

Mitä hiilidioksidin (CO₂) geologinen varastointi tarkoittaa?

**Vastuullista
fossiilisten polttoaineiden
käyttöä**

**Suurimman
kasvihuonekaasujen
lähteen poistamista**

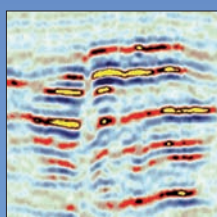
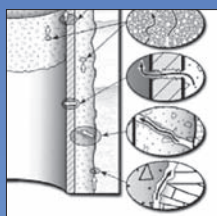
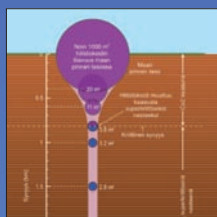
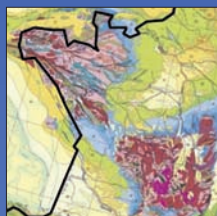
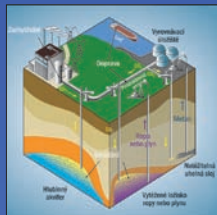
Palautetaan hiili maan alle

**Lisääaikaa
ilmastoystävällisten
energian
lähteiden kehittämiseen**



CO₂ GeoNet Eurooppalainen huippuosaamisen verkosto

Sisällysluettelo



Ilmastomuutos ja hiilidioksidin geologisen varastoinnin tarpeellisuus 4

1. Mihin ja kuinka paljon hiilidioksidia voidaan varastoida maan alle? 6

2. Kuinka suuria hiilidioksidimääriä kuljetetaan ja injektoidaan? 8

3. Mitä hiilidioksidille tapahtuu varastomuodostumassa? 10

4. Voiko hiilidioksidi vuotaa varastomuodostumasta ja mitä seurauksia siitä olisi? 12

5. Miten varastomuodostumaa tarkkaillaan sekä syvyyksissä, että maan pinnalla? 14

6. Millaisia turvallisuuskriteereitä tulee säätää ja noudattaa? 16

Sanasto 18

Mikä CO₂ GeoNet on? 19

Tämä esite on valmistunut seuraavien henkilöiden ansiosta:

Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuella Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

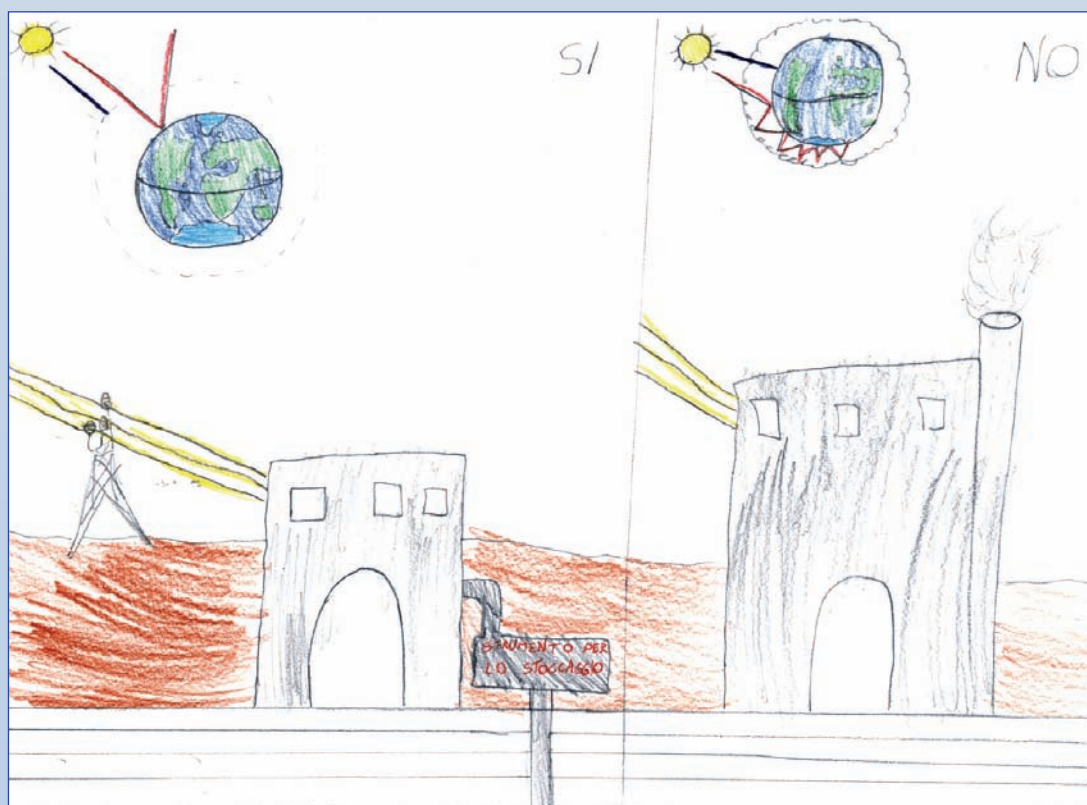
Suomenkielinen versio:

Lauri Solismaa, Tuija Vähäkuopus, Riitta Turunen, Nicklas Nordbäck ja Jarmo Kallio.

Tulevaisuuden visio

**Ei enää savuttavia savupiippuja
Putkisto kuljettaa hiilidioksidia ja palauttaa sen
maahan**

Tämä on maapallolle hyväksi



© Sapienza URS

Massimo 10v, Rooma - Italia

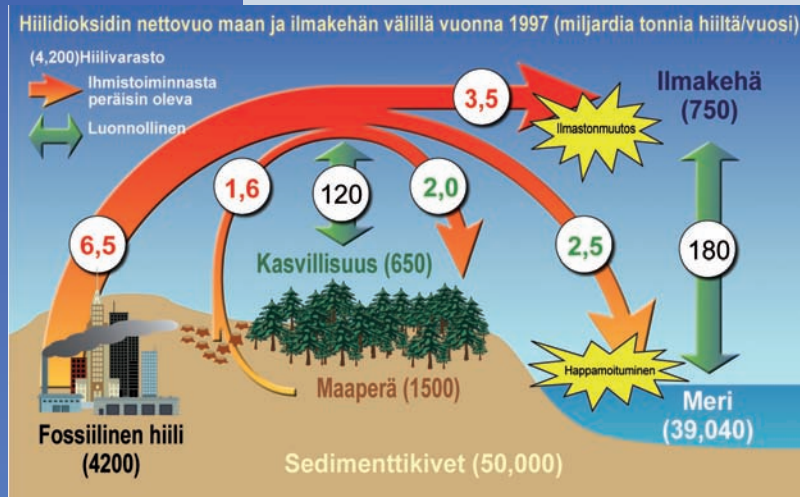
**Lastemme mielestä hiilidioksidin geologinen
varastointi on järkevää**

Ilmastonmuutos ja hiilidioksidin geologisen varastoinnin tarpeellisuus

Kuva 1
Maapallon hiilidioksidipäästöt yhdistettynä ihmisen toiminnasta aiheutuviin n. 30 Gt hiilidioksidipäästöihin vuodessa, mikä vastaa 8,1 Gt hiiltä (6,5 Gt fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja 1,6 Gt metsien hävittämisestä ja maatalouden harjoittamisesta).

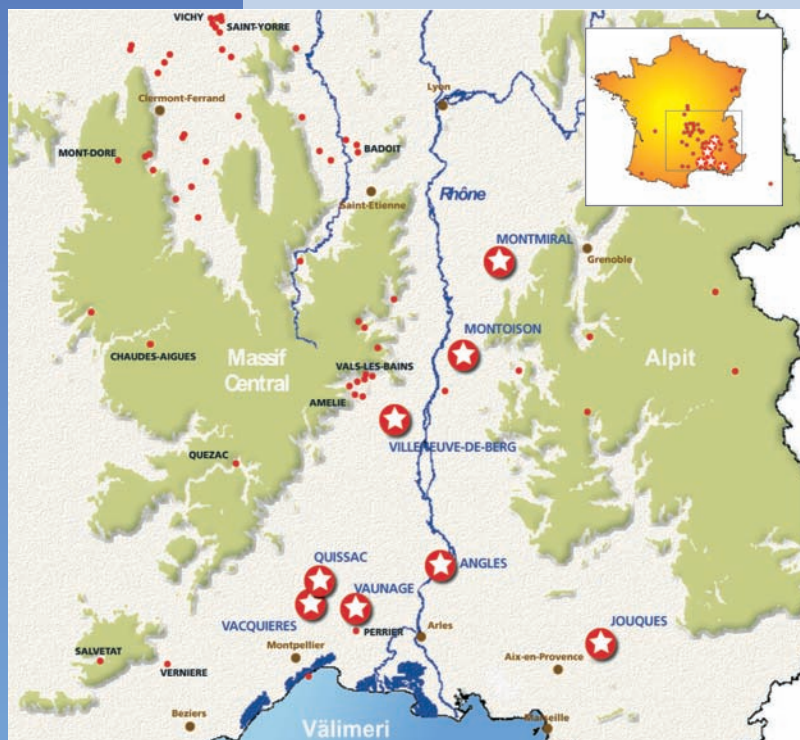
Ihmiskunta vapauttaa ylimääräistä hiilidioksidia (CO₂) ilmakehään

Ajatus siitä, että ihmisen toimet häiritsevät planeettamme hiilen kiertoa, on jo hyväksytty. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuudet olivat alhaisemmat (n. 280 ppm, eli 0.028 %) ennen teollista vallankumousta, sekä ajalla joka ulottui 10 000 vuotta taaksepäin. Tämä oli seurausta kierrosta, jossa hiilen vaihto geosfääriin, merien



© BRGM im@gé

Kuva 2
Ranskan hiili- ja kaasuprovinssi



© BRGM im@gé

ja ilmakehän välillä oli tasapainossa. Viimeisten 250 vuoden aikana lisääntynyt fossiilisten polttoaineiden (hiili, öljy, kaasu) käyttö energian tuotannossa, lämmityksessä, teollisuudessa ja kuljetuksessa on nostanut ilmakehään vapautuneen hiilidioksidin määrää (**Kuva 1**). Ihmisen tuottamasta ylimääräisestä hiilidioksidista noin puolet on päätynyt uudelleen kasvien käyttöön ja liuennut meriin. Merissä ylimääräinen hiilidioksidi voi aiheuttaa merien happamoitumista ja siihen mahdollisesti liittyvien negatiivisten seurausten muodossa haittoja merien kasveille ja eläimille. Jäljelle jäänyt osa ylimääräisestä hiilidioksidista on varastoitunut ilmakehään, missä se kasvihuonekaasuna varastoi osan auringon lämmöstä ja aiheuttaa maan pinnalla havaittavan lämpötilan nousun. Ilmakehän CO₂-pitoisuus on nykyään 387 ppm, eli se on noussut 38 %. Tarvitaan äärimmäisiä ja välittömiä toimia, jotta ilmakehän CO₂-pitoisuus ei nousisi tulevana vuosikymmeninä yli kriittisenä pidetyn 450 ppm tason. Asiantuntijat ovat maailmanlaajuisesti yksimielisiä siitä, että kaikkein vakavimpien seuraamusten estäminen tämän tason yläpuolella voi olla mahdotonta.

Hiilen palauttaminen takaisin maahan

Maailma on ollut vahvasti riippuvainen fossiilisista polttoaineista jo noin vuonna 1750 alkaneen teollisen ajan alusta asti. Siksi ei yllätä, että yhteiskunnan muuttaminen ilmastoystävällisiin energialähteisiin perustuvaksi ottaa sekä aikaa että rahaa. Ensimmäinen askel ja lyhyen aikavälin ratkaisu jota tarvitsemme, on vähentää riippuvuuttamme fossiilisista polttoaineista käyttämällä niitä vähemmän saastuttavalla tavalla. Tämä antaa aikaa kehittää uusiutuviin energialähteisiin perustuvaa teknologiaa ja infrastruktuuria. Yksi mahdollisuuksista on luoda energian tuotantoprosessiin suljettu hiilen kierto, jolloin alun perin kaasun, öljyn tai hiilen olomuodossa ollut hiili palautetaan takaisin maan alle hiilidioksidina. Mielenkiintoinen huomio on, että hiilidioksidin geologinen varastointi ei ole ihmisen keksintö, vaan se on täysin luonnollinen ja laajalle levinnyt ilmiö, joka ilmenee tuhansia ja miljoonia vuosia vanhoina maanalaisina hiilidioksidivarastoina. Tällaisesta alueesta esimerkkinä on 1960-luvulla öljynetsinnän yhteydessä Kaakkois-Ranskasta löydetty kahdeksan luonnollisen hiilidioksidiesiintymän sarja (**Kuva 2**).

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi: Lupaava hillitsemiskeino

Hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla (CCS*) voi

* Katso lopussa oleva sanasto

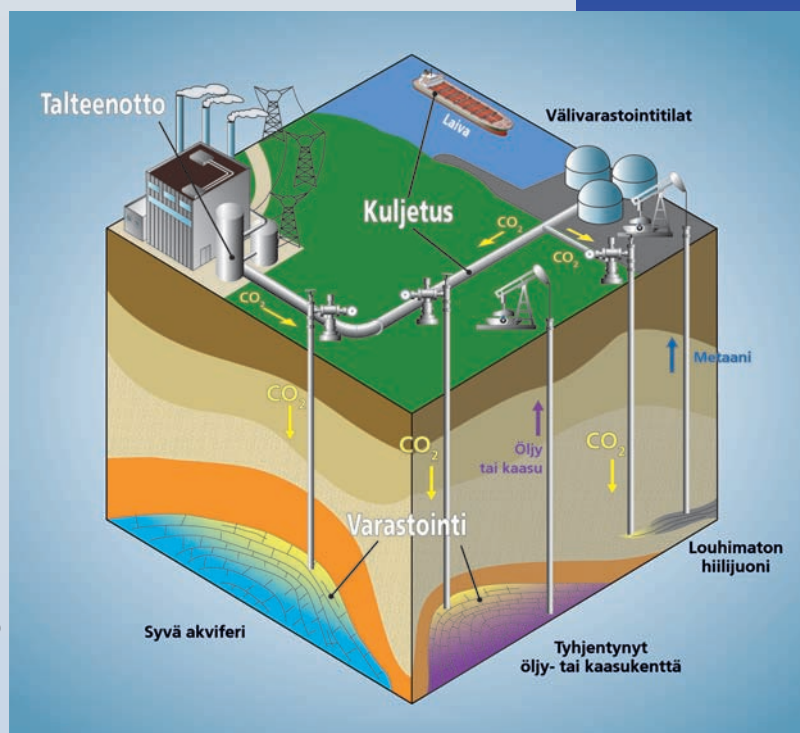
olla ratkaiseva rooli niiden keinojen joukossa, joilla pyritään lieventämään ilmastomuutosta ja merien happamoitumista. Sen osuus vuoteen 2050 mennessä tarvittavista hiilidioksidin päästövähennyksistä voi olla jopa 33 %. CCS tarkoittaa hiilidioksidin talteenottoa hiili- tai kaasukäyttöisillä voimalaitoksilla sekä teollisuuslaitoksilla (esim. teräs- ja sementtitehtaat, öljynjalostamot, jne.), hiilidioksidin kuljettamista joko putkia pitkin tai laivalla varastointipaikalle ja hiilidioksidin injektointista kaivon* kautta soveltuvaan geologiseen muodostumaan pitkäaikaista varastointia varten (Kuva 3). Fossiilisten polttoaineiden käytön jatkaminen on lyhyellä aikavälillä välttämätöntä, koska suuren mittakaavan korvaavaa "puhdasta" energianlähdetä tyydyttämään maailman kasvavan väestön ja kehittyvien maiden kasvavaa energian tarvetta ei ole. Ihmiskunta voi kehittää kestävään energiantuotantoon perustuvaa maailmanlaajuista talouttaan ympäristöystävälliseen suuntaan käsi kädessä CCS:n kanssa.

