till en låg kostnad.

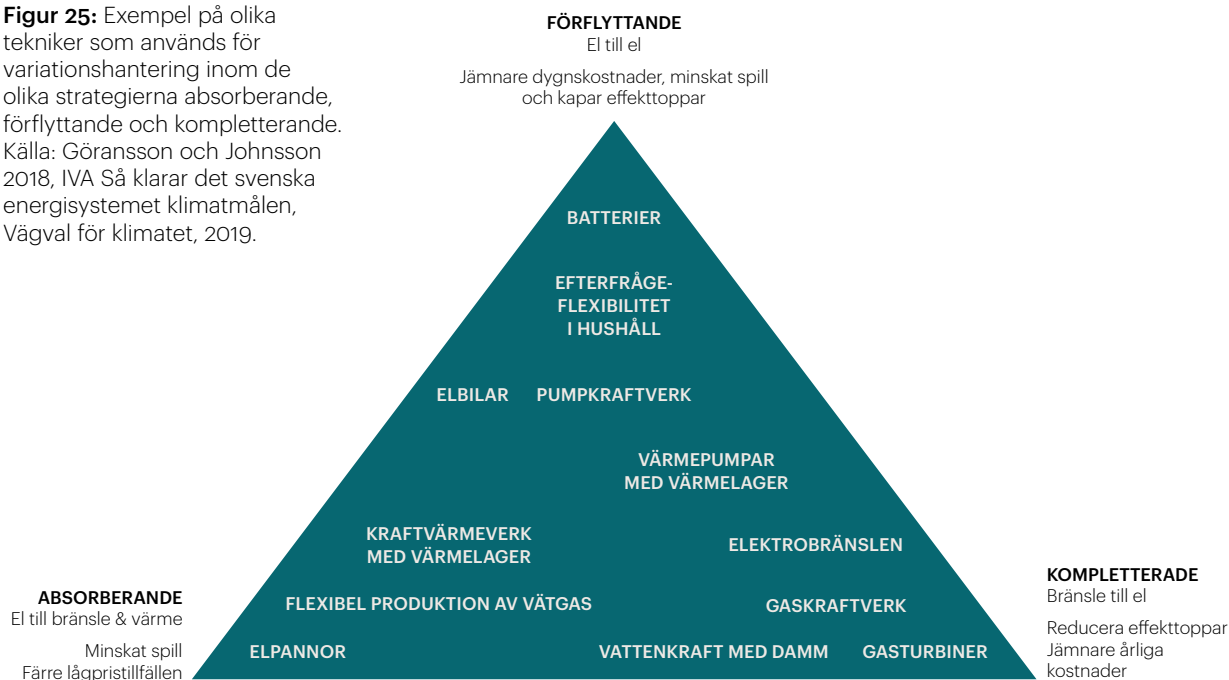
Direktreduceringsschaktugnen kan drivas på ett flexibelt sätt mellan minimibelastningsnivå och nominell kapacitet utan någon minskning av effektiviteten. Den tidsmäs-

siga fördelningen av processens elförbrukning kan göras flexibel genom den operativa flexibiliteten hos stålproduktionskapaciteten, det vill säga elektrolysören, direktreduceringsschaktugnen och den elektriska ljusbågsugnen, såväl som genom lagring av vätgas och järnbriketter.

En linjär elsystemoptimeringsmodell har utvecklats och tillämpats för att studera samspelet mellan en elektrifierad stålindustri och elsystemet (33). Modellen modulerar elsystemet i norra Europa och minimerar kostnaderna för investeringar i och drift av el- och stålproduktionen för att möta såväl elbehovet som efterfrågan på stål. Ett brett utbud av elproduktionstekniker⁵⁴ beaktas i modellen, inklusive lagrings- och överföringstekniker.

Resultat från modelleringen visar att flexibilitet i den vätgasbaserade stålproduktionen kan sänka kostnaderna för vätgas och el genom att undvika perioder med högt elbehov och genom att utnyttja möjligheten att lagra vätgas och järnbriketter (HBI). Modelleringsresultaten visar även att den ökade efterfrågan på el från en elektrifierad stålindustri främst tillgodoses genom ökad produktion från vind- och solkraft medan naturgasbaserad elproduktion minskar. För den modellerade regionen (norra Europa) beror dessutom den geografiska allokeringen av den vätgasbaserade stålproduktionen på tillgången på lågkostnadselektricitet och skiljer sig därmed från den nuvarande lokaliseringen av stålverk.

Figur 25: Exempel på olika tekniker som används för variationshantering inom de olika strategierna absorberande, förflyttande och kompletterande.
Källa: Göransson och Johnsson 2018, IVA Så klarar det svenska energisystemet klimatmålen, Vägval för klimatet, 2019.



Alternativ till vätgas för flexibilitet i elsystemet

För att hantera de utmaningar vi har på elmarknaden krävs ett nytt synsätt där nyckeln är att utnyttja den potential till flexibilitet som finns inom befintliga och nya system, inklusive möjligheter till en mer aktiv integrering av elsystemet med övriga sektorer. Vätgas är en del av lösningen, men inte den enda.

Elsystemet har alltid varit variabelt, men hittills nästan utslutande genom variationer i efterfrågan. Den starkast drivande faktorn har varit utomhustemperaturen eftersom vi har en stor andel elvärme i Sverige. Elproduktionen har anpassats efter efterfrågan. Genom den ökande andelen vindkraft i systemet ökar variabiliteten även på produktionsidan, vilket innebär nya utmaningar.¹³

Den centrala frågan är att klara effektbalansen, men om obalanser drar ut över tid, över dagar eller veckor, är det

i praktiken en utmaning att upprätthålla energibalansen, det vill säga att säkerställa att elmarknaden tillförs tillräckligt mycket elenergi. Den viktigaste effektresursen är vattenkraft. Annan planerbar produktion kompletterar vattenkraften med att upprätthålla effektbalansen och säkerställa tillgången på el. Med ett flexibelt elsystem menas normalt en flexibilitet inom timmen och upp till ett par veckor, vilket även skulle kunna täcka in variationer i vindkraftens produktion. Det krävs således flexibla resurser med olika tidsspann och amplitud, både på produktionsidan och användarsidan.

Figur 25 illustrerar olika tekniker för det som ibland benämns variationshantering, alltså hur olika flexibilitetsmöjligheter kan bidra till att öka elsystemets effektivitet i termer av att höja värdet på den variabla elen. Variationshanteringen är i själva verket systemberoende, det vill säga att effekten av en viss flexibilitetsåtgärd beror på elsystemet sammansättning. Figuren visar en principiell illustration av hur de olika teknikerna kompletterar eller

konkurrerar med varandra och därmed med vätgas och vätgaslagring.¹⁴

Det finns redan idag en betydande potential av flexibla resurser som inte utnyttjas. Delvis beror detta på att behoven ännu inte är tillräckligt stora, men också på att marknad och incitamentsstrukturer ännu inte är utvecklade. Läs gärna mer i IVAs rapport "Så klarar det svenska energisystemet klimatmålen", från projektet Vägval för klimatet.

Det finns redan idag ett stort antal flexibilitetsresurser att tillgripa om förutsättningarna och incitamenten är de rätta. Därför är det inte troligt att investeringar i vätgasproduktion och lager kommer att göras enkom för att tillhandahålla flexibilitet i elsystemet. Däremot finns det incitament hos de industriaktörer som av andra skäl investerar i en vätgasanläggning att även se över möjligheterna att tillhandahålla flexibilitet i syfte att undvika höga, och tillgodogöra sig låga, elpriser.

Kommer tillgången på el att kunna möta det ökade elbehovet?

På en perfekt marknad skulle ett ökat elbehov mötas av motsvarande produktionskapacitet i ett lämpligt "priskryss". Drivkrafterna kommer att finnas, men det finns även hinder på vägen i form av långa tillståndprocesser, låg social acceptans för vindkraft, bristande nätkapacitet, politiska risker (kärnkraft) och bristande ekonomiska incitament (planerbar kraft).

Idag är elbalansen god i norra Sverige, men på grund av flaskhalsar i transmissionsnätet når inte el som produceras i norr ned till södra Sverige. Eltillförseln är därför mer ansträngd i södra Sverige. Marginalerna har krympt i elsystemet de senaste åren, vilket har medfört större prisskillnader mellan norra och södra Sverige och, enligt en studie från Energiforsk (16), inneburit 30–45 procent högre priser i södra jämfört med i norra Sverige under hösten 2021. I skrivande stund (mars 2022) är prisskillnaderna ännu större, bland annat på grund av kriget i Ukraina som har lett till högre priser på kol, olja och gas och därmed även högre elpriser på kontinenten.

Tekniskt sett påverkas elmarknaden av olika system som är beroende av varandra; produktionsanläggningar med olika egenskaper, elnät med flaskhalsar på olika spänningsnivåer och platser i landet, samt kunder som har olika förutsättningar för att kunna svara på prissignaler på marknaden. Handeln med el är avreglerad men är en "energy-only"-marknad (det vill säga att det sker en handel med energi, men att effekt i praktiken inte värderas) och elnäten är ett monopol. En utbyggnad av kraftverk eller elnät tar, på grund av långa tillståndprocesser, lång tid. Det pågår dock arbete i Sverige med att försöka snabba på tillståndprocesserna.¹⁵ Dessutom föreslår EU¹⁶ att tillståndprocesserna måste kortas och förväntar sig att varje medlemsland bidrar till att detta sker.

Sammantaget kan konstateras att det egentligen varken är teknik eller ekonomi som primärt begränsar det framtida utbudet av el för produktion av vätgas, utan snarare utdragna tillståndprocesser och låg social acceptans, något som exempelvis ofta manifesteras i det kommunala vetot när det gäller vindkraftsprojekt. Men även vissa EU-direktiv samt krav från Försvarmakten spelar in. Som nämnts tidigare kan detta komma att ändras, inte minst finns numera bättre förutsättningar för att utbyggnaden av havsbaserad vindkraft kan ta fart genom att regeringen nyligen pekade ut ett antal områden för havsbaserad vindkraft på motsvarande 20–30 TWh. Dessutom har regeringen gett uppdrag åt Energimyndigheten och andra berörda myndigheter att identifiera lokaliseringar på ytterligare 90 TWh havsbaserad vindkraft.

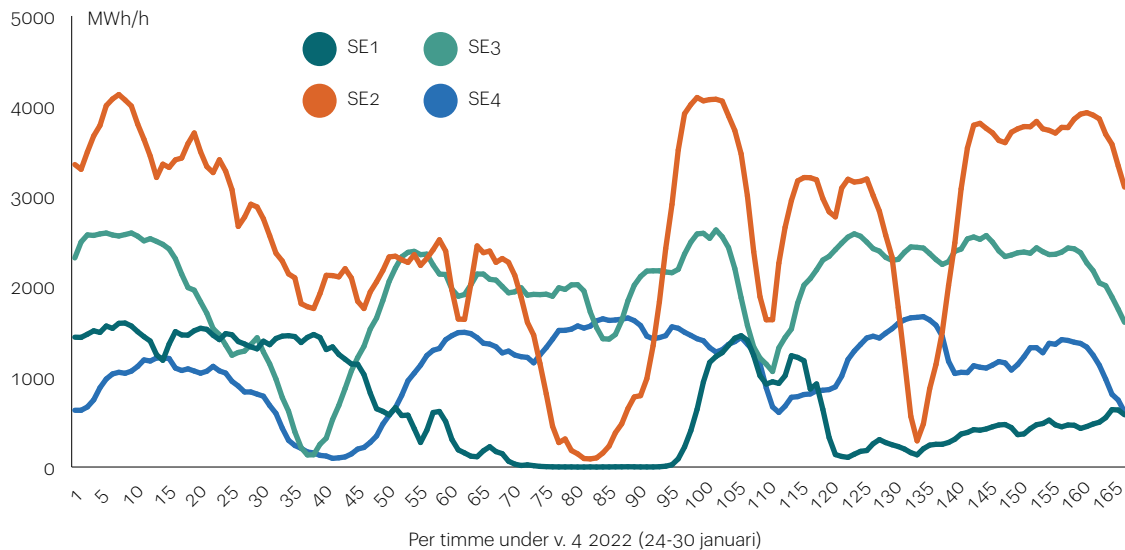
Det är osäkert huruvida elmarknaden, med de regelverk som gäller idag, kommer att kunna möta behovet av el för stora mängder vätgasproduktion. Regeringen har nyligen (3 februari, 2022) tagit beslut om en Nationell strategi för elektrifiering (17). I strategin diskuteras många av de frågor som är centrala för att klara av en ökad elektrifiering. Med det sagt, kommer det ändå att finnas betydande utmaningar för att få fram den el som behövs fram till 2030.



