



UPPSALA
UNIVERSITET

Självständigt arbete vid Institutionen för geovetenskaper
2015:27

Är koldioxidavskiljning och lagring nödvändigt för att uppnå klimatmålen? – en översikt ur ett globalt, europeiskt och svenskt perspektiv

Elias Rosell

Är koldioxidavskiljning och lagring
nödvändigt för att uppnå klimatmålen?
– en översikt ur ett globalt, europeiskt
och svenskt perspektiv

Elias Rosell

Abstract

Is Carbon Capture and Storage Necessary to Achieve the Climate Goals? – an Overview from a Global, European and Swedish Perspective

Elias Rosell

Carbon capture and storage (CCS) has been discussed as a possible tool to mitigate climate change. This study is investigating whether CCS is necessary to achieve climate goals at the global, European and Swedish levels. This study, which is a literature-review, has also looked into the possibilities, opportunities and risks linked to the use of CCS. The result is that CCS, according to the majority of the research, is necessary to achieve the “two degree target” and is also needed for achieving EU's climate goals. By year 2050 Sweden may need to store approximately 10 million tons of emissions annually in order to become climate neutral. There is sufficient geological capacity for carbon storage in the world, where Europe and Sweden have the capacity to store their own emissions. An interesting possibility of CCS is to reduce carbon dioxide from the atmosphere by storing carbon from biomass. Crucial to the development of CCS is the need for a price on carbon dioxide that makes it more expensive to emit carbon dioxide than to store it. It is likely that 99 percent of the stored carbon dioxide is retained for at least 1000 years. Fossil fuels with CCS are from a climate point of view, considerably better than fossil energy without CCS. But CCS does not make fossil energy problem-free. It leads to more coal mining. A conclusion is that the risks of not using CCS to combat global warming are greater than the risks of using CCS.

Key words: Carbon capture and storage, climate target, Sweden, European Union, global

Independent Project in Earth Science, 1GV029, 15 credits, 2015

Supervisor: Henrik Wachtmeister

Department of Earth Sciences, Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36

Uppsala (www.geo.uu.se)

The whole document is available at www.diva-portal.org

Sammanfattning

Är koldioxidavskiljning och lagring nödvändigt för att uppnå klimatmålen? – en översikt ur ett globalt, europeiskt och svenskt perspektiv

Elias Rosell

Koldioxidavskiljning och lagring (CCS) har lyfts fram som ett verktyg för att hejda klimatförändringarna. I detta arbete har det undersökts om CCS är nödvändigt för att uppnå klimatmålen på global, europeisk och svensk nivå. I uppsatsen, som är en litteraturstudie, har det även undersökts vilka möjligheter och risker som finns med att använda CCS och vilka förutsättningar som krävs för att CCS ska användas. Resultaten är att CCS är enligt en majoritet av forskningen nödvändigt för att uppnå tvågradersmålet och det anses även behövas för att EU:s klimatmål ska uppnås. Cirka 10 miljoner ton av de årliga svenska utsläppen runt år 2050 kan behöva lagras om Sverige ska vara klimatneutralt år 2050. Det finns tillräckliga geologiska kapacitet för koldioxidlagring i världen i helhet, Europa och Sverige. En intressant möjlighet med CCS är att ta ned koldioxid från atmosfären genom att lagra koldioxid från bioenergi. Avgörande för utvecklingen av CCS är att det finns ett pris på koldioxidutsläpp som gör det dyrare att släppa ut koldioxid än att lagra den. Det är sannolikt att 99 procent av den lagrade koldioxiden är kvar inom 1000 år. Fossilenergi med CCS är ur klimatsynpunkt betydligt bättre än fossilenergi utan CCS. Men CCS gör inte fossilenergi till ett problemfritt energislag. En nackdel är att CCS leder till mer kolbrytning. En slutsats är att mycket ändå talar för att riskerna med att inte använda CCS för att bekämpa den globala uppvärmningen är större än riskerna med CCS.

Nyckelord: Koldioxidlagring och avskiljning, klimatmål, Sverige, EU, globalt

Självständigt arbete i geovetenskap, 1GV029, 15 hp, 2015

Handledare: Henrik Wachtmeister

*Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Villavägen 16, 752 36 Uppsala
(www.geo.uu.se)*

Hela publikationen finns tillgänglig på www.diva-portal.org

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Metod och definitioner	1
2. Teknisk och geologisk översikt	2
2.1 Tekniker för koldioxidavskiljning och transport	2
2.2 Lagring av koldioxid	3
2.3 Pågående och planerade projekt	4
2.4 Andra metoder för att sänka atmosfärens koldioxidhalt	5
2.5 EI och energianvändning idag och i framtiden	5
3. Klimatmålen	8
3.1 Tvågradersmålet, klimatforskningen och klimatpolitik	8
3.2 Europa, EU och Sverige	10
4. CCS som klimatåtgärd–Behov, kapacitet och risker	11
4.1 Ekonomi och koldioxidpris	11
4.2 Globala klimatmål och CCS	12
4.3 Europa och CCS	14
4.4. Nordeuropa, Östersjöregionen och Sverige	16
4.4.1 Behov av CCS	16
4.4.2 Geologisk kapacitet	18
4.4.3 Politiska och ekonomiska förutsättningar	20
4.5 Risker och nackdelar med CCS	23
5. Diskussion	27
6. Slutsatser	31
7. Tackord	33
8. Referenser	33

1. Inledning

Om inte ytterligare utsläppsminskningar sker så förväntas den globala medeltemperaturen stiga med 3,7–4,8 grader till år 2100 jämfört med innan industrialismen (IPCC, 2014b, s. 8). Redan vid en uppvärmning på 1,5 grader, jämfört med innan industrialismen, så börjar det bli en hög risk associerad med unika och hotade system samt extrema väderhändelser (IPCC, 2014a, s.1073). Fram till 2012 har den globala uppvärmningen ökat med 0,85 grader från 1880 (IPCC, 2013, s 5). Om det ska vara mer sannolikt än inte att den globala uppvärmningen begränsas till 1,5° grader så behöver utsläppen å 2050 minskat med 70-95 procent jämfört med 2010 (IPCC, 2014c, s.21). Samtidigt står fossilenergi för cirka 80 procent av världens energiförsörjning (IEA, 2014a, s.6). Koldioxidavskiljning och lagring har lyfts fram som ett sätt att minska utsläppen. Samtidigt kan det ge upphov till en rad olika frågor om dess eventuella nödvändighet, miljövänlighet och säkerhet. Det har resulterat i följande frågeställningar:

- **Finns det behov av koldioxidlagring? Hur mycket behöver i så fall lagras för att det globala tvågradersmålet, EU:s och Sveriges klimatmål för 2050 och de klimatmål som vetenskapen förespråkar ska kunna vara möjliga att uppnå?**
- **Vilka politiska, tekniska, ekonomiska och geologiska förutsättningar finns och krävs för att CCS ska användas för att ovanstående klimatmål ska uppnås och vilka risker och nackdelar kan finnas med CCS?**

Uppsatsen skrivs för Fores som är en grön och liberal tankesmedja.

1. Metod och definitioner

Arbetet är en litteraturstudie. Uppsatsens frågeställning spänner över flera olika områden. Sökandet efter information har utgått från rapporter av de officiella organisationer som är ansvariga för den aktuella frågan på respektive nivå. Dessa organisationer är exempelvis FN:s klimatpanel (Intergovernmental Panel on Climate Change, förkortat IPCC), Internationella Energirådet (IEA), Europeiska kommissionen, Naturvårdsverket, Energimyndigheten och Sveriges Geologiska Undersökning. Studier och rapporter som de ovan nämnda organisationerna har hänvisat till har i sin tur använts för uppsatsen. Generellt så har förstahandsinformation använts i arbetet. Men i vissa rapporter och studier, exempelvis i rapporter från IPCC och metastudier, har de ibland sammanställt resultat från en mängd olika studier och kommit med en egen sammanfattning av resultaten. När uppgifter från sådana sammanställningar av studier förekommer i arbetet så anges det i den löpande texten. Resultaten från komplexa klimat-energi-modeller från ovanstående källor har använts. Ingen egen bedömning av modellernas kvalitet har gjorts. Utöver det har databasen ScienceDirect använts regelbundet för att söka efter vetenskapliga artiklar som ger svar på frågeställningen

och olika frågor som uppstått under arbetets gång. Artiklar som enligt rubrik och abstract är relevanta för frågeställningen har använts. Även Uppsala Universitetsbibliotek och Google har använts för sökningar. Resultat från sökningar på Google har endast används när de funna källorna ansetts som vetenskapligt trovärdiga. I några fall har rapporter som tagits fram i samverkan mellan akademi och näringsliv använts. Dessa har använts när de har bedömts vara tillräckligt trovärdiga. I uppsatsen används ofta begreppet CCS som står för Carbon Capture and Storage. När det handlar om CCS från bioenergi så används här begreppet bio-CCS. I en del annan litteratur används begreppet BECCS (Bio Energy with Carbon Capture and Storage). När grader nämns i denna uppsats så menas alltid grader i Celsius. Med temperaturökning och global uppvärmning så menas jämfört med innan industrialismen, om inte annat anges.

2. Teknisk och geologisk översikt

2.1 Tekniker för koldioxidavskiljning och transport

De globala antropogena utsläppen av växthusgaser var år 2010 49 miljarder ton koldioxidequivaler (IPCC, 2014b, s. 6). Koldioxidavskiljning sker lämpligast från anläggningar som släpper ut minst 0,1 miljoner ton fossil eller biogen koldioxid per år. Exempel på dessa anläggningar är kraftverk, järn och stålverk, cementfabriker och raffinaderier (IPCC, 2005, s. 22-23). Dessa anläggningar kallas i uppsatsen för punktkällor. Vid bio-CCS lagras koldioxid från förbränning av biomassa. Växter binder koldioxid från atmosfären i samband med fotosyntesen. När koldioxiden från förbränningen av biomassa sedan lagras så innebär det att koldioxid tagits från atmosfären och lagrats i berggrunden. På det viset skapas så kallade "negativa utsläpp" som gör att koldioxidhalten i atmosfären sjunker (Arasto, 2014). Dessa utsläpp kallas i arbetet för biogena utsläpp/ biogen koldioxid.

Koldioxiden kan avskiljas innan eller efter förbränningen. Tekniken kallas "post-combustion process" eller "pre-combustion process" beroende på när avskiljningen sker. I "post-combustion process" fångar ett organiskt lösningsmedel upp 85-90 procent av koldioxiden. Det koldioxidfyllda lösningsmedlet förs sedan till ett annan behållare där det frigörs genom upphettning (Rubin et al, 2012). En fördel med "post-combustion" är att det kan installeras i efterhand i en befintlig anläggning. En nackdel är att tekniken är energikrävande (Smit et al, 2014,s.143).

I "pre-combustion" måste kolet omvandlas till ett tillstånd där det kan infångas. Kolet får reagera med ånga och syre vid höga temperaturer. Resultatet blir en syntesgas, bestående av kolmonoxid och väte, som kan brännas för att skapa elektricitet. Efter att föroreningar tagits bort omvandlas syntesgasen genom en reaktion med vattenånga till koldioxid och väte. En lösning fångar upp koldioxiden och det, i stort sett, renade vätet kan sen användas för att skapa el.

En ny teknik för koldioxidavskiljning är "oxy-combustion systems". I det systemet används rent syre istället för luft till förbränningen. Att rent syre används gör att det inte finns något kväve och det som återstår efter förbränningen är

vattenånga, koldioxid och föroreningar. Efter att vattenångan tagits bort genom kondensation och föroreningarna rensats bort så återstår i stort sett ren koldioxid. Denna typ av koldioxidavskiljning kräver en teknik för att separera syre från luft. Det är viktigt att det inte läcker in någon luft i förbränningsgasen (Rubin et al, 2012).

Efter avskiljningen behöver koldioxiden komprimeras för att kunna lagras geologiskt. Att skapa det tryck som krävs för att koldioxiden ska omvandlas till ett superkritiskt tillstånd bidrar till kostnaden för CCS (Smit et al, 2014, s.155-156).

Rörledningar och marina transporter är de lämpligaste teknikerna för transport av koldioxid i större skala (Rackley, 2010, s. 331). Tekniken för transport och lagring är till stor del densamma oavsett om fossilenergi eller bioenergi används. Tekniken för koldioxidavskiljningen är något annorlunda beroende på om det är fossil eller biogen koldioxid som avskiljs. Att tekniken är något annorlunda beror på att förbränningsgasen har en lite annorlunda sammansättning (Vergragt et al, 2011).

2.2 Lagring av koldioxid

Det finns flera olika typer av geologiska formationer som koldioxid kan lagras i. I Europa är djupa akviferer samt gas och oljereservoarer de intressantaste formationerna för lagring. I Sverige är djupa akviferer den intressantaste formationen för att lagra koldioxid. Djupa kollager och saltdomer är andra formationer i bergrunden som koldioxid kan lagras i. En akvifer är en geologisk formation som det går att utvinna grundvatten ur. Grundvattnet på några hundra meters djup har en för hög salthalt för att konsumeras som dricksvatten, vilket beror på upplösning av mineral och att salt vatten har högre densitet och därför sjunker (Smit et al, 2014, s. 355-369 & 394). Dessa djupa och salta akviferer kan vara lämpliga för koldioxidlagring.

En grundförutsättning för koldioxidlagring är en bergart med hög porositet, porositet står för volymen av hål i en bergart, och genomsläpplighet. För att koldioxiden inte ska läcka ut så krävs det att bergarten ovanför, takbergarten, är tät och har en låg porositet och genomsläpplighet. Den bästa bergarten att lagra koldioxid i är sandsten. Den har vanligtvis en porositet på 10-30 procent. Bra takbergarter är lera, lersten, lerskiffer eller lerig kalksten (Erlström et al, 2011, s. 16, 21 & 24). Koldioxiden bör lagras på minst 800 meters djup, där uppnår den ett superkritiskt tillstånd. Det superkritiska tillståndet innebär att densiteten ökar betydligt och att volymen minskar i jämförelse med tillståndet vid markytan (Smit et al, 2014, s. 394-395). När ett ämne är i ett superkritiskt tillstånd har den en densitet som en vätska, men molekylerna har egenskaper som en gas (Allaby, 2014, "Critical temperature"). Koldioxid i en akvifer lagras genom att den samlas i porutrymmen, att den upplöses i vattnet i den geologiska formationen, att den omvandlas till fast karbonatmineral genom reaktion med silikatmineraler i akviferen och genom att koldioxiden binds till kolpartiklar och organiskt material (Erlström et al, 2011, s. 21).

Tömnda gas och oljelager har fördelen att de bevisligen har kunnat förvara oljan och/eller gasen på plats under miljontals år. Men det finns ju borrhål från olje och gas-produktionen som måste stängas igen. Koldioxiden kan även lagras i

samband med oljeutvinning enligt CO₂-EOR metoden. Koldioxid injekteras då ner till oljefyndigheten där den under vissa omständigheter kan göra oljan lättare samt mindre trögflytande och därför underlättar utvinningen. Den processen kan ta månader eller år. Resultatet blir sedan att olja, vatten och koldioxid kommer upp från berggrunden. Koldioxiden och vattnet återanvänds till nästa injektion. På det viset lagras koldioxiden i systemet (Smit et al, 2014, s. 336-367 & Hovorka, 2015). Koldioxid kan även ersätta metan i mikroporer i sprickor i kollager och lagras där. Denna teknik kallas "Enhanced Coalbed Methane Recovery (ECBM)".

Den svenska berggrunden består av i huvudsak tre delar: urberget (Fennoskandiska skölden), fjällkedjan och sedimentära bergarter ovanpå urberget. I det svenska urberget är möjligheterna till koldioxidlagring "i stort sett obefintliga" och det är inte heller möjligt att lagra i gruvor (Erlström et al, 2011, s. 26-27).

När berg vittrar och koldioxid reagerar med föreningar i exempelvis silikatmineraler så bildas bikarbonat. Detta är en process som sker naturligt i kolcykeln (Bogren et al, 2014, s. 48-49). Vittring betyder att berg sönderdelas genom naturliga mekaniska och kemiska processer (Tarbuck et al, 2011, s. 196). Det är en process som går för långsamt för att ha en stor klimatpåverkan på kort sikt men som är viktig för klimatets utveckling på en geologisk tidsskala (Gaillardet, 1999). Att låta antropogen koldioxid reagera med silikatmineraler och bilda karbonatmineraler är ett sätt att lagra koldioxid. Karbonaten som bildas kan användas som byggnadsmaterial (Schuiling & Krijgsman, 2006). Att använda karbonat som tillverkats genom mineralisering är ett exempel på "Carbon Capture and Utilization". Andra exempel på Carbon Capture and Utilization är att använda koldioxiden för att tillverka urea och metanol (Styring et al, 2011, s.11).

2.3 Pågående och planerade projekt

Världens första kommersiella kraftverk, Boundary Dam Power Station i Saskatchewan i Kanada, med koldioxidavskiljning och lagring öppnades i oktober 2014. Det kostade 1,3 miljarder dollar att införa koldioxidavskiljning enligt tekniken för "post-combustion" på en av de fyra generatorerna i kolkraftverket. Projektet fick ett statligt stöd på 240 miljoner dollar. CCS-tekniken gör att elproduktionen från kraftverket minskar med 20 procent. Genom att sälja den infångade koldioxiden till en oljeproducent skapas extra intäkter som kompenserar för en del av den minskade elproduktionen. Oljeproducenten använder koldioxiden till oljeutvinning enligt EOR-tekniken. Den koldioxid som inte används till oljeutvinning lagras i en akvifer (MIT, 2015a, & MIT Technology Review).

