



Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden  
korkeakoulu

Tytti Nguyen

**Uusiosideaineet pilaristabiloinnissa:  
Kuninkaantammen koestabilointi**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 24.1.2021

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaaja: DI Juha Forsman, DI Miia Paatsema

<b>Tekijä</b> Tytti Nguyen		
<b>Työn nimi</b> Uusiosideaineet pilaristabiloinnissa, Kuninkaantammen koestabilointi		
<b>Maisteriohjelma</b> Geoengineering	<b>Koodi</b> ENG23	
<b>Työn valvoja</b> Leena Korkiala-Tanttu		
<b>Työn ohjaaja(t)</b> DI Juha Forsman ja DI Miia Paatsema		
<b>Päivämäärä</b> 24.01.2021	<b>Sivumäärä</b> 84 + 68	<b>Kieli</b> suomi

### Tiivistelmä

Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on maailmanlaajuinen tavoite ja sen saavuttamiseksi myös maarakentamisessa etsitään siihen ratkaisuja. Yksi mahdollinen ratkaisu on uusiomateriaalien kuten teollisuuden sivuvirtojen (esim. metsä- ja energiategollisuuden tuhkien) hyödyntäminen infrarakentamisessa. Tämän työn tavoitteena on edistää vähäpäästöisten uusiomateriaalien käyttöä pilaristabiloinnissa.

Tässä työssä esitellään Helsingin Kuninkaantammen koestabiloinnin toteutusta, tehtyjä tutkimuksia sekä niistä saatuja tuloksia. Koepilaristabilointi toteutettiin toukuussa 2020. Työssä saatuja tuloksia voidaan hyödyntää mm. uusiomateriaalipohjaisten sideaineseosten tuotteistamisessa, ympäristökelpoisuuden osoittamisessa sekä syvästabiloinnin hankinnan ja hankintakriteerien kehittämisessä.

Kuninkaantammessa tehdyt tutkimukset sisälsivät: mm. stabiloitavuus- ja liukoisuuskokeet, maanäytetutkimukset, pilari- ja pilarisiipikairaukset, pilareiden yläpäiden ylösnotot, sideainejakauman vaihteluiden määrittäminen poikkileikkauksessa (pH, XRF, penetrometri-, puristus- ja kartiokokeet), sideaineen diffuusionopeus pilarin ulkopuolelle sekä pohjavesi- ja hulevesiseuranta. Esiselvitysvaiheen laboratoriotutkimuksista vastasivat sideainetoimittajat. Kenttätutkimuksista vastasivat lähinnä Helsingin kaupunki, Stara ja Ramboll. Ympäristötutkimusten tulosten raportointi ei sisällytynyt tähän työhön. Laadunvalvontakäytäntöjen perusteella kaikilla tutkituilla sideaineresepteillä pilareiden tavoitelujuus on saavutettu tai on saavutettavissa sideainemäärää optimoimalla. Tässä työssä keskityttiin pilarin lujuuteen pituus- ja poikkisuunnassa sekä sideaineen jakautumiseen poikkisuunnassa.

Koepilareista saatiin 3 kk ikäisten pilareiden keskiarvoleikkauslujuuksiksi sideainemäärillä 80, 120 ja 160 kg/m<sup>3</sup> 70-350 kPa, 90-400 kPa ja 220-450 kPa. Sideaineiden valmistuksen päästökertoimet olivat 144-307 kg CO<sub>2</sub>-ekv./tn lukuun ottamatta yhtä sideainetta, jolla päästöt olivat n. 609 kg CO<sub>2</sub>-ekv./tn. Esimerkiksi suomalaisella kalkkisementti-sideaineseoksella sideainesuhteella 50/50 päästökerroin on n. 856 kPa. Näin ollen uusiomateriaalien hyödyntämisellä voidaan vähentää materiaalivalmistuksen päästöissä jopa yli 80 %. Päästöt pilarimetriä kohti työssä laskettujen valmistuksen ja kuljetuksen päästökertoimista tavoiteleikkauslujuudelle 100 kPa olivat 46-283 g CO<sub>2</sub>-ekv./m/kPa.

Tässä työssä saatuja tuloksia, edellä mainittujen tulosten lisäksi, ovat mm. aikajättumiskertoimet ja kenttä-/laboratoriolujuuskertoimet (stabiloidun maan leikkauslujuuden mitoitusravon määrittämiseen), kalsiumin, pH:n jakautuminen ja suhteellinen lujuus pilarin poikkisuunnassa sekä sideaineiden valmistuksen, kuljetuksen työmaalle ja pilaristabiloinnin päästökertoimet.

**Avainsanat** Sideaineet, uusiosideaineet, syvästabilointi, pilaristabilointi, koestabilointi, tuhkat

---

<b>Author</b> Tytti Nguyen		
<b>Title of thesis</b> Recovered materials as binders in column stabilization: test column stabilization in Kuninkaantammi		
<b>Master programme</b> Geoengineering	<b>Code</b> ENG23	
<b>Thesis supervisor</b> Leena Korkiala-Tanttu		
<b>Thesis advisor(s)</b> MSc Juha Forsman, MSc Miia Paatsema		
<b>Date</b> 24.01.2021	<b>Number of pages</b> 84 + 68	<b>Language</b> Finnish

---

### Abstract

Reducing carbon dioxide is a global goal and to reach this goal the solution also is looked at from groundworks. One way is to use recovered materials for example forest and energy industrial by-products like ashes and thus decreasing the emissions and the untouched natural resources. The main goal of this thesis is to promote the use of recovered materials in deep stabilization.

This thesis introduces and reports the test deep stabilization done in Kuninkaantammi, investigations done, and results obtained from the investigations. Test stabilization was done in May 2020. The results are planned to use at least product binders made from recovered materials, prove environmental compatibility, developing procurement process, and procurement criterion.

The investigations done in this project includes laboratory investigation of stabilization and solubility of recovered materials and clay from the test area. After stabilization, as part of quality control, there were ground investigations done for one and three months old piles, lifting some upper parts of piles to investigate relative strength and variation in the distribution of binders in the cross-section of these piles (pH, XRF, penetrometer, fall-cone test, unconfined compression test). Also, there were investigations of diffuse of the binders outside the piles and monitoring groundwater and surface water. Material suppliers were in charge of their preliminary investigations. The city of Helsinki, Stara, and Ramboll were in charge of the field works. Environmental studies are not included in this thesis. Based on the ground investigation results the strengths of these piles have reached the target strength (100 kPa) or will be by optimizing the amount of binders. This thesis focuses on the strength of these piles in longitudinal and cross direction and distribution of the binders in the cross-section of these piles.

Average shear strengths from ground investigation for different binders with densities 80, 120, and 160 kg/m<sup>3</sup> were 70-350 kPa, 90-400 kPa, and 220-450 kPa. Emission factors manufacturing binders were 144-307 kg CO<sub>2</sub> eq/t not including a binder that had 609 kg CO<sub>2</sub> eq/t. For example, a Finnish lime-cement-mix with a ratio of 50/50 has a manufacturing emission factor around of 856 kg CO<sub>2</sub> eq/t. Thus, using these materials we can save over 80 % manufacturing emissions. Manufacturing and transporting emissions per strength per pile meter for 100 kPa was 46-283 g CO<sub>2</sub> eq/m/kPa.

The results in the thesis in addition to the above are the distribution of binders in the cross-section of piles (pH values, calcium values, and relative strength), the time strengthening ratio, the field laboratory strength ratio, and emissions of manufacturing, transporting and stabilizing using recovered materials as binders.

---

**Keywords** binder, deep stabilization, fly ash, ash, recovered materials, column stabilization, test stabilization

---

## Alkusanat

*Tämä diplomityö on osa laajempaa UUMA3-hankkeen tavoitetta edistää uusiomateriaalien käyttöä pilaristabiloinnissa. Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia ja raportoida vähäpäästöisten sideaineiden käyttöä Kuninkaantammen koestabiloinnissa. Tulokset toimivat lähtötietona mm. hankintamenettelyn kehittämiseksi.*

*Diplomityön valvojana toimi professori Leena Korkiala-Tanttu ja ohjaajina diplomi-insinöörit Juha Forsman Ramboll Finland Oy:stä ja Miia Paatsema Helsingin kaupungilta. Työn rahoittajana ovat toimineet UUMA3-hanke ja Ramboll Finland Oy. Koerakennuskohteen toteutuksesta ja kenttätutkimuksista sekä joistakin laboratoriotutkimuksista on vastannut Helsingin kaupunki. Sideainetoimittajat ovat vastanneet stabiloitavuus- ja liukoisuuskokeista. Suuri kiitos rahoittajille tämän työn mahdollistamisesta.*

*Kiitokset Leenalle ja Miialle sekä työn ohjausryhmälle tuesta työn aikana. Erityisen suuri kiitos ohjaajalleni Juhalle arvokkaista neuvoista, näkökulmista ja palautteista. Kiitokset Fredrik Winqvistille laadunvalvontaan liittyvistä opeista ja Tuuli Teittiselle päästöasioihin liittyen sekä Luopioisen laboratorion väkeä mukavasta työilmapiiristä ja avusta.*

*Suuri kiitos myös perheelleni ja sukulaisilleni sekä ystävilleni kaikesta saamastani tuesta.*

Espoo 24.1.2021

Tytti Nguyen

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Merkinnät ja lyhenteet

1	Johdanto.....	1
2	Pilaristabiloinnin periaate.....	2
2.1	Sideaineet.....	3
2.2	Sideainereaktiot.....	4
2.3	Stabiloinnin mitoituslujuuden määrittäminen.....	5
2.4	Stabiloinnin muodonmuutosmoduulin määrittäminen.....	6
2.5	Aikalujittuminen.....	7
2.6	Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin.....	11
2.7	Pilarin pituus- ja poikkisuuntainen lujuus.....	12
2.8	Stabiloinnin laadunvalvontamenetelmät.....	14
2.9	Syvästabiloinnin ympäristö- ja ilmastovaikutukset.....	20
3	Kuninkaantammen koestabilointi.....	23
3.1	Rakennuskohde ja geologia.....	23
3.2	Koestabiloinnin valmistelu.....	24
3.3	Koestabiloinnin sideaineseokset.....	28
3.4	Koestabiloinnin toteutus.....	29
3.5	Ympäristöseuranta.....	33
4	Koestabiloinnin laadunvalvonta.....	35
4.1	Stabiloitavuuskokeiden tulokset.....	35
4.2	Valvontakairaukset.....	44
4.3	Pilareiden yläpäiden ylösnosto.....	45
4.4	Pilarinäytteiden laboratoriotutkimukset.....	49
4.5	Ympäristöseurantamittausten tulokset.....	51
5	Stabiloinnin lujittuminen Kuninkaantammessa.....	54
5.1	Aikalujittuminen.....	56
5.2	Kenttä/laboratoriolujuuskerroin.....	57
5.3	Lujittumisen tasalaatuisuus (Pilarin pituus- ja poikkisuunnassa).....	58
6	Syvästabiloinnin kasvihuonekaasupäästöt.....	61
6.1	Sideaineiden valmistuksen päästöjen määrittäminen.....	62
6.2	Sideaineiden kuljetuksen päästöjen määrittäminen.....	63
6.3	Pilaristabiloinnin päästöjen määrittäminen.....	64
6.4	Päästöjen arviointi saavutettua lujuutta kohden (g CO <sub>2</sub> -ekv. /m/kPa).....	65
7	Uusiomateriaalit syvästabiloinnin sideaineena – hankinta ja taloudellisuus.....	68
7.1	Syvästabiloinnin hankintavaihtoehdot.....	68
7.2	Hankinnan päästökriteerit koestabilointiin perustuen.....	69
7.3	Uusiosideaineiden jatkotutkimustarpeet.....	69
7.4	Uusiomateriaalien arvonlisäys teollisuudelle.....	70
8	Yhteenvedo ja johtopäätökset.....	72
	Lähdeluettelo.....	74
	Liiteluettelo	
	Liitteet	

## **Merkinnät ja lyhenteet**

### **Sideaineet**

CaO	poltettu kalkki
Ca(OH) <sub>2</sub>	sammutettu kalkki
CEMII I	Portlandsementti
CEM II B-M (S-LL) 42,5 N	Portlandseossementti, jossa B seosainemäärä 21-35 %, Mix (sisältää useampaa seosainetta), S masuunikuona, LL kalkkikivi, loppulujuus 42,5 MPa – 62,5 MPa, N normaali varhaislujuuden kehitys (≥ 10 MPa 2 vrk:ssa)
LKD	kalkkiuunin sähkösuodinpöly - Lime Kiln Dust
LT	lentotuhka
Plussementti (PlusSe)	normaalisti kovettava portlandseossementti CEM II
QL90T	kalsiittinen kalkki, Nordkalkin tuote Lohjan Tytyrin tehtaalta
SL2T	Ca(OH) <sub>2</sub> , Nordkalkin sammutusjäännös

### **Kairausmenetelmät**

CPT	Cone Penetration Test – puristinkairaus
CPTu	puristinkairaus huokosvedenpainemittauksella
pk2/100	pilarikairaus, jossa kärki on kaksisiipinen ja kärjen alapinnan pinta-ala on 100 cm <sup>2</sup>
ps130/65	pilarisiipikairaus, jossa siiven koko on 13x6,5cm <sup>2</sup>

### **Kaavoissa käytetyt merkinnät**

E <sub>50</sub>	[kPa]	puristuslujuuden puolikasta vastaava kimmomoduuli
k <sub>K/L</sub>	[ - ]	kenttä- ja laboratoriolujuuskerroin
k <sub>Ts/Tt</sub>	[ - ]	aikalujittumiskerroin
N <sub>c</sub>	[ - ]	kokemusperäinen kantavuuskerroin
S <sub>u</sub>	[kPa]	suljettu leikkauslujuus
ε <sub>50</sub>	[%]	puristuslujuuden puolikasta vastaava suhteellinen muodonmuutos

### **Muut**

CO <sub>2</sub> -ekv.	[kg/tn]	hiilidioksidiekvivalentti on tunnus, jolla ilmoitetaan kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärää
pH	[ - ]	happamuusaste, mittaa liuoksen happamuutta
x	[cm]	penetrometrin jousen kokoonpuristuma
XRF		Röntgenfluoresenssispektrometria – X-ray fluorescence
w	[%]	vesipitoisuus
γ	[kN/m <sup>3</sup> ]	maan tilavuuspaino

# 1 Johdanto

Pilaristabiloinnissa sideaineen osuus menetelmän kokonaispäästöistä on merkittävä. Perinteisesti pilaristabiloinnissa käytettävä kalkkisementti-sideaineseos on hyvin päästöintensiivinen. Käyttämällä teollisuuden sivuvirtoja pilaristabiloinnin sideaineseoksissa, päästöt voivat olla huomattavasti pienemmät. Lisäksi teollisuuden sivuvirtoja käyttämällä säästetään primäärisiä raaka-ainevaroja (mineraalivaroja). Jotta markkinoille saadaan uusia vähäpäästöisiä ja edullisia sivutuote- ja jättepohjaisia sideaineita ja edistetään jo olemassa olevien käyttöä, tarvitaan kohteita, joissa niitä voidaan testata ja osoittaa toimivuus (myös toimitusvarmuus ja logistiikka).

Dokumentoidun laboratorio- ja kenttätutkimustiedon aikaansaamiseksi sideaineiden teknisestä toimivuudesta ja ympäristökelpoisuudesta on toteutettu Kuninkaantammen koestabilointi laboratorio- ja kenttätutkimuksineen. Tämä työ keskittyy Kuninkaantammen koestabilointiin, jossa toteutettiin saveen pilaristabilointi uusiosideaineilla toukuussa 2020. Mukana oli yhteensä kuusi sideaineseosta, joista kolme Nordkalk Oy:n, kaksi UPM-Kymmene Oyj:n ja yksi Ecolan Oy:n toimittamaa.

Tämän työn tavoitteena on tutkia ja raportoida vähäpäästöisten sideaineiden käyttöä kirjallisuuden ja Kuninkaantammen koestabiloinnin tutkimusten ja kokemusten pohjalta. Tämä työ alkaa kirjallisuusselvityksestä, missä esitellään pilaristabiloinnin peruseriä lyhyesti ja pilaristabiloinnissa yleisimpiä käytettyjä sideaineita sekä pilaristabiloinnin aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Sitten käydään läpi koestabiloinnin toteutus ja laadunvalvonta. Tämän jälkeen tarkastellaan ja analysoidaan tutkimustulokset. Lopuksi tarkastellaan koestabiloinnin aiheuttamia päästöjä ja käydään läpi hankinnan päästökriteerejä sekä tarkastellaan uusiomateriaalien käyttöä syvästabiloinnin sideaineena hankinnan ja taloudellisuuden näkökulmasta.

Vähäpäästöisten sideaineiden käyttöä voidaan edistää mm. hankintamenettelyillä, joissa CO<sub>2</sub>-ekv.-päästöt ja/tai kierrätysmateriaalien osuus asetetaan hankinnan kriteereiksi. Tämän edistämiseksi tässä työssä analysoidaan koetulokset ja määritellään asiaa käsitteleviä tunnuslukuja esim. sideaineen valmistuksen päästö mitoituslujuutta ja saavutettua lujuutta kohden (g CO<sub>2</sub>-ekv. / m / kPa) päästö/sideainetonnei (kg CO<sub>2</sub>-ekv. / t-sideaine) lisäksi. Tässä työssä aikaansaatu tutkimustieto toimii yhtenä lähtötietona hankintamenettelyjen kehittämiseksi. Lisäksi tämän työn laboratorio- ja kenttätutkimusten perusteella määritetään kenttä-/laboratoriokertoimia tulkituille uusiosideaineille tulevia suunniteluohjeiden täydennyksiä ja -päivityksiä varten. Tässä työssä ei käsitellä sideaineiden kustannuksia, mutta olemassa olevan tiedon perusteella uusiosideaineiden hinta €/tn on pienempi kuin kalkkisementti-sideaineseoksella.

Tämä työ käsittelee koepilaristabilointia kuivamenetelmänä saveen Kuninkaantammessa valituilla sideaineilla. Työ ei ota kantaa muiden maalajien stabilointiin tai muihin pohjanvahvistusmenetelmiin.

## 2 Pilaristabiloinnin periaate

Pilaristabilointi on syvästabilointimenetelmä, jolla pyritään parantamaan pehmeän maa-aineksen, kuten saven, liejun ja turpeen ominaisuuksia lisäämällä sen leikkauslujuutta ja/tai vähentämällä kokoonpuristuvuutta (kuva 2.1). Tämä tapahtuu sekoittamalla kemiallisia seosaineita maa-ainekseen pilareina vierekkäin. Tätä seosainetta kutsutaan sideaineeksi. Sideainetta voidaan syöttää kuiva- ja märkämenetelmänä. Kuivamenetelmässä puhalletaan sideainetta kuivana jauheena paineilmalla maa-ainekseen. Näin sideaine sitoo maaperässä olevaa kosteutta tehokkaammin. Märkämenetelmässä sideaine on juoksevaa vettä ja sideaineen seosta. Suomessa käytetään pilaristabiloinnissa kuivamenetelmää, joka perustuu 1970-luvulla Ruotsissa kehitettyyn kalkkipilarimenetelmään (Lahtinen 1992, 9; Liikennevirasto 2018, 17; Piispanen 2017, 11.)

