



ASIAKASRAPORTIN JULKINEN TIIVISTELMÄ

VTT-CR-00516-25



Pasi Venäläinen

Hiilidioksidin sidonta kaivosperien täytössä (HILKA)

Kirjoittajat: Marjut Mälkki, Sampo Mäkikouri, Ville Sjöblom, Tandre Oey

Luottamuksellisuus: VTT Public

Versio: 17.6.2025



POHJOIS-KARJALA
Maakuntaliitto



beyond the obvious



Hyväksyminen

TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY

Päivämäärä: 23 October 2025

Allekirjoitus:

DocuSigned by:

05233C1A8D364B7...

Nimi: Lauri Kujanpää

Asema: Research Team Leader

Laajennettu tiivistelmä

Hiilidioksidin sidonta kaivosperien täytössä (HILKA)

Projektin Hiilidioksidin sidonta kaivosperien täytössä (HILKA) taustalla oli tavoite mahdollistaa hiilidioksidin sidonta kaivosperien täyttömateriaalissa samalla vähentäen sementin tarvetta kovettuvassa kaivostäytössä. Globaalisti sovellettavan toimintamallin kehittäminen olisi merkittävää kaivostoiminnan laajuuden vuoksi. Projektissa tavoitteina olivat

- löytää sopiva teknologia ja resepti hiilidioksidin sitomiseksi,
- määrittää hiilidioksidin sidontapotentiaali,
- selvittää potentiaaliset hiilidioksidin toimittajat,
- luoda liiketoimintamalli ja jatkosuunnitelma.

Projektiin valittiin tarkasteltavaksi kaksi erilaista materiaaliesimerkkiä, joita voitaisiin hyödyntää kaivosperien täytössä. Ensimmäinen materiaali oli rikastushiekkänäyte, jota ei ollut saatavilla fyysisenä näytteenä, vaan materiaalin tiedot perustuivat aiempaan analyysiraporttiin. Toinen materiaali oli serpentiniittikivinäyte, jota tutkittiin röntgenfluoresenssi- (XRF), röntgendiffraktio- (XRD) sekä hiili-, vety- ja typpipitoisuus (CHN) -analyysillä. Sopivaa teknologiaa hiilidioksidin sidontaan kyseisillä materiaaleilla etsittiin kirjallisuuskatsauksella. Reseptiikkaa tutkittiin alustavin laboriotestein simuloimalla perinteistä kovettuvaa täyttöpastaa, joka sisältää sementtiä 2 %, sekä pastoja, joissa käytettäisiin hiilidioksidin kanssa reagoivaa eli karbonoitua sarvivälkepitoista rikastushiekkaa ja sementtiä 1 % ja 2 %. Teoreettiset hiilidioksidin sidontapotentiaalit materiaaleille laskettiin soveltaen Steinourin kaavaa. Liiketoimintasuunnitelman vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuudet ja uhkia (SWOT-analyysi) kartoitettiin workshopissa usean eri Outokummun seudun toimijan kanssa.

Teknologiakatsauksen perusteella lupaavimmalta hiilidioksidin sidontamenetelmältä vaikutti suora märkäkarbonointi, joka kirjallisuuden perusteella voisi sopia sekä serpentiniitti- että sarvivälkepitoiselle täyttömateriaalille, joskin sarvivälkkeen osalta tarvittaisiin lisänäyttöä laboratoriokokeista varsinaista materiaalinäytettä hyödyntäen. Useat karbonointitekniologiat voivat kuitenkin olla soveltuvia, ja soveltuvuuteen vaikuttavat käytettävissä oleva materiaali, kaivoksen sijainti ja hiilidioksidilähde. Teollisessa mittakaavassa hiilidioksidi otettaisiin talteen teollisuuden savukaasuista ja kuljetettaisiin putkella kaivokselle.

