



Att fatta ett genomtänkt beslut om koldioxidlagring

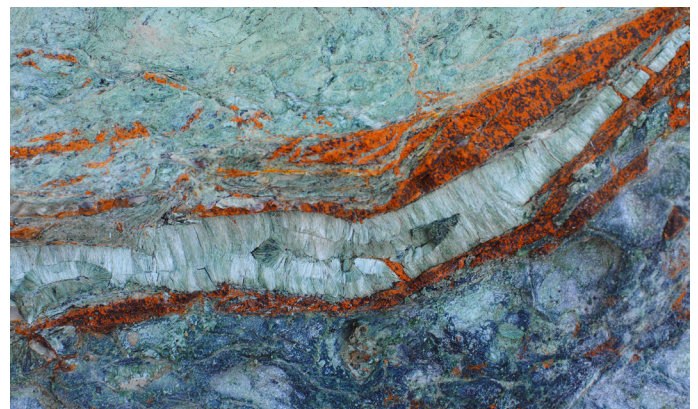
Bolincetrets Klimatarena syftar till att stödja arbeten mellan olika samhällssektorer för att möjliggöra den omställning som krävs för att ”böja kurvan” inom klimatförändringar, genom att:

- ✓ utveckla ett långsiktigt samarbete mellan akademi, näringsliv, offentlig sektor och civilsamhälle,
- ✓ förbättra effekterna och utnyttjandet av kunskap och forskning, och
- ✓ främja klimatutbildning för framtiden.

Förbränning av fossila bränslen och cementproduktion har lett till stora utsläpp av koldioxid till atmosfären. Kolet tas från geologiska källor (kol, olja, naturgas och kalksten), och utsläppen sker i en takt som är mycket snabbare än tidsskalan för de geologiska processer som avlägsnar koldioxid från atmosfären (vittring av berg och sten). Eftersom koldioxid är en växthusgas, så orsakar vi därmed global uppvärmning.

Denna policy brief berör koldioxidlagring, vilket förkortas med ”CCS” (”Carbon Capture and Storage”), och syftet är att ge beslutsfattare och beslutstagare ett vetenskapligt underlag i de beslut som behöver tas för att anta klimatutmaningen. Enligt en rapport av FNs klimatpanel Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) från 2018 är koldioxidlagring avgörande i våra ansträngningar att begränsa den globala uppvärmningen till 1.5°C, eller åtminstone väl

under 2°C, i enlighet med Parisavtalet. Denna policy brief är uppdelad i två delar, där den första delen presenterar grundläggande kunskap om kolcykeln och hur den relaterar till jordens klimat, vilket är avgörande för den andra delen där koldioxidlagring som en klimatlösning utvärderas.



Koldioxid kan avskiljas genom kemiska reaktioner med vulkaniska bergformationer. Foto: Alasdair Skelton