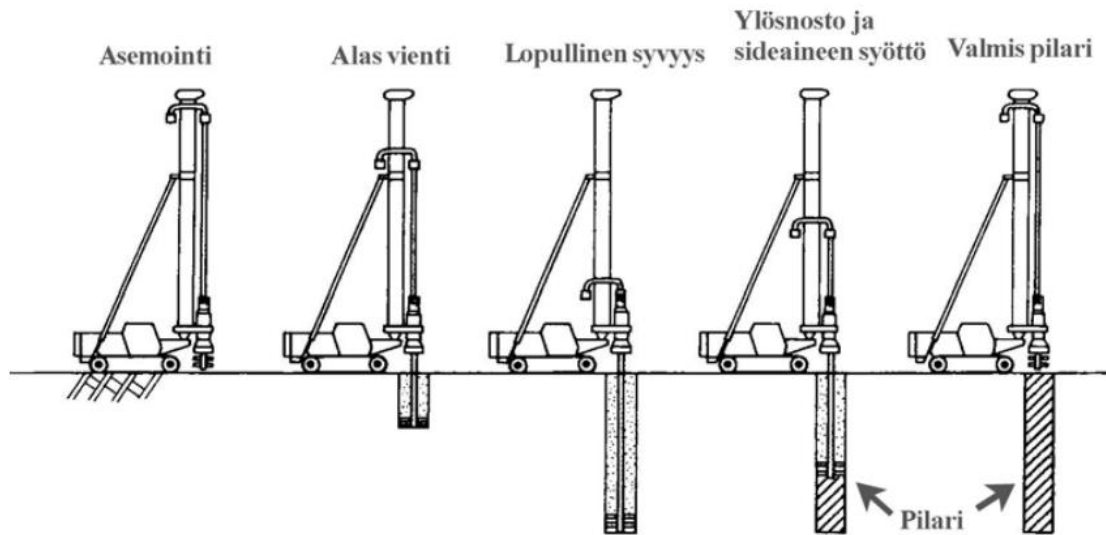
Pilaristabiloinnissa stabilointikoneen sekoitinkärki painetaan pehmeän maa-aineksen alarajaan tai määräsyyvyteen asti, ja sideaineen syöttö ja pilarin sekoitus aloitetaan nostettaessa sekoitinkärkeä ylös. Sideaineen syöttö pehmeään maa-ainekseen tapahtuu sekoitinkärjessä sijaitsevan aukon kautta. Samaan aikaan sekoitinkärkeä pyöritetään parantamaan sekoittumista ja mahdollisimman tasalaatuisen pilarin saavuttamiseksi. Sekoitinkärjen ylösnostonopeus on tärkeä osa syvästabilointia. Sideaineen sekoittamisella on tärkeä rooli tasalaatuisen ja riittävänä lujan pilarin saavuttamiseksi. Ensisijaista pilaristabiloinnissa on varmistaa sideaineen syötön tasaisuus ja hallittavuus, riittävän tehokas sekoitustyö sekä paineilman käytön minimointi. (Liikennevirasto 2018, 19-21.)

Sideaineen syöttömäärää mitataan säiliön massan vähänemisenä sideainetta syötettäessä. Mittauksen tarkkuutta heikentää mm. koneen liike punnituksen aikana. Nykyisin sideaineen syöttömäärää mitataan yleensä 0,2 metrin mittaista pilariosaa kohden ja päästään noin 1 kg mittaustarkkuuteen pilarimetriä kohden. (Liikennevirasto 2018, 21.)

Pilarit ovat tyypillisesti 500-800 mm halkaisijaltaan ja voivat olla jopa noin 25 m pituudeltaan. Sekoitustyön tehokkuus määritellään terätasokierros pilarimetriltä (kaava 2-1). Terätasojen määrä sekoitinkärjessä on nykyisin tavallisesti 2–4 ja terän nousu/kierros on yleensä max. 15 mm/r (Liikennevirasto 2018, 19-21).

$$\text{Sekoitustyön tehokkuus} = \frac{\text{Terätasojen määrä sekoitinkärjessä}}{\text{Nousu kierrosta kohti}} \quad 2-1$$





**Kuva 2.1:** Pilaristabiloinnin periaatekuva Probaha et al. 1999 esittämänä (Kangas & Paatsema 2003, 14).

## 2.1 Sideaineet

Sideaine koostuu yhdestä tai useammasta stabiloitavasta aineesta. Kun sideainetta on useampi, kutsutaan sitä sideaineseokseksi tai seossideaineeksi. Yleensä sideaineseoksissa on sementtiä tai poltettua kalkkia tai molempia. Sideaineseosten seossuhteita vaihtelemalla voidaan saada stabiloidulle rakenteelle erilaisia ominaisuuksia. Sementin ja kalkin rinnalla voidaan käyttää teollisuuden sivutuotteita ja jättepohjaisia sideaineita kuten erilaisia kuonia, lentotuhkaa, kipsimäisiä materiaaleja. (Liikennevirasto 2018, s. 27.)

### Sementti

Sementti on jauhemainen hydraulinen sideaine, joka valmistetaan murskatusta ja jauhetusta kalkkikivestä. Sementti sisältää kalkkikiven lisäksi kalkkivilouhoksen sivukivistä ja muista teollisuuden sivutuotteista piidioksidia ( $\text{SiO}_2$ ), rautaoksidia ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ja alumiinioksidia ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). (Finnsementti 2020, 8.)

### Kalkki

Syvästabiloinnin sideaineena kalkki on poltettua kalkkia ( $\text{CaO}$ , calcium oxide, quicklime), sammutettua kalkkia (poltetusta kalkista) ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , slaked lime, hydrated lime), veden (20-25 %) ja sammutetun kalkin seosta tai sideaineseoksessa esim. kalkkisementtiseoksessa (Kitazume & Terashi 2013, 31). Pelkkä poltetu kalkki oli yleisin sideaine 1980-luvun loppupuolelle asti (Liikennevirasto, 27).

### Kalkkiuunin sähkösuodinpöly

Kalkinpoltossa syntyy hiukkaspäästöjä, joita kerätään sähkösuotimilla kalkinpoltouunissa kalkinpoltton yhteydessä. Sähkösuotimien suodinpöly sisältää pääasiassa kalsiumkarbonaattia ( $\text{CaCO}_3$ ) ja poltettua kalkkia. Suodinpölyn raskasmetallien määrät ovat pieniä. Vuoden 2014 jälkeen sähkösuotimien pölyn hyödyntäminen on kasvanut, kun suodinpölyä ei saanut enää viedä kaatopaikalle. Suodinpölyä hyödynnetään mm. sideaineena stabiloinnissa. (Ympäristökeskus 2008, 5, 7.)

### Kipsi

Teollisuuden sivuaineena syntyvää kipsiä käytetään sideaineseoksessa lisäsideaineena (Piispanen 2017, 16). Kipsiä saadaan voimalaitosten savukaasujen puhdistuksesta märkämenetelmänä. Tämä tapahtuu johtamalla savukaasut kalkkikivilietteeseen. Näiden kemiallisten reaktioiden lopputuloksena syntyy kipsiä. (Knauf 2020.)

### Lentotuhka

Lentotuhka on energiateollisuuden sivuvirtaa. Lentotuhkaa kerätään voimalaitosten savukaasuista, kun jätettä, turvetta, biomassaa tai kivihiiltä poltetaan. Lentotuhka on koostumukseltaan hienorakeista ja jauhemaista. Raekooltaan lentotuhka vastaa silttiä ja on sementtiä karkearakeisempaa. (Piispanen 2017, 16; Hainari 2015, 9.)

## **2.2 Sideainereaktiot**

Sideaineiden lujittumisreaktioita ovat hydrataatioreaktio, potsolaaninen reaktio, ioninvaihtoreaktio ja ettringiitin muodostuminen. Hydrataatioreaktio on sementin ja veden välinen reaktio. Potsolaaninen reaktio voi tapahtua, kun sementin tai kalkin reaktion muodostama kalsiumhydroksidi ja maan potsolaaniset mineraalit reagoivat keskenään tai potsolaaninen materiaali ja lisätyn tai jonkun toisen reaktion tuottaman kalsiumhydroksidi reagoivat keskenään. Lisäksi on ioninvaihtoreaktiot, jotka ovat sementin tai kalkin muodostaman kalsiumhydroksidin ja maan ionin välinen reaktio. Ettringiitin muodostuminen tapahtuu, kun kipsi reagoi veden ja saven mineraalien kanssa. (Hainari 2015,14.)

Sideaineiden reaktiivisuus on riippuvainen niiden kontaktipinta-alasta. Pienempi partikkelikoko merkitsee suurempaa kontaktipinta-alaa ja voimakkaampaa reaktiivisuutta. Yleensä syvästabilointiin käytetyt sideaineet ovat sementti ja kalkki sekä niiden seokset. (Piispanen 2017, 31.)

Tavallisimmat sideaineiden pääreaktiot, niihin reagoivat aineet ja aikajänneet on esitetty taulukossa 2.1. Alla on selitetty pääreaktiot lyhyesti.

- Hydrataatio on veden ja sementin välinen reaktio, joka johtaa seoksen kovettumiseen (Finnsementti 2012, 46).
- Potsolaaneja ovat silikaatti- ( $\text{SiO}_2$ ) ja aluminaattipitoiset ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) materiaalit. Potsolaanisella reaktiolla tarkoitetaan sideaineen piidioksidin ( $\text{SiO}_2$ ), alumiinioksidin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ja rautaoksidin ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) kykyä reagoida kemiallisesti kalsiumhydroksidin  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kanssa (Kujala 1982, 65).
- Ettringiitti on sementin hydrataatiossa syntyvä hydrataatioreaktiotuote ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ). Ettringiitin muodostuminen aiheuttaa tilavuuden kasvua. (Finnsementti 2012, 46; Kujala 1982, 68.)

**Taulukko 2.1: Tavallisimpien sideaineiden lujittumisreaktiot Janz & Johansson 2002 esittämänä (Piispanen 2017, 26, taulukko 3.1).**

Sideaine	Reaktio	Reagoivat aineet	Aikajänne
Sementti	Hydrataatio	Vesi	Päiviä
Kalkki	Pozzolaaninen	Vesi + savi / pozzolaani	Kuukausia
Masuunikuona	Hydrataatio	Vesi + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ *	Viikkoja
Lentotuhka	Pozzolaaninen	Vesi + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ *	Kuukausia
Kipsi	Ettringiitin muodostus	Vesi + saven mineraalit	Tunteja/päiviä

\*  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  peräisin esim. sementin hydrataatiosta tai kalkin reaktiosta

### **2.3 Stabiloinnin mitoituslujuuden määrittäminen**

Stabiloinnin mitoituslujuusarvo on suunnittelussa käytettävä materiaalin lujuusarvo. Mitoituslujuusarvo saadaan jakamalla tutkimuksissa saatu materiaalia edustava lujuusarvo varmuuskertoimilla. Stabiloinnin mitoittava lujuusarvo on leikkauslujuus, joka voidaan määrittää:

- laboratoriossa tehtävillä stabiloitavuuskokeilla
- koestabiloinnin laadunvalvontakairausten tuloksista
- samassa geologisessa muodostumassa tehtyjen aikaisempien stabilointien toteumatiedoissa
- kokemuseräisesti.

(Liikennevirasto 2018, 57.)

Alustavissa suunnitteluvaiheissa voidaan hyödyntää lähiympäristön toteumatietoja. Ennen niiden käyttöä on kuitenkin varmistettava, että suunnittelualueen ja sen lähialueen savikerrosten indeksiominaisuudet varsinkin humus- ja vesipitoisuudet vastaavat toisiinsa. (Liikennevirasto 2018, 37 & liite 2.)

Koestabilointi ja vastaavat laboratoriokokeet alkavat sillä, että määritetään asioiden tärkeysjärjestys kuten sideaineen määrä, lujittumisnopeus ja sekoitinkärjen nostonopeus yms. Tutkittavan asian kannalta vähäiset tekijät pidetään kokeissa vakiona. Stabiloinnin lujuustavoitetta voidaan arvioida jo stabiloitavuuskokeiden suunnitteluvaiheessa. Koepilarit voidaan koestaa useammilla menetelmillä mutta vähintään pilarikairauksella, ellei pilarin lujuus tee pilarikairausta soveltumattomaksi. Pilareista otettavat näytteet antavat usein harhaanjohtavan kuvan pilarin lujuudesta. Sen vuoksi näytteenottoa käytetään vain muita menetelmiä täydentävänä tietona. (Liikennevirasto 2018, liite 2.)

Laboratoriokokeissa määritetään koekappaleista vähintään puristuslujuus ja muodonmuutosmoduuli E. Laboratoriokokeilla saaduista leikkauslujuuksista saadaan mitoituslujuuksia laboratoriolujuuden korjauskertoimella eli ns. kenttä-/laboratoriokertoimella. (Liikennevirasto 2018, 59.) Stabiloinnin mitoitusarvo määritetään kaavoilla 2-2, 2-3 ja 2-4 (Liikennevirasto 2018, 54-55).

$$\tau_{stab;k} = \tau_{stab} \times k_{K/L} \times k_{ed.} \times k_{Ts/Tt} \quad 2-2$$

$$\tau_{stab;lab} = \sigma_{murto, lab.}/2 \quad 2-3$$

$$\tau_{stab;d} = \tau_{stab;k}/\gamma_{stab} \quad 2-4$$

$\tau_{stab;k}$  stabiloidun maan leikkauslujuuden ominaisarvo mitoitusajan jälkeen (yleensä 28 vrk tai 90 vrk)

$\tau_{stab}$   $\left\{ \begin{array}{l} \tau_{stab;lab} \\ \tau_{stab;koestab} \\ \tau_{stab,tuot.stab} \\ \tau_{stab;emp} \end{array} \right.$

$\tau_{stab;lab}$  laboratoriossa valmistetun näytteen puristuskestävyydestä määritetty leikkauslujuus

$\tau_{stab;koestab}$  koestabiloinnin laadunvalvontakairaustuloksista määritetty stabiloidun maan leikkauslujuus

$\tau_{stab,tuot.stab}$  tuotantostabiloinnin laadunvalvontakairaustuloksista määritetty stabiloidun maan leikkauslujuus

$\tau_{stab;emp}$  kokemuseräisesti määritetty stabiloidun maan leikkauslujuus

$k_{K/L}$  kenttä- / laboratoriolujuuskerroin

$k_{ed.}$  koetulosten edustavuuskerroin

$k_{Ts/Tt}$  aikalujittumiskerroin

$\sigma_{murto,lab.}$  laboratoriossa valmistetun stabiloidun näytteen puristuskestävyys, 1- aksiaalinen

$\tau_{stab;d}$  stabiloidun maan leikkauslujuuden mitoitusarvo stabiliteettilaskentaan ja pilarin puristuskestävyydestä tarkasteluun

$\gamma_{stab}$  leikkauslujuuden osavarmuusluku stabiloidulle maalle (=1,4)

## 2.4 Stabiloinnin muodonmuutosmoduulin määrittäminen

Painumatarkastelussa käytetään pilareille muodonmuutosmoduulia  $E_{pilari}$ . Muodonmuutosmoduulin arvo voidaan saada laboratoriotuloksista tai lähialueen vastaavan stabiloinnin painumamittaustuloksista. Mikäli edelliset menetelmät eivät ole käytettävissä, määritetään pilarin muodonmuutosmoduuli kaavalla 2-5.

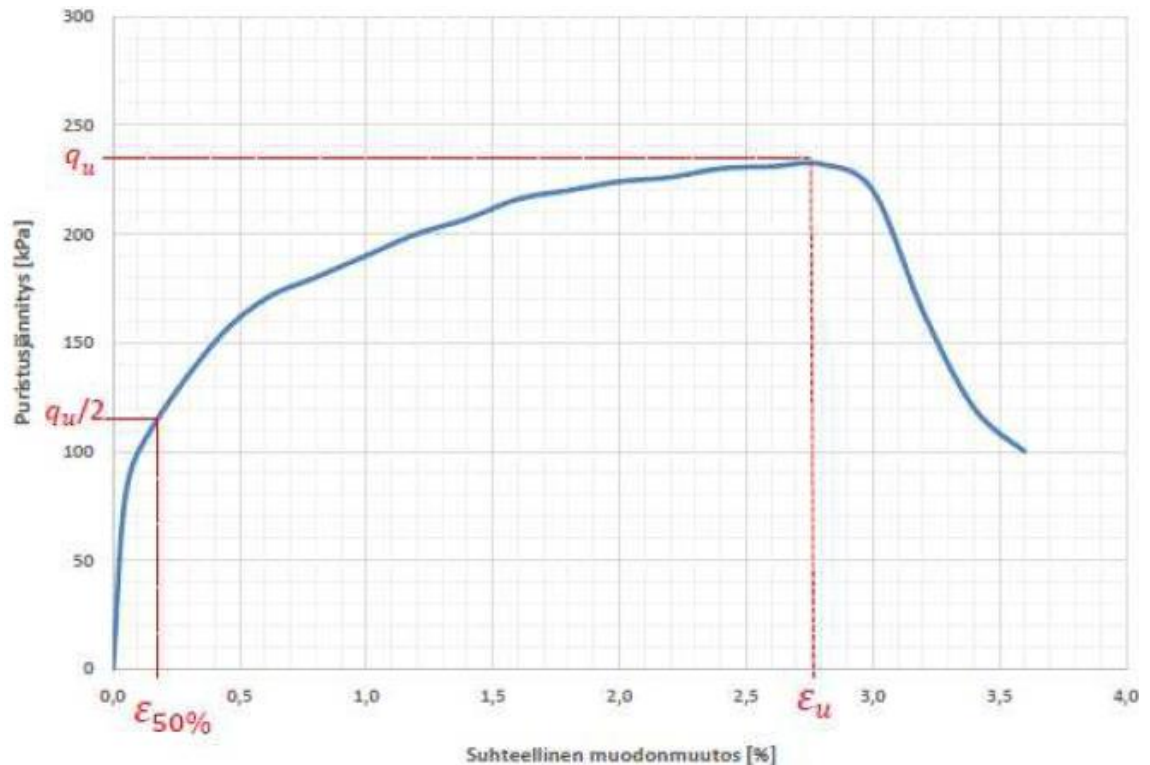
$$E_{pilari} = 20 \times (k_{myötö} \times \tau_{stab;k})^{1,6} = 20 \times (0,7 \times \tau_{stab;k})^{1,6} \quad 2-5$$

$E_{pilari}$  stabilointipilarin muodonmuutosmoduuli

$k_{myötö}$  oletusarvo 0,7

$\tau_{stab;k}$  stabiloidun maan leikkauslujuuden ominaisarvo

Yksiakiaalisen puristuskokeen muodonmuutosmoduuli  $E_{50}$  määritetään puristuskokeen jännitys-muodonmuutos-kuvaajasta (kuva 2.2) ja kaavalla 2-6.



