

Masters in Geoengineering

# Vähähiilinen pilaristabilointi ja hankintamennettelyt

---

Otto Kaukoranta

Copyright ©2024 Otto Kaukoranta

---

**Tekijä** Otto Kaukoranta

---

**Työn nimi** Vähähiilinen syvästabilointi ja hankintamenettelyt

---

**Koulutusohjelma** Georakentamisen maisteriohjelma

---

**Pääaine** Geotekniikka

---

**Vastuupettaja/valvoja** Professori Leena Korkiala-Tanttu

---

**Työn ohjaaja(t)** DI Juha Forsman ja YAMK Liisa Taskila

---

**Yhteistyötaho** -

---

**Päivämäärä** 26.06.2024

**Sivumäärä** 79 + 62

**Kieli** Suomi

---

#### Tiivistelmä

Syvästabiloinnin sideaineiden päästöjen vähentäminen on merkittävä osa pohjanvahvistamisen ja pohjarakentamisen hiilidioksidipäästöjen vähentämistä. Päästöjä voidaan vähentää suosimalla vähähiilisiä sideainereseppejä. Näiden käyttöä voidaan edistää UUMA4-ohjelmassa kehitetyllä syvästabiloinnin vähähiilisyysluokituksella. Tämän työn tavoitteena on edistää vähähiilisyysluokituksen käyttöönottoa syvästabiloinnin hankinnassa. Työssä esitellään syvästabiloinnin vähähiilisyysluokituksen yhdistämistä erilaisiin hankintamalleihin sekä esimerkkitarkasteluja vähähiilisyysluokituksen käytöstä.

Osana työtä Helsingin Malminkentällä nostettiin koepilareita niiden yläpäiden olomuodon tutkimiseksi (halkaisija, tasalaatuisuus, lujuus, yms.). Tutkimusten tavoitteena oli varmistaa vähähiilisten sideaineiden tuotantostabilointiin soveltuvuus. Tutkimukset sisälsivät ylös nostettujen pilareiden sideainejakauman vaihtelun määritykset poikkileikkauksessa (pH, XRF, penetrometri) ja sideaineen diffuusionopeuden pilarin ympärillä. Ylös nostetuista pilareista sekä niitä ympäröivästä savesta otettiin näytteitä laboratoriotutkimuksia varten. Tutkimukset käsittivät muun muassa puristuskokeita ja vesipitoisuusmittauksia. Tutkimuksista vastasivat Helsingin kaupunki, Stara, Ramboll ja Aalto-yliopisto.

Laadunvalvontakäytäntöjen perusteella sideaineille muodostettiin päästökuvaajat lujuutta kohden 3 ja 12 kk ikäisinä (kg CO<sub>2</sub>e / kPa / m-pilari). Kuvaajien perusteella havaittiin päästöjen lujuutta kohden olevan yhtä sideainetta lukuun ottamatta keskenään samaa suuruusluokkaa huolimatta sideaineiden erilaisista päästökertoimista. Tämä selittyy sillä, että suuremman päästökertoimen omaavilla sideaineilla saavutettiin suurempia lujuuksia (yhtä sideainetta lukuun ottamatta).

Koepilarien laadunvalvontakäytäntöjen ja stabiloitavuuskokeiden tulosten perusteella tehtiin kaksi esimerkkitarkastelua, joissa testattiin syvästabiloinnin sideaineiden vähähiilisyys (SSV) ja syvästabilointipilareiden vähähiilisyysluokitusta (SPV). Tarkasteluja varten optimoitiin sideainemäärät tavoitelujuutta vastaaviksi. Kokonaishiilidioksidipäästöt optimoiduilla sideainerespepeillä laskettiin sideaineiden päästökertoimien perusteella. Tarkastelujen perusteella havaittiin, että syvästabiloinnin kokonaispäästöihin voidaan vaikuttaa merkittävästi määrittämällä hankinta-asiakirjoihin tarkoituksenmukainen SSV- ja/tai SPV-luokka. Optimoiduilla sideainemäärillä laskettujen kohteen kokonaishiilidioksidipäästöjen erotus suurimman ja pienimmän SSV-luokan sideaineiden välillä oli noin 70 %.

---

**Avainsanat** Uusiosideaineet, syvästabilointi, pilaristabilointi, hankinta, hankintamenettelyt, koestabilointi, vähähiilisyys

---

---

**Author** Otto Kaukoranta

---

**Title of thesis** Low carbon deep mixing and procurement procedures

---

**Programme** Master's programme in Geoengineering

---

**Major** Geotechnical engineering

---

**Thesis supervisor** Prof. Leena Korkiala-Tanttu

---

**Thesis advisor(s)** MSc Juha Forsman and M. Eng. Liisa Taskila

---

**Collaborative partner** -

---

**Date** 26.06.2024

**Number of pages** 79 + 62

**Language** Finnish

---

**Abstract**

Reducing emissions of deep mixing binders is a significant part of reducing carbon dioxide emissions from soil improvement. Emissions can be reduced by favouring low-carbon binders. Their use can be promoted through the low-carbon classification for deep mixing developed in the UUMA4 program. The work presents the integration of low-carbon classification of deep mixing into various procurement procedures and example studies of the use of low-carbon classification.

As a part of the work, 08/2022 stabilized test columns were lifted at Helsinki Malminkenttä to investigate the structure (diameter, uniformity, strength, etc.) of their upper ends with the aim of ensuring the suitability of low-carbon binders for production deep mixing. Studies performed on the columns included determinations of variations in binder distribution of lifted columns across the cross-section (pH, XRF, penetrometer) and the diffusion of the binder outside the column. Samples were taken from the up lifted columns and the surrounding clay for laboratory studies. The studies included, among other things, compression tests and moisture content measurements, which are not reported in this work. The studies were conducted by the City of Helsinki, Stara (Helsinki City Construction Services), Ramboll, and Aalto University.

Based on quality control soundings of the test columns, strength-emission (kg CO<sub>2</sub>e / kPa / m-column) figures were formed for binders at 3 and 12 months of age. Based on the figures, it was observed that emissions per strength were of the same magnitude for all binders except one, regardless of the different emission factors of the binders. This is explained by the fact that binders with higher emission factors achieved higher strengths.

Based on quality control soundings of test columns and stabilization tests, two example studies were conducted for testing the low-carbon classification for deep mixing binders (SSV) and low-carbon classification for deep mixed columns (SPV). For the studies, binder amounts were optimized to match the target strength. Total carbon dioxide emissions with optimized binder recipes were calculated based on binder emission coefficients. The studies revealed that overall emissions from deep mixing can be significantly influenced by specifying an appropriate SSV and/or SPV class in procurement documents. The difference in total carbon dioxide emissions calculated with optimized binder recipes between binders of the highest and lowest SSV class was about 70%.

---

**Keywords** Low-carbon binders, deep mixing, column stabilization, procurement, procurement methods, test stabilization, low-carbon

---



# Sisällys

Esipuhe .....	7
Symbolit ja lyhenteet.....	8
1 Johdanto .....	9
2 Pilaristabilointimenetelmä .....	11
2.1 Pilaristabilointi pohjanvahvistuksena.....	11
2.2 Syvästabiloinnissa käytettäviä sideaineita.....	13
2.3 Syvästabiloinnin päästöt ja päästökertoimet.....	16
2.4 Syvästabiloinnin toteuttaminen.....	17
2.5 Syvästabiloinnin mitoitus ja laadunvarmistus .....	17
3 Vähähiilinen syvästabilointi.....	19
3.1 Vähähiilinen betoni .....	19
3.2 Syvästabiloinnin CO <sub>2</sub> e-tunnusluvut .....	21
3.3 Syvästabiloinnin sideaineen vähähiilisyysluokitus (SSV) .....	23
3.4 Stabilointipilarien vähähiilisyysluokitus (SPV).....	24
4 Syvästabiloinnin hankinta.....	27
4.1 Hankintamenettely .....	27
4.1.1 Tilaaajan sideaineresepti (1. malli).....	27
4.1.2 Urakoitsijan sideaineresepti (2. malli) .....	27
4.1.3 Suunnittele ja toteuta malli (3. malli).....	28
4.1.4 Hankintamallit ja SSV-luokitus .....	28
4.2 Hankintalaki.....	29
4.3 Kansainväliset menettelyt.....	30
4.4 Markkinavuoropuhelu .....	31
5 Malminkentän koestabilointi.....	34
5.1 Rakennuskohde .....	34
5.2 Maaperätiedot .....	36
5.3 Koestabilointi.....	38
5.4 Koestabiloinnin sideaineseokset .....	39
5.5 Malminkentän koestabiloinnin CO <sub>2</sub> e-tunnusluvut.....	40
6 Stabilointipilarien ylös nosto .....	47
6.1 Aiemmat kokemukset.....	47

6.2	Pilarien nosto, Malminkenttä.....	49
6.3	Tutkitut pilarit.....	51
6.4	Nostetuille pilareille suoritettut tutkimukset .....	53
7	SSV-menettelyn testaaminen kahdessa Malminkentän kohteessa .....	55
7.1	Kohdetarkastelu, Tattariharjuntie .....	55
7.2	Kohdetarkastelu, Malminkenttä, pohjoinen ajoyhteys.....	57
7.3	SSV- ja SPV-luokittelun yhdistäminen.....	67
7.4	SSV ja SPV-luokituksen käytön riskitarkastelu .....	68
8	Yhteenveto .....	72
	Lähteet .....	73
	Liitteet.....	80
	Liite 1. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden PS1, 90d.....	80
	Liite 2. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden PS1, 12kk.....	88
	Liite 3. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden PS4, 90d.....	96
	Liite 4. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden PS4, 12kk.....	104
	Liite 5. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden, PS6, 90d.....	112
	Liite 6. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden, PS6, 12kk.....	120
	Liite 7. Malminkenttä, penetrometritulokset .....	125
	Liite 8. Pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointilaskelmat.....	134

## Esipuhe

Syvästabiloinnin sideaineista muodostuu merkittävän osan pohjanvahvistuksen ja pohjarakentamisen päästöistä, joten niiden vähentämiseksi on etsittävä erilaisia ratkaisuja. Eräs tällainen ratkaisu on siirtyä käyttämään perinteisesti käytettyjä sideaineita (esim. kalkkisementti) vähähiilisempiä uusiosideaineita. Uusiosideaineiden käyttöön siirtyminen on kuitenkin prosessi, jossa on otettava huomioon monia eri näkökulmia ja tekijöitä. Vähähiilisempien sideaineiden käyttöä voidaan edistää UUMA4-ohjelmassa hankintaa varten luoduilla vähähiilisyysluokituksilla. Vähähiilisyysluokitus voidaan myös yhdistää nykyisin yleisesti ja vähemmän käytettyihin hankintamalleihin. Tämän diplomityön tarkoituksena oli tarkastella vähähiilisyysluokitusten käyttöä osana pilaristabiloinnin hankintaa.

Diplomityön valvojana toimi professori Leena Korkiala-Tanttu ja ohjaajina diplomi-insinööri Juha Forsman ja insinööri (YAMK) Liisa Taskila. Lisäksi työtä on kommentoinut tekniikan tohtori Mirva Koskinen. Kiitos kaikille kommentoijista ja ohjeista työn aikana.

Osana työtä suoritettiin stabilointipilarien ylösnosto Malminkentän koestabilointialueella. Kiitos Emmi Iloselle avusta ja neuvoista noston aikaisten kenttämittausten suorittamisessa ja kaikille nostoon osallistuneille. Kiitos myös Ida-Maria Savelalla ja Alejandra López Ramírezille pilareista otettujen näytteiden laboratoriotutkimusten suorittamisesta.

Kiitos myös työtä rahoittaneille osapuolille: Helsingin kaupunki, Ramboll Finland Oy ja Aalto yliopisto.

Lopuksi suuri kiitos perheelleni tuesta tämän työn kirjottamisen ja muutenkin koko opiskeluajan aikana.

Espoossa 26.6.2024

Otto Kaukoranta

# Symbolit ja lyhenteet

## Sideaineiden osat

CaO	Kalsiumoksidi
CaCO <sub>3</sub>	Kalsiumkarbonaatti
SiO <sub>2</sub>	Piioksidi
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rautaoksidi
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumiinioksidi

## Käsitteet

Detaljipiirustus	Yksityiskohtainen piirustus jostain rakenteen osasta. Kertoo tarkemmin, kuinka rakenne toimii tai toteutetaan
------------------	---

## Lyhenteet

BY	Suomen Betoniyhdistys Ry
CO <sub>2</sub> e	Hiilidioksidiekvivalentti
CPTU	Puristinkairaus samanaikaisella huokospaineen mittauksella
EPD	Ympäristöseloste (Environmental Product Declaration)
infraRYL	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset
KPO	Kalkkisementtipilariohje 2002
SPV	Stabilointipilarien vähähiilisyysluokitus
SSV	Syvästabiloinnin sideaineen vähähiilisyysluokitus

# 1 Johdanto

Syvästabilointimäärät Suomessa ovat kasvaneet suuresti sen jälkeen, kun menetelmän käyttö aloitettiin 1970-luvulla. Vuonna 1985 pilaristabilointimäärä oli noin 40 000 m<sup>3</sup>. Vuoteen 2022 mennessä pilaristabilointimäärä oli saavuttanut 574 000 m<sup>3</sup>. Pilaristabiloinnin lisäksi massastabiloinnin määrä vuonna 2022 oli noin 162 000m<sup>3</sup>. (Kuusipuro 2023a). Tässä työssä keskitytään pilaristabilointiin ja sen hankintamenettelyyn. Rakennettaessa pehmeikköalueelle pohjanvahvistukset voivat muodostaa jopa 75...95 % infrarakentamisen päästöistä (Forsman 2023). Helsingin katu- ja puistorakentamisessa syvästabiloinnin päästöt muodostavat toiseksi suurimman yksittäisen päästölähteen maa- ja kiviainesten jälkeen. Päästölähdekohtaisena päästönä syvästabilointi muodostaa noin 23 % katu- ja puistorakentamisen kokonaispäästöistä. (Aalto 2022).

Useat eri ympäristöohjelmat, kuten Hiilineutraali Helsinki 2030 eli HNH30 ja Hiilineutraali Tampere 2030 edellyttävät muun muassa rakennussektorin päästöjen vähentämistä nykytasosta, jotta hiilineutraalius voidaan saavuttaa. Syvästabiloinnin päästöjen vähentäminen muodostaa tärkeän osan tätä prosessia. Kaupunkien kasvavan tilantarpeen vuoksi rakentaminen pehmeiköille on entistä yleisempää, erityisesti osana täydennysrakentamista. Näin ollen syvästabilointimäärät tuskin tulevat vähenemään tulevana vuosina. Uusiosideaineet mahdollistavat huomattavasti pienemmät päästömäärät samalla stabilointimäärällä. Syvästabiloinnin hankintamenettelyn kehittäminen edistää tällaisten vähähiilisempien sideaineiden käyttöä.

Tässä työssä on ollut tavoitteena täydentää aineistoa, jonka perusteella voidaan arvioida, miten stabilointipilareiden hiilidioksidipäästöjä on mahdollista alentaa, millaisia uusiosideaineilla stabiloidut pilarit ovat olomuodoltaan, mitä tulisi huomioida vähähiilisten pilareiden hankinnassa ja miten syvästabiloinnin vähähiilisyysluokitukset (SSV- ja/tai SPV-luokitus) olisivat sovellettavissa hankinnassa.

Malminkentällä on toteutettu 2022 koepilareita seitsemällä erilaisella uusiosideaineella. 1, 3 ja 12 kuukautta lujittuneiden koepilareiden valvontakairauksilla on todettu kaikilla sideaineilla tapahtuneen lujittumista, jonka perusteella sideainemäärät ovat optimoitavissa tuotantostabilointia ajatellen. Suurin osa koepilareista on stabiloitu sideaineilla, joilla stabiloituja pilareita ei ole aikaisemmin nostettu ylös tutkimuksia varten. Pilareiden olomuodon, sideaineen jakautumisen sekä muiden ominaisuuksien selvittämiseksi työssä toteutettiin seitsemän koepilarin ylösnosto kenttä-tutkimuksineen. Myös osa laboratoriotutkimuksista toteutettiin tämän työn yhteydessä. Pilareiden todettiin olevan hyvin tuotantostabilointiin soveliaita. Pilareille määritettiin myös hiilidioksidipäästöjen tunnusluvut, joita voidaan käyttää verrattaessa sideaineita keskenään ja joiden perusteella voidaan arvioida hiilidioksidipäästöjä erilaisille pilareiden tavoitelujuuksille. Tunnusluvut määritettiin 3 ja 12 kuukautta lujittuneille pilareille.

Syvästabiloinnin sideaineiden vähähiilisyysluokittelua (SSV- ja SPV-luokitus) testattiin kahdessa kohteessa Malminkentän alueella. Ensimmäistä kohteista ei ole vielä toteutettu, joten tarkastelu tehtiin käytettävissä olevien stabiloitavuuskoetulosten pohjalta. Toinen kohde on toteutettu 2022 ja sen vieressä sijaitsee kaksi koepilarikenttää, joten tarkastelussa voitiin hyödyntää koepilareiden laadunvalvontakairaus-ten tuloksia. Tulosten perusteella optimoitiin sideainemäärät eri sideaineilla ja testattiin mitä SPV-luokkia olisi ollut mahdollista käyttää kyseessä olevan kohteen pilaristabiloinnin hankinnassa.

## 2 Pilaristabilointimenetelmä

### 2.1 Pilaristabilointi pohjanvahvistuksena

Syvästabiloinnilla tarkoitetaan pohjanvahvistusmenetelmää, jossa pehmeään pohjamaahan sekoitetaan muita sideaineita sen rakentamisominaisuuksien parantamiseksi. Tällaisia pehmeitä pohjamaaita ovat esimerkiksi savi, siltti ja lieju. Massastabiloinnissa sideaine tai sideaineet sekoitetaan pohjamaahan tasaisesti koko stabiloitavalla alueella. Pilaristabiloinnissa sideaine tai sideaineet sekoitetaan pohjamaahan pilareiksi, jotka sijoitetaan ruudukon muotoiseen kuvioon. (Jääskeläinen, 2009).

Syvästabiloinnin yleisiä käyttötarkoituksia ovat painumien vähentäminen sekä stabiliteetin parantaminen. Näitä ominaisuuksia pyritään parantamaan osana hanketta esimerkiksi penkereiden, putkijohtojen ja keveiden rakenteiden perustamisessa, kaivannon seinien vahvistamisessa sekä sulfidisavien tai muiden happamien maiden liukoisuuden säädössä. (Liikennevirasto 2018). Syvästabilointia voidaan käyttää myös pohjannousun estämiseen, paalujen sivusuuntaisen vastuksen lisäämiseen sekä kaivannon pohjan vahvistamiseen. Syvästabilointia voidaan myös hyödyntää liikennetärinän vähentämiseen tai estämiseen, haitta-aineiden eristämiseen tai kiinteyttämiseen sekä patoseiniin ja muihin vettä ohjaaviin seiniin. Syvästabilointia on mahdollista käyttää yhdessä massastabiloinnin kanssa. Tällöin massastabilointi suoritetaan pilaristabiloinnin päälle tai pilaristabilointi toteutetaan massastabiloinnin läpi. Työjärjestys voi vaihdella kohteen mukaan. (Forsman 2023).

Vaikka syvästabilointia voidaan käyttää monenlaisissa käyttökohteissa, sen käyttöön liittyy myös useita rajoittavia tekijöitä. Monet stabilointityötä vaikeuttavat tai sen suorittamisen kokonaan estävät tekijät liittyvät maaperään. Esimerkiksi paksu täyttömaakerros vaikeuttaa työtä, sillä stabilointikärjen tunkeutuvuus täyttökerroksen läpi on rajallinen. Myös stabiloitavien maakerrosten välissä olevat lujat maakerrokset vaikeuttavat työtä. Lisäksi maaperässä voi olla olemassa olevia rakenteita, kuten putkia ja johtolinjoja, joiden läpi stabilointityötä ei voida suorittaa. Muita maaperässä olevia rakenteita, jotka estävät stabilointityön suorittaminen, ovat muun muassa paalut ja hirsjarinat. (Liikennevirasto 2018).

Stabilointityötä voivat haitata tai estää myös muut kuin maaperään liittyvät tekijät. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi ilmajohdot sekä erilaiset luonnonilmiöt. Ilmajohdoille on määritetty turvaetäisyydet, joiden sisäpuolella työtä ei voida suorittaa ilman linjan sulkemista työn ajaksi. Luonnonilmiöistä työtä haittaavat erityisesti tulvat ja poikkeukselliset pakkasolot. (Liikennevirasto 2018).

Syvästabilointipilari lujittaa maata pystysuunnassa, mutta pilarien vaakasuuntainen lujuus on yleisesti ottaen melko huono (Forsman 2023). Stabilointipilarien suuren puristuslujuuden ansiosta pilareilla voidaan pienentää pengerkuorman aiheuttamia

painumia. Painumien rajoittaminen on tärkeää erityisesti sellaisille rakenteille, jotka ovat herkkiä siirtymille. (KPO 2002). Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi gravitaatioputket.

Syvästabilointi voidaan toteuttaa joko kuiva- tai märkämenetelmällä. Kuivamenetelmässä sideaine syötetään sekoituskärkeen paineilman avulla ja sekoitetaan mekaanisesti maahan sekoitinkärjellä. Kuivamenetelmän käyttö edellyttää stabiloitavan maan aineksen vesipitoisuuden olevan välillä 30...200 % (Han 2015). Märkämenetelmässä sideaineeseen sekoitetaan vettä ennen sen syöttämistä ja sekoittamista maan ainekseen. (Kivi 2021).

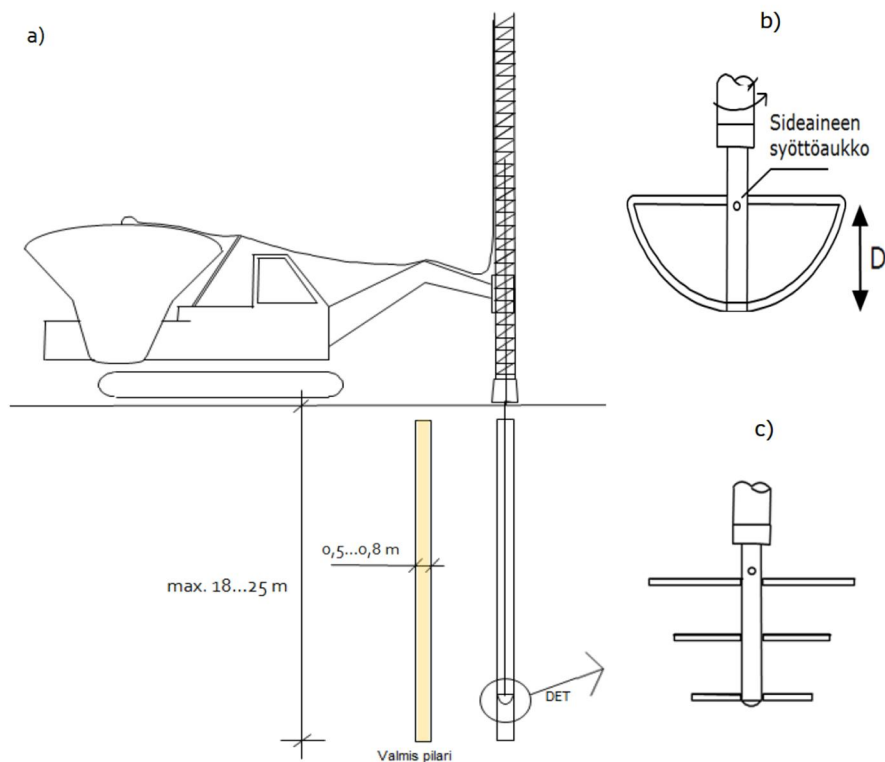
Pilaristabilointi suoritetaan upottamalla sekoitinkärki suunniteltujen stabilointipilariden halutulle aloitustasolle. Kun haluttu aloitustaso on saavutettu, sekoitinkärkeä nostetaan stabilointisuunnitelman mukaisella nopeudella pyörittäen samalla sekoitinkärkeä. Sekä nosto-, että pyörittämisnopeus määritetään stabilointisuunnitelmassa. Tavallisesti sekoitinkärjen nousu- ja pyörittämisnopeuksien suhde on suurimmillaan 15 mm/r. Liikenneviraston Syvästabiloinnin suunnittelu 17/2018-ohjeessa on annettu seuraava yhtälö sekoitustyön tehokkuudelle:

$$\text{Sekoitustyön tehokkuus} = \frac{\text{Terätasojen määrä sekoitinkärjessä}}{\text{Nousu kierrosta kohti}} \quad (1)$$

Terätasolla tarkoitetaan tässä sitä, kuinka monelle eri tasolle terät on kiinnitetty sekoitinkärkeen. (Liikennevirasto 2018). Stabilointityön jälkeen laadun arviointi suoritetaan laadunvalvontakairauksilla InfraRYL:n mukaisesti.

Maa-aineen laadun mukaan syvästabilointiin voidaan käyttää erilaisia sekoitinkärkiä (kuva 1). Käytettäessä sideaineena sementtiä sitkeässä maa-aineksessa, käpykärjellä (kuva 1 c) on havaittu saatavan parempia tuloksia. Sellaisessa tapauksessa, jossa maa-aines on sensitiivistä ja sideaine koostuu suurelta osin kalkista, erilaisten sekoituskärkien ero on pienempi. Myös sideaineen syöttövaiheen on havaittu vaikuttavan pilarien lujuuteen. Pilarin lujuuden on havaittu kasvavan hieman, kun käytetään työtekniikkaa, jota käytettäessä puolet sideaineesta sekoitetaan alaspainamisvaiheessa. (Aalto 2002). Tällaista menetelmää käytetään esimerkiksi Japanissa (penetration injection method). Tässä menetelmässä sideaine sekoitetaan pohjamaahan upotusvaiheessa ja ylösnostovaiheessa sekoitusterät sekoittavat sideaineen uudelleen. (Kitazume 2021).





**Kuva 1 a) syvästabilointikoneen toimintaperiaate, b) sekoitinkärki ("kattilakärki"), c) sekoitinkärki ("käpykärki") (Liikennevirasto 2018).**

Pilaristabilointi voidaan yleisesti ulottaa noin 15...25 metrin syvyyteen. On tosin huomioitavaa, että yli 20 metrin syvyyteen ulottuvien stabilointipilarien käyttöä ei yleisesti suositella stabilointityön vaativuuden sekä laadun epävarmuuteen ja laadunvalvontaan liittyvien vaikeuksien vuoksi. Stabilointiin käytettävän laitteiston paino vaihtelee yleensä välillä 15...35 t, mutta raskaimmat koneet voivat painaa jopa 55 t. Stabilointikoneen lisäksi tarvitaan yleensä erillinen sideainesäiliö, jonka massa on suuruudeltaan noin 25 t. Edellä mainittujen lisäksi stabilointityön suorittamiseksi tarvittavien sideainesäiliövaunujen pääsy työmaalle tulee mahdollistaa. Sideaineen kuljetuksessa käytettävän suuren säiliövaunun massa täytenä on noin 60 t. Työmaan sekä alueelle johtavien teiden kantavuus tulee tarkastaa tapauskohtaisesti koneiston sekä kuljetusten painon mukaisesti. Näin toimitaan erityisesti tapauksissa, joissa on oletettavaa, että kantavuus tai stabiliteetti eivät ole riittävällä tasolla. (KPO 2002).

## 2.2 Syvästabiloinnissa käytettäviä sideaineita

Syvästabiloinnin sideaine sisältää yhtä tai useampaa stabiloivaa ainetta. Sideainetta voidaan myös kutsua seossideaineeksi, mikäli se koostuu useammasta kuin yhdestä stabiloivasta aineesta. (Liikennevirasto 2018). Kaikissa Suomessa valmistettavissa syvästabiloinnissa käytettävissä sideaineissa käytetään uusiomateriaaleja. Uusiomateriaaleilla tarkoitetaan tässä yhteydessä teollisten prosessien sivuvirtoja

(Väylävirasto 2022). Uusiomateriaali voi olla osana sideaineen sementtiä tai olla osana muita sideaineen ainesosia. Suurimmillaan uusiomateriaalin osuus sideaineesta voi olla jopa 100 %, esimerkiksi nyt jo tuotannosta yrityskaupan vuoksi poistunut Ecolan Infrastabi100. Syvästabiloinnin sideaineissa käytettäviä uusiomateriaaleja ovat esimerkiksi kalkkiuunin sähkösuodinpöly, lentotuhka ja masuunikuonajauhe. Lentotuhkaa on käytetty sideaineseoksissa jo 1990-luvulla Suomessa ja Ruotsissa, muun muassa osana Lohjamix-sideaineseoksia. Myös muita uusiomateriaaleja on käytetty osana syvästabiloinnin sideaineita jo vuosikymmeniä. Esimerkkinä voidaan mainita Nordkalk, joka toi 1990-luvulla saataville sammutettua kalkkia, kipsiä sekä kalkkiuunin sähkösuodatinpölyä sisältäviä sideaineita. Tällainen tuote on esimerkiksi FTC, jonka nimi muutettiin GTC:ksi vuonna 2007. (Forsman 2022). Sivuvirroista saatavia sideainereseptin aineosia käytettäessä on huomioitavaa, että sivutuotteiden saatavuus on rajallinen, joskin runsas. Mikäli teollisuuden tuotantoprosessit muuttuvat siten, että sivutuotteiden saatavuus vähenee, myös niihin perustuvien uusiosideaineiden saatavuus voi vähentyä.

Sementti on jauhemainen sideaine, joka koostuu pääosin kalkkikivestä. Sementtiä valmistetaan jauhamalla klinkkeriä, seosaineita ja kipsiä kuulamyllyllä. Käytettävän klinkkerin pääainesosa on kalkkikivi, jonka pääosa on kaliumkarbonaattia,  $\text{CaCO}_3$ . Tarvittaessa sementtiin voidaan sekoittaa muita komponentteja, kuten piioksidia ( $\text{SiO}_2$ ), rautaoksidia ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ja alumiinioksidia ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). (Finnsementti Oy 2012). Pelkästä sementistä valmistetut pilarit ovat usein hauraita. Sementtipilareissa kalsiumionit eivät juuri liiku sekoittamisen jälkeen, joten sementin sekoittuminen stabilointityön jälkeen on vähäistä. Tästä syystä sementtipilareissa sekoitustyön laatu näkyy voimakkaammin kuin kalkkipitoisia sideaineita käytettäessä. (Liikennevirasto 2018). Kohteissa, joissa ei ole aikaa odottaa sideaineen lujittumista, sementin käytönä on nopea alkulujittuminen. (UUMA4 2023b).

Kalkkia on käytetty sideaineena sekä poltettuna kalkkina ( $\text{CaO}$ ) että sammutettuna kalkkina ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Poltettua kalkkia on käytetty yleisesti 1980-luvun loppupuolelta asti. Sideaineena poltettu kalkki on hyvin reaktiivista, sillä se sitoo vettä tehokkaasti. Kun sideaineena käytetään kalkkia, alkulujittumisvaihe on hidas, mutta pitkäaikaiset lujittumisreaktiot voivat kestää jopa vuosia. Kalkin kyky diffuntoitua tasoittaa mekaanisesta sekoittamisesta syntyviä epähomogeenisuuksia. Näin syntyvän pilarin lopputuloksen laatu paranee. Kalkista tehtyjen pilarien etu on niiden muita sideaineita suurempi sitkeys. Vastaavasti niiden mekaaninen lujuus on heikompi. Lisäksi ne eivät sovellu humuspitoisille saville ja liejuille. (Liikennevirasto 2018). Poltetun kalkin käyttö sideaineseoksissa on vähentynyt EU:n päästökaupasta johtuvan hinnannousun ja hiilidioksidipäästöjen vähentämistarpeen seurauksena ja vähenee edelleen 2020-luvulla. (UUMA4 2023b).

Kalkkiuunin sähkösuodinpölyä (LKD) saadaan kalkin polton sivutuotteena. Kalkin polttoprosessissa syntyy hiukkasia, jotka koostuvat kalkkikivessä olevista

mineraaleista, kuten kalsiumkarbonaatista ja kalsiumoksidista. Syntyvät päästöt ohjataan sähkösuodattimeen, joka poistaa savukaasusta hiukkasia. 2014 eteenpäin suodinpölyä ei ole saanut viedä kaatopaikoille, joten sen hyödyntäminen on lisääntynyt. (UUMA4 2023b).

Kipsiä saadaan teollisuuden sivutuotteena muun muassa hiilivoimaloiden savukaasujen puhdistuksesta. Ennen vuotta 2008 toteutetuissa stabiloinneissa on käytetty FTC-sideainetta, jossa käytetyn jättekipsin tuotemerkki oli Finnstabi. (Piispanen 2017). Vuodesta 2008 markkinoilla ollut Nordkalk Terra GTC sideaine sisältää kipsiä. Kipsipohjaiset sideaineet on tarkoitettu käytettäväksi huomattavasti lujittuville maalajeille, kuten liejuille sekä sulfidisaville. (Nordkalk Oy Ab 2023).

Lentotuhka on peräisin metsä- ja energiateollisuuden polttolaitoksista. Lentotuhkaa voidaan kerätä esimerkiksi jätteen, turpeen, biomassan tai kivihiilen poltosta. (Nguyen 2021; UUMA4 2023b). Kivihiilen käyttö energiantuotannossa loppuu Suomessa viimeistään 1.9.2029, joten sen jälkeen kivihiilenpolton lentotuhkaa ei ole saatavilla (Laki hiilen energiakäytön kieltämisestä 416/2019). Lentotuhka voidaan jakaa kemiallisen koostumuksensa mukaan kalkkipitoiseen ja silikaattipitoiseen tuhkaan. Silikaattipitoinen lentotuhka sisältää piin, raudan ja alumiinin oksideja. Kalkkipitoinen lentotuhka koostuu osin samoista aineista, kuten piin ja alumiinin oksideista. Lisäksi se sisältää kalsiumin oksideja ja sulfaatteja. (Oksman 2022). Poltettavan polttoaineen epäpuhtaudet voivat vaikuttaa huomattavasti lentotuhkan haitallisten aineiden pitoisuuksiin. Mikäli puupolttoaineen joukossa on pienikin määrä kyllästettyä puuta, lentotuhkan kromi-, kupari- ja arseenipitoisuudet voivat nousta huomattavasti. (Korpijärvi et. al. 2009).

Masuunikuonaa saadaan raakaraudan valmistuksen sivutuotteena. Masuunikuonasta saadaan sideainekäyttöön soveltuvaa materiaalia granuloimalla ja jauhamalla masuunin kuonaa. Granuloinnilla tarkoitetaan prosessia, jossa kuona jäähdytetään nopeasti veden avulla. Tällöin kuonasta syntyy lasimainen aine, joka voidaan jauhaa sideaineksi. Masuunikuona koostuu pääosin kalsiumin ja magnesiumin silikaateista sekä aluminosilikaateista. (Finnsementti 2019). Nykyään masuunikuonan päästöihin lasketaan mukaan pelkästään kuonan jauhatuksesta ja kuljetuksesta syntyvät päästöt. Raudan valmistuksesta syntyviä päästöjä ei siis huomioida mukaan masuunikuonan päästöihin. (Punkki 2021).

CEMII tarkoittaa sellaista sementtilaatua, joka sisältää portlandklinkkeriä sekä seosaineita. Seosaineiden määrä vaihtelee välillä 6–35 % klinkkerin ja seosaineiden yhteismäärästä. Seosaineiden määrä riippuu sementtilaadusta. CEMII/A sisältää 6–20 % seosaineita ja CEMII/B 21–35 %. Seosaineina voidaan käyttää esimerkiksi kuonaa, silikaa, lentotuhkaa, kalkkikiveä tai näiden yhdistelmiä. (Finnsementti Oy 2012).

CEMIII/A tarkoittaa sellaista sementtilaatua, joka sisältää portlandklinkkeriä ja masuunikuonaa, ja jossa masuunikuonan osuus on välillä 36–65 %. Malminkentän koestabiloinnissa on käytetty Finnsementin valmistamaan CEMIII/A-sementtiä, jonka tuotenimi on Kolmossementti. Kolmossementin pääasiallinen käyttötarkoitus on valmisbetoni, mutta sitä voidaan käyttää myös stabilointiin. (Finnsementti Oy 2023).

CEMIII/B tarkoittaa sellaista sementtilaatua, joka sisältää portlandklinkkeriä ja masuunikuonaa, ja jossa masuunikuonan osuus on välillä 66–80 %. Malminkentän koestabiloinnissa on käytetty Finnsementin valmistamaa CEMIII/B-sementtiä, jonka tuotenimi on KolmosBertta. KolmosBertta on sulfaatinkestävä sementtilaatu. (Finnsementti Oy 2023).

### 2.3 Syvästabiloinnin päästöt ja päästökertoimet

Syvästabilointi muodostaa merkittävän päästölähteen erityisesti infrarakentamisessa. Lehtovirta (2023) laski viiden vuoden keskimääräisten käyttömäärien perusteella syvästabiloinnin sideaineiden hiilidioksidiekvivalenttipäästöjen olevan arviolta noin 57 ktCO<sub>2</sub>e vuodessa. Laskelmassa arvioitiin infrarakentamisen kokonaispäästöjen olevan noin 2210 kt CO<sub>2</sub>e/vuosi. Sideaineet muodostavat tästä siis noin 3 %. Stabiloinnin sideaineiden päästöjä verrattuna eräisiin Lehtovirran esittämien infrarakentamisen materiaalien päästöihin on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1 Syvästabiloinnin sideaineiden vuosittaiset päästöt Suomessa verrattuna muihin infrarakentamisen materiaalipäästöihin (mukailtu Lehtovirta 2023).**

Materiaali	Päästöt (kt CO <sub>2</sub> e/vuosi)	Osuus kokonaispäästöistä (%)
Asfaltti	314	14,2
Betoni	451	20,4
Kiviainekset	140	6,3
Teräs	68	3,1
Stabiloinnin sideaineet	57	2,6
<b>Kokonaispäästöt</b>	<b>2210</b>	<b>100</b>

Syvästabiloinnin päästöt käytettyä sideainemäärää kohden riippuvat pitkälti käytetystä sideaineesta. Kalkki-sementtipohjaiset sideaineet ovat aiemmin muodostaneet yli puolet käytetystä sideaineesta. Käytetyimpiä ovat KC30 ja KC50. (Lehtovirta 2023). Infrarakentamisen päästötietokannan mukaan KC50-sideaineen päästökero on 0,844 kg CO<sub>2</sub>e/kg. Uusiosideaineille, kuten POZ ja GREEN, päästökertoimet ovat 0,563 kg CO<sub>2</sub>e/kg ja 0,237 kg CO<sub>2</sub>e/kg. Sideaineiden lisäksi kokonaispäästöjen laskennassa voidaan ottaa huomioon pilaristabilointikoneen päästöt. CO<sub>2</sub>data-tietokannan arvo pilaristabilointikoneelle on 34,1 kg CO<sub>2</sub>e/h. (SYKE, Suomen ympäristökeskus 2023). Nguyen (2021) laski Kuninkaantammen koestabilointiurakan

perusteella pilaristabiloinnin keskiarvohiilidioksidipäästöjen olevan noin 3 kg CO<sub>2</sub>e/pilarimetri.

## 2.4 Syvästabiloinnin toteuttaminen

Syvästabilointityö toteutetaan syvästabilointisuunnitelman mukaisesti. Syvästabilointisuunnitelma sisältää työselostuksen, jossa viitataan InfraRYL:in uusimpaan versioon ja johon kirjataan tarvittavat täydennykset ja poikkeamat InfraRYL:iin nähden. Lisäksi stabilointisuunnitelma sisältää laadunvalvontasuunnitelman, turvallisuusasiakirjan, määräluettelon, asemapiirroksen ja pohjatutkimusleikkaukset, joihin on täydennetty syvästabiloitavat alueet sekä pilareiden yläpäiden korkeusasemat ja pilareiden alapäiden tavoitetasot. Tarvittaessa syvästabilointisuunnitelmassa voidaan myös esittää detaljipiirustukset. (Forsman 2023). Osana syvästabilointisuunnitelmaa esitetään sideaineen tyyppi ja sideainemäärä. Lisäksi esitetään pilarien tavoitelujuus. Asemapiirros sisältää pilaristabilointikartan. Kartalla esitetään:

- Stabiloitava alue ja stabiloinnin osa-alueet
- Osa-alueiden nurkkapilarien keskipisteiden koordinaatit
- Yksittäiset pilarit
- Pilarien halkaisija, pilarien k/k-etäisyys ja pilarien kaltevuus
- Pilarien tavoite- tai päättymistasot
- Pilarien liittyminen mahdollisiin muihin pohjanvahvistustoimenpiteisiin
- Mahdollinen työalusta ja mahdolliset esi- ja yli-kuormituspenkereet

(Liikennevirasto 2018).

## 2.5 Syvästabiloinnin mitoitus ja laadunvarmistus

Syvästabiloinnin mitoituksessa käytetään varmuuskertoimia ja materiaaliominaisuuksien ominaisarvoja. Ominaisarvo on se materiaalin arvo, jonka tulkitaan edustavan materiaalin ominaisuuksia. Mitoitusarvon saamiseksi ominaisarvo jaetaan käytettävällä osavarmuusluvulla. Ominaisarvo voidaan määrittää laboratoriokokeilla, koestabiloinnin valvontakairauksilla, saman alueen aiemmin tehtyjen stabilointitöiden valvontakairauksilla tai kokemusperäisesti. (Liikennevirasto 2018).

Stabilointipilareille suoritetaan laadunvalvontatoimenpiteitä, jotta voidaan osoittaa pilarien täyttävän niille osoitetut vaatimukset. Laadunvalvontatoimenpiteet esitetään stabilointisuunnitelmassa. Laadunvalvonta voidaan suorittaa erilaisilla menetelmillä, joita on esitelty seuraavaksi.

### Kairausmenetelmät

Lujittuneita stabilointipilareita voidaan kairata niiden ominaisuuksien selvittämiseksi. Kairauksen tarkoituksena on selvittää pilarien leikkauslujuutta välillisesti tai suoraan. Välillisesti leikkauslujuutta mittaavia menetelmiä ovat pilari-, CPTU- ja

puristinheijarikairaukset. Näissä kairausmenetelmissä mittauskärkeä painetaan lujituneeseen pilariin ja leikkauslujuutta arvioidaan kairausvastuksen perusteella. Käytettävän menetelmän valintaan vaikuttaa pilarien lujuus. Mikäli pilarit ovat liian lujia pilarikairauksen käyttämiseksi, voidaan käyttää puristinheijarikairausta ( $A=50 \text{ cm}^2$ ). Pilarien leikkauslujuutta voidaan mitata suoraan pilarisiipikairauksella. Tässä menetelmässä pilarin leikkauslujuutta arvioidaan voimasta, jota siiven kääntäminen pilariin sisällä vaatii. (Liikennevirasto 2018).

Kairausmenetelmät sopivat huonosti tai eivät ollenkaan sideaineen sekoittumisen laadun tutkimiseen poikkileikkauksessa. Kairauksilla on mahdollista tutkia syvyyssuuntaisen lujittumisen muutoksia pilarissa. Pilarikairauksessa haasteena on kairakärjen suuri koko (lavan leveys 0,4 m) ja pilarikärjen tarkan sijainnin määrittäminen pilarissa. Kairausten voidaan olettaa pysyvän hyvällä varmuudella pilarin sisäpuolella noin kahdeksan metrin syvyyteen. Tätä voidaan kuitenkin parantaa jonkin verran esiporaamalla pilariin reikä pilarikairan kärkeä varten. (Melander 2017). Vastaava haaste esiintyy myös muissa mahdollisissa kairausmenetelmissä, kuten CPT- ja pilarisiipikairauksessa. Samalle pilaripoikkileikkaukselle voidaan tehdä vain rajallisesti kairauksia ilman, että aiemmat kairaukset vaikuttavat saataviin tuloksiin. (Larsson 2003).

#### Näytteenottomenetelmät

Pilarista otetuille näytteille voidaan suorittaa laboratorioskokeita pilarin ominaisuuksien selvittämiseksi. Näytteet otetaan yleensä häiriintymättöminä, mutta mikäli halutaan tutkia vain sideainepitoisuutta, voidaan ottaa häiriintyneitä näytteitä. Näytteenotto voi olla haastavaa pilarin lujuuden vuoksi. Näytteenotto onnistuu parhaiten, kun lujittuminen on tasaista eikä haurasta. (Liikennevirasto 2018).

#### Pilarien ylösnosto

Sen sijaan, että pilareista otettaisiin näytteitä kokeita varten, voidaan myös nostaa koko pilari tai osa pilarista ylös maasta. Näin voidaan muun muassa tutkia sen sekoittumisen laatua. (Liikennevirasto 2018). Pilarin ylösnostoa on tarkasteltu tarkemmin luvussa 6.5.

## 3 Vähähiilinen syvästabilointi

### 3.1 Vähähiilinen betoni

BY-vähähiilinen betoni on Suomen Betoniyhdistys ry:n kehittämä kansallinen luokitus betonin hiilidioksidipäästöille. Luokittelun käyttö on vapaaehtoista. Luokituksen tarkoituksena on vähentää betonin valmistuksesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Valmisbetoneita koskeva luokitus on tehty vuosien 2021 ja 2022 aikana ja betonielementtien betoneita koskeva luokitus vuosien 2022 ja 2023 aikana. (Suomen betoniyhdistys ry 2024b). BY-vähähiilisyysluokitusta on käytetty mallina Syvästabiloinnin vähähiilisyysluokituksen luonnissa.

BY-vähähiilisyysluokitus jaottelee betonilaadut viiteen luokkaan niiden päästöjen mukaan. Luokitus perustuu betonilaatukohtaisiin suomalaisten betonivalmistajien keskimääräisiin päästötasoihin vuonna 2021. Päästöjen laskennassa otetaan huomioon ympäristöselosteen moduulit A1...A3 (Taulukko 2), eli luokitus ei ota huomioon kuljetusta työmaalle. Luokitus ei myöskään sisällä raudoitusta tai työmaatoimintoja. Näin ollen luokitusta ei voida suoraan verrata betonielementtien päästöarvoihin, sillä elementtien päästöarvoissa päästöihin huomioidaan myös rauditus sekä valmistusprosessi. (Suomen betoniyhdistys ry 2024b).

**Taulukko 2 Ympäristöselosteen moduulit (Rakennustietosäätiö 2022).**

Tuotevaihe			Rakentamisvaihe		Käyttövaihe							Rakennuksen purkuvaihe				Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset		
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	D	D
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Raaka-ainekiden hankinta	Kuljetus valmistukseen	Valmistus	Kuljetukset työmaalle	Työmaatoiminnot	Käyttö	Kunnossapito	Korjaus	Osien vaihto	Laajamittaiset korjaukset	Energian käyttö	Veden käyttö	Purkaminen	Purkuvaiheen kuljetukset	Purkujätteen käsittely	Purkujätteen loppusijoitus	Uudelleenkäyttö	Hyödyntäminen	Kierrätys


Pakolliset moduulit  
Pakollisia RTS EPD- menetelmäohjeen kohdan 6.2.1 sääntöjen ja ehtojen mukaisesti  
Skenaarioihin perustuvat valinnaiset moduulit

BY-vähähiilinen betoni -luokituksen luokat on jaettu sen mukaan, kuinka suuret niiden päästöt ovat verrattuna luokituksessa määritettyihin vuoden 2021 tasoihin. Luokat ovat .REF, .85, .70, .55 ja .40. Luokituksessa esiintyvä luku kuvaa prosenttiosuutta vertailu tasosta ja luokka .REF kuvaa vertailutasoa. Luokituksessa käytetään

etuliitettä GWP, joka tarkoittaa ilmastonlämpenemispotentiaalia (Global Warming Potential). (Suomen betoniyhdistys ry 2024b). Taulukkoarvoja luokituksessa mukana oleville betonilaaduille on esitetty taulukossa 3.

Vähähiilisyysluokka ei kumoa muita betonille asetettuja vaatimuksia. Esimerkiksi lujuus- ja säilyvyysominaisuudet, kuten rasisluokat tulee toteutua vähähiilisyysluokasta riippumatta. On kuitenkin huomattava, että vähähiilisen betonin valinta vaikuttaa myös muihin betonin ominaisuuksiin, esimerkiksi lujuudenkehitykseen. (Suomen betoniyhdistys ry 2024b)

**Taulukko 3 BY-vähähiilinen betoni -luokitus (Suomen betoniyhdistys ry 2024b).**

BETONILAATU	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>				
	GWP.REF	GWP.85	GWP.70	GWP.55	GWP.40
C20/25 - Ei huokostettu	210	180	145	115	85
C25/30 - Ei huokostettu	230	195	160	125	90
C30/37 - Ei huokostettu	255	215	180	140	100
C35/45 - Ei huokostettu	285	240	200	155	115
C45/55 - Ei huokostettu	320	270	225	175	130
C50/60 - Ei huokostettu	340	290	240	185	135
C30/37 - Huokostettu	290	245	205	160	115
C35/45 - Huokostettu	330	280	230	180	130
C45/55 - Huokostettu	375	320	265	205	150
C50/60 - Huokostettu	395	335	275	215	160
C30/37 P0	270	230	190	150	110
C30/37 P30	300	255	210	165	120
C35/45 P0	300	255	210	165	120
C35/45 P30	330	280	230	180	130
C35/45 P50	340	290	240	185	135
C45/55 P50	375	320	265	205	150

Betoniyhdistys on luonut GWP-päästöjen laskentaa varten BY-Vähähiilisyyslaskurin. Päästöjä voidaan laskea myös kolmannen osapuolen toteuttamalla laskurilla, joskin laskurin on oltava Betoniyhdistyksen hyväksymä ja kolmannen osapuolen verifioida. Koska BY-Vähähiilinen betoni -luokitus ottaa huomioon betonilaadun lisäksi kuljetuksen valmistuspaikalla, laskenta suoritetaan betonilaatu- sekä betoniasemakohteisesti. Kuljetuksen päästöissä huomioidaan esimerkiksi raaka-aineiden kuljetus laivalla terminaaliin ja sieltä kuljetus kuorma-autolla betoniaseamalla. Paluumatka huomioidaan rekkakuljetusten tapauksessa käyttämällä 50 % kuormaa edestakaisella matkalla olettaen 100 % kuorma toiseen ja 0 % kuorma toiseen suuntaan. Laivakuljetusten osalta huomioidaan yhdensuuntainen matka. Kuljetuksen



päästökertoimet on haettu Rakentamisen CO2data.fi -tietokannasta. (Suomen Betoniyhdistys ry 2024a).

### 3.2 Syvästabiloinnin CO<sub>2</sub>e-tunnusluvut

Syvästabiloinnin sideaineiden valmistuksen ja työmaalle kuljettamisen hiilidioksidipäästöt esitetään usein sideainetonnia kohden (kg CO<sub>2</sub>e / t). Eräiden sideaineiden päästökertoimia on esitetty taulukossa 4. Koska saavutettu lujuus käytettyä sideainemäärää kohden riippuu sideaineresepistä (laatu+määrä), eri sideaineilla toteutuvien hiilidioksidipäästöjen vertailuun tarvitaan myös muita tunnuslukuja. Mahdollinen tunnusluku on stabiloinnin sideaineen ekvivalenttihilidioksidipäästöt saavutettua tai tavoitelujuutta kohden (g CO<sub>2</sub>e/m/kPa). Tämän yksikön käyttöä on tarkasteltu Tytti Nguyen diplomityössä (2021). Tämän arvon laskennassa otetaan huomioon sideaineen päästökerroin, sideainemäärä sekä saavutettu tai tavoitelujuus. Kuvassa 2 on esitetty Nguyen diplomityössä laskettu esimerkkikuvaaja Terra GTC -sideaineelle käyttäen tavoitelujuutena 100 kPa. Edellä kuvatulla hiilidioksidipäästöt tunnusluvulla voidaan vertailla eri sideaineresepien hiilidioksidipäästöjä kyseessä olevassa kohteessa.

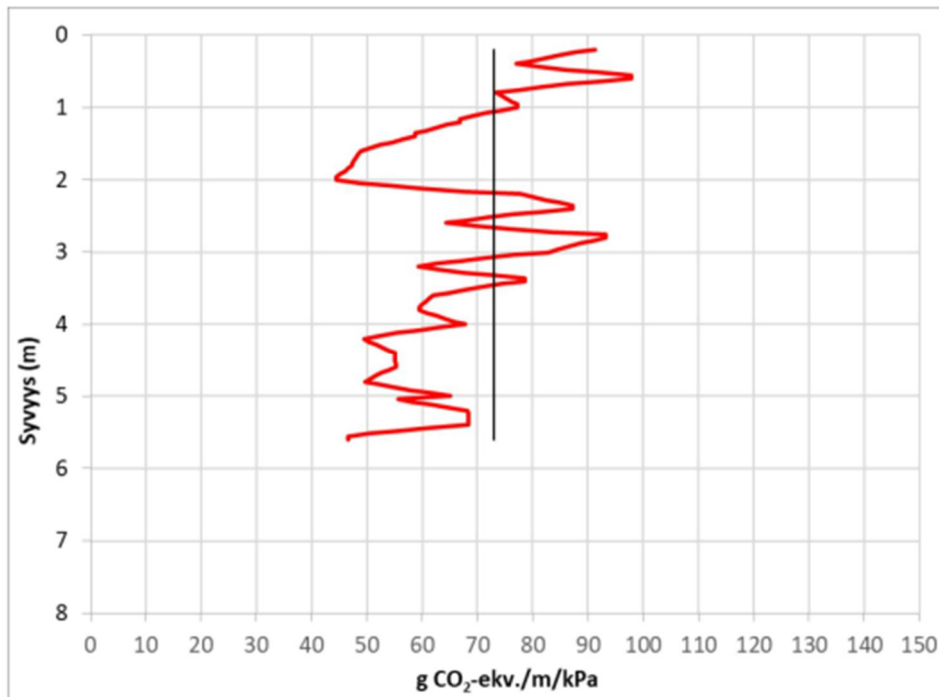
Päästöt lujuutta kohden lasketaan käyttäen kaavaa:

$$\text{Päästöt per lujuus} = \frac{\text{Päästökerroin} \times \text{Sideainemäärä}}{\text{tavoitelujuus tai saavutettu lujuus}} = \frac{\text{kg CO}_2\text{e/kg} \times \text{kg/m}}{\text{kPa}} \quad (2)$$

Vastaavia tunnuslukuja on määritetty rajallinen määrä, joten tunnuslukujen yleisestä pätevydestä eri pilaristabilointikohteissa ei ole toistaiseksi laajaa kokemusta. Tässä työssä on tehty ”hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden” -kuvaajia Malmin kentän koestabilointikohteen koepilareille erilaisilla sideaineresepteillä.

