



# CHALMERS

---

## **Resursbegränsningar för elektrobränslen**

I ett framtida globalt koldioxidneutralt energisystem

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammen Maskinteknik och Teknisk Matematik

Kristoffer Fürst  
Petra Holmér  
Erik Lindén  
Herman Lundberg  
Johanna Olovsson

KANDIDATARBETE 2016

# Resursbegränsningar för elektrobränslen

I ett framtida globalt koldioxidneutralt energisystem

KRISTOFFER FÜRST  
PETRA HOLMÉR  
ERIK LINDÉN  
HERMAN LUNDBERG  
JOHANNA OLOVSSON  
© 2016.

Handledare: Selma Brynolf, Institutionen för Energi och Miljö, fysisk resursteori  
Examinator: Maria Grahn, Institutionen för Energi och Miljö, fysisk resursteori



**CHALMERS**

Institutionen för Energi och Miljö  
*Fysisk resursteori*  
ENMX02-16-02  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2016

## Sammandrag

Elektrobränslen är ett samlingsnamn för alla kolhaltiga bränslen som produceras med hjälp av vatten, koldioxid och elektricitet. Om elektriciteten och koldioxiden hämtas från förnyelsebara källor kan bränslena bli koldioxidneutrala. Exempel på elektrobränslen är syntetiskt framställd metan, metanol och diesel.

Syftet med detta projekt är att ta reda på huruvida en global omställning till ett koldioxid neutralt energisystem med elektrobränslen som huvudsaklig energibärare i transportsektorn är resursmässigt genomförbar till år 2100. Produktionen av bränsle och förnyelsebar elektricitet från sol- och vindkraft har därför studerats för att identifiera eventuella resursbegränsningar vid en uppskalning. Arbetsmetoden har varit en litteraturstudie vilket innebär insamling och sammanställande av information för att svara på projektets frågeställningar.

Utifrån förutsedd framtida energiefterfrågan har material- och resursbehov beräknats för de ingående produktionsprocesserna, det vill säga bränslesyntes, elektrolys, koldioxidinfångning samt elproduktion. De flesta studerade tekniker används kommersiellt idag, men koldioxidinfångning från luft och SOEC-elektrolys är två tekniker som befinner sig i forskningsstadiet men som inkluderats då de kan komma att effektivisera produktionen av elektrobränslen i framtiden.

Resultatet av arbetet visar, med avseende på de tekniker och material som har undersökts, att det kan vara resursmässigt möjligt att producera den mängd elektrobränslen som krävs för ett framtida globalt energisystem. Vid stor uppskalning kommer vissa tekniker, exempelvis PEM-elektrolys och tunnfilms-solceller, vara resursmässigt begränsade och kommer därför troligtvis inte kunna bidra med någon betydande andel av produktionen. Utifrån resultatet går det även att se att både platinametaller och de sällsynta jordartsmetallerna kommer att vara kritiska för en stor uppskalning med de tekniker som har undersökts. Dock finns det ofta många alternativa material och tekniker.

Slutsatsen är att med rätt kombination av tekniker, rätt materialval, fortsatt forskning och teknisk utveckling kommer det vara möjligt att producera elektrobränslen i stor skala för ett globalt energisystem. Det kan dock finnas många praktiska problem med en uppskalning, då ekonomiska och sociala aspekter inte har behandlats i denna rapport.

**Nyckelord:** Elektrobränslen, energisystem, resursbegränsningar, förnyelsebar, elektricitet, bränslesyntes, elektrolys, koldioxidinfångning, material, litteraturstudie.

## Abstract

Electrofuels is an umbrella term for all carbon based fuels produced by water, carbon dioxide and electricity. If the electricity and carbon dioxide is collected from renewable sources, the fuels become carbon dioxide neutral. Examples of electrofuels are synthetically produced methane, methanol and diesel.

The aim of this project is to find out if a global transition to a carbon neutral energy system with electrofuels as the main energy carrier in transports is achievable by 2100 with respect to resources. The production of fuel and renewable electricity from wind and solar power has been studied to identify possible resource constraints. The method used is a literature review which involves collection and compilation of information to answer the questions of the project.

Based on the predicted future energy demand, the material and resource needs have been estimated for the production processes; fuel synthesis, electrolysis, carbon capture and electricity generation. Most of the studied technologies are used commercially today. However, carbon capture from air and SOEC-electrolysis, two technologies that currently are in the research stage, have been included since they may contribute to making the production more efficient in the future.

The result shows that, with respect to the technologies and materials that have been studied, it can be possible to produce the amount of electrofuels required for a future global energy system. At a large scale, some of the technologies, such as PEM-electrolysis and thin-film solar cells will run into resource constraints. Due to this, these will probably not be able to contribute with a significant part of the total production. Based on the result, it is also clear that platinum-group metals and rare earth metals will be critical for the production of electrofuels using the technologies that have been studied. However, there are usually many alternative materials and technologies available.

The conclusion is that with the right combination of technologies, the right material choices and further research and development, it will be possible to produce electrofuels on a large scale. However, there may be many practical problems, since economical and social aspects have not been examined in this report.

**Keywords:** Electrofuels, energy system, resource constraints, renewable, electricity, fuel synthesis, electrolysis, carbon capture, materials, literature review.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	1
1.2	Syfte . . . . .	2
1.3	Frågeställningar . . . . .	2
1.4	Avgränsningar . . . . .	3
1.5	Metod . . . . .	3
1.6	Scenarier . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Elektrobränslen</b>	<b>8</b>
2.1	Vad är elektrobränslen? . . . . .	8
2.2	Fördelar och utmaningar med elektrobränslen . . . . .	9
2.3	Produktionsprocesser . . . . .	10
2.3.1	Elproduktion . . . . .	11
2.3.1.1	Vindkraft . . . . .	12
2.3.1.2	Solceller . . . . .	13
2.3.2	Koldioxidinfångning . . . . .	14
2.3.2.1	Koldioxid från förbränning . . . . .	15
2.3.2.2	Koldioxidinfångning från luft . . . . .	16
2.3.3	Elektrolys . . . . .	18
2.3.3.1	Alkalisk elektrolys . . . . .	19
2.3.3.2	PEM-elektrolys . . . . .	20
2.3.3.3	SOEC . . . . .	20
2.3.4	Bränslesyntes . . . . .	21
2.3.4.1	Metanolsyntes . . . . .	22
2.3.4.2	Fischer-Tropschprocessen . . . . .	23
2.3.4.3	Sabatier-reaktionen . . . . .	24
2.4	Material . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Resultat och beräkningar</b>	<b>28</b>
3.1	Bränslesyntes . . . . .	28
3.1.1	Metanolsyntes . . . . .	28
3.1.2	Fischer-Tropschprocessen . . . . .	29
3.1.3	Sabatier-reaktionen . . . . .	30
3.2	Elektrolys . . . . .	31
3.2.1	Alkalisk elektrolys . . . . .	32
3.2.2	PEM-elektrolys . . . . .	33

## Innehåll

---

3.2.3	SOEC . . . . .	34
3.3	Koldioxidinfångning . . . . .	36
3.3.1	Koldioxid från förbränning . . . . .	36
3.3.2	Koldioxidinfångning från luft . . . . .	37
3.4	Elproduktion . . . . .	38
3.4.1	Vindkraft . . . . .	38
3.4.2	Solceller . . . . .	39
3.5	Ett möjligt framtidsscenario . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>48</b>
4.1	Teknik, material och resursbegränsningar . . . . .	48
4.2	Ekonomiska och sociala aspekter . . . . .	51
4.3	Kritik och rekommendationer för fortsatt arbete . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Slutsats</b>	<b>56</b>
	<b>Referenser</b>	<b>58</b>
	<b>Bilagor</b>	<b>68</b>
<b>A</b>	<b>Processvägar</b>	<b>69</b>
<b>B</b>	<b>Beräkningar av vätgas-, koldioxid- och elbehov</b>	<b>70</b>
<b>C</b>	<b>Beräkningar av materialbehov för bränslesyntes</b>	<b>71</b>
C.1	Metanolsyntes . . . . .	71
C.2	Fischer-Tropschprocessen . . . . .	71
<b>D</b>	<b>Beräkningar av materialbehov för elektrolys</b>	<b>73</b>
D.1	Alkalisk elektrolys . . . . .	73
D.2	PEM-elektrolys . . . . .	74
<b>E</b>	<b>Koldioxidberäkningar</b>	<b>75</b>
E.1	Mängden koldioxid i biomassa . . . . .	75
E.2	Koldioxidinfångning från förbränning . . . . .	75
E.3	DAC . . . . .	75
<b>F</b>	<b>Beräkningar av materialbehov för elproduktion</b>	<b>77</b>
F.1	Vindkraftverk . . . . .	77
F.2	Solceller . . . . .	78
<b>G</b>	<b>Beräkningar av framtida produktion av platinametaller</b>	<b>79</b>

# 1

## Inledning

I inledningen ges en bakgrund till dagens och en framtida energisituation samt en kort introduktion till ämnet elektrobränslen. Därefter beskrivs syftet med att genomföra en studie om resursbegränsningar för elektrobränslen. Även de avgränsningar som gjorts under projektet finns presenterade. Slutligen beskrivs upplägget av arbetet och den metod för litteraturstudier som använts.

### 1.1 Bakgrund

Globalt sett går trenderna mot en mer hållbar och miljövänlig livsstil. Under 2015 Paris Climate Conference enades för första gången 195 nationer om riktlinjer för hantering av klimatpåverkan. Nationerna enades om att vidta åtgärder för att hålla den globala temperaturökningen under  $2^{\circ}\text{C}$ , med ett riktmärke på  $1.5^{\circ}\text{C}$  [1]. Detta scenario karaktäriseras av en minskning av antropogena växthusgaser med 40-70% till 2050 jämfört med 2010, och att emissionsnivåerna är nära noll eller negativa till 2100 [2]. Sverige har en vision om att inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser i atmosfären till 2050, samt att ha en hållbar och resurseffektiv energiförsörjning [3, 4]. För att nå detta mål bör Sverige till 2030 ha en fordonsflotta som är oberoende av fossila bränslen [4].

Aktuella förnyelsebara substitut till dagens fossila bränslen är bland annat biobränslen och vätgas. Biobränslen har ökat i användning under de senaste åren, men stöter på flera problem vid stor uppskalning. Bland annat konkurrerar marken som används till odling av biobränslen med marken för att producera föda [5]. Det krävs även mycket vatten till de biologiska råvarorna. Till exempel krävs det mellan 10-17 liter vatten per liter etanol med majs som råvara [6]. Under de senaste åren har även intresset för vätgas ökat som ett möjligt framtida transportbränsle, då vätgas kan användas som drivmedel i exempelvis bränslecellsbilar [7]. Det finns dock problem som inte fullt ut är lösta, som till exempel säkerheten kring vätgas. Vätgas har även låg energidensitet och är i behov av ny infrastruktur i distributionskedjan [8]. En lösning till dessa problem kan vara att använda elektrobränslen som komplement.

Elektrobränslen är ett samlingsnamn för alla kolhaltiga bränslen som produceras med hjälp av vatten, koldioxid och elektricitet. Exempel på elektrobränslen är syntetiskt framställd metan, metanol, bensin eller diesel. Elektriciteten som används vid produktionen kan komma från förnyelsebara källor samt från överskottsel. Med förnyelsebar menas energi från källor som förnyas i snabb takt, exempelvis sol-, vatten- och vindkraft. Elektrobränslen har vissa fördelar gentemot fossila bränslen

och bibränslen, exempelvis att de kan produceras utan att konkurrera med matproduktion. Likt bibränslen kan de även vara koldioxidneutrala och kan utan större tekniska förändringar implementeras i den befintliga fordonsflottan [9].

Eftersom produktionen av elektrobränslen kräver energi samtidigt som den globala energiförbrukningen förutses öka de kommande åren, behöver energiproduktionen skalas upp. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) har tagit fram fyra scenarier, så kallade Representative Concentration Pathways (RCP). I dessa scenarier förmodas det primära energibehovet nå ungefär 750-900 EJ, eller i extremfallet runt 1750 EJ, till år 2100 jämfört med 510 EJ år 2010 [10, 11]. Idag framställs ungefär 80% av den globalt förbrukade energin från fossila bränslen [12], vilket innebär att produktionen av förnyelsebar energi de närmaste åren behöver öka. En viktig fråga att utreda är om det finns resursbegränsningar som hindrar en sådan uppskalning.

## 1.2 Syfte

Syftet med projektet är att ta reda på huruvida en global omställning till ett koldioxid neutralt energisystem med elektrobränslen som huvudsaklig energibärare i transportsektorn är resursmässigt genomförbar till år 2100. Arbetet ska resultera i en ökad förståelse för elektrobränslets framtida potentiella roll, samt en vetenskaplig rapport som kan ligga till grund för vidare forskning.

## 1.3 Frågeställningar

Den övergripande frågeställningen lyder:

- Är det möjligt att ha en koldioxidneutral elproduktion och fordonsflotta utan resursbegränsningar?

Vidare har ett antal följdfrågor tagits fram för att ytterligare specificera uppgiften:

- Går det att genomföra den nödvändiga uppskalningen av elektricitet- och elektrobränsleproduktion för att förse transportsektorn med elektrobränslen år 2100?
- Finns det några resursbegränsningar hos processerna för framställning av elektrobränslen?
- Finns det några resursbegränsningar vid produktion av förnyelsebar elektricitet med vind- och solkraft?
- Om uppskalningen inte går att genomföra: vilka resurser är begränsande och vilka tekniker begränsas?

### 1.4 Avgränsningar

Projektet genomfördes inom tidsramen för ett kandidatarbete. Det utfördes under halvtidsstudier av fem studenter och en tidsperiod av en termin. På grund av den begränsade tiden har det varit nödvändigt att göra vissa avgränsningar av projektets innehåll.

Projektets beräkningar utgår från ett givet behov av energi i form av elektricitet och bränslen baserat på möjliga framtidsscenarier. Hänsyn tas till världens totala elbehov men rapporten fokuserar framför allt på användning av elektrobränslen inom transportsektorn i varierande grad, kombinerat med andra koldioxidneutrala drivmedel. De elektrobränslen som i rapporten antas användas i framtiden är metan, metanol, bensin och diesel, då de har goda förbränningsegenskaper och används även i dagens transportsektor med andra framställningsmetoder. Dessa bränslen framställs redan syntetiskt från till exempel naturgas i kommersiella anläggningar, så teknikerna för omvandling av syntesgas till färdigt bränsle är välkända [13].

De tekniker för produktion av elektrobränslen som studeras begränsas till kommersiellt använda tekniker, samt tekniker som förutsägs kommersialiseras inom en snar framtid och har goda förutsättningar för effektiv produktion. Här undersöks begränsningar av material som krävs för att genomföra kemiska reaktioner, medan materialåtgång för att bygga större anläggningar och reaktorer utelämnas. Beräkningar av resursbehov görs för de vanligast använda materialen inom respektive teknik, då alla alternativa material inte kan beaktas. Vid beräkningarna görs även antagandet att vind- och solkraft är de enda förnyelsebara kraftslagen som i framtiden skalas upp eftersom de har störst utvecklingspotential [14]. Detta innebär att elproduktion via kärnkraft, vattenkraft och övriga koldioxidneutrala tekniker inte kommer att behandlas. Eftersom energikällorna sol och vind inte kommer vara bristvaror [15, 16], blir materialbehov till kraftverken källan till potentiella resursbegränsningar för elproduktion.

Eftersom rapportens syfte är att undersöka de resursmässiga möjligheterna för användning av elektrobränslen behandlas inte ekonomiska eller sociala aspekter av en uppskalning. Resursbegränsningar gällande eldistribution, lagring och slutanvändning av bränsle kommer inte heller att undersökas, då arbetets fokus är själva bränsleproduktionen. Slutligen bortses från eventuella effekter på miljön vid utvinning av material samt vid installation av kraftverk och reaktorer.

### 1.5 Metod

Detta kandidatarbete innefattar informationsinsamling från olika källor och sammanställande av informationen för att kunna besvara ett antal frågeställningar och uppfylla projektets syfte. Arbetet är därför främst litteraturbaserat och metoden är en litteraturstudie. Detta innebär sökning av vetenskaplig litteratur samt analys och bearbetning av insamlad data. Studien behövs för att i ett inledande skede motivera att arbetet genomförs, och sedan för att samla in tillgänglig kunskap inom ämnesområdet. För att finna relevant och tillförlitlig information genomförs litteratursökning

där sökmotorer för vetenskapliga publikationer används, exempelvis Google Scholar och Summon. Sökningar har även gjorts direkt i databaser såsom ScienceDirect.

Sökmotorerna har använts systematiskt med en gemensam sökstrategi. Som sökord valdes termer med koppling till det studerade ämnet och som motsvarar studiens syfte. Ett exempel på hur sökord har kombinerats vid sökning av materialbehov för katalysatorer är: processterm, katalysator och LCA. Avgränsningar gjordes direkt vid sökningen med hjälp av olika inklusions- och exklusionskriterier, exempelvis gällande publikationsår och ämnesområde. Först gjordes en bred sökning för respektive sökterm, för att sedan smala av sökningen efter hand tills den resulterade i ett rimligt antal träffar. Därefter lästes artiklarnas titlar och abstract för att baserat på detta välja ut relevanta källor. De publikationer som valdes var framför allt de som beskrev olika processteg vid produktion av elektrobränslen och som innehöll relevant data för arbetets analys, det vill säga data angående verkningsgrader, energibehov och materialåtgång. Databearbetningen innebar sedan att det viktigaste innehållet sammanställdes för att inkluderas i rapporten i text och tabellform, eller för att användas vid beräkningar.

Innan källorna användes bedömdes deras kvalitet vad gäller tillförlitlighet och validitet. Vetenskapliga artiklar har granskats av oberoende forskare vilket bör säkerställa deras korrekthet. För att jämföra och komplettera med ytterligare information användes även andra källor från bland annat konsulter och industri. Sådana källor är inte lika strikt granskade och då finns inte samma kvalitetsgarantier. Därför användes alltid ett kritiskt förhållningssätt och en rimlighetsbedömning gjordes utifrån egen kunskap vid användning av denna typ av källor. Den viktigaste informationen, exempelvis siffror som användes vid beräkningar, kontrollerades så ofta det var möjligt genom att jämföra mellan olika oberoende källor för att se att de stämmer överens.

Detta projekt undersökte resursanvändningen för hela kedjan vid framställning av elektrobränslen och produktion av förnyelsebar elektricitet med vind- och solkraft. Resursbehovet beräknades med hjälp av ett antal framtidsscenarioer med olika fördelning av elektrobränslen och andra koldioxidneutrala bränslen i transportsektorn. Dessa scenarioer definierade alltså det framtida energibehovet och det uppskattade behovet av elektrobränslen. Alla energiberäkningar är baserade på det högre värmevärdet om inget annat anges, och i de källor där inget har angivits har det antagits att det högre värmevärdet användes. I resultatet sammanställdes all data angående resursbehov för elektricitet och bränsle, varefter beräkningar gjordes och värdena jämfördes mot den uppskattade tillgången av olika resurser. På så sätt avgjordes om resursbegränsningar var troliga, vilka resurser som var mest kritiska och om scenarierna är realiserbara med avseende på resursbegränsningar.

Viktiga aspekter för att avgöra hur väl projektets syfte har uppnåtts är därför om tydliga slutsatser kunde dras kring den framtida potentialen hos elektrobränslen och vilka resurser som är begränsande. Arbetet blir användbart för andra som underlag för vidare forskning om studien är genomförd på ett vetenskapligt sätt med korrekta källhänvisningar. Projektets mål kan ses som uppfyllda om en tydlig och konkret analys av resursanvändande för elektrobränsleproduktionen har genomförts.

### 1.6 Scenarier

Tre framtidsscenarier har tagits fram med den data som utgör grunden för projektets beräkningar av resursbehov. Dessa tre scenarier beskriver ett framtida energisystem kring år 2100, och energibehovet för olika energisektorer baseras på data från GET-modellen [17]. Scenarierna har tillhandahållits av projektgruppens handledare.

De förnyelsebara bränslen som används för transporter i scenarierna är elektrobränslen, biobränslen, vätgas och eldrift. För värmeproduktion används biomassa och kol med koldioxidinfångning. För att hålla scenarierna koldioxidneutrala krävs CCS-teknik (Carbon Capture and Storage) för att ta hand om koldioxiden från förbränning av kol. Skillnaden mellan de tre scenarierna är vilka drivmedel som används för olika typer av transporter, och därmed i vilken omfattning som elektrobränslen används inom transportsektorn. Då en del bränslen lämpar sig bättre för vissa typer av fordon har tre mer eller mindre rimliga framtidsscenarier tagits fram.

Scenario 1 är basfallet där elektrobränslen används för flyg, lastbilar och fartyg, medan elektricitet används för bilar, bussar och tåg. Det totala årliga energibehovet för detta scenario är 637 EJ, vilket inkluderar det totala värme- och transportbehovet samt elbehovet utanför transportsektorn. För att visa på ytterligheter och ge studien ett större giltighetsintervall har även två mer extrema scenarier inkluderats. Scenario 2, där elektrobränslen inte används, innebär en minimering av elbehovet. På motsvarande sätt innebär scenario 3 en maximering av elbehovet, det vill säga den största tänkbara utbredningen av elektrobränslen i transportsektorn. Scenario 2 och 3 har ett totalt energibehov på 613 respektive 644 EJ. Skillnaden i energibehov mellan de olika scenarierna beror på att teknikerna är olika effektiva, exempelvis har elmotorer högre verkningsgrad än förbränningsmotorer.

Det mest intressanta för detta arbete är dock inte energibehovet utan det resulterade elbehovet som dessa scenarier kräver. Den mängd elektricitet som behöver produceras baserat på dessa energibehov beror bland annat på vilka typer av elektrobränslen som används, energieffektivitet vid bränsleproduktion och elektrolys samt energiförluster i elnätet. Elbehovet kan därför inte specificeras här utan de värden som användes framställs i rapportens resultatdel. Den tekniska potentialen för primär biomassa uppskattas i litteraturen till mellan 100-300 EJ/år [18]. I scenarierna antas därför att mängden energi från biomassa är begränsad till 200 EJ/år. Scenarierna presenteras i tabell 1.1, 1.2 och 1.3 nedan.

**Tabell 1.1:** En sammanställning för scenario 1 av energikällor och energibehov vid år 2100 för respektive fordonstyp, samt för värme- och elproduktion. 100% av biomassan antas användas till värmeproduktion i detta scenario. Data baserat från GET-modellen [17].

Scenario 1 - Basfall	Energikällor	Energibehov (EJ/år)	Biomassa (EJ/år)
Elektricitet	-	168	0
Värme	Biomassa och kol med CCS	246	200
Bilar	Elektricitet	7	0
Bussar	Elektricitet	0.43	0
Tåg	Elektricitet	6	0
Flyg	Elektrobränslen	76	0
Lastbilar	Elektrobränslen	32	0
Fartyg	Elektrobränslen	101	0
Totalt		637	200

**Tabell 1.2:** En sammanställning för scenario 2 av energikällor och energibehov vid år 2100 för respektive fordonstyp, samt för värme- och elproduktion. 96.5% av biomassan antas användas till biobränslen i detta scenario, resterande till värmeproduktion. Data baserat från GET-modellen [17].

Scenario 2 - Minimering av elbehovet	Energikällor	Energibehov (EJ/år)	Biomassa (EJ/år)
Elektricitet	-	168	0
Värme	Biomassa och kol med CCS	246	7
Bilar	Elektricitet	7	0
Bussar	Elektricitet	0.43	0
Tåg	Elektricitet	6	0
Flyg	Biobränslen	76	153
Lastbilar	Vätgas	13	0
Fartyg	Biobränslen (20%)	20.03	40
	Vätgas (80%)	74.97	0
Totalt		613	200

**Tabell 1.3:** En sammanställning för scenario 3 av energikällor och energibehov vid år 2100 för respektive fordonstyp, samt för värme- och elproduktion. 100% av biomassan antas användas till värmeproduktion i detta scenario. Data baserat från GET-modellen [17].

Scenario 3 - Maximering av elbehovet	Energikällor	Energibehov (EJ/år)	Biomassa (EJ/år)
Elektricitet	-	168	0
Värme	Biomassa och kol med CCS	246	200
Bilar	Elektricitet (50%)	3.72	0
	Elektrobränslen (50%)	10.55	0
Bussar	Elektricitet (50%)	0.21	0
	Elektrobränslen (50%)	0.52	0
Tåg	Elektricitet	6	0
Flyg	Elektrobränslen	76	0
Lastbilar	Elektrobränslen	32	0
Fartyg	Elektrobränslen	101	0
Totalt		644	200

# 2

## Elektrobränslen

I följande avsnitt presenteras den grundläggande teorin som krävs för förståelse av arbetet. Fördelar och utmaningar med elektrobränslen samt varför de är intressanta för framtida energisystem diskuteras. Därefter ges en översikt av de individuella processtegen och utmärkande drag för använda tekniker. Sedan går varje viktigt steg igenom med målet att avgöra material- och resursbehovet för respektive teknik.

### 2.1 Vad är elektrobränslen?

Elektrobränslen är ett gemensamt namn för kolvätebaserade bränslen som produceras från koldioxid och vatten med elektricitet som huvudsaklig energikälla [9, 19]. Produktionen innebär att koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) reageras med vätegas ( $\text{H}_2$ ) som är framställd från vatten genom elektrolys. Elektrobränslen används för att lagra elektricitet som kemisk energi i form av flytande eller gasformiga bränslen [20]. Det är möjligt att tillverka en mängd olika bränslen, till exempel metan, bensen, diesel och alkoholer. Det finns även flera olika produktionsvägar där tekniken för koldioxidinfångning, elektrolys och bränslesyntes varierar beroende på önskad slutprodukt [9]. Konceptet att tillverka bränsle från återvunnen koldioxid är inte helt nytt. Redan under 1970-talets oljekris föreställde sig Steinberg och Dang en version av syntetiska bränslen baserade på koldioxid infångad från luft [21].

För att elektrobränslen ska kunna räknas som förnyelsebara krävs att både tillförd energi och de ämnen som används för att bilda bränslemolekylerna kommer från icke-fossila källor [19]. Elektricitet från vind- och solkraft kan därför med fördel användas vid produktionen. Kolatomerna måste ingå i slutna system, vilket innebär att de kan tas från exempelvis rökgaser från förbränning eller förgasning av biomassa, eller infångning direkt från luften [9].