**Kuva 2.2: Esimerkki puristuslujuuskuvaajasta ja  $E_{50}$ -moduulin määrittämisestä. (Liikennevirasto 2018, liite 1)**

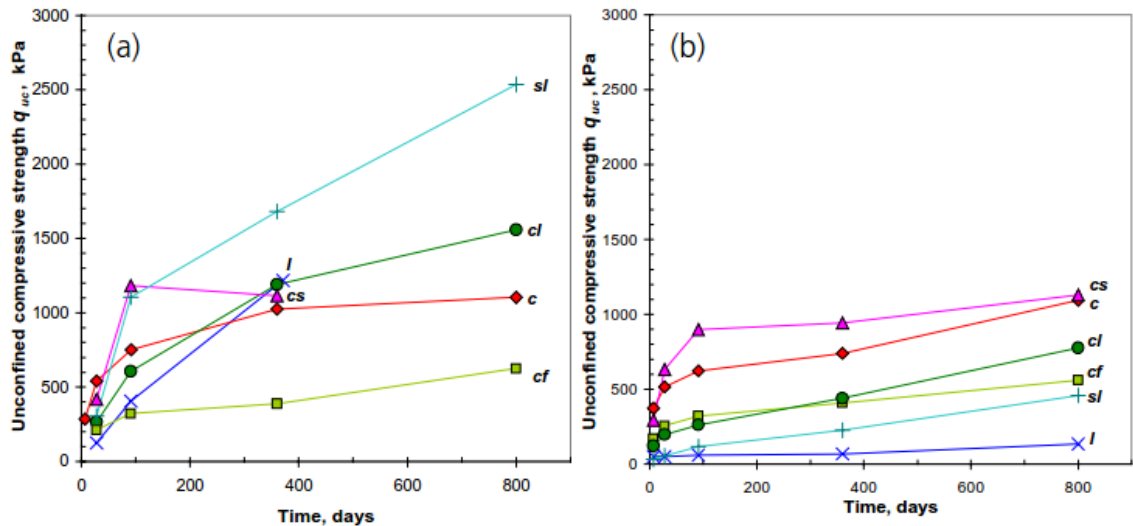
$$E_{50} = \frac{q_u/2}{(\epsilon_{50\%}/100\%)} \quad 2-6$$

$E_{50}$	stabiloidun maan muodonmuutosmoduuli, määritetään väliltä $0 \dots 0,5 \times \sigma_{1 \text{ murto}}$ [kPa] (sekanttimoduuli käyrästä, kuva 2.2)
$q_u$	puristuslujuus [kPa] ( $= \sigma_{1 \text{ murto}}$ )
$\epsilon_{50\%}$	puristuslujuuden puolikasta $0,5 \times \sigma_{1 \text{ murto}}$ vastaava muodonmuutos [%]

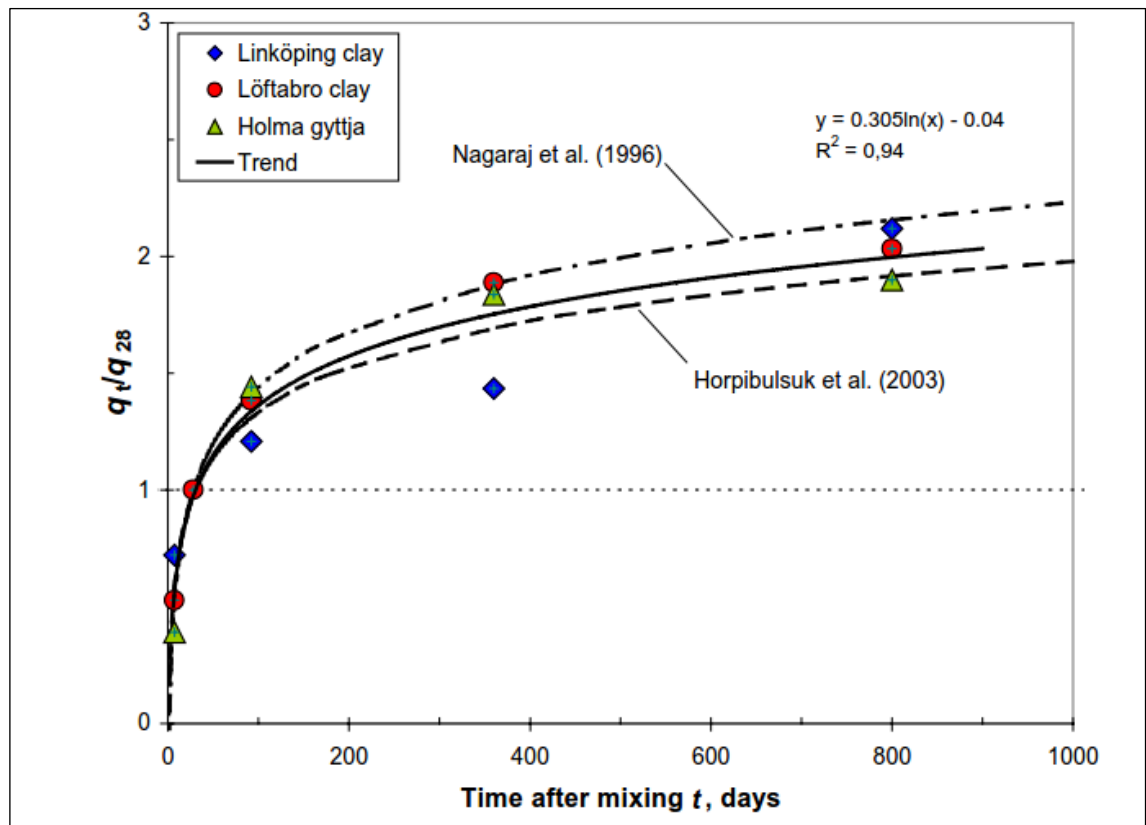
## 2.5 Aikalujittuminen

### Aikalujittuminen

Aikalujittumisella tarkoitetaan stabiloidun maan lujittumista ajan suhteen. Puhutaan alkulujittumisesta sekä pitkäaikaislujuutumisesta (tai pitkäaikaistoimivuudesta). Alkulujittuminen on stabiloidun maan lujittumista päivissä, viikoissa ja kuukausissa. Pitkäaikaislujuutumisessa tarkkaillaan stabiloidun maan lujittumista ja/tai lujuuden säilymistä vuosissa tai vuosikymmenissä (Piispanen 2017, 35). Lujittumisen kehittymiseen vaikuttavat sideaineen ja maa-aineksen väliset kemialliset reaktiot sekä ulkoiset tekijät kuten stabiloidun maan kuormittaminen ja tiivistyminen, ympäröivä maaperä ja pohjaolosuhteet. Toteutettavaan kohteeseen tulisi valita sideaine, jonka aikalujittuminen sopii projektin aikatauluun. Kuvassa 2.3 on joitakin esimerkkejä aikalujittumisesta laboratoriokokeissa useilla eri sideaineilla. Kuvassa 2.4 on esitetty eri tutkijoiden esittämien sementillä stabiloidun saven aikalujittumiskuvaajia. Kuvaan on lisätty myös ruotsalaisella savella tehtyjen puristuskokeiden tuloksia.



Kuva 2.3: Yksiakiaalisen puristuskokeen lujuudet ajan suhteen. Runkoaineena (a) Löftabron (b) Linköpingin savi ja sideaineina sementti (c), kalkki (l) sekä sideaineseokset sementti-lentotuhka (cf) (50:50), sementti-kuona 50:50 (cs), sementti-kalkki (cl) 50:50, kuona-kalkki (sl) 50:50. (Åhnberg 2006, 30)



Kuva 2.4: Aikalujittumiskertoimet sementille runkoaineena Linköpingin ja Löftabron savi (clay) ja Holman lieju (gyttja), vertailuaika 28 vrk. Kuvassa myös tuloksia edustava trendiviiva. (Åhnberg 2006, 32)

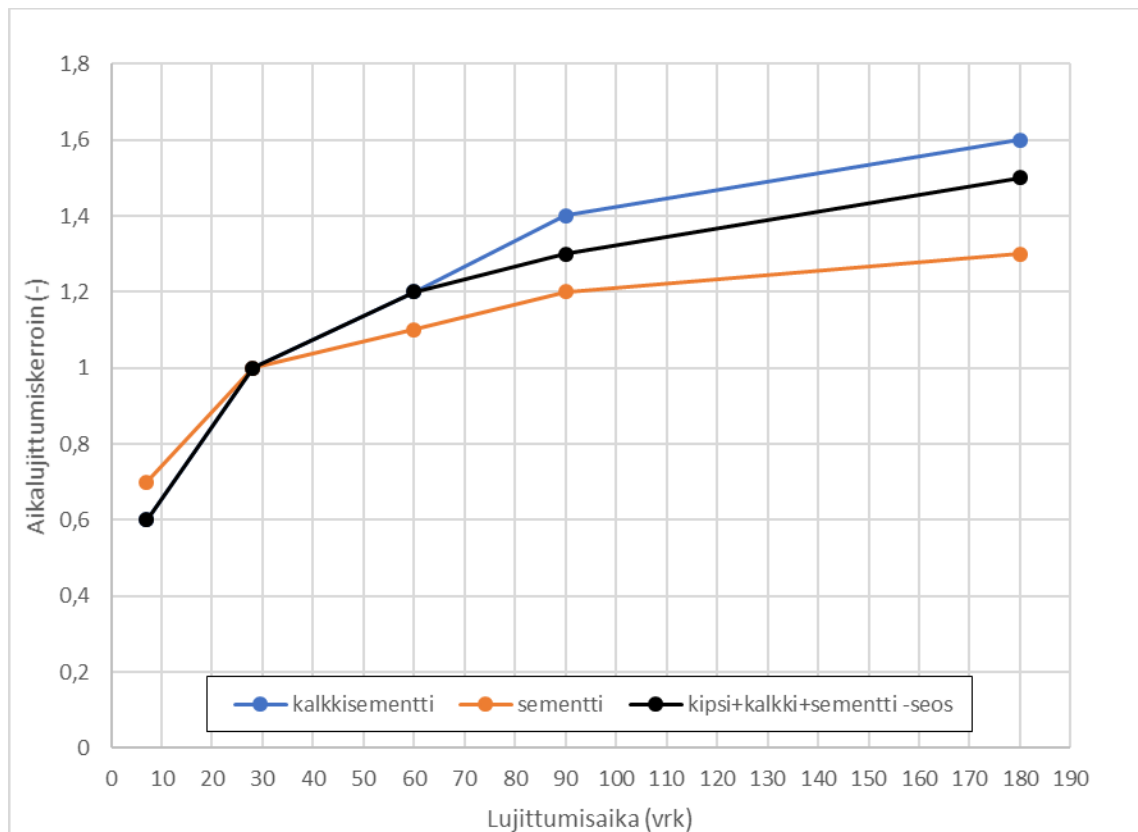
### Aikalujittamiskerroin

Aikalujittumiskertoimella huomioidaan stabiloidun maan leikkauslujuuden ominaisarvon määrittämisessä ennakkotutkimuksen ja suunnitellun lujittumisajan ero (kaava 2-7). Kuvassa 2.5 on esitetty tyypillisiä aikalujittumiskertoimen arvoja vertailuaikana 28 vrk. Esimerkiksi kalkkisementtiseoksen aikalujittumiskerroin kuvassa 2.5 on 90 vrk:n lujittumisen jälkeen 1,4. Saatu aikalujittumiskerroin on laboratoriossa saatu 90 vrk:n leikkauslujuus suhteessa 28 vrk:n lujuuteen. Aikalujittumiskerroin määritetään siis vertaamalla laboratoriotulosta laboratoriotulokseen. Kalkkisementtiseoksen leikkauslujuus on siis kehittynyt 40% 28 vrk:sta 90 vrk:n. Näin ollen stabiloitavuuskokeilla saatu 28 vrk:n leikkauslujuus kerrotaan mm. kertoimella 1,4 jos halutaan määrittää 90 vrk lujittuneen stabiloidun maan leikkauslujuuden ominaisarvo. (Liikennevirasto 2018, 55-57.)

$$k_{T_s/T_t} = \frac{\tau_{stab;s}}{\tau_{stab;t}} \quad 2-7$$

$\tau_{stab;s}$  leikkauslujuus suunnittelulujittumisajan jälkeen

$\tau_{stab;t}$  leikkauslujuus ennakkotutkimusten lujittumisajan jälkeen

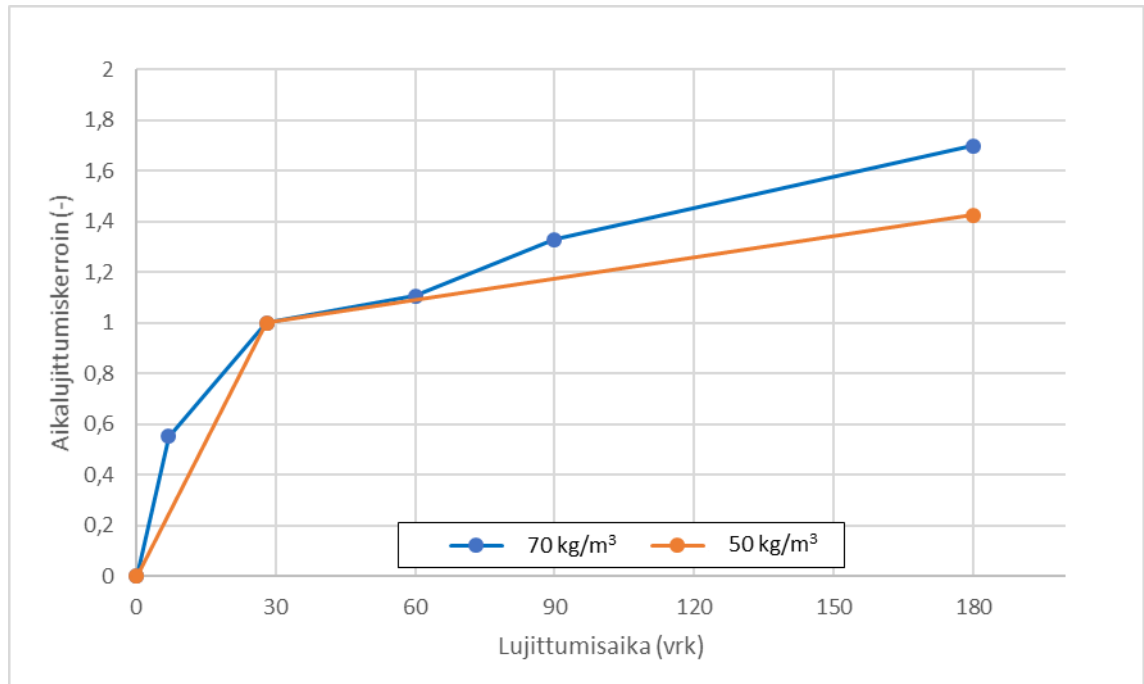


**Kuva 2.5:** Liikenneviraston ohjeessa esitetyjä tyypillisiä aikalujittumiskertoimen  $k_{T_s/T_t}$  arvoja kuvaajina (runkoaineena savi). Kertoimet perustuvat lukuisten kohteiden laboratoriotutkimustuloksiin. Vertailuaika 28 vrk. (Liikennevirasto 2018, 57 – muutettu taulukosta kuvaksi.)

Kuvissa 2.6, 2.7 ja 2.8 on esitetty aikalujittumiskertoimia, jotka on määritetty Hainarin (2015, liite 1) esittämistä stabiloitavuuskoetuloksista. Runkoaineena ko. kokeissa on ollut

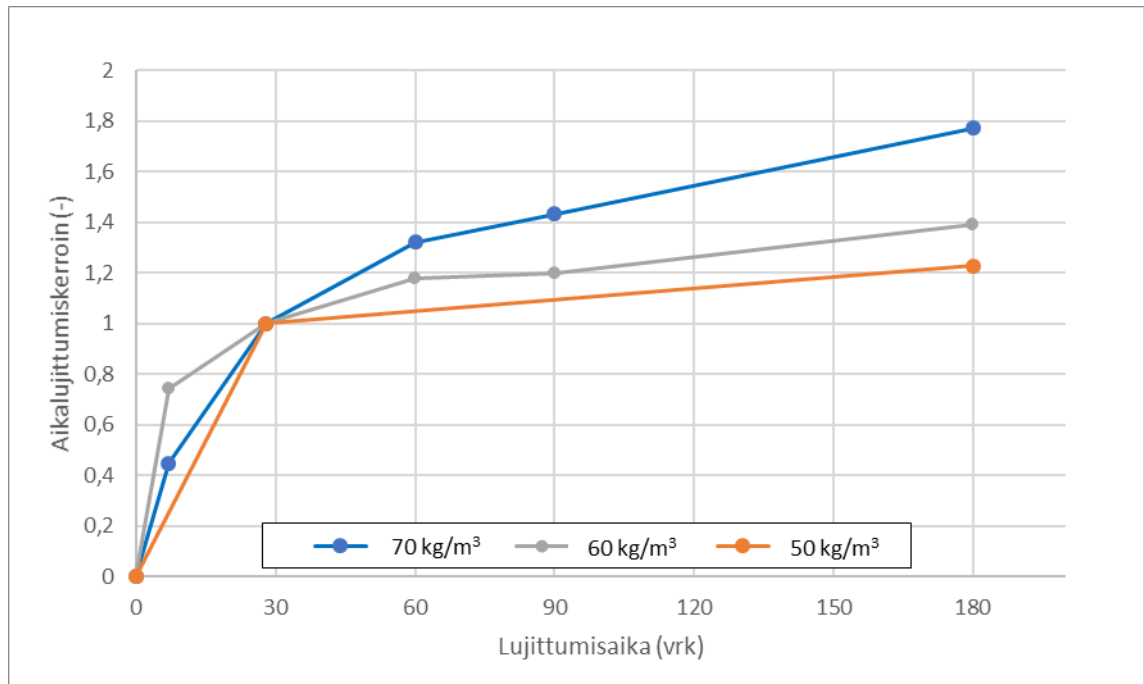
Honkasuon ja Kuohijoen savi. Aikalujittumiskertoimet ovat poltettu kalkki-Plussementti-sideaineseokselle seossuhteella 3:7 (kuva 2.6), Nordkalk Terra GTC:lle (kuva 2.7) ja Plussementille (kuva 2.8). Kuvassa 2.8 Plussementti + lentotuhka -sideaineseoksessa on Helsingin Hanasaaren kivihiilen polton lentotuhkaa. Kuvissa vertailuaika on 28 vrk.

Liitteessä 1 on Uotisen (1994) esittämiä aikalujittumiskertoimia kalkkisementti -sideaineseokselle 1:1 ja 1:2, sementille, kalkille, Finnstabi + kalkki-sideaineseokselle 1:1 ja LohjaMix-sideaineelle. Kuvissa vertailuaika on 30 vrk. Tulokset ovat laboratorioissa tehtyjen stabiloitavuuskokeiden puristuskokeista.