**Taulukko 4 Sideaineiden valmistuksen päästökertoimia.**

Sideaine	Päästökerroin (kg CO <sub>2</sub> e/sideaine-kg)
Finnsementti CEMIII/A 52,5 L	0,446 (Finnsementti Oy 2022)
Finnsementti CEMIII/B 42,5 L	0,315 (Heikkilä 2022)
Nordkalk Terra GTC	0,186 (Kuusipuro 2022b)
Nordkalk Terra GREEN	0,237 (CO2data.fi 2023; Kuusipuro 2022b)
Nordkalk Terra POZ	0,563 (CO2data.fi 2023; Kuusipuro 2022b)
PVO LT+CEMII 7/3	0,184 (Ngyen 2021)
UPM LT+CEMII 7/3	0,184 (Ngyen 2021)



**Kuva 2 Esimerkkikuvaaja CO<sub>2</sub>e-päästöt saavutettua (punainen) ja tavoiteleik-  
kauslujuutta (musta) kohden. Sideaine Nordkalk Terra GTC 80 kg/m<sup>3</sup>. (Ngu-  
yen 2021).**

Taulukossa 5 on esitetty teoreettinen laskelma Nordkalkin Terra GREEN ja POZ-sideaineille (700 mm pilarit). Tavoitelujuudelle on käytetty arvoa 100 kPa. Ensimmäisessä laskelmassa on käytetty samaa sideainemäärää (100 kg/m<sup>3</sup>, jolloin suuremman päästökertoimen sideaineella päästöt saavutettua lujuutta kohden ovat huomattavasti suuremmat. Toisessa laskelmassa on oletettu, että sideainetta POZ tarvitaan puolet siitä määrästä mitä sideainetta GREEN (100 kg/m<sup>3</sup> ja 50 kg/m<sup>3</sup>) tavoitelujuuden saavuttamiseksi. (Taulukko 5).

**Taulukko 5 Esimerkkilaskelma päästökertoimien ja sideainemäärien vaikutuksesta päästöihin.**

Side- aine	Päästökerroin (kg CO <sub>2</sub> e / kg side- aine)	Sideainemäärä (kg/m / kg/m <sup>3</sup> ) Pilarikoko 700 mm	Päästöt tavoitelujuutta 100 kPa kohden (g CO <sub>2</sub> e / m / kPa)
<b>Sama sideainemäärä</b>			
GREEN	0,237	38,5 / 100	91,2
POZ	0,563	38,5 / 100	216,7
<b>Sideainetta GREEN kaksinkertainen määrä</b>			
GREEN	0,237	38,5 / 100	91,2
POZ	0,563	19,2 / 50	108,3

### 3.3 Syvästabiloinnin sideaineen vähähiilisyysluokitus (SSV)

Syvästabiloinnin sideaineen vähähiilisyysluokituksella tarkoitetaan UUMA4-ohjelman työryhmässä 7 syvästabiloinnin hankintaa varten luotua sideaineen päästöluokitusta. Luokituksen tarkoituksena on helpottaa sideaineiden päästöjen määrittämistä suunnittelu- ja hankintavaiheissa. Luokitus kuvaa kuinka paljon hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä sideaineesta syntyy sideaineen painoa kohden. SSV-luokituksen yksikkö on kg CO<sub>2</sub>e/t. (UUMA4 2023a).

Sideaineiden vähähiilisyysluokitus määritetään sideaineiden ympäristöselosteiden, ilmastoselosteiden tai kriittisesti arvioitujen elinkaariarvioiden perusteella. Sideaineiden vähähiilisyysluokituksessa huomioidaan sideaineen elinkaaren vaiheet A1-A4 (taulukko 2), eli sideaineen raaka-aineista ja valmistuksesta syntyvien päästöjen lisäksi sideaineen kuljetus työmaalle. Käytettäessä kierrätysmateriaalipohjaista sideainetta tai -pohjaisia sideaineita, raaka-aineen hankinta -vaiheesta (A1) syntyviä päästöjä ei huomioida, vaan ne kuuluvat osaksi valmistettavan tuotteen elinkaarta. Koska hankinnassa voidaan määrittää suurin sallittu SSV-luokka sideaineelle, urakoitsijan on otettava huomioon etäisyys sideaineen valmistuspaikasta työmaalle osana SSV-luokan määrittäystä. On siis mahdollista, että joissakin tapauksissa sideaineen luokitus nousee suurempaan luokkaan johtuen pitkästä kuljetusmatkasta. On huomioitavaa, että SSV-luokituksessa ei käytetä päästökompensaatiota, vaan tuotteen aitojen omien päästöjen on jäätävä SSV-luokituksen rajan alle. (UUMA4 2023a).

Sideaineet on luokituksessa jaettu 7 luokkaan niiden päästöjen mukaan (Taulukko 6). Luokka ilmoitetaan tunnuksella ”SSV.n”, jossa ”.n” ilmoittaa luokituksen. Esimerkkinä voidaan mainita sideaine KC50, joka 100 km kuljetusmatkalla sijoittuisi luokkaan SSV.9, kun taas vastaavalla kuljetusmatkalla sideaine Nordkalk Terra GTC sijoittuisi luokkaan SSV.2. (UUMA4 2023a).

**Taulukko 6 Syvästabiloinnin sideaineen vähähiilisyysluokitus (SSV-luokitus) ja vähähiilisyysluokkia vastaavat päästökertoimet. Kertoimet sisältävät sideaineen valmistuksen (A1-A3) ja työmaalle kuljetuksen päästöt (A4). (UUMA4 2023a).**

SSV-luokka	SSV-luokkaa vastaava päästökerroin, joka sisältää sideaineen valmistuksen ja työmaalle kuljetuksen päästöt A1-A4 [kg CO <sub>2e</sub> / t]
SSV.1	≤ 100
SSV.2	≤ 200
SSV.3	≤ 300
SSV.4	≤ 400
SSV.5	≤ 500
SSV.7	≤ 700
SSV.9	≤ 900

### 3.4 Stabilointipilarien vähähiilisyysluokitus (SPV)

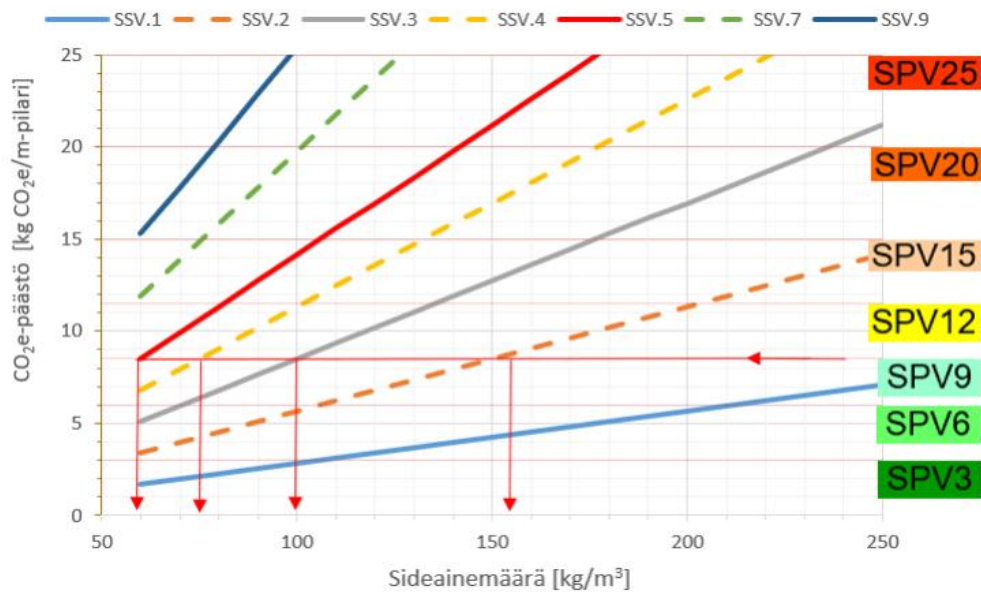
Stabilointipilarien vähähiilisyysluokitus on UUMA4 työryhmässä 7 luotu luokitus sideaineiden päästöjen arviointiin ottaen huomioon tavoiteleikkauslujuuteen tarvittava sideainemäärä. Tarvittava sideainemäärä otetaan luokituksessa huomioon ilmoittamalla käytettävän sideainemäärän pilarimetriä kohden. Luokituksen yksikkönä toimii kg CO<sub>2e</sub>/m-pilari. Luokituksessa huomioidaan myös pilarin halkaisijasiten, että suuremman halkaisijan pilarille sallitaan saman luokan sisällä suuremmat päästöt (Taulukko 7). Luokitus on luotu käyttäen pohjana halkaisijan 0,6 m pilareita, joista päästöt on skaalattu muille pilarihalkaisijoille niiden poikkipinta-alan mukaan. Luokitus on toteutettu sideainemäärille 60...200 kg/m<sup>3</sup>. Sideainemäärä on rajoitettu tälle välille, sillä alle 60 tai yli 200 kg/m<sup>3</sup> sideainemääriä käytetään harvoin pilaristabiloinnissa. (UUMA4 2023a).

**Taulukko 7 Stabilointipilarin vähähiilisyysluokitus (SPV-luokitus) ja vähähiilisyysluokkia vastaavat päästöt pilarimetriä kohden. Päästöt ovat sideaineen päästöluokkien (A1-A4) ja pilarin sideainemäärän tulo kg/m-pilari tulo [kg CO<sub>2</sub>e/m-pilari = kg CO<sub>2</sub>e/t x t/m-pilari]. D = pilarin halkaisija. (UUMA4 2023a).**

SPV-luokka	SPV-luokkaa vastaava CO <sub>2</sub> -päästö, joka sisältää sideaineen valmistuksen ja työmaalle kuljetuksen päästöt A1-A4 pilarimetrille [kg CO <sub>2</sub> e / m-pilari]				
	D [m]	0,5 m	0,6 m	0,7 m	0,8 m
SPV3		≤ 2,1	≤ 3,0	≤ 4,1	≤ 5,4
SPV6		≤ 4,2	≤ 6,0	≤ 8,2	≤ 10,7
SPV9		≤ 5,9	≤ 8,5	≤ 12,0	≤ 15
SPV12		≤ 7,9	≤ 11,5	≤ 16	≤ 20
SPV15		≤ 10,4	≤ 15	≤ 21	≤ 27
SPV20		≤ 13,8	≤ 20	≤ 28	≤ 36
SPV25		≤ 18	≤ 25	≤ 35	≤ 45

Stabiloinnissa voidaan käyttää myös niin sanottuja profiilipilareita, eli sideainemäärä on määritetty koko pilaria lyhyemmille väleillä. Tällöin sideaineen määrä voi vaihdella pilarin osuudella. Mikäli pilarien sideainemäärä määritetään profiilipilareina, SPV-luokitus tulee tarkistaa kaikille profiilin osille.

SPV-luokitus voidaan myös yhdistää SSV-luokitukseen. Tällöin sideaineelle asetetaan SSV-luokituksen mukainen rajoitus päästöjen osalta, minkä lisäksi SPV-luokitus rajoittaa suurinta mahdollista sideainemäärää pilarimetriä kohden. Pienemmän SSV-luokan sideainetta käytettäessä voidaan käyttää suurempaa määrää sideainetta saman SPV-luokan saavuttamiseksi. Esimerkiksi 0,6 pilarihalkaisijalla SSV.2-luokan sideaine sisältyy SPV.9-luokkaan jopa 155 kg/m<sup>3</sup> sideainemäärällä, kun taas SSV.5-luokan sideaine sisältyy samaan SPV-luokkaan sideainemäärällä 60 kg/m<sup>3</sup> (Kuva 3). (UUMA4 2023a).



**Kuva 3** Stabilointipilarin vähähiilisyysluokituksen (SPV-luokitus) taulukossa 5 esitetyt hiilidioksidipäästöt (kg CO<sub>2</sub>e/m-pilari) kuvaajina sideainemäärän, SSV-luokan ja pilarihalkaisijan suhteen. Pilarihalkaisija 0,6 m (b). Kuvassa on esitetty esimerkki max. sideainemääristä SPV9-luokassa, kun sideaineen SSV-luokka on .5, .4, .3 tai .2 => enimmäissideainemäärät 60, 75, 100 ja 155 kg/m<sup>3</sup>. (UUMA4 2023a).

## **4 Syvästabiloinnin hankinta**

### **4.1 Hankintamenettely**

Syvästabiloinnin hankintamenettely voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Liikenneviraston (2018) Syvästabiloinnin suunnittelu 17/2018-ohjeessa esitellään kolme erilaista mallia syvästabiloinnin hankinnalle. Mallit esitellään seuraavissa kappaleissa. Mallien esittelyn jälkeen esitellään niiden yhdistämistä SSV- ja SPV-luokituksiin.

#### **4.1.1 Tilaajan sideaineresepti (1. malli)**

Perinteinen menetelmä hankintaan on toteuttaa stabilointi tilaajan suunnitelman mukaisesti. Tätä mallia käytettäessä stabilointisuunnitelma ja työselostus laaditaan yksityiskohtaisesti tilaajan toimesta, sisältäen stabiloinnin laatuvaatimukset sekä sideainereseptin. Tällöin tilaaja vastaa sideainereseptin toimivuudesta kohteessa, sillä oletuksella, että stabilointityö suoritetaan suunnitelman mukaisesti. Urakoitsijan vastuulla tässä menetelmässä on suorittaa stabilointi suunnitelman mukaisesti. (Liikennevirasto 2018).

Urakoitsijan tulee esittää stabiloinnin toteutuksen onnistuminen stabilointipöytäkirjoilla, tarkepiirroksilla sekä valvontakairauksilla. Mikäli sideainetta tarvitaan enemmän kuin mitä tilaajan esittämässä stabilointisuunnitelmassa on esitetty, tilaaja vastaa lisäsideaineesta syntyvistä kustannuksista. Tätä mallia käytettäessä urakoitsijan on myös mahdollista vaihtaa sideainereseptiä, mutta muutos tulee hyväksyttäväksi tilaajalla. Siinä tapauksessa, että muutos hyväksytään, siirtyy vastuu sideaineen toimivuudesta tilaajalta urakoitsijalle. (UUMA4 2023).

#### **4.1.2 Urakoitsijan sideaineresepti (2. malli)**

Toinen mahdollinen menetelmä syvästabiloinnin hankintaan koostuu tilaajan laatimasta stabilointisuunnitelmasta samoin kuin edellä, mutta tässä mallissa urakoitsija tekee valinnan käytettävästä sideainereseptistä sekä sekoitustyön parametreista. Urakoitsija voi myös tarjouksen yhteydessä esittää useamman kuin yhden sideainereseptin. Tämän mallin mukaisessa toteutuksessa urakoitsija vastaa sideaineen toimivuudesta ja sekoitustyön onnistumisesta valitsemillaan parametreilla. (Liikennevirasto 2018).

Urakkalaskenta-ajan laskennassa on otettava huomioon sideainereseptointiin kuluva aika. Pelkästään stabiloitavuuskokeet kestävät sideaineen lujittumisajan mukaan 28 tai 91 vuorokautta (+ vähintään viikko valmisteluun ja tuloskäsittelyyn). 28 vuorokautta on näistä yleisempi, mutta erityisesti hitaasti lujittuville sideaineille 91 vuorokauden lujittumisajan käyttö on suositeltavaa. Onkin siis suositeltavaa, että tilaaja teettää stabiloitavuuskokeita etukäteen. Urakoitsija voi käyttää näitä omien

stabiloitavuuskokeidensa ja sideainereseptin suunnittelussa. (UUMA4 2023). Urakoitsijan tulee myös osoittaa laadunvalvontakairauksilla toteutetun syvästabiloinnin täyttävän vaatimukset. (Liikennevirasto 2018).

Hankintamallia käytettäessä tilaajan on suositeltavaa suorittaa stabiloitavuuskokeissa tarvittavien maanäytteiden otto keskitetysti. Mikäli stabiloitavuuskokeet suoritetaan urakoitsijan tai urakoitsijoiden toimesta osana hankintaprosessia, voidaan päätyä tilanteeseen, jossa samalle alueelle mobilisoidaan useita kaivin- tai kairauskoneita saman aikaisesti näytteenottoon. Lisäksi tilaajan on suositeltavaa suorittaa koestabilointeja, erityisesti mikäli kohdealue on laaja. Näin voidaan toimia myös tilanteessa, jossa kohdealueelta ei ole aikaisempaa stabilointikokemusta. Koestabiloinnit voidaan myös korvata menettelyllä, jossa stabilointityö aloitetaan koeluontoisella stabiloinnilla (suunnitelman mukaisella tai suuremmalla sideainemäärällä), jonka tulosten perusteella työtä jatketaan. Koeluontoinen stabilointi ei sovellu pieniin stabilointiurakoihin. (UUMA4 2023).

#### **4.1.3 Suunnittele ja toteuta malli (3. malli)**

Kolmannessa hankintamallissa tilaaja esittävää vain tekniset vaatimukset, jotka pohjarakenteen on täytettävä (suunnittele ja toteuta malli, ST-malli). Tilaaja voi esimerkiksi asettaa painumakriteerit sekä normaalia tiukempia vaatimuksia varmuudelle liukupintasortumaa vastaan. Tässä mallissa urakoitsija vastaa rakenteen suunnittelusta. Urakoitsija määrittää muun muassa pilarien halkaisijan, pilarivälin, tavoitetasot sekä sideainereseptin. Tämän mallin mukaisessa hankintamenettelyssä urakoitsijan on osoitettava syvästabilointirakenteen toimivuus mitoitus- ja painumalaskelmilla, laadunvalvontakairauksilla sekä painuma- ja siirtymämittauksilla tai muilla vastaavilla toimilla valmiin rakenteen täyttävän tilaajan asettamat vaatimukset. (Liikennevirasto 2018).

#### **4.1.4 Hankintamallit ja SSV-luokitus**

Syvästabiloinnin vähähiilisyysluokitus ja stabilointipilarin vähähiilisyysluokitus on mahdollista yhdistää kaikkiin edellä esiteltyihin hankintamalleihin.

1. mallia käytettäessä tilaaja määrittää sideainereseptin. Urakoitsija voi vaihtaa sideainereseptiä tilaajan esittämän SSV- ja/tai SPV-luokan hiilidioksidipäästöjen vaatimukset täyttäen.
2. mallia käytettäessä tilaaja määrittää urakkalaskentaan SSV- ja/tai SPV-luokan, joiden perusteella urakoitsija määrittää sideainereseptin. Urakoitsijan on mahdollista valita eri sideaineista, sillä useat sideaineet sisältyvät samoihin SSV-luokkiin ja voivat toteuttaa SPV-luokan sideainereseptin vaatimukset.



3. mallissa tilaaja esittää vain tekniset vaatimukset ja SSV- ja/tai SPV-luokan käytettävälle sideaineelle. Urakoitsija määrittää sideainereseptin siten, että SSV- ja/tai SPV-luokan vaatimukset täyttyvät.

Taulukossa 8 on esitetty vastuiden jakautuminen kahdessa erilaisessa hankintamennettelymallissa, kun käytetään SSV- tai SPV-luokittelua. Kaikissa vaihtoehdoissa tilaaja vastaa suunnittelusta mukaan lukien pilarihalkaisija, pilariväli ja leikkauslujuus. Taulukon päästöissä ei ole huomioitu syvästabiloinnin työsuorituksesta syntyviä päästöjä. Kaikissa vaihtoehdoissa urakoitsijan tulee esittää sideainereseptin toimivuus stabiloitavuskokeilla ja/tai koestabiloinnin tuloksilla. Lisäksi urakoitsijan tulee hyväksyttää sideaineresepti tilaajalla. Urakoitsijan ehdottama vaihtoehtoinen sideaine tai sideaineresepti ei myöskään saa ylittää tilaajan määrittämää SSV-luokkaa. Mikäli sideainetta tarvitaan enemmän kuin urakoitsijan suunnitelmassa on esitetty, urakoitsija vastaa lisäkustannuksista, ellei muuta ole sovittu tilaajan kanssa tai esitetty hankinta-asiakirjoissa. (UUMA4 2023).

Vaihtoehdossa A sideainereseptin valinta suoritetaan tilaajan toimesta. Sideaineelle esitetään SSV-luokka. Mikäli urakoitsija esittää vaihtoehtoisen sideainereseptin, tulee sen täyttää tilaajan määrittämä SSV-luokitus. Vaihtoehto B toimii samoin kuin vaihtoehto A, mutta sideainereseptin määrittäminen tehdään SPV-luokituksen mukaisesti. Tilaaja voi esittää lisäksi SSV-luokan. (UUMA4 2023).

**Taulukko 8 Vastuualueiden jakautuminen sovellettaessa SSV- tai SPV-luokittuista pilaristabiloinnin hankinnassa (vaihtoehdot ve 1.1, 1.2, 2.1 ja 2.2) (UUMA4 2023)**

	Menettely		Sideainereseptointi	Vaihtoehtoisen sideaineen reseptointi	Sekoitusparametrien määrittäminen
A	1. malli – ve 1.1	SSV	Tilaaja	Urakoitsija	Tilaaja
B	1. malli – ve 1.2	SPV(+SSV)	Tilaaja	Urakoitsija*	Tilaaja
C	2. malli – ve 2.1	SSV	Urakoitsija	-	Urakoitsija
D	2. malli – ve 2.2	SPV(+SSV)	Urakoitsija*	-	Urakoitsija

\*Tilaaja voi esittää max. SPV-luokan lisäksi myös max. SSV-luokan.

## 4.2 Hankintalaki

Hankintalain (Laki julkisista hankinnoista ja käyttöoikeussopimuksista 1397/2016) 93 § mukaan tarjouksista on valittava se, joka täyttää tarjouspyynnön vaatimukset ja on kokonaistaloudellisesti edullisin vaihtoehto. Valintaperusteena voi olla halvin hinta, edullisimmat kustannukset tai paras hinta-laatusuhde. Tarjoukset, jotka eivät täytä hankintayksikön asettamia vähimmäisvaatimuksia on suljettava tarjouskilpailusta. Edullisin vaihtoehto valitaan mukana olevista tarjouksista. Hankintalaissa edullisimmaksi tarjoukseksi voidaan määrittellä myös hinta-laatusuhteeltaan paras

tarjous. Hinta-laatusuhteen arvioinnissa voidaan liittää yhteiskunnallisia, ympäristöllisiä tai sosiaalisia näkökulmia. Hankintalain 94§ laatutekijät voivat liittyä kohteeseen missä tahansa sen elinkaaren vaiheessa ja niiden on oltava mitattavia ja viestittäviä.

Syvästabiloinnin hiilidioksidipäästöihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi SSV- ja SPV-luokituksia käyttämällä. SSV- ja SPV-luokitukset voidaan myös sisällyttää hankintayksikön asettamiin vähimmäisvaatimuksiin. (UUMA4 2023).

### **4.3 Kansainväliset menettelyt**

Yhdysvalloissa syvästabiloinnin hankinta suoritetaan Bruce & Cali (2021) mukaan käyttäen mallin 2 kanssa samankaltaista menetelmää. Hankinnan ongelmiksi on tunnistettu suunnittelijoiden määrittelemät epärealistiset tavoiteltavat parametrit sekä vanhoista projekteista suoraan kopioidut ehdot riippumatta niiden soveltuvuudesta käsillä olevaan projektiin. Epärealistisia parametreja ovat erityisesti valmiin lamellistabiloinnin vedenläpäisevyys- ja leikkauslujuusvaatimus. Yhdysvalloissa pilarilamelleita käytetään usein patojen tiivisterakenteina, mikä on syynä vedenläpäisevyysvaatimukselle. On myös havaittu, että urakoitsijat voivat olla liian varmoja esittämiensä sideainereseptien toimivuudesta, mikä voi johtaa liian vähäisiin rakentamista edeltäviin pohjatutkimuksiin sekä stabiloitavuuskokeisiin ja muihin laboratoriotutkimuksiin.

Yhdysvaltojen tiehallinnon ohjeissa (Federal Highway Administration 2013) kuvataan tyypillisen hankintamenetelmän olevan kokonaisurakkamalli (pääurakkamalli, design-bid-build), jossa suunnittelu ja toteutus tilataan erikseen. Suunnittelija toteuttaa kohteen suunnittelun tilaajalle. Kun suunnitelmat ovat valmiina, tilaaja kilpailuttaa urakoitsijan. Urakoitsija suorittaa stabilointityön tilaajan suunnitelmien mukaan. Urakoitsija vastaa sideainereseptöinnistä ja työn toteutuksesta suunnitelmien mukaisesti. Tilaja vastaa suunnitelmien toimivuudesta. Tässä mallissa suunnittelijalla ja urakoitsijalla ei ole keskinäistä sopimussuhdetta, vaan tilaaja on vastuussa suunnitelmien toimivuudesta ja urakoitsija sideainereseptin toimivuudesta. On myös mahdollista käyttää lähestymistapaa, joka on näiden kahden välillä. Ohje myös suosittaa, että tilaajalla olisi oma asiantuntija tai konsultti, joka tarkistaa suunnitelmien toimivuuden osana prosessia. Näin tulisi toimia kaikissa projekteissa riippumatta valitusta hankintamallista. (FHA 2013).

Ohjeessa (FHA 2013) mainitaan myös mahdollisuus käyttää suunnittele ja toteuta eli ST-urakkaa (design-build). Tässä hankintamallissa suunnittelija ja urakoitsija kuuluvat samaan sopimukseen. Hankinnan vaiheet tapahtuvat samanaikaisesti, eivätkä peräkkäin, kuten kokonaisurakkamallissa (design-bid-build). Vastuun jakautuminen projektissa riippuu siitä, millaista lähestymistapaa suunnittelussa käytetään. Puh- taasti teknisiin vaatimuksiin perustuvassa lähestymistavassa urakoitsija suunnittelee

stabiloinnin tilaajan antamien vaatimusten ja määritysten mukaisesti. Tällaisia voivat olla esimerkiksi kantokyky ja pohjaveden virtauksen hallinta. Tätä mallia käytettäessä urakoitsija on vastuussa rakenteen toimivuudesta. Ero kokonaisurakkamallin ja ST-mallin välillä on se, että kokonaisurakkamallissa tilaaja vastaa suunnittelutyöstä, urakoitsija vastaa työn toteutuksesta suunnitelma mukaisesti ja toteutetun työn toimivuudesta. ST-mallissa urakoitsija vastaa suunnittelusta sekä toteutetun työn toimivuudesta.

Japanissa kokonaisurakkamalli on perinteisesti ollut käytössä rakennusteollisuudessa. Tällöin suunnittelusta ja toteutuksesta vastaavat eri tahot. ST-urakkamallin suosio on kuitenkin kasvanut, osittain vuoden 2011 maanjäristystä ja tsunamia seuranneen uudelleen rakentamisen seurauksena. Urakkamallin eduksi voidaan mainita sen soveltuvuus olosuhteisiin, jossa tarvitaan nopeaa infrastruktuurin uudelleen rakentamista. (Pabor & Ishida 2012). ST-mallin suosion kasvu on jatkunut myös uudelleen rakentamisen jälkeen. Kokonaisurakkamallin käyttö jatkuu huolimatta ST-mallin suosion kasvusta. Tyypillisesti tarjouksista valitaan edullisin vaihtoehto, mutta viime aikoina myös laadulliset tekijät ovat nousseet suosioon tarjouksien valintaperusteina. (Horaguchi et al. 2022).

Ruotsissa rakennusteollisuuden urakkamalleina käytetään yleisesti joko kokonaisurakkamallia tai ST-mallia. Hankintaa ohjaa julkinen hankintalaki (2016:1145). (Ihse et al. 2023). ST-mallissa tilaaja laatii yleisen suunnitelman (tutkimukset ja työn dimensiot) ja urakoitsija vastaa työn yksityiskohtaisesta suunnittelusta (sideainereseptointi, sekoitusparametrit, liittymärakenteet ja ympäristövaatimukset) sekä pilaristabiloinnin toteutuksesta. Urakoitsija vastaa myös siitä, että toteutettu työ saavuttaa tilaajan määrittämän tavoitelujuuden. (Larsson 2006). Kyseinen menettely vastaa taulukossa 8 esitetty vaihtoehtoa 2.2, kun menettelyyn täydennetään SPV-luokitus hiilidioksidipäästöjen ohjaamiseksi.

#### **4.4 Markkinavuoropuhelu**

Julkisissa hankinnoissa markkinavuoropuhelun yksi tärkeimmistä tehtävistä on kartoittaa markkinoita tulevan hankinnan osalta, jotta hankinnasta saataisiin mahdollisimman onnistunut lopputulos, niin tilaajan kuin toimittajan näkökulmasta. Markkinavuoropuhelun ja sen eri keinojen hyödyntäminen on noussut vakiintuneeksi käytännöksi osana julkista hankintaprosessia. Onnistuneen markkinavuoropuhelun avulla voidaan säästää huomattavasti hankinnan kuluissa. (Palla 2021).

Markkinavuoropuhelun tarkoituksena on luoda kaksisuuntainen keskusteluyhteys hankintojen tilaajien ja niiden toteuttajien välille. Näin tilaaja voi jo ennen hankintamenettelyn aloittamista viestiä materiaalitoimittajilla ja urakoitsijoille tulevista hankkeista ja niiden vaatimuksista. Urakoitsijat voivat vastaavasti kertoa tilaajille mahdollisista muutoksista tai kehityksistä toiminta- ja toteutustavoissa tai

menetelmissä. Urakoitsijat voivat myös kertoa tilaajille millaisia tuotteita, menetelmiä ja palveluita heidän on mahdollista tarjota. Tämä on erityisen hyödyllistä silloin, kun tilaajalla ei ole tarkkaa tietoa siitä, millaisia ratkaisuja kyseessä olevaan hankintakohteeseen on tarjolla. Kun informaatio kulkee sujuvasti tilaajien ja urakoitsijoiden välillä, molempien osapuolten on mahdollista saada ajantasaista informaatio oman kohdealansa kehityksestä. (UUMA4 2022).

Perinteisesti tilaaja on esittänyt syvästabiloinnin hankinta-asiakirjoissa sideainereseptin (sideaineen laatu + määrä). Syvästabiloinnin sideaineiden ja menetelmän kehittämisen edistämiseksi tulisi siirtyä hankintamenettelyyn, jossa sideainereseptoinnista vastaisi urakoitsija. Urakoitsija myös vastaa sideainereseptinsä toimivuudesta. Vastuu sideainereseptoinnista ja stabiloinnin parametreista (muun muassa nousunopeus), lisää urakoitsijan vastuuta, mutta korostaa myös urakoitsijan osaamisen merkitystä ja motivoi menetelmän kehittämiseen. Osaaminen mahdollistaa sideainereseptien optimoinnin ja menetelmäkehitys tehostaa tuotantoa, jotka molemmat alentavat stabiloinnin tuotantokustannuksia ja aikaansaavat urakoitsijalle etua kilpailijoihinsa nähden. Vastuun lisääntyminen lisää luonnollisesti myös riskejä, joiden kantamisesta ja jakamisesta tulee myös keskustella markkinavuoropuhelussa. Mikäli vastuu on liiaksi urakoitsijalla, voi se vaikuttaa stabiloinnin kustannuksia lisäävästi.

Syvästabiloinnin hankintamenettelyiden muutokset edellyttävät vuoropuhelua tilaajien ja urakoitsijoiden välillä. Siirryttäessä hankintamalleihin, joissa urakoitsijoilla on enemmän vastuuta stabilointityön onnistumisesta, kaikki urakoitsijat eivät välttämättä ole siihen valmiita. Tilaajien taas on muutettava tottumuksiaan sekä menetelmiään syvästabiloinnin hankinnan suhteen. Koska syvästabiloinnin hankintamenettelyiden muutokset vaikuttavat kaikkiin alan toimijoihin, on suositeltavaa sisällyttää markkinavuoropuheluun mahdollisimman monia alan toimijoita. Vähähiilisyysluokitusten yhdistäminen hankintamenettelyihin koskee tilaajien ja urakoitsijoiden lisäksi myös sideaineen toimittajia. Näin ollen markkinavuoropuheluun tulee osallistua myös sideainevalmistajia. (UUMA4 2022). Markkinavuoropuhelut SSV-menetelmän jalkauttamiseksi syvästabiloinnin hankintaan on suunniteltu toteutettavaksi UUMA5-ohjelmassa 2024–2026.

Markkinavuoropuhelussa on huomioitava eri osapuolien erilaiset tavoitteet, motiivit ja tehtävät. Esimerkiksi tilaajan motiivina muuttaa syvästabiloinnin hankintaprosessia voi olla vähähiilisyystavoite, joka puolestaan kannustaa esimerkiksi SSV-luokituksen käyttämiseen ja vähähiilisten sideaineiden käytön yleistymiseen. (Suominen 2023). Urakoitsijan motiivi vähähiilisten sideaineiden käytölle voi olla taloudellinen. Pelkkä hinta valintaperusteena ei kuitenkaan kannusta valitsemaan ekologisinta vaihtoehtoa. On mahdollista antaa tarjouksille lisäpisteitä niiden ekologisuu den perusteella siten, että kustannuksiltaan korkeampi tarjous voi olla vertailuhinnaltaan alhaisin, mikäli sen ekologiset tekijät huomioidaan tarjouspyynnössä esitetysti. (Pokkinen 2023). Painottamalla ekologisia tekijöitä osana hankintamenettelyä

luodaan urakoitsijoille taloudellinen kannustin vähähiilisten sideaineiden käyttämiseen. Sideainetuottajien motiivi voi olla samankaltainen urakoitsijoiden motiivin kanssa. Vähähiilisten sideaineiden kehittäminen on kannattavaa, mikäli niille on markkinoita. Kehitettyjen sideaineiden tuotteistaminen sen sijaan helpottaa niiden käyttöä, sillä tällöin niille ei tarvitse hakea ympäristölupaa. Tuotteistamalla sideaineita sideainetuottajien on helpompi tarjota tuotteitaan käytettäväksi. (Suominen 2023).

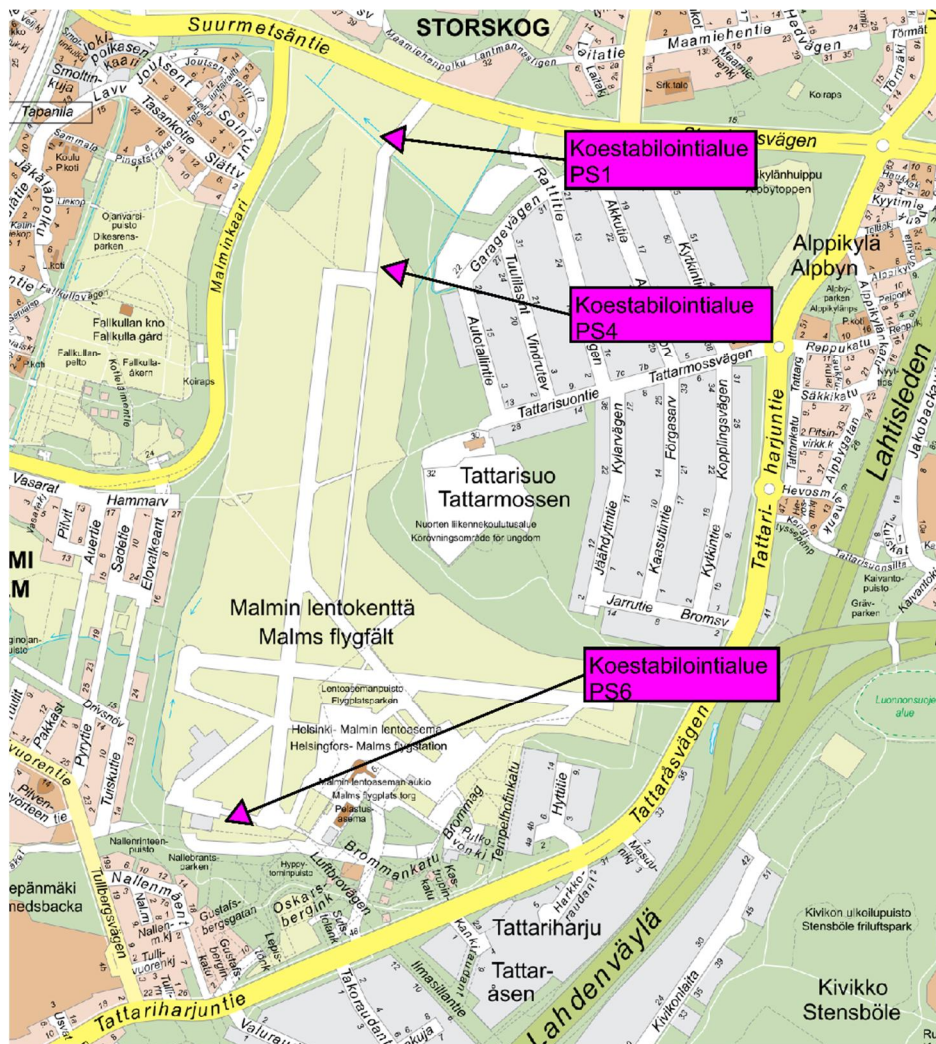
Hyvin järjestetyn markkinavuoropuhelun avulla on mahdollista löytää ratkaisu, jossa kaikkien osapuolien tavoitteet otetaan huomioon. Ottamalla huomioon kaikkien osapuolten tarpeet ja motiivit, toimijoiden on mahdollista kehittää omia toimintatapojaan, tuotteitaan ja menetelmiään siten, että kehitys tapahtuu kaikkien toimijoiden kannalta mahdollisessa ajassa. (KEINO 2021). Näin voidaan esimerkiksi varmistaa, että urakoitsijoilla on valmiudet vastata tilaajien vaatimukseen hankintamenettelyyn sekä toteutuksen kannalta. Lisäksi voidaan varmistaa sideainetoimittajien valmius vastata markkinoiden tarpeeseen esimerkiksi tuotantomäärien sekä saatavilla olevien tuotteiden osalta.

## 5 Malminkentän koestabilointi

### 5.1 Rakennuskohde

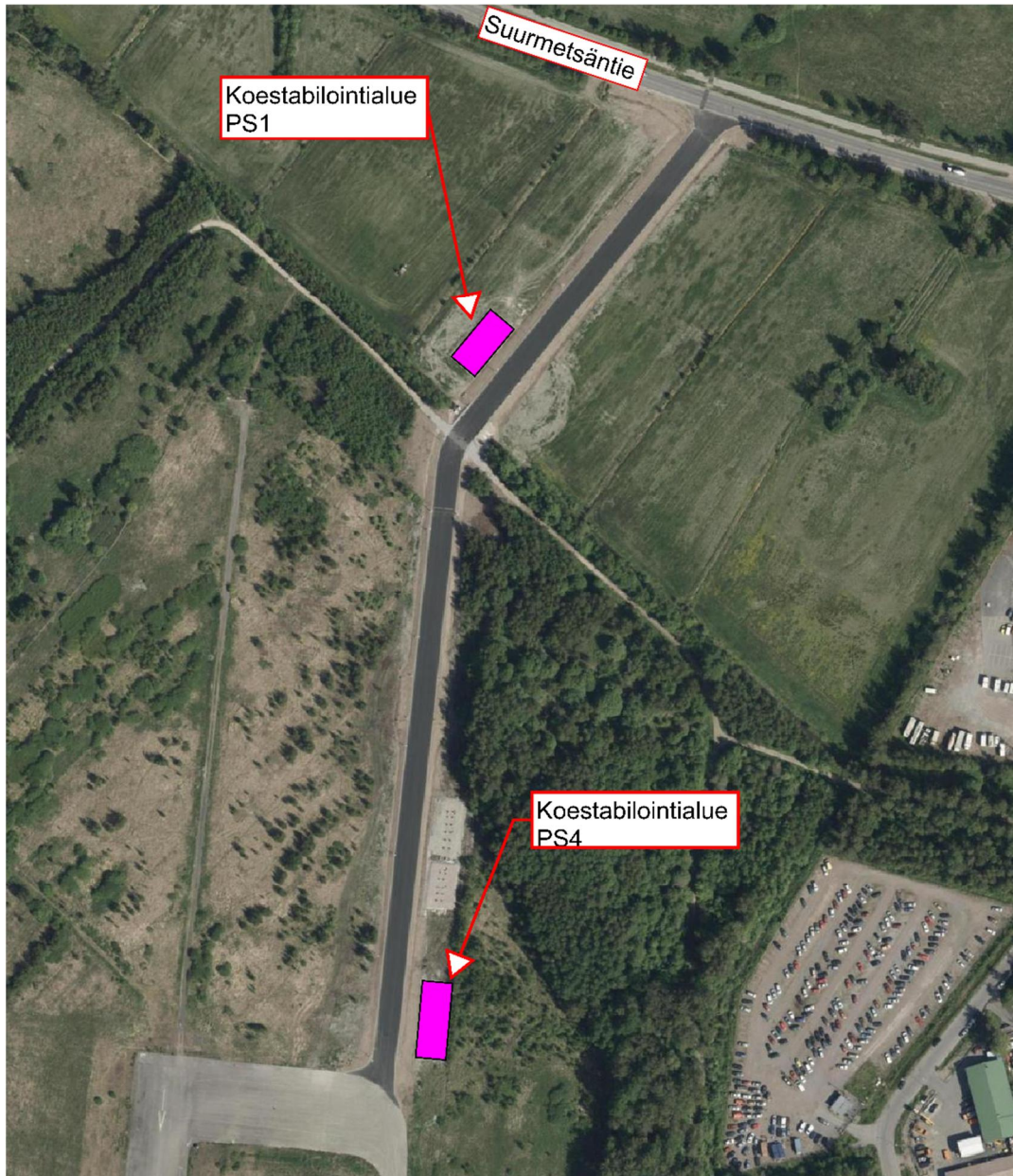
Malminkentän koestabilointialueet sijaitsevat Malminkentällä, joka sijaitsee Helsingissä Malmin kaupunginosassa. Koalueet on esitetty kartalla kuvassa 4 ja ilmaku-  
vissa 5 ja 6. Koestabilointialueiden PS1 ja PS4 eteläpuolella sijaitsee entinen  
kiitotie ja rullaustie. Koestabilointialue PS6 sijaitsee entisen kiitotien eteläpuolella.

Malmin entinen lentokenttä valmistui vuonna 1936. Lentokenttä on toiminut pääosin  
kotimaisessa yleisilmailukäytössä, sillä se todettiin kooltaan sekä kiitoteidensä  
rakenteen vuoksi riittämättömäksi kansainväliseen lentoliikenteeseen jo 1950-  
luvulla. (Arkkitehtitoimisto Freese Oy et. al. 2016). Lentoliikenne kentällä on  
loppunut vuonna 2021 (Mokkila 2021).



**Kuva 4** Koestabilointialueiden PS1, PS4 ja PS6 sijainti kartalla (Kuva: Helsingin karttapalvelu, [kartta.hel.fi](http://kartta.hel.fi))





**Kuva 5** Koealueet PS1 ja PS4 ilmakuvassa (korostettu) (Kuva: Helsingin karttapalvelu, kartta.hel.fi).



**Kuva 6 Koealue PS6 ilmakuvassa (korostettu) (Kuva: Helsingin karttapalvelu, kartta.hel.fi).**

## **5.2 Maaperätiedot**

Maaperä koealueella PS1 koostuu paksusta savikerroksesta, jonka alla on kerros silttiä, hiekkaa ja moreenia. Savikerroksen paksuus alueella vaihtelee noin välillä 7,5...8,9 m. Savikerroksen päällä on noin 0,7 m paksuinen kuivakuorikerros. Savikerroksen siipikairalla määritetty redusoimaton leikkauslujuus on alimmillaan alle 10 kPa. Savikerroksen alla olevan irtomaakerroksen paksuus vaihtelee noin välillä 4,4...7,2 m. Alkuperäinen maanpinta alueella on noin tasolla +15,2. Koestabilointialueen päälle on rakennettu noin metrin murskepenger (kuva 7). Alueen eteläpuolella sijaitsee Longinoja. Pohjaveden tasoa on mitattu koealueen läheisyydestä.



Pohjavedentason on mitattu olevan alimmillaan noin tasolla +14,2 ja ylimmillään noin tasolla +16,2. Pohjavesi on siis ajoittain paineellista.



**Kuva 7 Koealue PS1.2, jonka päällä on murskepenger (valokuva Otto Kaukoranta 19.6.2023).**

Koealueella PS4 maaperä koostuu paksusta savikerroksesta, jonka alla on silttiä, hiekkaa ja moreenia. Savikerroksen paksuus alueella vaihtelee noin välillä 12,0...13,0 m. Savikerroksen päällä on noin 0,7 m paksu kuivakuorikerros. Savikerroksen siipikairalla määritetty redusoimaton leikkauslujuus on alimmillaan alle 10 kPa. Savikerroksen alla olevan irtomaakerroksen paksuus vaihtelee noin välillä 5,0...7,6 m. Alkuperäinen maanpinta alueella on noin tasolla +15,3. Koestabilointialueen päälle on rakennettu alle metrin murskepenger. Kallionpinta alueella ei ole tiedossa. Alueen pohjoispuolella sijaitsee Longinoja. Pohjaveden tasoa on mitattu koealueen läheisyydestä. Pohjavedentason on mitattu olevan alimmillaan noin tasolla +15,0 ja ylimmillään noin tasolla +16,2. Pohjavesi on siis ajoittain arteesista.

Koealueella PS6 maaperä koostuu paksusta savikerroksesta, jonka alla on silttiä, hiekkaa ja moreenia. Savikerroksen paksuus alueella vaihtelee noin välillä 8,4...11,2 m. Savikerroksen päällä on noin 0,7 m paksu kuivakuorikerros. Savikerroksen siipikairalla määritetty redusoimaton leikkauslujuus on alimmillaan alle 10 kPa. Savikerroksen alla olevan irtomaakerroksen paksuus vaihtelee noin välillä 7,4...11,4 m kai-  
rausten päättymistason yläpuolella.

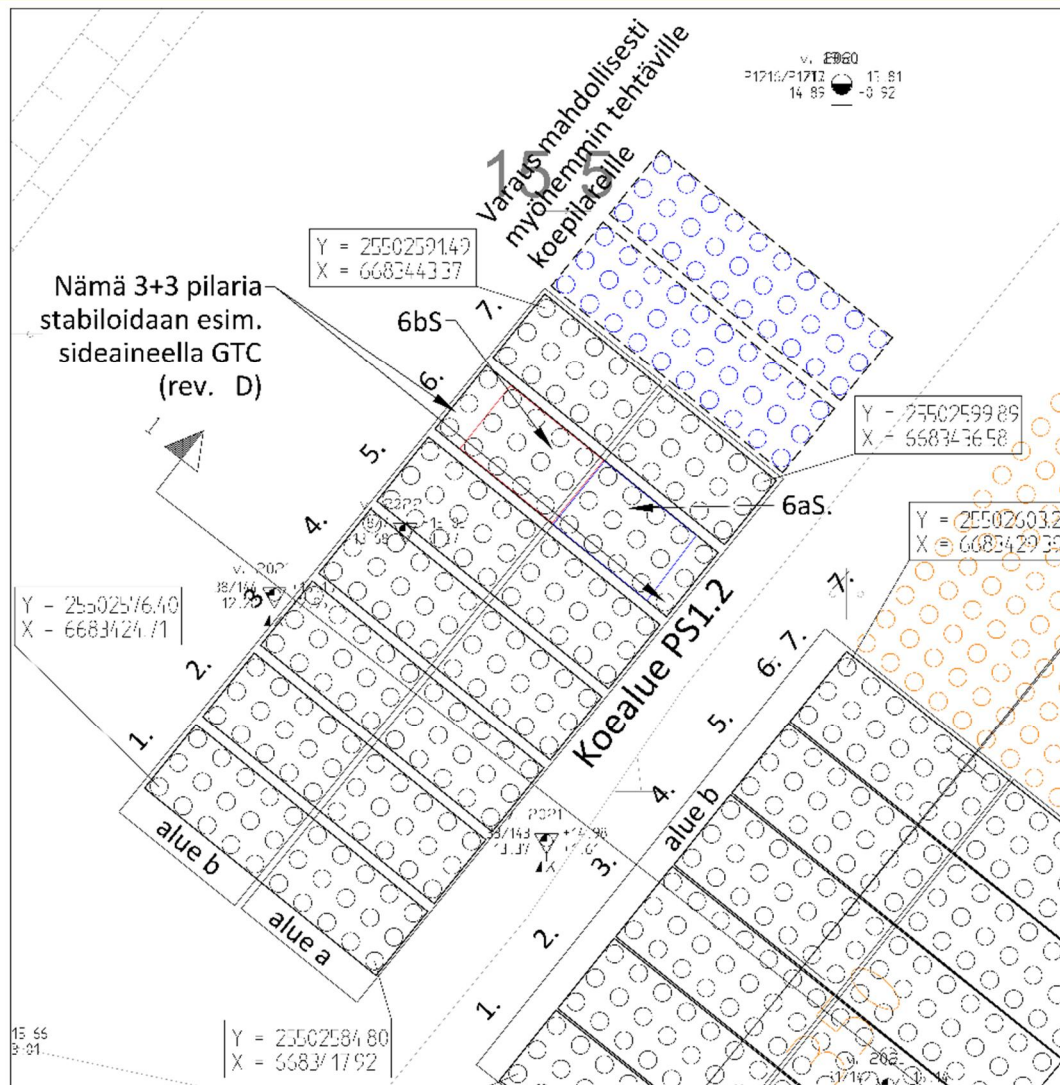
Alkuperäinen maanpinta alueella on noin tasolla +15,0. Kallionpinta alueella ei ole tiedossa. Pohjavedenpinta on lähellä maanpintaa.

### 5.3 Koestabilointi

Malminkentällä suoritettiin koestabilointeja syksyllä 2022. Stabilointikoerakenne toteutettiin seitsemällä eri sideaineelle ja kahdella eri sideainemäärällä. Sideaineet ja sideainemäärät on esitetty taulukossa 9. Käytetyt sideainemäärät muuttuvat eri syvyyksillä (”profiilipilarit”). Sideainemäärät on ilmoitettu eri syvyyksille maanpinnasta ja eri tasoille. Malminkentän alueen koestabilointi erilaisilla uusiosideaineilla suoritettiin kolmella eri koalueella. Näistä koalueet PS1 ja PS4 sijaitsevat alueen pohjoisosassa. Koalue PS6 sijaitsee alueen eteläosassa. (Ramboll Finland Oy 2022). Kuvassa 8 on esitetty kartta koestabilointialueesta PS1.2. Alue on jaettu lisäksi alueisiin a ja b. Alueella a käytetty pienempää sideainemäärää ja alueella b suurempaa.

**Taulukko 9 Malminkentän koestabilointiaineet ja sideainemäärät (Ramboll Finland Oy 2022). Sideainemäärä koalueille PS1, PS4 ja PS6 on esitetty taulukoissa 10–12.**

Alue	Valmistaja	Tuote	Sideainemäärä
1	Finnsementti	CEM III/B 42,5 L	pieni ja suuri
2	Nordkalk	Terra GTC3	pieni ja suuri
3	Nordkalk	Terra Green	pieni ja suuri
4	Nordkalk	Terra POZ	pieni ja suuri
5	UPM Jämsänkoski	LT+CEM II 7/3	pieni ja suuri
6	PVO Kaukaa	LT+CEM II 7/3	pieni ja suuri
7	Finnsementti	CEM III/A 52,5 L	pieni ja suuri



Kuva 8 Koealueen PS1.2 stabilointipilarit (Ramboll Finland Oy 2022).

## 5.4 Koestabiloinnin sideaineseokset

### Finnsementti CEM III/B 42,5L (KolmosBertta)

Finnsementin CEM III/B 42,5 L on CEM III-luokkaan kuuluva sementtilaatu, joka sisältää 65–80 % masuunikuonaa. Luku 42,5 sementtilaadun nimessä tarkoittaa sen minimipuristuslujuutta 28 vuorokauden kuluttua valusta. Tässä tapauksessa puristuslujuus on vähintään 42,5 MPa. (Finnsementti 2023). Koestabiloinnissa käytetty KolmosBertta on valmistettu Finnsementin Paraisten tehtaalla (UUMA4 2023b).

### Finnsementti CEM III/A 52,5 L (Kolmossementti)

Finnsementin CEM III/A 52,5 L on CEM III-luokkaan kuuluva sementtilaatu, joka sisältää 40–46 % masuunikuonaa. Finnsementin tuotenimi kyseiselle sementtilaadulle on Kolmossementti. Luku 52,5 sementtilaadun nimessä tarkoittaa sen minimipuristuslujuutta 28 vuorokauden kuluttua valusta. Tässä tapauksessa puristuslujuus on

vähintään 52,5 MPa. (Finnsementti 2023). Koestabiloinnissa käytetty Kolmossementti on valmistettu Finnsementin Paraisten tehtaalla (UUMA4 2023b).

#### Nordkalk Terra GTC

Nordkalk Terra GTC on kipsiä sisältävä kalkkisementti-pohjainen sideaine. GTC on tarkoitettu ongelmallisten maalajien stabilointiin. Tällaisia maalajeja ovat esimerkiksi liejut ja sulfidisavet. (Nordkalk 2023). GTC:ssä on käytetty vuodesta 2022 lähtien kolmossementtiä (Kuusipuro 2022). GTC:ssä 1/3 on sammutettua kalkkia, 1/3 kipsiä ja 1/3 sementtiä. (Kuusipuro 2023b). Koestabiloinnissa käytetty GTC on valmistettu Nordkalkin Lohjan Tytyrin tehtaalla (UUMA4 2023b).

#### Nordkalk Terra Green

Nordkalkin Terra Green on kalkkisementtiseos, jonka hiilijalanjälki on pienempi kuin tavallisen kalkkisementtiseoksen. Hiilijalanjäljen pienentäminen on toteutettu korvaamalla sideaineissa yleisesti käytetty poltettu kalkki kalkkiuunien sähkösuodinpölyllä. Terra Green soveltuu parhaiten helposti stabiloituvien savien vahvistukseen. (Nordkalk 2023). Koestabiloinnissa käytetty Green on valmistettu Nordkalkin Lohjan Tytyrin tehtaalla (UUMA4 2023b).

