



BECCS som klimatåtgärd

En rapport om koldioxidlagring från biomassa i ett svensk-norskt perspektiv

© Författarna och Biorecro AB, 2010

www.biorecro.se

Biorecro AB
Box 3699
103 59 Stockholm

Telefon: 08 678 75 01
Fax: 08 611 42 10
E-post: info@biorecro.se

Förord

Denna rapport har sammanställts för att belysa hur svenska och norska möjligheter kan kombineras för att i stor skala utnyttja koldioxidlagring från biomassa (BECCS) för att möta klimatutmaningen. Vi hoppas att även läsare som normalt inte tar del av de i huvudsak tekniskt inriktade rapporter som finns kring koldioxidlagring (CCS), kan få nytta av vår rapport.

Rapporten har sammanställts som en del av projektet Produkt- och tjänsteutveckling kring norsk-svenska BECCS-system, delfinansierat av Tillväxtverket, Innovasjon Norge, Biorecro, Swedish Weather and Climate Center (SWC) och den norska miljöorganisationen Zero Emission Resource Organisation, ZERO.

Författarna till rapporten är Henrik Karlsson, Lennart Byström och Josef Wiklund, samtliga från Biorecro. Bidrag till rapporten har givits av Marius Gjerset, verksam vid ZERO. Från Biorecro har även Susanne Toscha, Hui Qi Foong och Ariff Munshi bidragit.

Vi vill även tacka följande personer för dataunderlag och information: Anna Krohwinkel Karlsson, Kenneth Möllersten och Virgil Karlsson.

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	6
Executive Summary	8
1 Inledning	10
1.1 Syfte, avgränsningar och disposition	10
1.2 Bakgrund	10
1.2.1 En kall vinter?	11
1.2.2 Växthuseffekten	11
1.2.3 Havens ekosystemtjänster och aerosoler	12
1.2.4 Nuläget är 390 ppm	13
1.2.5 Vad gör vi nu?	13
1.3 Klimatmål inför 2020 och 2050	14
1.3.1 Norges klimatmål	14
1.3.2 Sveriges klimatmål	15
2 Vetenskaplig bakgrund	17
2.1 Vad är BECCS?	17
2.2 Negativa utsläpp med BECCS	18
2.3 Den hållbara potentialen för BECCS	19
2.4 Skillnaderna mellan FECCS och BECCS	21
3 Politiska och ekonomiska ramverk för BECCS	23
4 Koldioxidkällor i Norge och Sverige	26
4.1 Bakgrund till Norges och Sveriges koldioxidkällor	26
4.2 Biogena CO ₂ -källor i Norge	27
4.3 Biogena CO ₂ -källor i Sverige	27
4.4 Lokalisering av biogena CO ₂ -källor i Norge och Sverige	27
4.5 Fossila CO ₂ -källor i Norge	31
4.6 Fossila CO ₂ -källor i Sverige	32
4.7 Framtida utsläpp i Sverige	33
5 Teknisk översikt över avskiljning, transport och lagring av koldioxid	34
5.1 Avskiljningstekniker	34
5.2 Transport	35
5.2.1 Pipeline	35

5.2.2	Fartyg.....	36
5.2.3	Tåg och lastbil.....	37
5.3	Lagring.....	37
5.3.1	Tidigare erfarenheter och pågående lagringsprojekt.....	37
5.3.2	Lagringssäkerhet.....	40
5.3.3	Lagringspotential.....	40
6	Norsk-svenska BECCS-system.....	42
6.1	Avskiljning.....	43
6.2	Transport.....	44
6.3	Lagring.....	44
6.4	Kostnader för avskiljning, transport och lagring	46
7	BECCS som klimatåtgärd	49
7.1	Jämförelse med studie av McKinsey och Svenskt Näringsliv	49
7.1.1	Effekten av att inkludera BECCS i åtgärdsportföljen.....	51
7.1.2	Möjligheter till att nå de politiska målen.....	53
7.2	Är BECCS en klimatvinnare?	55
7.3	Hur vi med BECCS kan nå en svensk nollvision redan 2030	58
8	Pilot- och demonstrationsprojekt för BECCS.....	60
8.1	BECCS-pilot i sydvästra Skåne	61
8.2	Demonstration av BECCS vid etanolfabriken i Norrköping.....	62
8.3	Demonstration av BECCS vid svartlutsförgasning i Domsjö	64
9	Slutsatser	66
10	Referenser	67
	Appendix 1.....	72

Sammanfattning

Det är bråttom och viktigt att möta klimatutmaningen. Vi har redan idag för höga nivåer av koldioxid i atmosfären, och nivåerna ökar i snabb takt. Kostnaderna för att inte vidta åtgärder är oacceptabelt höga ur ekonomiskt såväl som mänskligt perspektiv. Samtidigt är de ekonomiska kostnaderna för att möta klimathotet avsevärda, varför noggranna prioriteringar måste göras och ekonomisk effektivitet eftersträvas. Med denna utgångspunkt, är syftet med denna rapport att undersöka de svenska och norska möjligheterna och potentialerna för koldioxidlagring från biomassa, eller BECCS (Bio Energy with Carbon Capture and Storage).

Så kallad biogen koldioxid är en del av det förnybara kretsloppet. Den binds in i träd och gröda när de växer, och avges när de förbränns eller bryts ned. Därför bidrar inte biogena koldioxidutsläpp till ökningen av halten växthusgaser i atmosfären. Däremot kan dessa utsläpp bli en del av lösningen på klimatproblemet. När koldioxid som fångats upp ur atmosfären lagras undan geologiskt, uppstår ett flöde av koldioxid ut ur atmosfären och ned i underjorden. Med en vetenskaplig term kallas detta för negativa utsläpp, eller permanenta sänkor av koldioxid. Eftersom vi redan idag har en halt av 390 ppm (miljondelar) koldioxid i atmosfären, och denna nivå stiger med 2 ppm per år, är negativa utsläpp avgörande för att vi skall kunna nå nödvändiga klimatmål som 350 ppm eller 400 ppm.

På grund av den stora mängden biomassa som bearbetas i massaindustrin, samt användningen av biomassa för energiframställning, finns det många och stora punktkällor med biogena koldioxidutsläpp i Sverige. 61 svenska anläggningar släpper totalt ut mer än 31 miljoner ton biogen koldioxid per år. I Norge är nämnda näringar avsevärt mindre. De större punktsläppen av biogen koldioxid är mindre än 2 miljoner ton per år, varför den fortsatta analysen fokuserat på svenska utsläpp. Däremot finns det mycket goda förutsättningar för att lagra koldioxid i den norska delen av Nordsjön, vilket inte finns i Sverige annat än i de sydvästligaste delarna av Skåne. Lagringspotentialen i de norska formationerna motsvarar tusentals år av svenska biogena utsläpp.

Med befintlig teknik kan koldioxid från svenska biogena källor infångas och skeppas med båt till norska lagringsformationer. Lagring i Nordsjön har framgångsrikt prövats i mer än tio år och koldioxid transporteras redan idag med båtar över Östersjön. År 2020 kan 27,5 miljoner ton koldioxid lagras årligen från svenska biogena källor till en kostnad på 700-900 svenska kronor per ton. Mängden ökar år 2030 till 30,0 miljoner ton per år, samtidigt som kostnaden beräknas sjunka med ett antal hundra kronor per ton. Det finns även möjligheter att nå kostnader under 500 kronor per ton redan år 2020, för de mindre mängder koldioxid om 400 000 till 2 miljoner ton som kan hämtas från etanolproduktion och svartlutsförgasning.

Kostnaderna för klimatåtgärder i Sverige är relativt höga sett ur ett internationellt perspektiv. I denna rapport jämför vi BECCS med tre tidigare studier för att sätta kostnader och potentialer i sitt sammanhang. Jämfört med de åtgärder som presenterades i en rapport från Svenskt Näringsliv och managementkonsultfirman McKinsey, är BECCS en större åtgärd än alla andra svenska åtgärder tillsammans. Dessutom möjliggör teknologin en uppfyllnad av både Alliansens och de Rödgrönas klimatmål, och detta till en kostnad som är lägre än tusen kronor per ton.

I jämförelse med en studie utgiven av tankesmedjan Fores, kan det konstateras att BECCS i Sverige med stor sannolikhet inte kan finansieras av det europeiska handelssystemet med utsläppsrätter. Däremot är det en mycket konkurrenskraftig metod för att nå de inhemska klimatmålen. Kostnaderna för BECCS ligger under dagens bensinskatt och långt under de framtida kostnadsnivåerna för koldioxidutsläpp i transportsektorn. Jämfört med de alternativa åtgärdskostnaderna för att minska utsläppen av koldioxid inom transportsektorn, kan BECCS spara in 20-50 miljarder per år enligt Fores beräkningsmetod.

Den tredje studien som vi jämfört med är en rapport utgiven av Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademin IVA, i vilken en väg till nollutsläpp år 2043 skisseras för Sverige. När BECCS introduceras i modellen, kan Sverige nå netto nollutsläpp redan till delmålsåret 2030. Därefter kan Sverige med hjälp av en rad andra åtgärder i kombination med BECCS nå netto negativa utsläpp efter år 2030, det vill säga att Sverige som nation tar bort koldioxid ur atmosfären.

Slutligen kan det konstateras att det idag inte finns några åtgärder, initiativ eller incitament för att utnyttja BECCS-tekniken i Sverige. Om vi skall kunna nå nödvändiga klimatmål, nå dem snabbare och med bästa ekonomiska effektivitet, behövs kraftiga satsningar på BECCS i Sverige snarast.

Executive Summary

Addressing the climate change challenge is of utmost importance. The atmospheric carbon dioxide concentration is already too high and increasing rapidly. The costs of not taking action are unacceptably high, both economically and socially. As the economic costs for combating the threat of climate change are considerable, accurate priorities have to be set and economic efficiency must be sought. On this basis, this report aims at examining the Swedish and Norwegian opportunities and potential for geologic storage of carbon dioxide from biomass, or BECCS (Bio Energy with Carbon Capture and Storage).

So-called biogenic carbon dioxide is part of the renewable carbon cycle. Carbon dioxide is extracted from the atmosphere into trees and crops as they grow, and is released when they are combusted or decompose. Therefore, biogenic carbon dioxide does not contribute to the increase of greenhouse gases in the atmosphere. On the contrary, these emissions may become part of the solution to the climate problem. When carbon dioxide that has been captured from the atmosphere by biomass is stored geologically, a flow of carbon from the atmosphere into the underground is created. With a scientific term, this is called negative emissions, or permanent carbon dioxide sinks. Since we already today have a level of 390 ppm (parts per million) of carbon dioxide in the atmosphere, and this level is rising by 2 ppm per year, negative emissions are vital if we are to achieve climate targets such as 350 or 400 ppm.

Due to the large amount of biomass that is processed in the pulp industry as well as the use of biomass for energy production, there are several and large point sources of biogenic carbon dioxide emissions in Sweden. The 61 largest Swedish plants are together emitting more than 31 million tons of biogenic carbon dioxide per year. In Norway, these industries are significantly smaller with the major point emissions of biogenic carbon amounting to less than 2 million tons per year. Because of this the continued analysis focuses on Swedish emissions. However, there are very good opportunities for carbon dioxide storage in the Norwegian part of the North Sea. This is not the case in Sweden. Suitable conditions for carbon dioxide storage are limited to the south-western parts of Skåne in the very south of Sweden. The storage potential in the Norwegian formations is equivalent to thousands of years of Swedish biogenic emissions.

Using existing technology, carbon dioxide from Swedish biogenic sources can be separated and shipped by boat to Norwegian storage formations. Storage in the North Sea has been successfully tested for more than ten years and carbon dioxide is shipped by boat across the Baltic Sea already today. At a cost of 700-900 Swedish crowns (approx. €75-95) per ton, 27.5 million tons of carbon dioxide from Swedish biogenic sources could be stored annually by 2020. The potential amount increases to 30.0 million tons per year by 2030, while the cost is estimated to decrease by several hundred crowns per ton. There is also a possibility to achieve costs below 500 crowns (approx. €45) per ton already by 2020 for the smaller amounts of carbon dioxide of 400 000 to 2 million tons which can be captured from ethanol production and black liquor gasification.

From an international perspective, the costs of climate action in Sweden are relatively high. In this report we compare BECCS with three earlier studies to put the costs and potentials into

context. Compared with the measures presented in a report by Svenskt Näringsliv and management consulting firm McKinsey, BECCS is a larger measure than all other Swedish measures combined. In addition, the technology allows for fulfillment of the climate goals of both political coalitions, and this at a cost of less than one thousand crowns per ton.

In comparison to a study published by the think tank Fores, it is deemed unlikely that BECCS in Sweden could be financed by the European Union emission trading scheme. However, it is a very competitive method for achieving domestic climate targets. The cost of BECCS falls below today's gasoline tax and is far below the future costs of carbon dioxide emissions in the transport sector. Compared with the costs of alternative measures to reduce emissions of carbon dioxide in the transport sector, BECCS can save 20-50 billion crowns per year according to Fores' calculation method.

The third study that we have included in our comparison is a report released by Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademin IVA (the Royal Swedish Academy of Engineering Sciences), in which a path to zero emissions by 2043 is outlined for Sweden. When BECCS is introduced into the model, Sweden can reach net zero emissions already by 2030. Thereafter, a number of measures in combination with BECCS can make Sweden achieve net negative emissions, i.e. that Sweden as a nation is removing carbon dioxide from the atmosphere.

Finally, it should be noted that there are currently no measures, initiatives or incentives to exploit BECCS technology in Sweden. If we are to achieve the necessary climate goals, reach them faster and with the best economic efficiency, serious and determined investments in BECCS in Sweden are needed soon.

1 Inledning

1.1 Syfte, avgränsningar och disposition

Denna rapport syftar till att belysa och bestämma den fysiska och ekonomiska potentialen för teknologin BECCS (Bio Energy with Carbon Capture and Storage), eller koldioxidlagring från biomassa på svenska.

Det finns en rad andra rapporter som redogör för möjligheterna att fånga in koldioxid från fossila utsläppskällor, såsom cementindustrier, stålverk, kolkraftverk och raffinaderier. Därför har vi i denna rapport enbart fokuserat på så kallade biogena punktkällor av koldioxidutsläpp, det vill säga industrier och energianläggningar som släpper ut koldioxid från biomassa, och därmed ingår i det förnybara kretsloppet. I många sådana anläggningar släpps koldioxid från både biogena och fossila källor ut, men vi har även i dessa fall valt att enbart fokusera på den biogena delen av utsläppen.

I kapitel 1 ger vi en bakgrund till behovet av åtgärder som minskar utsläppen, och även den absoluta halten av koldioxid i atmosfären. Vi går även igenom de klimatmål som finns uppställda i Norge och Sverige. I kapitel 2 redogörs för den vetenskapliga bakgrunden till BECCS-teknologin. Kapitel 3 redogör för de politiska och ekonomiska ramverken för BECCS. I kapitel 4 kartläggs de norska och svenska biogena utsläppen och i kapitel 5 vilka tekniker som kan användas för att fånga in, transportera och lagra dessa utsläpp i underjorden. I kapitel 6 sammanställer vi materialet till förslag på hur koldioxid från svenska biogena källor kan lagras i norska lagringsfält. Därefter jämför vi i kapitel 7 kostnaderna och volymerna för BECCS med andra åtgärder i Sverige. Vi använder metoder och data från tre tidigare studier för att få en bild av vilken roll BECCS kan spela i ett svenskt klimatstrategiskt sammanhang. I kapitel 8 föreslås ett mindre pilotprojekt och två större demonstrationsanläggningar för BECCS, varefter slutsatser och referenser följer i kapitel 9 och 10.

1.2 Bakgrund

De senaste 200 000 åren, det vill säga så länge det har funnits människor på jorden, har halten koldioxid i atmosfären varierat mellan 200 och 280 ppm (parts per million).¹ Detta har bland annat uppmätts genom analyser av borrhärdar från isar vid polartrakterna. Den oroväckande ökning som just nu angår hela mänskligheten har skett på endast 200 år, och beror framförallt på människans användande av fossila bränslen såsom kol, olja och naturgas samt avskogningen under denna period. Sedan 1700-talet har koldioxidhalten i atmosfären stigit från ca 280 ppm, till dagens nivå på 390 ppm i årsmedelvärde.^{2,3}

¹ Barnola et al., 2003

² UNEP GRID-Arendal, Historical trends in carbon dioxide concentrations and temperature

³ NOAA, Trends in Atmospheric Carbon Dioxide

1.2.1 En kall vinter?

Januari 2010 var en ovanligt kall vintermånad. Hela vintern var exceptionell, med snö som låg kvar i stora delar av landet till långt in i mars. I Sverige. Kylan här i Norden var regional, och berodde på att ett kallt vädersystem kommit ur kurs just denna vinter. Normala år ligger det över Arktis. Vi måste samla in alla relevanta data för att se hela bilden. Genom den amerikanska väderlekstjänsten NOAA får vi till vår stora förvåning reda på att just denna månad har de näst högsta havstemperaturerna för en januarimånad som hittills uppmätts, globalt sett, sedan mätningar startade i mitten av 1800-talet.⁴ På södra halvklotet har denna månad även de högsta temperaturerna som uppmätts över land av alla januarimånader sedan man började mäta.

1.2.2 Växthuseffekten

Den allmänna principen för växthuseffekten beskrevs för första gången år 1824. Den innebär att en gas släpper igenom solljus med våglängder inom det synliga spektrumet, men absorberar långvågig värmestrålning, så att energin tillvaratas. Namnet lånades från en allmänt känd princip, växthuskonstruktionen, där glastrutorna i ett växthus stänger inne den av solen uppvärmda luften.

Den svenske kemisten Svante Arrhenius brukar anses vara den som först kom fram till att utsläpp av växthusgaser i atmosfären kan leda till en ökning av temperaturen på jorden. Han utvecklade genom denna upptäckt en teori om att övergången mellan istider och varma perioder skulle vara beroende av variation i atmosfärens koldioxidhalt. Den växthusgas vars utsläpp skapar störst påverkan på klimatet är koldioxid, med den kemiska beteckningen CO₂ (en kolatom och två syreatomer).

Andra växthusgaser som också riskerar att påverka klimatet är bland andra metan, lustgas och vattenånga. För att kunna jämföra dessa gasers klimatpåverkan har man infört måttet CO₂-ekvivalent. Eftersom olika gaser har olika klimatpåverkan omvandlas de till motsvarande mängd av vår vanligaste växthusgas, koldioxid. På så sätt kan den klimatpåverkan som uppstår vid helt olika processer uttryckas med samma mått. 1 kg metan motsvarar till exempel 25 kg CO₂-ekvivalenter och 1 kg lustgas motsvarar 298 kg CO₂-ekvivalenter.

Vilka fakta i form av mätdata stöder hypotesen om att vi nu upplever inledningen till en av människan orsakad global uppvärmning? Jordens medeltemperatur har de senaste 100 åren ökat med 0,8 grader, ökningstakten är stigande, och flera av de allra varmaste åren som över huvud taget uppmätts har inträffat helt nyligen, på 1990- respektive 2000-talen.⁵ Denna trend sammanfaller med trenden mot stigande nivåer av koldioxid och andra växthusgaser i atmosfären.

Hotet om global uppvärmning, på grund av en förstärkt växthuseffekt orsakad av människans koldioxidutsläpp, leder en mer eller mindre enad mänsklighet in i ett resonemang om riskbedömning och kostnadsavvägningar. Risken för mycket allvarliga effekter på grund av en

⁴ NOAA, State of the Climate, Global Analysis, January 2010

⁵ Fisher et al., 2007 (IPCC 4th Assessment Report)

global uppvärmning är betydande, och ökande genom våra ökande utsläpp. Samtidigt är kostnaderna för att åtgärda utsläppsproblemet begränsade till enstaka procent av världens BNP, enligt bland annat den mycket uppmärksammade Stern-rapporten, som visade att det är önskvärt och möjligt att vidtaga dessa långtgående åtgärder. Rapporten pekade också på att de befarade kostnaderna för en flergradig uppvärmning inte på samma sätt är begränsade till enstaka procent av BNP, utan riskerar att leda till såväl ekonomisk katastrof som ett enormt mänskligt lidande.⁶

1.2.3 Havens ekosystemtjänster och aerosoler

Vi har under hela perioden av mänskliga utsläpp av koldioxid fått en ekosystemtjänst utförd av världshaven. De har hjälpt oss motverka växthuseffekten genom att absorbera cirka en tredjedel av den koldioxid som vi människor släppt ut. Nu riskerar haven att mättas och kan därmed upphöra med att ta upp koldioxid, eller till och med börja avge koldioxid till atmosfären. Ur ett annat perspektiv måste haven förr eller senare upphöra med att fungera som koldioxidbuffert, eftersom den absorberade koldioxiden skapar kolsyra, vilket försurat haven. Den nya kemiska balansen som uppstår i haven hotar en fundamental förutsättning för allt marint liv, inklusive korallreven; kalciumkarbonat.

Kalciumkarbonat, CaCO_3 , utgör en grundläggande byggsten för biologiskt liv i våra hav. Den bygger upp djurplankton och korallrev samt är en förutsättning för kräftdjurens skalbildning, och på så sätt en fundamental bas för hela näringskedjan i haven. Kalciumkarbonat är känsligt för försurning och reagerar dessutom med koldioxid, så att dess förekomst minskar när den bildar andra föreningar. Även haven håller på grund av våra koldioxidutsläpp på att närma sig en så kallad systemgräns. Här finns ytterligare ett viktigt skäl till att begränsa mängden koldioxid i atmosfären.⁷

Det finns fler system som dämpat effekterna av människans växthusgasutsläpp. Ett annat sådant exempel är så kallade aerosoler. Vid förbränningen av fossila bränslen och vid vanlig vedeldning släpps det ut partiklar och svavelhaltiga föreningar, vilka benämns med samlingsnamnet aerosoler. De har en kylande effekt på klimatet genom att reflektera direkt inkommande solstrålning. Halten aerosoler är relativt lätt att minska, och uppvärmningseffekten blir omedelbar när de försvinner. Att minska mängden aerosoler är önskvärt ur många synvinklar, som att förbättra den lokala luftkvaliteten och att minska fossilbränsleanvändningen i stort. De har kort uppehållstid i atmosfären, men så länge vi fortsätter att släppa ut dessa partiklar kommer de att försvåra mätningen av den globala uppvärmningen på grund av deras kylande effekt, och få det att se ut som om uppvärmningen inte är så stor som den faktiskt är.

Efter att ha vägt in de osäkerheter som finns i att förutsäga jordens framtida klimat, och hotet mot ekosystemen vid höga koldioxidhalter, så kommer författarna till rapporten fram till att vi behöver få ner halten koldioxid i atmosfären till under 350 ppm. Dels för att öka sannolikheten för att vi inte får en temperaturökning på mer än två grader. Dels för att inte rubba balansen i haven, utan ge dem utrymme att ventileras tillbaka den koldioxid som de buffrat under de

⁶ Stern, 2006

⁷ Rockström et al., 2009

senaste 200 åren. Vi kommer i analysen i senare kapitel inte enbart uppehålla oss kring ett 350-ppm-mål, men det kan vara intressant att hålla detta mål i minnet när vi tittar närmare på BECCS-teknikens möjligheter.

1.2.4 Nuläget är 390 ppm

Idag (september 2010) ligger halten CO₂ i atmosfären på en nivå av 390 ppm i årsmedelvärde, med säsongsvariationer uppåt och nedåt på ca tre ppm åt båda hållen. Ökningstakten är för närvarande två ppm per år. Även om all fossileldning upphörde imorgon, har vi redan ökat mängden koldioxid i luften med fyrtio procent på en klimathistoriskt sett mycket kort tid.

1.2.5 Vad gör vi nu?

Vi återfinner oss i en situation där vi har tre problem samtidigt:

1. Vi har för höga halter av koldioxid i atmosfären;
2. genom våra utsläpp ökar halterna och ökningen accelererar, och
3. det kommer att kosta mycket pengar att göra någonting åt problemen och mångdubbelt mer att inte göra någonting åt dem.

