

# CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

KANDIDATARBETE

---

## El och biomassa i svensk basindustris planer för en omställning mot noll netto-utsläpp

POTENTIELLA UTVECKLINGSVÄGAR FÖR INDUSTRIERNA  
CEMENT, KEMI, RAFFINADERI, SKOGSNÄRING OCH STÅL

---

Carl Emme  
Adam Fast  
Fanny Malmgren  
Evelina Nyqvist  
Jakob Streman  
Shukri Yasin



**CHALMERS**

9 juni 2019

## Abstract

This report evaluates the role of the energy carriers: electricity and biomass in the transformation of the Swedish primary industries towards zero emissions at 2045. The industries studied are the ones that are the most emission intensive in Sweden: cement, chemistry, refinery, forest sector and steel.

Fossil Free Sweden has drawn up pathways for the primary industries to reach the Swedish environmental goal of achieving zero emissions at 2045. But they do not discuss how the industries affect one another. SWECO and IVA have quantified the energy need for 2045 but does not describe how the change would happen in time nor what assumptions they made.

The goal with this report is to analyze the change in energy demand and carbon dioxide emissions from the primary industry with regard to different technical pathways. From these pathways two extreme cases were estimated, one with the maximum electricity usage and another with maximum biofuel usage. The demands add up to 56 TWh electricity and 68 TWh biofuel. This can be compared with today's energy demand of 28 TWh electricity and 51 TWh biofuel but also the total energy production in Sweden, 160 TWh electricity and 143 TWh biofuel. The conclusions from this study are:

- Zero net emissions of greenhouse gases will not be achieved by 2045 because the refineries are not able to capture all their emissions. The Recommended adaptation is the one which is closest to zero net emissions with an energy demand of 51 TWh electricity and 61 TWh biofuel. The green house emission is 0,9 CO<sub>2</sub>-ekv .
- The technologies that needs to be introduced and developed are:
  - Industrial hydrogen reduction of iron pellets
  - CCS with befitting infrastructure
  - Power To Gas
  - Black liquor gasification
  - Industrial production of hydrogen gas
  - Fortified power grid
  - Industrial production of biofuels

## Sammanfattning

Denna rapport utvärderar vilken roll energibärarna el och biomassa förväntas få i svensk basindustris omställning mot noll-nettutsläpp av växthusgaser. De branscher som studeras är cement, kemi, raffinaderi, skogsnäring samt stålindustrin vilka tillsammans står för huvuddelen av koldioxidutsläppen från svensk industri.

Med bakgrund av Sveriges miljömål om noll netto-utsläpp av växthusgaser 2045 har Fossilfritt Sverige tagit fram färdplaner för respektive industris omställning, men de diskuterar inte hur omställningen av industrierna kan påverka varandra. SWECO och IVA har kvantifierat energibehovet år 2045, men inte tydligt beskrivit hur omställningen kan se ut över tid eller vilka antaganden som gjorts.

Målet för studien är att med utgångspunkt i en nulägesanalys, analysera hur basindustrins energianvändning och utsläpp av växthusgaser kan förväntas förändras, givet olika tekniska utvecklingsvägar. Utifrån dessa olika framtids-scenarier har två olika extremfall uppskattats där maximal el- och bibränsleanvändning uppgår till 59 TWh respektive 70 TWh. Det kan ses i perspektiv till dagens energianvändning i samma industrier som är 28 TWh el och 51 TWh bibränsle, samt den totala elproduktionen i Sverige som är 160 TWh och den totala bibränsleanvändningen som var 143 TWh.

Utifrån denna studie har följande slutsatser konstaterats:

- Noll netto-utsläpp av växthusgaser åstadkoms inte till år 2045 på grund av att raffinaderierna inte kan fånga in 100% av utsläppen. Den omställning som kommer närmast noll netto-utsläpp av växthusgaser är den rekommenderade, som studien tagit fram. Den kräver 51 TWh el och 61 TWh bibränsle. Växthusgasutsläppen blir 0,9 CO<sub>2</sub>-ekv
- Tekniker som behöver introduceras eller utvecklas är:
  - Industriell vätgasreduktion av järnpellets
  - CCS med tillhörande infrastruktur
  - Power To Gas
  - Svartlutsförgasning
  - Industriell vätgasproduktion
  - Förstärkt elnät
  - Industriell produktion av förädlade bibränslen

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Metod</b>	<b>3</b>
2.1	Nulägesanalys och processbeskrivning . . . . .	3
2.2	Scenarioanalys . . . . .	4
2.2.1	Antaganden och beräkningar . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Nulägesanalys och processbeskrivning</b>	<b>12</b>
3.1	Cement . . . . .	13
3.1.1	Energianvändning och utsläpp av växthusgaser . . . . .	14
3.1.2	Processbeskrivning . . . . .	16
3.2	Kemiindustri . . . . .	17
3.2.1	Energianvändning och utsläpp av växthusgaser . . . . .	17
3.2.2	Processbeskrivning . . . . .	18
3.3	Raffinaderi . . . . .	19
3.3.1	Energianvändning och utsläpp av växthusgaser . . . . .	19
3.3.2	Processbeskrivning . . . . .	20
3.4	Skogsnäring . . . . .	21
3.4.1	Energianvändning och utsläpp av växthusgaser . . . . .	22
3.4.2	Processbeskrivning av kemiska massabruk . . . . .	23
3.4.3	Processbeskrivning av pappersbruk . . . . .	26
3.5	Stålindustri . . . . .	27
3.5.1	Energianvändning och utsläpp av växthusgaser . . . . .	27
3.5.2	Processbeskrivning . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Scenarier för industriernas framtid</b>	<b>32</b>
4.1	Cement . . . . .	32
4.1.1	C0 - Referens . . . . .	35
4.1.2	C1 - Färdplan . . . . .	36
4.1.3	C2 - Elektrifiering . . . . .	37
4.1.4	C3 - CCS, Calcium looping . . . . .	38
4.1.5	C4 - Biobränsle . . . . .	39
4.2	Kemiindustri . . . . .	39
4.2.1	K0 - Referens . . . . .	41
4.2.2	K1 - Biobränsleintensivt . . . . .	42
4.2.3	K2 - Elektrifiering . . . . .	43
4.3	Raffinaderi . . . . .	43
4.3.1	R0 - Referens . . . . .	44
4.3.2	R1 - Utbyggnad . . . . .	45

4.3.3	R2 - CCS . . . . .	46
4.3.4	Andra tänkbara utvecklingsvägar . . . . .	47
4.4	Skogsnäring . . . . .	47
4.4.1	SK0 - Referens . . . . .	49
4.4.2	SK1 - Färdplan och effektivisering . . . . .	51
4.4.3	SK2 - Svartlutsförgasning med ökad elproduktion . . . . .	52
4.4.4	SK3 - CCS . . . . .	53
4.5	Stålintusti . . . . .	54
4.5.1	ST0 - Referens . . . . .	56
4.5.2	ST1 - Färdplan genomförs . . . . .	57
4.5.3	ST2 - Extrem elektrifiering . . . . .	58
4.5.4	ST3 - Biomassa + CCS . . . . .	59
4.6	Summering av framtidsscenariernas extremfall . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>61</b>
5.1	Maximalt behov av förädlade biobränslen . . . . .	61
5.2	Maximalt behov av el . . . . .	62
5.3	Maximalt nyttjande av CCS . . . . .	63
5.4	Rekommenderade omställningsåtgärder . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Syntes</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>Rekommendationer för framtida studier</b>	<b>68</b>
	<b>Referenser</b>	<b>69</b>

# Ordlista

**BF** - Blast Furnace, masugn

**Biobränsle** - Bränsle som har tillverkats av biomassa [1]

**Bioenergi** - Energi som utvinns från biomassa [2]

**Biomassa** - Förnybar energikälla som består av energigrödor eller flis, grenar och andra restprodukter från skogsnäringen och jordbruk [3]

**CCS** - Carbon capture and storage, är en teknik för att samla upp koldioxid och lagra den geologiskt

**EAF** - Electrical Arc Furnace, ljusbågsugn

**Energibärare** - Ämne som kan lagra eller transportera energi [4]

**HYBRIT** - HYdrogen BReakthrough Ironmaking Technology, initiativ för att införa vätgasbaserad reduktion av järnmalm

**Hydrering** - En kemisk reaktion där vätgas adderas till en kemisk förening för att åstadkomma en reduktion

**Koldioxidekvivalenter** - Ett gemensamt mått för olika växthusgaser i syfte att lättare kunna jämföras[5]

**Krackeranläggning** - Bryter ner långa kolväten till korta kolväten

# 1 Inledning

Genom Parisavtalet har Sverige förbundit sig att inom de närmsta decennierna minska sina utsläpp av växthusgaser, för att nå det globala målet att begränsa jordens temperaturhöjning till under 2°C [6]. Ett led i detta arbete är att Sveriges riksdag antagit ett klimatpolitiskt ramverk, som fastslår att Sverige 2045 ska ha noll nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären för att därefter uppnå negativa utsläpp [7].

För att genomföra förändringen krävs omställningar i hela samhället, inte minst inom Sveriges basindustri. I dagsläget står industrin för cirka en tredjedel av landets totala växthusgasutsläpp [8]. Ett led i detta arbete är regeringens initiativ Fossilfritt Sverige [9]. Fossilfritt Sverige har tillsammans med industrin arbetat fram industrispecifika färdplaner som ger en bild av vad respektive bransch ser som framkomliga vägar, men gör ej en sammanställning. Andra organisationer och företag, som till exempel IVA och SWECO, har tagit fram egna rapporter där man kvantifierar de fossilfria energibehoven 2045, men inte gått in i detalj på hur detta ska genomföras eller bakomliggande antaganden. Den här rapporten ämnar att expandera kunskapsläget genom att inkludera möjliga omställningsvägar, teknikutveckling samt energibehov ur ett tidsperspektiv för att uppnå noll nettoutsläpp av växthusgaser.

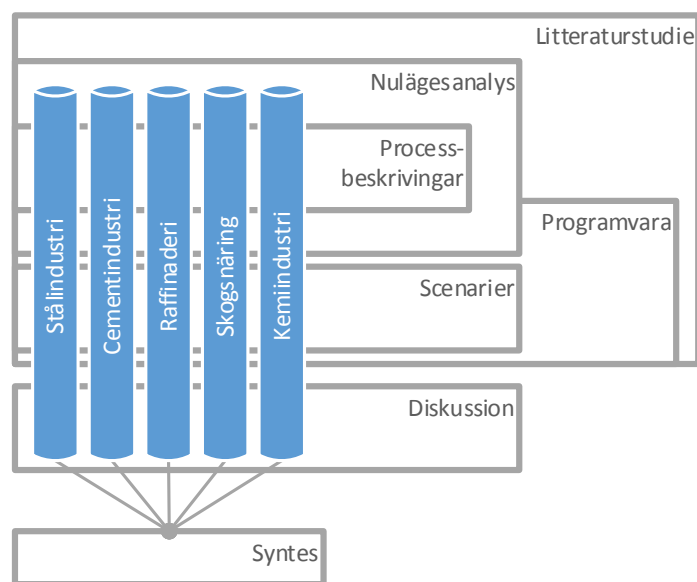
I takt med industrins utfasning av fossila bränslen kommer nya energibärare som el och biomassa bli allt mer viktiga i industriernas verksamhet [10]. Den här rapporten utvärderar rollen som energibärarna el och biomassa förväntas få i omställningen, i de fem industrigrenar som står för störst andel av industrins utsläpp av växthusgaser [8]: cement, kemisk industri, raffinaderier, skogsnäringen och stål. Rapporten riktas mot beslutsfattande organ inom politiken och industrin med syfte att identifiera potentiella synergier eller målkonflikter mellan branscher och ge underlag för hur en omställning kan se ut ur ett energisystemperspektiv.

Målet är att analysera utvecklingsvägar för industrierna med fokus på energibärare och utsläpp över tid. Det delas upp i delmål:

- Vilka kvantiteter el och biomassa krävs för att åstadkomma noll nettoutsläpp av växthusgaser till år 2045?
- Var gör biomassan mest nytta?
- Vilken teknikutveckling behöver ske?

## 2 Metod

I figur 1 visualiseras studiens arbetsgång. Studien har varit uppdelad i huvudmomenten nulägesanalys och scenarioanalys. I nulägesanalysen ingår delmomentet processbeskrivningar. De fem industrierna har studerats parallellt i alla moment, som byggts på litteraturstudier och därtill har programvara använts för beräkningar och visualisering. I diskussionen kopplas de olika industrierna samman till en syntes.



Figur 1: Flöde över projektets metod.

### 2.1 Nulägesanalys och processbeskrivning

Litteraturstudier har primärt använts som underlag för nulägesanalys och processbeskrivning. Information gällande dagens energianvändning och utsläpp samt inbördes korrelation, produktionsprocesser inom respektive industri samt ny teknik har hämtats från befintlig litteratur. Information har hämtats ifrån branschorganisationer, myndigheter, forskningsstudier samt från företag inom branscherna. Visualiseringar har gjorts med hjälp av programvarorna Visio och Excel.



## 2.2 Scenarioanalys

Scenarioanalys har gjorts från år 2015 till år 2045 där produktion, energianvändning och växthusgasutsläpp beräknats och visualiserats i form av diagram i Excel. Nulägesanalysen och processbeskrivningen har använts som utgångspunkt och därtill har information om möjliga omställningar undersökts och rimliga antaganden gjorts. Slutligen har ett antal utvecklingsvägar i respektive industri konstruerats vilka redovisas i figur 2. Ett referensscenario har skapats för varje industri. Det syftar till att visualisera verksamheten om den fortgår enligt nuvarande läge.

Cementindustri	C0: Referensscenario	C1: Färdplan	C2: Elektrifiering	C3: CCS	C4: Biointensivt
Kemiindustri	K0: Referensscenario	K1: Biointensivt	K2: Elektrifiering	-	-
Raffinaderi	R0: Referensscenario	R1: Utbyggnad	R2: CCS	-	-
Skogsnäring	SK0: Referensscenario	SK1: Färdplan och effektivisering	SK2: Svartlutsförgasning med ökad elproduktion	SK3: CCS	-
Stålindustri	ST0: Referensscenario	ST1: Färdplan	ST2: Extrem elektrifiering	ST3: Biointensivt och CCS	-

Figur 2: Överblick över respektive industris scenarier.

### 2.2.1 Antaganden och beräkningar

I scenarioanalysen har ett flertal antaganden gjorts som gäller för samtliga industrier och scenarier:

- Den totala produktionen är konstant enligt dagens nivå.
- Elproduktionen i Sverige är fossilfri.
- Fossila bränslen kan substitueras med biobränslen av likvärdig kvalitet.

Utöver dessa antaganden har varje bransch scenariospecifika antaganden, de redovisas nedan.

## Cementindustrin

Tabell 1: Sceneriespecifika antaganden för cementindustrin.

Scenario C0	Scenario C1	Scenario C2
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Energieffektivisering(EF)</li> <li>1% var femte år</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* EF</li> <li>* CCS nyttjar el</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* EF</li> <li>* Ny fabrik med plasmaugn i Slite 2030 och i Skövde 2035.</li> <li>* CCS 100% infågning</li> <li>* CCS nyttjar el</li> </ul>
Scenario C3	Scenario C4	
<ul style="list-style-type: none"> <li>* EF</li> <li>* CCS nyttjar termisk energi</li> <li>* CCS 90% infågning</li> <li>* CCS appliceras i Slite 2030 och 2035 i Skövde</li> <li>* Spillvärme används till elproduktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* EF</li> <li>* Biobränsle ersätter fossila bränslen successivt</li> </ul>	

I tabell 1 presenteras de antaganden som har gjorts vid konstruktion av scenarierna. I C0 har energieffektiviseringen med 1% antagits

Ett antal beräkningar har gjorts för att göra scenarierna. Det ökade energibehovet i C1 är för CCS är taget från [11],[12],[13]. I C2 har energianvändningen beräknats genom att energibehovet per ton klinker (4,4 GJ/ton klinker) är framtagen ur [14].

Fabriken i Degerhamn kommer läggas ner under 2019[15], produktionen ska flyttas till Fabriken i Slite och Norge[16]. I Scenarioanalysen antas all Degerhamns produktion flyttas till fabriken i Slite.

Beräkningar har gjorts för att erhålla cementindustrins energiförbrukningen, eftersom Energimyndigheterna inte anger det specifikt på grund av sekretess då Cementa är den enda aktören som producerar cement i Sverige. Klinkerproduktion och respektive direkt energiförbrukning för åren 2013 har hämtats från Slitefabrikens informationsblad utskick [17] för alla Cementas fabriker. Skövdefabrikens energiförbrukning per ton klinker år 2018 är bekräftat via kontakt med företaget [18]. Men för de övriga fabriker saknas denna exakta data. För Degerhamn har det antagits att 2017:s data är likvärdig år

2013. Däremot har Slitefabrikens klinkerproduktion ökat enligt Cementas miljödata[19] fram till 2016. Den estimerades till att ha ökat 10% mellan 2013 och 2017. Ingen uppdaterad information kring Slites energiförbrukning per ton klinker finns så den har antagits vara samma. Sammantaget uppskattades det totala energibehovet till 2,76 TWh och 3,06 TWh för år 2013 respektive 2017.

För att beräkna bränsle och elbehovet har det totala bränslebehovet år 2016 tagits fram från [20] och därefter har den subtraherats från det totala energibehovet för att få fram elbehovet. Bränsleandelen fås från [21]

## Kemiindustrin

Tabell 2: Sceneriespecifika antaganden för kemiindustrin. Antagande EF samt M.U baserade på [22].

Scenario K0	Scenario K1	Scenario K2
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Energieffektivisering på 500 GWh till 2030. (EF)</li> <li>* 10% minskning av utsläpp av växthusgaser till följd av effektivisering. (M.U)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* EF</li> <li>* M.U</li> <li>* Fossila bränslen och råvaror substitueras av biobaserade bränsle och råvaror med 20% var femte år fram till 2045.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* EF</li> <li>* M.U</li> <li>* Power To Gas-teknik implementeras 2030.</li> <li>* CCS infångning 100% till 2035.</li> </ul>

I tabell 2 redovisas de specifika antaganden som legat till grund för konstruerandet av framtidsscenario för kemiindustrin.

I scenario K2 beräknas det ökade energibehovet när CCS införs med värdet från IVAs rapport [23]. Elbehovet för CCS beräknas vara 0,25 MWh per ton koldioxid.

## Raffinaderi

Tabell 3: Sceneriespecifika antaganden för raffinaderiindustrin

Scenario R0	Scenario R1	Scenario R2
	<ul style="list-style-type: none"><li>* Utbyggnader sker var tionde år på Preem.</li><li>* Elförbrukning konstant.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>* CCS införs 2030 [24].</li><li>* CCS besparar 70% av koldioxidutsläppen [24].</li><li>* Det ökade behovet av termisk energi tillgodoses av fossila bränslen, som inte påverkar utsläppen.</li></ul>

I tabell 3 redovisas de specifika antaganden och förenklingar som legat till grund för konstruerandet av framtidsscenario för raffinaderiindustrin. Ett ytterligare antagande är att Nynas elförbrukning kan försummas då Nynas totala energianvändning är låg i förhållande till övriga raffinaderiföretag och data på elförbrukning saknas.

Beräkningar har gjorts i scenario R1 och R2. För att beräkna vilken mängd energi som kommer att krävas efter utbyggnaderna i R1 beräknades en faktor för mängden fossila bränslen per utsläpp av koldioxid för att approximera detta. I scenario R2 beräknades det ökade energibehovet när CCS införs, med maximala värden från Rootzén och Johnssons artikel [24] enligt följande för två olika tekniker:

- Post-combustion
  - Termisk energi: 6 GJ per ton olja
  - El: 110 kWh per ton olja
- Oxyfuel combustion
  - Termisk energi: 3 GJ per ton olja
  - El: 550 kWh per ton olja

## Skogsnäring

Tabell 4: Scenari-specifika antaganden för skogsnäring. ”I. massabruk” står för integrerade pappers- och massabruk.

Scenario SK0	Scenario SK1	Scenario SK2	Scenario SK3
<p>*Kontinuerlig effektivisering reducerar energianvändning och koldioxidutsläpp med 1% var femte år.</p>	<p>*KAM 2025-2035.</p> <p>*Fossila bränslen ersätts med biogena bränslen i I. massabruk.</p> <p>*Förhållandet mellan biobränsle och biogent koldioxidutsläpp är samma efter att KAM införs.</p> <p>*Såld el för oblekt massa är 663 kWh/ton för avsalubruk.</p> <p>*I I. massabruk köps 360 kWh el/ton sulfatmassa.</p>	<p>*KAM med svartlutsförgasning och kombicykel 2025-2035.</p> <p>*I. massabruk är finpapperbruk som producerar TCF-blekt massa och har noll netto-export av el.</p> <p>*Användning av biobränsle, fossila bränslen och utsläpp av koldioxidekvivalenter är samma som i scenario 1.</p> <p>*Såld el för oblekt massa är 663 kWh/ton för avsalubruk.</p>	<p>*Moderna massabruk med CCS-anläggning som fångar upp koldioxid från sodapanna, barkpanna och mesaugn 2025-2035.</p>

## Beräkningar

I scenario SK1 och SK2 har de totala biogena utsläppen av koldioxidekvivalenter från avsalubruk och integrerade pappers- och massabruk beräknats med samma metod, beräkningsgången redovisas nedan för avsalubruk:

$$\text{Biogena utsläpp från avsalubruk (KAM)} = \frac{\text{Biogena utsläpp från avsalubruk år 2015}}{\text{Biobränsleanvändning i avsalubruk år 2015}} * \text{Biobränsleanvändning i avsalubruk (KAM)}$$

I scenario SK3 har följande siffror från IEAGHG [25] använts:

- **Värmevärde [MJ/kg(torrsvikt)]:** 13,7 för svartlut, 20,5 för bark och 19,5 för skogsavfall.
- **Torrt flöde [kg/ton sulfatmassa]:** 1864 för svartlut och 192 för bark.
- **Totalt flöde [kg/ton sulfatmassa]:** 470 för skogsavfall.
- **Torrhalt [%]:** 45 för skogsavfall.

Biobränsleanvändningen för avsalubruket i scenario SK3 som redovisas i tabell 10 har beräknats enligt:

$$\begin{aligned} \text{Biobränsle svartlut} &= \\ &\text{Värmevärde svartlut} * \text{Torrt svartlutflöde till sodapanna} \end{aligned}$$

$$\text{Biobränsle bark} = \text{Värmevärde bark} * \text{Torrt barkflöde till barkpanna}$$

$$\text{Total biobränsleanvändning} = \text{Biobränsle svartlut} + \text{Biobränsle bark}$$

I scenario SK3 beräknas biobränslet till extrapannan för det integrerade papper- och massabruket enligt:

$$\begin{aligned} \text{Biobränsle skogsavfall} &= \text{Värmevärde skogsavfall} * \\ &* \text{Totalt skogsavfallflöde till extrapanna} * \text{Torrhalt skogsavfall} \end{aligned}$$

I scenario SK3 beräknas de totala biogena utsläppen av koldioxidekvivalenter för avsalubruk respektive integrerade pappers- och massabruk enligt samma metod, nedan redovisas beräkningen för avsalubruk:

$$\begin{aligned} \text{Totala biogena utsläpp från avsalubruk med CCS} &= \\ &= \frac{\text{Total produktion sulfatmassa från avsalubruk år 2015}}{\text{Produktion sulfatmassa från ett avsalubruk med CCS}} * \\ &* \text{Utsläpp av biogena koldioxidekvivalenter från ett avsalubruk med CCS} \end{aligned}$$

## Stålindustrin

Tabell 5: Scenari-specifika antaganden för stålindustrin.