CCS:n maailmanlaajuinen kehitys kukoistaa

Hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin (CCS) liittyviä suuria tutkimusohjelmia on ollut Euroopassa, Yhdysvalloissa, Kanadassa, Australiassa ja Japanissa jo 1990-luvulta asti. Maailman ensimmäisistä demonstraatioprojekteista on saatu jo paljon tietoa ja niissä on injektoitu hiilidioksidia syvälle maan alle monia vuosia: Sleipner, Norjassa (n. 1 Mt/vuosi jo vuodesta 1996) (Kuva 4.), Weyburn, Kanadassa (n. 1,8 Mt/vuosi alkaen vuodesta 2000) ja In Salah, Algeriassa (n. 1 Mt/vuosi vuodesta 2004). Näillä paikoilla tapahtuva, hiilidioksidin varastointia koskeva IEAGHG:n* ja CSLF:n* edistämä kansainvälinen yhteistyö, on ollut erityisen tärkeää CCS:n ymmärtämisen laajentamisessa ja asiaan keskittyvän maailmanlaajuisen tiedeyhteisön kehittämisessä. Erinomainen esimerkki tästä on IPCC:n* erikoisraportti hiilidioksidin talteenotosta ja varastoinnista (2005). Siinä kuvataan asiaan liittyvä senhetkinen tietämys ja esteet joiden yli täytyy päästä, jotta tekniikan laajamittainen käyttöönotto olisi mahdollista. Vankka tekninen osaaminen on jo olemassa ja maailmassa ollaan siirtymässä luottavaisina kohti demonstraatiovaihetta. Teknisen kehityksen lisäksi laaditaan lainsäädännön, säädösten, talouden ja politiikan kehyksiä, sekä määritetään sosiaalista näkemystä ja tukea. Jotta CCS:n laajamittainen kaupallinen käyttö olisi mahdollista vuonna 2020, on Euroopassa tarkoitus saada 12 laajamittaista demonstraatiohanketta rakennettua ja käynnistettyä vuoteen 2015 mennessä. Tätä varten julkaistiin tammikuussa 2008 Euroopan komission ilmasto- ja energiapaketti, joka sisältää direktiiviehdotuksen hiilidioksidin geologisesta varastoinnista ja sen lisäksi muita keinoja joilla CCS:n kehitystä ja turvallista käyttöä voidaan edistää.

Hiilidioksidin varastoinnin avainkysymykset

"CO₂GeoNet Network of Excellence" on tutkimuslaitosten

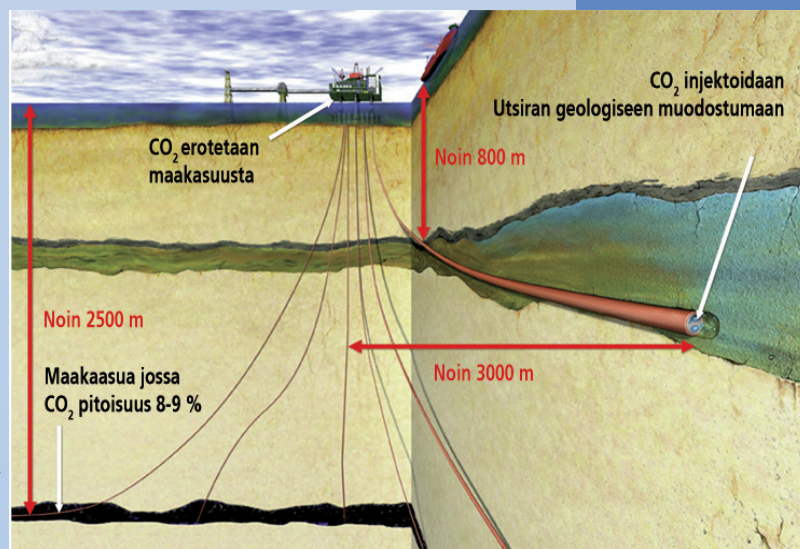


© BRGM im@gé

ryhmittymä, joka perustettiin Euroopan komission tuella säilyttämään Eurooppa suurimittakaavaisen kansainvälisen tutkimuksen eturintamassa. Yksi ryhmittymän tavoitteista on selkeä tieteellinen tiedonvälitys hiilidioksidin varastoinnin teknisistä näkökulmista. Tämän elintärkeän teknologian olennaisista kohdista käytävän vuoropuhelun rohkaisemiseksi CO₂GeoNet'in tutkijat ovat koonneet vastaukset moniin jatkuvasti kysyttyihin kysymyksiin. Vastaukset kysymyksiin, esimerkiksi kuinka hiilidioksidin geologinen varastointi voidaan toteuttaa, missä olosuhteissa se on mahdollista ja mitkä ovat turvallisen ja tehokkaan toimeenpanoon kriteerit, esitetään seuraavilla sivuilla.

Kuva 4

Pystysuuntainen läpileikkaus Sleipnerin kentältä Norjasta. 2500 m syvyydestä saatava maakaasu sisältää useita prosentteja hiilidioksidia, mikä on poistettava kaasusta, jotta se vastaisi kaupallisia standardeja. Sen sijaan että hiilidioksidi vapautettaisiin ilmakehään, se injektoidaan noin 1000 m syvyydellä sijaitsevaan hiekkaiseen Utsiran akviferiin*.

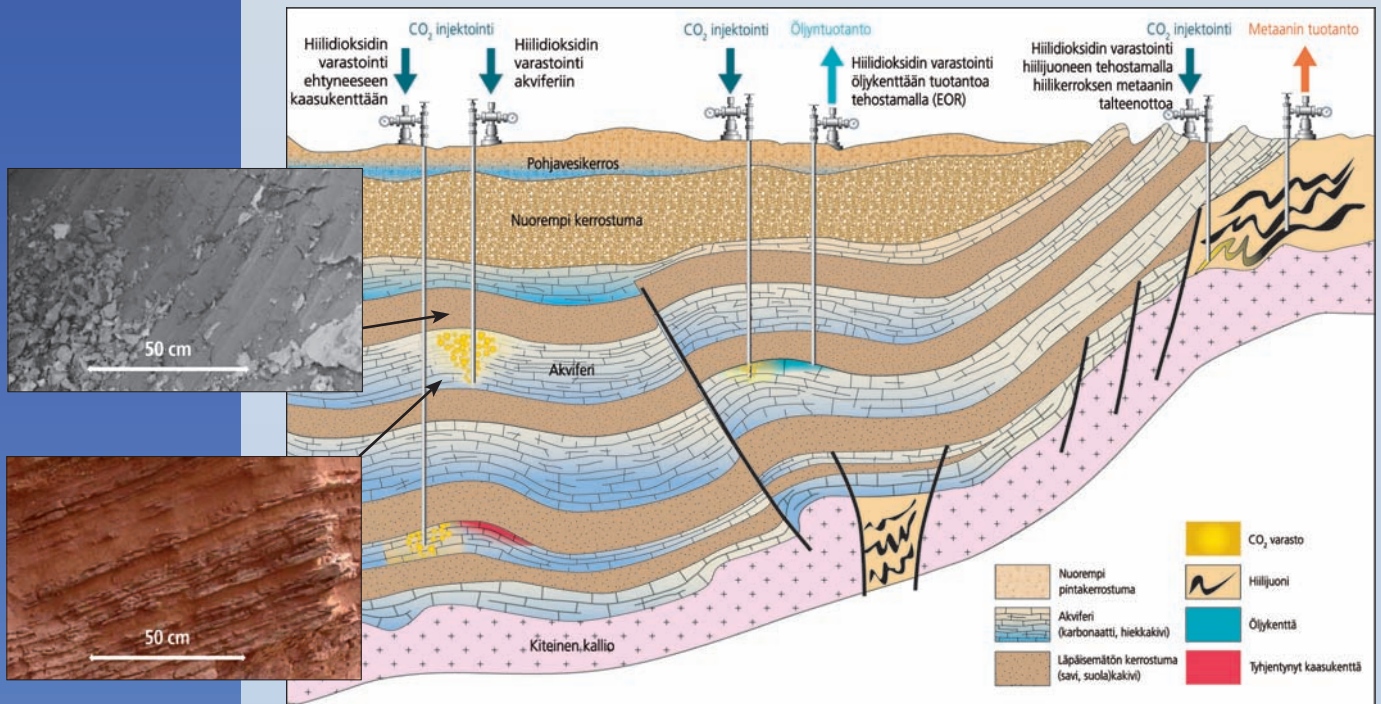


© StatoilHydro

Kuva 3
Voimalaitoksilla CO₂ otetaan talteen erottamalla se muista kaasuista. Sen jälkeen se paineistetaan ja kuljetetaan joko putkia pitkin tai laivalla geologiseen varastomuodostumaan: syvällä sijaitsevaan suolavesiakviferiin, köyhtyneeseen öljy- tai kaasumuodostumaan tai louhimattoon hiiliesiintymään.

Mihin ja kuinka paljon hiilidioksidia voidaan varastoida maan alle?

Hiilidioksidia ei voida injektoida maan alle minne tahansa, vaan sopivat muodostumat on ensin tunnistettava kallioperästä. Hiilidioksidin geologiseen varastointiin mahdollisesti sopivia varastomuodostumia esiintyy ympäri maailman ja niiden kapasiteetti riittää hillitsemään merkittävästi ihmisen vaikutusta ilmastomuutoksessa.



Kuva 1
Hiilidioksidia injektoidaan syvällä sijaitseviin huukoisiin ja läpäiseviin geologisiin kerrostumiin (vrt. hiekkakivi alemmassa kuvassa), joiden päällä sijaitsee läpäisemätöntä kiveä (vrt. savikivi ylemmässä kuvassa), mikä estää hiilidioksidin karkaamisen takaisin maan pinnalle. Tärkeimmät varastointimahdollisuudet ovat:
1. Kõyhtyneet öljy- ja kaasumuodostumat, joissa osassa hiilidioksidia voidaan käyttää parantamaan öljyn- tai kaasun saatavuutta.
2. Suolavesiakviferit, joiden vesi ei suolaisuutensa vuoksi sovellu ihmisen hyötykäyttöön.
3. Syvällä sijaitsevat louhimattomat hiiliesiintymät, joissa hiilidioksidia voidaan käyttää parantamaan metaanin saatavuutta esiintymästä.

Hiilidioksidin varastointiin on kolme mahdollisuutta (**Kuva 1**):

1. Öljyn ja maakaasun etsinnästä ja tuotannosta hyvin tunnetut tyhjentyneet maakaasu- ja öljykentät, jotka tarjoavat välittömänsuoran mahdollisuuden hiilidioksidin varastoimiseen.
2. Huonommin tunnetut, mutta suuren potentiaalin omaavat suolavesiakviferit.
3. Hyödyntämättömät hiiliesiintymät, jotka ovat tulevaisuuden mahdollisuuksia, kunhan saadaan ratkaistua kuinka injektoida suuria määriä hiilidioksidia alhaisen läpäisevyyden* omaaviin hiilikerrostumiin.

Varastomuodostumat

Soveltuvaan maanalaiseen varastomuodostumaan injektoitu hiilidioksidi kerääntyy huukoisessa kalliassa olevien rakeiden ja halkeamien väliin huokostiloihin, missä se syrjäyttää ja korvaa minkä tahansa nestemäisen aineen joka huokostilassa on aiemmin ollut, kuten kaasu, vesi tai öljy. Hiilidioksidin geologisella varastomuodostumalla tulee siis olla korkea huokoisuus* ja läpäisevyys. Tällaisia muodostumia on syntynyt muinaisten sedimenttien kerrostumisen tuloksena

ja ne sijaitsevat ns. "sedimenttien kerrostumisaltaissa". Joilakin paikoilla nämä huukoiset muodostumat vuorottelevat läpäisemättömien muodostumien kanssa. Nämä läpäisemättömät kerrokset voivat toimia paineen kestävässä sulkuna. Sedimenttien kerrostumisaltaissa tavataan usein hiilivesiintymiä ja luonnon omia hiilidioksidiesiintymiä. Koska muodostumat ovat säilyttäneet öljyä, kaasua ja puhdasta hiilidioksidia miljoonia vuosia, pidetään sitä todisteena niiden kyvystä säilyttää nestemäisiä aineita varastoituneena pitkiäkin aikoja. Hiilidioksidin maanalaiset varastointivaihtoehdot esitetään usein erittäin yksinkertaistettuna homogeneisena kerroskakkurakenteena. Todellisuudessa geologiset varastot koostuvat epätasaisesti jakautuneista ja paikallisesti siirrostuneista muodostumista ja sulkukerroksista, jotka muodostavat monimutkaisia heterogeenisiä rakenteita. Hiilidioksidin pitkäaikaiseen varastointiin ehdotetun paikan geologisten rakenteiden soveltuvuuden arvioimiseksi tarvitaan paljon syväluotaavaa tietoa sijoituspaikasta sekä geotieteellistä kokemusta. Lupaavien hiilidioksidin varastomuodostumien tulee täyttää monta kriteeriä, joista tärkeimpiä ovat:

- Riittävä huokoisuus, läpäisevyys ja varastokapasiteetti.
- Huokosen kerroksen päällä tulee olla ns. sulkukerrok* (esim. savea, savikiveä, merkelä, suolakiveä), joka estää hiilidioksidin nousun ylöspäin.