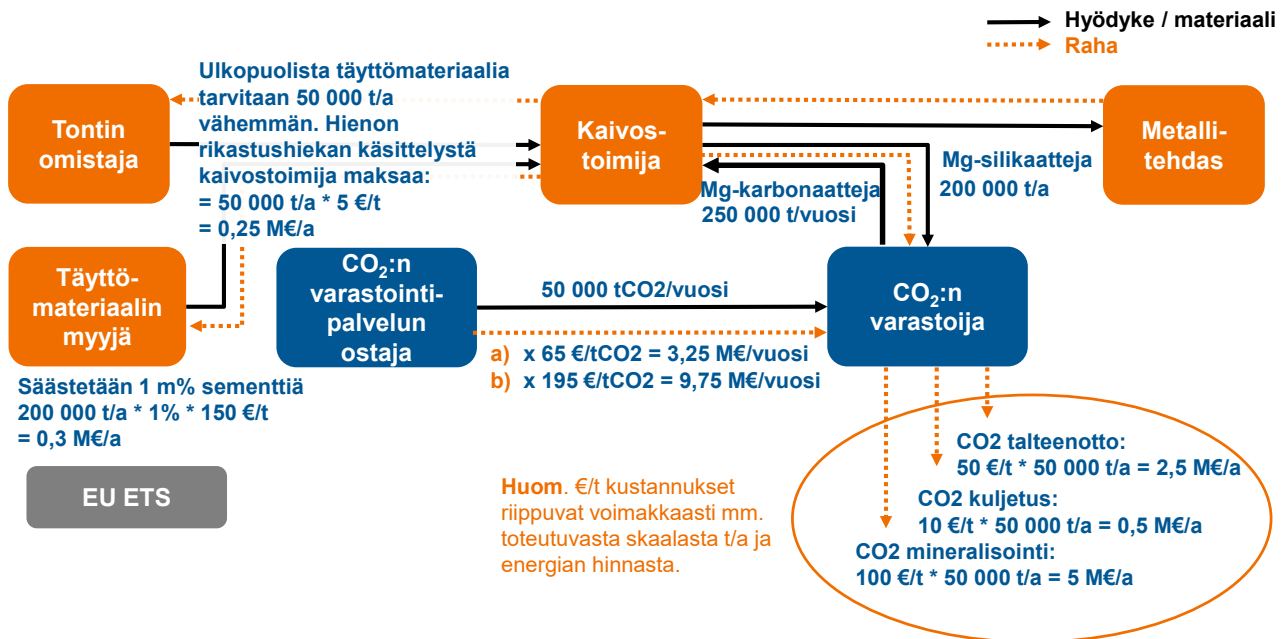
Alustavien laboriotestien perusteella kaikki pastat olivat hyvin työstettäviä, joten vaikutukset työstettävyyteen eivät näytä estävän karbonoidun rikastushiekan käyttöä. Alustavissa testeissä sopiva vedentarve oli kaikilla pastoilla 30 m-%, joskin ilman karbonaatteja alhaisempikin vesimäärä voisi riittää. Pastat eivät ehtineet kovettua riittävästi seitsemässä päivässä, minkä vuoksi karbonoinnin ja sementin määrän vaikutuksia seoksien lujuuksiin ei pystytty vertailemaan. Olennaista on kuitenkin suorittaa kokeita oikeilla ja edustavilla materiaaleilla, jotta voidaan varmistaa karbonoinnin vaikutukset materiaalien ominaisuuksiin. Näin voitaisiin myös optimoida seossuhteet huomioiden vedenimukyky ja raekokojakaumat, jotta sementin käyttö saataisiin minimoitua ja vaikutukset puristuslujuuteen määritettyä vähintään 28 päivän kovettumisajalla tai muuna määriteltynä ajankohtana.

Molemmista näytteistä löytyi hiilidioksidin sitomiseen sopivia mineraaleja: rikastushiekkänäytteestä sarvivälkettä ja serpentiniittinäytteestä serpentiiniä. Serpentiniittikivinäytteessä karbonointiin soveltuvien alkuaineiden pitoisuus oli suurempi, ja sen vuoksi serpentiniittimateriaali vaikuttaisi näistä paremmin hiilidioksidin mineralisointiin soveltuvalta. Sarvivälkepitoisen rikastushiekan

teoreettiseksi hiilidioksidin sidontapotentiaaliksi määritettiin 105,3 kg CO₂/t, kun taas serpentiniittikivinäytteen potentiaaliksi saatiin 263,9 kg CO₂/t huomioiden näytteessä jo olevan hiilen määrä. Jos oletetaan rikastushiekkaa hyödynnettävän kaivostäytössä noin 200 000 t/a, voitaisiin teoreettisesti sitoa hiilidioksidia sarvivälkepitöisen rikastushiekan tapauksessa 21 000 t/a. Vastaavaan määrään materiaalia serpentiniittinäytteen koostumuksella voisi teoreettisesti sitoa noin 53 000 t/a hiilidioksidia.