Scenario ST0	Scenario ST1	Scenario ST2	Scenario ST3
<ul style="list-style-type: none"> <li>* BF i Oxelösund ersätts av EAF (1)</li> <li>* Högspänningskabel till Oxelösund (2)</li> <li>* Samtliga EAF energieffektiviseras (3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* (1), (2) &amp; (3)</li> <li>* Sintringsugnen övergår till biobränsle</li> <li>* Industriell produktion av biokol &amp; biogas</li> <li>* Värmebehandlingsugnar elektrifieras</li> <li>* Pellets anpassade för vätgasreduktion utvecklas</li> <li>* BF i Luleå ersätts av EAF</li> <li>* Infrastruktur för industriell vätgasproduktion byggs</li> <li>* Mellanlager för vätgas byggs</li> <li>* Elnätet förstärks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Samma antaganden som i ST2</li> <li>* Samtliga producerade järnmalmspellets i Sverige reduceras med vätgas</li> <li>* Elnätet förstärks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* (1), (2) &amp; (3)</li> <li>* Sintringsugnen går över till biobränsle</li> <li>* Industriell produktion av biokol &amp; biogas</li> <li>* Värmebehandlingsugnar elektrifieras</li> <li>* Topgascirkulering med syrgas införs i BF i Luleå</li> <li>* 30% av kokset ersätts med biokol till 2040</li> <li>* CCS-anläggning tas i drift 2035 med infrastruktur för transport &amp; lagring av koldioxid</li> </ul>

Utöver antagningarna ovan har gasformiga fossila bränslen har benämnts som naturgas i samtliga kvantifieringar.

### Beräkningar

I scenario ST3 ersätts 30% av masugnens kolkoks ut till biobaserat förädlad kol [26]. Energimängden biokol har beräknats genom att ta 30% av den kol som används år 2025 i referensscenariot. 2025 har använts som referens för

energianvändning från stenkolk då masugnen i Oxelösund det året är fullt avvecklad.

$$\text{Energianvändning stenkolk} = 10,712TWh$$

$$\text{Energibehov biokolk} = \text{Energianvändning stenkolk} * 0.3$$

I scenario ST3 införs en CCS-anläggning som kan fånga 60% av masugnens koldioxid [24]. Den totala koldioxidmängden från masugnen har uppskattats med hjälp av figur 24 i HYBRITs förstudie [27]. Som referens har 2039 valts, vilket är året innan masugnen i Luleå avvecklats. Samtliga koldioxidutsläpp de året i figuren antas komma från Luleås masugn.

$$\text{Koldioxidutsläpp från masugn} = 3,8 \text{ Mton koldioxid}$$

$$\text{Fångad koldioxid} = \text{Koldioxidutsläpp från masugn} * 0,6$$

Elbehovet för CCS-tekniken har uppskattats till 3,6 MJ per kg koldioxid [24], varifrån ett totalt elbehov för hela CCS-anläggningen kan beräknas.

$$\text{Elbehov koldioxidinfångning} = 3,6 \text{ MJ per kg infångad koldioxid}$$

$$\text{Infångad koldioxid} = \text{Totalt elbehov} = 2,28 * \text{Infångad koldioxid}$$

I scenario ST2 antas alla LKABs producerade järnpellets bli reducerade med vätgas. I Mistra roadmaps anges elbehovet för vätgasproduktionen vid produktion av ett ton stål. Då beräkningarna är per ton järnpellets, har ett densitetsförhållande tagits fram mellan järnpellets (magnetit) och råstål.

$$\text{Densitetsförhållande} = \frac{\text{Densitet järnpellets}}{\text{Densitet råstål}}$$

$$\text{Elbehov vätgasproduktion} = 2633\text{kwh el per ton producerat stål}$$

$$\text{Totalt elbehov} = \text{vätgasproduktion} * \text{järnpellets} * \text{densitetseförhållande}$$

I scenario ST1, ST2 och ST3 har det antagits att LKABs pelletstillverkning blivit fossilfri fram till 2045. Bränslebehovet för pelletseringsprocessen har beräknats genom att i HYBRITs förstudie redogörs den bränsleeffekt samt eleffekt som krävs i sintringsugnen per ton pellets [27]. LKABs årsproduktion av järnmalmspelletts 2018 uppgick till 23,9 miljoner ton [28].

$$\text{Elbehov} = 25\text{kwh per ton pellets}$$

$$\text{Totalt elbehov} = \text{Elbehov} * \text{ton pellets}$$

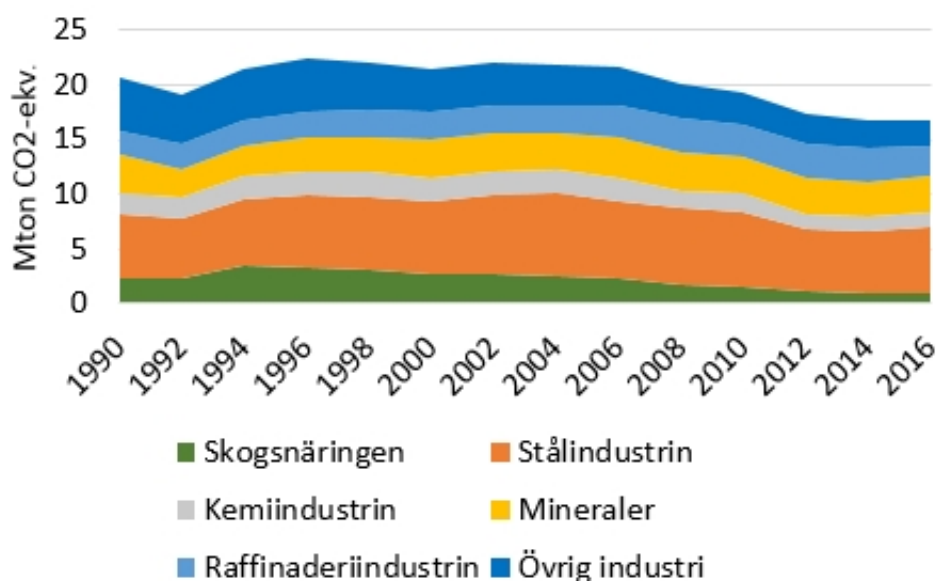
$$\text{Bränslebehov} = 80\text{kwh per ton pellets}$$

$$\text{Totalt bränslebehov} = \text{Bränslebehov} * \text{ton pellets}$$



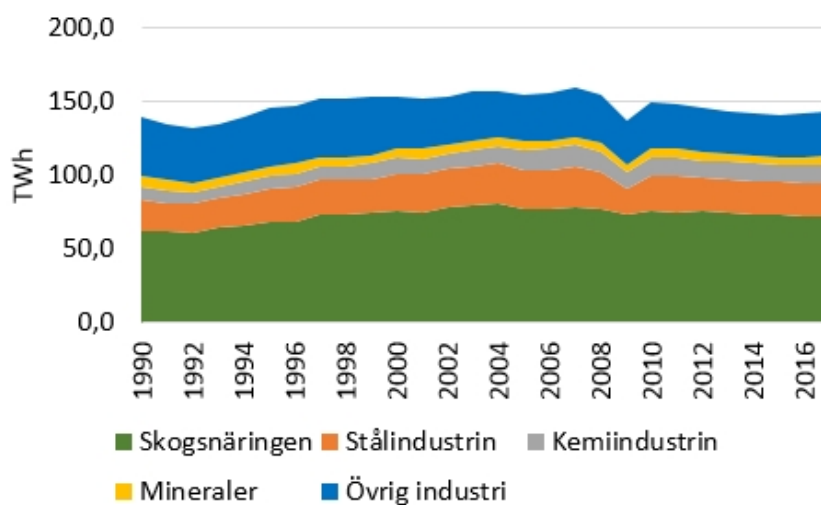
### 3 Nulägesanalys och processbeskrivning

Enligt data från Naturvårdsverket var Sveriges totala utsläpp 52,7 Mton koldioxidekvivalenter [8]. Av det totala utsläppet står industrin för cirka 33%, vilket motsvarar 17,2 Mton koldioxidekvivalenter [8]. Utifrån Naturvårdsverkets data står de undersökta industrierna i detta projekt för 84% av industrins totala utsläpp. Cementindustrin ingår i kategorin mineraler, där cementproduktionen står för största delen av utsläppen i denna grupp. I figur 3 visas industrins utsläpp från år 1990 till 2017.



Figur 3: Fördelning av utsläpp av växthusgaser från utvalda sektorer i industrin från år 1990 till 2017 [8].

Enligt Energimyndighetens rapport *Energiläget i siffror 2019* så var Sveriges totala energibehov 378 TWh år 2017 [29]. Enligt samma rapport var industrins behov då 143 TWh vilket är cirka 38 % av det nationellt totala behovet. Energimyndighetens data visar att de undersökta industrierna i detta projekt står för cirka 80 % av industrins totala energibehov. I figur 4 visuliserar industrins energibehov från 1990 till 2016. I energimyndighetens rapport presenteras inget energibehov för raffinaderiindustrin i den aktuella perioden. I Sverige användes 143 TWh biobränsle år 2017 och den totala produktionen av el var 160,2 TWh samma år [29].



Figur 4: Fördelning av energiförbrukning från utvalda sektorer i industrin från år 1990 till 2017. Data från [29].

### 3.1 Cement

Cement används för att tillverka betong, som är ett material som har haft och har en central roll för samhällsbyggandet i Sverige. Betong är ett beständigt material med lång livslängd och har en rad andra egenskaper vilket gör att den är svår att ersätta inom delar av samhällsbyggandet[30].

Cementens viktigaste komponent är kalksten [30]. Kalcinering sker när kalkstenen hettas upp frigörs koldioxid, denna process är den största utsläppskällan av växthusgaser i cementproduktion. Resterande utsläpp av växthusgaser kommer främst från bränslet som krävs för att hetta upp kalkstenen, samt drivmedlet för att transportera kalkstenen.

Idag är Cementa den enda aktören i Sverige som producerar cement med tre fabriker placerade i Slite, Skövde och Degerhamn[31]. Produktionskvantiteter för de olika fabrikena i dagsläget är ca 2.5 [32], 0.6 [33] och 0.3 [34] miljoner ton cement per år.

### 3.1.1 Energianvändning och utsläpp av växthusgaser

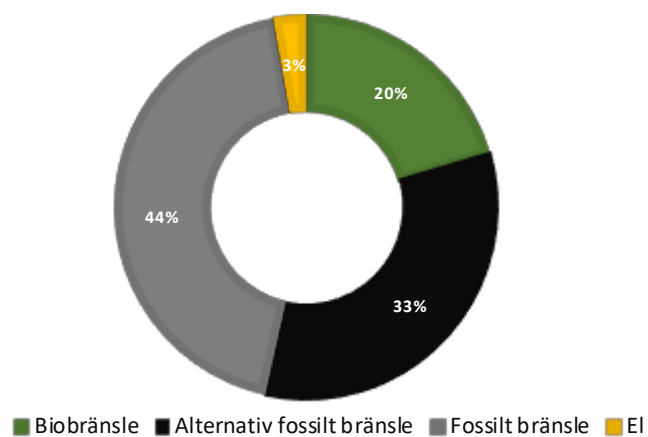
Tabell 6: Producerat klinker samt växthusgasutsläpp från cementindustrin år 2016. Data från [35].

Fabrik	Produktion [Mton klinker]	Fossila växthusgaser [Mton CO <sub>2</sub> ekv]	Biogena växthusgaser [Mton CO <sub>2</sub> -ekv]
Degerhamn	0,25	0,23	0,0028
Skövde	0,43	0,37	0,015
Slite	2,2	1,7	0,16
<b>Tot</b>	<b>2,9</b>	<b>2,3</b>	<b>0,18</b>

Cementindustrin står för ca 2% av svenska industrin totala energiförbrukningen och ca 13 % av svenska industrins utsläpp. Omkring 38% av växthusgasutsläppen i cementproduktionen härrör från förbränningen, medan resterande 62% kommer från kalcinering i processen [14]. Förbränningsutsläppen är beroende av energieffektiviteten i processen, medan processutsläppen endast är beroende av mängden kalkråvara. Process- och förbränningsutsläppen av växthusgaser från cementindustrin är 1.46 respektive 0.89 ton koldioxidekvivalenter [35]. I tabell 6 redogörs utsläppen av växthusgaser för varje fabrik. Cementfabriken i Slite genererar minst utsläpp av växthusgaser per ton klinker, men då produktionsnivån är hög blir det totala utsläppet störst. I tabell 7 presenteras uppskattat energibehov för cementindustrin.

Tabell 7: Cementas fabriker, och deras direkta energiförbrukning för 2017 visas i figur 7. Data estimerat från [17] [18] [19].

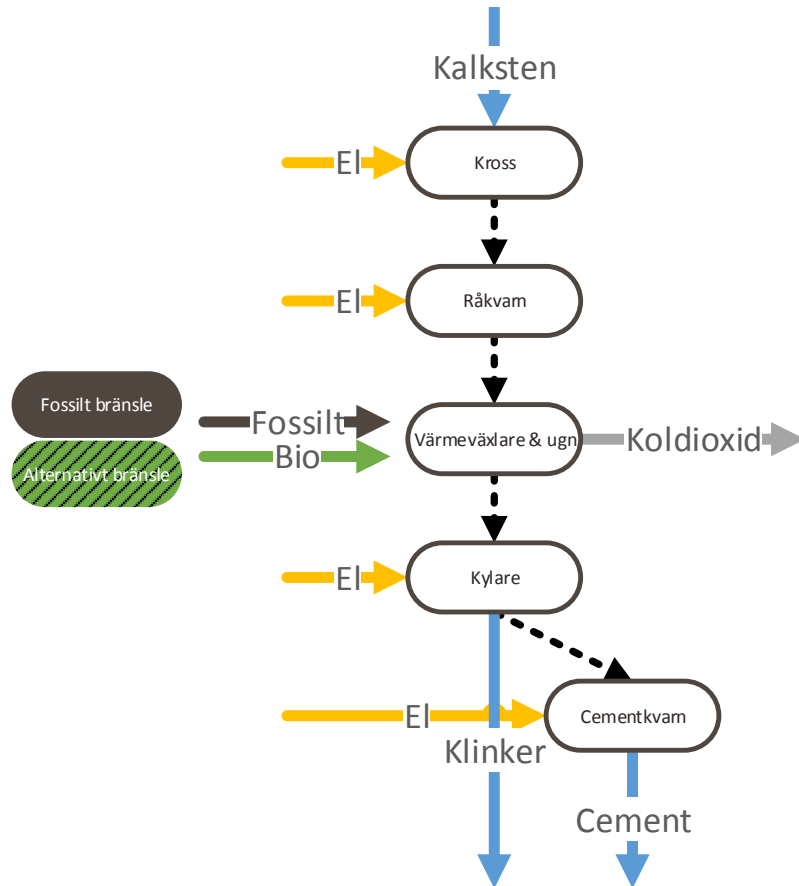
Fabrik	Energiåtgång per klinker [GJ/ton klinker]	Total energiförbrukning [TWh]
Degerhamn	4.8	0,3
Skövde	3.9	0,5
Slite	3.7	2.2
<b>Tot</b>		<b>3.0</b>



Figur 5: Energianvändning i cementindustrin år 2017 fördelat på energibärarna biobränsle, fossila bränslen, alternativa fossila bränslen samt el, baserad på data från [20][17][18][34][19].

Energiförbrukningen för cementbranschen i Sverige år 2017 visas procentuellt i figur 5. Den fossila och alternativa fossila bränsleanvändningen är 2,4 TWh, biobränsle 0,63 TWh och elförbrukningen är 0,08 TWh.

### 3.1.2 Processbeskrivning



Figur 6: Tillverkningsprocessen för cement med tillhörande energibehov och växthusgasutsläpp [36].

Kalksten transporteras från kalktälkten till anläggningen för att krossas och blandas med kiselsand, masugnslagg, aluminium och järnoxid [14]. Därefter mals det ner och torkas med återvunna avgaser från ugnen i råkvärnen [36]. Därutöver är det dessutom möjligt att utvinna fjärrvärme och elektricitet från råkvärnen [36].

Råmjölet från råkvärnen förs vidare till värmeväxlaren där en förkalcinering sker, kalciumoxid och koldioxid bildas då vid 900°C [14]. Detta höjer verkningsgraden genom att värmen från ugnen återvinns i syfte att använda mindre bränsle i ugnen [36].

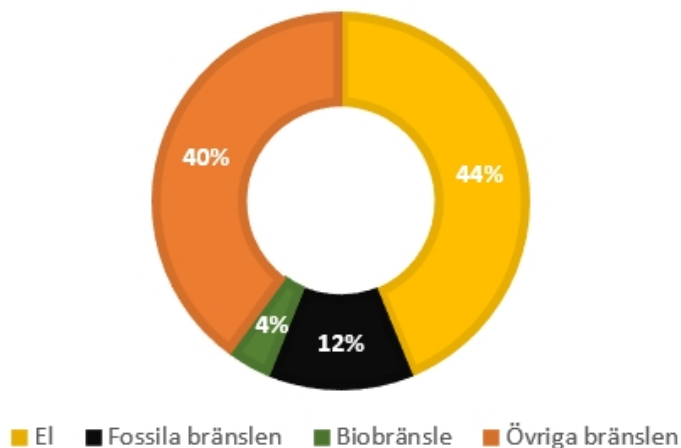
Det delvis kalcinerade råmjölet förs in i ugnen som upphettas till 1450 °C av kol, koks, gas, olja samt alternativa bränslen [14]. Alternativa bränslen är sorterat avfall som inte kan återvinnas på annat sätt, har jämn energifördelning samt kvalitet och används i syfte att ersätta fossila bränslen [37]. De kan bland annat innehålla förbrukade bildäck, icke-återanvändningsbart papper och plast, animaliska restprodukter och spillolja [38]. Därutöver genererar alternativa bränslen fossilt och biogent utsläpp av växthusgaser [38].

Ur ugnen fås klinkers som i nästa steg kyls ned med luft, mals och blandas med kalksten och gips för att bilda cement [36]. I figur 6 visualiseras processen med energiåtgång.

## 3.2 Kemiindustri

Kemisk industri tillverkar baskemikalier som innefattar bland annat färgämnen, industrigas, kväveprodukter, basplaster och organiska respektive oorganiska kemikalier [5].

### 3.2.1 Energianvändning och utsläpp av växthusgaser



Figur 7: Energianvändning i kemiindustrin år 2017 fördelat på energibärarna el, fossila bränslen, biobränslen samt övriga bränslen. Data från [29].

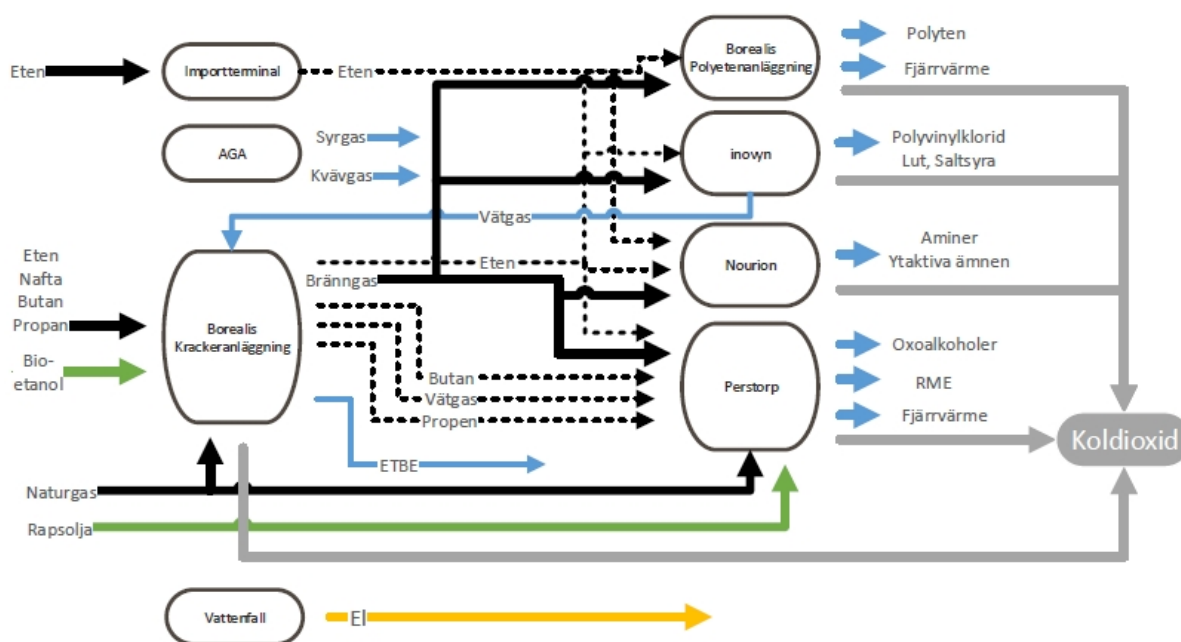
2017 hade kemiindustrin ett energibehov på 13 TWh, vilket är cirka 9 % av industrins totala behov [29]. Fördelningen av energibärare kan ses i figur 7. Elanvändningen uppgick till 5,6 TWh, fossilbränslebehovet 1,7 TWh, biobränsle 0,3 TWh och övrigt till 5,4 TWh. Fossila bränslen inkluderar

petroleumprodukter, naturgas, kol och koks. Den del av energianvändningen som klassificeras som övriga bränslen inkluderar bland annat interna bränslen, som framställs via förbränning av råvaror i processen därav särskiljs från de andra kategorierna.

Av det totala utsläppet av växthusgaser från industrin 2017 stod kemiindustrin för 8%, vilket motsvarar 1,34 Mton CO<sub>2</sub> ekvivalenter [8]. Största andelen av växthusgasutsläppen uppkommer vid förbränning av bränslen, men även som processutsläpp.

### 3.2.2 Processbeskrivning

Inom kemiindustrin finns lika många processer som det finns kemiska produkter. Här fokuseras på några av de processer som använder mest energi och släpper ut mest växthusgaser i Sverige. Kemiklustret i Stenungsund står för över 70% av kemiindustrins totala utsläpp [8]. Klustret utgörs av fem företag som alla är direkt eller indirekt beroende av varandra [39]. I figur 8 visualiseras kemiklustret i Stenungsund med energibärare, råvaror, produkter och utsläpp.



Figur 8: Processöverblick för kemiklustret i Stenungsund. Baserad på [22].

Hjärtat i verksamheten är Borealis krackeranläggning. Enligt Borealis miljörapport från 2018 produceras cirka 630 kton eten, 298 kton brännagas samt 480 kton

övriga produkter från de fossila råvarorna nafta, butan, propan och etan. [40]. Produkter distribueras vidare över hela klustret. Bränn gas är ett fossilt bränsle, men då den produceras från råvaror klassas den som ett internt bränsle och hamnar då i kategorin övriga bränslen enligt figur 7. Av kemiklustrets totala energianvändning står bränn gasen för cirka 70%, el för cirka 20% och resterande del utgörs av gasol och olja [5]

Borealis krackeranläggningen har ett stort energibehov och står för cirka 34% av kemiindustrins totala energiförbrukning [40]. Övriga energikrävande processer är pumpar, fläktar, kompressorer, omrörare, kylning av reaktorer och torkning av produkter enligt Borealis miljörapport.