I slutet av 2014 var 13 storskaliga CCS-projekt igång globalt sett. De har tillsammans en lagringskapacitet på 26 miljoner ton per år. I fem av dessa 13 projekt lagras koldioxiden för att övervakas i ett demonstrationsprojekt och i de andra åtta projekten så används koldioxiden för CO₂-EOR. Förutom dessa projekt finns det ytterligare 13 projekt som befinner sig i slutskedet av sin planeringsfas (IEA, 2015, s. 90). Av de 13 storskaliga CCS-projekt som enligt Global CCS Institute är igång så finns sju av dessa i USA, två i Kanada respektive Norge och ett var i Algeriet och

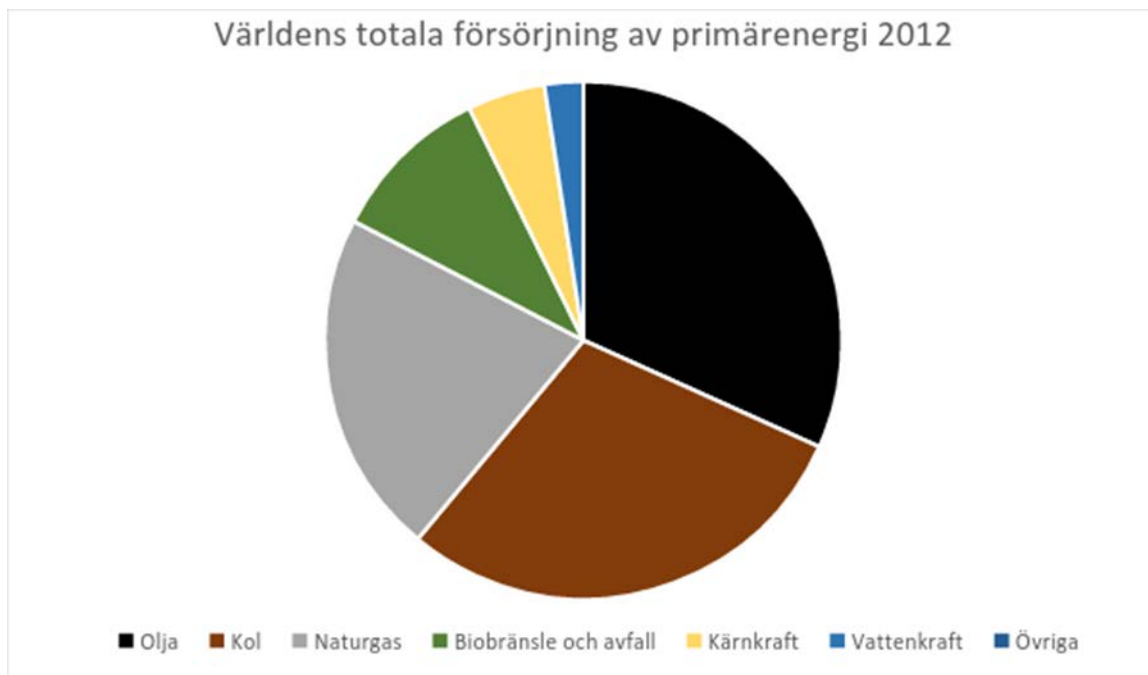
Brasilien. I nio av dessa 13 anläggningar kommer koldioxiden från bearbetning av naturgas, i två fall kommer koldioxiden från anläggningar som tillverkar gödningsmedel, en av anläggningarna är kraftverket Boundary Dam och i ett fall avskiljs koldioxiden från en anläggning som tillverkar väte (Global CCS Institute, 2015a). Med storskaliga anläggningar avses kolkraftverk som släpper ut minst 800 000 ton koldioxid per år eller andra industrier som släpper ut minst 400 000 ton koldioxid per år (Global CCS Institute, 2015b). Bland de projekt som befinner i stadiet innan att vara drift märks världens första järn och stålverk med koldioxidavskiljning. Det planeras att öppnas i Förenade Arabemiraterna 2016 (Global CCS Institute, 2015a). Ett pilotprojekt ägde rum mellan 2009-2010 i EON:s kraftverk i Karlshamn. Projektet i Karlshamn innefattade avskiljning av koldioxid, men inte lagring. Resultatet av projektet, som var ett samarbete mellan EON och Alstom, visade att 90 procent av koldioxiden kunde avskiljas och avskiljningen ledde till en ytterligare energiförbrukning på 10 procent (MIT, 2015b). På Island finns en demonstrationsanläggning för koldioxidlagring genom mineralisering (Orkuveita Reykjavíkur).

2.4 Andra metoder för att sänka atmosfärens koldioxidhalt

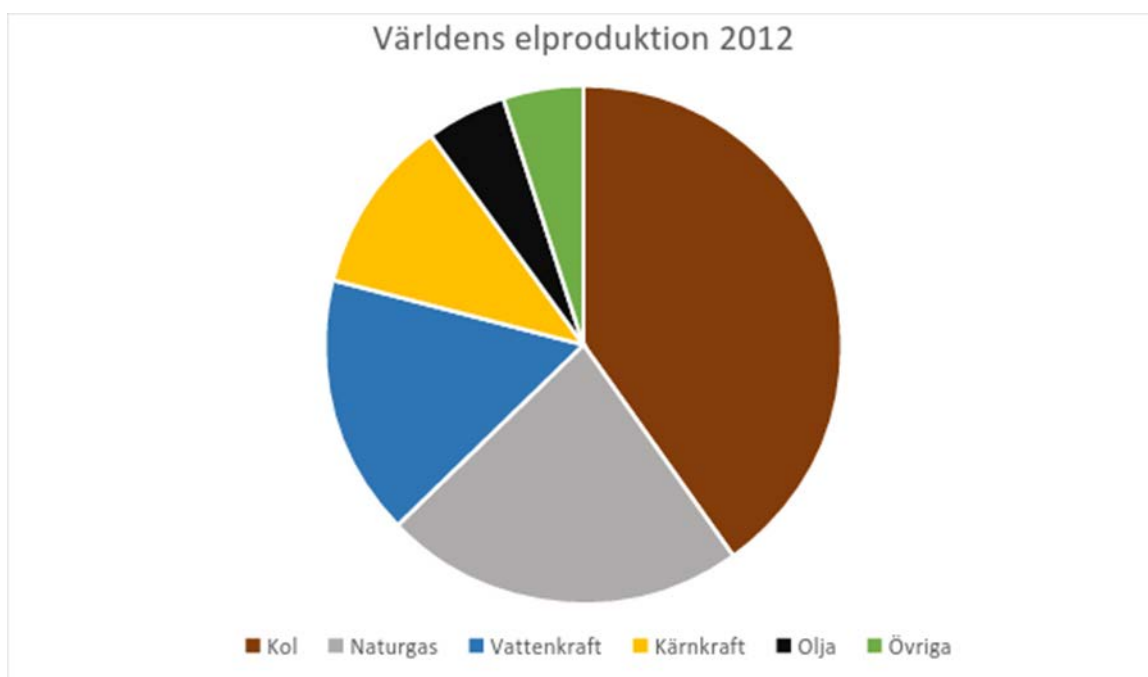
Negativa koldioxidutsläpp kan ske genom ett ökat kolupptag i ekosystem på land. Exempel på metoder för detta, förutom bio-CCS, kan, enligt en sammanställning från IPCC (2013, s. 547), vara skogsplantering, förändrad skogsskötsel, bindning i trä som används som byggnadsmaterial, nedgrävning av biomassa, förändrade jordbruksmetoder, biokol, fler våtmarker och gödsling. Biokol (biochar) är en slags träkol som skapas genom att rester från djur och växter upphettas utan att syre finns närvarande. Tekniken har använts i århundraden av indianstammar i Amazonasregnskogen för att berika jorden. Vid normal nedbrytning av organiskt material använder mikroorganismer syre och frigör koldioxid. Men om upphettning sker utan att syre finns tillgängligt så omvandlas istället den koldioxiden till fast form som en slags träkol ('Biochar' 2015). Biokol kan dock leda till förlust av humus och frigöra kol i jorden (Wardle, 2008). Enligt en sammanställning av IPCC (2013, s. 549) är biokol i jorden den metod som har störst potential ta ned koldioxid från atmosfären. Biokol bedöms kunna ta ned cirka 135 miljarder ton koldioxid på ett århundrade. Den metod som kommer därefter, i storleksordning utifrån potential att ta ned koldioxid från atmosfären, är bio-CCS med 130 miljarder ton koldioxid på ett århundrade. Dessa värden är dock högst spekulativa. Motsvarande bedömning för skogsplantering är 40-70 miljarder ton koldioxid.

2.5 El och energianvändning idag och i framtiden

Figur 1 visar världens totala tillförsel av primärenergi 2012. Fossilenergi stod för cirka 80 procent av världens energiförbrukning. Till övrig energi, som stod för 1,1 procent av världens energiproduktion, räknas sol, vind och geotermisk energi (IEA, 2014a, s. 6). Figur 2 visar världens elproduktion 2012 (IEA, 2014a, s. 24).



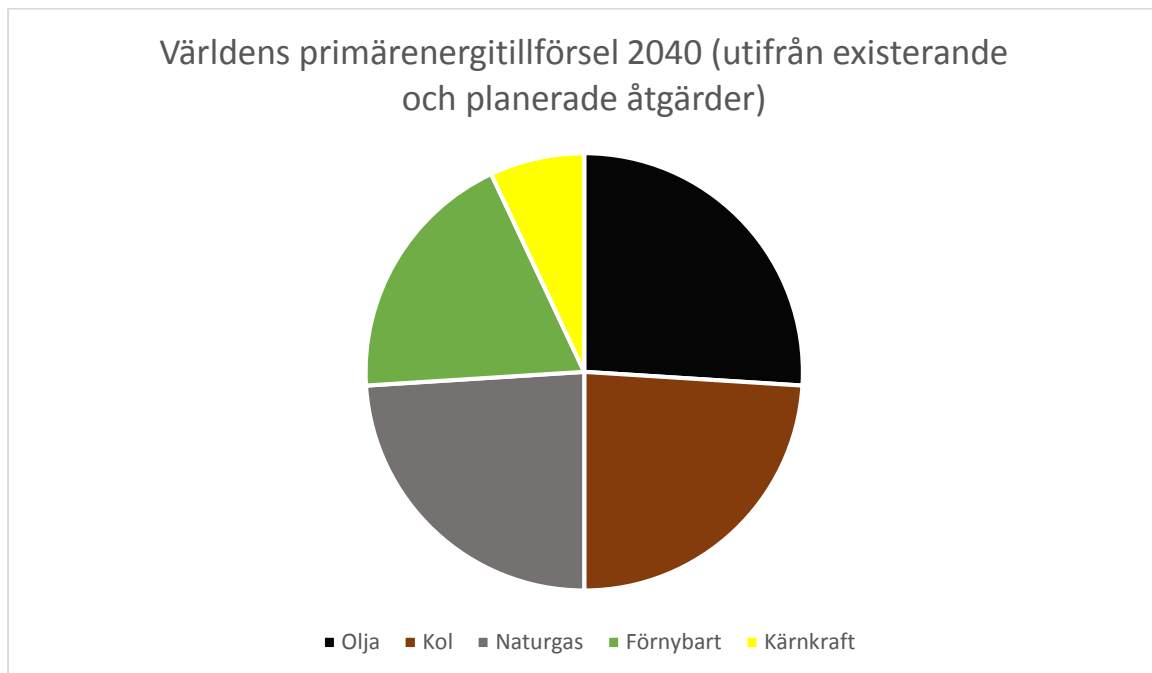
Figur 1. Världens totala försörjning av primärenergi 2012 (IEA, 2014a, s. 6)



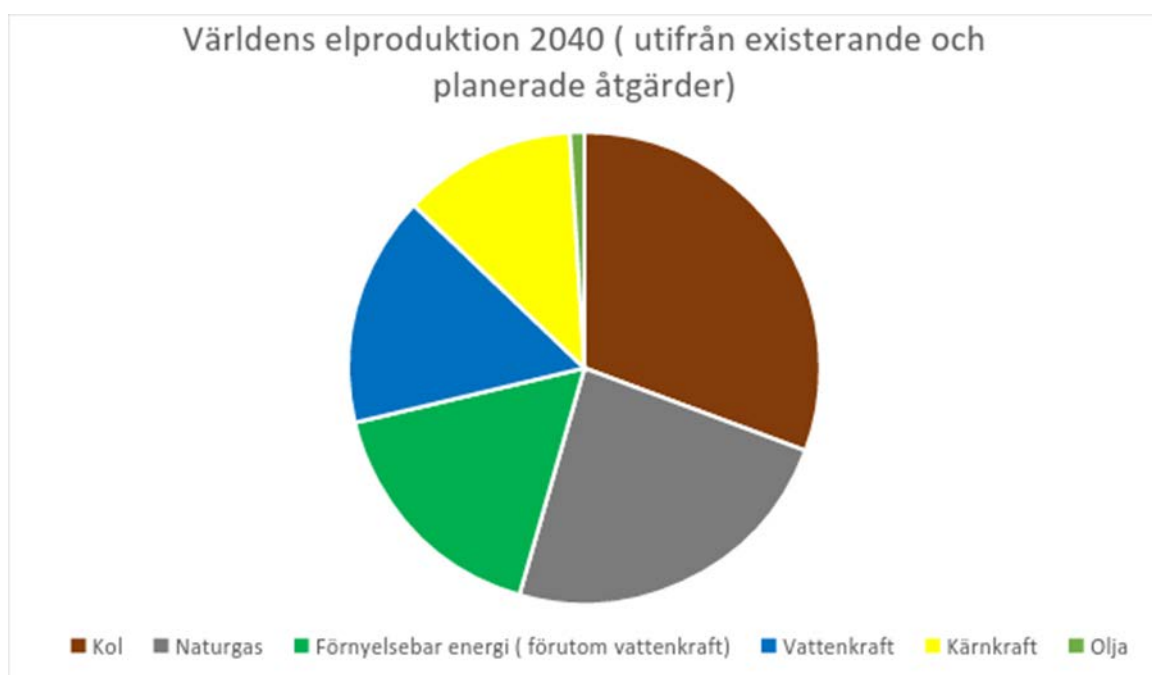
Figur 2. Världens elproduktion 2012 (IEA, 2014a, s. 24)

Figur 3 visar IEA:s centrala scenario för världens primärenergitillförsel 2040, New Policy Scenario, som utgår från både existerande och planerade åtgärder. Den globala efterfrågan på energi bedöms öka med 37 procent, vilket inte framgår i diagrammet (IEA, 2014b, s. 53-57). Figur 4 visar den globala elanvändningen år 2040, enligt New Policy Scenario. Elproduktionen förväntas öka med 2,1 procent per år fram till 2040. Det är skillnad på andel och total volym. Även om fossilelens andel minskar så ökar den totala volymen från 15 450 TWh till 22 230 TWh i detta scenario på grund av att den totala elkonsumtionen ökar (IEA, 2014b, s. 201 & 208). Fram tills 2040 bedöms den årliga globala kolkonsumtionen öka med i genomsnitt 0,5 procent

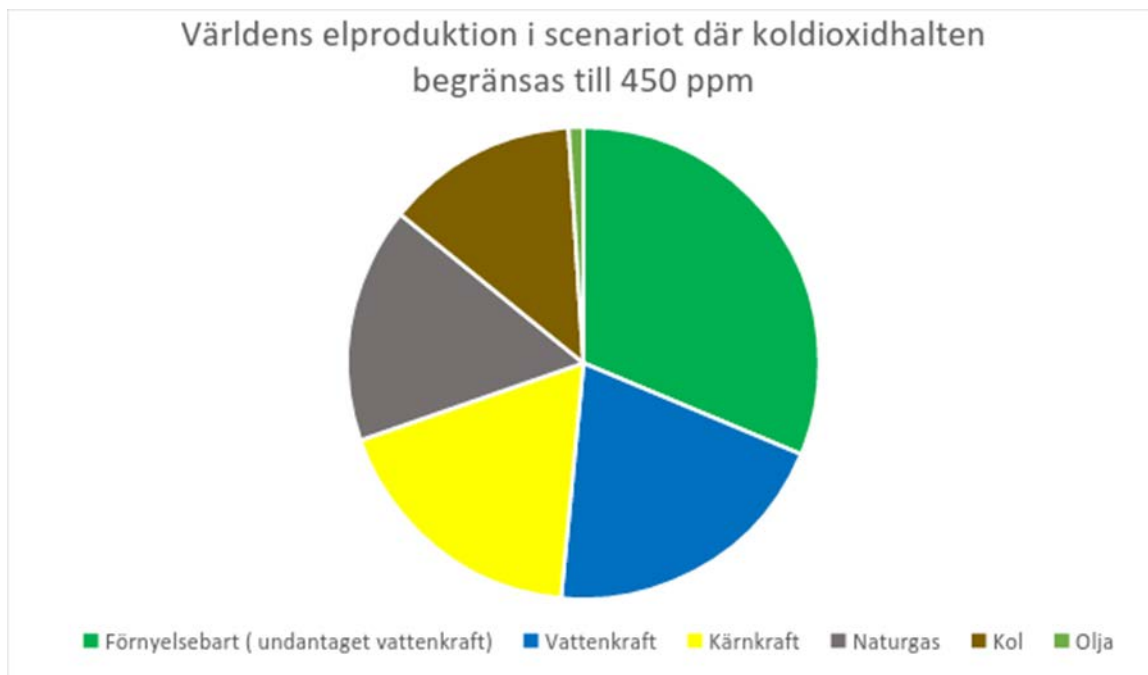
Nästan två tredjedelar av den ökningen förväntas ske de närmaste tio åren. Kina, Indien, Indonesien och Australien beräknas stå för 70 procent av världens kolproduktion 2040 (IEA, 2014b, s. 171-172). Figur 5 visar världens elkonsumtion år 2040 i scenariot där koldioxidhalten begränsas till 450 ppm. I det scenariot står el från fossila bränslen för 30 procent av den totala elkonsumtionen (IEA, 2014b, s. 208).



Figur 3. Världens primärenergitillförsel 2040 (IEA, 2014b, s. 53-57)



Figur 4. Världens elproduktion 2040 (IEA, 2014b, s. 208)



Figur 5. Världens elproduktion i scenariot där koldioxidhalten begränsas till 450 ppm (IEA, 2014b, s. 208)

3. Klimatmålen

3.1 Tvågradersmålet, klimatforskningen och klimatpolitik

Världens länder kom på FN:s klimattoppmöte 2010 i Cancun överens om att ökningen av den globala medeltemperaturen ska vara under två grader jämfört med innan industrialismen (UNFCCC, 2010).