- Sulkevia rakenteita, esimerkiksi kupolin muotoinen sulkukerros, joka voi ohjata hiilidioksidin leviämistä varastomuodostumassa.
- Varastomuodostuman sijaittava yli 800 m syvyydessä jotta saadaan varastoitua mahdollisimman paljon hiilidioksidia. Tällöin riittävä paine ja lämpötila takaavat, että hiilidioksidi voidaan injektoida nestemäisessä faasissa.
- Juomavedeksi kelpaavaa vettä ei saa olla alueella. Hiilidioksidia ei injektoida ihmisen käyttöön tai toimintoihin sopiviin vesiin.

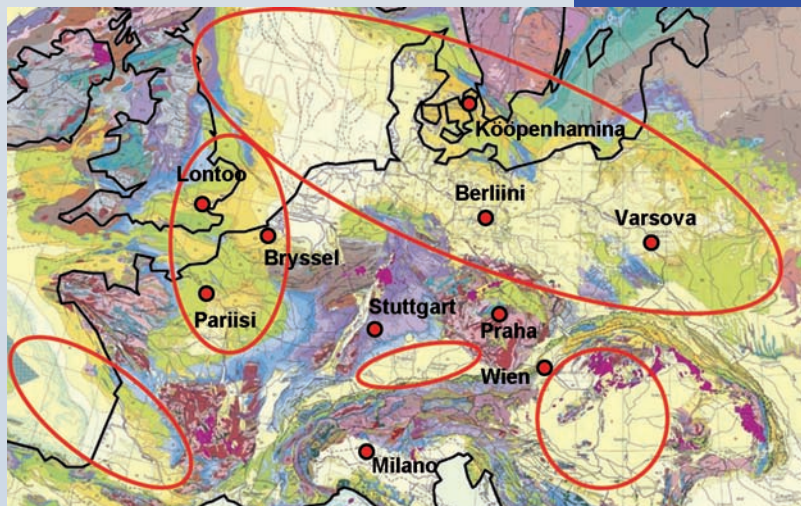
Mistä löytyvät Euroopan varastomuodostumat

Sedimenttien kerrostumisaltaita löytyy ympäri Eurooppaa, kuten Pohjanmeren merialueelta ja Alppien vuoristoa ympäröivältä manneralueelta (**Kuva 2**). Monet niistä täyttävät geologisen varastoinnin kriteerit ja tutkijat kartoittavat sekä karakterisoivat niitä parhaillaan. Muut Euroopan alueet, kuten suuri osa Skandinaviasta, koostuvat maapallon kiteisestä vanhasta kuoresta, eikä sieltä löydy varastointiin soveltuvia muodostumia. Esimerkki lupaavasta varastointialueesta on ”Southern Permian Basin” eli Englannista Puolaan ulottuva eteläinen permikautinen kerrostumisallas (esitetty kuvassa 2 suurimmalla soikiolla). Geologiset prosessit ovat vaikuttaneet näihin sedimentteihin siten, että osa sedimenttien huokostilasta on täyttynyt suolavedellä, öljyllä tai maakaasulla. Savikerrokset, jotka esiintyvät huokoisten hiekkakivien välissä, ovat puristuneet huonosti läpäiseviksi kerroksiksi jotka estävät nestemäisten aineiden poistumisen. Monet hiekkakivimuodostumista sijaitsevat 1–4 km syvyydessä missä paine on tarpeeksi korkea pitämään hiilidioksidin tiheässä olomuodossa. Näissä syvyyksissä muodostumissa olevan veden suolapitoisuus on 100–400 g/l, mikä on paljon suolaisempaa kuin merivesi (35 g/l). Kerrostumisaltaassa tapahtuneiden liikuntojen seurauksena vuorisuola deformatui plastisesti muodostaen satoja kupolimaisia rakenteita, joihin varastoitui myöhemmin maakaasua. Näitä rakenteita tutkitaan nyt mahdollisina hiilidioksidin lopullisina varastopaikkoina ja pilottiprojekteina.

Varastokapasiteetti

Varastokapasiteetista tarvitsevat tietoa poliitikot, viranomaiset ja varastoinnin toteuttajat. Arviot ovat yleensä erittäin likimääräisiä ja ne perustuvat sopivien muodostumien spatiaaliseen laajuuteen. Kapasiteettia voidaan arvioida karkeasti valtiotasolla tai tarkemmalla kerrostumisallas- sekä varastomuodostumatasolla, jolloin laskennassa otetaan huomioon olemassa olevan geologisen rakenteen heterogeenisyys ja monimuotoisuus.

Volumetrinen kapasiteetti: Julkaisuissa esitetty kansallinen varastokapasiteetti perustuu yleensä muodostuman huokostilavuuden laskemiseen. Teoriassa muodostuman varastokapasiteetti voidaan laskea kertomalla alueen pinta-ala sen paksuudella, keskimääräisellä huokoisuudella sekä hiilidioksidin keskimääräisellä tiheydellä varastomuodostuman syvyydessä. Koska



© BGR

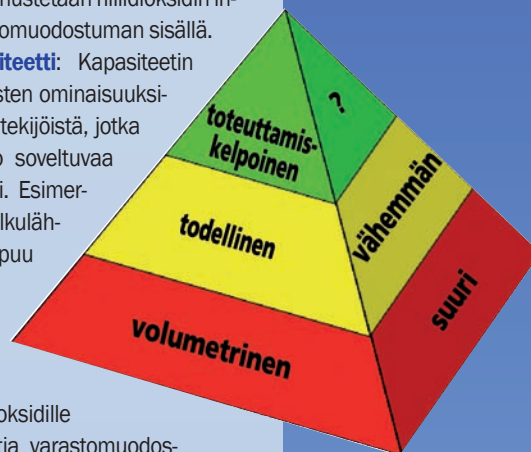
varastomuodostuman huokostila on jo täynnä vettä, voidaan siitä käyttää hiilidioksidin varastointiin vain pieni osa, yleensä 1–3 %. Tätä varastokapasiteettikerrointa käytetään kun arvioidaan volumetristä kapasiteettia.

Todellinen kapasiteetti: Yksittäisellä varastointipaikalla tehdyllä yksityiskohtaisella tutkimuksella saadaan aikaan realistisempi arvio varastointikapasiteetista. Muodostuman paksuus ei ole vakio ja varastomuodostuman ominaisuudet voivat vaihdella lyhyen matkan sisällä. Tietämys muodostuman koosta, muodosta, geologisista ominaisuuksista ja rakenteista auttaa vähentämään tilavuuden laskemiseen liittyviä epävarmuustekijöitä. Todellista varastointikapasiteettia voidaan arvioida näihin tietoihin perustuvalla tietokonemallinnuksella, missä mallinnuksen avulla ennustetaan hiilidioksidin injektioitumista ja liikettä varastomuodostuman sisällä.

Toteuttamiskelpoinen kapasiteetti: Kapasiteetin määrä riippuu kiven fysikaalisten ominaisuuksien lisäksi sosioekonomisista tekijöistä, jotka vaikuttavat siihen voidaanko soveltuvaa muodostumaa käyttää vai ei. Esimerkiksi hiilidioksidin siirto alkulähteeltä varastointipaikalle riippuu kuljetuskustannuksista. Kapasiteettiin vaikuttaa myös hiilidioksidin puhtaus, sillä muut sekoittuneet kaasut vähentävät hiilidioksidille olemassa olevaa kapasiteettia varastomuodostumassa. Varastomuodostuman hyötykäyttöön otossa viimeisen sanan sanovat poliittiset päätökset, sekä yleinen mielipide.

Euroopan varastokapasiteetin tiedetään olevan korkea, vaikka varastomuodostumien kompleksisuuteen, heterogeenisyyteen ja sosioekonomisiin tekijöihin perustuvia epävarmuustekijöitä esiintyy. EU-projekti GESTCO* arvioi hiilidioksidin varastointikapasiteetiksi Pohjanmerellä ja sen ympäristössä 37 Gt. Tämän perusteella alueelle voitaisiin asentaa laajat hiilidioksidin injektointilaitteistot ja injektoida hiilidioksidia useiden vuosikymmenten ajan. Varastokapasiteetin päivitys ja täydennyskartoitus on ajankohtainen tutkimusaihe sekä yksittäisille valtioille että suuremmissa Euroopan mittakaavassa (EU:n Geocapacity* projekti).

Kuva 2
Euroopan geologiseen karttaan (1:5 000 000) perustuvassa kuvassa esitetään punaisilla ellipsillä tärkeimmät hiilidioksidin geologiseen varastointiin soveltuvat sedimenttien kerrostumisaltaita.



Kuinka suuria hiilidioksidimääriä kuljetetaan ja injektoidaan?

Sen jälkeen, kun hiilidioksidi otetaan talteen teollisuuslaitoksella, se paineistetaan, kuljetetaan ja injektoidaan varastomuodostumaan yhden tai useamman injektiokaivon kautta. Usean miljoonan tonnin vuosittainen varastointi vaatii koko ketjun optimointia.

Paineistus

CO₂ paineistetaan tiheäksi nesteeksi jolloin se vie paljon vähemmän tilaa kuin kaasuna. Voimalaitoksen tai teollisuuslaitoksen savukaasuista erotettu konsentroitunut hiilidioksidi kuivataan (hiilidioksidista erotetaan vesi) ja paineistetaan kuljetuksen ja varastoinnin tehostamiseksi (**Kuva 1**). Kuivaus tehdään laitteiston ja infrastruktuurin korroosion sekä hydraattien muodostumisen estämiseksi. Hydraatit ovat kiinteitä jääkiteiden tapaisia kiteitä, jotka voivat aiheuttaa laitteistoon tai putkiin tukoksia. Paineistus toteutetaan yhdessä kuivauksen kanssa monivaiheisessa prosessissa, mikä koostuu jatkuvista paineistus-, jäähdytys- ja veden erotussykleistä. Paine, lämpötila ja vesipitoisuus pitää säätää tietyn kuljetustavan ja tietyn varastointipaikan painevaatumusten mukaiseksi. Merkittävimmät tekijät, jotka vaikuttavat paineistuslaitteiston suunnitteluun, ovat kaasujen virtausnopeus, imuvoima sekä kompressorin teho. Paineistusteknologia on saatavilla olevaa teknologiaa joka on jo käytössä monilla teollisuuden aloilla.

Kuljetus

Hiilidioksidia voidaan kuljettaa joko laivalla tai putkia pitkin. Tällä hetkellä hiilidioksidin laivakuljetusta käytetään

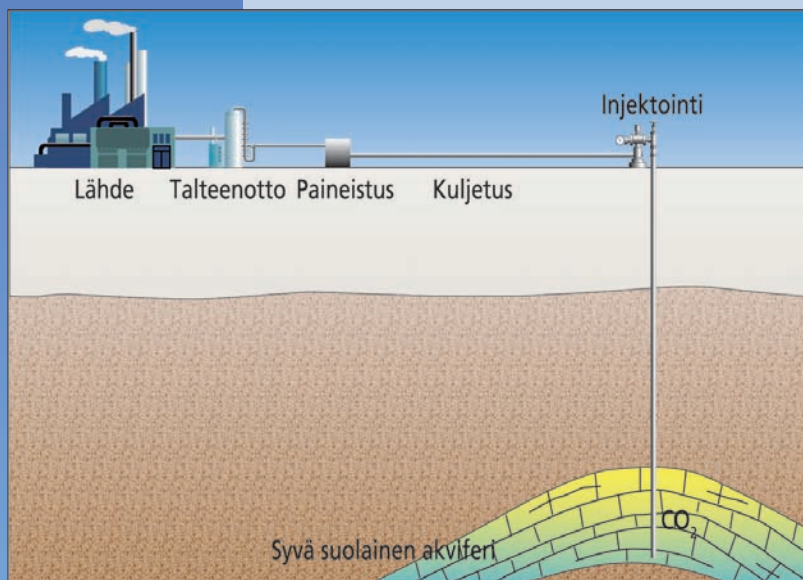
teollisiin tarkoituksiin hyvin pienimuotoisesti (10 000 – 15 000 m³), mutta siitä voi tulla kiinnostava vaihtoehto tulevaisuuden CCS-projekteille, jos rannikolla sijaitseva hiilidioksidin lähde on kaukana soveltuvasta varastomuodostumasta. Nestekaasun kuljetukseen käytetyt alukset soveltuvat myös hiilidioksidin kuljetukseen. Hiilidioksidia voidaan kuljettaa nestemäisessä muodossa, koska se paineistetaan ja jäähdytetään. Uusimpien nestekaasun kuljetukseen soveltuvien laivojen kapasiteetti on jopa 200 000 m³ ja niillä voidaan kuljettaa jopa 230 000 m³ hiilidioksidia. Laivakuljetuksilla ei voida logistisesti kuljettaa jatkuvalla virralla, minkä vuoksi satamissa on oltava lastausta varten hiilidioksidin välivarastointitilat.

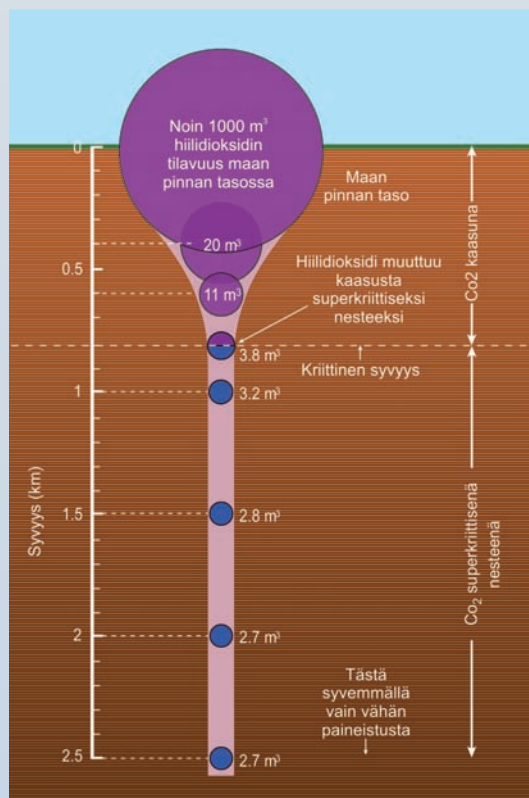
Hiilidioksidin putkikuljetuksella kuljetetaan tälläkin hetkellä suuria määriä hiilidioksidia öljy-yhtiöiden käyttöön. Öljy-yhtiöt käyttävät hiilidioksidia parantaakseen öljyn saatavuutta kallioperästä (EOR*). Tällä hetkellä suurin osa putkistoista sijaitsee Yhdysvalloissa (n. 3000 km). Putkikuljetus on laivakuljetusta kustannustehokkaampaa ja sillä saadaan aikaiseksi jatkuva virta tuotantolaitokselta varastointipaikalle. Olemassa olevia CO₂-putkistoja operoidaan siten, että hiilidioksidi on siellä superkriittisessä olomuodossa. Tällöin hiilidioksidi käyttäytyy kuin kaasu, mutta sillä on nesteen tiheys. Kolme tekijää määrää kuinka paljon putkistolla voidaan kuljettaa hiilidioksidia: putken halkaisija, paine putken pituudelta ja edellisestä johtuen putken seinämäpaksuus.