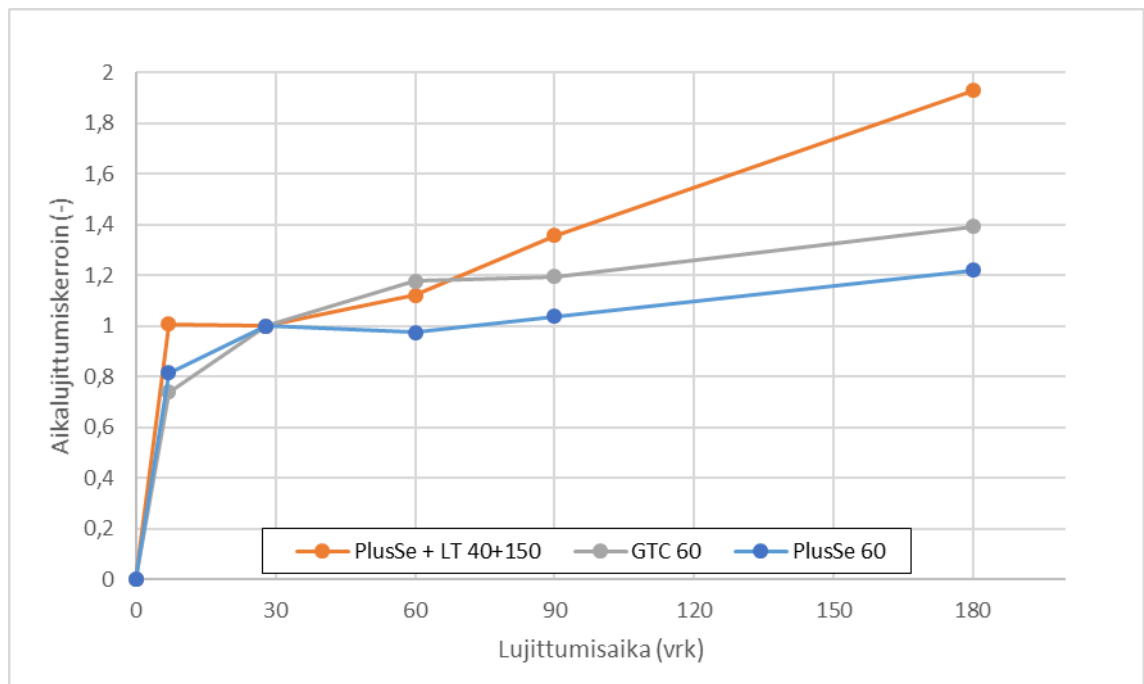


**Kuva 2.6: Aikalujittuminen sideaineseoksella poltettu kalkki + Plussementti (KC) 3:7. Runkoaineena savi Honkasuolta. (Hainari 2015, liite 1 – aikalujittumiskertoimet määritetty liitteen puristuskokeiden lujuuksista)**





**Kuva 2.7: Aikalujittuminen sideaineella Nordkalk Terra GTC. Runkoaineena savi Honkasuolta ja Kuohijoelta. (Hainari 2015, liite 1 – aikalujittumiskertoimet määritetty liitteen puristuskokeiden lujuuksista)**



**Kuva 2.8: Aikalujittuminen Plussementillä. Runkoaineena savi Honkasuolta ja Kuohijoelta. Kuvassa sideaineena Plussementti sekä Plussementti+lentotuhka -sideaineseos 1:3,7. (Hainari 2015, liite 1 – aikalujittumiskertoimet määritetty liitteen puristuskokeiden lujuuksista)**

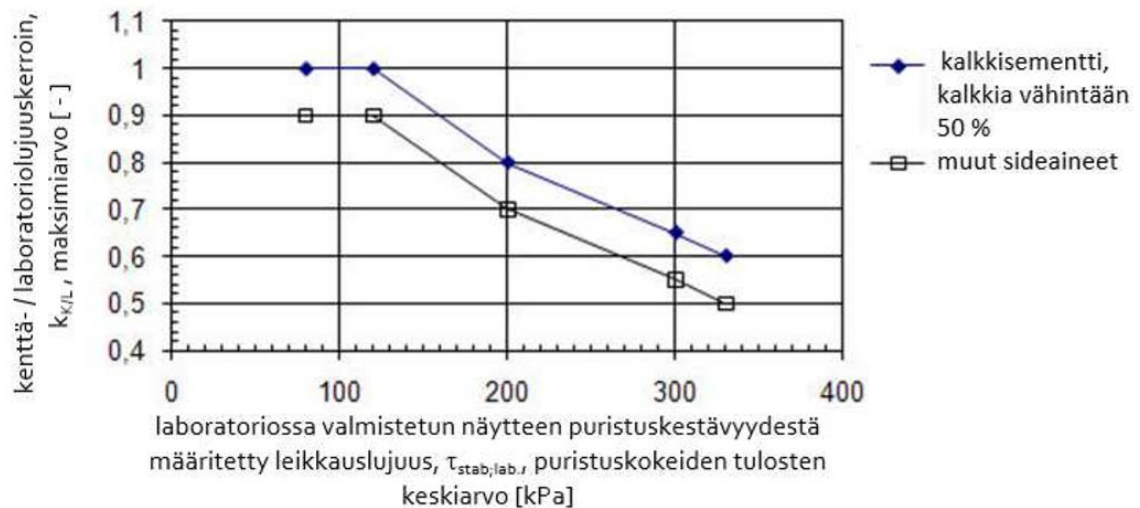
## 2.6 Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin

Kenttä-/laboratoriolujuuskerrointa tarvitaan stabiloidun maan leikkauslujuuden ominaisarvon määrittämiseen. Leikkauslujuuden ominaisarvo edustaa stabiloidun maan leikkauslujuutta. Laboratorion määrittämä stabiloidun maan leikkauslujuuden keskiarvo

muutetaan toimivaksi kenttälujuuksi kenttä-/laboratoriolujuuskertoimella  $k_{K/L}$  (kaava 2-8).

$$k_{K/L} = \frac{\text{kenttäljuuus}}{\text{laboratorioljuuus}} \quad 2-8$$

Pilaristabiloinnin kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$  kalkkisementille ja muille sideaineille on esitetty kuvassa 2.9 (Liikennevirasto 2018, 60).



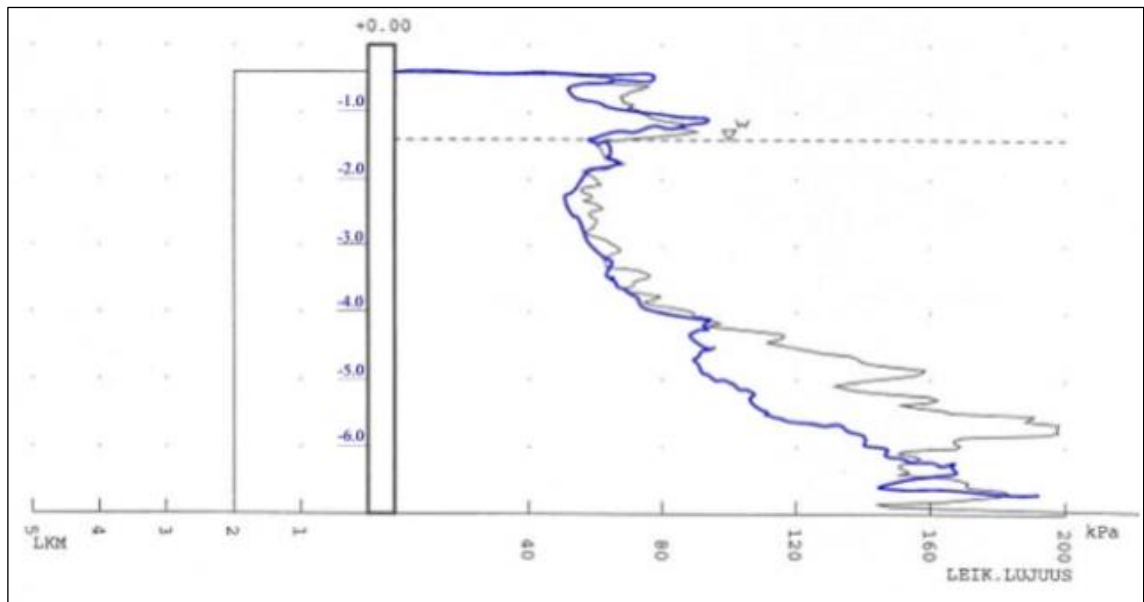
**Kuva 2.9: Laboratoriolujuuden korjauskertoimen (kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$ ) maksimiarvo pilaristabiloinnille. Kun sideaine sisältää vain sementtiä, kerrotaan kuvaajalta ”muut sideaineet” saatava kerroin luvulla  $\leq 0,8$ . (Liikennevirasto 2018, 60, kuva 6.5)**

Kenttä- ja laboratoriolujuudet voivat poiketa toisistaan vaikka sideaineen ja maaperän välisten pääreaktioiden oletetaan pysyvän samoina in situ- tilanteessa kuin laboratoriokeksissäkin (Åhnberg 2006, Piispanen 2017, 33). Piispanen (2017, 33) esittää eron johtuvan mm. seuraavista syistä:

- sideaine sekoitetaan laboratorio-olosuhteissa paremmin
- vallitseva lämpötilaero in situ -tilanteessa ja laboratoriossa
- kalkin ja veden välisessä reaktiossa vapautuvan energian ja sitä kautta nousevan lämpötilan in situ-vaikutuksia on vaikea mallintaa laboratorio-olosuhteissa (lämpötilalla on vaikutusta varsinkin potsolaanisiin lujittumisreaktioihin)
- kuivastabiloinnissa kuiva sideaine pienentää maaperän vesipitoisuutta, mikä johtaa yleisesti lujuuden kasvuun (laboratoriokeksissä vesipitoisuus laskee ja pysyy vakiona tai pienenee, kun taas in situ -tilanteessa vesipitoisuus voi jälleen nousta stabiloinnin ympäriltä tulevan veden ja kyllästymisen seurauksena).

## 2.7 Pilarin pituus- ja poikkisuuntainen lujuus

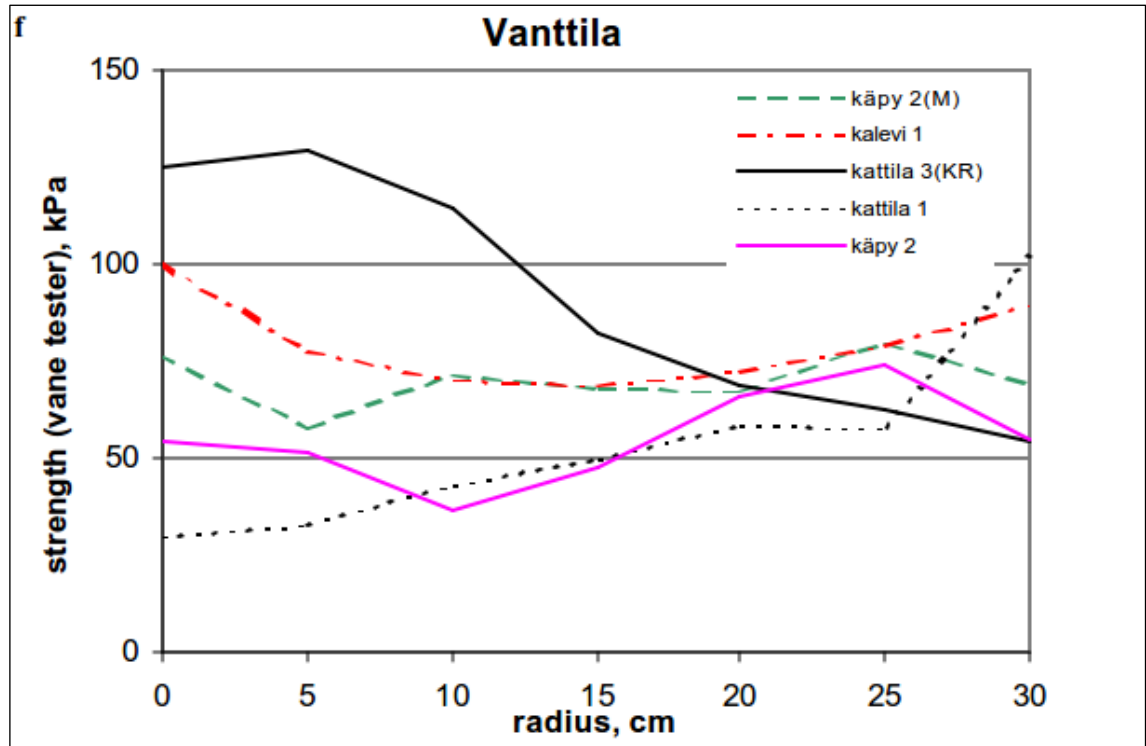
Pilarin pituussuuntainen lujuus ja sen tasalaatuisuus selvitetään laadunvalvontakairauksilla (Liikennevirasto 2018, 114-115). Kuvassa 2.10 on esitetty esimerkki stabiloinnin laadunvalvontakairauksesta, jossa näkyy pilarin syvyys-suuntaista lujuuden vaihtelua.



**Kuva 2.10: Eri sekoitinkärjillä stabiloitujen pilareiden keskiarvokuvaajat. Vanttila. Sekoituskärki käpy 2:lla valmistettujen kalkkisementtipilarien leikkauslujuuden keskiarvokuvaaja syvyyden funktiona (harmaa). Referenssikärjen, kattila 1:n keskiarvokuvaaja on merkitty mustalla. (Aalto 2002, 25)**

Pilarin poikkisuuntaista lujuuden vaihtelua voidaan tutkia vain isoista näytteistä eli ylösnostetuista pilareista. Muutaman metrin pituisia pilarin yläosaa voidaan nostaa kaivinkoneella kaivamalla tai pilarin ympärille painettavalla sylinterimäisellä putkella. Pilarin nostaminen syvemmältä vaatii raskaan nosturin käyttämistä ylösnostossa sekä erikseen rakennetun pilarinostoputken, jossa on suljin, joka estää pilarin valumisen putkesta. (Lahtinen & Parkkinen 1992, 26-29; Liikennevirasto 2018, 116; Aalto 2002, 21-22.)

Ylösnoston jälkeen pilarista voidaan selvittää silmämääräisesti sideaineen sekoittuminen pilarin eri osiin. Penetrometrimittauksilla voidaan saada nopea arvio pilarin leikkauslujuudesta ja lujuusvaihteluista. Tarkemmat tutkimukset tehdään laboratoriokokeilla. pH-mittauksilla tutkitaan sideaineen jakautumista pilarin eri osiin. pH-mittaus voidaan suorittaa laboratoriossa vesiliuoksesta. Lujuutta voidaan tutkia puristuskokeilla pilarinäytteistä. (Lahtinen & Parkkinen 1992, 26-27.) Lujuutta voidaan tutkia myös taskusiipikairalla (pocket vane tester) (Aalto 2002, 23-24). Kuvassa 2.11 on esitetty esimerkki erilaisilla sekoitinkärjillä stabiloitujen pilarien lujuuden vaihtelu pilarin poikkisuunnassa keskiarvokuvaajista. Kattilakärki oli 2000-luvun alkuun asti vallitseva kärkityyppi (Törnqvist 2003, 32; Aalto 2002, 5). Nykyään yleisempi sekoitinkärki on käpykärki.



**Kuva 2.11: Esimerkki eri sekoituskärjillä pilaristabiloitujen sementtipilarien lujuudet pilarin poikkileikkauksessa. Lujuudet on määritetty ”taskusiipikairalla”. Yhteenvetokuvaaja leikkauslujuusmittarilla mitatuista lujuuksista pilarin säteen funktiona. Tasot syvyyksiltä 1,5 – 3,6 m. (Aalto 2002, 32)**

## 2.8 Stabiloinnin laadunvalvontamenetelmät

Ennen stabilointia tehtyjen laadunvalvontatutkimusten perusteella voidaan tarkentaa stabilointityön toteutusta sekä syötettävän sideaineen määrää (luku 2.3). Stabilointityön aikaisella laadunvalvonnalla ja stabiloinnin jälkeisellä laadunvarmistuksella todennetaan, että stabilointi tulee saavuttamaan tai on saavuttanut tavoitelujuutensa. (Liikennevirasto 2018, 113.)

Stabilointityön aikainen laadunvalvonta saadaan stabilointityön toteumatiedoista, jotka löytyvät stabilointipöytäkirjasta. Syvästabilointityön onnistumista testataan stabiloinnin jälkeen mm. valvontakairauksilla ja näytteenotoilla sekä harvoin pilarien ylösnostoilla. Kairauksilla tutkitaan stabiloidun maan saavutettua lujuutta ja sen riittävää homogeenisuutta. Laboratoriotutkimuksilla ja pilareiden ylösnostoilla selvitetään mm. sideaineen sekoittumista tasaisesti runkoaineen sekaan. (Liikennevirasto 2018, 113 ja liite 6)

### Kairausmenetelmät

Valmiiden pilareiden laadunvarmistus toteutetaan kairaamalla valmiit pilarit in situ. Laadunvarmistukseen soveltuvia kairausmenetelmiä ovat pilarikairaus, puristinkairaus (CPT/CPTu), pilarisiipikairaus ja puristinheijarikairaus. Pilari- ja pilarisiipikairaus ovat yleisimmin käytössä olevia laadunvalvontakairauksia. Tyypillisesti pilarikairauksessa käytetään pk2/100 -mallia. Mallissa numero 2 tarkoittaa pilarikairaa, jonka kärjessä on kaksi siipeä ja 100:lla tarkoitetaan vaakasuoran pohjapinta-alaa eli tässä tapauksessa 100 cm<sup>2</sup>. Pilarisiipikairauksessa käytetään yleisesti mallia PS130/65, jossa siiven koko on 13

x 6,5 cm<sup>2</sup>. Mikäli pilari on niin lujaa, että pilarikaira ei tunkeudu siihen (kun pilarin leikkauslujuus noin 200-250 kPa) käytetään yleensä puristinheijarikairausta. (Liikennevirasto 2018, 114.)

### Pilarikairaus

Pilarikairauksessa tutkitaan pilaria koko pituudeltaan, mikä näyttää pilarin mahdolliset epäjatkuvuuskohdat (kuva 2.12). Pilarikairassa on ohjainkärki, joka auttaa pitämään kairan pilarin keskiosassa. Pitkissä pilareissa todennäköisyys kairan tunkeutumisesta pilarista ulos kasvaa merkittävästi. Toisin kuin puristinheijarikairauksessa, pilarikairauksessa tankoa ei pyöritetä kairatessa (Piispanen 2017, 23).