### 3.3 Raffinaderi

I Sverige finns i dagsläget fem raffinaderier som ägs av tre olika företag vilka syns i tabell 8. Av den olja som raffinerats fås ett flertal bränslen vilka ses i figur 10 över processen.

#### 3.3.1 Energianvändning och utsläpp av växthusgaser

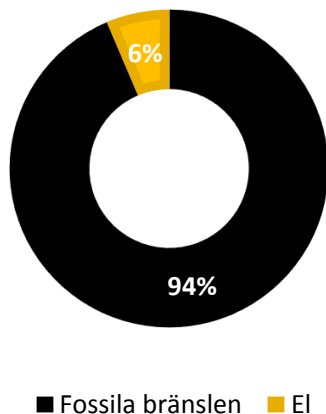
Raffinaderiernas utsläpp var 17% av industrins totala utsläpp 2017 och en stor del av dessa utsläpp sker vid förbränning av industriella restgaser och diffusa utsläpp, fackling och läckage från rörledningar, enligt Naturvårdverket [8]. Raffinaderiernas nuvarande energiförbrukning och koldioxidutsläpp redovisas i tabell 8. I tabellen redovisas även mängd raffinerad olja per år och det framgår tydligt att det är Preem som står för de största utsläppen men även den största produktionen.

Tabell 8: Sveriges raffinaderier och deras produktion, energiförbrukning och utsläpp av växthusgaser under 2017 (2015 för Preem Lysekil och 2011 för Preem Göteborg). Data från raffinaderiernas ägare [41][42][43][44]. För Nynas saknas data på elförbrukning.

Ägare	Ort	Råolja- förbrukning [Mton]	Fossila bränslen [TWh]	Elför- brukning [TWh]	Växthusgas- utsläpp [MtonCO <sub>2</sub> - ekv.]
Preem	Lysekil	10	6,4	0,52	1,71
Preem	Göteborg	4,4	2,3	0,15	0,47
St1	Göteborg	3,7	2,4	0,14	0,52
Nynas	Nynäshamn	1,1	0,9		0,15
Nynas	Göteborg	0,4	0,1		0,03



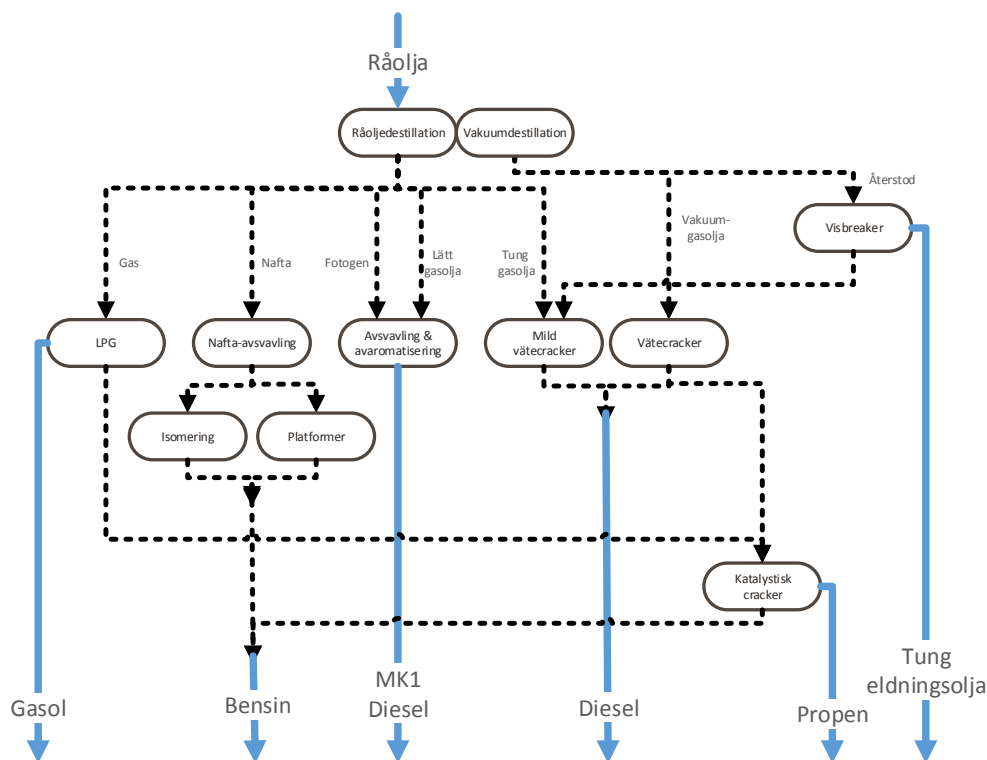
Energiförbrukningen visas procentuellt i figur 9. Som ses i figuren är det fossila bränslen som dominerar som energibärare i raffinaderierna.



Figur 9: Energianvändning för raffinaderierna fördelat på energibärarna fossila bränslen och el, baserad på data från tabell 8.

### 3.3.2 Processbeskrivning

Preems anläggning i Lysekil förbrukade år 2015 bränningsgas, LNG och krackerkoks totalt motsvarande 6,4 TWh och 0,52 TWh el enligt sin miljörapport [42]. Preem uppger att de samma år raffinerade ca 10 miljoner ton olja och att CO<sub>2</sub>-utsläppen var ca 1,7 miljoner ton. Hur raffinaderiprocessen ser ut kan ses i figur 10. Av råoljan som destilleras, genom råoljedestillation och vakuumdestillation, skapas gasol, bensin, MK1 (Miljöklass 1) diesel, diesel, propen och tung eldningsolja. Som ses i bilden är det många parallella och sammankopplade processer.



Figur 10: Oljeraffinaderiprocessen, baserad på bild över Preems anläggning i Lysekil [42]. Blå pilar representerar råvaror samt produkter och svarta streckade pilarna är ledningar mellan processerna.

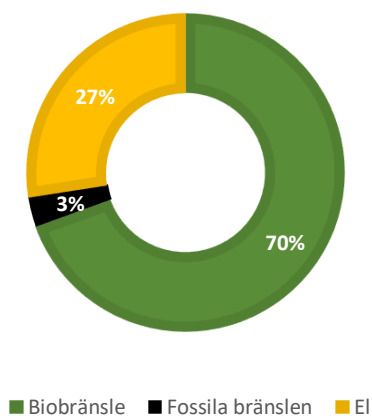
### 3.4 Skogsnäring

Skogsnäringen delas upp i skogsindustrier och skogsbruk [45]. Skogsindustrin består av massabruk, sågverk och all den övriga industri som använder råvara från skogen [45], [46]. Skogsbruket planterar och avverkar skog med syfte att tillgodose skogsindustrin med råvara [46]. Skogsindustrin utgör en stor del av den svenska ekonomin. Sverige hade näst störst export av sågade trävaror, papper och massa i världen år 2017 [47]. Det finns ungefär 60 bruk inom massa- och pappersindustrin i Sverige [48]. Ved består av lignin och cellulosa-fibrer som måste frigöras från varandra innan de kan användas i papperstillverkning [49]. Massabruk separerar fibrerna från varandra genom två principiellt olika metoder: mekaniskt samt kemiskt [5], [49], [50]. År 2017 producerades 4,3 miljoner ton massa i Sverige varav 68% utgjordes av blekt sulfatbarrmassa, 22% av övrig kemisk massa och resterande 10% av mekanisk och halv-kemisk massa [51]. Den här rapporten fokuserar på Sveriges

sulfatmassabruk då de står för störst andel av massaproduktionen.

### 3.4.1 Energianvändning och utsläpp av växthusgaser

Massa- och pappersindustris slutanvändning av energi år 2017 var 72,4 TWh och fördelningen över energibärare framgår av figur 11.



Figur 11: Energianvändning i massa- och pappersbruk år 2017 fördelat på energibärarna biobränsle, fossila bränslen samt el. Baserad på data från Energimyndigheten [29].

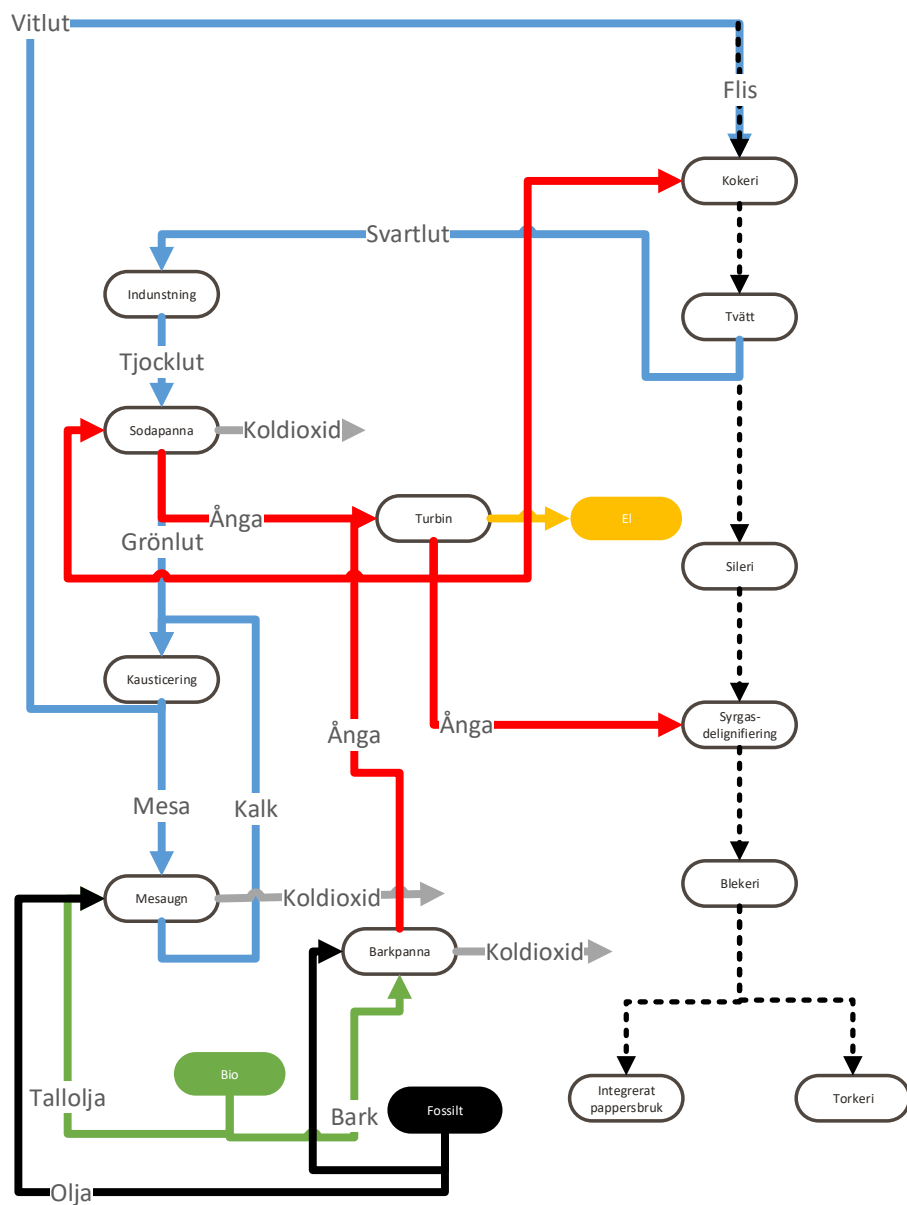
I Skogsindustriernas färdplan för fossilfri konkurrenskraft beskrivs att 96% av allt bränsle som används i pappers- och massaindustrins processer är fossilfria och att sågverken i princip inte använder några fossila bränslen i sina processer [45].

Tabell 9: Energianvändning, utsläpp och total produktion av sulfatmassa för Sveriges sulfatmassabruk år 2015 uppdelat efter avsalubruk och integrerade pappers- och massabruk. Negativ energianvändning innebär export av energi. Samtliga siffror är summerade från Skogsindustriernas miljödatabas [52].

	<b>Avsalubruk</b>	<b>Integrerade papper- och massabruk</b>	<b>Enhet</b>
Biobränsle	17,5	31,6	TWh
Fossila bränslen	0,3	1	TWh
El	-0,2	3,8	TWh
Biogena utsläpp	6,3	11,8	Mton
Fossila utsläpp	0,1	0,3	Mton
ECF-blekt	497	2397	Mton sulfatmassa
TCF-blekt	1596	272	Mton sulfatmassa
Oblekt	138	2172	Mton sulfatmassa

### 3.4.2 Processbeskrivning av kemiska massabruk

Den huvudsakliga principen bakom kemiska massabruk är att kemikalier och värme används för att frigöra fibrer från lignin [46]. Det finns huvudsakligen två parallella processer: fiberlinjen, där ved omvandlas till massa och kemikalieåtervinningen, där kokkemikalier återbildas [5]. I sulfatmassaprocessen används en basisk kokvätska, vitlut, som huvudsakligen består av natriumhydroxid och natriumsulfid [49]. Processen för kemiska massabruk kan ses i figur 12.



Figur 12: Processbeskrivning av kemiska massabruk, baserad på [53],[49]. De streckade pilarna beskriver fiberlinjen, de blå pilarna beskriver kemikalieåtervinningen.

### Fiberlinjen

I fiberlinjen avbarkas ved via friktion i stora roterande trummor och omvandlas till flis i huggmaskiner för att därefter transporteras till kokeriet

[49]. Barkpannan drivs med den bark som skalats av veden [53].

Det finns två metoder för kokningen: satsvis eller kontinuerlig [54]. I satsvis kokning tillsätts vitlut och flis till en kokare, varvid en kokcykel påbörjas och kokaren töms fullständigt när kokningen är klar. I en kontinuerlig kokning tillsätts flis och kokvätska i ett jämnt flöde och färdigkokt massa flödar ut i samma takt [46]. Koklösningen tvättas och det svartlut som separeras från massan följer kemikalieåtervinningen medan massan bleks i en syrgasreaktor med olika kemikalier [5]. Ifall blekningen sker utan att klorgas används kallas det *elementary chlorine free* och om ingen klordioxid använts kallas det *totally chlorine free* [49]. Ifall bruket är ett avsalubruk torkas massan med varmluft i torkmaskiner innan den säljs. Om det är ett integrerat pappersbruk torkas inte massan, utan transporteras vidare för papperstillverkning [49].

### **Kemikalieåtervinning**

Svartlutet indunstas genom att vatten kokas bort och det resulterande tjocklutet förs in i en sodapanna [5], [49]. I sodapannan förbränns tjocklut vilket genererar ånga och det bildas en smälta som delvis består av natriumkarbonat och natriumsulfat [5]. Natriumsulfatet reduceras med hjälp av kol till natriumsulfid [46]. Smältan upplöses till grönlut i en smältalösare där svaglut från sodapannan tillförts och grönluten transporteras vidare till vitlutberedningen [49].

I nästa processteg separeras grönlut från svaglut [5]. Svaglutet förs till smältalösaren i sodapannan och det renade grönlutet transporteras till en kalksläckare där kalciumhydroxid bildas efter reaktion med bränd kalk och vatten i luten [49]. Blandningen av kalk och lut omvandlas till kalciumkarbonat och natriumhydroxid genom reaktioner mellan kalciumhydroxid och natriumkarbonat [46]. De två aktiva substanserna i vitlut, natriumhydroxid och natriumsulfid, har således bildats på nytt. Innan vitluten kan återanvändas måste det kalciumkarbonat (mesa) som också bildas i reaktionen separeras från vitluten genom filtrering [54]. När separationen är genomförd tillförs mesan till en mesasugn där den förbränns vilket bildar bränd kalk som kan återanvändas i kalksläckaren medans vitluten återförs till kokeriprocessen [5],[49].

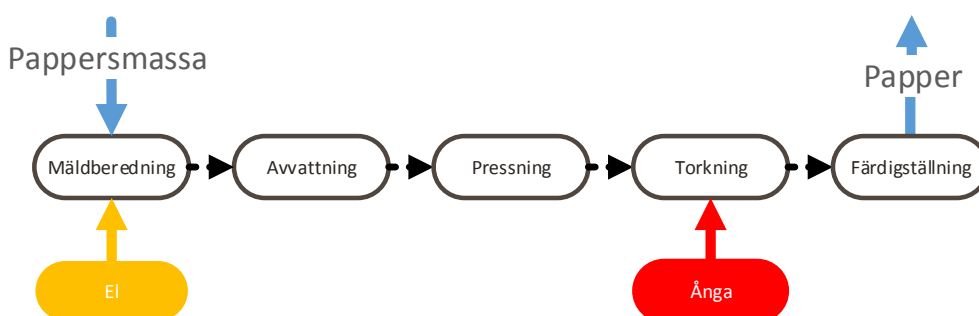
Tabell 10: Total årlig produktion och energianvändning per ton sulfatmassa av bibränsle, fossila bränslen och såld el i ett finskt sulfatmassabruk som byggdes år 2005. Baserad på IEAGHG [25].

	Avsalubruk	Enhet
Svartlut	25,5	GJ/ton
Bark	3,9	GJ/ton
Fossila bränslen	1,4	GJ/ton
Såld el	0,2	MWh/ton
Produktion	8	Mton/år

Massautbytet för kemiska massabruk är runt 40-50% [46]. Det trä som inte blir till flis kan användas som energi i de olika processerna, vilket gör att ett modernt avsalubruk för kemisk massa kan vara självförsörjande på energi [50]. Om massabruket är integrerat med ett pappersbruk kan värmeöverskottet som uppstår i vissa av massabrukets processer återanvändas i pappersbruket, t.ex. i torkningsprocessen[49].

### 3.4.3 Processbeskrivning av pappersbruk

Den första processen är mäldbredningen där pappersmassan blandas med vatten och mals [5], [49]. Förbrukningen av elenergi beror till stor del på hur mycket massan behöver malas [49]. Därefter tar avvattningen vid där mällden fördelas jämnt på en plastduk och vatten rinner av [5]. Pressning mellan två stora valsar ger mällden lägre vattenhalt [49]. Därefter torkas pappersarket ytterligare genom att pressas mellan uppvärmda torkeylindrar [5]. Torkprocessen är den delprocess där störst mängd ånga går åt [49]. Pappret genomgår därefter behandlingar för att skapa olika sorters slutprodukter.



Figur 13: Processbeskrivning av pappersbruk. Baserad på [49]

## 3.5 Stålindustri

Sverige har en lång historia av malmbrytning och produktion av stål. Landet har flera av Europas största järnmalmsfyndigheter och järn- och stålproduktionen har varit viktigt för Sveriges ekonomiska utveckling. Dagens samhälle är beroende av stål som används för uppbyggnad av infrastruktur, som konstruktionsmaterial i fastigheter och produktion av varor. Metallen utmärks genom sin höga hållfasthet vilket möjliggör konstruktioner med mindre materialförbrukning och lägre vikt, vilket innebär miljömässiga fördelar. Materialet kan också återvinnas utan att kvalitén försämras vilket har gett upphov till omfattande återvinningsindustri [55]. Sverige har i dagsläget tio skrotbaserade stålverk, två malmbaserade stålverk drivet av SSAB samt ett malmbaserat järnsvampverk i Höganäs [56].

Den malmbaserade stålproduktionen som idag står för omkring två tredjedelar [56] av den totala inhemska produktionen kräver betydliga mängder kol vilket ger upphov till stora utsläpp av växthusgasutsläpp. Att ställa om stålproduktionen till koldioxidneutral är därmed av stor betydelse om Sverige ska klara klimatmålen som formulerades i det klimatpolitiska ramverket [7].

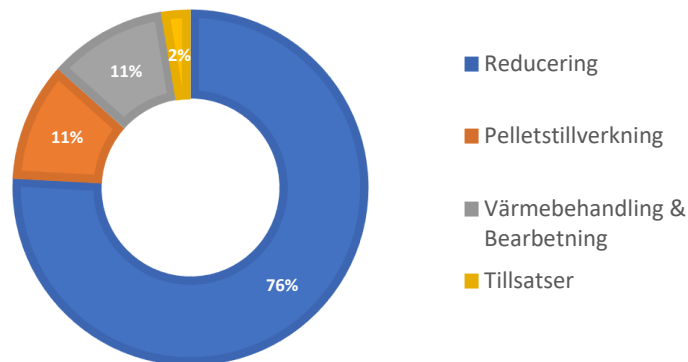
### 3.5.1 Energianvändning och utsläpp av växthusgaser

Sveriges järn- och stålindustri står idag för 36% av Svensk industris fossila koldioxidutsläpp [35], vilket är 10% av Sveriges totala utsläpp [57]. Utsläppen kommer i första hand från tillverkningsprocesser vars kvantiteter listas i tabell 11. De processer som ger upphov till utsläppen är reduceringen av järnmalm, tillverkning av järnpellets, värmebehandling och bearbetning av stålet, samt tillsatser och reglering av kolhalt.

Tabell 11: Utsläpp av växthusgaser i stål-järn produktionen från år 2017[58] [27].

Process	Växthusgasutsläpp [Mton CO <sub>2</sub> -ekv.]
Reducering	4,9
Pelletstillverkning	0,7
Värme & bearbetning	0,7
Kolinnehåll & tillsatser	0,2
<b>Totalt utsläpp:</b>	<b>6,5</b>



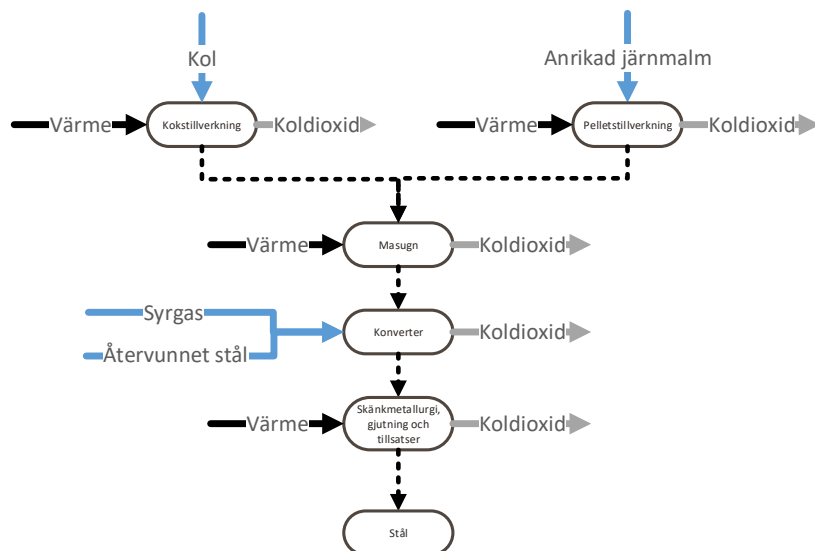


Figur 14: Utsläppsposterna från tabell 11 visualiserade.

### 3.5.2 Processbeskrivning

Stål tillverkas främst via tre olika processer. Två använder nytt råmaterial i form av järnmalm. Järnmalmen består delvis av syre och behöver reduceras i en reduceringsprocess. Dessa är masugnsprocessen och höganäsprocessen. Den tredje processen är skrotbaserad och använder ej något nytt råmaterial.