Vad kännetecknar ett elsystem med en stor andel vindkraft?

»Vindkraften har redan nu en stor påverkan på elpriset. Ju större volatilitet desto större behov av flexibilitet och möjlighet att kunna lagra el.«

Figur 26: Vindkraftsproduktion MWh/h i de fyra elområdena under v. 4, 2022.
Källa: Svenska kraftnät (18), bearbetad av IVA.



Vindkraften är det snabbast växande kraftslaget i Sverige och i flera av våra grannländer. I ett elsystem med en stor andel vindkraft, kommer den installerade effekten bli flera gånger större än efterfrågan under stora delar av året och elöverskotten kan momentant blir väldigt stora. Det kan leda till en mycket volatil elmarknad med stora svängningar mellan överskott och bristsituationer. Sverige har en nettoexport av elenergi över helåret, men i kortare tidsintervall kan problem uppstå med leveranssäkerheten. Volatiliteten påverkar också elprisets variation.

För att hantera detta behövs en alternativ tillförsel när vinden inte producerar, mer flexibel elförbrukning samt möjlighet att lagra el vid överskottssituationer. Det ställer också krav på anpassning av elnäten inom landet. Ett yttersta alternativ är att vindkraftverken regleras ned då elen inte behövs. Det innebär att man spiller bort elenergi, men det kan bli nödvändigt om inte överförings- eller mottagar-kapaciteten räcker till. I Figur 26 visas hur vindkraften varierade per timme i respektive elområde under vecka 4, 2022.

Det är faktiska värden för en specifik period. Det kan uppstå situationer med långvariga högtryck och svag vind, vilket begränsar elproduktionen från vindkraft under långa tidsperioder.

Vad kan vara begränsande för utbyggnad av vindkraft?

Det som begränsar utbyggnaden av vindkraft, givet bra vindlägen, är på kort sikt lokalt motstånd, kommunalt veto och Försvarsmakten. Vid en större andel vindkraft i systemet krävs mindre vind för att elpriserna ska pressas, vilket kan minska incitamenten för att investera i ytterligare ny vindkraft. Elmarknaden kan bli mättad på vindkraft. Vid vilken nivå det inträffar beror på systemet i övrigt. En lösning är att elen kan lagras, till exempel i form av vätgas, vilket diskuteras i denna rapport.

Hur mycket el kan behöva lagras?

Ju större andel vindkraft i elsystemet, desto större volatilitet och behov av att kunna flytta elanvändning i tiden. Hur mycket vindkraft som behöver lagras beror på många faktorer, exempelvis var elen produceras, vilken kapacitet elnätet har i regionen att transportera elen vidare och hur flexibel elförbrukningen är.

Situationen skiljer sig också mellan sommar och vinter. Om tillgång på vindkraft är stor när elförbrukningen är hög är sannolikheten större att andra delar av produktionsapparaten har möjlighet att reglera ned sin produktion. Är vindkraftsproduktionen hög sommartid, när elförbrukningen är låg, kan det vara en större utmaning att ta hand om överskottsproduktion. Om inte elen kan lagras eller tas tillvara på annat sätt, kan den behöva spillas bort. Idag varierar effektbehovet mellan sommar och vinter med 150 procent då förbrukningen uppgår till cirka 10 GW som lägst sommartid och 25 GW vintertid, (18) något som dagens elproduktion är anpassad efter.

För att få en bild av vilka energivolymer det kan röra sig om på nationell nivå har vi i Figur 27 och Figur 28 skalat upp produktionsmönstret i dagens vindkraftsproduktion till 100 TWh.

I diagrammen illustreras hur effektvariationerna (grön linje) kan se ut i ett vindkraftssystem som producerar 100 TWh el baserat på de verkliga svängningar som rådde i vindkraften motsvarande period, i januari respektive juli 2020. I samma diagram visas också vindkraftens variation per timme under januari respektive juli 2020 (blå linje), samt vattenkraftens produktion och reglering av kraftsystemet (blått fält). Dagens klimatsimuleringar tyder inte på att det kommer bli några större förändringar i vindförhållandena, men det finns betydande osäkerheter och fler studier måste göras. (19). Notera också att diagrammen är förenklingar.

I ett verkligt fall kan den sammanlagrade vindkraftsproduktionen se annorlunda ut då ett framtida vindkraftssystem kommer att ha betydligt större andel havsbaserad vindkraft och modernare vindturbiner, något som troligtvis kommer att öka antalet fullasttimmar för varje vindturbin.

Ur diagrammen kan utläsas att vindkraften idag kan ha en effektvariation på 3–4 GW på några timmar (nationell nivå) vilket i stor utsträckning balanseras av vattenkraften som har motsvarande amplitud i sin variation. Notera att vattenkraften även reglerar (dygns-)variation¹⁷ i elförbrukning, vilket gör att kurvorna inte helt följs åt. I ett kraftsystem med 100 TWh vindkraft blir utslagen betydligt större, i storleksordningen 15–20 GW. Dessa amplituder kan inte regleras

Vilka faktorer påverkar elpriset?

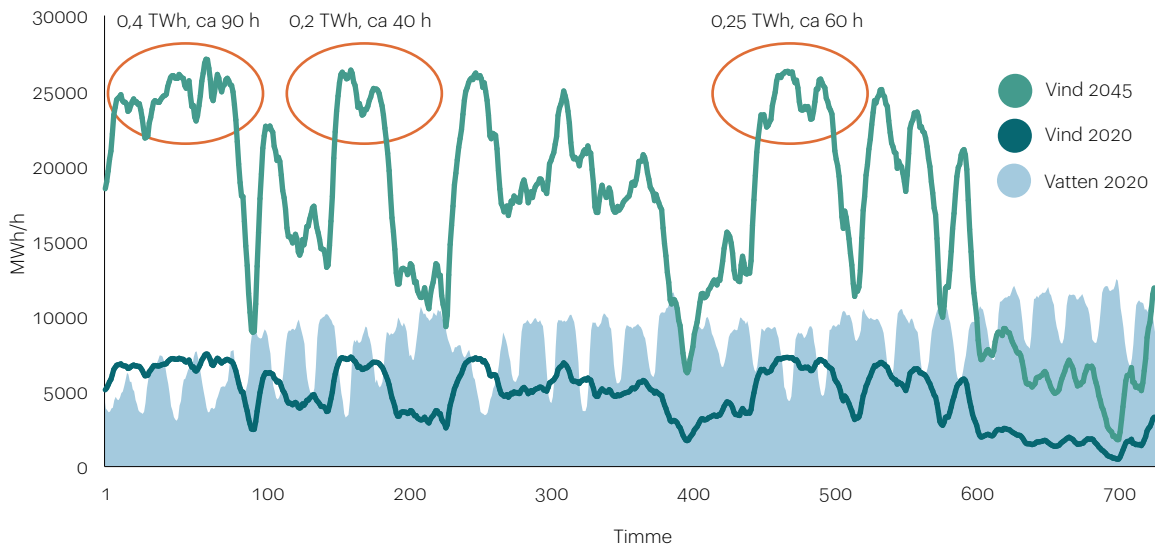
Elpriset styrs av utbud och efterfrågan. I Sverige påverkas efterfrågan i stor utsträckning av utomhustemperaturen eftersom vi har en stor andel elvärme i systemet och de högsta elpriserna traditionellt inträffar under vintern. Industrins elförbrukning är mer jämnt fördelad över året.

Tillgången på el påverkas av den hydrologiska balansen eftersom både Norge och Sverige har en stor andel vattenkraft. Totalt sett svarar vattenkraften för drygt hälften av elproduktionen i det nordiska elsystemet. Nederbördsrika år med god tillgång på vattenkraft har generellt sett lägre elpriser än så kallade torrår.

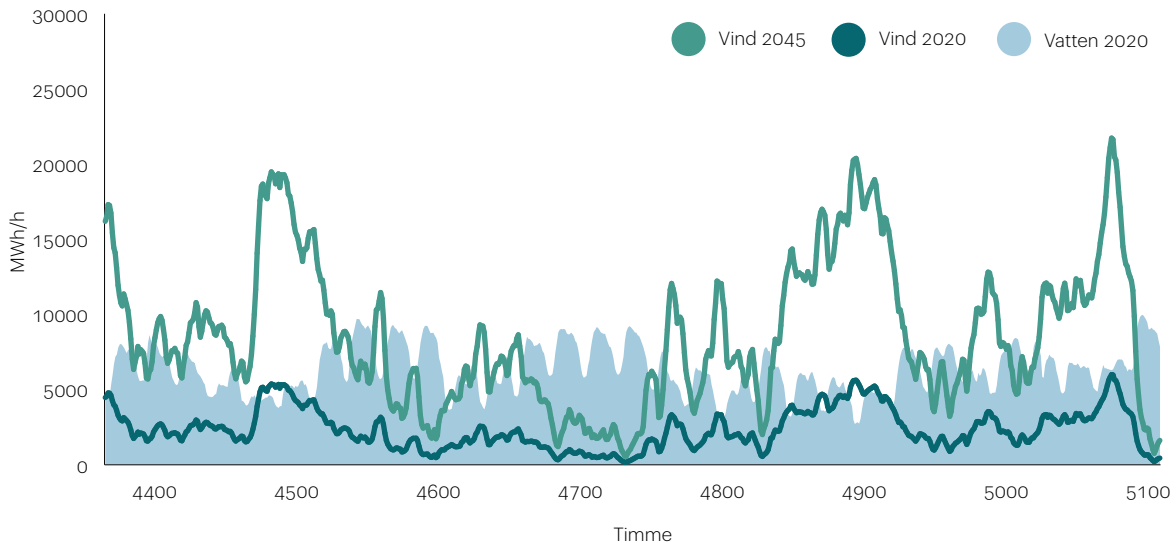
Över helåret har Sverige en nettoexport av el, men vi har ett ständigt handelsutbyte med våra grannländer vilket påverkar elpriserna i Sverige. Nu (april 2022) ser vi kraftigt ökade priser på naturgas, vilket slår igenom i de svenska elpriserna även om elproduktionen med naturgas är mycket begränsad i Sverige. Genom att kraftverk (kärnkraftverk och kraftvärmeverk) har stängts i södra Sverige, och marginalerna därmed har krympt, får gas- och kolpriser på kontinenten en större prispåverkan på den svenska marknaden, något som bidrar till högre elpriser. På marginalen påverkas elpriserna på den svenska marknaden också av priset på utsläppsrätter i Europa. Flaskhalsarna i transmissionsnätet bidrar också till högre (just nu mycket högre) elpriser i södra Sverige jämfört med i norra.

Nu när andelen vindkraft ökar får även den en allt större prispåverkan, vilket förändrar tidigare mönster i elprisvariationen. Elpriserna blir mer variabla och svårare att förutse.

Figur 27: Beräkningsexempel för år 2045 – ett system med vindkraft installerade effekt 30 GW och en årsproduktion på 100 TWh, tänkbara timvärden för **januari** månad. Diagrammet visar även vindkraft och vattenkraftproduktionen per timme under januari 2020. Källa: IVAs projekt Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle, modifierat baserat på vindkraftstatistik från SvK.



Figur 28: Beräkningsexempel för år 2045 ett system med vindkraft installerade effekt 30 GW och en årsproduktion på 100 TWh, tänkbara timvärden för **juli** månad. Diagrammet visar även vindkraft och vattenkraftproduktionen per timme under juli 2020. Källa: IVAs projekt Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle, modifierat baserat på vindkraftstatistik från SvK.