Injektointi

Varastointipaikalle kuljetettu hiilidioksidi injektoidaan paineen alaisena varastomuodostumaan (**Kuva 2**). Injektointipaineen tulee olla huomattavasti varastomuodostuman painetta suurempi, jotta injektoitu hiilidioksidi syrjäyttäisi olemassa olevan nesteen pois injektointipisteestä. Injektointikaivojen määrä riippuu varastoitavan hiilidioksidin määrästä, injektointinopeudesta (CO₂ l/h), muodostuman läpäisevyydestä ja paksuudesta, suurimmasta mahdollisesta turvallisesta injektointipaineesta ja kaivotyypistä. Koska tavoitteena on hiilidioksidin pitkäaikainen varastointi, tulee olla varma muodostuman hydraulisesta eheydestä. Korkeat injektointimäärät voivat aiheuttaa paineen kasvua injektointipisteessä etenkin huonosti läpäisevissä muodostumissa. Yleensä injektointipaine pyritään pitämään alhaisempana kuin kiven halkeamispaine, ettei varas-

Kuva 1
Hiilidioksidin geologisen varastoinnin vaiheet. Hiilidioksidin matka päästölähteestä kohti turvallista ja kestävää varastoa kulkee monen erilaisen toiminnallisen vaiheen läpi, mm. talteenotto, paineistus, kuljetus ja injektointi.





Kuva 2
Kallioperään injektoidusta hiilidioksidista tulee tiheä superkriittinen* neste noin 0,8 km syvyydessä. Sen tilavuus pienenee huomattavasti pinnalla olevasta noin 1000 m³ tilavuudesta noin 2,7 m³ tilavuuteen 2 km syvyydessä. Tämä on yksi niistä tekijöistä, miksi hiilidioksidin geologinen varastointi on niin houkuttelevaa.

tomuodostuma tai sen päällä sijaitseva sulkukerros vaurioidu. Maksimaalisen injektioapaineen määrittämiseen käytetään geomekaanisia analyyseja ja malleja. Myös kemialliset prosessit voivat vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti hiilidioksidia voidaan injektoida muodostumaan. Injektointikaivon läheisyydessä voi tapahtua liukenemista ja haihtumista. Tähän vaikuttaa mm. varastomuodostuman kivilaji, nestemäisten aineiden koostumus ja varastomuodostuman ominaisuudet (lämpötila, paine, tilavuus, konsentraatio, jne.). Liukeneminen ja haihtuminen voivat johtaa joko kasvavaan tai vähenevään injektointinopeuteen. Välttämättä hiilidioksidin injektioimisen jälkeen osa siitä liikenee varastomuodostuman suolaiseen veteen alentaen sen pH:ta*. Varastomuodostuman karbonaattimineraalien liukeneminen puskuroi tapahtumaa. Karbonaattien reaktiivisuus on korkea ja ne ovatkin ensimmäisiä mineraaleja jotka alkavat liueta välittömästi injektoinnin alettua. Liukenemisprosessi voi kasvattaa muodostuman huokoisuutta ja injektioivyyttä*. On myös mahdollista että liukenemisen jälkeen karbonaattimineraalit voivat saostua ja sementoida muodostuman injektioikaivon ympäriltä. Läpäisevyyden laskua kaivon läheisyydessä voidaan kontrolloida korkealla virtausnopeudella. Tällöin kemiallinen tasapaino-alue, missä saostumista tapahtuu, siirtyy kauemmas. Toinen ilmiö minkä injektioiminen aiheuttaa on kuivuminen. Happanemisivaiheen jälkeen kaivon lähelle jäänyt

jäännösvesi liikenee injektointiin kuivaan kaasuun, mikä aiheuttaa suolavedessä* esiintyvien kemiallisten yhdisteiden konsentroituimista. Mineraalit, esimerkiksi suolat, saostuvat kun suolavesi on tarpeeksi konsentroitunutta. Tämä vähentää injektointikaivon ympäristön läpäisevyyttä.

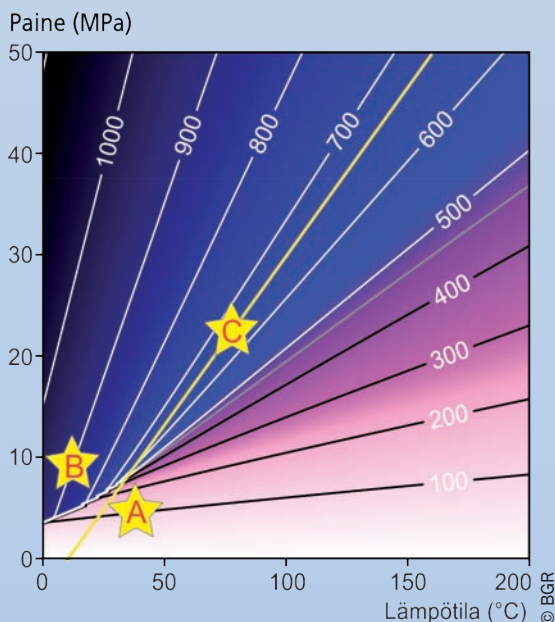
Monimutkaiset vuorovaikutussuhteet, jotka esiintyvät paikallisesti kaivon läheisyydessä, vaikuttavat injektointiin. Myös aika ja etäisyys kaivon vaikuttavat näihin vuorovaikutussuhteisiin, joita pyritään simuloimaan numeerisesti.

Injektoinnin virtausnopeuden huolellinen säätäminen on tarpeen, jotta voidaan selvittää halutun hiilidioksidimäärän injektointia rajoittavista prosesseista.

CO₂-virran koostumus

Talteenotto-prosessista riippuva CO₂-virran koostumus ja puhtaus vaikuttavat suuresti kaikkiin seuraaviin CO₂-projektin vaiheisiin. Hiilidioksidikaasun sisältämät muut aineet, kuten vesi, vetysulfaatti (H₂S), rikin tai typen oksidit (SO_x, NO_x), typi (N₂) tai happi (O₂), vaikuttavat jo muutaman prosentin pitoisuuksina hiilidioksidin fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin ja sitä kautta myös sen käyttäytymiseen ja vaikutuksiin. Näiden aineiden vaikutuksiin täytyy varautua jo siinä vaiheessa, kun suunnitellaan paineistus-, kuljetus- ja injektiovaiheita, sekä kun säädetään toimintaolosuhteita ja laitteistoa.

Suurien hiilidioksidimäärien kuljetus ja injektointi on jo mahdollista, mutta jos hiilidioksidin geologisesta varastoinnista tulee laajamittaista, pitää kaikki mukana olevat vaiheet suunnitella erikseen jokaiselle projektille sopivaksi. Tärkeimmät muuttujat ovat hiilidioksidivirran termodynaamiset ominaisuudet (**Kuva 3**), virtausnopeus ja ominaisuudet niin varastomuodostuman ulkopuolella että muodostuman sisällä.



Kuva 3
Puhtaan hiilidioksidin tiheys (kg/m³) paineen ja lämpötilan funktiona. Keltainen viiva kuvaa sedimenttikivialtaan tyypillistä paine- ja lämpötilagradienttia. Yli 800 m syvyydessä (~8 MPa) varastomuodostuman olosuhteet pitävät hiilidioksidin tiheyden suurena (sininen varjostus). Vihreä viiva kuvaa hiilidioksidin kaasu- ja nestefaasin rajaa. Tyypilliset paine- ja lämpötilaolosuhteet talteenotolle, kuljetukselle ja varastoinnille ovat kuvattu A-, B- ja C-koirjaimilla.

Mitä hiilidioksidille tapahtuu varastomuodostumassa?

Sen jälkeen kun hiilidioksidi on injektoitu varastomuodostumaan, se nousee nosteen saattelemana ylöspäin täyttäen huokostilan sulkukerroksen alapuolella. Ajan saatossa osa hiilidioksidista liukenee ja muuttuu lopulta mineraaleiksi. Nämä prosessit tapahtuvat erilaisilla aikajaksoilla ja johtavat pysyvään varastoitumiseen.

Varastoitumismekanismit

Varastomuodostumaan injektoitu hiilidioksidi täyttää sedimenttikiven huokostilan, joka on useimmissa tapauksissa jo valmiiksi täynnä suolavettä. Tämä johtaa edellä esitettävien mekanismien käynnistymiseen. Ensimmäistä pidetään tärkeimpänä, koska se estää hiilidioksidin nousemisen maan pinnalle. Muut kolme parantavat enemmän varastoinnin tehokkuutta ja turvallisuutta ajan kuluessa.

1. Varastoituminen sulkukerroksen alle (rakenteellinen varastoituminen)

Tiheä hiilidioksidi on vettä "kevyempää", joten se alkaa nousta kohti pintaa. Liike pysähtyy vasta kun hiilidioksidi saavuttaa läpäisemättömän kiverroksen eli ns. sulkukerroksen, joka koostuu yleensä savikivestä tai suolakerroksesta. Sulkukerros toimii esteenä hiilidioksidin nousulle, minkä seurauksena hiilidioksidi kertyy suoraan sen alapuolelle. **Kuvassa 1** esitetään hiilidioksidin ylöspäin suuntautuva liike kiven huokostiloissa (sinisellä) kunnes se saavuttaa sulkukerroksen.

2. Kiinnittyminen pieniin huokosiin (jäännösvarastoituminen)

Kiinnittyminen pieniin huokosiin tapahtuu silloin, kun varastomuodostuman huokoisen kivilajin huokokset käyvät niin pieniksi, että hiilidioksidi ei enää mahdu liikkumaan ylöspäin, huolimatta tiheyserosta ympäröivän veden kanssa. Tämä prosessi tapahtuu enimmäkseen hiilidioksidin ylöspäin suuntautuvan liikkeen aikana ja se varastoi tyypillisesti muutaman prosentin injektoidusta hiilidioksidista. Määrä on riippuvainen myös varastomuodostuman kivilajin ominaisuuksista.

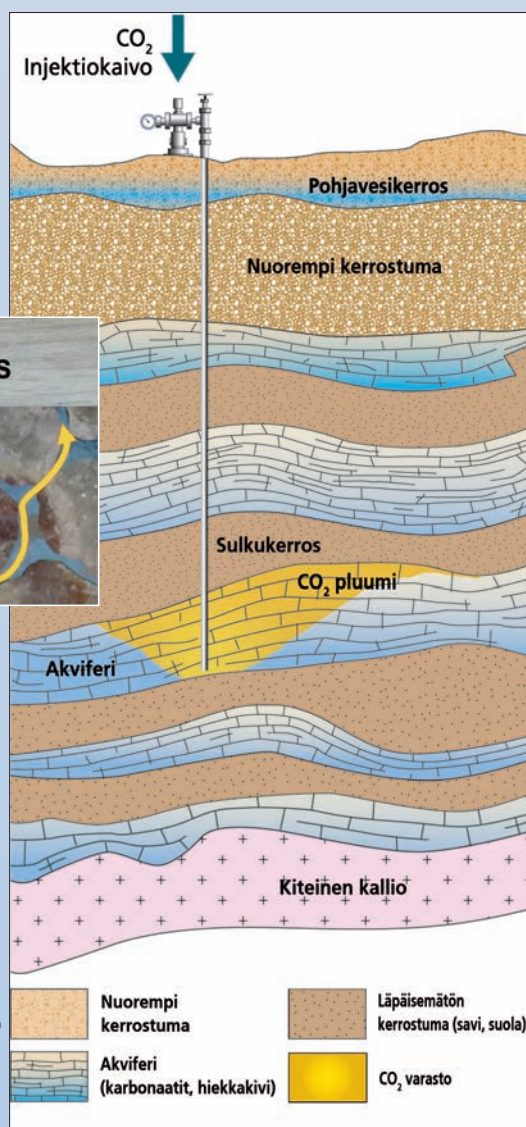
3. Liukeneminen (liukenemisvarastoituminen)

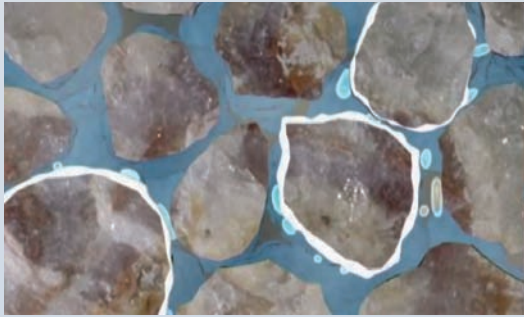
Pieni osa injektoidusta hiilidioksidista liukenee suolaveteen, joka täytti varastomuodostuman huokostilan ennen injektointia. Liukenemisestä seuraa että vesi johon hiilidioksidia on liuennut, muuttuu painavammaksi kuin vesi johon hiilidioksidia ei ole liuennut ja se pyrkii painumaan kohti varastomuodostuman pohjaa. Liukenemisnopeus riippuu hiilidioksidin ja suolaveden kontaktista ja sitä rajoittaa hiilidioksidin liukenemisen maksimikonsentraatio. Koska injektoitu hiilidioksidi pyrkii liikkumaan ylöspäin ja liuennut hiilidioksidi alaspäin, suolaveden ja hiilidioksidin kontakti uusiutuu koko ajan. Tämä kasvattaa liukenevan hiilidioksidin määrää. Nämä prosessit ovat suhteellisen hitaita koska ne tapahtuvat kapeissa huokosväleissä. Karkea arvio Sleipnerin projektista on, että noin 15 % injektoidusta hiilidioksidista on liuennut 10 vuoden injektoinnin jälkeen.

Mikroskooppinäkömä



Kuva 1
Injektoitu vettä kevyempi CO₂ pyrkii nousemaan ylöspäin mutta pysähtyy päällä sijaitseviin läpäisemättömiin kerroksiin.