#### Masugnsprocessen

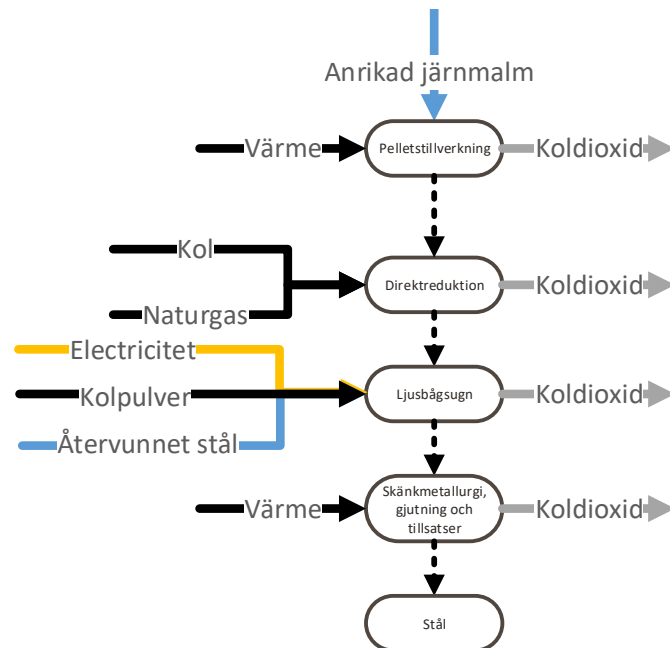


Figur 15: Processbeskrivning av masugnsprocessen. Baserad på processschemata i HYBRITs förstudie [27].

Masugnprocessen, som visas i figur 15, använder sig av ett reduktionsmedel som huvudsakligen består av koksande kol som tillsätts tillsammans med järnmalm och kolpulver i en masugn. Tillverkningen av koks sker i en pyrolysisprocess där kolets flyktiga beståndsdelar förgasas [58]. I masugnen tillsätts koks, järnmalm och kolpulver vilket binder järnmalmens syre och ger ett smält råjärn med en hög kolhalt på 4-5%. Reduceringen genererar höga koldioxidutsläpp [27]. Stålverket med kokstillverkning, masugn och ståltillverkningen är integrerade och bildar en mycket energieffektiv anläggning. Biprodukterna från de olika processerna såsom kolväten från koksverket, gas från masugnen och spillvärme används i andra processer samt för el- och värmeproduktion [27].

### Höganäsprocessen

Höganäsprocessen, som visas i figur 16, använder sig av direktreducering av järnmalm där den utgående produkten blir en porös järnprodukt som kallas järnsvamp.



Figur 16: Processbeskrivning för höganäsprocessen. Baserad på processschema i HYBRITs förstudie [27].

Reduktionsmedlet i höganäsprocessen skapas genom förgasning av koks som tillsammans med naturgas bildar en energirik blandning av vätgas och kolmonoxid [27]. Järnpelletsen direktreduceras i en tunnelugn vilket ger upphov till

koldioxidutsläpp. För att tillverka stål smälts järnsvampen i en ljusbågsugn och kolpulver tillsätts [27]. I Sverige används endast direktreducering vid produktion av järnpulver i Höganäs.

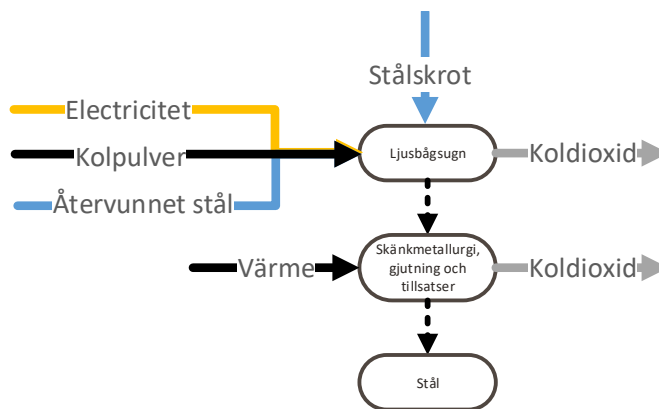
### Tillverkning av järnpellets

Vid reduktion av järnmalm i masugnsprocessen eller höganäsprocessen används järnpellets för att energieffektivisera reduceringsprocessen. Stål tillverkad från järnpellets resulterar i 14% lägre koldioxidutsläpp jämfört med stål producerat vid ett genomsnittligt sinterbaserat europeiskt stålverk [59]. Pelletstillverkningen drivs av LKAB som levererar järnpellets både till svensk stålindustri och exporterar utomlands. För att hela produktionskedjan vid ståltillverkning ska bli koldioxidneutral behöver även pelletstillverkningen ställas om.

Vid tillverkningen behöver malmen rullas, pelletiseras, tillsätts bindemedel och slutligen bränns i en sintringsugn. Sintringen görs i en ugn vid cirka 1250°C där eldningsolja används för uppvärmning [27]. Det är vid sintringen som den största delen av utsläppen sker.

### Skrotbaserad ståltillverkning

I skrotbaserade stålverk återvinns stålskrot genom nersmältning och tillsatser av legeringar. Processen visas i figur 17.



Figur 17: Processbeskrivning av skrotbaserad tillverkning av stål. Baserad på processschema i HYBRITs förstudie [27].

Skrotet smälts i ugnar där värme genereras genom att elektriska ljusbågar bildas mellan skrotet och grafit Elektroder, så kallade ljusbågsugnar. Även

kemisk energi tillförs genom injektion av syrgas och kolpulver för att få ökad effekt i ugnen, vilket även genererar koldioxid [27]. Vid förbehandling, skänkning och gjutning används naturgas eller gasol bränsle [58].

### **Värmebehandling, skänkmetsallurgi, bearbetning och tillsatser:**

Under tillverkningen kan stålet gå igenom flera olika steg av värmebehandling och bearbetning. Vissa av processerna kräver höga temperaturer och snabba uppvärmningsförlopp. För att uppfylla värmebehovet används bland annat elektrifierade ugnar för processer i temperaturspannet 600-1200°C. Det används även fossila bränslen som gasol, flytande naturgas eller eldningsolja när högre effekt eller snabbare uppvärmningsförlopp krävs[58].

För att stålet ska få rätt egenskaper behöver kolhalten regleras och legeringsämnen tillsättas. I masugnprocessen får järnet ofta en hög kolhalt vilket sänks genom tillsättning av syrgas, vilket genererar koldioxid. För att höja kolhalten i smältan när den befinner sig i ljusbågsugnen tillsätts kolpulver. Alla tillsatser tas inte upp utan en viss mängd hamnar i slagget eller blir till koldioxid [58].

## 4 Scenarier för industriernas framtid

I scenarioanalysen har ett antal framtidsscenarier för de olika industrierna betraktats, där olika nivåer av omställningar antagits. I analysen har energibehov och utsläpp av växthusgaser kvantifierats för de olika scenarierna. Detta har sedan sammanställts i en övergripande energianalys för de fem industrigrenarna. Sammanställningen jämförs med Sveriges uppskattade produktion av el samt bioenergi år 2045. Energimyndigheten uppskattar Sveriges totala elproduktionen till 160 TWh. [60]. Tillgången på bioenergi 2045 uppskattas till 200-220 TWh [61].

Möjliga tekniker som kan komma att implementeras i industrierna redovisas i figur 18. Dessa tekniker beskrivs mer i respektive avsnitt för industrierna.

	Elektrifiering	Ersätta fossila bränslen med biobränslen	CCS	Alternativa bränslen	Effektivisering	Övrig teknik
Cementindustrin	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kemiindustrin	✓	✓	✓		✓	✓
Raffinaderier		✓	✓		✓	
Skogsnäring		✓	✓		✓	✓
Stålindustrin	✓	✓	✓		✓	✓

Figur 18: Möjlig teknikutveckling för industrierna.

### 4.1 Cement

Det finns flera vägar för att lösa cementindustrins koldioxidutsläpp. Nedan redovisas scenerier som i olika utsträckning uppnår klimatneutralitet. Cementindustrin har två utmaningar att åtgärda för att nå noll netto-utsläpp år 2045, bränsleutsläpp och processutsläpp. Scenarierna är byggda på nylägesanalys och processbeskrivningar i 3.1 och antaganden som kan hittas i Metod.

#### Plasmaugn

Cemta har i samarbete med Vattenfall gjort en förstudie, Cemzero, där tekniker för elektrifiering av Slites cementfabrik utvärderas [14]. Tekniken som anses vara mest lovande enligt Cemzero är plasmaugnar, där en gas hettas upp till plasmagas med hjälp av el. Denna teknik resulterar i att bränslen som används i ugnen, skulle kunna exkluderas från produktionen.

Användning av koldioxid som plasmagas genererar avgaser med hög koldioxidhalt vilket möjliggör CCS med ett lågt energibehov och 100% infångning[14]. Tekniken har endast testats i liten skala, men Cemzero föreslår en pilotfabrik år 2022-2024 och har som mål att vara redo för kommersiellt bruk 2030. En ny fabrik fordras för omställningen.

I C2 scenariot har en nya fabriker med plasmaugnar konstruerats som drivs av koldioxid och nyttjar CCS. Första fabriken konstrueras i Slite år 2030 och den andra i Skövde år 2035. En elektrifiering av Slitefabriken förutsätter enligt Cemzero en utökning av elnätet till Gotland.

### **Övergång till biobränsle**

Ett annat sätt att åtgärda bränsleutsläppen är att ersätta de fossila bränslena i ugnen med biobränsle. I scenario C4 antas att fossila och alternativt fossila bränslena byts ut till biobränsle.

### **Nya cementsorter**

Klinker ersätts av andra bindemedel vilket leder till ett minskat behov av klinker [30]. En minskad produktion av klinker medför ett minskat processutsläpp av växthusgaser. I färdplansscenariet C1 antas nya cementsorter introduceras.

### **Karbonatisering**

Karbonatisering är en kemisk process där betong fångar upp koldioxid från luften [30]. Drygt 15% av processutsläppen fångas i dagsläget upp [30]. Upptaget kan förbättras genom bättre hantering av rivna betongkonstruktioner. Denna teknik appliceras i scenariet C1.

### **CCS**

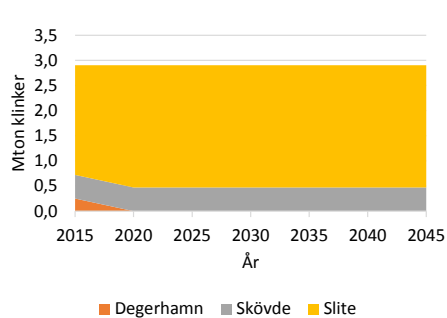
Utsläppen från cementindustrin innehåller en hög koncentration av koldioxid, därför är det lämpligt att nyttja CCS [11]. I figur 12 finns olika CCS-tekniker tabellerade med tillhörande värden. Det är av vikt att framhäva att värden är estimeringar och vissa fall saknas det även värden då information inte finns eller är tvetydlig.

Tabell 12: Det är en betydande skillnad mellan CCS-tekniker. De varierar i mängden koldioxid de kan fånga, termiskt energibehov och om de nyttjar eller producerar el. Data från[24][11][62].

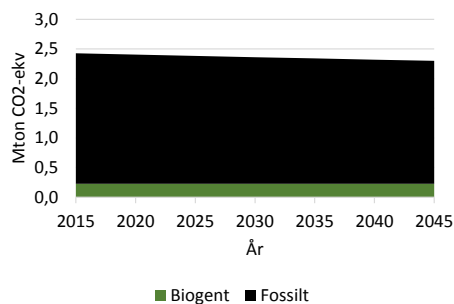
	<b>Infångad CO2 (%)</b>	<b>Termisk energi (GJ/ton klinker)</b>	<b>El (kWh/ton klinker)</b>
Pre combustion	34	-	-
Post combustion	90	6,1	180
Partial oxy-combustion	65	3,5	200
Full oxy-combustion	90	3,2	220
Calcium looping(coal)	90	6,5	-427
Amine scrubbing(MEA)	-	5,5	119

Den CCS-teknik som undersöks närmare i scenariet C3 är Calcium looping med kol. Tekniken har en hög investeringskostnad men kan tillämpas på befintlig tillverkningsprocess inom cementindustrin [62]. De andra teknikerna är också relevanta, med undantag för tekniken Pre combustion som endast påverkar förbränningsutsläppen av växthusgaser.

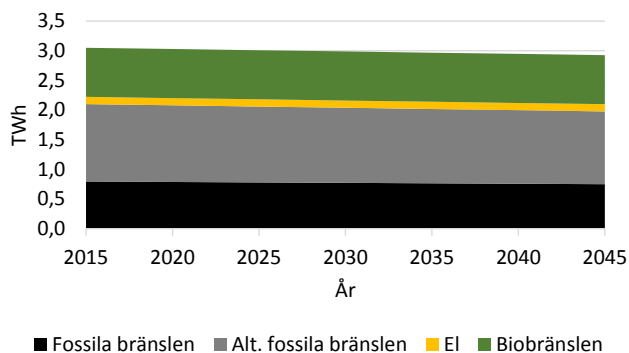
#### 4.1.1 C0 - Referens



Figur 19: Cementfabrikernas produktion scenario C0.



Figur 20: Totala utsläppet av växthusgaser från cementindustrin scenario C0.

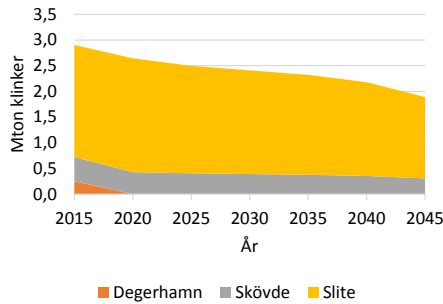


Figur 21: Energibehovet för cementindustrin uppdelat per energibärare för scenario C0.

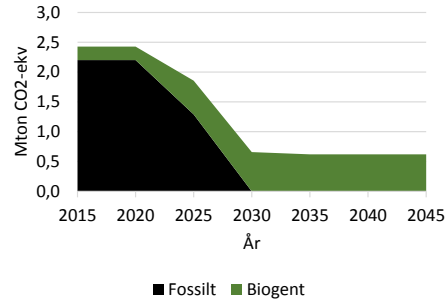
Scenariet C0 illustrerar produktion av klinker i figur 19, totalt utsläpp av växthusgaser i figur 20 och energibehovet i figur 21.



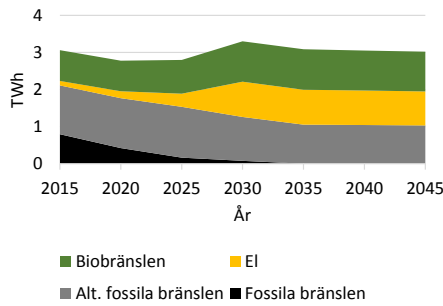
### 4.1.2 C1 - Färdplan



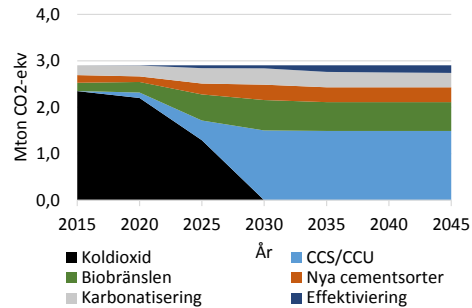
Figur 22: Cementfabrikernas produktion scenario C1.



Figur 23: Totala utsläppet av växthusgaser från cementindustrin scenario C1 .



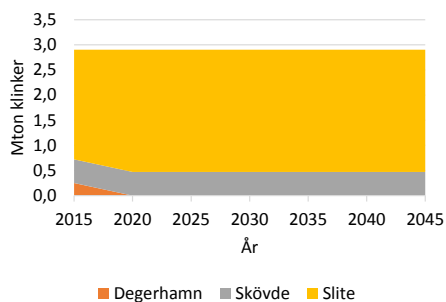
Figur 24: Energibehovet för cementindustrin uppdelat i energibärare scenario C1.



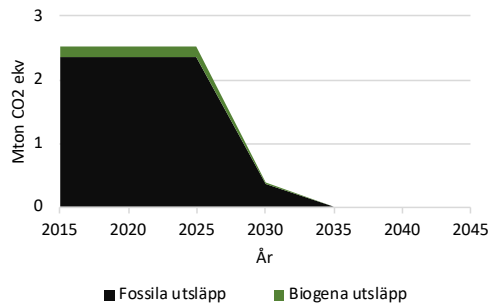
Figur 25: Tekniker och energibärare ersätter fossila koldioxidutsläppen enligt Cementas färdplan [20].

Scenariet C1 illustrerar produktion av klinker i figur 22, totalt utsläpp av växthusgaser i figur 23 och energibehovet i figur 24. Enligt cementindustrins färdplan är de koldioxidneutrala år 2030 [20], figur 25 är en illustration av hur det ska gå till.

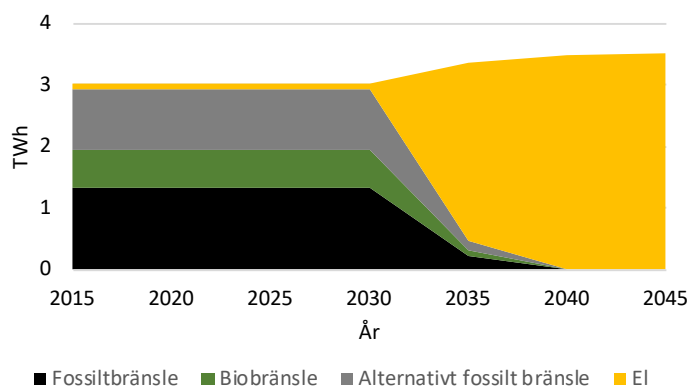
### 4.1.3 C2 - Elektrifiering



Figur 26: Cementfabrikernas produktion scenario C2.



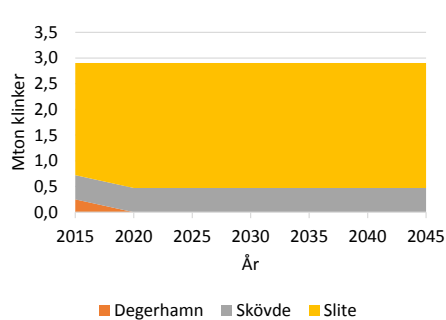
Figur 27: Utsläpp av växthusgaser scenario C2.



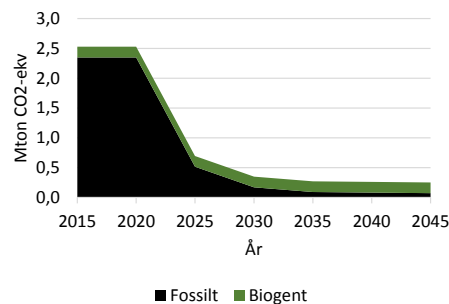
Figur 28: Energiförbrukningen i cementindustrin uppdelat i energibärare i scenario C2.

Scenariet C2 illustrerar produktion av klinker i figur 26, totalt utsläpp av växthusgaser i figur 27 och energibehovet i figur 28. Anmärkningsvärt är det ökad elbehovet mellan år 2030 och 2045. Elbehovet 2045 för cementindustrin är 3,5 TWh/år och når klimatneutralitet.

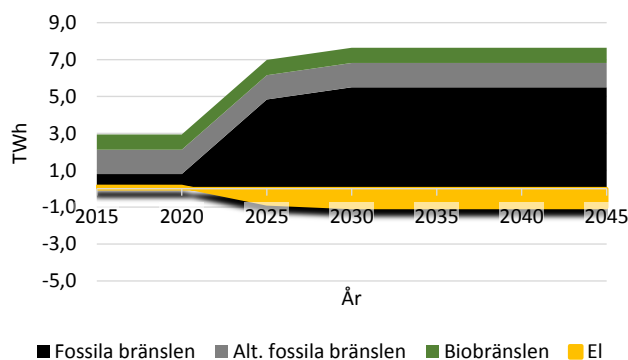
#### 4.1.4 C3 - CCS, Calcium looping



Figur 29: Cementfabrikernas produktion scenario C3.



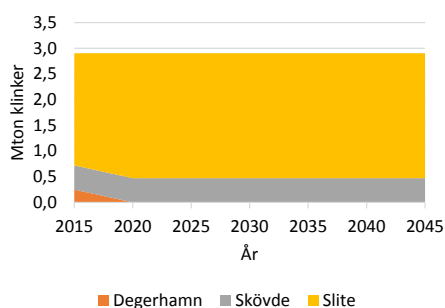
Figur 30: Totala utsläppet av växthusgaser från cementindustrin scenario C3.



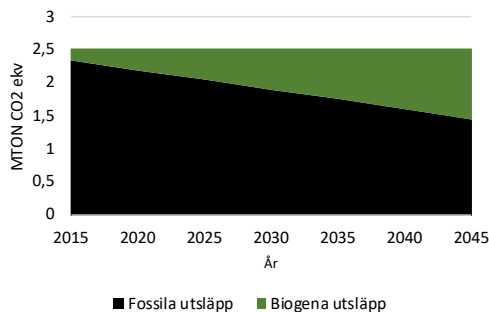
Figur 31: Energibehovet för cementindustrin uppdelat per energibärare med Calcium looping implementerat scenario C3.

Scenariet C3 illustrerar produktion av klinker i figur 29, totalt utsläpp av växthusgaser i figur 30 och energibehovet i figur 31. Scenariet C3 skiljer sig från övriga cementscenarier med sin negativa elförbrukning och ökande användning av fossila bränslen. Minskningen av utsläppen av växthusgaser till atmosfären visas i figur 30.

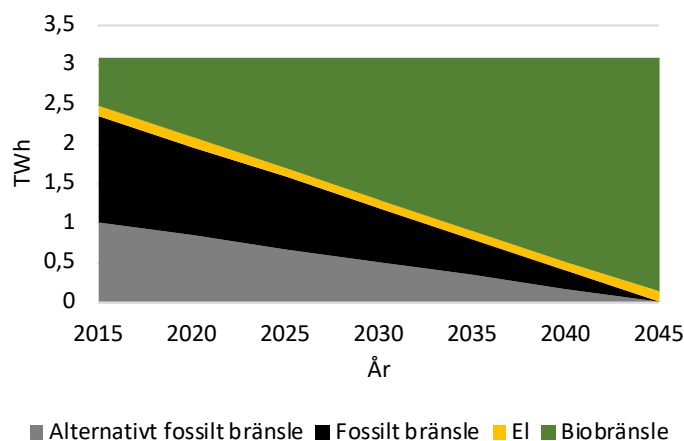
#### 4.1.5 C4 - Biobränsle



Figur 32: Cementfabrikernas produktion.



Figur 33: Utsläpp av växthusgaser i koldioxidekvivalenter i scenario C4



Figur 34: Energiförbrukningen i cementindustrin uppdelat i energibärare i scenario C4

Scenariet C4 illustrerar produktion av klinker i figur 32, totalt utsläpp av växthusgaser i figur 33 och energibehovet i figur 34. Att bara substituera fossilt bränsle med biobränsle kommer inte kunna sänka utsläppen av fossila växthusgaser mer än 38% då processutsläppen inte åtgärdas som i scenario C1, C2 och C3. Biobränsle behovet blir i detta scenario cirka 3 TWh/år.