Vindkraftens variation påverkar elpriset

Vindkraften har redan nu en stor påverkan på elpriset, vilket visas i Figur 29. Diagrammen visar den sammanlagda vindkraftsproduktionen i norra (SE1+SE2) respektive södra (SE3+SE4) Sverige under januari 2022. I respektive diagram anges också elpriset i respektive elområde under samma period. Det är dygnsmedelvärden som presenteras. (39)

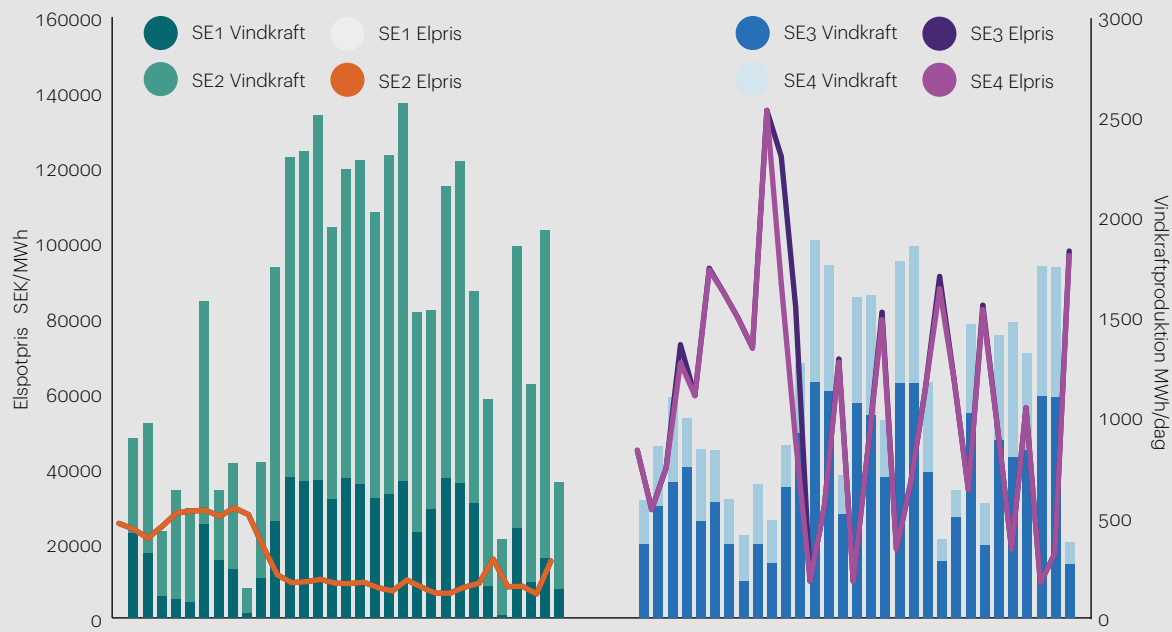
Många faktorer påverkar prisbilden, i synnerhet den stora prisskillnaden mellan norra och södra Sverige. Dock är det tydligt för båda regionerna att vindkraftens produktion har en signifikant påverkan på elpriset, vilket är särskilt tydligt i södra Sverige. Bilden förstärks säkert också av att motsvarande vindförhållanden råder i norra Tyskland, vilket driver prissvängningarna ytterligare.

Den svenska vindkraften producerade 28 TWh år 2020, vilket motsvarar 17 procent av den svenska elproduktionen. Enligt Energimyndigheten kan vindkraftsproduktionen öka till 60 TWh år 2030 och över 100 TWh år 2050.

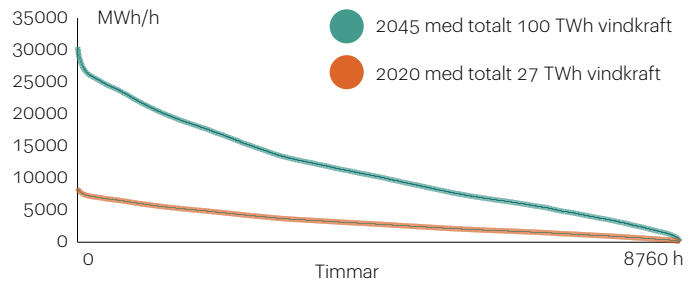
Redan 2030 kan därför vindkraften stå för närmare 40 procent av Sveriges elproduktion. Eftersom vindkraften även byggs ut i våra grannländer kan det ge en förstärkt prispåverkan om förhållandevis vindar råder över större områden. Det vill säga, variabiliteten kommer att öka.

Vindkraften har totalt sett en viss prisdämpande effekt på elsystemet. Enligt en ny studie beräknas vindkraftens påverkan på det genomsnittliga elpriset över året⁵⁵ under perioden 2022–2025 ligga runt 0,4–0,5 öre per kilowattimme vid en utbyggnad jämfört med ett scenario utan utbyggnad av ny vindkraft. Priseffekten påverkas av var vindkraften placeras. Placeras den i norra Sverige (SE1 och SE2) kan det skapas en inläsnings-effekt, det vill säga att elpriserna trycks ned ytterligare eftersom den befintliga överföringskapaciteten är begränsad söderut. (40) Kan vindkraften balanseras och förbrukas i norra Sverige genom vätgasprojekt minskar betydelsen av flaskhalsar och elpriserna kan stabiliseras genom en flexibel vätgasproduktion.

Figur 29: Vindkraftsproduktion i SE1+SE2 och elpris i SE1 respektive SE2 (t.v.) (priskurvorna sammanfaller, därav bara en linje) samt vindkraftsproduktion i SE3+SE4 och elpris i SE3 respektive SE4 (t.h.), per dag under januari 2022, MWh/dag respektive kr/MWh. Källa SVK, Nordpool spot, bearbetning IVA.



Figur 30: Varaktighetsdiagram för en vindkraftsproduktion i dagens system, totalt 27 TWh 2020, och ett uppskalat system till (exempelvis) 2045 där vindkraften producerar 100 TWh el, baserat på samma kapacitetsfaktor som råder idag. Källa: IVAs projekt Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle, egna beräkningar.



Effektintervall, MWh/h	Av total installerad effekt, 30 GW	Energimängd, TWh	Andel av total energi (100 TWh), %	Antal timmar, h	Andel av året, %
Mer än 25 000 MWh/h	83 %	0,5 TWh	0,5 %	353 h	4 %
20 000–25 000 MWh/h	67–83 %	2,3 TWh	2,3 %	921 h	11 %
5 000–20 000 MWh/h	17–67 %	91,7 TWh	91,7 %	5 703 h	65 %
Under 5 000 MWh/h	17 %	5,5 TWh	5,5 %	1 783 h	20 %

enbart med vattenkraften, som har en total installerad effekt på 16 GW. Av hydrologiska och tekniska skäl får vattenkraften inte köras mer än drygt 13 GW. Gällande vattendomar kräver i många fall en minsta vattenföring som motsvarar en produktion på 1,8 GW. (20) Det gör att vattenkraften maximalt kan reglera 11 GW, vilket är en teoretisk siffra. I praktiken ligger reglervariationerna i vattenkraften på mellan 3 och 13 GW och varierar mellan årstider och med den hydrologiska balansen.

I ett försök att bedöma vilka energimängder det kan röra sig om kan man exempelvis titta på effekttopparna över 20 GW i det övre diagrammet. Då kan det handla om en energiproduktion på 0,2–0,4 TWh under 2–4 dagar på nationell nivå, som kan vara svår att nyttiggöra. Det kan jämföras med de lager som Hybrit planerar. De bygger nu en pilotanläggning på 100 kubikmeter med ett tryck upp till 200–250 bar, vilket innebär cirka 2000 kilo vätgas. Det motsvarar cirka 100 MWh el som därmed kommer att kunna lagras i pilotanläggningen. Ett fullskaligt lager beräknas kunna bli 1000 gånger större och kunna lagra 0,1 TWh el. Något beslut om detta är ännu inte fattat (maj 2022).

Dessa effektnivåer råder framför allt vintertid. Sommartid är effektbehovet generellt sett betydligt lägre, och då kan behoven av att kunna lagra el bli ännu större.

Ovan ges en enkel illustration över hur ett varaktighetsdiagram för 100 TWh vindkraft skulle kunna se ut, framtagen genom uppskalning av dagens vindkraftvariation över året. Beroende på om det är landbaserad eller havsbaserad vindkraft kan kurvan komma att se olika ut, men den ger en indikation. I tabellen beräknas vilka energimängder som levereras över olika effektnivåer, samt under hur många timmar.

Om ovanstående beräkning kan tjäna som exempel för hur ett system med 100 TWh vindkraft kan se ut, kommer produktionseffekten att överstiga 25 GW under 353 timmar per år och motsvara en energimängd på 0,5 TWh. Det är en energimängd som kanske kan spillas bort som alternativ till lager och flexibilitet. I slutänden är det ekonomin som avgör.

Kostnader för ny elproduktion

Energiforsk (41) har gjort en sammanställning av kostnaderna för ny elproduktion, baserat på faktiska kostnader för sol- och vindkraft som byggs nu. För övriga energislag har bedömningar gjorts baserat på äldre investeringar i Sverige och internationella observationer. De redovisar kostnaderna som "levelized cost of energy" (LCOE) som är en sammanslagning av alla förväntade kostnader för uppförande, drift och avveckling under ett kraftverks livstid, fördelat på dess beräknade elproduktion.

I Figur 31 visas vilka kostnadsintervall de olika kraftslagen bedöms ligga inom. Noteras bör också att ordningsföljden här påverkas starkt av kapitalkostnaden (kalkylräntan) som varierar starkt mellan kraftslagen i verkligheten.

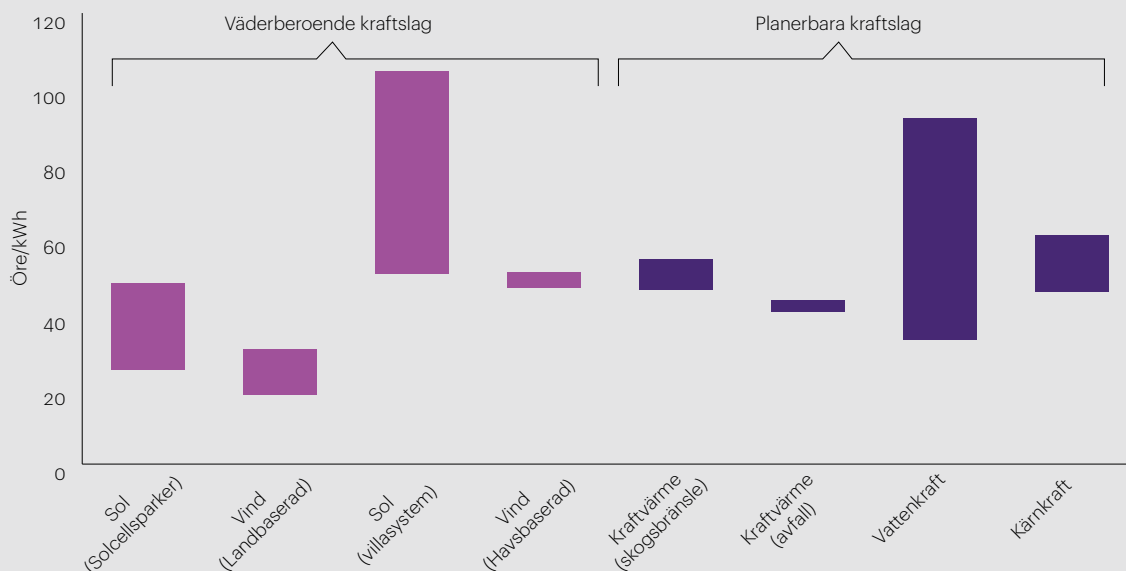
De olika kraftslagen har olika egenskaper i elsystemet, vilket gör att man inte bara kan titta på produktionskostnaden per kilowattimme. Vindkraften har lägst kostnad per kilowattimme, men då beaktas inte behovet reglerresurser, flexibel användning, lager och utbyggnad av elnätet, som behövs för att kunna integrera större mäng-

der vindkraft. De planerbara kraftslagen har inte samma behov av systemtjänster.