IPCC sammanfattar, utifrån en mängd studier, riskerna med en global uppvärmning och delar in dem i fem olika kategorier: risker för unika och hotade system, risker med extrema väderhändelser, risker med spridning av effekter, risker med de sammanlagda effekterna och risker med storskaliga enskilda händelser. Med risker för unika och hotade system menas både "fysiska, biologiska och sociala system i ett relativt begränsat geografiskt område och som är hotade av framtida klimatförändringar". Exempel på sådana system är den havsis-miljö som inuiter lever i, korallrev, ekosystem, unika arter i bergsområden, Amazonas ekosystem, sötvattenekosystem i en del afrikanska länder, glaciärer och unika arter på tropiska öar.

Exempel på extrema väderhändelser är värmeböljor, cykloner, torka och intensiv nederbörd. Risker med spridning av effekter definieras som "Risker för samhällen och socio-ekologiska system som är oproportionerligt påverkade på grund av ojämna fördelning av risker, exponering och sårbarhet." Exempel på detta kan vara minskade majs och veteskördar i tropikerna och vattenbrist i olika regioner. Med risker med de sammanlagda effekterna menas de globalt sammanlagda förlusterna i ekonomi, människoliv, arter och ekosystem. Enskilda storskaliga händelser (även

kallat tröskeleffekter) är “abrupta och drastiska förändringar i fysiska, ekologiska och sociala system”. Exempel på dessa är avsmältning av Grönland och Antarktis, förändringar i den atlantiska havscirkulationen och metanutsläpp från våtmarker och permafrost.

Vid en grads uppvärmning jämfört med innan industrialismen finns det en måttlig risk associerad med unika och hotade ekosystem, extrema väderhändelser och spridning av effekter. Utöver det finns det, vid en grads uppvärmning, en låg till måttlig risk associerad med enskilda storskaliga händelser och en låg risk associerad med sammanlagda globala effekter. Vid 1,5 graders uppvärmning jämfört med innan industrialismen börjar det bli en hög risk associerad med unika och hotade system samt extrema väderhändelser. Vid två graders uppvärmning jämfört med innan industrialismen finns det en hög risk associerad med extrema väderhändelser samt unika och hotade system, en måttlig till hög risk associerad med spridning av effekter samt en måttlig risk associerad med sammanlagda globala effekter och enskilda storskaliga händelser. Vid tre graders uppvärmning jämfört med innan industrialismen finns det en väldigt hög risk associerad med unika och hotade system, en hög risk associerad med extrema väderhändelser, spridning av effekter och enskilda storskaliga händelser samt måttlig till hög risk för sammanlagda effekter.

Vid fyra graders uppvärmning finns det en mycket hög risk associerad med unika och hotade system och en hög risk associerad med de övriga kategorierna (IPCC, 2014a, s. 1073-1097). Fram till 2012 har den globala uppvärmningen ökat med 0,85 grader från 1880 (IPCC, 2013, s. 5). IPCC skriver att forskningen inte ger ett svar på hur mycket global uppvärmning som är oacceptabel. Svaret är “i slutändan en subjektiv bedömning som beror på kultur och värderingar, men även socioekonomiska och psykologiska faktorer” (IPCC, 2014a, s. 1047).

Det som världens ledare kommit överens om hittills räcker sannolikt inte för att hålla temperaturökningen under två grader (IPCC, 2014c, s. 24). Om inte ytterligare utsläppsminskningar sker så förväntas den globala medeltemperaturen år 2100 ha stigit med 3,7–4,8 grader jämfört med innan industrialismen (IPCC, 2014b, s. 8). För att det ska vara sannolikt att den globala uppvärmningen under detta århundrade blir under två grader jämfört med innan industrialismen behöver de mänskliga växthusgasutsläppen minska med 40-70 procent till 2050 jämfört med 2010 och nästan ha upphört vid slutet av detta århundrade. Om det ska vara mer sannolikt än inte att den globala uppvärmningen begränsas till 1,5 grader behöver utsläppen 2050 minska med 70-95 procent jämfört med 2010 (IPCC, 2014c, s. 20-21). Mänskligheten bör inte orsaka mer än ytterligare 1000 miljarder ton koldioxidutsläpp om sannolikheten ska vara större än 66,7 procent att tvågradersmålet nås. Fram till 2011 har mänskligheten orsakat utsläpp på 1900 miljarder ton koldioxid. Med en koldioxidhalt på cirka 450 parts per million eller lägre år 2100 är det sannolikt att tvågradersmålet nås, enligt sammanfattning från IPCC (2014c, s. 10 & 21). För att det ska vara sannolikt att den globala uppvärmningen år 2100 inte överstiger 1,5 grader jämfört med innan industrialismen bedöms koldioxidhalten år 2100 behöva vara under 430 ppm. De globala antropogena

utsläppen av växthusgaser var år 2010 49 miljarder ton koldioxidekvivalenter (IPCC, 2014b, s. 6). Uppgifterna ovan från IPCC bygger i de flesta fall på deras sammanställning av annan forskning.

FN:s klimatoppmöte i Durban 2011 beslutade att införa geologisk lagring av koldioxid som en del av systemet för Clean Development Mechanism (CDM) (UNFCCC, 2012, s. 13-15). Enligt en studie (Dixon, 2013) så hade ingen ansökan om att använda CCS i CDM kommit in. CDM är en del av Kyotoprotokollet som ger ett land en möjlighet att finansiera en utsläppsminskande åtgärd i ett annat land och själva tillgodoräkna sig den utsläppsminskningen. CDM ska göra "det möjligt att genomföra utsläppsminskningar där det är mest kostnadseffektivt." (Energimyndigheten, 2014).

3.2 Europa, EU och Sverige

EU ska till 2030 minskat sina växthusgasutsläpp med minst 40 procent jämfört med 1990. För att lyckas med det har EU satt upp mål om att ha minst 27 procent förnyelsebar energi 2030. Målen om utsläppsminskningar och förnyelsebar energi är bindande på EU-nivå. EU har även ett vägledande mål om 27 procent energieffektivisering till 2030, energieffektiviseringsmålet ska dock utvärderas 2020 med ett mål på 30 procent i åtanke (Europeiska kommissionen, 2015a). Energisektorn ska ha minskat sina utsläpp med 54-69 procent och industrin med 34-40 procent till 2030 jämfört med 1990. Till 2050 ska EU ha minskat sina växthusgasutsläpp med 80-95 procent jämfört med 1990. Energisektorn ska ha minskat sina utsläpp med 93-99 procent och industrin med 83-87 procent till 2050 jämfört med 1990 (Europeiska kommissionen, 2011b).

Den förra regeringen beslutade 2014 att "en särskild utredare ska lämna förslag till en strategi för hur regeringens långsiktiga vision att Sverige år 2050 inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser i atmosfären ska uppnås" och att "uppdraget ska redovisas till Regeringskansliet (Miljödepartementet) senast den 2 november 2015" (Regeringen, 2014a). På Regeringens hemsida under "Mål för klimat och miljö" står det inget om klimatmål för 2050 (Regeringen, 2015-03-04). Naturvårdsverket tog 2012 på regeringens uppdrag fram "Underlag till en svensk färdplan för ett Sverige utan klimatutsläpp 2050." (Naturvårdsverket, 2012). Färdplanen har inte behandlats i Sveriges Riksdag och något slutgiltigt beslut är inte taget (Olsson, 2014).

4. CCS som klimatåtgärd–Behov, kapacitet och risker

4.1 Ekonomi och koldioxidpris

I scenarier där det inte finns tillgång till CCS-teknik är kostnaden för att begränsa koldioxidhalten till relativt låga nivåer högre än i scenarier där det finns CCS-teknik. Att begränsa koldioxidhalten till 400 ppm med CCS bedöms bli 20 miljarder USD billigare jämfört med att nå 400 ppm utan CCS (i 2005 års-dollarvärde). Motsvarande siffra för 450 ppm är 8 miljarder (Luckow et al, 2010).

Enligt IEA (2015, s. 11) är det viktigt för utvecklingen av CCS att kostnaden och riskerna för fossilenergi utan CCS ökar genom regler eller ett pris på koldioxid. I en studie (Luckow et al, 2011) som tittar på relationen mellan koldioxidpris i USA, förväntad utveckling av CCS och klimatmål för USA kommer artikelförfattarna fram till att CCS antas börja utvecklas snabbt när koldioxidpriset är över 60 USD/tCO₂. Vid ett pris på 100 USD/tCO₂ består nästan all baselproduktion av fossilenergi med CCS, kärnkraft och förnyelsebar energi. Vid ett koldioxidpris på 150 USD/tCO₂ så är all fossil, undantaget när elbehovet är ovanligt stort, producerad med CCS. Däremot så krävs det ett koldioxidpris på över 400 USD/tCO₂ för att CCS ska vara aktuellt för även "peak electricity generation".

I en annan studie (Renner, 2014) jämförs vilket CO₂-pris som krävs för att CCS ska bli lönsamt i EU respektive Kina. Med den nuvarande kostnaden för kraftverk och IEA:s förväntade utveckling av bränslepriser krävs det ett pris på 115 euro per ton koldioxid för att kolkraftverk med CCS ska bli den mest lönsamma typen av kraftverk i Europa. Motsvarande siffra för Kina är 35-45 Euro. År 2030 behöver koldioxidpriset i EU vara på 85 Euro/ton för att investeringar i CCS ska börja ske, men priset i EU bedöms vara 30 Euro/ton CO₂ år 2030. Därför föreslås att EU ska överväga att ge stöd till CCS-utbyggnad i länder med lägre kostnader, som exempelvis Kina. Anledningarna till att kostnaden för kraftverk skiljer sig betydligt mellan Nordamerika/Europa och Kina är att kostnaden för arbetskraft är lägre i Kina, att Kina har en kombination av stordriftsfördelar och standarddesign, att kostnaden för råmaterial är lägre i Kina (statligt satta priser är betydligt lägre än marknadspriset) och att det är färre begränsande regler i Kina. I IEA:s scenario för 450 ppm CO₂, där CCS är en viktig del, så är koldioxidpriset år 2040 140 USD/ton och 125 USD i Brasilien, Kina, Sydafrika och Ryssland (IEA, 2014, s. 45).

Enligt Världsbanken (2014, s. 14-17) så finns det cirka 40 länder och 20 regioner som har infört ett pris på koldioxid och de täcker tillsammans cirka 12 procent av de årliga globala utsläppen. Sverige har den högsta koldioxidskatten på 168 USD/tCO₂, följt av Tokyo på 95 USD/tCO₂. Den svenska industrin har en lägre koldioxidskatt jämfört med övriga samhället, den uppgår från och med 2015 till 60 procent av den ordinarie koldioxidskatten på bränsle (Skatteverket). I en klar majoritet av marknaderna är priset under 35 USD/tCO₂. I EU:s handel med utsläppsrätter är priset 9 USD/tCO₂ (Ecofys, 2014, s. 17).

4.2 Globala klimatmål och CCS

Med en koldioxidhalt på cirka 450 parts per million eller lägre år 2100 är det sannolikt att tvågradersmålet nås. För att det ska vara sannolikt att den globala uppvärmningen år 2100 inte överstiger 1,5 grader jämfört med innan industrialismen bedöms koldioxidhalten år 2100 behöva vara under 430 ppm, enligt sammanställning från IPCC (2014b, s. 10).

I en studie (Kriegler et al, 2014) som använder 18 olika modeller för att undersöka hur koldioxidhalten kan begränsas till 450 respektive 550 ppm är resultatet att i fyra modeller kan koldioxidhalten begränsas till 450 ppm utan CCS. Bio-CCS gör det rimligt att strålningsdrivningen kan stanna på 2,6 W/m² och att genomföra utsläppsminskningar senare och ändå nå uppsatta klimatmål (van Vliet, 2009). Strålningsdrivning definieras som "den ökade energin som tas upp av jord/atmosfärsystemet till följd av den förhöjda växthuseffekten" (Bogren et al, 2014, s. 164). Mellan år 1750 och 2011 har strålningsdrivningen ökat med 2,29 W/m² (IPCC, 2013, s. 13). IPCC har fyra olika scenarier för vilken strålningsdrivning som jorden kommer att ha år 2100: 2,6, 4,5, 6,0 och 8,5 W m/2. I alla scenarier förutom det med en strålningsdrivning på 2,6 W m/2 överstiger den globala uppvärmningen 1,5 grader år 2100 jämfört med 1850-1900 (IPCC, 2013, s. 20-23)

En annan studie (Edenhofer et al, 2010) kom fram till att det inte är möjligt att begränsa koldioxidhalten till 400 ppm utan CCS eller en betydande ökning av förnyelsebar energi. En metastudie (Dooley, 2013) av 122 scenarier från 34 studier visar att den genomsnittliga bedömningen är att det globalt behöver lagras 1670 miljarder ton koldioxid om koldioxidhalten ska vara 350-399 ppm år 2100. För att koldioxidhalten ska vara mellan 400-499 ppm år 2100 krävs det att 1340 miljarder ton koldioxid lagras, enligt den genomsnittliga bedömningen. Enligt de nyare scenarierna i studien krävs det dock en mindre volym lagrad koldioxid i jämförelse med vad som anges i de äldre studierna. IPCC (2014b, s. 10) bedömer att om den globala uppvärmningen ska hållas under 1,5 grader så behöver koldioxidhalten begränsas till 430 ppm. Det finns dock inte så många studier som undersöker hur mycket koldioxid som behöver lagras för att koldioxidhalten inte ska överstiga 430 ppm år 2100. Den generella trenden är att det krävs mer lagrad koldioxid ju mer koldioxidhalten ska begränsas, ett undantag är att metastudien som uppgifterna är tagna ifrån bedömer att det krävs något mer lagrad koldioxid för att koldioxidhalten ska begränsas till 450 ppm än 400 ppm. Dock finns det två studier i metastudien, som undersöker hur mycket koldioxid som behöver lagras för att koldioxidhalten ska vara 450, 550 och 650 ppm, som anger ett betydligt större behov lagrad koldioxid jämfört med övriga studier. Även i dessa studier anges att en större mängd koldioxid behöver lagras ju lägre koldioxidhalten ska vara, dessa studier stannar dock på 450 ppm (Dooley, 2013). Enligt en studie (Edenhofer et al, 2010) behövs det lagras mellan 120-500 miljarder ton koldioxid för att nå scenarier med en låg koldioxidhalt i atmosfären. Enligt en annan studie (Koornneef et al, 2012a) skulle bio-CCS kunna bidra med negativa utsläpp på upp till 10,4 miljarder ton årligen runt år 2050. Vilken mängd biomassa som kan framställas på ett hållbart sätt är avgörande för

utvecklingen av bio-CCS. IPCC har en sammanställning som anger hur stora utsläppen från olika sektorer, exempelvis industri och elsektorn, kan vara med och utan CCS för att koldioxidhalten ska kunna begränsas till cirka 450 ppm år 2100. Det finns olika många scenarier för de olika sektorerna. Generellt är det många fler scenarier där koldioxidhalten kan begränsas till 450 ppm år 2100 när CCS används jämfört med när CCS inte används. Det är 36-22 scenarier, antalet varierar mellan de olika sektorerna, där koldioxidhalten begränsas till 450 ppm när CCS finns tillgängligt. När CCS inte finns tillgängligt är det endast 6-3 scenarier där koldioxidhalten begränsas till 450 ppm (IPCC, 2014b, s. 480).

IPCC drar, bland annat utifrån studier som nämns ovan, slutsatsen att scenarier där koldioxidhalten begränsas till 450 ppm år 2100 vanligtvis har en högre koldioxidhalt än 450 ppm innan år 2100. Därför är de scenarierna beroende av att koldioxidhalten kan minska med hjälp av bio-CCS och skogsplantering. IPCC skriver även i sammanfattningen att "i majoriteten av scenarierna som når 450 ppm koldioxid 2100 så ökar andelen av elförsörjningen som kommer från koldioxidsnåla källor (förnyelsebar energi, kärnkraft, fossilenergi med CCS och BECCS) från den nuvarande andelen på cirka 30 procent till mer än 80 procent 2050" och att scenarier där koldioxidhalten begränsas till 450 ppm kännetecknas av "en snabb utveckling inom energieffektivisering och en tredubbling till nära en fyrdubbling av andelen koldioxidfri och snål energiproduktion från förnyelsebart, kärnkraft, fossilenergi med CCS och bioenergi med CCS" (IPCC, 2014b, s. 12 & 20). CCS från fossila bränslen står, enligt de flesta scenarier, för en större volym än bio-CCS (IPCC, 2014b, s. 560). I scenarier där den globala uppvärmningen begränsas till 1,5 grader jämfört med innan industrialismen används alla tekniker som minskar utsläppen (IPCC, 2014b, s. 16).

I scenariot i IEA:s World Energy Outlook 2014 där koldioxidhalten på högst 450 ppm år 2100 har det installerats 80 GW kol och gaskraft med CCS år 2025. Till år 2040 finns det 580 GW kolkraft med CCS, vilket motsvarar 40 procent av kolkapaciteten och 80 procent av den beräknade producerande elen från kolkraft. Utöver det har 22 procent av de gaseldade kraftverken CCS. Detta betyder att CCS-tekniken måste utvecklas snabbt, skriver IEA. En sådan utveckling kräver att 60 procent av kolkraftverken byggs om. Ifall behovet av CCS ska ersättas med vindkraft krävs det en tjugofaldig ökning av vindkraft, med CCS så tiodubblas vindkraften i scenariot för 450 ppm 2100 (IEA, 2014b, s.174-175). De tre scenarierna i World Energy Outlook 2014 utgår ifrån vissa gemensamma antaganden. Dessa är att den årliga globala ekonomiska tillväxten ökar med 3,4 procent mellan 2012-2040, vilket innebär att den globala ekonomin är två och en halv gånger större 2040 än 2012. Scenarierna utgår även från att världens befolkningsstorlek har ökat till 9 miljarder 2040 (IEA, 2014b, s. 40-43). I scenariot med en koldioxidhalt på 450 ppm år 2100 sjunker priset på importerad olja från 106 USD/fat 2013 till 100 USD/fat 2040. Priset på importerad energikol sjunker från 86 dollar/ton till 77 dollar/ton år 2040. Priset på naturgas sjunker i Europa och Japan, men stiger i USA. Anledningen till att priset på fossil energi generellt sjunker i scenariet med en koldioxidhalt på 450 ppm år 2100 är

att den lägre efterfrågan på energi gör att de mer kostsamma fossilreserverna inte utvinns (IEA, 2014b, s. 48).