För att lösa det första problemet behöver vi hitta ett sätt att aktivt föra bort koldioxid ur atmosfären. Om vi använder växternas förmåga att binda koldioxid med hjälp av fotosyntesen, och sedan fångar in denna koldioxid när växter i olika industriella tillämpningar bryts ned eller förbränns, kan vi återföra mycket stora mängder koldioxid från atmosfären tillbaka till underjorden. Den vetenskapliga termen är negativa utsläpp (eng. negative emissions), det vill säga motsatsen till (fossila) utsläpp.

Om vi kan ta bort koldioxid ur atmosfären, så kan vi även balansera utsläppen och åtgärda det andra problemet som vi står inför.

Om det är en kostnadseffektiv metod har vi dessutom råd att genomföra den och kan därmed även lösa det tredje problemet.

Den ovan beskrivna tekniken att kombinera biomassa med koldioxidlagring kallas BECCS (eng. Bio-Energy with Carbon Capture and Storage) och diskuteras utförligt i denna rapport. Särskilt fokus ligger på hur vi kan skapa nytta och kostnadseffektivitet genom att kombinera svenska källor för koldioxid från växter (biogen koldioxid) med den norska kapaciteten att återföra koldioxid ned i underjorden.

1.3 Klimatmål inför 2020 och 2050

1.3.1 Norges klimatmål

Den norska regeringen antog i juni 2007 mål avseende reduktion av de norska utsläppen av växthusgaser. Ett mål är att uppnå en reduktion överstigande Norges åtagande enligt Kyotoprotokollet, och år 2012 uppnå en utsläppsreduktion på nio procent jämfört med 1990 års nivåer.⁸ Ett långsiktigt mål som regeringen antog är att Norge skall vara koldioxidneutralt år 2050.

Dessa åtaganden utvecklades och förtydligades genom en klimatöverenskommelse som antogs i januari 2008 av samtliga partier förutom ett i Stortinget.⁹ I denna överenskommelse sätts mål för den norska reduktionen av växthusgaser under Kyotoprotokollet (perioden 2008 till 2012), samt mål för 2020, 2030 och 2050. Utsläppsmålen i klimatöverenskommelsen baserar sig på ett referensscenario där Norge år 2007 släpper ut 58,7 miljoner ton koldioxidekvivalenter.

Utsläppsmålet för 2012 om en reduktion utöver Norges åtagande enligt Kyotoprotokollet fastställs till tio procent och skall uppnås genom finansiering av utsläppsminskningar i andra länder, främst utvecklingsländer.

Det norska utsläppsmålet för 2020 är en reduktion på mellan 15 och 17 miljoner ton koldioxidekvivalenter i förhållande till referensscenariot. Denna reduktion skall uppnås genom åtgärder internt i Norge och inkluderar vad koldioxidupptaget av det norska skogsbruket beräknas innebära, 1,5 miljoner ton koldioxid per år.¹⁰

Klimatöverenskommelsen bekräftar att Norge skall vara koldioxidneutralt år 2050. Med detta avses att Norge senast 2050 skall sörja för globala utsläppsreduktioner vilka motsvarar de norska utsläppen av växthusgaser. I överenskommelsen anges att målet om koldioxidneutralitet skall uppnås redan 2030 under förutsättning att ett globalt klimatavtal ingås där även andra industriländer åtar sig avsevärda utsläppsreduktioner.

I klimatöverenskommelsen understryks vikten av att uppmuntra andra länder att sätta seriösa klimatmål. Det anges att Norge bör vara en drivande kraft i arbetet för ett nytt och mer ambitiöst internationellt klimatavtal, vilket skall grundas på målet att den globala temperaturökningen inte skall överstiga två grader Celsius jämfört med förindustriell nivå. I detta arbete måste rika länder ta en hög andel av utsläppsminskningarna eftersom vägen ut ur fattigdomen för utvecklingsländer kräver ökad användning av energi.

Norges unika ställning avseende koldioxidlagring (eng. Carbon Capture and Storage, CCS) får visst utrymme i klimatöverenskommelsen. Inom ramen för Norges ökade internationella insatser nämns att CCS i framtiden kommer att vara viktigt för att minska de globala utsläppen,

⁸ Stortingsmelding nr. 34 (2006-2007) Norsk klimapolitikk

⁹ Klimaförliket 17.01.08

¹⁰ Beräknat nettoupptag om 1,5 miljoner ton per år anges i Stortingsmelding nr. 34 (2006-2007) Norsk klimapolitikk

och att stöd för tekniken kommer att bidra till godkännande av framtida avtal. Stödet till ökade forskningsinsatser avseende CCS och förnybara energikällor skall uppgå till 300 miljoner NOK i 2009 års statsbudget och minst 600 miljoner NOK i 2010 års budget.

I praktiken har Norges investeringsvilja och positiva inställning till CCS bland annat tagit sig uttryck genom bildandet av Gassnova SF.¹¹ Gassnova är ett statsägt företag som skall verka för Norska statens intressen avseende avskiljning, transport och lagring av koldioxid. För närvarande är Gassnova inblandat i flera CCS-projekt varav de mest framträdande är gaskraftverken i Kårstø och Mongstad.

1.3.2 Sveriges klimatmål

Den svenska alliansregeringen har ställt upp klimatmål för Sverige för år 2020 respektive 2050:¹²

År 2020 skall Sverige ha uppnått följande:

- 50 procent förnybar energi
- 10 procent förnybar energi i transportsektorn
- 20 procent effektivare energianvändning
- 40 procent minskning av utsläppen av klimatgaser

Det senare målet avser den icke handlande sektorn och innebär en minskning av utsläppen av klimatgaser med 20 miljoner ton i förhållande till 1990 års nivå. Två tredjedelar av dessa minskningar skall ske i Sverige och en tredjedel i form av investeringar i andra EU-länder eller i flexibla mekanismer som CDM (Clean Development Mechanism).

Med den icke handlande sektorn menas de utsläpp som inte omfattas av bestämmelserna om reglerade utsläpp inom EU. EU har satt ett tak för de totala utsläppen av CO₂ inom ett antal industrisektorer som till exempel järn och stål, cement- och energiproduktion. De olika företagen inom EU tilldelas sedan rättigheter att släppa ut en viss mängd CO₂ och kan genom att frivilligt minska utsläppen sälja dessa utsläppsrätter vidare. Om ett enskilt företag däremot inte kan klara utsläppsmålet måste man köpa ytterligare utsläppsrätter via EU-ETS, som är det europeiska utsläppshandelssystemet. Politikerna i EU kan indirekt kontrollera prisnivån i EU-ETS, och därigenom påverka företagens klimatarbete, genom att de bestämmer den totala mängden utsläppsrätter för varje år. När mängden minskar ökar företagens kostnader och därmed drivkraften att byta teknik, effektivisera och på olika sätt minska sina utsläpp.

För att nå målet har regeringen angett att man kommer att presentera förslag om ekonomiska styrmedel, till exempel höjd koldioxidskatt, samt minskade eller slopade undantag. Även drivmedelsskatter och övriga energiskatter kan komma att höjas. Sammantaget ska dessa utvecklade ekonomiska styrmedel ge ett bidrag om två miljoner ton i minskade utsläpp av klimatgaser per år.

¹¹ <http://www.gassnova.no/>

¹² Regeringens proposition 2008/09:162

För år 2050 finns följande vision:

- År 2050 har Sverige en hållbar och resurseffektiv energiförsörjning och inga nettoutsläpp av växthusgaser i atmosfären.

Oppositionen räknar istället utifrån de totala utsläppen som år 1990 uppgick till ca 72,4 Mton CO₂-ekvivalenter. Deras förslag är att minska utsläppen totalt sett med 28,8 Mton. Detta skall ske genom ett utsläppsminskningmål om 45 procent för den icke handlande sektorn. Hela denna minskning föreslås ske i Sverige. Oppositionen förutsätter att EU ger direktiv om minskningar för den handlande sektorn (EU-ETS) med 30 procent. Om EU ger direktiv om lägre minskningar bör Sveriges ambitioner för den icke handlande sektorn revideras. Om så sker räknar oppositionen att detta sammantaget ger en minskning med ca 40 procent totalt jämfört med 1990.¹³

¹³ Motion 2008/09: MJ17

2 Vetenskaplig bakgrund

2.1 Vad är BECCS?

BECCS (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage) är en kombination av biomassasystem och geologisk koldioxidlagring.¹⁴ Vid förbränning, jäsning, förruttnelse och andra processer avger biomassa, exempelvis träd, växter och jordbruksgrödor, stora mängder koldioxid. Processerna återfinns bland annat i biomasseldade kraftverk och kraftvärmeverk, pappersmassabruk, etanolfabriker och biogasanläggningar.

När biomassa växer, binds kol genom att koldioxid (CO₂) spjälkas från atmosfären. Genom fotosyntesen tas kolet upp och bygger själva växtens fibrer, medan syret från den spjälkade CO₂-molekylen släpps fritt. Energin för processen kommer från solen som driver fotosyntesen. När biomassan bryts ned genom förbränning eller någon annan naturlig process frigörs de kolatomer som växten till stora delar består av. Syret i luften bildar tillsammans med kolatomerna gasen koldioxid. På detta sätt fås genom naturliga nedbrytningsprocesser stora mängder biogen koldioxid, som släpps tillbaka till atmosfären. Koldioxiden spjälkas sedan på nytt av ny biomassa, vilken tas till vara i nästa generations växter, och så vidare. Vid tillämpning av BECCS fångas den koldioxid upp som biomassan bundit från atmosfären, och flödet omdirigeras till bergrunden för att lagras permanent.¹⁵ På så sätt skapar BECCS-system ett flöde av koldioxid från atmosfären till underjorden, se bild 1.

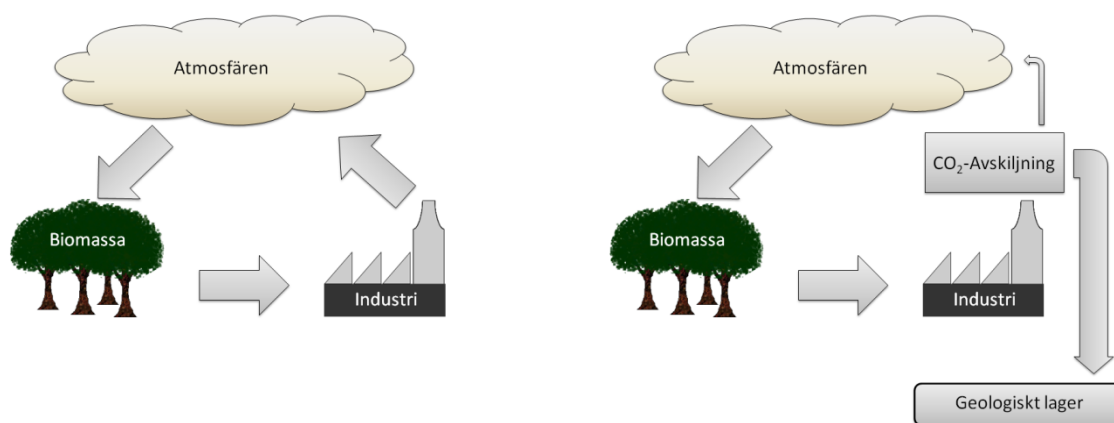


Bild 1. Kolflöden i bioenergisystem respektive BECCS-system.

BECCS-teknologin omnämndes för första gången i vetenskapliga publikationer under 1990-talet.^{16,17} Sedan dess har BECCS-teknologin dels diskuterats som en variant av den CCS-teknologi som appliceras på fossila källor (FECCS, Fossil Energy with Carbon Capture and Storage), men

¹⁴ Fisher et al., 2007 (IPCC 4th Assessment Report)

¹⁵ Obersteiner et al., 2001

¹⁶ Williams, 1996

¹⁷ Herzog et al., 1996

framförallt analyserats som en unik möjlighet till att skapa negativa koldioxidutsläpp som tar bort koldioxid från atmosfären. På grund av att BECCS är en ny och sammansatt teknologi, har den kommit att benämnas olika beroende på författare och kontext. IPCC använder förkortningen "BECCS" för att beskriva teknologin i sin fjärde utvärderingsrapport från 2007.¹⁸ Andra författare använder förkortningarna "BECS"¹⁹, "biomass-based CCS"²⁰, "BCCS"²¹, samt "Biotic CCS"²². I denna rapport används genomgående den förkortning som IPCC valt att tillämpa.

2.2 Negativa utsläpp med BECCS

Det finns många tekniker, både etablerade och under utveckling, som har potential att minska utsläppen av fossil koldioxid radikalt. Exempel på sådana är sol-, vind-, bio- och geotermisk energi, energieffektivisering och även att applicera CCS-teknologi på fossila bränslen. Det som gör BECCS unikt som klimatåtgärd är att nettoeffekten av tillämpningen kan resultera i negativa koldioxidutsläpp. Detta sker genom att koldioxid som bundits från atmosfären i biomassa lagras djupt ner i bergrunden. På så sätt kombinerar BECCS fördelarna med träden och växternas bindning av koldioxid, med fördelarna med geologisk koldioxidlagring.

I jämförelse med andra typer av kolsänkor som hav och skogar, påverkas inte geologisk lagring av temperaturökningar, avverkning eller andra variationer som riskerar att äventyra dessa former av koldioxidbindning. I andra sänkor finns risk för negativa återkopplingar vid temperaturökningar, som skulle kunna leda till stora utsläpp av den lagrade koldioxiden. I inledningen nämnde vi havens förmåga att ta upp och lagra koldioxid. Detta har lett till en relativt långsammare ökning av koldioxidhalten i atmosfären än vad som annars hade varit fallet. Den här förmågan är dock starkt temperaturberoende och minskar med ökande temperaturer. Dessutom har haven redan lagrat så stora mängder koldioxid att förmågan att ta upp ytterligare mängder avtar; de börjar uppnå mättnad. Vi riskerar då att våra fortsatta utsläpp får en större påverkan på koldioxidhalten i atmosfären än hitintills.²³

Forskningen och erfarenheter från pågående koldioxidlagringsprojekt visar däremot att den förväntade lagringstiden i geologiska formationer kommer att bli mycket lång, troligtvis miljontals år. För mer om lagringstider och lagringssäkerhet, se avsnitt 5.3.

BECCS unika kapacitet att skapa negativa utsläpp har fyra viktiga implikationer:

1. BECCS kan hantera koldioxid från alla typer av utsläppskällor. I detta avseende kan BECCS jämföras med infångning av koldioxid direkt från atmosfären, eftersom biomassa binder koldioxid ur atmosfären oavsett var den har släppts ut.²⁴ Detta innebär att BECCS kan användas

¹⁸ Fisher et al., 2007 (IPCC 4th Assessment Report)

¹⁹ Royal Society, 2009; Azar et al., 2006; Metz et al., 2005

²⁰ Metz et al., 2005 (IPCC Special Report on CCS)

²¹ Bonijoly et al., 2009

²² Grönkvist et al., 2006b

²³ Rockström et al., 2009

²⁴ Keith, 2005

för att återställa de koldioxidutsläpp som är de svåraste och dyraste att skära ner på, till exempel utsläpp från fossildrivna bilar och från flygtrafik. Allteftersom kostnaderna för att begränsa utsläpp stiger och de mest kostnadseffektiva alternativen (såsom energieffektivisering) har uttömts, ökar betydelsen av denna möjlighet med BECCS. För ett tydligt exempel på detta, se avsnitt 7 där kostnaderna för BECCS ställs i relation till de utsläppsmål och alternativkostnader som gäller i Sverige.

2. BECCS är en åtgärd som tillkommer som ett komplement till andra åtgärder. I de klimatscenarier som tagits fram på nationell nivå i Sverige och Norge är inte BECCS medräknat. Applicering av BECCS skulle möjliggöra lägre kostnader för uppsatta klimatmål och även stora möjligheter till att höja ambitionerna för mängden utsläppsreduktioner och takten i klimatarbetet. Med BECCS kan exempelvis Sverige i samarbete med Norge uppnå netto nollutsläpp av växthusgaser redan år 2030, och därefter leverera negativa koldioxidutsläpp som en exportprodukt till andra länder. Se mer i kapitel 7.

3. BECCS kan hantera koldioxidutsläpp som redan har gjorts. Med andra ord kan BECCS återställa atmosfären från utsläpp som ägt rum tidigare. Detta har redogjorts för i ett antal långsiktiga klimatscenarier i vilka utsläppen inte bara når en topp för att därefter vända nedåt, utan även de absoluta halterna av koldioxid i atmosfären minskar.²⁵ I vissa av dessa scenarier kan en sådan topp följas en stabiliseringsnivå vilken ligger flera hundra ppm lägre än toppen. Skillnaden mellan topp och stabiliserad nivå är resultatet av att använda BECCS under en period som sträcker sig över flera decennier för att ta bort koldioxid från atmosfären.

4. Möjligheten att kunna återställa atmosfären med BECCS gör teknologin till ett riskhanteringsverktyg i det långsiktiga klimatarbetet. När man idag talar om ett tvågradersmål (det vill säga att jordens medeltemperatur skall höjas med maximalt två grader på grund av människans utsläpp), kan man inte med säkerhet veta vilken halt av koldioxid i atmosfären som detta motsvarar. Detta beror på klimatsystemets komplexitet, med ett antal dynamiska faktorer som medför att det inte finns någon exakt koppling mellan olika koldioxidhalter och temperaturer. Inte heller kan man med exakthet förutsäga vilka utsläppsnivåer som leder till vilka koldioxidhalter, med tanke på oförutsägbarheten i buffringssystemen i haven och på land. På grund av dessa osäkerheter, är det viktigt att i ett långsiktigt globalt perspektiv ha tillgång till BECCS som en teknologi där vi kan kompensera för felaktiga prognoser, eller för den delen felaktiga och senfärdiga politiska beslut, som gör att vi inte möter de mål som vi satt upp för temperaturökningar och negativa konsekvenser.²⁶

2.3 Den hållbara potentialen för BECCS

I ett flertal olika scenarier bedöms den långsiktiga, hållbara kapaciteten för BECCS som mycket stor i ett globalt perspektiv.²⁷ Vid modellering av klimatscenarion finns det ett antal prognoser för den eventuella omfattningen av BECCS i framtiden, vilka ser möjlighet till att skapa negativa

²⁵ se bl.a. Fisher et al., 2007

²⁶ Hare och Meinshausen, 2006

²⁷ Fisher et al., 2007

utsläpp på 5 till 20 miljarder ton CO₂ per år.²⁸ Detta kan jämföras med de årliga växthusgas-utsläppen i världen idag på drygt 30 miljarder ton CO₂e. Vissa författare har till och med pekat på att en massiv tillämpning av BECCS är tillräcklig för att motverka och uppväga alla antropogena utsläpp av växthusgaser som någonsin skett eller kommer att ske, och att detta är möjligt redan inom 50-60 år.²⁹ Hållbarheten i att producera biomassa i den skala som föreslås på detta sätt har dock ifrågasatts.³⁰ Det är däremot vida accepterat att BECCS-system kan uppväga antropogena utsläpp över längre tidsrymder om 100 år och mer.³¹

Den huvudsakliga invändningen mot BECCS i ett livscykelperspektiv hänför sig till det underliggande användandet av biomassa. Samma invändning möter alla energisystem som använder sig av biomassa. Biomassa kan odlas på ett ohållbart sätt och därigenom ge negativa bidrag på flera olika sätt, till exempel genom koldioxidutsläpp vid odling och transport, ohållbar vattenförbrukning samt minskad biologisk mångfald. Om efterfrågan på biomassa ökar alltför snabbt på grund av framtagandet av BECCS-system, och dessa faktorer inte redovisas, kan de negativa effekterna överväga fördelarna med negativa koldioxidutsläpp.³² Å andra sidan finns det redan idag en omfattande produktion av biomassa som är hållbar. Ett bra exempel på detta är det svenska skogsbruket, som har ett nettoupptag av koldioxid (det vill säga högre tillväxt än avverkning) på tiotals miljoner ton koldioxid per år.³³ Det finns också utmärkta möjligheter att producera hållbar biomassa i betydande global omfattning.³⁴

I den vetenskapliga litteraturen på området beskrivs emellanåt BECCS-system i vilka biomassan odlas primärt för att åstadkomma negativa utsläpp med BECCS. BECCS-system kan dock skapas mycket enklare och billigare genom att kombinera redan existerande biomassaanläggningar med koldioxidlagring. Genom att införa koldioxidlagring på redan etablerade biomassaanläggningar kan tekniken börja tillämpas i närtid, samt till en mycket lägre kostnad än i system där biomassan odlas enbart för de negativa utsläppens skull. I denna rapport räknar vi endast med biomasseanläggningar som redan är i bruk och som redan idag släpper ut stora mängder biogen koldioxid. I de längre scenarierna använder vi oss av prognoser för tillväxten i pappersmassa- och kraftvärmeindustrin, inklusive förväntade omställningar från fossil till biologisk insatsråvara.

Som tidigare nämnts är BECCS en kostnadseffektiv teknologi för att reducera halterna CO₂ i atmosfären samt möta mer ambitiösa klimatmål. Enligt studier ledda av bland annat forskare vid Chalmers och KTH är andra alternativ att anse som otillräckliga eller alltför dyra för att nå ambitiösa koldioxidnivåer om 350 miljondelar,³⁵ något som kan vara en nödvändighet för att undvika plötsliga och svåra klimatförändringar. Med den utbredda passivitet som präglar klimatarbetet i några nyckelländer och i de internationella förhandlingarna gäller detta förhållande snart även för högre stabiliseringsnivåer på 400 och 450 ppm. Det är även värt att

²⁸ Azar et al., 2006

²⁹ Read et al., 2005

³⁰ Rhodes et al., 2008

³¹ Royal Society, 2009; Azar et al., 2006; Metz et al., 2005

³² Rhodes et al., 2008

³³ Naturvårdsverket, 2010

³⁴ Kraxner et al., 2003

³⁵ Se exempelvis Azar et al., 2006

notera att BECCS enligt dessa vetenskapliga studier sänker kostnaderna för mindre ambitiösa klimatmål om teknologin ingår i den samlade portföljen för klimatåtgärder, se bild 2.

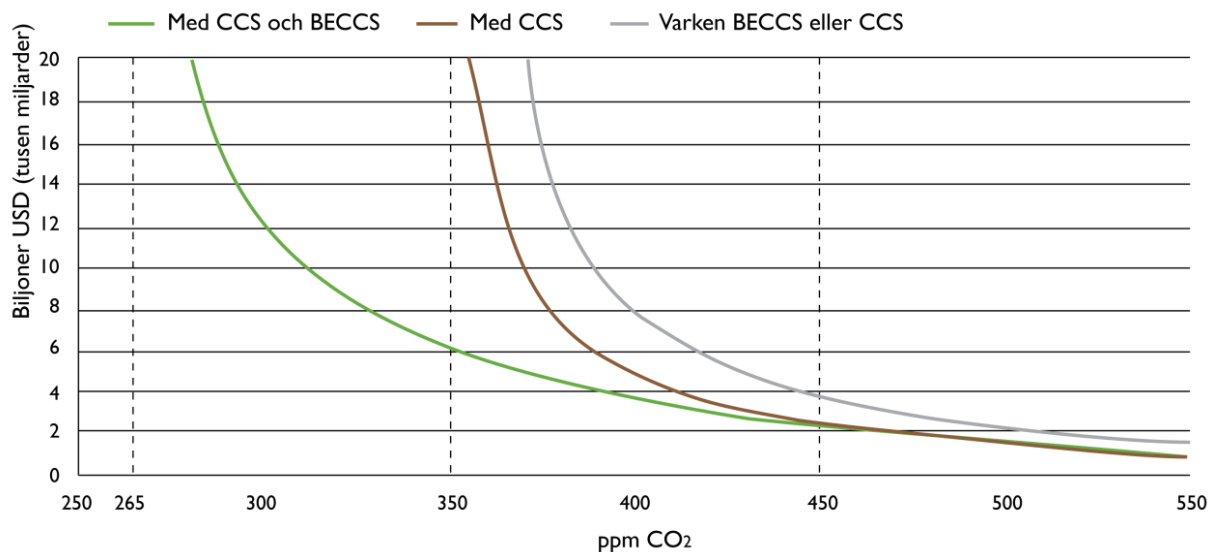


Bild 2. Källa: Azar et al., 2006

2.4 Skillnaderna mellan FECCS och BECCS

Samtidigt som BECCS är mindre känt som teknologi, har konventionell CCS (Carbon Capture and Storage), eller FECCS³⁶ (Fossil Energy with CCS), blivit mer och mer omtalat under de senaste åren. I fossila sammanhang brukar CCS-teknologin kopplas samman med stora kolkraftverk, men den kan även användas för att minska utsläppen från bland annat gaskraftverk, stålverk och cementindustrier. I länder som Norge och Sverige, där det endast finns ett fåtal mindre kolkraftverk är det främst de senare kategorierna som har tilldragit sig intresse.