Potentiaalisia hiilidioksidin toimittajia kartoitettaessa löydettiin useita hiilidioksidin päästäjiä noin 120 km säteellä Outokummusta. Kaikkiaan kuusi eri toimijaa tuotti > 50 000 t/a hiilidioksidia tällä alueella, joista pienin, Riikinvoiman Ekovoimalaitos tuotti 187 000 t/a hiilidioksidia ja suurin, Stora Enso Oyj:n Uimaharjun tehtaas tuotti 1 370 000 t/a hiilidioksidia. Lisäksi alueella oli kolme biokaasulaitosta, joista kunkin arvioidut hiilidioksidipäästöt olivat < 5 000 t/a. Hiilidioksidin päästölähteistä ainakin sellutehtaat tuottavat hiilidioksidia ympäri vuoden. Tehtaiden jatkaessa toimintaansa nykyisellä tasolla, syntyy hiilidioksidia useiden vuosikymmenten ajan, ja vuosittain enemmän, kuin mahdolliseen kaivostäyttöön voidaan hyödyntää yhdellä kaivoksella. Tämän vuoksi tulisi selvittää, onko alueella suunnitteilla useampia kaivoshankkeita, joihin hiilidioksidia voisi hyödyntää. Näin voitaisiin saavuttaa mittakaavaetuja hiilidioksidin talteenotossa ja kuljetuksessa hiilidioksiditonnikohtaisten investointikustannusten pienentyessä. Vaihtoehtona olisi myös pohtia, voidaanko esimerkiksi osa bioperäisestä hiilidioksidista hyödyntää muun muassa liikennepolttoaineisiin. Lisäksi todettiin bioperäistä hiilidioksidia olevan saatavilla vielä pitkään halvemmalla kuin suoraan ilmasta kaapattuna.

Liiketoimintamallin tarkastelussa käytetyt materiaali- ja tulovirrat on esitetty Kuvassa A1. Yksinkertaisuuden vuoksi oletettiin, että 200 000 t/a rikastushiekkaa (sisältäen magnesiumsilikaatteja, kuvassa Mg-silikaatteja) ja 50 000 tCO₂/a reagoi täydellisesti muodostaen 250 000 t/a magnesiumkarbonaatteja ja silikahiekkaa. Tällöin kaivostoimijan oletetaan maksavan 5 €/t täyttömateriaalimäärän 50 000 t/a lisäyksestä hiilidioksidin varastoijalle. Lisäksi oletetaan esimerkinomaisesti, että hiilidioksidin mineralisointi mahdollistaa 50 m-% sementin käytön vähentämisen. Hiilidioksidin talteenoton kustannukseksi on oletettu 50 €/t, kuljetuksen kustannukseksi 10 €/t ja mineralisoinnin kustannukseksi 100 €/t. Hiilidioksidin talteenottokustannus voisi vastata tilannetta, jossa suuresta päästölähteestä osa otetaan talteen mineralisoitavaksi. Kuljetuskustannus puolestaan vastaisi tämän suuruusluokan putkikuljetusta lähialueelta. Mineralisointikustannus on hyvin epävarma ja riippuu käytettävästä materiaalista ja prosessista. Nämä karkeat arviot sopivatkin vain koko arvoketjun tulovirtojen hahmotteluun ja riippuvat voimakkaasti erityisesti toteutuvasta mittakaavasta ja energian hinnasta.

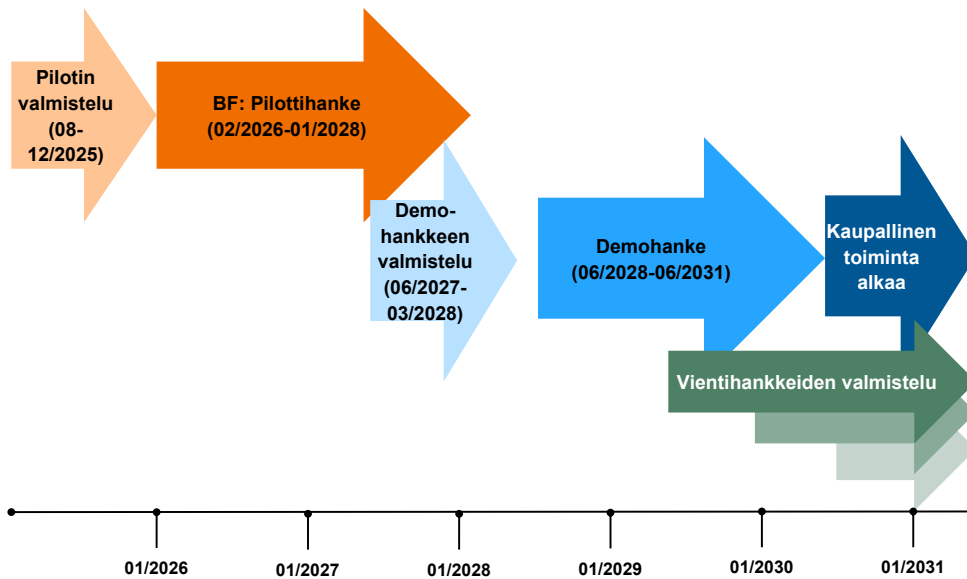


Kuva A1 Hahmottelua tulovirroista arvoketjun alkupäässä, kun kovettuvan kaivostäytön yhteydessä sovelletaan hiilidioksidin mineralisointia.