Det bedöms finnas en teoretisk global kapacitet att lagra 35 300 miljarder ton koldioxid, en effektiv kapacitet att lagra 13 500 miljarder ton koldioxid, en praktisk kapacitet att lagra 3 900 miljarder ton koldioxid och en "matchande kapacitet" på 290 miljarder ton koldioxid. Kapaciteten är dock ojämnt fördelad mellan världens regioner. I studien dras slutsatsen att geologiskt utrymme inte borde bli något hinder för utvecklingen av CCS inom detta århundrade (Dooley, 2013). "Carbon Sequestration Leadership Forum" har tagit fram ett ofta använt system för att klassificera kapacitet för koldioxidlagring (Liu et al, 2014). Teoretisk kapacitet är den maximala kapacitet som uppnås om alla lagringsplatser används till 100 procent, effektiv kapacitet är den delen av den teoretiska kapaciteten som är tekniskt tillgänglig, praktisk kapacitet är den kapaciteten som är tillgänglig när även aspekter kring ekonomi, juridik och infrastruktur tas med och "matchande kapacitet" är de lagringsplatser som är nära en koldioxidkälla (Bachu, S, 2007, s. 13-14).

4.3 Europa och CCS

Enligt EU:s färdplan för att nå målet om att minska koldioxidutsläppen med 80-95 procent till 2050 jämfört med 1990, Färdplan för ett konkurrenskraftigt utsläppssnålt samhälle 2050, behövs det efter 2035 CCS i stor skala på utsläpp från industriprocesser för att industrin ska nå målet om att minska koldioxidutsläppen med 83-87 procent till 2050 jämfört med 1990 (Europeiska kommissionen, 2011b). Men kostnaden för CCS gör att det finns en risk för koldioxidläckage, vilket definieras av Europeiska kommissionen som "att det finns en risk för att företag inom sektorer som är utsatta för hård internationell konkurrens flyttar sin verksamhet från EU till tredjeländer som har mindre strikta gränser för utsläpp av växthusgaser", om inte konkurrenter till EU gör motsvarande åtgärder (Europeiska kommissionen, 2015b)

I EU:s energifärdplan för att nå målet om att minska koldioxidutsläppen med 80-95 procent till 2050 jämfört med 1990 står det att "om avskiljning och lagring av koldioxid kommersialiseras, kommer den att behöva bidra i betydande omfattning i de flesta scenarier, med så mycket som 32 procent vid en begränsad kärnkraftsproduktion och andelar på 19–24 procent i andra scenarier med undantag av scenariot med stor andel förnybara energikällor." I scenariot med stor andel förnybara energikällor så kommer 97 procent av elproduktionen från förnybara källor. Om CCS fördröjs antas det leda till mer kärnkraft. I energiplanen skriver Europeiska kommissionen även att CCS gör att kol kan vara ett hållbart alternativ i framtiden (Europeiska kommissionen, 2011a).

I scenarier där målen om att elsektorn i Europa ska minska sina utsläpp med 93-99 procent så lagras 7,8–15,4 miljarder ton koldioxid i Europa mellan år 2025-2030. Elproduktion med CCS har potentialen att bidra med 25-35 procent av den europeiska elproduktionen år 2050. Det förutsätter att CCS-tekniken utvecklas så att kraftverk med CCS blir koldioxidfria eller att CCS med biomassa gör CCS klimatneutralt. Scenariot där den lagrade koldioxiden är 15,4-14,5 miljarder ton är ett

“marknadsscenario” där politiska åtgärder begränsas till ett pris på koldioxid och där det finns en allmän acceptans för CCS. Scenariot med mindre CCS är ett “policy-scenario” med fler politiska mål och ett tak för koldioxidutsläpp.

CCS-direktivet, som antogs den 23 april 2009, är en “rättslig ram för miljömässigt säker geologisk lagring av koldioxid”. EU-länderna har kvar självbestämmanderätten över beslutet om och vart de ska lagra koldioxid. Medlemsländer som vill använda sig av CCS-tekniken ska genomföra en undersökning av lagringskapaciteten i delar av eller hela landets territorium. När en tillståndsprocess för koldioxidlagring pågår i något medlemsland kan Europeiska kommissionen ska avge ett icke-bindande yttrande. Om ett medlemsland väljer att inte följa kommissionens yttrande ska de motivera sitt beslut. Ansvariga för förbränningsanläggningar med en “nominell elektrisk effekt på 300 megawatt eller mer” och som har fått tillstånd efter den 23 april 2009 ska utreda om det finns lämpliga lagringsplatser, om transport är tekniskt och ekonomisk genomförbar samt om det finns möjlighet till eftermontering. Om dessa villkor är uppfyllda ska den berörda myndigheten “se till att lämpligt utrymme avsätts vid anläggningen för den utrustning som krävs för att avskilja och komprimera koldioxid” samt bedöma miljö och hälsoaspekter (Europeiska kommissionen, 2009c). Kommissionen skriver att “om koldioxid från lagringsplatsen skulle läcka ut i atmosfären måste verksamhetsutövaren kompensera detta genom att överlåta utsläppsrätter i enlighet med EU:s system för handel med utsläppsrättigheter.” (Europeiska kommissionen, 2012). I övrigt så innehåller CCS-direktivet en del av mer teknisk och administrativ karaktär om exempelvis undersökning och lagringstillstånd, skyldigheter under drift och efter stängning, övervakning, inspektioner och åtgärder vid läckage eller störningar. ”. I EU-parlamentets skäl till beslutet görs bedömningen att “sju miljoner ton koldioxid skulle kunna lagras fram till 2020 och upp till 160 miljoner ton fram till 2030, vid antagandet att utsläppen av växthusgaser minskar med 20 % fram till 2020.” Detta skulle enligt parlamentet motsvara cirka 15 procent av den minskning som krävs i unionen till 2030. Parlamentet säger även att CCS “bör inte leda till minskade ansträngningar för att stödja energisparande åtgärder, förnybar energi och andra säkra och hållbara tekniker med låga koldioxidutsläpp.” och att CCS inte heller är ett skäl att öka andelen fossileldade kraftverk (Europeiska kommissionen, 2009c) Under det kommande årtiondet behövs det 13 miljarder euro i offentliga och privata investeringar i CCS, skrev Europeiska kommissionen (2009b). Med dessa investeringar ville Europeiska kommissionen “sänka kostnaderna för avskiljning och lagring av koldioxid med 30–50 euro per ton koldioxidminskning fram till 2020.

Lagringskapaciteten i de länder som deltog i EU:s “Geo Capacity” kan vara 360 miljarder ton, i den bedömningen ingår att det finns en lagringskapacitet på 200 miljarder ton i havet utan Norge. I “Geo Capacity” deltog de flesta EU-länderna, men inte Sverige, Finland, Irland, Portugal, Österrike, Cypern och Malta. Utöver EU-länderna deltog även Norge, Bosnien-Hercegovina, Albanien och Makedonien. En försiktig uppskattning i Geo Capacity uppger däremot att kapaciteten kan vara 117 miljarder ton och 25 procent av lagringskapaciteten bedöms finnas i havet utanför Norge. De sammanlagda årliga utsläppen, i länderna som deltar i EU Geo Capacity,

från anläggningar med koldioxidutsläpp på över 100 000 ton per år är 1,9 miljarder ton. Det gör att det finns en lagringskapacitet för 62 års utsläpp från större anläggningar, förutsatt att de årliga utsläppen stannar på samma nivå (Europeiska kommissionen, 2009a, s. 19-21). I en studie (Upham & Roberts, 2011) med fokusgrupper från sex europeiska länder svarade 53 procent av de tillfrågade att de skulle föredra koldioxidlagring under havsbotten jämfört med landbaserad lagring. Undersökningar med fokusgrupper visar att det generellt finns en "signifikant oro relaterat till riskerna med koldioxidlagring".

4.4 Nordeuropa, Östersjöregionen och Sverige

4.4.1 Behov av CCS

Naturvårdsverket har i "Underlag till en färdplan för ett Sverige utan klimatutsläpp 2050" två olika målscenarier för hur ett Sverige utan nettoutsläpp av växthusgaser kan uppnås. I det ena scenariot minskar utsläppen från cirka 65 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år, vilket har varit nivån de senaste åren innan 2012 då rapporten gjordes, till tio miljoner ton koldioxidekvivalenter 2050. CCS inklusive bio-CCS står för cirka 20 miljoner ton av den minskningen. För de återstående tio miljoner ton koldioxidekvivalenterna skulle kompensering kunna ske genom ett ökat kolupptag i skog och mark eller handel med utsläppsätter. I det andra scenariot får koldioxidinfångning "inte få något genomslag varken på fossila eller biogena processutsläpp" och i det scenariot har Sverige år 2050 utsläpp motsvarande cirka 20 miljoner ton koldioxidekvivalenter. Nettoupptaget av koldioxid från skog och mark skulle kunna öka med 0-10 miljoner ton utan att det får "betydande negativa konsekvenser på andra samhällsmål". För att nå målet om inga nettoutsläpp av växthusgaser 2050 så föreslås i målscenario två att det kompensera för de återstående utsläppen på 10-20 miljoner ton koldioxidekvivalenter genom att använda den internationella marknaden för utsläppsätter. Det går inte att säga nu vilken väg som kommer att vara mest kostnadseffektiv (Naturvårdsverket, 2012, s. 23-31).

Utsläppen från punktkällorna i Östersjöregionen är cirka 300 miljoner ton årligen. Utifrån ett antagande om att 80 procent av koldioxiden avskiljs blir det 240 miljoner ton årligen. Det innebär sex miljarder ton över en 25-års period (2026-2050) (Energimyndigheten, 2011b, s. 138). De sammanlagda utsläppen från industrianläggningar med utsläpp på minst 100 000 ton fossil eller biogen koldioxid per år är i Sverige nästan 50 miljoner ton per år. Motsvarande siffra för Finland är nästan 55 miljoner ton koldioxid per år, för Danmark är den lite under 30 miljoner ton koldioxid, för Norge lite över 20 miljoner ton koldioxid och för Island under fem miljoner ton. Siffrorna är tagna från ett diagram och är därför inte exakta. En studie bedömer att minst 20 miljoner ton koldioxid från de nordiska länderna behöver lagras årligen runt år 2050 för att Norden ska vara klimatneutralt (Mazzetti et al, 2014). Koldioxidavskiljning bör lämpligast ske från större punktkällor (Gode et al, 2011, s. 5). För att förtydliga vilka anläggningar som kan vara aktuella listas de tio största

utsläppskällorna av fossilt eller biogen koldioxid i Sverige 2014 nedan (Naturvårdsverket).

Tabell 1. De 10 största utsläppskällorna av fossil eller biogen koldioxid i Sverige 2014.

1)	Luleå Kraftvärmeverk (Värmekraftverk, enbart fossil koldioxid) 2,06 miljoner ton
2)	Södra Cell Mönsterås (Kalmar Län, pappersmassa, nästan bara biogen koldioxid) 1,83 miljoner/ton per år
3)	Cementa, Slite (Gotland, Cement, nästan bara fossil koldioxid) 1,70 miljoner/ton år
4)	Metså Humus (Örnsköldsvik, Pappersmassa, nästan bara biogen koldioxid) 1,65 miljoner ton/år
5)	Preemraf Lysekil (olja och gasraffinaderi, bara fossil koldioxid) 1,63 miljoner ton/år
6)	Skutskärs (Älvkarleby, Uppsala Län, Pappersmassa, nästan bara biogen koldioxid) 1,59 miljoner ton/år
7)	SSAB Oxelösund (bara fossil koldioxid) 1,54 miljoner ton/år
8)	Korsnäsverken (Gävle, pappersmassa, nästan bara biogen koldioxid) 1,25 miljoner ton
9)	Södra Cell Värö (Varberg, pappersmassa, nästan bara biogen koldioxid) 1,23 miljoner ton
10)	Gruvöns bruk (Grums, pappersmassa, nästan bara biogen koldioxid) 1,22 miljoner ton år

Bäst förutsättningar i Sverige för koldioxidavskiljning har järn och stål, cement och kalk samt fossilenergiindustrin. Dessa industrier bedöms ha en "medel till hög mognadsgrad och stor potential". Raffinaderier för vätgasproduktion, pappers och massa samt bioenergi-industrin bedöms ha låg mognadsgrad, men stor potential. Gruvindustrin har däremot låg mognadsgrad och bedöms ha "tveksam tillämpbarhet" på grund av "låg koldioxidhalt och många utsläppspunkter (Gode et al. s. 7). Industrins direkta utsläpp står för 26 procent av de totala svenska utsläppen. Cirka hälften av industrins utsläpp är processutsläpp. Processutsläpp är "utsläpp som inte kommer från förbränning för energi utan från själva materialprocessen i

framställningen av t.ex. cement, reduktion av järnmalm, aluminium.” (Åhman et al, 2013, s. 6 & 18).

Förutsättningarna för CCS i Östersjöregionen är annorlunda jämfört med övriga Europa. Det beror på tre faktorer: Punktutsläppen i Östersjöregionen är relativt små, utsläppen i Östersjöregionen kommer i större utsträckning från processindustrin och i lägre utsträckning från energiproduktion och utsläppen i Östersjön är i högre grad än övriga Europa från biogena källor (Energimyndigheten, 2011b, s. 178-179).

Utsläppskällorna i Östersjöregionen finns samlade i 15 kluster när även utsläpp från biogena källor räknas in (Energimyndigheten, 2011b, s. 78-79).

4.4.2 Geologisk kapacitet

Om landbaserade akviferer i Europa inte kommer att användas för koldioxidlagring så kommer Nordsjön att bli centrum för CCS i Europa. En sådan utveckling bedöms dock inte ha någon större påverkan på den samlade koldioxidlagringen i Europa, enligt en studie. I studiens (Odenberger et al, 2013) ena scenario minskar den lagrade koldioxiden i Europa 2025-2050 från 9,5 till 7,8 miljarder ton om inte landbaserade akviferer används och i det andra scenariot minskar den lagrade koldioxiden från 15,4 till 14,5 miljarder ton. Enligt brittiska Energy Technologies Institute finns det en teoretisk lagringskapacitet på cirka 70 miljarder ton i brittiska Nordsjön. I den uppskattningen har dock ingen riskbedömning av lagringsplatserna gjorts (Gammer, 2015, s. 8). I en studie (Halland et al, 2013) bedöms lagringskapaciteten i akviferer norska Nordsjön vara 48 miljarder och lagringskapaciteten i gas och oljefält i norska Nordsjön vara 24 miljarder ton.

Potentiella lagringsplatser som kan innebära en konflikt med oljeutvinning är inte medräknade i studien. EU Geo Capacity anger att det kan finnas en lagringspotential på 200 miljarder ton i haven utanför Norge. I deras försiktiga bedömning anger de en lagringspotential på cirka 30 miljarder ton utanför Norge (Vangklide-Pedersen, 2009b, s. 157). För vissa av utsläppsklustren i Östersjöregionen är avståndet till lagringsplatserna i Norge långt, men för en del utsläppskluster är transport till Norge “kanske det attraktivaste alternativet.” (Energimyndigheten, 2011, s. 10).

Sveriges Geologiska Undersökning bedömer att det finns en lagringskapacitet på cirka 3,4 miljarder ton koldioxid i Sverige. Hälften av den lagringskapaciteten finns i sydöstra Östersjön och den andra hälften av lagringskapaciteten finns under land i Skåne och under havsbottnen utanför den skånska kusten. Bedömningen är en del av Nordiccs-projektet, som är ett nätverk av universitet, myndigheter och företag, som har som mål att bidra till utvecklingen av CCS i Norden. Den enskilda geologiska formationen som har störst lagringskapacitet är Faluddensandstenen i sydöstra Östersjön som, i den delen som är på svenskt territorium, bedöms ha en lagringskapacitet på 745 miljoner ton. Utöver Faluddensandstenen bedöms Viklausandstenen och Närsandstenen i sydöstra Östersjön ha en lagringskapacitet på 533 respektive 426 miljoner ton. Faluddensandstenen sträcker sig från Gotland till Polen och Baltikum, där den kallas för Deimenasandsten. Den delen av

Faludensandstenen som är på minst 800 meters djup och i svenskt territorium har en medeltjocklek på 35 meter och en utbredning på 13 500 kvadratkilometer. Området har undersökts genom borrhåll och seismisk data. Olika kornstorlekar, sortering, kvarts och lerhalt vittnar om att sandstenen avsattes i en kustnära miljö med strömmar, vågor och stormar. Avsättningen skedde under Kambrium, 542-488 miljoner år sedan (Erlström et al, 2011, s. 36 & 52 & Tarbuck et al, 2011, s. 613). Det finns även sandstenslager under Faluddensandstenen som kan bli aktuella för koldioxidlagring. Lagringspotentialen i dem anses vara "mycket svårbedömd", men de anses inte lika intressanta som Faluddensandstenen. Takbergarterna i området är alunskiffer, bentonitisk och lerig kalksten, mägersten och lersten (Erlström et al, 2011, s. 36-38). Enligt en rapport från Elforsk, som ägdes av Svensk Energi och Svenska Kraftnät, framtagen 2014 i samarbete med bland annat Energimyndigheten och flera privata företag så bör koldioxidinjektionen i den svenska delen av södra Östersjön begränsas till 0,5 miljoner ton/år per injektionshål, om totalt fem injektionshål används över en 50-års period. Det skulle ge en lagringskapacitet på 2,5 miljoner ton per år. Om fler injektionshål skulle användas över en 25-års period så kan den totala injektionshastigheten öka något (Nilsson, 2014, s. 3 & 17-18). Enligt Christopher Juhlin, professor i geofysik vid Uppsala Universitet och en av författarna till studien "A probabilistic assessment of the effective CO2 storage capacity within the Swedish sector of the Baltic Basin", så är mängden koldioxid som kan injiceras i de lämpligare områdena i Östersjön upp till cirka 0,5-1 miljon ton per år och borrhål. Om det skulle inrättas ett tiotal borrhål skulle det då vara möjligt att injicera uppåt 10-20 Mt/år sammanlagt.¹ I sydvästra Skåne och utanför kusten finns flera akviferer på 1200-2500 meters djup med potential för koldioxidlagring. De har ler, kalk och siltsten som takbergart. SGU gör bedömningen att "den teoretiskt möjliga lagringskapaciteten är relativt hög", men att det är "mycket svårt att bedöma områdets potential" (Erlström et al, 2011, s. 33-36). I södra Kattegatt, på gränsen mot dansk ekonomisk zon, bedömer SGU att det finns en möjlighet att lagra 100 miljoner ton koldioxid i två formationer där sandstenslager omväxlas med kalk, ler, silt och anhydritlager i den ena formationen och ler, silt och kollager i den andra formationen (Erlström et al, 2011, s. 32-33). Enligt Energimyndigheten (2011b, s. 9) är södra Östersjön och sydvästra Skåne sannolikt de mest lovande områdena för lagring av koldioxid inom svensk ekonomisk zon" av de tre svenska platserna med potential för koldioxidlagring.