#### Nordkalk Terra POZ

Nordkalkin Terra POZ koostuu kalkkiuunin sähkösuodinpölystä ja masuunikuonaa sisältävästä sementistä. Seos on alun perin kehitetty 1990-luvulla, jolloin sen myyntivalttina oli edullinen hinta. Nykyään sideaineen vahvuutena on sen suuri sivutuotteiden käyttöprosentti. Riippuen käytetystä sementtilaadusta, kierrätysmateriaalien osuus vaihtelee noin välillä 40–45 %. (Nordkalk 2023). Koestabiloinnissa käytetty POZ on valmistettu Nordkalkin Lohjan Tytyrin tehtaalla (UUMA4 2023b).

#### UPM Jämsänkoski LT+CEM II 7/3

Tämä sideaine koostuu lentotuhkan ja CEMII-sementin seoksesta sekoitussuhteessa 70 % ja 30 %. Sideainereseptissä käytetty lentotuhka on peräisin UPM:n Jämsänkosken tehtaan voimalaitokselta. Noin 80 % tehtaan voimalaitoksen polttoaineista on biomassapohjaisia. (UPM Kymmene Oyj 2022).

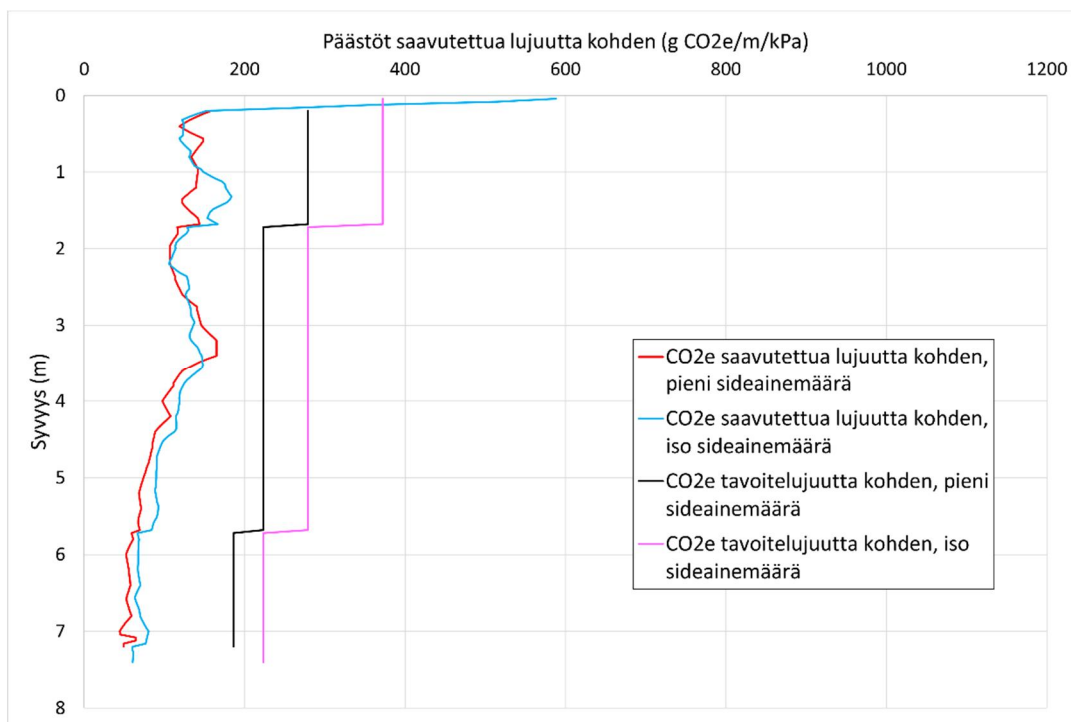
#### Kaukaan Voima LT+CEM II 7/3

Tämä sideaine koostuu lentotuhkan ja CEMII-sementin seoksesta sekoitussuhteessa 70 % ja 30 %. Sideainereseptissä käytetty lentotuhka on peräisin Kaukaan voiman voimalaitoksesta. Voimalaitoksella käytetään polttoaineena biopolttoaineita, kuten hakkuutähdettä ja turvetta. (Pohjolan voima Oyj 2024).

## **5.5 Malminkentän koestabiloinnin CO<sub>2</sub>e-tunnusluvut**

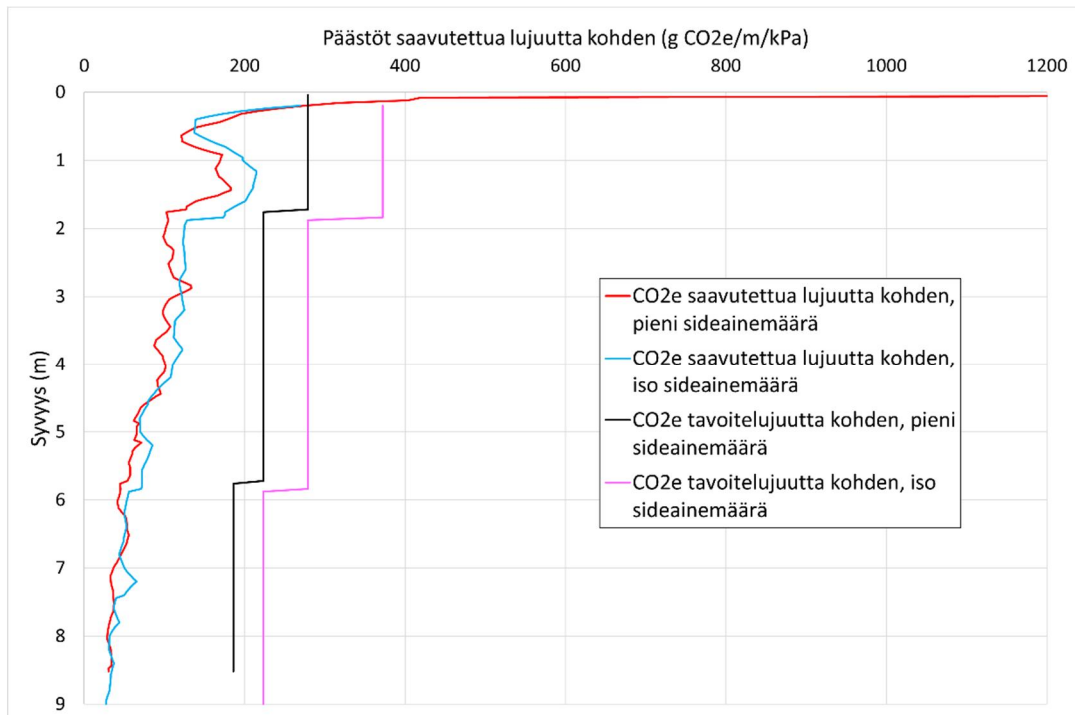
Malminkentän koealueen pilareille tehtiin laadunvalvontakairaukset 1, 3 ja 12 kuukauden ikäisinä. Laadunvalvontakairausten 3kk keskiarvoleikkauslujuustuloksia

käyttäen muodostetut ”hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden” -kuvaajat si-  
deaineelle GTC 90 päivän ikäisillä pilareilla kaikilta kolmelta koekentältä on esitetty  
kuvilla 9–11. Muut kuvaajat on esitetty liitteissä 1–6. Kuvaajat perustuvat keskiar-  
voleikkauslujuuskuvaajiin (Ikävalko 2023; Ramboll Finland Oy 2023). Päästöt lu-  
juutta kohden on laskettu keskiarvoleikkauslujuuksista käyttäen taulukossa 4 esitet-  
tyjä päästökertoimia (kaava 2). Lujuus päästöjä kohden -kuvaajat eri sideaineilla on  
koottu samaan kuvaan niiden vertailun helpottamiseksi. Esimerkkinä kuvissa 12–14  
on esitetty 12 kuukauden ikäisille pienellä sideainemäärällä stabiloiduille pilareille  
muodostetut kuvaajat. Laskennassa käytetyt sideainemäärät on esitetty taulukoissa  
10–12 .

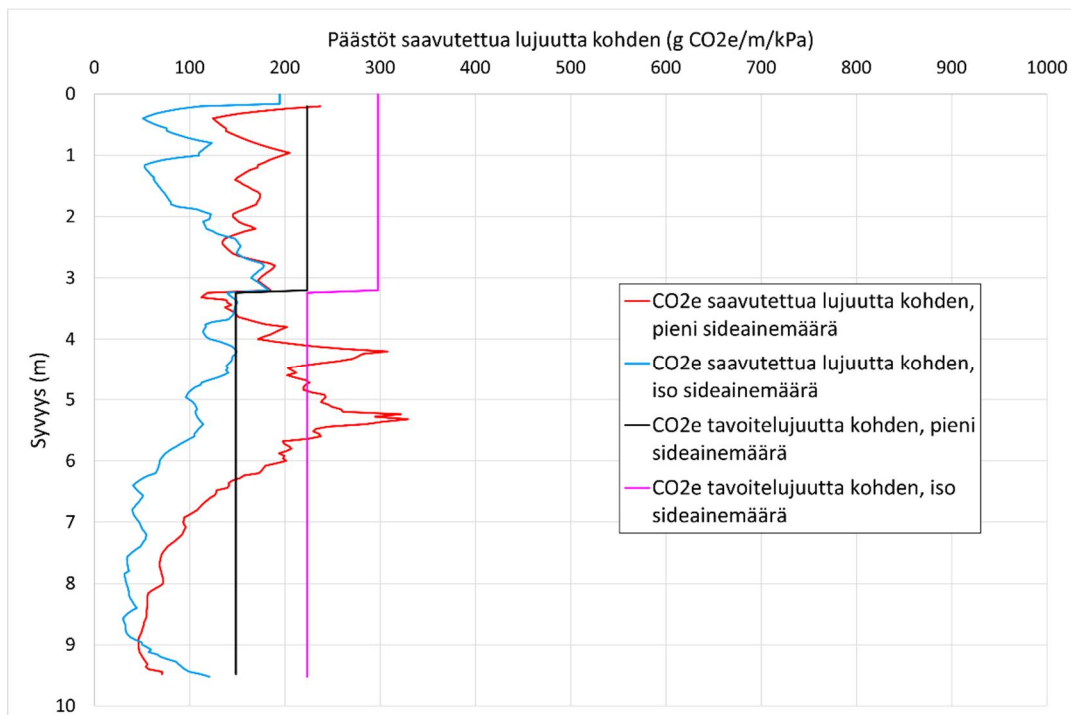


**Kuva 9 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GTC. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**





**Kuva 10 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GTC. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**



**Kuva 11 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GTC. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**

**Taulukko 10 Koealueella PS1 käytetyt sideainemäärät (kaikille sideaineille, pienemmän sideaineen koealue) (Ramboll Finland Oy 2022).**

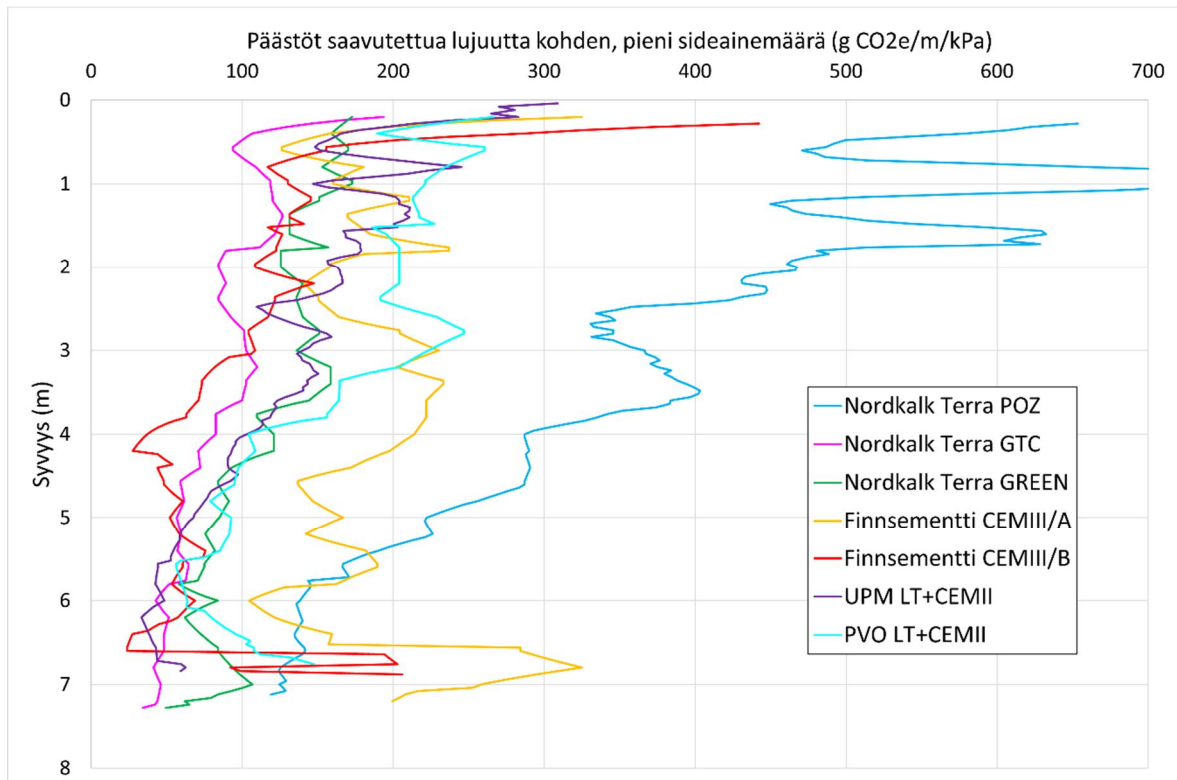
Syvyys (m) / taso	Sideainemäärä, pieni (kg/m <sup>3</sup> )	Sideainemäärä, iso (kg/m <sup>3</sup> )
0-1,7 / +14,7 - +13,0	150	200
1,7-5,7 / +13,0- +9,0	120	150
5,7- / +9,0 -	100	120

**Taulukko 11 koealueella PS4 käytetyt sideainemäärät (kaikilla sideaineilla, pienempi sideainemäärä) (Ramboll Finland Oy 2022).**

Syvyys (m) / taso	Sideainemäärä, pieni (kg/m <sup>3</sup> )	Sideainemäärä, iso (kg/m <sup>3</sup> )
0-1,8 / +14,8 - +13,0	150	200
1,8-5,8 / +13,0 - +9,0	120	150
5,8- / +9,0 -	100	120

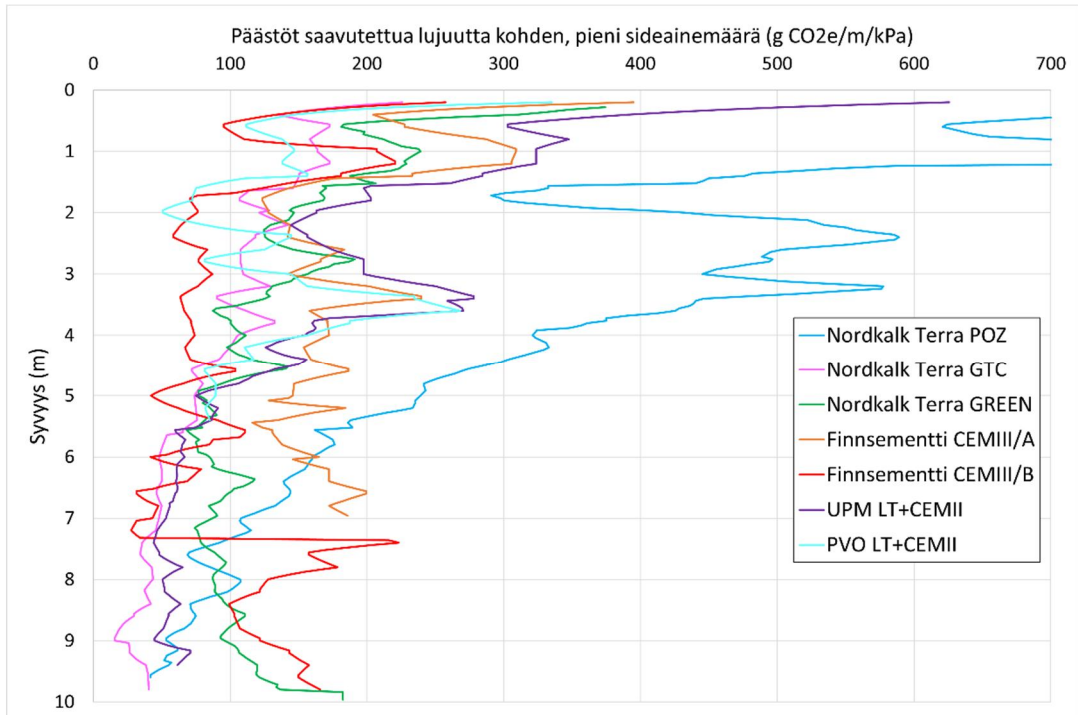
**Taulukko 12 koalueella PS6 käytetyt sideainemäärät (kaikilla sideaineilla, pienempi sideainemäärä) (Ramboll Finland Oy 2022).**

Syvyys (m) / taso	Sideainemäärä, pieni (kg/m <sup>3</sup> )	Sideainemäärä, iso (kg/m <sup>3</sup> )
0-3,2 / +14,7 - +11,5	120	160
3,2- / +11,5 -	80	120

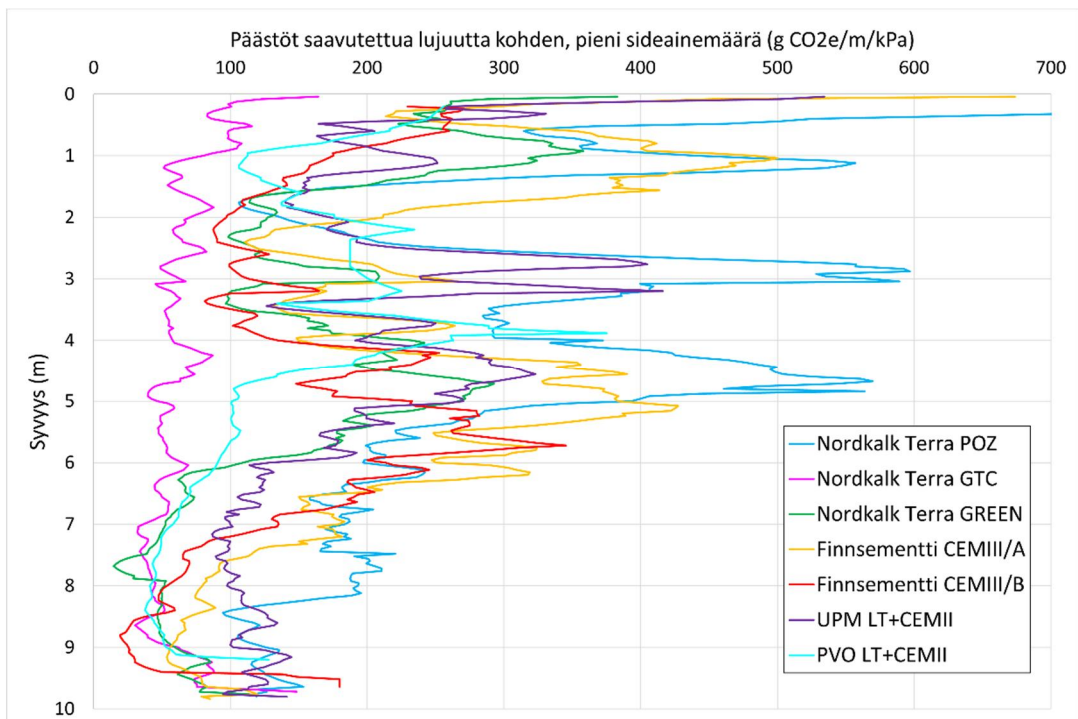


**Kuva 12 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, pieni sideainemäärä.**





**Kuva 13 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, pieni sideainemäärä.**



**Kuva 14 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, pieni sideainemäärä.**

Kuvista 9–11 havaitaan, että mikäli pilarin saavutettu lujuus ylittää mitoituslujuuden, ovat sen päästöt pienemmät kuin mitoituslujuutta kohden lasketut päästöt. Vertailukuvaajien (kuvat 12–14) perusteella voidaan myös havaita, että esimerkiksi CEMIII/A-sideaineen ja GTC-sideaineen päästöt saavutettua lujuutta kohtaan ovat melko lähellä toisiaan huolimatta siitä, että CEMIII/A:n päästökerroin on yli kaksinkertainen GTC:n päästökertoimeen verrattuna. Voidaan myös havaita, että POZ-sideainetta lukuun ottamatta kaikkien sideaineiden päästöt lujuutta kohtaan vastaavat melko hyvin toisiaan. Tästä voidaan päätellä, että suuremman päästökertoimen omaavat sideaineet voivat tuottaa suurempia lujuuksia ja siten tuottaa vastaavia päästöarvoja lujuutta kohden.

Vertailukuvaajien perusteella voidaan havaita, että POZ-sideaine on tuottanut muita sideaineita huomattavasti suurempia päästöarvoja suhteessa saavutettuun lujuuteen. Tämän voidaan olettaa johtuvan pääosin sideaineen muita suuremmasta päästökertoimesta, sillä sen saavuttamat lujuudet eivät ole muita sideaineita matalampia. Tämä voidaan päätellä saavuttujen lujuuksien kuvaajan erosta tavoitelujuuden kuvaajaan. Merkittävä ero saavutettujen lujuuksien ja tavoitelujuuksien kuvaajien välillä kertoo, että saavutetut lujuudet ovat merkittävästi suurempia kuin tavoitelujuus.

Kuten liitteistä 1–4 sekä kuvista 12 ja 13 voidaan havaita, tulokset koekentiltä PS1 ja PS4 vastaavat hyvin toisiaan. Koekentällä PS6 (kuva 14) hajonta sideaineiden välillä on suurempaa, mutta sideaineiden tuottamien kuvaajien järjestys suurimmista päästöistä pienimpiin on melko samankaltaista, eli sideaine POZ on tuottanut suurimpia päästöjä lujuutta kohden.

## 6 Stabilointipilarien ylös nosto

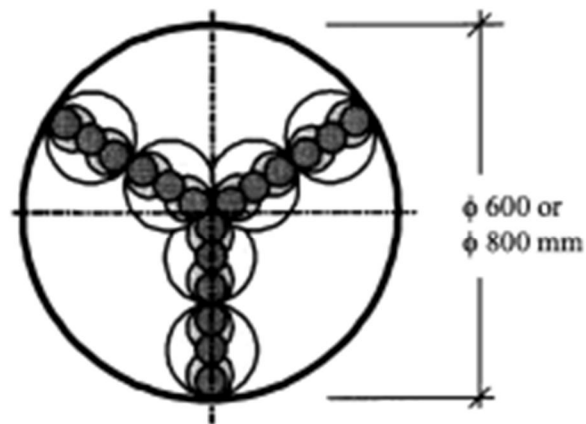
### 6.1 Aiemmat kokemukset

Stabilointipilarien ominaisuuksien tutkimiseksi pilareita voidaan nostaa ylös maasta. Pilareiden ylösnostoja on tehty useissa eri tutkimuksissa eri maissa. Näitä tutkimuksia ovat esimerkiksi KT40 koepilarikenttä (Heikkilä 1991), Teknillisen korkeakoulun syvästabilointitutkimus (Aalto 2002), Stefan Larssonin väitöstyö (2003) Arabianrannan Salpaseinän stabilointiurakat 2000–2005 (Lahdenperä 2015) ja Kuninkaantammi (Nguyen 2021).

Pilarien ylösnosto voidaan suorittaa joko koko pilarin pituudelle tai pilarin yläosalle. Mikäli pilarista nostetaan vain muutaman metrin pituinen osa tai jos pilari on lyhyt, nosto voidaan suorittaa kaivinkoneella tai lyhyellä pilarin ympärille painettavalla teräsputkella. Nostettavan pilarin pituuden kasvaessa myös nostamisen työläys ja kustannukset nousevat. Esimerkiksi 10 metriä pitkän pilarin nostaminen ylös maasta on kallis ja työläs prosessi pilarin sekä nostokaluston suuren massan ja tarvittavan laitteiston vuoksi. (Liikennevirasto 2018). Pilareiden nosto voidaan suorittaa erilaisilla laitteilla. Arabianrannassa ja Arbogassa suoritettussa pilarien nostoissa käytettiin halkaistavaa nostoputkea (Lahdenperä 2015; Larsson 2003, kuva 15). Arbogassa pilareista näytteenotto suoritettiin kolmeen eri suuntaan keskikohdasta lähtien (Kuva 16) tavoitteena tutkia sideaineen sekoittumisen laadun muutoksia pilarin sisällä.



**Kuva 15 Arboga, Ruotsi. Pilarin nosto halkaistavalla nostoputkella (Larsson 2003).**



Column section on A-A

**Kuva 16 Arboga, Ruotsi. Näytteenottokaavio pilaripoikkileikkauksesta (Larsson 2003).**

Osana Teknillisen korkeakoulun syvästabilointitutkimuksen 3:ta vaihetta 20 stabilointipilaria nostettiin maasta Espoossa Vanttilan koestabilointialueella. Pilarit nostettiin käyttämällä kaivinkonetta ja hieman pilarin halkaisijaa suurempaa teräsputkea. Pilarien nosto aloitettiin kaivamalla pilarien yläpää esiin. Kun pilarin yläpää saatiin näkyviin, teräsputki painettiin maahan pilarin ympärillä kaivinkoneen avulla. Lopulta kaivinkoneen kauha upotettiin putken alapään alle ja pilari nostettiin putken mukana maasta. Nostoprosessin vaiheita on esitetty kuvassa 17.

Kuninkaantammen koestabilointialueella nostettiin kuusi pilaria (Nguyen 2021). Pilarit nostettiin kaivinkoneella 0,5–1,0 metrin kokoisina osina noin kolmen metrin syvyyteen asti.

a)



b)



c)



d)



**Kuva 17 Vanttila. a) Pilarin yläpään esiin kaivuu. b) Putken upottaminen pilarin ympärille. c) Putken nostaminen kaivinkoneella. d) Ylös nostettu putki ja pilari. (Aalto 2002).**

## 6.2 Pilarien nosto, Malminkenttä

Pilarien ylösnosto suoritettiin aikavälillä 4.9.2023-12.10.2023. Viisi eri sideaineilla stabiloitua pilaria nostettiin käyttäen teräsputkea: CEMIII/B, Kaukaan voima LT+CEMII, Terra GTC, Terra GREEN ja Terra POZ. Putken sisähalkaisija oli 810 mm, seinämäpaksuus 14,2 mm ja pituus 2,5 m (kuva 18). Putken yläpähän oli kiinnitetty nostokoukut nostokettinkiä varten putken liikuttamista ja paikallalleen asetelua varten. Putki oli teroitettu alaosasta sen maahan upottamisen helpottamiseksi. Kaksi muuta pilari nostettiin käyttäen kaivinkonetta: CEMIII/A ja UPM LT+CEMII. Näistä pilareista nostettiin ylin 1,5 metriä. (Forsman et al. 2024).





**Kuva 18 Nostossa käytetty alapäästään teroitettu teräsputki. (valokuva Otto Kaukoranta 4.9.2023).**

Nostaminen aloitettiin kaivamalla pilarin yläosa esiin tasoille +14,3 (CEMIII/B) ja +14,2 (Kaukaan voima LT+CEMII, Terra GREEN, Terra POZ ja Terra GTC). Kun pilarin yläosa saatiin näkyviin, tehtiin pilarin yläpäähän penetrometrikokeet, XREF-mittaus, pH-mittaus ja redox-mittaus. Lisäksi pilarin ympärillä olevaa maata tutkittiin sideaineen diffuntoitumisen eli sideaineen pilarin ulkopuolelle mahdollisesti leviämisen selvittämiseksi. (Forsman et al. 2024).

Leikkaustason tutkimusten jälkeen teräsputki asetettiin pilarin ympärille ja upotettiin kaivinkoneen avulla. Kun putki oli saatu asennettua maahan, pilarin viereistä maata kaivettiin, kunnes pilarin alaosa saatiin näkyviin. Seuraavaksi putkessa oleva pilari kaadettiin ja nostettiin vaakatasossa. Pilarit poistettiin putkesta koealueen läheisyyteen asetettujen kevytpeitteiden päälle tutkimuksia varten (Kuva 19). (Forsman et al. 2024).





**Kuva 19 a) Esiin kaivettu pilarin yläpää. b) Putken upotus maahan. c) Esiin kaivettu putki. d) Putken nosto maasta. (valokuvat Otto Kaukoranta 4.9.-7.9.2023).**

### **6.3 Tutkitut pilarit**

Kaikki nostetut pilarit katkesivat pätkiin, kun ne poistettiin putkesta. Lujemmat pilarit säilyivät suurempina kappaleina kuin pehmeämmät pilarit. Kaikki pilarit säilyivät kyllin suurina kappaleina, jotta niille voitiin suorittaa kenttätutkimukset leikkauspinoille (Kuva 20). Leikkauspinoille eli pinnoille, joista pilari katkesi putkesta poistettaessa, suoritettiin samoja tutkimuksia kuin pilarien esiin kaivetuille yläpäille (penetrometri, pH, redox, XREF). Lisäksi pilareista otettiin näytteitä



laboratoriotutkimuksia varten. Näytteenotto suoritettiin käyttäen 120 mm timantti-poraa CEMIII/B, CEMIII/A ja UPM LT+CEMII-pilareille. Muista pilareista näytteet otettiin käyttäen 51 mm teräsputkia. (Forsman et al. 2024).



**Kuva 20 Nostetut pilarit: a) CEMIII/B, b) Kaukaan voima LT+CEMII, c) Terra GREEN, d) Terra POZ , e) Terra GTC, f) CEMIII/A ja g) UPM LT+CEMII. (valokuvat Otto Kaukoranta 4.9.-12.10.2023).**



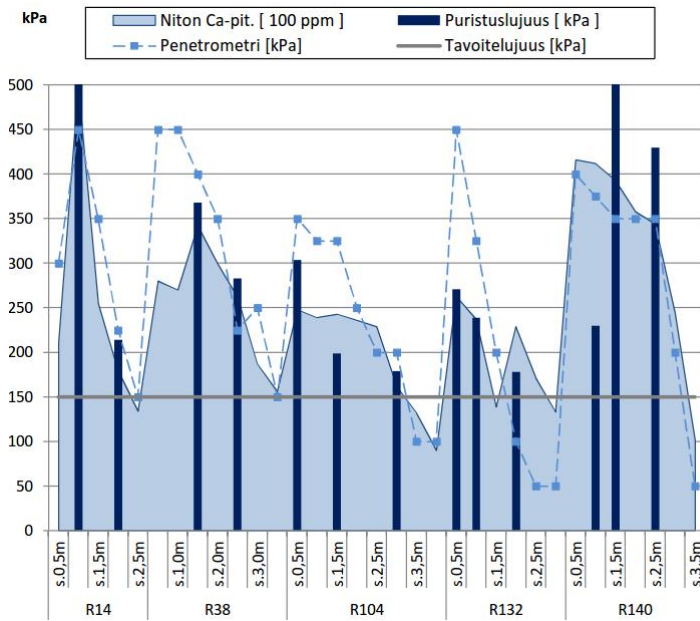
## 6.4 Nostetuille pilareille suoritettut tutkimukset

Sideaineen sekoittumista pilarin poikkileikkauksessa voidaan tutkia ylös nostettuna tarkemmin kuin tutkimalla pilareita maan pinnalta käsin. Nostettujen pilareiden poikkileikkauksille voidaan tehdä erilaisia kokeita niiden laadun selvittämiseksi. Voidaan tehdä esimerkiksi penetrometrikokeita, visuaalista tarkastelua sekä erilaisia laboratoriossa suoritettavia kokeita. (Larsson 2003).

Penetrometrikokeiden avulla voidaan tutkia suhteellisen lujuuden muutoksia pilarin poikkileikkauksessa. Mittaria painetaan mitattavaan kohteeseen ja mittarin asteikko kertoo, kuinka paljon mittarissa oleva jousi puristuu. Seuraamalla muutoksia jousen kokoonpuristumassa nähdään pilarin lujuuden muutoksia eri kohdissa pilaria. Näin voidaan havaita esimerkiksi heikkousvyöhykkeitä pilarissa. (Nguyen 2021). Xiongin (2019) diplomityössä penetrometrimittauksia kokeiltiin stabiloitavuuskoeäytteen lujuuden arviointiin. Kokeita tehtäessä näytteet hajosivat helposti ja laboratoriotutkimuksena havaittiin kartiokoe penetrometrikoetta soveliaammaksi. Kokkolan satamassa massastabiloidun ruoppausmassan lujuuden tutkimiseen penetrometri havaittiin soveliaaksi menetelmäksi, kun kokeet tehtiin koekuopan seinämään. Tuloksia verrattiin koekuopasta otettujen näytteiden 1-aksiaalisiin puristuskoetuloksiin ja viereen tehtyjen pilarikairausten leikkauslujuusdiagrammeihin (kuva 21). Eri menetelmillä tehtyjen kokeiden tuloksilla havaittiin selvä korrelaatio keskenään. (Forsman et al. 2012).

Malminkentällä nostetuille pilareille tehtyjen penetrometrikokeiden tulokset on esitetty liitteessä 7. Esimerkkinä penetrometritulokset sideaineelle CEMIII/B tasoväliä +13,5-+12,3 on esitetty kuvassa 22. Kuvaajista on havaittavissa, että erityisesti CEMII/A ja CEMIII/B -pilareilla saavutettiin useimmissa mittauspisteissä penetrometrin kärkivastuksen maksimiarvo (600 kPa). Larsson et al. (2005) ovat havainneet, että käsikäyttöinen penetrometri ei ole luotettava yli 200 kPa leikkauslujuuden pilareilla, koska tätä suuremmilla lujuuksilla murtumistapa on epävarma stabiloidun maan ollessa haurasta. Kärkivastuksen arvo ei tällöin välttämättä kuvaa pilarin todellista lujuutta.

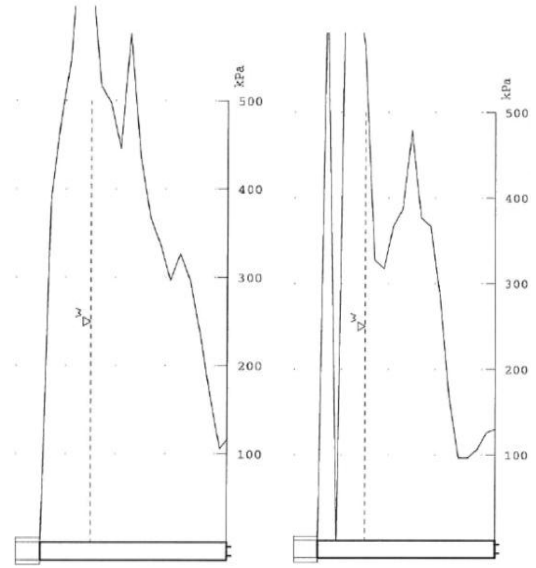
Ruudut 14, 38, 104, 132 ja 140



a)

Ruutu 38

Ruutu 132

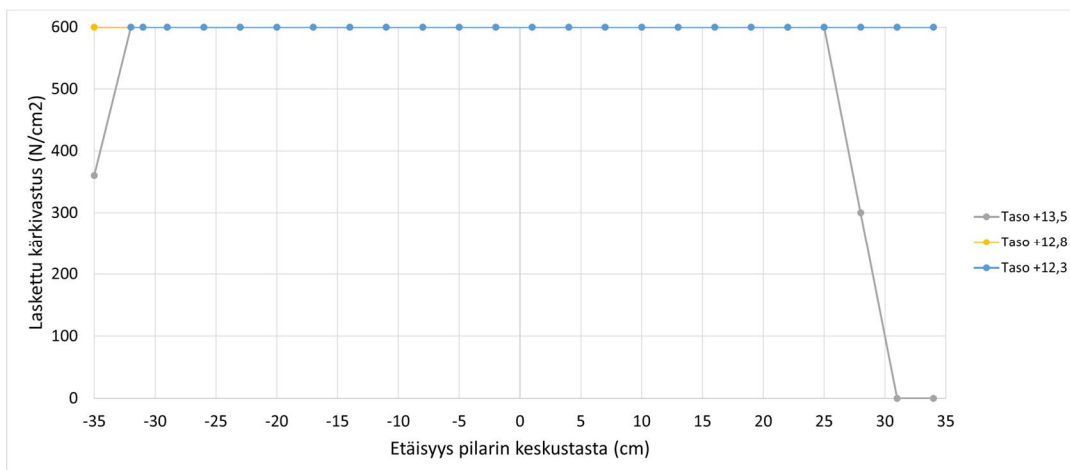


R38

R132

b)

**Kuva 21 Kokkolan satama. Massastabiloitu ruoppausmassa. a) Koekuopan seinämään tehtyjen penetrometrikokeiden ja koekuopasta otetuilla näytteillä laboratoriossa tehtyjen kokeiden tuloksia (1-aks. puristuskoe, XRF). Vasemmanpuoleisella y-akselilla puristuslujuus [kPa] b) Pilarikairaukset ruutuihin 38 ja 132, x-akselilla syvyys (0 - n. 3 m) ja y-akselilla leikkauslujuus [kPa].**



**Kuva 22 Malminkenttä. Penetrometritulokset (mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti 600 N/cm<sup>2</sup>). Sideaine CEMIII/B. Taso +13,5-+12,3.**

## 7 SSV-menettelyn testaaminen kahdessa Malminkentän kohteessa

SSV-luokituksen tavoitteena on vähentää pilaristabiloinnista syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Päästövähennyksen toteutumisen esittämiseksi tehtiin kaksi kohdetarkastelua: Helsingin Tattariharjunttiellä ja Helsingin Malminkentällä. SSV-menettelyn toimivuutta ja sen tuottamia hiilidioksidipäästövähennyksiä tarkasteltiin molemmissa esimerkkikohteissa. Malminkentän kohdetarkastelussa tarkasteltiin lisäksi SPV-luokituksen käyttöä ja sen tuottamia hiilidioksidipäästövähennyksiä.

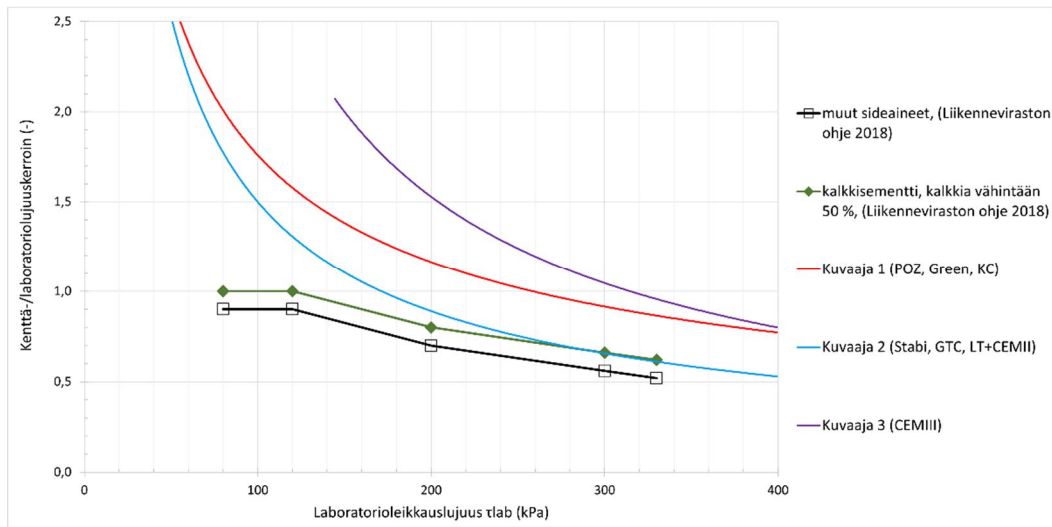
### 7.1 Kohdetarkastelu, Tattariharjuntie

Tattariharjuntie sijaitsee Malmin entisen lentokentän eteläpuolelle suunnittelulla Nallenrinteen asuinalueella (kuva 6). Osa saneerattavasta tiestä on suunniteltu perustettavaksi stabiloidulla pohjalle (urakka alkanee keväällä 2024). Työselostuksen mukaan sideaineena käytetään Nordkalk Terra GTC:tä sideainemäärällä  $120 \text{ kg/m}^3$ . Pilarikoko on 700 mm. Pilareiden tavoitelujuus on 100 kPa. Tattariharjuntien stabilointia varten on suoritettu stabiloitavuuskokeita, joiden tulokset on esitetty taulukossa 13. Tässä on tehty tarkastelu stabiloinnin sideaineen laadun ja määrän vaikutuksista hiilidioksidipäästöihin. Tarkastelu on teoreettinen ja se perustuu täysin siihen, mitä on arvioitavissa yhdestä pisteestä tehtyjen stabiloitavuuskokeiden tulosten perusteella. Erityisesti saneerauskohteissa voi olla tekijöitä (esimerkiksi aikataulu tai liikennejärjestelyt), joiden vuoksi optimaalinen sideainemäärä ei ole toimiva ratkaisu. Tällaisia mahdollisia tekijöitä ei ole huomioitu tässä tarkastelussa.

Taulukossa 13 on esitetty kohteen savinäytteille tehtyjen stabiloitavuuskokeiden tuloksia. Kokeet on tehty sideaineilla Nordkalk Terra GTC ja Ecolan InfraStabi80. Stabiloitavuuskoetulosten redusointi on esitetty Liikenneviraston ohjeessa (2018). Kuvan 23 nomogrammissa on esitetty Liikenneviraston ohjeessa esitetyt kuvaajat, jotka on laadittu 90-luvulla. Niiden lisäksi kuvaan on täydennetty 2023 laaditut kuvaajat (Ikävalko 2023). Uusien kuvaajien tietoja hyödynnetään seuraavassa Väyläviraston Stabilointiohjeen päivityksessä (ohjeeseen lisäämisen yhteydessä kuvaajia todennäköisesti vielä muokataan). Taulukon 13 redusoitujen arvojen perusteella kaikki sideaineet stabiloitavuuskokeissa käytetyillä sideainemäärillä täyttävät tavoitelujuusvaatimuksen.

**Taulukko 13 Tattariharjuntie, stabilointikoetulokset. (Stara, Katu- ja maalaboratorio 2022). Sarakkeisiin 5 ja 6 on lisätty 90d lujittumisajan puristuslujuustulosten redusointi kenttä-/laboratoriolujuuskertoimella.**

Määrä [kg/m <sup>3</sup> ]	Syvyys [m]	Leikkauslujuus [kPa], 28d	Leikkauslujuus [kPa], 90d	Liikenneviraston ohjeen (2018) mukaisesti määritetty kenttä-/laboratorio-kerroin (Kuva 20)	Leikkauslujuus [kPa], 90d redusoitu
Nordkalk Terra GTC					
80	4	245	294	0,66	194
100	4	333	406	0,52	211
120	4	388	464	0,47	218
80	8	250	270	0,71	192
100	8	324	378	0,55	208
120	8	330	472	0,46	217
Ecolan InfraStabi80					
100	4	213	272	0,7	190
100	8	218	602	0,45	271



**Kuva 23 Liikenneviraston ohjeen (2018) Kenttä-/laboratoriolujuuskertoimen määrittäminen täydennettynä Ikävalkon (2023) määrittämällä kuvaajilla.**

Esimerkkilaskelmassa oletetaan, että halkaisijaltaan 700 mm pilareita tulisi yhteensä 100 000 m-pilari. Tällä pilarimäärällä muodostuvat stabiloinnin kokonaishiilidioksidipäästöt on esitetty taulukossa 14. Sideaineen GTC päästökerroin ilman työmaalle kuljetusta on 0,186 kgCO<sub>2</sub>e/kg. Tässä esimerkissä kuljetuksen päästön on oletettu olevan noin 0,01 kgCO<sub>2</sub>e/kg. Näin ollen kokonaispäästökerroin on 0,196 kgCO<sub>2</sub>e/kg. Työselostuksen mukaan käytettävä sideainemäärä on 120 kg/m<sup>3</sup>, joten kokonaispäästöt ovat 905 155 kgCO<sub>2</sub>e kun pilarimetrejä on 100 000.

Stabiloitavuustulosten perusteella työ olisi mahdollista toteuttaa sideainemäärällä 80 kg/m<sup>3</sup> (GTC), jolloin redusoitu lujuus olisi välillä 192–194 kPa (suunnitelmassa tavoiteleikkauslujuus 100 kPa). Taulukossa 14 esitettyjen tulosten perusteella näin saavutettava päästövähennys olisi 301 718 kgCO<sub>2</sub>e, eli noin 33 %. Taulukossa 13 esitettyjen stabiloitavuuskoetulosten perusteella tavoitelujuus olisi saavutettavissa myös sideaineella Ecolan InfraStabi80 sideainemäärällä 100 kg/m<sup>3</sup>. InfraStabi80 päästökerroin on 0,151 kgCO<sub>2</sub>e/kg (Nguyen 2021). Kuljetuksen päästöt mukaan lukien sen kokonaispäästökerroin olisi 0,161 kgCO<sub>2</sub>e/kg. Päästövähennys olisi 285 555 kgCO<sub>2</sub>e, eli noin 32 %.

Edellä esitettyjä GTC:n hiilidioksidipäästöjä voidaan verrata ”perinteisen” sideainevalinnan eli kalkkisementtiratkaisun (KC50) päästöihin. KC50 hiilidioksidipäästöt sideainemäärällä 120 kg/m<sup>3</sup> ovat noin 3 980 000 kgCO<sub>2</sub>e. Samalla sideainemäärällä GTC:n päästöt olisivat noin 77 % pienemmät ja optimoidulla sideainemäärällä noin 85 % pienemmät. Tehdyillä tarkasteluilla havaitaan, että sideaineen ja sideaineen määrän valinnalla ja optimoinnilla voidaan vaikuttaa huomattavasti stabiloinnista syntyviin päästöihin.

**Taulukko 14 Tattariharjuntie, kokonaispäästöt, esimerkkilaskelma.**

Sideaine	Määrä [kg/m <sup>3</sup> ]	Päästökerroin	Kokonaispäästöt [kgCO <sub>2</sub> e]
Nordkalk Terra GTC	80	0,186+0,01	603 437
Nordkalk Terra GTC	100	0,186+0,01	754 296
Nordkalk Terra GTC	120	0,186+0,01	905 155
Ecolan InfraStabi80	100	0,151+0,01	619 600
Kalkkimentti KC50	120	0,844+0,01	3 980 000

Molempien tarkasteltujen sideaineiden SSV-luokaksi määräytyy SSV.2 (<0,20 kgCO<sub>2</sub>e/kg) (UUMA4 2023), joten kohteeseen olisi valikoitunut teoreettisen tarkastelun perusteella arvioituna toimiva sideaineresepti asettamalla sideaineen hiilidioksidipäästöjen maksimi luokaksi SSV.2. Mikäli kuljetuksen päästöt kaksikertaistuisivat esimerkiksi pitemmän kuljetusmatkan takia, sideaine InfraStabi80 kuuluisi luokkaan SSV.2 ja GTC luokkaan SSV.3. Valitsemalla päästöluokaksi SSV.9 olisi voitu päätyä moninkertaisiin hiilidioksidipäästöihin.

## 7.2 Kohdetarkastelu, Malminkenttä, pohjoinen ajoyhteys

### Kohteen esittely

Malminkentän pohjoinen ajoyhteys yhdistää Suurmetsäntien kiitoradan pohjoispäähän. Ajoyhteys kulkee koestabilointialueen PS1.2:n itäpuolelta (kuva 26). Ajoyhteyden ja koealueiden pilaristabilointi on toteutettu 08-11/2022. (Destia Oy 2022b).

Koealue PS1.1 koealueen PS1.2 itäpuolella on osa tilapäisen ajoyhteyden pohjanvahvistusta. Alueen PS1.1 stabilointi on toteutettu käyttäen samoja sideaineita kuin

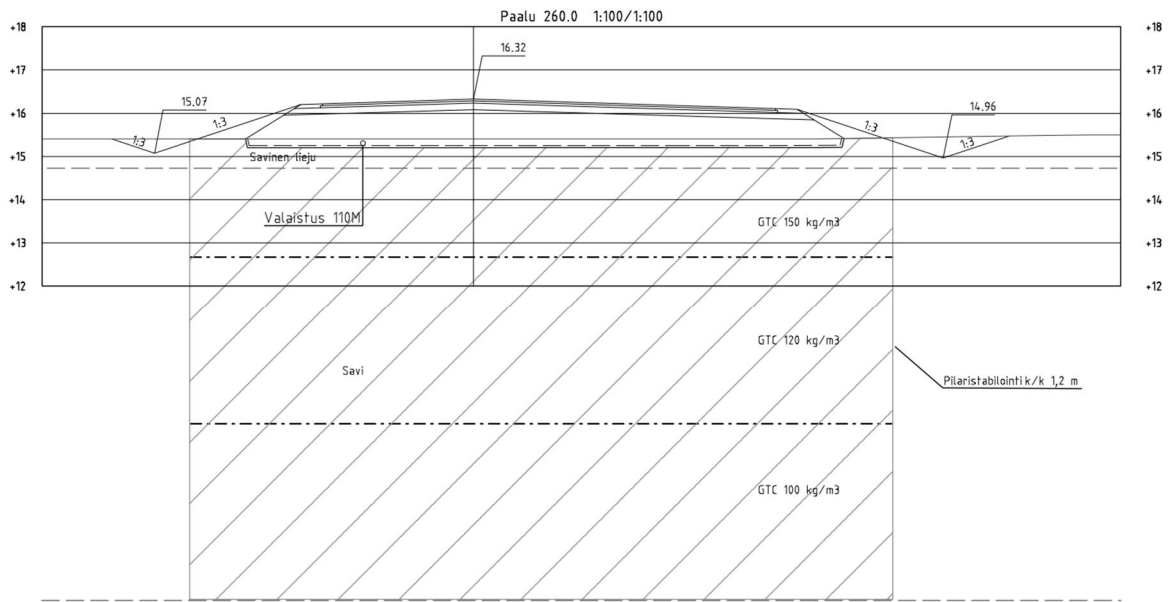
koekentällä PS1.2. Lisäksi ajoyhteyden pohjanvahvistuksena on koekenttä PS2 sekä Longinojan ylittävän rumpurakenteen puupaalutus. Kuvassa 24 on esitetty poikkeileikkaus paaluluvulta 260 ja kuvassa 25 pituusleikkaus Longinojan pohjoispuolelta tieosuudelta.

Koerulettä PS1.1 lukuun ottamatta stabilointityö on tehty käyttäen sideainetta Nordkalk Terra GTC. Pilarikoko on 700 mm. Suunnitelman mukainen kokonaispilarimäärä on 60 400 m (Destia Oy 2022a). Pilarit ovat profiilipilareita, joissa on kolme sideainemäärää taulukon 15 ja kuvan 24 mukaisesti. Ylimmässä savikerroksessa sideainemäärä vaihtuu ”sideainemäärien muutoslinjalla”, joka on esitetty kuvassa 26. Työselostuksessa esitetty stabilointipilareiden tavoitelujuus on 110 kPa. (Destia Oy 2022b).

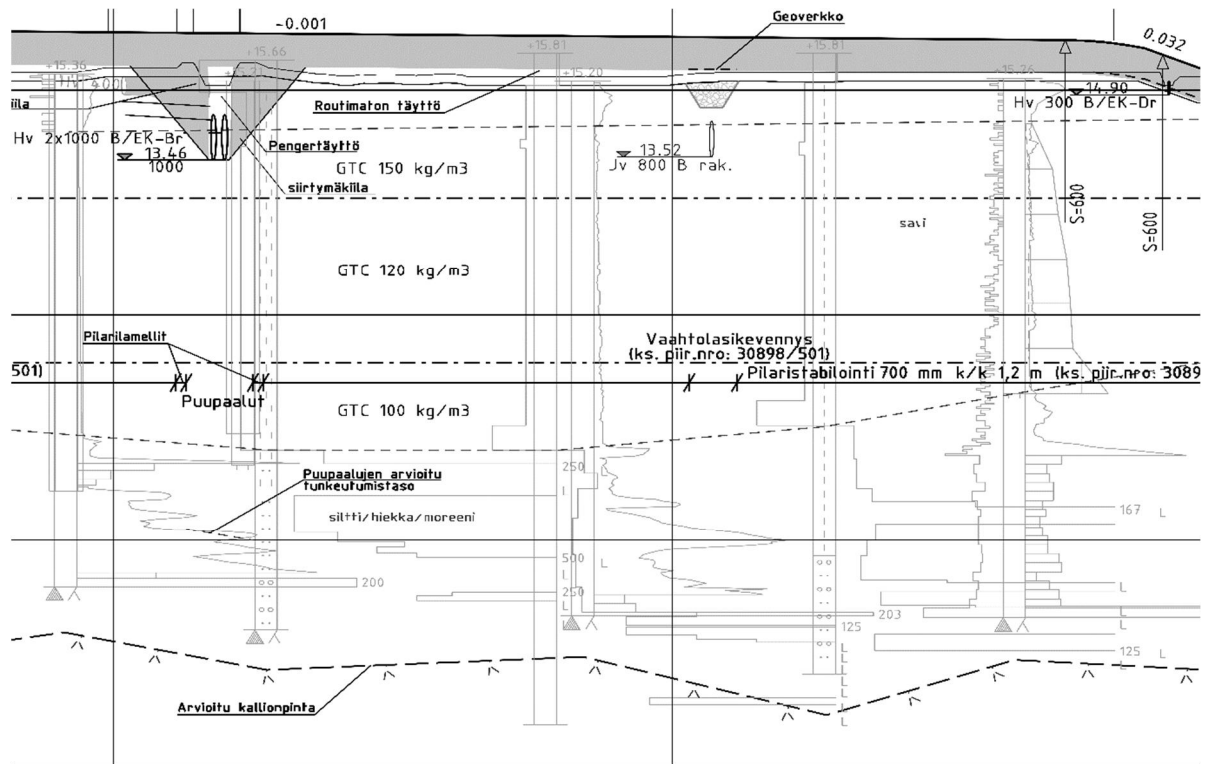
Ajoyhteyden pilareille on tehty laadunvalvontakairauksia 1–3 kuukauden lujittumisajan jälkeen. Tässä tarkastelussa on käytetty ajoyhteyden pilareita edustavina kairastuloksia, jotka on kairattu koerakenteen PS2 kohdalta (kuva 26).