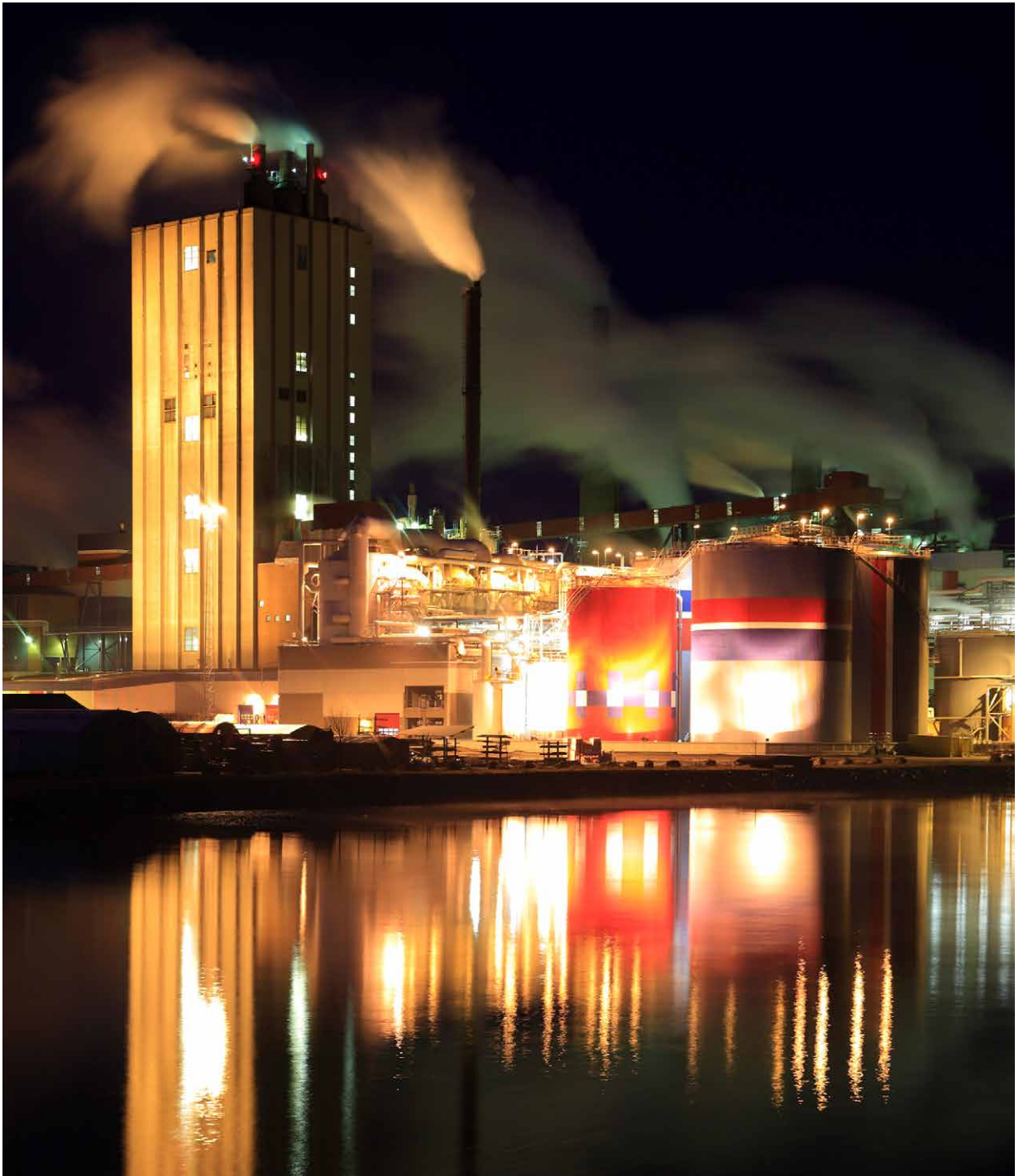
Tabell 3: LCOE för nya elproduktionsanläggningar vid 5 % kalkylränta. Källa: Energiforsk, El från nya anläggningar, rapport 2021:714.

		Öre/kWh
Väderberoende kraftslag	Storskalig solkraft	59
	Landbaserad vindkraft	31
	Småskalig solkraft	141
	Havsbaserad vindkraft	53
Planerbara kraftslag	Vattenkraft	55
	Kraftvärme – flis	49
	Kraftvärme – avfall	38
	Kärnkraft	51

Figur 31: LCOE-intervall för olika tekniker. Källa: Energiforsk, El från nya anläggningar, rapport 2021:714.



Vad kännetecknar ett elsystem med en stor andel vindkraft?





Olika strategier för vätgasproduktion

»Olika strategier för produktion av vätgas har skilda effekter på elsystemet.«

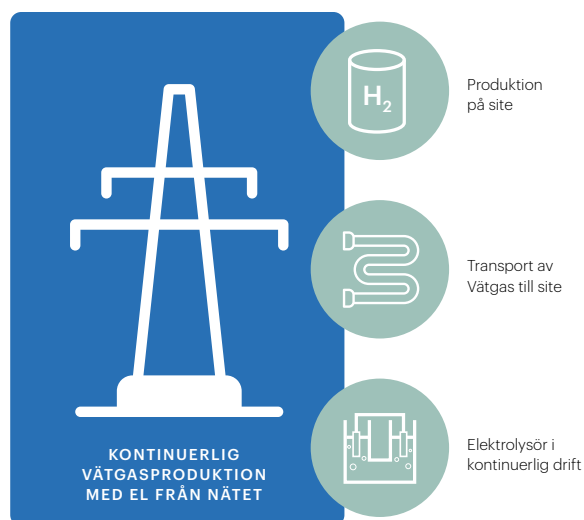
Det finns flera olika tänkbara varianter av system för framställning av vätgas genom elektrolys i ett kraftsystem som innehåller mycket vindkraft. Nedan diskuteras förutsättningarna för några alternativ:

- Kontinuerlig produktion av vätgas med el från nätet
- Variabel produktion av vätgas
- Produktion av vätgas i en dedikerad vindkraftpark

De olika modellerna har vitt skilda effekter på elsystemet, och valet mellan dem påverkar också kostnader och möjligheter till sidointäkter från försäljning av värme och syrgas.

Kontinuerlig produktion av vätgas med el från nätet

Kontinuerlig produktion av vätgas baserad på el från nätet innebär att el behöver tillföras under årets alla timmar. Därmed kan man inte undvika att belasta kraftproduktionssystemet under perioder med lite vind och risk för effektbrist och höga elpriser. För att mildra belastningen på elsystem kan vätgasproduktionen förläggas på en mer fördelaktig plats ur elsystemets perspektiv varifrån vätgasen sedan transporteras till förbrukarens lokalisering. Vätgastranspor-



ten kräver dock investeringar i infrastruktur, antingen en rörledning eller faciliteter för lastbilstransporter.

Lokaliseringen av anläggningen har också betydelse för om det går att få avsättning för biprodukterna syre och värme. Det kan potentiellt öka intäkterna med i storleksordningen 5–10 procent men förutsätter kompletterande investeringar för anslutning till ett fjärrvärmnät och utrustning för omhändertagande och lagring av syrgas. Detta diskuteras vidare i 9.1.

Variabel produktion av vätgas

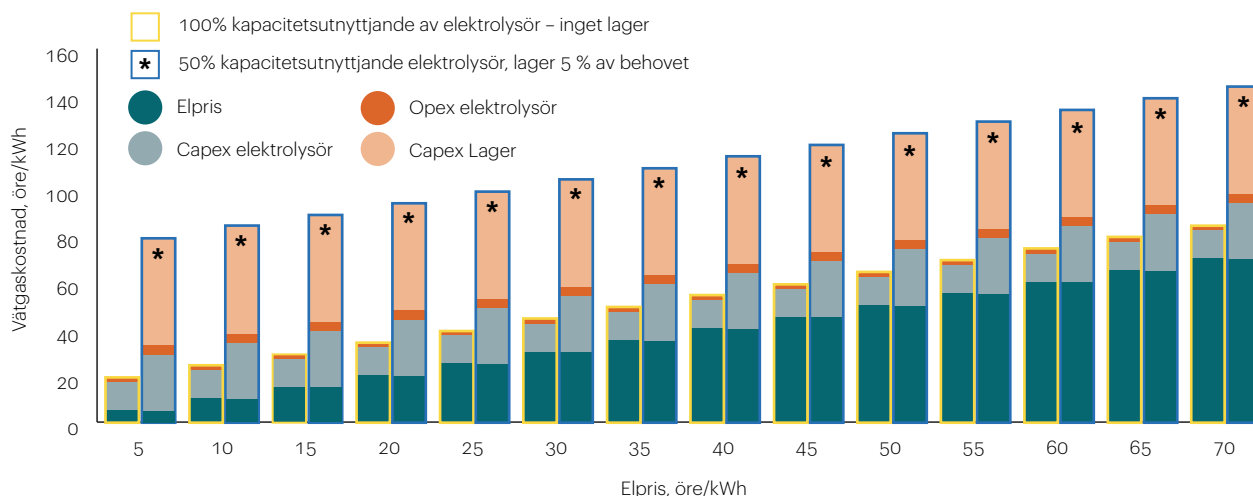
Variabel produktion av vätgas med el från nätet innebär att man investerar i överkapacitet i elektrolysören och i ett lager i avsikt att undvika att producera när elpriset är högt, vilket diskuteras i kapitlet *Hur påverkar vätgasen elsystemet?*

Med ett kraftigt volatilt elpris skapas incitament att dra nytta av perioder av låga elpriser och samtidigt undvika att producera när priset är högt. För att kunna leverera samma volym vätgas behöver man, som nämnts tidigare, investera i en överkapacitet i elektrolysören samt i ett vätgaslager. Nedan ges ett räkneexempel på hur det påverkar kostnaden för vätgas vid olika elprisivåer. Beräkningarna är baserade på ett storskaligt berggruslager och en volym vätgas på 0,1 TWh.

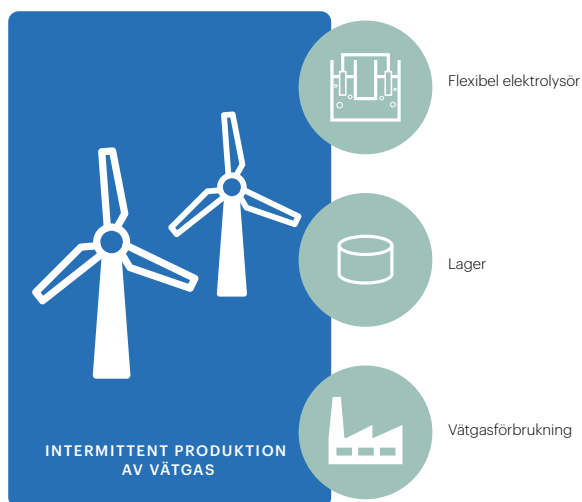
I diagrammet visas två fall där ingående variabel är elpris (öre/kWh) och utgående resultat är priset på vätgas (öre/kWh):

- Ett fall där producenten av vätgas dimensionerar sin elektrolysör efter vätgasbehovet med ett 100-procentigt kapacitetsutnyttjande av elektrolysören för en jämn vätgasproduktion över året. Något lager behövs inte. Priset på vätgas varierar med elpriset.
- Ett fall där elektrolysören dimensioneras för ett 50-procentigt kapacitetsutnyttjande (dubbelt så hög installerad effekt som i fall a), kompletterat med ett lager som klarar 5 procent av årsanvändningen av vätgas, vilket innebär en in- respektive urladdning cirka 20 gånger per år.

Figur 32: Detta är ett räkneexempel. Skillnad i vätgaskostnad där elektrolysören i ena fallet har ett 100-procent kapacitetsutnyttjande över året, och andra fallet där elektrolysören har en överkapacitet (50 % kapacitetsutnyttjande) och kompletteras med ett lager som klarar 5 % av anläggningens årliga vätgasproduktion/behov (laddas ur och i). En prisjämförelse kan inte göras direkt ur bilden, eftersom elektrolysör med lager i större utsträckning kan undvika höga elpriser.



Indata räkneexempel: Elektrolysör inkl. kringutrustning 8 MSEK/MWe, verkningsgrad 65 %, storskaligt lager 3 500 kr/kg H2 (drygt 100 kr/kWh), kalkylränta 6 %, avskrivning 20 år.



Diagrammet i Figur 32 ger inte en helt rättvisande bild av prisskillnaden mellan de båda alternativen. I alternativ b. med en flexibel produktion mot lager kan man undvika höga elpriser och dra nytta av perioder då elpriset är lågt, vilket sänker den genomsnittliga kostnaden. Dock är kapitalkostnaden högre per använd kWh el. Eftersom båda alternativen producerar lika mycket vätgas och förbrukar lika mycket el, kan man räkna ut skillnaden i kapitalkostnad per kWh, vilket i det här räkneexemplet motsvarar cirka 40 öre/kWh förbrukad el. Hur mycket skillnaden blir i rörlig kostnad genom en flexibel elförbrukning är svårare att räkna ut. Det beror på den faktiska elprisvariationen som varierar mellan olika år beroende på väderförhållanden samt variationer i naturgas- och kolpriser som påverkar marginalkostnaden för el på kontinenten, vilket också har påverkan på den svenska elmarknaden.



I de fall man ändå behöver investera i ett vätgaslager för redundans, och därmed har möjligheten att anpassa sin vätgasproduktion efter variationerna i elpris, går det att hitta ett optimum givet olika situationer där det lönar sig att investera i en överkapacitet i elektrolysören. Eftersom den är modulär och kan byggas ut efter hand, behöver inte hela investeringen ske vid ett tillfälle.