Pilarikairaa puristetaan pilarin keskiosasta alas ja tuloksena saadaan pilarikairan painamiseen tarvitsema puristusvoima syvyyden funktiona. Kun puristaminen ei ole mahdollista, yleensä kun leikkauslujuus on yli 200kPa, pilarikairaus toteutetaan heijaroimalla. Toisin sanoen pilarin pehmeät osat kairataan puristamalla ja lujat kohdat heijaroimalla. Heijaroimalla pilaria saadaan tulokseksi lyöntiä per 0,2m. Tämä tulos muunnetaan leikkauslujuudeksi olettaen, että 10 lyöntiä/ 0,2 m vastaa puristusvastusarvoa 1 MPa (kaava 2-9). Sen lisäksi tarvitaan  $N_c$ , joka on kokemusperäinen kantavuuskerroin, jota tarvitaan leikkauslujuuden määrittämisessä. Suomessa käytetään tyypillisesti lukua 10 kantavuuskertoimelle  $N_c$ , mutta kertoimen arvo voi vaihdella arviolta 10-20 (Melander 2017,22; Halkola 1999; Bergman 2012). Useimmiten puristamalla saatu tulos on heijaroimalla saatua tulosta tarkempi, sillä kairakärjen painamiseen käytettävä puristusvoima mitataan puolen sekunnin välein ja hetkellinen puristusvoima 1 Newtonin tarkkuudella, kun taas heijaroitaessa lasketaan ja tallennetaan 0,04 m kairausyvyvyyden välein. Kaavoilla 2-10, 2-11 ja 2-12 muutetaan pilarikairausten tulokset leikkauslujuudeksi. (Lahtinen ja Parkkinen 1992, 20-21; Melander 2017, 21-22; Liikennevirasto 2018, 114.)

$$\frac{10 \text{ lyöntiä}}{0,2 \text{ m}} \text{ vastaa } q_c: n \text{ arvoa } 1 \text{ MPa} \quad 2-9$$

Pilarikairausten pk/100 lyönnit muutetaan kärkivastukseksi.

$$q_c = \frac{N_{20}}{A} \quad 2-10$$

Pilarikairausten puristus muutetaan kärkivastukseksi.

$$q_c = \frac{F_{tot}}{A} \quad 2-11$$

Leikkauslujuus

$$s_u = \frac{q_c - \sigma'_0}{N_c} \quad 2-12$$

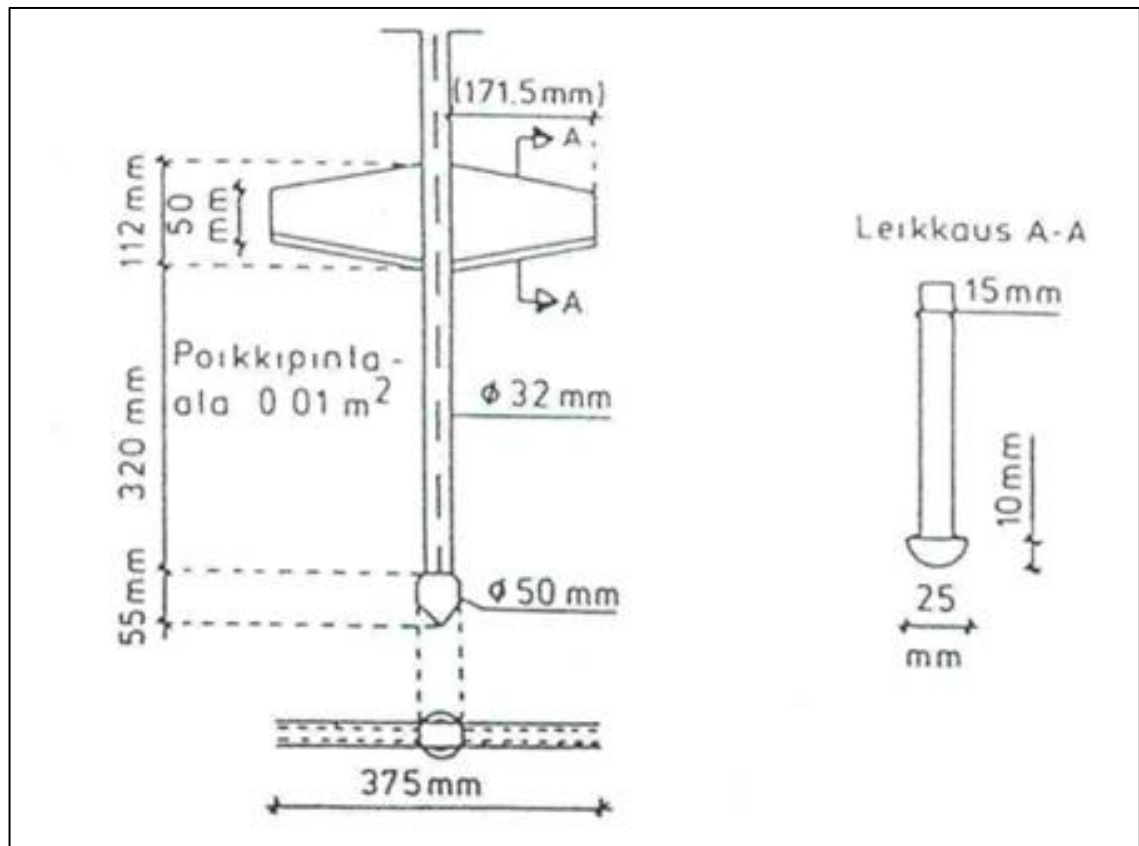
$q_c$	lyönnin tai puristuksen kärkivastus [kPa]
$N_{20}$	lyöntien määrä / 0,2 m [kpl]
$N_c$	kokemusperäinen kantavuuskerroin [-]
$A$	kärjen pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$F_{tot}$	mitattu puristusvoima [N]

$s_u$	likimääräinen suljettu leikkauslujuus [kPa]
$\sigma'_0$	maaperässä vaikuttava tehokas pystysuora jännitys [kPa]

Yksinkertaistettu leikkauslujuuden kaava ilman tehokasta pystysuoraa jännitystä  $\sigma_0$  (Ruotsala 2011, s. 25-26). Virhe yksinkertaistetussa kaavassa on yleensä hyvin pieni (erityisesti, jos kairaukset ovat lyhyitä alle 15-20 m). Tällöin leikkauslujuus voidaan määrittää kaavalla 2-13.

$$s_u = \frac{p}{N} \quad 2-13$$

Pilarikairauksen etuja ovat sen suorittamisen nopeus, suhteellisen edullinen hinta muihin menetelmiin verrattuna sekä tulokset koko pilarin pituudelta. Vaikka pilarin erityinen ohjainjärki auttaa kairaa pysymään pilarin keskiosassa sen ohjautuminen haastavissa maolosuhteissa tai syvissä pilareissa on silti suuri haaste. Sen lisäksi pilarikairaustuloksissa on mukana pilarikairan vaippavastus, joka vääristää tulosta varsinkin heijarointivaiheessa. Lisäksi heijaroimalla saaduissa tuloksissa vaippavastuksen vaihtelut saattavat näyttää harhauttavasti lisälujuutena. (Ruotsala 2011, 11.)

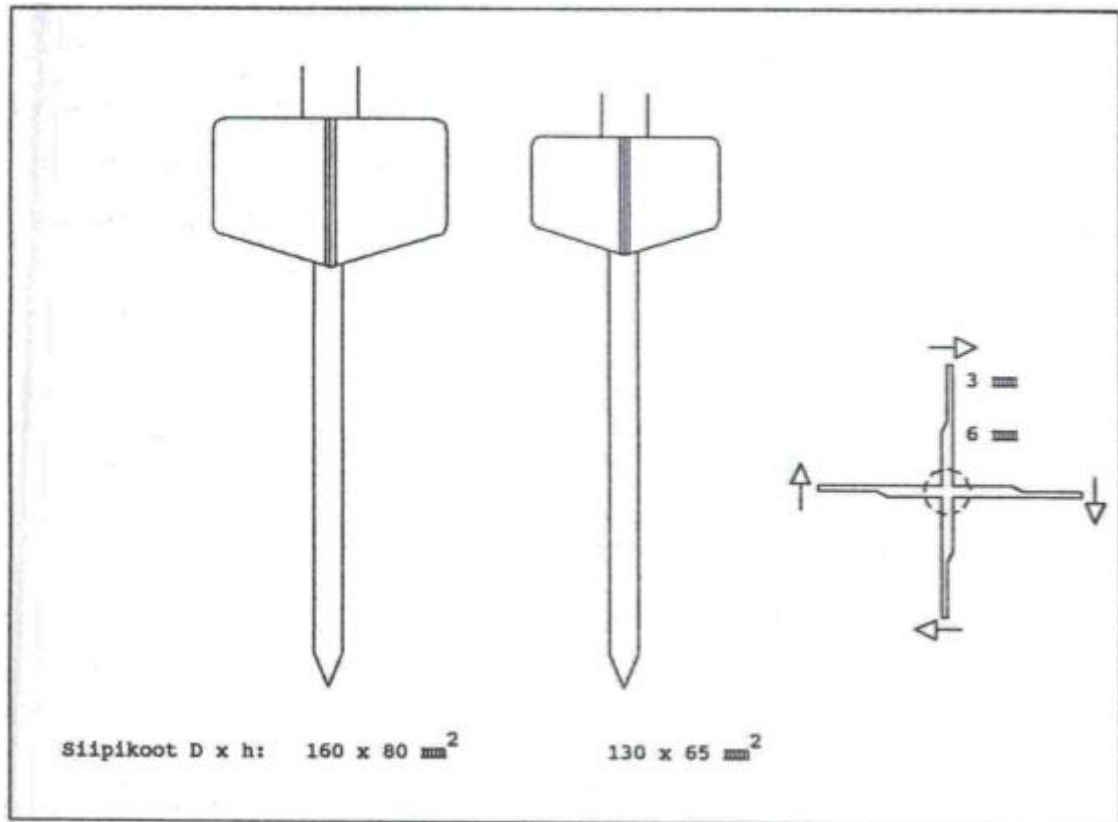


**Kuva 2.12: Pilarikaira (Lahtinen 1992, s. 20 kuva 4; Liikennevirasto 2018, liite 8).**

### Pilarisiipikairaus

Pilarisiipikairauksella saadaan mitattua pilarin leikkauslujuutta suoraan (kuva 2.13). Tämä on pilarisiipikairauksen merkittävin etu. Pilarisiipikairauksen heikkouksia ovat tulosten epäjatkuvuus sillä mittaukset saadaan tietyiltä syvyyksiltä, kairaus on hidasta ja kärki ohjautuu melko helposti ulos pilarista. Pilarisiipikairaus on hitaampi, hankalampi ja kalliimpi toteuttaa kuin pilarikairaus. Pilarisiipikairaus soveltuu pilarikairaustulosten ka-

libroimiseen, joten pilarisiipikairaus on hyvä toteuttaa pilarikairauksen rinnalla. Pilarisiipikairaustulosten perusteella määritetään kantavuuskerroin  $N_c$ , tavoitteena on saada pilarikairauksen laskettu leikkauslujuus samaksi kuin pilarisiipikairauksella saatu. (Ruotsala 2011, 26-27.)



**Kuva 2.13: Pilarisiipikaira (Lahtinen 1992, 22 kuva 5).**

#### Puristinkairaus

Puristinkairauskoe (Cone Penetration Test, CPT) huokosvedenpaineen mittauksella (CPTu) mittaa kärkikartioon ja vaippahylsyyhin kohdistuvaa vastusta (Selänpää 2015, 3). Puristinkaira mittaa pilarin puristuslujuuden suoraan kairan kärjestä sähköisesti (Lahtinen 1992, 21). Puristinkairauskokeessa puristetaan CPTu-kärkeä 2 cm/s ja mitataan yleensä 2 cm välein vastukset, huokosvedenpaineen sekä kairauksen suoruuden (Selänpää 2015, 3). CPTu-kairan kärjen alapinnan pinta-ala on yleensä 10 cm<sup>2</sup>. Puristuskairaus suositellaan käytettävän vain kohtuullisen alhaisen lujuuden omaavan stabiloidun maan tutkimuksissa (Liikennevirasto 2018, 115).

#### Ruuvilevykuormitus

Ruuvilevytyskokeen avulla voidaan tutkia valmiiden pilareiden lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia. Ruuvilevykuormituskoe vaatii paljon aikaa, kokeella saadaan yhdessä työvuorossa vain 1-2 pilaria koestettua (Lahtinen 1992, s.25). Tämä on kuitenkin ainoa menetelmä, jolla saadaan pilarin kimmomoduuli määritettyä in situ -tilanteessa. Ruuvilevykuormituskokeessa kierretään ruuvimainen levy halutulle syvyydelle ja tehdään puristuskoe. (Liikennevirasto 2018, 115.) Ruuvilevykuormitusmenetelmää ei käytetty tässä koestabiloinnissa.

### Näytteenottomenetelmät

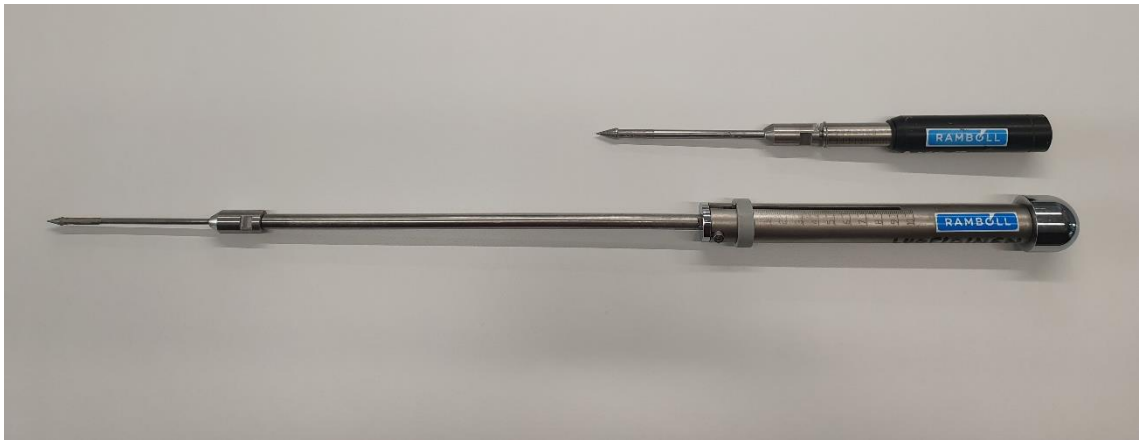
Näytettä laboratoriotutkimusta varten voidaan ottaa lujittuneesta maasta in situ näytteenottimella, putkella, poraamalla tai kaivinkoneella. Näytteenottimella otettu näyte on ehjänä säilyessään soveltuva tutkittavaksi. Paloina näytteet on muotoiltava laboratoriossa sylinterin muotoisiksi laboratoriotutkimuksia varten. Yksiaksoisessa puristuskokeessa näyte on oltava häiriintymätön (tai mahdollisimman vähän häiritty) ja ehjä liian alhaisen lujuuden välttämiseksi. Pelkän maan sideainepitoisuuden määrittämiseksi näyte voi olla häiriintynyt. (Liikennevirasto 2018, 115-116.)

### Pilarin ylösnosto

Pilarin onnistumista voidaan tutkia nostamalla pilaria tai pilarin yläosaa ylös. Tällöin voidaan arvioida pilaria silmämääräisesti sekä erilaisilla kenttä- ja laboratoriotutkimusmenetelmillä. Pilarin yläpään nostaminen muutaman metrin syvyydeltä voidaan toteuttaa kaivinkoneella tai lyhyellä pilarin ympärille painettavalla putkella. Pilarien nostaminen syvemmältä voi vaatia raskaan nosturin käyttämistä ylösnostossa. Pitkän pilarin esim. 10 metrin pilarin ylösnosto on erittäin työläs ja kallis menetelmä. (Liikennevirasto 2018, 116.)

### Penetrometri

Penetrometrillä voidaan arvioida suuntaa antavasti maa-aineksen lujuuskehitystä. Penetrometrin kartiomainen kärki painetaan tasaisella voimalla tutkittavaan maahan. Laitteen kärjen puristuminen aiheuttaa laitteen sisällä olevan jousen puristumista, jota mitataan millimetreinä (kuva 2.14). (Hautalahti 2007, 22.)



**Kuva 2.14: Koepilareiden tutkimisessa käytetyt kaksi erilaista penetrometriä. (valokuva Tytti Nguyen 21.9.2020)**

### XRF-menetelmä

Röntgenfluoresenssispektrometria (X-ray fluorescence, XRF) on teollisuudessa käytettävä analyysimenetelmä. XRF-laite voi mitata kaikki alkuaineet fluorista uraaniin ( $Z=9-92$ ). (Cooper 2011, s. 2.) Pilaristabiloinnin laadunvalvonnassa laitetta voidaan käyttää valmiiden pilareiden sideainesytön tasaisuuden tutkimiseen (Liikennevirasto 2018, liite 6/2). XRF-laitevalmistajia ovat mm. Niton ja Olympus. Kuninkaantammen koestabiloitujen pilareiden metallipitoisuuksien tutkimiseen käytettiin Olympus – Vanta- XRF-laitetta (kuva 2.15).

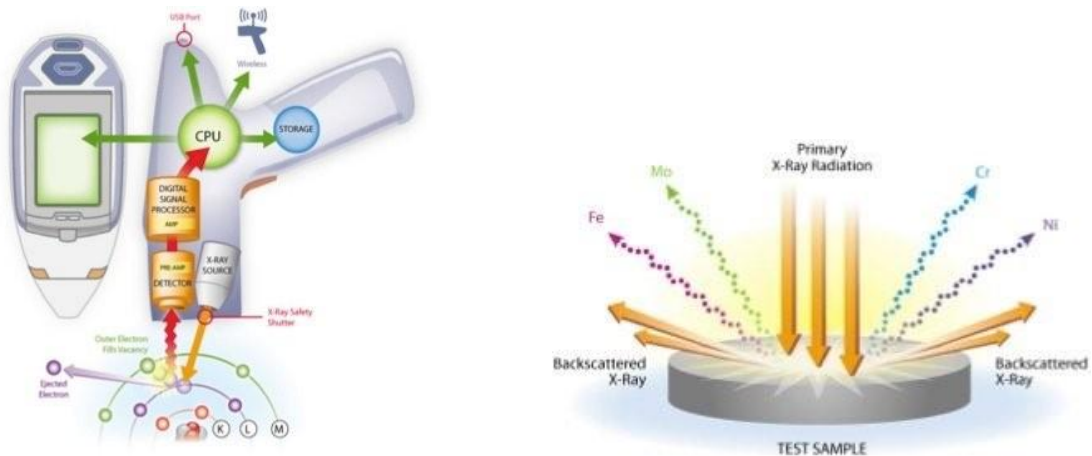
XRF-Nitron-laitteen toimintaperiaatekuva on esitetty kuvassa 2.16. XRF-menetelmä perustuu kemialliseen ilmiöön nimeltä röntgenfluoresenssi, joka on sähkömagneettista säteilyä. Menetelmässä röntgenputki ja detektori ovat päärooleissa. Röntgenputki synnyttää



röntgensäteilyä, kun siihen johdetaan virtaa. Tämä säteily aiheuttaa elektronien liikehdinnän, josta syntyy fluoresenssisäteilyä. Fluoresenssisäteily lähtee näytteestä pois päin, jolloin detektori ottaa tämän fluoresenssisäteilyn vastaan ja tunnistaa jokaisen alkuaineen ominaisen aaltoliikkeen. Menetelmä perustuu toisin sanoen röntgensäteilyn aiheuttamaan reaktioon näytteessä. (Holger Hartmann Oy 2020.)



**Kuva 2.15:** Koepilareiden tutkimisessa käytetty Olympus – Vanta – XRF-laite. (valokuvat Tytti Nguyen 11.9.2020)



**Kuva 2.16:** XRF-Nitron-laitteen toimintaperiaatekuva (Holger Hartmann Oy 2020).

### Laboratoriokokeet

Laboratoriossa tapahtuvaan laadunvalvontaan kuuluu ennen stabilointia stabiloitavan alueen luonnonmaan tutkiminen (mm. indeksiominaisuudet) sekä stabiloitavuuskokeet sekä niistä määritettävät lujuudet ja muodonmuutosmoduuli. Stabiloinnin jälkeen laboratoriossa voidaan tutkia, miten maan stabilointi on onnistunut eli näytteitä otetaan stabiloidusta maasta, joita tutkitaan laboratoriossa. (Liikennevirasto 2018.)