## 4.2 Kemiindustri

Scenarierna har sin utgångspunkt i den nuläges- analys av svensk kemiindustri som beskrivs i 3.2. Antaganden kopplade till kemiindustrins framtidsce-

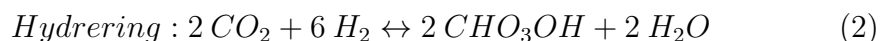
narier hittas i Metod. Då kemiindustrin inte har tagit fram någon gemensam färdplan finns inget scenario kopplat till det

## Övergång till biobaserade råvaror och bränslen

Genom att substituera fossila råvaror och bränslen mot biobaserade råvaror och bränslen, ersätts de fossila utsläppen av växthusgaser till biogena utsläpp. Detta bytet sker i scenario K1.

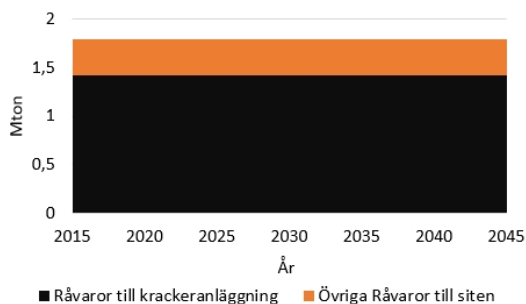
## Elektrifiering

En möjlig metod för att avlägsna utsläppen från krackeranläggningen i Stenungsund är tekniken *Power To Gas*, PTG. En PTG-teknik utgår ifrån att tillverka alkener av metanol med lågt koldioxidavtryck, tekniken beskrivs närmare i en rapport från Dechema [63]. Metanolen produceras via elektrolys av vatten följt av hydrering av  $CO_2$  som kolkälla. Stegen för framställning kan ses i ekvation 1, 2 samt 3. Enligt Dechemas rapport är potentialen hög för att tekniken skall fungera i stor skala till 2030. Dechemas rapport visar på att energibehovet ökar cirka 5,5 gånger jämfört med den konventionella krackeranläggningen. För implementering av denna teknik krävs en ny anläggning för prdouktion av eten och propen, då den nuvarande krackeranläggningen inte kan användas för denna teknik. Power To Gas används i scenario K2.

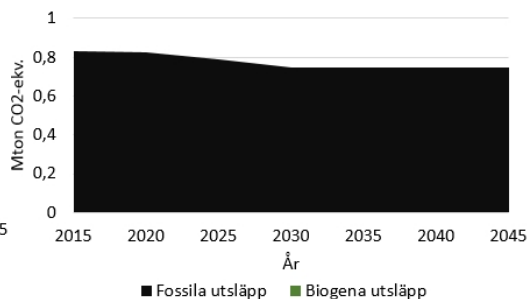


För vidare produktion till alkener används sedan tekniken *Methanol To Olefins*, MTO, som redan används i stor skala i industrin världen över [64].

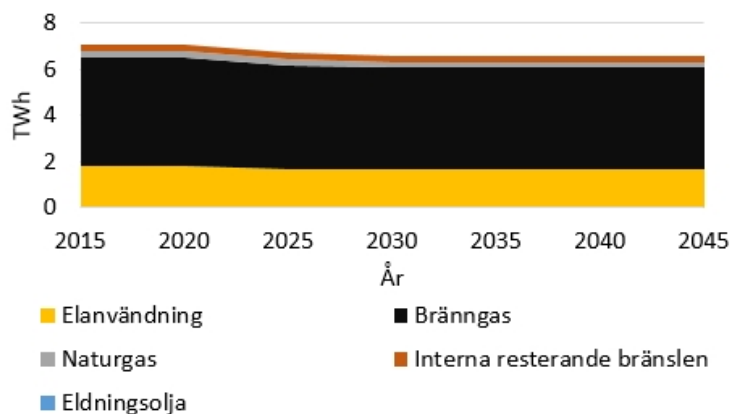
#### 4.2.1 K0 - Referens



Figur 35: Behandlade råvaror scenario K0.



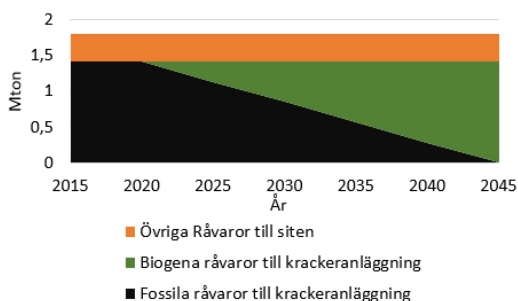
Figur 36: Utsläpp av växthusgaser scenario K0.



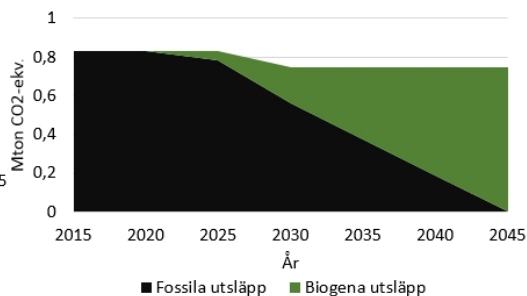
Figur 37: Total energiförbrukning uppdelat på energibärare i scenario K0.

I figur 35 visas råvarubehovet för scenario K0. Energiförbehovet samt utsläppen av växthusgaser för scenario K0 visualiseras i figur 37 samt figur 36. I energiförbehovet är inte råvarubehovet inkluderat. Det innebär att det tillkommer ytterligare cirka 2 TWh fossila råvaror för att täcka detta behov.

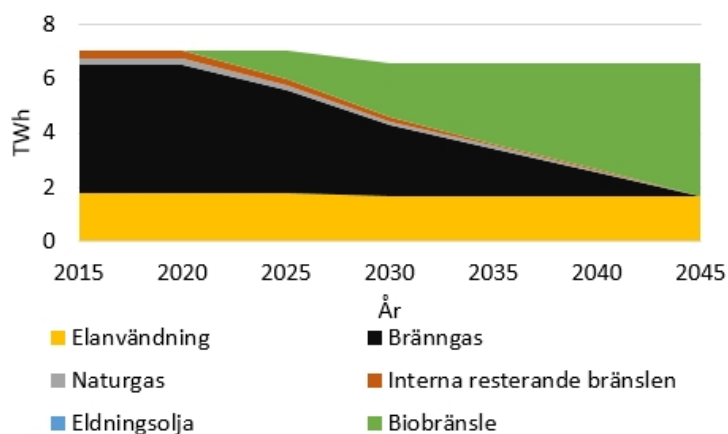
#### 4.2.2 K1 - Biobränsleintensivt



Figur 38: Behandlade råvaror scenario K1.



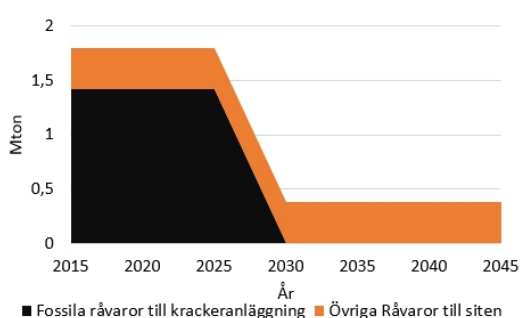
Figur 39: Utsläpp av växthusgaser scenario K1.



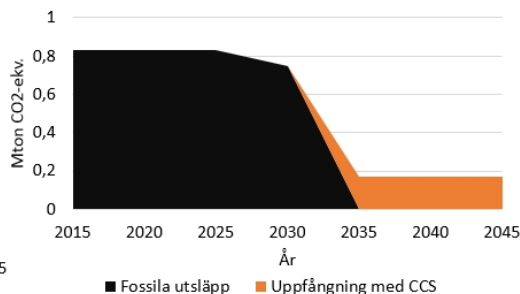
Figur 40: Total energiförbrukning uppdelat per energibärare scenario K1.

Scenario K1 resulterar i ett energibehov på 5 TWh per år, vilket ses i figur 40. Det totala behovet av biobränslen är cirka 7 TWh, då även råvarubehovet inkluderas. Alla fossila utsläpp av växthusgaser ersätts av biogena utsläpp, se figur 39. I figur 38 och 39 visualiseras skiftet av råvaror och utsläppen över tid.

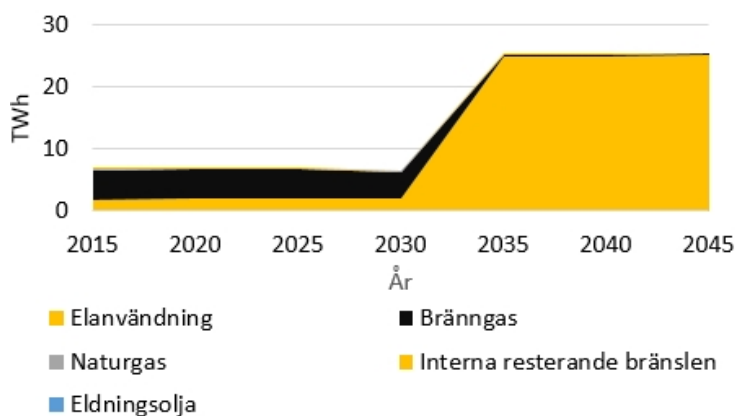
### 4.2.3 K2 - Elektrifiering



Figur 41: Råvaror scenario K2.



Figur 42: Utsläpp av växthusgaser scenario K2.



Figur 43: Total energiförbrukning uppdelat per energibärare scenario K2.

I scenario K2 illustreras råvarubehov i figur 41, totalt utsläpp av växthusgaser i figur 42 och energibehovet i figur 43. För att nå noll fossila utsläpp av växthusgaser i elektrifieringsscenarioet behöver CCS användas. Lagring av 170 kton CO<sub>2</sub> innebär en ökning av elbehovet med ytterligare 0,0425 TWh enligt IVAs rapport [23]. Beroende på hur koldioxiden som används som råvara till processen har producerats, skulle processen kunna bidra med negativa utsläpp [63], men detta har inte medräknats i beräkningarna till Scenario K2.

## 4.3 Raffinaderi

För raffinaderiindustrin studeras utöver referensscenarioet ett utbyggnadsscenario och ett CCS-scenario. Scenarierna tar sin utgångspunkt i den nuläges-



analys av svensk raffinaderiindustri som beskrivs i 3.3. Antaganden och beräkningar kopplade till raffinaderiernas framtids- scenarier hittas i Metod.

## Utbyggnader

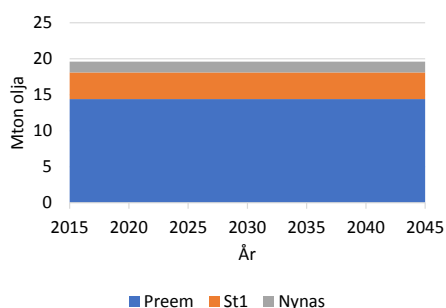
Preem planerar att bygga ut sin anläggning i Lysekil för att producera egen vakuumgasolja (VGO), som används vid tillverkningen av diesel och bensin [65]. Den nya anläggningen kommer att elda med bränngas (naturgas eller egenproducerad) och utsläppen av koldioxid kommer att öka med 1,7 miljoner ton jämfört med nuvarande utsläppsnivå [66].

I Göteborg planerar Preem att bygga en vätgasanläggning. Anläggningen kommer att ångreformera naturgas, cirka 100 000 ton per år [67]. Koldioxidutsläppen från raffinaderiet i Göteborg beräknas då öka med cirka 50%, till 780 000 ton per år. Dock skall 300 000 ton av råoljan som raffinerats ersättas med förnybar råvara i samband med vätgasanläggningen, vilket leder till en nettobesparing på 800 000 ton koldioxid när transportsektorn räknas med [67].

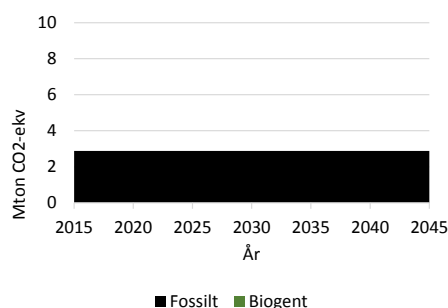
## CCS

Olika sorters CCS kan användas, post-combustion eller oxyfuel combustion, som har skilda elbehov och behov av termisk energi. Värden för energibehoven och övriga antaganden kan ses i Metod.

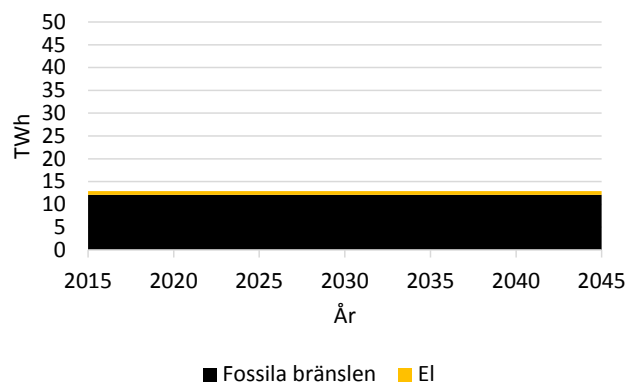
### 4.3.1 R0 - Referens



Figur 44: Konstant produktion av olja. I figur syns oljeförbrukningen för Preem, St1 och Nynas.



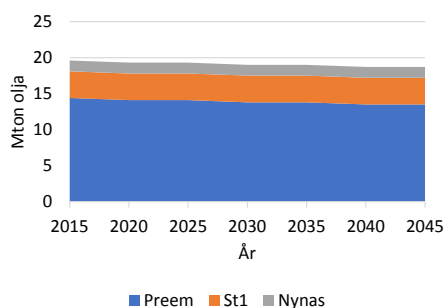
Figur 45: Konstanta utsläpp. I figur syns fossilt respektive biogent utsläpp av koldioxidekvivalenter.



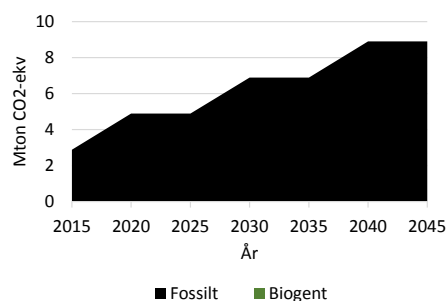
Figur 46: Konstant energianvändning av fossila bränslen och el.

I referensscenariot raffinerar lika mycket råolja, energiförbrukningen är konstant och utsläppen är konstant lika stora som idag enligt figurer 44, 45 och 46.

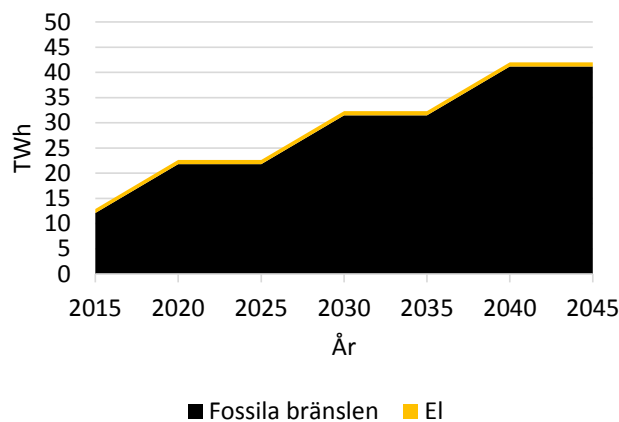
### 4.3.2 R1 - Utbyggnad



Figur 47: Ingående råolja för Preem, St1 och Nynas.



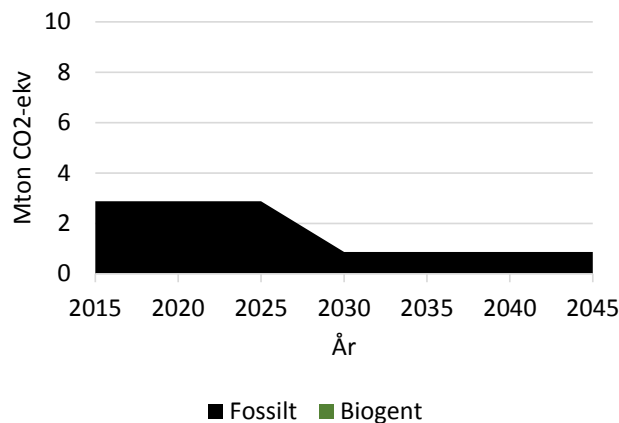
Figur 48: Fossilt respektive biogent utsläpp av koldioxidekvivalenter



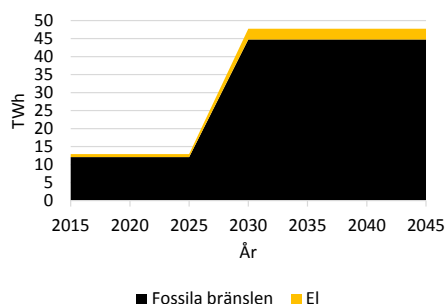
Figur 49: Energianvändning av fossila bränslen och el

I detta scenario sker utbyggnader av raffinaderiindustrin, främst Preem. I figur 47 syns att råolja som processas minskar, vilket beror på en inblandning av förnybar råvara. Det syns även att utsläppen av växthusgaser ökar, i figur 48, vilket beror på den ökade användningen av fossila bränslen. Energianvändningen ses i figur 49.

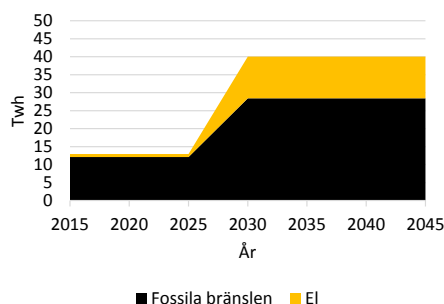
#### 4.3.3 R2 - CCS



Figur 50: Fossilt respektive biogent utsläpp av koldioxidekvivalenter med införande av CCS-teknik.



Figur 51: Energianvändning om post-combustion används för infångning av CO<sub>2</sub>.



Figur 52: Energianvändning om oxyfuel combustion används för infångning av CO<sub>2</sub>.

I detta scenario är den ingående råoljan densamma som i referensscenariot, enligt figur 44. Minskningen av utsläpp av växthusgaser när CCS är fullskalligt år 2030 ses i figur 50. Då det finns två passande tekniker för att fånga in koldioxiden visas energianvändningen vid post-combustion i figur 51 och oxyfuel combustion i figur 52.

#### 4.3.4 Andra tänkbara utvecklingsvägar

Raffinaderiindustrins utmaningar skiljer sig från de andra industrierna som ingår i denna studie eftersom dess utveckling är kopplad till utvecklingen i transportsektorn. Två möjliga utvecklingsvägar som inte inkluderats i scenarioanalysen ovan är:

Ett möjligt scenario är att oljeraffineringen minskar drastiskt i samband med att den svenska fordonsflottan går mot att bli fossiloberoende [68]. Dock antas en nedläggning av raffinaderiindustrin inte trolig då Sveriges raffinaderier exporterar mycket produkter [69].

Ett annat scenario är att all fossil olja byts ut till bioråvara. Enligt Kjærstad et al skulle raffinaderierna i Göteborg behöva 120 TWh biomassa och fordon skulle behöva ha en högre effektivitet för att möjliggöra detta [70].

## 4.4 Skogsnäring

Följande avsnitt redogör för möjliga scenarier där Sveriges sulfatmassabruk ställer om sin produktion till noll netto-utsläpp innan år 2045. Scenarierna har sin utgångspunkt i den nulägesanalys av svensk skogsnäring som beskrivs i 3.4. I Skogsindustriernas färdplan för fossilfri konkurrenskraft framgår att

substitution av fossila bränslen till biobränsle är möjligt i skogsindustriella processer och att fortsatt hållbar tillgång till biomassa är en förutsättning för omställningen [45]. Trots att nuvarande processer för massaproduktion är effektiva finns potential för förbättringar gällande exempelvis energieffektivitet [71]. Antaganden och beräkningar kopplade till skogsnäringens framtidsscenarier hittas i Metod. Samtlig energianvändning i följande avsnitt är angiven per producerat ton sulfatmassa.

### **Kretsloppsanpassat massabruk**

Kretsloppsanpassat massabruk (KAM) var ett hypotetiskt sulfatmassabruk som togs fram på slutet av 90-talet med dåtidens bästa teknik samlat i ett och samma bruk och beskrivs i en bok av MISTRA [72]. I boken framgår att bruket använder kontinuerlig kokning istället för satsvis kokning och i avsalubruken används biobränsle istället för fossila bränslen.

I scenario SK1 undersöks hur energianvändningen samt koldioxidutsläppen påverkas om Sveriges samtliga sulfatmassabruk övergår till KAM.

Avsalubrukets biobränsleanvändning är 25,3 GJ/ton biobränsle varav 21,9 GJ/ton är svartlut och 3,4 GJ/ton bark [72]. Elbalansen, fortsätter MISTRA, beror på massablekningsmetod där elförsäljningen för TCF och ECF är 584 kWh/ton respektive 663 kWh/ton. Vidare framgår av MISTRA att för ett massabruk som producerar TCF-blekt massa och har ett integrerat finpappersbruk köps el (360 kWh/ton) och bränsleanvändningen är större än för avsalubruket då även tallolja (1,2 GJ/ton) och fossila bränslen (1,8 GJ/ton) används.

### **Svartlutsförgasning med kombicykel**

MISTRA redogör även för svartlutsförgasning med kombicykel där sodapannan i ett kretsloppsanpassat massabruk ersätts med en svartlutsförgasningsanläggning där svartlut förgasas till en energirik syngas som eldas i en gasturbin. Avgaserna passerar en ångpanna vilket genererar ånga som driver en mottrycksturbin. Båda turbinerna genererar el.

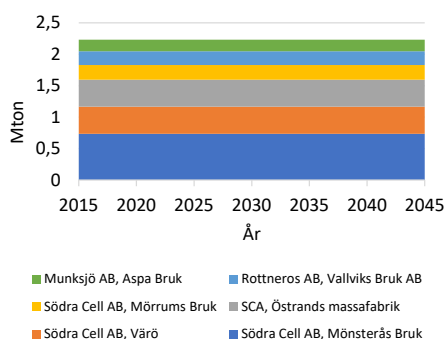
Svartlutsförgasning med kombicykel medför elöverskott på 1103 kWh/ton för avsalubruk och 21 kWh/ton för integrerade pappers- och massabruk, biobränsleanvändningen ökar eftersom mer bark används i mesaugnen [72]. Rent tekniskt är det möjligt att införa svartlutsförgasning innan år 2020 [73].

I scenario SK2 undersöks hur energianvändning och utsläpp av koldioxidekvivalenter påverkas då samtliga svenska sulfatmassabruk modifierar sina anläggningar till KAM med svartlutsförgasning och kombicykel.