Kuva 2

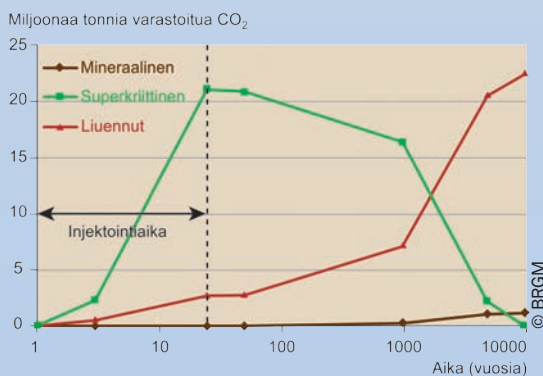
Tiheä CO₂ liikkuu ylöspäin (vaalean siniset kuplat), liukenee ja reagoi kiven mineraalirakeiden kanssa saostaen karbonaattimineraaleja rakeiden rajapinnoille (valkoisella).

4. Mineralisoituminen (varastoituminen mineraaleihin)

Hiilidioksidi voi reagoida ympäröivän kallioperän mineraalien kanssa, etenkin yhdistettynä suolaveteen. Riippuen pH-arvosta ja kallioperän muodostavista mineraaleista voivat jotkut mineraalit liueta ja jotkut saostua (Kuva 2). Arviot Sleipneristä osoittavat, että vain hyvin pieni osa hiilidioksidista mineralisoituu. On arvioitu, että 10 000 vuodessa hiilidioksidia ei esiinny enää omana erillisenä faasinan, vaan että 5 % injektoidusta hiilidioksidista mineralisoituu ja 95 % liukenee.

Näiden varastoitumismekanismien suhteellinen tärkeys on paikkakohtaista, eli jokaisen paikan yksilölliset ominaisuudet vaikuttavat asiaan. Esimerkiksi kupolimaisissa varastomuodostumissa hiilidioksidin pitäisi pysyä enimmäkseen omana faasinan pitkien aikojen ajan, kun taas tasaisissa muodostumissa, kuten Sleipnerissä, suurin osa injektoidusta hiilidioksidista liukenee tai mineralisoituu.

Eri varastoitumismekanismien suhteellisten hiilidioksidimäärien kehitys Sleipnerin tapauksessa on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3

Virtausmallinnoihin perustuva hiilidioksidin eri olomuotojen evoluutio Sleipnerin varastomuodostumassa. Hiilidioksidia varastoituu superkriittisessä muodossa mekanismeilla 1 ja 2, liuenneessa muodossa mekanismeilla 3 ja mineraaleina mekanismeilla 4.

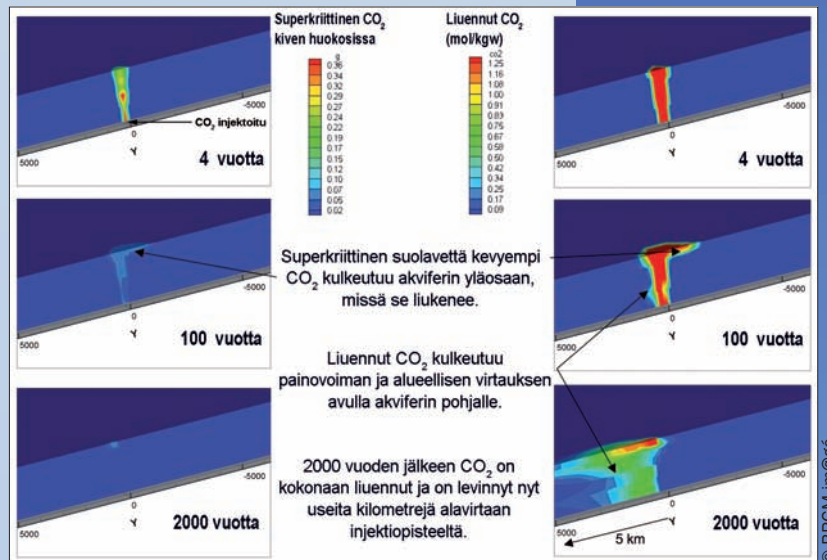
Mistä tämä kaikki tiedetään?

Tieto näistä prosesseista tulee pääasiassa neljästä eri tiedonlähteestä:

- **Laboratoriomittaukset:** pienen mittakaavan mineraalisaatio-, virtaus- ja liukenemiskokeita voidaan tehdä kiviläytöksillä. Kokeet antavat näkemystä lyhyen aikavälin ja pienen mittakaavan prosesseihin.
- **Numeeriset simulaatiot:** kehittyneillä laskentakoodilla pystytään ennustamaan hiilidioksidin käyttäytymistä pidemmällä aikavälillä (Kuva 4). Laboratoriokokeita käytetään kalibroimaan numeerisia simulaatioita.
- **Luonnon hiilidioksidiesiintymien tutkimus.** Luonnossa hiilidioksidi on usein vulkaanista alkuperää ja se on ollut varastoituneena maan alle usein miljoonia vuosia. Tällaisia paikkoja kutsutaan "luonnollisiksi analogioiksi". Ne tuottavat tietoa kaasun käyttäytymisestä ja pitkän ajan seurauksista, jota hiilidioksidi voi aiheuttaa ollessaan kauan varastoituneena maan alle.
- **Olemassa olevien hiilidioksidin varastointiprojektien tarkkailu.** Näitä projekteja ovat mm. Sleipner (Norjan merialueella), Weyburn (Kanadassa), In Salah (Algeriassa) ja K12-B (Alankomaiden merialueella). Lyhyen aikavälin simulaatitulosia voidaan verrata oikeiden kenttätutkimusten tuloksiin ja jaloittaa mallia sitä kautta.

Kuva 4

3D mallinnus Dodgerin akviferistä Ranskasta, sen jälkeen kun siihen on injektoitu 150 000 tonnia hiilidioksidia neljässä vuodessa. Kuvassa on kuvattuna superkriittinen hiilidioksidi (vasemmalla) ja suolaveden liennut hiilidioksidi (oikealla) 4, 100 ja 2000 vuotta sen jälkeen kun injektointi on aloitettu. Simulaatio perustuu kenttätutkimuksiin ja kokeisiin.



Vain tarkastelemalla ja vertaamalla näitä neljää tiedon lähdettä jatkuvasti ristiin, voidaan saavuttaa luotettavaa tietoa siitä, mitä tapahtuu noin 1000 m maanpinnan alapuolella.

Yhteenvedon voi todeta hiilidioksidin varastoinnin turvallisuuden normaalista kasvavan ajan myötä. Varastoinnin kriittisin tekijä on sopivan hiilidioksidia pidättävän sulkukerroksen omaavan varastomuodostuman löytäminen, jotta hiilidioksidi varastoituu rakenteellisesti. Liukenemiseen, mineralisoitumiseen ja jäännösvarastoitumiseen liittyvät prosessit toimivat kaikki hiilidioksidin pysyvyyttä varastomuodostumassa lisäävinä tekijöinä.

Voiko hiilidioksidi vuotaa varastomuodostumasta ja mitä seurauksia siitä olisi?

Huolellisesti valittujen varastointipaikkojen ei odoteta vuotavan merkittävästi. Oletus perustuu luonnollisiin varastoihin perustuvaan tutkimukseen. Luonnolliset varastomuodostumat, jotka sisältävät kaasua, auttavat ymmärtämään olosuhteita missä kaasua varastoituu tai vapautuu ja vuotavat paikat auttavat ymmärtämään mitkä olisivat mahdolliset seuraukset hiilidioksidin vuotamiselle.

Vuotoreitit

Vuotoreitit ovat joko ihmisen (syväkairaukset) tai luonnon (halkeamat ja siirrokset) aiheuttamia. Sekä aktiivisesti käytössä olevat, että hylätyt kairareitit voivat toimia vuotoreittinä, koska ne muodostavat suoran yhteyden varastomuodostuman ja maan pinnan välille. Niissä on myös käytetty materiaaleja, jotka voivat kärsiä pidemmällä aikavälillä korroosiosta (**Kuva 1**). Kairattuja kaivoja on tehty eri aikoina erilaisilla tekniikoilla mistä johtuen uudemmat ovat yleisesti turvallisempia kuin vanhemmat. Vuotoriskiä kaivojen kautta pidetään hyvin alhaisena koska sekä uusia että vanhoja kaivoja voidaan tarkkailla tehokkaasti käyttäen herkkiä geokemian ja geofysiikan menetelmiä ja kaivoihin voidaan tehdä tarvittaessa parannustoimenpiteitä öljyteollisuuden käytössä olevalla teknologialla. Vuodot jotka tapahtuvat sulkukerrossa tai sen yläpuolisissa kerroksissa luonnon omia halkeamia tai siirroslinjoja pitkin, ovat monimutkaisempia hallita. Silloin ollaan tekemisissä vaaka-asentoisten epäsäännöllisten pintojen kanssa, joilla on vaihteleva läpäisevyys. Hyvä tieteellinen ja tekninen tietämys sekä vuotavista, että vuotamattomista luonnon muodostumista antaa mahdollisuuden suunnitella hiilidioksidin varastointiprojekteja, joilla on samat ominaisuudet kuin luonnossa esiintyvillä varastomuodostumilla. Nämä ovat kuitenkin varastoineet hiilidioksidia ja metaania tuhansista vuosista miljooniin vuosiin.

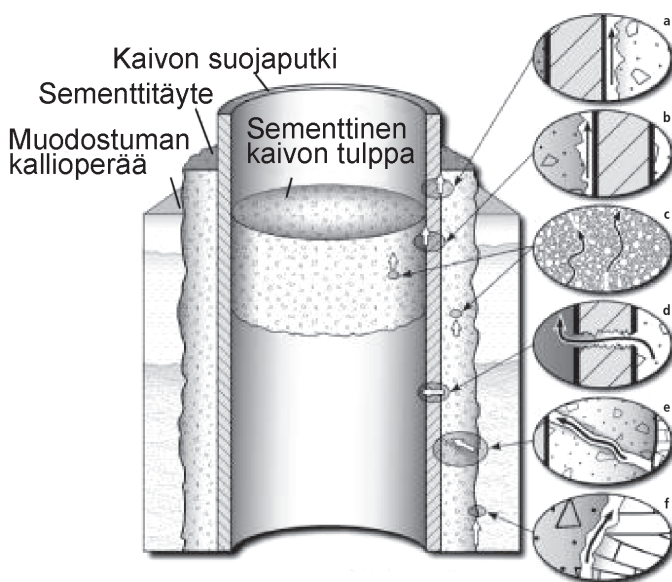
Luonnolliset analogit ja niistä opitut asiat

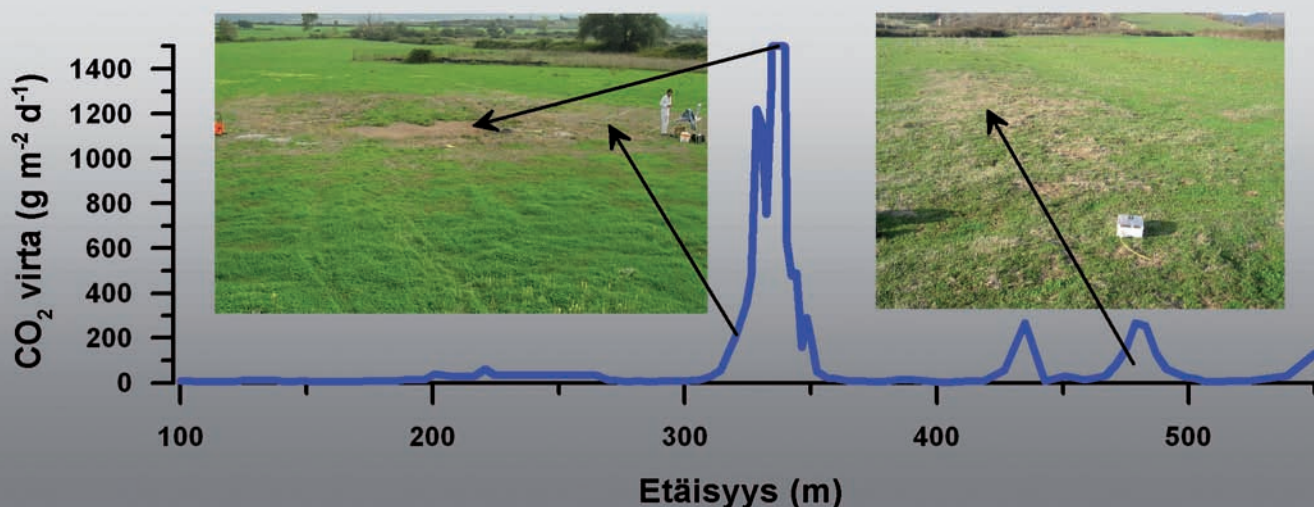
Luonnolliset systeemit (ns. analogiat) ovat tärkeitä tiedonlähteitä, joilla voidaan parantaa tietämystä syvälle varastoituneen kaasun liikkeistä ja luonnossa tapahtuvasta kaasujen vaihdosta maan ja ilmakehän välillä. Tärkeimmät johtopäätökset tutkimuksista, jotka perustuvat lukuisiin luonnossa esiintyviin vuotamattomiin ja vuotaviin kaasujen varastomuodostumiin ovat:

- Luonnossa syntynyt kaasu voi olla varastoituneena satoja tuhansia tai miljoonia vuosia suotuisissa geologisissa olosuhteissa.
- Eristyneitä kaasumuodostumia tai kaasutaskuja esiintyy jopa epäsuotuisimmissa geologisissa olosuhteissa, kuten vulkaanisilla alueilla.
- Merkittävän kaasumäärän liikkumiseen tarvitaan paineen ajamaa virtausta, koska diffuusio on hyvin hidas prosessi.
- Jotta virtausta voisi esiintyä, pitää varastomuodostumassa olevien nestemäisten aineiden olosuhteiden olla lähellä litostaattista painetta*, jotta siirrokset ja halkeamat pysyisivät auki ja uusia vuotoreittejä muodostuisi.
- Luonnossa muodostunutta kaasua pintaan vuotavat alueet sijaitsevat lähes poikkeuksetta paljon lohkeilleilla vulkaanisilla tai seismisillä alueilla, missä kaasun vuotokohdat sijaitsevat aktiivisten tai viimeaikoina aktiivisina olleiden siirrosten myötäisesti.
- Merkittäviä kaasuvuotoja esiintyy vain harvoin ja ne ovat yleensä rajoittuneet erittäin siirrostuneille vulkaanisille ja geotermisille alueille missä hiilidioksidi syntyy luonnon prosesseissa koko ajan lisää.
- Anomaliset kaasuesiintymät maan pinnalla esiintyvät vain paikallisesti ja niistä on vain rajoittunutta spatiaalista haittaa maanpinnan läheiselle ympäristölle.