Till skillnad från BECCS kan CCS applicerat på fossila källor inte skapa negativa utsläpp, utan endast minska mängden fossila utsläpp. En möjlighet som finns är dock att samelda exempelvis fossila bränslen med biomassa. Sammantaget skulle kombinationen leda till lägre, noll eller negativa utsläpp, beroende på mängden biomassa och verkningsgraden i CCS-systemet. Det bör tilläggas att på samma sätt som biomassa kan leda till utsläpp under produktionen, leder även utvinning av fossila bränslen till utsläpp, exempelvis vid brytning och transport. Därför krävs det noggranna livscykelanalyser för att avgöra systemens totala påverkan vad gäller CO₂-utsläpp.

För en översikt över de generella flödena av kol och CO₂ i olika energisystem, se bild 3. Märk väl att det förutom dessa generella system finns stödjesystem för t.ex. byggnation, utvinning av bränslen och transporter, vilket medför att alla system idag har vissa fossila utsläpp i något led i produktionskedjan. Till och med konstruktion och montering av vindkraftverk medför koldioxidutsläpp, även om det rör sig om i sammanhanget små mängder.

³⁶ Vergragt et al, mimeo

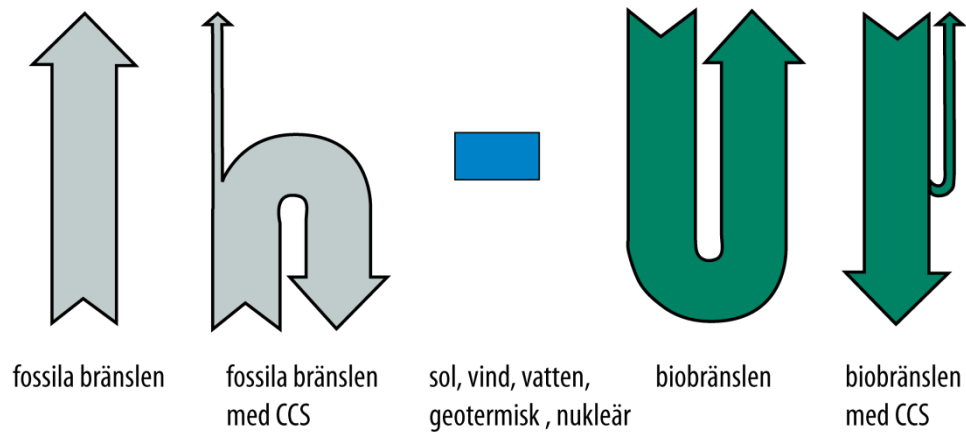


Bild 3. Översiktlig jämförelse mellan kolflödet i olika system.

I jämförelse med andra energisystem blir det radikalt annorlunda med konceptet negativa koldioxidutsläpp tydligt. Fossila bränslen ökar halten koldioxid i atmosfären i absoluta tal. Fossil kol och olja som inte ingår i våra kretslopp tas upp, förbränns och koldioxid tillförs därmed atmosfären. Fossila bränslen med CCS ökar också halten koldioxid, men i mindre utsträckning än utan CCS. Förnyelsebar energi genererad av exempelvis vindkraft, solpaneler, geotermianläggningar och vattenkraftverk påverkar i mycket liten utsträckning kolflöden och kolets kretslopp när de väl är i drift. Bioenergi släpper ut lika mycket koldioxid som biomassan tidigare fångat in. BECCS däremot innebär att koldioxid lagras undan från atmosfären.

3 Politiska och ekonomiska ramverk för BECCS

De politiska och ekonomiska förutsättningarna för BECCS kan grovt delas in i två kategorier: tillståndsgivning och ekonomiska styrmedel. I båda kategorierna råder det i dagsläget otydlighet om vad som gäller för BECCS, både på nationell såväl som internationell nivå. Främst beror detta på att det tidigare inte planerats några BECCS-anläggningar, och att det funnits begränsat intresse från både biomasseindustrin och CCS-industrin för att driva frågan. Inom tillståndsgivningsområdet har det skett en rad framsteg under de senaste åren, främst som en följd av de internationella satsningarna på fossil CCS.

I denna studie kommer vi framförallt undersöka möjligheterna till att lagra koldioxid från svenska biogena källor i norska akvifärer. De norska akvifärerna är belägna ute i Nordsjön och ligger under havsbotten. En rad internationella konventioner behandlar eller vidrör frågan om lagring av koldioxid under havsbotten. De viktigaste bland dessa är OSPAR-konventionen och Londonkonventionen, vilka båda har justerats för att tillåta geologisk koldioxidlagring under havsbotten.^{37, 38}

EU har även gjort en rad ändringar i sina direktiv, så att de numera omfattar och tillåter avskiljning, transport och lagring av koldioxid.³⁹ För lagring på land i Sverige i eventuella mindre pilotprojekt är dock rättsläget mer osäkert, och förändringar krävs i bland annat miljöbalken för att kunna hantera frågan.

Under FN: s klimatkonvention, som är ett slags underlag till Kyotoprotokollet, bokförs förändringar i den mängd kol som finns bunden i biomassa.⁴⁰ Detta sker genom att koldioxid som upptas (när biomassan växer) eller avges (när biomassan exempelvis skördas) förändrar mängden kol som är bokförd i varje kolpool. Exempelvis så rapporterar Sverige förändringar i den mängd biomassa som finns i landet under klimatkonventionen.

Den svenska skogen är för tillfället en sänka för koldioxid totalt sett. Det innebär att tillväxten är större än avverkningen av skog. År 2008 var nettoupptaget av koldioxid 14,7 miljoner ton i Sverige.⁴¹ Denna sänka är dock inte att betrakta som permanent, då upptagningsförmågan i skog och mark för koldioxid är beroende av en rad faktorer som varierar över tid. Exempelvis kan varmare temperaturer leda till både bättre och sämre upptagningsförmåga i en snar framtid. Sänkan är även svår att exakt mäta och styra över. Den brukar därför inte räknas med när de svenska klimatmålen sätts.

Med BECCS öppnas möjligheten till en permanent sänka som är oberoende av klimatförändringar och skogsanvändning. FN: s klimatpanel IPCC har visat på möjligheten att räkna med de negativa utsläpp som BECCS medför i "2006 IPCC Guidelines for National

³⁷ http://www.ospar.org/content/news_detail.asp?menu=00600725000000_000002_000000

³⁸ http://www.imo.org/Newsroom/mainframe.asp?topic_id=1472&doc_id=7772

³⁹ Direktiv 2009/31/EG om geologisk lagring av koldioxid

⁴⁰ Penman et al 2003.

⁴¹ Naturvårdsverket, 2010

Greenhouse Gas Inventories".⁴² I riktlinjerna rekommenderas att negativa utsläpp från BECCS bokförs som en minuspost, vilket ger goda möjligheter till att i framtida regelverk betrakta BECCS på samma sätt i klimaträkenskaper som i den vetenskapliga diskursen. På så sätt kan negativa utsläpp från BECCS bli en minuspost i de svenska klimaträkenskaperna, vilket är en viktig observation i en klimatstrategisk kontext.

Helt korrekt kan det påpekas att det ur ett livscykelperspektiv inte uppstår negativa utsläpp om odling, avverkning, transport och processande av biomassan som ligger till grund för BECCS ger upphov till stora utsläpp av växthusgaser. I dessa fall bör dock de indirekta utsläppen redovisas som direkta utsläpp vid utsläppskällan, snarare än längre fram i kedjan när koldioxid från biomassan lagras. På så sätt kan ett enhetligt system utformas som ger rätt incitament till samtliga parter att minska utsläppen där de uppstår och få ersättning för de negativa utsläpp som uppstår vid koldioxidlagring av biogen koldioxid.

Koldioxidbalans i atmosfären	Fossila bränslen	Fossila bränslen med CCS	Biomassa	Biomassa med CCS, BECCS
Förbränning	+1	+1	0	0
CCS	0	-1	0	-1
Totalt	+1	0	0	-1

Tabell 1. Tabellen baseras bland annat på Grönkvist et al.⁴³

Trots att FN:s klimatkonvention reglerar kolbalanser och utsläppsåtgärder, är CCS applicerat på fossila utsläpp inte tydligt reglerat i det bindande Kyotoprotokollet. Däremot så har en praxis utvecklats, där fossil koldioxid som återförs med CCS-tekniken inte räknas in i länders totala utsläpp. Exempelvis så redovisas inte den koldioxid som lagras i de norska CCS-anläggningarna Slipevne och Snöhvit i de norska klimaträkenskaperna.

Inte heller i direktivet för ETS, det europeiska handelssystemet för utsläppsrätter, är CCS tydligt reglerat. Däremot så har det senare klimatpaketet från EU förtydligat spelreglerna för fossil CCS. I samma paket förslögs även att 10-12 större demonstrationsanläggningar för CCS skulle finansieras med pengar från auktioneringen av utsläppsrätter, alternativt genom dubbel tilldelning av utsläppsrätter till CCS-anläggningar.⁴⁴ Det har även framförts krav på obligatorisk installation av CCS på nya fossileldade anläggningar från och med 2015.

Att BECCS inte är reglerat vare sig i Kyoto-protokollet eller i ETS innebär att de negativa utsläpp som uppstår i BECCS-system inte i dagsläget ger rättigheter till ersättning eller tillgodohavanden. Det är visserligen tillåtet med utsläppsminskande åtgärder inom Kyoto-protokollet, men hur ett BECCS-projekt skulle behandlas är svårt att veta på förhand. Då CCS

⁴² Eggleston 2006

⁴³ Grönkvist et al, 2006b.

⁴⁴ Direktiv 2009/31/EG om geologisk lagring av koldioxid

ännu inte är accepterat som metod inom CDM (Clean Development Mechanism), är BECCS svårt att få in även i detta system.

Kyotoprotokollet från 1997 reglerar endast tiden fram till 2012. Eftersom inget internationellt avtal om bindande utsläppsminskningar ingicks under förhandlingarna i Köpenhamn i slutet av 2009 är spelreglerna efter 2012 ovissa. Detta gäller i synnerhet för nya teknologier såsom BECCS.

I Norge anses CCS vara ett viktigt steg på vägen till ett hållbart samhälle, och en rad initiativ har lanserats för att möjliggöra teknikens implementering. Bland annat planeras för statlig finansiering av projekt i Kårstø och Mongstad, vilka dock upprepade gånger har skjutits fram i tiden. Ett särskilt bolag har etablerats för att facilitera processen, Gassnova, och staten investerar hundratals miljoner norska kronor i utveckling av CCS varje år. Det kan noteras att detta är flera tiopotenser mer än de svenska satsningarna på CCS-området, vilka endast omfattar enstaka miljoner kronor.

För att möjliggöra storskaliga negativa utsläpp för svensk del, behövs en incitamentsstruktur som kopplar svenska fossila utsläpp till möjliga negativa utsläpp från BECCS. På så sätt skulle den samhällsekonomiska nyttan av BECCS kunna realiseras. Det är anmärkningsvärt att det för närvarande inte finns vare sig ekonomiska incitament eller medel avsatta för forskning, utveckling, pilot- och demonstrationsprojekt i Sverige. Inte heller i Norge planeras för BECCS, utan fokus ligger främst på CCS inom olja- och gasutvinningen och för gaskraftverk.

4 Koldioxidkällor i Norge och Sverige

4.1 Bakgrund till Norges och Sveriges koldioxidkällor

I diskussioner om koldioxidlagring, dess potential och klimatnytta, beaktas ofta endast fossila CO₂-utsläpp. Som framgår av denna rapport finns det all anledning att höja blicken och även inkludera potentialen för koldioxidlagring från biogena CO₂-utsläpp. Med biogen CO₂ avses CO₂ som härrör från biomassa, såsom träd, växter, säd, sopor eller avlopp. Oavsett om CO₂ härrör från fossila eller biogena källor krävs viss volym för att utsläppskällan skall lämpa sig för att inkluderas i ett koldioxidlagringssystem. I dagsläget krävs större punktkällor för att kunna få ekonomi i systemet vilket gör att vissa utsläpp, exempelvis från transporter och hushåll, faller utanför teknikens användbarhet. Detta kapitel syftar därför till att klargöra hur potentialen från norska respektive svenska punktsläpp ser ut, framförallt avseende biogena CO₂-utsläpp.

Förutsättningarna för CO₂-utsläpp skiljer sig åt mellan Norge och Sverige, i synnerhet när det gäller biogena CO₂-utsläpp. Sverige är till stor del täckt av skog och har byggt upp en stor industri som processar trädråvara. Pappers- och massaindustrin utgör en viktig del av svensk basindustrin och därtill finns många kraftvärmeverk vilka eldas med trädråvara. Norge har mindre goda möjligheter till uttag av massaved och biomassa för process- och energiändamål. Det finns därför betydligt fler och större anläggningar i Sverige än i Norge som använder skog som råvara i energi- och industriprocesser. På så sätt har Sverige betydligt större och fler biogena CO₂-källor än Norge, se bild 4.

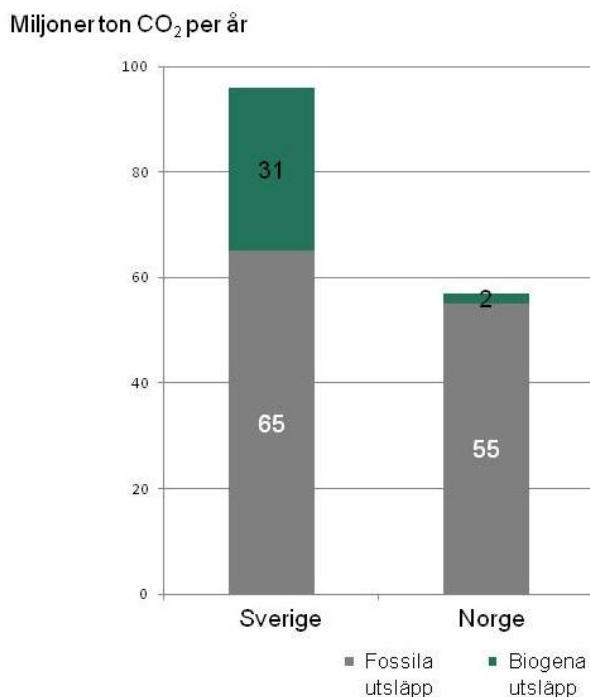


Bild 4.

När det gäller fossila CO₂-källor skiljer sig inte länderna åt på samma sätt. Utsläpp per capita samt större punktkällor är på flera sätt jämförbara med undantag för att Norge har stora fossila CO₂-utsläpp inom olja- och gasindustrin ute till havs.

4.2 Biogena CO₂-källor i Norge

År 2008 uppgick större punktutsläpp av biogen CO₂ i Norge till knappt 1,7 miljoner ton. Det största punktutsläppet svarade Södra Cell Tofte för med ett utsläpp på 860 000 ton biogen CO₂. I tabell 3 återfinns en sammanställning som upptar de utsläppskällor vars utsläpp översteg 100 000 ton år 2008. Sammanställningen är baserad på data inrapporterade till Klima- og forurensningsdirektoratet (KLIF),⁴⁵ Utöver data från KLIF bygger sammanställningen på data som hämtats direkt från bolagen (exempelvis ingår märkligt nog inte den enskilt största och dominerande källan, Södra Cell Tofte, i KLIF:s databas). Då utsläpp av biogen CO₂ inte är kvot- och rapporteringspliktig på samma sätt som fossila CO₂-utsläpp kan vissa mindre anläggningar ha förbigåtts. Utsläppsmängderna från sådana anläggningar bedöms dock vara alltför små för att kunna bli föremål för en tidig implementering av koldioxidlagring.

4.3 Biogena CO₂-källor i Sverige

För svensk del uppgår de biogena CO₂-utsläppen från större punktkällor (med utsläpp överstigande 100 000 ton per år) till över 31 miljoner ton årligen. Det är värt att notera att mängden biogena utsläpp är mycket stor, i synnerhet i relation Sveriges fossila CO₂-utsläpp. En annan intressant aspekt är att de största biogena CO₂-källorna inte är kraftvärmeverk som eldar med biomassa, utan pappersmassabruk. Den enskilt största utsläppskällan år 2006 var Husums pappersmassabruk i Örnsköldsvik, med biogena koldioxidutsläpp på 1 865 000 ton.

En sammanställning av biogena utsläpp i Sverige återfinns i tabell 2 nedan. Endast anläggningar som släpper ut mer än 100 000 ton årligen finns upptagna. Sammanställningen bygger på data från rapporten "CO₂-avkiljning i Sverige" med Stefan Grönqvist som huvudförfattare.⁴⁶ Dessa uppgifter är i sin tur hämtade från EMIR,⁴⁷ Naturvårdsverkets databas för registrering av anläggningar som deltar i handeln med utsläppsrätter, samt data från Skogsindustrierna.

4.4 Lokalisering av biogena CO₂-källor i Norge och Sverige

Den geografiska spridningen av norska och svenska punktkällor med koldioxidutsläpp överstigande 100 000 ton per år framgår av kartan på bild 5 nedan. Till denna följer tabell 2 samt tabell 3, som listar vilka svenska respektive norska utsläppskällor som anges på kartan.

⁴⁵ Klima- og forurensningsdirektoratet, Norske utslipp, Karbondioksid biomasse

⁴⁶ Grönqvist et al., 2008

⁴⁷ EMIR, Länsstyrelsernas EmissionsRegister

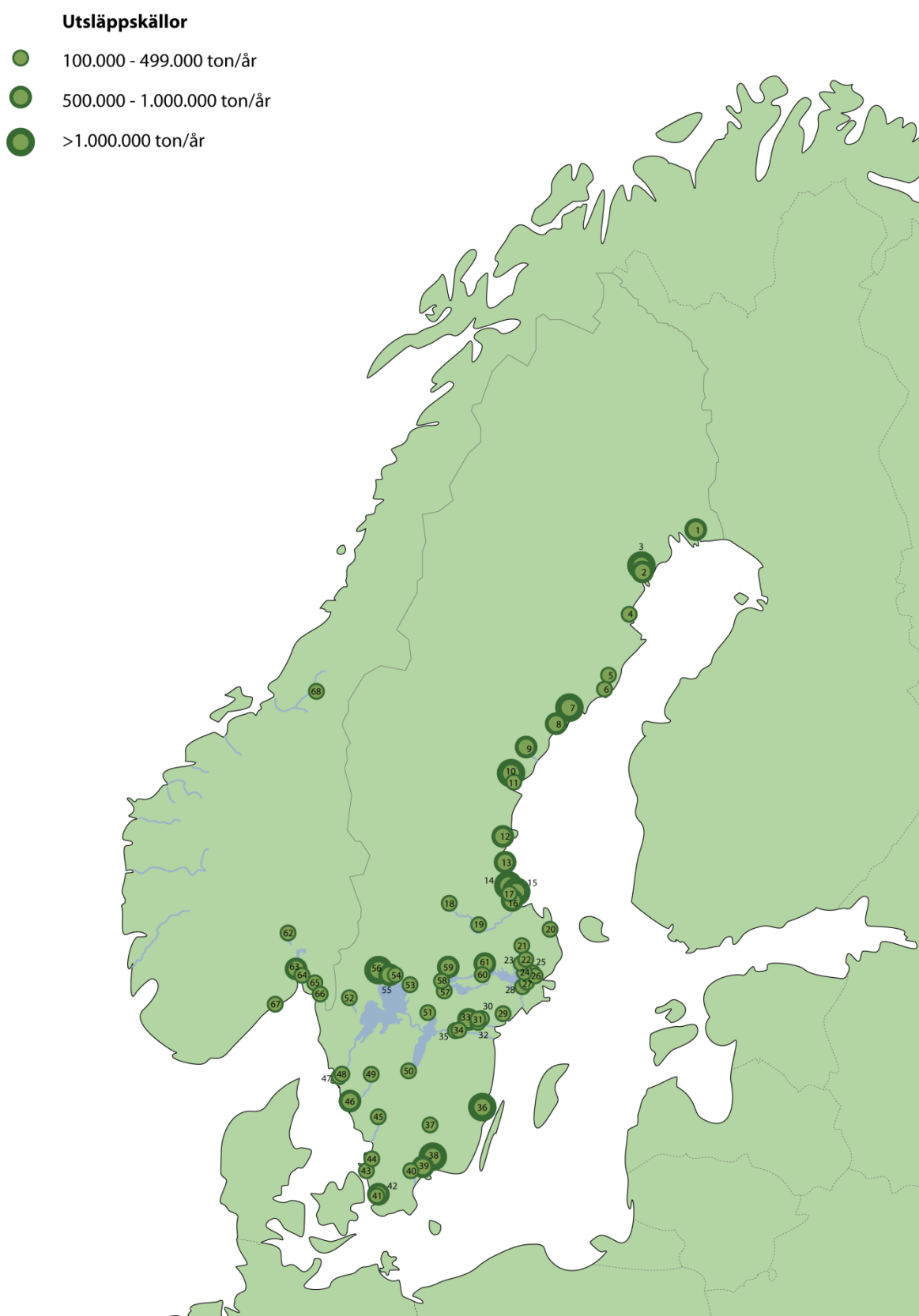


Bild 5.

	Namn	Industrislag	Plats	Biogena CO ₂ -utsläpp (ton/år)
1	Billerud AB, Karlsborgs bruk	Massa- och pappersbruk	Karlsborg, Kalix	789 000
2	SCA, Munksund	Massa- och pappersbruk	Piteå	605 980
3	Kappa Kraftliner Piteå	Massa- och pappersbruk	Piteå	1 181 000
4	Skellefteå Kraft, Hedensbyns Kraftvärmeverk	Energi	Skellefteå	223 900
5	Umeå Energi, Dåva Kraftvärmeverk	Energi	Umeå	176 028
6	SCA, Obbola	Massa- och pappersbruk	Umeå	423 000
7	M-real Sverige AB, Husums fabrik	Massa- och pappersbruk	Örnsköldsvik	1 865 000
8	Domsjö fabriker	Massa- och pappersbruk	Örnsköldsvik	567 926
9	Mondi Packaging Dynäs	Massa- och pappersbruk	Kramfors	579 000
10	SCA, Östrands massafabrik	Massa- och pappersbruk	Timrå	1 147 000
11	SCA, Ortvikens pappersbruk	Massa- och pappersbruk	Sundsvall	254 000
12	Holmen AB, Iggesunds Bruk	Massa- och pappersbruk	Hudiksvall	750 589
13	Rottneros AB, Vallviks Bruk AB	Massa- och pappersbruk	Vallvik	553 000
14	Korsnäs AB, Korsnäsverken	Massa- och pappersbruk	Gävle	1 417 000
15	Stora Enso, Skutskärs Bruk	Massa- och pappersbruk	Skutskär	1 489 000
16	Stora Enso, Norrsundets Bruk	Massa- och pappersbruk	Skutskär	890 350
17	Karskär Energi, Karskärsverket	Energi	Gävle	139 702
18	Stora Enso, Kvarnsveden	Massa- och pappersbruk	Borlänge	316 698
19	Stora Enso, Fors Bruk	Massa- och pappersbruk	Avesta	162 806
20	Holmen AB, Hallsta Papper	Massa- och pappersbruk	Hallstadvik	173 000
21	Vattenfall, Boländeranläggningarna	Energi	Uppsala	373 762
22	Fortum, Bristaverket	Energi	Sigtuna	286 481
23	Ragn-Sells AB, Högbytorps avfallsanläggning	Energi	Upplands-Bro	115 500
24	Fortum, Hässelbyverket	Energi	Stockholm	346 220
25	Norrenergi, Solnaverket	Energi	Solna	128 538
26	Fortum, Värtaverket	Energi	Stockholm	244 825
27	Söderenergi, Fittjaverket	Energi	Stockholm	128 259
28	Söderenergi, Igelstaverket	Energi	Södertälje	346 987
29	Vattenfall, Idöbäckens Kraftvärmeverk	Energi	Nyköping	123 502
30	Lantmännen Agroetanol AB	Etanol	Norrköping	170 000 ⁴⁸
31	Holmen AB, Bravikens Pappersbruk	Massa- och pappersbruk	Norrköping	161 400
32	E.ON, Händelöverket	Energi	Norrköping	484 553
33	Billerud AB, Skärblacka	Massa- och pappersbruk	Skärblacka	691 000
34	Tekniska Verken i Linköping, Gärsdalsverket	Energi	Linköping	418 866
35	Tekniska Verken i Linköping, Kraftvärmeverket	Energi	Linköping	190 202
36	Södra Cell AB, Mönsterås Bruk	Massa- och pappersbruk	Mönsterås	1 735 755
37	Växjö Energi, Sandviksverket	Energi	Växjö	228 013
38	Södra Cell AB, Mörrums Bruk	Massa- och pappersbruk	Mörrum	1 144 000
39	Stora Enso, Nymölla	Massa- och pappersbruk	Nymölla	867 000

⁴⁸ Uppgiften har hämtas från Peter Nimrodsson vid Lantmännen Agroetanol AB. Volymen beräknas uppnås 2011 och budgeterad volym för 2010 motsvarar 150 000 ton.