Det kan finnas en kapacitet att lagra 16,7 miljarder ton koldioxid i danska akviferer, enligt EU Geo Capacity. Enligt den konservativa bedömningen i EU:s Geo Capacity finns det en lagringskapacitet på 2,8 miljarder ton i Danmark. Lagringskapaciteten i danska gas och oljefält kan vara 0,8 miljarder ton, men bedöms i den konservativa uppskattningen vara 0,2 miljarder ton. Men de flesta av gas och oljefälten i Danmark består av bergarten Krita, som kan vara olämplig för koldioxidlagring. Mer forskning behöver göras om detta (Vangkilde-Pedersen, 2009a, s. 153-155). Det bedöms finnas en kapacitet att lagra 60-330 miljarder ton koldioxid

¹ Källa: Mail från Christopher Juhlin. Publicerat med tillstånd från honom.

genom mineralisering på Island. När det gäller Island är dock uppskattningarna preliminära. Kapaciteten för koldioxidlagring i de fem nordiska länderna bedöms enligt en sammanställning vara 76 miljarder ton i akviferer, 29 miljarder ton i gas och oljefält och 62-333 miljarder ton genom lagring i mineraler (Anthonssen et al, 2013). Enligt EU Geo Capacity kan Polen ha en effektiv lagringskapacitet på 4,7 miljarder ton, men enligt den försiktiga bedömningen är lagringskapaciteten 2,9 miljarder ton (Vangklide-Pedersen, 2009a, s. 45-49). I landbaserade tyska akviferer bedöms det finnas en lagringskapacitet på cirka 20 miljarder ton (+/- 8 miljarder ton). Det kan finnas en kapacitet på 6,3 miljarder ton i tyska Nordsjön, men enligt den konservativa bedömningen är kapaciteten i tyska Nordsjön 2,9 miljarder ton. Det bedöms även finnas en lagringskapacitet på 2,2 miljarder ton i tyska naturgasfält, dessa är till stor del landbaserade (Vangklide-Pedersen, 2009a, s. 127-129).

Det faktum att det kan vara svårare att få acceptans hos befolkningen för koldioxidlagring på land än till havs kan vara ett skäl till att det kan bli aktuellt för Tyskland och Polen, trots potential att lagra koldioxid på land, att lagra koldioxid i Östersjön och Nordsjön (Energimyndigheten, 2011, s. 105). Om samtliga aktuella länders territorium i den sydöstra delen av Östersjön räknas in så bedöms det finnas en teoretisk kapacitet att lagra 16 miljarder ton koldioxid i sandstensformationerna. Utöver det bedöms det finnas en teoretisk kapacitet att lagra 1,9 miljarder ton i en "monocline" under havsbotten (Nilsson, 2014, s. 17-18). En "monocline" är en geologisk formation som uppstår när sedimentlagren böjs på grund av förkastningar i den underliggande berggrunden. En förkastning är en zon i berggrunden där en rörelse har ägt rum (Tarbuck et al, 2011, s. 290-296). Det bedöms även finnas en teoretisk lagringskapacitet på 743 miljarder ton i geologiska strukturer, till största del, utanför Lettland (Nilsson, 2014, s. 16-17). I rapporten står det att "risken för läckage genom sprickor i täckbergarterna av koldioxid till markytan och därmed till atmosfären, bedöms, som låg.", men ytterligare undersökningar av täckbergarten behöver göras. Om provborrning eller test-injektering av koldioxid ska ske så behövs "omfattande och platsspecifika undersökningar av möjliga miljökonsekvenser" (Nilsson, 2014).

4.4.3. Politiska och ekonomiska förutsättningar

Regeringen lade den 15 mars 2012 fram propositionen "Geologisk lagring av koldioxid" (2011/12:125) till riksdagen med motiveringen att genomföra CCS-direktivet. Förslaget innebär att "geologisk lagring av koldioxid kan bli möjlig inom svenskt territorium och kontinentalsockel." och att CCS ska kunna "prövas som miljöfarlig verksamhet enligt miljöbalken". Därför ändras en del lagar, exempelvis infördes ett undantag för koldioxidlagring i Miljöbalkens bestämmelser om förbud mot dumpning. Ändringarna gäller från den 4 januari 2013 (Miljödepartementet, 2012, s. 1 & 54-56). Förslaget tar inte "ställning till om avskiljning och lagring av koldioxid är en lämplig åtgärd för Sverige för att nå klimatmålen". Förslagen handlar endast om att skapa juridisk möjlighet att använda koldioxidlagring utifall att Sverige senare skulle

vilja använda sig av det (Miljödepartementet, 2012, s.1 & 97-98). Riksdagen sa ja till regeringens proposition (Miljö- och jordbruksutskottet, 2012).

I samband med propositionen behandlades även tre motioner om CCS. Sju socialdemokrater, däribland den klimat och miljöpolitiska talespersonen Matilda Ernkrans, skrev en motion där de ställer sig bakom det viktigaste i regeringens proposition. Utöver det föreslår de bland annat att "regeringen i Sverige och i EU bör verka för att CCS inte ska fungera som en förevändning för att minska ansträngningarna att satsa på förnybar energi." och att "regeringen bör verka för att EU:s regelverk anpassas så att det finns en ekonomisk stimulans för CCS även när det gäller anläggningar med koldioxidutsläpp som inte har fossilt ursprung" (Sveriges Riksdag, 2012a). Sverigedemokraterna Josef Fransson och Lars Isovaara föreslog i en motion att "geologisk lagring av koldioxid endast ska få ges för lagring under havsbotten med undantag för landbaserade småskaliga testanläggningar." (Sveriges Riksdag, 2012b). Fem vänsterpartister, däribland klimat och miljöpolitiska talespersonen Jens Holm, föreslog i en motion att "CCS-teknik endast ska användas för anläggningar för energiproduktion från biobränslen" och att "inga statliga subventioner ska ges som stöd för CCS-teknik" (Sveriges Riksdag, 2012c). Samtliga motioner avslogs (Sveriges Riksdag, 2012d & Miljö- och jordbruksutskottet, 2012). Vänsterpartiets klimat och miljöpolitiska talesperson Jens Holm har dock meddelat i en paneldebatt att Vänsterpartiet bytt åsikt om CCS från "att vara extremt kritiska till att se CCS som en möjlig lösning" (Svenskt Näringsliv, 2015)

Regeringen antog i januari 2014 ett nytt regelverk som "gör det möjligt att tillåta lagring av koldioxid under havets botten. Det tidigare förbudet mot geologisk lagring av koldioxid upphör därmed att gälla." Beslutet är en del i genomförandet av CCS-direktivet (Sveriges Radio, 2014).

Enligt Energimyndigheten är det avgörande att "det blir lönsamt att etablera tekniken i förhållande till att inte göra det" för att CCS ska slå igenom i stor skala i Europa. De skriver även att "På kort sikt kan utvecklingen skyndas på av olika former att riktade stöd men på längre sikt kommer priset för utsläppsrätter att vara avgörande såvida man inte kommer att införa regelverk som är tvingande gällande CCS", ett sådant regelverk anses dock för tillfället inte vara sannolikt. Det krävs att priset på utsläppsrätter stiger rejält för att CCS ska bli lönsamt utan andra ekonomiska incitament (Energimyndigheten, 2011, s.177). Fossila koldioxidutsläpp som undviks genom CCS räknas som icke-utsläppt koldioxid i det europeiska systemet för handel med utsläppsrätter. Det gör att det finns ett ekonomiskt incitament, om än för svagt idag, för koldioxidlagring från fossila bränslen. Koldioxid från förbränning av biomassa tillför ingen ny koldioxid till atmosfären och det behövs inga utsläppsrätter för koldioxidutsläpp från biomassa. Det gör att det idag saknas ekonomiska incitament i Europa för att lagra koldioxid från biomassa (Energimyndigheten, 2011, s. 37-42 & Nilsson, 2014, s. 39).

Om CCS kan användas för samtliga större utsläppskällor i ett kluster ökar sannolikheten att CCS i Östersjöregionen kan bli lönsamt. På kontinenten finns det inte samma behov av att koppla samman utsläppen i och med att koncentrationen av utsläppskällor ofta är hög. Bristen på ekonomiska incitament för CCS från de

branscher vars koldioxidutsläpp har biogena källor, exempelvis utsläpp från massa och pappers-industrin, kan fördröja införandet av CCS för andra branscher i regionen. Det gör att Östersjöregionen sannolikt inte kommer att vara den regionen i Europa som leder utvecklingen inom CCS. Om CCS ska införas i Östersjöregionen 2035 så behöver ekonomiska incitament för CCS från biogena utsläpp införas i god tid innan så att industrierna hinner förbereda sig. Energimyndigheten rekommenderar därför att en utredning om ekonomiska incitament för CCS från biogena källor och möjligheten att koppla det till systemet med utsläppsrätter genomförs (Energimyndigheten, 2011, s. 173-174).

Om CCS ska vara utbyggt i stor skala i Sverige runt år 2045, så att processindustrin då kan bli klimatneutral, krävs det att en utbyggnad påbörjas runt år 2035 och att ett demonstrationsprojekt påbörjas runt år 2025. Det kräver i sin tur att det införs en nationell strategi för CCS, att förutsättningarna för en demonstrationsanläggning utreds och att ett sammanhållet forskningsprogram för perioden 2016-2020 tas fram. Det är den preliminära slutsatsen i en rapport som kommer att utges av Energiforsk i samarbete med svensk industri och akademi. Rapportens preliminära slutsatser presenterades i slutet av maj 2015, på ett seminarium arrangerat av Svenskt Näringsliv och Miljömålsberedningen (Nilsson, 2015).

Enligt Nordiccs- studien kan Norden bli en föregångsregion inom CCS. Anledningarna till det är kombinationen av stora biogena koldioxidutsläpp i Sverige och Finland, punktutsläpp från exempelvis stål och cement-industrin, förekomsten av gas och oljefält samt den stora lagringspotentialen i kusten utanför Norge och Danmark. För att sänka kostnaderna för införandet av CCS föreslås att koldioxid från gasutvinning lagras genom att användas till oljeproduktion med hjälp av tekniken för CO₂-EOR. Enligt studien har Skagerrak-regionen goda förutsättningar för CCS. I regionen finns både danska, norska och svenska utsläppskällor och potential för koldioxidlagring (Mazzetti et al, 2014). Enligt en studie (Onarheim et al, 2015) finns det en risk, så länge det inte finns något internationella avtal om att minska växthusgasutsläppen, att införandet av CCS i Norden leder till att den nordiska industrin får minskad konkurrenskraft och att produktion flyttas till länder där priset på utsläpp är lägre. Norge är för tillfället det enda land i Norden som bedöms ha ekonomiska förutsättningar för CCS. Det framtida priset på koldioxid bedöms bli för lågt för att CCS ska införas.

En rapport, som beställdes av norska olje och energidepartementet, om hur Norge kan ha en fullskalig demonstrationsanläggning innan 2020 presenterades nyligen. Rapporten utgår från koldioxidavskiljning från landbaserade anläggningar och menar att transport med skepp är det effektivaste sättet att transportera koldioxiden. Koldioxiden skulle kunna lagras i Sleipnerområdet där Statoil idag lagrar koldioxid. Dock föreslås att lagringen i så fall skulle ske i en del av området som är avskilt från den del som Statoil använder. Ett annat alternativ är att använda koldioxiden till utvinning enligt EOR-metoden (Regjeringen, 2015). Brittiska Energy Technologies Institute menar i en rapport att CCS har potentialen att spara miljarder pund åt Storbritannien. För det krävs att cirka 30 GWh med CCS är utbyggt runt år

2030. Det bedöms som möjligt och skulle innebära att cirka 50 miljoner ton lagras per år runt 2003 (Energy Technologies Institute, 2015)

4.5 Risker och nackdelar med CCS

Det krävs mer bränsle per producerad energienhet i ett kraftverk med CCS jämfört med ett kraftverk utan CCS. Den främsta anledningen till att det krävs mer bränsletillförsel i ett CCS-kraftverk är att det krävs energi för koldioxidavskiljandet, men det krävs även energi för komprimeringen av koldioxiden och för pumpar och fläktar. Koldioxidavskiljandet står för cirka 60 procent av det ökade energibehovet, komprimering av koldioxiden står för cirka 30 procent av det ökade energibehovet, pumpar och fläktar med mera står för cirka 10 procent av det ökade energibehovet (Rubin et al, 2012). Enligt en sammanställning i en metastudie (Thorbjörnsson et al, 2014) så är den genomsnittliga bedömningen att det krävs 18,9 procent mer energitillförsel, jämfört med utan CCS, för att ett kraftverk med CCS-tekniken "pre-combustion" ska producera samma mängd energi. Motsvarande siffror för ett CCS-kraftverk med "oxy-fuel" och "post-combustion" är 21,4 respektive 24,8 procent mer energi. Totalt sett kan det krävas upp till 31 procent mer kolkonsumtion och kolbrytning i scenarier där CCS används jämfört med scenarier där CCS inte används. Enligt en annan metastudie (Corsten et al, 2013) så krävs det 6-8 procent mer energi för att ett kraftverk med CCS-tekniken "pre-combustion" (gäller både kol och gas) ska producera samma mängd energi som ett kraftverk utan CCS. Motsvarande bedömning i den studien för ett CCS-kraftverk med "post-combustion" är 4-18 procent. Kolbrytning bidrar bland annat till olyckor, påverkan på vattnet i närmiljön, luftföroreningar och avfall (Bian et al, 2010). Trots att kraftverk med CCS kräver mer tillförsel av energi så minskar CCS-tekniken ändå klimatpåverkan från ett fossileldat kraftverk med 47-97 procent, ur ett livscykelperspektiv, jämfört med om CCS-tekniken inte hade använts. "Oxy-fuel"-tekniken bedöms minska klimatpåverkan med 76-97 procent och är den CCS-teknik som bedöms ha minst negativ påverkan på miljön. Med minskning av klimatpåverkan menas reduktion i koldioxidekvivalenter (Corsten et al, 2013). Att höja kolkraftverkets effektivitet motverkar ett ökat kolbehov, det kan dock kräva stora investeringar i forskning och utveckling (Thorbjörnsson et al, 2014). En risk med CCS från fossilenergi är att det kan leda till en inlåsning i fossilenergi, om inte bio-CCS använts i första hand (Vergragt et al, 2011).

Användning av CCS reducerar även svaveldioxidutsläpp. Men i en del CCS-tekniker kan utsläppen av kväveoxider och ammoniak öka (Koornneef et al, 2012: b). Dikväveoxid, även kallat lustgas, är en växthusgas som även bidrar till nedbrytningen av ozonskiktet. Kvävedioxid anses som en av de allvarligaste luftföroreningarna (Elding, 2014b; Bogren et al, 2014, s. 139-140). Ammoniak bidrar till markförsurning och övergödning (Elding, 2015a).

Även fossilenergi med CCS orsakar växthusgasutsläpp. Enligt en sammanställning från IPCC bedöms kol med CCS, ur ett livscykelperspektiv, orsaka växthusgasutsläpp motsvarande 70-290 gram CO₂/kWh. Motsvarande siffra för gas

med CCS är 120-170 gCO₂/kWh. Dessa bedömning bygger till största del på antagande att 90 procent av koldioxiden i förbränningsgasen infångas. Kol utan CCS orsakar, ur ett livscykelperspektiv, växthusgaser motsvarande 710-950 gCO₂/kWh och naturgas 410-650 gCO₂/kWh. Motsvarande siffror för andra energislag är: solenergi 9-180 gCO₂/kWh, kärnkraft 4-110 gCO₂/kWh, vindenergi 7-56 gCO₂/kWh och vattenkraft 70 gCO₂/kWh. Utsläppen från vattenkraft kan dock variera mycket (IPCC, 2014b, s. 538-541).

Även bio-CCS kan få olika konsekvenser. Om biobränsle odlas på fel mark så kan det leda till ökade koldioxidutsläpp. När skogar och slätter eldas upp och omvandlas till jordbruksmark så frigörs koldioxid. De utsläppen av koldioxid kompenseras för genom att det odlade biobränslet ersätter fossila bränslen. Den tid det tar att spara lika mycket koldioxid som förlorades i samband med markomvandlingen kallas "carbon payback times". När odling av biobränsle sker på mark som tidigare var tropisk regnskog är "carbon payback time" 30-300 år beroende på bland annat val av gröda och hur produktionen har skett (Gibbs et al, 2008).