Produktion av vätgas i dedikerad vindkraftpark

Kontinuerlig produktion i en dedikerad vindkraftpark som inte är ansluten till elnätet, så kallad ö-drift, medför ingen som påverkan på kraftsystemet bortsett från att en del av vindkraftspotentialen reserveras för vätgasframställning. Till fördelarna hör att man inte behöver bygga ut elnätet, men det gör samtidigt att alternativet bör användas i ännu

inte byggda vindkraftparker. Alternativet kräver en större investering, både i elektrolyskapacitet och lager, samt i en gasledning mellan vindkraftparken och lagret. Med produktionen förlagd till en vindkraftpark kan spillvärmen inte utnyttjas och det blir även svårare och mera kostsamt att utnyttja syrgasen som bildas i framställningsprocessen.

Modellen medför dessutom att man knappast kan investera i så stor kapacitet hos elektrolysörerna att man kan utnyttja all el när det blåser som mest och man tvingas att "spilla" vind när det blåser mycket. Med dagens, och även morgondagens, förväntade priser på elektrolysörer blir det svårt att få ö-driftsalternativet att gå ihop ekonomiskt. Det gäller särskilt i ett småskaligt system där kostnaden för lagret blir mycket högre än i ett fall där skalan på parken, rörledningen och lagret är större. I det senare fallet kan man behöva ansluta flera vindkraftparker vilket sannolikt ger upphov till längre transportavstånd.



Sverige bör vara mer aktiva i EU

»Svensk lagstiftning påverkas i stor utsträckning av de regelverk som tas fram inom EU.«

En stor del av de regelverk som blir styrande för svensk lagstiftning tas fram inom EU. Det gäller inte minst inom energiområdet. I bilaga 3 och 4 ges en översikt av EUs gröna giv "Fit for 55" och EUs klimatlag. En central del i den gröna givnen är EUs nya klimatlag.¹⁸ Genom klimatlagen lagstadgas det bindande EU-målet om en minskning av nettoutsläppen av växthusgaser med minst 55 procent fram till år 2030 jämfört med år 1990.

Enbart EUs nuvarande politiska ram gör det inte möjligt att nå netto-nollutsläpp till 2050. Enligt de beräkningar som EU-kommissionen redovisar i meddelandet *Höjning av Europas klimatambition för 2030 – Investering i en klimatneutral framtid till förmån för våra medborgare*¹⁹ kommer växthusgasutsläppen bara minska med 60 procent till fram till 2050 med den nu gällande lagstiftningen. EU måste därför höja ambitionerna fram till 2030. Ju färre åtgärder EU vidtar under de kommande tio åren, desto brantare och mer utmanande kommer minskningsbanan att bli efter 2030.

Arbetet med höjda ambitioner fram till 2030 resulterade i Kommissionens förslag till lagstiftningspaket som syftar till att anpassa all EUs nuvarande klimat- och energilagstiftning till målet att minska utsläppen med minst 55 procent fram till 2030 jämfört med 1990.

Flera av de ingående förslagen har en direkt påverkan på vätgas. Så har också Kommissionen tagit fram en vätgasstrategi. Det är fundamentalt att Sverige har ett helhetsperspektiv på de olika regelverken inom Fit for 55. Detta för att säkerställa konkurrensförutsättningar för fossilfri vätgas men också för att förhindra att regelverken begränsar utvecklingen av ny teknik. Det är därför viktigt att Sverige fortsätter att vara aktiva i EU-förhandlingar som kan tänkas påverka förutsättningar för vätgasmarknaden så att Sveriges nationella förutsättningar, med en redan i stort sett fossilfri elproduktion, tas till vara. Definitioner av vätgas med olika ursprung, regelverk etcetera bör formuleras så att Sveriges väl utbyggda fossilfria energiproduktion, med mycket vind-, vatten- och kärnkraft, blir en fördel. Genom att vara delaktiga tidigt i lagstiftningsprocessen, ha fokus på helheten och söka samsyn med andra EU-länder kan Sveriges intressen tas tillvara.

Kort om styrmedel för vätgas

Vi har i denna studie inte kunnat göra någon fördjupad analys av hur styrmedlen ser ut inom vätgasområdet, men vi kan konstatera följande om dagens styrmedel som berör vätgas:

- El för framställning av vätgas genom elektrolys får inte beskattas enligt Energiskattedirektivet (21).
- El är inte skattepliktig om den framställts och förbrukats på fartyg eller annat transportmedel. Det innebär att el som framställs av vätgas i en bränslecell i ett fordon inte är skattepliktig⁵⁶ (22)
- Vätgas som används för uppvärmningsändamål inom tillverkningsindustri är inte skattepliktig eftersom vätgas inte är en energiprodukt enligt Energiskattedirektivet.
- Det finns inga regler för koncession för vätgasledningar.
- Klimatklivet och Industriklivet ger möjlighet till stöd för investering i ökad produktion och användning av vätgas.

När det gäller omställningen av elsystemet har vi identifierat ett antal kritiska frågor:

- Hur kraftfull kommer EUs och Sveriges klimatpolitik vara?
- Vilket marknadstryck för klimatneutrala värdekedjor kommer att skapas av industrierna längst ut i värdekedjorna, närmast slutkund? Kommer exempelvis köparen av en ny bil efterfråga en som är byggd av fossilfritt stål?
- Till vilken grad kan tillståndsprocesserna förenklas och påskyndas?
- Kopplat till ovanstående, vilken social acceptans kan förväntas för utbyggnad av klimatneutral elproduktion samt elnät och, inte minst, för en storskalig produktion och användning av vätgas i samhället?

Om definitioner och additionalitetskrav i EU-rätten

Det finns ingen definition av förnybar vätgas i det nu gällande så kallade förnybartdirektivet⁵⁷ (RED2). Inte heller föreslås någon sådan definition införas i den översyn av RED2 som pågår just nu. Däremot omfattar RED2 en definition av *förnybara flytande och gasformiga drivmedel av icke-biologiskt ursprung*, så kallade RFNBOs, som innebär flytande eller gasformiga bränslen av annat slag än biodrivmedel eller biogas, vilkas energiinnehåll hämtas från andra förnybara energikällor än biomassa och som används inom transportsektorn. I denna definition ryms exempelvis elbaserad vätgas, men inte vätgas som producerats genom reformering av biogas eller förgasning av biomassa.

I RED2 framgår även att Kommissionen genom en delegerad akt ska lägga fast metod för att definiera under vilka omständigheter RFNBOs,⁵⁸ i de fall elen som använts vid produktionen av vätgasen kommit från elnätet, ska klassas som förnybara. Det framgår även att metoden ska säkerställa att det finns ett tidsmässigt och geografiskt samband mellan elproduktionen och bränsleproduktionen, samt att det bör finnas ett inslag av additionalitet. Det innebär bland annat att elbaserad vätgas måste produceras från ny, tillkommande förnybar el för att klassas som förnybar.

Vid framtagandet av denna rapport har Kommissionen ännu inte beslutat om den delegerade akten, men mot bakgrund av skrivningarna i den version av den delegerade akt som i skrivande stund är på samråd från Kommissionen, kommer vätgas som produceras med el från elnätet behöva produceras från ny, tillkommande förnybar el för att klassas som förnybar, med undantag från om produktionen av förnybar vätgas sker i ett elområde där den genomsnittliga andelen förnybar el översteg 90 procent föregående kalenderår.

Inom ramen för den gröna given ser Kommissionen över en stor mängd direktiv och andra rättsakter. I det sammanhanget görs även en översyn av RED2. I den översynen, som brukar kallas RED3, föreslås bland annat mycket detaljerade nya mål för transportsektorn och industrin:

- Medlemsstaterna ska säkerställa att 50 procent av industrins vätgasanvändning ska vara förnybar med icke-biologiskt ursprung (RFNBOs) år 2030.

- Nytt bindande mål om att varje medlemsstat ska uppnå en andel om minst 2,6 procent förnybara bränslen av icke-biologiskt ursprung (RFNBOs) i transportsektorn år 2030.

Definitionen av RFNBOs, tillsammans med kraven på additionalitet, innebär alltså att hälften av den vätgas som används inom industrin år 2030 måste produceras med hjälp av el från ny, tillkommande förnybar elproduktion. Eftersom målen bara avser RFNBOs kan inte vätgas från befintlig elproduktion eller vätgas med biogent ursprung bidra till målpåfyllnad. Det innebär vidare att möjligheten att uppfylla det målet till 2030 blir helt beroende av tidsåtgången för tillståndsprocesser och annat som krävs för att få tillräckligt mycket ny förnybar elproduktion på plats i tid.

Om de långa tillståndsprocesserna för ny förnybar elproduktion leder till att industrin ökar sin användning av fossil vätgas, eller vätgas som producerats genom elektrolys med hjälp av befintlig el från elnätet, så kommer den mängd vätgas som måste produceras från ny, tillkommande elproduktion att öka. Det i RED3 föreslagna målet om att minst 50 procent av industrins vätgasanvändning ska vara RFNBOs år 2030, i kombination med kraven på additionalitet, kommer därmed att driva på för utbyggd förnybar elproduktion. Detta under förutsättning att RED3 beslutas i enlighet med vad Kommissionen föreslagit och att inte definitionen av RFNBOs och kravet på additionalitet ändras.

Slutligen kan nämnas att biogen vätgas idag omfattas av definitionen biogas, som enligt RED2 innebär "gasformiga bränslen som framställs av biomassa".

EU-LAGSTIFTNING MED BÄRING PÅ VÄTGAS

En europeisk klimatlag – ett av de viktigaste inslagen i den gröna given!

En central del i den gröna given är EUs nya klimatlag.⁵⁹ Genom klimatlagen lagstads det bindande EU-målet om en minskning av nettoutsläppen av växthusgaser med minst 55 procent fram till 2030 jämfört med 1990.

Kort sammanfattning av några av de viktigaste huvudpunkterna i EUs klimatlag:

- Klimatmål för 2030 om minst 55 procent lägre nettoutsläpp (utsläpp efter avdrag för upptag) jämfört med 1990, med tydliga besked om utsläppsminskningarnas och kolupptagens storlek.
- Erkännande av behovet av att stärka EUs kolsänkor genom att öka ambitionsgraden i förordningen om markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk.
- Process för att fastställa ett klimatmål för 2040, inklusive en preliminär budget för växthusgaser för 2030–2050 som kommer att offentliggöras av kommissionen.
- Ett åtagande om negativa utsläpp efter 2050.
- Inrättandet av en europeisk vetenskaplig rådgivande nämnd för klimatförändringar, som ska bistå med oberoende vetenskaplig rådgivning.
- Åtagande att samarbeta med berörda sektorer för att förbereda sektorsspecifika färdplaner som visar vägen mot klimatneutralitet inom ekonomins olika områden.

EU:s vätgasstrategi

I meddelandet En vätgasstrategi för ett klimatneutralt Europa⁶⁰ lägger Kommissionen fast följande strategiska mål för vätgas 2030:

- Elektrolysanläggningar för förnybar vätgas med minst 40 GW effekt ska ha installerats inom EU.
- Produktion av tio miljoner ton förnybar vätgas i EU.

REPowerEU

I meddelandet REPowerEU pekar Kommissionen ut förnybar vätgas som en av flera viktiga lösningar för att minska beroendet av rysk gas. Enligt meddelandet vill Kommissionen se en ökad produktion och import av vätgas till 20 miljoner ton fram till 2030 (670 TWh).

Definitioner ur EU:s vätgasstrategi

Det förekommer olika benämningar på vätgas kopplat till hur den är framställd. I detta sammanhang bör det påpekas att den nomenklatur som väljs i Sverige företrädesvis bör vara i linje med den som används i olika lagförslag som EU-kommissionen har presenterat inom ramen för

lagstiftningspaketet Fit for 55. Detta då de definitioner som läggs fast där kommer att avgöra vilka villkor som kommer att gälla för vätgas med olika ursprung. Det gäller exempelvis hur vätgas med olika ursprung ska regleras och beskattas. Nedanstående definitioner är hämtade från EU:s vätgasstrategi.

Förnybar vätgas avser vätgas som produceras genom elektrolys av vatten (i en elektrolysanläggning som drivs med el), och elektriciteten kommer från förnybara energikällor. Förnybar vätgas kan också produceras genom reformering från biogas (i stället för från naturgas) eller biokemisk omvandling av biomassa, om den uppfyller hållbarhetskraven.

Elbaserad vätgas avser vätgas som produceras genom elektrolys av vatten (i en elektrolysanläggning som drivs med el), oavsett källan till elektriciteten. Livscykelutsläppen av växthusgaser från produktionen av elbaserad vätgas beror på hur elektriciteten produceras.