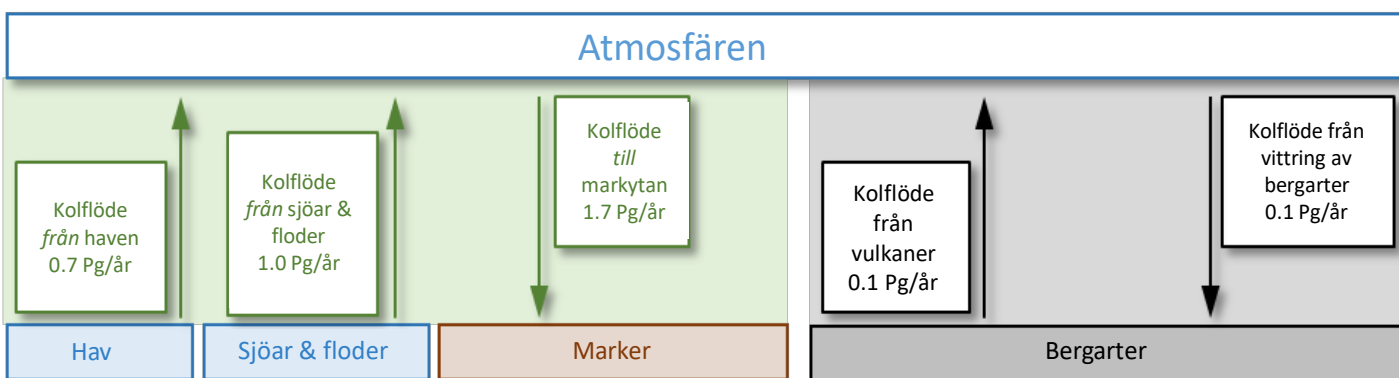
Del 1: Att förstå kolcykeln

Figur 1 illustrerar den naturliga kolcykeln (i petagram [Pg] per år), det vill säga innan människan började påverka jordens klimat. Kolcykeln kan delas upp i två delar, där den första delen är den "snabba cykeln" där kolet cirkulerar mellan atmosfären och haven/sjöar/floder/markytan (skuggat med grönt i figur 1). Denna cykel styrs av snabba processer, exempelvis fotosyntesen och flödet mellan atmosfären och haven, med tidsskalor av säsonger (eller kortare) till tusentals år. Den andra delen är den "långsamma cykeln", där kolet cirkulerar mellan atmosfären och bergarter (skuggat med grått i figur 1). Den styrs av långsamma processer, som vittring av bergarter, och verkar på tidsskalor som sträcker sig från hundratusentals till miljontals år. Notera att

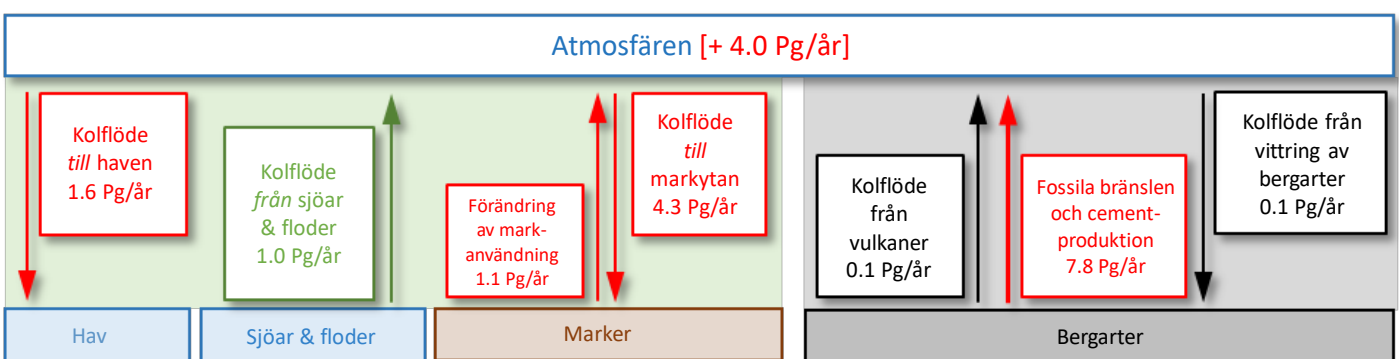
1 petagram (Pg) motsvarar 1 miljard ton.
 Det är vikten av ungefär 5 miljoner jumbo jets, eller 600 miljoner bilar.

mängden kol som tillförs och lämnar atmosfären är detsamma; detta är ett system i balans.

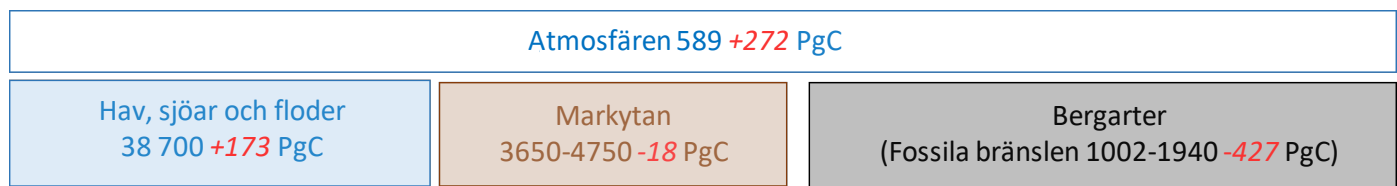
Figur 2 illustrerar hur människan har rubbat kolcykeln. Enligt IPCC (2013) släpper vi ut 8,9 petagram kol årligen på grund av förbränning av fossila bränslen, cementproduktion och förändring i markanvändning. Kolet tas upp av atmosfären, haven och marken. Kolet som tas upp av atmosfären förvandlas till koldioxid (CO₂) och metan (CH₄), vilket orsakar global uppvärmning, och koldioxid som tas upp av haven orsakar försurning.