Liiketoimintamallin tarkastelussa havaittiin, että keskipitkällä aikavälillä (2030–2035) on mahdollista löytää liiketoimintamalli uudelle mineralisointia harjoittavalle toimijalle myös Outokummun alueella siten, että kaikki arvoketjun osapuolet hyötyvät taloudellisesti. Taloudellisesti kannattavan liiketoimintamallin edellytyksiin sisältyy sopiva rikastushiekka, sopivanlainen teollisen mittakaavan mineralisointiprosessi, riittävän suuri hiilidioksidin talteenotto ja varastointivolyymi (> 50 kt/a), sekä riittävä tulo päästökaupasta, kompensatiomarkkinoilta tai muusta syystä hiilidioksidin varastointipalvelusta maksavalta toimijalta. Kuitenkin jo nyt on mahdollista, että esimerkiksi muualta Euroopasta tai maailmalta löytyvän kaivoksen yhteydessä vastaava liiketoimintamalli voisi olla kannattava, minkä vuoksi voisi olla hyödyllistä jo nyt demonstroida teknologiaa Outokummun seudulla suomalaisten laitevalmistajien ja teknologiayritysten kanssa. Lisäksi liiketoimintamallin tarkastelussa tunnistettiin hiilidioksidin varastointiin liittyvän liiketoiminnan olevan liiketoimintapotentialiltaan suurempi kuin mahdolliset materiaalisäästöt sementin ja täyttömateriaalin kustannuksissa.

Workshopissa luodussa liiketoimintamallin SWOT-analyysissä tunnistettiin useita keskeisiä tekijöitä uuden liiketoiminnan menestymisen kannalta. Osallistujien esiin nostamat positiiviset havainnot keskittyivät kestäväen kehityksen mukaiseen liiketoimintaan, suhteellisen yksinkertaiseen teknologiseen ratkaisuun, paikallisen yhteistyön voimaan sekä globaaliin monistettavuuteen. Negatiivisina huomioina esiin nousivat erityisesti politiikan epävarmuudet, kustannus- ja tulo rakenteen epävarmuudet sekä raaka-aineiden (hiilidioksidi, mineraalit) saatavuuden haasteet.

Kuva A2 esittää aikajanaa jatkohankemahdollisuuksista. Ensimmäisenä on pilottihankkeen valmistelu ja toteutus, jossa varmistetaan teknologian toimivuus aiottua rikastushiekkaa käyttäen. Pilotointihanke voitaisiin toteuttaa Business Finland Co-Innovation-hankkeena. Demonstraatiohankkeen valmistelu voisi alkaa pilottihankkeen aikana. Pilottihankkeessa saavutetusta teknologian kypsyydestä riippuen demonstraatiohanke voitaisiin rahoittaa esimerkiksi Horizon Europe tai Innovation Fund -tuella. Kuvassa A2 alimpana on esitetty teknologian viennin valmistelu toisinnettavaksi muilla kaivoksilla eri puolilla maailmaa.



Kuva A2 Hahmoteltu aikajana jatkohankemahdollisuuksista vuosille 2025–2030.

Rahoitusmahdollisuuksia kartoittaessa havaittiin, että tällä hetkellä rahoitusta on tarjolla erityisesti liittyen kriittisiin metalleihin. Lisäksi rahoitusta on saatavilla hiilidioksidin varastointiin, mikä tukee Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamista. Business Finlandin Kestävä kaivos ja kriittiset mineraalit -ohjelma voisi toimia hyvänä kehyksenä jatkohankevalmistelun aloittamiseksi. Olennaista on tunnistaa yritykset, jotka ovat valmiita panostamaan kehitystyöhön, ja näissä alustavissa keskusteluissa Outokummun seudun teollisuuskylä voisi toimia merkittävässä roolissa. Lisäksi teknologian soveltuvuus tulisi todentaa käyttäen edustavaa rikastushiekkamateriaalia. Tärkeää on myös keskustella kaikkien alueen hiilidioksidin päästäjien, mahdollisesti sopivien kaivosyhtiöiden ja hiilidioksidin hyötykäyttäjien kanssa, jotta tulevaisuuden investointeja voitaisiin suunnitella järkevästi aluetasolla ja saavuttaa merkittävää mittakaavaetua.