40	C4 energi, Allöverket	Energi	Kristianstad	111 697
41	Sydsånes Avfall, Sysav	Energi	Malmö	363 985
42	E.ON, Heleneholmsverket	Energi	Malmö	511 341
43	Öresundskraft, Västhamnsverket	Energi	Helsingborg	310 787
44	Ängelholms Energi, KVV-Åkerslund	Energi	Ängelholm	146 788
45	Stora Enso, Hylte	Massa- och pappersbruk	Hyltebruk	216 000
46	Södra Cell AB, Värö	Massa- och pappersbruk	Väröbacka	927 392
47	C4 energi, Allöverket	Energi	Göteborg	397 700
48	Göteborg Energi, Sävenäs Kraftvärmeverk	Energi	Göteborg	444 075
49	Borås Energi och Miljö AB, Ryaverket	Energi	Borås	342 882
50	Jönköping Energi, Kraftvärmeverket, Munksjö	Energi	Jönköping	131 851
51	Munksjö AB, Aspa Bruk	Massa- och pappersbruk	Olshammar	420 000
52	Munksjö Paper, Billingsfors	Massa- och pappersbruk	Billingsfors	133 000
53	Nordic Paper, Bäckhammars Bruk	Massa- och pappersbruk	Bäckhammar	358 389
54	Karlstads Energi, Heden kraftvärmeverk	Energi	Karlstad	137 516
55	Stora Enso, Skoghalls Bruk	Massa- och pappersbruk	Skoghall/Karlstad	867 408
56	Billerud AB, Gruvöns Bruk	Massa- och pappersbruk	Karlstad	1 400 000
57	SAKAB AB	Energi	Kumla	109 210
58	E.ON, Åbyverket	Energi	Örebro	346 940
59	AssiDomän	Massa- och pappersbruk	Frövi	604 000
60	Eskilstuna Energi & Miljö, Kraftvärmeverket	Energi	Eskilstuna	282 140
61	Mälarenergi, Västerås kraftvärmeverk	Energi	Västerås	983 888
				31 435 831

Tabell 2.

	Namn	Industrislag	Plats	Biogena CO ₂ -utsläpp (ton/år)
62	Norske Skogindustrier ASA, Follum Fabrikk	Massa- och pappersbruk	Hønefoss	136 420
63	Södra Cell AS	Massa- och pappersbruk	Tofte	859 400
64	Peterson Linerboard AS	Massa- och pappersbruk	Moss	265 000
65	Borregaard Ind. Ltd.	Massa- och pappersbruk	Sarpsborg	100 000
66	Norske Skogsindustrier ASA, Saubrugs	Massa- och pappersbruk	Halden	161 910
67	Norcem AS	Betong	Brevik	113 850
68	Norske Skog Skogn	Massa- och pappersbruk	Skogn	187 000
				1 687 160

Tabell 3.

4.5 Fossila CO₂-källor i Norge

År 2008 var de norska utsläppen av växthusgaser 53,8 miljoner ton CO₂e, varav fossil koldioxid stod för 44,0 miljoner ton.⁴⁹ De tio största punktutsläppen av fossil koldioxid på land svarade samma år för knappt 8 miljoner ton, se tabell 4.

Fossila utsläpp på land	Ton CO ₂
STATOIL ASA, Mongstad	1 437 600
Hammerfest LNG	1 356 230
Gassco AS, Kårstø	1 200 730
Nordcem AS, Brevik	812 250
Yara Norge AS, Yara Porsgrunn	673 820
Hydro Aluminium AS Sunndal	647 400
Hydro Aluminium AS Karmøy	532 600
NORETYL AS	458 000
Alcoa Mosjøen	423 000
NORCEM AS, Kjøpsvik	403 320
	7 944 950

Tabell 4.⁵⁰

Norge har även stora utsläppskällor till havs vilka hör från olja- och gasindustrin. De tio största punktutsläppen på norsk kontinentalsockel framgår av tabell 5.

Fossila utsläpp till havs	Ton CO ₂
StatoilHydro ASA, Osebergfältet	1 239 287
StatoilHydro ASA, Gullfaksfältet	1 059 779
StatoilHydro ASA, Åsgardfältet	1 008 090
ConocoPhillips Skandinavia, Ekofiskområdet	1 002 041
StatoilHydro ASA, Statfjordfältet	967 417
StatoilHydro ASA, Sleipnerfältet	861 250
StatoilHydro ASA, Troll B och C	633 895
StatoilHydro ASA, Snorre fältet	502 630
StatoilHydro ASA, Heidrunfältet	390 246
Marathon Petroleum Company, Alvheim	343 901
	8 008 536

Tabell 5.⁵¹

⁴⁹ Statistisk sentralbyrå, Utslipp av klimagasser 1990-2009

⁵⁰ Klima- og forurensningsdirektoratet, Norske utslipp, Karbondioksid fossilt

⁵¹ Klima- og forurensningsdirektoratet, Klimakvoter for 2008–2012

4.6 Fossila CO₂-källor i Sverige

År 2008 var de svenska utsläppen av växthusgaser 64,0 miljoner ton CO₂e, varav 50,4 miljoner ton var fossil koldioxid.⁵² I tabell 6 listas de tio största punktutsläppen av fossil CO₂ i Sverige under 2008.

Namn	Anläggning	Bransch	Ton CO ₂
SSAB Oxelösund AB	SSAB Oxelösund	Järn och Stål	2 334 970
Lulekraft AB	Kraftvärmeverket	El och fjärrvärme	2 229 736
Preem Petroleum AB	Preemraff Lysekil	Raffinaderi	1 769 903
Cementa AB	Slitefabriken	Mineral Cement	1 541 171
SSAB Tunnpå AB	Metallurgi, Luleå	Järn och Stål	1 252 730
Borealis AB	Krackeranläggningen	Energi Kemi	615 596
AB Fortum Värme	Värtan	El och fjärrvärme	610 389
Preem Petroleum AB	Preemraff Göteborg	Raffinaderi	539 306
Shell Raffinaderi AB	Shell raffinaderi Göteborg	Raffinaderi	522 275
Mälarenergi AB	KVV, Block 4	El och fjärrvärme	490 242
			11 906 318

Tabell 6.⁵³

Under 2008 var det totalt 31 anläggningar som släppte ut mer än 100 000 ton fossil CO₂. Tillsammans stod dessa anläggningar för utsläpp om 16,0 miljoner ton CO₂. Punktutsläppen av fossil koldioxid i Sverige är därmed hälften så stora som utsläppen av biogen koldioxid. De största biogena punktutsläppen är ungefär lika stora som de största fossila punktkällorna och nästan dubbelt så många bland anläggningarna med mer än en miljon ton utsläpp per år. Detta förhållande visar att BECCS har större potential i Sverige än fossil CCS applicerat på fossila källor inom stål- cement – och raffinaderiindustrin.

En faktor som gör bilden något mer komplicerad är att majoriteten av de biogena punktkällorna har en viss procentandel fossila utsläpp inblandat i de biogena utsläppen. I exempelvis massabrukens mesaugnar används ofta olja som bränsle, vilket i kombination med biomassaråvaran renderar en blandning av biogen och fossil koldioxid i rökgaserna. Rent tekniskt medför detta inga problem vid avskiljningen och lagringen, tvärtom så innebär det skalfördelar. De fossila utsläppen i de svenska pappers- och massabruken är knappa två miljoner ton per år, vilket motsvarar cirka 8 procent av de biogena utsläppen på samma anläggningar.⁵⁴ På samma sätt är det vanligt i kraftvärmeproduktionen att de biogena utsläppen är uppblandade med fossila delar. Därför skulle installation av koldioxidlagringssystem i kraftvärme- och massaindustrin kunna minska även de fossila utsläppen med flera miljoner ton årligen. Vi har i vår studie inte räknat med denna potential, dels för att framhäva de biogena

⁵² Naturvårdsverket, Utsläpp av växthusgaser i Sverige 2008

⁵³ Naturvårdsverket, Utsläpp och tilldelning av utsläppsätter

⁵⁴ Grönkvist et al., 2008

lagringsmöjligheterna, dels för att de fossila delarna med sannolikhet kommer att fasas ut över tid och ersättas av biomassa.

4.7 Framtida utsläpp i Sverige

De utsläppsdata som har presenterats ovan kommer inte att vara oförändrade över tid. Höjda ambitioner avseende klimatmål kommer att minska de totala utsläppen av fossil CO₂. Utsläppen av biogen CO₂ förväntas däremot att öka i och med ökad användning av biomassa inom sektorerna industri, elproduktion och fjärrvärme. Även omvandlings- och distributionsförlusterna ökar till följd av ökad elproduktion fram till år 2030. Användningen av biomassa inom pappersmassaindustrin förväntas likaså öka, se bild 6. En mer utförlig redogörelse för den förväntade ökningen av biogena CO₂-utsläpp följer nedan i avsnitt 6.

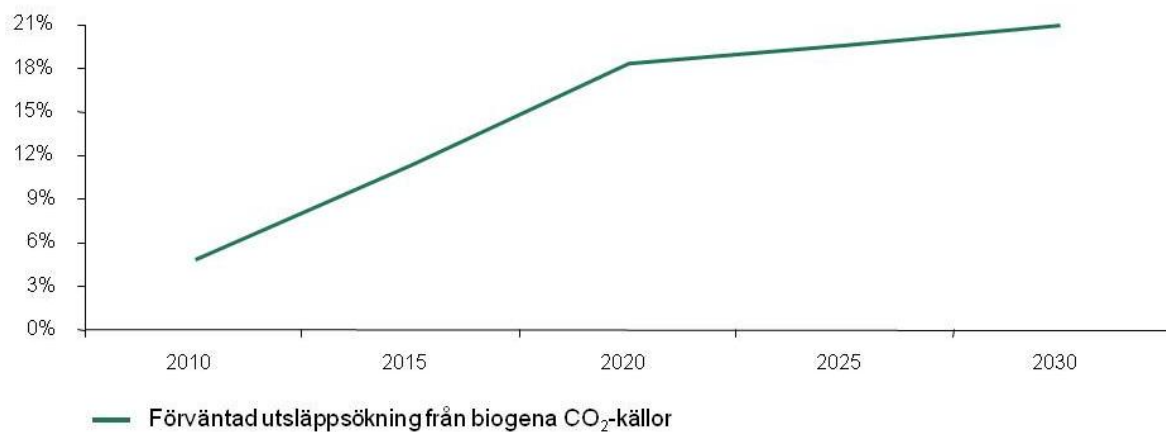


Bild 6.

Data är hämtade från "Långsiktsprogno 2008" från Energimyndigheten,⁵⁵ samt en rapport från CEMS-programmet vid Handelshögskolan i Stockholm.⁵⁶

⁵⁵ Energimyndigheten, 2009

⁵⁶ Zantioti et al., 2009

5 Teknisk översikt över avskiljning, transport och lagring av koldioxid

Koldioxid är inte bara en växthusgas, utan används även i en rad industriella tillämpningar. Mest känt är koldioxiden som bildar kolsyre bubblorna i läskedrycker, men koldioxid används även i brandsläckare, som kylmedium i livsmedelsindustrin, i produktionen av konstgödsel och för kemikalieframställning. Kunskapen om hur koldioxid hanteras är därför god, samtidigt som den storskaliga hantering som koldioxidlagring innebär ställer delvis nya krav.

5.1 Avskiljningstekniker

Vid förbränning av kol, olja, gas och biomassa bildar bränslets kolatomer och luftens syre koldioxid. Syret är uppblandat med med andra gaser i luften, varför även rökgaserna blir uppblände med kväve och andra gaser från både luften och bränslet. Halten koldioxid i rökgaserna är vid förbränning av naturgas 3-4 procent, av kol 13-15 procent och av biomassa 14-17 procent.⁵⁷ För att kunna komprimera och lagra koldioxiden geologiskt, behöver den avskiljas till en ren ström.

Det finns i huvudsak tre tekniker för avskiljning av koldioxid ur förbränningsgaser. Koldioxiden kan antingen skiljas av före förbränning, på engelska kallat pre-combustion, eller efter, post-combustion. Den tredje tekniken är att förbränna bränslet med rent syre, benämnt oxyfuel, varpå ren koldioxid bildas, se bild 7. Vardera metod har i sin tur olika teknikvarianter. För post-combustionsteknikerna kan exempelvis aminer användas, eller metoden chilled ammonia. Det norska företaget Sargas har utvecklat en metod som bygger på trycksatt förbränning och post-combustionavskiljning, så kallad pfbc-teknik (Pressurized Fluidized Bed Combustion). I kolkraftverket i Värtahamnen i Stockholm har metoden testats med goda resultat. Vanligtvis kan 85-90 procent av koldioxiden avskiljas, men med vissa metoder såsom oxyfuel eller pfbc-tekniken kan mer än 95 procent avskiljning uppnås.⁵⁸

Redan idag avskiljs koldioxid vid två svenska massabruk (M-real i Husum och StoraEnso i Nymölla) genom att rökgaser reagerar med släckt kalk för att bilda PCC (kalciumkarbonat). I vardera anläggning binds på detta vis 40-50 tusen ton koldioxid per år, varav merparten i båda fallen är av biogent ursprung. PCC används för produktion av färg, lim, tätningsmedel, plast, gummi och läkemedel. När dessa produkter bryts ned eller eldas upp återgår den bundna koldioxiden till det atmosfäriska kretsloppet, varför den långsiktiga klimatnyttan är begränsad.

⁵⁷ Grönkvist et al., 2008

⁵⁸ Martin Rödén, affärsutvecklingschef, Sargas AS.

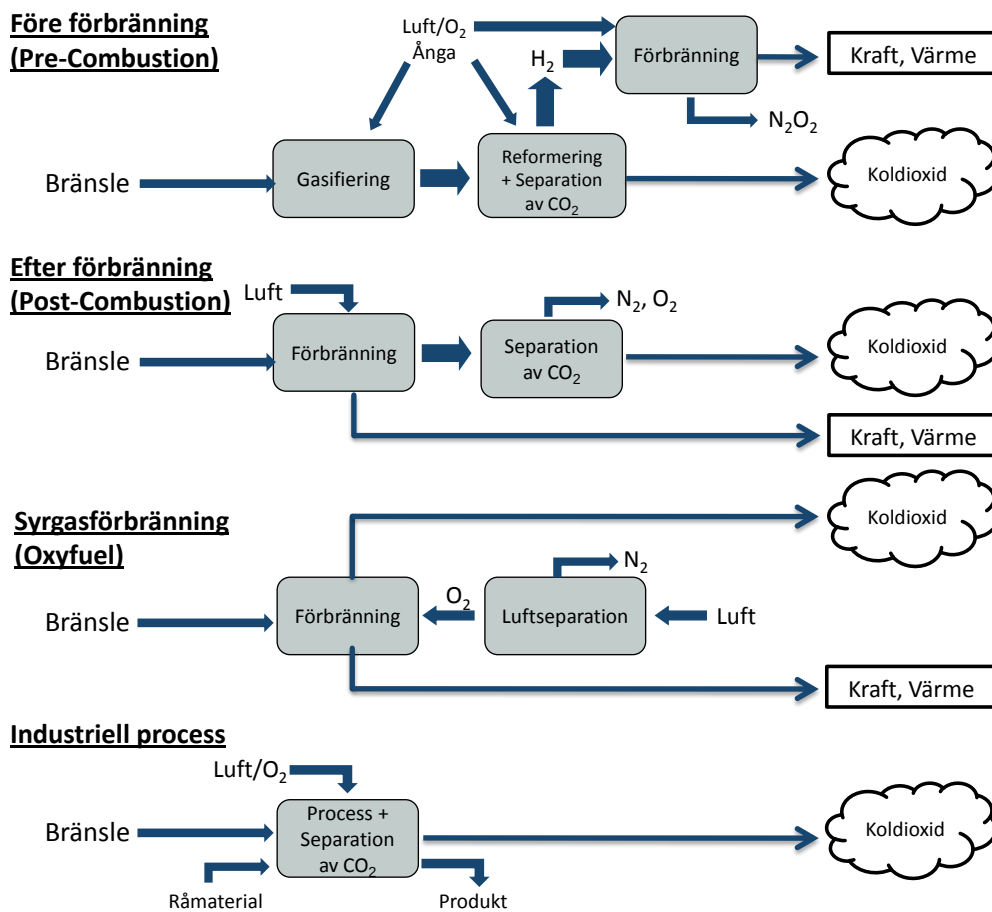


Bild 7.

I tillägg till rökgaser från förbränning finns det processer som avger relativt rena strömmar av koldioxid med 95-99 procent koldioxidkoncentration. Ett exempel är jäsning av etanol, en annan är uppgraderingsprocessen för biogas. Ytterligare en process som ger rena strömmar av biogen koldioxid är svartlutsförgasning, en process där en biprodukt i pappersmassabruk omvandlas till fordonbränsle. En försöksanläggning för svartlutsförgasning finns idag i Piteå, och en fullskaleanläggning är projekterad för Domsjö Fabriker i samarbete med Chemrec. I alla tre fallen kan kostnaderna för ett koldioxidlagringssystem kraftigt reduceras, då koldioxiden redan separeras som en del i de underliggande processerna.

5.2 Transport

5.2.1 Pipeline

För transport av koldioxid över kortare sträckor eller för större mängder är pipeline ett alternativ. För att få koldioxiden mer lätthanterlig komprimeras gasen till över 74 atmosfärs tryck. Vid detta tryck övergår koldioxiden från gasform till så kallad superkritisk fas, vilket medför att koldioxiden beter sig som ett mellanting mellan gas och vätska. Densiteten är vid

detta tryck mer än 700 kg/m³, vilket är i närheten av densiteten för vanligt vatten.⁵⁹ Kompressionen sker med känd teknik, men kräver energi.

Det finns i dagsläget mer än 5 000 kilometer pipelines i USA för transport av koldioxid,⁶⁰ med en sammanlagd kapacitet på cirka 50 miljoner ton årligen. Den största av dessa pipelines är Cortez-ledningen, som går genom tre delstater och transporterar 20 miljoner ton CO₂ per år genom en pipeline som är 76 cm i inre diameter.⁶¹ Erfarenheterna av pipelinetransport är därför omfattande och innehåller få osäkerhetsmoment.

5.2.2 Fartyg

För långa transporter över vatten är fartygstransport ett alternativ. Det finns idag fartyg som transporterar koldioxid för industriellt bruk, med en kapacitet om 1 250 - 1 500 ton. För att få koldioxiden hanterbar kylls den ned till under -25 °C och trycksätts till 14-17 atmosfärers tryck. På så sätt blir koldioxiden flytande och kan transporteras i stora tankar. Sex fartyg ägda av I.M. Skaugen, som idag transporterar etylen, skulle utan större modifikationer kunna transportera koldioxid i ett tänkt första lagringsprojekt. De har en kapacitet på 10-12 tusen ton koldioxid per fartyg.⁶² För att transportera större volymer på många miljoner ton per år föreslås fartyg med en kapacitet på 20 000 ton eller mer, men sådana skepp finns inte idag.⁶³



Bild 8. Skepp för transport av flytande koldioxid. Foto Yara International.

⁵⁹ Elforsk 04:27, 2004

⁶⁰ Parfomak och Folger, 2007

⁶¹ Elforsk 04:27, 2004

⁶² Grönkvist et al., 2008

⁶³ Elforsk 04:27, 2004

5.2.3 Tåg och lastbil

För mängder om miljontals ton koldioxid per år är tåg och lastbil olämpliga som transportmedel. Däremot används ofta lastbilar för de mindre mängder koldioxid som behövs i till exempel industriellt bruk eller i pilotprojekt med koldioxidlagring.

5.3 Lagring

Koldioxid kan lagras i flera olika typer av geologiska formationer, såsom uttjänta olja- och gasfält, så kallade salina akvifärer, basalter och liknande porösa formationer. Störst kapacitet finns i salina akvifärer.⁶⁴ En salin akvifär är en porös sandsten med salt eller bräckt vatten som ligger isolerad från grund- och havsvattnet. Man tittar efter formationer på mer än 800 meters djup som har vissa egenskaper och som ligger under ett impermeabelt och täckande berglager som stänger in det som injiceras i akvifären. På samma sätt som olja och gas som bildats under lång tid har stannat kvar i porösa formationer tack vare ett sådant täckande och instängande berglager, kan man skapa en permanent förvaring av koldioxid i flytande form i porerna i sandstenen under ett sådant lock.

5.3.1 Tidigare erfarenheter och pågående lagringsprojekt

Koldioxid förekommer i koncentrerad form i naturliga reservoarer i jordskorpan. Exempel på sådana förekomster är McElmo Dome i Colorado och Bravo Dome i New Mexico i USA. Här har koldioxiden legat lagrad i miljontals år, på samma sätt som olja- och gasfyndigheter.⁶⁵

Sedan 1970-talet har koldioxid använts för att öka utvinningen i oljefälten i västra Texas. Koldioxiden pumpas ner för att höja trycket i oljekällorna, så att mer olja kan utvinnas. Detta kallas EOR, Enhanced Oil Recovery. Koldioxiden som används för EOR utvinns framförallt ur naturliga underjordiska CO₂-förekomster, varpå det inte finns någon klimatnytta med verksamheten i dagsläget. Det är för EOR som de stora rörledningarna till oljefälten i västra Texas har byggts, bland annat den tidigare nämnda Cortez-ledningen.

Det första större projektet med koldioxidlagring för att minska utsläppen av CO₂, initierades av norska Statoil på 1990-talet. På gasplattformen Sleipner i Nordsjön utvinns naturgas, som är uppblandad med koldioxid när den kommer upp ur underjorden. För att kunna sälja naturgasen enligt gällande kvalitetsnormer, avskiljs koldioxiden ur gasen. För att undvika den norska koldioxidskatten har sedan 1996 cirka 1 000 000 ton koldioxid per år injicerats tillbaka ner i underjorden under havsbotten i den stora salina akvifären Utsira. Mer än tio miljoner ton har hittills injicerats ner till 800 meters djup genom ett och samma lagringshål, med mycket goda resultat.⁶⁶ Som en jämförelse, skulle ett utsläpp om en miljon ton koldioxid kosta in bland de tio största punktkällorna i Norge och motsvarar nästan två procent av Norges samlade utsläpp av växthusgaser.

⁶⁴ Metz et al., 2005 (IPCC Special Report on CCS)

⁶⁵ Elforsk 04:27, 2004

⁶⁶ Elforsk 05:27, 2005



Bild 9. Statoils plattform Sleipner A. Foto Øyvind Hagen/Statoil.

Ett liknande projekt inleddes 2007 vid Snövit- fältet i Nordnorge, även detta i Statoils regi. Här lagras 700 000 ton koldioxid per år i Tubåsen, en salin akvifär under havsbotten.⁶⁷ Det finns planer och förslag på CCS-anläggningar i anslutning till industrierna vid Mongstad, Kårstø och Tjellbergodden, men här har projekten skjutits upp på grund av kombinationer av ekonomiska, tekniska och politiska svårigheter.