Potentialen för att tillverka elektrobränslen avgörs till stor del av tillgången på elektricitet och koldioxid till rimligt pris [9]. I en studie från Grahn et al. har en jämförelse av produktionskostnader visat att syntetiskt producerad metanol kan vara mer kostnadseffektivt än bensen som transportbränsle med dagens olje- och elpris. Under förutsättning att kostnaden för koldioxidinfångning och vätegasproduktion är relativt låg, visar även denna studie att produktionsanläggningen bara behöver köras delar av året för att konkurrera med bensenproduktionen [8].

Flera demonstrationsanläggningar för produktion av elektrobränslen har utvecklats i Europa under det senaste årtiondet. Ett exempel är Carbon Recycling International (CRI) på Island som producerar metanol med hjälp av geotermisk energi och koldioxid från samma källa. En kommersiell anläggning har drivits av CRI sedan år 2011 med en kapacitet att producera 5 miljoner liter metanol per år. Den senaste tidens intresse för elektrobränslen beror framför allt på ett behov av att finna alternativ för långtidslagring av elektricitet, men även en angelägenhet att finna klimatneutrala bränslen för transportsektorn [18].

## 2.2 Fördelar och utmaningar med elektrobränslen

En stor utmaning i dagens samhälle är hanteringen av miljöpåverkande utsläpp. Förnyelsebara elektrobränslen är ett sätt att återvinna koldioxid och kan bidra till att koldioxidhalten i atmosfären inte ökar [20]. Användning av elektrobränslen leder dock inte till en minskning av lokala utsläpp från förbränningsmotorer, såsom kväveoxider ( $\text{NO}_x$ ), kolmonoxid (CO) och sot, vilka bidrar till luftföroreningar och marknära ozon [8].

Då elektricitet är dyrt att lagra kan en omvandling till bränsle via vätgas vara ett bra sätt att jämna ut och ta till vara på perioder med stor eltillgång [22]. Eftersom elektrobränslen kan användas för att lagra överskottsel kan de bidra genom att balansera det växande överskottet från intermittent elproduktion med vind- och solkraft [9]. Detta är något som kommer att bli viktigare då en allt större andel av elproduktionen blir förnyelsebar och baseras på fluktuerande resurser.

Ytterligare en fördel är att elektrobränslen, till skillnad från elektricitet och vätgas, kan byta ut sin fossilbaserade motsvarighet i dagens infrastruktur och fordon utan några modifikationer [9]. Om metanol ska användas i förbränningsmotorer för exempelvis bensin behövs en viss modifikation göras, men metanol har utmärkta förbränningsegenskaper som möjliggör att den även kan blandas in i konventionell bensin. Att elektrobränslen kan blandas in till befintliga bränslen kan dock även ses som ett problem, då detta kan leda till en förlängd användning av fossila bränslen.

Elektrobränslen är ett bra alternativ för att försörja transportsektorn med förnyelsebara, koldioxidneutrala drivmedel. Även med en förväntad spridning av elektricitet och vätgas som drivmedel i den privata fordonssektorn, kommer det troligtvis finnas ett behov av energitäta bränslen för olika typer av långdistanstransport, till exempel båt-, lastbils- och flygplanstransport [20]. Här kan alltså elektrobränslen fylla en viktig funktion.

En storskalig implementation av elektrobränslen i transportsektorn skulle dock innebära en markant ökning av elektricitetsbehovet. Det uppskattas att om alla Sveriges personbilar skulle drivas av elektrobränslen skulle det resultera i att öka Sveriges totala elektricitetsbehov med upp till 93% (beroende på bränsletyp, bilstorlek och körmonster) [19]. Med tanke på att bilar endast utgör en liten del av hela transportsektorn kommer detta att bli en stor utmaning.

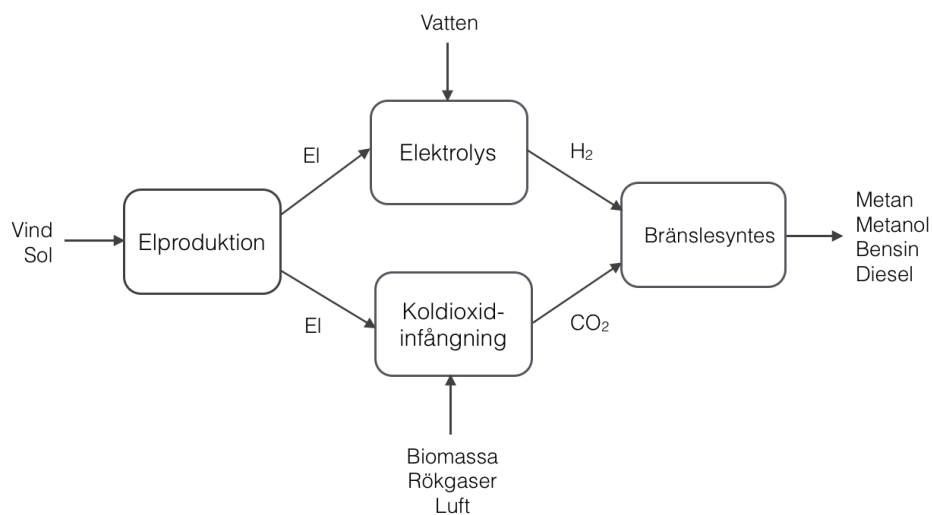
Produktionen av elektrobränslen är fortfarande i början av sin utveckling, och många utmaningar behöver fortfarande övervinnas innan elektrobränslen införs på marknaden i stor skala [18]. En av dessa utmaningar är att utreda vilka material och resurser som kan komma att bli begränsande då produktionen skalas upp.

## 2.3 Produktionsprocesser

Det finns ett flertal möjliga processvägar och slutprodukter vid produktion av elektrobränslen. Produktionsprocesserna för elektrobränslen kan delas upp i fyra steg:

1. Elektricitetsproduktion
2. Koldioxidinfångning
3. Elektrolys
4. Bränslesyntes

En modell över dessa processteg presenteras nedan i figur 2.1. Först produceras den förnyelsebara elektricitet som behövs för att driva elektrolysen och koldioxidinfångningen. Sedan sker infångning av koldioxid samt framställning av vätgas genom elektrolys. Slutligen blandas koldioxid och vätgas för att producera olika typer av elektrobränslen. Vilken typ av bränsle som bildas beror bland annat på vilken reaktion som används [8, 9, 20]. Det är viktigt att notera att detta är en förenklad modell, processen är i verkligheten mer komplex där varje steg involverar ett antal delprocesser.



**Figur 2.1:** Modell över produktionsprocesserna för elektrobränslen

Mellan dessa steg tillkommer transport och lagring av koldioxid och vätgas. Dessutom krävs vattenrening för vätgasproduktionen. Ett alternativ skulle kunna vara att alla produktionsprocesser kombineras till ett enda steg. Integration av flera processer kan vara fördelaktigt då det eliminerar behov av transport och lagring och

förbättrar värmehanteringen. Men integrationen kan även resultera i lägre flexibilitet och snävare konstruktionsbegränsningar än att använda ett större antal steg där varje steg optimeras för sin särskilda funktion [21].

Utöver elektrobränslen bildas även vissa biprodukter såsom syrgas och värme under produktionsstegen från elektricitet till bränsle. Vid elektrolys fås ett överskott på syre som exempelvis kan användas i industriella processer. Värme produceras vid elektrolysen och i bränslesyntesreaktorn, och denna värme kan tas tillvara och användas i ett fjärrvärmenät [18].

### 2.3.1 Elproduktion

Elektricitet är en av de främsta resurser som krävs vid framställning av elektrobränslen. Den krävs huvudsakligen för att framställa vätgas genom elektrolys, vilket är nödvändigt för bränslesyntesen. Dessutom kan elektricitet användas direkt som drivmedel i exempelvis elbilar.

Nästan all förnyelsebar energi har sitt ursprung från instrålning av solenergi, då den omvandlas till ett antal sekundära energiflöden, bland annat vind och vattenströmmar. Förnyelsebar elproduktion går i stort ut på att konvertera dessa energiflöden till elektricitet. Det finns ett flertal olika metoder för att producera förnyelsebar elektricitet varav de mest etablerade är sol-, vind- och vattenkraft [23].

År 2014 producerades elektriciteten främst från fossila bränslen: 5% olja, 39% kol samt 22% naturgas [24]. För att elektrobränslen ska anses vara koldioxidneutrala krävs det även att elektriciteten som används för framställningen är förnyelsebar samt koldioxidneutral. För att det ska uppnås krävs en omställning till att produktionen av elektricitet från förnyelsebara metoder ökar, eftersom denna produktion endast stod för 30% av den totala mängden producerad elektricitet inom EU år 2014. Trots att vind- och solkraft i nuläget bara bidrar med 11% av elproduktionen i EU [25], ser trenderna lovande ut.

Mängden konsumerad vattenkraft har under de senaste åren legat på en stabil nivå, med en ökning på 2% mellan åren 2013 och 2014. Både mängden sol- och vindkraft har globalt ökat markant under de senaste åren. År 2000 låg mängden solkraft på 1 TWh och vindkraft kring 29 TWh, år 2014 låg de på 185 TWh respektive 706 TWh. Ökningen av solkraft mellan åren 2013 och 2014 var 38% och för vindkraft var ökningen 10% [26]. Med undantag för vattenkraft utnyttjas idag bara en liten del av potentialen för förnyelsebar elproduktion. Den fysiska potentialen för solenergi är stor jämfört med dagens elektricitet- och energianvändning, även potentialen för vindkraft är betydande [15].

För att öka produktionen av förnyelsebar energi krävs nya anläggningar och kraftverk. De tekniker för elproduktion som tas upp i denna rapport är vindkraft och solceller. Elproduktion från vind och sol kräver även stora landtytor, företrädesvis på platser med optimala förhållanden. I följande avsnitt behandlas sol- och vindkraft med fokus på resursbehov.

### 2.3.1.1 Vindkraft

Att producera elektricitet med hjälp av vindkraft är ett sätt att ta vara på den kinetiska energin som finns lagrad i vinden. Vinden som passerar vindkraftverket driver en generator som producerar elektricitet [27]. Vindkraftverkets effekt beror på turbinens storlek och vindens hastighet. Dagens turbiner har varierande prestationsförmåga, där landplacerade vindkraftverk (onshore) har kapacitet på upp till 1-2 MW medan de placerade till havs (offshore) har en kapacitet på upp till 3-5 MW [16]. Vindkraftverken har en ungefärlig livslängd på 20-25 år och kan då köras kontinuerligt i upp till 120 000 timmar [27, 28]. 2014 hade de totalt globalt installerade vindkraftverken en kapacitet på cirka 370 GW, och bidrog med 3% av den totala globala elektricitetgenereringen samma år [29, 30].

Vindkraftverk producerar inte elektricitet med maximal kapacitet under hela året eftersom vinden som driver turbinen inte är konstant. Därför krävs det vid beräkningar en faktor som är representativ för den egentliga andelen energi som produceras jämfört med den maximala kapaciteten. För moderna vindkraftverk ligger kapacitetsfaktorn typiskt mellan 20-35%, beroende på hur bra vindförhållanden samt kraftverket är. Högst kapacitetsfaktor nås med vindkraftverk placerade till havs [31].

En storskalig installation av vindkraftverk kräver stora ytor, antingen på land eller till havs, och markanvändningen är därför betydande. Vindkraftverk förekommer ofta i vindkraftparker, där flera vindkraftverk är samlade på ett mindre område. Beroende på tillgänglighet och terräng tar vindkraftverken upp 1-10% av den totala ytan i vindkraftparker [32]. För onshore-vindkraftverk kan marken mellan kraftverken utnyttjas till bland annat jordbruk och betesmarker, eller som områden för vilda djur och växter [33]. Arealen för offshore-vindkraftverk stör inte antropogena behov för markanvändning till samma grad som onshore. Vid tillverkning av offshore-vindkraftverk krävs dock mer material på grund av den påfrestande miljön de placeras i. Detta medför även längre tillverkningstid och högre kostnader [27].

Materialen som krävs för produktionen av vindkraftverk innefattar: stål för tillverkning av torn, maskinhus, rotor, et cetera; stål och armerad betong till fundamentet; aluminium, stål, plast och koppar till maskinhuset samt kol- och glasfiberförstärkt plast till rotorbladen [31]. Kleijn och van der Voet har sammanställt materialbehovet för två typer av vindkraftverk, ett 0,8 MW onshore vindkraftverk samt ett 2 MW offshore vindkraftverk, se tabell 2.1 [16]. Stålet som används till tornet, maskinhuset och rotorn kan i hög grad återvinnas, där 100% återvinningsbarhet teoretiskt är möjligt. Material som betong kan även återvinnas och återbrukas [34].

Utöver dessa material kan även neodym användas till permanentmagneter i växelådor för att öka effektiviteten. Neodymmagneter används ofta på grund av dess egenskap att skapa en hög magnetisk styrka till en mindre vikt än andra permanentmagneter [16]. Neodym har andra användningsområden än permanentmagneter i vindkraftverk. Globalt sett utgör vindkraftverkens förbrukning av neodym endast cirka 4% av den totala användningen [35]. Fastän neodym har lämpliga egenskaper produceras bara ett fåtal av dagens vindkraftverk med permanentmagneter, där majoriteten använder elektromagneter gjorda av koppar och järn [16].

**Tabell 2.1:** Materialbehov för 0.8 MW (onshore) samt 2 MW (offshore) vindkraftverk, baserat på data från Kleijn och van der Voet [16].

Material	800 kW onshore (ton)	2 MW offshore (ton)
Stål	108	296
Aluminium	0.21	0.84
Koppar	1.46	5.5
Bly	-	7.58
Plaster	1.54	4.18
Betong	244.8	2 100
Grus	-	300
Neodym	-	0.3

### 2.3.1.2 Solceller

En solcell är en elektrisk anordning för att framställa elektricitet från solljus. Resultatet blir en låg spänning, vilket är anledningen att solcellerna seriekopplas till solpaneler [36, 37, 38]. Under de senaste åren har utbyggnaden av solceller ökat kraftigt, men de står fortfarande endast för en liten del av den globala produktionen, strax över 1% år 2014 [39]. Likt vindkraft är det en typ av förnyelsebar elproduktion som är möjlig att installera globalt, då det som behövs är sol och en plats för panelen [36, 37, 38]. Då det solljus som når jordens alla platser varierar har en median av världens soltimmarna under ett år tagits, vilket motsvarar en kapacitetsfaktor på strax under 30%.

Solpaneler kan placeras på platser som inte är passande för jordbruk, som till exempel öken, depåer och tak. De behöver alltså inte konkurrera med framställningen av föda [40]. Enligt uppskattningar är endast 10.6% av jordens land brukbar för odling [41], vilket innebär att det finns mycket mark som kan utnyttjas för installationer av solpaneler.

Flera olika typer av solceller har under åren utvecklats och många av dem är under fortsatt utveckling för att minska materialåtgången samt höja effektiviteten. Majoriteten av marknaden består idag av så kallade kristallina kiselceller som antingen är multi- eller mono-kristallina [42]. Multi-kristallina består av en stor och jämnt fördelad yta av kisel, där många korngränser uppstår på grund av storleken och tillverkningssättet. Korngränser är gränsen som separerar områden av materialets kristallstruktur som är riktade åt samma håll, och förekomsten av många korngränser ökar risken för defekter i materialet. Mono-kristallina solceller består istället av flera mindre kisel fyrkanter utlagda över panelens yta, vilket ger färre möjligheter för korngränser och ofta bättre materiella egenskaper men de är även något dyrare [43]. På väg att få allt större marknadsandelar är tunnfilm solceller (9% år 2014 [42]) som baseras på tunna lager av olika sammansatta metaller, exempelvis kadmium och tellur (CdTe), eller koppar, indium, gallium och kisel (CIGS) [40]. Effektiviteten är i vissa fall något lägre [44], men det förutspås en fortsatt god utveckling samt ett

billigare tillverkningspris. Då det finns många olika solceller, där de tekniker som kommer användas under de närmaste hundra åren bara kommer vara spekulationer, riktades arbetet in på de fyra ovannämnda.

I varje solcell finns ett antal olika material som koppar och gummi till kablage, plast till strukturer och glas som skydd för halvledarna. Rapporten bortser från dessa och riktar in sig på de material som bedöms av yttersta vikt för en solcells specifika egenskaper. För mono- och multikristallina solceller är det kisel och silver. Kristallina solceller kräver en stor mängd kisel för sina celler och tyvärr har inga siffror uppdagats, men eftersom kisel är det åttonde vanligaste ämnet i jordskorpan antas det inte vara ett problem [45]. Istället kommer den lilla mängd silver som finns i solcellerna vara ett begränsande ämne innan kisel blir ett problem. Det beräknas att ungefär 22.8 ton silver behövs per installerad GW för båda typerna [46].

För CdTe synas behovet av tellur och kadmium och för CIGS undersöks behovet av indium. För att producera CdTe-solceller behövs mellan 91 och 176 ton tellur per GW [40, 47]. Den mängd kadmium som behövs är mindre och inte mer än 34.2 ton per GW. CIGS-solceller behöver 83 ton indium per GW [48] och tyvärr har ingen data hittats på de resterande materialens storleksordning.

### 2.3.2 Koldioxidinfångning

Koldioxid till elektrobränslen kan komma från många olika källor, till exempel från luft, havsvatten eller diverse industriella processer såsom bibränsleproduktion, förbränning av biomassa och fossila bränslen, ståltillverkning och oljeraffinering. De tekniker som behandlas i denna rapport är koldioxidinfångning från luft och från förbränningsanläggningar.

Koldioxidinfångning från förbränningsanläggningar är något som används kommersiellt i dagsläget och flera stora anläggningar är även under uppbyggnad [49]. Koldioxidhalten vid förbränning ligger ofta mellan 3-15 % [8]. I framtiden kan även koldioxidinfångning från luft bli aktuellt. Fastän koncentrationen av koldioxid är väldigt låg, nämligen runt 0.04 %, kan detta komma att bli en näst intill outtömlig källa till koldioxid [8]. Metoderna är dock inte tillräckligt utvecklade och även för dyra för att användas i större skala i dagsläget, och mer forskning är därför nödvändig.

I scenario 1 och 3 antas all biomassa behövas för uppvärmning. I scenario 2 där bibränslen används, behöver ingen koldioxid samlas in då inga elektrobränslen produceras. Det är därför inte aktuellt att samla in koldioxid från bibränsleproduktion. I framtida scenarier med bibränsleproduktion är det dock möjligt att använda den extra koldioxid som genereras från dessa processer och i vissa fall kan bibränsleproduktion ge mycket rena koldioxidflöden. Anledningen till att koldioxidinfångning från havsvatten inte tas med är att det finns relativt lite forskning på området, och därför gjordes bedömningen att osäkerheterna är för stora för att inkludera tekniken i denna rapport.

För att uppnå ett koldioxidneutralt framtida samhälle, där konstgjord koldioxidinfångning direkt från luften inte än är möjligt att realisera i stor skala, och där

fordonsflottan till viss del kommer vara baserad på kolväte, behöver en viss del koldioxid förvaras. Koldioxiden pumpas då ner någon kilometer under marken där den långtidsförvaras. Storleken bör vara av samma mängd som industrier och kraftverk, som inte använder sig av förnyelsebara kolkällor, släpper ut [50].

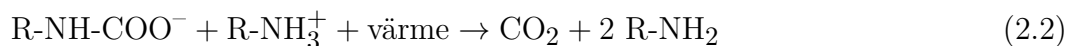
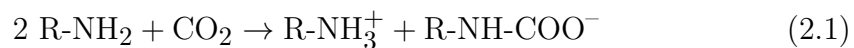
### 2.3.2.1 Koldioxid från förbränning

Det finns tre olika grundsystem vid koldioxidinfångning i samband med förbränning: *pre-combustion infångning*, infångning av koldioxid efter omvandling av kolmonoxid till koldioxid i en syntesgas; *post-combustion infångning*, infångning av koldioxid från de rökgaser som bildas vid förbränning och *oxy-fuel-combustion infångning*, syrgasförbränning vilket huvudsakligen ger en gas av koldioxid och vatten [51]. Pre-combustion infångning undersöks inte närmare då de andra två systemen täcker in det efterfrågade behovet. Nedan kommer först post-combustion behandlas, följt av oxy-fuel-combustion.

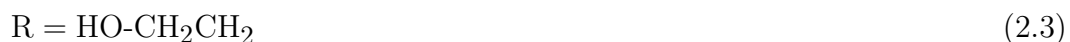
Post-combustion har fördelen, jämfört med de två andra teknikerna, att tekniken kan integreras med existerande förbränningstekniker utan större modifikationer [52]. De kommersiella anläggningar och kraftverk som använder post-combustion fångar in upp till 90 procent av koldioxiden som bildas vid förbränningen [49].

Det finns ett flertal olika tekniker som kan användas vid post-combustion. Den vanligaste använda tekniken är kemisk adsorption. Detta då tekniken tillåter infångning vid låga koldioxidhalter. På grund av sin spridning och kommersiella användning är det denna teknik som undersöks vidare för post-combustion. Den vanligaste använda lösningen i kommersiella anläggningar är MEA (monoethanolamine), en relativt billig lösning samt kommersiellt tillgänglig och bevisad teknik [53]. Andra aminer och kemiska lösningar som är effektivare förekommer, dessa kommer dock inte undersökas närmare då de är under utvecklingsfasen.

Den allmänna reaktionen för koldioxidseparation med MEA som lösning beskrivs enligt följande [53]:



där



Det har funnits att den termiska energiåtgången vid användning av 30 vikt-% MEA ligger mellan 3200 till 5500 kJ/kg CO<sub>2</sub> [54], detta medför en minskad effektivitet för förbränningsanläggningen.

Ett flertal olika stödmaterial kan användas till reaktionen, där en låg kostnad och kommersiell tillgänglighet är eftersökt. Material som TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, FeOOH och TiO(OH)<sub>2</sub> uppfyller dessa krav [55]. Även material som ammoniak (NH<sub>3</sub>), natriumhydroxid (NaOH), kalksten och kalciumoxid används vid reaktionen. Då åtgången av lösning är låg, eftersom denna återanvänds till hög grad, samt att många valmöjligheter till de olika stödmaterialen finns [56], så ses inga hot om resursbegränsningar för material.

Oxy-fuel-combustion fungerar ungefär som post-combustion då koldioxiden i båda fallen fångas in efter förbränningen. Däremot behövs ingen avskiljningsprocess vid oxy-fuel-combustion då bränslet förbränns i ren syrgas, vilket gör att rökgaserna nästan uteslutande blir till koldioxid. Den lilla mängden kvarvarande vatten ångas bort och kvar blir då nästintill ren koldioxid som användas till bränsleproduktion eller sparas för långtidsförvaring. Nedan syns en mycket förenklad kemisk modell för hur förbränningen fungerar, där bränslet generaliserats till rent kol.



Tekniken är kommersiellt gångbar och ett effektivt sätt att samla in koldioxid [57]. Upp till 95% av koldioxiden kan samlas in, men den samlade effektiviteten för kraftverket sjunker 7-11% på grund av den energikrävande processen att framställa rent syre från luft [57, 58].

Det finns flera tillvägagångssätt för att framställa syrgas, som till exempel Cryogenic Distillation processer, där luft kyls ner till väldigt låga temperaturer och eftersom de ingående gaserna har varierande kokpunkt kan de silas bort i flytande fas vid olika temperaturer. För att kyla ned till så låga temperaturer kan potentiellt vätgas användas som kylmedel. Då Cryogenic Distillation är en etablerad process baserad på grundläggande tekniska redskap: isolering, ventiler och rör [59], vilka består av material som inte antas vara begränsande, är det även den enda process för framställning av syre som tas upp i rapporten.

Då framställning av syrgas, förbränning i syrgas och en viss modifiering till pannan är det enda som skiljer oxy-fuel-combustion från den etablerade förbränningspannan [57] kommer processen antagligen inte stå under hot från några resursbegränsningar.

### 2.3.2.2 Koldioxidinfångning från luft

Direct Air Capture (DAC) är en framväxande teknik för industriell extraktion av koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) från atmosfärisk luft [60]. DAC undviker de flesta resursbegränsningar men har ett högt behov av energi. Tekniken har stor fysisk potential men uppskattas vara mycket ekonomiskt kostsam på grund av det höga energibehovet [61]. Det finns inga kommersiella DAC-anläggningar i dagsläget, men ett antal nystartade företag har tagit fram prototyper. Air Fuel Synthesis byggde år 2012 en demonstrationsanläggning som producerar 5-10 liter syntetiska bränslen per dag från luftinfångad koldioxid. Air capture är i tidigt utvecklingsstadium och mer forskning behövs för att optimera tekniken [8].

Om koldioxid för elektrobränsleproduktion hämtas direkt från luften säkerställer detta att samma mängd som släpps ut vid förbränning kan fångas in, och då fås inget nettoutsläpp av koldioxid. DAC kan även vara ett viktigt redskap för att hantera emissioner som inte kommer från förbränning, eller som är svåra att eliminera vid källan [62]. På grund av den låga koldioxidkoncentrationen i luften är denna teknik svårare och dyrare än infångning från stationära källor [60]. Koncentrationen i luften är endast 400 ppm, och rent teoretiskt krävs 1,8 - 3,4 gånger mer energi för att samla

in koldioxid på detta sätt jämfört med separering från rökgaser [63]. En skillnad mellan DAC och övriga infångningstekniker är dock att systemet inte behöver fånga in all koldioxid från gasen, utan istället kan optimeras för att processen ska bli så energieffektiv som möjligt [9].

Extraktion av koldioxid från luft sker i två steg, infångning och regenerering. Infångningen görs med hjälp av kemikalier som binder till koldioxid, men inte till andra atmosfäriska ämnen. När luften passerar kemikalierna fastnar koldioxiden. Regenereringen sker sedan genom att energi tillsätts för att frigöra koldioxiden så att den kan tas tillvara på [64]. De kemikalier som används är ofta basiska ämnen som fungerar genom kemisk adsorption eller absorption [9]. Starka baser såsom natriumhydroxid (NaOH), kaliumhydroxid (KOH) och kalciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) är effektiva, men regenereringen av dessa baser är en energikrävande process. Andra alternativa material som är mer effektiva är under utveckling [8]. För att systemet ska bli effektivt krävs att adsorbenten/absorbenten har hög upptagningsförmåga samtidigt som den har låg bindningsenergi vilket ställer höga krav på materialet [9].