Fossilbaserad vätgas avser vätgas som produceras genom en rad olika processer med fossila bränslen som råvara, främst reformering av naturgas eller förgasning av kol. Den står för merparten av den vätgas som produceras idag.

Fossilbaserad vätgas med avskiljning av koldioxid kallas i vissa sammanhang även **blå vätgas** och avser den delmängd av den fossilbaserade vätgasen (vanligen syftande på naturgasbaserad) där växthusgaserna från vätgasproduktionen avskiljs och lagras i stället för att släppas ut. Utsläppen av växthusgaser från produktionen av fossilbaserad vätgas med avskiljning av koldioxid eller pyrolys är lägre än för fossilbaserad vätgas, men hänsyn behöver tas till den varierande effektiviteten i avskiljningen av växthusgaser samt att fossilbränsleutvinningen kan läcka kolväten till atmosfären.

Koldioxidsnål vätgas avser fossilbaserad vätgas med avskiljning av koldioxid samt elbaserad vätgas, med livscykelutsläpp av växthusgaser som är betydligt lägre än för den nuvarande vätgasproduktionen.



Bilagor

Bilaga 1: Metodik

Projektet har genomförts och organiserats på det sätt som är vanligt för IVA-projekt. En arbetsgrupp (se förord) av kunniga och erfarna personer har, under ledning av en ordförande och projektledare, penetrerat och analyserat en frågeställning. Som underlag används olika faktarapporter och vetenskapliga artiklar. Arbetet har pågått under perioden maj 2021 till juni 2022.

Bilaga 2: Alternativ till vätgas i olika typer av processer

Samtidigt som det planeras för vätgasbaserade industriprojekt utvecklas andra tekniska alternativ för att kunna fasa ut fossila bränslen. Nedan ges exempel på lösningar som inte bygger på vätgas från elektrolys och som också kan bidra till att vi uppnår klimatmålen. Det är ingen "uttömmande lista", utan ett försök att peka på att det finns andra alternativ som kan komma i fråga i stället för vätgas i olika tillämpningar.

TYP AV PROCESS BASERADE PÅ VÄTGAS FRÅN ELEKTROLYS	ALTERNATIV TILL VÄTGAS FRÅN ELEKTROLYS	EXEMPEL PÅ PROJEKT
Reduktion av järnmalm (ersätter kol)	Använda biokol i befintlig process Direktreduktion med befintlig DRI-process, t.ex. MIDREX Syntesgas från biomassa, med eller utan CCS, (även samtidig produktion av biokol för ljusbågsugn) Reformering av naturgas med CCS Torr elektrolys, elektrolys av CO ₂ till CO Direktreduktion med el.	Hybrit – fossilfritt stål LKAB – järnsvamp H2 Green Steel – fossilfritt stål
Reduktion av slagg för zinkåtervinning	Förgasning av skogsavfall, produktion av syntesgas Biogas Reformering av naturgas med CCS Plasmabrännare	Höganäs – metallpulver
Bränngas (ersätter naturgas)	Biogas Syntesgas från förgasning av biomassa med eller utan CCS Reformering av naturgas med CCS Ammoniak Plasmabrännare som drivs av el Nya anläggningar kan vara direktuppvärmda med el	Ovako AB
Hydrering av bioolja	Vätgas från naturgas + CCS. Vätgas från bioolja med eller utan CCS Vätgas från biogas med eller utan CCS Syntesgas från förgasning av biomassa med eller utan CCS	Preemraff Lysekil och Göteborg ST1 Raff i Göteborg
Elektrobränslen/material där vätgas tillsammans med grön kolmolekyl skapar nya kolväten	Direkt produktion av biodrivmedel från biomassa via förgasning eller pyrolys, med eller utan CCS samt olika grad av elektrifiering	ST1 Finland – elektrometanol ST1 Raff i GöteborgM&P-bruk Liquid wind
Kemiindustri	Elektrifiering av krackerugnar, nya ugnar Elektrifiering genom installation av plasmabrännare i befintliga ugnar Reformering av metan som bildas i processen kompletterad med CCS för att elda ugnarna med ren vätgas. Klimatneutral ammoniak	Perstorp Nouryon Borealis
Drivmedel för tunga transporter	För flera tillämpningar – batteridrift, elvägar Vätgas och bränsleceller kan motiveras för vissa nischer Biodrivmedel	Volvo Scania
Övriga transporter, flyg och sjöfart	Alternativ till elektrobränslen är biodrivmedel och direktelektrifiering	
Balansering av elsystemet	Användarflexibilitet inom andra processer, lagring av mellanprodukter, reglerbar elproduktion, lagring via pumpkraft och batterier, etc.	

Bilaga 3: Kommissionens lagstiftningspaket Fit for 55

Lagstiftningspaketet har presenterats i två omgångar. Den första delen presenterades den 14 juli 2021 och omfattade en lång rad förslag till ny eller ändrad EU-lagstiftning:

- Översyn av EUs utsläppshandelssystem, inbegripet utvidgningen till sjöfarten, översyn av reglerna för utsläpp från luftfarten och inrättande av ett separat system för handel med utsläppsrätter för vägtransporter och byggnader.
- Översyn av förordningen om ansvarsfördelning vad gäller medlemsländernas minskningsmål i sektorer utanför EUs utsläppshandelssystem.
- Översyn av energiskattedirektivet (ETD).
- Översyn av direktivet om förnybar energi (RED).
- Översyn av förordningen om inbegripande av utsläpp och upptag av växthusgaser från markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk (LULUCF).
- Översyn av direktivet om utbyggnad av infrastrukturen för alternativa bränslen.
- Ändring av förordningen om fastställande av normer för koldioxidutsläpp för personbilar och lätta lastbilar.
- FuelEU, sjöfart, för ett grönt europeiskt sjöfartsområde.
- Införande av en gränsjusteringsmekanism (CBAM).
- Omarbetning av energieffektivitetsdirektivet (EED).
- Initiativet ReFuelEU, luftfart, för hållbart flygbränsle.
- Införandet av en social klimatfond.
- EUs skogsstrategi.

Den andra delen presenterades den 15 december 2021 och innehöll:

- Direktivet om byggnaders energiprestanda (EPBD).
- Gasmarknadsdirektivet och direktivet om villkor för tillträde till naturgasöverföringsnäten (tredje gasmarknadspaketet).
- Nya regler för att förhindra metanläckage i energisektorn.

Bilaga 4: Sammanfattning av några av Kommissionens förslag i lagstiftningspaketet Fit for 55 – ur ett vätgasperspektiv

Översyn av direktivet om förnybar energi (RED)

Det reviderade förnybartdirektivet²⁰ brukar förkortas RED2, medan översynen av det reviderade förnybartdirektivet kallas RED3.²¹

De övergripande målen för översynen av RED2 är att främja användningen av energi från förnybara energikällor senast 2030, verka för en bättre integrering av energisystemen och bidra till klimat- och miljömålen, inbegripet skyddet av den biologiska mångfalden, och därigenom ta itu med de generationsöverskridande problemen kopplade till den globala uppvärmningen och förlusten av biologisk mångfald.

Det finns ingen definition av förnybar vätgas i vare sig RED2 eller RED3. Däremot finns det en definition av förnybara drivmedel av icke-biologiskt ursprung, så kallade RFNBOs.²² Detta begrepp definieras som "flytande och gasformiga bränslen vilkas energiinnehåll hämtas från andra förnybara energikällor än biomassa." och kan därmed anses vara en definition av bland annat vätgas från elektrolys med förnybar el.

RED3 främjar användningen av RFNBOs genom förslag om:

- Utvidgat EUs certifieringssystem för förnybara bränslen till att även omfatta vätgas.
- Specifika konkreta mål för industrin och för tunga, långväga transporter.
 - Medlemsstaterna ska säkerställa att 50 procent av industrins vätgasanvändning ska vara förnybar med icke-biologiskt ursprung (så kallade RFNBOs).
 - Nytt bindande submål om att varje medlemsstat ska uppnå en andel om minst 2,6 procent RFNBOs i transportsektorn.

De specifika målen för RFNBOs inom industrin och transportsektorn omfattar därmed inte all förnybar vätgas, utan endast den som producerats genom elektrolys med förnybar el. Biogen vätgas, från reformering av biogas eller förgasning av biomassa, utesluts från dessa specifika mål.

Biogen vätgas kan i stället anses omfattas av definitionen biogas: "gasformiga bränslen som framställs av biomassa".

Förslag till reviderat energiskattedirektiv

I energiskattedirektivet²³ fastställs EUs regler om beskattning av energiprodukter och elektricitet. Det omfattar produkter som används som motorbränsle och bränsle för uppvärmning (dvs. för att driva motorer eller producera värme) och elektricitet. Andra användningsområden för energiprodukter, exempelvis som råvara, och vissa användningsområden för elektricitet ligger utanför direktivets tillämpningsområde.

Revideringen²⁴ av ETD inriktas på två huvudsakliga reformområden:

- Ny struktur för skattesatser som grundar sig på energiinnehåll och miljöprestanda för bränslen och el.
- Breddning av beskattningsunderlaget, genom att fler produkter omfattas och genom att vissa av de nuvarande undantagen och nedsättningarna avskaffas.

Kommissionen föreslår att de skattepliktiga bränslena delas in i fyra olika kategorier, där kategori 1 får den högsta minimiskattenivån och kategori 4 den lägsta.

I kategori 1 återfinns konventionella fossila bränslen (som exempelvis bensin, diesel, eldningsolja och kol) och icke-hållbara biobränslen.

I kategori 2 återfinns bränslen som Kommissionen klassar som övergångsbränslen. Här finns bland annat fossil vätgas.

I den lägsta minimiskattenivån, kategori 4, återfinns RFNBOs. I denna kategori återfinns även el. Det är värt att notera att el kategoriseras här oavsett ursprung, medan RFNBO måste vara producerat från förnybar el för att hamna i denna, låga kategori. Avancerad biogas klassificeras också i kategori 4, vilket innebär att hållbar biogen vätgas i de allra flesta fall också hamnar i denna kategori.

Även koldioxidsnål vätgas och närliggande bränslen kommer att gynnas av den lägsta minimiskattenivån under en övergångsperiod på tio år.

I förslaget till reviderat energiskattedirektiv föreslås även att vätgas ska definieras som en energiprodukt, vilket innebär att vätgasen blir skattepliktig vid användning för uppvärmning. Hur hög beskattningen blir beror av vätgasens ursprung enligt indelningen i minimiskatternas kategorier som beskrivs ovan.

I de fall vätgasen används i vägtrafiken blir beskattningen olika beroende på om vätgasen används i en bränslecell eller direkt i en förbränningsmotor. I det första fallet beskattas varken vätgasen eller elen som produceras i bränslecellen. I det andra fallet kommer vätgasen däremot att beskattas. Vilken nivå beskattningen hamnar på beror på vätgasens ursprung, se ovan.

EUs system för handel med utsläppsrätter

EUs system för handel med utsläppsrätter,²⁵ EU ETS, är ett styrmedel för att på ett kostnadseffektivt sätt minska utsläppen av växthusgaser. Idag ingår cirka 13 000 europeiska anläggningar i systemet, varav cirka 750 finns i Sverige. Många anläggningar finns inom energiintensiv industri och energiproduktion. Från år 2012 ingår även de flygoperatörer som flyger i EU.

Kommissionen föreslår²⁶ att nuvarande handelssystem breddas till att även omfatta utsläpp från sjötransporter. Dessutom föreslås att även utsläpp från vägtransporter och byggnader ska omfattas av utsläppshandel, men i ett nytt, separat system.

Kommissionen föreslår också att ambitionsnivån ska ökas:

- Utsläppen från de nuvarande sektorerna inom EU ETS samt sjöfartssektorn minskas med 61 procent fram till 2030 (idag gäller 43 procent, men då ingår inte sjöfarten), jämfört med 2005 års nivåer.
- Större årlig utsläppsminskning på 4,2 procent (i stället för 2,2 procent per år enligt det nuvarande systemet), efter en engångsminskning av det totala utsläppstaket med 117 miljoner utsläppsrätter ("byte av basår").

Senast 2027 föreslås att den fria tilldelningen av utsläppsrätter ska upphöra, vilket innebär fullständig auktionering av utsläppsrätter.

Koldioxidnormer för personbilar och lätta nyttofordon

Utsläppsnormerna för koldioxid från personbilar och lätta nyttofordon syftar till att minska koldioxidutsläppen från transportsektorn. De allmänna målen är att bidra till att uppnå klimatneutralitet senast 2050 och att uppnå nettominusningar av växthusgasutsläppen med minst 55 procent fram till 2030 jämfört med 1990.