Förutom risker vid själva energiproduktionen och förbränningen finns det risker kopplade till transporten av koldioxid och den geologiska lagringen. Läckage av koldioxid från geologiska formationer kan ske på i huvudsak följande sätt: genom att koldioxidens höga tryck gör att det läcker genom porsystemet i den ovanliggande takbergarten, genom öppningar takbergarten, genom frakturer och förkastningar eller genom mänskligt skapade flyktvägar som exempelvis dåligt stängda borrhål (IPCC, 2005, s. 242-243).

En långvarig exponering för en koldioxidhalt på 3 procent kan leda till koncentration av kalcium i blodet som kan vara negativ (Rice, 2004). Enligt Vårdguiden (2013) ökar förhöjd nivå av kalcium i blodet "i första hand risken för njursten. Men det kan också ge symtom som muskelsvaghet, högt blodtryck, skört skelett, trötthet och psykiska besvär." Vid hög koldioxidnivå så kan undanträngningen av syre leda till kvävning om syrehalten blir under 16 procent (Rice, 2004)

Ett exempel på att koldioxid kan vara farligt vid högre koncentrationer är naturkatastrofen 1986 i kratersjön Nyos i Kamerun. 1700 personer dog vid ett plötsligt utsläpp av koldioxid. Den troliga orsaken är att koldioxid med vulkaniskt ursprung hade samlats djupt i sjön under flera årtionden och sedan frigjorts genom en störning, som exempelvis ett landskred (Decker & Decker, 2015). Denna typ av utsläpp är dock inte representativ för det läckage som kan uppstå från CCS (IPCC, 2005, s. 211). Risken att en farlig koldioxidhalt uppstår är högre i miljöer som sänkor i landskapet, byggnader eller grottor (IPCC, 2005, s. 246).

I IPCC:s rapport om CCS från 2005 görs bedömningen att "det är väldigt sannolikt att mer än 99 procent av den lagrade koldioxiden bevaras under de första 100 åren" och att "det är sannolikt att mer än 99 procent av den lagrade koldioxiden bevaras under de första 1000 åren" för koldioxidlagring i stor skala. Detta förutsatt att platserna för lagringen är "väl utvalda, designade, hanterade och övervakade" (IPCC, 2005, s. 246). I en studie (Torvanger et al. 2012) som IPCC hänvisar till görs

bedömningen att "endast under de mest olyckliga omständigheterna kan så mycket koldioxid läcka ut att det skulle kunna hota möjligheten att nå ett mål om att den globala uppvärmningen inte ska överstiga 2,5 grader Celsius". Efter 14 respektive två års erfarenhet av koldioxidlagring från Sleipner och Snohvit i Norge finns det inga tecken på läckage. Ett "genombrott" av koldioxid upptäcktes vid ett av injektionshålen i lagringsplatsen In Salah i Algeriet. Åtgärder har därefter vidtagits för att undvika framtida läckage från injektionshålet. Den sammanlagda bedömningen från en studie (Eiken et al, 2010) som utvärderar erfarenheterna av koldioxidlagring i Sleipner, Snohvit och In Salah är ändå att koldioxidlagring är tekniskt genomförbart och att tekniken för övervaka att den lagrade koldioxiden är långsiktigt säker och fungerar effektivt.

I en studie (Ha-Duong et al, 2013) beräknas att CCS väntas leda till mellan 150-338 dödsfall per år om 3,67 miljarder ton koldioxidutsläpp undviks år 2050 genom koldioxidlagring. Kolbrytning kopplat till CCS beräknas komma att orsaka 196-81 dödsfall per år och är därmed den enskilt farligaste aktiviteten kopplad till CCS. Järnvägstransporter kopplade till CCS beräknas komma att orsaka 81-56 dödsfall per år och är därmed den näst farligaste aktiviteten kopplat till CCS. Beräkningen utgår ifrån antagandet att den globala kolbrytningen år 2050 har samma säkerhetsstandard som kolbrytning i USA idag vilket ger 0,04-0,09 dödsfall per Mt kol. Läckage från den lagrade koldioxiden beräknas leda till 0,2-0,9 dödsfall per år. Den beräkningen utgår ifrån att det kommer att finnas 450 lagringsplatser under land med en befolkningstäthet på 20 personer/kvadratmeter.

World Health Organisation bedömer att klimatförändringarna kommer att orsaka ytterligare 250 000 dödsfall per år mellan 2030-2050. Bedömningen bygger på ett "medel-högt" utsläppscenario (Hales et al. 2014)

Även andra energislag har olyckor som leder till dödsfall. De energislagen som hittills lett till flest dödsfall per GW, enligt en sammanställning från IPCC, är kärnkraft med RBMK-reaktorer (cirka 9-32 dödsfall per GWe/år), följt av vattenkraft i icke OECD-länder (cirka 7 dödsfall per GWe/år) och kolkraft i Kina (cirka 6 dödsfall GWe/år). Olja i icke OECD-länder har cirka 1 dödsfall GWe/år. Cirka 0,06- 0,1 dödsfall GW e/år står kol och olja i OECD och EU, vattenkraft i EU och naturgas för. Övrig förnyelsebar energi och kärnkraft har cirka eller under 0,01 dödsfall GW e/år. Sammanställningen är gjord innan Fukushimaolyckan. Enligt sammanställningen har kolkraften totalt orsakat cirka 1000 dödsfall (IPCC, 2011, s. 746). Luftföroreningar från olika former av förbränningar beräknas orsaka cirka 3,2 miljoner dödsfall per år. I IPCC:s senaste rapport sammanfattar de att kol, olja och vattenkraft i icke OECD-länder har mer än 20 dödsfall per PW, kol och olja i OECD-länder och naturgas generellt har cirka 10 dödsfall per PW samt att förnybart och kärnkraft i OECD-länder har cirka 2 dödsfall per PW (IPCC, 2014b, s. 547-550). I samband med informationssökandet för arbetet har inga jämförelsebara mått för energi med CCS hittats.

En annan studie (Shaffer, 2010) bedömer att lagrad koldioxid måste bevaras i tiotusentals år för att orsaka en försenad men stark global uppvärmning. För att ett liknande resultat ska uppnås med CCS jämfört med scenarier med låga utsläpp utan

CCS så bör inte mer än en procent av den lagrade koldioxiden läcka ut under 1000 år. Slutsatsen i studien är att "med stora minskade utsläpp i vår tid så behöver vi inte lagra lika mycket koldioxid och vi kan då minska oväntade konsekvenser och bördor från läckage för kommande generationer". Lenzen (2010) beräknar att om 1 procent av den lagrade koldioxiden skulle läcka ut årligen så skulle det leda till en temperaturökning på 0,4 grader. Uppvärmningen på grund av den läckta koldioxiden skulle då upphöra efter cirka 1000 år på grund av det relativt snabba läckaget. Beräkningen utgår från att 900 miljarder ton koldioxid kan lagras totalt.

Grundvatten som kommer i kontakt med koldioxid blir surare och det kan i sin tur frigöra olika metaller som påverkar grundvattnets kvalitet (Wang, 2004). Det finns ett tydligt samband mellan koldioxidhalten och syrehalten i jord. En hög koldioxidhalt i jorden kan minska växternas tillväxt. Ett test visade att böror inte överlever om de utsätts för en koldioxidkoncentration i jorden på över 50 procent. Resultatet visar att läckage från koldioxidlagring kan vara dödligt för en del växter (Al-Trabouls et al, 2012).

Få mänskligt orsakade jordbävningar har observerats vid platser för koldioxidlagring. Men antalet platser är hittills få och den lagrade volymen liten. Risker för jordbävningar kopplat till koldioxidlagring är troligen liten. Men större jordbävningar som påverkar allmänheten kan ske. Riskerna kan minska genom noggrant urval av lagringsplatser och rätt hantering (Nicol et al, 2013).

Det finns potentiella risker med transport av koldioxid. Om nivån av fritt vatten i ledningsrören blir för hög kan små håll uppstå, på grund av att kolsyra bildas, och läckage uppstår på grund av korrosion. Även koncentrationen av bland annat svavelväte måste hållas under vissa nivåer. Rörledningen kan designas så att de olika delarna av ledningen kan isoleras från varandra vid ett läckage. Då kan det undvikas att stora mängder koldioxid släpps ut vid ett eventuellt läckage (Rackley, 2010, s. 331-335). I USA fanns det år 2004 2400 km rörledningar för transport av koldioxid. Koldioxiden som transporteras kommer ofta från naturliga lager av koldioxid och transporteras till oljefält för att där användas i oljeutvinningen enligt metoden för CO₂-EOR. Erfarenheterna från transport av koldioxid för CO₂-EOR är användbara vid bedömningen av konsekvenser av transport av koldioxid som en del i CCS. Statistiken visar att rörledningar för transport av koldioxid är säkrare än rörledningar för transport av naturgas. Därmed borde ledningar för transport av koldioxid kunna accepteras, om allmänheten accepterat stora nätverk av ledningar för transport av naturgas (Gale & Davison, 2004)

IPCC hänvisar i en rapport från 2011 till en studie från 2006 där en jämförelse mellan externa kostnader för fossil och förnyelsebar elproduktion. Studien som IPCC hänvisar till är på tyska och därför hänvisas här till IPCC:s sammanfattning av studien. I studien jämförs externa kostnader för klimatförändringar, hälsa, ekosystem, materiella skador, jordbruk, stora olyckor, spridning, energisäkerhet och geopolitik. Resultatet är att elproduktion från kol bedöms ha en extern kostnad på minst 7 US cent/kWh och elproduktion från naturgas bedöms ha en extern kostnad på minst 3,6 US cent/kWh. Förnyelsebar elproduktion bedöms ha en positiv extern effekt. Studien är gjord på centraleuropeiska förhållanden (IPCC, 2011, s. 855).

Motsvarande uppgifter kring CCS har inte hittats i samband med informationssökandet.

5. Diskussion

Ambitionen har varit att få en så bra och rättvisande överblick som möjligt över forskningsläget i de frågor som tas upp i frågeställningen. Därför har rapporter från IPCC, som sammanfattar forskning inom aktuella områden, och relevanta myndigheter använts i arbetet. För att komplettera den informationen har sökningar efter relevanta studier gjorts framförallt i ScienceDirect. Studier som utifrån rubrik och sammanfattning har ansetts vara aktuella för att besvara frågeställningen har används i arbetet. Långt ifrån alla studier som på något sätt handlar om CCS har analyserats i detta arbete. Även om ambitionen har varit att få en så representativ bild av forskningsläget som möjligt så finns det ingen garanti för att det inte kan finnas relevanta studier med andra resultat än de som har hittats i samband med detta arbete. Arbetets frågeställningar sträcker sig över ett relativt brett ämnesområde. Samtliga ämnen som tas upp i arbetet kan fördjupas betydligt mer än vad som gjorts i detta arbete.

CCS är enligt de flesta scenarier nödvändigt för att uppnå tvågradersmålet. Enligt IPCC kan inte forskningen avgöra vad som är en oacceptabel nivå av klimatförändringar, det är i slutändan en subjektiv bedömning. Men om en hög risk associerad med extrema väderhändelser samt unika och hotade system ska undvikas så bör den globala uppvärmningen understiga 1,5 grader jämfört med innan industrialismen. Det finns forskning som menar att det är möjligt att begränsa den globala uppvärmningen till 1,5 grader utan CCS. Men IPCC sammanfattande bedömning är att om den globala uppvärmningen ska begränsas till 1,5 grader så behöver alla tekniker som minskar utsläppen användas. Den bedömningen väger här tyngre än enskilda studier. Även om vi inte vet hur världens energianvändning kommer att se ut i framtiden så vore det orimligt att inte vara öppen för möjligheten att en majoritet av scenarierna kan komma att få rätt. Därmed är det riskabelt att avfärda CCS som ett verktyg för att undvika en temperaturökning på 1,5 eller två grader jämfört med innan industrialismen.

En intressant aspekt med CCS är möjligheten att ta ned koldioxid från atmosfären genom bio-CCS. Enligt IPCC behövs negativa utsläpp, i de flesta scenarier, från bio-CCS och skogsplantering för att tvågradersmålet ska kunna nås. Bio-CCS skulle kunna ta ned 10,4 miljarder ton koldioxid årligen runt år 2050. Det motsvarar ungefär en femtedel av utsläppen av koldioxidekvivalenter år 2010. Hur den bio-energi som används för bio-CCS framställs har en stor betydelse för den sammanlagda klimat och miljöeffekten av bio-CCS. En djupare jämförelse mellan bio-CCS och andra sätt att ta ned koldioxidhalten i atmosfären har inte gjorts i denna uppsats.

Samtidigt bedömer IPCC att CCS från fossila bränslen kommer att vara vanligare än bio-CCS runt år 2050. CCS-tekniken gör inte fossilenergi till ett problemfritt energislag. Dels leder CCS till att ännu mer energi måste användas per

producerad GWh. Det krävs alltså mer kolbrytning, med tillhörande konsekvenser, för att få ut samma mängd energi. Mer kolbrytning leder till fler olyckor. Kolbrytning är den främsta orsaken till att CCS väntas leda till mellan 150-338 dödsfall per år om 3,67 miljarder ton koldioxidutsläpp undviks år 2050 genom koldioxidlagring. Förutom olyckor leder kolbrytning även till en påverkan på luft och vatten. I och med att kolbrytningen är den aktiviteten i CCS som orsakar flest dödsfall så skulle det kunna vara så att bio-CCS har färre dödsfall. I samband med informationssökningen har ingen studie om dödsfall kopplat till bio-CCS hittats. CCS från fossila bränslen kan även bidra till att utsläpp av kväveoxider och ammoniak ökar. All koldioxid från anläggningarna infångas inte. IPCC:s bedömningar av koldioxidutsläppen från CCS ur ett livscykelperspektiv bygger på ett antagande om att 90 procent av koldioxiden infångas. Energimyndighetens bedömning om CCS i Östersjöregionen bygger på ett antagande om att 80 procent av koldioxiden infångas.

Även med CCS finns det skäl att verka för en minskad mängd fossilenergi. I IEA:s scenario där koldioxidhalten begränsas till 450 ppm minskar både volymen och andelen fossilenergi. Men i scenariot där koldioxidhalten begränsas till 450 ppm, i det scenariot har CCS har en viktig roll, står el från fossila bränslen ändå för 59 procent av världens elförsörjning. En hel del talar alltså för att fossilenergi, som idag står för cirka 80 procent av världens energi, kommer att ha en betydande roll även under de kommande decennierna. Men även om ett kraftverk med CCS kräver mer bränsletillförsel så minskar CCS-tekniken klimatpåverkan, ur ett livscykelperspektiv, från ett fossileldat kraftverk med 47-97 procent jämfört med om CCS-tekniken inte hade använts. Fossilenergi med CCS är ur klimatsynpunkt betydligt bättre än fossilenergi utan CCS. Det borde vara möjligt att samtidigt minska volymen fossilenergi och göra den återstående fossilenergin mindre miljöskadlig.

Det finns risker för läckage från koldioxidlagring. IPCC bedömer det som att "det är väldigt sannolikt att mer än 99 procent av den lagrade koldioxiden bevaras under de första 100 åren" och att "det är sannolikt att mer än 99 procent av den lagrade koldioxiden bevaras under de första 1000 åren". En studie (Lentzen, 2010) menar att om en procent av den lagrade koldioxiden skulle läcka ut årligen så skulle det leda till en temperaturökning på 0,4 grader, beräkningen utgår från att 900 miljarder ton koldioxid kan lagras totalt. Även om "ett genombrott" av koldioxid upptäcktes vid ett injektionshål i lagringsplatsen In Salah så har det inte kunnat hittas någon information om att det skulle ha varit en allvarlig incident. Läckage från lagrad koldioxid väntas leda till 0,2-0,9 dödsfall per år. Kolbrytning är en klart farligare lagrad läckage från lagrad koldioxid. Klimatförändringarna bedöms orsaka ytterligare 250 000 dödsfall per år mellan 2030-2050 vid ett "medel-högt" utsläppscenario. Eftersom CCS, enligt en majoritet av forskningen, behövs för att tvågradersmålet ska uppnå så är risken med att inte använda CCS ur klimatsynpunkt vara större än risken med att använda CCS.

En mer fördjupad jämförelse mellan CCS från fossila bränslen och andra energislag skulle kräva att de mått för dödsfall per PW installerad kapacitet energi och den externa kostnaden per kWh som tagits fram för andra energislag även togs fram för CCS från fossila bränslen. Det skulle kunna vara ett ämne där det finns behov av

ytterligare forskning, förutsatt att det inte redan finns någon studier på detta som har inte har hittats i samband med detta arbete. På grund av att det hittills inte finns lika stor erfarenhet av energiproduktion med CCS som det finns av annan energiproduktion så kan en sådan jämförelse kan behöva utgå ifrån beräknade framtida konsekvenser av CCS.

Det kanske största hindret för CCS är de ekonomiska förutsättningarna. Avgörande för utvecklingen av CCS är att det finns ett pris på koldioxidutsläpp som gör det dyrare att släppa ut än att lagra koldioxid. Vid ett tillräckligt högt koldioxidpris minskar risken att volymen fossilenergi utan CCS växer. Koldioxidpriset i EU 2030 bedöms vara för lågt för att det ska vara lönsamt att investera i CCS. Det i sig kan vara olyckligt eftersom det bedöms bli dyrare utan CCS att begränsa koldioxidhalten i atmosfären till relativt låga koncentrationer. I en studie föreslås att EU ska satsa på att finansiera CCS i länder där kostnaden är lägre. Den möjligheten finns i Clean Development Mechanism sedan 2011, men enligt en studie från 2013 har ingen ansökan kommit in.

Tekniken för koldioxidavskiljning, transport och lagring finns idag. Men ju effektivare och billigare tekniken blir desto större möjlighet att den blir ekonomisk lönsam.