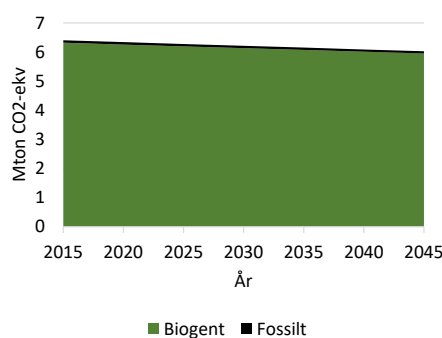
## CCS

I en rapport från IEAGHG [25] beskrivs hur energibalansen påverkas för såväl ett avsalubruk som ett integrerat pappers- och massabruk, då en CCS-anläggning införs som fångar upp koldioxid från mesaugn, barkpanna samt sodapanna. De siffror som redovisas i tabell 10 gäller för avsalubruket även efter införandet av CCS. Det integrerade pappers- och massabruket använder 4,1 GJ/ton mer bibränsle än avsalubruket eftersom en extrapanna används för att förse CCS-anläggningen med ånga [25]. Enligt IEAGHG medför införandet av CCS att utsläpp av biogen koldioxid är 215761 ton/år för ett avsalubruk och 564807 ton/år för ett integrerat pappers- och massabruk.

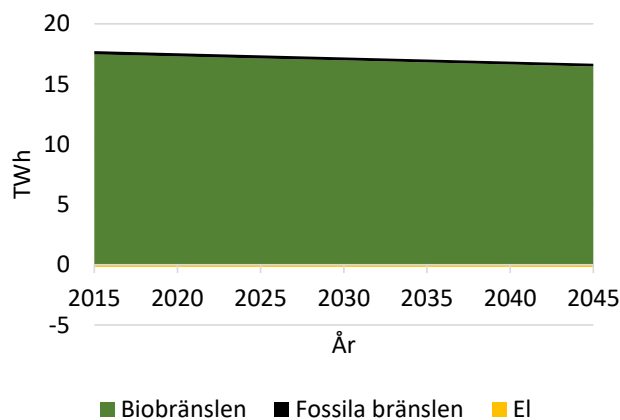
### 4.4.1 SK0 - Referens



Figur 53: Produktion av sulfatmassa i samtliga svenska avsalubruk mellan år 2015-2045.

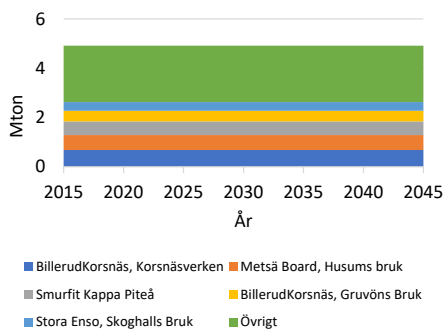


Figur 54: Utsläpp av växthusgaser från samtliga svenska avsalubruk mellan år 2015-2045.

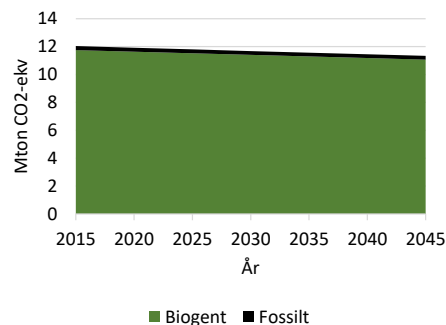


Figur 55: Total energianvändning i samtliga svenska avsalubruk mellan år 2015-2045.

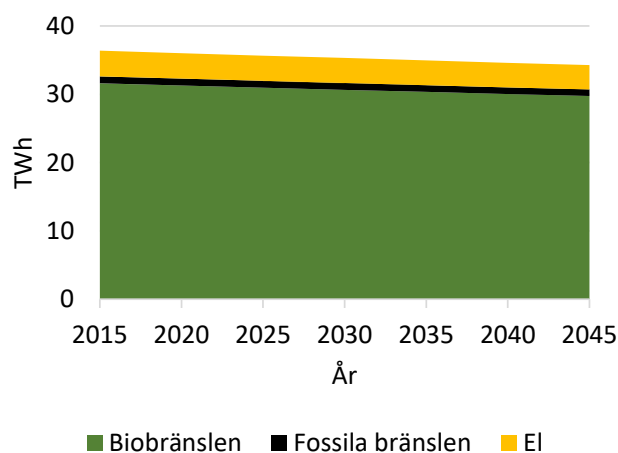
I figur 53, 54 och 55 presenteras total produktion av sulfatmassa, utsläpp av växthusgaser och energianvändning för avsalubruk mellan år 2015-2045.



Figur 56: Produktion av sulfatmassa för samtliga svenska integrerade pappers- och massabruk mellan år 2015-2045.



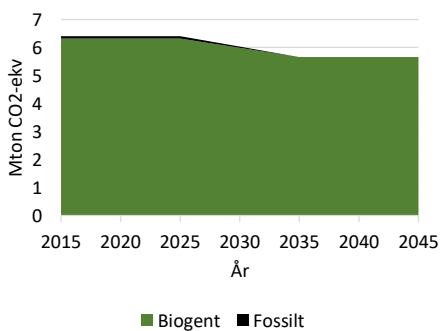
Figur 57: Utsläpp av växthusgaser för samtliga svenska integrerade pappers- och sulfatmassabruk mellan år 2015-2045.



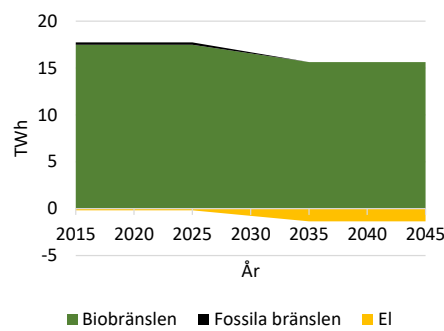
Figur 58: Total energianvändning i samtliga svenska integrerade pappers- och sulfatmassabruk mellan år 2015-2045

I figur 56, 57 och 58 presenteras total produktion av sulfatmassa, utsläpp av växthusgaser och energianvändning för integrerade pappers- och massabruk mellan år 2015-2045.

#### 4.4.2 SK1 - Färdplan och effektivisering

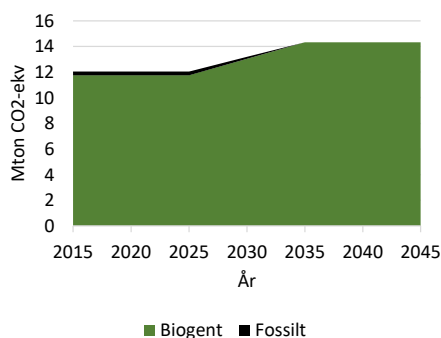


Figur 59: Utsläpp av växthusgaser från samtliga svenska avsalubruk mellan år 2015-2045

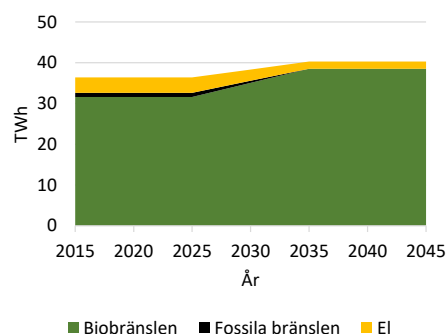


Figur 60: Total energianvändning i svenska avsalubruk mellan år 2015-2045





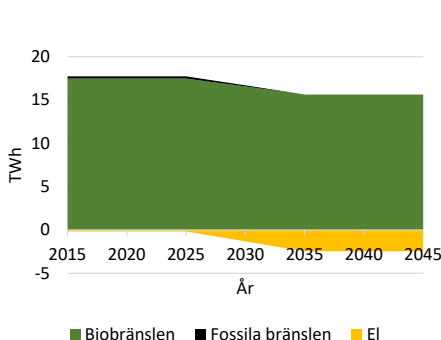
Figur 61: Utsläpp av växthusgaser från samtliga svenska integrerade pappers- och sulfatmassabruk mellan år 2015-2045.



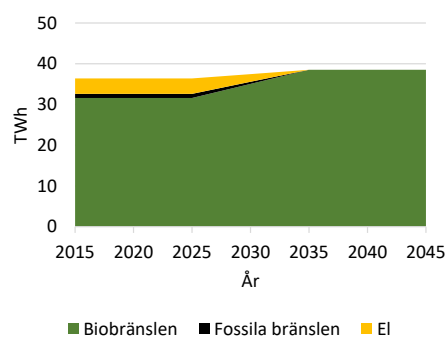
Figur 62: Total energianvändning i samtliga svenska integrerade pappers- och sulfatmassabruk mellan år 2015-2045

I scenario SK1 byggs samtliga sulfatmassabruk om till KAM mellan år 2025 och 2035, fossila bränslen substitueras av biogena bränslen. Figur 59 och 60 visar hur utsläpp av växthusgaser och total energianvändning påverkas för avsalubruk, figur 61 och 62 visar hur utsläpp av växthusgaser och total energianvändning påverkas för integrerade pappers- och massabruk.

#### 4.4.3 SK2 - Svartlutsförgasning med ökad elproduktion



Figur 63: Total energianvändning i samtliga svenska avsalubruk mellan år 2015-2045

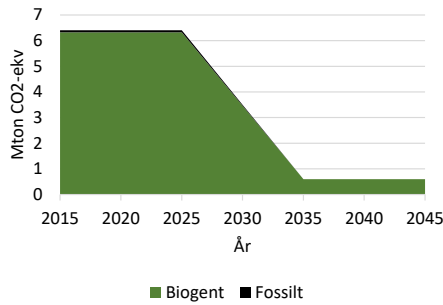


Figur 64: Total energianvändning i samtliga svenska integrerade pappers- och sulfatmassabruk mellan år 2015-2045

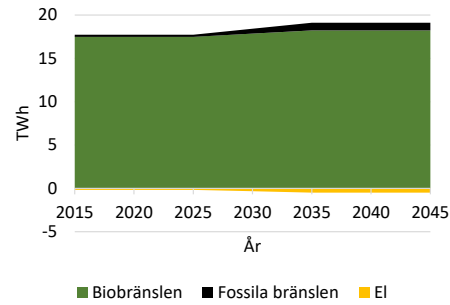
I scenario SK2 införs KAM med svartlutsförgasning och kombicykel gradvis mellan år 2025-2035 i Sveriges samtliga sulfatmassabruk och fossila bränslen

substitueras av biobränslen. Hur energianvändningen påverkas för avsalubruk respektive integrerade pappers- och massabruk framgår av figur 63 och 64.

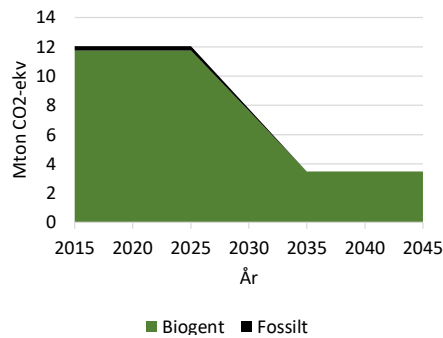
#### 4.4.4 SK3 - CCS



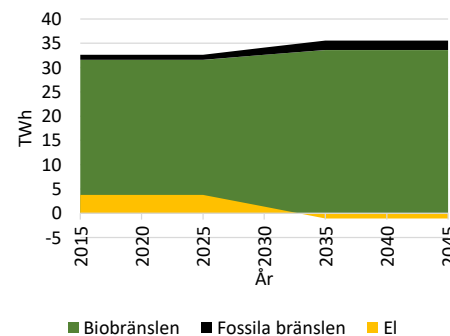
Figur 65: Utsläpp av växthusgaser från samtliga svenska avsalubruk mellan år 2015-2045



Figur 66: Total energianvändning i samtliga svenska avsalubruk mellan år 2015-2045



Figur 67: Utsläpp av växthusgaser från samtliga svenska integrerade pappers- och sulfatmassabruk mellan år 2015-2045.



Figur 68: Total energianvändning i samtliga svenska integrerade pappers- och sulfatmassabruk mellan år 2015-2045

I scenario SK3 införs modernt massabruk med CCS på sodapanna, mesaugn samt barkpanna gradvis mellan år 2025-2035 i Sveriges samtliga sulfatmassabruk. Utsläpp av koldioxidekvivalenter och energianvändning i avsalubruk framgår av figur 65 och 66. Figur 67 och 68 visar utsläpp av koldioxidekvivalenter och energianvändning i integrerade pappers- och massabruk.

## 4.5 Stålindustri

För stålindustrin har utöver referensscenariot ett färdplansscenario, ett extrem elektrifiering och ett biomassa med CCS scenario studerats. Scenarierna har sin utgångspunkt i den nulägesanalys av stålindustrin som beskrivs i 3.5. Antaganden kopplade till stålindustrins framtidsscenarioer hittas i Metod.

### Masugnsprocessen

Kokset kan upp till 30% bytas ut till biobaserat förädlad kol [26] vilket innebär ett biokolsbehov på 3,21 TWh från och med 2040 som beräknats enligt Metod. Genom att implementera topgascirkulering med syrgas kan upp till 60% av koldioxidutsläppen [24] fångas in och lagras i en CCS-anläggning. Sammanlagt fångas 2,34 Mton koldioxid in vilket innebär ett elbehov på 2,28 TWh, som beräknats enligt Metod. Dock för att helt bli fossilfri behöver själva masugnsprocessen bytas ut, då användningen av koks är nödvändig i processen [58].

### Höganäsprocessen och ljusbågsugnar

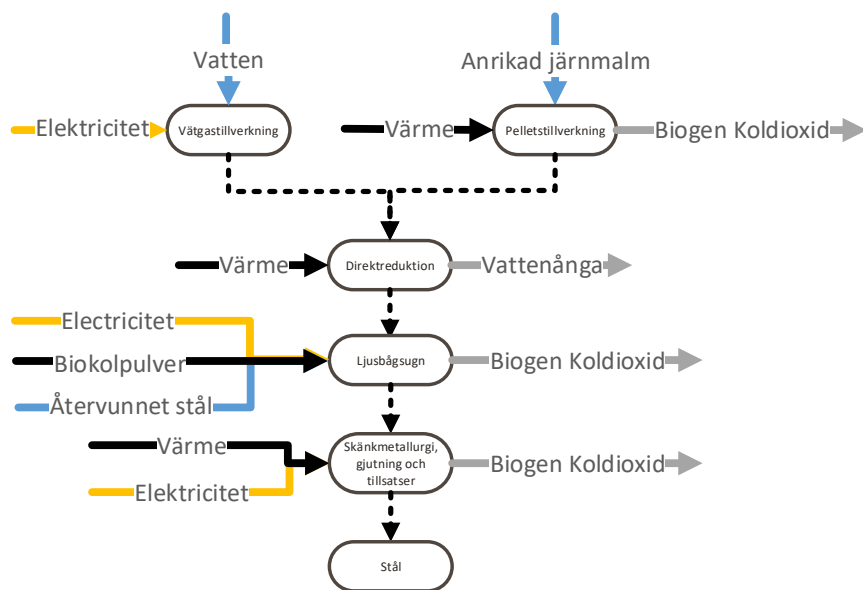
För att eliminera utsläppen i Höganäsprocessen kan kolet ersättas av ett förädlad biobaserat kol med höga kvalitetskrav. Höganäs AB har sedan 2013 drivit projektet PROBIOSTÅL tillsammans med Cortus Energy vilket ska utvärdera möjligheten att framställa energigas och biokol som kan användas i reduceringsprocessen. [58]. Projektet har resulterat i en pilotanläggning som tas i kommersiellt bruk under 2019 [74]. Även kolpulvret i ljusbågsugnar vid skrotbaserad tillverkning kan ersättas av förädlad biokol.

Detta ger ett sammanlagt biokolsbehov på 1-1,5 TWh [75]. I scenarierna har konservativa uppskattningar gjorts. Därmed antas 1,5 TWh kol användas i processerna idag som sedan helt ersatts med biokol vid 2040. Då närmare detaljer på Höganäs energisituation saknas har vidare omställning för företaget utlämnats.

### Vätgasbaserad direktreduktion

HYdrogen BReakthrough Ironmaking Technology, eller HYBRIT är ett initiativ som drivs gemensamt av SSAB, LKAB och Vattenfall. Initiativet syftar till att år 2035 skapa världens första fossilfria stålproduktion genom direktreduktion av järnmalm med vätgas [27]. En pilotanläggning med vätgasproduktion och reduktion börjades byggas 2018, och därefter kommer en helomställning ske i två faser. I den första fasen ersätts SSABs masugnar med ljusbågsugnar,

vilket sker 2025 i Oxelösund och 2040 i Luleå. En förutsättning för omställningen i Oxelösund är att anläggningen ansluts till högspänningsnätet. I den andra fasen introduceras vätgasproduktion, direktreduktion med vätgas och fossilfri pelletsering [27]. Målet är att hela SSABs stålproduktion ska vara fossilfri till 2040.



Figur 69: Processträd för HYBRIT, baserad på processschema i HYBRITs förstudie [27].

Genom HYBRIT introduceras en ny vätgasbaserad reduktionsprocess, som visas i figur 69. Vätgas produceras via elektrolys och används för att direktreducera järnmalmspellet. Resultatet blir en järnsvamp som smälts i ljusbågsugnar där biokolpulver tillsätts för att producera stål. Industrins energibehov samt produktion under åren 2020-2045 har kartlagts i MISTRA scenarios roadmaps [76].

### Tillverkning av järnpellet

Inom ramen för projektet HYBRIT har LKAB även undersökt möjligheten att byta värmningsteknik för att göra tillverkningen av järnmalmspellet fossilfri. Projektet har resulterat i konstruktionen av en testanläggning som väntas tas i drift 2020. Målet med testanläggningen är att konvertera ett av LKABs pelletsverk till biooljadrift vilket skulle minska LKABs utsläpp med 40% fram till 2025 [77]. Järnpelletstillverkningen har idag ett uppskattat energibehov på 1,9 TWh eldningsolja och 0,6 TWh el som beräknats enligt

Metod. Eldningsoljan antas ersättas av ett bibränsle av likvärdig kvalitet fram till 2045.

## Värmebehandling och ljusbågsugnar

Värmebehandlingsugnar kan endast delvis elektrifieras på grund av de höga temperaturerna som krävs i processerna. De fossila bränslena kan däremot ersättas med bibränslen av motsvarande kvalitet. I scenarierna har det an-

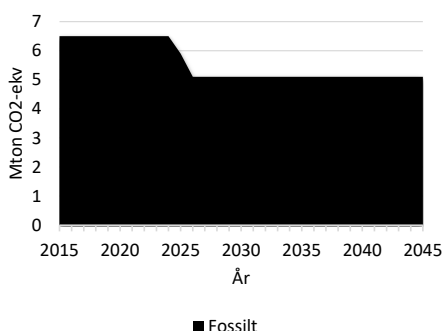
Tabell 13: Energiförbrukning per ton producerat stål för ljusbågsugn [27] [78].

Ljusbågsugn	El-behov	Gas-behov
Gammal	0,74 MWh/ton	0,41 MWh/ton
Ny	0,49 MWh/ton	0,38 MWh/ton

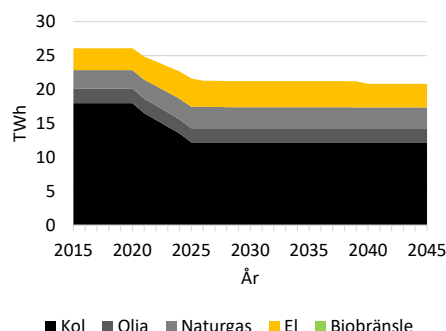
tagits att de befintliga ljusbågsugnar gradvist renoverats och blivit mer energieffektiva, samt att det används biobaserad gas istället för naturgas. Energieffektiviseringen går att se i tabell 13 och beräknas per ton producerat stål.

Fram till 2040 skapas ett ökat elbehov på 2 TWh [75] från elektrifiering av värmebehandlingsprocesser samt ett bibränslebehov på 1,79 TWh [76]. Utöver det sänks elbehovet med 0,41 TWh i och med effektiviseringen av ljusbågsugnar, samt ett ökat behov av bibränsle på 0,66 TWh för att ersätta naturgasen.

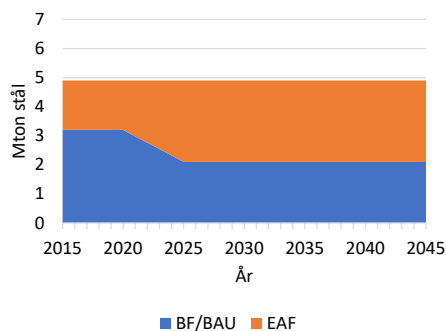
### 4.5.1 ST0 - Referens



Figur 70: Utsläpp av växthusgaser från stålindustrin för scenario ST0.



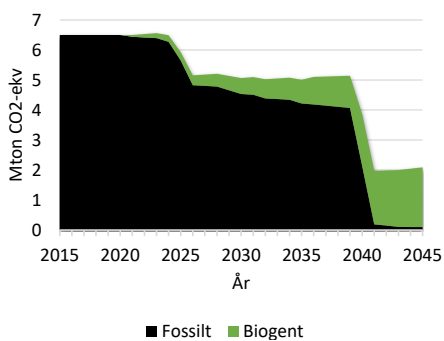
Figur 71: Total energianvändning inom stålindustrin för scenario ST0



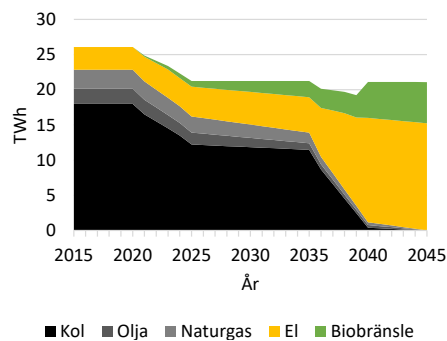
Figur 72: Produktionsnivåer av olika stålproduktionstekniker för scenario ST0 och ST3.

Ombyggnationen av Oxelösunds minskar nyproduktionen av stål och ökar andelen skrotbaserad stålproduktion vilket visualiseras i figur 72. Både utsläppen i figur 70 och energianvändningen i figur 71 minskar när denna produktionsskiftet sker.

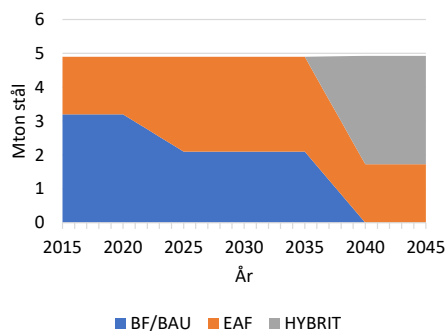
#### 4.5.2 ST1 - Färdplan genomförs



Figur 73: Utsläpp av växthusgaser från stålindustrin för scenario ST1.



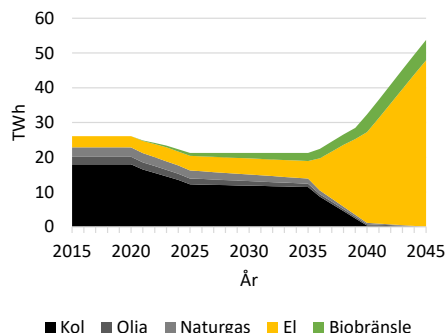
Figur 74: Total energianvändning inom stålindustrin för scenario ST1.



Figur 75: Produktionsnivåer av olika stålproduktionstekniker för scenario ST1 och ST2.

Scenariot innebär att de åtgärder som redogörs i Jernkontorets färdplan implementeras och vätgasreducering blir den primära processen för nystålstillverkning [58]. Produktionen förändras enligt figur 75. Scenariot innebär att stålindustrin blir fossilfri och istället ett stort elbehov skapas, vilket visas i figur 74. Utsläppen visas i figur 73.