**Taulukko 15 Pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärät (Destia Oy 2022b).**

Tasoväli	Sideainemäärä (kg/m <sup>3</sup> )	
	Etelään muutoslinjasta	Pohjoiseen muutoslinjasta
+14,7 - +12,7	200	150
+12,7 - +8,8	120	120
+8,8 -	100	100

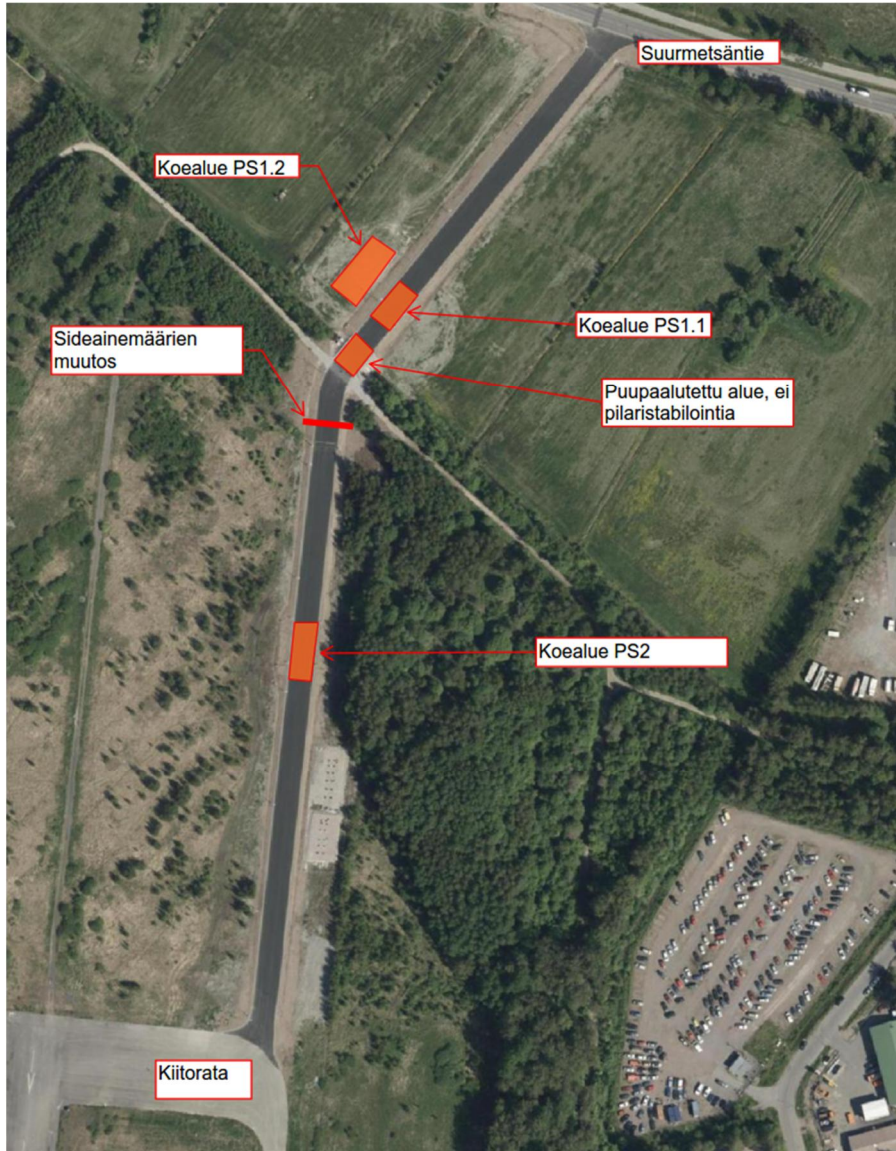


**Kuva 24 Pohjoinen ajoyhteys, poikkileikkaus, PL260. (Destia Oy 2022b).**



**Kuva 25 Pohjoinen ajoyhteys, pituusleikkaus, pohjoiseen Longinojan puupaalutetusta ylityksestä. (Destia Oy 2022b).**





**Kuva 26 Pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärän muutos ja stabilointityön ulkopuolelle jäävät alueet (korostettu) ilmakuvassa. (Kuva: Helsingin karttapalvelu, kartta.hel.fi).**

Ajoyhteiden ”sideainemäärän optimointi”:

Ajoyhteiden pilareiden valvontakairausten perusteella pilarit ovat lujittuneet tavoitelujuuttaan lujemmin. Teknisesti tulos on hyvä, mutta se tarkoittaa myös sitä, että sideainemäärän optimointi ei ole onnistunut optimaalisesti kustannusten tai hiilidioksidipäästöjen kannalta. ”Ylimääräisen” sideainemäärän ( $\text{kg/m}^3$ ) valmistuksen ja kuljetuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ja kustannukset ovat suuremmat kuin olisi välttämätöntä.

Koealueiden PS1 ja PS4 pienen ja ison sideainemäärän osa-alueiden laadunvalvontakairausten 91 d keskiarvokuvaajien avulla on määritetty kertoimet, joiden avulla

voidaan inter- tai ekstrapoloida tarvittava sideainemäärän muutos optimoitaessa sideainemäärää (kuva 27). Sideaineelle GTC laskettuja kertoimia on käytetty optimoidessa ajoyhteyden sideainemäärää (kuva 104). Sideainemäärän optimointi ekstrapoloimalla ei ole suositeltava menettely tuotantostabiloinnin sideainereseptin määrittämiseksi. Erityisesti kokeellisesti testatun sideainemäärän pienentämisessä ekstrapoloimalla tulee olla erityisen varovainen. Nyt niin on tehty teoreettista tarkastelua varten. Tässä esitettyjä alaspäin ekstrapoloituja sideainereseptejä ei tule käyttää tuotantostabiloinnissa ilman reseptin toimivuuden varmistamista.

#### Ajoyhteyden ”sideainereseptin optimointi”:

Koealueiden PS1 ja PS4 seitsemän uusiosideaineen laadunvalvontakairaustuloksista muodostettujen keskiarvoleikkauslujuuskuvaajien perusteella voitiin muodostaa sideaineresepteille tunnusluvut ”lujuuden muutos sideainekiloa kohden” (kPa / kg/m<sup>3</sup>) ja ”sideainemäärän muutos kilopascalia kohden” (kg/m<sup>3</sup> / kPa). Arvot muodostettiin kahden alueen keskiarvoleikkauslujuuksien kuvaajista silmämääräisesti arvioituna ”varovaisena” keskiarvona painottaen pienempiä leikkauslujuuden arvoja kahdelle ylimmälle syvyysvälille (taulukko 18). Näitä tunnuslukuja käyttämällä oli mahdollista laskea ajoyhteyden pilaristabiloinnille asetetun tavoitelujuuden saavuttamiseksi tarvittava sideainemäärä. Havaittiin tunnuslukujen olevan erilaiset eri sideaineille, eli kairaustulosten perusteella eri sideainereseptien tuottaman lujuuden muutos sideainemäärän muutosta kohden vaihtelee.

#### Hiilidioksidipäästöjen vertailulaskelmat:

Tavoitelujuuden saavuttamiseksi tarvittava sideainemäärä laskettiin edellä esitellyn ”sideainemäärän muutos kilopascalia kohden”-tunnusluvun avulla. Laskentaan käytettiin seuraavia parametreja:

- Sideainemäärä, pieni (kg/m<sup>3</sup>)
- Leikkauslujuus pienellä sideainemäärällä (kPa) – tavoitelujuus (kPa)
- Sideainemäärän muutos kilopascalia kohden (kg/m<sup>3</sup> / kPa)

Vähentämällä pienestä sideainemäärästä leikkauslujuuksien muutos kerrottuna sideainemäärän muutoksella kilopascalia kohden saatiin selville tavoitelujuuden saavuttamiseksi tarvittava sideainemäärä. Esimerkki laskennasta sideaineelle GTC on esitetty kuvassa 27. Muiden sideaineiden laskelmat on esitetty liitteessä 8. Kuvissa on esitetty myös laskennallisten keskiarvoleikkauslujuuksien perusteella lasketut tunnusluvut. Havaitaan niiden poikkeavan graafisesti määritetyistä tunnusluvuista. Ero johtuu kuvaajista määritettyjen keskiarvoleikkauslujuuksien ja laskennallisten keskiarvolujuuksien eroista.

Kokonaishiilidioksidipäästöjen laskemiseksi sideainemäärä ekstrapoloitiin kolmelle eri tasovälille. Kahden ylimmän sideainekerroksen paksuudet on esitetty taulukossa 17. Alimman sideainekerroksen paksuudeksi arvioitiin ajoyhteyden

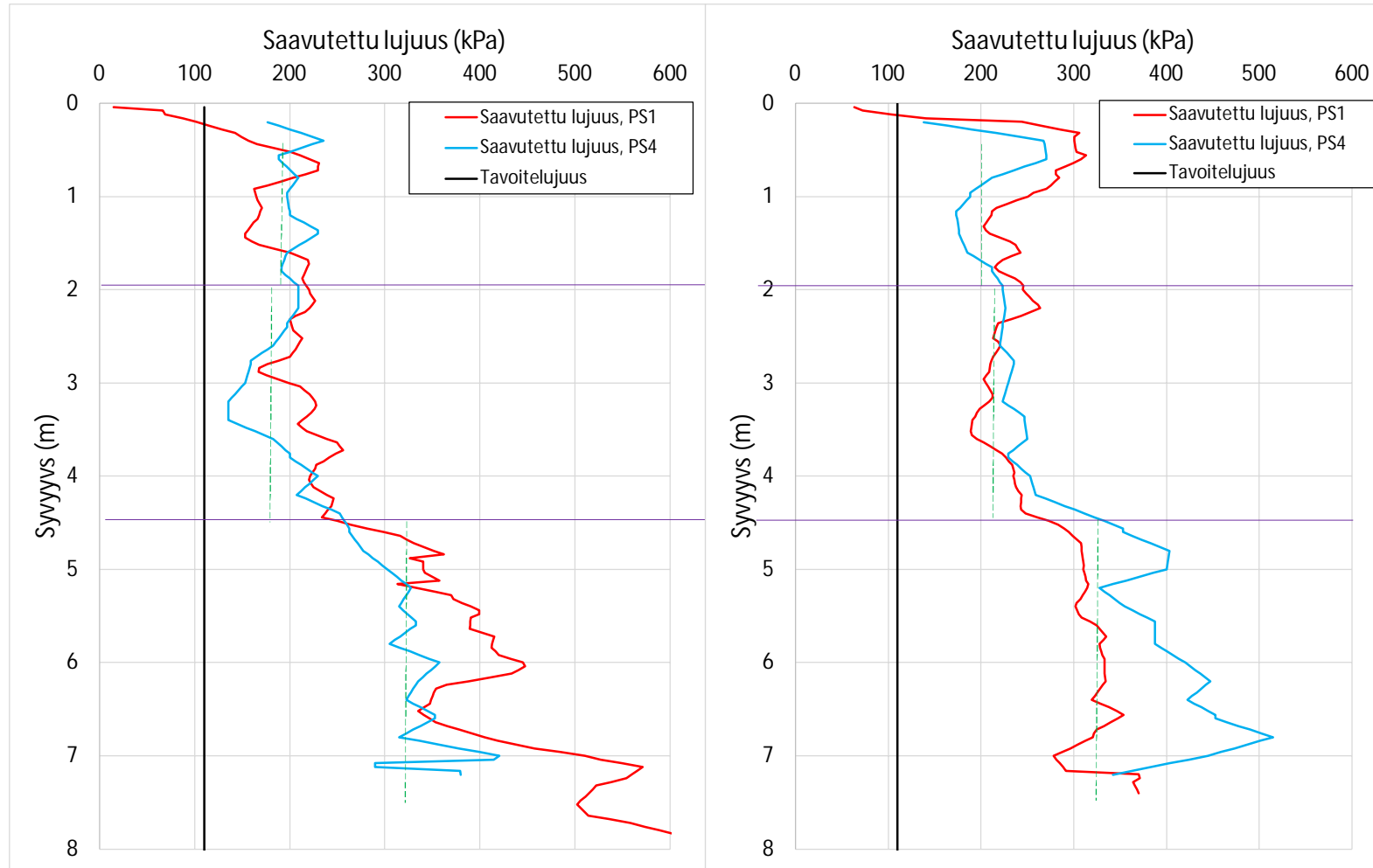
poikkileikkausten pilarien päättymistasojen keskiarvojen perusteella noin 4,5 metriä. Näin pilareiden keskimääräiseksi pituudeksi saatiin yhdeksän metriä. Kerrospaksuuksien ja pilareiden kokonaispituuden perusteella laskettiin jokaisen sideainekerrosten osuus pilarimäärästä. Laskentaa varten käytettiin seuraavia parametreja:

- Sideainekerroksen osuus pilarin kokonaispituudesta (%)
- Pilarimäärä, pilarimetrejä (60 400 m)
- Sideainemäärä pilarimetriä kohden (kg/m)
- Sideainekohtainen päästökerroin (kgCO<sub>2</sub>e/kg)

Laskentaparametrien tulona laskettiin hiilidioksidipäästöt jokaiselle sideainekerrokselle. Kokonaishiilidioksidipäästöt laskettiin sideainekerrosten päästöjen summana.

PIENI SIDEAINEMÄÄRÄ

ISO SIDEAINEMÄÄRÄ



**EXTRAPOLINTI:**

leikkauslujuus, pieni (ka.):	180 kPa
leikkauslujuus, iso (ka.):	200 kPa
sideainemäärä, pieni:	150 kg/m <sup>3</sup>
sideainemäärä, iso:	200 kg/m <sup>3</sup>
=> lujuuden muutos *:	0,40 kPa / kg/m <sup>3</sup>
=> sideainemäärän muutos **:	2,50 kg/m <sup>3</sup> / kPa
tavoitelujuus:	110 kPa
=> sideainemäärä:	-25 kg/m <sup>3</sup> => 100 kg/m <sup>3</sup>
ylin 1-2 m on vaikeasti lujittuvaa => vähintään 100 kg/m <sup>3</sup>	
leikkauslujuus, pieni (ka.):	175 kPa
leikkauslujuus, iso (ka.):	210 kPa
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>
=> lujuuden muutos *:	1,17 kPa / kg/m <sup>3</sup>
=> sideainemäärän muutos **:	0,86 kg/m <sup>3</sup> / kPa
tavoitelujuus:	110 kPa
=> sideainemäärä:	64 kg/m <sup>3</sup> => 80 kg/m <sup>3</sup>

leikkauslujuus, pieni (ka.):	320 kPa
leikkauslujuus, iso (ka.):	330 kPa
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>
=> lujuuden muutos *:	0,33 kPa / kg/m <sup>3</sup>
=> sideainemäärän muutos **:	3,00 kg/m <sup>3</sup> / kPa
tavoitelujuus:	110 kPa
=> sideainemäärä:	-510 kg/m <sup>3</sup> => 70 kg/m <sup>3</sup>
(sideainemäärän 70 kg/m <sup>3</sup> toimivuus tulisi todentaa)	

**Selitteet:**

- \* Lujuuden muutos sideainekiloa kohden
- \*\* sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden

APULUVUT	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	Leikkauslujuus, pieni (med.)	Leikkauslujuus, pieni (min.)	Leikkauslujuus, iso (ka.)	Leikkauslujuus, iso (med.)	Leikkauslujuus, iso (min.)
0-2m	197 kPa	200 kPa	153 kPa	225 kPa	218 kPa	174 kPa
2-4,5m	203 kPa	209 kPa	135 kPa	233 kPa	229 kPa	189 kPa
4,5- m	357 kPa	342 kPa	260 kPa	362 kPa	342 kPa	278 kPa

**Kuva 27 Pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointi valvontakairausten tulosten perusteella, GTC.**

Ekstra- ja interpoloinnin tuloksena saavutetut sideainemäärät on esitetty taulukossa 17. Ekstra- ja interpoloiduille sideainemäärille valittiin raja-arvot kokemusperäisesti siten, että voidaan olettaa lujittumista tapahtuvan (taulukko16). Laskettujen sideainemäärien tuottamat kokonaishiilidioksidipäästöt on esitetty taulukossa 20.

**Taulukko 16 Pohjoinen ajoyhteys, ekstra- tai interpoloitujen sideainemäärien raja-arvot.**

Syvyys (m)	Pienin hyväksytty sideainemäärä (kg/m <sup>3</sup> )
0–2 m	100
2–4,5 m	80
4,5- m	70

**Taulukko 17 Pohjoinen ajoyhteys, ekstra- tai interpoloidut sideainemäärät.**

Sideaine	Sideainemäärä eri syvyysväleillä (kg/m <sup>3</sup> )			Painotettu keskiarvo (kg/m <sup>3</sup> )
	0–2 m	2–4,5 m	4,5– m	
Nordkalk Terra GTC	100	80	70	79
Nordkalk Terra GREEN	100	80	70	79
Nordkalk Terra POZ	130	130	70	100
Finnsementti CEMIII/A	100	80	70	79
Finnsementti CEMIII/B	100	80	100	94
UPM LT+CEMII	140	150	70	108
Kaukaan voima LT+CEMII	150	200	100	139

**Taulukko 18 Pohjoinen ajoyhteys, lujuuden muutos sideainekiloa kohden ja sideainemäärän muutos kilopascalia kohden.**

Sideaine \ Syvyys	Lujuuden muutos sideainekiloa kohden (kPa/kg/m <sup>3</sup> ) / Sideainemäärä muutos kilopascalia kohden (kg/m <sup>3</sup> /kPa)		
	0–2 m	2–4,5 m	4,5- m
Nordkalk Terra GTC	0,40 / 2,50	1,17 / 0,86	0,33 / 3,00
Nordkalk Terra GREEN	1,33 / 0,75	1,67 / 0,60	2,67 / 0,38
Nordkalk Terra POZ	1,33 / 0,75	1,67 / 0,6	0,33 / 3,00
Finnsementti CEMIII/A	1,67 / 0,60	1,67 / 0,60	3,67 / 0,27
Finnsementti CEMIII/B	3,33 / 0,30	1,67 / 0,60	10,67 / 0,09
UPM LT+CEMII	2,00 / 0,50	1,33 / 0,75	1,33 / 0,75
Kaukaan voima LT+CEMII	1,00 / 1,00	0,50 / 2,00	2,00 / 0,50

**Taulukko 19 Pohjoinen ajoyhteys, hiilidioksidipäästöt ja SPV-luokat ekstrat tai interpoloiduilla sideainemäärillä laskettuna (päästökerroin pilarimetriä kohden = sideainemäärä × päästökerroin × pilarimetrin tilavuus).**

	Hiilidioksidipäästö kg CO <sub>2e</sub> / m-pilari eri syvyysväleillä ja hiilidioksidipäästöä vastaava SPV-luokka			
Sideaine	0–2 m	2–4,5 m	4,5– m	0- m
Terra GTC	7,54 / SPV6	6,03 / SPV6	5,28 / SPV6	5,99 / SPV6
Terra GREEN	9,51 / SPV9	7,60 / SPV6	6,65 / SPV6	7,55 / SPV6
Terra POZ	28,7 / SPV25	28,7 / SPV25	15,4 / SPV12	22,0 / SPV20
CEMIII/A	17,5 / SPV15	14,0 / SPV12	12,3 / SPV12	13,9 / SPV12
CEMIII/B	12,5 / SPV12	10,0 / SPV 9	12,5 / SPV12	11,8 / SPV9
UPM LT+CEMII	10,5 / SPV9	11,2 / SPV9	5,23 / SPV6	8,05 / SPV6
Kau LT+CEMII	11,2 / SPV9	14,9 / SPV12	7,47 / SPV6	10,4 / SPV9

**Taulukko 20 Malminkentän pohjoinen ajoyhteys, esimerkkilaskelma.**

Sideaine	Määrä [kg/m <sup>3</sup> ]	Päästökerroin [kgCO <sub>2e</sub> /kg]	Kokonaispäästöt [kgCO <sub>2e</sub> ]	Ero Terra GTC ”työselostus”
Nordkalk Terra GTC	Ekstrapoloitu	0,196	361 925	-35 %
Nordkalk Terra GTC, Koealue PS2	Ekstrapoloitu	0,196	361 925	-35 %
Nordkalk Terra GREEN	Ekstrapoloitu	0,247	456 099	-18 %
UPM LT+CEMII	Interpoloitu	0,194	485 939	-13 %
Nordkalk Terra GTC (työselostuksen mukainen)	Taulukko 15	0,196	556 791	±0 %
PVO LT+CEMII	Interpoloitu	0,194	626 231	+12 %
Finnsementti CEMIII/B	Ekstrapoloitu	0,325	713 502	+28 %
Finnsementti CEMIII/A	Ekstrapoloitu	0,456	842 029	+51 %
Nordkalk Terra POZ	Ekstrapoloitu	0,573	1 331 728	+139 %

Taulukossa 20 esitetyistä tuloksista havaitaan, että koekenttien PS1 ja PS4 kairaus-tulosten perusteella ekstrapoloituilla sideainemäärillä sideaineresepteillä GTC, UPM LT+CEMII ja GREEN on saavutettu n. 13-35 % pienempiä kokonaishiilidioksidipäästöjä kuin työselostuksen mukaisesti lasketulla GTC:llä. Lisäksi koealueen PS2 kairaus-tulosten perusteella ekstrapoloitu kokonaishiilidioksidipäästö on pienempi kuin työselostuksen mukaisesti laskettu.

Kun valitaan pienimmät kokonaishiilidioksidipäästöt tuottanut sideaineresepti (GTC, ekstrapoloitu) kokonaishiilidioksidipäästöt vähenevät 194 866 kgCO<sub>2e</sub> verrattaessa työselostuksessa esitetyllä sideainemäärällä saavutettuun, vähenemä on noin 35 %. Sideainemäärän optimoinnilla on siis merkittävä vaikutus pilaristabiloinnin kokonaishiilidioksidipäästöihin.

Mikäli pilaristabiloinnin SSV-luokkana olisi käytetty SSV.2, sideaineena olisi voitu käyttää GTC:tä tai lentotuhka-sementti-seoksia. Taulukon perusteella lentotuhka-

seoksilla sideainetta olisi kuitenkin tarvittu enemmän, kuin GTC:tä. Valitsemalla SSV.2-luokka, päädyttäisiin taulukon 20 mukaan -35 - +12 % hiilidioksidipäästöjen muutokseen verrattuna työselostuksessa esitettyyn sideainereseptiin.

Valittaessa sideaineen vähähiilisyysluokaksi SSV.3, voitaisiin käyttää myös sideainetta GREEN, jolla pienemmän sideainemäärän ansiosta päästöt vähenisivät n. 18 % verrattuna työselostuksessa esitettyyn sideainereseptiin. Mikäli sallittaisiin kaikkien tarkasteltujen sideaineiden käytön mahdollistava luokka SSV.7 päästöt voisivat kasvaa moninkertaiseksi.

Laskentatulosten perusteella havaitaan, että pienen SSV-luokan määrittäminen voi johtaa suurempaan sideainemäärään. Sallimalla suurempi SSV-luokka, tarvittava sideainemäärä voi pienentyä siten, että sideaineperäiset kokonaispäästöt pienentyvät. Esimerkiksi sideaineen GREEN SSV-luokka on SSV.3, mutta sen kokonaishiilidioksidipäästöt ovat pienemmät kuin SSV.2-luokkaan kuuluvilla lentotuhka-seoksilla.

Taulukossa 19 on esitetty ekstra- tai interpoloimalla optimoiduilla sideainemäärillä lasketut SPV-luokat eri syvyyksille sekä niiden painotetut keskiarvot. Mikäli pilaristabiloinnin hankinnassa olisi käytetty SPV.6 -luokkaa, olisi vaatimuksen täyttänyt kolme sideainereseptiä (GTC, GREEN ja UPM LT+CEMII). Sideaineet GTC ja UPM LT+CEMII kuuluvat SSV.2-luokkaan ja GREEN SSV.3-luokkaan. Havaitaan, että määrittämällä pilaristabiloinnille SPV-luokka, olisi mahdollista käyttää sideaineita useista SSV-luokista.

Sideaineilla Kaukaan voima LT+CEMII ja CEM III/B tehdyt koepilarit kuuluvat samaan SPV-luokkaan huolimatta CEM III/B:n yli 60 % suuremmasta päästökertoimesta. Lentotuhkaseoksilla UPM LT+CEM II ja Kaukaan voima LT+CEM II tehdyt koepilarit kuuluvat eri SPV-luokkiin, vaikka niiden päästökertoimet ovat samat. Tämä johtuu siitä, että Kaukaan voima LT+CEMII interpoloimalla optimoidut sideainemäärät ovat suurempia kuin seoksella UPM LT+CEMII. Tavoitelujuuden saavuttamiseksi tarvittavilla sideainemäärillä on siis merkittävä vaikutus sideainereseptin SPV-luokkaan.

### **7.3 SSV- ja SPV-luokittelun yhdistäminen**

Edellä esitettyjen kohdetarkastelujen perusteella SSV- ja SPV-luokitusten käyttäminen hankinnassa vähentäisi syvästabiloinnista syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Taulukon 20 perusteella syvästabilointihankkeen sideaineperäiset kokonaishiilidioksidipäästöt vertautuvat suurelta osin sideaineen päästökertoimeen. Muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta voidaan todeta: ”mitä suurempi päästökerroin, sitä suurempi kokonaispäästö”. Näissä poikkeustapauksissa tarvittava sideainemäärä kasvaa muihin vaihtoehtoihin verrattuna suureksi, jolloin kokonaispäästö on pienemmän

päästökertoimen omaavalla sideaineella suurempi kuin suuremman päästökertoimen omaavalla sideaineella.

Syvästabiloinnin vähähiilisyysluokitus (SSV) perustuu stabiloinnissa käytettävän sideaineen valmistuksen ja kuljetuksen hiilidioksidipäästöihin sideainetonnina kohden. Koska luokittelu ei huomioi stabiloinnissa tarvittavaa sideainemäärää, pienemmän hiilidioksidipäästöluokan sideaineen todelliset päästöt voivat nousta suuremmiksi kuin suuremman päästöluokan sideaineella. On myös huomioitava, että tarvittava sideainemäärä vaihtelee sideaineen sekä olosuhteiden mukaan. Sideaineet eivät toimi samalla tavalla kaikissa maakerroksissa, joten sideaineresepti (laatu + määrä) on kohdekohtainen. Näin ollen pelkän SSV-menettelyn käyttäminen hankinnan kriteerinä ei välttämättä johda pienimpiin mahdollisiin päästöihin. Esimerkki tästä on esitetty luvussa 5.3 sekä kuvissa 12-14.

Helsingin Malminkentän Pohjoiselle ajoyhteydelle suoritettun tarkastelun (taulukot 4, 19, 20) perusteella käytettäessä SSV.2 -luokkaa kokonaishiilidioksidipäästöt vaihtelevat välillä 0,36-0,62 t CO<sub>2</sub>e (-35 - +12 %). Vastaavasti käytettäessä SPV.6-luokkaa päästöt vaihtelevat välillä 0,36-0,49 t CO<sub>2</sub>e (-35 - -13 %). Esimerkkitarkastelussa pienimmän saavutetun SPV-luokan käyttö siis vähentää kokonaishiilidioksidipäästöjä enemmän kuin pienimmän SSV-luokan käyttö. Suluissa on esitetty muutos työselostuksessa esitetyn sideainereseptin hiilidioksidipäästöön verrattuna. Määrittämällä sekä pienin tarkoituksenmukainen SSV- että SPV-luokka, kokonaishiilidioksidipäästöjen vaihteluväli on sama kuin käytettäessä pienintä saavutettua SPV-luokkaa.

Käytettäessä Pohjoisella ajoyhteydellä SSV.3 -luokkaa, kokonaishiilidioksidipäästöt vaihtelevat välillä 0,36-0,62 t CO<sub>2</sub>e (-35 - +12 %) ja SPV.9 -luokkaa välillä 0,36-0,71 t CO<sub>2</sub>e (-35 - +28 %). Pienempi kokonaishiilidioksidipäästöjen vaihteluväli saavutettiin käyttämällä SSV-luokitusta. Havaitaan siis, että laskennallisten päästöarvojen minimoimiseksi tulisi käyttää samanaikaisesti sekä SSV- että SPV-luokituksia. On huomioitavaa, että SPV-luokkaa käytettäessä tilaajalla tulee olla stabiloitavuuskokeisiin, koestabilointiin tai aikaisempaan kokemukseen perustuen käsitys siitä, millaisella sideainereseptillä tavoiteleikkauslujuus on saavutettavissa ja millaista SPV-luokkaa sen perusteella voidaan hankinnassa urakoitsijalta edellyttää.

## **7.4 SSV ja SPV-luokituksen käytön riskitarkastelu**

Syvästabiloinnin vähähiilisyysluokitus -oppaassa (UUM4 2023) on todettu menetelmän riskeistä: ”Menettelyssä, jossa sideainereseptointi on urakoitsijan vastuulla, on yksityiskohtia, joissa tarvitaan harkintaa hankekohtaisesti ja/tai yleistä kehitystä (esim. ohjeistusta kehittämällä) ajatellen tarjouspyyntöä ja urakkatarjousten hinnoittelua. Tällaisia tarkennettavia asioita voivat olla esim.:



1. geoteknisten tutkimusten eli kairausten ja indeksikoetulosten riittävyys, määrä ja laatu (riippuu mm. geologiasta)
2. pohjamaan erityispiirteiden selvitysten riittävyys (esim. pienipiirteisyys, kerroksellisuus, happamat sulfaattimaat ”hasu” ja pilaantuneet maat ”pima”)
3. stabiloitavuuskokeiden edustavuus ja riittävyys (tilaajan / urakoitsijan teettämät)
4. sideainereseptin toimivuuden riskien hallinta ja riskin jako (sideainetta tarvitaan urakkatarjouksessa esitettyä enemmän / vähemmän)
5. muut mahdolliset asiat

Oleellista on sideainereseptin toimivuuteen liittyvien riskien hallinta ja sitä varten tehtävät valinnat, jotka ovat osin olosuhderiippuvaisia. Silloin, kun alue on geologisesti tunnettu ja homogeeninen, maaperän ominaisuuksiin liittyvät riskit ovat vähäisiä. Silloin, kun esim. maakerrosrajat vaihtelevat pieni- / jyrkkäpiirteisesti, maakerrosten ominaisuudet vaihtelevat, maaperässä on happamia sulfaattimaita, tms., on sideainereseptiin liittyviä riskejä enemmän ja silloin geoteknisiä tutkimuksia ja stabiloitavuuskokeita tarvitaan esim. stabiloitavan savialtaan tilavuuteen nähden tavannoimaista enemmän.”

Edellä esitettyjä riskejä on tarkasteltu tehdyille esimerkkitarkasteluille. Riskitarkastelu on suoritettu molemmille esimerkkitarkasteluille kohdittain Syvästabiloinnin vähähiilisyys -oppaassa esitetyn listauksen mukaisesti. Tarkastelu on esitetty taulukossa 21.

**Taulukko 21 Malminkenttä, kohdetarkastelut Tattariharjuntie ja Pohjoinen ajoyhteys. Mahdolliseen SSV- ja SPV-menettelyyn käyttöön liittyvät UUMA4-oppaassa (2023) mainittujen riskien tarkastelut.**

Riski	Tattariharjuntie	Pohjoinen ajoyhteys
1. geotekniset tutkimukset	on riittävästi	on riittävästi
2. pohjamaan erityispiirteet	vanha katualue => voi aiheuttaa yllätyksiä	rakentamaton ja ei yhtenäinen alue => tutkimuksia on riittävästi
3. stabiloituavuuskokeet	vain yhdestä pisteestä => tutkimuksia tulisi olla enemmän	stabiloituavuuskokeita ja koestabilointi kahdessa pisteellä tielinjalla => tutkimuksia on riittävästi
4. sideainereseptin toimivuuden riskit	ei koestabilointia ja stab.kokeita vähän => riskiä ja riskinjakoa mietittävä	toteutettu koepilarit ja niiden kattavat tutkimukset => suurimmalla osalla sideainereseptejä sideainemäärää tulisi pienentää koepilareissa testatuista => optimointi tehtävä harkiten => riski vähäinen
5. muuta	-	Longinoja risteää stabiloitavan tiepohjan kanssa => SSV- ja SPV-luokitusten käyttäminen ei poikkea vesistövaikutuksiltaan ”perinteisestä” menettelystä => riski vähäinen

Taulukon 21 perusteella tarkastelluissa hankkeissa mahdolliset riskit aiheutuvat sideainereseptin optimoinnista ekstrapoloimalla (koepilareissa tarvittava suurempi sideainemäärä) ja vaikeasti lujittuvien maakerrosten huomioonnotta reseptoinnissa. Lisäksi riski kohdistuu pohjamaan erityispiirteisiin, kuten Tattariharjuntien vanhan tierakenne.

Mikäli urakkatarjouksessa esitetty sideainemäärä ei ole riittävä tavoitelujuuden saavuttamiseksi, SSV-menettelyssä sideainemäärän nostaminen johtaa kustannusten kasvuun sekä hiilidioksidipäästöjen lisääntymiseen. Menettelyssä käytetään kriteerinä sideaineen päästökerrointa ja urakoitsija ei ole tarjouksessa sitoutunut kokonaishiilidioksidipäästöjen määrään. Riskeihin eli pääosin kustannusten nousuun voidaan varautua tarjouspyynnössä sopimalla mahdollisesta lisäkustannusten jakautumisesta.

SPV-menettelyssä urakoitsija on urakkatarjouksessaan sitoutunut kokonaishiilidioksidipäästöjen määrään. Menettelyssä sideainemäärän lisäys urakkatarjouksessa esitetystä aikaansaa taloudellisen riskin lisäksi riskin siitä, että toteutus ei täytä urakkasopimuksen ehtoja (hiilidioksidipäästö pilarimetriä kohden).

Molempia menettelyjä (SSV, SPV) käytettäessä on tarjouspyynnössä varauduttava siihen, että todellinen tarvittava sideainemäärä saattaa poiketa urakkatarjouksessa esitetystä. Käytännössä varautuminen tarkoittaa muun muassa mahdollisten lisäkustannusten jakautumisesta ennalta sopimista. Käytettäessä SPV-luokitusta on harkittava muun muassa SPV-luokituksen mukaisten hiilidioksidipäästöjen ylittämisen

sanktioinnin toteutusta. Voidaan myös harkita, onko mahdolliset SPV-luokituksen mukaisten hiilidioksidipäästöjen ylitykset mahdollista kohdistaa muihin kerroksiin.

Tattariharjuntiellä stabiloitavuuskokeita on tehty vain yhdestä pisteestä eikä tiedossa ole kohteessa aiemmin toteutettuja pilaristabilointeja. Vähäisten stabiloitavuuskokeiden ja aiempien kokemusten puuttumisen takia riski siitä, ettei urakoitsijan arvioima sideainemäärä olisi riittävä on olemassa. Pohjoisen ajoyhteyden tapauksessa ennakkotutkimukset ovat huomattavasti laajemmat ja sideainereseptin toimivuuteen liittyvät riskit pienemmät ja helpommin hallittavissa.

Syvästabiloinnin vähähiilisyys -oppaassa (2023) esitettyjen riskien lisäksi vähähiilisyysluokitusten käyttöön voi liittyä myös muita riskejä. Esimerkiksi yhdistämällä suunnittele ja toteuta -malli SPV-luokitukseen ja korostamalla SPV-vaatimusta tarjousten vertailussa, lienee mahdollista, että hankkeen kokonaispäästöt voivat nousta vaaditun SPV-luokan saavuttamisesta huolimatta. Näin voinee tapahtua, mikäli urakoitsija saavuttaa vaaditun SPV-luokan tarkasti optimoidulla sideainemäärällä saavutettavan leikkauslujuuden kustannuksella johtaen pienempään pilariväliin sekä suurempaan pilari- ja sideainemäärään, hiilidioksidipäästöihin ja kustannuksiin.

## 8 Yhteenveto

Tässä työssä tarkasteltiin syvästabiloinnin vähähiilisyysluokituksen ja erilaisten hankintamallien yhdistämistä. Lisäksi tutkittiin Malminkentällä vuonna 2022 toteutettujen koepilareiden yläosien olomuotoja. Koepilareille muodostettiin laadunvalvontakairausten perusteella hiilidioksidipäästöt lujutta kohden -tunnusluvut seitsemälle uusiosideaineella.

Työssä käsiteltiin UUMA4-ohjelmassa laaditussa ”Sideaineiden vähähiilisyysluokitus”-oppaassa esitettyjä syvästabiloinnin sideaineiden vähähiilisyysluokitusta (SSV) ja syvästabilointipilareiden vähähiilisyysluokitusta (SPV). Vähähiilisyysluokitusten yhdistämistä syvästabiloinnin hankintaan ja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen arvioitiin kahdella teoreettisella esimerkkitarkastelulla: Helsingin Malminkentän pohjoinen ajoyhteys ja Helsingin Tattariharjuntien saneeraus.

Malminkentän koepilarien laadunvalvontakairaustulosten perusteella muodostettujen ”päästöt saavutettua lujutta kohden” -tunnuslukujen perusteella tunnuslukuun vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa sideainekohtainen päästökerroin sekä saavutetun leikkauslujuuden suhde tavoiteleikkauslujuuteen. Havaittiin, että suuremman päästökertoimen omaavan sideaineen päästöt lujutta kohden voivat olla yhtenevät pienemmän päästökertoimen sideaineen kanssa, mikäli suuremman päästökertoimen omaavalla sideaineella saavutetut leikkauslujuudet ovat merkittävästi suuremmat kuin pienemmän päästökertoimen omaavalla sideaineella saavutetut.

Työssä tehtyjen esimerkkitarkastelujen perusteella havaittiin, että SSV- ja SPV-luokituksia käyttämällä voidaan vaikuttaa merkittävästi syvästabiloinnin kokonaishiilidioksidipäästöihin. Malminkentän pohjoisen ajoyhteyden esimerkkitarkastelussa havaittiin, että asettamalla pieni SSV-luokka, päästöjä voitiin vähentää noin 70 % verrattuna suuremman SSV-luokan, joka mahdollistaisi kaikki koepilareissa käytetyt sideaineet, käyttämiseen. Vastaava tulos havaittiin myös SPV-luokituksen käytössä.

Tämän työn tuloksia on mahdollista hyödyntää osana syvästabiloinnin sideaineiden vähähiilisyysluokitusten käyttöönottoa. Työssä tarkasteltiin alustavasti, kuinka markkinavuoropuhelua voidaan käyttää osana vähähiilisyysluokitusten käyttöönottoa sekä erilaisten hankintamallien yhdistämistä vähähiilisyysluokituksiin. Työssä muodostettuja tunnuslukuja on mahdollista käyttää eri sideaineilla stabiloitujen pilareiden toteutuneiden hiilidioksidipäästöjen vertailuun.

## Lähteet

Aalto, A. 2002. Syvästabilointitutkimus – yhteenveto projektin III vaiheesta. Espoo, TKK, pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio.

Aalto, O.-P. 2022. Vähähiilinen betoni ja betonin kaltaiset materiaalit infrarakentamisessa. UUMA-vuosiseminaari 28.9.2022. PP-esitys. [Viitattu 18.7.2023]. Saatavissa: [https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/07%20Olli-Pekka%20Aalto%20ja%20Jarno%20Arkko\\_V%C3%A4h%C3%A4hiilinen%20betoni%20ja%20betonin%20kaltaiset%20materiaalit%20infrarakentamisessa.pdf](https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/07%20Olli-Pekka%20Aalto%20ja%20Jarno%20Arkko_V%C3%A4h%C3%A4hiilinen%20betoni%20ja%20betonin%20kaltaiset%20materiaalit%20infrarakentamisessa.pdf)

Aluehallintovirasto. 2022. Päätös 162/2022 Tytyrin kalkkitehtaan luvan muuttaminen ja toiminnan aloittamislupa, Lohja. [Viitattu 31.7.2023]. Saatavissa: [https://lohja.emmi.fi/l/ChwKPKkT\\_2wS](https://lohja.emmi.fi/l/ChwKPKkT_2wS)

Arkkitehtitoimisto Freese Oy, Arkkitehtitoimisto Schulman Oy. 2016. Malmin lentoasema, ympäristöhistoriaselvitys. [Viitattu 8.8.2023]. Saatavissa: <https://www.malmiairport.fi/wp-content/uploads/2017/02/160823-Malmi-YHS-kevyt.pdf>

Bruce, D; Cali, P. 2021. Deep Foundations SEPT/OCT 2021. U.S. Deep Mixing Specifications and Quality Assessment s.101-105.

Destia Oy. 2022a. Malmin lentokenttäalueen KL-reitit ja pohjoinen ajoyhteys, määräluettelo. Liikenne- ja katusuunnittelu. Maankäyttö ja kaupunkirakenne. Kaupunkiympäristön toimiala. Helsingin kaupunki.

Destia Oy. 2022b. Malmin lentokenttäalueen KL-reitit ja pohjoinen ajoyhteys, työselustus. Liikenne- ja katusuunnittelu. Maankäyttö ja kaupunkirakenne. Kaupunkiympäristön toimiala. Helsingin kaupunki.

Federal Highway Administration. 2013. Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support. U.S. Department of Transportation. Publication no. FHWA-HRT-13-046.

Finnsementti Oy. 2012. Suomalainen sementti.

Finnsementti Oy. 2019. Masuunikuonajauhe KJ400. [Viitattu 1.8.2023]. Saatavissa: [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Masuunikuonajauhe\\_KJ400.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Masuunikuonajauhe_KJ400.pdf)

Finnsementti Oy. 2022. Environmental Product Declaration, Kolmos-sementti, CEM III/A 52,5 L Parainen. [Viitattu 17.8.2023] Saatavissa: <https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti-Parainen-Kolmossementti.pdf>

Finnsementti Oy Ab. 2023. *Yrityksen kotisivut* [Verkkosivu]. [Viitattu 2.8.2023]. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/>

Forsman, J. 2022. Uusiosideaineet syvästabiloinnissa – kokemuksia ja kehitysajatuksia. -UUMA4-ohjelma. Vuosiseminaari 28.9.2022. PP-esitys. [Viitattu 18.7.2023] Saatavissa: [https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/09%20Juha%20Forsman\\_Uusiosideaineet%20syv%C3%A4stabiloinneissa%20-%20kokemuksia%20ja%20kehitysajatuksia.pdf](https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/09%20Juha%20Forsman_Uusiosideaineet%20syv%C3%A4stabiloinneissa%20-%20kokemuksia%20ja%20kehitysajatuksia.pdf)

Forsman, J. 2023. Pohjanvahvistus, Syvästabiloinnin mahdollisuudet. Luento 28.3.2023 Tampere, Tampereen yliopisto.

Forsman, J.; Ilonen, E; Kaukoranta, O. 2024. Malminkenttä, pilarien ylösnosto, taustaraportti. Ramboll Finland Oy

Forsman, J.; Autiola, M.; Lahtinen; P. 2012. Field test in Port of Kokkola, longtime monitoring. Raportti 5.12.2012.

Jääskeläinen, R. 2009. Pohjarakennuksen perusteet. 4.p. Tampere: Tammertekniikka. 233 s. ISBN 978-952-5491-51-7

Han, J. 2015. Principles and Practice of Ground Improvement. 1st edition. Wiley.

Heikkilä, E. 2022. Sähköposti J. Forsmanille 1.12.2022.

Heikkilä. 1991. Loppuraportti KT40:n stabilointikokeista ja koepilarikentästä. IPT/Viatek 12.4.1991.

Horaguchi, S; Koyama, Y; Watanabe, Y. 2022. The Legal 500 Country Comparative Guides, Japan Construction. Nagashima Ohno & Tsunematsu.

Ihse, O; Bjele, H; Edberg, V. 2023. The legal 500 Country Comparative Guides, Sweden Construction. AG Advokat.

Ikävalko, J. 2023. Pilaristabiloinnin kenttä- ja laboratoriolujuuksien suhde koestabilointikohteissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. [Viitattu 17.8.2023]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/5ced88ab-bb6e-4998-87f6-d6500ecdb0f9/content>

KEINO, Kestävien ja innovatiivisten julkisten hankintojen verkostomainen osaamiskeskus. 2021. Vähähiilisten hankintojen pelikirja.

Kitazume, M. 2021. Recent development and Future Perspectives of Quality Control and Assurance for the Deep Mixing Method. Applied Sciences 11, no. 19: 9155. <https://doi.org/10.3390/app11199155>

Kivi, E. 2021. Pohjanvahvistusmenetelmät Suomessa – käyttömäärät ja hiilijalanjälki. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. [Viitattu 19.7.2023]. Saatavissa: [https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/112692/master\\_Kivi\\_Elis\\_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/112692/master_Kivi_Elis_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Korpijärvi, K; Mroueh, U-M; Merta, E; Laine-Ylijoki, J; Kivikoski, H; Järvelä, E; Wahlström, M; Mäkelä, E. 2009. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. VTT tiedotteita 2499. VTT. [viitattu 1.8.2023]. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2009/T2499.pdf>

KPO 2002. Kalkkisementtipilariohje. Geotekniikkayksikkö. Espoo: Espoon kaupungin tekninen keskus.

Kuittinen, M; le Roux, S. 2017. Vähähiilisen rakentamisen hankintakriteerit. Ympäristöministeriö. Helsinki.

Kuusipuro, K. 2023a. Syvästabilointikatsaus. Nordkalk. Powerpoint-esitys 24.8.2023 SGY Pohjanvahvistuspäivä. [Haettu 15.1.2024]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2023/05/syvastabilointikatsaus-kari-kuusipuro.pdf>

Kuusipuro, K. 2023b. Sähköposti J. Ikävalkolle 1.6.2023.

Kuusipuro, K. 2022a. Nordkalk Terra-tuotteiden hiilijalanjälki pienenee. Mediatiedote 21.4.2022. Nordkalk Oy.

Kuusipuro, K. 2022b. Stabilointimäärät ja sideaineet. Nordkalk. Powerpoint-esitys 25.8.2022 SGY Pohjanvahvistuspäivä. [Haettu 12.7.2023]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2022/06/kuusipuro-stabilointimaarat-ja-sideaineet-kari-kuusipuro.pdf>

Lahdenperä, P. 2015. Arabianrannan pohjarakenteiden pitkäaikainen toimivuus. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. [Viitattu 16.1.2024]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/items/57263f0a-6bc2-4d5c-9c91-9156e74f5273>

Laki hiilen energiakäytön kieltämisestä 29.3.2019. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190416>

Laki julkisista hankinnoista ja käyttöoikeussopimuksista 29.12.2016/1397. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161397>

Larsson, R. 2006. Djupstabilisering med bindemedels-stabiliserade pelare och masstabilisering – En vägledning. Svensk Djupstabilisering. [Viitattu 23.1.2024]. Saatavissa: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-r17.pdf>

Larsson, S. 2003. Mixing Processes for Ground Improvement by Deep Mixing. Väitöstyö. Royal Institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering. Tukholma. [Viitattu: 28.7.2023]. Saatavissa: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:9502/FULLTEXT01.pdf>

Larsson, S.; Dahlström, M; Nilsson, B. 2005. Uniformity of lime-cement columns for deep mixing: a field study. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement. [Verkkoaineisto] 9 (1), 1–15. <https://doi.org/10.1680/grim.2005.9.1.1>

Lehtovirta, T. 2023. Infrarakentamisen hiilidioksidiekvivalenttipäästöt Suomessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. [Viitattu 5.7.2023]. Saatavissa: [https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/120978/master\\_Lehtovirta\\_Tommi\\_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/120978/master_Lehtovirta_Tommi_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Liikennevirasto 2018. Liikenneviraston ohjeita 17/2018. Syvästabiloinnin suunnittelu. Liikennevirasto. Helsinki. 128 s. ISBN 978-952-317-588-4.

Melander, M. 2017. Massastabiloinnin laadunvarmistuskairaukset. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. [Viitattu 16.1.2024]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/2d2472cd-757c-4d87-b3ca-0140c8000005/content>

Mokkila, M. 2021. Lentotoiminta Malmilla on päättymässä – kenttä tyhjenee viikonlopun aikana. YLE. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 8.8.2023] Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-11834260>

Nguyen, T. 2021. Uusiosideaineet pilaristabiloinnissa: Kuninkaantammen koestabilointi. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. [Viitattu 28.7.2023]. Saatavissa: [https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/103361/master\\_Nguyen\\_Tuyet\\_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/103361/master_Nguyen_Tuyet_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Nordkalk Oy Ab. 2023. *Yrityksen kotisivut* [Verkkosivu]. [Viitattu 1.8.2023]. Saatavissa: <https://nordkalk.fi/>



Oksman, O. 2022. Syvästabiloinnin sideaineiden vähähiilisyysluokitus ja pilaristabiloinnin hankinta. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. Turku. [viitattu 1.8.2023]. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/786607/Oksman\\_Onerva.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/786607/Oksman_Onerva.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Pabor, E.J; Ishida, S. 2012. Japan public works construction contracting methods: and the rebuilding ja Japan after the march 2011 earthquake and tsunami. Fifth International Public Procurement Conference.

Palla, K. 2021. Markkinavuoropuhelu osana julkista hankintaa, Tilaaajan ja toimittajan näkökulman huomiointi. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/504519/Palla\\_Kati.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/504519/Palla_Kati.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Piispanen, P. 2017. Massastabiloinnin pitkäaikaistoimivuus. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. [viitattu 1.8.2023]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/28497>

Pohjolan voima Oyj. 2024. Kaukaan voima, Lappeenranta. [Verkkosivu]. [Viitattu 16.1.2024]. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/voimalaitokset/kaukaan-voima-lappeenranta/>

Pokkinen, M. 2023. Kiertotalouskriteerit infrahankinnoissa. RATKI-hanke, Hankitustyöpaja 24.1.2023. Tampere. [Viitattu 21.3.2024]. Saatavissa: <https://projects.tuni.fi/uploads/2023/02/998ed33a-kiertotalouskriteerit-tampereen-infrahankinnoissa.pdf>

Punkki, J. 2021. Betonin sideaineet tulevaisuudessa. BET2104\_74–83. [Viitattu 1.8.2023]. Saatavissa: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/12/BET2104\\_74-83.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/12/BET2104_74-83.pdf)

Xiong, T. 2019. The use of recycled materials as binders to stabilize soft clay in laboratory. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. [Viitattu 25.1.2024]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/3fa3f71c-9057-42f7-ba8b-ab77cbed7510/content>

Rakennustietosäätiö. RTS EPD malliseloste sementtilaastitasoitteelle (suomeksi, versio 010620). [verkkoaineisto]. [viitattu 5.7.2023]. Saatavissa: [https://cer.rts.fi/wp-content/uploads/epd-malliseloste\\_sementti\\_010620\\_sfsen15804\\_2019\\_voimassa.pdf](https://cer.rts.fi/wp-content/uploads/epd-malliseloste_sementti_010620_sfsen15804_2019_voimassa.pdf)

Ramboll Finland Oy. 2022. Malmin lentokenttä alueen tilapäiset reitti yhteydet, pohjoinen ajoyhteys Suurmetsäntielle, Koesyvästabiloointi, työselostus. Liikenne- ja katusuunnittelu. Maankäyttö ja kaupunkirakenne. Kaupunkiympäristön toimiala. Helsingin kaupunki.

Ramboll Finland Oy. 2023. Malminkentän koestabiloinnit 2022, 28d ja 90 d laadunvalvontakairausten yhteenvetoraportti. Helsingin kaupunki.

RIL 121-2004. Pohjarakennusohjeet. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. ISBN 951-758-439-3

Savela, I-M. 2024. Malminkenttä, puristuskoetulokset.

Stara, Katu- ja maalaboratorio. 2022. Tattariharjuntie, stabilointikoetulokset.

Suomen Betoniyhdistys ry 2024a. BY-vähähiilisyysluokitus. Taustaraportti 2024 osa 1. Saatavissa: [https://vahahiilinenbetoni.fi/wp-content/uploads/2024/01/by\\_vahahiilisyysluokitus\\_osa\\_1\\_versio2\\_0124.pdf](https://vahahiilinenbetoni.fi/wp-content/uploads/2024/01/by_vahahiilisyysluokitus_osa_1_versio2_0124.pdf)

Suomen Betoniyhdistys ry 2024b. BY-vähähiilisyysluokitus. [verkkoaineisto]. [viitattu 19.3.2024]. Saatavissa: <https://vahahiilinenbetoni.fi/>

Suominen, M. 2023. Vähähiilinen syvästabilointi, markkinakartoitus ja markkinavuoropuhelu. UUMA4 – Markkinavuoropuhelu UUMA-rakentamisen edistäjänä – työpajan 17.11.2022 tulosten esittely 7.6.2023. Helsingin kaupunki.