Kombinationen av en stor andel biogena koldioxidutsläpp, en hög andel processutsläpp från industrin som är svåra att få bort genom att byta energislag, mål om klimatneutralitet, egna lagringsplatser och ett grannland med pågående CCS-verksamhet gör att CCS och i synnerhet bio-CCS kan vara ett intressant alternativ för Sverige. Sverige har dessutom världens högsta koldioxidskatt. De största nackdelarna med CCS är de konsekvenser av fossilenergianvändning som inte försvinner för att koldioxiden lagras. Eftersom de flesta stora utsläppen i Sverige är från biogena källor eller processutsläpp i industrin så handlar CCS i Sverige, till skillnad från i många andra länder, inte i första hand om fossilenergi. Det innebär att de nackdelar som är kopplat till CCS från fossilenergi därmed inte är lika aktuella i Sverige. Den svenska koldioxidskatten på utsläpp från industrin är idag ungefär på den nivå som krävs för att CCS i EU ska vara lönsamt. Men bristen på ekonomiska incitament för bio-CCS, exempelvis utsläpp från pappers och massa-industrin, kan fördröja införandet av CCS i andra branscher eftersom infrastrukturen för CCS behöver samordnas mellan närliggande utsläppspunkter. Om det på grund av avsaknad av ekonomiska incitament för bio-CCS inte är lönsamt att lagra koldioxiden från en del utsläppspunkter så kan det vara svårt att få infrastruktur för CCS att bli lönsamt i den regionen i helhet. Enligt Energiforsk behövs det en demonstrationsanläggning för CCS kring år 2025 för att CCS ska vara igång i stor skala i Sverige runt 2045. För att en demonstrationsanläggning ska kunna öppnas runt 2025 krävs det en nationell strategi för CCS, att förutsättningarna för en demonstrationsanläggning utreds och att ett sammanhållet forskningsprogram för perioden 2016-2020 tas fram. Enligt Energimyndigheten behövs antingen CCS eller handel med utsläppsrätter för att Sverige ska uppnå klimatneutralitet. Om CCS eller handel med utsläppsrätter är det bästa och mest kostnadseffektiva alternativet har inte undersökts i detta arbete. Ett förslag på CCS i Sverige skulle klassas som

miljöfarlig verksamhet och prövas enligt Miljöbalken. En möjlighet som föreslagits är att EU skulle finansiera CCS i länder där kostnaden för CCS är lägre, exempelvis Kina. Den frågan har inte fördjupats i detta arbete.

Tabell 2. Sammanfattande resultat

	Mål om utsläppsminskning till 2050	Behov av CCS?	Mängd lagrad koldioxid (miljarder ton) i de scenarier där målen nås.	Geologisk kapacitet (miljarder ton)
Globalt (2 grader)	40-70 % jämfört med 2010	Ja (Enligt en majoritet av forskningen)	1340 totalt (genomsnittlig bedömning)	3900 (praktisk kapacitet)
Globalt (1,5 grader)	70-95 % jämfört med 2010	Ja	1670 totalt (genomsnittlig bedömning)	3900 (praktisk kapacitet)
Europa	80-95 % jämfört med 1990	Ja	7,8–15,4 år 2025-2050 (endast elsektorn i EU)	Minst 117 (försiktig bedömning)
Sverige	100 % (Nettoutsläpp)	Ja (Om målet ej ska nås med utsläppshandel)	Minst 10 miljoner ton per år	3,4

Tabellen ovan är en övergripande och lite förenklad bild av behovet och kapaciteten kring koldioxidlagring och ger en ungefärlig bild av storleksordningen. De olika uppgifterna i tabellen är inte alltid helt jämförelsebara med varandra. Exempelvis så anges uppgifterna om mängden lagrad koldioxid som behövs för att uppnå klimatmålen i Europas fall som mängden mellan 2025-2050, men mängden lagrad koldioxid som behövs för att uppnå de globala klimatmålen anges som total mängd oberoende av tidsperiod. Det beror på att helt jämförelsebara mått inte alltid har kunnat hittas. Ett annat sådant exempel är att måttet för mängden lagrad koldioxid som behövs för att uppnå klimatmålen gäller för EU:s del, men den geologiska kapaciteten är hämtat från en studie som även innefattar en del europeiska länder som inte är med i EU. En annan skillnad är att slutsatserna bygger på olika många studier. Det har varit betydligt enklare att hitta forskning om CCS och de globala

klimatmålen än om CCS och de europeiska och svenska klimatomålen. Informationen om EU, CCS och klimatomål är hämtad från EU och en ytterligare studie, information om Sverige, klimatomål och CCS är hämtad från Naturvårdsverkets rapport. Information om de globala klimatomålen och CCS är hämtad från betydligt fler studier. För att den globala uppvärmningen ska hållas under 1,5 grader behöver koldioxidhalten begränsas till 430 ppm, enligt IPCC. Det är svårt att hitta studier som har tittat på hur mycket koldioxid som behöver lagras för att koldioxidhalten inte ska överstiga 430 ppm år 2100. Uppgiften om hur mycket koldioxid som behöver lagras för att den globala uppvärmningen inte ska överstiga 1,5 grader baseras på den genomsnittliga bedömningen av hur mycket koldioxid som lagras i scenarier där koldioxidhalten år 2100 är mellan 350-400 ppm, alltså klart under vad som krävs för att för att begränsa den globala uppvärmningen till 1,5 grader. Den generella trenden är att det krävs mer lagrad koldioxid ju mer koldioxidhalten ska begränsas, ett undantag är att metastudien som uppgifterna är tagna ifrån bedömer att det krävs något mer lagrad koldioxid för att koldioxidhalten ska begränsas till 450 ppm än 400 ppm. Dock finns det två studier i metastudien, som undersöker hur mycket koldioxid som behöver lagras för att koldioxidhalten ska vara 450,550 och 650 ppm och som anger ett betydligt större behov av lagrad koldioxid jämfört med övriga studier. Även i dessa studier anges att en större mängd koldioxid behöver lagras ju lägre koldioxidhalten ska vara, dessa studier stannar dock på 450 ppm. Det kan dra upp snittet för bedömningen om hur mycket koldioxid som behöver lagras för 450 ppm i jämförelse med 400 ppm. Bedömningen om mängden koldioxid som behöver lagras för att koldioxidhalten ska begränsas till 450 ppm år 2100 baseras på den genomsnittliga bedömningen om hur mycket koldioxid som lagras i de scenarier där koldioxidhalten begränsas till mellan 400-500 ppm år 2100.

Det är inte helt tydligt vad Sverige har för klimatomål för 2050. Den tidigare regeringen angav i samband med beslut om en utredning att regeringens långsiktiga vision är att "Sverige år 2050 inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser i atmosfären". På regeringens hemsida står det nu inget om klimatomål för 2050. Men i och med att ingen annan information har hittats så utgår detta arbete från att Sverige klimatomål för 2050 är att "Sverige år 2050 inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser i atmosfären" En utredning om hur visionen om att Sverige inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser ska uppnås ska presenteras den 2 november 2015. Det är möjligt att den utredningen kommer att göra Naturvårdsverkets "Underlag till en färdplan för ett Sverige utan klimatutsläpp 2050" från 2012, som delen i detta arbete om Sveriges klimatomål och CCS baseras på, inaktuell. Men även med dessa brister så ger tabellen ovan en ungefärlig bedömning av storleksordningen.

6. Slutsatser

CCS är enligt en majoritet av forskningen nödvändigt för att uppnå tvågradersmålet. Om den globala uppvärmningen ska begränsas till 1,5 grader behöver alla tekniker som minskar utsläppen användas. CCS behövs för att industrisektorn i EU ska nå EU:s klimatmål. CCS behövs enligt de flesta scenarier även för att energisektorn ska uppnå EU:s klimatmål. Cirka 10 miljoner ton av de årliga svenska utsläppen runt år 2050 behöver lagras om Sverige ska vara klimatneutralt år 2050 utan att klimatneutraliteten uppnås genom handel med utsläppsrätter. Det finns geologiska förutsättningar för omfattande koldioxidlagring i världen i helhet, Europa och Sverige. I Sverige finns det en lagringskapacitet på cirka 3,4 miljarder ton. Ungefär hälften av lagringskapaciteten finns söder om Gotland och den andra hälften av lagringskapaciteten finns i och utanför Skåne. I och med CCS-direktivet, att CCS-direktivet implementerats i svensk lagstiftning och att det har blivit tillåtet att lagra koldioxid under havsbotten i svenskt territorium så finns det grundläggande juridiska förutsättningar för CCS. Dessa beslut tyder även på att det finns en politisk acceptans för CCS-tekniken. Det kan dock krävas ett mer aktivt politiskt arbete om CCS ska förverkligas i Sverige. Kombinationen av en stor andel biogena koldioxidutsläpp, en hög andel processutsläpp från industrin som är svåra att få bort genom att byta energislag, mål om klimatneutralitet, egna lagringsplatser och ett grannland med pågående CCS-verksamhet gör att CCS och i synnerhet bio-CCS kan vara ett intressant alternativ för Sverige. CCS i Sverige, till skillnad från i många andra länder, är inte i första hand kopplat till fossilenergi. Det innebär att de nackdelar som finns med CCS från fossilenergi därmed inte är lika aktuella i Sverige. Det kanske största hindret för CCS är de ekonomiska förutsättningarna, trots att det bedöms bli dyrare att hejda klimatförändringarna utan CCS. Avgörande för utvecklingen av CCS är att det finns ett pris på koldioxidutsläpp som gör det dyrare att släppa ut än att lagra koldioxid. Ett hinder för att CCS ska bli lönsamt i Sverige är avsaknaden av ekonomiska incitament för koldioxidlagring från biogena källor i det europeiska systemet för handel med utsläppsrätter.

Tekniken för koldioxidavskiljning, transport och lagring finns idag. Men ju effektivare och billigare tekniken blir desto större möjlighet att CCS blir ekonomiskt lönsamt. IPCC bedömer det som att "det är väldigt sannolikt att mer än 99 procent av den lagrade koldioxiden bevaras under de första 100 åren" och att "det är sannolikt att mer än 99 procent av den lagrade koldioxiden bevaras under de första 1000 åren". Om en procent, av den mängd koldioxid som bedöms lagras globalt, skulle läcka ut årligen så bedöms det leda till en temperaturökning på 0,4 grader. CCS från fossila bränslen bedöms vara vanligare än bio-CCS runt år 2050. Den största nackdelen med CCS är att ännu mer energi måste användas per producerad GW. Det krävs, när kol används som bränsle, mer kolbrytning för att få ut samma mängd energi. Det leder till fler olyckor och sämre luft och vattenmiljö. Även andra energislag har risker och miljökonsekvenser. Fler studier som jämför den externa kostnaden för CCS och andra energislag skulle kunna bidra till ett bättre beslutsunderlag. Möjligheten att ta ned koldioxid från atmosfären genom bio-CCS är

en mycket intressant metod. CCS-tekniken gör inte fossilenergi till ett problemfritt energislag. En hel del talar för att fossilenergi, som idag står för cirka 80 procent av världens energi, kommer att ha en betydande roll även under de kommande decennierna. Fossilenergi med CCS är ur klimatsynpunkt betydligt bättre än fossilenergi utan CCS. Det borde vara möjligt att minska volymen fossilenergi och samtidigt göra den återstående fossilenergin mindre miljöskadlig.

Mycket talar för att riskerna med att inte använda CCS för att bekämpa den globala uppvärmningen är större än riskerna med CCS.

7. Tackord

Stort tack till min handledare Henrik Wachtmeister för värdefulla råd och bra handledning. Stort tack även till Mattias Goldmann och Daniel Engström-Stenson på Fores för bra dialog om arbetets frågeställningar. Avslutningsvis vill jag tacka Per-Arne Nilson för att jag fick ta del av de preliminära slutsatserna i den rapport som han skriver för Energiforsk.

8. Referenser

Tryckt material

Allaby, M. (ed.) (2013), *A dictionary of Geology and Earth Sciences*, 4th ed., Oxford: Oxford University Press.

<http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199653065.01.0001/acref-9780199653065>

Al-Traboulsi, M., Sjögersten, S., Colls, J., Steven, M., Craigon, J. & Black, C. (2012). Potential impact of CO₂ leakage from carbon capture and storage (CCS) systems on growth and yield in spring field bean. *Environmental and experimental botany*, vol. 80, s. 43-53. Tillgänglig:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847212000469>

Anthonsen, K.L., Aagaard, P., Bergmo, P.E.S., Erlström, M., Fariede, J.I., Gislason, S.R., Mortensen, G.M. & Snæbjörnsdóttir, S.Ó. (2013). CO₂ Storage Potential in the Nordic Region. *Energy Procedia*, vol. 37, s. 5080-5092. Tillgänglig:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213006644>

Arasto, A., Onarheim, K., Tsupari, E. & Kärki, K. (2014). Bio-CCS: Feasibility comparison of large scale carbon-negative solutions. *Energy Procedia*, vol. 63, s. 6756-6769. Tillgänglig:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214025260>

Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Christensen, N. P., Holloway, S. & Mathiassen, O-M. (2007). *Phase II Final Report from the Task Force for Review and Identification of Standards for CO₂ Storage Capacity*

- Estimation*. Carbon Sequestration Leadership Forum. Tillgänglig: <http://www.cslforum.org/publications/documents/PhaseIIReportStorageCapacityMeasurementTaskForce.pdf>
- Bian, Z., Inyang, H.I., Daniels, J.L., Otto, F. & Struthers, S. (2010). Environmental issues from coal mining and their solutions. *Mining Science and Technology (China)*, vol. 20, no. 2, s. 215-223. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674526409601873>
- Bogren, J., Gustavsson, T., & Loman, G. (2014). *Klimatförändringar-Naturliga och antropogena orsaker*. 3. ed. Lund: Studentlitteratur.
- Corsten, M., Ramírez, A., Shen, L., Koornneef, J & Faaij, A. (2013). Environmental impact assessment of CCS chains – Lessons learned and limitations from LCA literature. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 13, s. 59-71. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583612003143>
- Decker, RW & Decker BB. (2015). Volcano. I: *Encyclopedia Britannica Academic Edition*. Tillgänglig: <http://academic.eb.com.ezproxy.its.uu.se/EBchecked/topic/632130/volcano/253594/Gas-clouds?anchor=ref884106>
- Dixon, T., Leamon, G., Zakkour, P & Warren, L. (2013). CCS Projects as Kyoto Protocol CDM Activities. *Energy Procedia*, vol. 37, s. 7596-7604. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213009478>
- Dooley, J.J. (2013). Estimating the Supply and Demand for Deep Geologic CO₂ Storage Capacity over the Course of the 21st Century: A Meta-analysis of the Literature. *Energy Procedia*, vol. 37, s. 5141-5150. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213006723>
- Ecofys; World Bank. (2014). *State and trends of carbon pricing 2014*. Washington, DC. World Bank Group. Tillgänglig: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2014/05/19572833/state-trends-carbon-pricing-2014>
- Edenhofer, O., Knopf, B., Barker, T., Baumstark, L., Bellevrat, E., Chateau, B., Cricqui, P., Isaac, M., Kitous, A., Kypreos, S., Leimbach, M., Lessmann, K., Magne, B., Scricciu, S., Turton, H & van Vuuren, D.P. (2010). The economics of low stabilization: model comparison of mitigation strategies and costs. *The energy journal*, vol. 31, no. 1, s. 11-48. Tillgänglig: http://pik-potsdam.de/~lessman/docs/EdenhoferEtAl2010_Modelcomparison_ADAM.pdf
- Eiken, O., Ringrose, P., Hermanrud, C., Nazarian, B., Torp, TA & Høier, L. (2011). Lessons learned from 14 years of CCS operations: Sleipner, In Salah and Snøhvit. *Energy Procedia*. vol. 4, 2011, s. 5541-5548. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211008204>

- Energimyndigheten. (2011). *Systemstudie av möjligheter att etablera en infrastruktur för CCS i Östersjöregionen*. Eskilstuna. ER 2010:36. Tillgänglig: <https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=2535>
- Energy Technologies Institute. (2015). *Carbon capture and storage Building the UK carbon capture and storage sector by 2030 – Scenarios and actions*. Tillgänglig: <http://www.eti.co.uk/wp-content/uploads/2015/03/CCS-Building-the-UK-carbon-capture-and-storage-sector-by-2013.pdf>
- Erlström, M., Fredriksson, D., Juhojuntti, N., Sivhed, U & Wickström, L. (2011). *Lagring av koldioxid i berggrunden – krav, förutsättningar och möjligheter*. Uppsala. Sveriges Geologiska Undersökning. (Rapporter och meddelanden, 131). Tillgänglig: <http://resource.sgu.se/produkter/rm/rm131-rapport.pdf>
- Europeiska kommissionen. (2009a). *EU GeoCapacity Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide*. Bryssel. Tillgänglig: http://ec.europa.eu/clima/events/docs/0028/geocapacity_en.pdf
- Europeiska kommissionen. (2009b). *om att investera i utvecklingen av teknik med låga koldioxidutsläpp (SET-planen)*. Bryssel. Tillgänglig: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/HTML/?uri=CELEX:52009DC0519&from=EN>
- Europeiska kommission. (2009c). *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*. Bryssel. Tillgänglig: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009L0031&from=sv>
- Europeiska kommissionen. (2011a). *Energifärdplan för 2050*. Bryssel. Tillgänglig: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/HTML/?uri=CELEX:52011DC0885&from=EN>
- Europeiska kommissionen. (2011b). *Färdplan för ett konkurrenskraftigt utsläppsnålt samhälle 2050*. Bryssel. Tillgänglig: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/HTML/?uri=CELEX:52011DC0112&from=EN>
- Europeiska kommissionen. (2012). *Säker användning av teknik för avskiljning och lagring av koldioxid i Europa*. Bryssel. Tillgänglig: http://ec.europa.eu/clima/publications/docs/factsheet_ccs_sv.pdf
- Gaillardet, J. (1999). Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology*, vol. 159, no. 1-4, s. 3-30. Tillgänglig: http://www.researchgate.net/profile/Jerome_Gaillardet/publication/222476952_Global_silicate_weathering_and_CO2_consumption_rates_deduced_from_the_chemistry_of_large_rivers/links/0deec52151c116cf18000000.pdf
- Gale, J. & Davison, J. (2004). Transmission of CO₂—safety and economic considerations. *Energy*, vol. 29, no. 9-10, s. 1319-1328. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544204001744>