Figur 1. Den förindustriella kolcykeln (modifierad och översatt från IPCC's Fifth Assessment Report).



Figur 2. Kolcykeln med medelflöden för perioden 2000–2009 (modifierad och översatt från IPCC's Fifth Assessment Report). De röda pilarna representerar kolfödet som har förändrats på grund av mänsklig aktivitet. För att bättre förstå dessa siffror så kan en addera kolfödet till atmosfären från sjöar & floder (1.0 Pg/år), från vulkaner (0.1 Pg/år), från ändringar av markanvändning (1.1 Pg/år) och från fossila bränslen och cementproduktion (7.8 Pg/år). Detta ger 10 Pg/år som tillförs atmosfären. Subtrahera sedan kolfödet från atmosfären till hav (1.6 Pg/år), till marker (4.3 Pg/år) och till följd av vittring av bergarter (0.1 Pg/år). Detta ger 6 Pg/år, vilket är mängden kol som lämnar atmosfären. Skillnaden 4 Pg/år är det som stannar kvar i atmosfären.



Figur 3. Siffrorna i denna figur är uträknade från IPCC's Fifth Assessment Report (2013). Figuren illustrerar den uppskattade mängden kol i atmosfären, hydrosfären (hav, sjöar och floder) och markytan samt det som tillhör fossila bränslen. De röda siffrorna visar koldioxidutsläpp från förbränning av fossila bränslen samt cementproduktion, och ett nettoutflöde av kol från markytan (vegetation, jord och permafrost) och en ökning av kol i atmosfären och hydrosfären.

Figur 3 visar mängden kol uppskattat för varje **reservoar**, och de röda siffrorna illustrerar kol som antingen tillförts eller lämnat respektive reservoar till följd av mänsklig aktivitet. Vid slutet av 2019 hade vi släppt ut ungefär 427 Pg (IPCC, 2013) från berg och sten på grund av förbränning av fossila bränslen och cementproduktion. Vi hade också orsakat ett nettoutflöde av kol på 18 Pg från markytan. Det här kolet har tillförts atmosfären och haven.

Figurer 3 visar en stor ökning av koldioxidhalten i atmosfären (46 %), vilket är den största orsaken till den globala uppvärmningen. För att lösa klimatkrisen behövs en betydande minskning av utsläppen och åtgärder för att dämpa växthuseffekten, där lagring av koldioxid kan bidra till det senare.



Del 2: Koldioxidlagring

Nu när vi har redogjort för den grundläggande kunskapen om kolcykeln är vi redo att besvara specifika frågor kring lagring av koldioxid.

Vad är koldioxidlagring?

Termen "koldioxidlagring", eller på engelska "Carbon Capture and Storage" med förkortningen "CCS", används för att beskriva en rad olika tekniker där koldioxid avskiljs (infångas), transporteras och lagras i en av reservoarerna som illustreras i figur 3, med undantag för atmosfären (där det orsakar global uppvärmning). Koldioxidlagring är en form av "Carbon Dioxide Removal (CDR)", vilket översätts till "avlägsnande av koldioxid". Detta är en bredare term som omfattar koldioxidlagring samt artificiella metoder för att avlägsna koldioxid från atmosfären, så som skogsplantering där det tidigare inte funnits några träd (s.k. "afforestation" på engelska).

Avskiljning av koldioxid kan utföras från en punktkälla, vilket kan vara ett kraftverk eller en fabrik där förbränning av fossila bränslen eller biobränslen sker vid en specifik plats. Koldioxid kan även avskiljas direkt från luften. Lagring av koldioxid från en punktkälla där förbränning av biobränslen sker kallas koldioxidlagring av biomassa, på engelska Biomass Energy Carbon Capture and Storage (BECCS). Lagring av koldioxid som avskiljs direkt från luften kallas Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS).