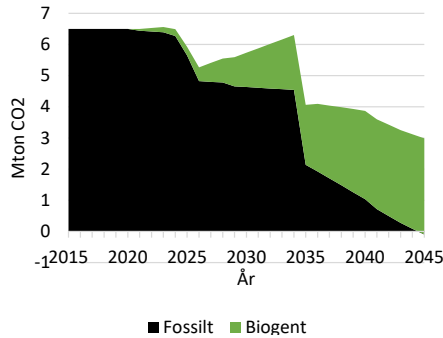
#### 4.5.3 ST2 - Extrem elektrifiering



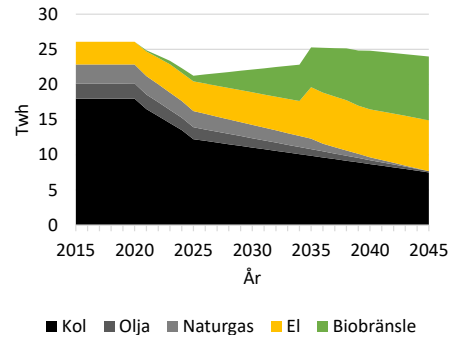
Figur 76: Total energianvändning inom stålindustrin för scenario ST2.

Scenariot innebär att samtliga 23,9 Mton järnmalmpellets [28] som LKAB producerar reduceras i Sverige med hjälp av vätgasreduktion, och den reducerade järnsvampsprodukten sedan exporteras. Elbehovet för scenariot har beräknats enligt Metod till 47,9 TWh, varav 41,1 TWh kommer från produktion av vätgas. Scenariot skulle innebära stora förändringar på europeisk nivå då integrerade masugnsstålverk behövs läggas ner. Då varken Sveriges stålproduktion eller utsläpp förändras av detta scenario har det exkluderats ur framtida kapitel. Figur 76 visar på de energibehov som uppkommer från detta scenario.

#### 4.5.4 ST3 - Biomassa + CCS



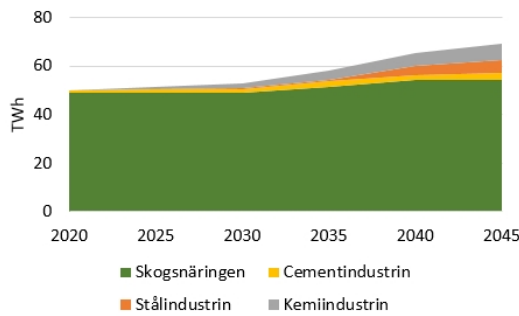
Figur 77: Utsläpp av växthusgaser från stålindustrin för scenario ST3.



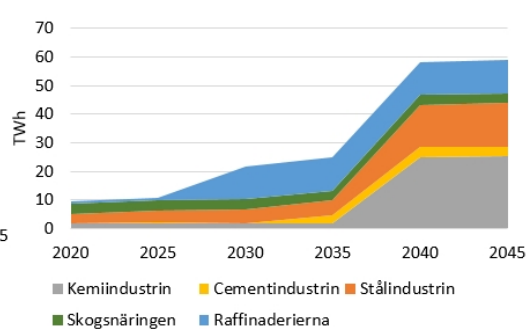
Figur 78: Total energianvändning inom stålindustrin för scenario ST3.

Scenariot innebär att masugnprocessen fortsätter användas vid SSABs anläggning i Luleå. Produktionen förblir som i referensscenariot ST0. Energibehovet visas i figur 78 och utsläppen i figur 77.

#### 4.6 Summering av framtidssceneriernas extremfall



Figur 79: Summering av uppskattat maximalt behov av förädlade biobränslen i TWh 2045 för de undersökta industrierna.



Figur 80: Summering av uppskattat maximalt elbehov i TWh 2045 för de undersökta industrierna.

I figur 79 visualiseras det uppskattade maximala behovet av förädlade biobränslen för de undersökta industrierna. Vid denna summering har det scenario som haft störst biobränslebehov använts för respektive industri. I figur 80 visualiseras det uppskattade maximala elbehovet för de undersökta industrierna. Vid denna summering har det scenario som haft störst elbehov använts för



respektive industri. Då summeringarna har beräknats utifrån olika framtids-scenarion, kommer dessa två olika behov inte vara möjliga samtidigt. I tabell 14 är det totala behovet av el samt biobränslen 2045 beräknat utifrån enskilda industris behov 2045. Raffinaderiernas biobränslebehov samt stålindustrins extremelektrifiering ingår inte i någon av summeringarna och är därför endast med i tabell 14, inte i figurer över behov och utsläpp eller nästkommande kapitel.

Tabell 14: Industriernas uppskattade behov av biobränsle och el 2045

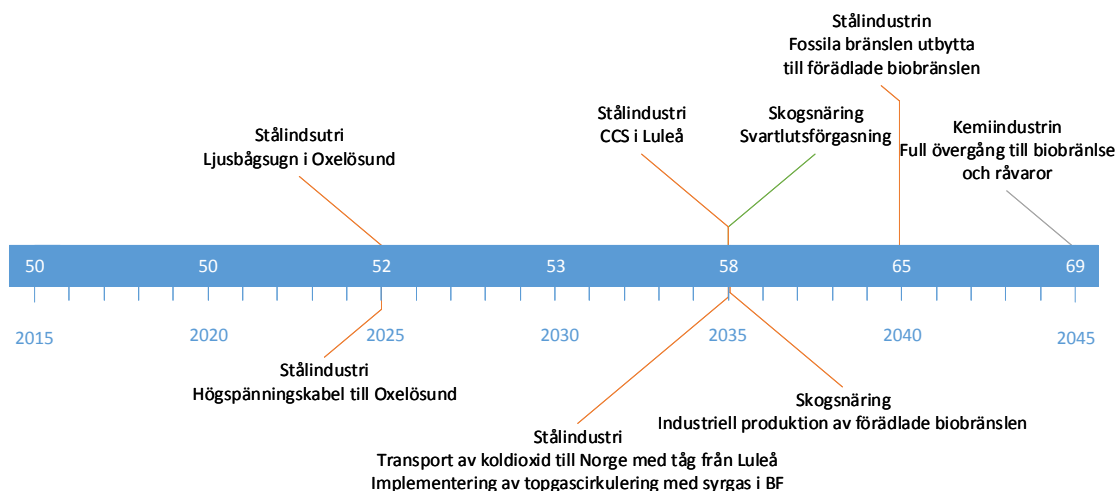
	Uppskattat maximala behov av el 2045 [TWh]	Uppskattat maximala behov av förädlade biobränslen 2045 [TWh]
Stålindustrin	15,2 (47,9)	5,5
Cementindustrin	3,5	3,0
Skogsnäringen	3,4	54,2
Kemiindustrin	25,2	7,4
Raffinaderierna	11,6	(120)
<b>Summa</b>	<b>59 (91,7)</b>	<b>70 (190)</b>

Den summerade energibehoven kan jämföras med den uppskattade produktionen av el och biomassa 2045, som är 160 TWh el och 200-220 TWh biomassa.

## 5 Diskussion

### 5.1 Maximalt behov av förädlade biobränslen

Baserat på summeringen av maximalt biobränslebehov, som visas i figur 79, har en tidslinje tagits fram som visar nödvändiga tekniska implementeringar samt infrastruktur för en biointensiv omställning av samtliga industrier. Tidslinjen visualiseras i figur 81.

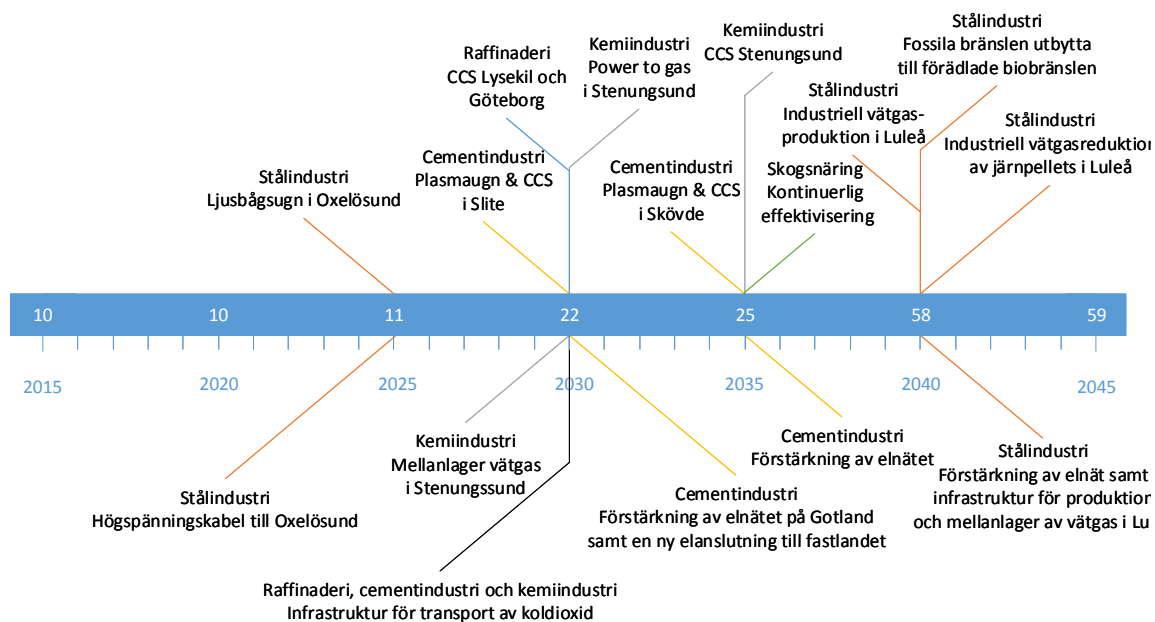


Figur 81: På ovasidan av tidslinjen presenteras nya tekniker och på undersidan nödvändig infrastruktur för respektive industris mest biobränslekrävande scenario: C4, K1, SK2 och ST3. Totalt **biobränslebehov** framgår av de vita siffrorna på tidslinjen i **TWh**.

Cement-, kemi- och stålsuttrien visar samtliga på en stor procentuell ökning av förädlade biobränslen jämfört med skogsnäring, vilket ses i figur 79. Det leder till att nya processer för industriell produktion av förädlade biobränslen som biogas och biokol behöver implementeras. Skogsnäringen får därmed en central roll i att uppfylla dessa behov som industrin inte har möjlighet att tillgodose idag. Det kan således krävas nya tillverkningsanläggningar inom skogsnäringen som gör biobränslen som en primär produkt. En betydande ökning i behov av biobränslen sätter höga krav på att transporten av dessa fungerar över hela landet, då behovet kommer bli utspritt geografiskt. Det är inte heller givet att de biogena bränslena får samma kvalitet som de fossila, därav kan biobränslen skilja sig från den här studien.

## 5.2 Maximalt behov av el

Baserat på summeringen av maximalt elbehov som visas i figur 80 har en tidslinje tagits fram som visar nödvändiga tekniska implementeringar samt infrastruktur för en elintensiv omställning av samtliga industrier. Tidslinjen visualiseras i figur 82.



Figur 82: På ovensidan av tidslinjen presenteras nya tekniker och på undersidan nödvändig infrastruktur för respektive industris mest elkrävande scenario: C2, K2, R2, SK0, ST1. Totalt **elbehov** framgår av de vita siffrorna på tidslinjen i **TWh**.

Ifall samtliga industrier väljer den utvecklingsväg med störst elanvändning ställs stora krav på att det befintliga elnätet förstärks och byggs ut. I figur 82 visas två nödvändiga utbyggnader, en högspänningskabel till Oxelösund och ny elanslutning till Gotland från fastlandet samt en förstärkning av elnätet. Då kemiindustrin och raffinaderi ställer om 2030, kan de gemensamt investera i förstärkning av elnätet på västkusten.

För kemi- och stålindustrin skulle vätgas bli en viktig råvara för industriernas nya processer. Det skulle krävas industriell vätgasproduktion samt mellanlagring av vätgas, vilket är ett utmanande teknikskifte. Vätgas kan även vara till nytta för andra sektorer, som till exempel bränsle i bränslecellsbilar eller

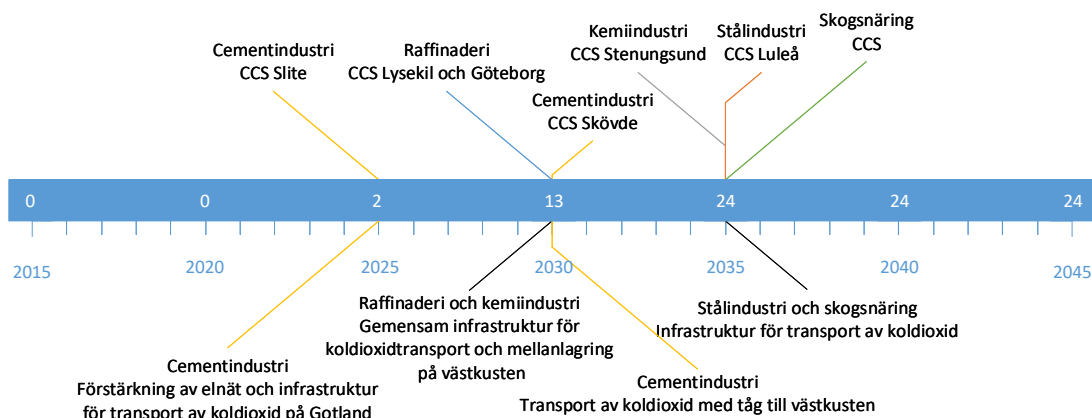
agera energilagringsmedium för att reglera elförsörjningen.

Som ses i figur 82 sker en fördubbling av elbehovet mellan åren 2035 och 2040, vilket är en utmaning för elnätet. Då stora delar av det svenska elnätet är statligt ägt, har politiska incitament stor påverkan på hur elnätet kommer utformas i framtiden. Därav är det inte självklart att de utbyggnader av elnätet som behöver ske för varje enskild industri kommer genomföras.

I den elintensiva tidslinjen har elektrifiering skett i största möjliga utsträckning. De biobränslebehov som kvarstår är i processer där elektrifiering inte är möjligt. Det är för de processerna som tillgången till biobränsle är absolut nödvändigast och bör prioriteras.

### 5.3 Maximalt nyttjande av CCS

Utifrån scenarioanalysen är det tydligt att CCS är en av de tekniker som har störst betydelse för att reducera utsläppen av växthusgaser fram till år 2045. Baserat på denna observation har även en tidslinje tagits fram som beskriver vilken infrastruktur som krävs när CCS införs i samtliga industrier.



Figur 83: Tidslinje som visar implementering av CCS i samtliga industrier. Total uppfångning av koldioxid framgår av de vita siffrorna på tidslinjen i Mton. Förutsättningar för CCS i respektive industri beskrivs i scenario C3, K2, R2, SK3 och ST3.

De olika industrierna implementerar tekniken på olika sätt och vid olika tidpunkter. År 2035 antas CCS vara implementerad i någon form inom alla industrier, se figur 83. I och med att flera fabriker kommer fånga in sin

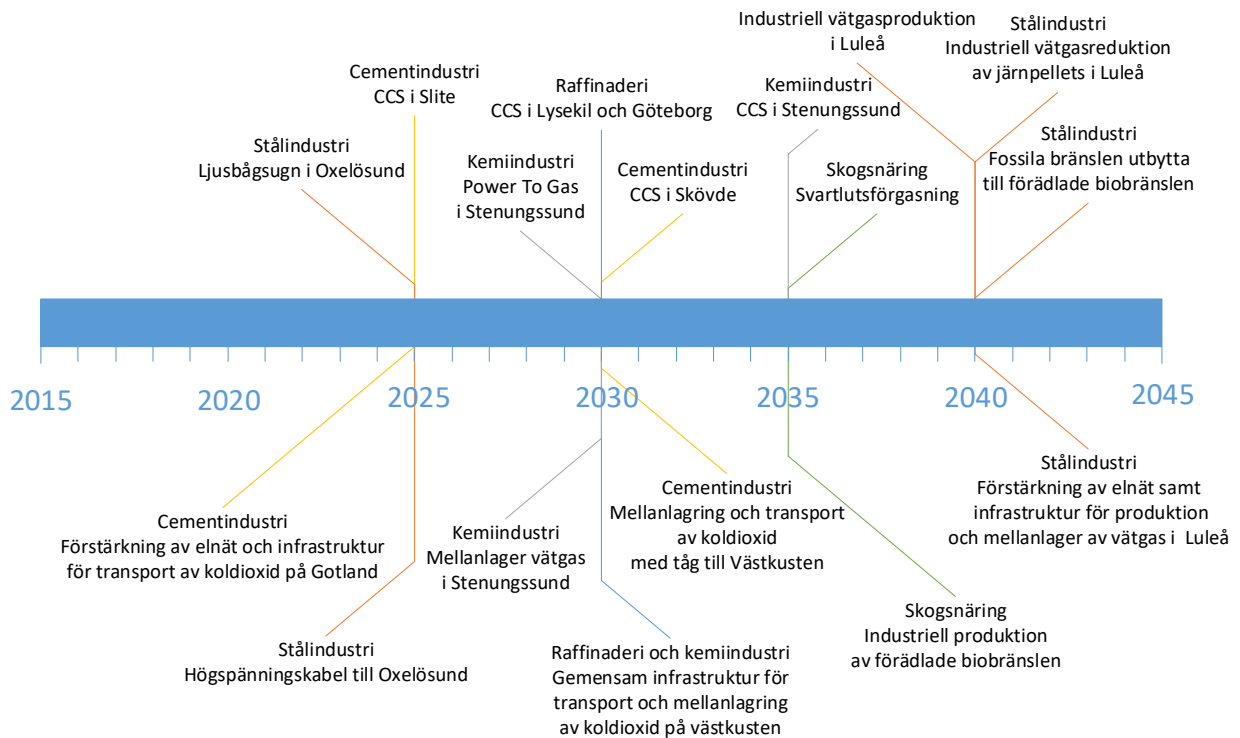
koldioxid samtidigt, finns det möjligheter till samarbete som är viktigt för att minska kostnader. I dagsläget sker det ingen lagring av koldioxid i Sverige. Det innebär att den lagrade koldioxiden skulle behöva transporteras långa sträckor, i dagsläget är Norge närmast. Själva lagringen är en viktig förutsättning för att CCS-tekniken ska fungera, det kan därav vara av intresse att Sverige investerar i en egen lagringsanläggning.

Ett branschöverskridande samarbete är en viktig komponent för att kunna realisera en transport och mellanlagring av den infångande koldioxiden. Ett initialt led är upprättningen av en gemensam infrastruktur för mellanlagring och transport på västkusten för kemiindustrin och raffinaderierna som även kan nyttjas av cementindustrin. Transport av koldioxid från västkusten kan till exempel gå via pipeline till Norge. Övriga industrier kan nyttja befintlig infrastruktur för att frakta koldioxiden med tåg, fartyg eller lastbil.

Om biogena utsläpp av växthusgaser inte ses som noll netto-utsläpp, är det rimligt att CCS får större betydelse även i de biobränsleintensiva scenarierna.

## 5.4 Rekommenderade omställningsåtgärder

Utifrån projektets analys har en rekommenderad omställning för industrierna tagits fram. Tekniker och nödvändig infrastruktur för denna omställning visualiseras i figur 84.



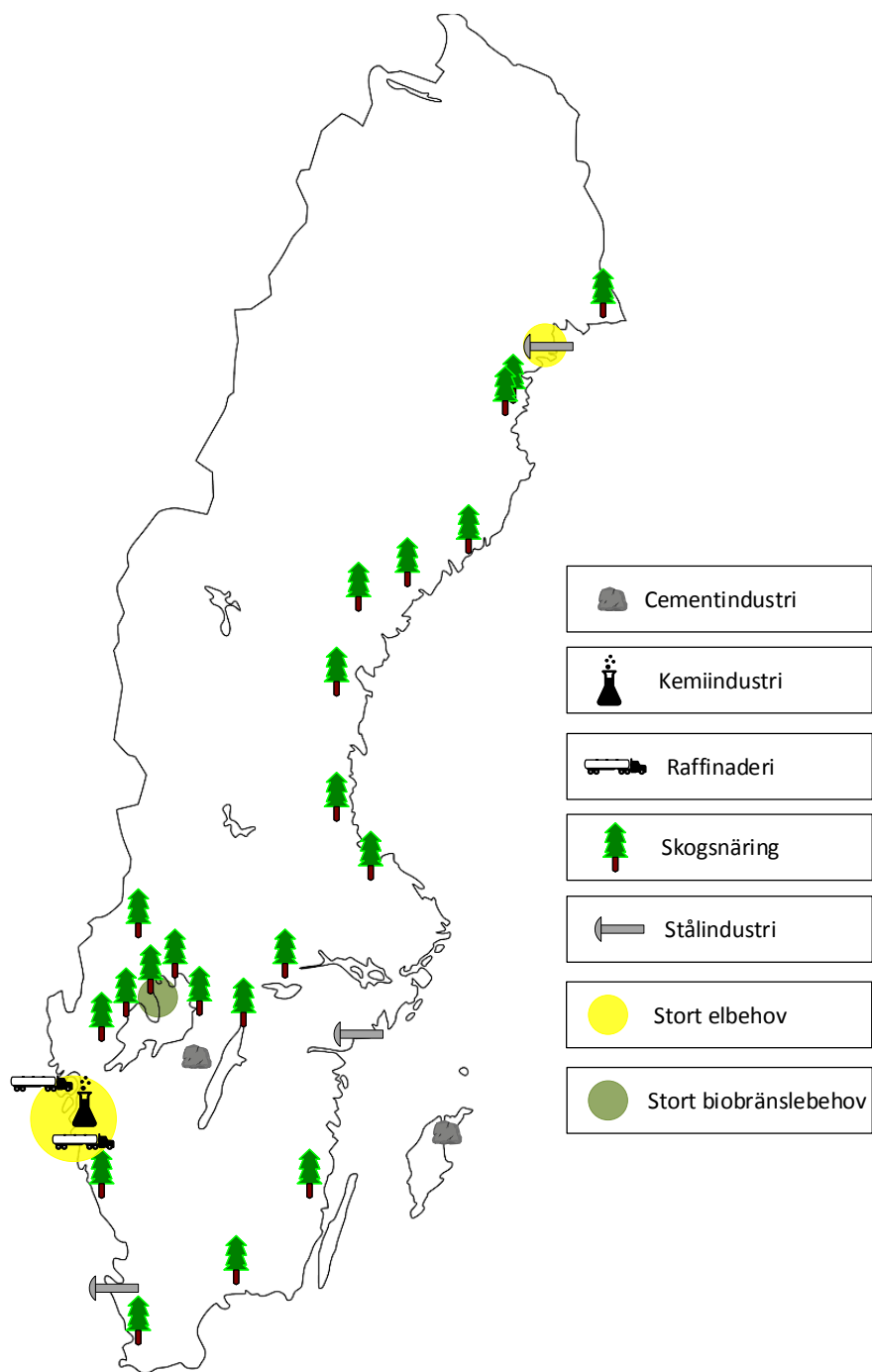
Figur 84: Tidslinje som visar rekommenderade omställningsåtgärder för samtliga industrier. Förutsättningar för respektive industri beskrivs i scenario C3, K2, R2, SK2 och ST1.