Den del av processen som är mest energikrävande är regenereringen, och energitillförseln sker vanligen i form av värme eller elektricitet. För att få 100% ren koldioxid vid maximal effektivitet krävs teoretiskt sett 497 kJ för 1 kg koldioxid [64], vilket motsvarar cirka 21.87 kJ/mol. I de försök som gjorts samt i modellberäkningar varierar energibehovet för DAC mellan 400 och 700 kJ/mol [9, 21]. Nyligen har en process med solid adsorbent utvecklats som avsevärt minskat energibehovet och kostnaden för processen. Denna process har uppskattats behöva endast 50 kJ per mol koldioxid [21]. Vad gäller termodynamisk effektivitet anger Goeppert en effektivitet på 45% [63] medan Lackner föreslår 50% [65]. Andra metoder för luftinfångning har dock mycket lägre effektiviteter på omkring 10%.

Enligt Goeppert bör markanvändning för koldioxidinfångning från luft inte ses som en begränsande faktor [63]. Då anläggningarna inte behöver placeras på platser med goda vind- och väderförhållanden kommer de förmodligen inte konkurrera med vind eller solkraft. Till skillnad från koldioxidinfångning från förbränning av biomassa finns inget behov av jordbruksmark [64]. Det uppskattas att det kommer att krävas 50 kvadratmeter yta för att fånga in ett ton koldioxid per dag [65]. Tillgången på rent vatten kan dock vara en begränsande resurs vid storskalig infångning av koldioxid. I tidiga prototyper är avdunstningen upp emot 90 ton vatten per ton koldioxid, vilket motsvarar ca 20 liter vatten per liter bensin [9]. Detta kan sättas i relation till produktion av bensin från råolja, som kräver mellan 2.8 och 6.6 liter vatten per liter bensin [6]. För vissa infångningstekniker är vattenanvändningen lägre, ca 2 liter vatten per liter bensin [9], vilket kan ses som en mer optimistisk uppskattning.

Som nämnts tidigare är basiska material, som exempelvis metallhydroxider, de adsorbenter som är vanligast. Dessa löses i vatten och bildar karbonater med hög bindningsenergi till koldioxid. De adsorbenter som används är ofta zeoliter, en grupp aluminiumsilikater. Fördelen med dessa är den höga adsorptionsförmågan vid låga temperaturer. Vattenlösta adsorbenter är mer energikrävande än fasta adsorbenter, men adsorbenter har låg upptagningsförmåga vid låg koncentration. Adsorbenterna och absorbenterna åldras snabbt och livslängden blir därför begränsad [9].

Keith et al. [66] har tagit fram ett exempel för att illustrera ett DAC-system baserat på en absorbent av natriumhydroxid (NaOH). Systemet kan beskrivas förenklat enligt följande: koldioxid fångas i en NaOH-lösning som sprayas genom luften i ett slags kyltorn, där den absorberar CO<sub>2</sub> från luften och bildar en lösning av natriumkarbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Sedan regenereras Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> till NaOH genom tillsats av kalksten (CaO), vilket bildar CaCO<sub>3</sub>. CaCO<sub>3</sub> regenereras i sin tur till CaO och CO<sub>2</sub> genom energitillförsel via en process som kallas kalcinering. Ett sådant system har fördelen att alla ingående kemikalier, det vill säga NaOH och CaO, är billiga och finns i riklig tillgång [66]. Detta innebär att DAC bör kunna användas i stor skala utan risk för materialbegränsningar.

### 2.3.3 Elektrolys

Vätgas (H<sub>2</sub>) är en energibärare precis som elektricitet, men kan användas för att lagra, transportera och tillhandahålla energi. Flexibiliteten är stor eftersom vätgas kan produceras från flera typer av energikällor [67]. Vätgas kan även användas direkt som energi i bränsleceller och genererar då endast vattenånga som restprodukt. Det finns olika metoder för produktion av vätgas [68], men denna rapport kommer att fokusera på framställning av vätgas genom elektrolys. Det vanligaste sättet att producera vätgas är idag genom ångreformerings av naturgas [18].

Elektrolys är en teknik som innebär att elektrisk energi används för att driva en annars icke-spontan kemisk reaktion (redox-reaktion). Reaktionen sker i en gemensam elektrolytlösning, det vill säga en lösning av joner som kan leda ström. Ström tillförs via speciella elektronledare, så kallade elektroder. Vid den negativt laddade elektroden (katoden) sker en reduktion då positivt laddade joner mottar elektroner från katodens yta. Vid den positiva elektroden (anoden) sker på motsvarande sätt en oxidation genom att de negativt laddade jonerna lämnar ifrån sig elektroner [69]. Vid produktion av elektrobränslen innebär elektrolys användning av elektricitet för att splittra upp vattenmolekyler i sina beståndsdelar, väte och syre. Den vätgas som bildas kan då tas tillvara på och transporteras vidare för användning vid bränslesyntes.

Den allmänna reaktionen för vätgaselektrolys kan skrivas enligt [68]:



Rapporten kommer att behandla tre typer av elektrolysörer för vätgasproduktion: alkaliska, proton exchange membrane (PEM) och solid oxide electrolysis cell (SOEC). Dessa tre metoder kommer att analyseras mer ingående i kommande avsnitt. Teknikerna kan särskiljas baserat på driftstemperatur och vilken typ av elektrolyt som används. Alkaliska elektrolysörer använder sig av en flytande elektrolyt medan PEM och SOEC har en fast. För SOEC sker reaktionen vid förhöjd temperatur till skillnad från alkaliska och PEM som används vid lägre temperaturer. Verkningsgraden från elektricitet till vätgas beror främst på elektrolyscellens totala resistans, det vill säga den strömbegränsande förmågan hos cellen. Utöver detta underlättar höga temperaturer sönderdelning av vatten, vilket medför att högre temperaturer ger högre verkningsgrader [22].

Vid alla typer av elektrolys krävs en mängd färskvatten. Tillgången på rent vatten beror framförallt på geografiska förhållanden. I vissa fall kan det vara nödvändigt att koppla samman vätgasproduktionen med destillationsanläggningar för att säkra tillgången på vatten. Trots att destillationsprocessen har blivit mer effektiv de senaste åren kräver processen en viss mängd tillförd energi, vilket ökar hela vätgasproduktionens energibehov [16].

### 2.3.3.1 Alkalisk elektrolys

Alkaliska elektrolysörer är vanligast eftersom de varit kommersialiserade i många år. En typisk alkalisk elektrolysanordning består av en anod, katod, energikälla samt en elektrolytlösning. Vid elektrolys används energikällan för att driva elektroner genom elektrolytlösningen, och vid katoden förbrukas sen elektroner för att bilda vätgas. För att upprätthålla spänningen i lösningen diffunderar hydroxidjoner ur elektrolytlösningen till anoden, där elektroner frigörs för att återgå till den positiva polen i energikällan [70].

Alkalisk elektrolys sker normalt vid  $70^{\circ}\text{C}$ , eftersom högre temperatur leder till risk för ångbildning vilket resulterar i sämre konduktivitet och ökad resistans hos elektrolyscellen [22]. Alkaliska elektrolysörer har god hållbarhet med en typisk livslängd på 10-20 år [21].

Kommersiella alkaliska elektrolytanordningar har en verkningsgrad mellan 47-82% beräknat som förhållandet mellan det högre värmevärdet för väte ( $3.54 \text{ kW/Nm}^3$ ) och den specifika energiförbrukningen. Flertalet anläggningar har höga produktionsnivåer som ligger mellan  $500\text{-}760 \text{ Nm}^3/\text{h}$  producerad vätgas. Dessa volymer motsvarar en energiåtgång på 2150 - 3534 kW [71].

Storskaliga alkaliska elektrolysörer är tillverkade av rostfritt stål; plast; materialen som ingår i membranen och elektroderna; samt en elektrolyslösning. Det finns bristande information tillgänglig gällande kvantiteter av materialanvändning till membranen och elektroderna.

Kaliumhydroxid (KOH) och natriumhydroxid (NaOH) är de vanligast använda elektrolytlösningarna. Båda är bulkkemikalier och mängden som kommer används inom elektrolys kommer vara liten jämfört med den globala totalförbrukningen [16]. Membranen är tillverkade av organiska polymerer så som Nafion och polybenzimidazol, vilket är material som inte kommer vara begränsade. Nickel (Ni) och koppar (Cu) är de främst använda materialen för anoden samt att katoden är tillverkad av nickel överdraget med platina (Pt) [16, 70, 72]. Eftersom det inte finns tillräckligt med data att tillgå gällande mängden material är det svårt att uppskatta om det kommer att uppstå en begränsning.

För att underlätta reaktionen krävs närvaro av katalysatorer. Den vanligast förekommande katalysatorn vid anoden tillverkas av kobolt (Co) och mängden som krävs är cirka  $6.2 \text{ mg/cm}^2$ . Vid antagande av en elektrisk strömthet på  $0.3 \text{ mA/cm}^2$  och en potential på 1.7 V krävs 8.9 mg kobolt per watt [73].

### 2.3.3.2 PEM-elektrolys

Proton exchange membrane (PEM) är en teknik för elektrolys av vatten i en cell med fast polymerelektrolyt. Kommersiella PEM-elektrolysörer finns tillgängliga, men tekniken är än så länge anpassad för vätgasproduktion i mindre skala. De har även höga investeringskostnader då de använder ädelmetaller som katalysatorer, samt har mycket kortare livslängd än de andra metoderna. De är pålitliga men har till skillnad från de alkaliska inte tillräckligt stor kapacitet för att producera energi i betydande hastigheter [71]. Däremot kan PEM användas vid högre strömtätheter, vilket sänker operationskostnaderna, och de är även fördelaktiga för att få ut så ren vätgas som möjligt [74]. Kommersiella PEM-elektrolysörer har en verkningsgrad på cirka 50-65% baserat på högre värmevärdet [71].

Inom PEM-elektrolys används ett så kallat CCM (Catalyst Coated Membrane) som elektrolyt. Elektrolyten består alltså av ett fast membran, med en ungefärlig tjocklek på 100  $\mu\text{m}$ , av sulfatpolymerer, vanligtvis Nafion [74, 75]. Detta täcks på vardera sidan av ett lager katalysator. På anodsidan är katalysatorn oftast baserad på antingen iridium (Ir) eller rutenium (Ru), eftersom de har högst aktivitet, och på katodsidan används främst platina [74]. Elektrolyten och elektroderna har i dagsläget en livslängd på cirka 5-10 år [22]. Mängden katalysator i kommersiella reaktorer är ca 2  $\text{mg}/\text{cm}^2$  på anodsidan och 1  $\text{mg}/\text{cm}^2$  på katodsidan. Elektrodernas strömavtagare består av 0,8-2 mm tjocka lager av titanpulver (Ti). Vid PEM-elektrolys används även separatorplattor som vattnet färdas genom för att nå strömavtagarna. Dessa kan bestå av titan, grafit eller rostfritt stål. Stål är det billigaste och mest tillgängliga alternativet, men eftersom det korroderar snabbt krävs då en beläggning för att få en rimlig livslängd. Kommerciellt är titan vanligast [74] och i rapporten antas det användas i alla PEM-elektrolysörer.

### 2.3.3.3 SOEC

En solid oxide electrolyser cell (SOEC) är en typ av elektrolysör som använder sig av en fastoxidelektrolyt för att uppnå elektrolys av vatten och därigenom bilda vätgas. SOEC har möjlig tillämpning i bränsleproduktion, återvinning av koldioxid och kemisk syntes. Här fokuseras på användning av SOEC vid vätgasproduktion, men tekniken kan även användas för att producera syntesgas genom elektrolys av vattenånga och koldioxid [76]. SOEC är mycket lik en solid oxide fuel cell (SOFC) som körs i regenerativt läge, med liknande driftförhållanden, material och geometrisk konfiguration [77].

Högtemperatur-SOEC har stor potential för effektiv och ekonomisk produktion av vätgas [78], och har attraherat stort intresse på senare år eftersom det ger betydande effektivitetsfördelar jämfört med konventionell lågtemperaturolektrolys [79]. SOEC är mer effektiv och potentiellt billigare än alkaliska elektrolysörer och PEM. På lång sikt verkar alltså SOEC vara den mest lovande elektrolystekniken. Tekniken har dock ännu inte kommersialiserats, men en pilotanläggning invigdes i slutet av 2014 [80]. Högtemperatur-SOEC förväntas träda in på marknaden innan år 2020 [8]. Att kapitalkostnaderna är låga beror främst på att inga dyra och ovanliga material krävs [9].

SOEC används vid temperaturer som möjliggör högttemperaturelektrolys [81], vilket typiskt sker mellan 500 och 850°C. Då värme tillsätts utifrån minskar den mängd elektricitet som krävs. Elektrolys av vatten vid 25°C kräver 285.83 kJ [77], och reaktionen blir allt mer endotermisk då temperaturen ökar. Men energibehovet reduceras vid högre temperaturer på grund av Joule-uppvärmning, vilket kan utnyttjas vid klyvningsprocessen för vattenmolekylerna [79]. En nackdel med hög driftstemperatur är att det resulterar i långa uppstartstider. Den höga temperaturen leder också till mekaniska kompatibilitetsproblem, som exempelvis termisk expansion, och kemiska stabilitetsproblem, såsom diffusion mellan skikt av material i cellen [82]. SOEC lider fortfarande av hög nedbrytningshastighet och cellens hållbarhet behöver förbättras. Det är livslängden som är den största utmaningen för att SOEC effektivt ska kunna spridas i energisystemet [20].

Den förväntade verkningsgraden för SOEC ligger omkring 80-90% baserat på högre värmevärde (HHV) [8]. En el- till vätgas omvandlingseffektivitet på över 100% kan till och med vara möjlig på grund av värmeförlusten [83]. Detta förutsätter dock tillgång på högvärdig värme, exempelvis spillvärme från adiabatiska katalysreaktorer för metanisering [22].

SOFC-komponenter kan fabriceras från lättillgängliga keramiska material, och kan på så sätt undvika användning av värdefulla ädelmetaller [84]. Precis som för SOFC är dopat zirkonium det mest använda materialet i SOEC-applikationer [79]. SOEC består av en bränseelektrod (katod), en syreelektrod (anod) och en fastoxidelektrolyt. Det vanligaste elektrolytmaterialet är en jonledare bestående av yttriumstabiliserat zirkonium (YSZ), det vill säga  $ZrO_2$  dopat med 8 mol-%  $Y_2O_3$ . Zirkoniumdioxid används på grund av dess höga styrka, smälttemperatur (ca 2700°C) och utmärkta korrosionsbeständighet. För bränseelektroden är det mest använda materialet porös cement bestående av nickel (Ni) och YSZ. Slutligen är lantan-strontium-manganat (LSM) det vanligaste syreelektrodmaterialet [79]. Trots att LSM är vanligast, kan andra material såsom LSF-YSZ vara bättre val och behöver studeras närmare [78]. Sammanfattningsvis används alltså zirkonium, yttrium, nickel, lantan, strontium och mangan.

### 2.3.4 Bränslesyntes

Bränslesyntesen är det sista steget i produktionen av elektrobränslen. Den innebär att en blandning av väte, koldioxid och kolmonoxid, så kallad syntesgas, omvandlas med hjälp av katalysatorer till ett bränsle. Vilken katalysator som används beror på vilket bränsle som ska produceras [19, 20]. En katalysator är ett ämne som utan att själv förbrukas ökar den kemiska reaktionshastigheten. Detta sker genom att katalysatorn öppnar en ny reaktionsväg med lägre aktiveringsenergi, vilket innebär att reaktionen kan ske vid lägre temperatur och tryck [85]. I praktiken kan katalysatorämnena förbrukas i sekundära processer och måste då till slut bytas ut, vilket innebär att de blir intressanta ur ett resursperspektiv. På grund av de unika egenskaperna är materialen som används i katalysatorer ofta ovanliga övergångsmetaller, exempelvis platina, rutenium och iridium [86].

Det är möjligt att producera en stor mängd olika bränslen, men denna rapport fokuserar på metanol, metan, bensen och diesel. Dessa bränslen har valts då de både är vanligt förekommande i transportsektorn och kan produceras med välutvecklad teknik. De flesta alternativen innebär användning av redan etablerade tekniker för produktion av syntetiska bränslen, framför allt metanolsyntes (metanol), Sabatierreaktionen (metan) och Fischer-Tropschprocessen (bensen och diesel) [9]. Dessa tre tekniker kommer behandlas i följande kapitel.

### 2.3.4.1 Metanolsyntes

Metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) är den enklaste typen av alkohol och är en lätt, färglös och brännbar vätska som bland annat kan användas som bränsle. Metanolsyntes är den industriella process där syntesgas förs genom en katalysator och koldioxid, kolmonoxid och väte reagerar för att bilda metanol. Som biprodukt fås vatten och beroende på hur ren syntesgasen är kan andra ämnen bildas, vilket är något som tas hänsyn till med en omvandlingskoefficient. Följande förenklade stökiometriska ekvation visar huvudförloppet för reaktionen:



Metanolreaktionen är exotermisk, vilket innebär att energi avges i form av värme. Processen kan ske under ett högre tryck på 25-35 MPa och 300-450°C, dock är det vanligare att det sker under lägre tryck och temperatur. Denna så kallade lågtrycks-metanolsyntes sker vid ett tryck på 5-10 MPa och en temperatur på 220-230°C [87]. Omvandlingsfaktorn i processen blir då hög och har ett genomsnittligt värde på 95%, där de sista fem procenten blir till andra gaser som tvättas bort och behandlas för att kunna tas om hand i andra områden [88].

Katalysatorns livslängd i reaktorn är i snitt 5 år [89, 90, 91, 92], och när den är uttjänad samlas den in och smälts ner för att bevara metallen, alltså görs inget försök till att återanvända samma katalysator då det är för kostsamt att återställa de kopparkristaller som behövs för full effektivitet i processen [93]. Större delen av katalysatorerna baseras på en viss del koppar (Cu), efter det följer olika stora delar av en till tre andra ämnen. De vanligaste är: zink (Zn), aluminium (Al), zirkonium (Zr) och krom (Cr) [87]. Då det finns en mängd olika sammansättningar av katalysatorer med varierande verkningsgrad, presenteras nedan i tabell 2.2 ett fåtal, där den effektivaste används för beräkningarna. Alltså producerar en volymenhet katalysator 1.190 volymenheter metanol under en timmes produktion [87].

**Tabell 2.2:** Ingående material, sammansättning och metanolproduktion för tre olika katalysatorer, baserat på data från Asinger [87].

Material	Vikt-%	$\text{kg}_{\text{MeOH}}/\text{dm}_{\text{kat}}^3$
Cu-Zn-Cr-Al	30:50:16:3	1
Cu-Zn-Al	65.2:23.8:11	0.82
Cu-Zn-Al	65:27:10	1.19

### 2.3.4.2 Fischer-Tropschprocessen

Fischer-Tropschprocessen (FT-processen) har varit känd sedan 1920-talet och av de bränslen som undersöks i detta projekt används den framförallt till produktion av bensin och diesel. Den allmänna kemiska reaktionen är följande [94]:



Parallellt kan vatten-gas-skiftreaktionen (WGS) ske:



Eftersom det är CO som reagerar i FT-processen och CO<sub>2</sub> som ska utnyttjas är den omvända vatten-gas-skiftreaktionen (RWGS) nödvändig [95].

Från processen erhålls alltid en blandning av olika produkter bestående av kolväten [-CH<sub>2</sub>-] med varierande mängd kolatomer, koldioxid, vatten och syrehaltiga biprodukter. Önskade produkter såsom bensin (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>), diesel (C<sub>11</sub>-C<sub>18</sub>) och vax (C<sub>19</sub>+) separeras sedan ut från blandningen [94].

Processen kan ske antingen vid hög eller låg temperatur och kallas då för en HTFT-respektive LTFT-process (High respektive Low Temperature Fischer-Tropsch). HTFT-processen sker vid 320-350°C och är att föredra för framställning av bensin eftersom omvandlingskapaciteten är högre för den typen av reaktor samt att selektiviteten för bensin är större [96]. För denna typ av process används reaktorer med fast eller cirkulerande fluidiserad bädd [94]. Reaktorerna beskrivs närmare av exempelvis Steynberg et al. [97]. För att maximera framställning av diesel används med fördel LTFT-processen som sker vid 200-250°C i antingen en multitubulär fastbäddsreaktor eller en så kallad Slurry Phase-reaktor. I dessa reaktorer kan vax produceras med hög selektivitet och sedan utsättas för hydrocrackning och isomerisering, där man bryter upp de längre kolvätena till önskad storlek. På detta sätt kan man få ut över 60 vikt-% dieselbränsle [94, 13].

Katalysatorer för FT-processen kan baseras på kobolt (Co), järn (Fe), nickel (Ni) eller rutenium (Ru). Nickel producerar dock en oönskad mängd metan vid de flesta driftförhållanden och rutenium är cirka 50 000 gånger dyrare än järn, varför dessa inte används i industrin. Man brukar även använda sig av så kallade supporters och promoters. Supporters är det material som katalysatorn är fäst vid, vanligtvis fast med stor ytarea. Promoters har inga egna katalytiska egenskaper men ökar aktiviteten hos katalysatorn och förbättrar dess hållfasthet. Som supporters i FT-processen används oxider av kisel (Si), titan (Ti), aluminium (Al) eller magnesium (Mg), aktivt kol (C) eller zeoliter. Som promoters kan man använda oxider av exempelvis koppar (Cu), kalium (K), torium (Th) och lantan (La), eller olika ädelmetaller som platina (Pt) och iridium (Ir) [98]. För vatten-gas-skiftreaktionen används Cu-baserade katalysatorer, främst Cu/ZnO, eller cerium (Ce). Cu/ZnO-katalysatorer kan modifieras med oxider av aluminium, titan, kisel eller zirkonium (Zr). Eftersom reaktionen är reversibel är katalysatorer för WGS-reaktionen även aktiva i den omvända reaktionen [95].

Vid HTFT-processer används uteslutande järnbaserade katalysatorer i kommersiella reaktorer [94]. Katalysatorerna för LTFT-processer kan vara baserade på antingen

kobolt eller järn. Kobolt har flera fördelar såsom högre aktivitet och livslängd - katalysatorn håller cirka 5 år genom återanvändning [99]. Kostnaden är dock ca 1000 gånger högre för kobolt än järn [98]. Kobolt har även en mycket lägre vatten-gas-skift-aktivitet vilket innebär att förhållandet mellan  $H_2$  och CO och i (2.8) behöver vara omkring 2.15:1 för att säkerställa en hög omvandling. Med järn som katalysator har reaktionerna en total omvandlingskvot på ca 1.7 omkring 230°C vilket kräver förhållandet 1.7:1 i den ingående syntesgasen för en hög omvandling [100].

Information om materialsammansättningen hos kommersiella katalysatorer samt mängden katalysator som krävs för att framställa en viss mängd bränslen är svåråtkomlig. Det finns många olika alternativ till sammansättningar [101], vilket även gör det svårt att dra generella slutsatser kring vilka material som är mest fördelaktiga och kan komma att användas i större utsträckning i framtiden. Dock finns flera experiment inom området som kan antas vara representativa för processen gällande storleksordning på åtgången av viktiga material. Ett sådant experiment presenteras av Ernst et al. [102] och undersöker effekter av olika sammansättningar och förbehandlingsav koboltbaserade katalysatorer med kiseloxid som supportorer ( $Co/SiO_2$ ). Kobolt är fördelaktigt vid framställning av längre kolväten, framförallt med  $SiO_2$  eller  $Al_2O_3$  som supportorer. Detta experiment har valts som underlag för beräkningar eftersom det innehåller tillräckligt med data för att kunna uppskatta mängden material som kan gå åt vid en uppskalning.

Experimentet utförs i en slurry phase reactor vid temperaturen 164°C, trycket 2 MPa och förhållandet 2:1 mellan  $H_2$  och CO. Inflödet i reaktorn hålls vid 2 liter syntesgas per timme och gram katalysator. Högst selektivitet för längre kolväten fås för katalysatorn med 64.4 vikt-% Co och 5.1 vikt-% Si. Aktiviteten uppgår för denna sammansättning till  $20.7 \cdot 10^{-3}$  mol omvandlad CO per timme och gram katalysator och selektiviteten för  $C_{10}$ - $C_{20}$  kolväten motsvarar efter hydrokrackning ca 70% [102].

Uppskattningar av katalysatormängd för RWGS-reaktionen har baserats på en artikel om bland annat aktivitet för WGS-reaktionen över Cu-Zn-Al-katalysatorer. Med en sammansättning av katalysatorn på 42.6 vikt-% Cu, 43.7 vikt-% Zn och 13.7 vikt-% Al fås en aktivitet på cirka 0.55 omvandlade mol CO per timme och gram Cu [103]. I denna rapport har dessa värden antagits gälla även för RWGS-reaktionen. I den omvända reaktionen (2.9) krävs även ytterligare tillförsel av vätgas. I denna reaktion antas omvandlingseffektiviteten 95%, vilket ger förhållandet 1:0.95 mellan  $H_2$  och CO.

### 2.3.4.3 Sabatier-reaktionen

Metan är det enklaste kolvätet med den kemiska formeln  $CH_4$  och en energidensitet på 55.5 MJ/kg [104]. Det kan användas som bränsle och är den största beståndsdelen i naturgas och biogas. Naturgas består av 70-90% metan och bidrar till stora växthusgasutsläpp vid förbränning [105], vilket innebär att den behöver ersättas med förnyelsebara alternativ. Redan under tidigt 1900-tal upptäckte Sabatier och Sendersén hur det på kemisk väg går att framställa metan från vätgas och kolmonoxid/koldioxid [106]. Detta skulle komma att kallas för Sabatier-reaktionen eller metansyntes. Reaktionen kan ske enligt någon av följande kemiska formler:



Att producera syntetisk naturgas (SNG) som ett substitut till naturgas av fossilt ursprung har under de senaste åren utforskats väl. Idag använder majoriteten av de storskaliga anläggningarna biomassa eller kol för att få  $\text{CO}_2$  eller  $\text{CO}$  till reaktionerna [107]. Fördelen med SNG är den höga verkningsgraden, den redan befintliga infrastrukturen kring distribution av gasen och den väl etablerade tekniken för slutanvändningen såsom i CNG-bilar (Compressed Natural Gas), värmeproduktion och kraftverk [108].