SYKE, Suomen ympäristökeskus, 2022. Infrarakentamisen päästötietokanta. [verkkoaineisto]. [viitattu 5.7.2023]. Saatavissa: <https://co2data.fi/infra/>

UPM-Kymmene Oyj. 2022. UPM Jämsänkosken tehdas ympäristö- ja yhteiskuntavastuu 2022. Saatavissa: <https://www.upm.com/siteassets/documents/responsibility/certificate-finder/environmental-management-system/emas-report---upm-jamsankoski-mill-suomi.pdf>

UUMA4. 2022. Markkinavuoropuhelu UUMA-rakentamisen edistäjänä -työpajan 17.11.2022 tulosten koonti. 27.12.2022 Saatavissa: <https://uusiomaarakentaminen.fi/wp-content/uploads/sites/5/2023/09/Tyopaja-Markkinavuoropuhelu-UUMArakentamisen-edistajana.pdf>

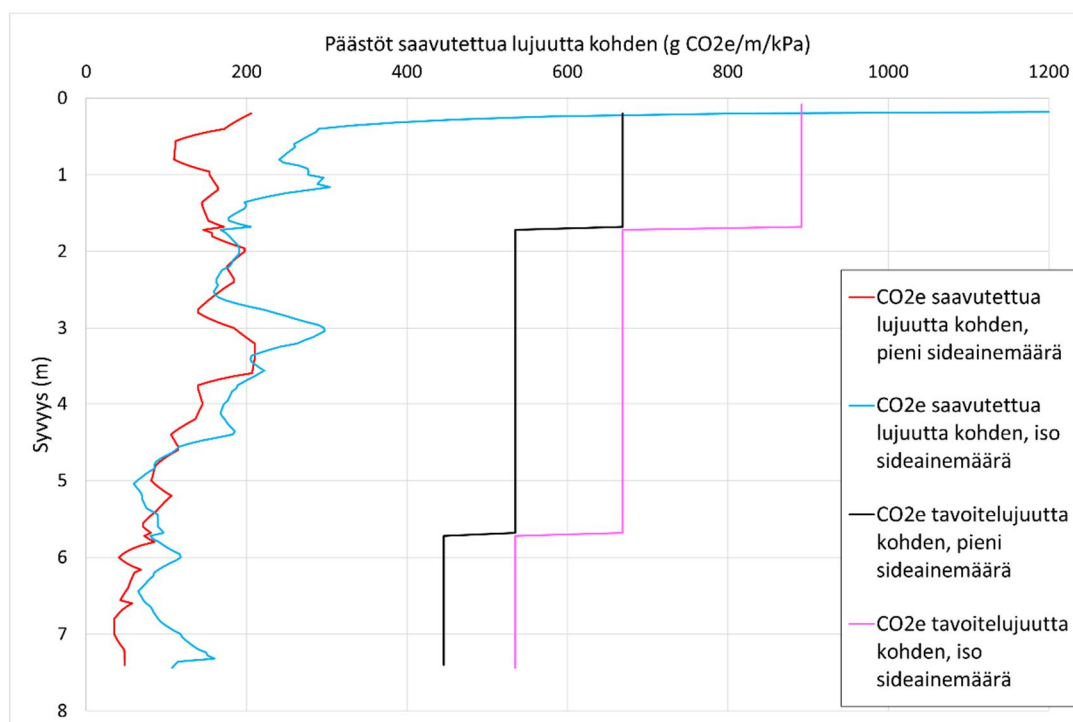
UUMA4. 2023a. Syvästabiloinnin sideaineiden vähähiilisyysluokitus, koekäyttöversio 20.12.2023. Saatavissa: [https://uusiomaarakentaminen.fi/wp-content/uploads/sites/5/2024/01/2023\\_12\\_20-Syvastabiloinnin-sideaineiden-vahahiilisyysluokitus\\_A.pdf](https://uusiomaarakentaminen.fi/wp-content/uploads/sites/5/2024/01/2023_12_20-Syvastabiloinnin-sideaineiden-vahahiilisyysluokitus_A.pdf)

UUMA4. 2023b. Uusiosideaineet koheesiomaiden syvästabiloinnissa – käyttökoke-  
mukset ja ympäristövaikutukset, raportti. Saatavissa: [https://uusiomaarakentaminen.fi/wp-content/uploads/sites/5/2024/01/UUMA4\\_Uusiosideaineet-koheesiomaiden-syvastabiloinnissa-kayttokokemukset-ja-ymparistovaikutukset\\_2023\\_12\\_12.pdf](https://uusiomaarakentaminen.fi/wp-content/uploads/sites/5/2024/01/UUMA4_Uusiosideaineet-koheesiomaiden-syvastabiloinnissa-kayttokokemukset-ja-ymparistovaikutukset_2023_12_12.pdf)

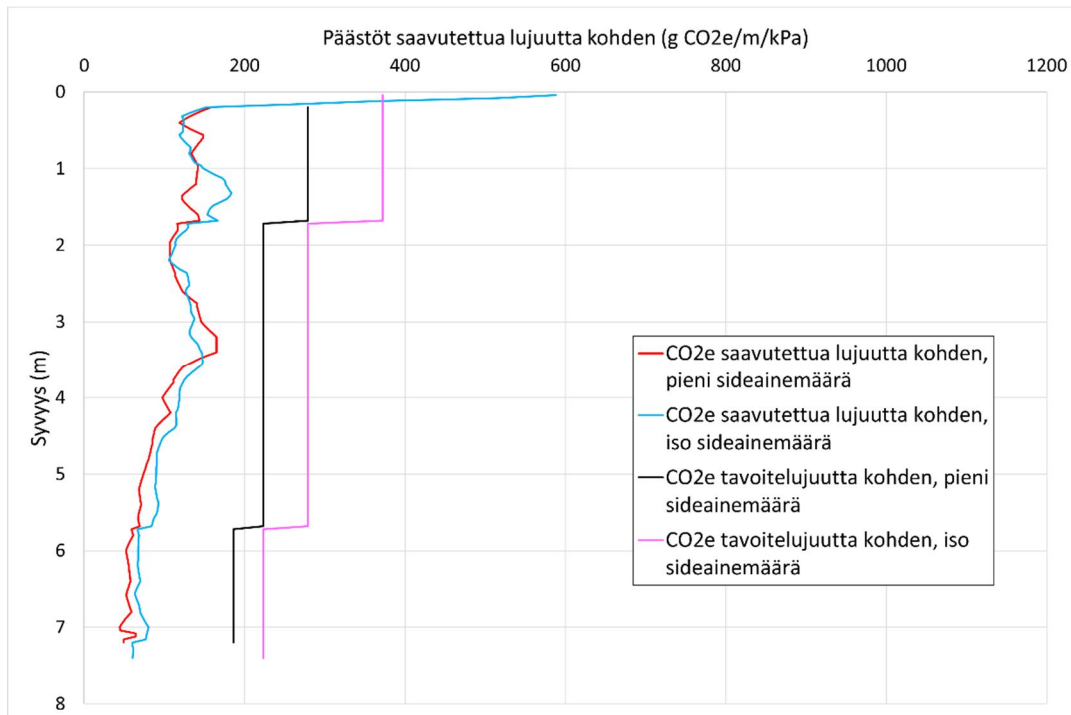
Väylävirasto 2022. Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa. Väyläviraston ohjeita 20/2022. Saatavissa: [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2022-20\\_uusiomateriaalien\\_kaytto\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-20_uusiomateriaalien_kaytto_web.pdf)

## Liitteet

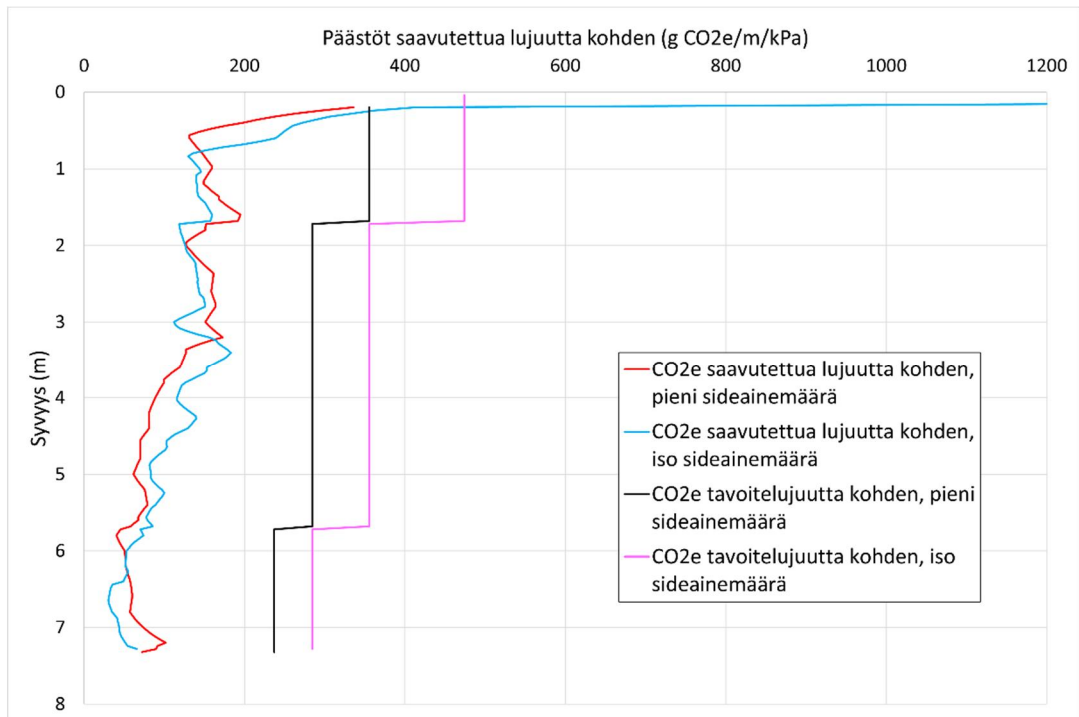
### Liite 1. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden PS1, 90d



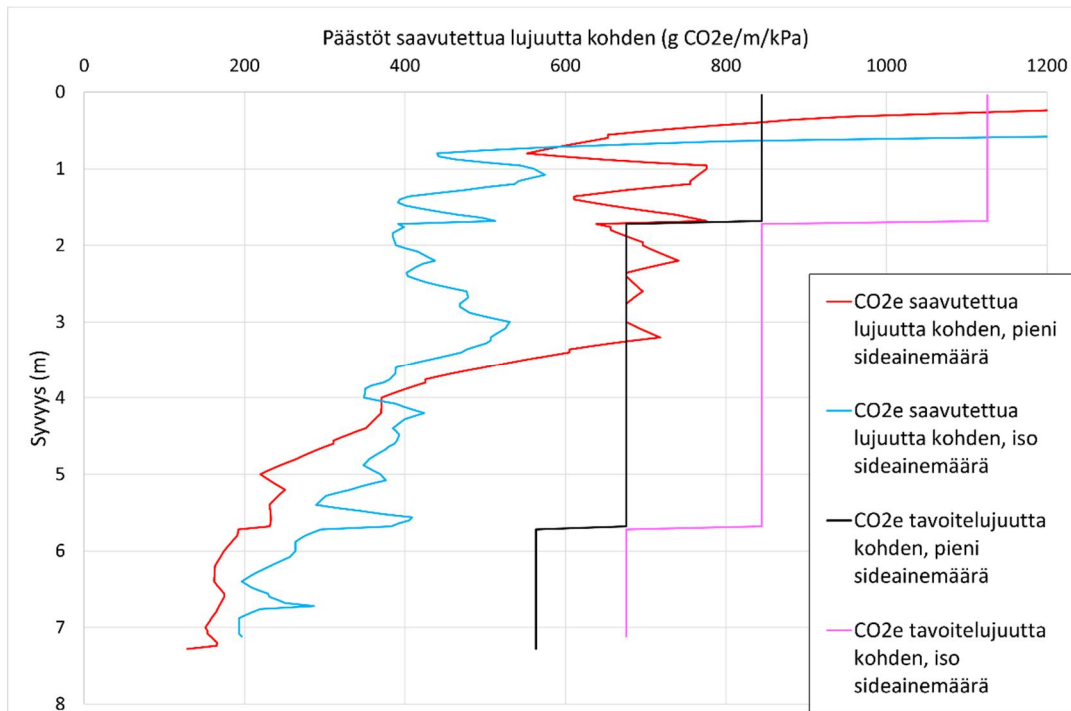
Kuva 28 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine CEMIII/A. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.



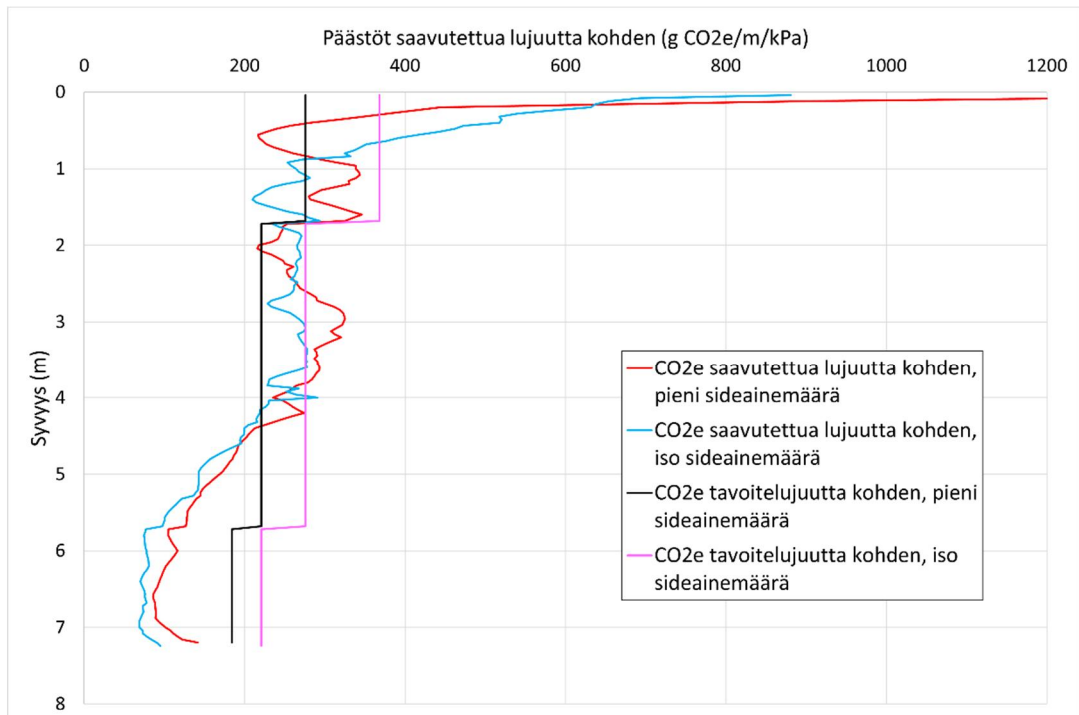
**Kuva 29 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GTC. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**



**Kuva 30 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GREEN. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**

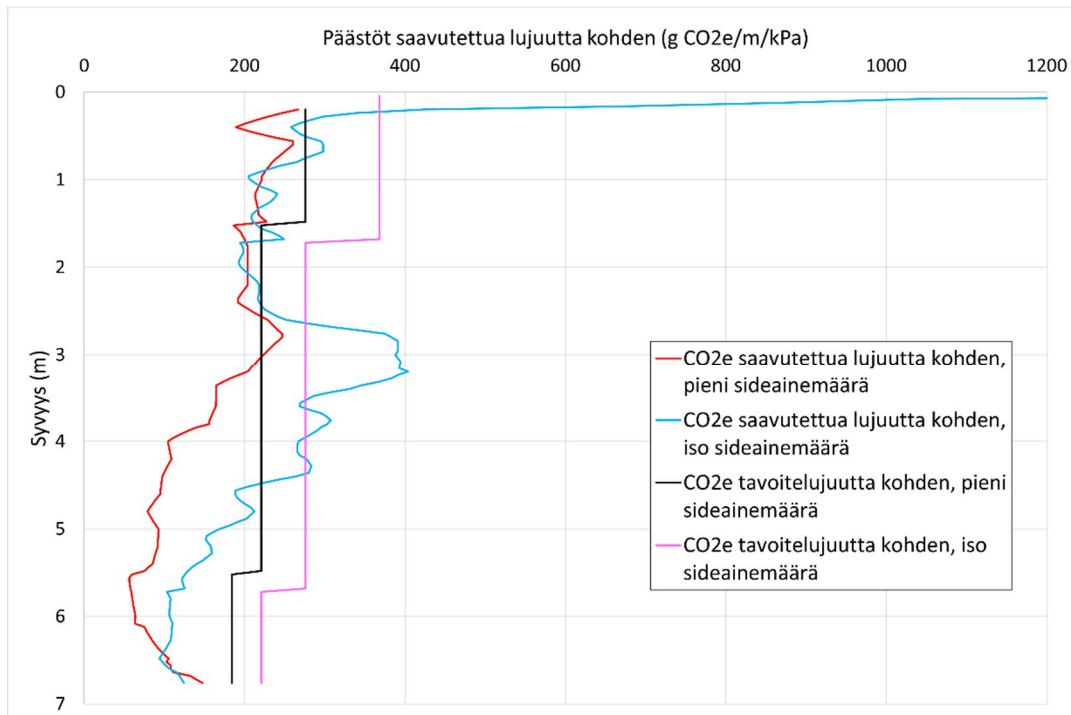


**Kuva 31 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine POZ. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**

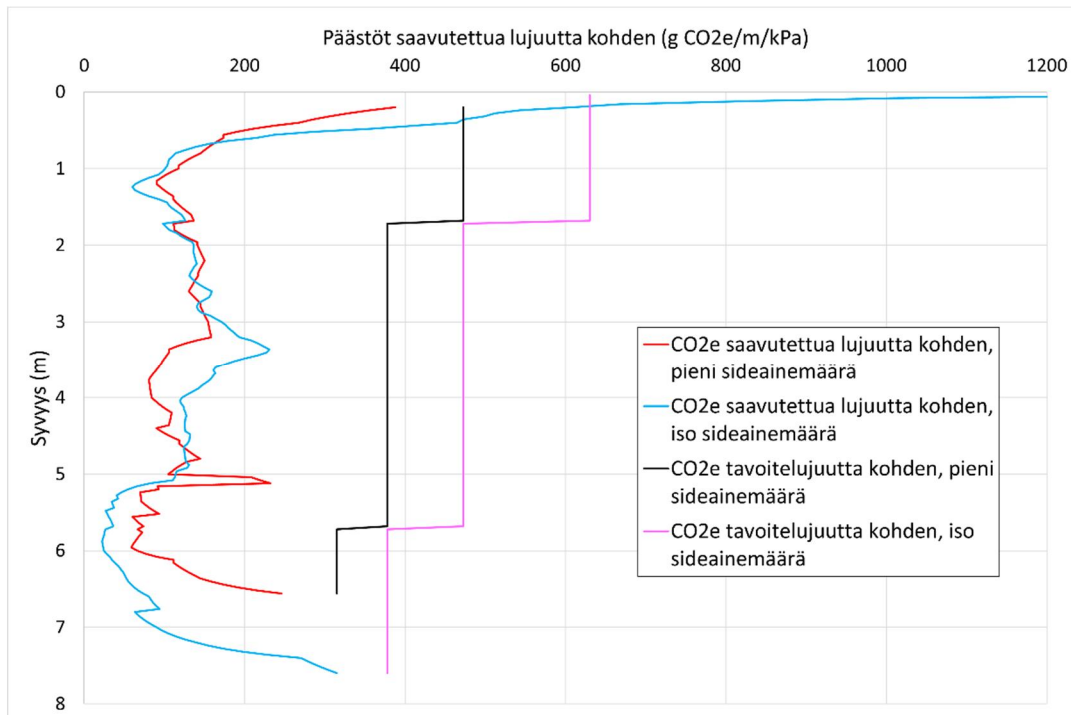


**Kuva 32 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine UPM LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**

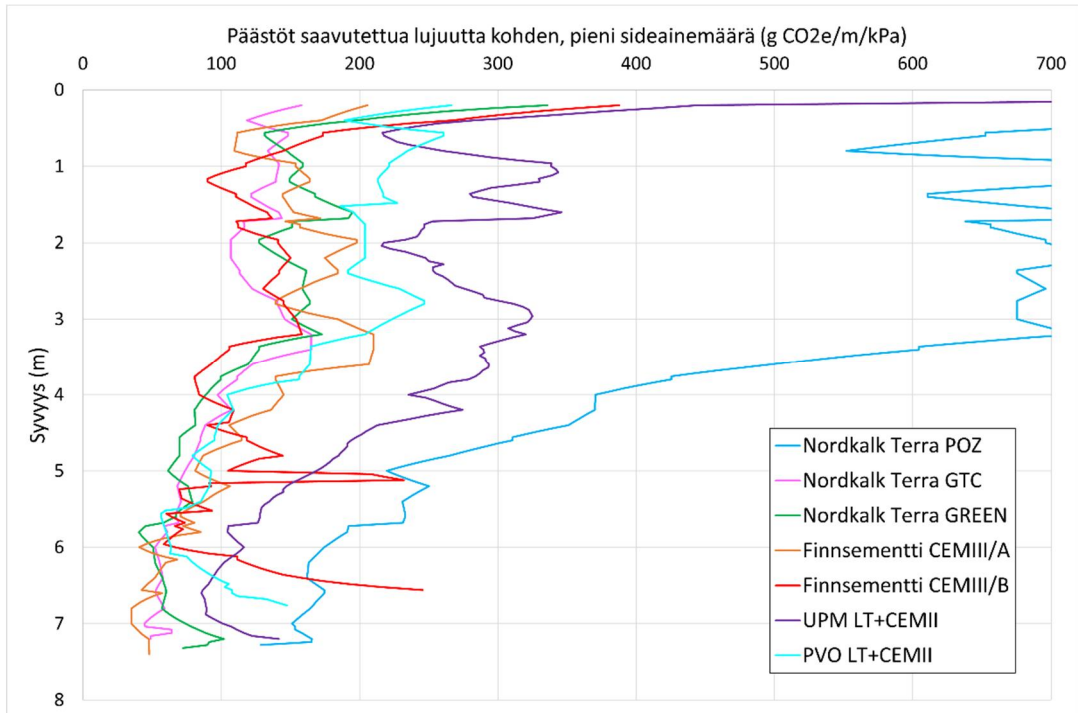




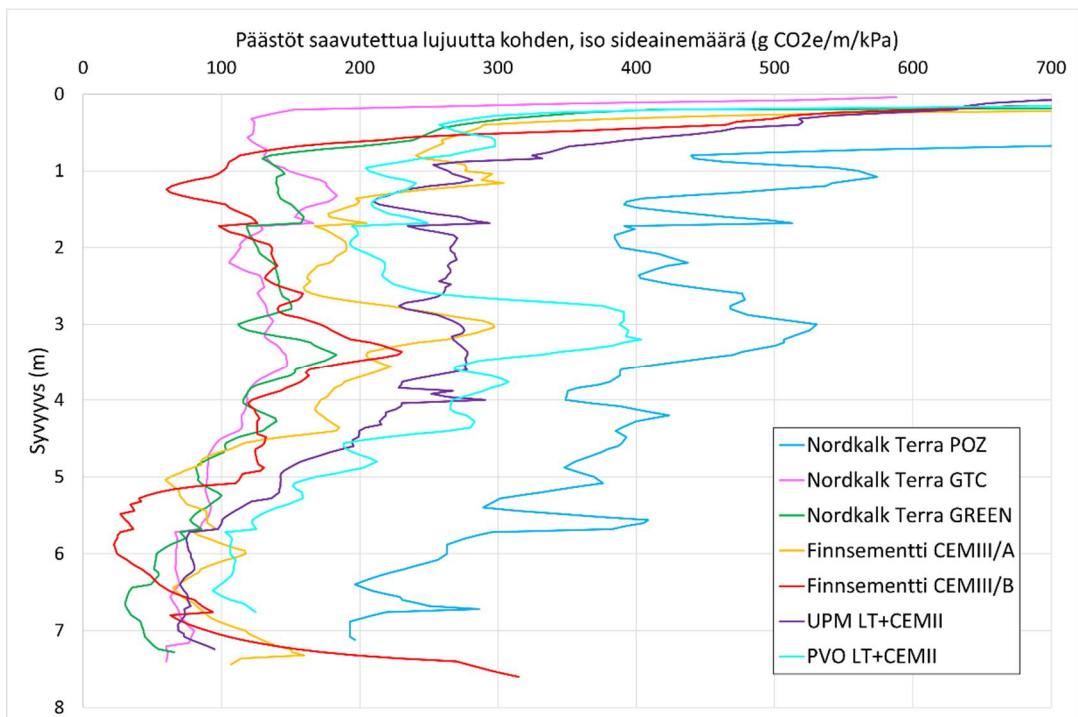
**Kuva 33 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine Kaukaan voima LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**



**Kuva 34 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine CEMIII/B. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**

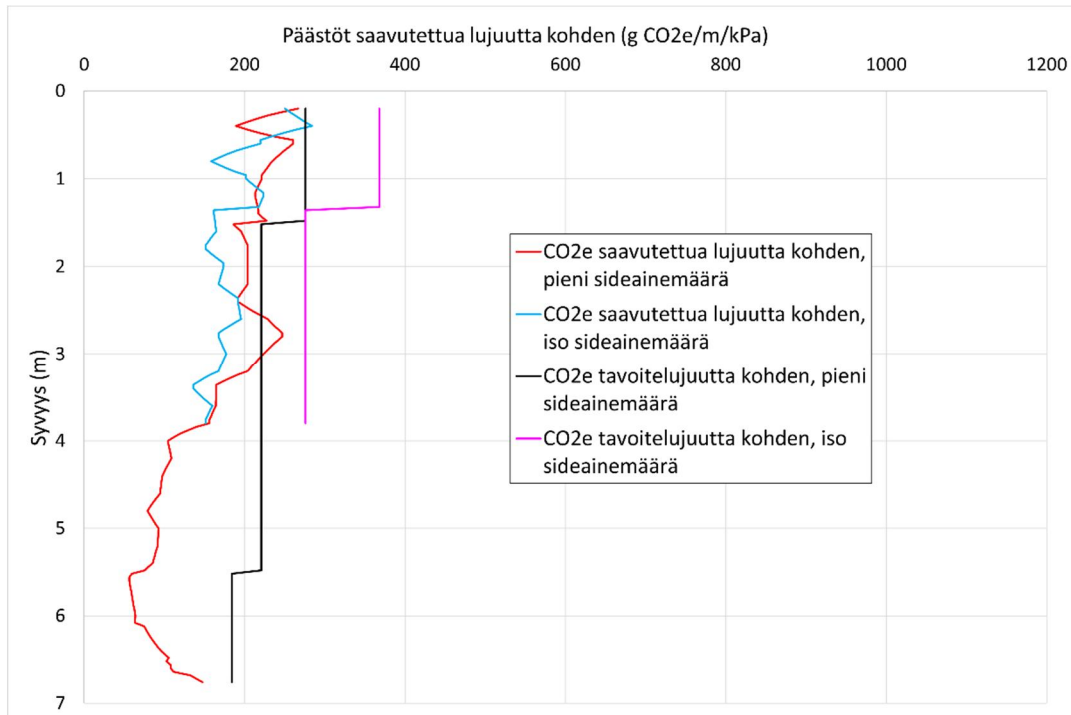


**Kuva 35 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, pieni sideainemäärä**

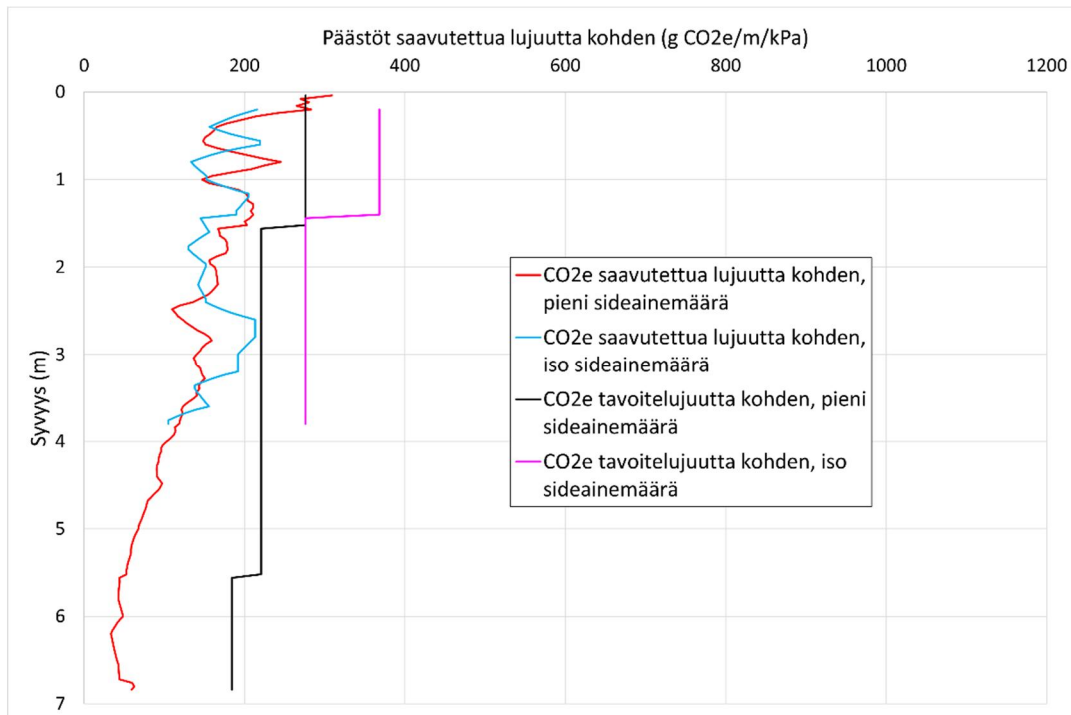


**Kuva 36 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, iso sideainemäärä**

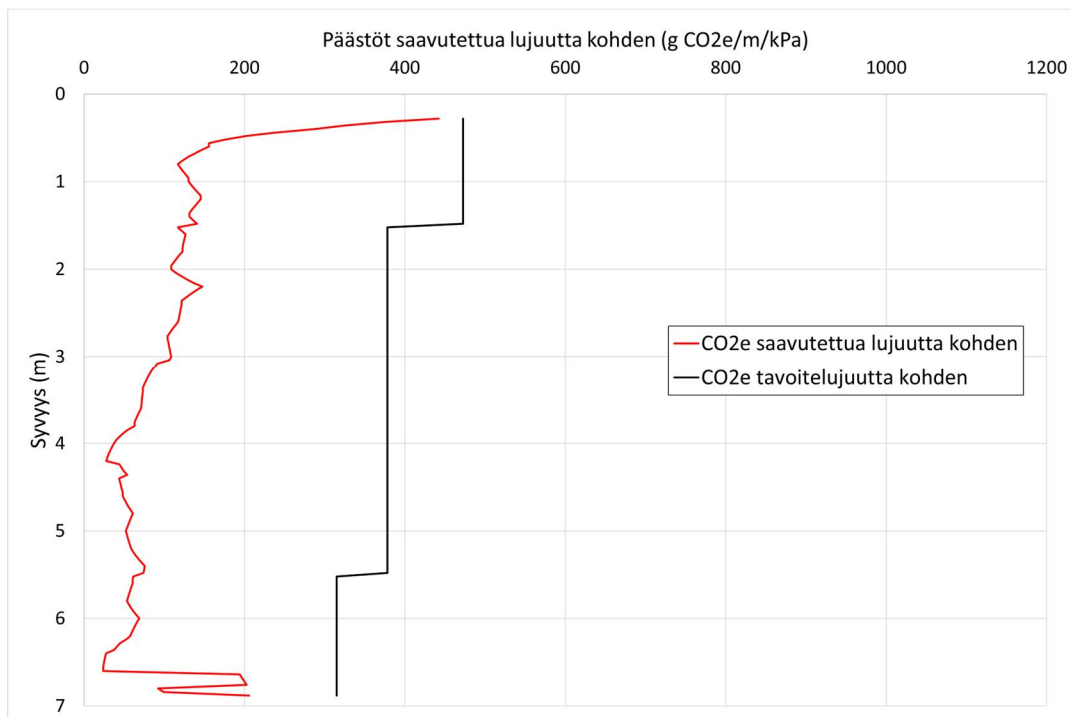
## Liite 2. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden PS1, 12kk



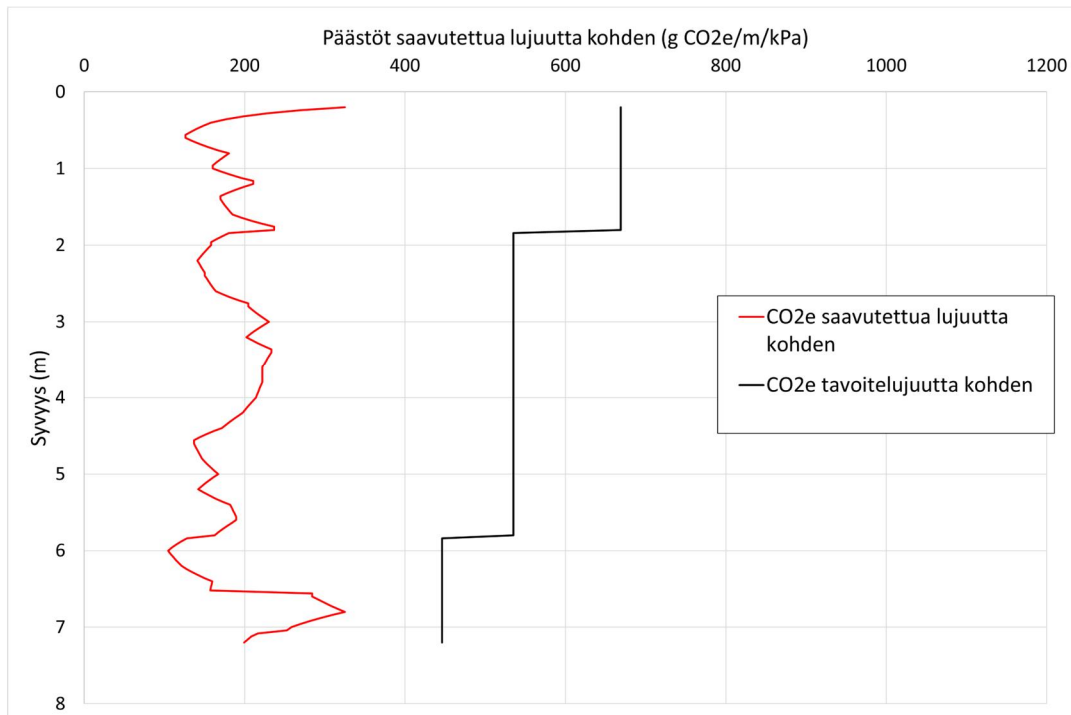
Kuva 37 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine Kaukaan voima LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.



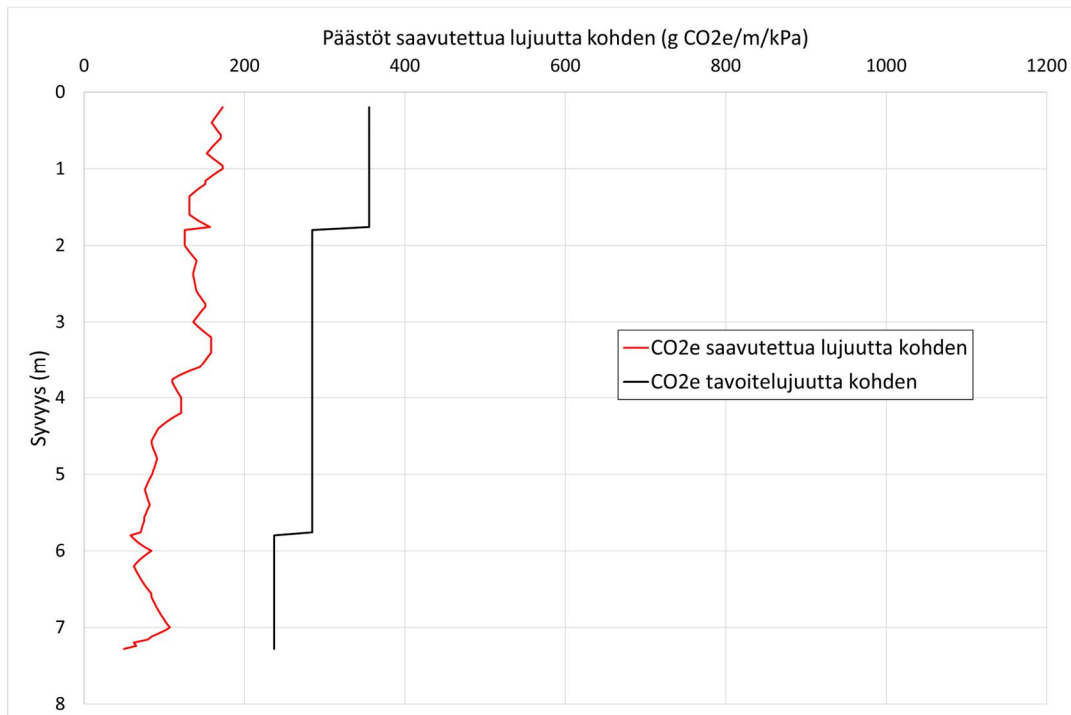
**Kuva 38 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine UPM LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**



**Kuva 39 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 12k, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine CEMIII/B. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.**

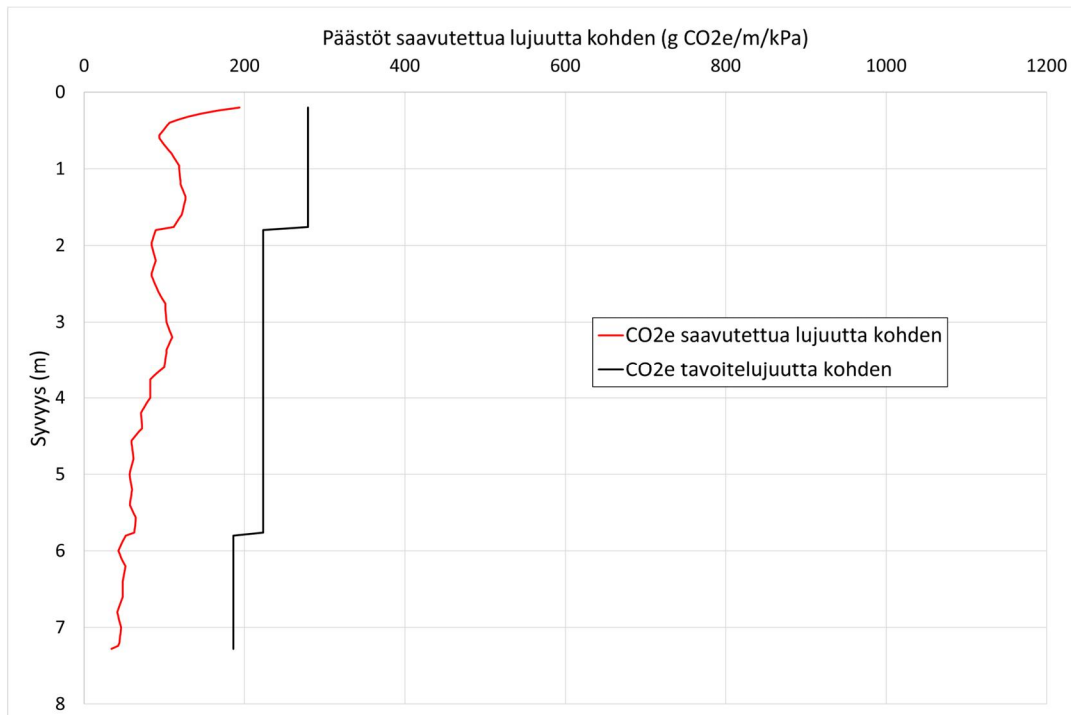


**Kuva 40 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 12k, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine CEMIII/A. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.**

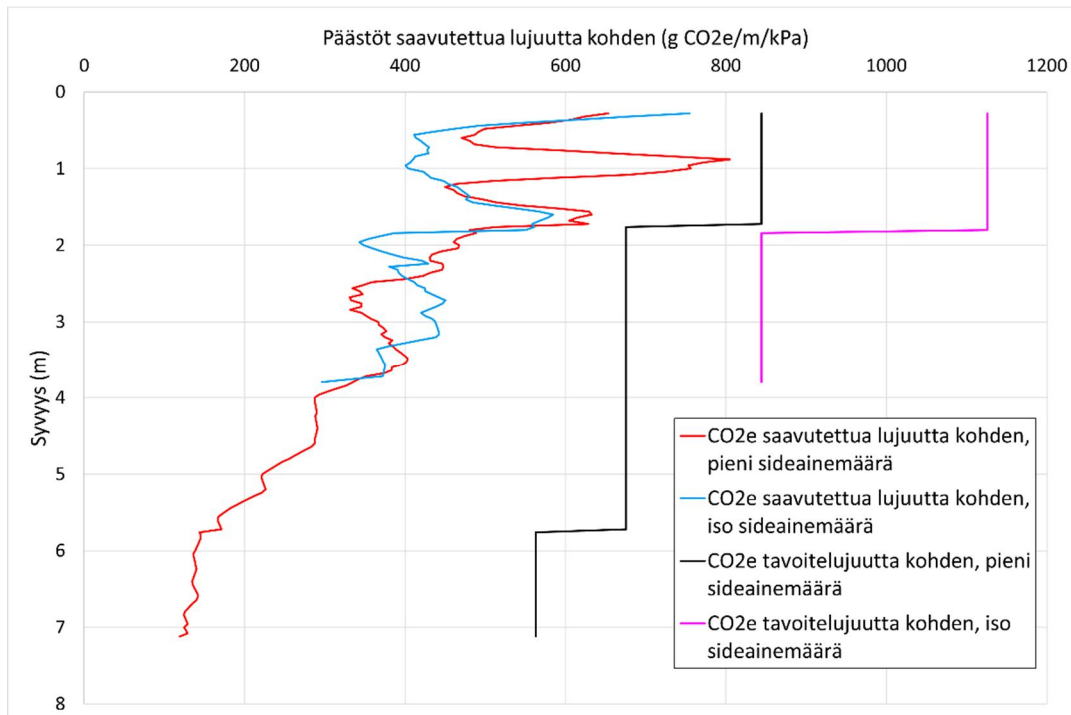


**Kuva 41 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 12k, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine GREEN. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.**

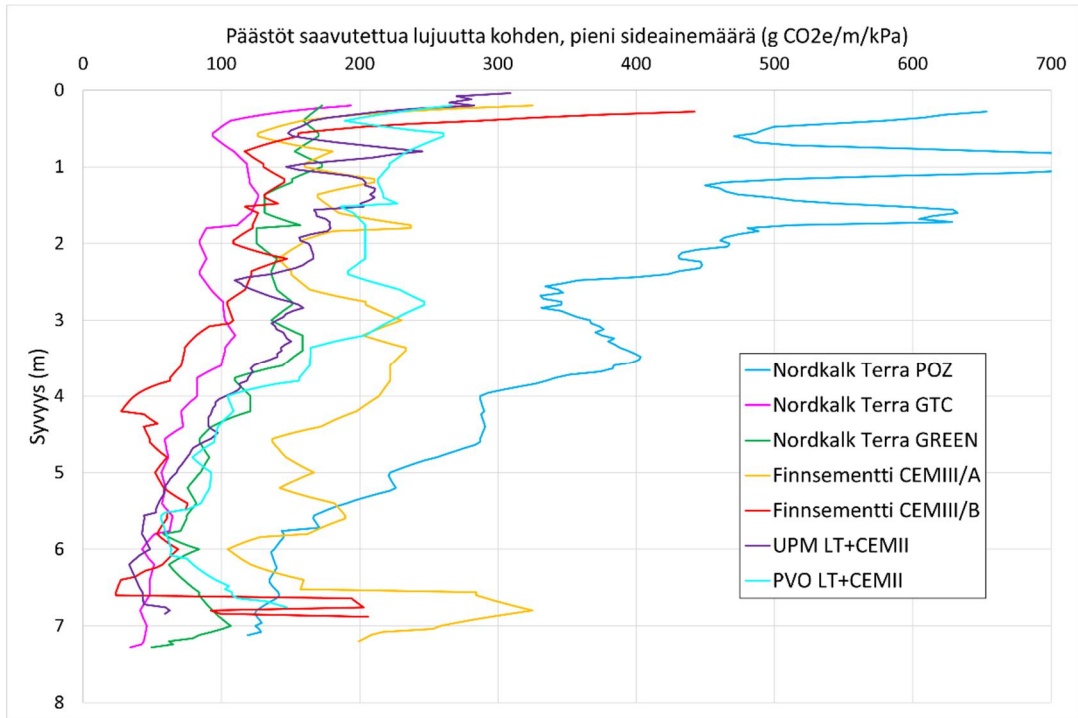




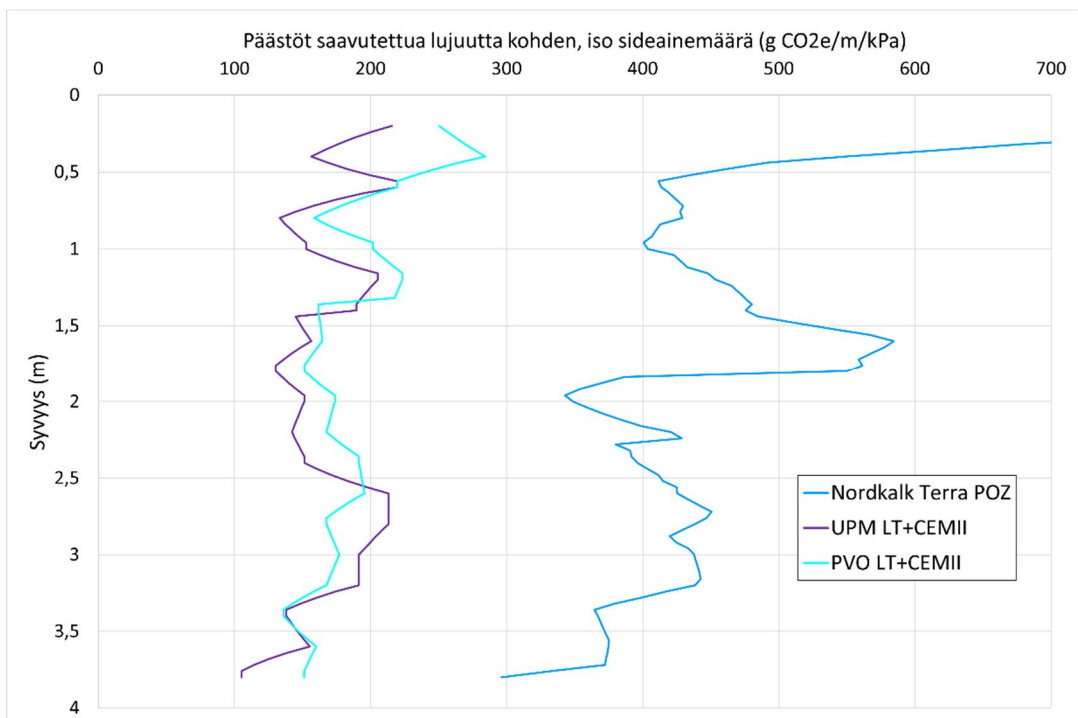
**Kuva 42 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 12k, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine GTC. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.**



**Kuva 43 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine POZ. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**

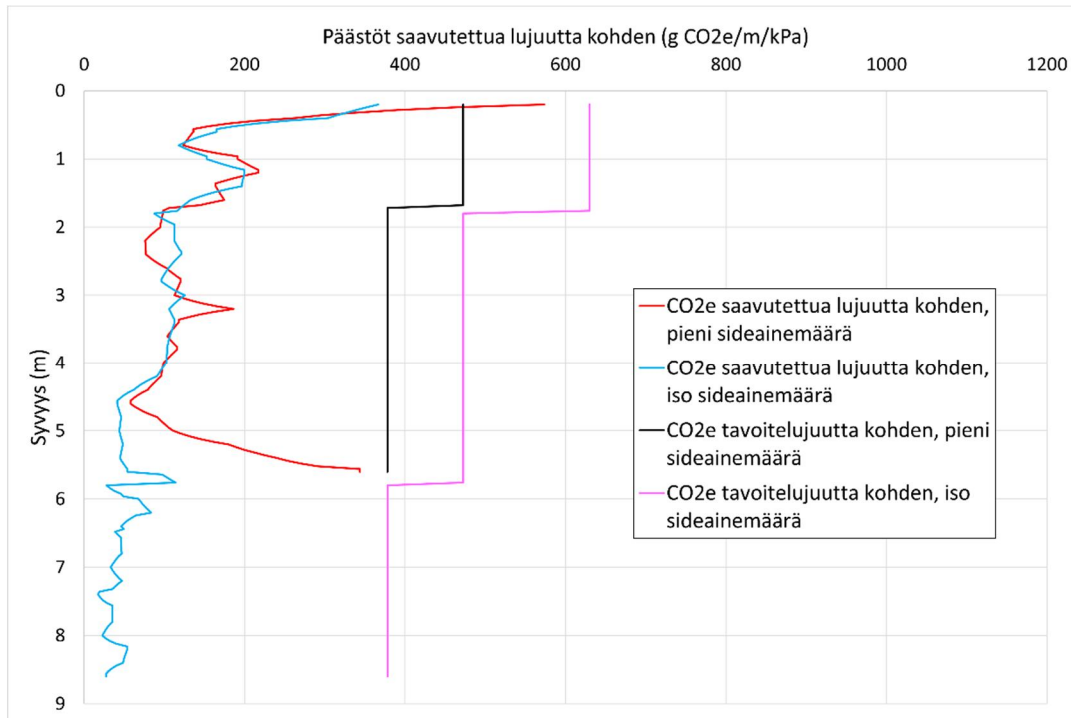


**Kuva 44 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, pieni sideainemäärä.**

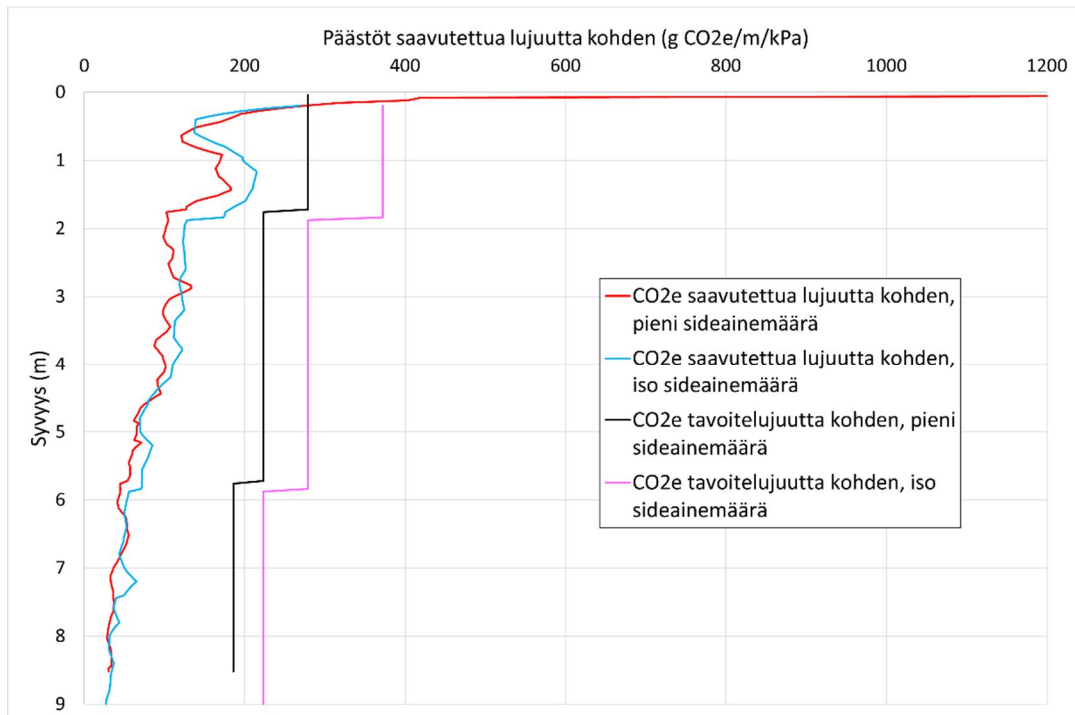


**Kuva 45 Malminkenttä, koekenttä PS1, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, iso sideainemäärä.**

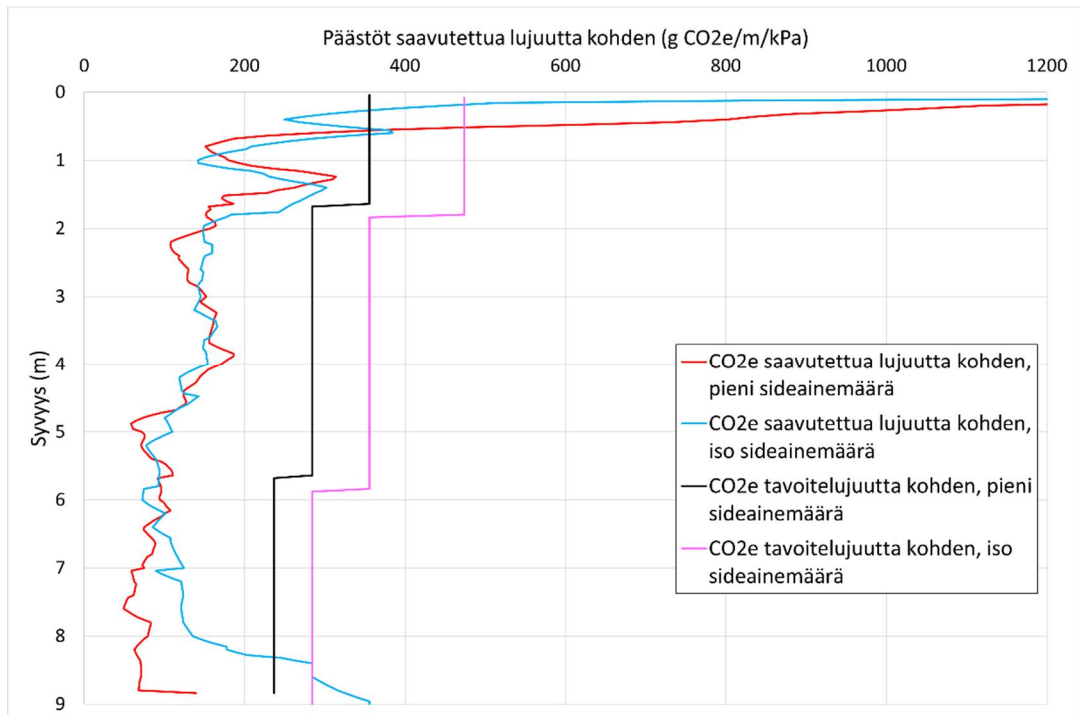
### Liite 3. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden PS4, 90d



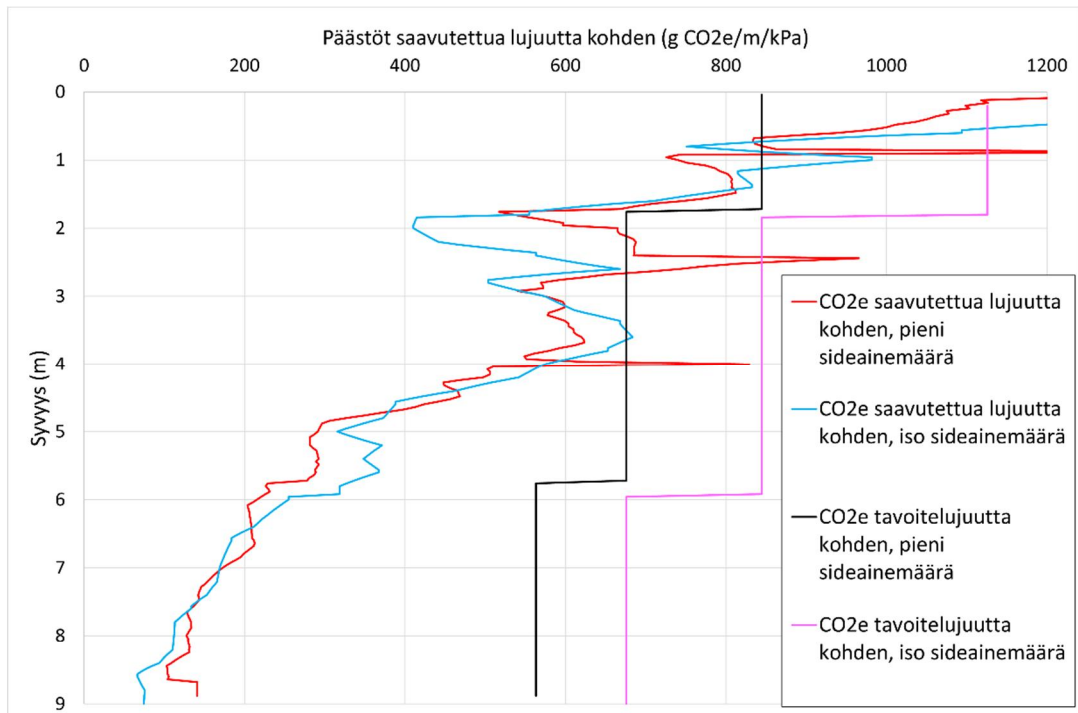
Kuva 46 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine CEMIII/B. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.