Transport av koldioxid sker vanligtvis i flytande form med fartyg eller via rörledningar.

Lagring av koldioxid kan teoretiskt ske i bergarter, marken eller haven, vilket är illustrerat i figur 4. Lagring av koldioxid i haven bör och ska dock uteslutas då det leder till försurning, vilket i sin tur hotar det marina ekosystemet (IPCC, 2005).

Koldioxidlagring kan ske genom konvertering till biokol som lagras i marken eller genom skogsplantering där det tidigare inte funnits några träd. Biokol kan påverka jordbruket positivt. Skogsplanterings effektivitet samt risker för negativa bieffekter som exempelvis förlust av biologisk mångfald är dock omdebatterat (Bastin et al., 2019; Veldman et al., 2019). Livslängden för denna lagringsmetod är fortfarande osäker, men uppskattningsvis handlar det om decennier (De la Rosa et al., 2017) till årtusenden (Kuz'yakov et al., 2009). Ett annat alternativ är koldioxidlagring i bergarter, vilket kan ske som **superkritisk vätska i porösa** sedimentära bergarter. Dessa kan vara tömda olje- och gasfält, kollager eller saltvattensakviferer – vid platser där fossila bränslen i många fall härstammar från. Koldioxid kan också lagras i vissa typer av **porösa** vulkaniska bergarter. En viktig skillnad mellan sedimentära och vulkaniska bergarter som är lämpliga för koldioxidlagring är att sedimentära bergarter inte är kemiskt reaktiva (inerta), medan vulkaniska bergarter förenas kemiskt med koldioxid. Detta beror på att mineral som utgör vulkaniska bergarter innehåller mycket kalcium, magnesium och järn, vilket förenas kemiskt med koldioxid och bildar fast karbonatmineral, exempelvis kalцит (CaCO_3). Denna typ av mineralisering går överraskande

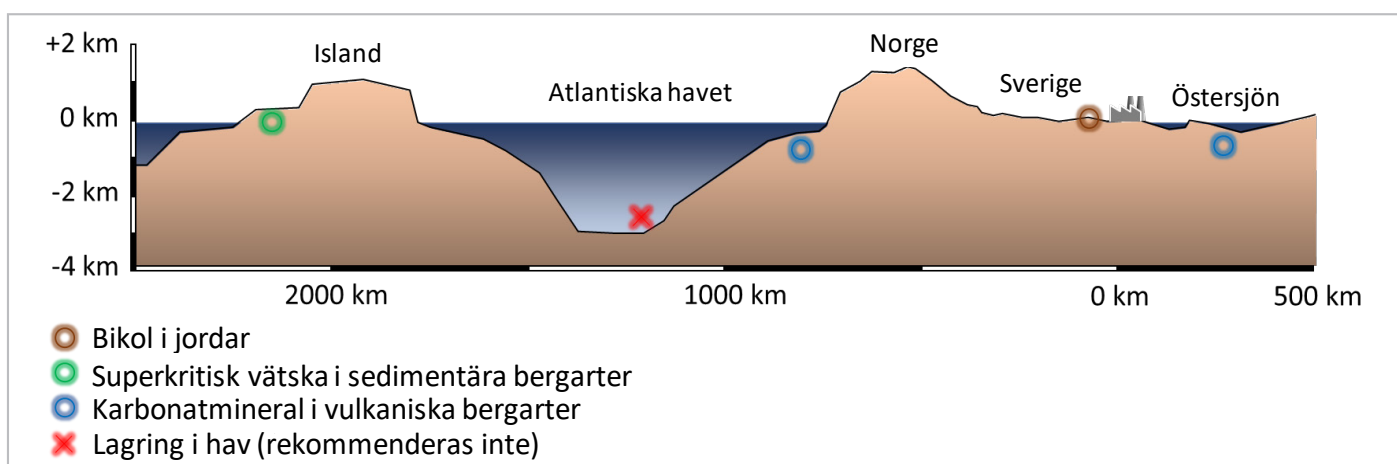
Superkritisk vätska har kombinerade egenskaper av både gasform och flytande form. Exempelvis, om CO_2 överstiger sin kritiska punkt (dvs. om en tillämpar tillräckligt hög temperatur och högt tryck) så beter den sig inte längre som en gas eller vätska, utan mer som något mitt emellan.