Själva Sabatierprocessen drivs vid temperaturer kring 250-400 °C och mellan 1-80 bar. Eftersom reaktionen är exoterm uppnås högst omvandling till metan vid lägre temperaturer. Under reaktionen frigörs cirka 17% av vätgasens energi som värme, vilket begränsar reaktionens verkningsgrad till 83% om inte ytterligare värme tillförs [109].

För att metansyntesen ska kunna genomföras krävs närvaro av katalysatorer. Metaller i grupp 8-10 i det periodiska systemet fungerar väl, där rutenium (Ru) uppvisar högst effektivitet. Dock förekommer nickel-katalysatorer främst bland kommersiella anläggningar på grund av lämplig kombination av pris, aktivitet och selektivitet. Katalysatorn förekommer sällan själv utan ofta krävs supporters för att hålla aktiviteten och selektivitet på önskad nivå. Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), kiseloxid ( $\text{SiO}_2$ ), eller titanoxid ( $\text{TiO}_2$ ) är vanligt förekommande, men  $\text{Al}_2\text{O}_3$  används i majoriteten av fallen [107].

## 2.4 Material

För att beskriva de kvantiteter av olika material som finns i världen används begreppen reserver och resurser. Reserver definieras som den del av en identifierad resurs som ekonomiskt kan utvinna eller produceras och som uppfyller vissa fysiska och kemiska kriterier för nuvarande gruvdrift och produktionsmetoder, som till exempel djup och kvalitet. Resurser definieras som de material i eller på jordskorpan som är naturligt förekommande och som är i sådan form och storlek att en ekonomisk utvinning är möjlig eller potentiellt möjlig [110]. Slutligen definieras produktionen eller utvinningshastigheten som den mängd material som utvinns under ett år. I tabell 2.3 presenteras reserver, resurser och utvinningshastighet för majoriteten av de material som förekommer i rapporten.

Det är svårt att avgöra om uppskalning av olika tekniker kommer stå för några resursbegränsningar även när det finns siffror på hur mycket av materialen som finns i världen. Storleken på reserverna är uppskattade beräkningar och det är svårt att veta i vilken grad och inom vilka områden resurserna kommer att användas. Ännu ett problem som kan spela in är när utvinningshastigheten av materialen inte är tillräckligt hög för att den tänkta uppskalningen ska kunna äga rum inom de satta tidsramarna.

Allt eftersom reserverna blir mindre på grund av globalt ökad efterfrågan [111], kommer sannolikt en ökning av priset på metallerna att ske. Detta kommer troligtvis innebära att reserverna definieras om och en mängd från resurserna blir teknoeconomiskt att bryta, vilket i sin tur gör att storleken på reserverna förändras. Fastän återvinningsgraden av flera material ökar, kommer nya gruvor behöva hittas och utvecklas för att kunna tillfredsställa den ökade efterfrågan på metaller [112].

Vissa material har blivit utsedda som kritiska material. På grund av den rörliga globala marknaden, utvecklingen av nya tekniker samt upptäckten av nya tillgångar, kommer antagligen vissa av dessa material bytas ut och fler tillkomma [113]. Detta medför att det är svårt att göra framtidsanalyser över hur efterfrågan ser ut, samt hur stora tillgångar som kommer finnas.

Vanligt förekommande metaller i tekniska applikationer är sällsynta jordartsmetaller (REM), såsom neodym, yttrium och lantan. 97% av den globala tillgången på REM produceras av Kina. Att majoriteten av produktionen av vissa metaller är centrerat till ett visst område kan medföra komplikationer, exempelvis har Kina minskat sin export, vilket har medfört att priserna har ökat. Problem uppstår då eftersom REM ofta saknar likvärdiga substitut och har låg återvinningsgrad. Att den globala efterfrågan på dessa material har ökat, och förutsägs öka mellan 10 till 20% varje år framöver, har medfört en drastisk minskning av tillgångarna [114]. Detta kan leda till att begränsningar för en framtida fordonsflotta med dagens tekniker uppstår.

De vanliga katalysatormaterialen platina, iridium och rutenium är alla så kallade platinametaller, och utvinns gemensamt från malm. Baserat på en tabell över hur stora mängder av vardera platinametall som bröts 2010 [115], har andelarna av respektive ämne beräknats och antas i rapporten gälla för alla resurser av platinametaller. Det finns olika modeller för att räkna ut den framtida brytningshastigheten av platinametaller, vilket återkommer längre fram i rapporten, kapitel 3.2.2. Den ena modellen antar att världens totala resurser uppgår till 90 700 ton platinametaller, medan den andra modellen antar 338 400 ton i resurser [115]. I denna rapport tas ett medelvärde av dessa, och de beräknade andelarna har använts för att bestämma resurserna av iridium och platina (appendix G, vilka presenteras i tabell 2.3.

## 2. Elektrobränslen

---

**Tabell 2.3:** Sammanställning av reserver, resurser och produktion/utvinningshastighet av de material som undersöks i resultatet. Siffrorna är baserade på United States Geological Survey (USGS) rapport [110], om inget annat anges. Produktionen är baserad på uppskattade volymer 2015 om inget annat anges.

Material	Reserver (ton)	Resurser (ton)	Produktion (ton/år)
Aluminium (Al)	$23.9 \cdot 10^9$	$47-64.1 \cdot 10^9$	$58 \cdot 10^6$
Bly (Pb)	$89 \cdot 10^6$	$> 2 \cdot 10^9$	$4.71 \cdot 10^6$
Indium (In)	49 000 [116]	N/A	755
Iridium (Ir)	N/A	2 150[115]	3 [117]
Järn (Fe)	$85 \cdot 10^9$	$230 \cdot 10^9$	$1.49 \cdot 10^9$
Kadmium (Cd)	500 000 [118]	$5.7 \cdot 10^6$ [119]	24 200
Kisel (Si)	Riklig	Riklig	$8.1 \cdot 10^6$
Kobolt (Co)	$7.1 \cdot 10^6$	$25 \cdot 10^6$	124 000
Koppar (Cu)	$720 \cdot 10^6$	$5.5 \cdot 10^9$	$18.7 \cdot 10^6$
Lantan (La)	$6 \cdot 10^6$ [117]	N/A	12 500 [117]
Neodym (Nd)	$8 \cdot 10^6$ [117]	N/A	N/A
Nickel (Ni)	$79 \cdot 10^6$	$>130 \cdot 10^6$	$2.53 \cdot 10^6$
Platina (Pt)	N/A	77 200[115]	178
Rubidium (Rb)	80 000	N/A	N/A
Rutenium (Ru)	5 000 [117]	N/A	12 [117]
Silver (Ag)	570 000	N/A	27 300
Tellur (Te)	25 000	N/A	220 [117]
Titan (Ti)	N/A	$1.5 \cdot 10^9$	N/A
Yttrium (Y)	540 000 [118]	N/A	8 000 - 10 000
Zink (Zn)	$200 \cdot 10^6$	$1.9 \cdot 10^9$	$13.4 \cdot 10^6$
Zirkonium (Zr)	$67 \cdot 10^6$ [118]	N/A	$1.41 \cdot 10^6$

# 3

## Resultat och beräkningar

I detta avsnitt presenteras den beräknade materialåtgången för produktionsprocesserna, jämförd med de reserver och resurser som finns av materialen. Beräkningar för processtegen; bränslesyntes, elektrolys, koldioxidinfångning och elproduktion presenteras var för sig med fokus på de mest relevanta kombinationerna av olika bränslen och tekniker. Slutligen sammanställs den totala materialåtgången för ett möjligt framtidsscenario. Siffror som används vid beräkningar och inte nämns i detta kapitel har presenterats i respektive teoristycke och mer utförliga beräkningar finns tillgängliga i bilagorna. Beräknade behov av bränsle, vätgas, koldioxid och elektricitet för alla kombinationer av tekniker presenteras i bilaga A. De formler som används för att beräkna dessa behov finns i bilaga B.

### 3.1 Bränslesyntes

De olika typerna av elektrobränslen som undersökts är Fischer-Tropschbränslen (diesel/bensin), metanol och metan. Hur dessa bränslen kan komma att kombineras i den framtida transportsektorn är osäkert. Därför har behovet av katalysatormaterial, vätgas och koldioxid i vardera scenario beräknats för tre olika fall, som innebär att hela elektrobränslebehovet täcks av endast ett bränsle. Beräkningarna utfördes stökiometriskt efter omräkningar av energibehovet till substansmängden som behövs av varje bränsle. Substansmängden beräknades med hjälp av molmassan och det högre värmevärdet, omräknat till energidensitet i J/mol, se bilaga B. Resursbegränsningar har i första hand undersökts med avseende på scenario 3, se tabell 3.1 och figur 3.1, eftersom det innebär den största användningen av elektrobränslen och därmed även elektricitet. Ett antagande om en kapacitetsfaktor på 0.8 har gjorts för alla tekniker.

#### 3.1.1 Metanolsyntes

För processen att producera metanol är det främst materialet i katalysatorn som kan bli begränsande. Beräkningar har gjorts från insamlad data på mängd katalysator som behövs för att producera en liter bränsle under en timme och sedan räknats om till det krav på den årliga produktionen som behövs för att tillfredsställa det maximala bränslebehovet. De siffror som används är hämtade från kapitel 2.3.4.1 och 2.4. För formler och uträkningar se bilaga B och C.1. Alla beräkningar sker med det högre värmevärdet som är 22.9 MJ/kg [120].

Av koppar, zink och aluminium behövs  $6.6 \cdot 10^6$ ,  $2.2 \cdot 10^6$  respektive  $0.30 \cdot 10^6$  ton för att producera 220 EJ om året. De globala reserverna beräknas för dessa ämnen vara mellan  $200 \cdot 10^6$  och  $24 \cdot 10^9$  ton [110]. Alltså är det, utan hänsyn till annan efterfrågan, materialmässigt möjligt att utföra uppskalningen för att i framtiden producera enbart metanol till världens hela fordonsflotta. Utvinningshastigheten för koppar, zink och aluminium är  $18.7 \cdot 10^6$ ,  $13.4 \cdot 10^6$  och  $58 \cdot 10^6$  ton per år [110], vilket är tillräckligt för att inte heller den behöver vara en begränsande faktor till år 2100. Däremot beräknas kopparreserverna som de ser ut idag ta slut redan om 38 år, vilket kan bli ett problem. I tabell 3.1 finns en sammanställning över mängden material som behövs för att de olika bränslesynteserna själva ska kunna producera nog för fordonsflottans maximala behov och i figur 3.1 tydliggörs hur stor andel det motsvarar av världens reserver och resurser.

Livslängden för en katalysator är i genomsnitt 5 år [89, 90, 91, 92], varefter de kan smältas ner för att ta tillvara på metallerna [93]. Ingen data har dock hittats som visar på materialförluster som uppkommer under drift. Det är alltså svårt att uppskatta hur länge den här produktionstakten skulle kunna pågå, då inget system är perfekt.

#### 3.1.2 Fischer-Tropschprocessen

Eftersom FT-bränslen består av olika långa kolväten, och diesel har mellan cirka 10 och 20 kolatomer, så har molekylsammansättningen antagits vara  $C_{15}H_{30}$  för att lättare kunna räkna stökiometriskt. Det högre värmevärdet för FT-diesel är 45.5 MJ/kg [120]. Det beräknade behovet av koldioxid som visas i tabell 3.1 användes för att beräkna katalysatorbehovet enligt appendix C.2 med hjälp av siffror som presenterades i kapitel 2.3.4.2.

Om alla producerade elektrobränslen består av FT-bränslen krävs till själva bränslesyntesens katalysatorer i genomsnitt 438 000 ton kobolt och 106 000 ton kisel per år eller totalt  $2.19 \cdot 10^6$  ton kobolt och 529 000 ton kisel som används samtidigt, se tabell 3.1. Denna mängd kobolt motsvarar cirka 30% av dagens uppskattade reserver vilket syns i figur 3.1. Kobolt skulle därför kunna vara begränsande på sikt även om uppskalningen är möjlig med reserverna som finns i nuläget samt om mer resurser kan utvinnas i framtiden. För mängden kiselreserver har ingen data hittats, men det beräknas finnas stora reserver i förhållande till dagens produktion på  $8.1 \cdot 10^6$  per år [110]. Kisel bör därför inte vara begränsande som katalysatormaterial.

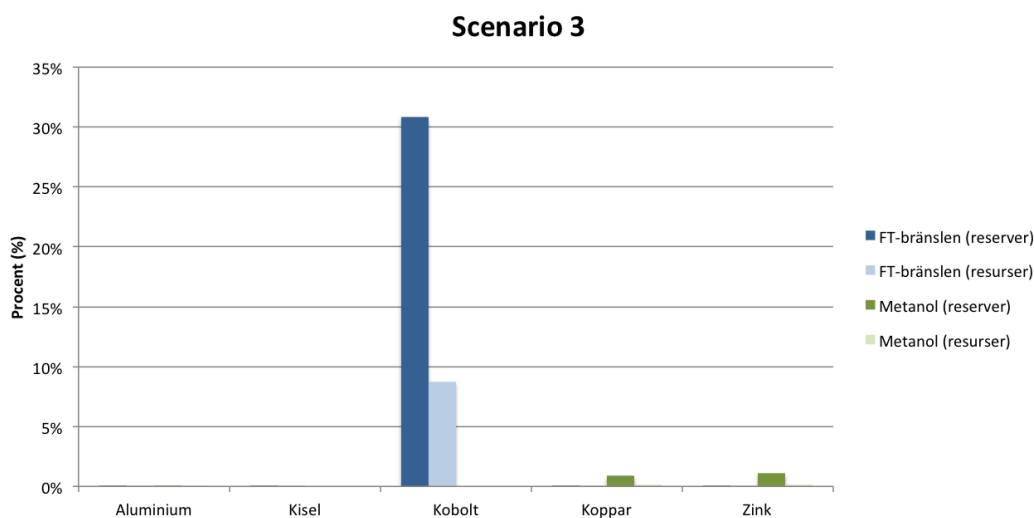
För RWGS-katalysatorer saknas data över livslängd och därför beräknas endast den totala mängden katalysator som krävs för att producera 220 EJ bränsle per år enligt antaganden i kapitel 2.3.4.2. Beräkningarna resulterar i ett materialbehov på omkring 100 000 ton av koppar och zink samt 30 000 ton aluminium, vilket kan jämföras med reserverna i tabell 2.3 som för alla ämnen är av storleksordning  $100 \cdot 10^6$  ton [110]. Detta tyder på att själva syntesen av FT-bränslen skulle kunna skalas upp till en nivå där bränslena täcker majoriteten av fordonsflottans behov utan att katalysatormaterialen är begränsande.

### 3.1.3 Sabatier-reaktionen

Då det inte finns data på de mängder av material som krävs för processen är det svårt att uppskatta om en begränsning av materialen kommer att uppstå. Vid uppskalning av metanproduktionen kan eventuellt materialen till katalysatorerna eller de tillhörande supportrarna vara begränsade. De främst förekommande katalysatorerna är producerade av nickel. 2015 bestod cirka 45% av den globala konsumtionen av återvunnet nickel [110], vilket kan ses som anledning till att tro att nickel inte kommer vara begränsande. De stora resurserna av aluminium tros också möta framtidens efterfrågan [110]. Den metall som eventuellt kan utgöra en begränsning är rutenium. Rutenium tillhör platinametallerna vars uppskattade resurser år 2015, relativt andra metaller, var liten. Men eftersom det finns möjlighet att ersätta ruteniumkatalysatorer med nickelkatalysatorer, borde båda sorters katalysatorer kunna användas, vilket kan underlätta uppskalningen av metanproduktionen.

**Tabell 3.1:** Sammanställning av vätgas-, koldioxid- och materialbehov för 100% bränslesyntes av respektive elektrobränsle vid maximalt bränslebehov för scenario 3.

Scenario	3		
	FT-bränslen	Metan	Metanol
Bränslebehov (EJ)	220	220	220
Vätgasbehov ( $10^6$ ton)	3 030	2 400	1 910
Vätgasbehov (EJ)	214	169	135
Koldioxidbehov ( $10^9$ ton)	21.7	13.1	13.9
<hr/>			
Materialbehov ( $10^3$ ton)			
Aluminium	39.1	-	305
Kisel	529	-	-
Kobolt	2 190	-	-
Koppar	128	-	6 578
Nickel	-	N/A	-
Rutenium	-	N/A	-
Zink	125	-	2 177



**Figur 3.1:** Materialbehov som andel av reserver och resurser för 100% elektrobränsleframställning av respektive teknik för scenario 3. Otillgängligt materialbehov: nickel och rutenium för metansyntes.

## 3.2 Elektrolys

Det står klart att elektrolysen är ett kritiskt steg av produktionskedjan eftersom det är den mest energikrävande processen. Verkningsgraden från elektricitet till vätgas får därför en central betydelse eftersom den avgör hur mycket energi som går förlorad. De kommersiella verkningsgraderna från kapitel 2.3.3 finns presenterad i tabell 3.2. För SOEC anges den förväntade framtida verkningsgraden. Vid beräkningar används ett medelvärde av dessa verkningsgrader.

**Tabell 3.2:** Verkningsgrader för elektrolys baserade på HHV.

	Alkalisk	PEM	SOEC
Verkningsgrad	47-82 %	50-65%	80-90%
Medelvärde	64.5%	57.5%	85%

Elbehovet beräknas för alla tre elektrolystekniker med de vätgasbehov som tagits fram i samband med beräkningarna för bränslesyntesen i föregående kapitel. Beräknade vätgas- och elbehov finns presenterade för alla processvägar, se bilaga A. Materialbehovet beräknades sedan för maximalt vätgasbehov för scenario 2 respektive 3 och presenteras i tabell 3.3. Andelar av reserver och resurser som dessa materialbehov utgör kan ses i figur 3.2 och 3.3. Liksom för bränsleproduktionen antas för elektrolysteknikerna en kapacitetsfaktor på 0.8.

Utöver elektricitet kräver elektrolysreaktionen rent vatten. Den allmänna reaktionsformeln för vätgaselektrolys avgör vattenbehovet, det vill säga en mol  $H_2O$  omvandlas till en mol  $H_2$ . Detta gäller gemensamt för alla tre tekniker. Enligt scenarierna

krävs maximalt  $1.5 \cdot 10^{15}$  mol vätgas, och därmed samma antal mol vatten. Detta motsvarar cirka  $27 \cdot 10^9$  ton vatten, eller en volym av  $27 \text{ km}^3$ .

Av allt vatten på jorden är 2.5% sötvatten, och nästan allt sötvatten finns i form av glaciäris och grundvatten [121]. Omkring 1% sötvattnet, vilket motsvarar cirka  $350\,000 \text{ km}^3$ , är direkt tillgängligt för mänsklig användning. Detta vatten finns i sjöar, floder, reservoarer och underjordiska källor och förnyas genom nederbörd vilket gör att det kan användas på ett hållbart sätt [122]. I förhållande till de globala tillgångarna av sötvatten är alltså det direkta vattenbehovet för elektrolys mycket litet.

Vattenförbrukningen kan dock vida överstiga den vattenmängd som behövs för att tillhandahålla de väteatomer som bygger upp bränslet. Den kvalitet som krävs för detta extra vatten beror dock på de specifika processerna som används [21]. Även om hänsyn tas till förluster i processen från vatten till vätgas kommer vattenbehovet troligtvis ändå inte komma upp i nivåer som riskerar att leda till resursbegränsningar. Ett övergripande problem vad gäller vattenanvändning kan dock vara de stora regionala skillnaderna i tillgänglighet på rent vatten. Vid behov kan då havsvatten användas om det först avsaltas i en avsaltninganläggning. Graves et al. anser att det är osannolikt att kostnaden för avsaltning skulle innebära en betydande del av kostnaden för bränsleproduktion [21]. Sammantaget innebär detta att vattenbehovet för elektrolys troligtvis inte kommer vara begränsande i projektets scenarier.

#### 3.2.1 Alkalisk elektrolys

Eftersom det har funnits lite information att tillgå gällande mängder material som ingår i alkalisk elektrolys, är det svårt att dra slutsatser om det kommer finnas material som kommer begränsa uppskalningen av vätgasproduktionen. NaOH och KOH är vanligt förekommande kemiska lösningar inom dagens industri, troligtvis kommer mängden som behövs för alkalisk elektrolys bara utgöra en liten del av den totala mängden. NaOH och KOH används även vid koldioxidinfångning från luft, och förväntas där inte leda till några resursbegränsningar (se kapitel 3.3.2). De organiska polymererna som ingår i elektrolysörer kommer troligtvis inte heller utgöra en begränsning [16].

För en uppskalning av vätgasproduktionen för scenario 3 med enbart alkalisk elektrolys krävs det i genomsnitt 200 000 ton kobolt för katalysatorer, för beräkningar se appendix D.1 samt kapitel 2.3.3.1. Denna mängd utgör bara en liten del, cirka 2% av dagens globala uppskattade reserver av kobolt, se figur 3.3. Eftersom mängden utgör en så liten del, borde inte kobolt vara en faktor som hindrar en uppskalning.

Gällande de andra metallerna som används vid alkalisk elektrolys har ingen information hittats om hur mycket som kommer krävas. Resurser av platina är inte stora jämfört med många andra metaller och därför kan platina ses som en potentiellt begränsad resurs. Dock ökar återvinningsgraden av platina ständigt, speciellt från bilindustrin [110], vilket kan komma att underlätta uppskalningen.

### 3.2.2 PEM-elektrolys

Gällande katalysatorer för PEM-elektrolys finns mycket information om hur stor mängd katalysator som krävs per ytenhet. Det har däremot visat sig svårare att hitta information om hur stor yta, eller mängd katalysator, som krävs för att producera en viss mängd vätgas. Grigoriev, S. A. et al. skriver dock i sin artikel om fördelar med och utveckling av PEM-elektrolys att kostnaden för Nafion-membran minskats till 200\$/m<sup>2</sup> eller 50\$ för 1 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/h för strömmen  $i=1$  A/cm<sup>2</sup> [123]. Baserat på dessa värden antas i denna rapport att man kan producera 4 m<sup>3</sup> vätgas per timme och m<sup>2</sup> katalysator. Eftersom data över tryck och temperatur vid reaktionen saknas användes vätgasens densitet vid standardtryck och -temperatur (0.0899 kg/m<sup>3</sup>) samt dess molmassa (2.016 g/mol) för att beräkna antalet producerade mol vätgas per timme och m<sup>2</sup> katalysator. Sedan beräknades materialbehovet enligt appendix D.2 med övriga värden och antaganden från kapitel 2.3.3.2.

Den nödvändiga katalysatormängden beräknades först från det maximala vätgasbehovet för scenario 3 med FT-bränslen och 100% PEM-elektrolys. Dessa beräkningar resulterar i att det krävs totalt 24 000 ton iridium som används samtidigt, om iridium är det enda material som används som anodkatalysator (som nämnts i kapitel 2.3.3.2 är även rutenium vanligt). På katodsidan krävs 4 180 ton platina för samma scenario. För scenario 2, som har det lägsta behovet av vätgas, behövs istället maximalt 4 910 ton iridium och 982 ton platina (tabell 3.3). Med hänsyn till en katalysatorlivslängd på 5 år motsvarar detta i genomsnitt 4 180 ton iridium och 963 ton platina per år för scenario 3, medan det i scenario 2 krävs 982 ton iridium och 196 ton platina per år.

Med hjälp av samma framtidsmodeller [115] som använts för att bestämma materialresurserna i tabell 2.3, beräknades produktionshastigheterna för både platina, iridium och rutenium år 2100, se appendix G. Beräkningarna resulterade i produktionshastigheter på 16.3 ton iridium, 32.5 ton rutenium och 585 ton platina per år. Enligt framtidsmodellerna är således tillgången på iridium otillräcklig i båda fallen, medan mängden platina räcker för scenario 2. Dagens platinabehov, som antas vara den årliga produktionen på 178 ton/år [110] täcks också i detta scenario. Det går att se att anodkatalysatorn för PEM-elektrolys utgörs av begränsande material även om hälften iridium och hälften rutenium används, genom att jämföra det totala behovet i tabell 3.3 med uppskattade reserver/resurser i tabell 2.3. För det maximala vätgasbehovet räcker inte ens dagens uppskattade resurser till det genomsnittliga årliga behovet. En ännu mindre mängd rutenium finns att tillgå om det använda elektrobränslet är metan, då rutenium även används som katalysator i Sabatier-reaktionen. För scenario 2 (och scenario 3 för platina) finns dock resurser för det totala materialbehovet om metallerna i platinagruppen sparas istället för att användningen ökar som förväntat [115]. Dessutom återvanns sammanlagt cirka 125 ton platina, palladium och rodium år 2015 [110]. Med en andel platina på 36%, vilket användes för att beräkna den framtida produktionshastigheten, skulle denna återvinning täcka nästan 5% av det årliga platinabehovet för maximal vätgasproduktion genom PEM-elektrolys.

Data saknas för mängden titan som krävs till strömvtagare och separatorplattor. Titan är dock vanligt förekommande (se tabell 2.3) så om man antar att behovet är av ungefär samma storleksordning som för katalysatormaterial bör ämnet inte utgöra en begränsning.

#### 3.2.3 SOEC

Eftersom SOEC fortfarande är i forsknings- och utvecklingsstadiet är det svårt att finna siffror för verkningsgrad och materialåtgång och därför går det inte att räkna ut ett totalt resursbehov för tekniken.

Fördelen med SOEC framför övriga elektrolysörer är framför allt dess höga verkningsgrad. SOEC kan potentiellt nå verkningsgrader över 90% [83] men vid beräkningar används en verkningsgrad på 85% (medelvärde av verkningsgraderna som angavs i kapitel 2.3.3.3) som ett rimligt framtidsscenario för kommersiella produkter.