Mahdolliseen vuotoon tarvitaan yhdistelmä tiettyjä ominaisuuksia. Siksi onkin epätodennäköistä, että huolellisesti valittu ja hyvin suunniteltu geologinen varastointipaikka vuotaisi. Vaikka vuodon todennäköisyys onkin pieni, tulee siihen liittyvät prosessit ja mahdolliset vaikutukset ymmärtää täysin. Näin voidaan valita, suunnitella ja toimia turvallisimmilla mahdollisilla hiilidioksidin varastointipaikoilla.

Kuva 1
Hiilidioksidin mahdollisia kulkureittejä poratussa kaivossa. Karkaaminen muuttuneen materiaalin vuoksi (c, d, e) tai rajapintoja pitkin (a, b, f).





Vaikutukset ihmisiin

Hengittämme hiilidioksidia koko ajan. Ihmisen terveydelle se on vaarallista vasta korkeina pitoisuuksina. Esimerkiksi yli 50 000 ppm (5 %) pitoisuus hengitysilmassa aiheuttaa päänsärkyä, huimausta ja uneliaisuutta. Tätä pitoisuutta suuremmat arvot voivat johtaa kuolemaan jos altistuminen kestää pitkään. Ilman happipitoisuuden vähimmäismäärä ihmiselämän ylläpitämiseksi on 16 %. Jos pitoisuus laskee alle tämän, on tukehtuminen todennäköistä. Jos hiilidioksidi vuotaa avoimelle tai tasaiselle alueelle se sekoittuu nopeasti ilmaan jopa heikolla tuulella. Mahdolliset riskit väestölle rajoittuvat tilanteisiin, joissa hiilidioksidi vuotaa suljettuun tilaan tai topografiseen painaumaan. Näissä tapauksissa hiilidioksidin pitoisuus voi nousta, koska hiilidioksidi on ilmaa tiheämpää ja pyrkii siten kerääntymään lähelle maan pintaa. Kaasua vuotavilta alueilta saatu tieto on tärkeää riskien estämisessä ja hallinnassa. Todellisuudessa monet ihmiset elävät alueilla, joissa tapahtuu päivittäisiä maakaasupäästöjä. Esimerkiksi Ciampinossa lähellä Roomaa taloja sijaitsee vain 30 m päässä kaasuventtiileistä, joista päästetään n. 7 tonnia hiilidioksidia ilmaan päivittäin. Tämä aiheuttaa maanpinnan lähellä hiilidioksidipitoisuuden nousun 90 % tasolle. Paikalliset asukkaat välttävät vaarat noudattamalla yksinkertaisia varotoimenpiteitä, kuten nukkumalla muualla kuin kellarissa ja pitämällä talot hyvin tuuletettuina.

Vaikutukset ympäristöön

Mahdolliset vaikutukset ekosysteemiin ovat riippuvaisia siitä, sijaitseeko varastointipaikka merellä vai maalla.

Meriekosysteemeissä hiilidioksidivuodon suurimmat vaikutukset syntyvät pH:n paikallisesta alenemisesta. Tämä vaikuttaisi etenkin eläimiin, jotka elävät meren pohjalla eivätkä voisi liikkua pois. Vaikutukset ovat kuitenkin paikallisia ja ekosysteemi näyttää toipumisen

merkkejä nopeasti vuodon laannuttua.

Maanpäällisissä ekosysteemeissä vaikutuksista voidaan tehdä seuraava yhteenveto:

- **Kasvillisuus** - Vaikka korkeat (20–30 %) maaperän hiilidioksidikaasupitoisuudet voivat edistää tiettyjen lajien kasvunopeutta, ovat tätä pitoisuustasoa korkeammat pitoisuudet yleisesti tappavia lähes kaikille lajeille. Vaikutus on hyvin paikallinen ja kasvillisuus säilyy muutaman metrin päässä kaasulähteestä vahvana ja elinvoimaisena (**Kuva 2**).
- **Pohjaveden laatu** - Pohjaveden kemiallinen koostumus voi muuttua lisääntyneen hiilidioksidin myötä. Kasvanut hiilidioksidin määrä lisää pohjaveden happamuutta, mikä saattaa liuottaa akviferia ympäröivistä kivistä ja mineraaleista veteen erilaisia aineita. Vaikka hiilidioksidia vuotaisi juomavesiakviferiin, olisivat vaikutukset paikallisia ja näiden vaikutusten laskeminen on parhaillaan tutkijoiden työn alla. On sinänsä kiinnostavaa, että monet Euroopassa sijaitsevat akviferit ovat rikastuneet hiilidioksidilla ja tätä vettä pullotetaan sekä myydään "poreilevana mineraalivetenä".
- **Kiven kestävyys** - Pohjaveden happamoituminen voi johtaa kiven liukenemiseen, pienempään rakenteelliseen kestävyteen ja vajoreikien syntyyn. Tällaista voi tosin tapahtua ainoastaan tietynlaisten geologisten ja hydrogeologisten olosuhteiden vallitessa (tektonisesti aktiivinen alue, korkean virtaaman omaavia akvifereja, karbonaattirikas mineralogia), eikä ole todennäköistä että ihminen rakentaisi geologisen varastointipaikan tällaiselle alueelle.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että koska hypoteettisen CO₂-vuodon vaikutukset ovat hyvin kohteeseen sidonnaisia, perusteellinen tietämys alla olevasta geologiasta ja rakenteista on erittäin tärkeää. Tämä tieto antaa mahdollisuuden identifioida mahdolliset vuotoreitit, mahdollistaa valita paikat joissa on pienin todennäköisyys hiilidioksidin vuotamiseen ja ennustaa kaasun käyttäytymistä sekä siten arvioida ja estää merkittävät vaikutukset ihmisiin ja ekosysteemiin.

Kuva 2
Hiilidioksidivuodon vaikutus kasvillisuuteen korkean virtaaman (vasen) ja vähentyneen virtaaman (oikea) tapauksissa.

Vaikutus on rajoittunut alueeseen mistä hiilidioksidi tulee maan pinnalle.

Miten varastomuodostumaa tarkkaillaan sekä maan syvyyksissä, että maan pinnalla?

Kaikkia hiilidioksidin varastointipaikkoja on tarkkailtava toiminnallisten, turvallisuus-, ympäristö-, sosiaalisten ja taloudellisten syiden vuoksi. Näiden seikkojen takia on luotava toimintasuunnitelma, missä määritellään tarkasti mitä tarkkaillaan ja miten.

Miksi valvontaa tarvitaan??

Sijoituspaikan toimivuuden valvonta on tärkeää ensisijaisen päämäärän saavuttamiseksi, eli ihmislähtöisen hiilidioksidin pitkäaikaiseen eristämiseen ilmakehästä. Varastointipaikkoja tarkkaillaan monista eri syistä:

- **Toiminnallisuus:** injektioprosessin hallinta ja optimointi
- **Turvallisuus ja ympäristö:** ihmisiin, eläimiin tai ekosysteemiin kohdistuvien vaikutusten minimointi tai esto ja maailmanlaajuisen ilmastomuutoksen hidastaminen.
- **Yhteiskunnallinen:** ihmisille tarvittavan tiedon tuottaminen, jotta ymmärretään sijoituspaikan turvallisuus sekä saavutetaan yleinen luottamus.
- **Taloudellinen:** markkinoiden luottamuksen rakentaminen CCS-teknologiaa kohtaan sekä hiilidioksidin varastoitujen määrien varmistaminen, jotta ne voidaan hyvyttää "vältettyinä päästöinä" tulevaisuudessa kun Euroopan unionin päästökauppa (European Union Trading scheme ETS) siirtyy seuraavaan vaiheeseen.

Ympäristön alkuperäisen tilan (ns. perustilan) tarkkailu, sekä sitä seuraava sijoituspaikan valvonta, on tärkeä säädöksellinen vaatimus Euroopan komission CCS-direktiivissä. Direktiivin julkaistiin 23. huhtikuuta 2009. Toimijoiden pitää kyetä osoittamaan että varastointi vastaa säännöksiä ja tekee niin myös pidemmällä aikavälillä. Valvonta on tärkeä osa, millä vähennetään epävarmuuksia paikan toimivuuden suhteen ja se tuleekin sitoa vahvasti turvallisuuden hallintatoimintoihin.

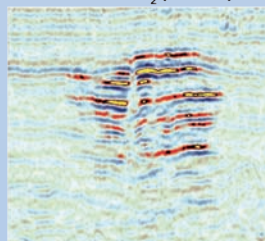
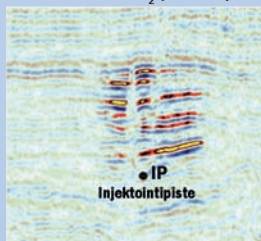
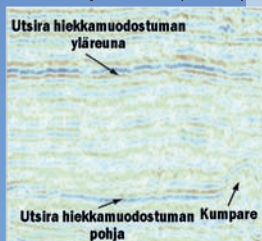
Mitkä ovat valvonnan kohteet?

Valvonta voidaan kohdentaa monenlaisiin kohteisiin

2.35 Mt CO₂ (1999)

4.36 Mt CO₂ (2001)

Ennen injektointia (1994)



© StatoilHydro

ja prosesseihin varastointipaikan eri kohdissa kuten:

- **Kaikupesäkuvantaminen** – seurataan hiilidioksidin liikkumista sen liikkeessä pois injektiokohdasta. Tämä tuottaa tietoa mallien kalibroimiseen, joilla voidaan ennustaa hiilidioksidin jakautumista sijoituspaikalla tulevaisuudessa. Monia kehittyneitä tekniikoita on saatavilla joista merkittävin on toistuvat seismiikan linjat, mitä on jo käytetty hyvällä menestyksellä monissa demonstraatio- ja pilottimittakaavan projekteissa (**Kuva 1**)
- **Sulkukerroksen eheys** – tarkkailu on tärkeää jotta voidaan varoittaa ajoissa varastomuodostumaan varastoidun hiilidioksidin odottamattomasta liikkeestä ylöspäin. Tämä voi olla erityisen tärkeää projektin injektiovaiheessa, milloin varaston paineet ovat merkittävästi mutta väliaikaisesti kohonneet.
- **Kaivon eheys.** Tämä on tärkeä kohta, sillä syvät kaivot voivat mahdollisesti olla suora kulkureitti hiilidioksidin kulkeutumiseen pintaan. Hiilidioksidin äkillisen karkaamisen estämiseksi, tulee kaikkia injektio- ja tarkkailukaivoja, sekä jo olemassa olevia hylättyjä kaivoja tarkkailla injektiovaiheessa ja myös sen jälkeen. Tarkkailulla varmistetaan myös että kaikkien käytöstä poistettujen kaivojen sulkeminen on onnistunut. Tarkkailussa voidaan hyödyntää öljy- ja kaasuteollisuuden käytössä olevia geofysikaalisia ja geokemiallisia tarkkailulaitteita, jotka voidaan asentaa joko kaivojen sisä- tai ulkopuolelle turvallisuuden takeeksi.
- **Kulkeutuminen ylempiin kivikerroksiin.** Niillä varastointipaikoilla, missä lähempänä pintaa sijaitsevat kivikerrokset omaavat samanlaiset ominaisuudet kuin sulkukerros, voivat nämä kerrokset toimia tärkeänä pidättävänä komponenttina, joka estää hiilidioksidin vuotamisen maan pinnalle tai mereen. Jos sulkukerroksesta havaitaan vuoto, voidaan sen päällä olevia kerroksia tarkkailla samoilla menetelmillä kuin varastomuodostumaa, mm. kaikupesäkuvantamisella.
- **Vuotaminen pinnalle ja havainnointi** sekä mittaus ilmakehästä. Hiilidioksidin määrää ilmakehässä, maaperässä ja meriympäristössä voidaan mitata käyttäen geokemiallisia sekä biokemiallisia kaukokartoitusmenetelmiä. Näillä menetelmillä voidaan paikallistaa paikalliset vuodot sekä arvioida ja tarkkailla hiilidioksidin pysyvyyttä muodostumassa (**Kuva 2**).

Kuva 1
Seismiset kuvat joissa tarkkaillaan CO₂-pluunia* ennen Sleipnerin pilottiprojektin alkua 1996 sekä injektioinnin alettua 3 ja 5 vuotta myöhemmin.

- Varastoidun hiilidioksidin määrä säännös- ja vi-
ranomaistarkoituksiin. Varastoidun hiilidioksidin
määrä voidaan helposti mitata injektointaessa.
Varastomuodostumaan varastoidun hiilidioksidin
määrän määrittäminen varastomuodostumasta
on sen sijaan teknisesti hyvin haastavaa. Jos hiili-
dioksidia vuotaa pinnalle, pitää sen määrä pystyä
määrittämään kansallisiin kasvihuonekaasuva-
rastoihin sekä tulevaisuuden ETS järjestelmiä var-
ten.
- Maan liikkuminen ja mikroseismit*. Hiilidioksi-
din injektoinnista johtuva varastomuodostuman
kasvanut paine voi tietyissä erikoistapauksissa
aiheuttaa pienimuotoisia maanjäristyksiä. Näitä
pienimpiäkin maan häiriöitä voidaan tarkkailla
mikroseismin tarkkailumenetelmin sekä kauko-
kartoitusmenetelmin joko lentokoneesta tai satelli-
teista.

Miten tarkkailu toteutetaan?

Monia erilaisia tarkkailumenetelmiä sovelletaan jo olemassa oleviin demonstraatio- ja tutkimusprojekteihin. Tarkkailumenetelmät voidaan jakaa menetelmiin, joilla tarkkaillaan hiilidioksidia suoraan, sekä menetelmiin joilla tarkkaillaan sen epäsuoria vaikutuksia kiviin, nestemäisiin aineisiin ja ympäristöön. Suoria mittauksia ovat mm. nestemäisten aineiden analysointi syväkairausreistä sekä maaperän ja ilmakehän kaasupitoisuuden mittaukset. Epäsuoria menetelmiä ovat geofysikaaliset mittaukset, paineen muutoksen tarkkailu injektiokaivoista sekä pohjaveden pH:n tarkkailu.

Sekä maalla että merellä sijaitsevat varastointipaikat vaativat tarkkailua. Sopivan tarkkailumenetelmän valinta riippuu paikan teknisistä ja geologisista ominaisuuksista sekä monitoroinnin tarkoituksesta. Tekniikoita tarkkailun toteuttamiseen on jo laajalti saatavissa (**Kuva 3**). Nämä tekniikat ovat jo pitkälti öljy- ja kaasuteollisuuden käytössä, mistä ne mu-

kautetaan soveltuvaksi hiilidioksidille. Tutkimusta olemassa olevien menetelmien optimoimiseksi sekä innovatiivisten tekniikoiden kehittämiseksi on jo käynnissä. Päämääränä on parantaa resoluutiota ja luotettavuutta, vähentää kuluja, lisätä automaatiota sekä demonstraatioiden tehokkuutta.