I denna omställning når cement noll netto-utsläpp av växthusgaser på kortast tid och är realiserbar då inte allt fokus läggs på en åtgärd, utan flera små förändringar genomförs. Kemiindustrin når noll netto-utsläpp utan att ersätta fossila utsläpp av växthusgaser mot biogena och konkurrerar inte om biobränslen. Raffinaderi reducerar sina utsläpp av växthusgaser. Skogsnäring har god möjlighet att exportera el. Stålindustrin har redan en tydligt utarbetad plan för fossilfrihet där HYBRIT genomförs och flera processer elektrifieras eller övergår till biobränsle.

Flera synergier har identifierats vilket kan ses i figur 84. Synergier gällande vätgas och CCS som diskuterats kring föregående tidslinjer ligger till grund

för rekommendationen. Även fast skogsnäringen har goda möjligheter att exportera el, gör de geografiska förutsättningarna, som framgår av figur 85, att det är svårt att direkt samarbeta med de studerade industrierna. I figur 85 visualiseras även särskilt stora behov av energi sett utifrån geografiskt läge.

Den rekommenderade omställningens totala energibehov är 51 TWh el och 61 TWh biobränsle. Utsläppen av växthusgaser blir 0,9 Mton koldioxidekvivalenter, vilket är en markant minskning från de studerade industriernas totala utsläpp 2017, som då var cirka 15 Mton.



Figur 85: Karta över Sverige med utmärkta industrier som fokuserats på i det rekommenderade scenariet. Grundbild av Sverigekarta från Pixabay [79].



## 6 Syntes

Denna studie har undersökt vilken roll energibärarna biomassa och el kan få i Svensk basindustris omställning mot noll-nettoutsläpp år 2045. En nulägesanalys för industrierna cement, kemi, raffinaderi, skogsnäring och stål har lagt grund för en framtidsanalys där olika scenarier för omställningen diskuteras och energibehov kvantifieras. Utifrån denna studie har följande slutsatser konstaterats:

- Noll netto-utsläpp av växthusgaser åstadkoms inte till år 2045 på grund av att raffinaderierna inte kan fånga in 100% av utsläppen. Den omställning som kommer närmast noll netto-utsläpp av växthusgaser är den rekommenderade, som kräver 51 TWh el och 61 TWh biobränsle. Kvarvarande utsläppen av växthusgaser blir 0,9 Mton CO<sub>2</sub> ekv.
- I det rekommenderade scenariot är det endast cement och stålindustrin, utöver skogsnäringen, som har ett behov av biomassa. Den begränsade resursen biomassa gör mest nytta i de processer där elektrifiering inte är möjligt. Tillgången till biomassa för skogsnäringen är fundamental och kommer vara det även framöver.
- Tekniker som behöver introduceras eller utvecklas är
  - Industriell vätgasreduktion av järnpellets
  - CCS med tillhörande infrastruktur
  - Power To Gas
  - Svartlutsförgasning
  - Industriell vätgasproduktion
  - Förstärkt elnät
  - Industriell produktion av förädlade biobränslen

## 7 Rekommendationer för framtida studier

För framtida studier kan alla sektorer studeras, inte bara basindustrin. Det skulle också vara av intresse att göra en ekonomisk analys av vad omställningen kan komma att kosta och dessutom ta hänsyn till produktionsutveckling med mer avancerade prognosticeringsmetoder. Det kan även vara intressant att göra en mer avancerad geografisk analys för att se var de framtida behoven av el och biomassa kommer vara, exempelvis undersöka vilken infrastruktur som krävs. Dessutom hade det varit intressant att utvärdera möjlighet för skogsnäring att minska deras biomassabehov genom exempelvis elektrifiering.

## Referenser

- [1] Nationalencyklopedin, “biobränsle.” [Online]. Available: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/biobr%C3%A4nsle>
- [2] —, “Bioenergi.” [Online]. Available: <https://www.ne.se/>
- [3] Vattenfall, “Fakta om bioenergi,” 2017. [Online]. Available: <https://corporate.vattenfall.se/om-energi/el-och-varmeproduktion/biomassa/>
- [4] Nationalencyklopedin, “Energibärare.” [Online]. Available: <https://www.ne.se/>
- [5] C. Sundlöf, “Energianvändning i industrin,” Kungliga ingenjörsvetenskapsakademien, Tech. Rep., 2003.
- [6] Klimatkonventionen, “Parisavtalet,” 2018. [Online]. Available: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/EU-och-internationellt/Internationellt-miljoarbete/miljokonventioner/Klimatkonventionen/Parisavtalet/>
- [7] Regeringen, “Det klimatpolitiska ramverket,” 2019. [Online]. Available: <https://www.regeringen.se/artiklar/2017/06/det-klimatpolitiska-ramverket/>
- [8] Naturvårdsverket, “Utsläpp av växthusgaser från industrin,” 2018. [Online]. Available: <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-industrin/>
- [9] Fossilfritt Sverige, “Om fossilfritt Sverige,” 2019. [Online]. Available: <http://fossilfritt-sverige.se/om-fossilfritt-sverige/>
- [10] Davis et al, “Net-zero emissions energy systems,” *Science*, pp. 3, 5, 6 2018.
- [11] Leeson et al, “A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources,” Tech. Rep., 2017.
- [12] Rodriguez et al, “CO<sub>2</sub> Capture from Cement Plants Using Oxyfired Precalcination and/ or Calcium Looping,” Tech. Rep., 2012.

- [13] Rolfe et al, “Technical and environmental study of calcium carbonate looping versus oxy-fuel options for low CO<sub>2</sub> emission cement plants,” Tech. Rep., 2018.
- [14] C. Wilhelmsson, Bodil, C. Kollberg, Claes, C. Larsson, Johan, V. Eriksson, Jan, and V. Eriksson, Magnus, “CemZero,” Cementa och Vattenfall, Tech. Rep., 2018.
- [15] Cementa AB, “Cementa avvecklar cementproduktionen i Degerhamn,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/cementa-avvecklar-cementproduktionen-i-degerhamn>
- [16] —, “Cementa överväger att avveckla cementproduktionen i Degerhamn,” 2018. [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/cementa-overvager-avveckla-degerhamn>
- [17] Cementa Slite, “Utsikt 2014,” p. 4, 6 2014. [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sites/default/files/assets/document/49/2b/utsikthallbarhet20122013slitedistribution.pdf>
- [18] B. Nyström, “Personal Contact,” 2019.
- [19] Cementa, “Miljörapport Slite.” [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/miljodata-slite>
- [20] —, “Cementa färdplan(bild),” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: [https://www.cementa.se/sites/default/files/assets/document/9a/c0/fardplan\\_cement-for\\_klimatneutralt\\_betongbyggande-20180424.pdf](https://www.cementa.se/sites/default/files/assets/document/9a/c0/fardplan_cement-for_klimatneutralt_betongbyggande-20180424.pdf)
- [21] —, “Cementas bränsle andelar.” [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/nollvision2030>
- [22] k. i. S. Hållbar kemi, “Energieffektivisering för Kemiföretagen i Stenungsund.” [Online]. Available: <http://kemiforetagenistenungsund.se/vart-arbete/energieffektivisering-i-kemiindustrin/>
- [23] Kungliga ingenjörsvetenskaps akademien, “Så klarar svensk industri klimatmålen,” Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: [https://www.iva.se/globalassets/bilder/projekt/vagval-klimat/201904-iva-vagval-for-klimatet-delrapport1-n\\_ver2.pdf](https://www.iva.se/globalassets/bilder/projekt/vagval-klimat/201904-iva-vagval-for-klimatet-delrapport1-n_ver2.pdf)
- [24] J. Rootzén and F. Johnsson, “CO<sub>2</sub>emissions abatement in the Nordic carbon-intensive industry - An end-game in sight?” *Energy*, 2015.

- [25] IEAGHG, “Techno-economic evaluation of retrofitting ccs in a market pulp mill and an integrated pulp and board mill,” Tech. Rep., 2016.
- [26] H. e. a. Mandova, “Possibilities for CO<sub>2</sub>emission reduction using biomass in European integrated steel plants,” *Biomass and Bioenergy*, p. 231–243, 2018.
- [27] Wijk et al., “HYBRIT - Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology genomförbarhetsstudie,” Tech. Rep., 2018.
- [28] LKAB, “2018 Års och Hållbarhetsredovisning,” Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: [https://www.lkab.com/sv/SysSiteAssets/documents/finansiell-information/arsredovisning/2018\\_lkab\\_ars\\_och\\_hallbarhetsredovisning.pdf](https://www.lkab.com/sv/SysSiteAssets/documents/finansiell-information/arsredovisning/2018_lkab_ars_och_hallbarhetsredovisning.pdf)
- [29] Energimyndigheten, “Energiläget i siffror 2019,” Tech. Rep., 2019.
- [30] Cementa, “Färdplan cement för ett klimatneutralt betongbyggande,” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: [http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2018/04/ffs\\_cementbranschen.pdf](http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2018/04/ffs_cementbranschen.pdf)
- [31] Sven Olof Ahlberg & Lena Knutson Udd, “Degerhamn cementfabrik Industri- och kulturhistorisk dokumentation,” Tech. Rep., 2011.
- [32] Cementa, “Miljödata slite.” [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/miljodata-slite>
- [33] —, “Miljödata Skövde.” [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/miljodata-skovde>
- [34] —, “Miljödata från Degerhamn.” [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/miljodata-degerhamn>
- [35] Naturvårdsverket, “Utsläpp i siffror.” [Online]. Available: [https://utslappisiffror.naturvardsverket.se/Sok/Lista-over-utslapp-per-amne/?underbransch=3.\(c\),3.\(c\).\(i\)](https://utslappisiffror.naturvardsverket.se/Sok/Lista-over-utslapp-per-amne/?underbransch=3.(c),3.(c).(i))
- [36] Cementa AB, “Cementproduktion steg-för-steg,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/cementproduktion-steg-f%C3%B6r-steg>
- [37] Cementa, “Frågor och Svar om alternativa bränslen vid Cementa.” [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/QA-alternativbranslen>

- [38] Cementa AB, “Råmaterial och avfall.” [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/ramaterial-avfall>
- [39] Kemiföretagen i Stenungsund, “Hållbar kemi.” [Online]. Available: <http://kemiforetagenistenungsund.se/>
- [40] Borealis AB, “Miljörapport 2017 Borealis AB Stenungsund,” Tech. Rep., 2018.
- [41] Nynas AB, “Miljödata för Nynas raffinaderier,” 2019. [Online]. Available: <https://www.nynas.com/sv/ansvar/miljo/miljodata-for-nynas-rafnaderier/>
- [42] Preem AB, “Miljörapport Preemraff Lysekil 2015,” Tech. Rep., 2016.
- [43] —, “Miljörapport 2011 Preemraff Göteborg,” Göteborg, Tech. Rep., 2012.
- [44] St1 Refinery AB, “Miljöredovisning enligt EMAS 2017,” Tech. Rep., 2018.
- [45] Skogsindustrierna, “Färdplan för fossilfri konkurrenskraft Skogsnäringsen,” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2018/04/ffs-skogsnaringen.pdf>
- [46] M. Kassberg, M. Erlandsson, and G. Gavelin, *Massa och papper - en grundbok*. Markaryd: Skogsindustrins Utbildning i Markaryd, 1998.
- [47] Skogsindustrierna, “Skogsindustrin i världen.” [Online]. Available: <https://www.skogsindustrierna.se/skogsindustrin/branschstatistik/skogsindustrin-i-varlden/>
- [48] P. Thollander and M. Ottosson, “An energy efficient Swedish pulp and paper industry - exploring barriers to and driving forces for cost-effective energy efficiency investments,” *Energy Efficiency*, vol. 1, no. 1, pp. 21–34, 2008.
- [49] N. e. a. Jirvall, *Miljöinfo från Skogsindustrierna*. Stockholm: Media-express, 1995.
- [50] J. Joelsson and L. Gustavsson, “CO2 emission and oil use reduction through black liquor gasification and energy efficiency in pulp and paper industry,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 52, no. 5, pp. 747–763, 2008.

- [51] Skogsindustrierna, “Massa- och pappersindustrin 2017,” Tech. Rep., 2017.
- [52] —, “Miljödatabas skogsindustrierna - sammanställning 2015.” [Online]. Available: <https://miljodatabas.skogsindustrierna.org/simdb/Web/main/report.aspx?id=91>
- [53] X. Ji, J. Lundgren, C. Wang, J. Dahl, and C.-E. Grip, “Simulation and energy optimization of a pulp and paper mill – Evaporation plant and digester,” *Applied Energy*, vol. 97, pp. 30–37, 2012.
- [54] M. Ek, G. Gellerstedt, and G. Henriksson, *Pulping chemistry and technology*. Berlin: Walter de Gruyter, 2009.
- [55] Svenskt Näringsliv, “Stål formar en bättre framtid.” [Online]. Available: <https://miljonytta.se/branscher/stalindustrin>
- [56] Jernkontoret, “Stålindustrin.” [Online]. Available: <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/stalindustrins-betydelse/https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/stalindustrins-betydelse/https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/branschfakta-och-statistik/produktion/>
- [57] Hybrit Development AB., “HYBRIT – towards fossil-free steel.” [Online]. Available: <http://www.hybritdevelopment.com/hybrit-toward-fossil-free-steel>
- [58] Jernkontoret, “Klimatfärdplan för en fossilfri och konkurrenskraftig stålindustri i Sverige,” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: [http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2018/04/ffs\\_stalindustrin.pdf](http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2018/04/ffs_stalindustrin.pdf)
- [59] LKAB, “Våra järnmalmspellets för renare stål.” [Online]. Available: <https://www.lkab.com/sv/hallbarhet/miljo/energi-och-klimat/vara-jarnmalmspellets-for-renare-stal/>
- [60] Energimyndigheten, “Scenarier över sveriges energisystem 2018,” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=5783>
- [61] S. Black-Samuelsson, H. Eriksson, D. Henning, G. Janse, L. Kärnerud, A. Lundborg, and L. Niemi Hjulfors, “Bioenergi på rätt sätt - om hållbar bioenergi i Sverige och andra länder. Rapport av Skogsstyrelsen, Energimyndigheten, Jordbruksverket

- och Naturvårdsverket.” Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/om-oss/publikationer/2017/rapport-201710-bioenergi-pa-ratt-satt.pdf>
- [62] K. Atsonios, P. Grammelis, S. K. Antiohos, N. Nikolopoulos, and E. Kakaras, “Integration of calcium looping technology in existing cement plant for CO<sub>2</sub> capture: Process modeling and technical considerations,” 2015. [Online]. Available: [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/42043554/Integration\\_of\\_calcium\\_looping\\_technolog20160204-16811-1ltk7rv.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1557663605&Signature=My1l%2BfGepeyuJIb06UiI8Nxnnsg%3D&response-content-disposition=inli](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/42043554/Integration_of_calcium_looping_technolog20160204-16811-1ltk7rv.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1557663605&Signature=My1l%2BfGepeyuJIb06UiI8Nxnnsg%3D&response-content-disposition=inli)
- [63] Dechema, “Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry,” Tech. Rep., 2017.
- [64] S. Jenkins, “World’s largest single-train methanol to olefins plant now operating,” 2018. [Online]. Available: <https://www.chemengonline.com/worlds-largest-single-train-methanol-to-olefins-plant-now-operating/>
- [65] Preem AB, “Pågående projekt.” [Online]. Available: <https://www.preem.se/om-preem/om-oss/vad-vi-gor/raff/preemraff-lysekil2/pagaende-projekt/>
- [66] VÄNERSBORGS TINGSRÄTT and Mark- och miljödomstolen, “Mål nr M 4708-16,” Vänersborg, Tech. Rep., 2018.
- [67] —, “Mål nr M 2840-16,” Vänersborg, Tech. Rep., 2017.
- [68] Regeringskansliet, “Fossiloberoende fordonsflotta - ett steg på vägen mot nettonollutsläpp av växthusgaser,” 2012. [Online]. Available: <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/kommittedirektiv/2012/07/dir.-201278/>
- [69] SPBI Service AB, “Import & Export,” 2019. [Online]. Available: <https://spbi.se/statistik/import-export/>
- [70] J. Kjärstad, M. Bisailon, S. Harvey, F. Johnsson, J. Johnsson, E. Löfblad, E. Mata, E. Nyholm, J. Rootzén, H. Sköldberg, H. Thunman, and T. Unger, “Transforming the energy system in Västra Götaland and Halland – linking short term actions to long term goals,” Tech. Rep., 2015.

- [71] “Skogsnäringens forskningsagenda 4.0 - För tillväxt i världens bioekonomi,” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <https://www.skogsindustrierna.se/siteassets/dokument/forskningsagendan/skogsnaeringens-forskningsagendan4.0.pdf>
- [72] MISTRA, *Kretsloppsanpassad massafabrik: Ett MISTRA-finansierat forskningsprogram: Slutrapport 1996-1999*, 1999.
- [73] Y. Chan, L. Petithuguenin, T. Fleiter, A. Herbst, M. Arens, and P. Stevenson, “Industrial Innovation Part 1: Technology analysis,” Tech. Rep., 2019.
- [74] Cortus Energy, “Projekt Probiostål.” [Online]. Available: <http://www.cortusenergy.se/hoganas>
- [75] Emma Wiesner, “Klimatneutral Konkurrenskraft,” Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: [https://www.svensktnaringsliv.se/Bilder\\_och\\_dokument/klimatneutral-konkurrenskraft-kvantifiering-av-atgarder-i-klimatf\\_729540.html/BINARY/Klimatneutral%20konkurrenskraft%20-%20kvantifiering%20av%20%C3%A5tg%C3%A4rder%20i%20klimatf%C3%A4rdplaner.pdf?fbclid=](https://www.svensktnaringsliv.se/Bilder_och_dokument/klimatneutral-konkurrenskraft-kvantifiering-av-atgarder-i-klimatf_729540.html/BINARY/Klimatneutral%20konkurrenskraft%20-%20kvantifiering%20av%20%C3%A5tg%C3%A4rder%20i%20klimatf%C3%A4rdplaner.pdf?fbclid=)
- [76] Rootzén Johan, “Mistra scenarios roadmaps 190320,” Tech. Rep., 2019.
- [77] Bioenergitidningen, “LKAB tar språng mot fossilfri produktion av järnmalmspelletts med hjälp av bioolja.” [Online]. Available: <https://bioenergitidningen.se/bioolja/lkab-tar-sprang-mot-fossilfri-produktion-av-jarnmalmspelletts-med-hjalp-av-bioolja>
- [78] M. G. T. S. S. P. A. S. D. Otto, A.; Robinius, “Power to Steel: Reducing CO2 through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry,” *Energies*, 2017.
- [79] Clker-Free-Vector-Images, “Sverige Karta Land.” [Online]. Available: <https://pixabay.com/sv/vectors/sverige-karta-land-europa-23576/>
- [80] Linnéuniversitetet, “Algoland.” [Online]. Available: <https://lnu.se/en/research/searchresearch/forskningsprojekt/algoland/>
- [81] Nationalencyklopedin, “Biobränsle.” [Online]. Available: <https://www.ne.se/>
- [82] Vattenfall, “Biomassa,” 2017. [Online]. Available: <https://corporate.vattenfall.se/om-energi/el-och-varmeproduktion/biomassa>



- [83] P. Lydén, “CCS,” 2015. [Online]. Available: <http://www.klimatordlista.se/ccs-carbon-capture-and-storage/>
- [84] A. Bosoaga, O. Masek, and J. E. Oakey, “CO2 Capture Technologies for Cement Industry,” 2009.
- [85] Naturskyddsföreningen, “Elektrifierade vägar,” 2015. [Online]. Available: [https://www.naturskyddsforeningen.se/sveriges-natur/2015-1/elektrifierade-vagar?fbclid=IwAR1BKdbSTVpdQdQgYXsot0f-Fr259GtX\\_RK7PdY9zbnDR9x95Wic9BzsdRc](https://www.naturskyddsforeningen.se/sveriges-natur/2015-1/elektrifierade-vagar?fbclid=IwAR1BKdbSTVpdQdQgYXsot0f-Fr259GtX_RK7PdY9zbnDR9x95Wic9BzsdRc)
- [86] Christian Holmström, “Elproduktion,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ekonomifakta.se/fakta/energi/energibalans-i-sverige/elproduktion/>
- [87] —, “Elproduktion,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ekonomifakta.se/fakta/energi/energibalans-i-sverige/elproduktion/>
- [88] Energimyndigheten, “Energiläget,” 2016. [Online]. Available: <http://www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/>
- [89] Naturvårdsverket, “Fördjupad analys av svensk klimatstatistik 2018,” Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6848-6.pdf?pid=23767>
- [90] Fossilfritt Sverige, “Hoppfulla trender för ett fossilfritt Sverige,” 2017. [Online]. Available: [http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2017/11/hoppfulla-trender-fr-ett-fossilfritt-sverige\\_webb.pdf](http://fossilfritt-sverige.se/wp-content/uploads/2017/11/hoppfulla-trender-fr-ett-fossilfritt-sverige_webb.pdf)
- [91] Jordbruksverket, “Klimatförändringar påverkar jordbruket,” 2018. [Online]. Available: <http://www.jordbruksverket.se/amnesomraden/miljoklimat/klimatanpassningavjordbruket/klimatforandringarpaverkarjordbruket.4.e01569712f24e2ca09800012513.html>
- [92] WWF, “Konsekvenser - Klimat,” 2018. [Online]. Available: <https://www.wwf.se/wwfs-arbete/klimat/konsekvenser/1124276-konsekvenser-klimat>
- [93] Helena Bouveng, “Konsekvenser för landsbygden av höjd skatt på bensin och diesel,” 2015. [Online]. Available: [https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/interpellation/konsekvenser-for-landsbygden-av-hojd-skatt-pa\\_H210536](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/interpellation/konsekvenser-for-landsbygden-av-hojd-skatt-pa_H210536)

- [94] Energimyndigheten, “Scenarier över Sveriges energisystem 2016,” Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: <http://www.energimyndigheten.se/globalassets/statistik/prognoser-och-scenarier/scenarier-over-sveriges-energisystem.pdf>
- [95] Naturvårdsverket, “Sektorunderlag industri - Underlag till Färdplan 2050,” 2016. [Online]. Available: <https://www.naturvardsverket.se/upload/miljoarbete-i-samhallet/miljoarbete-i-sverige/klimat/fardplan-2050/sectorsunderlag-industri-.pdf>
- [96] International energy agency and Cement sustainability agency, “Technology roadmap low carbon transition in the cement industry,” Tech. Rep., 2018.
- [97] F. Birol and P. Fonta, “Technology Roadmap,” 2018.
- [98] SCB and Energimyndigheten, “Tillförsel och användning av el 2001–2017 (GWh),” Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/energi/tillforsel-och-anvandning-av-energi/arlig-energistatistik-el-gas-och-fjarrvarme/>
- [99] Kemiföretagen i Stenungsund, “Vårt arbete - Hållbar kemi.” [Online]. Available: <http://kemiforetagenistenungsund.se/vart-arbete/>
- [100] N. H. o. K. Vätgas Sverige, Hynor Lillestrøm and Lillestrøm i projektet Next Move, “Vätgas och bränsleceller,” 2013.
- [101] Carbon Capture and Storage Association, “What Is CCS?” 2019. [Online]. Available: <http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/>