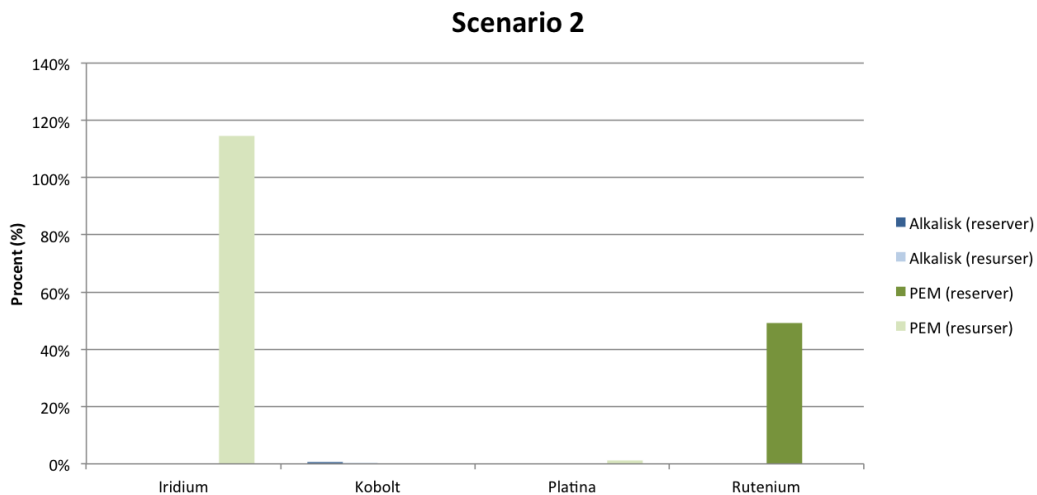
Det finns många alternativa material för alla komponenter vilket ytterligare komplicerar en uppskattning av materialbehovet för tekniken. Att inga dyra och ovanliga material krävs tyder dock på att tekniken inte använder sig av något av de mest begränsade materialen. Enligt litteraturen kan SOFC-komponenter fabriceras från lättillgängliga keramiska material, och kan på så sätt undvika användning av värdefulla ädelmetaller som stöter på resursbegränsningar vid massproduktion. Då SOEC innehåller i princip samma material indikerar detta att resursbegränsningar inte heller kommer att uppstå för SOEC. Samtidigt innebär det en konkurrens om dessa resurser vilket skulle kunna vara ett problem vid uppskalning av båda teknikerna.

Zirkonium är det vanligaste materialet i SOEC då det kan användas i elektrolyt, anod och katod. Enligt data från US Geological Survey (USGS) var de totala zirkoniumreserverna  $67 \cdot 10^6$  ton år 2013, och den årliga zirkoniumutvinningen  $1.44 \cdot 10^6$  ton [118]. Av de övriga materialen som används i SOEC är det troligt att yttrium och lantan är mest begränsade då de tillhör de sällsynta jordartsmetallerna. De totala yttriumreserverna uppskattas till 540 000 ton, med en utvinningstakt av 7 100 ton per år [118]. Reserverna av lantan tros ligga kring  $6 \cdot 10^6$  ton, och utvinningshastigheten är 12 500 ton per år [117]. Yttrium är alltså den av dessa metaller som har de minsta tillgångarna. Med dagens utvinningstakt kommer reserverna av zirkonium och yttrium ta slut innan år 2100. Det finns därför en risk att dessa material kommer bli begränsande för SOEC-teknikens framtida utveckling. Dock är det viktigt att påpeka att detta endast är de identifierade reserverna och att någon källa på resurserna inte har hittats, vilket innebär att de totala resurserna troligtvis är mycket större. Om något av materialen inte finns tillgängligt kommer det troligtvis även gå att ersätta det med ett annat material, om än på bekostnad av viss effektivitet.

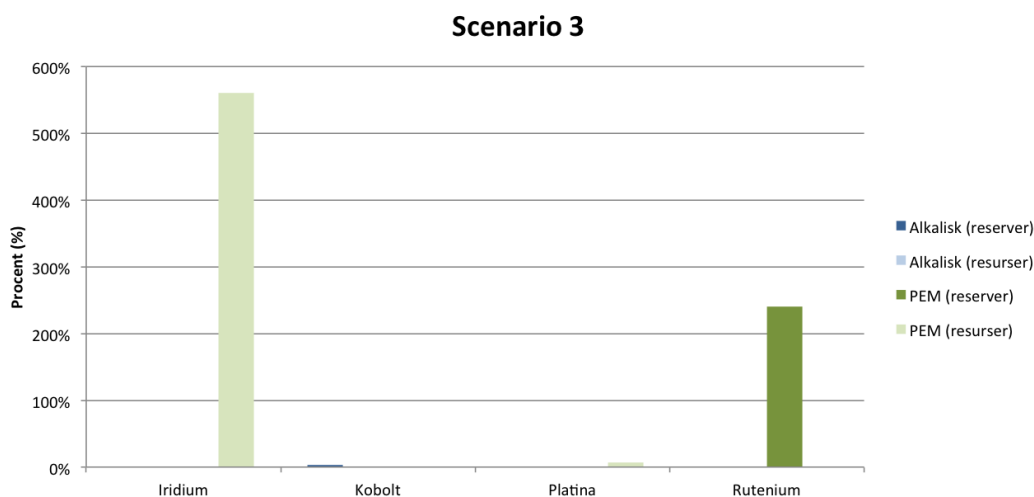
### 3. Resultat och beräkningar

**Tabell 3.3:** Sammanställning av el- och materialbehov för 100% elektrolys av respektive teknik vid maximal vätgasproduktion för scenario 2 respektive 3.

Scenario	2			3		
	Alkalisk	PEM	SOEC	Alkalisk	PEM	SOEC
Vätgasbehov ( $10^6$ ton)	619	619	619	3 030	3 030	3 030
Vätgasbehov (EJ)	43.6	43.6	43.6	214	214	214
Elbehov vätgasproduktion (EJ)	136	153	103	750	690	507
<u>Materialbehov (ton)</u>						
Iridium	-	2 460	-	-	12 050	-
Kobolt	40 800	-	-	200 000	-	-
Koppar	N/A	-	-	N/A	-	-
Lantan	-	-	N/A	-	-	N/A
Nickel	N/A	-	N/A	N/A	-	N/A
Platina	N/A	982	-	N/A	4 810	-
Rutenium	-	2 460	-	-	12 050	-
Titan	-	N/A	-	-	N/A	-
Yttrium	-	-	N/A	-	-	N/A
Zirkonium	-	-	N/A	-	-	N/A



**Figur 3.2:** Materialbehov som andel av reserver och resurser för 100% elektrolys av respektive teknik för scenario 2. Otillgängligt materialbehov; koppar, nickel och platina för alkalisk; titan för PEM; lantan, nickel, yttrium och zirkonium för SOEC. Otillgänglig reservdata: platina, iridium. Otillgänglig resursdata: rutenium



**Figur 3.3:** Materialbehov som andel av reserver och resurser för 100% elektrolys av respektive teknik för scenario 3. Otillgängligt materialbehov; koppar, nickel och platina för alkalisk; titan för PEM; lantan, nickel, yttrium och zirkonium för SOEC. Otillgänglig reservdata: platina, iridium. Otillgänglig resursdata: rutenium

### 3.3 Koldioxidinfångning

Med dagens teknik är koldioxid en begränsande faktor för en uppskalning av elektrobränsleproduktionen. Det maximala koldioxidbehovet från scenarierna är  $21.7 \cdot 10^9$  ton koldioxid per år, se bilaga A. Förbränning av biomassa genererar i genomsnitt cirka 10 kg koldioxid per GJ [124]. Med en infångningseffektivitet på 92.5% (medelvärde av post-combustion och oxy-fuel-combustion) innebär detta att  $1.87 \cdot 10^9$  ton koldioxid kan fångas in från 200 EJ biomassa, se bilaga E.2. Detta är endast 8.6% av det totala årliga koldioxidbehovet, resterande koldioxid måste fångas in från luft. Siffror för detta scenario presenteras i tabell 3.4. Luftinfångning används inte kommersiellt idag, men här görs antagandet att den tekniska utvecklingen fram till år 2100 kommer att möjliggöra en storskalig utbyggnad av tekniken. Då koldioxidinfångning från luft kräver elektricitet kommer detta även öka det totala elbehovet i scenarierna. Det bör även nämnas att det finns alternativa källor till koldioxid som inte behandlas i denna rapport men som skulle kunna bidra till att minska behovet av luftinfångning, till exempel utsläpp från pappersindustrin [18].

#### 3.3.1 Koldioxid från förbränning

Materialåtgången vid koldioxidinfångning för post-combustion antas vara låg då de katalysatorer som används återanvänds till en hög grad, samt att det finns ett flertal olika katalysatorer av vanligt förekommande art. För oxy-fuel-combustion ses inga direkta materialbegränsningar kopplat till användningen.

Post-combustion och oxy-fuel combustion fångar in upp till 90-95% av koldioxiden i de kommersiella anläggningarna. Dock skiljer sig energiåtgången åt mellan de två metoderna, där oxy-fuel-combustion har en högre energiåtgång. Energin tillförs i

form av värme, vilket innebär att om koldioxidinfångningen sker vid ett värmekraftverk kommer den samlade effektiviteten för kraftverket minska. Konsekvensen av det blir att mer energi i form av kol eller biomassa behöver tillföras systemet. Det kommer dock inte påverka resultatet då uppskalning av värmeanläggningar inte är inkluderat i rapporten.

#### 3.3.2 Koldioxidinfångning från luft

För koldioxidinfångning från luft (Direct Air Capture, DAC) valdes siffran 375 kJ elektricitet per mol koldioxid för beräkningar av elbehov. Värdet beräknades som ett medelvärde av det maximala och minimala elbehovet (50 och 700 kJ/mol), som anges i kapitel 2.3.2.2. Med tanke på teknikens snabba utveckling görs bedömningen att detta är möjligt att uppnå i kommersiell skala fram till år 2100, vilket är det år scenarierna baseras på. Enligt arbetets scenarier krävs maximalt  $21.7 \cdot 10^9$  ton koldioxid för bränsleproduktionen. Om den koldioxid som kan fångas in från biomassa dras bort från detta kvarstår ett behov av  $19.83 \cdot 10^9$  ton koldioxid. Det beräknade elbehovet för detta koldioxidbehov presenteras i tabell 3.4.

Som beskrevs i kapitel 2.3.2.2 utgörs materialbehovet för DAC framför allt av de kemikalier som används som absorbenter eller adsorbenter. De vanligaste absorbenterna är metallhydroxider, till exempel natriumhydroxid (NaOH), kaliumhydroxid (KOH) och kalciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Vanliga adsorbenter är zeoliter, vilka framför allt består av aluminium (Al) och kisel (Si). Alla dessa ämnen finns i riklig tillgång i naturen. Aluminium, kisel, natrium, kalium och kalcium är bland de tio mest förekommande ämnena i jordskorpan [125]. Resursbegränsningar kopplat till dessa material bedöms därför inte som troligt och koldioxidinfångning från luft bör inte stå inför några materialbegränsningar inom den närmaste framtiden. Som med alla framtidstekniker är dock detta ett osäkert antagande då inga kvantiteter av använda kemikalier kunnat hittats i litteraturen. Dessutom används NaOH och KOH även inom alkalisk elektrolys, vilket ytterligare ökar behovet av dessa resurser.

Markanvändningen för tekniken är relativt låg, och enligt Goeppert kommer den inte vara begränsande [63]. Cirka 50 kvadratmeter antas behövas för att fånga in ett ton koldioxid per dag [65]. Vattenbehovet är dock betydande och uppskattas till mellan 9 och 90 ton per ton infångad koldioxid [9]. För att fånga in mängden koldioxid från luft enligt scenario 3 krävs cirka  $1.785 \cdot 10^{12}$  ton vatten, vilket motsvarar en volym av  $1\,785 \text{ km}^3$ , för de mest vattenkrävande teknikerna. Vattenbehovet för koldioxidinfångning är större än för elektrolys, men ändå relativt litet i förhållande till de globala resurserna vilka är i storleksordningen  $350\,000 \text{ km}^3$  [122]. Skulle de mest vattenkrävande koldioxidinfångningsteknikerna skalas upp blir vattenbehovet årligen endast omkring 0.5% av de totala tillgångarna. Eftersom vattnet förnyas kontinuerligt genom nederbörd bör detta inte vara ett problem. Även med hänsyn taget till övrig vattenanvändning för exempelvis jordbruk, industri och hushåll kommer detta med stor sannolikhet inte vara begränsande. Som nämndes i kapitel 3.2 finns regionala problem med tillgänglighet på rent vatten, vilket innebär att koldioxidinfångning från luft lämpligtvis sker på platser med god vattentillgång.

**Tabell 3.4:** Sammanställning av el-, vatten- och materialbehov för koldioxidinfångning av respektive teknik vid maximalt koldioxidbehov för scenario 3.

Scenario	3	
	Post/oxy-combustion	DAC
Koldioxidbehov ( $10^9$ ton)	1.9	19.8
Elbehov (EJ)	0	169
Vattenbehov ( $10^9$ ton)	N/A	1 790
Materialbehov	N/A	N/A

## 3.4 Elproduktion

Materialbehovet för vindkraftverk och solceller avgörs av hur mycket elektricitet som behöver produceras. Det totala elbehovet beräknas som en summa av behovet från elektrolys, koldioxidinfångning och elanvändning i övriga sektorer, se bilaga A. Vid beräkningarna antogs en förlust i elnätet på 10%. Beroende på väg genom produktionskedjan och scenario varierar det beräknade elbehovet mellan 372 och 1212 EJ/år vilket tyder på att denna siffra är högst osäker.

Vid beräkningar av materialbehov används det maximala elbehovet för scenario 2 respektive scenario 3 med enbart PEM-elektrolys och FT-bränslen. I tabell 3.5 och 3.6 presenteras materialbehovet som scenario 2 och 3 resulterar i. För att se hur stor andel denna mängd utgör av reserver och resurser, se figur 3.4, 3.5, 3.6 och 3.7.

### 3.4.1 Vindkraft

Resultatet i kommande stycken baseras på beräkningar i appendix F.1 med värden från kapitel 2.3.1.1, tabell 2.1. Tillverkning av ett stort antal turbiner kommer att kräva stora mängder av bulkmaterial såsom stål och betong, se tabell 3.5. Dessa bulkmaterial verkar dock inte globalt resultera i en begränsad resurs, även om lokala brister på material kan komma att uppstå. De främsta beståndsdelarna av betong: grus, sand och kalksten, finns det riklig tillgång på samt att det går att återanvända [34]. Det är dock viktigt att tänka på att betong- och cementindustrin medför stora koldioxidutsläpp [16]. 2015 var reserverna av järn  $85 \cdot 10^9$  ton medan uppskattade resurser låg på  $230 \cdot 10^9$  ton. Stålbehovet jämförs med uppskattade resurser och reserver av järn. Mängden stål som krävs för att nå det maximala elbehovet med hjälp av vindkraft utgör cirka 20-25% av de uppskattade reserverna, se figur 3.6. Dock utgör behovet bara en liten del av de uppskattade totala resurserna av järn och borde därmed inte utgöra någon begränsning, speciellt inte eftersom produktionen av vindkraftverken borde kunna genomföras av återvunnet stål.

Globalt sett finns det relativt stora reserver av sällsynta jordartsmetaller. För att nå framtidsscenarioets elefterfrågan med vindkraftverk krävs stora mängder neodym. Eftersom neodym för produktionen av vindkraftverk bara utgör en liten del av den globala användningen [35] är det svårt att se att vindkraftsindustrin kommer kunna

öka sin mängd drastiskt. Men eftersom många av kraftverken idag inte använder sig av neodym, är det inte troligt att neodym kommer vara orsaken till att inte tillräckligt många vindkraftverk kommer kunna byggas. Det kan dock bidra till att marknaden kommer att se annorlunda ut.

Produktionen av  $64 \cdot 10^6$  2MW-vindkraftverk skulle medför att cirka 6%, se figur 3.6, av år 2015 uppskattade reserver av koppar skulle behöva användas. Samma år bidrog skrot med 32% av USA:s totala koppertillgångar [110]. Återvunnen koppar borde i framtiden kunna utgöra en större andel och därmed minska risken för att koppar kommer utgöra en begränsning.

Andelen aluminium som skulle krävas för att producera  $64 \cdot 10^6$  2MW-vindkraftverk skulle bara utgöra en minimal del av 2015 uppskattade resurser och utgör därför sannolikt inte en resursbegränsning.

Kvantiteten bly som krävs för antalet offshore-vindkraftverk överstiger till stor grad reserverna som år 2015 uppskattades finnas tillgängliga, se figur 3.6, baserat på det kommer bly utgöra en begränsad resurs. Mängden bly utgör cirka 25% av uppskattade resurser, men med den aktuella produktionen för år 2015 kommer inte tillräckligt med bly ha hunnits produceras fram till år 2100 för att nå efterfrågan för uppskalningen, även det tyder på att en eventuell begränsning kommer att uppstå. Att tänka på är dock att cirka 70% av den konsumerade mängden bly år 2015 bestod av återvunnet bly [110], vilket kan komma att möjliggöra en uppskalning till en viss nivå.

Med en ständigt ökande global produktion av plaster, uppgick mängden producerad plast till  $24.5 \cdot 10^9$  ton år 2014 [126]. Med elproduktionen från scenario 3 kommer mängden plast inte överstiga produktionsvolymerna för år 2014. Det talar för att plastindustrin kommer kunna ha möjlighet att möta den större efterfrågan i framtiden och inte borde resultera i en resursbegränsning.

#### 3.4.2 Solceller

Likt vindkraftverk producerar solceller inte elektricitet konstant under året, därav har beräkningarna gjorts med en median på antalet soltimmar världen upplever på ett år [127]. Beräkningar utgår ifrån 2 600 timmar, vilket motsvarar en aktivitet på strax under 30%. Om inget annat anges är siffrorna tagna från kapitel 2.3.1.2 och 2.4 och beräkningarna är baserade på de formler som redovisas i bilaga F.2.

För de två tunnfilmstyperna, CdTe och CIGS, krävs en stor mängd material från sällsynta metaller. Tellur har en beräknad reserv på 25 000 ton medan indium och kadmium inte har någon uppskattning då de existerar i sådan liten mängd. Kadmium brukar utgöra ungefär 0.03% av zinkmalm och indium kan utgöra så lite som 1-100 ppm av zinkmalm [110]. Enligt beräkningarna behövs det för CdTe 13 889 ton tellur och 3649 ton kadmium för produktion av solceller som under sin livstid skulle motsvara en årlig produktion av 1 EJ. För CIGS krävs närmare 8868 ton indium, medan data tyvärr saknas på mängden germanium, kisel och koppar som krävs. Det gör att CdTe baserat på reserverna inte ens kan stå för 1% av det framtida scenariot när elbehovet är minimerat. Med den tillgängliga informationen är det

alltså svårt att tro att de kommer kunna bidra med ens en procent till den globala elproduktionen år 2100. I figur 3.5 och 3.7 går att läsa om hur stor andel av reserver och resurser som skulle behövas för respektive typ för att de var för sig ska kunna producera nog för att stilla elbehovet för scenario 2 och 3.

För de kiselbaserade typerna mono- och multikristallina solceller krävs mycket stora mängder av kisel, men med tanke på att det är det åttonde vanligaste ämnet i jordskorpan [110] borde det inte vara begränsande. Däremot krävs med dagens tillverkningsmetod även en liten mängd silver, där mängden förväntas minska allt eftersom utvecklingen pågår. Enligt beräkningar med dagens siffror kommer ungefär  $2.95 \cdot 10^6$  ton silver behövas för att dessa typer av solceller ska kunna producera den mängd elektricitet som behövs när behovet är maximerat. Tyvärr beräknas reserverna inte vara större än 570 000 ton [110], alltså inte nog för att säkerställa behovet. Om silverreserverna uteslutande användes för uppskalningen skulle mono- och multikristallina solceller årligen kunna producera 234 EJ, det motsvarar strax över 19% av det maximerade elbehovet. Om verkligheten blir mer lik det minimerade elbehovet skulle enbart kristallina solceller kunna stå för 107% av det globala elbehovet. I tabell 3.6 finns en sammanställning över den materialmängd som skulle behövas för respektive typ för att de var för sig ska kunna producera nog för att uppfylla elbehovet för scenario 2 och 3. Detta synliggörs även i figur 3.4 och 3.6 där materialbehovet visas som andel av de totala reserverna och resurserna.

Livslängden för en solcell kan vara längre än 20 år, men kan på grund av slitage förloras runt 8-13% [128] i effektivitet under livsspannet. Enligt en källa kan redan idag 85-90% [129] av materialet i solceller återvinnas och tas om hand, vilket kommer vara ytterst viktigt att bli bättre på för att producera nya solceller när de gamla är uttjänta.

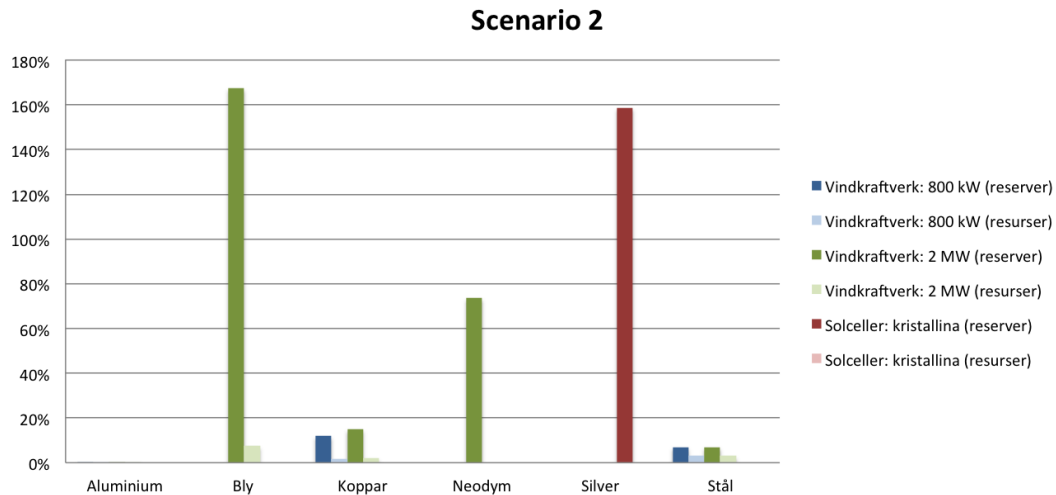
**Tabell 3.5:** Sammanställning av materialbehov som krävs för 100% elproduktion av respektive vindkraftverkstyp vid maximal elproduktion för scenario 2, respektive 3.

Scenario	2		3	
	800 kW onshore	2 MW offshore	800 kW onshore	2 MW offshore
Elbehov (EJ)	372	372	1212	1212
Antal vindkraftverk ( $10^6$ )	58.9	19.6	192	64.1
<u>Materialbehov (<math>10^6</math> ton)</u>				
Aluminium	12.3	16.5	40.0	53.8
Betong	14 400	41 200	47 000	135 000
Bly	-	149	-	486
Grus	-	5 890	-	19 200
Koppar	86.2	108	281	352
Neodym	-	5.89	-	19.2
Plaster	90.5	82.1	295	268
Stål	6 360	5 810	20 800	19 000

### 3. Resultat och beräkningar

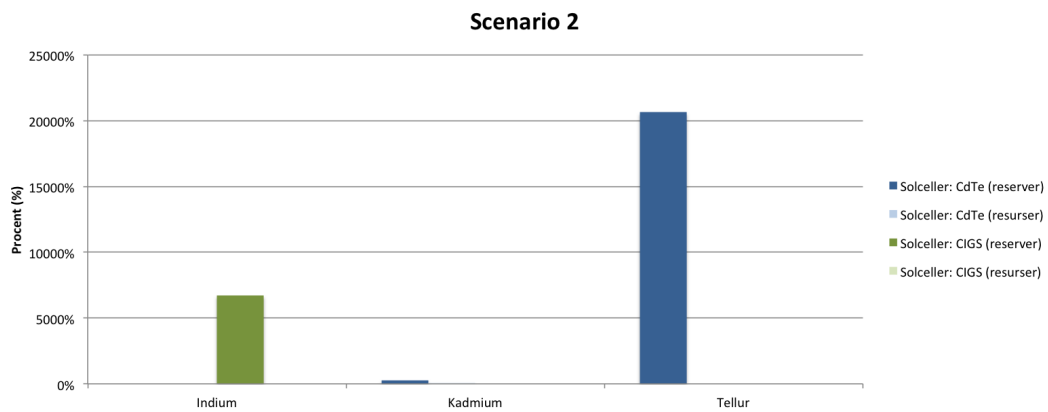
**Tabell 3.6:** Sammanställning av materialbehov som krävs för 100% elproduktion av respektive solcellsteknik vid maximal elproduktion för scenario 2, respektive 3.

Scenario	2			3		
	Kristallina	CdTe	CIGS	Kristallina	CdTe	CIGS
Elbehov (EJ)	372	372	372	1212	1212	1212
<u>Materialbehov (10<sup>6</sup> ton)</u>						
Gallium	-	-	N/A	-	-	N/A
Indium	-	-	3.3	-	-	10.7
Kadmium	-	1.4	-	-	4.4	-
Kisel	N/A	-	-	N/A	-	-
Koppar	-	-	N/A	-	-	N/A
Selen	-	-	N/A	-	-	N/A
Silver	0.9	-	-	3.0	-	-
Tellur	-	5.2	-	-	17.0	-

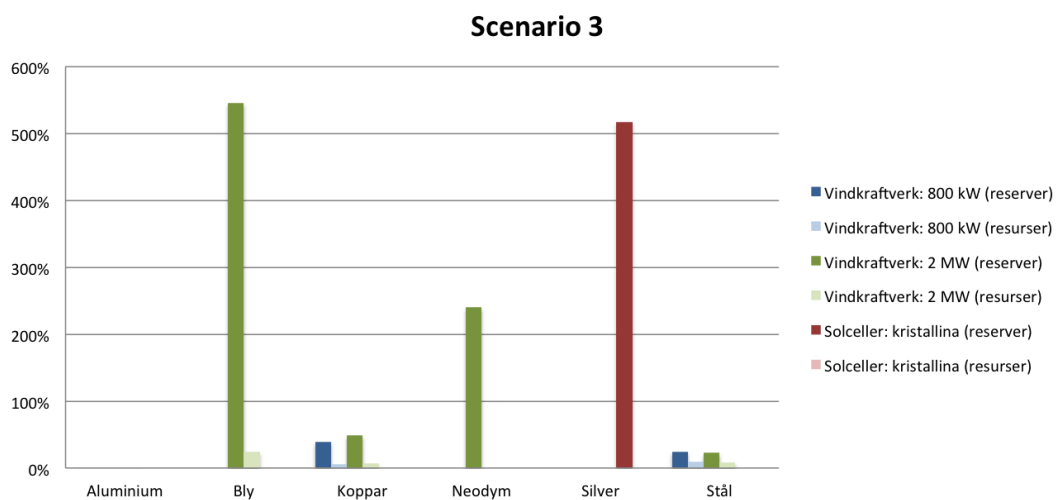


**Figur 3.4:** Materialbehov som andel av reserver och resurser som krävs för 100% elproduktion av respektive teknik för scenario 2. Otillgängligt materialbehov: kisel för kristallina solceller. Otillgänglig resursdata: silver, neodym.