Förslaget har tre specifika mål. Det första är att bidra till klimatmålen för 2030 och 2050 genom att minska koldioxidutsläppen från personbilar och lätta nyttofordon. Det andra specifika målet är att konsumenter och medborgare kan dra nytta av en bredare spridning av utsläppsfria fordon genom förbättrad luftkvalitet. Det tredje specifika målet är att stimulera innovation inom utsläppsfri teknik och därmed stärka det tekniska ledarskapet i fordonsindustrins värdekedja och stimulera sysselsättningen i EU.

I förslaget till ny förordning²⁷ föreslår Kommissionen att de genomsnittliga utsläppen från nya personbilar ska minskas med 55 procent från 2030 och med 100 procent från 2035 jämfört med 2021 års nivåer. Från och med 2035 föreslås alla nyregistrerade personbilar att vara utsläppsfria, vilket i praktiken innebär att alla nyregistrerade personbilar ska drivas med el eller vätgas från och med 2035.

Infrastrukturreglering för alternativa bränslen (AFIR)

Det så kallade Infrastrukturdirektivet²⁸ syftar till att säkerställa tillgången till, och användbarheten hos, ett tätt och omfattande nät av infrastruktur för alternativa bränslen i hela EU. Alla användare av fordon som drivs med alternativa bränslen (inklusive fartyg och luftfartyg) måste enkelt kunna röra sig genom EU, med hjälp av viktiga infrastruktur som motorvägar, hamnar och flygplatser. De särskilda målen är följande:

- Säkerställa en minimiinfrastruktur för att stödja den nödvändiga spridningen av fordon som drivs med alternativa bränslen inom alla transportsätt och i alla medlemsstater, för att uppnå EUs klimatmål.
- Säkerställa att infrastrukturen är helt driftskompatibel.
- Säkerställa fullständig användarinformation och lämpliga betalningsalternativ.

I översynen av Infrastrukturdirektivet ersätts befintligt direktiv med en förordning som brukar kallas AFIR.²⁹ Förordningen stödjer utvecklandet av en infrastruktur för alternativa bränslen, bland annat tankstationer för vätgas.

- Medlemsstaterna ska säkerställa att det senast den 31 december 2030 finns ett minsta antal tankstationer för vätgas som är tillgängliga för allmänheten.
- Medlemsstaterna ska säkerställa att det då har installerats tankstationer för vätgas längs TEN-Ts stomnät och TEN-Ts övergripande nät med ett maximalt mellanliggande avstånd på 150 kilometer, och att dessa stationer:
 - är tillgängliga för allmänheten,
 - har en kapacitet på minst 2 ton per dag, och
 - är utrustade med en dispenser för minst 700 bar.
- Flytande väte ska göras tillgängligt på tankstationer som är tillgängliga för allmänheten med ett maximalt mellanliggande avstånd på 450 kilometer.
- Minst en tankningsstation för vätgas som är tillgänglig för allmänheten ska finnas installerad i varje urban knutpunkt senast den 31 december 2030.

- I AFIR finns även krav på användarinformation, betalningslösningar, prisinformation, tillhandahållande av olika typer av data samt uppfyllande av gemensamma tekniska specifikationer.

FuelEU Sjöfart

I initiativet FuelEU Maritime³⁰ föreslås ett gemensamt EU-regelverk för att öka andelen förnybara och koldioxidsnåla bränslen i de internationella sjötransporternas bränslemix utan att skapa hinder för den inre marknaden. Här ingår även koldioxidsnål vätgas och koldioxidsnåla vätgasbase-erade bränslen (inklusive metanol och ammoniak).

Gasmarknadsdirektivet och direktivet om villkor för tillträde till naturgasöverföringsnäten (tredje gasmarknadspaketet)

Syftet är att EUs gasregler ska ses över för att underlätta marktillträdet för förnybara och koldioxidsnåla gaser och ta bort onödiga regelhinder.

Enligt förslaget görs ingen skillnad mellan systemansvarig för överföringssystemet (TSO) och systemansvarig för distributionssystemet (DSO) för vätgasinfrastruktur. Alla blir nätoperatörer för vätgas oavsett storlek, läge eller nättryck.

I förslaget framgår även att vätgasnät föreslås regleras först från och med den 31 december 2030.

Vidare framgår att en nätoperatör för vätgas som ingår i ett företag som är verksam inom överföring eller distribution av naturgas eller el måste vara oberoende åtminstone vad gäller sin juridiska form.

I förslaget redovisas även krav på att inmatning av förnybar och koldioxidsnål gas ska få 75 procent rabatt på inmatningstariffen samt att systemansvariga för överföringssystemen i naturgasnätet måste godta gasflöden med en

vätgashalt på upp till 5 volymprocent vid sammanlänkingspunkter mellan unionens medlemsstater i naturgasnät.

Slutligen presenteras ett förslag till definition av koldioxidsnåla bränslen och koldioxidsnål vätgas. Koldioxidsnål vätgas föreslås innebära vätgas vars energiinnehåll hämtas från icke-förnybara källor och som uppfyller ett tröskelvärde för minskning av växthusgasutsläppen på 70 procent.

Bilaga 5: Litteraturförteckning

1. IVA Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle. Vätgasens roll för tunga vägtransporter. Stockholm: IVA, 2022.
2. IVA Vägval el. Energilagring – teknik för lagring av el. Stockholm: IVA, 2015.
3. Energimyndigheten. Scenarier över Sveriges energisystem 2020, ER 2021:16. Eskilstuna: Energimyndigheten, 2021.
4. Johnsson, Filip och Rootzén, J. Managing the costs of CO₂ abatement in the cement industry. *Climate Policy*, 17(6), 781–800. 2016.
5. —. Paying the full price of steel – Perspectives on the cost of reducing carbon dioxide emissions from the steel industry. *Energy Policy*, Volume 98, 2016, Pages 459–469, 2016.
6. Johnsson, Filip, Klement, J. och Normann, J. Supply Chain Driven Commercialisation of Bio Energy Carbon Capture and Storage. *Frontiers in Climate*, 3, 1–12. 2021.
7. Energimyndigheten. Förslag till Sveriges nationella strategi för vätgas, elektrobränslen och ammoniak. ER 2021:34. Eskilstuna: Energimyndigheten, 201.
8. Swedegas. Swedegas. Gasbarometern – så utvecklas biogasen i gasnätet. [Online] Swedegas, 2022. [Citat: den 05 05 2022.]
9. Fossilfritt Sverige. Strategi för fossilfri konkurrenskraft – Vätgas. Stockholm: Fossilfritt Sverige, 2021.
10. Nordion Energy. Nordion Energy. Nordion Energy Nyhetsarkiv. [Online] den 22 04 2022. [Citat: den 27 04 2022.] <https://www.mynewsdesk.com/se/nordion-energi/pressreleases/nordion-energi-och-gasgrid-finland-lanserar-nordic-hydrogen-route-europas-foersta-storskaliga-och-graensoeverskridande-vaetgasinfrastruktur-3176999>.
11. IEA G20 Hydrogen report. The future of Hydrogen: IEA, 2019.
12. Energy Transitions Commission. Making the Hydrogen Economy Possible. Global organisation: Energy Transitions Commissions, 2021.
13. IEA. Global Hydrogen Review: IEA, 2021.
14. Öberg, Simon, Odenberger, Mikael och Johnsson, Filip. Exploring the competitiveness of hydrogen-fueled gas turbines in future energy systems. Göteborg: Chalmers university of technology, 2021.
15. IVA Vägval för klimatet. Så klarar det svenska energisystemet klimatmålen. Stockholm: IVA, 2019.
16. Energiforsk. Impact on electricity prices of added generation in southern Sweden. Stockholm: Energiforsk, 2022.
17. Regeringskansliet. Nationell strategi för elektrifiering – en trygg, konkurrenskraftig och hållbar elförsörjning för en historisk klimatomställning. Stockholm: Infrastrukturdepartementet, Regeringskansliet, 2022.
18. Svenska kraftnät. Elstatistik. Elstatistik. [Online] Svenska kraftnät, 2022. [Citat: den 20 03 2022.] <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/kraftsystemdata/elstatistik/>
19. Energiforsk. Klimatförändringarnas inverkan på vindkraften. Rapport 2021:742: Energiforsk, 2021.
20. IVA Vägval för klimatet. Så klarar det svenska energisystemet klimatmålen. Stockholm: IVA, 2019.
21. EU. Rådets direktiv 2003/96/EG av den 27 oktober 2003 om en omstrukturering av gemenskapsramen för beskattning av energiprodukter och elektricitet. Bryssel: EU, 2021.
22. Finansdepartementet. Lag (1994:1776) om skatt på energi. Stockholm: Regeringskansliets rättsdatabaser, 2021.

23. Svenskt gastekniskt center. Naturgas som råvara för kemikalier och bränslen: Svenskt gastekniskt center, rapport SGC 123, 2002.
24. Studie över elektrolys-teknologier idag och i framtiden: Rise, 2021.
25. Energimyndigheten. Underlagsrapport – Förslag till nationell strategi för vätgas, elektrobränslen och ammoniak. ER 2021:34. Eskilstuna: Energimyndigheten, 2021.
26. Energinet. Technology Data Energy Storage Hydrogen Storage (New chapter 2020): Energistyrelsen Danish Energy Agency, 2018.
27. Vätagasens potentiella värde som bränsle för framdrift av fordon samt andra industriella processer: Rise, 2022.
28. Cihlar, Jan. Hydrogen generation in Europe: Overview of costs and key benefits. Bryssel: Europa Kommissionen, 2021.
29. McKinsey&Co. How clean can the nickel industry become? [Online] den 11 September 2020. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/how-clean-can-the-nickel-industry-become>.
30. Derwent, Richard G. Global modelling studies of hydrogen and its isotopomers using STOCHEM-CRI: Likely radiative forcing consequences of a future hydrogen economy. Hydrogen Energy. 45 (2020) 9211–9221, 2020.
31. Energimyndigheten. Energiläget i siffror 2022. Eskilstuna: Energimyndigheten, 2022.
32. Svenska kraftnät. Kraftbalansen på den svenska elmarknaden, rapport 2021. Sundbyberg: Svenska kraftnät, 2021.
33. Toktarova, Alla, Göransson, Lisa och Johnsson, Filip. Design of Clean Steel Production with Hydrogen: Impact of Electricity System Composition. Energies. 14, 8349, 2021.
34. Energiforsk. Efterfrågan på fossilfri el. Analys av högnivåscenario: Energiforsk, 2021.
35. Svenska kraftnät. Långsiktig marknadsanalys 2021. Sundbyberg: Svenska kraftnät, 2021.
36. Qvist, Staffan. Långsikt scenarioanalys, Kraftsamling elförsörjning. Stockholm: Svenskt näringsliv, 2020.
37. Qvist, Staffan och Qvist, Staffan. Jämförelse av scenarioanalyser för svensk kraftförsörjning. Stockholm: Svenskt näringsliv, 2021.
38. Svenska kraftnät. Systemutvecklingsplan 2022–2031. Sundbyberg: Svenska kraftnät, 2021.
39. NordPool. NordPool Day-Ahead. NordPool Spot. [Online] NordPool, den 02 03 2022. [Citat: den 02 03 2022.] <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/SE/Hourly1/?view=table>.
40. Sweco. Vindkraftens elpriseffekt 2022–2025. Stockholm: Sweco, 2022.
41. Energiforsk. El från nya anläggningar Rapport 2021:714: Energiforsk, 2021.
42. Brändle, Gregor, Schönfisch, Max och Schulte, Simon. Estimation Long-Term Global Supply Costs for Low-Carbon Hydrogen. Köln: Institute of Energy Economics at the University of Cologne (EWI), 2020.
43. Energimyndigheten. Energiläget i siffror. Eskilstuna: Energimyndigheten, 2021.
44. NEPP. Eleffektfrågan – utmaningar och lösningar: North European Energy Perspectives Projects, 2020.
45. IVA Vägval för klimatet. Så klarar det svenska energisystemet klimatmålen. Stockholm: IVA, 2019.
46. Energimyndigheten. Framtidens elektrifierade samhälle. Eskilstuna: Energimyndigheten, 2021.

47. IEA. Limits in hydrogen blending in natural gas networks, 2018. [Online] den 20 April 2020. [Citat: den 02 Februari 2022.] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/limits-on-hydrogen-blending-in-natural-gas-networks-2018>.

48. US Department of Energy. Potential Roles of Ammonia in Hydrogen Economy: US Department of Energy , 2006.

49. Is iridium demand a potential bottleneck in the realization of large-scale PEM water electrolysis? Minke, Christine, o.a. 2021, International Journal of Hydrogen Energy, volume 46, 6 July 2021, ss. 23581–23590.