## **2.9 Syvästabiloinnin ympäristö- ja ilmastovaikutukset**

### Ympäristövaikutukset

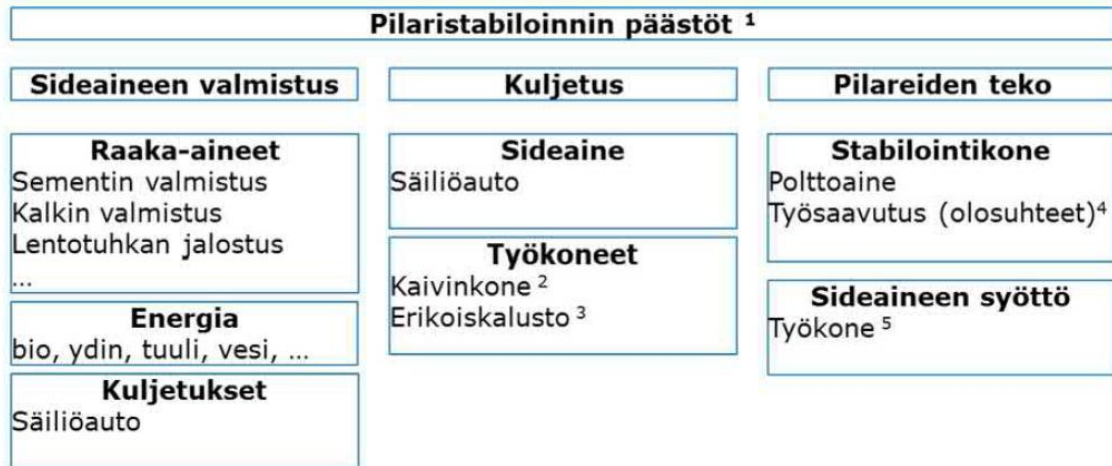
Syvästabilointi aiheuttaa stabilointikohteen ympäristössä maapohjan tilapäistä häiriintymistä ja tärinää. Häiriintymisen ja tärinän minimoimiseksi tarpeettoman suuren syöttöpaineen ja ilmamäärän käyttöä on vältettävä. Kun sideaine syötetään maaperään paineilmalla, yleensä ilma purkautuu sekoittimen vartta pitkin maanpinnalle. Ilman poistuminen maasta voi tapahtua myös muilla tavoin esim. aiemmin tehtyjen stabilointipilareita pitkin monen metrin päähän, mikä voi aiheuttaa paikallisesti hetkellistä häiriintymistä maapohjassa stabilointikohdan vieressä. Tärinää aiheuttavat raskaat stabilointikoneet ja kaivinkoneet. Itse sideaineen sekoittamistyön aiheuttama tärinä on yleensä varsin pientä. Kun stabilointia tehdään mm. stabiliteetiltaan heikkojen kaivantojen, penkereiden tai luonnon-tilaisten rinteiden välittömässä läheisyydessä häiriintymisen minimoiminen on erityisen tärkeää. (Liikennevirasto 2018, 43.)

Paineellisen pohjaveden tapauksessa riskinä on pohjaveden ylösvirtaus pitkin lujittamatonta pilaria. Määrämittaisilla pilareilla voidaan välttää savikerroksen alaosan läpäisy alapuoliseen kitkamaakerrokseen, jossa pohjavesi on paineellista. (Liikennevirasto 2018, 43-44.)

Pilarin yläpään stabilointi voi aiheuttaa pölyämistä. Tätä voidaan vähentää stabiloimalla työalustan päällä, jolloin sideaineen syöttö voidaan lopettaa syvemmällä työalustassa tai sen alla. Pölyn leviämistä ja saven roiskumista voidaan vähentää myös suojuksella, joka asetetaan pilarikoneen varren ympärille. Pölyn leviämistä voidaan vaikuttaa myös pölyn-sidonnalla esim. kastelemalla. (Liikennevirasto 2018, 44.)

### Ilmastovaikutukset (kasvihuonekaasupäästöt)

Syvästabiloinnin merkittävimmät päästöt tulevat sideaineiden valmistamisesta. Sen vuoksi sideainevalinnalla on suuri merkitys päästöjen hillitsemiseksi. Pilaristabiloinnin päästöt lasketaan sideaineen valmistuksesta, kuljetuksesta sekä itse pilaristabiloinnista. Pilaristabiloinnin päästöjen muodostuminen on koottu kuvaan 2.17.



1. Pilaristabiloinnin yhteydessä tehdään myös muita maarakentamisen työvaiheita, jotka ovat edellytyksiä pilaristabiloinnin toteutukselle kuten esim. raivaus ja pilaristabiloinnin työpenger. Nämä on huomioitava hankkeessa tapauskohtaisesti.
2. Kaivinkone usein lähialueelta
3. Stabilointilaitteisto – kohteesta riippuen voidaan mobilisoida kaukaakin
4. Pilarin pituus ja halkaisija. Vaikuttaa mm. sideainetankkaukseen ja työsaavutukseen
5. Pilaristabilointikoneen yhteydessä tai erillinen teloilla liikkuva

**Kuva 2.17: Pilaristabiloinnin päästöjen muodostuminen. (Dettenborn et al. 2018, 4, kuva 3.)**

#### Sideaineiden kasvihuonekaasupäästöt

Poltettu kalkki valmistetaan kuumentamalla kalkkikivi murskattuna ja lajiteltuna uunissa noin 1100 °C:ssa. Sen jälkeen poltettu kalkki voidaan murskata, seuloa ja jauhaa eri tuotteiksi. Kalkkikiven poltossa ja käsittelyssä kuluu paljon energiaa ja aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi pölypäästöjä. Poltetun kalkin päästökerroin on erittäin korkea. Nordkalk Oy ilmoitti vuoden 2019 ympäristöraportissaan poltetulle kalkille (quick lime) päästöarvoksi 1100 kg CO<sub>2</sub>-ekv. /tn (Nordkalk Oy, 2019c). (Nordkalk Oy 2006, 5.)

Sementti valmistetaan polttamalla pääasiassa kalkkikiveä noin 1450 C:n lämpötilassa ja ja siitä muodostunut sementtiklinkkeri jauhetaan hienoksi jauheeksi, sementiksi. Sementin valmistuksessa kuluu paljon energiaa. Sementin valmistuksessa polttoaineiden sekä kalkkikiven poltossa vapautuu suuri määrä hiilidioksidia. Sementtituotannon aiheuttama CO<sub>2</sub>-ekv.-päästö on noin 1 % Suomen kokonais- CO<sub>2</sub>-ekv.-päästöistä. Perinteistä sementtiä ympäristöystävällisempi vaihtoehto on Plussementti. Plussementti on seossementti, joka sisältää muun teollisuuden sivutuotteita, kuten masuunikuonaa ja lentotuhkaa. (Betonteollisuus ry 2020.) Plussementin päästökerroin oli vuonna 2019 Finnsementin ympäristöselosteessa (2020b, 1) 611,7 kg CO<sub>2</sub>-ekv. /tn.

Uusiomateriaalien käyttö sideaineseoksissa voisi pienentää merkittävästi sideaineen valmistuksesta syntyviä päästöjä. Energiantuotannon jäte- ja sivutuotemateriaalit kuten lentotuhka voi korvata sementin osittain pilaristabiloinnin sideaineseoksissa pienentäen hiilidioksidipäästöjä (Liikennevirasto 2018, 28). Koska lentotuhkan sekä muiden uusiomateriaalien päästölaskennalle ei ole yhtenäistä linjaa, uusiomateriaalien päästölaskennassa on arvioitava materiaalikohtaisesti huomioitavat vaiheet (Dettenborn et al. 2018).

Uusiomateriaalien valmistuksen päästöt lasketaan kuuluvan tuotannon päämateriaalille. Vain jos uusiomateriaalia käsitellään uusiokäyttöä varten, lasketaan siitä aiheutuvat päästöt kuuluvan uusiomateriaalin päästöihin. Kuljetukset lasketaan mukaan päästölaskennassa. (UUMA3, 16; Teittinen 2019, 45, 54)

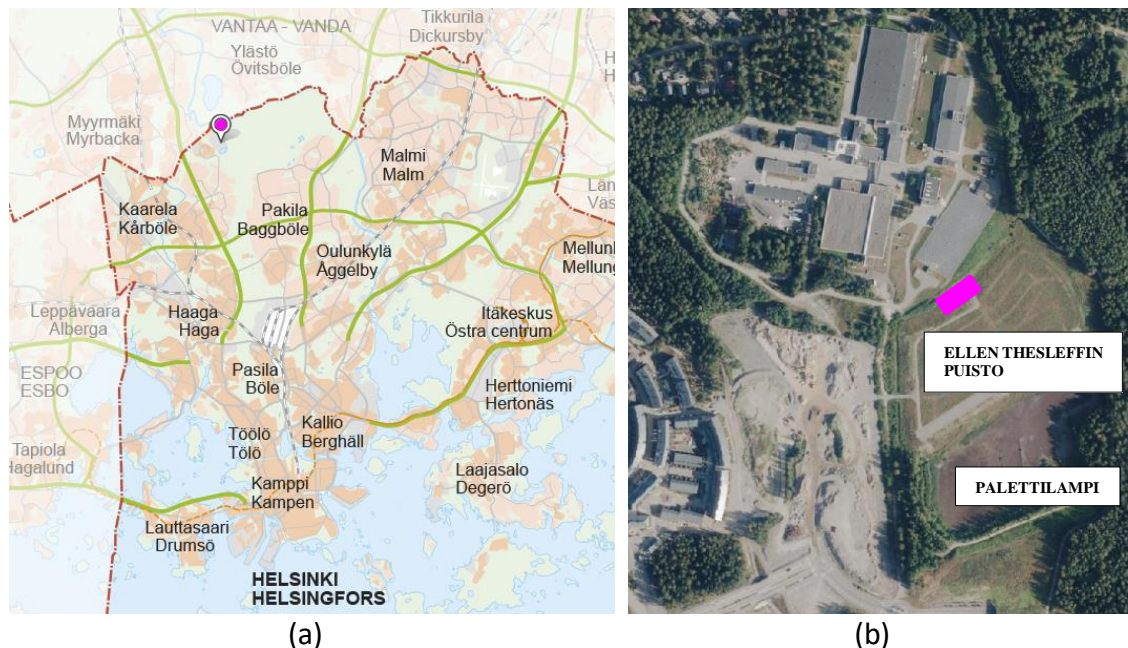
### 3 Kuninkaantammen koestabilointi

Kuninkaantammen koestabilointi toteutettiin toukokuussa 2020. Seuraavaksi esitellään Kuninkaantammi koestabilointikohteena, koestabiloinnin valmistelu, mukana olevat si-deaineseokset, varsinainen koestabiloinnin toteutus sekä koealueen ympäristöseuranta. Näiden lisäksi hankkeeseen kuului monia muita vaiheita. Kuninkaantammen koestabiloinnin jälkeen hankintamenettelyjen kehitys jatkuu 2021-2023 (UUMA4). Koestabiloinnin toteutuksen vaiheet ja aikataulu on esitetty aikajärjestyksessä liitteessä 15.

#### 3.1 Rakennuskohde ja geologia

Kuninkaantammen koestabilointikohde sijaitsee Kaarelan kaupunginosassa Luoteis-Helsingissä Vedenkierto kadun itäosassa. Kohteen sijainti on esitetty kuvassa 3.1. Tarkemmin kuvattuna koestabilointialue sijaitsee Ellen Thesleffin puiston pohjoispuolella Vedenkierrolla paaluvälillä 620-700 (kuva 3.1b ja kuva 3.2).

Koestabilointialueen eteläpuolella sijaitsevat Ellen Thesleffin puisto ja Palettilampi, jotka on rakennettu alun perin HSY:n vedenpuhdistuslaitoksen sakka-altaiksi (alumiinihydrok-sisakalle). Altaiden rakentaminen aloitettiin 1959 ja käyttö päättyi 1985. Altaiden käytön lopettamisen jälkeen Ellen Thesleffin puiston alueelle on täytetty sekalaisella maa-ainek-sella mm. erilaisia jätteitä, pilaantunutta maata, puhdistamolietettä ja orgaanista ainetta.



**Kuva 3.1: Kuninkaantammen koestabilointialueen sijainti kartalla (a) ja ilmakuvassa (b) lilalla merkinnällä.**

#### Geologia/maaperätiedot

Koestabiloinnin lähellä on tehty maaperätutkimuksia 1970-luvulla ja 2003-2018. Kai-rauksia on ollut paino-, puristin- ja siipikairaukset. Alueella on tehty myös koekuoppia ja otettu maanäytteitä maan ominaisuuksien ja stabiloitavuuden tutkimiseksi. Ympäristövai-kutusten seuraamiseksi koestabilointialueen läheisyydessä on useita pohjavesiputkia.

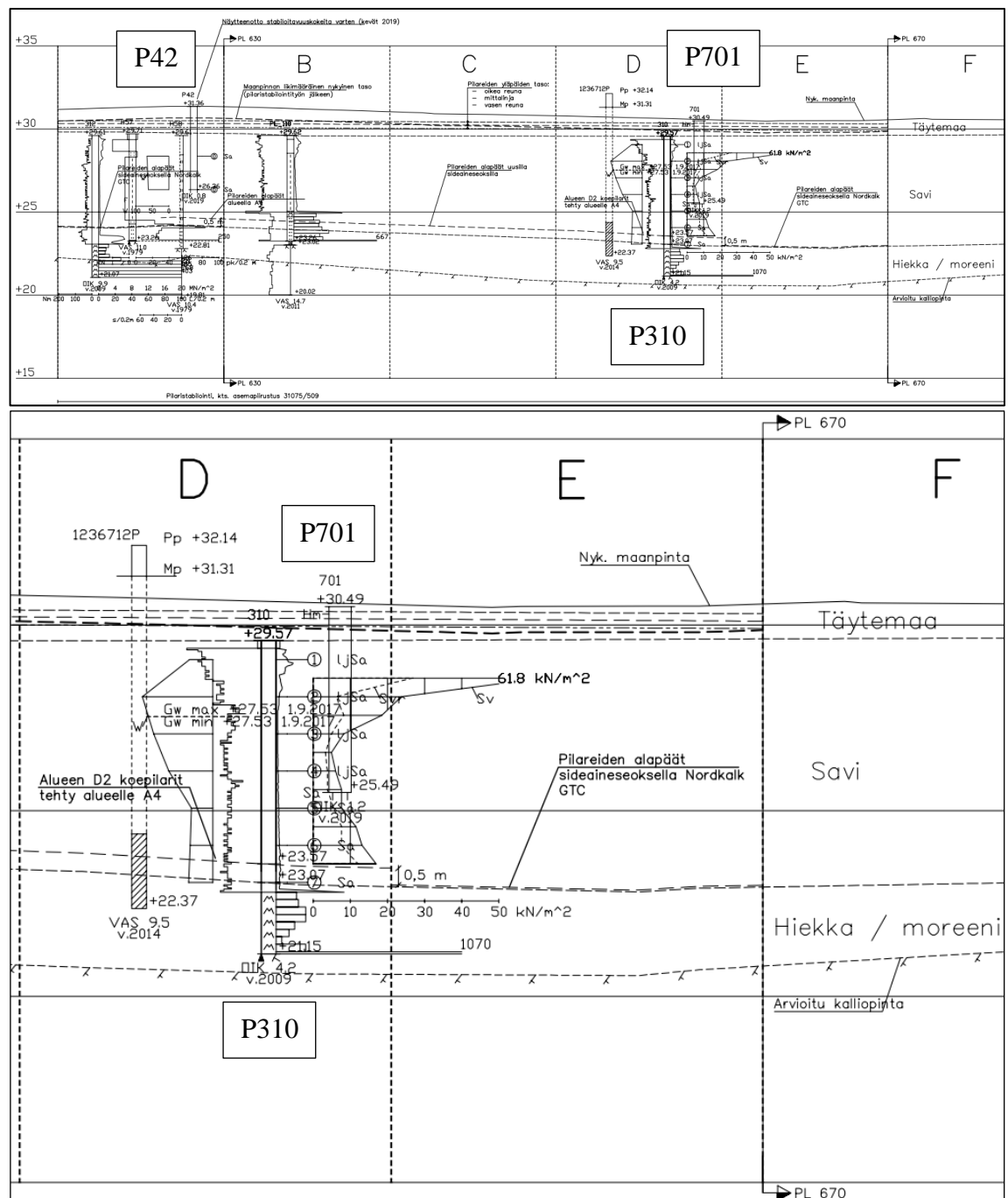
Koestabilointialueen maanpinta vaihtelee välillä +29 - +32. Maanpinnassa on noin 1-1,5m savista täyttemaata, jonka seassa on kiviä, lohkareita sekä rakennusjätettä. Ennen koestabilointia isot kivet, lohkareet ja rakennusjätteet välpättiin pois täyttemaasta kaivin-

koneella. Sen jälkeen maanpinnan taso laski noin 0,5-1m. Täytemaa oli tiivistä välppäämisen jälkeen. Täytteen alla maaperä on savea noin 5-6 syvyydelle maanpinnasta. Savi-kerroksen yläosassa on 1-2m kuivakuorikerros. Pehmeän saven määritetty redusoimaton leikkauslujuus siipikairalla on  $5-17\text{kN/m}^2$ . Saven alapuolella on moreenia ja hiekkaa n. 8-10m syvyydellä maanpinnasta. Pohjavedentaso on havaittu koestabilointialueella tasolla  $+27,34-28,12$  (16.10.2020).

### 3.2 Koestabiloinnin valmistelu

#### Pohjavesi

Koestabilointialueen ympäristöstä yhdeksän pohjavesipisteen perusteella pohjavedenpinta vaihtelee koestabilointialueella tasovälillä  $+25,99 - +29,88$  (12.08.2010-16.03.2016). (Helsingin karttapalvelu 2020.)



Kuva 3.2: Kuninkaantammi. Koestabilointialueen pituusleikkaus.

### Näytteenotto

Koestabilointialueelta ja sen lähialueelta on otettu savinäytteitä keväällä 2019. Helsingin kaupunki otti maanäytteitä pisteeltä 101, 102 ja 103 (kuva 3.4). Niistä määritetyt indeksiominaisuudet löytyvät taulukosta 3.1 ja kootut stabiloitavuuskoetulokset liitteestä 3.

Materiaalitoimittajien savinäytteet stabiloitavuuskokeita varten otettiin pisteeltä P701 (kuva 3.2 ja kuva 3.3). Piste P701 koekuoppa on tehty 07.06.2019. Sen vieressä on piste P310, jossa tehty siipikairaus ja puristinheijarikairaus 17.04.2009 ja otettu häiriintyneitä maanäytteitä 21.04.2009 (kuva 3.2) (SoundingsWEB 2020).

Savinäytteet otettiin sideainetoimittajille pisteeltä P701 syvyyksiltä 2,5 m ja 5,0 m 20 l/sideainetoimittaja stabiloitavuuskokeita varten (kuva 3.3 ja kuva 3.4). Luonnonsaven indeksiominaisuudet on esitetty taulukoissa 3.2-3.4 Nordkalkin, Ecolanin ja UPM:n toimittamissa tutkimustuloksissa.