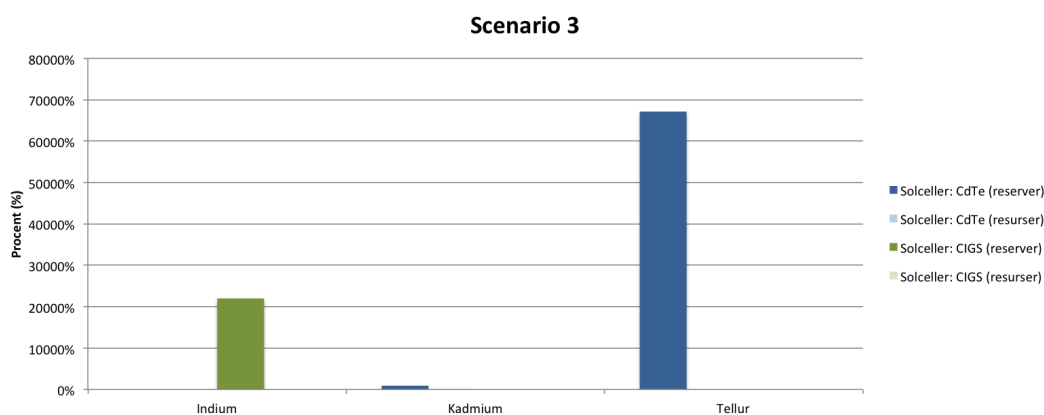
### 3. Resultat och beräkningar



**Figur 3.5:** Materialbehov som andel av reserver och resurser som krävs för 100% elproduktion av respektive teknik för scenario 2. Otillgängligt materialbehov: gallium, selen och koppar för CIGS. Otillgänglig resursdata: indium, tellur.



**Figur 3.6:** Materialbehov som andel av reserver och resurser för 100% elproduktion av respektive teknik för scenario 3. Otillgängligt materialbehov: kisel för kristallina solceller. Otillgänglig resursdata: silver, neodym.



**Figur 3.7:** Materialbehov som andel av reserver och resurser för 100% elproduktion av respektive teknik för scenario 3. Otillgängligt materialbehov: gallium, selen och koppar för CIGS. Otillgänglig resursdata: indium, tellur.

### 3.5 Ett möjligt framtidsscenario

Här kommer ett försök göras till att uppskatta en tänkbar väg genom produktionskedjan, det vill säga ett alternativ till hur ett framtida energisystem med elektrobränslen skulle kunna se ut år 2100. Scenario 1 togs fram med syftet att vara ett rimligt scenario med användning av elektrobränslen och energibehovet för dessa beräkningar baseras därför på det.

Av de tre behandlade bränslena är metanol det som har högst verkningsgrad och är därmed effektivast att producera för att minska energiförlusterna. Metanolproduktionen verkar inte leda till resursbegränsningar och bör kunna skalas upp till de nivåer som krävs. Det är dock inte rimligt att alla transporter ska använda metanol som drivmedel på grund av att det finns så många olika fordonstyper och förbränningsmotorer där alla har olika krav på bränsle. Därför antas en fördelning av 50% metanol, 25% metan och 25% Fischer-Tropschbränslen i framtidens transportsektor, se tabell 3.7 och figur 3.8.

För vätgasframställning bör SOEC användas i så stor utsträckning som möjligt eftersom det är den mest effektiva elektrolystekniken med högst verkningsgrad. SOEC antas stå för 50% av all vätgasproduktion, medan alkalisk elektrolys bidrar med resterande 50%, se figur 3.8. Teknikerna bör klara av dessa produktionsnivåer utan resursbegränsningar men här finns stora osäkerheter kopplat till material vilket nämnts tidigare i rapporten. PEM utelämnas på grund av att tekniken är mycket begränsad av tillgången på iridium och rutenium. Även i detta scenario sker koldioxidinfångningen i första hand från förbränning av biomassa och resterande koldioxid fångas in från luft. Detta resulterar i att biomassa står för 12.5% av infångad koldioxid och DAC står för 87.5%, se figur 3.8. Koldioxiden bör kunna samlas in utan resursbegränsningar men kräver omfattande utveckling av tekniken för luftinfångning.

Totalt sett leder dessa uppskattningar och antaganden till ett elbehov av cirka 798 EJ/år, se tabell 3.8. Denna mängd elektricitet behöver då produceras med en kom-

### 3. Resultat och beräkningar

bination av vindkraft och solceller. Tunnfilmsteknikerna för solceller utelämnas då de bara antas kunna bidra med en försumbar del av elproduktionen eftersom de är mycket begränsade av material. Mono- och multikristallina solceller beräknas kunna bidra med 234 EJ/år, vilket motsvarar cirka 30% av den totala elproduktionen. För att ha en viss säkerhetsmarginal skalas inte produktionen upp till max utan en andel på 15% antas i detta scenario. För vindkraft bör det vara mer fördelaktigt att bygga offshore-vindkraft då de generellt sett har en högre kapacitetsfaktor samt att kraftverken kan byggas större. Offshore-vindkraft begränsas av tillgången på bly men kan skalas upp till 20% av elproduktionen utan risk för resursbegränsningar. Resterande elproduktion, det vill säga 65%, täcks upp av onshore-vindkraft. För en sammanställning av uppdelningen av tekniker för bränsleproduktion, elektrolys, koldioxidinfångning och elproduktion i detta scenario, se figur 3.8.

Det sammanlagda materialbehovet för alla använda tekniker presenteras i tabell 3.9 nedan. I figur 3.9 anges sedan detta materialbehov som procentandel av dagens reserver och resurser. Då ingen av materialen överstiger 100% är detta alltså ett möjligt framtidsscenario utifrån de materialbehov som finns tillgängliga. Det är dock viktigt ha i åtanke att det kan finnas begränsningar som inte har identifierats på grund av att siffror för materialbehov saknas för vissa tekniker.

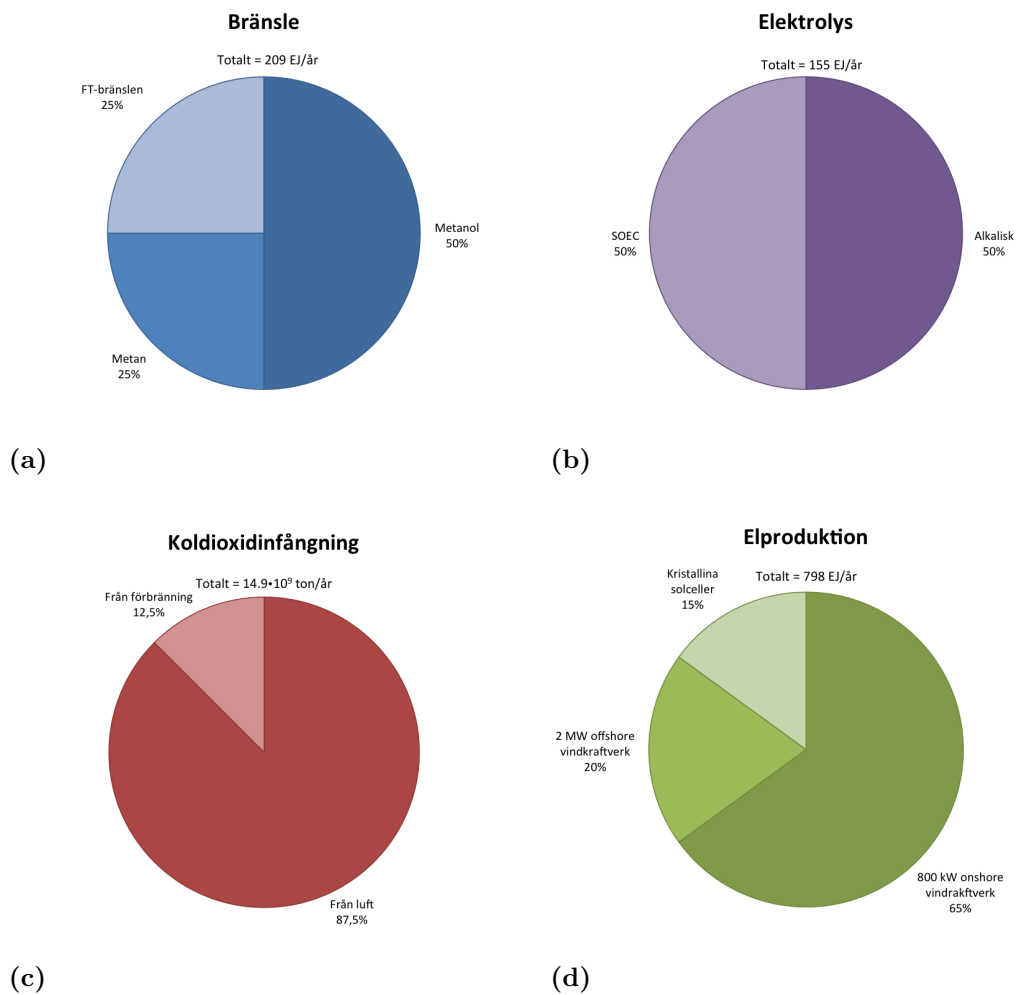
**Tabell 3.7:** Sammanställning av bränsle-, vätgas- och koldioxidbehov med 25% FT-bränslen, 25% metan och 50% metanol för scenario 1, se figur 3.8a.

Drivmedel	Bränslebehov ( $10^{-6}$ Emol/år)	Vätgasbehov (EJ/år)	Vätgasbehov ( $10^9$ ton/år)	Koldioxidbehov ( $10^9$ ton/år)	Koldioxidbehov DAC ( $10^9$ ton/år)
FT-bränslen 25%	5.5	50.8	0.7	5.2	4.5
Metan 25%	58.7	40.2	0.6	3.1	2.7
Metanol 50%	71.3	64.0	0.9	6.6	5.8
Totalt	135.4	155.0	2.2	14.9	13.0

**Tabell 3.8:** Sammanställning av elbehov med 50% vätgasproduktion från alkalisk och 50% från SOEC för scenario 1, se figur 3.8b.

	Elektrolys (EJ/år)		Koldioxidinfångning (EJ/år)	Övrigt (EJ/år)	Totalt <sup>1</sup> (EJ/år)
	Alkalisk 50%	SOEC 50%			
Elbehov	242	184	111	181	798

<sup>1</sup> inkl. förluster i elnätet (10%)



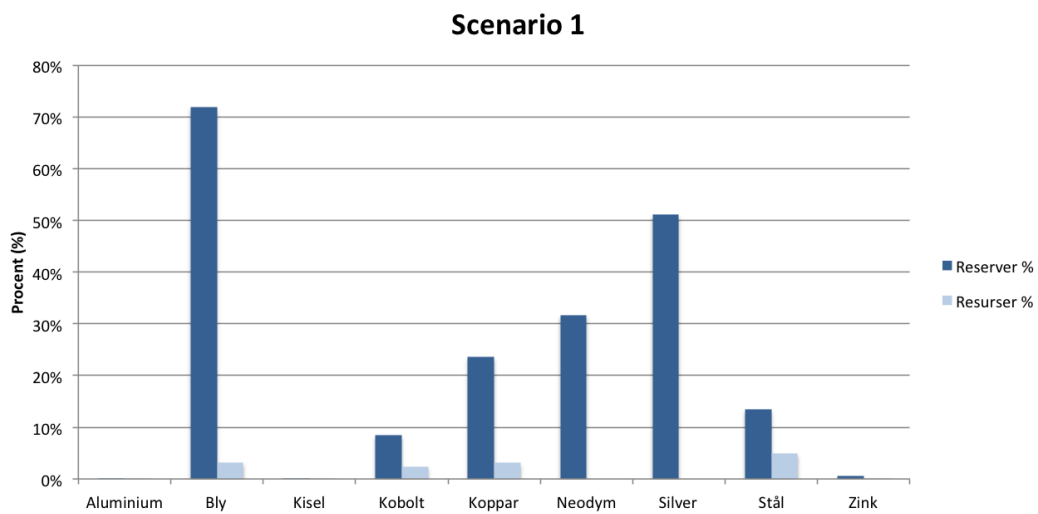
**Figur 3.8:** Uppdelning av (a) bränsletekniker, (b) elektrolystekniker, (c) koldioxidinfångningstekniker samt (d) elproduktionstekniker för en resursmässigt möjlig lösning till scenario 1.

### 3. Resultat och beräkningar

**Tabell 3.9:** Sammanställning av materialbehov för en möjlig lösning till scenario 1 med en bränsleuppdelning på 25% FT-bränslen, 25% metan och 50% metanol (se figur 3.8a), 50% av vätgasproduktion från alkalisk och 50% från SOEC (se figur 3.8b) samt 65% av elproduktionen från 800kW onshore vindkraftverk, 20% 2MW offshore vindkraftverk och 15 % från kristallina solceller (se figur 3.8d).

Materialbehov	Bränslesyntes (10 <sup>6</sup> ton)	Elektrolys (10 <sup>6</sup> ton)	Elproduktion (10 <sup>6</sup> ton)	Totalt (10 <sup>6</sup> ton)
Aluminium	15.1	-	24.2	39.3
Bly	-	-	64.0	64.0
Kisel	0.13	-	N/A	0.13 <sup>1</sup>
Kobolt	0.52	0.08	-	0.60
Koppar	7.73	N/A	166.7	174.4 <sup>1</sup>
Lantan	-	N/A	-	N/A
Neodym	-	-	2.54	2.54
Nickel	N/A	N/A	-	N/A
Platina	-	N/A	-	N/A
Rutenium	N/A	-	-	N/A
Silver	-	-	0.29	0.29
Stål	-	-	11 400	11 400
Yttrium	-	N/A	-	N/A
Zink	5.63	-	-	5.63
Zirkonium	-	N/A	-	N/A

<sup>1</sup> Behov större än angivet, materialbehov saknas för viss teknik.



**Figur 3.9:** Totalt materialbehov för elektrobränsle-, vätgas- och elproduktion som andel av reserver och resurser för en möjlig lösning till scenario 1. Otillgängligt materialbehov: koppar, lantan, nickel, platina, yttrium och zirkonium för elektrolys samt kisel, nickel och rutenium för elektrobränsleproduktion. Otillgänglig resursdata: neodym, silver.

# 4

## Diskussion

I detta kapitel kommer viktiga faktorer som kan inverka på resultatet diskuteras, och förslag kommer att ges för vidare arbete inom området. Det rör sig om faktorer som inte har fått något utrymme i den övriga rapporten, som exempelvis politiska, sociala och ekonomiska aspekter, alternativa tekniker och återvinning.

### 4.1 Teknik, material och resursbegränsningar

Det går inte att med säkerhet uppskatta de framtida reserverna, det vill säga den mängd material som kommer vara tekniskt och ekonomiskt brytbar i framtiden [110]. Med största sannolikhet kommer reserverna öka och inkludera mängder som idag räknas som resurser, men det är ytterst svårt att svara på i vilken storleksordning. Osäkerheten inför framtiden gäller även för produktionshastigheter, då de kan öka med en större efterfrågan, men de kan lika väl minska då reserverna och resurser minskar, för att det blir allt dyrare att utvinna metallerna.

Enligt resultatet är resursbegränsningar för metanol- och RWGS-katalysatorer inte att vänta, men det är viktigt att påpeka att ingen hänsyn har tagits till geopolitik eller efterfrågan till andra produkter. Till exempel är koppar en metall som används till bland annat kablar över hela världen. Över 94% av dagens kopparreserver beräknas användas mellan 2007 och 2032 [130, 110]. Detta är dock endast 1.2% av de beräknade resurserna [110], som borde kunna utvinnas med nya tekniker innan år 2100. Silver har beräknats vara en kritisk resurs för kristallina solceller, men reserverna beräknades kunna räcka till det lägre elbehovet i rapportens scenarier. Med dagens utvinningshastighet på 27 300 ton per år kommer dock silverreserverna vara tillvaratagna redan om 20 år. För iridium, som redan är ett begränsande material för PEM-elektrolys, bidrar faktorer såsom tillverkning av lysdioder för mobiltelefoner och surfplattor till en stark ökad efterfrågan [74].

Ingen hänsyn har heller tagits till återanvändning och återvinning av material i beräkningarna, vilket istället ger en pessimistisk uppskattning av materialtillgången. Alla antaganden om resursbegränsningar har gjorts mot de uppskattade reserver och, i vissa fall, resurser som finns. Viss data angående återvinning, för exempelvis material till solceller, platinametaller och koppar, har hittats och nämnts i resultatet och kan ge en något bättre bild av verkligheten. Mängden återvunnet material bygger dock på uppskattningar och är svåra att använda vid beräkningar om framtida tillgångar.

Tänkvärt är även att som ett resultat av den heterogena förekomsten av råmaterial sker utvinning och användning av material ofta inte på samma ställe. I cirka hälften av alla fall sker brytning av material i politiskt instabila länder, vilket kan leda till att tillgången av materialen blir osäker. En ökad efterfrågan inom landet som utvinnet materialet kan även leda till minskade möjligheter för andra länder att importera materialen [111].

För de flesta tekniker finns flera olika alternativ till material som kan användas. Exempelvis för vindkraft är data som använts för beräkningarna bara representativa för specifika onshore- och offshore-vindkraftverk. Det finns dock stor variation på exempelvis kapacitet och storlek på vindkraftverk [16], vilket kan leda till att behovet av material kommer skilja sig från det i rapporten beräknade. Att endast offshore-vindkraftverk som kräver neodym i generatorerna har undersökts kan påverka hur det framtida behovet av material kommer att se ut, då det redan idag finns substitut till neodymanvändningen [16]. Om generatorer utan neodym används kan det dock komma att påverka totalvikten av kraftverket, vilket kan innebära behov av en stadigare struktur och större materialåtgång för konstruktionen.

Ett annat exempel är PEM-elektrolys, där det nämndes att en nackdel är att ädla metaller används som katalysatorer, och i beräkningarna visade sig alla undersökta katalysatormaterial vara begränsande. Iridium och rutenium är dock inte de enda metaller som kan användas som anodkatalysator, liksom platina inte är den enda möjliga katalysatorn på katodsidan. Andra metaller såsom palladium och rodium är bra alternativ och även nickel kan användas till katodsidan [74]. Alternativen är något mindre effektiva [74] men en fördelning skulle kunna bidra till att resursbegränsningarna minskar. För Fischer-Tropschprocessen, där kobolt eventuellt är en kritisk resurs i ett extremt scenario med endast FT-bränslen, kan järn användas som alternativ. Järn är mycket billigare att använda [98], men livslängd och aktivitet är lägre.

Liksom för material finns det till processerna ofta alternativa tekniker till de som behandlats här. Exempelvis har bara två kategorier, kristallina och tunnfilms, och totalt fyra olika typer, mono- och multikristallina, CdTe- och CIGS-tunnfilm, av solceller undersökts i arbetet. Detta kan ge en skev bild av resultatet, då det finns fler olika kategorier och typer på marknaden och ytterligare fler finns inom forskningen. Många av teknikerna är baserade på andra material. Vid uppskalning för att möta energiefterfrågan i framtiden, kommer resursbegränsningar för vissa av de undersökta teknikerna uppstå. Genom att sprida ut elproduktionen med flera olika sorters solceller kommer en större bredd på material användas [44], vilket kan göra att resursbegränsningar undviks. Det är inte orimligt att tro att solceller kan stå för all elproduktion om en större bredd av solcellsteknik används. Det finns även andra typer av tekniker för att ta tillvara på solenergin, som till exempel Concentrated Solar Power (CSP) [131], vilket kan bidra med ytterligare möjligheter att minska risken för resursbegränsningar.

Det finns fler förnyelsebara tekniker som kommer kunna användas som komplement till vindkraft och solkraft [23], men som inte har undersökts i rapporten. Vattenkraft utgör i vissa delar av världen en stor andel av den lokala elproduktionen och kommer även i framtiden troligtvis göra det [132]. Andra förnyelsebara tekniker kommer

även de spela en stor roll för den lokala elproduktionen, då de i vissa fall är mer tillgängliga eller mer ekonomiskt gynnsamma att använda [34]. Om uppskalningen av vindkraft och solceller är möjligt för att nå efterfrågan på elektricitet, är det väsentligt att ta i beaktande att dessa tekniker inte producerar elektricitet med jämn kapacitet under året och då är det fördelaktigt att sprida ut elproduktionen över olika tekniker. Fluktueringarna i elproduktionen gör i sin tur att en överproduktion kan behövas, för att säkerställa att den elektricitet som behövs faktiskt blir producerad. Här finns det även en möjlighet att de oanvända elektrobränslen som produceras kan användas som energibuffert under perioder när elproduktionen sjunker under 100% [133]. Det kan även vara värt att nämna att till exempel kärnkraft producerar elektricitet som kan räknas som koldioxidneutral och alltså skulle den kunna användas för uppskalningen, men den räknas inte med i rapportens scenarier eftersom den står för en annan typ av farligt avfall [134].

Den sammanlagda verkningsgraden för hela produktionskedjan från el till bränsle beror på elektrolysens och bränslesyntesens verkningsgrader. Av dessa är det främst elektrolysen som kan förbättras för att på så sätt öka den totala verkningsgraden. Alkalisk elektrolys och PEM kan förbättras genom ytterligare effektivisering av processerna, men verkningsgraden för dessa elektrolysörer är tekniskt begränsade. Det som skulle kunna förbättra den totala verkningsgraden för framställning av elektrobränslen mer markant är användning av SOEC. Med potential att nå upp till en verkningsgrad av 90% skulle detta öka den totala verkningsgraden för bränsleproduktion från ungefär 50 till 70% [22]. Fortsatt forskning inom SOEC-tekniken är därför nödvändig för att uppnå mer ekonomisk produktion av elektrobränslen. Forskningen behöver framför allt inrikta sig på att förbättra cellernas livslängd då detta är det största problemet idag. SOEC är även i behov av högvärdig värmeförsörjning vilket det i denna rapport inte tagits hänsyn till vid beräkningar. Det har antagits att denna värme funnits tillgänglig då bränslesyntes ger ett överskott av värme. Detta behöver dock utredas ytterligare för att finna bästa sätt att kombinera elektrolys och bränslesyntes för att ta vara på värmen.

Det är viktigt att påpeka att de verkningsgrader och värden som används i rapporten mestadels har tagits från dagens teknik, då framtidsmodeller bara har funnits i enstaka fall. Två tekniker som fortfarande befinner sig på forskningsstadiet har även behandlats, vilket är SOEC och DAC. SOEC-tekniken har tagits med då den verkar som ett intressant inslag av en potentiellt väldigt stor landvinning som kan effektivisera elektrolysen. Därav kan siffrorna för SOEC i jämförelse med siffrorna för alkalisk- och PEM-elektrolys vara spekulativa när det gäller realisering i större skala. Koldioxidinfångning från luft (DAC) är en teknik som måste utvecklas rent tekniskt och skalas upp till höga produktionsnivåer för att tillräckligt med koldioxid ska kunna fångas in för att producera den mängd bränsle som scenarierna förutspår. Även i detta fall är det då risk för att siffrorna för DAC är spekulativa jämfört med Post-combustion- och Oxy-fuel-infångning. Att DAC verkligen kommer fungera i framtiden är inget som kan sägas med säkerhet idag. Om DAC inte kan skalas upp till den tilltänkta mängden, och ingen annan alternativ teknik utvecklas, så finns det i princip ingen möjlighet att skapa ett koldioxid neutralt energisystem baserat på elektrobränslen av denna omfattning. Det finns andra källor till koldioxid, till exempel industrier, men om inte förnyelsebara källor används behöver den koldioxiden

pumpas ned i marken för att energisystemet ska förbli koldioxidneutralt. Eftersom SOEC och DAC inte används kommersiellt har siffror för materialbehov varit mycket svårtillgängligt i litteraturen, och därför behövs mer forskning för att avgöra resursbegränsningarna för dessa tekniker. För bränslesyntesen har inga andra framtida tekniker behandlats som på samma sätt kan revolutionera framställningen.

I de fall då dagens kommersiella teknik används vid beräkningar innebär det att rum finns för förbättringar. Inom vissa områden kan stora förbättringar vara att vänta, då efterfrågan och intresse skulle stiga med en uppskalning. Fortsatt utveckling förväntas leda till lägre materialbehov, högre verkningsgrader och lägre kostnader. Exempelvis presenteras i rapporten livslängderna för alkaliska- och PEM-elektrolysörer som 5-10 respektive 10-20 år. Vid beräkningar av det genomsnittliga materialbehovet per år för PEM antogs 5 år för att få en marginal. Detta bör inte vara representativt för kommersiella elektrolysörer år 2100, då livslängden förväntas öka. Redan år 2030 beräknas elektrolysörerna få en livslängd på 90 000 produktionstimmar för PEM och 100 000 timmar för alkaliska i bästa fall [135]. Detta motsvarar cirka 13 år med produktionstiden på 80% som antagits i denna rapport. Material som är i riskzonen för att ta slut kan alltså få en bättre prognos när de används mer effektivt. I de flesta fall kan man dock mest spekulera och det går inte att räkna på framtidens teknik med någon större säkerhet.

Markanvändning av olika tekniker för elproduktion är något som bara har berörts flyktigt i rapporten. Att odlingsbarmark skulle hindra utbyggnaden av vindkraft och solceller anses inte vara ett problem [136], exempelvis uppgår mängden mark passande för odling bara till strax över 10% av totalen [41]. Dock kan en stor uppskalning av teknikerna komma att riskera mark som är värdefull på andra sätt. Därför är det viktigt att utbyggnaden sker med hänsyn till såväl miljömässiga som sociala och hållbara aspekter. Rent vatten är en annan resurs som används vid elektrolys samt vid koldioxidinfångning från luft. Tillgången på rent vatten skulle också kunna vara ett problem lokalt, även om det nämndes i kapitel 3.2 att världens totala vattenmängd är stor jämfört med behovet för vätgasproduktion.