Sammantaget finns ett tiotal genomförda och ett hundratal projekterade och planerade koldioxidlagringsprojekt i världen idag. Norge och norska företag ligger i täten tillsammans med nordamerikanska satsningar. Bland annat förbereds nu ett tiotal mellanstora CCS-projekt i USA med stöd från US Department of Energy, och EU har anslagit medel till åtta större projekt. Däremot är det mycket få initiativ och satsningar som sker för att lagra koldioxid från biomassa.⁶⁸

⁶⁷ Elforsk 08:58, 2008

⁶⁸ Vergragt et al, mimeo



Bild 10. Områden för koldioxidlagring.

5.3.2 Lagringssäkerhet

Under de snart 40 år som koldioxid lagrats i syfte att öka oljeutvinningen genom EOR, har man fått stor erfarenhet av tekniken. Den kan därför inte längre beskrivas som vare sig oprövad eller osäker, även om skälen för nedpumpningen har varit att utvinna mer fossila bränslen snarare än att nå klimatvinster. Koldioxid är inte heller jämförbart med annat miljöavfall eller gifter, eftersom det inte är toxiskt och inte åstadkommer permanent skada ens vid läckage eller utsläpp. Det är en naturligt förekommande gas som är dödlig enbart i mycket höga koncentrationer.

I den salina akvifären sker instängningen av koldioxid genom fyra på varandra följande processer, i fyra olika faser. Först strävar injicerad koldioxid, som är i flytande fas och lättare än saltvatten, uppåt i formationen och hindras att komma upp till ytan genom det icke porösa berglocket. När koldioxid rör sig uppåt och sprids i sandstens-formationen blir den även instängd i stenens porer vilket hindrar den från att migrera vidare. Efter tio år är mer än en fjärdedel av vätskan bunden i porer på detta sätt. Den tredje fasen går långsammare och består av reaktioner i det salta vattnet, där koldioxid blir löst, vilket gör den tyngre än vattnet så att den börjar sträva nedåt. Efter 100 år är ca en fjärdedel av den flytande koldioxiden omvandlad till en vätska som inte längre strävar uppåt. Den sista fasen är den långsammaste och innebär en reaktion där koldioxid omvandlas till en så kallad karbonat, ett mineral som blir en del av berget, och som blir kvar på det sättet under miljontals år. Vartefter processen fortgår minskar successivt andelen koldioxid som är instängd på grund av någon av de tre första mekanismerna. Det sker en mineralisering av större och större mängder koldioxid som dithills varit bundet på något av de tidigare sätten. Sammantaget innebär processerna att lagringssäkerheten ökar för varje år.

Seismisk övervakning som visar den injicerade CO₂-mängdens placering, utbredning och förflyttning ger direkta och tydliga indikationer på huruvida man lyckats hitta en lämplig formation. Därigenom kan man tidigt avbryta injektion in i en olämplig formation, eller vidta ett antal åtgärder om risk för läckage indikeras.

IPCC har sammanställt en omfattande rapport om koldioxidlagring.⁶⁹ I detta material, bedöms att det är "... troligt att mer än 99 procent lagrad koldioxid stannar i väl utvalda formationer i mer än 1000 år." Det bör tilläggas att man beräknar att lagringen kommer att vara i tiotals miljoner år, men att man inte vill uttala sig bortom en tusenårig horisont.⁷⁰

5.3.3 Lagringspotential

Den globala lagringskapaciteten för koldioxid är mycket stor. Enligt IPCC:s uppskattningar finns det lagringsutrymmen som rymmer hundratals år av globala utsläpp, se tabell 7. Som jämförelse är de årliga globala växthusgasutsläppen för närvarande cirka 30 miljarder ton koldioxidekvivalenter.

⁶⁹ Metz et al., 2005 (IPCC Special Report on CCS)

⁷⁰ Tore A. Torp, CCS-teknisk expert på Statoil och medförfattare av IPCC:s rapport om CCS

Geologisk formation	Låg skattning av lagringskapacitet i miljarder ton koldioxid (GtCO ₂)	Hög skattning av lagringskapacitet i miljarder ton koldioxid (GtCO ₂)
Olje- och gasfält	675	900
Kollager	3-15	200
Salina akvifärer	1 000	10 000 (osäkert)
Totalt	1 675	~11 000

Tabell 7.⁷¹

Den norska respektive svenska lagringsförutsättningarna är diametralt motsatta. Sveriges berggrund består till stor del av hårda, icke-porösa bergarter, där det vare sig finns oljefyndigheter eller möjligheter till att lagra koldioxid. De enda undantagen återfinns i sydvästra Skåne och i havet utanför Gotland. Norge däremot har mycket stora områden i den norska delen av Nordsjön, där stora mängder kan lagras under lång tid.

Trots den internationellt sett begränsade kapaciteten i sydvästra Skåne, bedöms lagringspotentialen vara cirka 1600 Mton koldioxid i lämpliga salina akvifärer. I jämförelse med de Skånska punktutsläppen av koldioxid motsvarar detta många hundratals års lagringskapacitet. De sydvästska lagren är mellan 40 och 250 meter tjocka och har en utbredning på ett antal tusen kvadratkilometer.⁷² Det kan även bli aktuellt att lagra koldioxid från södra och västra Sverige och sydöstra Norge i Danmark. Kapaciteten i de danska geologiska formationerna har uppskattats till så mycket som 16 miljarder ton koldioxid.⁷³ Norges kapacitet är ännu mycket större, och dessutom beprövad i projekten vid Sleipner och Melkøya. Den totala norska lagringskapaciteten har uppskattats till minst 29 miljarder ton koldioxid (29 Gton), men kan vara betydligt större.⁷⁴ Det motsvarar mer än tusen år av biogena svenska utsläpp.

⁷¹ Metz et al., 2005 (IPCC Special Report on CCS)

⁷² Elforsk 04:27, 2004

⁷³ Tel-Tek, 2008

⁷⁴ Uppgift från Matti Nieminen, VTT

6 Norsk-svenska BECCS-system

De svenska och norska förutsättningarna för koldioxidavskiljning från biogena källor och lagring i geologiska formationer är motsatta varandra. Sverige har få områden med lämpliga lager men stora och många utsläppskällor; Norge har ett överflöd av lagring som dessutom är utprövat under mer än ett decennium, men har endast en större punktkälla för biogen koldioxid. Vårt fokus i arbetet med rapporten har varit att undersöka möjligheten till att kombinera dessa potentialer för största möjliga effekt. Därför kommer vi i den fortsatta analysen inte att fokusera på de norska utsläppen eller de svenska lagren. Vi ger dock ett exempel på en pilotanläggning som lagrar i Skåne för att visa på möjligheten.

Det finns även andra aspekter att ta hänsyn till när det gäller de svenska potentiella koldioxidlagren. De har ännu inte undersökts lika väl som de norska formationerna, och den data som finns är hämtad från borrhöjningar och undersökningar med andra syften, såsom geotermiska projekt eller oljeprospektering. Det är högst sannolikt att tillståndprocesserna för lagring av koldioxid, i synnerhet på land i det tätbefolkade Skåne, kan tänkas ta mycket lång tid. I vissa områden i Tyskland och Danmark har planerade lagringsprojekt mött ett stort lokalt motstånd och därför avbrutits. Det bör dock tilläggas att det även finns projekt för koldioxidlagring på land i Europa i drift, bland annat i Lacq i södra Frankrike och i tyska Ketzin utanför Berlin.^{75, 76}

Vi har i denna studie endast inräknat sådana anläggningar som släpper ut mer än 100 000 ton årligen. Med mindre koldioxidmängder förloras skalfördelar och tonkostnaderna blir snabbt avsevärt högre. Samtidigt har vi enbart inräknat de källor som ligger i närheten av kusten. I andra fall måste rörledningar dras ut till kusten, vilket ökar komplexiteten och kostnaderna. Vi har därför satt en gräns vid maximalt 20 km mellan punktutsläpp och kustlinje. Det bör noteras att det stora flertalet av källorna redan idag ligger vid en djuphamn, för att kunna transportera insatsråvaran till anläggningen (och i massabrukens fall, slutprodukten därifrån).

De energianläggningar som mötte ovanstående krav, släppte ut 7,0 miljoner ton biogen koldioxid år 2006. Motsvarande siffra för massa- och pappersindustrin var 19,6 miljoner ton. Tillsammans med Agroetanols fabrik i Norrköping gav detta totala utsläpp på 26,8 miljoner ton år 2006.

År 2020 beräknas de svenska biogena punktutsläppen av koldioxid ha ökat till närmare 32,5 miljoner ton. Med en lagringsandel om 85 procent blir den svenska BECCS-potentialen år 2020 drygt 27,5 miljoner ton. År 2030 kommer den svenska BECCS-potentialen, givet en lagringsandel om 85 procent, att uppgå till cirka 30,0 miljoner ton. De mer exakta beräkningarna återfinns i Annex 1.

⁷⁵ www.co2sink.org

⁷⁶ <http://www.total.com/fr/nos-enjeux/respecter-l-environnement/contribuer-a-la-lutte-contre-le-changement-climatique/captage-stockage-co2-200673.html>

Det bör tilläggas att ett ton avskild koldioxid inte exakt motsvarar ett ton lagrad koldioxid. Vid transporten och lagringen kan det vara nödvändigt att låta små andelar av koldioxiden ventileras ut på grund av säkerhetsaspekter, eller för att justera för ändringar i tryck och temperatur. Vi har inte räknat med detta i vår översiktliga analys, inte heller har vi räknat på de utsläpp som kan uppstå i transportledet eller på grund av energibehovet i avskiljningen, kompressionen och likviferingen. Detta beror på att vi antar att en stor del av denna energi och bränslebehov kan mötas av koldioxidneutrala energilag. Om däremot konventionell bunkerolja skulle användas för fartygen vid transport över 1 000 - 2 000 km, skulle utsläppen från transporten motsvara cirka 1-3 procent av den lagrade mängden koldioxid.⁷⁷ Analysen av eventuella indirekta utsläpp på grund av avskiljning och kompression är svårare att utföra generellt då den är avhängig av platsspecifika förutsättningar, vilka kan vara komplexa, i synnerhet när det gäller massabruk. Det är till och med så att eventuella bibränsleeldade anläggningar som driftsätts för att möta det ökade energibehovet på grund av BECCS i sin tur kan användas för BECCS. På så sätt kan mängden koldioxid som lagras undan från atmosfären öka än mer.

Sammanfattningsvis krävs det mer ingående studier för att noggrannare undersöka möjligheterna för varje anläggning var för sig, både vad gäller volympotential, avskiljningsteknologier, transportlösningar, kostnader och påverkan ur ett livscykelperspektiv.

6.1 Avskiljning

De biogena punktutsläppen av koldioxid kan grovt delas upp i två kategorier: pappersmassabruk och kraftvärmeverk. Kraftvärmeanläggningarna eldas med sopor och/eller olika former av trädbränsle. Utsläppen uppstår vid förbränningen och kommer ut ur en och samma rökgaskanal. Avskiljningen av koldioxiden kan ske med någon av de tekniker som beskrevs i kapitel 5, men för anläggningar som inte byggs nya med avskiljning inplanerad i designen, är det troligast med någon form av post-combustion-teknik.

Pappersbruken kan i sin tur delas upp på sulfatmassabruk, sufitmassabruk och olika former av mekaniska massabruk. Sulfatmassabruken är dominerande i Sverige vad gäller massa-produktion och även koldioxidutsläpp.

Utsläppen sker huvudsakligen i fyra olika processer: i sodapannan, i fastbränslepannan, i mesaugnen och i restgaspannan. Det kan vara lämpligt att olika avskiljningstekniker används för de olika processerna. Det har bland annat föreslagits att avskiljning av koldioxid från mesaugnen sker med oxyfuel-tekniken. På grund av att koldioxid inte enbart uppstår ur förbränning, utan även i själva den kemiska omvandlingsprocessen i mesaugnen, blir halten koldioxid i rökgaserna 26 procent, jämfört med de cirka 15-18 procent som uppkommer vid enbart förbränning av biomassa. Därför blir kostnadseffektiviteten per avskild syremolekyl betydligt högre i mesaugnen än när oxyfueltekniken används på en förbränningsprocess.⁷⁸

⁷⁷ IEA GHG, 2004

⁷⁸ Grönkvist et al, 2006a, och Grönkvist et al., 2008

6.2 Transport

Gemensamt för de stora svenska och norska punktutsläppen av biogen koldioxid är att de ligger långt från potentiella lagringsplatser. De är även utspridda över stora ytor, från Kalix i norr till Malmö i söder. Samtidigt är de relativt små jämfört med de fossila utsläppskällor som diskuterats för koldioxidlagring i övriga världen. Implementering av BECCS på nämnda källor kommer att ske stegvis, med stegrande kapacitetsbehov. Transportkapaciteten behöver även vara flexibel, om en anläggning skulle expandera, lägga ned eller ha stora årstidsfluktuationer. Det senare är aktuellt främst för kraftvärmeanläggningarna, vilka utnyttjas som mest under vintertid när behovet av fjärrvärme är som störst.

Sammantaget talar alla nämnda faktorer för att koldioxid skall skeppas från källan till lagringsplatsen, i synnerhet i de första projekten. De eventuella undantagen är källor i Skåne som kan tänkas lagras i de regionala formationerna, och källorna i Oslofjorden och på svenska Västkusten, vilka kan tänkas ingå i ett framtida pipelinesystem i Skagerack. Vi har i kostnadsuppskattningarna utgått från att transport av koldioxid kommer att ske i trycksatta och nedkylda tankar på fartyg. Först på sikt, när BECCS och lagring från fossila källor i Norden är etablerat i stor skala, kan de mångmiljardinvesteringar som krävs för långa rörledningar bli aktuella. För transport av koldioxid i de första projekten, finns det redan idag fartyg som fraktar etylen, vilka kan användas för detta ändamål.⁷⁹

Vid skeppning av koldioxid blir transportkostnaderna mindre känsliga för avstånd än när rörledningar behöver läggas. En stor del av kostnaderna består av lastnings- och lossningsterminaler samt av den energi som går åt till att komprimera och kyla koldioxiden så att den blir flytande och möjlig att tanka till en båt.

6.3 Lagring

Med tanke på de mycket goda förutsättningarna och den långa erfarenheten av koldioxidlagring som finns i området väster om norska kusten, har vi antagit att lagringen kommer att ske i någon av de formationer som finns i området, exempelvis Utsira- eller Johansen-akvifererna. Lossning av koldioxid kan ske till havs vid exempelvis Sleipnerplattformen, eller vid landbaserade terminaler i anslutning till de planerade CCS-klustren vid Mongstad eller Kårstø, varifrån koldioxiden kan ledas ut till underjorden under havsbotten. Det krävs dock investeringar i bland annat lossningsterminaler, vilket kommer att belasta framförallt de första projekten.

⁷⁹ Tel-Tek, 2008

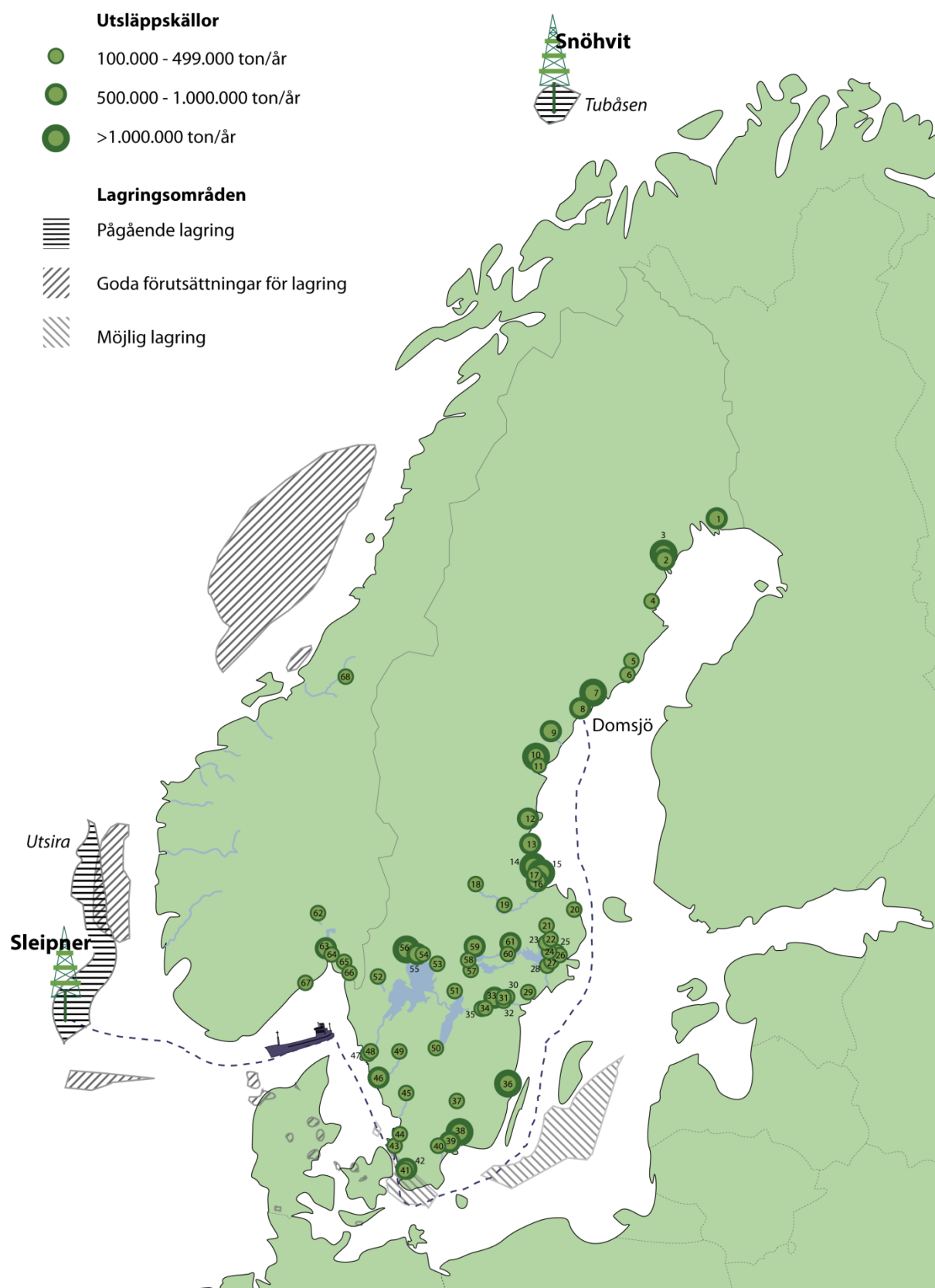


Bild 11. Översikt koldioxidkällor, transport och lagring.

6.4 Kostnader för avskiljning, transport och lagring

I en rapport framtagen av det norska institutet Tel-Tek har kostnaden för att avskilja koldioxid vid massabruket i Värö utanför Varberg uppskattats till 53 € per ton (inklusive kompression) och från kraftvärmeverket Sävenäs utanför Göteborg till 56 € per ton.⁸⁰ Priserna uppges ha en osäkerhet på +/- 35 procent. En EU-finansierad Interreg-studie har inletts, vars avsikt är att ta fram exaktare siffror. En tidigare studie från 2003 visar på betydligt lägre kostnader på 34 \$/ton avskild koldioxid ur en sodapanna (exklusive kostnader för kompression på cirka 6-10 €/ton), som är den dominerande utsläppskällan i ett typiskt massabruk.⁸¹ Ytterligare en studie visar på kostnader motsvarande 38-39 €/ton (exklusive kompression på cirka 6-10 €/ton).⁸² I en rapport från Ångpanneföreningens forskningsstiftelse och Naturvårdsverket poängteras att koldioxidkoncentrationen i de biogena utsläppen är relativt höga, vilket borde leda till generellt sett lägre avskiljningskostnader än vad som gäller för exempelvis kolkraftverk. Samtidigt poängteras det att varje utsläppskälla och anläggning har specifika förutsättningar som kan påverka kostnaderna för avskiljning avsevärt, såsom tillgång till spillvärme, kylvatten, syrgas med mera.⁸³ Det pågår samtidigt ett intensivt arbete världen över för att minska kostnaderna för avskiljning. Med den stora implementering som vi studerar i föreliggande studie, förväntas kostnaderna sjunka på grund av inlärningseffekter och skalekonomier. För att få ett konservativt estimat av kostnaderna för avskiljning kommer vi trots detta att använda oss av de högre avskiljningskostnaderna från Tel-Tek-studien. Som ett representativt snittvärde antar vi därför 53 €/ton som en genomsnittlig avskiljningskostnad för alla källor i våra beräkningar.

En avsevärd del av kostnaden för fartygstransport ligger i energin som krävs för att komprimera och likvifiera koldioxiden. Denna kostnad har i en studie bedömts ligga på cirka 140 kronor per ton för kompression och likvifiering, varav 50 kronor för enbart likvifiering.⁸⁴ Till denna kostnad kommer installation av lastning, lossning och mellanlagring, samt kostnader för inköp och drift av fartyg. En uträkning baserad på kostnaden för att använda tidigare nämnda etylenfraktfartyg om 9 500 tons kapacitet för att frakta koldioxid från Värö bruk till Kårstø i Västnorge, kom fram till en kostnad på knappt 15 €/ton. Detta inkluderar kostnader från det att koldioxiden kommer ut komprimerad från avskiljningsanläggningen i Värö, fram till kajen i Kårstø. Merkostnaden för varje 250 kilometer i studien anges som 4 €/ton.⁸⁵

I studier där kostnaden för rörledningar (pipelines) från svenska källor till lager i sydvästra Skåne och utanför Gotland studerats har transportkostnaderna varit betydligt lägre. Att forsla 5 miljoner ton koldioxid från Stockholmstrakten till Gotland skulle kosta 33 SEK/ton, och samma mängd från Malmö till lagring i sydvästra Skåne 9 SEK/ton och från Göteborg till sydvästra Skåne 46 SEK/ton.⁸⁶ Vi bedömer däremot att de stora engångsinvesteringar som skulle krävas, skulle kunna motiveras och finansieras först när det redan finns fungerande

⁸⁰ Tel-Tek, 2008

⁸¹ Möllersten et al., 2003

⁸² Grönkvist et al., 2008, adapterat från Hendriks et al., 2004

⁸³ Grönkvist et al., 2008

⁸⁴ Elforsk 08:58, 2008

⁸⁵ Tel-Tek, 2008

⁸⁶ Elforsk 04:27, 2004

koldioxidlagringssystem på plats, och att de första systemen av nödvändighet därför är baserade på fartygstransport.

I en studie genomförd på uppdrag av IEA (International Energy Agency), beräknades båttransportkostnaderna för tre olika fartygsstorlekar. Med ledning av resultaten bör båtar som är större än de som anges i Tel-Tek-studien användas, i synnerhet om många miljoner ton koldioxid per år skall transporteras. Studien kom fram till en kostnad om motsvarande 15,6 €/ton för transport över 1 000 km och 21,2 €/ton över en sträcka om 3 000 km. Beräkningarna bygger på fraktfartyg i 30 000-tonsklassen, och i kalkylen ingår alla transportkostnader, inklusive kompression och likvifering.^{87,88} Generellt kan sägas att den initiala kostnaden för transport med fartyg är dominerande, då detta inkluderar likvifering, lastning, lossning, mer mera. Däremot är kostnaden för ytterligare avstånd lågt, i ovanstående studie endast 5,6 €/ton för ytterligare 2 000 km transportsträcka. Denna låga merkostnad är en bidragande orsak till varför vi förespråkar en lösning där koldioxid från svenska källor lagras i norska formationer, snarare än att använda de i nuläget mer okända svenska lagren.

Avståndet sjövägen mellan Utsira, som är den formation som Sleipnerprojektet lagrar koldioxid i, och de svenska biogena utsläppen är mellan 500 km och 2 500 km. Utsläppen ligger utspridda någorlunda jämnt fördelat utmed denna sträcka, varför en snittkostnad för koldioxidtransport från svenska källor till norska lager borde ligga mellan 15,6 €/ton och 21,2 €/ton. Vi antar därför i våra beräkningar en snittkostnad för transport på 18 €/ton, varav 7 €/ton är kostnaden för likvifering och installationer (som den anges i Tel-Tek-rapporten), och 11 €/ton den kostnaden för fartygsfrakten från en genomsnittlig svensk biogen koldioxidkälla (med ett spann på mellan 5 och 20 €/ton beroende på avstånd och beräkningsmodell).