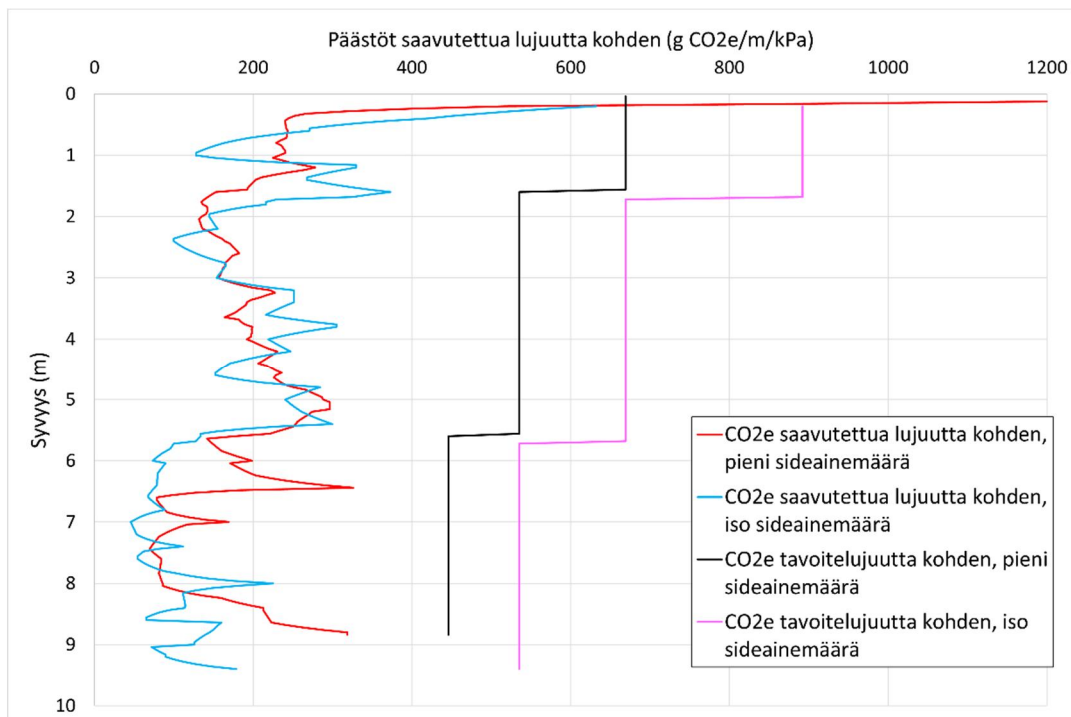
**Kuva 47 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GTC. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**



**Kuva 48 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GREEN. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**

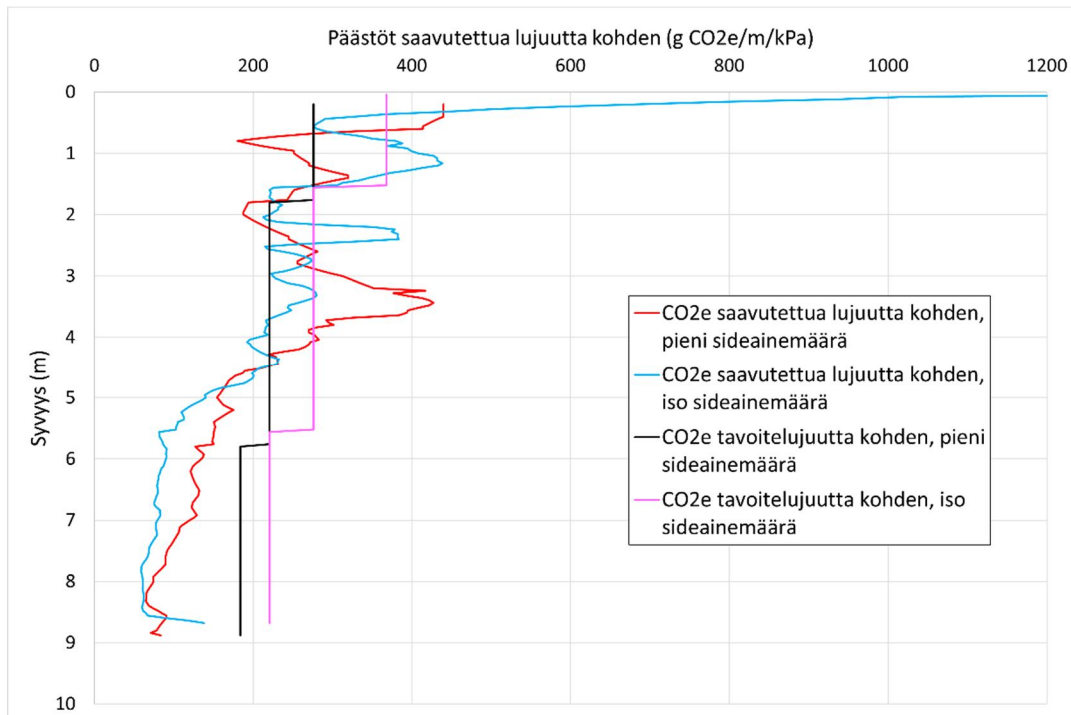


**Kuva 49** Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine POZ. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.

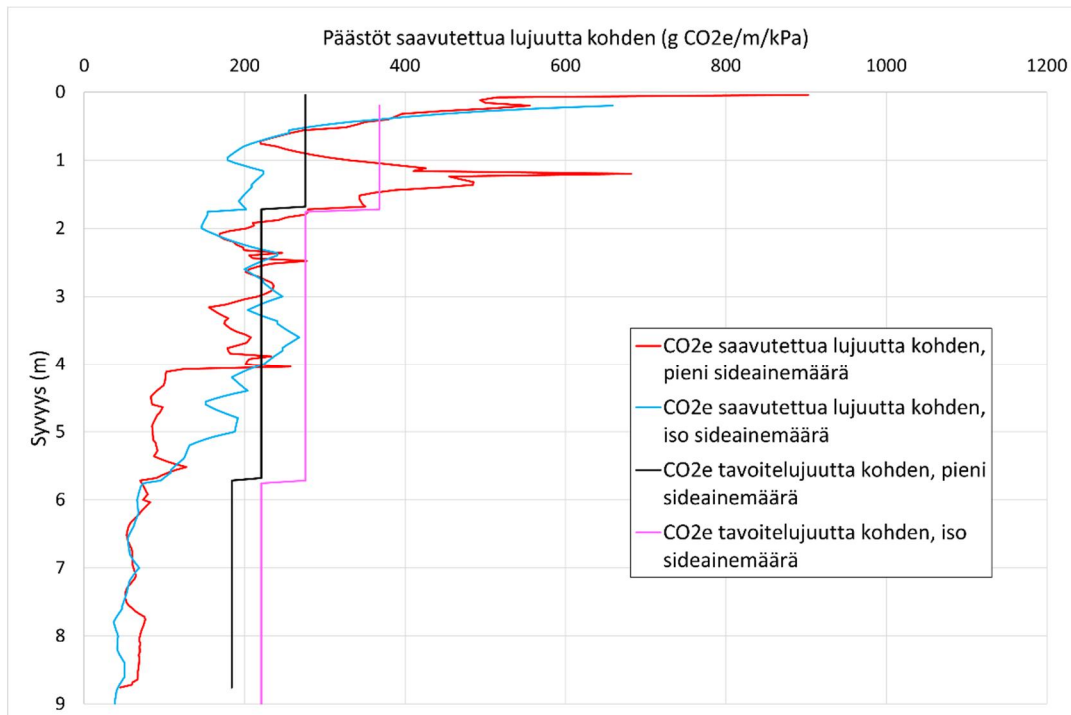


**Kuva 50 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine CEMIII/A. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**

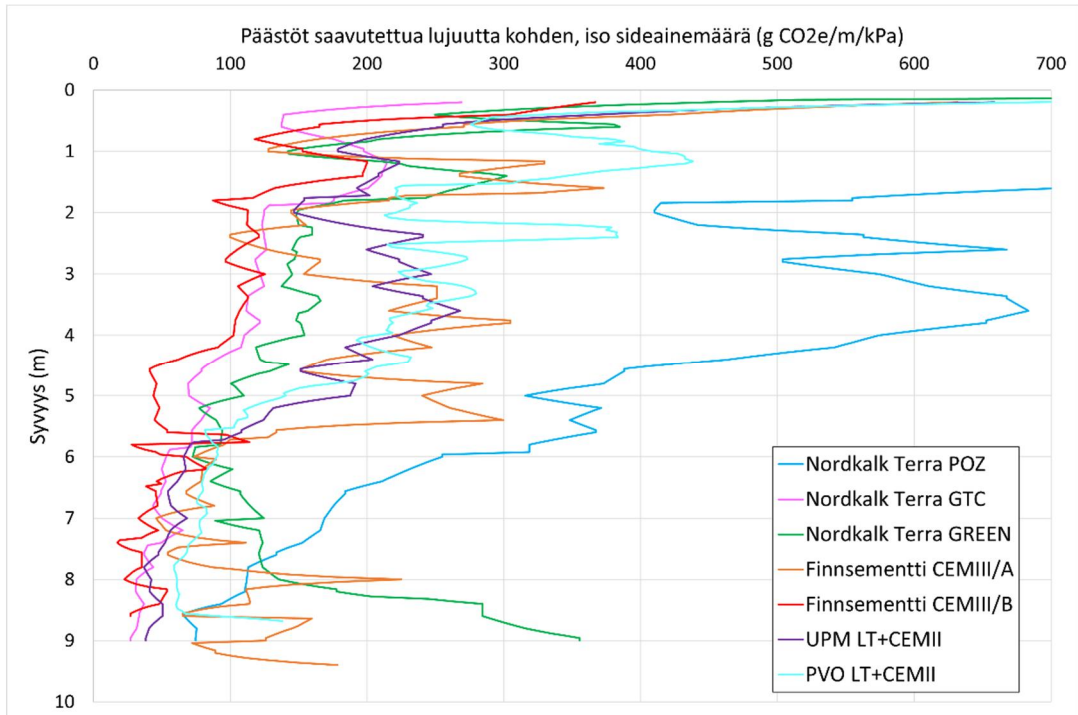




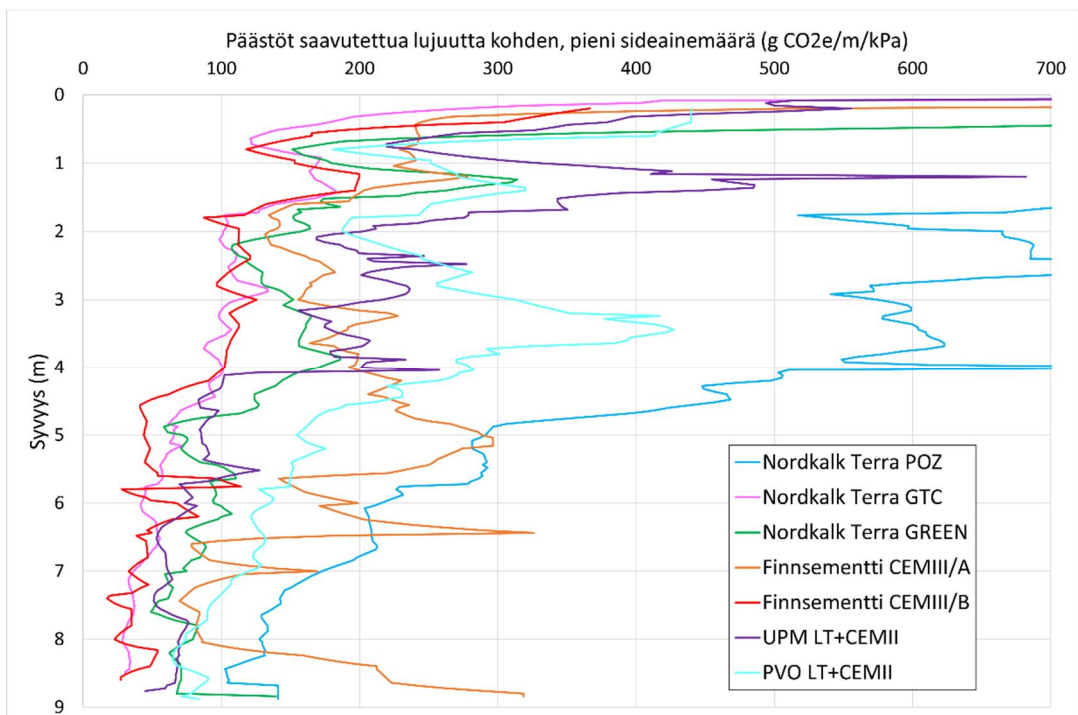
**Kuva 51 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine Kaukaan voima LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**



**Kuva 52 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine UPM LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**

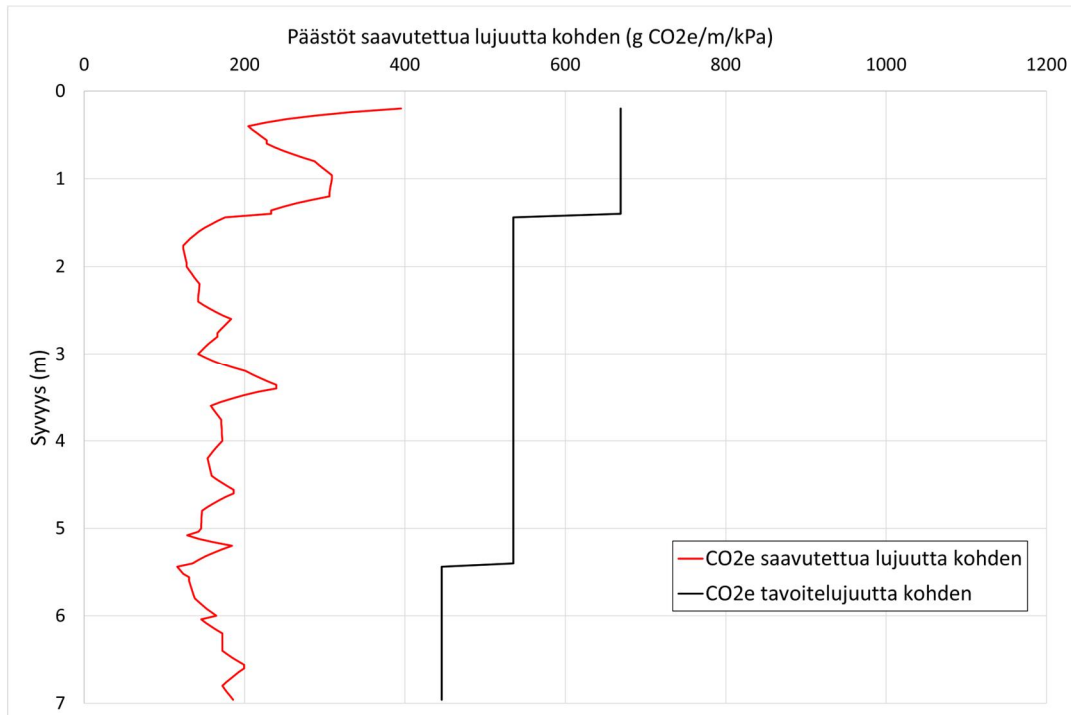


**Kuva 53 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujutta kohden, tulosten vertailu, iso sideainemäärä.**

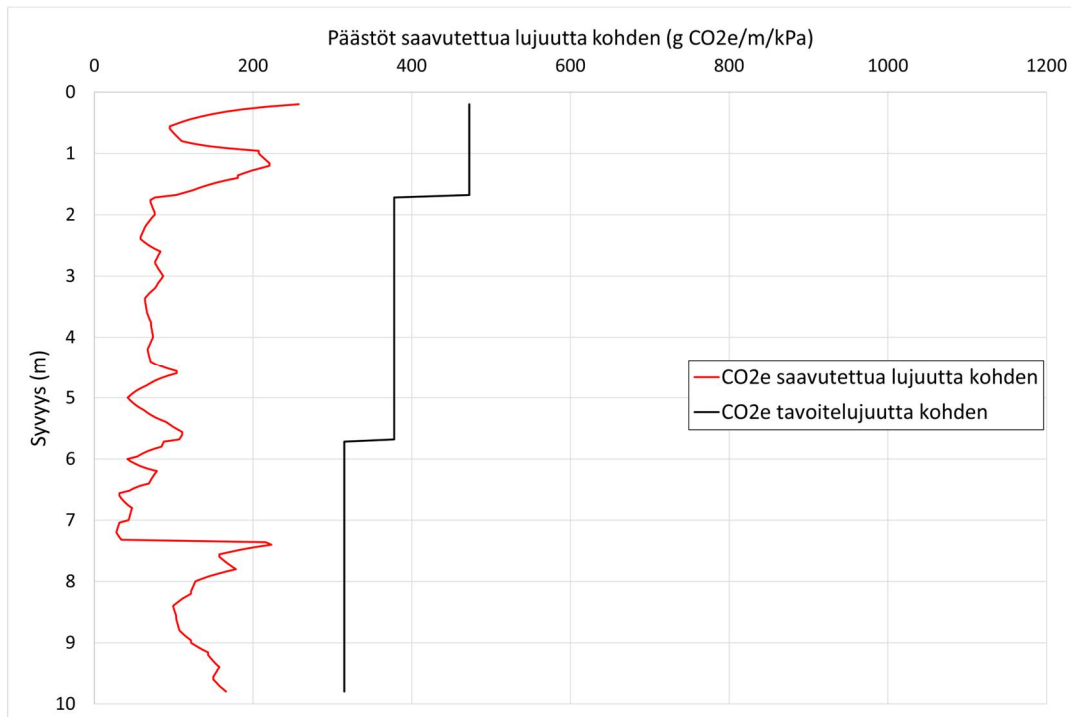


**Kuva 54 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujutta kohden, tulosten vertailu, pieni sideainemäärä.**

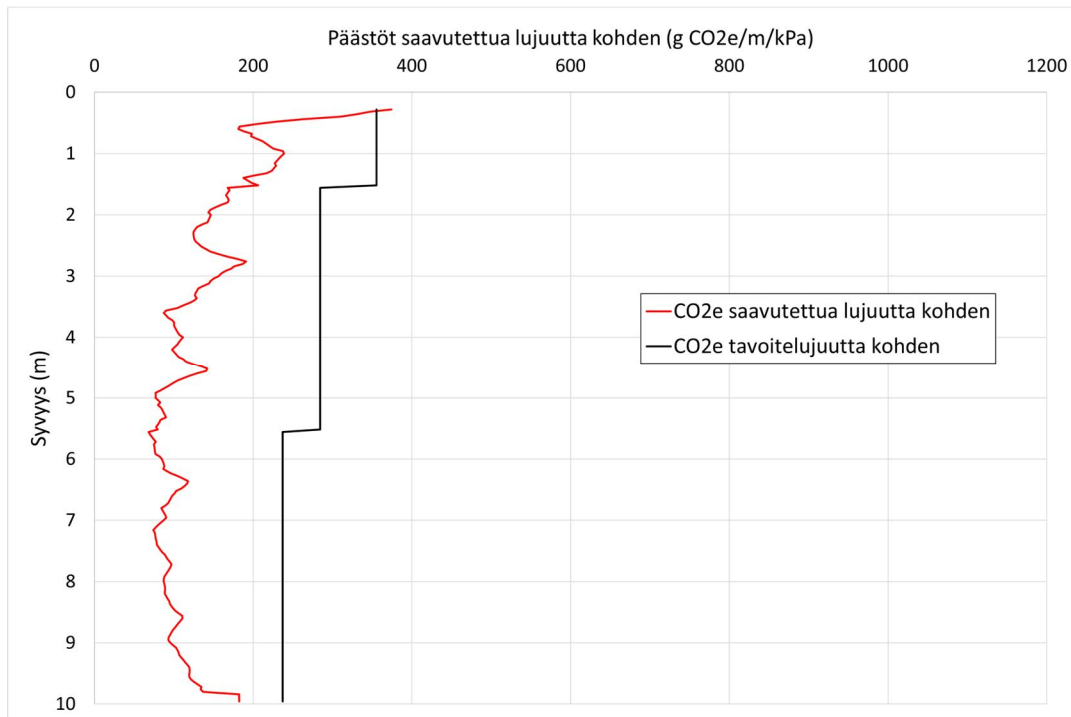
## Liite 4. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden PS4, 12kk



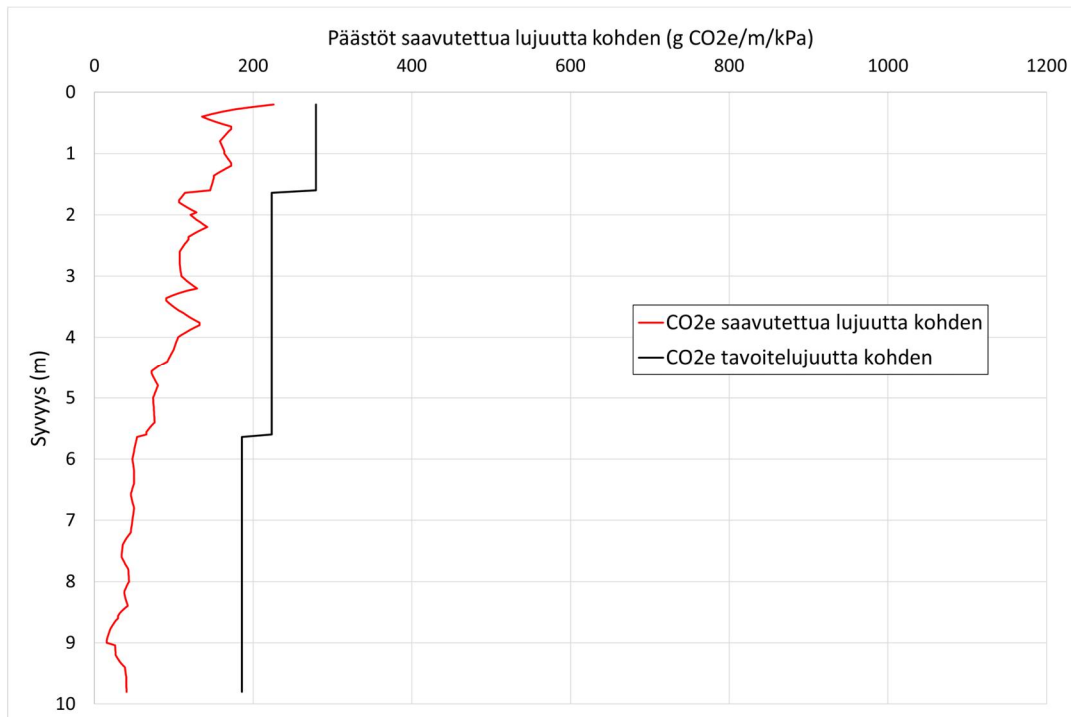
Kuva 55 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 12k, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine CEMIII/A. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.



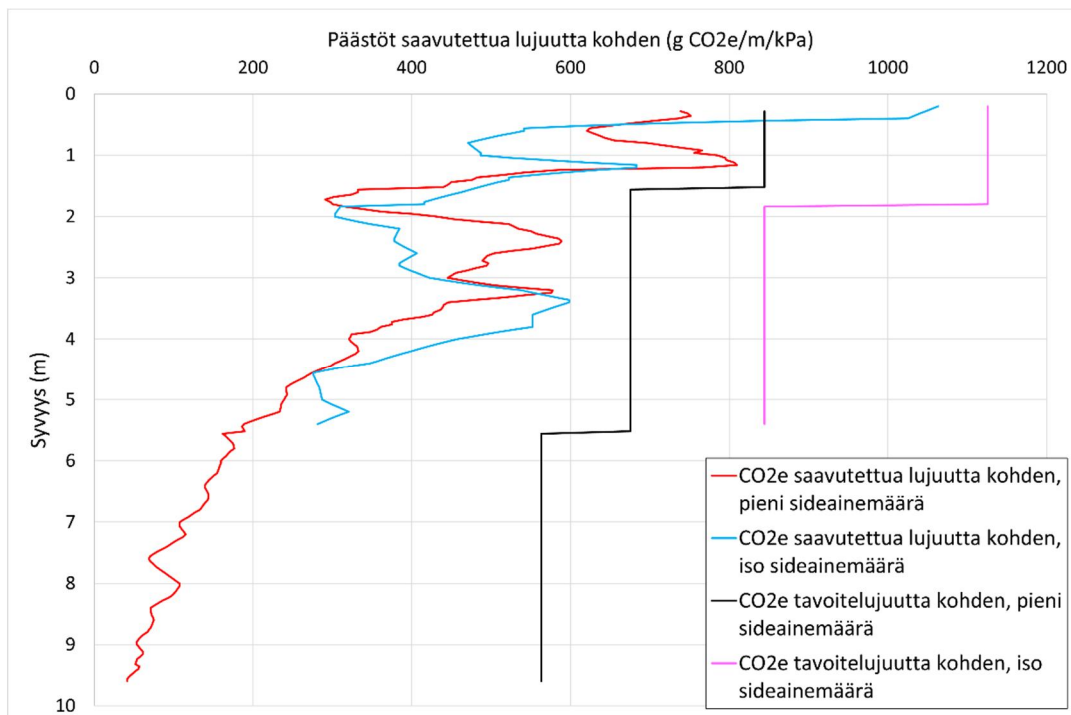
**Kuva 56 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine CEMIII/B. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.**



**Kuva 57 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine GREEN. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.**

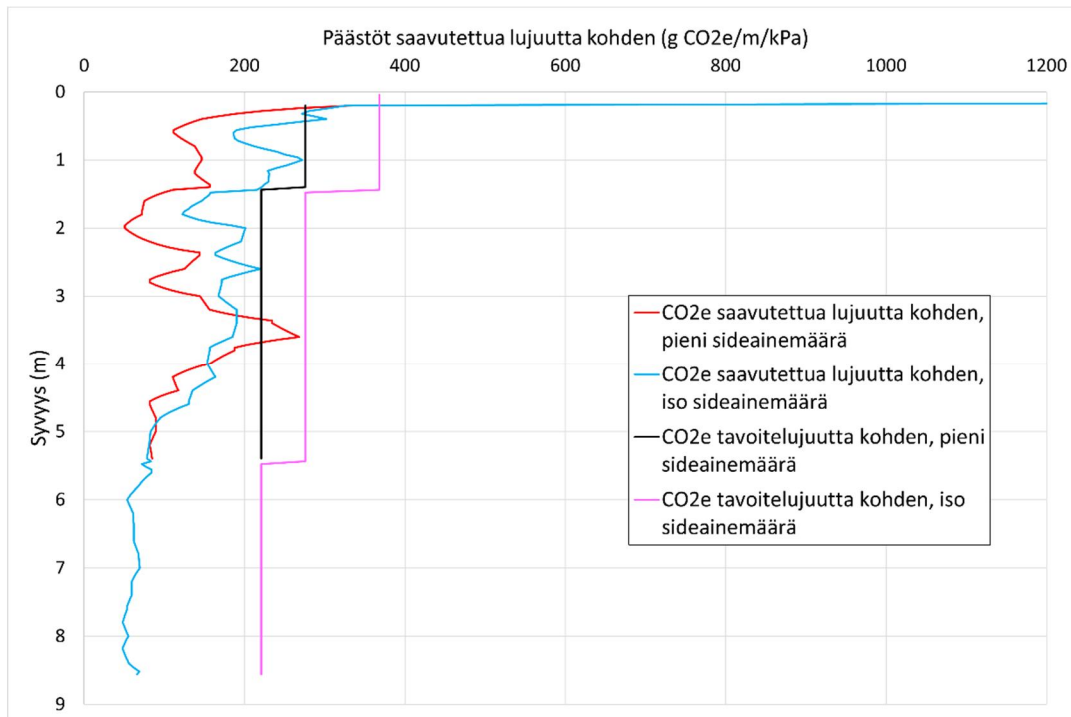


**Kuva 58 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine GTC. Sideainemäärät eri syvyyksille on esitetty taulukossa 10. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.**

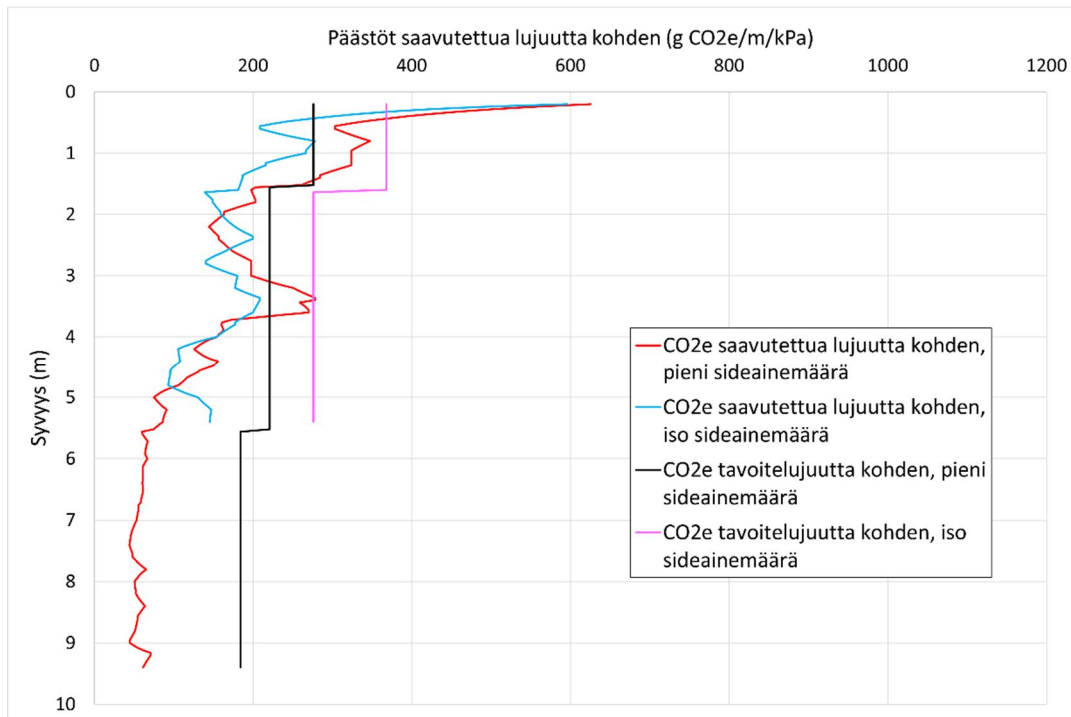


**Kuva 59** Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine POZ. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.

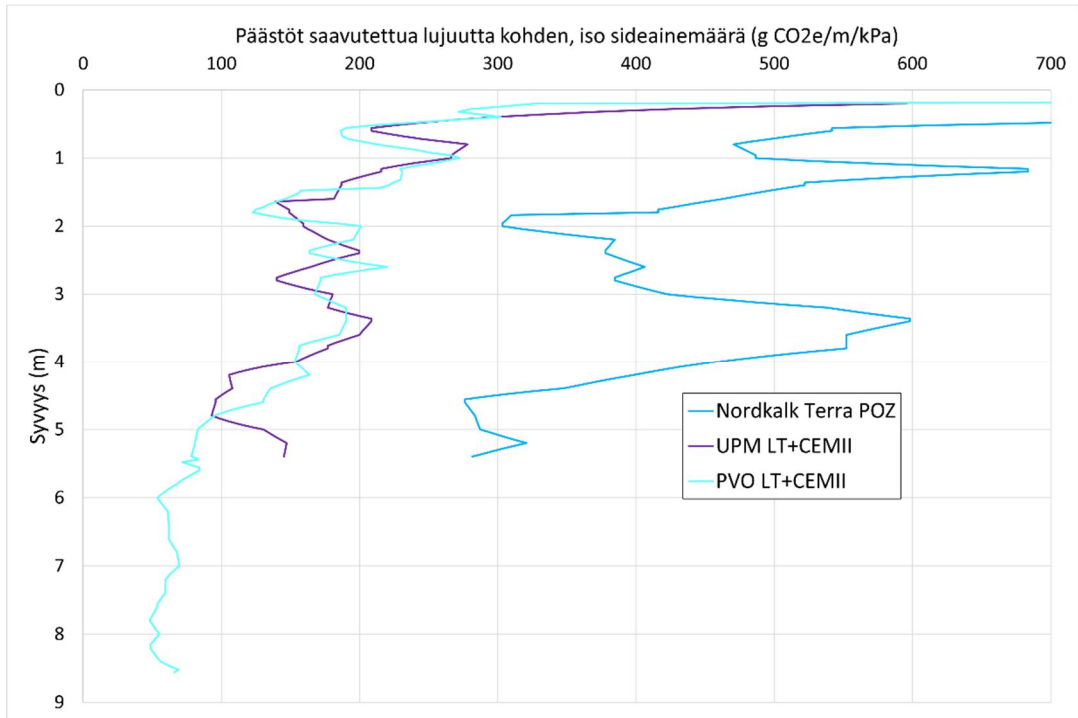




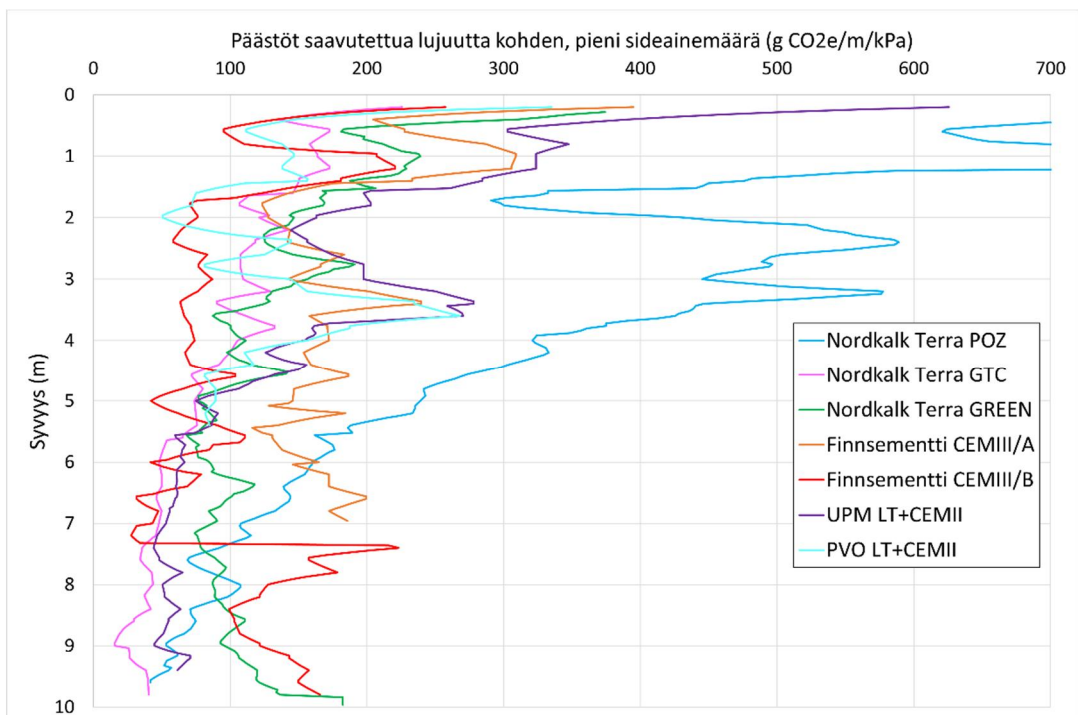
**Kuva 60 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine Kaukaan voima LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**



**Kuva 61 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine UPM LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 10.**

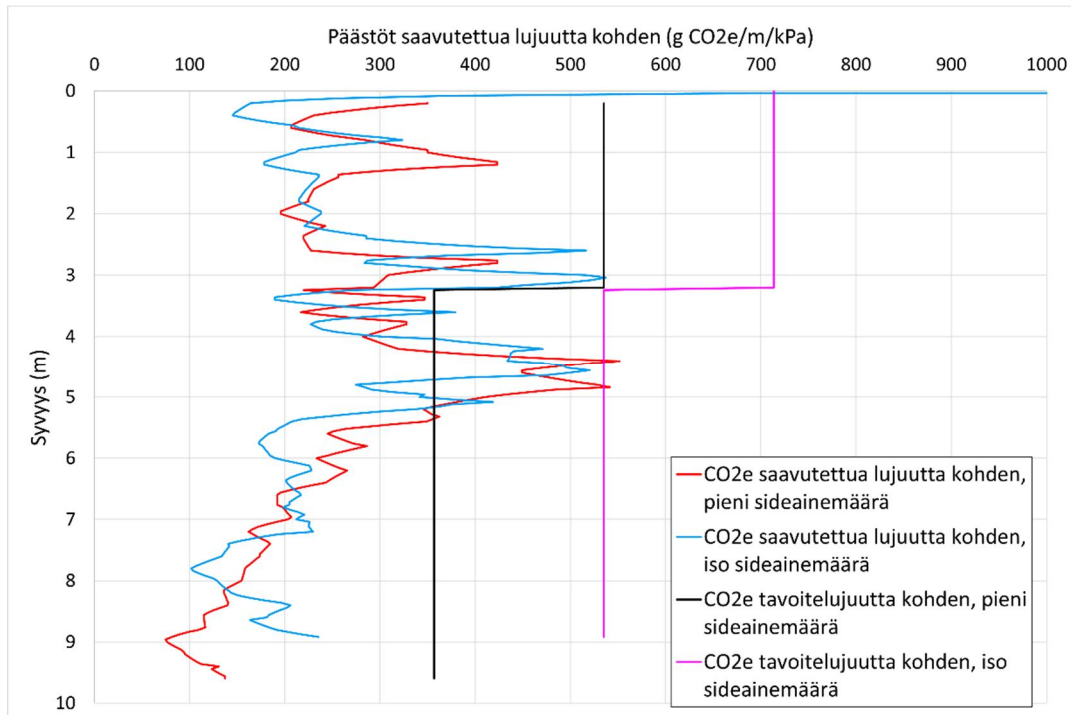


**Kuva 62 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, iso sideainemäärä.**

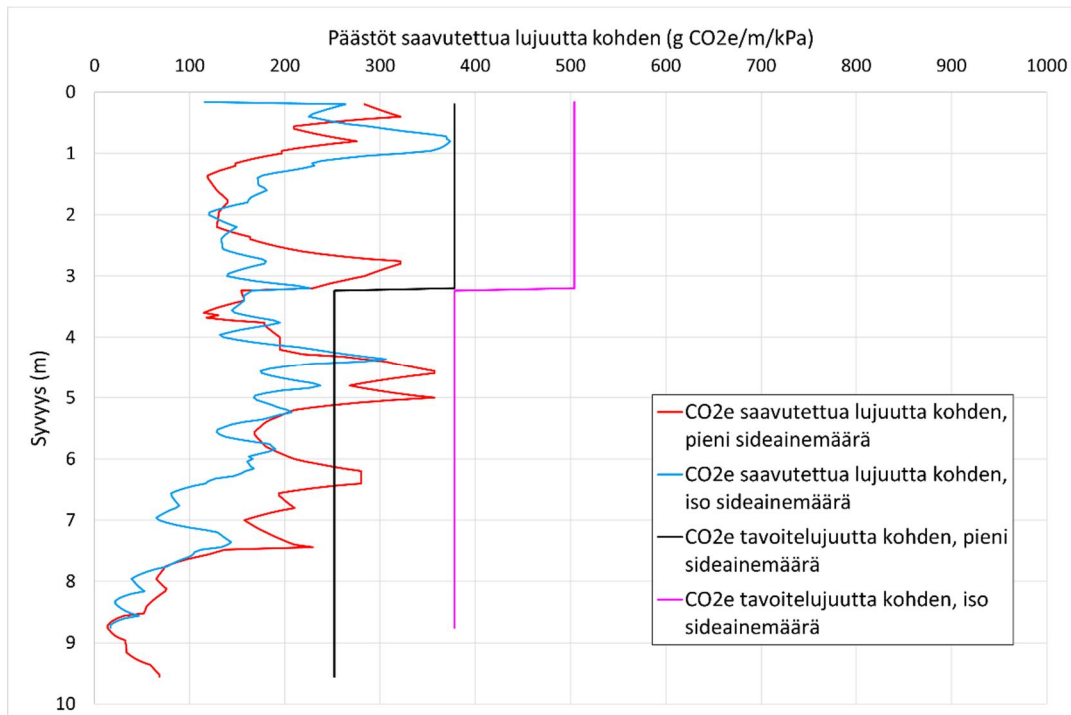


**Kuva 63 Malminkenttä, koekenttä PS4, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, pieni sideainemäärä.**

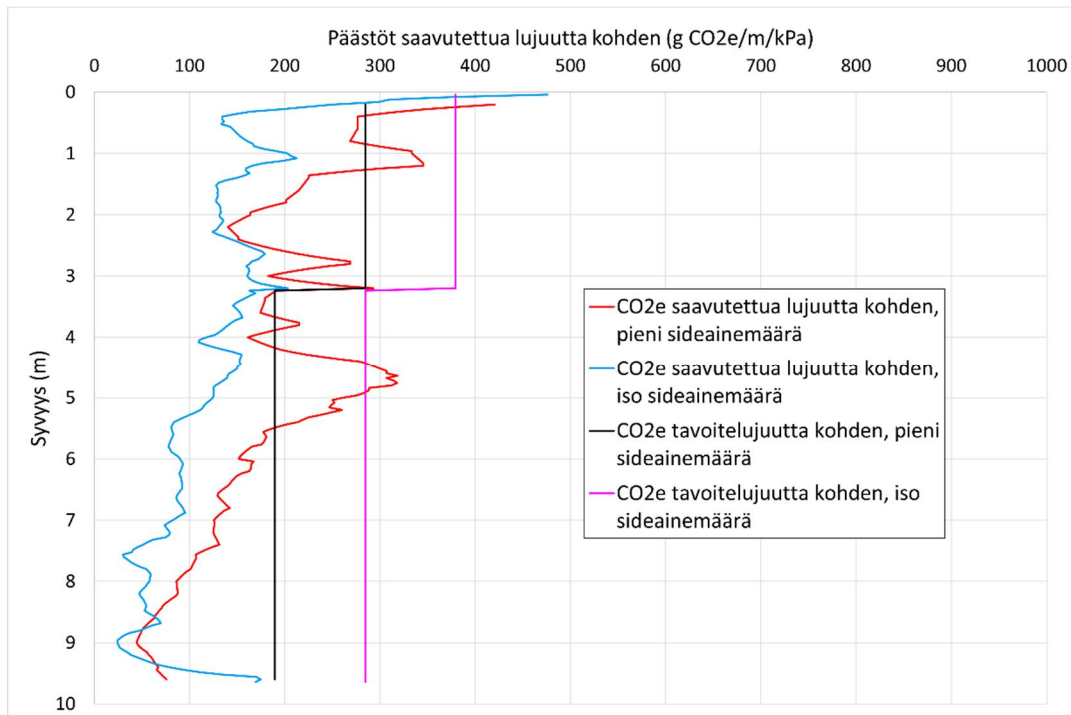
## Liite 5. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden, PS6, 90d



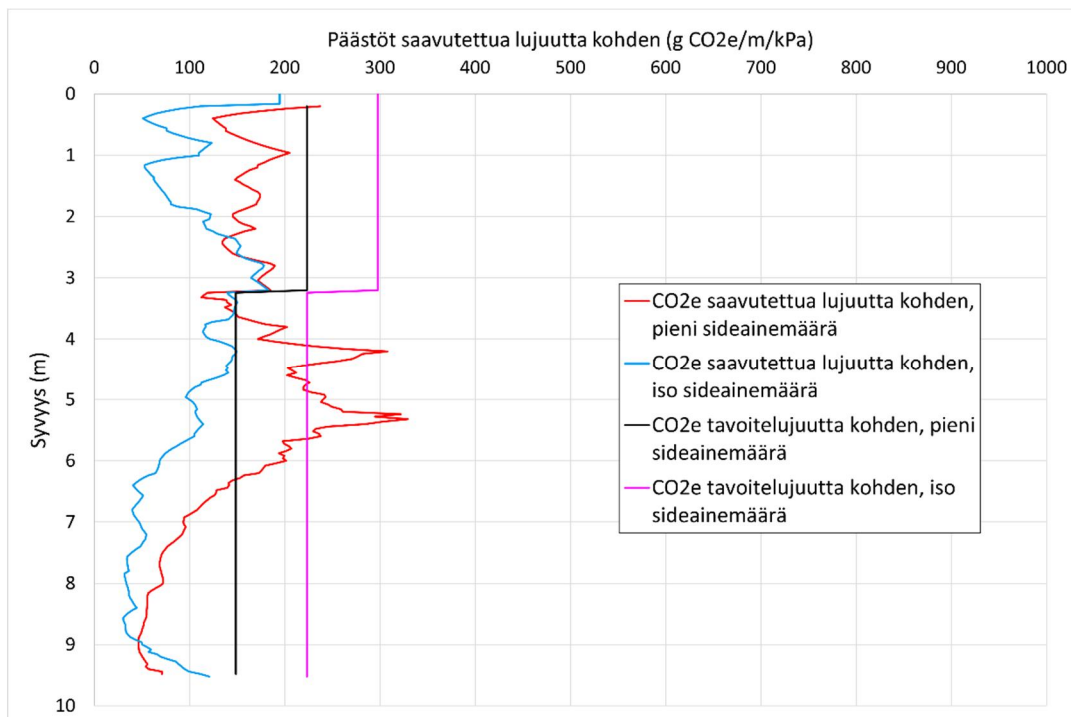
**Kuva 64 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine CEMIII/A. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.**



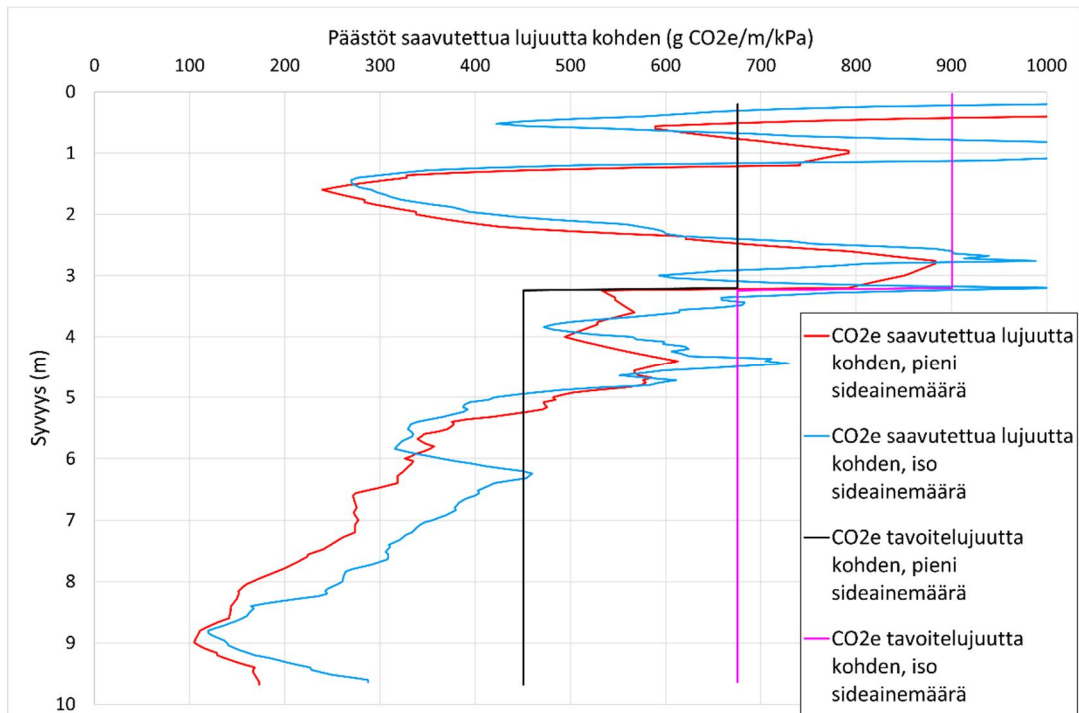
**Kuva 65 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine CEMIII/B. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.**



**Kuva 66 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GREEN. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.**

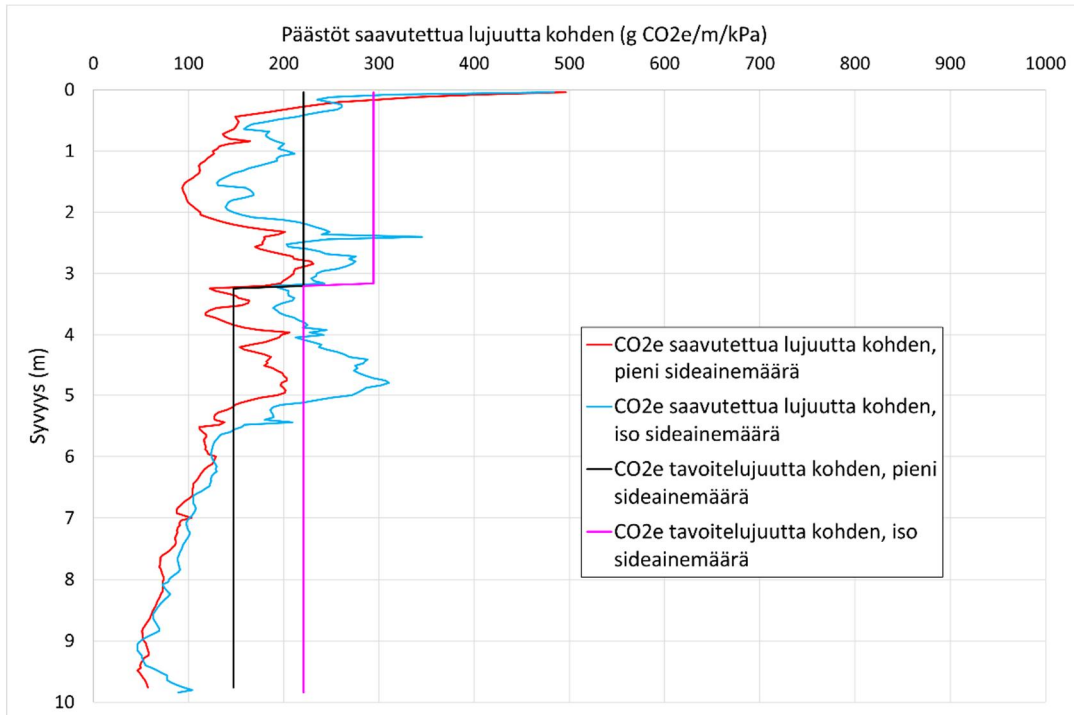


**Kuva 67 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GTC. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.**

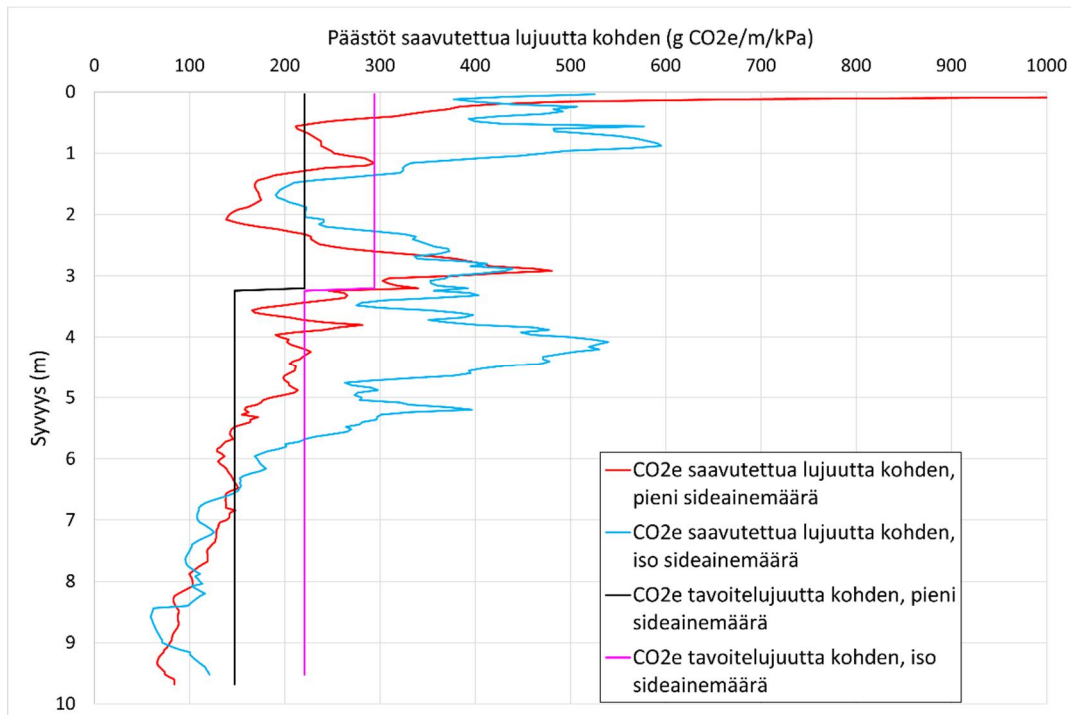


**Kuva 68 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine POZ. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.**