## 4.2 Ekonomiska och sociala aspekter

Mycket ska till för att en uppskalning av den här storleken ska kunna realiseras och det krävs inte bara att resurserna ska räcka, utan det gäller att den expertis och det tekniska kunnande som krävs finns att tillgå, det gäller att de reserver som bryts används just till uppskalningen, men framförallt gäller det att de olika viljorna i världen styr åt samma håll. Om till exempel stater som sitter på stora mängder av metallers reserver inte vill exportera dem, så sätter det hinder för uppskalningen. Att bygga fabriker för framställning av bränsle och för produktion av solceller och vindkraftverk kommer kosta stora summor, vilket ställer krav på lönsamheten.

Ett hållbart energisystem begränsas alltså inte bara av resurser, utan även ekonomiska och sociala aspekter spelar en central roll. Dessa har inte behandlats i denna rapport, men behöver ingå i en mer omfattande hållbarhetsbedömning. Förnyelsebar energi bidrar bara med en liten del av dagens globala energi- och elektricitetspro-

duktion, men den tekniska potentialen bör vara större än det förutsedda framtida behovet [15]. Den begränsande faktorn för ett framtida energisystem med elektrobränslen är därför troligtvis inte mängden förnyelsebar energi som kan produceras utan istället ekonomisk och social problematik. Ett sådant problem kan vara att förnyelsebar energi inte byggs ut i tillräcklig takt även fast det är tekniskt möjligt att göra det. Tillgången på förnyelsebar energi blir då begränsad även fast begränsningen inte beror på materialtillgång. Fastän det inte alltid är billigare att använda fossila bränslen [137] kan det fortfarande vara enklare, och eftersom människor ofta drivs av egenintressen kommer användningen med största sannolikhet fortsätta så länge denna situation kvarstår.

För att tillhandahålla den förnyelsebara energi som krävs för projektets framtidsscenarier kommer en majoritet av energibehovet behöva täckas av vindkraft. I praktiken finns framför allt två aspekter som begränsar potentialen för uppskalning av vindkraft. I tätbefolkade områden finns konflikter om placering, då många menar att de är störande och förstör landskapet, medan mer glesbefolkade områden kräver stora infrastrukturinvesteringar för utbyggnaden. Det är även sannolikt att en fullskalig ersättning av fossila bränslen kommer vara beroende av solenergi. Fortsatt forskning behövs därför för att finna nya solcellsmaterial som inte är resursbegränsade så att solenergi kan stå för en större andel av den globala elproduktionen. Övriga förnyelsebara energikällor kommer troligtvis inte ha någon större inverkan på global nivå, men kan få stor lokal betydelse på grund av gynnsamma geografiska förhållanden [15]. Det är alltså av stor vikt att välja platser med optimala förhållanden för energiproduktion. De idealiska platserna för vind- och solkraft är ofta avlägsna områden långt från de platser där energin används och som inte är anslutna till det befintliga elnätet. Solkraft i öknen är ett sådant alternativ som kan producera elektricitet effektivt eftersom solinstrålningen kan vara högre i öknen än på andra platser [21]. Omfattande investeringar i infrastruktur behövs för att bygga ut elnätet så att denna energi ska kunna tas tillvara.

För att elektrobränslen ska slå igenom på en global marknad är det en stor fördel om produktionen är vinstgivande. Idag är detta redan fallet på vissa platser, och det är troligen under dessa förhållanden som bränsleframställningen först kommer att implementeras. När oljepriset stiger och de olika teknikerna som ingår i produktionen utvecklas kommer dessa förhållanden bli allt vanligare och det kommer bli mer och mer ekonomiskt att producera syntetiska bränslen. Eftersom elektrobränslen kan vara ett miljövänligare alternativ till fossila bränslen kan de även komma att gynnas av bensin- och koldioxidskatter i vissa länder [21].

### 4.3 Kritik och rekommendationer för fortsatt arbete

Detta arbete är ett första steg att analysera materialbehovet vid en omställning av energisystemet. Det är viktigt att komma ihåg att projektets scenarier är osäkra och inte någon definitiv framtid. Först och främst finns en osäkerhet gällande det totala energibehovet. Scenariernas totala energibehov till alla sektorer ligger mellan 613

och 644 EJ vilket enligt rapportens beräkningar resulterar i ett behov från primära energikällor (sol, vind, biomassa etc.) på cirka 650-1500 EJ. Dessa energibehov är något lägre, men i ungefär i samma storleksordning som IPCCs scenarier, där det primära energibehovet beräknas ligga inom intervallet 750-1750 EJ år 2100 [11], och verkar därför rimliga. Jämfört med det nutida primära energibehovet på cirka 510 EJ [10] innebär rapportens scenarier däremot en stor uppskalning. Det är inte säkert att energibehovet i transportsektorn och andra sektorer blir så här stort. I ett alternativt scenario skulle man kunna begränsa användningen av fordon och energikrävande processer och utrustning i allmänhet.

Avsikten var dock inte att skapa så realistiska framtidsscenarier som möjligt utan att utforska materialbehovet för en fullständig omställning till elektrobränslen. En delvis omställning är mer rimlig, och skulle leda till minskat materialbehov. Genom att använda olika scenarier med varierande energibehov har en viss hänsyn tagits till en osäker framtid. Beräkningar av materialbehov har alltid gjorts för scenariot med det maximala elbehovet för att på så sätt även täcka in övriga scenerier. Grundligare känslighetsanalyser, där osäkra värden varieras för att avgöra utslaget på resultatet, har inte genomförts då det skulle vara allt för tidskrävande för detta projekt. Detta lämnas därför som ett förslag på vidare arbete inom området.

När en litteraturstudie görs kan det vid flera tillfällen vara svårt att avgöra validiteten på källor och mindre möjlighet finns att kontrollera de siffror som används till beräkningar. För att minska risken för fel har försök gjorts att samla in flera källor för den information som används i rapporten och källorna har jämförts för att kontrollera att de stämmer överens någorlunda väl. Men i många fall har det varit svårt att finna siffror över huvud taget. I de fall då endast värden för specifika experiment har hittats, är det sannolikt att värdena inte är helt representativa för tekniken. Rapporten skulle ha tagit fördel av att ha kontakt med forskare med praktisk expertis inom respektive område för att ytterligare validera informationen. Inga tydliga fall har upptäckts där två källor har stått i direkt konflikt med varandra, men källorna har ofta presenterat något varierande värden där medelvärden valts för beräkningar.

De resultat som har framkommit är i rimlig storleksordning men är naturligtvis osäkra på grund av antaganden och uppskattningar. Ett flertal undersökningar har gjorts som är relaterade till vad som beskrivs i denna rapport och resultaten skiljer sig till viss del men motsäger inte direkt varandra. Att primära förnyelsebara energikällor inte är begränsande för dagens eller framtidens uppskattade behov (vilket antagits i denna rapport) är en slutsats som dragits i flera undersökningar, av bland annat Sanden et al. och Kleijn et al [15, 16]. Sanden et al. kommer fram till att tillgången är två storleksordningar högre än behovet och att direkt omvandling av solenergi är den viktigaste tekniken vid en total övergång till förnyelsebar energi, med vind- och vattenkraft som komplement. I denna rapport var scenario 2, med enbart el och vätgas som fordonsdrivmedel, det mest fördelaktiga med avseende på materialtillgång och skulle vara tekniskt genomförbart. Kleijn et al. baserar sin undersökning på en framtida vätgasekonomi och kommer fram till att potentiella ”show stoppers” skulle vara neodym till vindkraft och elmotorer, ovanliga ämnen i tunnfilmsolceller samt platina till elektrolys och bränsleceller. Därför bör tekniker utan dessa ma-

terial väljas eller utvecklas [16]. Jacobson och Delucchi kommer i sin artikel fram till att världens totala energibehov år 2030 skulle kunna tillfredsställas av enbart el och vätgas, där elen produceras genom till exempel 50% vindkraft, 40% solkraft och 10% övriga förnyelsebara tekniker. De tar då även hänsyn till återvinning av material [34]. Dock undersöks inte elektrobränslen alls, och de skulle kunna vara ett viktigt komplement i framtiden som drivmedel i till exempel fartyg. Tao et al. kommer å andra sidan fram till att dagens solcellstekniker endast kan tillfredsställa cirka 2% av det totala energibehovet år 2100 [45].

Det finns många viktiga aspekter som inte har behandlats och som behöver studeras vidare. Då tiden har varit begränsad har många faktorer valts att förbise eller tagits hänsyn till genom antaganden. Om tidsramen hade varit större skulle fler typer av förnyelsebar energi och fler tekniker kunnat behandlas. Detta för att få en bredare bild och slå ut eventuella resursbegränsningar över fler tekniker. Vidare skulle elbilar kunnat inkluderas i uppskalningen för att exempelvis undersöka resursbegränsningar kopplade till batterierna, vilket är nödvändigt för att kunna ställa elektrobränslen i relation till elbilsdrift. Scenario 2, som minimerar elbehovet, verkar enligt resultatet som det mest genomförbara, men en fordonsflotta till stor del driven direkt av el skulle eventuellt kunna innebära resursbegränsningar (för exempelvis batterier) som ersätter begränsningarna för bränsleproduktionen. I detta scenario används dessutom kol till en större del av värmeproduktionen vilket kräver betydligt mer koldioxidlagring för att få ett koldioxidneutralt energisystem, något som inte undersökts här.

I detta arbete har ingen hänsyn tagits till säkerhetsfrågor eller andra praktiska problem med att introducera nya bränslen. Ett annat problem som inte tagits upp är övriga miljömässiga aspekter av bränsleproduktionen. Hänsyn har inte tagits till att förbränning av kolväten släpper ut andra ämnen än koldioxid vilka bidrar till luftföroreningar [18]. Problem med övergödning, bildande av kväveoxider, avgasernas andra giftiga ämnen och skadliga partiklar skulle fortfarande kvarstå. Diesel bildar exempelvis flera cancerframkallande ämnen vid förbränning [138].

Om en uppskalning genomfördes skulle det jämfört med dagens sätt att framställa bränsle innebära ett större behov av energi då framställningen av elektrobränslen är en energikrävande process. De miljömässiga vinningarna kan dock väga upp för priset av den extra energin. En koldioxidneutral värld skulle innebära en mindre risk för klimatförändringar och en potentiellt stabilare miljö. Systemet har tagits fram med syftet att minska utsläpp av växthusgaser, men frågan är om så verkligen blir fallet. En storskalig materialutvinning kan bidra till utsläpp av växthusgaser och uppbyggnaden av anläggningar för bränsleproduktion likaså. Även om utsläppen kan reduceras finns det fortfarande många andra typer av miljöpåverkan såsom mark- och vattenanvändning, utsläpp av giftiga ämnen och så vidare. Dessa effekter måste undersökas mera noggrant för att avgöra den totala miljöpåverkan från energisystemet.

Det kan även diskuteras om det är mest fördelaktigt att lagra infångad koldioxid under marken eller använda koldioxiden för att tillverka elektrobränslen. Ur ett klimatperspektiv kan det vara bättre att lagra koldioxiden med hjälp av CCS-teknik (Carbon Capture and Storage) istället för att konvertera koldioxiden till ett bränsle

som vid förbränning släpper ut koldioxiden igen. Om koldioxiden fångas in från biomassa eller luft kommer CCS att minska koldioxidkoncentrationen i atmosfären. Idag finns dock flera hinder innan CCS kan vara tillgängligt i stor skala. Och även om CCS skulle kunna användas är det osäkert om koldioxiden alltid bör lagras. Ett argument för att konvertera koldioxid till elektrobränslen istället för att använda CCS, är bristen på andra förnyelsebara bränslealternativ för transportsektorn. Om inga andra bränslen är tillgängliga eller tekniskt möjliga att producera, till exempel om biomassa utnyttjas maximalt och bränsleceller och batterier inte kan skalas upp mer, så kanske endast elektrobränslen finns kvar som alternativ till fossila bränslen [18].

Något som är väldigt viktigt för uppskalningen i fråga som behöver studeras vidare är åtgången av material i de olika processerna. Hur mycket av katalysatorn går förlorad under en livslängd? Hur mycket kan återvinnas av de redan nu värdefulla metallerna? Hur förväntas övrig efterfrågan på material se ut de kommande åren? En del siffror har hittats men långt ifrån alla som skulle behövas för att ta detta i beaktande annat än i spekulationer.

Det finns alltså många osäkerheter och stort utrymme för fortsatt forskning som behöver genomföras för att bättre kunna förstå den tekniska och ekonomiska potentialen hos elektrobränslen.

# 5

## Slutsats

Med utgångspunkt i den fakta och de resultat som har tagits fram i rapporten och de element som tagits upp i diskussionen, presenteras här en slutsats om huruvida det är möjligt att genomföra en omställning till elektrobränslen.

Utifrån det möjliga framtidsscenarioet som har arbetats fram, med avseende på de tekniker och material som har undersökts, bör det vara resursmässigt möjligt att till år 2100 genomföra en uppskalning av elektricitet- och elektrobränsleproduktionen för att förse transportsektorn med elektrobränslen. Scenarioet innebär en framtid med användning av 50% metanol, 25% metan och 25% FT-bränslen. SOEC står för 50% av vätgasproduktionen och alkalisk elektrolys för återstående 50%. Den nödvändiga koldioxiden fångas in från förbränning av biomassa samt luftinfångning. Elbehovet som det resulterar i täcks till 15% av mono- och multikristallina solceller och resterande av vindkraft.

Gällande resursbegränsningar hos enskilda processer för framställning av elektrobränslen stöter vissa av teknikerna som undersökts på begränsningar vid stor uppskalning. Inom elproduktion stöter såväl solceller som vindkraft på resursbegränsningar. För tunnfilmssolceller är kadmium, tellur och indium begränsande till den grad att deras bidrag till den globala elproduktionen antagligen kommer bli ytterst litet. Hos kristallina solceller är silver begränsande. Hos uppskalningen av vindkraftverk utgör kvantiteten av bly en potentiell begränsning. Detta påverkar dock bara uppskalningen på det vis att inte 100% användning av den undersökta typen av offshore-vindkraftverk kommer kunna ske.

Resursbegränsningar kommer även kunna uppstå hos elektrolys. Potentiellt kan platin vara en begränsad resurs hos alkalisk elektrolys samt för PEM, och det är även troligt att iridium och rutenium är begränsande vid en stor uppskalning. För SOEC finns det en risk för att zirkonium och yttrium blir begränsande. Utifrån detta går det att se att både platinametaller och de sällsynta jordartsmetallerna kommer att vara kritiska för en uppskalning med de tekniker som har undersökts. Det är även hos elektrolysen som den största osäkerheten ligger då få siffror har hittats för materialbehov.

Sammanfattningsvis visar resultatet av arbetet att det kan vara tekniskt och resursmässigt möjligt att producera den mängd elektrobränslen som krävs för ett framtida globalt energisystem. Med rätt kombination av tekniker, rätt materialval och fortsatt forskning bör en sådan framtid vara rimlig att uppnå. Detta innebär inte nödvändigtvis att uppskalningen kommer kunna genomföras i praktiken, då det sannolikt finns ekonomiska och sociala problem som begränsar möjligheterna

för produktion av elektrobränslen. Resultatet bygger även på många osäkra antaganden och uppskattningar, och beräkningarna bör främst användas för att ge en uppfattning av storleksordningen av material- och resursbehov som uppskalningen kommer resultera i.

# Referenser

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change (2015). *Adoption of the Paris Agreement*. s. 22. Artikel 4.
- [2] IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, red. Core Writing Team, Pachauri, R.K. och Meyer, L.A. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [3] Naturvårdsverket (2012). *Underlag till en färdplan för ett Sverige utan klimatutsläpp 2050*. Stockholm: Bilagor till rapport 6537, ss. 3-4.
- [4] Miljö- och energidepartementet (2012). *Fossiloberoende fordonsflotta - ett steg på vägen mot nettonollutsläpp av växthusgaser*. <http://www.regeringen.se/rattsdokument/kommittedirektiv/2012/07/dir.-201278> (2016-02-15).
- [5] Conrado, R.J. et al. (2013). Electrofuels: A new paradigm for renewable fuels. *Advanced Biofuels and Bioproducts*, vol. 1, ss. 1026–1053.
- [6] Wu, M. et al. (2009). Water consumption in the production of ethanol and petroleum gasoline. *Environmental Management*, vol. 44, nr 5, ss. 981–997.
- [7] Winebrake, J. (2002). Hype or holy grail? the future of hydrogen in transportation. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, vol. 22, nr 2, ss. 20–34.
- [8] Grahn, M. et al. (2014). Utilising excess power: the case of electrofuels for transport. *Systems Perspectives on Renewable Power*, ss. 128–137.
- [9] Nikoleris, A. och Nilsson, L.J. (2013). *Elektrobränslen - en kunskapsöversikt*. Lund: Lunds Tekniska Högskola. (Lunds Tekniska Högskola rapport: 85).
- [10] van Vuuren, D.P. et al. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, vol. 109, nr 5.
- [11] Bruckner, T. et al. (2014). Energy Systems. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, red. Edenhofer, O. et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, ss. 511-597.

- [12] bp (2015). *2014 in review*. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/2014-in-review.html> (2016-02-15).
- [13] Leckel, D. (2009). Diesel production from fischer-tropsch: The past, the present and new concepts. *Energy & Fuels*, vol. 23, ss. 2342–2358.
- [14] Sørensen, B (2011). *Renewable Energy: Physics, Engineering, Environmental Impacts, Economics & Planning*, fourth edition, ss. 3–34. London: Academic Press.
- [15] Sanden, B., Hammar, L. och Hedenus, F. (2014). *Systems perspectives on renewable power*, chapter 3. Are renewable energy resources large enough to replace non-renewable energy?, ss. 18–31. Chalmers University of Technology.
- [16] Kleijn, R. och van der Voet, E. (2010). Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, nr 9, ss. 2784–2795.
- [17] Grahn, M. et al. (2013). *Description of the global energy systems model GET-RC 6.1*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola. (Chalmers Tekniska Högskola Rapport No: FRT-2013:10).
- [18] Täljegård, M. et al. (2015). Electrofuels – a possibility for shipping in a low carbon future? *Proceedings of International Conference on Shipping in Changing Climates 2015*, vol. 2, nr 1, ss. 405–418.
- [19] Gustafsson, T. och Johansson, A. (2014). *Comparison between Battery Electric Vehicles and Internal Combustion Engine Vehicles fueled by Electrofuels*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
- [20] Ridjan, I. (2015). *Integrated electrofuels and renewable energy systems*. Department of Development and Planning, Aalborg University.
- [21] Graves, C. et al. (2011). Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O with renewable or nuclear energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, nr 1, ss. 1–23.
- [22] Benjaminsson, G. Benjaminsson, J. och Rudberg, R.B. (2013). El till gas - system, teknik och ekonomi. , Svenskt Gastekniskt Center AB.
- [23] Office of energy efficiency & renewable energy, U.S Department of Energy (2016). *Renewable Electricity Generation*. <http://energy.gov/eere/renewables> (2016-04-06).
- [24] The shift project (2016). *Data portal*. <http://www.tsp-data-portal.org> (2016-04-06).
- [25] Enerdata (2015). *Global Energy Statistical Yearbook 2015*. <https://yearbook.enerdata.net> (2016-04-06).

- [26] bp (2015). Bp statistical review of world energy june 2015 - data workbook. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [27] European Wind Energy Association (2004-2015). *Wind energy's frequently asked questions (FAQ)*. <http://www.ewea.org/wind-energy-basics/faq/> (2016-04-08).
- [28] Martíneza, E. et al. (2009). Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable Energy*, vol. 34, nr 3, ss. 667–673.
- [29] Global Wind Energy Council (2014). *Global Wind Report - annual market update*. [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC\\_Global\\_Wind\\_2014\\_Report\\_LR.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf) (2016-05-10).
- [30] bp (2015). *Wind energy*. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy/wind-energy.html> (2016-05-08).
- [31] Crawford, R.H. (2009). Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, nr 9, s. 2653–2660.
- [32] Fthenakis, V. och Kim, H.C. (2009). Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, nr 6, ss. 1465–1474.
- [33] Hertwich, E. et al. (2015). Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS*, vol. 112, nr 20, ss. 6277–6282.
- [34] Jacobson, M.Z. och Delucchi, M.A. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power. part 1: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, vol. 39, nr 3, ss. 1154–1169.
- [35] Zhang, Y. (2013). Peak neodymium - material constraints for future wind power development. , Uppsala University, Department of Earth Sciences.
- [36] Böer K. W. (2016). *Solar Cells*. <http://www.chemistryexplained.com/Ru-Sp/Solar-Cells.html> (2016-04-05).
- [37] Aldous, S. och Tootman, J. (2000). *How solar cells work*. <http://science.howstuffworks.com/environmental/energy/solar-cell.htm> (2016-04-07).
- [38] Physics.org (2016). *How do solar cells work?* <http://www.physics.org/article-questions.asp?id=51> (2016-04-12).

- [39] IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2014). Snapshot of global pv markets. , IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY.
- [40] Fthenakis, V. (2009). Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, nr 9, ss. 2746–2750.
- [41] Food and Agriculture Organization of the United Nations (2010). *Resources*. <http://www.fao.org/economic/ess/ess-publications/ess-yearbook/ess-yearbook2010/yearbook2010-reources/en/> (2016-04-12).
- [42] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE (2016). Photovoltaics report. , Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE.
- [43] PVEDUCATION.org (2016). *Instructions*. <http://www.pveducation.org/pvcdrom/instructions> (2016-04-12).
- [44] Dunlop, E. et al. (2015). Solar cell efficiency tables (version 45). *Progress in Photovoltaics*, vol. 23, nr 1, ss. 1–9.
- [45] Tao, C.S., Jiang, J. och Tao, M. (2011). Natural resource limitations to terawatt-scale solar cells. *Solar energy materials and solar cells*, vol. 95, ss. 3176–3180.
- [46] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) (2016). Itrpv seventh edition 2016. , International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV).
- [47] Zweibel, K. (2010). The impact of tellurium supply on cadmium telluride photovoltaics. *Science*, vol. 328, nr 5979, ss. 699–701.
- [48] Fthenakis, V. (2004). Life cycle impact analysis of cadmium in cdte pv production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, 4, ss. 303–334.
- [49] Carbon Capture and Sequestration Technologies Program at MIT (2016). *Power Plant Carbon Dioxide Capture and Storage Projects*. [http://sequestration.mit.edu/tools/projects/index\\_capture.html](http://sequestration.mit.edu/tools/projects/index_capture.html) (2016-03-13).
- [50] Haszeldine, S.R. (2009). Carbon capture and storage: How green can black be? *Science*, vol. 325, nr 5948, ss. 1647–1652.
- [51] Kanniche, M. et al. (2010). Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO<sub>2</sub> capture. *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, nr 1, ss. 53–62.
- [52] Wang, M. et al. (2011). Post-combustion CO<sub>2</sub> capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 89, nr 9, ss. 1609–1624.

- [53] Berkenpas M.B., Rao A.B. och Rubin E.S. (2004). *An Integrated Modelling Framework for Carbon Management Technologies. Volume 1 – Technical Documentation: Amine-Based CO<sub>2</sub> Capture and Storage Systems for Fossil Fuel Power Plant*. Pittsburgh, Pennsylvania: Carnegie Mellon University.
- [54] Luis, P. (2016). Use of monoethanolamine (mea) for CO<sub>2</sub> capture in a global scenario: Consequences and alternatives. *Desalination*, vol. 380, ss. 93–99.
- [55] Argyle, M., Fan, M. och Sun, Z. (2011). Supported monoethanolamine for CO<sub>2</sub> separation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, nr 19, ss. 11343–11349.
- [56] Koornneef, J. et al. (2008). Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO<sub>2</sub>. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 2, nr 4, ss. 448–467.
- [57] Buhre, B.J.P. et al. (2005). Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 31, nr 4, ss. 283–307.
- [58] Brix, J. et al. (2010). Oxy-fuel combustion of solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, nr 5, ss. 581–625.
- [59] Klosek, J. och Smith, A.R. (2001). A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes. *Fuel Processing Technology*, vol. 70, nr 2, ss. 115–134.
- [60] Carbon Engineering Ltd. (2016). *What is air capture?* <http://carbonengineering.com/air-capture/> (2016-03-20).
- [61] Harrison, R. och Hester R. (2014). *Geoengineering of the Climate System*, chapter 6, ss. 72–73. RSC Publishing.
- [62] Keith, D. (2016). *Direct Air Capture*. <http://www.keith.seas.harvard.edu/direct-air-capture/> (2016-03-20).
- [63] Goeppert, A. et al. (2012). Air as the renewable carbon source of the future: an overview of co<sub>2</sub> capture from the atmosphere. *Energy & Environmental Science*, vol. 5, nr 7, ss. 7833–7853.
- [64] Deich, N. (2015). *Direct Air Capture Explained in 10 Questions*. <http://www.centerforcarbonremoval.org/blog/2015/9/20/direct-air-capture-explained-in-10-questions> (2016-03-24).
- [65] Lackner, K. (2009). Capture of carbon dioxide from ambient air. *The European Physical Journal*, vol. 176, nr 1, ss. 93–106.
- [66] Keith, D. et al. (2002). *Climate strategy with CO<sub>2</sub> capture from the air*. , Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary.
- [67] Vätgas Sverige (2016). *Fakta om vätgas*. <http://www.vatgas.se/fakta> (2016-03-24).