Att lagra koldioxid på land är relativt sett billigare än till havs, men erfarenheter från andra länder visar att det kan vara svårt att få tillstånd för sådana lager, främst beroende på lokalt motstånd. Detta trots att koldioxidlagring generellt anses som mindre riskfyllt än mellanlagring av naturgas, som sker på land i stor utsträckning redan idag, och i vissa fall under stora städer.⁸⁹ Om koldioxidlagring i större skala skulle anläggas i sydvästra Skåne antas kostnaden bli 30 SEK/ton lagrad koldioxid.⁹⁰ Lagring ute till havs antas bli dyrare, men det finns goda möjligheter till att utnyttja existerande och planerad infrastruktur i norska delen av Nordsjön. Exempelvis är Sleipners fulla lagringskapacitet långt ifrån utnyttjad, och lagring planeras nu även utanför Mongstad och Kårstø i bland annat Johansen-formationen. Lagring till havs i Nordsjön uppskattas av IPCC att kosta 7,7 \$/ton lagrad koldioxid. Vi antar i våra beräkningar nedan att lagring sker i norska formationer i anslutning till Mongstad, Kårstø eller Sleipner, till en kostnad om 6 €/ton.

Sammanlagt blir våra antagna kostnader 53 € för avskiljning, 18 €/ton för fartygstransport och 6 €/ton för lagring. Sammanlagt blir detta 77 €/ton för en genomsnittlig anläggning, såsom ett pappersmassabruk som släpper ut knappt en miljon ton biogen koldioxid per år och ligger på

⁸⁷ Genomgående antas valutakurserna 1 USD = 7,5 SEK och 1 EUR = 9,5 SEK

⁸⁸ IEA GHG, 2004

⁸⁹ Tel-Tek, 2008

⁹⁰ Elforsk 04:27, 2004

Sveriges ostkust. De anläggningar som släpper ut mindre, eller har en ojämnare nyttjandegrad under året, eller ligger längre bort från lagringsplatserna, kan antas få en kostnad som är 10 – 20 €/ton högre per år. Samtidigt kan vissa anläggningar komma att få kostnader som är 20 – 40 €/ton lägre än 77 €/ton. Detta gäller främst de vars biogena utsläpp kommer från svartlutsförgasning och etanolframställning. Den stora potentialen för BECCS med källor i Sverige och lagring i Norge uppskattar vi däremot ha en typkostnad kring €77/ton koldioxid. Översatt i svenska kronor ger detta ett kostnadsspann för BECCS år 2020 på 700 – 900 kr/ton lagrad koldioxid för den svenska kapaciteten på 27,6 miljoner ton biogen koldioxid per år, med en typkostnad om 730 kronor/ton.

Fram till 2030 kan denna kostnad väntas minska med ett antal hundra kronor per ton, och eventuellt nå ned under 500 kronor per ton lagrad koldioxid, samtidigt som den procentuella andelen avskild koldioxid ur anläggningarnas utsläpp kan förväntas öka med förbättringar i tekniken, vilket tillsammans med tillväxten för biomassaindustrierna möjliggör större volymer.

7 BECCS som klimatåtgärd

27,5 miljoner ton biogen koldioxid från svenska punktkällor kan återföras till lagring i norska akvifärer till en kostnad av 700 – 900 kr/ton år 2020. Låt oss nu jämföra detta med kapaciteten och kostnaden för andra klimatåtgärder och se hur BECCS kan bli en del i de svenska klimatstrategierna.

Under de senaste åren har det utkommit en rad rapporter om kostnaderna för och möjligheterna till att nå olika svenska klimatmål. Viktiga årtal är i beräkningarna år 1990, 2012, 2020, 2030 och 2050. 1990 är det år utifrån vilket beräkningarna av procentuella minskningar brukar räknas. 2012 går Kyotoprotokollet ut och 2020 är en annat viktigt årtal, till vilket regeringar, politiska partier, företag och miljörörelsen sätter utsläppsminskningmål. År 2030 är en mellanstation till 2050, vilket brukar vara ett riktmärke för när förändringsprocesser skall vara i hamn, exempelvis nollnivå för växthusgasutsläpp eller 80 procents minskning från basåret 1990.

Vad gäller kostnader för att minska utsläpp brukar de anges i kronor (eller Euro) per ton koldioxidekvivalent (ton CO₂e). Redan idag finns denna kostnad introducerad i en rad sektorer i Sverige. Tyngre industrier och energisektorn är sedan några år tillbaka del av den europeiska handeln med utsläppsrätter, där priserna idag ligger kring 15 euro per ton. Inom transportsektorn är prisläget för utsläpp mycket högre, med en koldioxidskatt på 1050 kronor per ton och ytterligare energiskatter ovanpå det.

Vi skall nu jämföra de volymer och kostnader för BECCS i Sverige (med lagring i Norge) som vi har räknat fram, med tre rapporter på klimatområdet. Ingen av rapporterna inkluderade BECCS i sina beräkningar, men vi kommer applicera deras metoder för att kunna jämföra BECCS med de alternativ som finns för att möta de svenska klimatmålen.

7.1 Jämförelse med studie av McKinsey och Svenskt Näringsliv

Managementkonsultfirman McKinsey i samarbete med Svenskt Näringsliv utkom 2008 med en studie som sponsrades av ett flertal svenska industriföretag.⁹¹ Studien visade på ett mycket pedagogiskt och illustrativt vis kostnader och volympotentialer för olika utsläppsminskningåtgärder i jämförelse med ett referensscenario, se bild 12.

Fossil CCS ingick i beräkningarna och var den åtgärd som angavs ha enskilt störst potential. Kostnadstaket för åtgärder sattes till 500 SEK/ton CO₂e, vilket medgav att nå 5,5 miljoner ton i utsläppsminskningar till 2020 jämfört med referensscenariot. Om kostnadstaket skulle höjas till 1000 SEK/ CO₂e är det enligt studien möjligt att uppnå knappt 10 miljoner ton utsläppsminskningar fram till 2020 utöver referensscenariot. Den enskilt största åtgärden är då att applicera CCS på utsläppen inom stålindustrin. Mätt i procent från 1990 års nivåer, motsvarar minskningarna i referensscenariot på 6,8 Mton tillsammans med nämnda potential om 10 Mton, totalt 23 procent i minskade utsläpp fram till 2020. Att nå ytterligare

⁹¹ McKinsey & Company, 2008

utsläppsminskningar är enligt denna studie mycket svårt, då åtgärdskostnaderna kraftigt stiger och potentialerna minskar på ett sätt som gör att utsläppen endast kan minskas med ett fåtal miljoner ton, och detta till kostnader på många tusen kronor per ton CO₂e.

Studien analyserade även situationen för 2030, se bild 13. Till dess antog studien att kostnaderna för CCS har sjunkit ned under 500 SEK/ton CO₂e och att CCS applicerat på stål- och cementtillverkning är de enskilt största åtgärderna i Sverige.

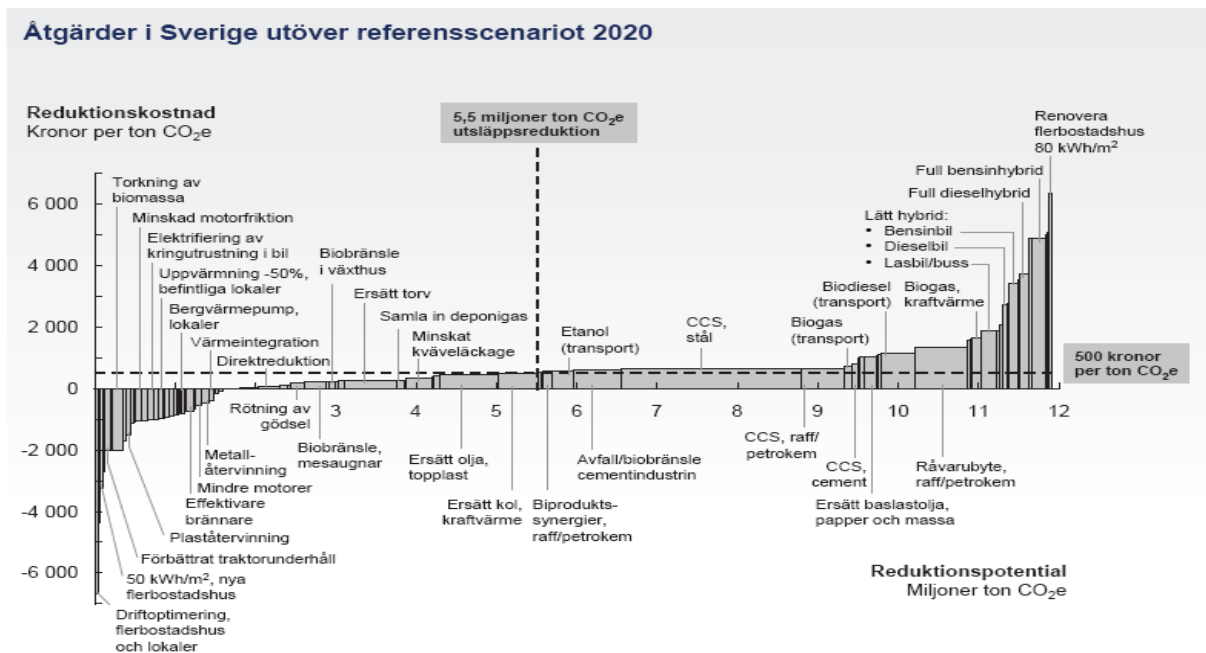


Bild 12.

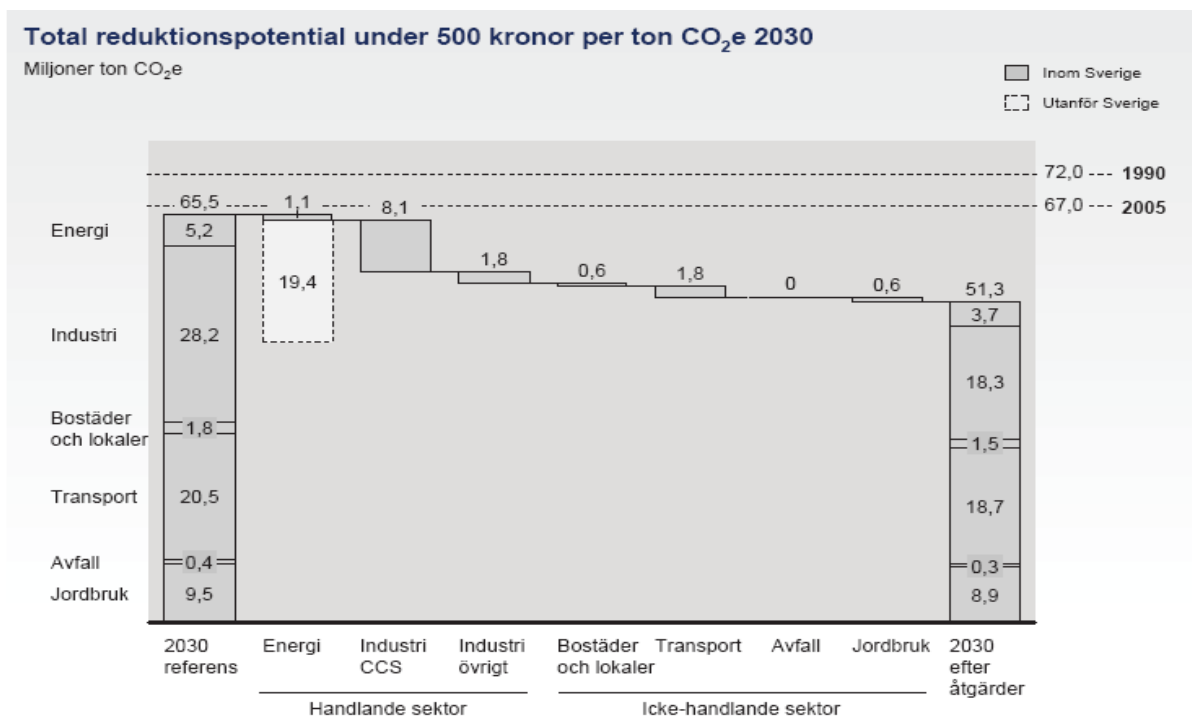


Bild 13.

7.1.1 Effekten av att inkludera BECCS i åtgärdsportföljen

I rapportens kalkyler var BECCS inte inkluderat. Med utgångspunkt i de värden som vi beräknat för norsk-svenska BECCS-system i tidigare kapitel, har vi tagit fram en modifierad modell som inkluderar BECCS. När BECCS introduceras i kalkylen förbättras möjligheterna för minskningar av Sveriges totala utsläpp kraftigt, se bild 14. Den totala åtgärdspotentialen i Sverige mer än tredubblas. Samtidigt är åtgärdskostnaden för denna stora potential under 1000 SEK/ton CO_{2e}, vilket är viktigt för den ekonomiska genomförbarheten.

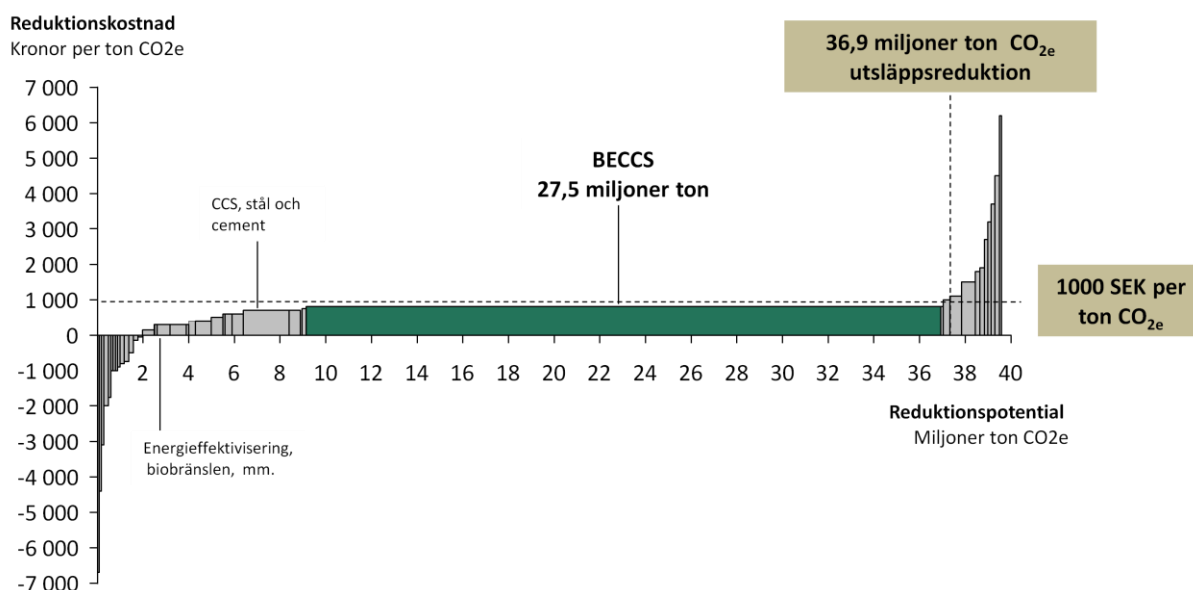


Bild 14.

Med den prognostiserade tillväxten för svensk massaindustri och energisektor fram till år 2030, ökar den årliga kapaciteten för BECCS med ytterligare 2,5 miljoner ton. Det är rimligt att anta att kostnaderna för CCS kommer att gå ned under 500 SEK/ton CO_{2e} fram till 2030, vilket även McKinsey gjort i sin analys. Den ökade volymen i kombination med lägre pris år 2030 jämfört med 2020 bidrar till att ytterligare öka betydelsen av BECCS i den svenska åtgärdsportföljen, se bild 15. Om utbyggnaden av andra och tredje generationens biodrivmedel tar fart, kan potentialen för BECCS bli ännu större år 2030. Som tidigare nämnts är både etanol och gasifiering två tekniskt mycket lämpliga utgångspunkter för att bygga BECCS-system. En sådan expansion är inte inkluderad i vår analys.

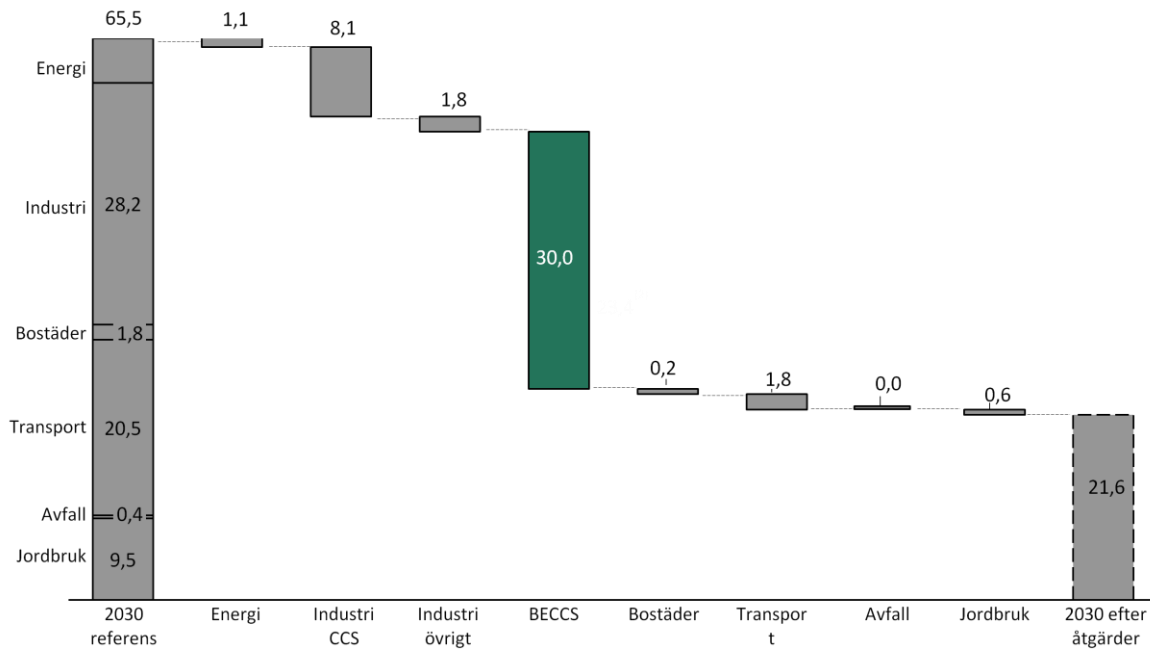


Bild 15. Åtgärder under 500 SEK/ton CO₂e i Sverige år 2030

Åtgärdsutrymmet inom den fossila sektorn krymper allt eftersom de enkla och lättillgängliga åtgärderna utförts, samtidigt som kostnaderna för åtgärderna stiger. För BECCS gäller det omvända förhållandet, det vill säga att de möjliga volymerna växer och kostnaderna för tekniken minskar. Därför ökar betydelsen av BECCS med tiden. Antag att vi lyckas minska de fossila utsläppen i Sverige med 65 procent fram till 2030 jämfört med 1990 års nivåer. Vi når då en årlig utsläppsnivå på 18,4 miljoner ton CO₂e. Eftersom BECCS genererar en sänka av koldioxid (se kapitel 2), kan vi addera hela potentialen om 30,0 miljoner ton till den redan uppnådda fossila utsläppsminskningen, se bild 16. Vi når då en situation där vi har negativa utsläpp av växthusgaser till atmosfären, även utan att inräkna andra sänkor från exempelvis jord- och skogsbruk. Nettoeffekten resulterar i att Sverige kan bli världens första land som tar bort koldioxid från atmosfären. Därmed bereds vi en möjlighet till att nå ambitiösare klimatmål såsom 350 och 400 ppm.

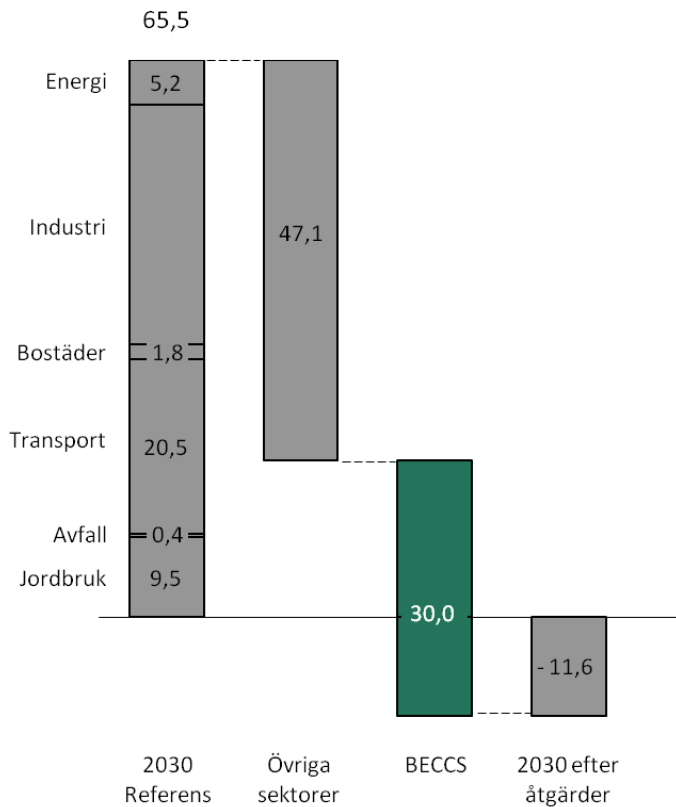


Bild 16.

7.1.2 Möjligheter till att nå de politiska målen

Det är intressant att jämföra referensscenariot och reduktionspotentialen som anges i studien med de politiska mål som satts upp för Sverige av de båda politiska blocken (se kapitel 2). Om vi lägger in Alliansens respektive de Rödgrönas klimatmål för 2020 och justerar för en rad faktorer,⁹² får vi den nedslående bilden 17.⁹³ Både Alliansens och de Rödgrönas klimatmål är i princip omöjliga att uppnå enligt McKinseys och Svenskt Näringslivs analys.

⁹² Utsläppsminskningar i det av McKinsey använda referensscenariot, mål satta på icke-handlande respektive handlande sektor, inkluderande minskningar i Sverige men inte de utomlands, samt de Rödgrönas nivå utan uppräknings för att kompensera för lägre målsättning i EU.

⁹³ Det bör noteras att scenarierna såväl som klimatmålen varierar i viss mån vad gäller hur stora minskningar som skall ske i de så kallade handlande och icke-handlande sektorerna. I bilden 14 är dock de övergripande målen översatta till alla sektorer för att möjliggöra jämförelse.

7.2 Är BECCS en klimatvinnare?

I tankesmedjan FORES rapport "Vinnare och Förlorare" från 2010,⁹⁴ analyseras olika alternativ och kostnader för svenska utsläppsminskningar i relation till framtida pris för koldioxidutsläpp i olika sektorer. Det konstateras att priset för att släppa ut koldioxid idag varierar stort mellan olika sektorer och styrs av en rad olika styrmedel, exempelvis utsläppsrättshandel, koldioxidskatt och energiskatt. Kostnaderna och prisnivåerna inom den icke-handlande sektorn (exempelvis hushåll och transporter) är avsevärt högre än inom den handlande (tung industri och energiproduktion). Inom transportsektorn (exempelvis bensin för bilar) är kostnaderna för utsläpp som störst. I den handlande sektorn har priset på utsläppsrätter inom det europeiska handelssystemet EU-ETS varit cirka 15 Euro/ton under första halvan av 2010, motsvarande cirka 140 SEK/ton. Den svenska koldioxidskatten är idag motsvarande 1050 SEK/ton.⁹⁵ Ovanpå denna skatt kommer energiskatten, som är olika stor beroende på sektor, men är som störst inom transportsektorn.

Enligt de prognoser som FORES räknat fram kommer den totala kostnaden för koldioxidutsläpp öka kraftigt fram till 2020. Dels kommer priset på utsläppsrätter öka till nivåer mellan 40 och 90 Euro/ton. Detta motsvarar en utsläppskostnad på cirka 380 – 850 SEK/ton för den handlande sektorn med energiproduktion och tung industri.