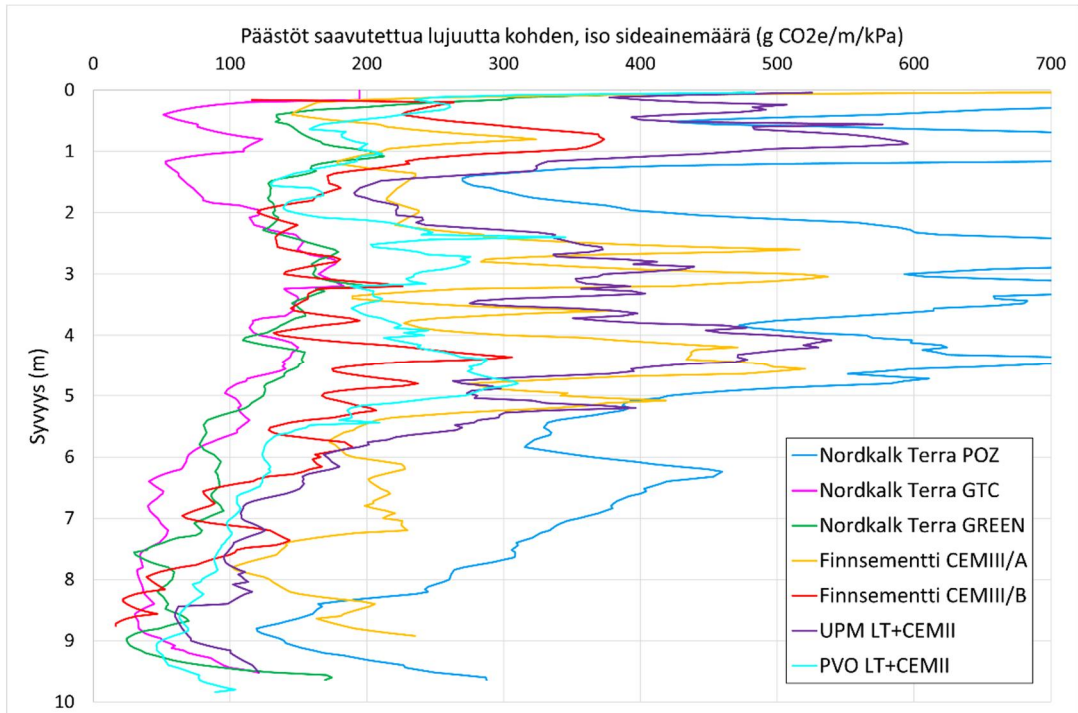




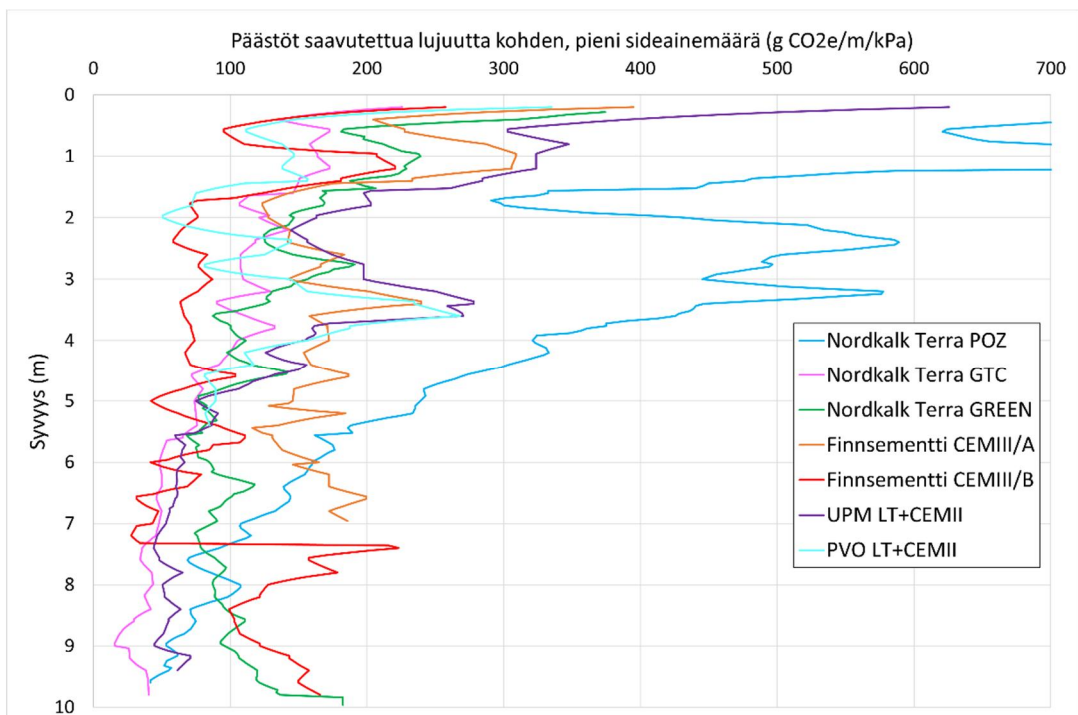
**Kuva 69 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine Kaukaan voima LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.**



**Kuva 70 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine UPM LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.**

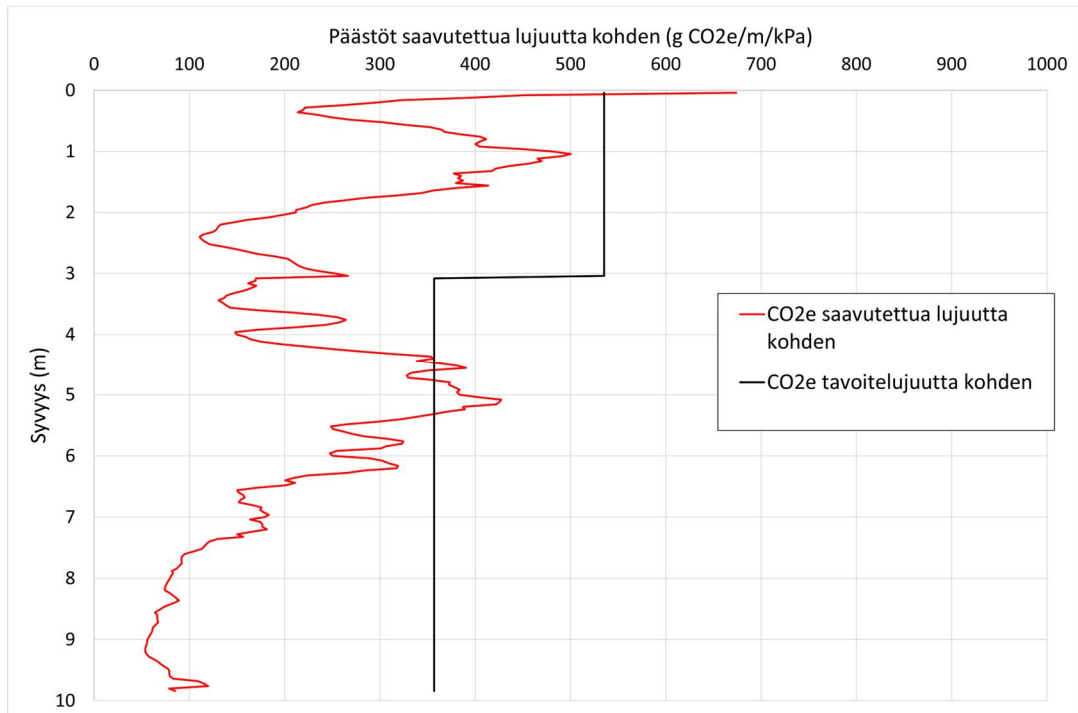


**Kuva 71 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, iso sideainemäärä.**

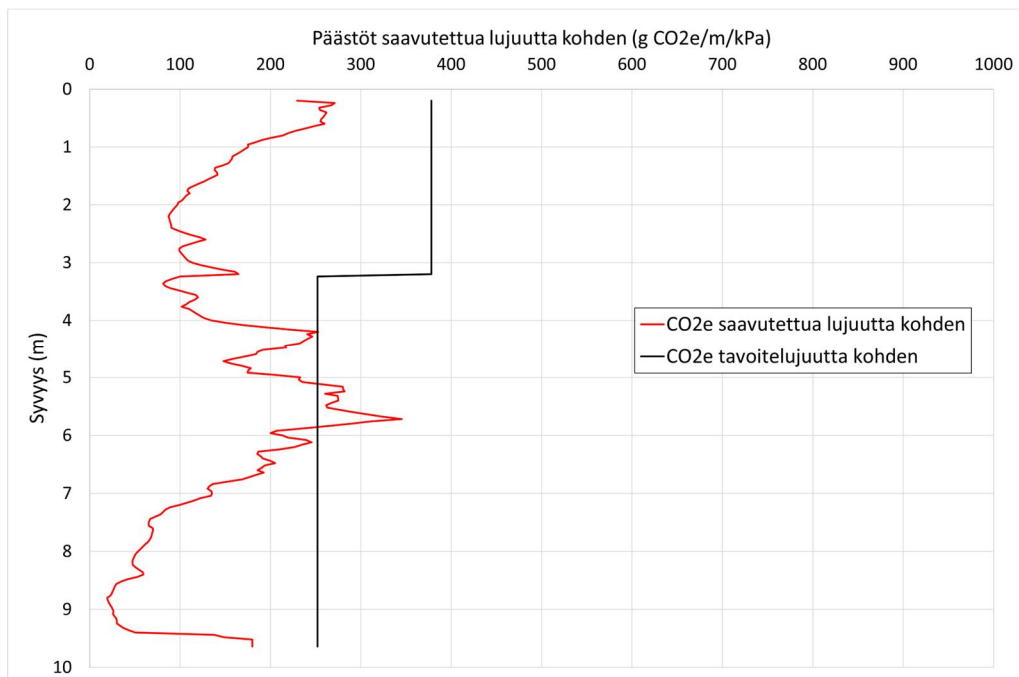


**Kuva 72 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 90d, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, pieni sideainemäärä.**

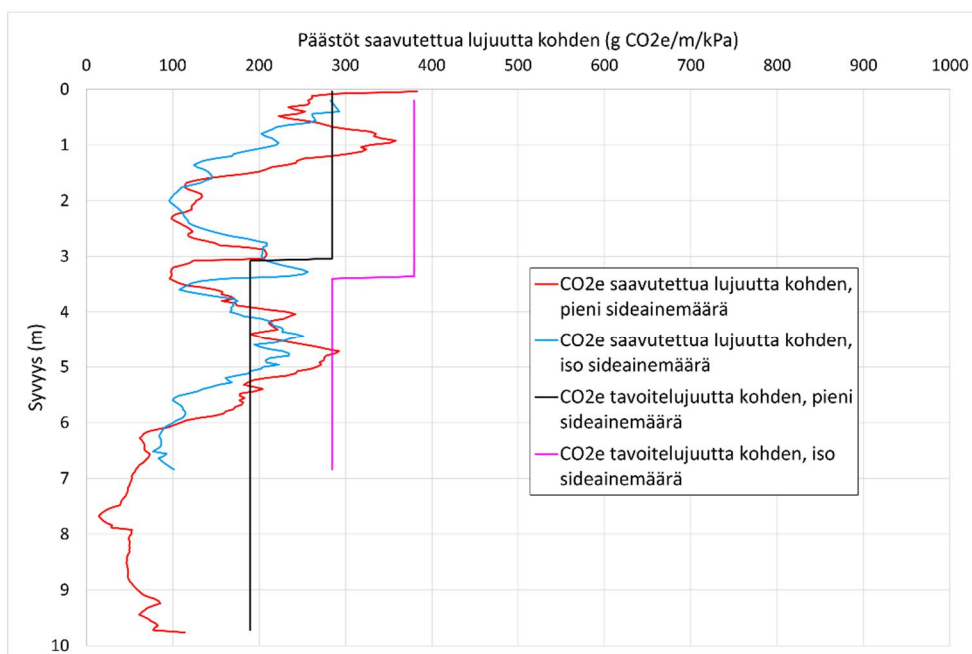
## Liite 6. Malminkenttä, päästöt saavutettua lujuutta kohden, PS6, 12kk



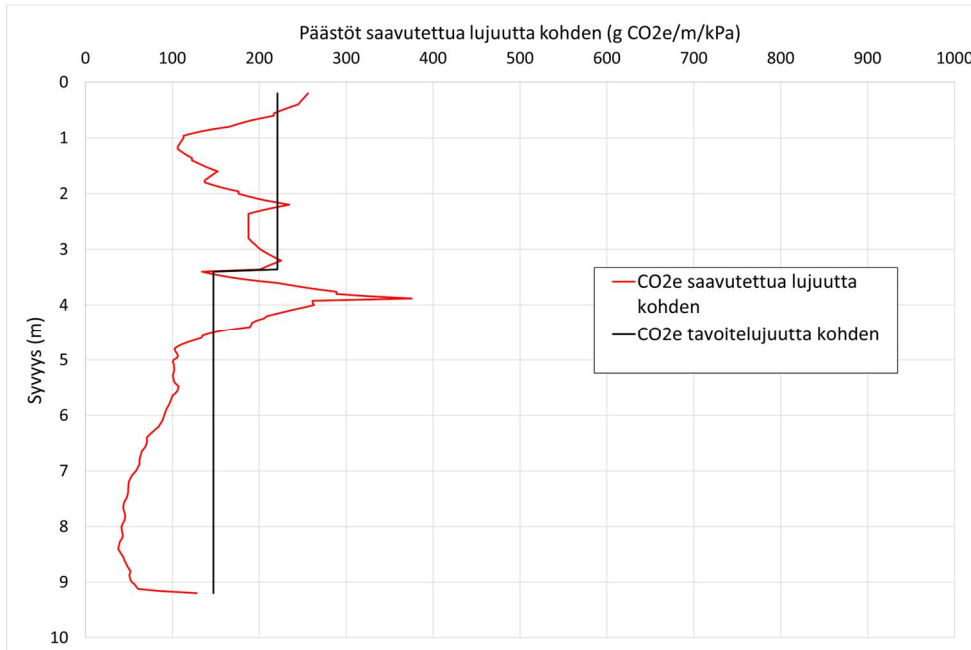
**Kuva 73 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine CEMIII/A. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.**



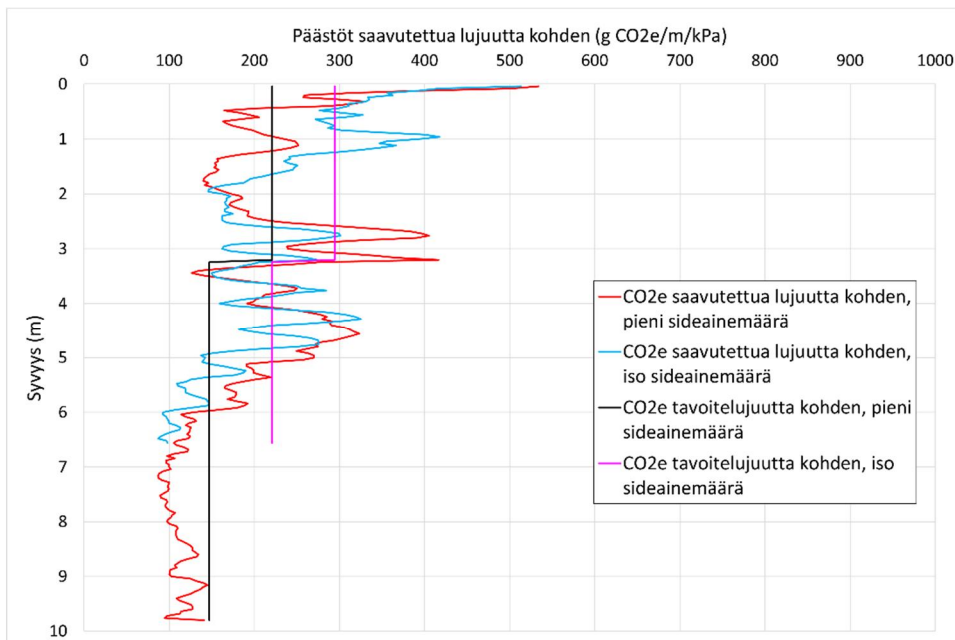
**Kuva 74** Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine CEMIII/B. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.



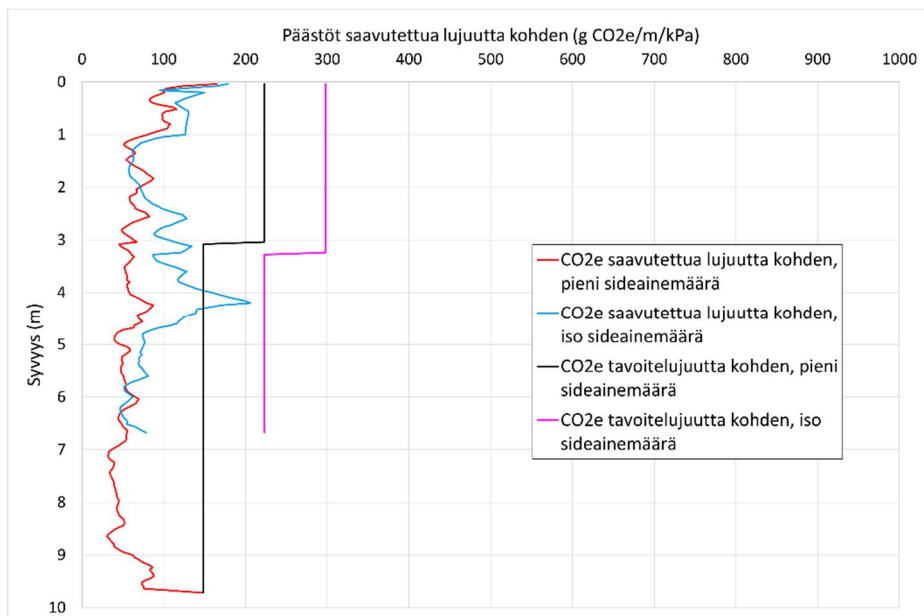
**Kuva 75** Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GREEN. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.



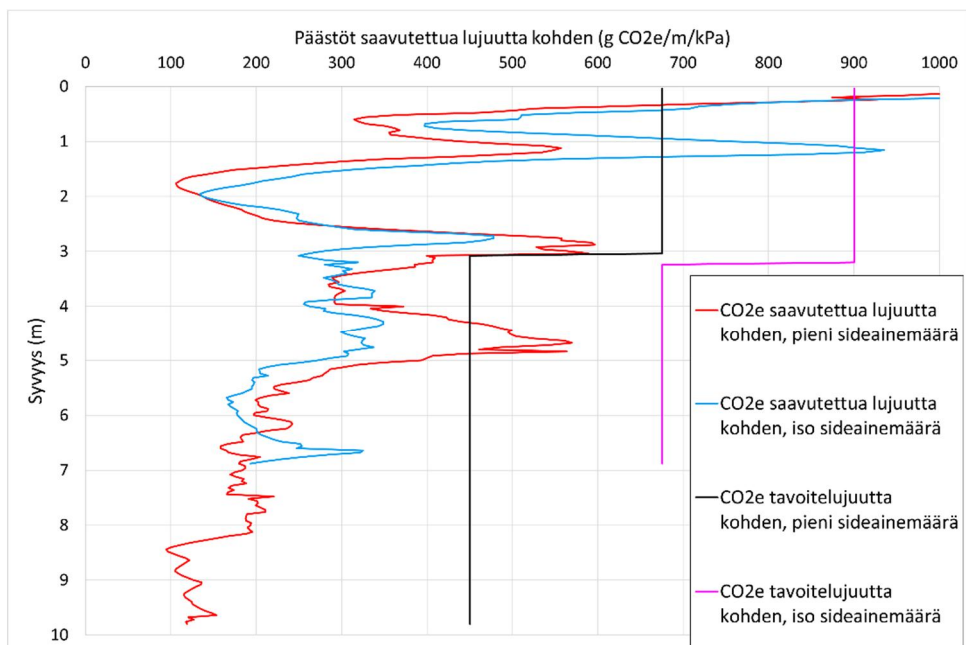
**Kuva 76** Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta (punainen) ja tavoitelujuutta (musta) kohden, sideaine Kaukaan voima LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11. Valvontakairaukset on tehty vain sideainemäärällä pieni stabiloiduille pilareille.



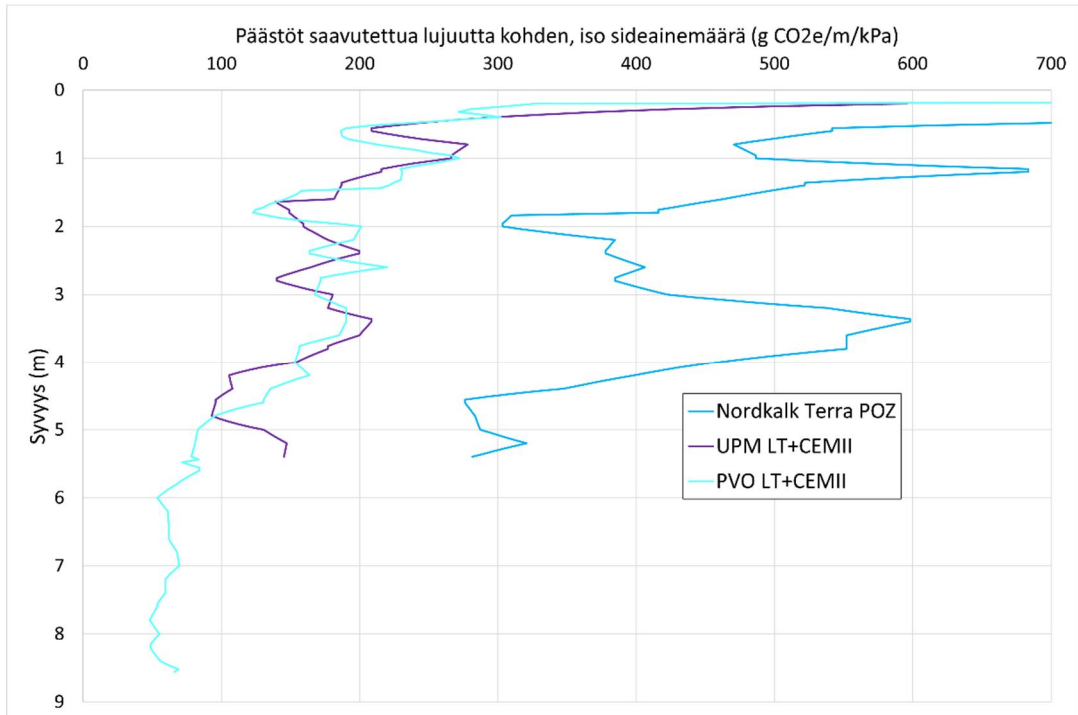
**Kuva 77** Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujuutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine UPM LT+CEMII. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.



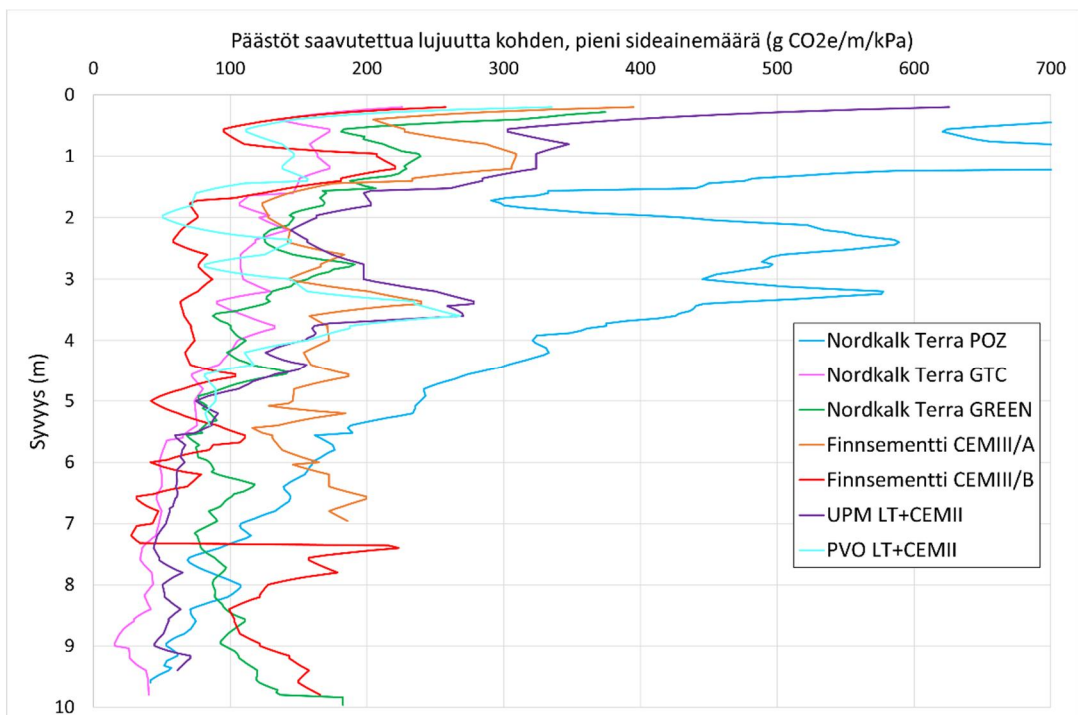
**Kuva 78** Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine GTC. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.



**Kuva 79** Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujutta kohden pienellä (punainen) ja isolla (sininen) sideainemäärällä sekä tavoitelujutta kohden pienellä (musta) ja isolla (pinkki) sideainemäärällä, sideaine POZ. Sideainemäärät eri syvyyksillä on esitetty taulukossa 11.



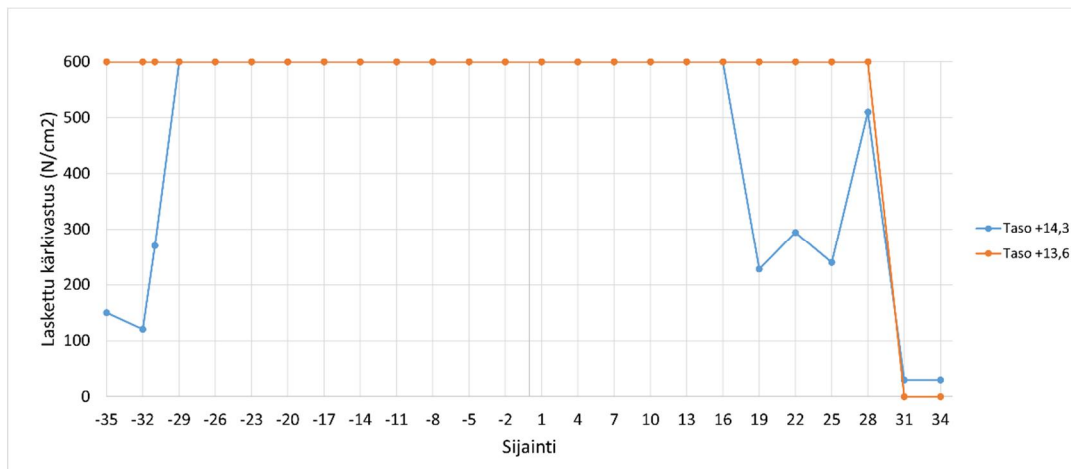
**Kuva 80 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, iso sideainemäärä.**



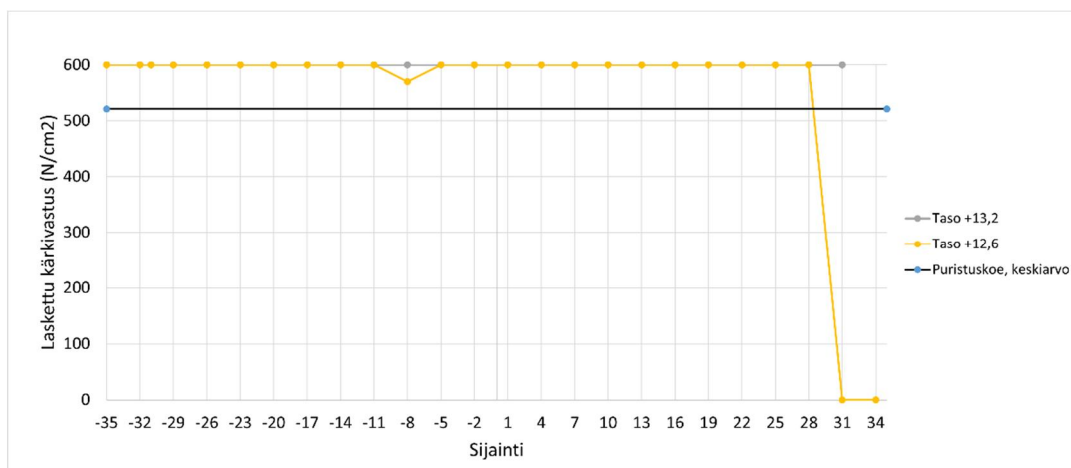
**Kuva 81 Malminkenttä, koekenttä PS6, lujittumisaika 12kk, hiilidioksidipäästöt saavutettua lujuutta kohden, tulosten vertailu, pieni sideainemäärä.**



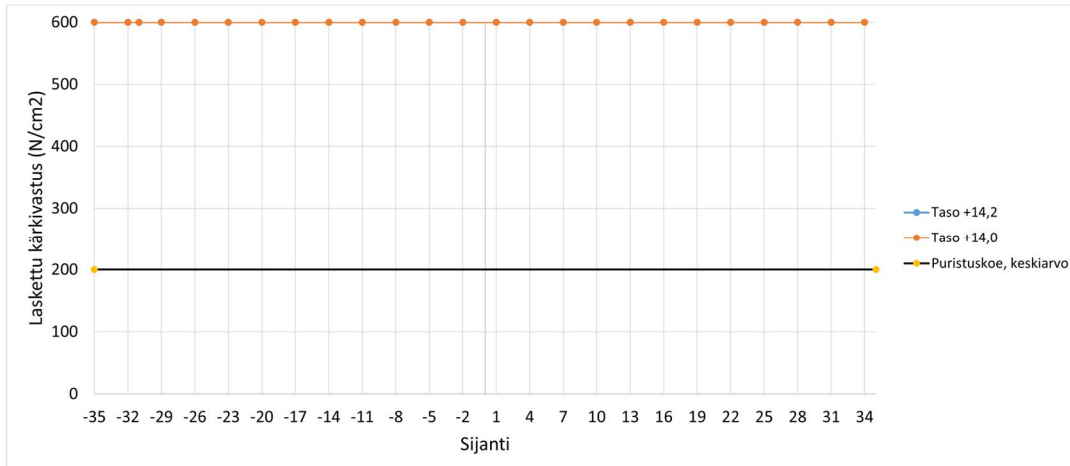
## Liite 7. Malminkenttä, penetrometritulokset



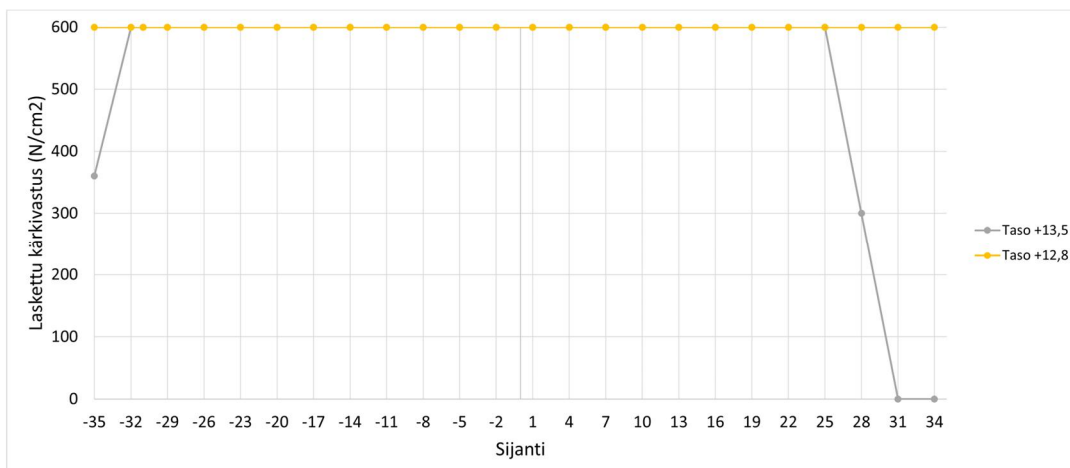
**Kuva 82 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine CEMIII/A, syvyys 0–1 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.**



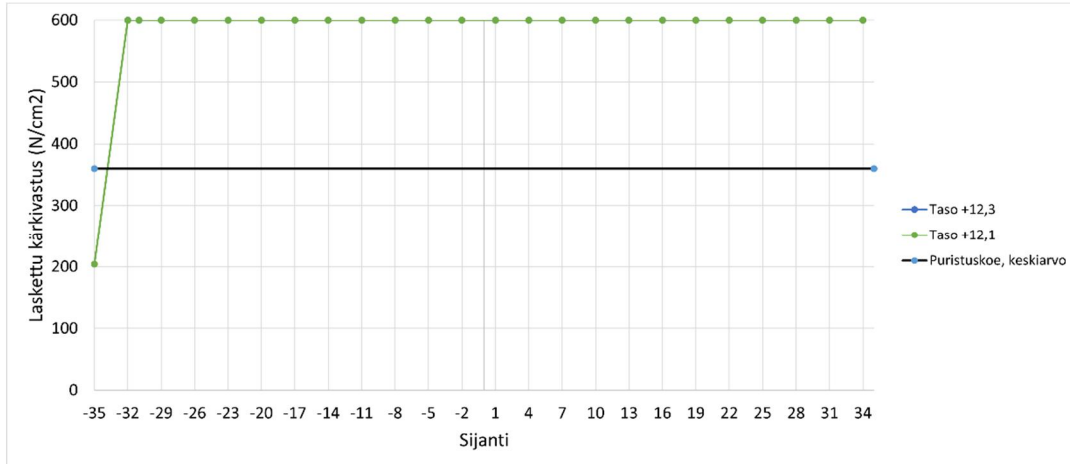
**Kuva 83 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine CEMIII/A, syvyys 1–2 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>. Puristuskoetulokset: Savela 2024.**



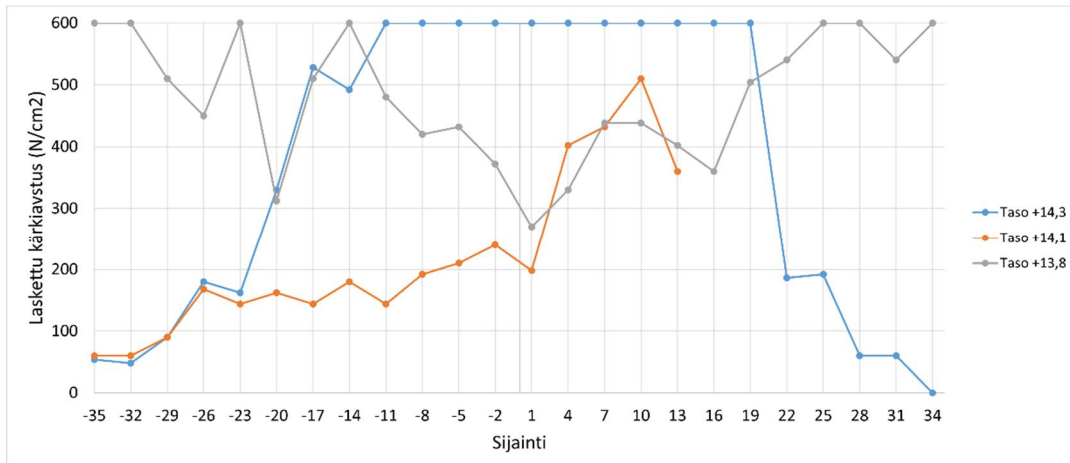
**Kuva 84 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine CEMIII/B, syvyys 0–1 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>. Puristuskoetulokset: Savela 2024.**



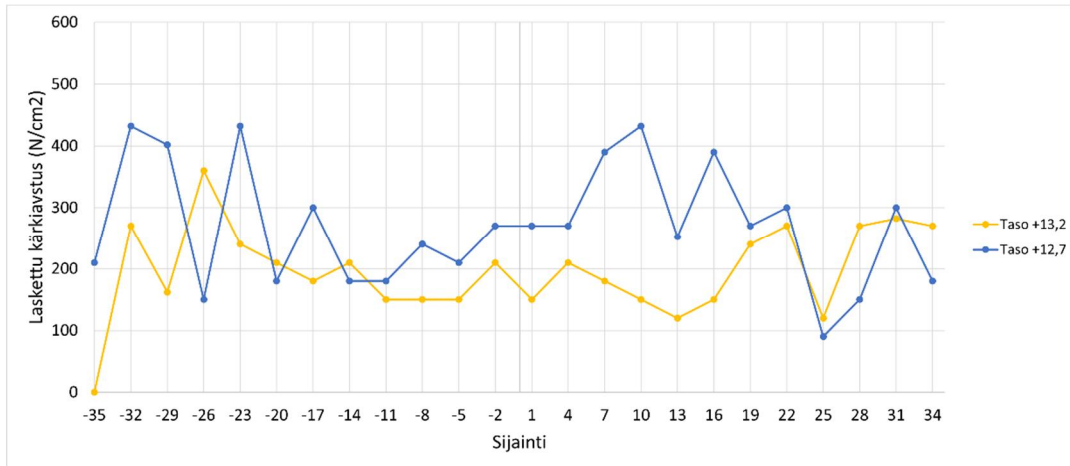
**Kuva 85 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine CEMIII/B, syvyys 1–2 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.**



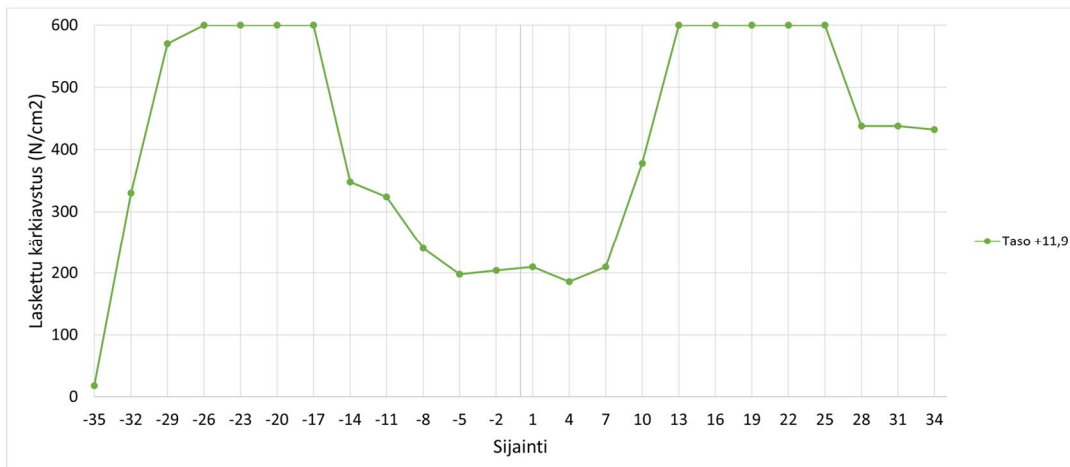
**Kuva 86 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine CEMIII/B, syvyys 2–3 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>. Puristuskoetulokset: Savela 2024.**



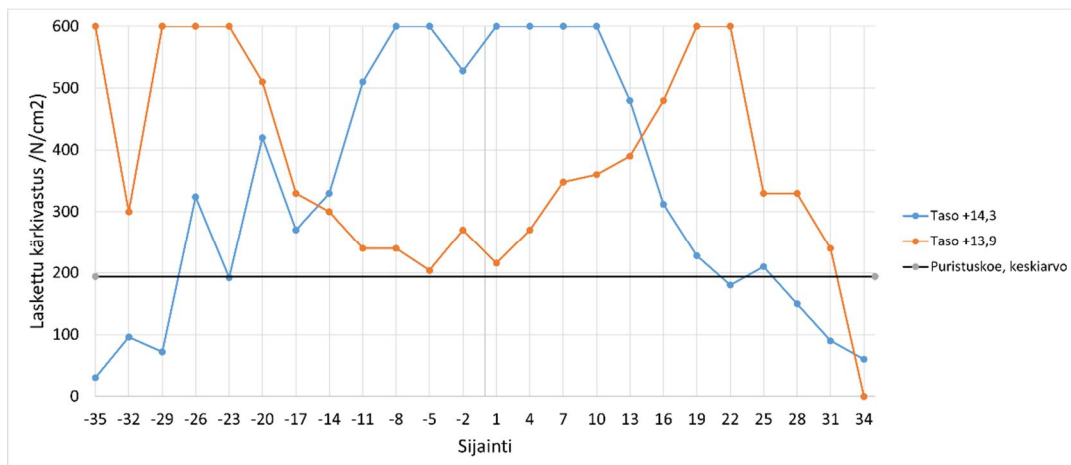
**Kuva 87 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine PVO LT+CEMII, syvyys 0–1 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.**



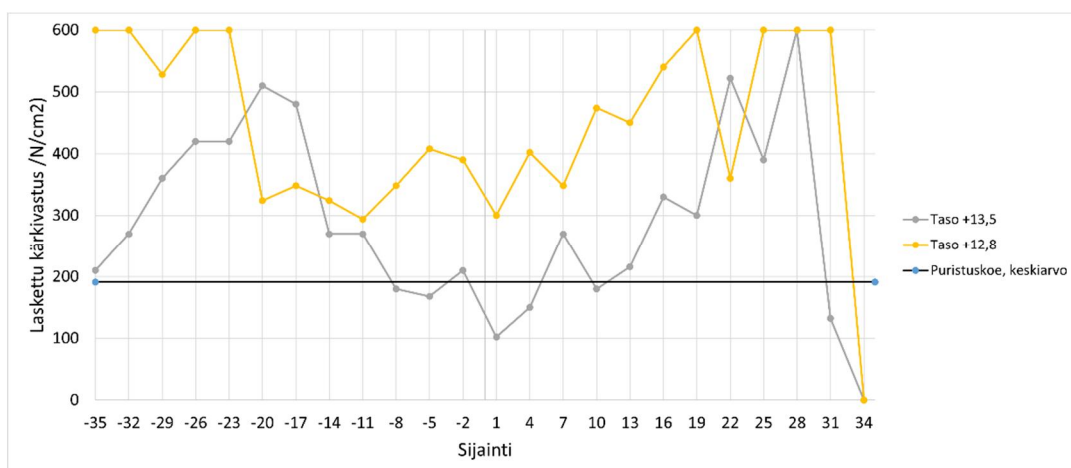
**Kuva 88 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine PVO LT+CEMII, syvyys 1–2 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.**



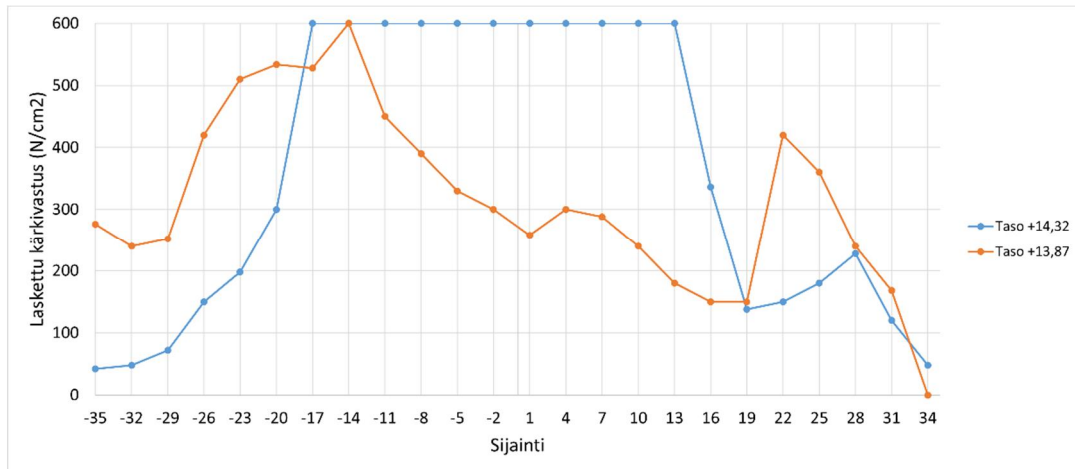
**Kuva 89 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine PVO LT+CEMII, syvyys 2–3 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.**



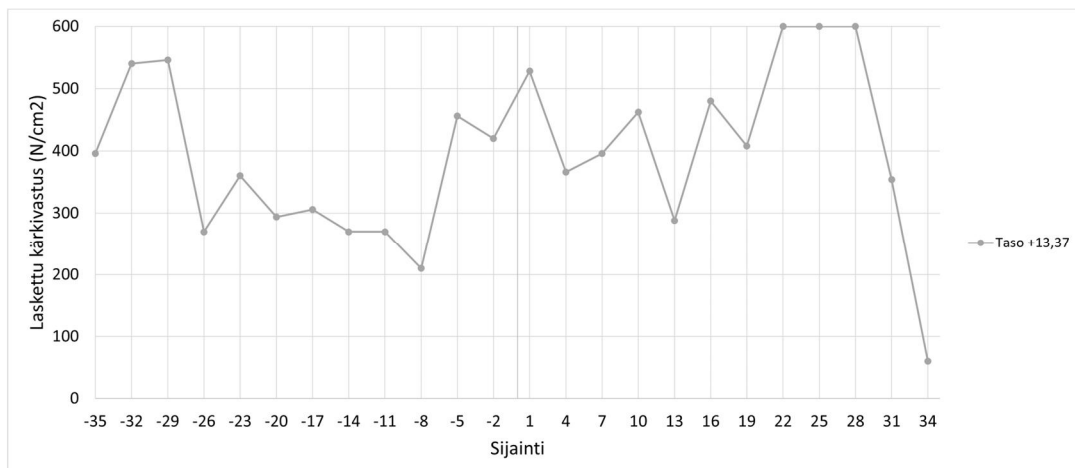
**Kuva 90 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine UPM LT+CEMII, syvyys 0–1 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>. Puristuskoetulokset: Savela 2024.**



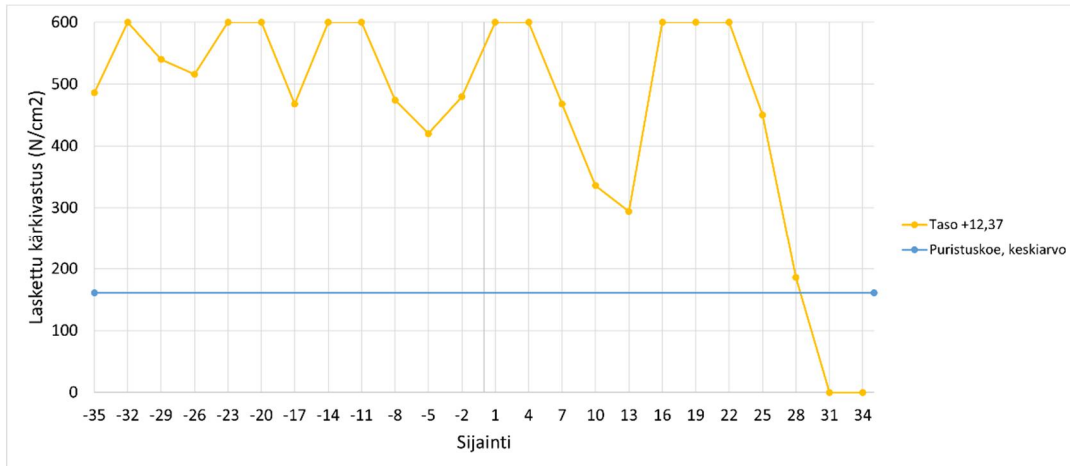
**Kuva 91 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine UPM LT+CEMII, syvyys 1–2 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>. Puristuskoetulokset: Savela 2024.**



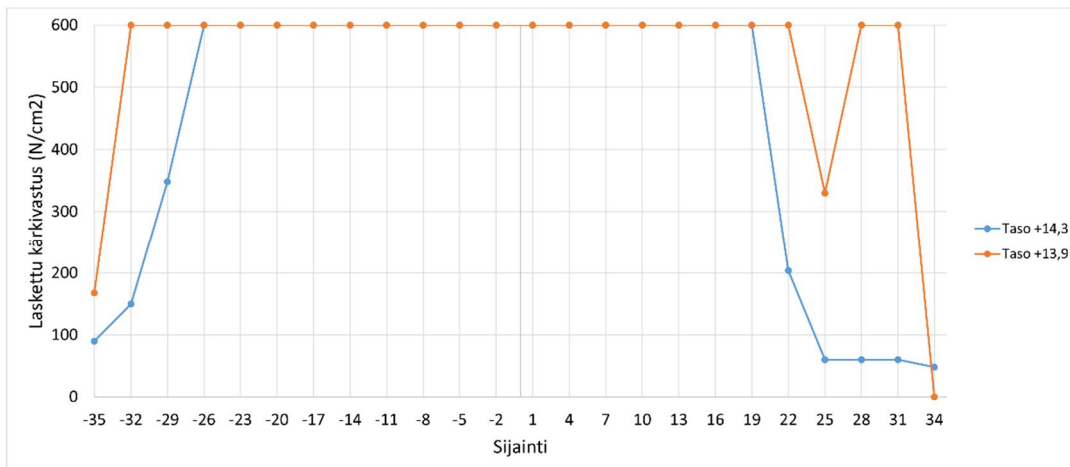
**Kuva 92 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine POZ, syvyys 0–1 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.**



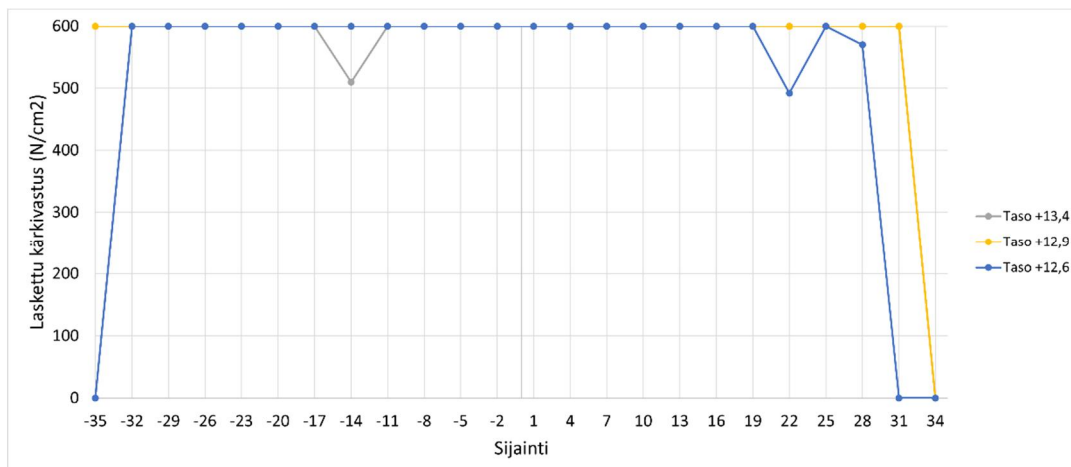
**Kuva 93 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine POZ, syvyys 1–2 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.**



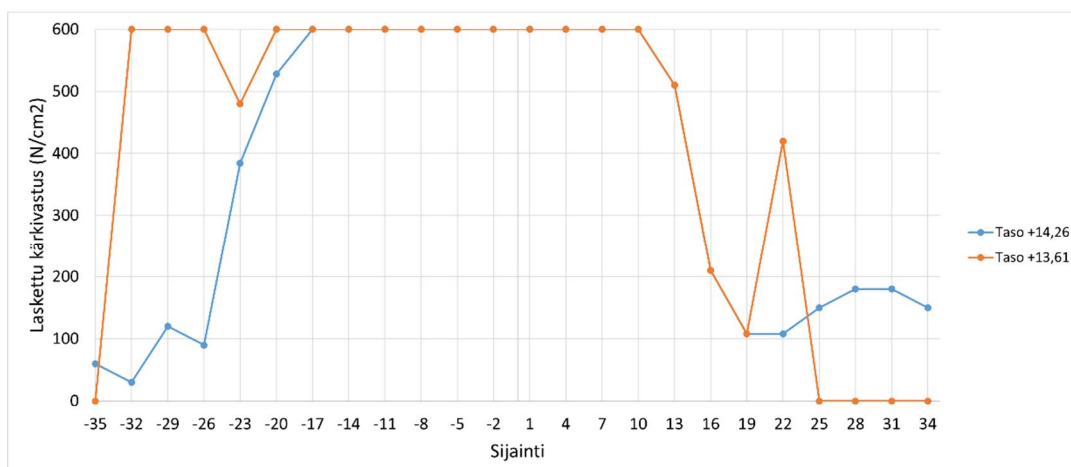
**Kuva 94** Malmin kenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine POZ, syvyys 2–3 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>. Puristuskoetulokset: Savela 2024.



**Kuva 95** Malmin kenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine GREEN, syvyys 0–1 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.