**Taulukko 3.1: Kuninkaantammi, Staran tutkimukset. Savinäytteiden indeksiominaisuudet pisteiltä 101, 102, 103. Näytteet otettu R38 -näytteenottimella.**

Piste	z [m]	y <sub>w</sub> [kN/m <sup>3</sup> ]	y <sub>d</sub> [kN/m <sup>3</sup> ]	e [-]	w [%]	pH [-]	Humus- pitoisuus [%]	Maa- laji
101	3,0	15,5	9,3	1,85	66,2	7,3	3,0	Sa
101	5,0	15,4	9,6	1,77	61,2	7,8	2,6	Sa
102	4,0	16,0	10,4	1,56	54,3	7,0	3,8	Sa
102	7,2	17,4	12,1	1,19	43,3	7,6	2,0	Sa
103	2,5	15,5	10,6	1,51	46,6	6,4	4,9	Sa
103	5,5	16,2	10,1	1,62	60,0	7,4	2,8	Sa
103	8,5	18,0	13,3	0,99	35,5	8,5	1,3	Sa

z näytteenottosyvyys e huokosluku (veden ja ilman täyttämän huokosten  
y<sub>w</sub> tilavuuspaino tilavuus/kiintoaineksen tilavuus)  
y<sub>d</sub> kuivatilavuuspaino w vesipitoisuus

**Taulukko 3.2: Nordkalk, piste P701. Piste sijainti on esitetty kuvassa 3.5.**

z [m]	w [%]	Loi (550°C) [%]	Loi (800°C) [%]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	S [%]	pH [-]	Maalaji
2,5	92,2	4,1	0,8	1455	0,03	7,1	Sa
5	72,0	2,7	0,7	1553	0,01	8,2	Sa

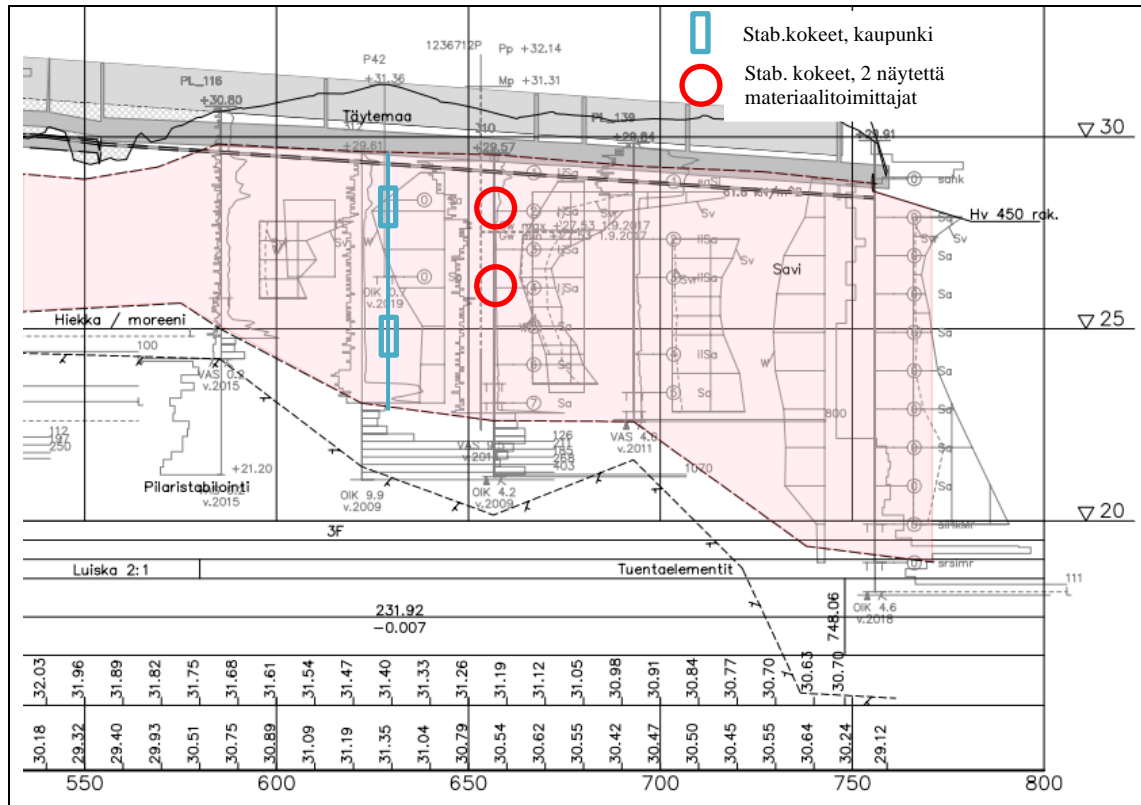
**Taulukko 3.3: Ecolan, piste P701.**

z [m]	w [%]	Loi (550°C) [%]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	pH [-]	Maalaji
2,5	77,5	4,2	1520	6,8	Sa
5	69,1	3,1	1570	7,6	Sa

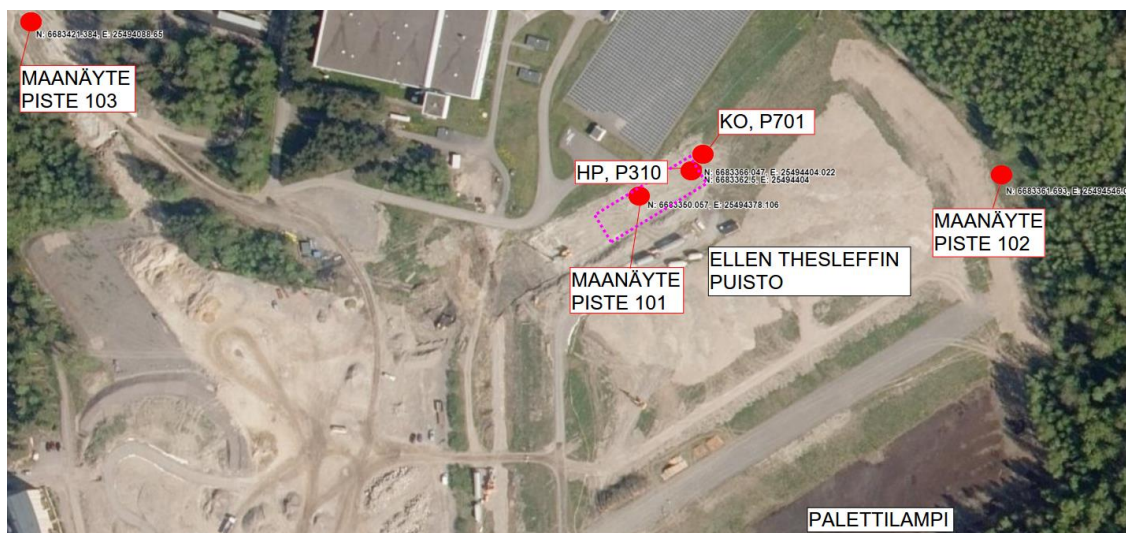
**Taulukko 3.4: UPM, piste P701.**

z [m]	w [%]	pH [-]	Maalaji
2,5	79,9	7,5	Sa
5	72,5	8,3	Sa

z näytteenottosyvyys Loi hehkutushäviö  
ρ tiheys Sa Savi  
S rikkipitoisuus Maalaji silmämääräisesti esitetty maalaji



**Kuva 3.3: Kuninkaantammi. Näytteenottopisteet (arvio) ja syvyydet pituusleikkauksessa Kuninkaantammen koestabilointialueella.**



**Kuva 3.4: Kuninkaantammi. Näytteenottopisteet 101, 102, 103, P701 ja P310. Koestabilointialue on merkitty lilalla pisteiviivalla (arvio).**

### Vaatimukset

Laadunvalvontatutkimuksilla osoitetaan stabiloidun maan leikkauslujuus. Laadunvalvontakairaukset tehdään 1 kk ja 3kk ikäisille pilareille. Pilareiden leikkauslujuustavoite on 3 kk ikäisille pilareille 100 kPa. 1 kk ikäisille pilareille ei ole esitetty tavoiteleikkauslujuutta.



### Ennakkokokeet

Sideainetointimittajat ovat toteuttaneet stabiloitavuuskokeet sideaineresepteillään runkoaineena 2019 otetut savinäytteet. Ennakkokokeiden tuloksia verrataan koestabiloinnin laadunvalvontakairaustuloksiin ja määritetään kenttä-/laboratoriokerroin.

### Ympäristöseuranta

Koestabilointialueen läheisyydessä on pohjavesiputkia, joita käytetään syvästabiloinnin ympäristötarkkailussa. Pohjaveden laatua on tutkittu ennen koestabilointia, sen aikana ja sen jälkeen. Alueen pintaveden laatua on tarkkailtu tekemällä pH-mittauksia Rajaojan yläjuoksulta (Oja 1) ja alajuoksulta (Oja 2) ennen koestabilointia, sen aikana ja sen jälkeen.

### Koekuopat

Koekuopat noin paaluväleillä 630 ja 650 koestabilointialueella 29.4.2020 (kuva 3.5). Koekuopissa havaittiin savea, kiviä ja lohkareita sekä suodatinkangasta ja mursketta.



(a)



(b)



(c)

**Kuva 3.5: Kuninkaantammi. Koekuopat: (a) pl. 630, (b) pl. 650 ja (c) koealue. (valokuvat Mikko Tuohino 29.04.2020)**

### 3.3 Koestabiloinnin sideaineseokset

Kuninkaantammen koestabilointiin osallistui kolme sideainetoimittajaa kuudella sideainereseptillä. Taulukossa 3.5 on esitetty sideaineseosten seosaineet ja niiden osuudet sideaineseoksessa. Taulukkoon 3.6 on koottu koestabiloinnissa käytetyt sideaineresepit.

#### Nordkalk Oy, Terra GTC

Terra GTC -sideaineseos sisältää kipsiä, sammutettua kalkkia ( $Ca(OH)_2$ ), ja sementtiä. Kipsiä (kalsiumsulfaatti) on 33 %, sammutettua kalkkia (kalsiumhydroksidi) on 33 %, ja Plussementtiä 33 % (Nordkalk 2020b). GTC on kaupallinen sideaineseos, joka toimii tässä koestabilointikohteessa vertailukohteena. Sideaineen kierrätysmateriaalien osuus on noin 40-45 % riippuen käytetyn Plussementin kierrätysmateriaalien osuudesta. Finnsementin Plussementti on CEMII/B-M (S-LL) 42,5 N. Plussementin (CEMII) sisältämän uusiomateriaalin vaihteluväli on 21-35 % (standardissa).

#### Nordkalk Oy, Terra Green

Sideaineseos Terra Green koostuu kalkkiuunin sähkösuodin pölystä (LKD) ja Plussementistä suhteessa 1:1. Tuotteessa käytetty sivutuote on kalkkiuunin sähkösuodin pöly (Nordkalk Oy 2020). Näin ollen sideaineen kierrätysmateriaalien osuus on noin 61-68 % riippuen käytetyn Plussementin kierrätysmateriaalien osuudesta.

#### Nordkalk Oy, Terra POZ

Sideaineseos Terra POZ sisältää kalkkiuunin sähkösuodin pölyn ja Plussementin lisäksi Lohjan Tytyrin tehtaan poltettua, jauhattua kalkkia suhteessa 1:1:1 (Nordkalk Oy 2020). Seos oli myynnissä vuosina 2004-2010, jolloin sementtinä oli Yleissementti. Vastaava tuote oli Kehä II stabiloinnissa nimellä Nordkalk Terra NK3 vuosina 1996-1997 (sementtinä Pikasementti) (Nordkalk Oy 2020c). Uudella Nordkalk Terra POZ:illa on edullisempi ja sillä on pienemmät CO<sub>2</sub>-ekv.-päästöt (Nordkalk 2019b). Tuotteessa käytetty sivutuote on kalkkiuunin sähkösuodin pöly (Nordkalk Oy 2020). Sideaineseoksen kierrätysmateriaalien osuus on noin 40-45 % riippuen käytetyn Plussementin kierrätysmateriaalien osuudesta.

#### Ecolan Oy, Infra Stabi80

Infra Stabi80 -sideaineseoksessa on 80% tuhkaseosta ja 20% sementtiä. Sideaineseoksen tuhkaseos koostuu kivihiihen polton lentotuhkasta, biopolton lentotuhkasta ja kalkkipitoisen lietteen polton tuhkasta. Tuotenimessä numero kertoo kierrätysmateriaalien osuuden seoksessa eli Infra Stabi80 -sideaineseoksessa on 80% kierrätysmateriaalia (Ecolan Oy 2020). Sementtinä sideaineseoksessa on Schwenkin RAPID -sementti CEM I 52,5 N. Sideaineseoksen tuhkaseosta on käsitelty uusiokäyttöä varten ja tämä on huomioitu sideaineen valmistuksen päästölaskelmassa. (Ecolan Oy 2020b.)

#### UPM-Kymmene Oyj, LT KAI + CEMII 7:3

Sideaineseos LT KAI + CEMII 7:3 on Kaipolan paperitehtaan lentotuhkan ja Plussementin (Finnsementti) seos suhteessa 70 % ja 30 %. Lentotuhka muodostuu metsätähteiden ja muiden puuperäisten sivuvirtojen kuten kuoren, purun ja prosessissa syntyvien kuitulietteiden sekä turpeen poltossa. Näin ollen sideaineseoksessa LT KAI + CEMII 7:3 on kierrätysmateriaalia noin 77 % (kun Plussementissä kierrätysmateriaalia 23 %). Lentotuhkan ja sementin sekoitus tapahtui työmaalla. (UPM-Kymmene Oyj 2020.). Kaipolan tehdas on lopettanut toimintansa 12/2020.

### UPM-Kymmene Oyj, LT JAM + CEMII 7:3

Sideaineseos LT JAM + CEMII 7:3 on Jämsänkosken tehtaan lentotuhkan ja Plussementin seos suhteessa 70 % ja 30 %. Lentotuhka muodostuu metsätähteiden ja muiden puuperäisten sivuvirtojen kuten kuoren, purun ja prosessissa syntyvien kuitulietteiden sekä turpeen poltossa. Sideaineseoksessa on kierrätysmateriaalia noin 77 %. Tuhkan ja sementin sekoitus tapahtui työmaalla. (UPM-Kymmene Oyj 2020.)

**Taulukko 3.5 Kuninkaantammi. Sideaineseosten seosaineet ja niiden osuudet sideaineseoksessa.**

Sideainetoimittaja	Sideaine	Koostuvat osat	Osuus sideaineseoksessa [%]
Nordkalk Oy	Terra GTC	Sammutettu kalkki	33
		Kipsi	33
		Plussementti	33
	Terra Green	Kalkkiuunin sähkösuodin pöly	50
		Plussementti	50
	Terra POZ	Kalkkiuunin sähkösuodin pöly	33
Poltettu, jauhettu kalkki		33	
Plussementti		33	
Ecolan Oy	Stabi80	Tuhkasekoitus	80
		Rapid-sementti	20
UPM-Kymmene Oyj	LT KAI	Lentotuhka	70
		Plussementti	30
	LT JAM	Lentotuhka	70
		Plussementti	30

### **3.4 Koestabiloinnin toteutus**

Kuninkaantammen koestabilointi toteutettiin 4.-13.5.2020. Koestabiloinnin toteutti YIT Finland Oy. Koestabilointialue jaettiin 16 osa-alueeseen, alueisiin A1-E2. Stabilointi aloitettiin alueesta E1 ja lopetettiin alueeseen A4. Jokaisella osa-alueella on 20 koepilaria ja sama sideaine sekä sama sideainepitoisuus. Koestabiloinnin toteumakartta näkyy kuvassa 3.7. Koestabiloinnin kalustoihin kuului yksi stabilointikone, yksi kaivinkone sekä säiliövaunuja sideaineiden kuljettamiseen ja sekoittamiseen (kuva 3.6).

Koestabilointialueella löydettiin savisen täytön seasta mm. isoja kiviä, lohkkareita, suodattinkankaita, ajosiltoja ja rakennusjätettä. Haastavan täyttemaan vuoksi stabilointityö oli hidasta. Kaivinkoneella kaivettiin isot kivet täyttemaasta stabilointityön helpottamiseksi.

Sideaineseokset tulivat sideainetoimittajien tehtailta valmiiksi sekoitettuna lukuun ottamatta UPM:n sideaineseokset, jotka sekoitettiin työmaalla paikan päällä. UPM:n sideaineseokset sekoitettiin työmaalla säiliöstä toiseen kolme kertaa juuri ennen stabilointia.

Pilaristabilointityö toteutettiin käpykärjellä. Käpykärjessä on kolme tasoa ja sideaineen syöttö ylimmän sekoitintason kohdalla (kuva 3.8). Sekoitinkärjen nousunopeus on 15 mm/r. Pilarit ovat halkaisijaltaan 700 mm. Pilaristabilointi tehtiin k/k-välillä 1,2 m. Uu-siosideaineiden pilarit suunniteltiin määräsyyvyteen 0,5 m saven alarajasta, jotta pilarien

alapäätt jätävät huonosti vettä johtavaan savikerrokseen ja ne eivät ole kosketuksissa savi-kerroksen alapuoliseen vettä johtavaan kitkamaakerrokseen. Vain sideaineella Terra GTC stabiloitiin saven alarajaan asti. Sideaineen toteutunut määrä oli yhteensä 81 264 kg. Koestabiloinnissa kokonaispilarimäärä oli 1 874 pilarimetriä. Sideainemäärä oli vakio pilarin koko pituudella.

Stabiloitavan alueen täytemaakerroksessa oli seassa mm. suodatinkankaan palasia, jotka sekoitinkärkeen tarttuessaan hidastivat stabilointityötä. Kärkeen tarttuneet suodatinkankaan palaset oli revittävä käsin pois (kuva 3.8b). Täytemaa oli kuiva ja sen läpi oli vaikeaa päästä, mikä myös hidasti työtä.

Urakoitsija totesi, että sideaineiden toimitus sujui hyvin sekä sideaineiden juoksevuus oli hyvä. Uusiosideaineiden laatu vaihteli, oli osittain paakkuista. Lentotuhkan ja sementin sekoittaminen paikan päällä työmaalla lisäsi työn määrää, hän ei nähnyt toimivaksi käytännöksi sekoittaa sideaineseos paikan päällä. Hän totesi myös, että tuhka on kevyempää kuin muut sideaineet, karkeasti 60-70 % painosta perinteisistä sideaineista. Tämä veisi käytännössä enemmän tilaa kuljetuksessa ja stabiloinnin säiliöissä verrattuna muihin sideaineisiin, jotta saavutetaan sama sideainemäärä pilareissa. (Mäntynen 2020.)