Beroende på en eventuell ökning av koldioxidskatten med 60 öre per kg, kommer priset på utsläpp i den icke-handlande sektorn att hamna på 630 – 1650 SEK/ton CO₂e. I transportsektorn kommer utsläppspriset på grund av ökande energiskatt bli ännu högre, mellan 1630 och 2650 SEK/ton CO₂e.

För att mäta potentialen i olika teknologier jämfördes priset på olika åtgärder i relation till utsläppspriset i respektive sektor. Den potentiella besparingen av åtgärden multiplicerades med den potentiella volymen (benämnd reduktionspotential) för att se hur stor den så kallade vinstpotentialen var för åtgärden. Därefter adderades alla åtgärder i respektive sektor och jämfördes, se tabell 8.

Reduktions- och vinstpotential i olika sektorer år 2020		
	Reduktionspotential, miljoner ton CO ₂	Vinstpotential, miljarder SEK
Energi	6,9	2,8 – 6,2
Industri	6,8	3,2 – 7,1
Bostäder & lokaler	6,1	3,5 – 8,8
Transport	1,6	3,6 – 5,7

Tabell 8.

⁹⁴ von Bahr et al., Fores 2010

⁹⁵ Regeringens proposition 2009/10:41, sid 132

Tyvärr ingick inte BECCS i FORES översikt, men vi kan använda oss av deras metod för att se hur stor den eventuella vinstpotentialen blir för BECCS.

Med ett konservativt genomsnittligt kostnadsestimat om 800 SEK per ton för BECCS (högre än mediankostnaden på 730 SEK/ton), blir vinstpotentialen för BECCS i relation till priserna för utsläpp i den handlande sektorn, den icke-handlande sektorn, respektive i transportsektorn enligt tabell 9.

	Reduktionspotential, miljoner ton CO ₂	Vinstpotential, miljarder SEK
Handlande (EU-ETS)	27,5	0 – 2,8
Icke-handlande (ej transporter)	27,5	0 – 23,4
Transport	27,5	22,8 – 50,9

Tabell 9.

Det är intressant att notera att analysen kring vinstpotential är mycket känslig för koldioxidpriset, i synnerhet om vi ser på möjligheterna till BECCS i Sverige som en enda åtgärd med enhetlig kostnad. Analysen är även känslig för våra kostnadsantaganden kring BECCS. I FORES-studien antas en åtgärds-kostnad för svenska CCS-system i stål- och cementindustrin på 650-750 kronor/ton. Fossil CCS har i många avseenden liknande kostnader som CCS applicerat på massabruk och bioenergianläggningar. Den kostnadsnivå som FORES antagit är således lägre än det mer konservativa estimat på 800 SEK/ton som vi använt i denna studie.

Som vi kommer att se i nästa kapitel, finns det potential för att lagra cirka 140 000 ton koldioxid från den befintliga etanolfabriken i Norrköping till en kostnad under 500 kronor per ton, en kostnad som kan gå ned till under 400 kronor per ton om samordningsfördelar kan nås med andra projekt. Beroende på om produktionen av etanol och anläggningar för svartlutsförgasning inte byggs ut eller expanderar femfalt till 2020, kommer 400 000 – 2 000 000⁹⁶ ton koldioxid kunna lagras till en kostnad kring 400 kronor/ ton årligen. Vinstpotentialen för systemen, som kan bli de första och mest lönsamma svenska BECCS-anläggningarna per lagrat ton koldioxid, återfinns i tabell 10.

⁹⁶ Siffran 400 000 ton bygger på den sammanlagda potentialen för lagring av koldioxid från etanolfabriken i Norrköping och den planerade anläggningen för svartlutsförgasning i Domsjö. Den högre siffran är ett exempel på potential om kapaciteten för svenska anläggningar byggs ut med ytterligare fyra etanolfabriker och fyra svartlutsförgasningsanläggningar fram till 2020.

	Reduktionspotential, miljoner ton CO ₂	Vinstpotential, miljarder SEK
Handlande (EU-ETS)	0,4 – 2	0 – 1,0
Ikke-handlande (ej transporter)	0,4 – 2	0,09 – 2,5
Transport	0,4 – 2	0,49 – 4,5

Tabell 10.

Det är intressant att notera att kostnaden för BECCS i relation till EU-ETS inte är fördelaktig i perioden fram till 2020. Det finns en rad åtgärder inom EU-ETS som kan genomföras till en betydligt lägre kostnad än svensk BECCS. Inte ens de billigaste BECCS-anläggningarna med biogen koldioxid från etanol och svartlutsförgasning kan räknas hem i ett riskavvägt industriellt sammanhang med hjälp av EU-ETS, om inte priset stabiliseras på en nivå över 50 €/ton. Däremot så är BECCS mycket effektivt, både vad gäller kostnader och den enorma kapaciteten, i jämförelse med åtgärder och prisnivåer för koldioxidutsläpp inom den icke-handlande sektorn och i synnerhet jämfört med transportsektorn. Kostnaden för att plocka bort koldioxid ur atmosfären är omkring 80 öre per kilo koldioxid år 2020, med sjunkande kostnader till under 50 öre per kilo fram till 2030. Detta är betydligt lägre kostnader än nuvarande och kommande kostnader inom den icke-handlande sektorn, och så lite som 30 till 50 procent av kostnaderna inom transportsektorn.

Vi har tidigare konstaterat att BECCS-system agerar som en permanent koldioxidsänka och därmed kan användas för att möta utsläpp från alla typer av utsläpp, oavsett var de uppstår i ekonomin. Därför vore det mest effektivt att matcha potentialen för BECCS mot de utsläpp som sker i den icke-handlande sektorn och i synnerhet transportsektorn. De politiska målsättningar och den politiska styrning som Sverige utövar på klimatarbetet sker framförallt inom den icke-handlande sektorn (se kapitel 1). Det är här som vi kan påverka utsläppen mest på nationell nivå. Produktion av negativa utsläpp, eller med andra ord rensning av atmosfären från koldioxid, skulle vara som mest effektiv ur ekonomisk synvinkel och ur klimatmålsperspektiv om den finansierades genom styrmedel knutna till den inhemska, icke-handlande sektorn.

Delar av koldioxidskatten eller liknande inhemskt styrmedel skulle kunna användas för att finansiera BECCS-anläggningar i Sverige. Med detta skulle en åtråvärd situation kunna uppnås: Stora nettoutsläppsminskningar med möjlighet att snabbt nå nollutsläpp, marginalkostnader för åtgärder under de nuvarande nivåerna, sysselsättning i Sverige (och även i Norge i samband med lagringen) i en ny grön atmosfärsrenande bransch, samt möjligheten till att bygga upp en industribas och kompetens som kan exporteras till andra länder i den snabbt växande globala climatekonomin.

7.3 Hur vi med BECCS kan nå en svensk nollvision redan 2030

Inom ramen för Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademins (IVA) program Vägval Energi utgavs 2008 rapporten "En svensk nollvision för växthusgasutsläpp".⁹⁷ I rapporten skisseras en väg fram till nollutsläpp på nettobasis för Sverige år 2043, med delmål år 2030. I rapporten lyfts skog- och markanvändning fram som en möjlig sänka för att uppväga kvarvarande fossila utsläpp i det scenario som konstruerades. Sänkor i skog och mark är idag inte inkluderade i Sveriges nationella utsläppsåtaganden, men kan komma att bli det i efterföljare till Kyotoprotokollet. I delmålet 2030 skall en 62 procentig sänkning av de fossila utsläppen ske, samtidigt som utsläppen från jordbrukssektorn skall minska med 17 procent, se tabell 11.

Tabell 3. Delmål 2030 – potentiell reduktion av utsläpp av växthusgaser till år 2030 fördelade på samhällets sektorer

	Fossila utsläpp (Mton CO ₂ e)		Biologiska system (Mton CO ₂ e)	
	Nuläge	Delmål 2030	Nuläge	Delmål
Industri värme & processer	25,0	15,0		
Vätransporter	18,8	2,0		
varav				
– personbilar	10,3	0,0		
– lastbil och buss	8,5	2,0		
Fjärrvärmeproduktion	4,4	2,2		
Bostäder/service	3,4	0,0		
Elproduktion	1,5	0,5		
Flyg, inrikes	0,7	0,4		
Sjöfart, inrikes	0,7	0,4		
Militära	0,3	0,2		
Avfall	2,2	1,1		
Jordbruk			8,6	7,1
– markanvändning (lustgas)			4,8	4,1
– matsmältning (metan)			2,8	2,5
– jordbruksmaskiner (koldioxid)	1,4	0,0		
– gödselhantering (lustgas, metan)			1,0	0,5
Totalt växthusgasutsläpp	58,4	21,8	8,6	7,1

Notera: Jordbrukets utsläpp räknas in under biologiska system (förutom fossila utsläpp från maskiner). Användning av biobränslen kommer att öka inom alla sektorer men har inte preciserats i ovanstående tabell under biologiska system.

Tabell 11.

Inte heller i denna analys har möjligheterna till BECCS-system inkluderats. När vi adderar den sänka som BECCS-systemen kan generera år 2030, når vi redan vid detta delmål netto *negativa* utsläpp om 1,0 miljoner ton CO₂e/år. Det innebär att nollvisionen uppnås redan vid delmålsåret 2030, se tabell 12. Om de potentiella sänkorna från skogsbruket räknas in, blir nettot än mer till klimatets fördel.

⁹⁷ IVA, 2008

	Fossila utsläpp	(Mton CO ₂ e)	Biologiska system	(Mton CO ₂ e)
	Nuläge	Delmål 2030	Nuläge	Delmål 2030
Industri värme & processer	25,0	15,0		- 22,7
Vägrtransporter	18,8	2,0		
varav				
- Personbilar	10,3	0,0		
- Lastbil och buss	8,5	2,0		
Fjärrvärmeproduktion	5,9	2,7		-7,2
varav				
- Fjärrvärme	4,4	2,2		
- Elproduktion	1,5	0,5		
Bostäder/service	3,4	0,0		
Flyg, inrikes	0,7	0,4		
Sjöfart, inrikes	0,7	0,4		
Militära	1,4	0,0		
Avfall	2,2	1,1		
Jordbruk			8,6	7,1
- markanvändning (lustgas)			4,8	4,1
- matsmältning (metan)			2,8	2,5
- jordbruksmaskiner (koldioxid)	1,4	0,0		
- gödeselhantering (lustgas, metan)			1,0	0,5
Totalt växthusgasutsläpp	58,4	21,8	8,6	-22,8

Tabell 12.

8 Pilot- och demonstrationsprojekt för BECCS

Investeringar i koldioxidlagring är kapitalintensiva och storskaliga. Möjligheterna till storskalig drift är fördelaktig när det gäller teknikens potential som klimatåtgärd, men skapar även en hög tröskel för att introducera tekniken. På EU-nivå har flertalet satsningar på miljardtals Euro utlysts för att få till stånd CCS för kolkraftverk. Däremot finns det inga större projekt eller finansieringsmöjligheter för att applicera tekniken på biomassa, vare sig i Sverige eller i EU. Nedan ges ett förslag till hur en småskalig BECCS-pilot skulle kunna se ut för svensk del, samt även två förslag till kostnadseffektiva demonstrationsanläggningar för CCS, där svensk koldioxid lagras i norska lagringsfält i Nordsjön. De tre exempelprojekten för pilot- och demonstrationsanläggningar representerar tre olika nischer bland biogena utsläppskällor, ur vilka koldioxiden släpps ut i relativt ren form. Den höga halten koldioxid i utgasströmmen innebär att ingen dyr avskiljningsteknologi behöver användas. Eftersom avskiljningen är det mest energikrävande och därför det dyraste steget i CCS-kedjan, kan demonstrationsprojekten få en lägre kostnad än de storskaliga system som tidigare nämnts, trots att transport och lagring blir väsentligt dyrare när endast en källa med ett fåtal hundra tusentals ton hanteras årligen.

I det föreslagna pilotprojektet lagras relativt små mängder koldioxid från biogasuppgradering i en forskningsstudie i de prospektiva lagren i sydvästra Skåne, med en liten mängd om 500 – 5000 ton per år. För att demonstrera genomförbarheten av BECCS-system i större skala krävs större projekt som hanterar mer än 100 000 ton CO₂ per år. För demonstrationsanläggningarna kan det vara lämpligt att använda de beprövade norska koldioxidlagringsfälten i Nordsjön, dels för att minska den tekniska osäkerheten, dels för att förkorta ledtiderna för tillståndsgivning och installation. På exempelvis Sleipnerplattformen finns en outnyttjad kapacitet på flera miljoner ton koldioxid per år genom befintligt borrhål. Faciliteter för avlastning, värmning och komprimering ute till havs vid plattformen behöver dock byggas, vilket är en investering i storleksordningen 200 miljoner SEK.⁹⁸ För de relativt små mängder koldioxid som kommer att lagras i demonstrationsprojekten blir detta en avsevärd uppstartskostnad. När den norska lagrings- och transportinfrastrukturen för CCS expanderar under de närmaste åren, finns det goda möjligheter till att undvika nämnda kostnader genom koordination med inhemska norska satsningar. Exempelvis finns det planer på att inrätta båtterminaler och/eller pipelines för transport av koldioxid från land till lagring ute i Nordsjön, vilket skulle underlätta även för koldioxid som kommer utifrån.

Två svenska källor framstår som särdeles intressanta för en fullskalig BECCS-demonstration. Den ena är Agroetanols etanolfabrik i Norrköping, den andra är Chemrecs planerade svartlutsförgasningsanläggning i Domsjö fabriker vid Örnsköldsvik. Vid båda dessa anläggningar släpps det ut relativt stora mängder biogen CO₂ i rena strömmar. Med rena strömmar menas att koldioxiden redan är koncentrerad till mer än 90 procent, och inte är uppblandad med luft. Det innebär att de installationer och den energi som går åt till avskiljning av koldioxiden ur rökgaser inte behövs, vilket sparar in mycket pengar. I en vanlig CCS-anläggning står avskiljningsdelen för mer än hälften av de totala kostnaderna för hela CCS-processen.

⁹⁸ Uppgift från Tore A. Torp, CCS-teknisk expert på Statoil

8.1 BECCS-pilot i sydvästra Skåne

Målet med en BECCS-pilot är att visa på praktisk genomförbarhet i liten skala. För att kunna genomföra detta med så små kostnader som möjligt, kan en lösning som inte är gångbar i stor skala användas, om denna lösning ger lägre investeringskostnader för pilotprojektet. På grund av kostnadsbilden för transport i en småskalig lösning, kan det vara svårt att kombinera källor i Sverige med lagring i Norge. Därför bör fokus ligga på en lokal lösning där koldioxiden hämtas från källor nära möjliga lagringsplatser.

En möjlig lösning vore att transportera biogen koldioxid från en näraliggande källa till de planerade norska CCS-klustren i Melkøya eller Mongstad för injicering i planerad lagringsinfrastruktur. Det finns enligt de efterforskningar som vi genomfört i denna studie dock inga lämpliga källor nära dessa anläggningar varifrån biogen koldioxid kan hämtas för ett pilotprojekt.

En alternativ lösning kan vara att hämta koldioxid från en källa i Skåne och lagra i ett nyborrat småskaligt experimentlager i närheten. De sydvästra delarna av Skåne är de enda delarna av Sverige där berggrunden har rätt sammansättning för att möjliggöra koldioxidlagring. Provborrhningar har visat på goda egenskaper i de sedimentlager som ligger under den nödvändiga nivån av minst 800 meters djup. Bland annat har ett projekt där möjligheterna för att genomföra storskalig bergvärmeproduktion gett data och underlag, men det sker idag ingen lagring av koldioxid i området, till skillnad från i de norska fälten till havs. Ett mindre pilotprojekt kan bereda ett tillfälle för att noggrannare studera lagringskapaciteten och även visa på de goda lagringsmöjligheterna rent praktiskt.

För att exemplifiera en möjlig svensk BECCS-pilot, har vi kartlagt möjliga biogena koldioxidkällor i Skåne med lämpliga lagringsplatser för en småskalig pilot. Skåne är pilotlän för biogassatsningar och har ett flertal anläggningar i drift. Vid sju rötningsanläggningar leds den råa biogasen in i en så kallad uppgraderingsanläggning. I uppgraderingen renas rågasen genom att biometanet skiljs från koldioxiden som uppkommit i rötningsprocessen. Efter uppgraderingen kan biometanet tankas i biogasfordon, eller matas in i naturgasnätet. Den avskiljda koldioxiden kommer ut i en relativt ren ström, som i dagsläget släpps ut i luften. Relativt massabruk och etanolfabriker rör det sig om små mängder om ett hundratal till ett fåtal tusen ton koldioxid per år. Denna koldioxid lämpar sig däremot väl till ett mindre pilotprojekt och kan på grund av sin renhet lätt fångas in, komprimeras och kylas ned så att den blir flytande och mer hanterbar. Den tankas därefter på lastbil som kör till en näraliggande lagringsbrunn, varefter den komprimeras ytterligare och pumpas ned i underjorden, se bild 19.

Kapaciteten för ett pilotsystem baserat på en eller flera biogasanläggningar är i storleksordningen 500 – 5000 ton per år. Kostnaden för systemet varierar kraftigt beroende på tillgång till och kostnad för borrhutrustning, ledtider för lagringstillstånd och en rad andra faktorer. En samlad bedömning ger att totalkostnaden för BECCS-piloten är i storleksordningen 50 – 150 miljoner kronor.

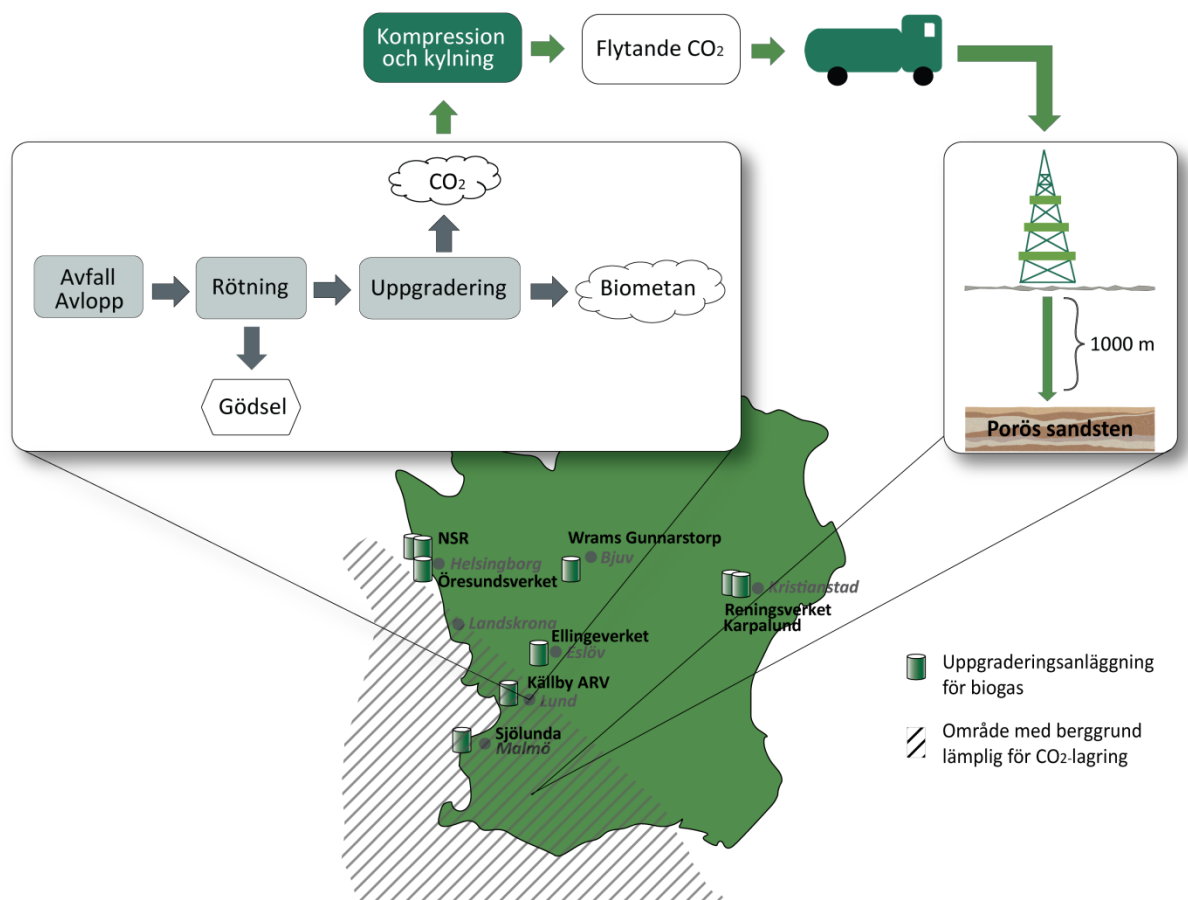


Bild 19.

8.2 Demonstration av BECCS vid etanolfabriken i Norrköping

På Händelö utanför Norrköping produceras sedan 2001 etanol i Sveriges enda stora etanolfabrik. I anläggningen framställs årligen 210 miljoner liter etanol ur spannmål, och anläggningen ökar för tillfället sin kapacitet.⁹⁹ I jäsningsprocessen uppstår inte bara etanol, utan även 175 000 ton proteinfoder och cirka 140 000 ton koldioxid. Det finns planer på att öka produktionsvolymerna till motsvarande 170 000 ton per år inom kort.¹⁰⁰

Koldioxiden som kommer ur jäsningsprocessen består till cirka 99 procent av ren koldioxid, vilket innebär att den inte behöver avskiljas före kompression och kylning. Detta medför i sin tur att den största kostnaden för BECCS försvinner och att kostnaden för en demonstrationsanläggning kan hållas nere. Ett första projekt kommer att ha avsevärt högre kostnader än nästkommande projekt. I de efterföljande projekten kan inlärningseffekter, skalfördelar och samordningseffekter minska kostnaderna väsentligt. Detta medför att kostnaden för en demonstrationsanläggning som under en längre tid lagat koldioxid från

⁹⁹ Uppgifter hämtade från www.agroetanol.se

¹⁰⁰ Uppgift från platschefen i Norrköping Peter Nimrodsson

etanolproduktionen i Norrköping kan förväntas bli 500-1 500 miljoner kronor, beroende på en rad osäkra faktorer. I ett större systemsammanhang förväntas kostnaderna bli lägre än 400 kronor per ton, om samordningsfördelar kan uppnås.



Bild 20. Agroetanols anläggning i Norrköping. Foto: Lantmännen Agroetanol AB.

Fabriken ligger väl placerad i anslutning till hamnområdet, där koldioxiden kan lastas på båt i nedkyld och komprimerad flytande form, för transport till lagringen i Nordsjön, se bild 21.

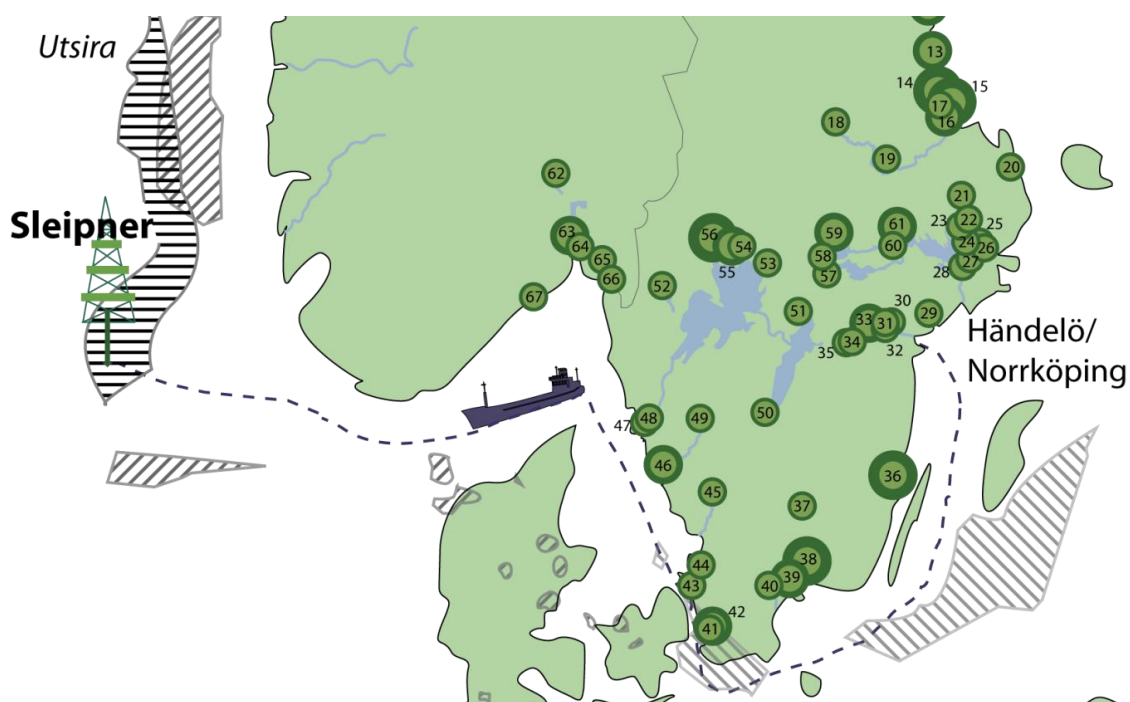


Bild 21.