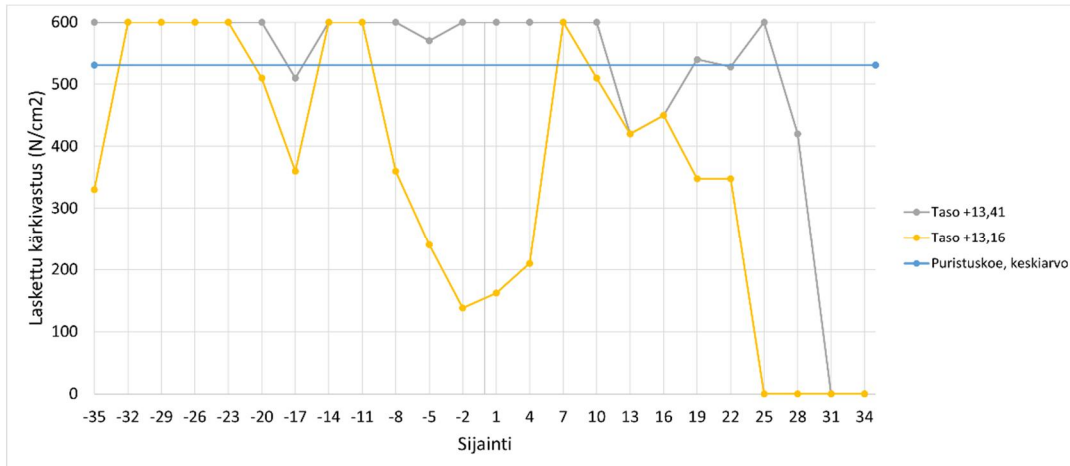


**Kuva 96 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine GREEN, syvyys 1–2 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.**

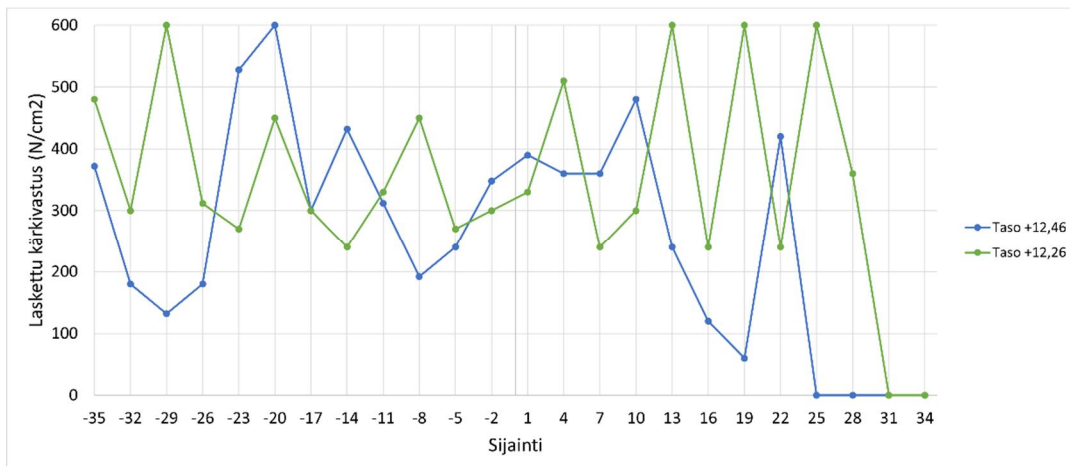


**Kuva 97 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine GTC, syvyys 0–1 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.**



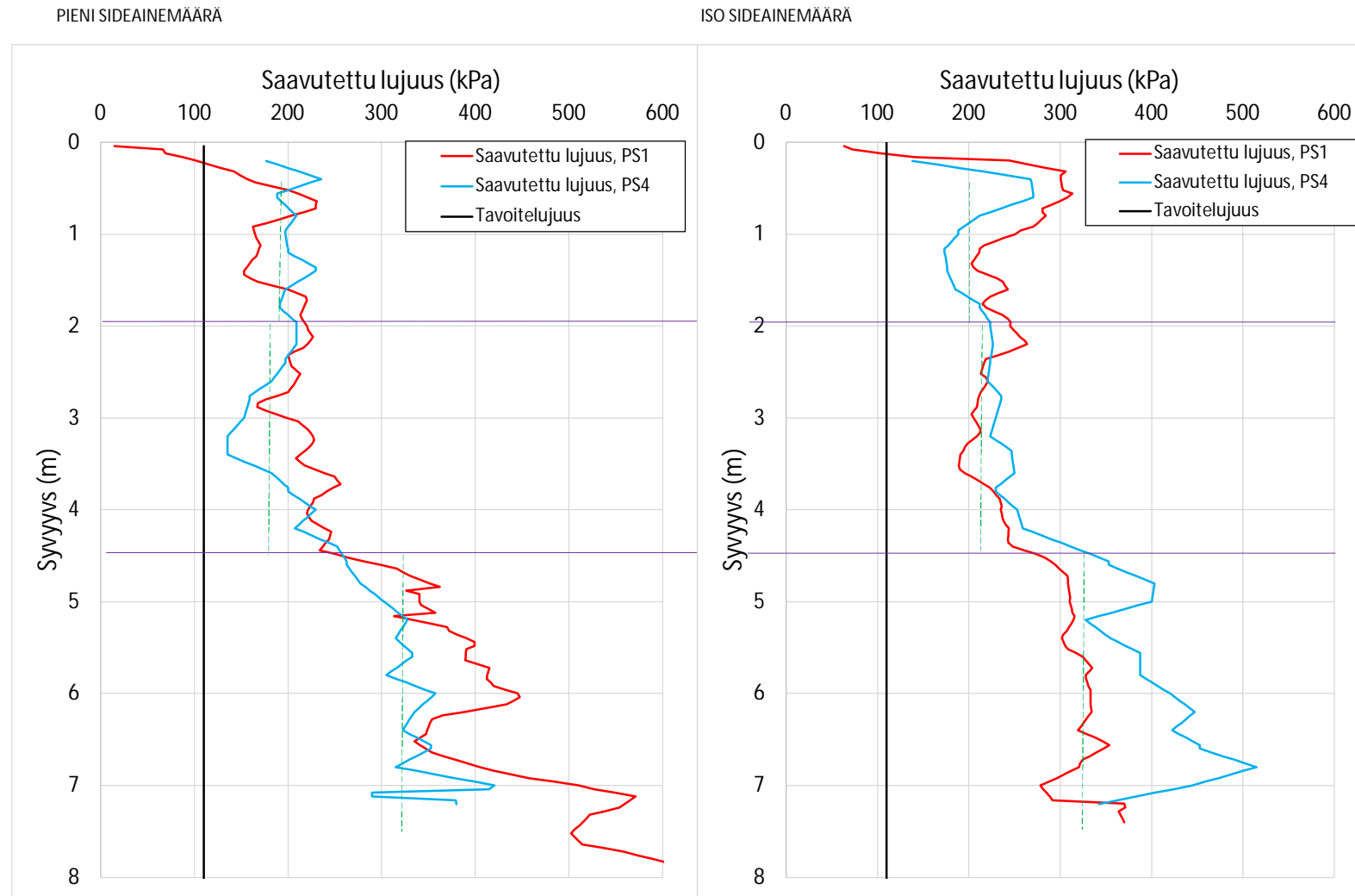


**Kuva 98 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine GTC, syvyys 1–2 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>. Puristuskoetulokset: Savela 2024.**



**Kuva 99 Malminkenttä, koekenttä PS1, penetrometritulokset, sideaine GTC, syvyys 2–3 m. Mittauksessa käytetyn penetrometrin kapasiteetti on 600 N/cm<sup>2</sup>.**

# Liite 8. Pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointilaskelmat



**EXTRAPOLINTI:**

leikkauslujuus, pieni (ka.):	180 kPa
leikkauslujuus, iso (ka.):	200 kPa
sideainemäärä, pieni:	150 kg/m <sup>3</sup>
sideainemäärä, iso:	200 kg/m <sup>3</sup>
=> lujuuden muutos *:	0,40 kPa / kg/m <sup>3</sup>
=> sideainemäärän muutos **:	2,50 kg/m <sup>3</sup> / kPa
tavoitelujuus:	110 kPa
=> sideainemäärä:	-25 kg/m <sup>3</sup> => 100 kg/m <sup>3</sup>
ylin 1-2 m on vaikeasti lujittuvaa => vähintään 100 kg/m <sup>3</sup>	
leikkauslujuus, pieni (ka.):	175 kPa
leikkauslujuus, iso (ka.):	210 kPa
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>
=> lujuuden muutos *:	1,17 kPa / kg/m <sup>3</sup>
=> sideainemäärän muutos **:	0,86 kg/m <sup>3</sup> / kPa
tavoitelujuus:	110 kPa
=> sideainemäärä:	64 kg/m <sup>3</sup> => 80 kg/m <sup>3</sup>

leikkauslujuus, pieni (ka.):	320 kPa
leikkauslujuus, iso (ka.):	330 kPa
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>
=> lujuuden muutos *:	0,33 kPa / kg/m <sup>3</sup>
=> sideainemäärän muutos **:	3,00 kg/m <sup>3</sup> / kPa
tavoitelujuus:	110 kPa
=> sideainemäärä:	-510 kg/m <sup>3</sup> => 70 kg/m <sup>3</sup>
(sideainemäärän 70 kg/m <sup>3</sup> toimivuus tulisi todentaa)	

**Selitteet:**

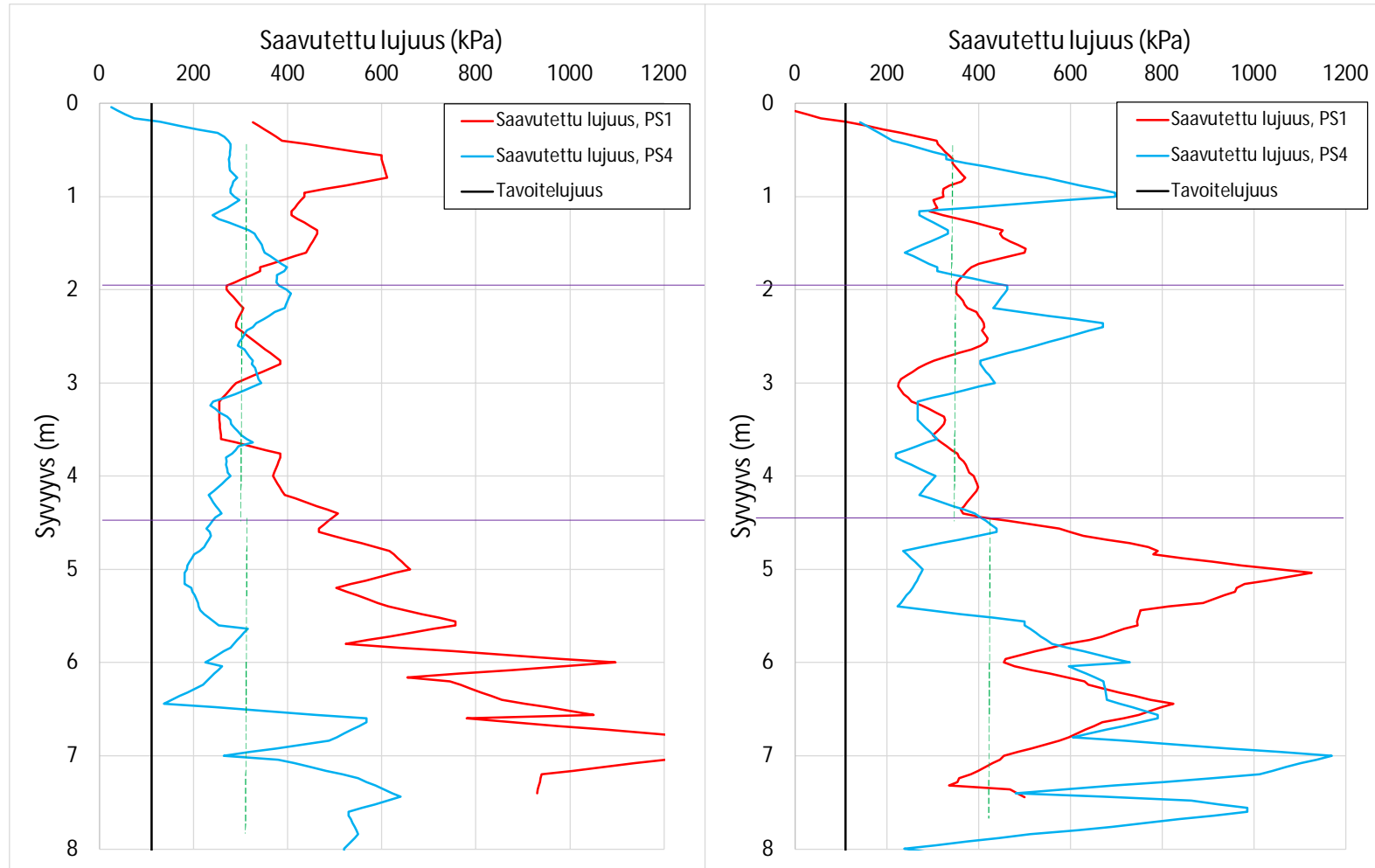
- \* Lujuuden muutos sideainekiloa kohden
- \*\* sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden

APULUVUT	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	Leikkauslujuus, pieni (med.)	Leikkauslujuus, pieni (min.)	Leikkauslujuus, iso (ka.)	Leikkauslujuus, iso (med.)	Leikkauslujuus, iso (min.)
0-2m	197 kPa	200 kPa	153 kPa	225 kPa	218 kPa	174 kPa
2-4,5m	203 kPa	209 kPa	135 kPa	233 kPa	229 kPa	189 kPa
4,5- m	357 kPa	342 kPa	260 kPa	362 kPa	342 kPa	278 kPa

Kuva 100 Malminkenttä, pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointi, GTC.

PIENI SIDEAINEMÄÄRÄ

ISO SIDEAINEMÄÄRÄ



EXTRAPOLINTI:

leikkauslujuus, pieni (ka.):	300 kPa		
leikkauslujuus, iso (ka.):	350 kPa		
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>		
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>		
=> lujuuden muutos *:	1,67 kPa / kg/m <sup>3</sup>		
=> sideainemäärän muutos **:	0,60 kg/m <sup>3</sup> / kPa		
tavoitelujuus:	110 kPa		
=> sideainemäärä:	6 kg/m <sup>3</sup> => 100 kg/m <sup>3</sup>		
ylin 1-2 m on vaikeasti lujittuvaa => vähintään 100 kg/m <sup>3</sup>			

leikkauslujuus, pieni (ka.):	310 kPa		
leikkauslujuus, iso (ka.):	420 kPa		
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>		
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>		
=> lujuuden muutos *:	3,67 kPa / kg/m <sup>3</sup>		
=> sideainemäärän muutos **:	0,27 kg/m <sup>3</sup> / kPa		
tavoitelujuus:	110 kPa		
=> sideainemäärä:	65 kg/m <sup>3</sup> => 70 kg/m <sup>3</sup>		
(sideainemäärän 70 kg/m <sup>3</sup> toimivuus tulisi todentaa)			

Selitteet:

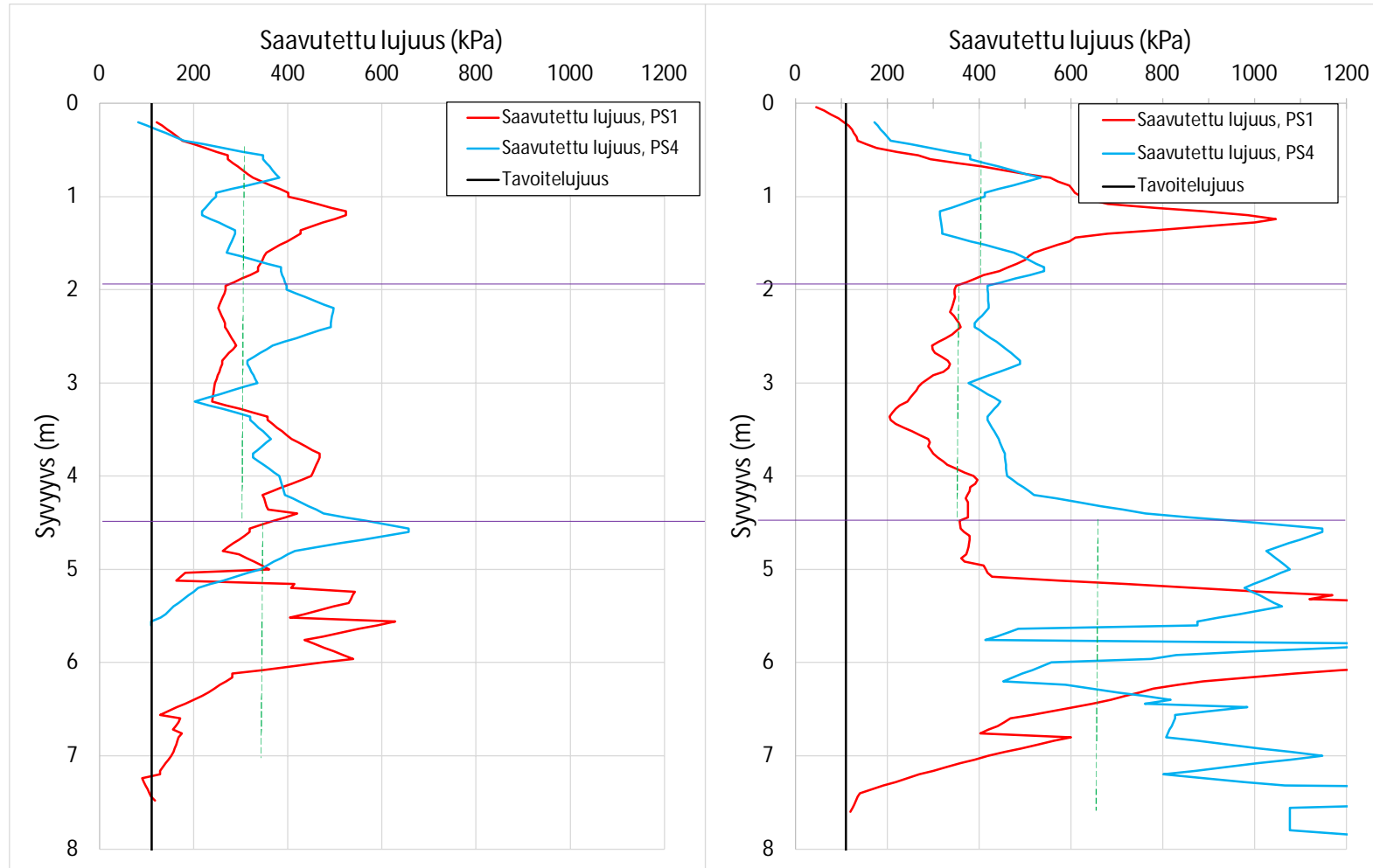
- \* lujuuden muutos sideainekiloa kohden
- \*\* sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden

APULUVUT	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	Leikkauslujuus, pieni (med.)	Leikkauslujuus, pieni (min.)	Leikkauslujuus, iso (ka.)	Leikkauslujuus, iso (med.)	Leikkauslujuus, iso (min.)
0-2m	383 kPa	376 kPa	240 kPa	386 kPa	355 kPa	239 kPa
2-4,5m	317 kPa	303 kPa	233 kPa	361 kPa	360 kPa	220 kPa
2-4,5m	554 kPa	535 kPa	137 kPa	624 kPa	634 kPa	223 kPa

Kuva 101 Malminkenttä, pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointi, CEMIII/A.

PIENI SIDEAINEMÄÄRÄ

ISO SIDEAINEMÄÄRÄ



**EXTRAPOLINTI:**

leikkauslujuus, pieni (ka.):	300 kPa
leikkauslujuus, iso (ka.):	400 kPa
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>
=> lujuuden muutos *s:	3,33 kPa / kg/m <sup>3</sup>
=> sideainemäärän muutos **:	0,30 kg/m <sup>3</sup> / kPa
tavoitelujuus:	110 kPa
=> sideainemäärä:	63 kg/m <sup>3</sup> => 100 kg/m <sup>3</sup>
ylin 1-2 m on vaikeasti lujittuvaa => vähintään 100 kg/m <sup>3</sup>	
leikkauslujuus, pieni (ka.):	300 kPa
leikkauslujuus, iso (ka.):	350 kPa
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>
=> lujuuden muutos *s:	1,67 kPa / kg/m <sup>3</sup>
=> sideainemäärän muutos **:	0,60 kg/m <sup>3</sup> / kPa
tavoitelujuus:	110 kPa
=> sideainemäärä:	6 kg/m <sup>3</sup> => 80 kg/m <sup>3</sup>

APULUVUT					
0-2m	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	340 kPa	kPa / kg/m <sup>3</sup>	5,12	
	Leikkauslujuus, pieni (med.)	343 kPa	kg/m <sup>3</sup> / kPa	0,20	
	Leikkauslujuus, pieni (min.)	218 kPa			
	Leikkauslujuus, iso (ka.)	494 kPa			
	Leikkauslujuus, iso (med.)	468 kPa			
	Leikkauslujuus, iso (min.)	221 kPa			
2-4,5m	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	353	kPa / kg/m <sup>3</sup>	1,39	
	Leikkauslujuus, pieni (med.)	349	kg/m <sup>3</sup> / kPa	0,72	
	Leikkauslujuus, pieni (min.)	203			
	Leikkauslujuus, iso (ka.)	394			
	Leikkauslujuus, iso (med.)	391			
	Leikkauslujuus, iso (min.)	205			
4,5- m	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	303	kPa / kg/m <sup>3</sup>	18,27	
	Leikkauslujuus, pieni (med.)	282	kg/m <sup>3</sup> / kPa	0,05	
	Leikkauslujuus, pieni (min.)	90			
	Leikkauslujuus, iso (ka.)	851			
	Leikkauslujuus, iso (med.)	851			
	Leikkauslujuus, iso (min.)	132			

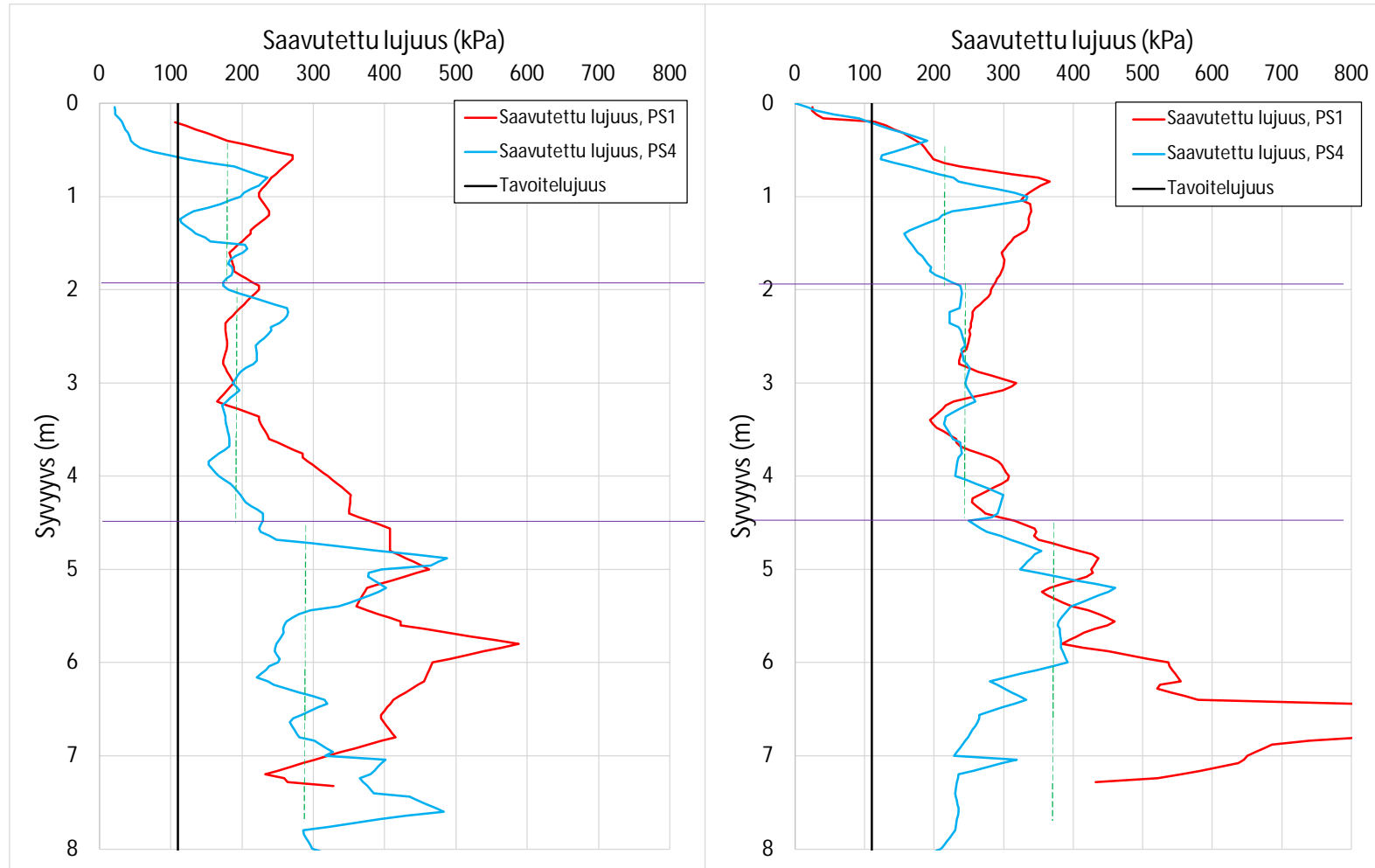
**Selitteet:**

- \* lujuuden muutos sideainekiloa kohden
- \*\* sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden

**Kuva 102 Malminkenttä, pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointi, CEMIII/B.**

PIENI SIDEAINEMÄÄRÄ

ISO SIDEAINEMÄÄRÄ



EXTRAPOLINTI:

leikkauslujuus, pieni (ka.):	170 kPa	0-2m
leikkauslujuus, iso (ka.):	210 kPa	
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>	
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>	
=> lujuuden muutos *:	1,33 kPa / kg/m <sup>3</sup>	
=> sideainemäärän muutos **:	0,75 kg/m <sup>3</sup> / kPa	
tavoitelujuus:	110 kPa	
=> sideainemäärä:	75 kg/m <sup>3</sup> => 100 kg/m <sup>3</sup>	
ylin 1-2 m on vaikeasti lujittuvaa => vähintään 100 kg/m <sup>3</sup>		
leikkauslujuus, pieni (ka.):	190 kPa	2-4,5m
leikkauslujuus, iso (ka.):	240 kPa	
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>	
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>	
=> lujuuden muutos *:	1,67 kPa / kg/m <sup>3</sup>	
=> sideainemäärän muutos **:	0,60 kg/m <sup>3</sup> / kPa	
tavoitelujuus:	110 kPa	
=> sideainemäärä:	72 kg/m <sup>3</sup> => 80 kg/m <sup>3</sup>	

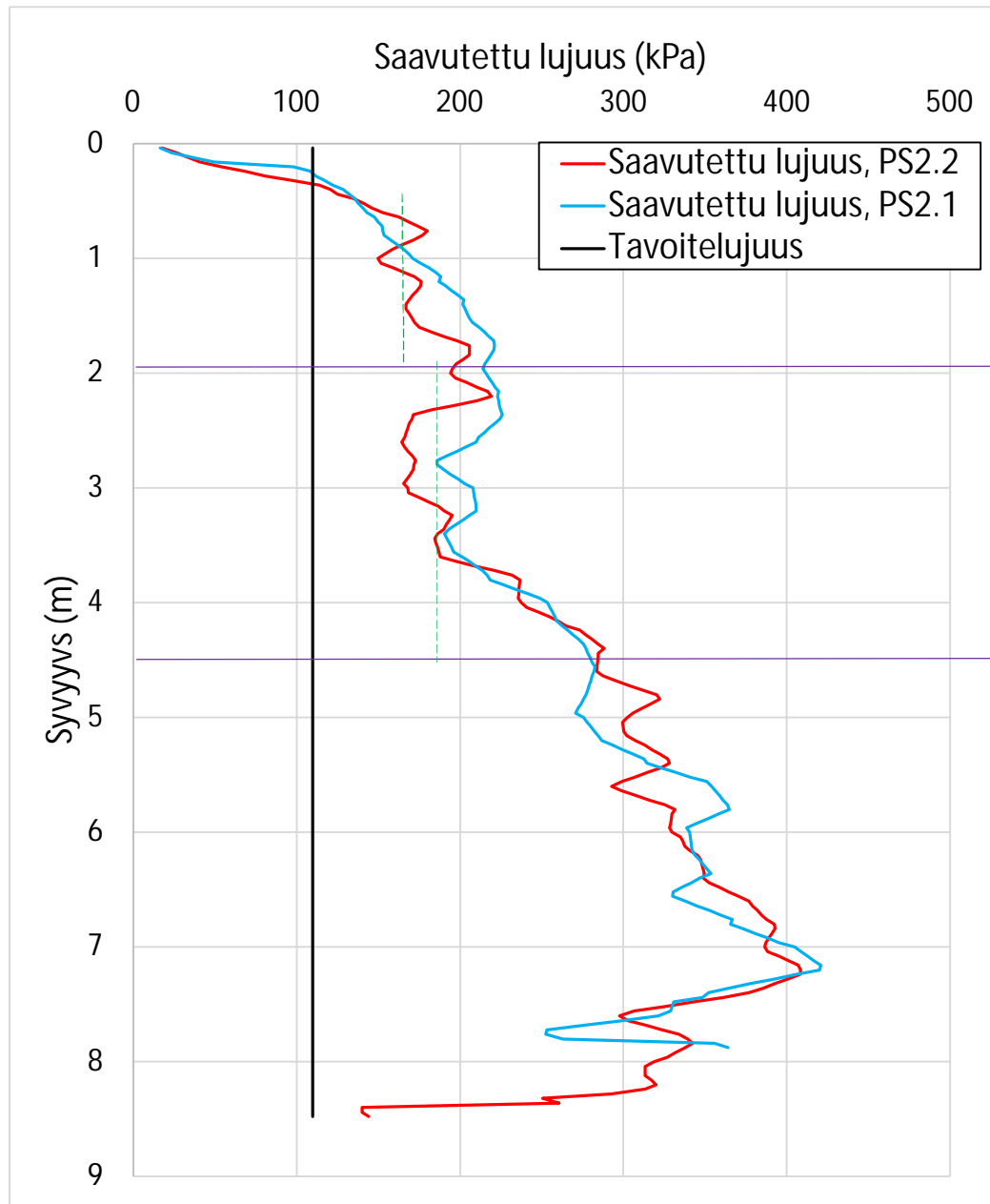
leikkauslujuus, pieni (ka.):	290 kPa	4,5- m
leikkauslujuus, iso (ka.):	370 kPa	
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>	
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>	
=> lujuuden muutos *:	2,67 kPa / kg/m <sup>3</sup>	
=> sideainemäärän muutos **:	0,38 kg/m <sup>3</sup> / kPa	
tavoitelujuus:	110 kPa	
=> sideainemäärä:	53 kg/m <sup>3</sup> => 70 kg/m <sup>3</sup>	
(sideainemäärän 70 kg/m <sup>3</sup> toimivuus tulisi todentaa)		

Selitteet:

- \* lujuuden muutos sideainekiloa kohden
- \*\* sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden

APULUVUT				
Leikkauslujuus, pieni (ka.)	196 kPa	kPa / kg/m <sup>3</sup>	1,97	
Leikkauslujuus, pieni (med.)	200 kPa	kg/m <sup>3</sup> / kPa	0,51	
Leikkauslujuus, pieni (min.)	75 kPa			
Leikkauslujuus, iso (ka.)	255 kPa			
Leikkauslujuus, iso (med.)	269 kPa			
Leikkauslujuus, iso (min.)	123 kPa			
Leikkauslujuus, pieni (ka.)	220 kPa	kPa / kg/m <sup>3</sup>	1,07	
Leikkauslujuus, pieni (med.)	198 kPa	kg/m <sup>3</sup> / kPa	0,93	
Leikkauslujuus, pieni (min.)	153 kPa			
Leikkauslujuus, iso (ka.)	252 kPa			
Leikkauslujuus, iso (med.)	247 kPa			
Leikkauslujuus, iso (min.)	194 kPa			
Leikkauslujuus, pieni (ka.)	360 kPa	kPa / kg/m <sup>3</sup>	2,30	
Leikkauslujuus, pieni (med.)	377 kPa	kg/m <sup>3</sup> / kPa	0,44	
Leikkauslujuus, pieni (min.)	220 kPa			
Leikkauslujuus, iso (ka.)	429 kPa			
Leikkauslujuus, iso (med.)	387 kPa			
Leikkauslujuus, iso (min.)	229 kPa			

Kuva 103 Malminkenttä, pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointi, GREEN.



**EXTRAPOLOINTI:**

leikkauslujuus, pieni (ka.): 170 kPa  
 sideainemäärä, pieni: 200 kg/m<sup>3</sup>  
 => lujuuden muutos \*: 0,40 kPa / kg/m<sup>3</sup>, lujuuden muutos sideainekiloa kohden  
 => sideainemäärän muutos \*: 2,50 kg/m<sup>3</sup> / kPa, sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden  
 tavoitelujuus: 110 kPa \* kerroin GTC PS1 ja PS4 perusteella määritetty  
 => sideainemäärä: 50 kg/m<sup>3</sup>  
 ylin 1-2 m on vaikeasti lujittuvaa => vähintään 100 kg/m<sup>3</sup>

leikkauslujuus, pieni (ka.): 180 kPa  
 sideainemäärä, pieni: 120 kg/m<sup>3</sup>  
 => lujuuden muutos: 1,17 kPa / kg/m<sup>3</sup>, lujuuden muutos sideainekiloa kohden  
 => sideainemäärän muutos: 0,86 kg/m<sup>3</sup> / kPa, sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden  
 tavoitelujuus: 110 kPa \* kerroin GTC PS1 ja PS4 perusteella määritetty  
 => sideainemäärä: 60 kg/m<sup>3</sup> => 80 kg/m<sup>3</sup>

leikkauslujuus, pieni (ka.): 180 kPa  
 sideainemäärä, pieni: 120 kg/m<sup>3</sup>  
 => lujuuden muutos: 0,33 kPa / kg/m<sup>3</sup>, lujuuden muutos sideainekiloa kohden  
 => sideainemäärän muutos: 3,00 kg/m<sup>3</sup> / kPa, sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden  
 tavoitelujuus: 110 kPa \* kerroin GTC PS1 ja PS4 perusteella määritetty  
 => sideainemäärä: -90 kg/m<sup>3</sup> => 70 kg/m<sup>3</sup>  
 (sideainemäärän 70 kg/m<sup>3</sup> toimivuus tulisi todentaa)

0-2m Laskennalliset arvot  
 Leikkauslujuus, pieni (ka.) 181 kPa  
 Leikkauslujuus, pieni (med.) 176 kPa  
 Leikkauslujuus, pieni (min.) 138 kPa

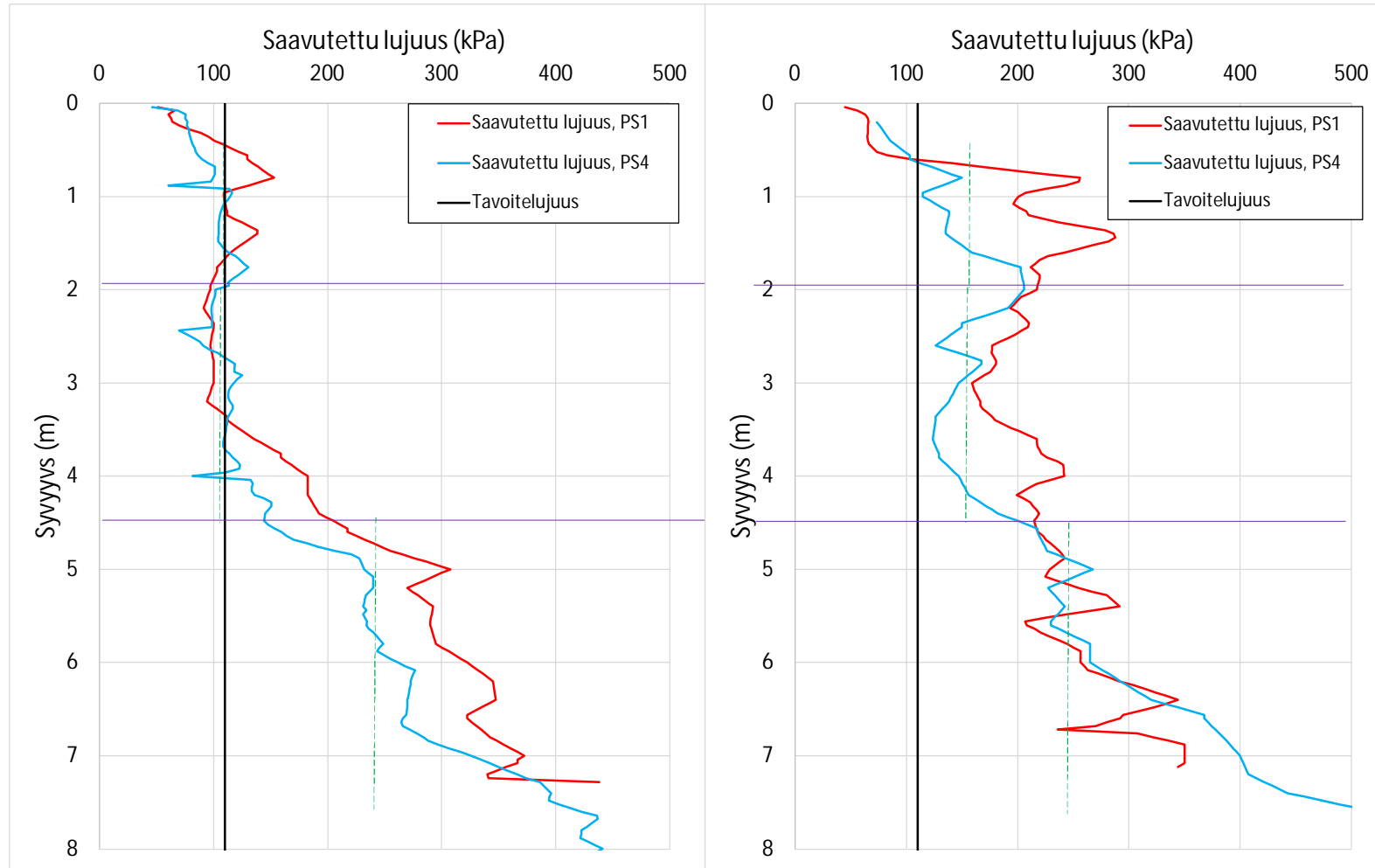
2-4,5m Leikkauslujuus, pieni (ka.) 214 kPa  
 Leikkauslujuus, pieni (med.) 209 kPa  
 Leikkauslujuus, pieni (min.) 164 kPa

2-4,5m Leikkauslujuus, pieni (ka.) 336 kPa  
 Leikkauslujuus, pieni (med.) 337 kPa  
 Leikkauslujuus, pieni (min.) 253 kPa

**Kuva 104 Malminkenttä, pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointi, GTC koalueen PS2 mukaisesti.**

PIENI SIDEAINEMÄÄRÄ

ISO SIDEAINEMÄÄRÄ



EXTRAPOLINTI:

leikkauslujuus, pieni (ka.): 100 kPa  
 leikkauslujuus, iso (ka.): 140 kPa  
 sideainemäärä, pieni: 120 kg/m3  
 sideainemäärä, iso: 150 kg/m3  
 => lujuuden muutos \*: 1,33 kPa / kg/m3  
 => sideainemäärän muutos \*\*: 0,75 kg/m3 / kPa  
 tavoitelujuus: 110 kPa  
 => sideainemäärä: 128 kg/m3

ylin 1-2 m on vaikeasti lujittuvaa => vähintään 100 kg/m3

leikkauslujuus, pieni (ka.): 100 kPa  
 leikkauslujuus, iso (ka.): 150 kPa  
 sideainemäärä, pieni: 120 kg/m3  
 sideainemäärä, iso: 150 kg/m3  
 => lujuuden muutos \*: 1,67 kPa / kg/m3  
 => sideainemäärän muutos \*\*: 0,60 kg/m3 / kPa  
 tavoitelujuus: 110 kPa  
 => sideainemäärä: 126 kg/m3

leikkauslujuus, pieni (ka.): 230 kPa  
 leikkauslujuus, iso (ka.): 240 kPa  
 sideainemäärä, pieni: 120 kg/m3  
 sideainemäärä, iso: 150 kg/m3  
 => lujuuden muutos \*: 0,33 kPa / kg/m3  
 => sideainemäärän muutos \*\*: 3,00 kg/m3 / kPa  
 tavoitelujuus: 110 kPa  
 => sideainemäärä: -240 kg/m3 => 70 kg/m3  
 (sideainemäärän 70 kg/m3 toimivuus tulisi todentaa)

Selitteet:

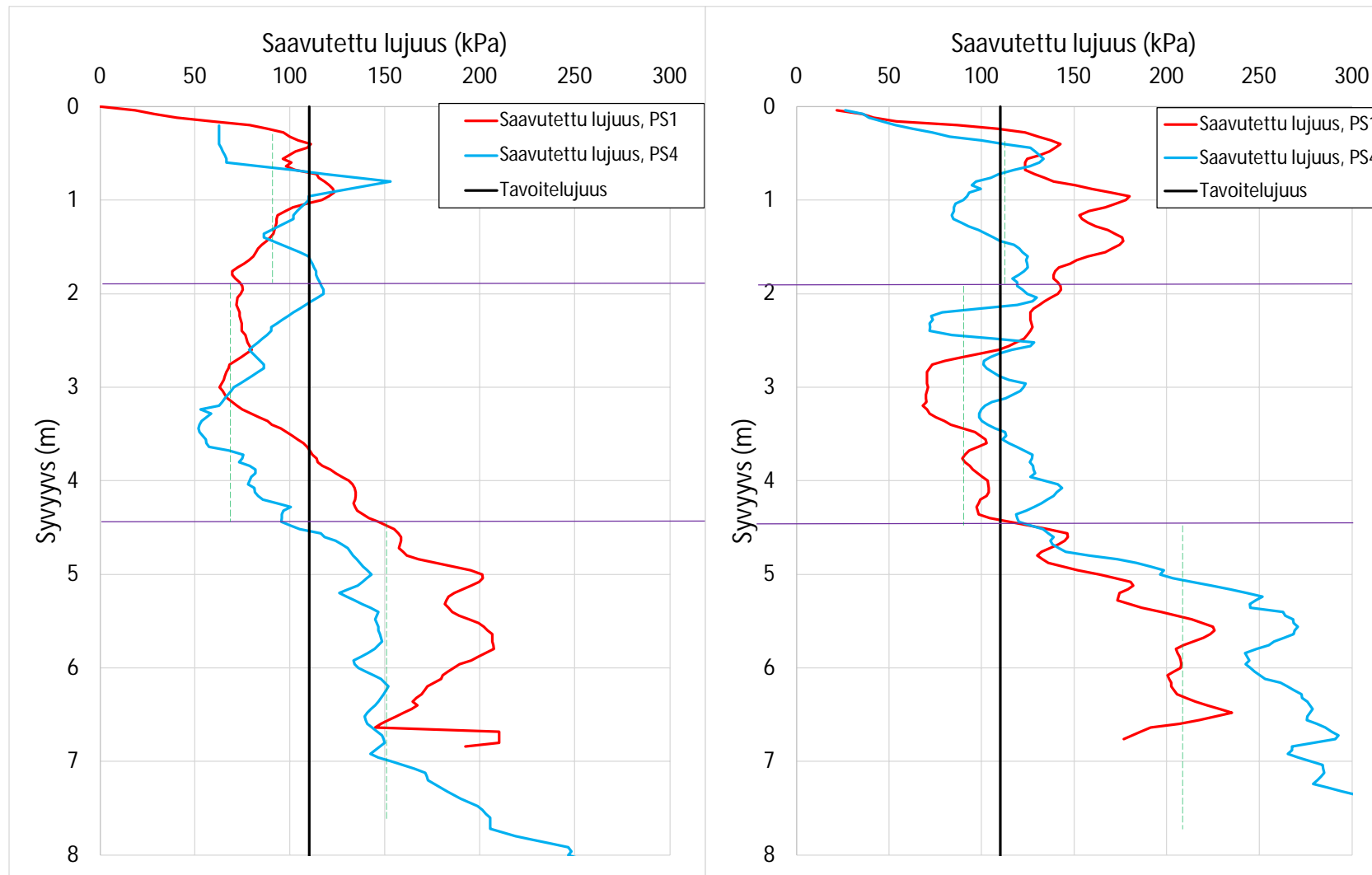
\* lujuuden muutos sideainekiloa kohden  
 \*\* sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden

Alue	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	Leikkauslujuus, pieni (med.)	Leikkauslujuus, pieni (min.)	Leikkauslujuus, iso (ka.)	Leikkauslujuus, iso (med.)	Leikkauslujuus, iso (min.)	Yksikkö	Arvo	
0-2m	113 kPa	111 kPa	60 kPa	182 kPa	197 kPa	73 kPa	kPa / kg/m3 kg/m3 / kPa	2,29	
								0,44	
								1,78	
2-4,5m	121 kPa	112 kPa	70 kPa	175 kPa	172 kPa	124 kPa	kPa / kg/m3 kg/m3 / kPa	0,56	
								1,78	
								0,56	
4,5- m	278 kPa	276 kPa	148 kPa	279 kPa	264 kPa	207 kPa	kPa / kg/m3 kg/m3 / kPa	0,03	
								34,58	
								0,03	

Kuva 105 Malminkenttä, pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointi, POZ.

PIENI SIDEAINEMÄÄRÄ

ISO SIDEAINEMÄÄRÄ



EXTRAPOLOINTI:

leikkauslujuus, pieni (ka.):	80 kPa
leikkauslujuus, iso (ka.):	110 kPa
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>
=> lujuuden muutos *:	1,00 kPa / kg/m <sup>3</sup>
=> sideainemäärän muutos **:	1,00 kg/m <sup>3</sup> / kPa
tavoitelujuus:	110 kPa
=> sideainemäärä:	150 kg/m <sup>3</sup>

APULUVUT

0-2m	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	100 kPa	kPa / kg/m <sup>3</sup>	1,03
	Leikkauslujuus, pieni (med.)	101 kPa	kg/m <sup>3</sup> / kPa	0,97
	Leikkauslujuus, pieni (min.)	66 kPa		
	Leikkauslujuus, iso (ka.)	131 kPa		
	Leikkauslujuus, iso (med.)	126 kPa		
	Leikkauslujuus, iso (min.)	84 kPa		

leikkauslujuus, pieni (ka.):	70 kPa
leikkauslujuus, iso (ka.):	85 kPa
sideainemäärä, pieni:	120 kg/m <sup>3</sup>
sideainemäärä, iso:	150 kg/m <sup>3</sup>
=> lujuuden muutos *:	0,50 kPa / kg/m <sup>3</sup>
=> sideainemäärän muutos **:	2,00 kg/m <sup>3</sup> / kPa
tavoitelujuus:	110 kPa
=> sideainemäärä:	200 kg/m <sup>3</sup>

2-4,5m	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	87	kPa / kg/m <sup>3</sup>	0,61
	Leikkauslujuus, pieni (med.)	81	kg/m <sup>3</sup> / kPa	1,64
	Leikkauslujuus, pieni (min.)	52		
	Leikkauslujuus, iso (ka.)	106		
	Leikkauslujuus, iso (med.)	105		
	Leikkauslujuus, iso (min.)	68		

Selitteet:

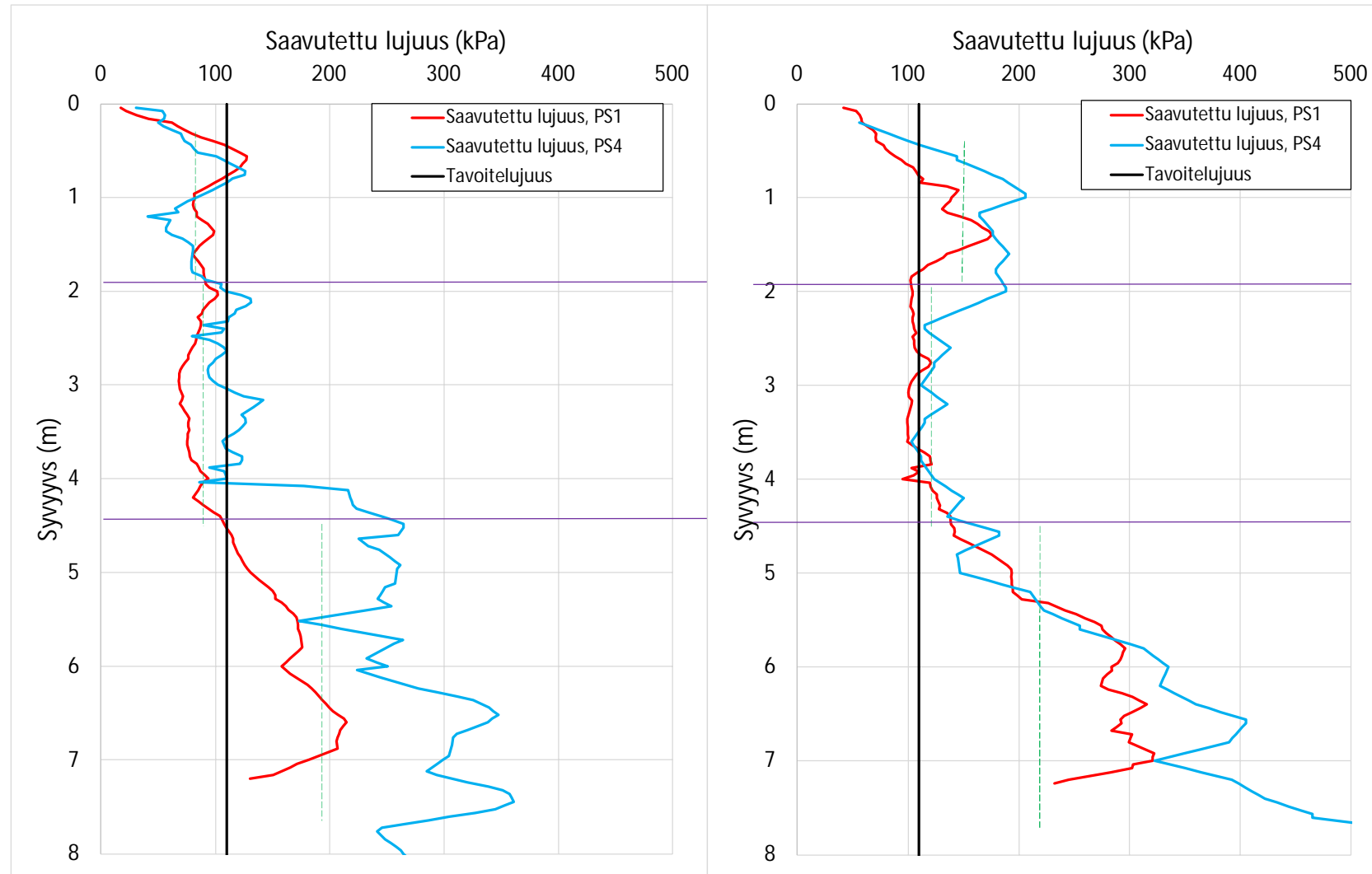
- \* lujuuden muutos sideainekiloa kohden
- \*\* sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden

Kuva 106 Malminkenttä, pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointi, PVO LT+CEMII.



PIENI SIDEAINEMÄÄRÄ

ISO SIDEAINEMÄÄRÄ



EXTRAPOLOINTI:

leikkauslujuus, pieni (ka.): 70 kPa  
 leikkauslujuus, iso (ka.): 130 kPa  
 sideainemäärä, pieni: 120 kg/m<sup>3</sup>  
 sideainemäärä, iso: 150 kg/m<sup>3</sup>  
 => lujuuden muutos \*: 2,00 kPa / kg/m<sup>3</sup>  
 => sideainemäärän muutos \*\*: 0,50 kg/m<sup>3</sup> / kPa  
 tavoitelujuus: 110 kPa  
 => sideainemäärä: 140 kg/m<sup>3</sup>

leikkauslujuus, pieni (ka.): 70 kPa  
 leikkauslujuus, iso (ka.): 110 kPa  
 sideainemäärä, pieni: 120 kg/m<sup>3</sup>  
 sideainemäärä, iso: 150 kg/m<sup>3</sup>  
 => lujuuden muutos \*: 1,33 kPa / kg/m<sup>3</sup>  
 => sideainemäärän muutos \*\*: 0,75 kg/m<sup>3</sup> / kPa  
 tavoitelujuus: 110 kPa  
 => sideainemäärä: 150 kg/m<sup>3</sup>

leikkauslujuus, pieni (ka.): 180 kPa  
 leikkauslujuus, iso (ka.): 220 kPa  
 sideainemäärä, pieni: 120 kg/m<sup>3</sup>  
 sideainemäärä, iso: 150 kg/m<sup>3</sup>  
 => lujuuden muutos \*: 1,33 kPa / kg/m<sup>3</sup>  
 => sideainemäärän muutos \*\*: 0,75 kg/m<sup>3</sup> / kPa  
 tavoitelujuus: 110 kPa  
 => sideainemäärä: 68 kg/m<sup>3</sup> => 70 kg/m<sup>3</sup>  
 (sideainemäärän 70 kg/m<sup>3</sup> toimivuus tulisi todentaa)

Selitteet:

- \* lujuuden muutos sideainekiloa kohden
- \*\* sideainemäärän muutos kilopaskalia kohden

APULUVUT

0-2m	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	91 kPa	kPa / kg/m <sup>3</sup>	2,09
	Leikkauslujuus, pieni (med.)	89 kPa	kg/m <sup>3</sup> / kPa	0,48
	Leikkauslujuus, pieni (min.)	40 kPa		
	Leikkauslujuus, iso (ka.)	153 kPa		
	Leikkauslujuus, iso (med.)	162 kPa		
	Leikkauslujuus, iso (min.)	83 kPa		
2-4,5m	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	107	kPa / kg/m <sup>3</sup>	0,40
	Leikkauslujuus, pieni (med.)	95	kg/m <sup>3</sup> / kPa	2,48
	Leikkauslujuus, pieni (min.)	68		
	Leikkauslujuus, iso (ka.)	119		
	Leikkauslujuus, iso (med.)	116		
	Leikkauslujuus, iso (min.)	95		
4,5- m	Leikkauslujuus, pieni (ka.)	217	kPa / kg/m <sup>3</sup>	1,74
	Leikkauslujuus, pieni (med.)	210	kg/m <sup>3</sup> / kPa	0,57
	Leikkauslujuus, pieni (min.)	109		
	Leikkauslujuus, iso (ka.)	269		
	Leikkauslujuus, iso (med.)	283		
	Leikkauslujuus, iso (min.)	141		

Kuva 107 Malminkenttä, pohjoinen ajoyhteys, sideainemäärien ekstrapolointi, UPM LT+CEMII.