Porös betyder att bergformationen har små hål och gångar där vatten eller luft kan passera.

snabbt; preliminära resultat indikerar att fast karbonatmineral kan formas i vissa vulkaniska bergarter när koldioxid injicerats inom loppet av endast 100 dagar (Matter et al., 2016). En fördel med att lagra koldioxid i formen av fast karbonatmineral är att det finns mindre risk för läckage, och lagringstidslängden är miljontals år.

Är koldioxidlagring nödvändig?

Det korta svaret på denna fråga är *ja*. Klimatförändringar på jorden sker väldigt snabbt; i skrivande stund värms jorden upp med en hastighet av 0.2°C per årtionde. Med denna takt kommer den globala uppvärmningen överstiga 1.5°C inom loppet av 20 år. Det krävs framförallt utsläppsminskningar,



Figur 4. Lagringsalternativ för koldioxidutsläpp från en punktkälla i Sverige.

men också koldioxidlagring och naturliga klimatlösningar (återplantering av skog, hållbart jordbruk och bevarande av våtmarker [Griscom et al., 2017]) för att vända trenden och begränsa den globala uppvärmningen. Det här illustrerades i IPCC rapporten "Global Warming 1.5°C" från 2018, där de presenterar färdplaner som kan begränsa den globala uppvärmningen till 1.5°C. Dessa färdplaner, eller "pathways" på engelska, visas i figur 5. I figuren framgår det att det inte är möjligt att endast förlita sig på utsläppsminskningar och naturliga klimatlösningar; även geologisk lagring av koldioxid är avgörande.

Analysen visar dock att vi behöver tillgång till geologisk lagring av koldioxid på en skala som långt ifrån existerar idag. I en rapport från 2018 beräknade The Global CCS Institute att vi behöver ungefär 2500 storskaliga anläggningar (större än 1 megaton/år) för lagring av koldioxid innan år 2040 om vi ska uppfylla Parisavtalets mål att hålla den globala medeltemperaturen väl under 2°C. År 2018 var det endast 18 storskaliga anläggningar i drift. Vi skulle alltså behöva bygga mer än 100 storskaliga anläggningar varje år till och med år 2040, men ändå gör vi inte det.

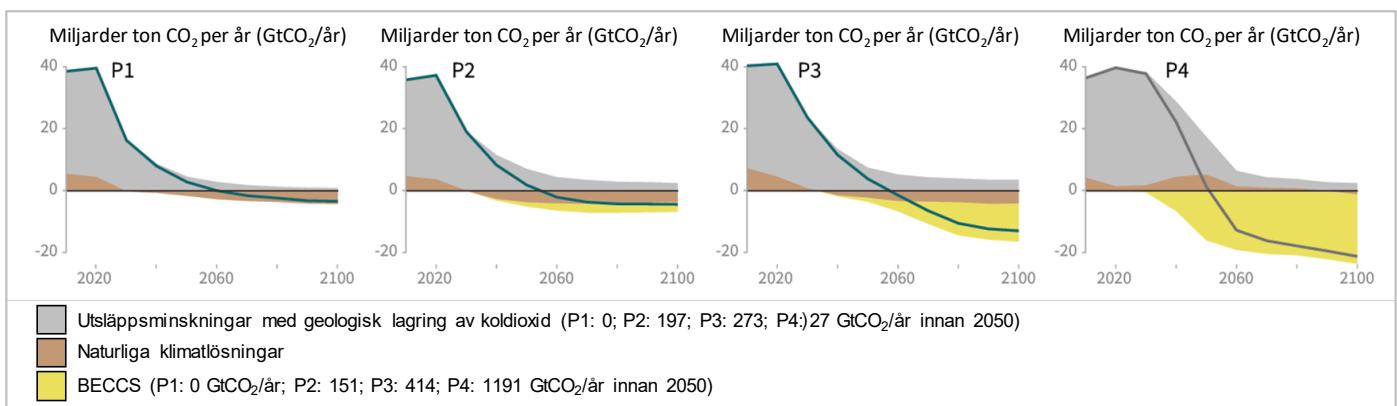
Är koldioxidlagring ett alternativ till utsläppsminskningar?