- Gibbs, H.K., Johnston, M., Foley, J.A., Holloway, T., Monfreda, C., Ramankutty, N. & Zaks, D. (2008). Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. *Environmental Research Letters*, vol. 3, no. 3, s. Tillgänglig: <http://iopscience.iop.org/1748-9326/3/3/034001>
- Gode, J., Stigson, P., Höglund, J & Bingel, E. (2011). *Förutsättningar för avskiljning och lagring av koldioxid (CCS) i Sverige En syntes av Östersjöprojektet*. IVL Svenska Miljöinstitutet. B1969. Tillgänglig: <https://www.energimyndigheten.se/Global/Forskning/Br%C3%A4nsle/CCS%20-%20BASTOR2/CCS%20broschyr.pdf>
- Gammer, D. A (2015) *Picture of CO2 Storage in the UK Learnings from the ETI's UKSAP and derived projects*. Tillgänglig: http://www.eti.co.uk/wp-content/uploads/2014/03/A_Picture_of_Carbon_Dioxide_Storage_in_the_UKUPDATED1.pdf
- Hales, S., Kovats, S., Lloyd, S & Campbell-Lendrum, D. (2014) *Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s*. Geneve, World Health Organization. Tillgänglig: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2014/05/19572833/state-trends-carbon-pricing-2014>
- Halland, E.K., Riis, F., Magnus, C., Johansen, W.T., Tappel, I.M., Gjeldvik, I.T., Solbakk, T & Pham, V.T.H. (2013). CO2 Storage Atlas of the Norwegian Part of the North Sea. *Energy Procedia*, vol. 37, s. 4919-4926. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213006462>
- Ha-Duong, M & Loisel, M. (2013). Actuarial Assessment of Fatalities Attributable to CCS in 2050. *Energy Procedia*, vol. 37, s. 7526-7536. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213009399>
- Hovorka, S.D. (2015) *EOR as Sequestration—Geoscience Perspective*. Tillgänglig: <https://mitei.mit.edu/system/files/hovorka.pdf>
- IEA. (2014a). *Key World Energy Statistics*. Paris. Tillgänglig: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>
- IEA. (2014b). *World Energy Outlook 2014*. Paris. Tillgänglig: <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2014/>
- IEA. (2015). *Energy Technology Perspectives 2015*. Paris. Tillgänglig: <http://www.iea.org/etp/etp2015/>
- IPCC. (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York och Cambridge: Cambridge University Press. Tillgänglig: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf
- IPCC. (2011). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge

- och New York. Tillgänglig: http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf
- IPCC. (2013). *Climate Change 2015: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge och New York. Tillgänglig: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf
- IPCC. (2014a). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University och New York. Tillgänglig: <https://ipcc-wg2.gov/AR5/report/full-report/>
- IPCC. (2014b). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge och New York. Tillgänglig: <http://mitigation2014.org/report/publication/>
- IPCC. (2014c). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneve. Tillgänglig: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf
- Koornneef, J., van Breevoort, P., Hamelinck, C., Hendriks, C., Hoogwijk, M., Koop, K., Koper, M., Dixon, T. & Camps, A. (2012: a). Global potential for biomass and carbon dioxide capture, transport and storage up to 2050. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 11, s. 117-132. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583612001843>
- Koornneef, J., Ramírez, A., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2012: b). The environmental impact and risk assessment of CO₂ capture, transport and storage—An evaluation of the knowledge base. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol.38, s. 62–86. Tillgänglig på: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128511000402>
- Kriegler, E., Weyant, J.P., Blanford, G.J., Krey, V., Clarke, L., Edmonds, J., Fawcett, A., Luderer, G., Riahi, K., Richels, R., Rose, S.K., Tavoni, M. & van Vuuren, D.P. (2014). The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies. *Climatic Change*, vol. 123, no. 3, s. 353-367. Tillgänglig: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-013-0953-7#page-1>
- Lenzen, M. (2010). Global warming effect of leakage from CO₂ storage. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. Tillgänglig: http://www.isa.org.usyd.edu.au/publications/ISA_CCSleakage.pdf
- Liu, C-T., Hsieh, B-Z., Chen, H-I., Lin, Z-S & Chen, T-L. (2014). Estimation of CO₂ Practical Capacity in Saline Formations. *Energy Procedia*, vol. 63, s.

- 5211-5221, Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214023674>
- Luckow, P., Wise, M.A & Dooley, J.J. (2011). Deployment of CCS Technologies across the Load Curve for a Competitive Electricity Market as a Function of CO₂ Emissions Permit Prices. *Energy Procedia*, vol. 4, 2011, s. 5762-5769. Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211008514>
- Luckow, P., Wise, M.A., Dooley, J.J. & Kim, S.H. (2010). Large-scale utilization of biomass energy and carbon dioxide capture and storage in the transport and electricity sectors under stringent CO₂ concentration limit scenarios. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, no. 5, s. 865-877. Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175058361000099X>
- Mazzetti, M.J., Eldrup, N.H. Anthonsen, K.L., Haugen, H.A., Onarheim, K., Bergmo, P., Kjarstad, J., Johnson, F., Stigson, P., Gislason, S.R. & Røkke, N.A. (2014). NORDICCS CCS Roadmap. *Energy Procedia*, vol. 51, s. 1-13, Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214008637>
- Miljödepartementet. (2012). *Geologisk lagring av koldioxid. (Regeringens proposition 2011/12:125)* Stockholm: Regeringskansliet. Tillgänglig:
http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/Forslag/Propositioner-ochskrivelser/Geologisk-lagring-av-koldioxid_GZ03125/?text=true
- Miljö- och jordbruksutskottet. (2012). *Klimatpolitik och geologisk lagring av koldioxid (2011/12: MJU25)*. Stockholm: Sveriges Riksdag Tillgänglig:
<http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/Utskottensdokument/Betankanden/Arenden/201112/MJU25/>
- Naturvårdsverket. (2012). *Underlag till en färdplan för ett Sverige utan klimatutsläpp 2050*. Stockholm. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Om-Naturvardsverket/Publikationer/ISBN/6500/978-91-620-6537-9/>
- Nicol, A., Gerstenberger, M., Bromley, C., Carne, R., Chardot, L., Ellis, S., Jenkins, C., Siggins, T & Viskovic, P. (2013). Induced Seismicity; Observations, Risks and Mitigation Measures at CO₂ Storage Sites. *Energy Procedia*, vol. 37, 2013, s. 4749-4756. Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213006279>
- Nilsson, P-A. (2014). *CCS in the Baltic Sea region – Bastor 2. Final Summary Report*. Stockholm. Elforsk. (Elforsk Rapport 14:50). Tillgänglig:
http://www.elforsk.se/Programomraden/El-Varme/Rapporter/?rid=14_50
- Odenberger, M., Kjærstad, J & Johnsson, F. (2013). Prospects for CCS in the EU Energy Roadmap to 2050. *Energy Procedia*, vol. 37, s. 7573-7581. Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213009442>
- Onarheim, K., Mathisen, A. & Arasto, A. (2015). Barriers and opportunities for application of CCS in Nordic industry—A sectorial approach.

- International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 36, s. 93-105.
Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583615000638>
- Rackley, Stephen A. (2010). *Carbon Capture and Storage*. Elsevier. Tillgänglig
https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpCCS00001/viewerType:toc/root_slug:carbon-capture-and
- Regeringen. (2014:a). *Kommittédirektiv*. Tillgänglig:
<http://www.regeringen.se/contentassets/2c7a8ebcc6d847b9b188201869a401b7/klimatfardplan-2050--strategi-for-hur-visionen-att-sverige-ar-2050-inte-har-nagra-nettoutslass-av-vaxthusgaser-ska-uppnas-dir-201453>
- Renner, M. (2014). Carbon prices and CCS investment: A comparative study between the European Union and China. *Energy Policy*, vol. 75, s. 327-340. Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421514005448>
- Rice, S.A. (2004). *Human health risk assesment of CO2: survivors of acute high-level exposure and population sensitive to prolonged low level exposure*. National Energy Technology Laboratory. Tillgänglig:
<https://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/04/carbon-seq/169.pdf>
- Rubin, E.S., Mantripragada, H., Marks, A., Versteeg, P. & Kitchin, J. (2012). The outlook for improved carbon capture technology. *Progress in Energy and Combustion Science*. vol. 38, no. 5, s. 630. Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128512000184>
- Schilling, R.D. & Krijgsman, P. (2006). Enhanced Weathering: An Effective and Cheap Tool to Sequester Co2. *Climatic Change*, vol. 74, no. 1, s. 349-354. Tillgänglig: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-005-3485-y#page-1>
- Smit, B., Reimer, J.A., Oldenburg, C.M. & Bourg, I.C. (2014), *Introduction to carbon capture and sequestration*. London. Imperial College Press. Tillgänglig:
<http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/p911>
- Shaffer, G. (2010). Long-term effectiveness and consequences of carbon dioxide sequestration. *Nature Geoscience*, vol. 3, no. 7, s. 464-467. Tillgänglig:
<http://www.nature.com.ezproxy.its.uu.se/ngeo/journal/v3/n7/full/ngeo896.html>
- Styring, P & Jansen, D. (2011). *Carbon Capture and Utilisation in the green economy*. Center for low carbon futures. Tillgänglig:
http://www.policyinnovations.org/ideas/policy_library/data/01612/res/id=sa_File1/CCU.pdf
- Sveriges Riksdag. (2012a). *Motion 2011/12: MJ6*. Stockholm: Sveriges Riksdag. Tillgänglig: http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/Forslag/Motioner/Geologisk-lagring-av-koldioxid_GZ02MJ6/?text=true

- Sveriges Riksdag. (2012b). *Motion 2011/12: MJ7*. Stockholm: Sveriges Riksdag.
Tillgänglig http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/Forslag/Motioner/Geologisk-lagring-av-koldioxid_GZ02MJ7/?text=true
- Sveriges Riksdag. (2012c). *Motion 2011/12: MJ8*. Stockholm: Sveriges Riksdag.
Tillgänglig: http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/Forslag/Motioner/Geologisk-lagring-av-koldioxid_GZ02MJ8/?text=true
- Sveriges Riksdag. (2012d). *Riksdagens protokoll 2011/12:125 Torsdagen den 7 juni*. Stockholm: Sveriges Riksdag. Tillgänglig:
http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/Kammaren/Protokoll/_GZ09125/
- Tarbuck, E.J. Lutgens, F.K. & Tasa, D. (2011). *Earth-an introduction to physical geology 10:e*. International Edition. Upper Saddle River: Pearson.
- Thorbjörnsson, A., Wachtmeister, H., Wang, J. & Höök, M. (2014). Carbon capture and coal consumption: Implications of energy penalties and large scale deployment. *Energy Strategy Reviews*, vol. 7, s. 18-28. Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X14000716>
- Torvanger, A., Grimstad, A., Lindeberg, E., Rive, N., Rypdal, K., Skeie, R.B., Fuglestad, J. & Tollefsen, P. (2012). Quality of geological CO₂ storage to avoid jeopardizing climate targets. *Climatic Change*, vol. 114, no. 2, s. 245-260. Tillgänglig:
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-012-0447-z#page-1>
- UNFCCC. (2010). *Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010*. Tillgänglig:
<http://unfccc.int/resource/docs/2010/cop16/eng/07a01.pdf#page=2>
- UNFCCC. (2012). *Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its seventh session, held in Durban from 28 November to 11 December 2011*. Tillgänglig:
<http://unfccc.int/resource/docs/2011/cmp7/eng/10a02.pdf>
- Upham, P. & Roberts, T. (2011). Public perceptions of CCS: Emergent themes in pan-European focus groups and implications for communications. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 5, no. 5, s. 1359-1367. Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583611001149>
- Vangklide-Pedersen. (2009). *EU GeoCapacity Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide*. Tillgänglig:
<http://www.geology.cz/geocapacity/publications/D16%20WP2%20Report%20storage%20capacity-red.pdf>
- Vergragt, P.J., Markusson, N. & Karlsson, H. (2011). Carbon capture and storage, bio-energy with carbon capture and storage, and the escape from the fossil-fuel lock-in. *Global Environmental Change*, vol. 21, s. 282-292. Tillgänglig:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378011000215>

- Vliet, J., Elzen, M.G.J. & Vuuren, D.P. (2009). Meeting radiative forcing targets under delayed participation. *Energy Economics*. vol. 31, s. 152-162.
Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014098830900108X>
- Wang, S. (2004). Dissolution of a mineral phase in potable aquifers due to CO₂ releases from deep formations; effect of dissolution kinetics. *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 18-19, s. 2833-2848.
Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890404000226>
- Wardle, D.A., Nilsson, M. & Zackrisson, O. (2008). Fire-Derived Charcoal Causes Loss of Forest Humus. *Science*, vol. 320, no. 5876, s. 629-629.
Tillgänglig: <http://www.sciencemag.org/content/320/5876/629>
- Åhman M., Lars J Nilsson., & Andersson, FNG. (2013). *Industrins utveckling mot netto-nollutsläpp 2050 - Policyslutsatser och första steg*. Lund Universitet. Rapport nr 88. Tillgänglig: http://miljo.lth.se/fileadmin/miljo/Industrin_mot_nettonollutslaep2050_IMES_rapport_88.pdf

Internetkällor

- “Biochar” (2015) Britannica Academic.
<http://academic.eb.com/EBchecked/topic/1525345/biochar>
- Elding, L. I. (2015a). Ammoniak: miljöeffekter. *Nationalencyklopedin*.
<http://www.ne.se/ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/ammoniak/milj%C3%B6effekter> (2015-06-11)
- Elding, L. I. (2015b) Kväveoxider. *Nationalencyklopedin*.
<http://www.ne.se/ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/kv%C3%A4veoxider> (2015-06-11)
- Energimyndigheten. (2014). *CDM och JI i praktiken*.
<http://www.energimyndigheten.se/Internationellt/Internationellt-klimatsamarbete/Information-om-CDM-och-JI/Investera-i-CDM-och-JI/> (2015-06-11)
- Europeiska kommissionen. (2015a). *2030 climate & energy framework*.
Tillgänglig: http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/index_en.htm (2015-08-26)
- Europeiska kommissionen. (2015b) *Utsläppshandel: Medlemsstaterna godkänner en förteckning över sektorer som anses löpa risk för koldioxidläckage*.
http://europa.eu/rapid/press-release_IP-09-1338_sv.htm (2015b-08-26).
- Global CCS Institute. (2015a) *Large Scale CCS Projects*.
<http://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects> (2015-06-11)

- Global CCS Institute. (2015b) *Large-Scale CCS Projects – Definitions*.
<http://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects-definitions> (2015-06-11)
- MIT. (2015a). *Boundary Dam Fact Sheet: Carbon Dioxide Capture and Storage Project*. http://sequestration.mit.edu/tools/projects/boundary_dam.html (2015-06-11)
- MIT. (2015b). *E.ON Karlshamn Fact Sheet: Carbon Dioxide Capture and Storage project*. http://sequestration.mit.edu/tools/projects/eon_karlshamn.html (2015-06-11)
- MIT Technology Review. (2015). *A Coal Plant That Buries Its Greenhouse Gases*.
<http://www.technologyreview.com/demo/533351/a-coal-plant-that-buries-its-greenhouse-gases/> (2015-06-11)
- Naturvårdsverket. (2015) *Utsläpp i siffror-Lista över utsläpp per anläggning*.
<http://utslappisiffror.naturvardsverket.se/Sok/Lista-over-utslapp-per-anlaggning/?sid=128&limit=1000000000-m> (2015-06-11)
- Nilsson, P-A. (2015). *CCS – en nödvändighet för ambitiösa klimatmål?* Energiforsk.
http://www.svensktnaringsliv.se/Bilder_och_dokument/presentation_per-arne-nilsson_panawarepdf_619901.html/BINARY/Presentation_Per%20Arne%20Nilsson_Panaware.pdf (2015-06-11)
- Olsson, M. (2014). *Varför tog vägen slut för färdplan 2050?* Uppsala Universitet. Institutionen för geovetenskaper. Masterprogram i hållbar utveckling.
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:729085/FULLTEXT01.pdf> (2015-06-11)
- Orkuveita Reykjavíkur. (2015) *CarbFix*. Publication.
<https://www.or.is/en/projects/carbfix> (2015-06-11)
- Regeringen. (2015). *Mål för luft och klimat*. <http://www.regeringen.se/regeringens-politik/miljo/klimat-och-luft/mal-for-klimat-och-luft/> (2015-06-11)
- Regjeringen (2015). *Samandrag av Gassnovas utgreiing av moglege fullskala CO2-handteringsprosjekt i Noreg*.
https://www.regjeringen.no/contentassets/3652c303169e46e7815617adab685710/idestudie_samandrag.pdf (2015-06-11)
- Skatteverket. (2015). *Lägre skatt för industriell verksamhet*.
<http://www.skatteverket.se/foretagorganisationer/skatter/punktskatter/energiskatter/verksamhetermedlagreskatt/industriellverksamhet.4.18e1b10334ebe8bc80002009.html> (2015-06-11)
- Svensk Näringsliv. (2015). *Basindustrin siktar mot nollutsläpp*.
http://www.svensktnaringsliv.se/fragor/miljo_energi_klimat/basindustrin-siktar-mot-nollutslapp_619454.html (2015-06-11)
- Sveriges Radio. (2014). *Tillåtet att lagra koldioxid under havsbotten i Sverige*. 17 januari.
<http://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=406&artikel=5758866> (2015-06-11)

Vårdguiden. (2013). *Vad gör man åt för höga kalkvärden i blodet?*.
<http://www.1177.se/Vastra-Gotaland/Stall-en-anonym-fraga/Fraga/Vad-gor-man-at-for-hoga-kalkvarden-i-blodet/> (2015-06-11)