Tarkkailustrategia

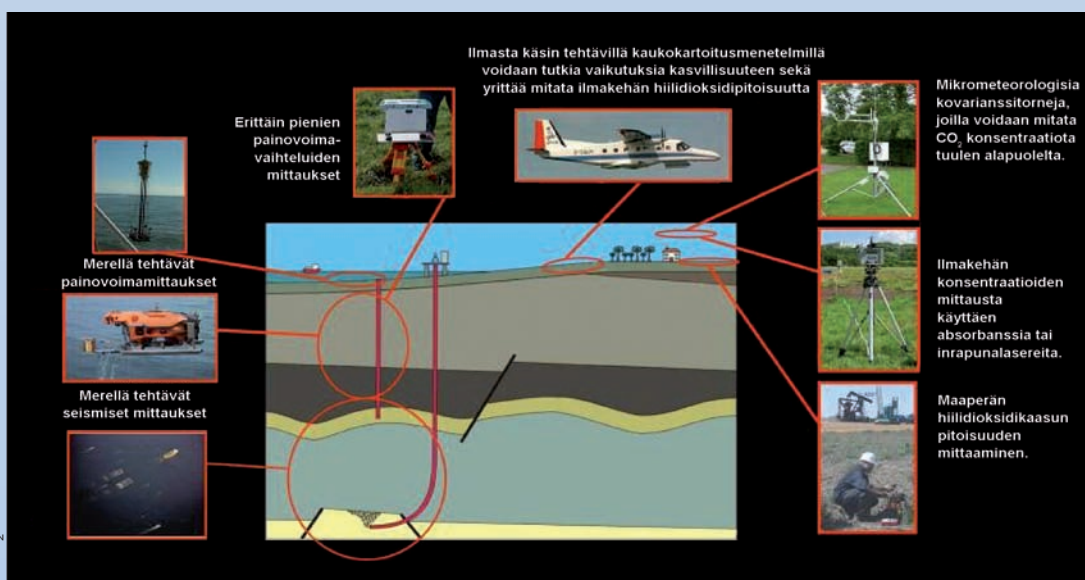
Kun suunnitellaan tarkkailustrategiaa, joudutaan tekemään päätöksiä jotka riippuvat yksittäisen sijoituspaikan geologisista ja teknisistä ominaisuuksista. Ominaisuuksia ovat varastomuodostuman geometria, syvyys, hiilidioksidipiuumin oletettu leviäminen, mahdolliset vuotoreitit, sulkukerroksen päällinen geologia, injektointiaika ja virtausnopeus, varastomuodostuman päälliset ominaisuudet kuten topografia, asutuksen tiheys, infrastruktuuri ja ekosysteemit. Soveltuvimpien mittaustekniikoiden ja paikkojen päättämisen jälkeen tulee tehdä laajat perustasoselvitykset, jotka toimivat vertailukohtana kaikille seuraaville mittauksille. Kaikkien tarkkailuohjelmien tulee olla joustavia, jotta niitä voidaan kehittää varastointiprojektien kehittämisen myötä. Tarkkailuohjelma, johon on saatu sisällytettyä kaikki edellä mainitut asiat ja joka samalla parantaa kannattavuutta, muodostaa tärkeän osan riskianalysissa ja varmistaa varastointipaikan turvallisuutta sekä tehokkuutta.

Yhteenvetona voidaan todeta, että hiilidioksidin varastointipaikan tarkkailu on jo toteutettavissa monilla markkinoilla olevilla tai kehitteillä olevilla tekniikoilla. Tutkimusta tehdään parhaillaan sekä uusien työkalujen kehittämisessä (etenkin merenpohjakäyttöön), että tarkkailun suorituskyvyn ja kulujen vähentämiseksi.



© CO₂ GeoNet

Kuva 2
Aurinkopaneeleista virtansa saava kelluva tarkkailupolju, johon kuuluu kaasua meren pohjasta keräävä laite.



Kuva 3
Muutamia valittuja menetelmiä, jotka kuvaavat kuinka monella eri tavalla hiilidioksidin varastointisysteemin eri osia voidaan tarkkailla.

Millaisia turvallisuuskriteereitä tulee säätää ja noudattaa?

Varastoinnin turvallisuuden ja tehokkuuden turvaamiseksi on toimijoiden noudatettava ehtoja, joita säätelevät viranomaiset projektin suunnittelulta ja toteuttamiselta vaativat.

Vaikka hiilidioksidin geologinen varastointi on laajasti hyväksytty yhdeksi uskottavaksi vaihtoehtoksi ilmastoon muutoksen vähentämiseksi, tulee ensin määrittää ihmisen terveyteen ja paikalliseen ympäristöön liittyvät turvallisuuskriteerit, ennen kuin laajamittaiset teollisen mittakaavan toiminnot voivat käynnistyä. Turvallisuuskriteereinä voidaan pitää säätelevien viranomaisten toimijoille asettamia vaatimuksia, jotka takaavat että vaikutukset paikalliseen terveydentilaan, turvallisuuteen ja ympäristöön (mukaan lukien pohjavesivarannot) ovat merkityksellisiä lyhyellä, keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä. Yksi tärkeimmistä tekijöistä hiilidioksidin geologisessa varastoinnissa on varastoinnin pysyvyys, eli varastojen ei oleteta vuotavan. Toimijoiden on kuitenkin otettava huomioon ns. "mitä jos?" näkökulma, jonka vuoksi riskit on arvioitava ja toimijoiden on noudatettava keinoja, jotka estävät kaiken vuotamisen tai muut poikkeavat tapahtumat sijoituspaikalla. IPCC:n mukaan hiilidioksidin tulisi säilyä varastoituneena vähintään 1000 vuotta, jotta ilmakehän CO₂ pitoisuus tasapainottuisi tai vähenisi meriveden luonnollisen vaihdon seurauksena minimoiden samalla ilmastoon lämpenemisen aiheuttaman pintalämpötilan nousun. Paikalliset vaikutukset tulee kuitenkin arvioida aikaskaalalla, joka vaihtelee päivistä moniin tuhansiin vuosiin. Hiilidioksidin varastointiprojektin elinkaarelle voidaan määrittellä monia eri vaiheita.

(**Kuva 1**) Turvallisuus taataan perusteellisesti:

ominaisuuksia (huokoisuus, läpäisevyys ja injektiiivisyys) sekä sulkukerroksen läpäisemättömyyttä

- Ottaa hiilidioksidivirran koostumuksesta huomioon etenkin talteenotto-prosessissa poistamatta jääneet epäpuhtaudet. Tämä on tärkeää jotta voitaisiin välttää epäsuotuiselta vuorovaikutukselta kaivon, varastomuodostuman, sulkukerroksen ja vuodon sattuessa yläpuolisen pohjaveden kanssa.

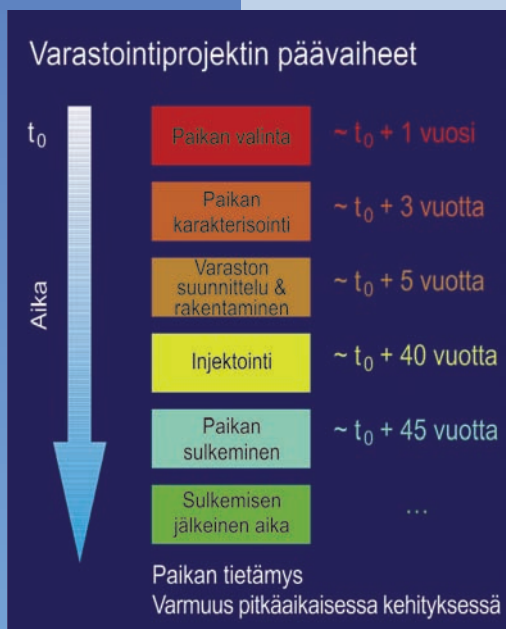
Projektisuunnittelun turvallisuuskriteerit

Turvallisuus pitää näyttää toteen ennen kuin toiminta voi alkaa. Tärkeimmät tutkittavat asiat paikan valinnan suhteen ovat:

- Varastomuodostuma ja sulkukerros
- Sulkukerroksen päälliset kerrokset ja etenkin ne läpäisemättömät kerrokset jotka voivat toimia mahdollisesti varmistavana sulkuna
- Läpäisevien siirrostien tai kaivojen olemassa olo jotka voivat toimia hiilidioksidille reittinä pintaan
- Juomavesiakviferit
- Ihmiset ja ympäristön asettamat rajoitukset pinnalla

Varastopaikan geologian ja geometrian arvioimisessa käytetään öljyn- ja kaasun etsimisessä käytettäviä menetelmiä. Varastomuodostuman hiilidioksidin fluidivirtaus-, kemiallinen- ja geomekaaninen mallinnus mahdollistaa ennustukset hiilidioksidin käyttäytymisestä ja pitkän aikavälin lopputuloksesta sekä lisäksi määrittävät tehokkaan injektoinnin rajat. Huolellisen paikan karakterisoinnin tuloksena pitäisi pystyä määrittelemään "normaali" varaston toimintaskenaario, joka vastaa hiilidioksidin varastointiin soveltuvaa paikkaa ja missä luotetaan hiilidioksidin säilyvän varastoituna. Varaston myöhempiä vaiheita koskevan riskinarvioinnin pitää ottaa huomioon myös vähemmän todennäköiset skenaariot, mukaan lukien odottamattomien tapahtumien esiintymiset. On erittäin tärkeää kuvitella kaikki mahdolliset vuotoreitit, altistumiset ja vaikutukset (**Kuva 2**). Jokainen vuotoskenaario pitäisi pyrkiä analysoimaan asiantuntijoilla ja soveltaa mahdollisuuksien rajoissa numeerista mallinnusta jotta voidaan arvioida skenaarion todennäköisyys ja vakavuus. Esimerkiksi hiilidioksidipluumin laajenemisen kehitys tulisi tarkastaa tarkasti jotta huomataan mahdolliset yhteydet siirrosvyöhykkeisiin. Riskinarvioinnissa tulisi myös huomioida herkkyyden syötettävien arvojen muutoksille

Kuva 1
Varastointiprojektin eri vaiheet.



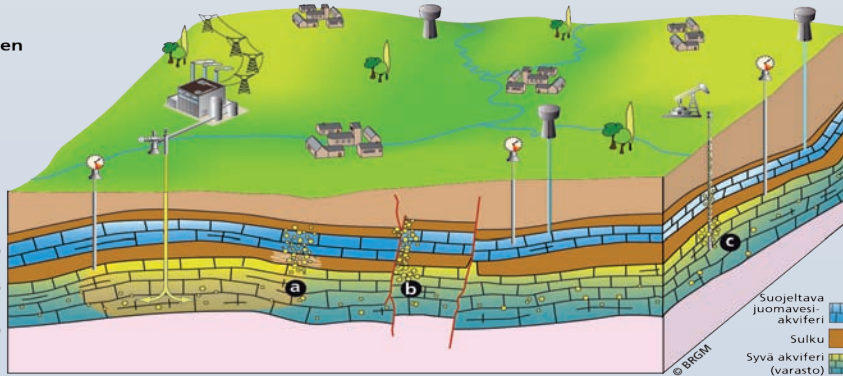
- Huolellisella paikan valinnalla ja karakterisoinnilla
- Turvallisuuden arvioinnilla
- Oikealla käytöllä
- Tarkoituksenmukaisella tarkkailusuunnitelmalla
- Asianmukaisella ennallistamissuunnitelmalla

Näihin liittyvät tärkeät tavoitteet ovat

- Varmistaa hiilidioksidin pysyminen varastomuodostumassa
- Säilyttää kaivojen koskemattomuus
- Varjella varastomuodostuman fysikaalisia

CO₂ kulkeutumisen skenaarioita

- a Vuoto sulkukerroksen puutteellisuuden takia
- b Vuoto olemassa olevien siirrosten kautta
- c Vuoto hylätyn kaivon kautta



Kuva 2
Esimerkkejä mahdollisista vuotoreiteistä.

sekä niiden epävarmuuksille. Hiilidioksidista ihmisille ja eläimille aiheutuvat mahdolliset vaikutukset tulisi arvioida ympäristövaikutusten arviointitutkimuksilla, mikä on standarditoimenpide kaikkien teollisuuslaitosten luvansaantiprosesseissa. Tässä prosessissa tutkitaan sekä vuotamaton että vuotava vaihtoehto ja arvioidaan laitoksen aiheuttama mahdollinen riski. Sekä lyhyen, että pitkän aikavälin tarkkailuohjelman tulisi perustua riskinarviointianalyysiin ja siinä tulisi tarkkailla eri vaihtoehtojen määritellyjä kriittisiä parametreja. Sen tärkeimmät kohteet ovat hiilidioksidipluumin liikkeen kuvaaminen, sekä kaivojen että sulkukerroksen eheyden tarkkailu, mahdollisten CO₂-vuotojen havainnointi, pohjaveden laadun arviointi ja varmistaminen että yhtään hiilidioksidia ei ole päässyt pinnalle. Jälkihoito- ja ennallistamissuunnitelma on turvallisuuden arvioinnin viimeinen osa, jonka tähtäin on oikeiden toimenpiteiden yksityiskohtaisessa kuvaamisessa vuodon tai muun poikkeavan tapahtuman sattuessa. Se kattaa sulkukerroksen eheyden ja kaivon rikkoutumisen, injektoidessa tai ajanjaksolla injektoinnin jälkeen, sekä äärimmäiset jälkihoitosuunnitelmat kuten varaston tyhjennyksen. Tämänhetkinen tietotaito sisältää normaalit öljy- ja kaasutekniikat, kuten kaivojen erilaiset korjaustavat, injektioapaineen alentamisen, veden pumpaamisen muodostumasta paineen alentamiseksi, matalalla sijaitsevien kaasumuodostumien talteenoton.