Svaret på denna fråga är nej. Det mest effektiva och därmed viktigast att fokusera på är utsläppsminskningar. Men, för att begränsa den globala uppvärmningen och undvika allvarlig påverkan på planeten så måste vi implementera alla tillgängliga klimatåtgärder. Eftersom vi dessvärre har skjutit på att börja minska på utsläppen kan vi inte längre förlita oss enbart på utsläppsminskningar utan måste också inkludera en rad naturliga klimatlösningar och koldioxidlagring. Det är dock viktigt att tillägga att: "Storskalig användning av CDR är hittills oprövad, och att förlita sig på sådan teknik för att begränsa den globala uppvärmningen till 1.5°C är en stor risk" enligt IPCC (2018).

Genererar kolodioxidlagring negativa utsläpp?

För att besvara frågan så måste vi beakta källan till den koldioxid som avskiljs samt hur energin som används för avskiljning, transport och lagring genereras:

Om koldioxidutsläpp från förbränning av fossila bränslen för att producera energi avskiljs och lagras, så tillför vi ingen koldioxid till atmosfären. Vi har dock heller inte avlägsnat någon koldioxid från



Figur 5. Fyra olika framtida scenarier för att begränsa den globala uppvärmningen till 1.5°C (IPCC's special report [2018]: Global Warming of 1.5°C). Scenarierna är följande: företag och teknologisk innovation som resulterar i lågt energibehov innan 2050 (P1), stort fokus ligger på hållbarhet (P2), samhället och den teknologiska utvecklingen följer historiska mönster (P3) och ekonomisk tillväxt samt globalisering leder till utbredd anpassning av växthusgasintensiva livsstilar (P4). Notera att en förflyttning från P1 till P4 visar att beroendet av BECCS ökar. Detta är oroande då utvecklingen av BECCS på denna skala är oprövad, och förbränning av biomassa är sällan koldioxidneutralt.

atmosfären, vilket gör att vi inte genererar några negativa utsläpp. Istället, eftersom det faktiskt krävs energi för att avskilja, transportera och lagra koldioxid, så genererar vi förmodligen fortfarande koldioxidutsläpp.

Fallet med BECCS är ännu mer komplicerat. Om det vore rättvist att konstatera att förbränning av biomassa är koldioxidneutralt, så är det också möjligt att hävda att BECCS genererar negativa utsläpp. Emellertid är förbränning av biomassa inte nödvändigtvis koldioxidneutralt. Det beror på vilken typ av biomassa det är. Förbränning av hushållsavfall och vissa typer av industriella biprodukter kan vara koldioxidneutralt, medan avverkning av skog med syfte att tillhandahålla biomassa troligtvis inte är koldioxidneutralt. Detta beror på följande skäl:

- Energiplantager är inte nödvändigtvis lika bra på att lagra koldioxid som de naturliga ekosystemen som de ersätter är (Harper et al., 2018). Således motverkas eventuella "negativa utsläpp" genom förlusten av ett ekosystem som annars skulle ha avlägsnat koldioxid från atmosfären.
- Det kan finnas en tidsfördröjning när en avlägsnar biomassa som ska användas för förbränning tills att den ersätts av ny biomassa, och under den tiden avlägsnas mindre koldioxid från atmosfären via fotosyntes. Denna tidsfördröjning kommer med utsläppsböter som bör mätas mot eventuella "negativa utsläpp".

Endast lagring av koldioxid som avskiljs från luften (DACCS) genererar otvetydiga negativa utsläpp, men

bara om 1) koldioxiden som används för att uppfylla energibehovet inte överstiger mängden som avskiljs och lagras, samt att 2) när den avskiljs så lagras den och används inte senare för kommersiella syften (t.ex. för att tillverka kolsyrat vatten).