50. Feng, Mingbo, o.a. Characterization of the thermolysis products of Nafion membrane: A potential source of perfluorinated compounds in the environment: Scientific reports, Environmental Chemistry, Nature, 2015.

51. IVA Vägval för klimatet – transporter. Så klarar Sveriges transporter klimatmålen. Stockholm: IVA, 2019.

52. Naturvårdsverket. Industri, utsläpp av växthusgaser. Naturvårdsverket, data och statistik. [Online] Naturvårdsverket, 2022. <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-industrin/>

53. Hydrogen Europe. Clean hydrogen monitor. Bryssel: Hydrogen Europe, 2020.

54. Guidehouse. Market state and trends in renewable and low-carbon gases in Europe. Utrecht: Guidehouse Netherlands B.V. , december 2020.

55. Energimarknadsinspektionen. Elområde. Energimarknadsinspektionen. [Online] [Citat: den 21 03 2022.] <https://ei.se/konsument/el/sa-har-fungerar-emarknaden/elomrade#h-Sverigedeladesinielomraden>.

56. SCB Statistikdatabas. Totala utsläpp och upptag av växthusgaser efter växthusgas och sektor. År 1990–2020. SCB. [Online] SCB. [Citat: den 23 03 2022.] https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START_MI_MI0107/TotaltUtslappN/.

57. IVA Vägval el. Leveranssäkerhet inom elförsörjningen. Stockholm: IVA, 2017.

58. Svergies framtida elproduktion. Stockholm: IVA, 2016.

59. US Department of Energy. Hydrogen Pipelines — Hydrogen and Fuelcells technologies. [Online] 2022. [Citat: den 2022-02-02 februari 2022.] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines>.

Fotnoter

- 1 Så kallad Direct Air Capture (DAC).
- 2 Exempelvis Hybrit.
- 3 IVA, egna övergripande bedömningar inom detta arbete.
- 4 Och andra elektrobaserade drivmedel. Inom RED2 (förnybarhetsdirektivet) ska Kommissionen lägga fast en metod för under vilka omständigheter flytande och gasformiga drivmedel av icke-biologiskt ursprung (RFNBOs) ska definieras som förnybara. Vätgas från biogas eller biomassa omfattas inte.
- 5 För att utnyttja bioråvaran effektivt behöver vätgas tillföras utifrån. Tillförs inte vätgas från extern källa används en del av bioråvaran för att täcka vätgasbehovet och utbytet av biodrivmedel blir mindre.
- 6 Strategi för fossilfri konkurrenskraft – Vätgas, Fossilfritt Sverige 2021

- 7 Baserat på Fossilfritt Sveriges prognoser, Energimyndighetens sammanställning i förslag på nationell strategi och tillägg för HG2GS med mera.
- 8 REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy”, https://www.ipvf.fr/wp-content/uploads/2021/01/REPowerEU_Communication_with_Annexes_EN.pdf
- 9 Genom Rikard Gebart februari, 2022.
- 10 Resultatet kan variera beroende på val av komponenter men ligger i den storleksordningen.
- 11 IVAs projekt Vätgasens roll i ett fossilfritt samhälle, egna beräkningar.
- 12 Exempelvis Hybrit.
- 13 Det finns även behov av stödtjänster (tidigare ”systemtjänster”) för att upprätthålla stabiliteten i elsystemet. Här har vätgas inte en tydlig roll så dessa behandlas inte ytterligare i denna rapport.
- 14 De olika resurserna har olika potential i hur stor effekt de kan bidra med och på vilka tidsskalor. Som nämnts tidigare kan vätgaslagring, tillsammans med industriella tillämpningar där stora vätgaslager används, klara att hantera variationer i vindkraft, dvs. på tidsskalor på upp till en veckas tid. (Egentligen är det elektrolysören och lagret som dimensioneras efter de förväntade elprisvariationerna). Batterier i elfordon å andra sidan kan visserligen bidra med mycket effekt (om en stor andel av fordonsflottan elektrifieras), men på en tidskala av dag-natt-karaktär. Detsamma gäller styrning av värmepumpar i uppvärmningssystem där byggnadernas tröghet sätter gränsen för hur lång tid lasten kan förskjutas i tid, dvs. i storleksordningen upp till 12 timmar beroende på byggnadstyp och utomhustemperatur. Även om värmepumpar i hushållen är en relativt stor resurs som finns att tillgå på lokal nivå redan idag, finns denna resurs bara tillgänglig under uppvärmningssäsong. Elbilar som flexibilitetsresurs är naturligtvis begränsad än så länge, men om elektrifieringen fortgår kan den bli betydande framemot 2030 och därefter. De konsumentnära flexibilitetsresurserna kräver också system som motiverar kunderna att låta sig styras av en extern aktör.
- 15 Genom exempelvis Klimaträtsutredningen med syfte att väga klimatnytta högre än lokal miljöpåverkan vid tillståndsärenden.
- 16 ”REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy” från den 8 mars 2022
- 17 Förbrukningens dygnsvariation syns tydligt med regelbundna toppar och dalar mellan dag och natt.
- 18 EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS FÖRORDNING (EU) 2021/1119 av den 30 juni 2021 om inrättande av en ram för att uppnå klimatneutralitet och om ändring av förordningarna (EG) nr 401/2009 och (EU) 2018/1999 (europeisk klimatlag)
- 19 MEDDELANDE FRÅN KOMMISSIONEN TILL EUROPAPARLAMENTET, RÅDET, EUROPEISKA EKONOMISKA OCH SOCIALA KOMMITTÉN SAMT REGIONKOMMITTÉN Höjning av Europas klimatambition för 2030 Investering i en klimatneutral framtid till förmån för våra medborgare (Bryssel den 17.9.2020, COM(2020) 562 final)
- 20 EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV (EU) 2018/2001 av den 11 december 2018 om främjande av användningen av energi från förnybara energikällor
- 21 Förslag till EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV om ändring av Europaparlamentets och rådets direktiv (EU) 2018/2001, Europaparlamentets och rådets förordning (EU) 2018/1999 och Europaparlamentets och rådets direktiv 98/70/EG vad gäller främjande av energi från förnybara energikällor och om upphävande av rådets direktiv (EU) 2015/652

- 22 RFNBOs = Renewable Fuels of Non-Biological Origins
- 23 RÅDETS DIREKTIV 2003/96/EG av den 27 oktober 2003 om en omstrukturering av gemenskapsramen för beskattning av energiprodukter och elektricitet
- 24 Förslag till RÅDETS DIREKTIV om en omstrukturering av unionsramen för beskattning av energiprodukter och elektricitet.
- 25 Europaparlamentets och rådets direktiv 2003/87/EG av den 13 oktober 2003 om ett system för handel med utsläppsrätter för växthusgaser inom gemenskapen och om ändring av rådets direktiv 96/61/EG
- 26 Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757
- 27 Förslag till EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS FÖRORDNING om ändring av förordning (EU) 2019/631 vad gäller skärpning av normerna för koldioxidutsläpp från nya personbilar och nya lätta nyttofordon i linje med unionens höjda klimatambitioner
- 28 DIREKTIV EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV 2014/94/EU av den 22 oktober 2014 om utbyggnad av infrastrukturen för alternativa bränslen
- 29 Förslag till EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS FÖRORDNING om utbyggnad av infrastruktur för alternativa bränslen och om upphävande av Europaparlamentets och rådets direktiv 2014/94/EU
- 30 Förslag till EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS FÖRORDNING om användning av förnybara och koldioxidsnåla bränslen för sjötransport och om ändring av direktiv 2009/16/EG
- 31 Mellan 2015 och 2020 har fyra kärnkraftreaktorer stängts, (O1, O2, R1, R2) motsvarande en installerad effekt på 2,9 GW och möjlig elproduktion på ca 17 TWh (varierar mellan olika år).
- 32 Tränger igenom material vid inneslutning under tryck.
- 33 Anm. Gäller bränslen generellt. Det bildas ingen aska vid förbränning av vätgas, bara vattenånga.
- 34 Effektivt värmevärde där energiförluster i rökgaserna räknats bort (vattnets ångbildningsentalpi)
- 35 Vid förbränning av ett bränsle oxiderar kolet till koldioxid och vätet till vattenånga. Kalorimetrisk värmevärde eller högre värmevärde (HHV = higher heating value) anger hur mycket energi som kan frigöras som värme vid förbränning av ett bränsle under förutsättning att vattenånga kondenseras och att energin kan nyttiggöras.
- 36 Källa: Linde gas https://www.linde-gas.se/sv/safety_health_ren/gas_risks/flammable_gas/index.html 2021-02-01
- 37 Ullmans encyclopedia of industrial chemistry.
- 38 PEM-elektrolys = Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis.
- 39 SOEC = Solid Oxide Electrolysis Cell.
- 40 Föredrag av Nocola G.Arlia, Westinghouse, vid Energiforsks seminarium den 9 maj 2022.
- 41 EDF vision on the role of nuclear in hydrogen deployment; Sylvain Takenouti, EDF, vid Energiforsks seminarium den 9 maj 2022.
- 42 Utsläppen varierar mellan olika år beroende på tillgången på vind och vatten, utomhustemperaturen och andra omständigheter som kan påverka elbalansen.

- 43 Bland annat vill man att materialet ska tillåta vätejontransport men förhindra ledning av elektroner.
- 44 Ett av de bästa materialen avseende detta är Nafion, vilket är en fluorinerad sulfonerad polymer som började tillverkas på 60-talet av DuPont. Problemet med Nafion är att det är en så kallad evighetskemikalie av samma typ som PFAS. Även om man förbränner Nafion, och liknande kemikalier som har föreslagits som membranmaterial, bildas problematiska biprodukter.
- 45 USA 2 600 km, Belgien 600 km och Tyskland 400 km. The Future of Hydrogen, IEA June 2019.
- 46 Primärt Hybrit, samt andra större elektrifieringsprojekt inom industrin och transportsektorn.
- 47 Intervallet mellan scenarierna "Referens EU" (referensscenario) och "Elektrifiering" (högre takt av elektrifiering, inklusive vätgas). Källa: Scenarier över Sveriges energisystem 2020, Energimyndigheten.
- 48 Svensk vindenergi bedömer att vindkraften kommer att producera 49 TWh redan 2024, enligt ett pressmeddelande "Vindkraften levererar på ny rekordnivå", 2022-02-01.
- 49 Utvecklas av företaget Mine Storage <https://www.minestorage.com/>
- 50 H-DR = Hydrogen Direct Reduction.
- 51 HBI = Hot Briquetted Iron.
- 52 EAF = Electric Arc Furnace.
- 53 DRI = Direct Reduced Iron.
- 54 Vattenkraft, vindkraft (land och hav), solkraft, kärnkraft, övrig värmekraft med olika bränslen, batterier, utlandsförbindelser och olika typer av elkonsumenter.
- 55 Definierad som: "Den långsiktiga underliggande och enkelt kommunicerbara elprisdämpande effekten av vindkraft." Källa: Vindkraftens elpriseffekt 2022-2025, Sweco.
- 56 Enligt 11 kap. 2 § första stycket 3 LSE är el inte skattepliktig om den framställts och förbrukats på fartyg eller annat transportmedel
- 57 EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV (EU) 2018/2001 av den 11 december 2018 om främjande av användningen av energi från förnybara energikällor (omarbetning)
- 58 RFNBOs = Renewable Fuels of Non-Biological Origins
- 59 EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS FÖRORDNING (EU) 2021/1119 av den 30 juni 2021 om inrättande av en ram för att uppnå klimatneutralitet och om ändring av förordningarna (EG) nr 401/2009 och (EU) 2018/1999 (europeisk klimatlag)
- 60 MEDDELANDE FRÅN KOMMISSIONEN TILL EUROPAPARLAMENTET, RÅDET, EUROPEISKA EKONOMISKA OCH SOCIALA KOMMITTÉN SAMT REGIONKOMMITTÉN En vätgasstrategi för ett klimatneutralt Europa (Bryssel den 8.7.2020, COM(2020) 301 final)

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

Utgivare: Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA), 2022
Box 5073, SE-102 42 Stockholm
Tfn: 08-791 29 00

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

IVA-M 536
ISSN: 1100-5645
ISBN: 978-91-89181-31-1

Projektledning: Karin Byman, IVA
Text: Karin Byman, IVA
Layout: Pelle Isaksson, IVA

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



Kungl. Ingenjörsvetenskaps
Akademien