Turvallisuuskriteerit toiminnan aikana ja sulkemisen jälkeen

Suurin huoli turvallisuudesta liittyy toiminnalliseen vaiheeseen. Injektoinnin loputtua aleneva paine tekee paikasta turvallisemman. Luottamus kykyyn injektoida ja varastoida hiilidioksidia turvallisella tavalla tukeutuu teollisten yritysten kokemukseen. Hiilidioksidi on suhteellisen tavallinen tuote jota käytetään useilla teollisuuden aloilla, joten sen käsittely ei nosta esiin uusia ongelmia. Projektien suunnittelu ja hallinta perustuu enimmäkseen öljy- ja kaasuteollisuuden tietotaitoon, erityisesti kausittaiseen maakaasun varastointiin ja öljyteollisuuden käyttämään EOR-tekniikkaan. Tärkeimmät

säädeltävät muuttujat ovat:

- Injektioapaine ja virtausnopeus – ensimmäinen tulisi pitää sulkukerroksen halkeamispaineen alapuolella;
- Injektoitu määrä – jotta voidaan tavoittaa mallintamalla määritellyt ennusteet;
- Injektoidun hiilidioksidivirran koostumus;
- Hiilidioksidipluumin lähellä sijaitsevan injektointikaivon tai minkä tahansa kaivon eheys;
- Hiilidioksidipluumin laajuus ja vuotojen havaitseminen;
- Maan vakaus.

Injektoinnin aikana hiilidioksidin todellista käyttäytymistä tulee jatkuvasti verrata ennusteisiin. Tämä parantaa jatkuvasti tietämystä sijoituspaikasta. Tarkkailuohjelmaa tulee päivittää ja korjaaviin toimiin on ryhdyttävä tarpeen mukaan, jos käyttäytyminen on epätavallista. Jos varastomuodostuman epäillään vuotavan, voidaan tarpeelliset tarkkailutyökalut suunnata tietylle alueelle varastomuodostumassa ja sen yläpuolella. Siten voidaan havaita ylöspäin nouseva hiilidioksidi ja edelleen, mahdolliset haittavaikutukset mitä se voi tehdä juomavesi-akvifereille, ympäristölle ja mitä tärkeimmin, ihmisille. Injektointivaiheen loputtua alkaa sulkemisvaihe. Kaivot tulisi sulkea ja hylätä oikein, mallinnus- ja tarkkailuohjelma pitää päivittää sekä tarvittaessa ryhtyä toimiin riskien vähentämiseksi. Kun riskitaso arvioidaan tarvittavan pieneksi, siirtyä valvonta kansallisille viranomaisille ja tarkkailusuunnitelma voidaan minimoida tai lopettaa. Euroopan direktiivi asettaa oikeudelliset puitteet jotka takaavat että hiilidioksidin talteenotto ja varastointi on käytettävissä oleva hillitsevä keino, jota voidaan toteuttaa turvallisesti ja vastuullisesti.

Lopuksi, turvallisuuskriteerit ovat tärkeä osa onnistunutta teollisen mittakaavan hiilidioksidin varastointia. Kriteerit täytyy määrittää jokaiselle varastolle sen ominaisuuksien mukaan. Nämä kriteerit tulevat olemaan erityisen tärkeitä yleisen mielipiteen muodostamisessa, ja todella tärkeitä lisensointiprosessissa missä säätelevien viranomaisten täytyy päättää turvallisuussäännösten tarkkuudesta.

Akviferi: pohjaveden kyllästämä ja vettä hyvin johtava maa- tai kivilajiyksikkö. Lähempänä pintaa sijaitsevat akviferit sisältävät ihmisen käyttöön soveltuvaa makeaa vettä. Syvemmällä sijaitsevat akviferit sisältävät ihmisen käyttöön soveltumatonta suolaista vettä.

CCS: hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (carbon capture and storage)

CO2 pluumi: superkriittisen hiilidioksidin spatiaalinen levinneisyys kiviüksiköissä

CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum): Kansainvälinen ilmastomuutokseen liittyvä hanke mikä keskittyy hiilidioksidin erottamiseen, talteenottoon ja pitkäaikaiseen turvalliseen varastointiin liittyvien kustannustehokkaiden menetelmien kehittämiseen.

EOR: (enhanced oil recovery) tekniikka missä öljyn juoksevuutta varastomuodostumassa parannetaan injektioimalla juoksevia aineita kuten vesihöyryä tai hiilidioksidia varastomuodostumaan.

EU Geocapacity: valmistunut Eurooppalainen tutkimusprojekti missä arvioitiin ihmislähtöisen hiilidioksidin varastointiin soveltuva geologinen varastokapasiteetti Euroopassa.

GESTCO: valmistunut Eurooppalainen tutkimusprojekti missä arvioitiin hiilidioksidin geologiset varastointimahdollisuudet 8 maassa (Norja, Tanska, UK, Belgia, Hollanti, Saksa, Ranska, Kreikka).

Huokoisuus: se osa kiven kokonaistilavuudesta mikä ei sisällä mineraaleja. Näitä vapaita aukkoja kutsutaan huokosiksi ja ne voivat täytyä erilaisilla nesteillä. Syvällä sijaitsevilla kivillä neste on tyypillisesti suolavettä mutta neste voi olla myös öljyä tai kaasua, kuten metaania tai luonnollisesti muodostunutta hiilidioksidia.

IEAGHG: Kansainvälisen energijärjestön kasvihuonekaasu tutkimus- ja kehitysohjelma. Kansainvälisen yhteistyön päämääränä on arvioida kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen suunniteltuja tekniikoita, levittää näiden tutkimusten tuloksia sekä määritellä tutkimuksen, kehityksen ja demonstroinnin kohteet edistään samalla tarkoituksen mukaisia töitä.

Injektivisyys: kuvaa helppoutta jolla nestettä (esim CO2) voidaan injektoida geologiseen varastomuodostumaan. Injektivisyys on injektio nopeus jaettuna injektio kaivon pohjalla sijaitsevan injektointipisteen ja muodostuman paine-erolla.

Lisäksi:

IPCC:n erikoisraportti hiilidioksidin talteenotosta ja varastoinnista:
http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Euroopan komission ympäristötoimien CCS-sivusto sisältää tietoa CCS-direktiivin toimeenpanosta sekä laillisesta viitekehystä:
http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs_en.htm

IEAGHG tarkkailutyökalujen sivusto:

http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html

IPCC: hallitusten välinen ilmastomuutospaneeli. WMO (maailman meteorologinen organisaatio) ja UNEP (yhdistyneiden kansakuntien ympäristöohjelma) perustivat organisaation vuonna 1988 arvioidakseen oleellista tieteellistä, teknistä ja sosioekonomista tietoa, joka auttaa ymmärtämään ilmastomuutosta sen mahdollisia vaikutuksia ja vaihtoehtoja sopeutumiseen tai sen hillitsemiseen. IPCC ja Al Gore saivat Nobelin rauhanpalkinnon vuonna 2007. Litostaattinen paine: voima joka kohdistuu maanpinnan alapuoliseen kiveen sen yläpuolisista kivistä. Litostaattinen paine kasvaa syvyyden myötä.

Luonnollinen analogia: luonnossa esiintyvä hiilidioksidivaroisto. Luonnossa esiintyy luonnollisia hiilidioksidiesiintymiä joista jotkut vuotavat ja jotkut ei. Näiden esiintymien tutkimus voi parantaa ymmärtämystämme hiilidioksidin kohtalosta syvässä geologisessa systeemissä pitkällä aikavälillä.

Läpäisevyys: huokoisen kiven ominaisuus joka kuvaa sitä kuinka helposti neste pystyy virtaamaan tiettyssä painegradientissa.

Kaivo (tai porakaivo): poraamalla tehty pyöreä, läpimitaltaan pieni ja syvä reikä, vastaavanlainen kuin esimerkiksi öljynporauskaivo.

Mikroseisminen: maankuoressa tapahtuva maanjäristyksistä erillinen pieni vavahtelu tai värinä joka voi johtua erilaisista, joko luonnollisista tai luonnottomista tekijöistä.

pH: liuoksen happamuuden mittari missä pH 7 kuvaa neutraalia liuosta.

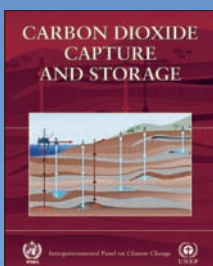
Sulkukerros: läpäisemätön kivilajiyksikkö joka sijaitseensa varastomuodostuman päällä estää nesteiden ja kaasujen liikkeen ylöspäin.

Superkriittinen: juoksevan aineen tila kriittisten paine- ja lämpötila-arvojen yläpuolella (CO₂:lle 31,03 C ja 7,38 MPa.) Superkriittisessä tilassa aineella on kaasun liikkuvuus ja nesteen tiheys.

Suolavesi: erittäin suolainen vesi, eli sisältää runsaasti liuenneita suoloja.

Varastomuodostuma: kivi- tai sedimenttikerros joka on tarpeeksi huokoinen ja läpäisevä varastoidakseen hiilidioksidia. Hiekkakivi ja kalkkikivi ovat yleisimpiä varastointikivilajeja.

Yläpuoliset kerrokset: Geologiset kerrostumat varastomuodostuman sulkukerroksen ja maanpinnan (tai merenpohjan) välillä.



Mikä CO₂GeoNet on?



CO₂GeoNet on Eurooppalainen tieteellinen yhteisö jonka puoleen voi kääntyä jos haluaa selkeää ja kaikenkattavaa tietoa hiilidioksidin geologisesta varastoinnista sekä innovatiivisesta ja elinvoimaisesta teknologiasta ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. Euroopan komissio aloitti CO₂GeoNet:in osana "Network of Excellence, 6th Framework Programme" ohjelmaa. (EC FP6 sopimus 2004-2009). Siinä liitetään yhteen 7 eri maan 13 eri tutkimuslaitosta joilla kaikilla on korkea kansainvälinen profiili ja tarvittava painoarvo hiilidioksidin geologisen varastoinnin tutkimuksessa. Vuonna 2008 CO₂GeoNet rekisteröitiin Ranskan lakien alaisuudessa toimivaksi voittoa tuottamattomaksi yhdistykseksi jotta se voisi toimia Euroopan komission tuen lakattuakin.

CO₂GeoNet:illä on laaja kokemus tutkimusprojekteista jotka käsittelevät varastomuodostumaa, sulkukerrosta, mahdollisia hiilidioksidin kulkureittejä maan pinnalle, tarkkailutyökaluja, mahdollisia vaikutuksia ihmisiin ja ekosysteemiin sekä yleistä mielipidettä ja viestintää. CO₂GeoNet tarjoaa palveluitaan neljällä eri alalla: 1) yhteiset tutkimukset 2) koulutus ja kapasiteetin rakennus 3) tieteellinen neuvonta 4) tiedotus ja kommunikointi.

CO₂GeoNet:in vaikutusvalta on lisääntynyt koko ajan ja siitä on tullut kestävä tieteellinen referenssi ja auktoriteetti Euroopassa koska se pystyy tarjoamaan tarvittavan tieteellisen tuen suuren mittakaavan hiilidioksidin varastointiprojektien turvalliseen kehittämiseen. Yhteisön laajeneminen koko Euroopan laajuiseksi on tekeillä CGS-hankkeen kautta jonka koordinoinnin rahoitti EC FP7 (2010-2013). CGS Europe yhdistää CO₂GeoNet:in ytimen ja 21 muuta tutkimuslaitosta kattaen näin 28 Euroopan valtiota (24 jäsenmaata ja 4 muuta). Tuloksena on monia satoja tieteen tekijöitä, jotka ovat saatavilla ja kykeneviä käsittelemään hiilidioksidin geologisen varastoinnin kaikkia näkökulmia monitieteellisen yhteenliittymän avulla. Tarkoitus on tuottaa osakkeenomistajille ja yleisölle riippumatonta tavaa tietoa hiilidioksidin geologisesta varastoinnista.



CO₂GeoNet: the European Network of Excellence on the Geological Storage of CO₂

BGR (Saksa); **BGS** (UK); **BRGM** (Ranska); **GEUS** (Tanska); **HWU** (UK); **IFPEN** (Ranska); **IMPERIAL** (UK); **NIVA** (Norja); **OGS** (Italia); **IRIS** (Norja); **SPR** Sintef (Norja); **TNO** (Hollanti); **URS** (Italia)

www.co2geonet.eu



www.co2geonet.eu

CGS Europe: the Pan-European Coordination Action on the Geological Storage of CO₂

CO₂GeoNet (lista 13 jäsenestä);

CzGS (Tsekin tasavalta); **GBA** (Itävalta); **GEOECOMAR** (Romania); **GEO-INZ** (Slovenia); **G-IGME** (Kreikka); **GSI** (Irlanti); **GTC** (Liettua); **GTK** (Suomi); **LEGMC** (Latvia); **LGI** (Unkari); **LNEG** (Portugali); **METU-**

PAL (Turkki); **PGI-NRI** (Puola); **RBINS-GSB** (Belgia); **SGU** (Ruotsi); **SGUDS** (Slovakia); **S-IGME** (Espanja); **SU** (Bulgaria); **TTUGI** (Viro); **UB** (Serbia); **UNIZG-RGNF** (Kroatia)

www.cgseurope.net



www.cgseurope.net

CO2GeoNet on saavuttanut laajaa tunnustusta Euroopassa ja muualla maailmassa

CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum) tukee CO2GeoNet:iä



CO₂GeoNet toimii läheisessä yhteistyössä kansainvälisen energijärjestön kasvihuonekaasu tutkimus- ja kehitysohjelman (IEAGHG) kanssa.



Esitteen tausta

Yleisen tietoisuuden nostamiseksi hiilidioksidin geologisesta varastoinnista CO₂GeoNet otti puheeksi kysymyksen "mitä hiilidioksidin geologinen varastointi todella tarkoittaa?" Ryhmä arvostettuja CO₂GeoNet:in tieteilijöitä vastasi kuuteen olennaiseen kysymykseen perustuen maailmanlaajuiseen tutkimukseen ja kokemukseen. Päämääränä oli tuottaa selkeää ja tasapuolista tieteellistä tietoa laajalle yleisölle sekä rohkaista vuoropuhelua jota käydään hiilidioksidin geologisen varastoinnin teknisten yksityiskohtien tärkeimmistä kohdista. Tämä työ, joka on yhteenvetona tässä esitteessä, julkaistiin harjoitus- ja vuoropuhelutyöpajassa Pariisissa 3. lokakuuta 2007.

"Mitä hiilidioksidin geologinen varastointi tarkoittaa?" on ladattavissa monella eri kielellä osoitteesta:

www.co2geonet.com/brochure

CO₂GeoNet

The European Network of Excellence on the geological storage of CO₂



www.co2geonet.eu

Secretariat: info@co2geonet.com

BGS Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFPEN** IFP Energies nouvelles, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Università di Roma La Sapienza-CERI.



Suomenkielinen versio on käännetty 7. Puiteohjelman hankkeen "CGS Europe - Pan-European coordination action on CO₂ Geological storage" puitteissa Geologian tutkimuskeskuksen toimesta.



ISBN: 978-952-217-189-4