- [68] Kothari, R., Buddhi, D. och Sawhney, R.L. (2004). Sources and technology for hydrogen production: a review. *International Journal of Global Energy Issues*, vol. 21, nr 1-2, ss. 154–178.
- [69] Holmström, B. (2016). Elektrolys. *Nationalencyklopedin*. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/elektrolys> (2016-03-08).
- [70] Zeng, K. och Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, nr 3, ss. 307–326.
- [71] Ursua, A., Gandia, L.M. och Sanchis, P. (2012). Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, nr 2, ss. 410 – 426.
- [72] Koroneos, C. et al. (2004). Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 29, nr 9, ss. 1443–1450.
- [73] Grandell, L. et al. (2016). Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies. *Renewable Energy*, vol. 95, ss. 53 –62.
- [74] Carmo, M. et al. (2013). A comprehensive review on pem water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, nr 12, ss. 4901–4934.
- [75] E.I. du Pont de Nemours and Company (2016). Nafion pfsa membranes. <http://www.dupont.com/products-and-services/membranes-films/fluoropolymer-films/brands/naion-pfsa-membranes.html> (2016-03-15).
- [76] Ceramtec, Inc (2016). Ceramic membrane separation & purification technologies. <http://www.ceramtec.com/technology/ceramic-solid-state-ionic-technologies/separation-&-purification-technologies/index.php> (2016-03-13).
- [77] Nave, R. (2016). *Electrolysis of Water*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/electrol.html> (2016-03-13).
- [78] Ni, M., Leung, M. och Leung, D. (2008). Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC). *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, nr 9, ss. 2337–2554.
- [79] Laguna-Bercero, M.A. (2012). Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. *Journal of Power Sources*, vol. 203, nr 1, ss. 4–16.
- [80] Beckman, K. (2014). *World's first power-to-liquids production plant opened in Dresden 2014*. <http://www.energypost.eu/worlds-first-power-liquids-production-plant-openeddresden/> (2016-03-13).
- [81] Tao, G. (2006). *FY 2006 Annual Progress Report*. Materials and Systems Research, Inc.

- [82] Badwal, S.P.S. (2014). Review of progress in high temperature solid oxide fuel cells. *Journal of the Australian Ceramics society*, vol. 50, nr 1.
- [83] Brisse, A., Schefold, J. och Zahid, M. (2008). High temperature water electrolysis in solid oxide cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, nr 20, ss. 5375–5382.
- [84] Lu, K. (2014). *Materials in Energy Conversion, Harvesting, and Storage*, chapter 8, ss. 204–284. John Wiley & Sons, Inc.
- [85] Larsson, R. (2016). Katalysator. *Nationalencyklopedin*. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/katalysator> (2016-03-08).
- [86] Muroi, T. (2013). Role of precious metal catalysts. *ChemInform*, vol. 44, nr 40, ss. 301–334.
- [87] Asinger, F. (2014). *Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future*, red. Martin, B. et al. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [88] Yang, R. et al. (2007). A new method of low-temperature methanol synthesis on Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts from CO/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>. *Fuel*, vol. 87, nr 4-5, ss. 443–450.
- [89] Kung, H.H. (1992). Deactivation of methanol synthesis catalysts - review. *Catalysis Today*, vol. 11, nr 4, ss. 443–453.
- [90] Chinchin G.C. et al. (1988). Synthesis of methanol: Part 1. catalysts and kinetics. *Applied Catalysis*, vol. 36, ss. 1–65.
- [91] Metcalfe, I.S., Sahibzada, M. och Sun, J.T. (1999). Deactivation of Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> methanol synthesis catalyst by sintering. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 38, nr 10, ss. 3868–3872.
- [92] Jahanmiri, A. och Kordabadi, H. (2005). Optimization of methanol synthesis reactor using genetic algorithms. *Chemical Engineering Journal*, vol. 108, nr 3, ss. 249–255.
- [93] Spencer, M.S. och Twigg, M.V. (2003). Deactivation of copper metal catalysts for methanol decomposition, methanol steam reforming and methanol synthesis. *Topics in Catalysis*, vol. 22, nr 3, ss. 191–203.
- [94] Krylova, A.Y. (2012). Fischer-tropsch synthesis catalysts as the core of the strategy for obtaining synthetic liquid fuels. *Kinetics and Catalysis*, vol. 52, nr 6, ss. 742–746.
- [95] Centi, G. och Perathoner, S. (2009). Opportunities and prospects in the chemical recycling of carbon dioxide to fuels. *Catalysis Today*, vol. 148, nr 3-4, ss. 191–205.
- [96] Dry, M.E. (1999). Fischer-tropsch reactions and the environment. *Applied Catalysis A: General*, vol. 189, nr 2, ss. 185–190.

- [97] Steynberg, A.P. et al. (2004). *Studies in Surface Science and Catalysis*, chapter Chapter 2: Fischer-Tropsch Reactors, ss. 64–195. Elsevier B. V.
- [98] Sehabieque, L. (2012). *Modeling, Scaleup and optimization of slurry bubble column reactors for Fischer-Tropsch synthesis*. PhD thesis, University of Pittsburgh.
- [99] Maitlis, P.M. (2013). *Greener Fischer-Tropsch Processes for Fuels and Feedstocks*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co.
- [100] Dry, M.E. (2001). High quality diesel via the fischer-tropsch process - a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 77, ss. 43–50.
- [101] Das, T.K. et al. (2005). Fischer-tropsch synthesis: Kinetics and effect of water for a CO/SiO<sub>2</sub> catalyst. *Energy & Fuels*, vol. 17, ss. 1430–1439.
- [102] Ernst, B. et al. (1999). Preparation and characterization of fischer-tropsch active CO/SiO<sub>2</sub> catalysts. *Applied Catalysis A: General*, vol. 186, nr 1-2, ss. 145–168.
- [103] Gines, M.J.L. et al. (1995). Activity and structure-sensitivity of the water-gas shift reaction over cu-zn-al mixed oxide catalysts. *Applied catalysis A: General*, vol. 131, nr 2, ss. 283–296.
- [104] The Engineering Toolbox (u.å). Fuels - higher calorific values. [http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d\\_169.html](http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html) (2016-04-19).
- [105] Energimyndigheten (2011). *Energikunskap*. <http://www.energikunskap.se/sv/FAKTABASEN/Energisystemet/Naturgas/> (2016-02-28).
- [106] Sabatier, P. och Sendersens, J.B. (1902). New synthesis of methane. *Comptes Rendus*, vol. 314, ss. 514–516.
- [107] Rönsch, S. et al. (2016). Review on methanation – from fundamentals to current projects. *Fuel*, vol. 166, nr 4, ss. 279–292.
- [108] Hoekman, K.S. et al. (2010). CO<sub>2</sub> recycling by reaction with renewably-generated hydrogen. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, nr 1, ss. 44–50.
- [109] Schiebahn, S. et al. (2015). Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, nr 12, ss. 4285–4294.
- [110] U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (2016). Mineral commodity summaries 2016. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf>.
- [111] Tiess, G. (2010). Minerals policy in europe: Some recent developments. *Resources Policy*, vol. 35, nr 3, ss. 190–198.

- [112] International Council on Mining & Metals (2012). Trends in the mining metals industry.
- [113] European Commission (2014). Report on critical raw materials for the eu.
- [114] Massari, S. och Ruberti, M. (2013). Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, vol. 38, nr 1, ss. 36–43.
- [115] Mudd, G.M. (2012). Key trends in the resource sustainability of platinum group elements. *Ore Geology Reviews*, vol. 46, ss. 106–117.
- [116] Mikolajczak, C. (2009). *Availability of Indium and Gallium*. [http://www.commodityintelligence.com/images/2010/jan/11%20jan/availability\\_of\\_indium\\_and\\_galliumwhite\\_papermikolajczak\\_sept09.pdf](http://www.commodityintelligence.com/images/2010/jan/11%20jan/availability_of_indium_and_galliumwhite_papermikolajczak_sept09.pdf) (2016-05-12).
- [117] MMTA, Minor Metals Trade Association (u.å.). *Minor Metals in the Periodic Table*. <http://www.mmta.co.uk/metals> (2016-05-12).
- [118] U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (2014). *Mineral commodity summaries 2014*. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>.
- [119] Buttermann, W.C. och Plachy, J. (2013). *Mineral Commodity Profiles, Cadmium*. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. (Open-File Report 02-238). <https://pubs.usgs.gov/of/2002/of02-238/of02-238.pdf> (2016-05-12).
- [120] U.S. Department of Energy (2011). Biomass energy data book. appendix a: Lower and higher heating values of gas, liquid and solid fuels.
- [121] University of Michigan (2000). Human appropriation of the world's fresh water supply. [http://www.globalchange.umich.edu/globalchange2/current/lectures/freshwater\\_supply/freshwater.html](http://www.globalchange.umich.edu/globalchange2/current/lectures/freshwater_supply/freshwater.html) (2016-04-23).
- [122] U.S. Geological Survey (2016). The world's water. <http://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html> (2016-04-23).
- [123] Grigoriev, S. A., Poremsky V. I. och Fateev, V.N. (2004). Pure hydrogen production by pem electrolysis for hydrogen energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, nr 2, ss. 171–175.
- [124] Biomass Energy Centre (2011). Carbon emissions of different fuels. [http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?\\_pageid=75%2C163182&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=75%2C163182&_dad=portal&_schema=PORTAL) (2016-04-28).
- [125] Aarnio, C. (2016). Jordklotet. <http://www.geologia.fi/index.php/sv/geologi/jordklotet/kaernan-manteln-och-jordskorpan#källor> (2016-05-13).
- [126] The Statistics Portal (2016). Production of plastics worldwide from 1950 to 2014. <http://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/> (2016-04-19).

- [127] Earth Forum, Houston Museum of Natural Science (2016). *World Sunshine Map*. <http://earth.rice.edu/mtpe/geo/geosphere/hot/energyfuture/Sunlight.html> (2016-04-21).
- [128] Dunlop, E., Sample, T. och Skoczek, A. (2009). The results of performance measurements of field-aged crystalline silicon photovoltaic modules. *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, vol. 17, ss. 227–240.
- [129] Fang, L. et al. (2013). The status and trends of crystalline silicon pv module recycling treatment methods in europe and china. *Advanced Materials Research*, vol. 724-725, ss. 200–204.
- [130] AQM Copper Inc. (2016). Copper fundamentals.
- [131] Ferrara, F. och Gimelli, A. (2014). Small-scale concentrated solar power (csp) plant: Orcs comparison for different organic fluids. *Energy Procedia*, nr 45, number nr 45, ss. 217–226.
- [132] International Energy Agency (2015). *Hydropower*. <https://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/hydropower/> (2016-05-12).
- [133] Olah, G. (2005). Beyond oil and gas: The methanol economy. *Angewandte*, vol. 18, ss. 2636–2639.
- [134] Ojovan, M. och Lee, W. (2014). *An introduction to nuclear waste immobilisation*. Elsevier.
- [135] Bertuccioli, L. et al. (2014). Study on development of water electrolysers in the eu. , E4tech Sàrl with Element Energy Ltd for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking.
- [136] Jacobson, M. (2009). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy & Environmental Science*, nr 2, number nr 2, ss. 148–173.
- [137] Parkinson, G. (2016). India energy minister says solar power now cheaper than coal. *Renewconomy*.
- [138] American Cancer Society (2015). Diesel exhaust and cancer. <http://www.cancer.org/cancer/cancercauses/othercarcinogens/pollution/diesel-exhaust-and-cancer> (2016-05-14).

# Bilagor

# A

## Processvägar

En sammanställning av de möjliga processvägarna presenteras i tabell A.1 & A.2. Scenario 1 & 3 har nio möjliga kombinationer och scenario 2 har tre möjliga kombinationer vid en 100%-ig uppskalning av varje processväg.

**Tabell A.1:** Sammanställning av bränsle-, vätgas- samt koldioxidbehov för respektive drivmedel och scenario.

Scenario	Drivmedel	Bränslebehov (10 <sup>-6</sup> Emol/år)	Vätgasbehov (EJ/år)	Vätgasbehov (10 <sup>9</sup> ton/år)	Koldioxidbehov (10 <sup>9</sup> ton/år)	Koldioxidbehov
						DAC (10 <sup>9</sup> ton/år)
1	FT-bränslen	21.9	203.2	2.881	20.60	18.74
	Metan	234.8	160.9	2.281	12.45	10.58
	Metanol	285.1	128.0	1.815	13.21	11.34
2	Vätgas	306.9	43.6	0.619	-	-
	FT-bränslen	23.0	213.9	3.033	21.69	19.83
3	Metan	247.2	169.4	2.402	13.11	11.24
	Metanol	300.1	134.8	1.911	13.90	12.04

**Tabell A.2:** Sammanställning av elbehov för respektive drivmedel, elektrolysmetod och scenario.

Scenario	Drivmedel	Elbehov elektrolys (EJ/år)			Elbehov koldioxidinfångning (EJ/år)	Elbehov övrigt (EJ/år)	Elbehov totalt <sup>1</sup> (EJ/år)		
		PEM	Alkalisk	SOEC			PEM	Alkalisk	SOEC
		1	FT-bränslen	712.3	635.0	481.8	159.7	181.4	1170.4
Metan	564.0		502.8	381.5	90.2	181.4	928.4	860.4	725.7
Metanol	448.7		400.0	303.5	96.6	181.4	807.5	753.4	646.2
2	Vätgas	153.0	136.4	103.5	-	181.4	371.6	353.1	316.6
	FT-bränslen	750.0	668.6	507.4	169.0	171.9	1212.1	1121.7	942.5
3	Metan	593.8	529.4	401.7	95.8	171.9	957.3	885.7	743.8
	Metanol	472.5	421.2	319.6	102.6	171.9	830.0	773.0	660.1

<sup>1</sup> inkl. förluster i elnätet (10%)

# B

## Beräkningar av vätgas-, koldioxid- och elbehov

### Givet

Molmassa:  $M$  [g/mol]

Högre värmevärde: HHV [J/g]

Elbehov:  $E$  [EJ/år]

Energibehov bränslen:  $B$  [EJ/år]

Elbehov DAC:  $e_{\text{DAC}}$  [kJ/mol]

Vattenbehov DAC:  $v_{\text{DAC}}$  [ton<sub>v</sub>/ton]

Kemisk formel (antal mol H<sub>2</sub> och CO<sub>2</sub> och för 1 mol bränsle):  $\alpha_{\text{H}_2}$ ,  $\alpha_{\text{CO}_2}$  [mol/(mol bränsle)]

Verkningsgrad/selektivitet för bränslesyntes:  $\eta_b$

Verkningsgrad elektrolys:  $\eta_{\text{el}}$

Omvandlingseffektivitet RWGS-reaktion (Fischer-Tropsch):  $\eta_{\text{CO}}$

### Beräkningar

Energidensitet:  $\rho_E = M_{\text{bränsle}} \cdot \text{HHV}_{\text{bränsle}}$  [J/mol]

Bränslebehov (substansmängd):  $n_b = \rho_E B$  [Emol/år]

Koldioxidbehov:  $n_{\text{CO}_2} = n_b \alpha_{\text{CO}_2} / \eta_b$  [Emol/år]

Koldioxidbehov i ton:  $n_{\text{CO}_2,t} = \frac{n_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2} \cdot 10^{18}}{10^6}$  [ton/år]

Vätgasbehov:  $n_{\text{H}_2} = n_b \alpha_{\text{H}_2} / \eta_b$  [Emol/år]

(För FT-processen adderas vätgasbehovet för RWGS-reaktionen:  $n_{\text{CO}} / \eta_{\text{CO}}$ )

Elbehov för elektrolys:  $E_{\text{el}} = \text{HHV}_{\text{H}_2} n_{\text{H}_2} / \eta_{\text{el}}$  [EJ/år]

Elbehov för koldioxidinfångning:  $E_{\text{DAC}} = e_{\text{DAC}} \cdot n_{\text{CO}_2} \cdot 10^3$  [EJ/år]

Vattenbehov för koldioxidinfångning:  $V_{\text{DAC}} = v_{\text{DAC}} \cdot n_{\text{CO}_2,t}$  [ton<sub>v</sub>/år]

# C

## Beräkningar av materialbehov för bränslesyntes

### C.1 Metanolsyntes

#### Givet

Kapacitetfaktor: Antal produktionstimmar/Antal timmar under ett år = C

Producerat bränsle i energi per kilogram katalysator: A [J/kg]

#### Beräkningar

Från producerad mängd bränsle per katalysatormängd räknas ut hur många kilogram av katalysatorn som behövs för att producera en J. Beräkningsgången är lite annorlunda jämfört med den för Fischer-Tropschprocessen då utgångsvärdena i de båda processerna har haft något annorlunda enheter.

Metanolsyntes:

$$\frac{C}{A} \text{ [kg/J]} \tag{C.1}$$

### C.2 Fischer-Tropschprocessen

#### Givet

Aktivitet (FT):  $a_1$  [omv. mol CO / (h·kg kat.)]

Aktivitet (WGS):  $a_2$  [omv. mol CO / (h·kg Cu.)]

Andel av material i katalysator: q

Produktionstid: T [h/år]

Livslängd (FT): L [år]

Kolmonoxidbehov:  $n_{CO}$  [mol/år]

## Beräkningar

FT-reaktionen:

$$\text{Materialbehov} = \frac{n_{\text{CO}}}{a_1 \text{TL}} \cdot q \text{ [kg/år]} \quad (\text{C.2})$$

RWGS-reaktionen:

$$\text{Materialbehov} = \frac{n_{\text{CO}}}{a_2 \text{T}} \cdot \frac{q}{q_{\text{Cu}}} \text{ [kg]} \quad (\text{C.3})$$

# D

## Beräkningar av materialbehov för elektrolys

### D.1 Alkalisk elektrolys

#### Givet

De genomsnittliga värden för producerad vätgas, elbehov samt mängd kobolt för katalysatorer i kommersiella alkaliska elektrolysörer presenteras i tabell D.1.

**Tabell D.1:** Genomsnittliga värden för producerad vätgas, elbehov samt mängd kobolt för katalysator i kommersiella alkaliska elektrolysörer

	H <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Elbehov (kW)	Kobolt (mg/W)
Genomsnitt	630 [71]	2 842 [71]	8.9 [73]

$$\text{Densitet H}_2 = 0.0899 \text{ kg/Nm}^3 [71] \quad (\text{D.1})$$

#### Beräkningar

Massflödet beräknas med ekvation D.1 och tabell D.1

$$630 [\text{Nm}^3/\text{h}] \cdot 0.0899 [\text{kg/Nm}^3] = 56.6 \text{ kg/h} \quad (\text{D.2})$$

Utifrån massflödet ovan och värden i tabell D.1 beräknades hur mycket vätgas som en nuvarande anläggning kan producera under 1 år samt det motsvarande elbehovet. Utefter det beräknades en nödvändig uppskalningsfaktor (se vätgasbehov i tabell A.1) för att kunna uppskatta det elbehov och den mängd kobolt som en uppskalning skulle resultera i. Resultaten presenteras i tabell D.2.

**Tabell D.2:** Data över uppskalning av befintlig alkalisk kommersiell anläggning för att möta scenariets vätgasbehov, samt resulterad mängd kobolt.

Scenario	H <sub>2</sub> -behov (ton)	Uppskalning	Elbehov (kW)	Kobolt (ton)
2	$6.19 \cdot 10^8$	$1.70 \cdot 10^6$	$4.58 \cdot 10^9$	$4.08 \cdot 10^4$
3	$3.03 \cdot 10^9$	$8.32 \cdot 10^6$	$2.25 \cdot 10^{10}$	$2.00 \cdot 10^5$

## D.2 PEM-elektrolys

### Givet

Mängd katalysator per ytenhet:  $a$  [kg/m<sup>2</sup>]

Kostnad Nafion:  $b$  [\$/m<sup>2</sup>]  $\iff c$  [ $\frac{\$}{\text{m}^3\text{H}_2} \cdot \text{h}$ ]

Molmassa, vätgas:  $M$  [kg/mol]

Densitet för vätgas vid standardtryck och -temperatur:  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

Katalysatorlivslängd:  $L$  [år]

Produktionstid:  $T$  [h/år]

Vätgasbehov:  $n_{\text{H}_2}$  [mol/år]

### Beräkningar

$$\text{Materialbehov} = a \frac{c M}{b \rho} \frac{1}{TL} n_{\text{H}_2} \text{ [kg/år]} \quad (\text{D.3})$$

för anodsidan. På katodsidan multipliceras (D.3) med en andel platina på 40%. För den totala mängden material som behöver användas samtidigt utelämnas livslängden  $L$  i ekvationen.

**Tabell D.3:** Data över uppskalning av befintlig kommersiell PEM-anläggning för att möta scenariets vätgasbehov, samt resulterad mängd metaller.

Scenario	H <sub>2</sub> -behov (mol)	Elbehov (EJ)	Ir/Ru (ton)	Pt (ton)
2	$3.07 \cdot 10^{14}$	153	2 460	982
3	$1.5 \cdot 10^{15}$	750	12 000	4 810

# E

## Koldioxidberäkningar

### Allmänna formler

Koldioxidbehov:  $n_{\text{CO}_2} = n_b \alpha_{\text{CO}_2} / \eta_b$  [Emol/år]

Koldioxidbehov i ton:  $n_{\text{CO}_2,t} = \frac{n_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2} \cdot 10^{18}}{10^6}$  [ton/år]

Molmassa:  $M_{\text{CO}_2}$  [g/mol]

### E.1 Mängden koldioxid i biomassa

#### Givet

Mängd biomassa :  $B_m$  [EJ]

Genomsnitt CO<sub>2</sub> utsläpp:  $u_{\text{bio}}$  [kg/GJ]

#### Beräkningar

Mängd genererad CO<sub>2</sub> från biomassa:  $B_m \cdot u_{\text{bio}}$

### E.2 Koldioxidinfångning från förbränning

#### Givet

Verkningsgrad:  $\eta_{\text{CO}_2}$

#### Beräkningar

Infångad CO<sub>2</sub>:  $B_m \cdot u_{\text{bio}} \cdot \eta_{\text{CO}_2}$

### E.3 DAC

#### Givet

Genomsnittligt elbehov för DAC:  $e_{\text{DAC}}$  [kJ/mol]

## Beräkningar

Totalt elbehov för CO<sub>2</sub>-infångning från DAC:  $E_{\text{DAC}} = e_{\text{DAC}} \cdot n_{\text{CO}_2} \cdot 10^3$  [EJ/år]

# F

## Beräkningar av materialbehov för elproduktion

### F.1 Vindkraftverk

#### Givet

Kapacitetsfaktor: Antal produktionstimmar/Antal timmar under ett år = C

Effekt per vindkraftverk: P [W]

#### Beräkningar:

Energi producerat per år och vindkraftverk

$$\frac{J}{\text{år}} = \frac{P \cdot s}{\text{år}} \cdot C \quad (\text{F.1})$$

Antal vindkraftverk för att producera 1 EJ per år

$$\frac{\text{Vindkraftverk}}{\text{EJ}} = \frac{1 \text{ EJ}}{J/\text{år}} \quad (\text{F.2})$$

**Tabell F.1:** Antal vindkraftverk per EJ/år

	800 kW onshore	2 MW offshore
P [W]	800 000	2 000 000
J/år	$7.57 \cdot 10^{12}$	$1.58 \cdot 10^{12}$
Antal vindkraftverk	132 000	63 400

**Tabell F.2:** Materialbehov för vindkraftverk

	Material per vindkraftverk		Totalt materialbehov för 1 EJ/år	
	800 kW onshore (ton)	2 MW offshore (ton)	800 kW onshore (ton)	2 MW offshore (ton)
Stål	169	296	22 300 000	18 800 000
Aluminium	0.325	0.84	42 900	53 300
Koppar	2.29	5.5	302 000	349 000
Bly	0	7.58	0	481 000
Plaster	2.4	4.18	317 000	265 000
Betong	383	2100	50 500 000	133 000 000
Grus	0	300	0	19 000 000
Neodym	-	0.3	-	19 000

## F.2 Solceller

### Givet:

Antal ton material som krävs för att producera 1 EJ:  $m_{m,EJ}$  [ton/1 EJ]

Antal solsekunder på ett år:  $s_{sol}$  [t]

### Beräkningar:

$$\frac{m_{m,EJ}}{\text{Solsekunder på ett år}} = \frac{\text{Ton}}{1 \text{ EJ}} \text{ Producerat på ett år} \quad (\text{F.3})$$

**Tabell F.3:** Den mängd material som beräknas behövas för att producera en GW.

Solcellsmaterial	$\frac{\text{ton}}{\text{GW}}$
Silver	22.8
Kadmium	34.15
Tellur	130
Indium	83

# G

## Beräkningar av framtida produktion av platinametaller

### Givet

Producerad mängd av olika platinametaller i några större gruvor 2010:

$$m_{\text{Pt}} = 12.009 \text{ ton}$$

$$m_{\text{Pd}} = 18.404 \text{ ton}$$

$$m_{\text{Rh}} = 0.793 \text{ ton}$$

$$m_{\text{Ru}} = 0.7 \text{ ton}$$

$$m_{\text{Ir}} = 0.3 \text{ ton}$$

$$m_{\text{Au}} = 1.308 \text{ ton}$$

enligt tabell 11 i [115].

Två framtidsmodeller över hur mycket platinametaller som produceras totalt år 2100:

$$T_1 = 250 \text{ ton}$$

$$T_2 = 3\,000 \text{ ton}$$

enligt figur 7 i [115], där modell 1 antar de nuvarande resurserna  $r_1 = 90\,700$  ton platinametaller och modell antar  $r_2 = 338\,400$  ton.

### Beräkningar

Total produktion av platinametaller i gruvorna från tabell 11:

$$m_{\text{tot}} = m_{\text{Pt}} + m_{\text{Pd}} + m_{\text{Rh}} + m_{\text{Ru}} + m_{\text{Ir}} + m_{\text{Au}} = 33\,514 \text{ ton}$$

Andelar av intressanta metaller:  $a = \frac{m_{\text{metall}}}{m_{\text{tot}}}$

$$a_{\text{Pt}} = 0.36$$

$$a_{\text{Ru}} = 0.02$$

$$a_{\text{Ir}} = 0.01$$

Nuvarande resurser av platinametaller (medelvärde av modell 1 och 2):

$$r = \frac{r_1 + r_2}{2} = 214\,550 \text{ ton}$$

Resurser av intressanta metaller:  $r_{\text{metall}} = a_{\text{metall}} r$  [ton]

$$r_{\text{Pt}} = 77\,200 \text{ ton}$$

$$r_{\text{Ir}} = 2\,150 \text{ ton}$$

Total produktion av platinametaller år 2100 (medelvärde av modell 1 och 2):

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2} = 1\,625 \text{ ton}$$

Produktion av intressanta metaller år 2100:  $P_{\text{metall}} = a_{\text{metall}} T$  [ton/år]

$$P_{\text{Pt}} = 585 \text{ ton/år}$$

$$P_{\text{Ru}} = 32.5 \text{ ton/år}$$

$$P_{\text{Ir}} = 16.25 \text{ ton/år}$$