8.3 Demonstration av BECCS vid svartlutsförgasning i Domsjö

Sedan lång tid tillbaka bedrivs forskning och pilotanläggningar med teknik för förgasning av den svartlut som bildas i pappersmassaprocessen. En av de ledande aktörerna inom området är Chemrec, som planerar att uppföra en större anläggning i Domsjö fabriker under de närmaste åren. Svartlutsförgasning är ett alternativ till dagens sodapannor i massabruk och ger möjligheten till att producera drivmedlet DME (Dimetyleter) från massabrukets restprodukter. I förgasningsprocessen uppstår även en ren ström av koldioxid, som i Domsjö kommer att uppgå till cirka 260 000 ton per år.¹⁰¹



Bild 22. Foto Chemrec AB.

Omständigheterna är snarlika de som gäller vid etanolfabriken i Norrköping, med närhet till utskeppningshamn, om än med något längre väg ut till Nordsjön. Som vi dock tidigare konstaterat, är inte avståndet avgörande för kostnaden vid båttransporter av koldioxid, varför den längre sträckan inte påverkar den totala kostnadsbilden i större utsträckning.

¹⁰¹ Uppgifter från Ingvar Landälv, vice vd för teknologi på Chemrec

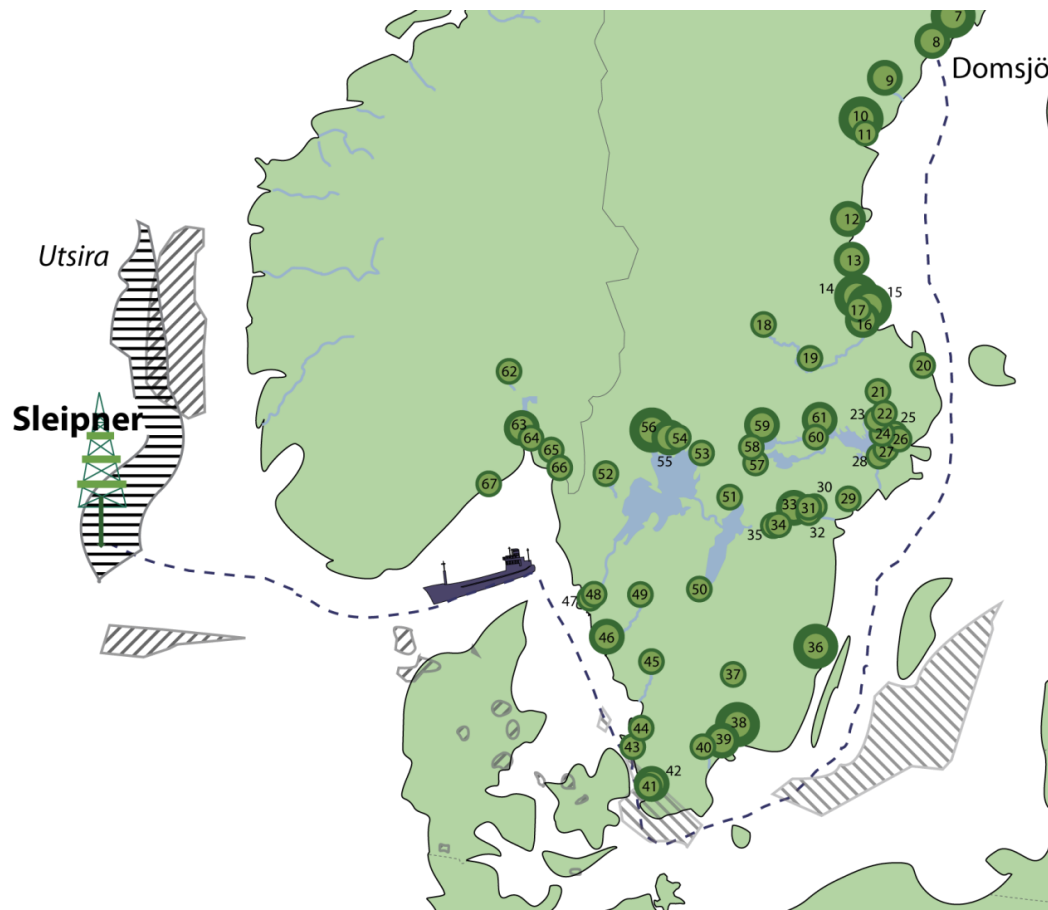


Bild 23.

9 Slutsatser

Potentialen för BECCS i Sverige är mycket stor, både sett till den stora mängd koldioxid som kan tas bort från atmosfären och ur ett samhällsekonomiskt perspektiv. Med fullt utnyttjad potential om 27,5 miljoner ton år 2020, skapar BECCS en större sänka än vad hela den svenska transportsektorn släpper ut idag.

BECCS i kombination med andra åtgärder kan få Sverige att nå ner till noll i nettoutsläpp redan år 2030, även utan att räkna in sänkor inom jord- och skogsbruk. Det är möjligt på grund av att BECCS skapar en sänka, snarare än minskar ett utsläpp. Därför kan BECCS användas för att åtgärda utsläpp varhelst de uppstår, i både tid och rum. På ytterligare längre sikt kan Sverige skapa större sänkor än utsläpp av koldioxid, och därmed bidra till att vända den globala klimatutvecklingen genom att minska mängden koldioxid i atmosfären.

Kostnaden för BECCS-system är lägre än dagens nivå på den svenska koldioxidskatten, och långt under de nivåer som behövs för att skapa ytterligare utsläppsminskningar i den icke-handlande sektorn. Över tid kommer kostnaderna för BECCS att sjunka ytterligare med hjälp av tekniska förbättringar, samtidigt som volymen ökar i takt med ökad användning av biomassa för produktion av energi och pappersmassa.

Prisnivåerna som kan förväntas i det europeiska handelssystemet för utsläppsrätter (EU-ETS) kommer inte att kunna bära kostnaderna för BECCS-system i Sverige. I synnerhet inte inom de närmaste tio till tjugo åren. De svenska förhållandena skiljer sig från de flesta andra EU-länder, då vi har en stor skogsindustri och använder mycket biomassa för kraftvärme. Samtidigt har vi – på grund av en långsiktig infasning av koldioxid- och energiskatter – åtgärds-kostnader som är högre än andra länder i Europa och världen. Om sänkorna som BECCS kan skapa matchas mot de inhemska klimatmålen (snarare än mot EU-ETS) kan stora samhällsvinster uppstå. Besparingarna för samhället är i storleksordningen miljarder till tiotals miljarder kronor per år.

Tekniken är känd och redan utprövad i Nordsjön, där lagring har pågått framgångsrikt i femton år. Till de prisnivåer som denna rapport redovisat finns avskiljning och transportteknologierna färdiga för att implementeras i stor skala. Lagring i Sverige är dock oprövat och det krävs mer studier för att kunna utröna dess möjligheter.

Det finns idag inga satsningar för att realisera BECCS i Sverige. För att kunna få med BECCS i den svenska åtgärdsportföljen krävs fokuserade insatser i Sverige så snart som möjligt. Pilotanläggningar, demonstrationsanläggningar och nya styrmedel som stimulerar användning av BECCS behövs för att realisera potentialen, spara pengar och rädda klimatet.

10 Referenser

- Azar, C., Lindgren, K., Larson, E.D. and Möllersten, K: (2006), "Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass – Costs and potential role in stabilising the atmosphere". Climatic Change, Vol 74, 47-79.
- von Bahr, J., Andersson, M., Rutqvist, J., Taxén, O., (2010), "Vinnare och Förlorare". Fores, Studie 2010:1.
- Barnola, J.-M., Raynaud, D., Lorius, C. and Barkov, N.I.: (2003), "Historical CO₂ record from the Vostok ice core". In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge CRU (2007). CRUTEM3v dataset. Climate Research Unit, University of East Anglia.
- Bonijoly, D., Fabbri A., Chapuis, F., Laude, A., Ricci, O., Bauer, H., Grataloup, S., och Galiègue X: (2009), "Technical and economic feasibility of the capture and geological storage of CO₂ from a bio-fuel distillery: CPER Artenay project". Energy Procedia, Volume 1, Issue 1, 2009, 3927-3934.
- Simon Eggelston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara and Kiyoto Tanabe: (2006), "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories".
- Elforsk rapport 04:27, Claes Ekström, Annika Anderson, Åsa Kling, Christian Bernstone, Anders Carlsson, Stefan Liljemark, Caroline Wall, Thomas Erstedt, Maria Lindroth, Per Tengborg och Mikael Erlström: (2004), "CO₂-lagring i Sverige".
- Elforsk rapport 05:27, Jenny Gode och Gunnar Hovsenius: (2005), "Avskiljning och lagring av koldioxid i ett nordiskt systemperspektiv – en studie baserad på arbete inom IEA: s FoU-program kring växthusgaser".
- Elforsk rapport 08:58, Gunnar Hovsenius: (2008), "Avskiljning och lagring av CO₂ – Kunskap av strategiskt värde för den svenska energisektorn".
- Energimyndigheten: (2009), "Långsiktsprogno 2008, ER 2009:14".
- Enholm Zantioti, L., Amoretti, O., Jasansky, V. and Rosberg, J.: (2009), "Opportunities and Societal Costs of Introducing the BECCS Technology in Sweden", CEMS at Stockholm School of Economics.
- Europaparlamentets och rådets direktiv 2009/31/EG av den 23 april 2009 om geologisk lagring av koldioxid och ändring av rådets direktiv 85/337/EEG, Europaparlamentets och rådets direktiv 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG och 2008/1/EG samt förordning (EG) nr 1013/2006

- Fisher, B.S., N. Nakicenovic, K. Alfsen, J. Corfee Morlot, F. de la Chesnaye, J.-Ch. Hourcade, K. Jiang, M. Kainuma, E. La Rovere, A. Matysek, A. Rana, K. Riahi, R. Richels, S. Rose, D. van Vuuren, R. Warren: (2007), "Issues related to mitigation in the long term context", In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)].
- Grönkvist, S., Bryngelsson, M. and Westermarck, M.: (2006a), "Oxygen efficiency with regard to carbon capture". Energy, Vol. 31 (15), 3220-3226.
- Grönkvist, Stefan, Möllersten, Kenneth and Pingoud, Kim: (2006b), "Equal Opportunity for Biomass in Greenhouse Gas Accounting of CO₂ Capture and Storage: A Step Towards More Cost-Effective Climate Change Mitigation Regimes", Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11 (5-6):1083-1096.
- Grönkvist, Stefan, Grundfelt, Ellenor och Sjögren, Helena: (2008), "CO₂-avskiljning i Sverige", Naturvårdsverket and Ångpanneföreningens Forskningsstiftelse.
- Hare, B., Meinshausen, M.: (2006), "How much warming are we committed to and how much can be avoided?", Climatic Change 75, 111-149.
- Hendriks, C., Graus, W., van Bergen, F.: (2004), "Global carbon dioxide storage potential and costs", Rapport från Ecofys och TNO-NITG.
- Herzog H.J., Drake E.M.: (1996), "Carbon dioxide recovery and disposal from large energy systems", Annual Review of Energy and the Environment, 21: 145-166.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme: (2004), "Ship transport of CO₂", Report Number PH4/30.
- Keith DW, Ha-Duong M, and Stolaroff JK: (2005) "Climate strategy with CO₂ capture from the air", Climatic Change 74(1-3):17-45.
- Klimaförliket 17.01.08,
http://www.regjeringen.no/Upload/MD/Vedlegg/Klima/avtale_klimameldingen.pdf.
- Klima- og forurensningsdirektoratet: "Klimakvoter for 2008-2012",
<http://www.klif.no/Tema/Klima-og-ozon/CO2-kvoter/Klimakvoter-for-2008/>.
- Klima- og forurensningsdirektoratet: "Norske utslipp, Karbondioksid biomasse",
<http://www.norskeutslipp.no/Templates/NorskeUtslipp/Pages/component.aspx?id=179&epslanguage=no&ComponentType=utslipp&ComponentPageID=179>.
- Klima- og forurensningsdirektoratet: "Norske utslipp, Karbondioksid fossilt",
<http://www.norskeutslipp.no/Templates/NorskeUtslipp/Pages/component.aspx?id=180&epslanguage=no&ComponentType=utslipp&ComponentPageID=180>.

- Kraxner, Florian, Nilsson, Sten and Obersteiner, Michael: (2003), "Negative emissions from BioEnergy use, carbon capture and sequestration (BECS)—the case of biomass production by sustainable forest management from semi-natural temperate forests", *Biomass and Bioenergy* 24 (2003) 285-296.
- Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademin IVA: (2008), "En svensk nollvision för växthusgasutsläpp", rapport inom projektet Vägval energi.
- McKinsey & Company, Per-Anders Enkvist, Thomas Koch, Astrid Lilliestråle, Adam Lindberg, Tomas Naucélér, Gerda Nilsson och Jerker Rosander: (2008) , "Möjligheter och kostnader för att reducera växthusgasutsläpp i Sverige".
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Meyer. L. (Eds.): (2005), "IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage". Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.
- Motion 2008/09: MJ17 med anledning av prop. 2008/09:162 En sammanhållen klimat- och energipolitik
- Möllersten, K., Yan, J. and Westermarck, M.: (2003), "Potential and cost-effectiveness of CO₂ reductions through energy measures in Swedish pulp and paper mills", *Energy* 28(7), 691–710.
- Naturvårdsverket: (2010), "National Inventory Report 2010, Sweden".
- Naturvårdsverket: "Utsläpp av växthusgaser i Sverige 2008",
<http://www.naturvardsverket.se/sv/Klimat-i-forandring/Utslappsstatistik-och-klimatdata/Utslappsstatistik/Utslapp-av-vaxthusgaser-i-Sverige/>.
- Naturvårdsverket: "Utsläpp och tilldelning av utsläppsrätter",
<http://www.naturvardsverket.se/sv/Lagar-och-andra-styrmedel/Ekonomiska-styrmedel/Handel-med-utslappsraatter/Resultat-och-uppfoljning/Utslapp-och-tilldelning-av-utslappsraatter/>.
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration National: "Trends in Atmospheric Carbon Dioxide", http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo_growth.
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration: State of the Climate, Global Analysis, January 2010,
<http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/?report=global&year=2010&month=1&submitted=Get+Report>.
- Obersteiner, M., Azar, C., Kauppi, P., Möllersten, K., Moreira, J., Nilsson, S., Read, P., Riahi, K., Schlamadinger, B., Yamagata, Y., Yan, J. and van Ypersele, J.P.: (2001), "Managing Climate Risk", *Science* 294 (5543), 786–787.

- Parfomak, P. and Folger, P.: (2007), "Carbon Dioxide (CO₂) Pipelines for Carbon Sequestration: Emerging Policy Issues", <http://ncseonline.org/nle/crsreports/07may/rl33971.pdf>.
- Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner: (2003), "Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry".
- Read, Peter and Lermitt, Jonathan: (2005), "Bio-Energy with Carbon Storage (BECS): A Sequential Decision Approach to the threat of Abrupt Climate Change", *Energy* 30 (2005) 2654–2671.
- Regeringens proposition 2008/09:162, En sammanhållen klimat- och energipolitik – Klimat
- Regeringens proposition 2009/10:41, Vissa punktskattefrågor med anledning av budgetpropositionen för 2010
- Rhodes, James S. and Keith, David W.: (2008), "Biomass with capture: negative emissions within social and environmental constraints: an editorial comment", *Climatic Change* 87:321-328.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, III, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. Foley: (2009), "Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity".
- Royal Society: (2009), "Geoengineering the climate", Science, governance and uncertainty, London, UK.
- Statistisk sentralbyrå: "Utslipp av klimagasser 1990-2009", <http://ssb.no/emner/01/04/10/klimagassn/>.
- Stern, Nicholas: (2006), "Stern Review on the Economics of Climate Change".
- Stortingsmelding nr. 34 (2006-2007) Norsk klimapolitikk, <http://www.regjeringen.no/pages/1988897/PDFS/STM200620070034000DDDPDFS.pdf>.
- Tel-Tek report no. 2208010, Georg Hegerland, Nils Eldrup; Hans Aksel Haugen, Anette Mathisen, Audun Rødingsby, Marius Gjerset, John O. Pande, Tom Böckman, Thomas Vangkilde-Pedersen: (2008), "Capture, Transportation and Storage of CO₂ from large point sources in the Skagerrak Region".
- UNEP GRID-Arendal: "Historical trends in carbon dioxide concentrations and temperature, on a geological and recent time scale", <http://maps.grida.no/go/graphic/historical-trends-in-carbon-dioxide-concentrations-and-temperature-on-a-geological-and-recent-time-scale>.

Vergragt, Ph. J., Markusson, N. och Karlsson, H.: (2011), "CCS, BECCS, and the escape from carbon lock-in", mimeo (ej ännu i tryck).

Williams, R.H.: (1996), "Fuel decarbonization for fuel cell applications and sequestration of the separated CO₂". In R.U. Ayres and P.M. Weaver (eds.) Eco-restructuring: Implications for Sustainable Development, United Nations University Press, Tokyo, pp. 180-222.

<http://www.gassnova.no/>

http://www.ospar.org/content/news_detail.asp?menu=00600725000000_000002_000000

http://www.imo.org/Newsroom/mainframe.asp?topic_id=1472&doc_id=7772

www.co2sink.org

<http://www.total.com/fr/nos-enjeux/respecter-l-environnement/contribuer-a-la-lutte-contre-le-changement-climatique/captage-stockage-co2-200673.html>

www.agroetanol.se

Appendix 1

BECCS-potential idag

Namn	Industrislag	Plats	Biogena CO ₂ -utsläpp (ton/år)
C4 energi, Allöverket	Energi	Kristianstad	111 697
E.ON, Heleneholmsverket	Energi	Malmö	511 341
E.ON, Händelöverket	Energi	Norrköping	484 553
Eskilstuna Energi & Miljö, Kraftvärmeverket	Energi	Eskilstuna	282 140
Fortum, Bristaverket	Energi	Sigtuna	286 481
Fortum, Hässelbyverket	Energi	Stockholm	346 220
Fortum, Värtaverket	Energi	Stockholm	244 825
Göteborg Energi, Rya Kraftvärmeverk	Energi	Göteborg	397 700
Göteborg Energi, Sävenäs Kraftvärmeverk	Energi	Göteborg	444 075
Karlstads Energi, Heden kraftvärmeverk	Energi	Karlstad	137 516
Karskär Energi, Karskärsverket	Energi	Gävle	139 702
Mälarenergi, Västerås kraftvärmeverk	Energi	Västerås	983 888
Norrenergi, Solnaverket	Energi	Solna	128 538
Ragn-Sells AB, Högbytorps avfallsanläggning	Energi	Upplands-Bro	115 500
Skellefteå Kraft, Hedensbyns Kraftvärmeverk	Energi	Skellefteå	223 900
Sydskaånes Avfall, Sysavs avfallsförbränningsanläggning	Energi	Malmö	363 985
Söderenergi, Fittjaverket	Energi	Stockholm	128 259
Söderenergi, Igelstaverket	Energi	Södertälje	346 987
Tekniska Verken i Linköping, Gärsdaverket	Energi	Linköping	418 866
Tekniska Verken i Linköping, Kraftvärmeverket i Linköping	Energi	Linköping	190 202
Umeå Energi, Dåva Kraftvärmeverk	Energi	Umeå	176 028
Vattenfall, Idåbäckens Kraftvärmeverk	Energi	Nyköping	123 502
Ängelholms Energi, KVV-Åkerslund	Energi	Ängelholm	146 788
Öresundskraft, Västhamnsverket	Energi	Helsingborg	310 787
Total Energi			7 043 480
Billerud AB, Gruvöns Bruk	Massa- och pappersbruk	Karlstad	1 400 000
Billerud AB, Karlsborgs bruk	Massa- och pappersbruk	Karlsborg, Kalix	789 000
Billerud AB, Skärblacka	Massa- och pappersbruk	Skärblacka	691 000
Domsjö fabriker	Massa- och pappersbruk	Örnsköldsvik	567 926
Holmen AB, Bravikens Pappersbruk	Massa- och pappersbruk	Norrköping	161 400
Holmen AB, Hallsta Papper	Massa- och pappersbruk	Hallstadvik	173 000
Holmen AB, Iggesunds Bruk	Massa- och pappersbruk	Hudiksvall	750 589
Kappa Kraftliner Piteå	Massa- och pappersbruk	Piteå	1 181 000
Korsnäs AB, Korsnäsverken	Massa- och pappersbruk	Gävle	1 417 000
Mondi Packaging Dynäs	Massa- och pappersbruk	Kramfors	579 000
M-real Sverige AB, Husums fabrik	Massa- och pappersbruk	Örnsköldsvik	1 865 000

BECCS som klimatåtgärd

Rottneros AB, Vallviks Bruk AB	Massa- och pappersbruk	Vallvik	553 000
SCA, Munksund	Massa- och pappersbruk	Piteå	605 980
SCA, Obbola	Massa- och pappersbruk	Umeå	423 000
SCA, Ortvikens pappersbruk	Massa- och pappersbruk	Sundsvall	254 000
SCA, Östrands massafabrik	Massa- och pappersbruk	Timrå	1 147 000
Stora Enso, Norrsundets Bruk	Massa- och pappersbruk	Skutskär	890 350
Stora Enso, Nymölla	Massa- och pappersbruk	Nymölla	867 000
Stora Enso, Skutskärs Bruk	Massa- och pappersbruk	Skutskär	1 489 000
Södra Cell AB, Mönsterås Bruk	Massa- och pappersbruk	Mönsterås	1 735 755
Södra Cell AB, Mörrums Bruk	Massa- och pappersbruk	Mörrum	1 144 000
Södra Cell AB, Värö	Massa- och pappersbruk	Väröbacka	927 392
Total Massa- och pappersbruk			19 611 392
Lantmännen Agroetanol AB	Etanol	Norrköping	170 000
Total			26 824 872

Framtida BECCS- potential

Energi (>100 kton i utsläpp per källa och år samt kustnära)

Biogen del, Årlig förändring 2005 till 2020 förutsätts vara 1,21 %

Biogen del, Årlig förändring 2021 till 2030 förutsätts vara 0,22 %

Idag (2006) 7 043 480

År 2020 8 335 185

År 2030 8 520 385

Massa och papper (>100 kton i utsläpp per källa och år samt kustnära)

Årlig förändring 2005-2020 "högt scenario" förutsätts vara 2,0 %

Årlig förändring 2005-2020 "medelscenario" förutsätts vara 1,5 %

Årlig förändring 2005-2020 "lågt scenario" förutsätts vara 1,0 %

Årlig förändring 2021-2030 förutsätts vara 1,0%

Idag (2006) 19 611 392

2020 hög 25 876 815

2020 medel 24 156 444 (används nedan)

2020 låg 22 542 789

2030 (om 2020 hög) 28 584 103

2030 (om 2020 medel)	26 683 743 (används nedan)
2030 (om 2020 låg)	24 901 264
<u>Total 2020</u>	<u>32 491 629</u>
Lagringsandel	
95 %	30 867 048
90 %	29 242 466
85 %	27 617 885
80 %	25 993 303
<u>Total 2030</u>	<u>35 204 128</u>
Lagringsandel	
95 %	33 443 922
90 %	31 683 715
85 %	29 923 509
80 %	28 163 302