Rekommendationer för Sverige

Det finns en rad punktkällor där koldioxid kan avskiljas i Sverige. Dessa syftar till diverse fabriker och kraftverk. De lagringsalternativ vi har är som biokol i jordar, som superkritisk vätska i sedimentära formationer eller som karbonatmineral i vulkaniska bergarter. Det finns för och nackdelar med samtliga alternativ. Dessa avser kostnader för transport samt lagringsmetodernas livslängd (tabell 1). Det är möjligt att producera biokol lokalt, vilket eliminerar kostnaden för transport. Däremot är lagringsmetodens livslängd osäker, vilket betyder att varaktighet inte kan garanteras. Lagring av koldioxid som en superkritisk vätska i sedimentära formationer kan å andra sidan ses som permanent, men endast om det är möjligt att med säkerhet undvika läckage. När en beaktar varaktighet så är lagring av koldioxid som fast karbonatmineral det bästa alternativet, eftersom risken för läckage till stor del elimineras. Däremot kan en inte hitta lämpliga porösa vulkaniska formationer nära Sverige (Island är närmast). Sedimentära formationer som är lämpliga (eller potentiellt lämpliga) för lagring av koldioxid som superkritisk vätska går däremot att hitta närmare Sverige. Sådana platser går att hitta utanför Norge och under Östersjön (Mortensen et al., 2017), vilket betyder att transportsträckor och tillhörande kostnader ändå är omfattande.

Lagringsmetod	Transportkostnad	Lagringslivslängd
<ul style="list-style-type: none"> • Biokol i jordar • Superkritisk vätska i sedimentära bergarter • Karbonatmineral 	<ul style="list-style-type: none"> • Låg • Hög • Mycket hög 	<ul style="list-style-type: none"> • Osäker • Permanent om inget läckage • Permanent

Tabell 1. Fördelar och nackdelar med möjlig koldioxidlagring i Sverige.

Från ett klimatperspektiv så väger varaktighet mer än transportkostnaden. Förutsatt att utsläppen i samband med transporter är låga jämfört med den mängd koldioxid som avskiljs, rekommenderas lagring i bergarter. Åtminstone tills vi vet mer om livslängden för lagring av biokol i jordar.

Referenser

- Bastin, J-F. et al., 2019. The global tree restoration potential, *Science* 365, 76–79.
- IPCC, 2013. Climate change 2013. The Physical Science Basis. In: Stocker, T.F., et al., (eds.), Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2005: Ocean Storage. In: Carbon Dioxide Capture and Storage. Metz, B., et al., (eds.). Cambridge University Press, UK. pp 431.
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. Masson-Delmotte, V., et al., (eds.). In press.
- De la Rosa, J.M., et al., 2017. Effects of aging under field conditions on biochar structure and composition: Implications for biochar stability in soils. *Science of the Total Environment* 613–614, 969–976.
- Griscom, B. W., et al., 2017. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Science* 114, 11645–11650.
- Harper, A. B., et al., 2018. Land-use emissions play a critical role in landbased mitigation for Paris climate targets. *Nature Communications* 9, 2938.
- Kuzyakov, Y., et al., 2009. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 210–219.
- Matter, J. M., et al., 2016. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science* 352, 1312–1314.
- Mortensen, G.M. et al., 2017. Geologisk lagring av koldioxid i Sverige. Rapport och meddelanden 142, Sveriges geologiska undersökning. 119 pp.
- Veldman, J. W., 2019. Comment on “The global tree restoration potential”. *Science* 10.1126/science.aay7976

Denna policy brief är ett expertutlåtande av Alasdair Skelton och Kevin Noone, och är referentgranskad av Paul Glantz och Nina Kirchner, som alla är forskare vid Bolincentrum för klimatforskning. Detta är inte nödvändigtvis en kollektiv ståndpunkt som alla medlemmar vid Bolincentrum delar.

Kontakt information

Alasdair Skelton, Institutionen för geologiska vetenskaper
08 16 47 50, alasdair.skelton@geo.su.se

Kevin Noone, Institutionen för miljövetenskap
08 674 75 43, kevin.noone@aces.su.se

Redigerad och översatt av Laila Islamovic, laila.islamovic@su.se
kommunikatör vid Bolincentrum för klimatforskning.

Bolincentrum
för klimatforskning