(a)



(b)

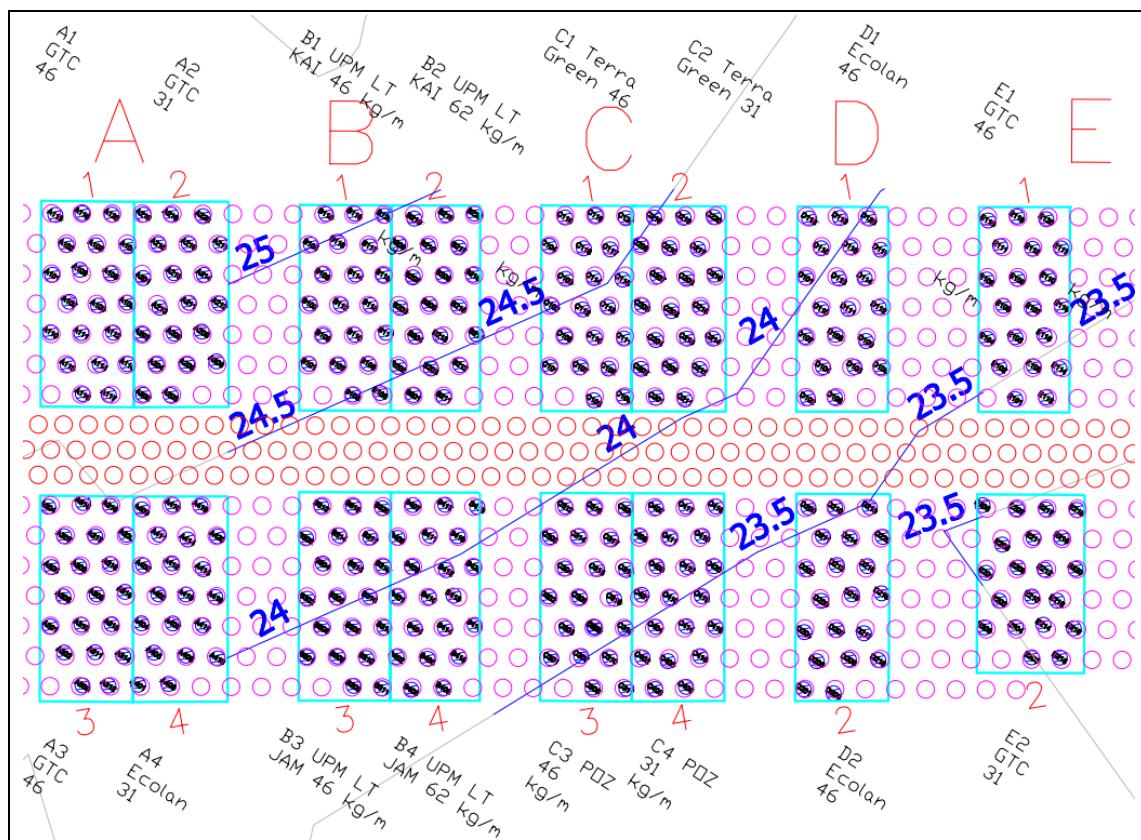


(c)

**Kuva 3.6: Kuninkaantammi. Koestabiloinnissa käytetty (a) stabilointikone, (b) säiliövaunu sideaineiden kuljettamiseen koestabilointialueelle ja (c) työmaasäiliöt sideaineseosten sekoittamiseen paikan päällä (UPM:n lentotuhkat ja sementti). (valokuvat Tytti Nguyen 5.-11.5.2020)**

**Taulukko 3.5: Kuninkaantammi. Koestabiloinnissa käytetyt sideainereseptit eri koealueilla.**

Koealueen tunnus	Sideainemäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	Tuotenimi tässä tutkimuksessa	Sideainetoimittaja
A1	120	GTC	Nordkalk Oy Ab
A2	80		
A3	120		
A4	80	Infra Stabi80	Ecolan Oy
B1	120	LT KAI + CEMII 7:3	UPM-Kymmene Oyj
B2	160		
B3	120		
B4	160		
C1	120	Terra Green	Nordkalk Oy Ab
C2	80		
C3	120		
C4	80		
D1	120	Infra Stabi80	Ecolan Oy
D2	120		
E1	120	GTC	Nordkalk Oy Ab
E2	80		



**Kuva 3.7: Kuninkaantammi. Koestabiloinnin osa-alueet. Pilarihalkaisija on 700 mm.**



(c)

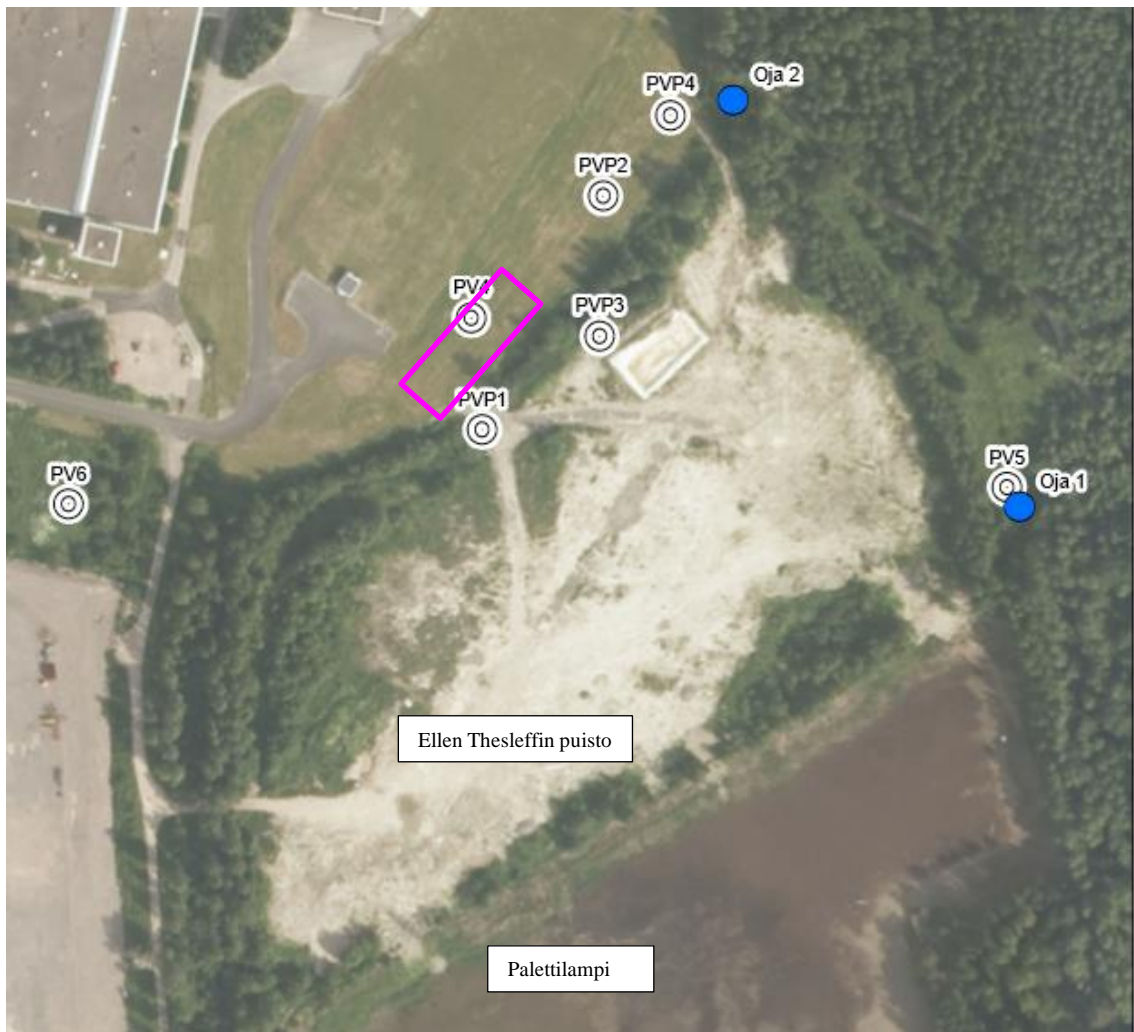
**Kuva 3.8: Kuninkaantammi. Koestabiloinnissa käytetty käpykärki. (a) Sideaineen syöttöaukko. (b) Suodatinkankaan palanen tarttuneena sekoitinkärkeen. (c) Käpykärki kehikkoineen. (valokuvat Tytti Nguyen 5.-11.5.2020)**

### **3.5 Ympäristöseuranta**

Pohjavedenlaatua tarkkaillaan seitsemän koestabilointialueen lähistöllä sijaitsevan pohjavesiputken avulla. Kolmen jo valmiiksi asennetun pohjavesiputken (PV4, PV5 ja PV6) lisäksi alueelle asennettiin neljä uutta pohjavesiputkea (PVP1, PVP2, PVP3 ja PVP4 (kuva 3.9). Neljä pohjavesiputkista sijaitsevat koalueen välittömässä läheisyydessä ja

kolme kauempana. Pohjavesien virtaussuunta vaikuttaa mitatun pohjaveden pinnantason perusteella (27.1.2020) olevan lännestä itään/koilliseen. Pinta- ja pohjavesinäytteitä otetaan kahden vuoden ajan ainakin kuudella erillisellä näytteenotokerralla. Ensimmäinen näytteenotokerta tapahtui ennen stabilointia kontrollina pohja- ja pintaveden alkuperäiselle laadulle. Seuraavat kuusi näytteenottoa toteutetaan stabiloinnin jälkeen 1 kk, 6 kk, 12 kk, 18 kk ja 24 kk.

Koetoiminnan vaikutusta pintavesien laatuun tarkkaillaan koestabilointialueen itäpuoleisessa Rajaojassa. Rajaojan vedenlaatua seurataan ylä- (Oja 1) ja alajuoksulla (Oja 2). Näin voidaan seurata vedenlaatua ennen ja jälkeen koetoiminta-alueen. Rajaojan veden pH:n on oltava 6-9 välillä. Pohja- ja pintavedenlaadusta raportoidaan erikseen.



**Kuva 3.9: Kuninkaantammi. Pinta- ja pohjavesiseurantapisteen, tutkimuspistekartta (13.5.2020). Sininen symboli kuvaa pintavesipistettä. Valkoinen symboli kuvaa pohjavesipistettä. Vaaleanpunainen alue kuvaa koestabilointialuetta (likimääräinen).**



## 4 Koestabiloinnin laadunvalvonta

Ennen varsinaista pilaristabilointia toteutettiin ennakkotutkimusvaihe. Ennakkotutkimusvaiheessa otettiin näytteitä alueen savesta ja tehtiin stabiloitavuuskokeita koestabiloinnissa mukana olevilla uusiosideaineilla. Stabiloitavuuskokeiden tulosten perusteella tarkennettiin koestabiloinnin suunnitelmaa. Ennakkotutkimusvaiheeseen osallistui myös si-deaineseoksia, joita ei käytetty koestabiloinnissa sideaineiden tuottajien vetäytyttyä.

Lujittuneiden koepilareiden laadunvarmistus toteutettiin pilarikairauksilla, pilarisiipikairauksilla ja puristinkairauksilla (CPTu) sekä pilareiden yläpäiden ylösnostoilla. Laadunvalvontakairaukset tehtiin noin 1 kk ja 3 kk lujittuneille pilareille. Noin 3 kk lujittuneille pilareille tehtyjen laadunvalvontakairausten jälkeen tehtiin kaksi puristinkairausta kolmelle pilarille eli yhteensä kuusi puristinkairausta. Näiden jälkeen toteutettiin pilareiden yläpäiden ylösnosto noin 1 m pätkinä noin 3 metrin syvyyteen asti kaivinkoneen kauhallalla. Pilareiden yläpäiden nosto tehtiin 3 – 4 kk lujittuneille pilareille.

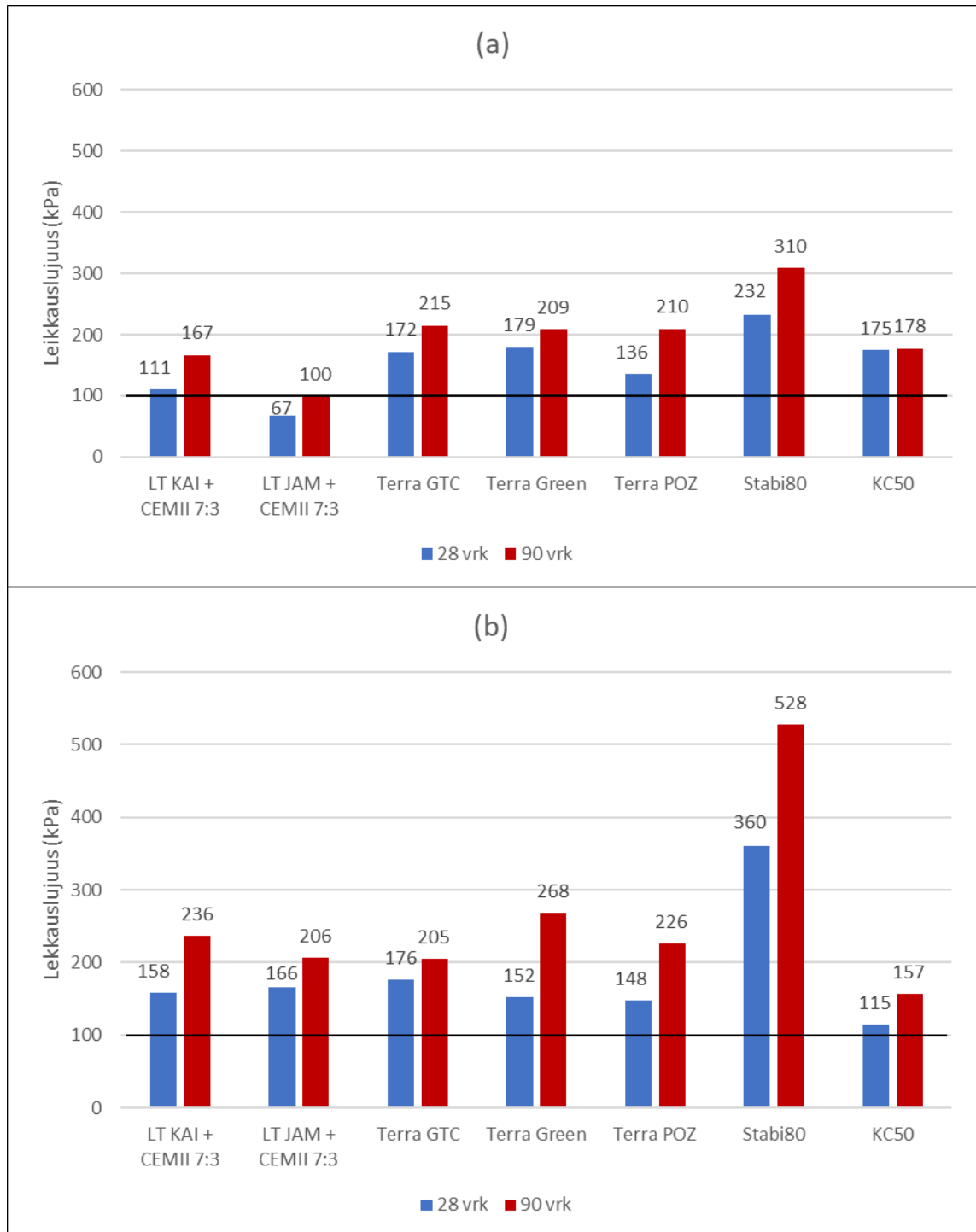
### 4.1 Stabiloitavuuskokeiden tulokset

Ennen koestabilointia tehtiin laboratoriossa stabiloitavuuskokeet koestabiloinnissa mukana olevien sideainetoimittajien sideaineilla runkoaineena Helsingin kaupungin ottamat savinäytteet koestabilointialueelta (kuva 3.2, kuva 3.3 ja kuva 3.4). Ecolan Oy:n ja Nordkalk Oy:n sideaineiden sideainepitoisuudet olivat kokeissa 80 ja 120 kg/m<sup>3</sup> ja UPM-Kymmene Oy:n sideaineet 120 ja 160 kg/m<sup>3</sup>. Ecolanin ja UPM:n sideaineilla stabiloitavuuskokeet teki Ramboll, Nordkalk teki tutkimukset Terra GTC, Terra POZ ja Terra Green ja KC50. Stara teki stabiloitavuuskokeet sideaineella Terra GTC. Materiaalitoimittajien stabiloitavuuskoetulokset on koottu taulukkoon liitteessä 2. Staran stabiloitavuuskoetulokset on koottu taulukkoon liitteessä 3.

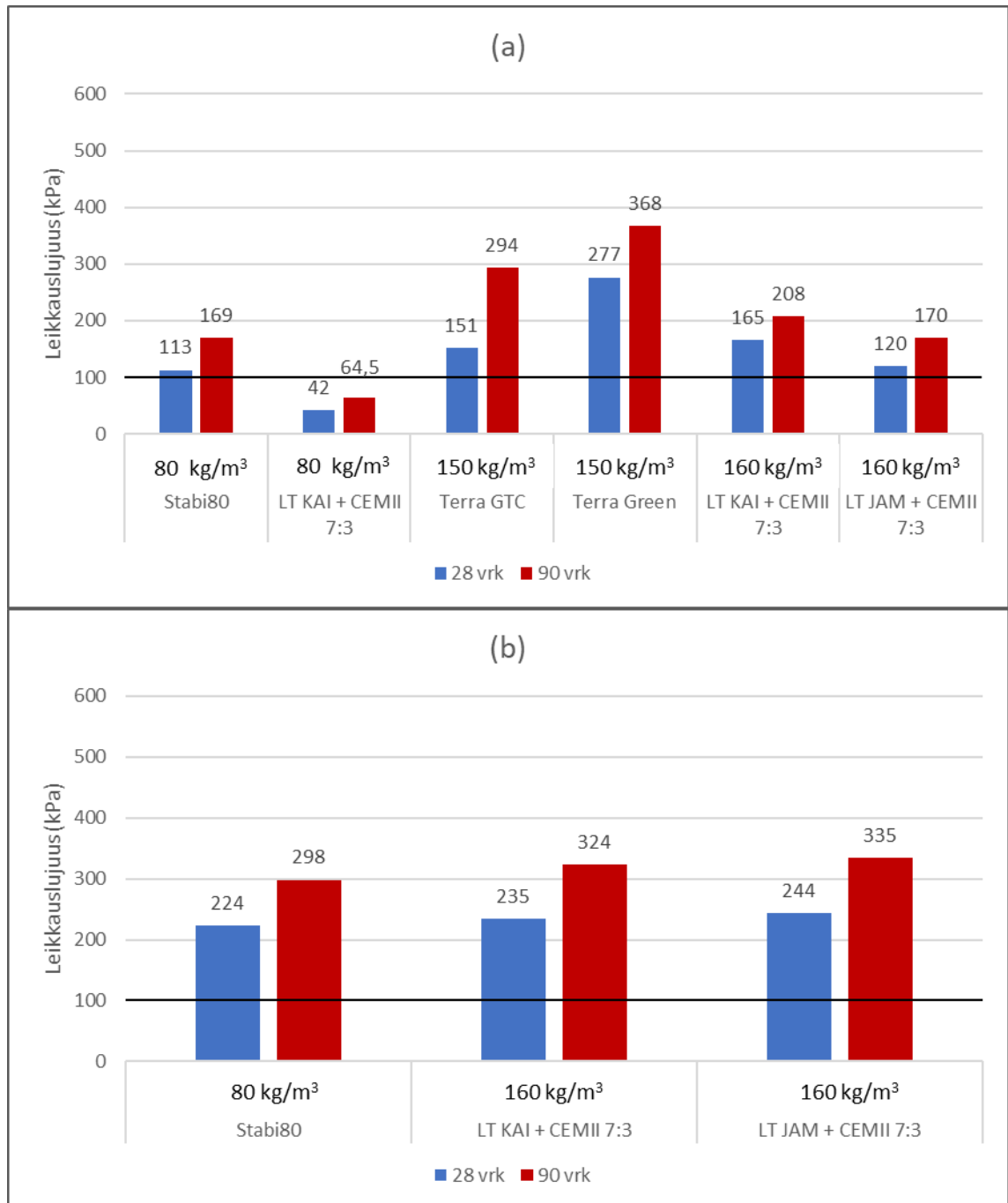
#### Lujuudet

Kuvissa 4.1 ja 4.2 on esitetty Kuninkaantammen stabiloitavuuskokeiden puristuskokeista määritetyt leikkauslujuuksien keskiarvot 28 ja 90 vrk:n tuloksista. 28 vrk: tulokset ovat sinisellä ja 90 vrk:n tulokset punaisella. Vaakasuuntainen musta viiva kuvaa 90 vrk:n lujuuksille esitettyä tavoiteleikkauslujuutta. Stabiloitavuuskokeissa sideaineiden ja si-deaineseosten sideainepitoisuudet olivat 120 kg/m<sup>3</sup> (kuva 4.1) ja 80, 150 ja 160 kg/m<sup>3</sup> (kuva 4.2). Kuvissa 4.1 ja 4.2 tulokset ovat esitetty syvyydeltä 2,5 ja 5,0 m.

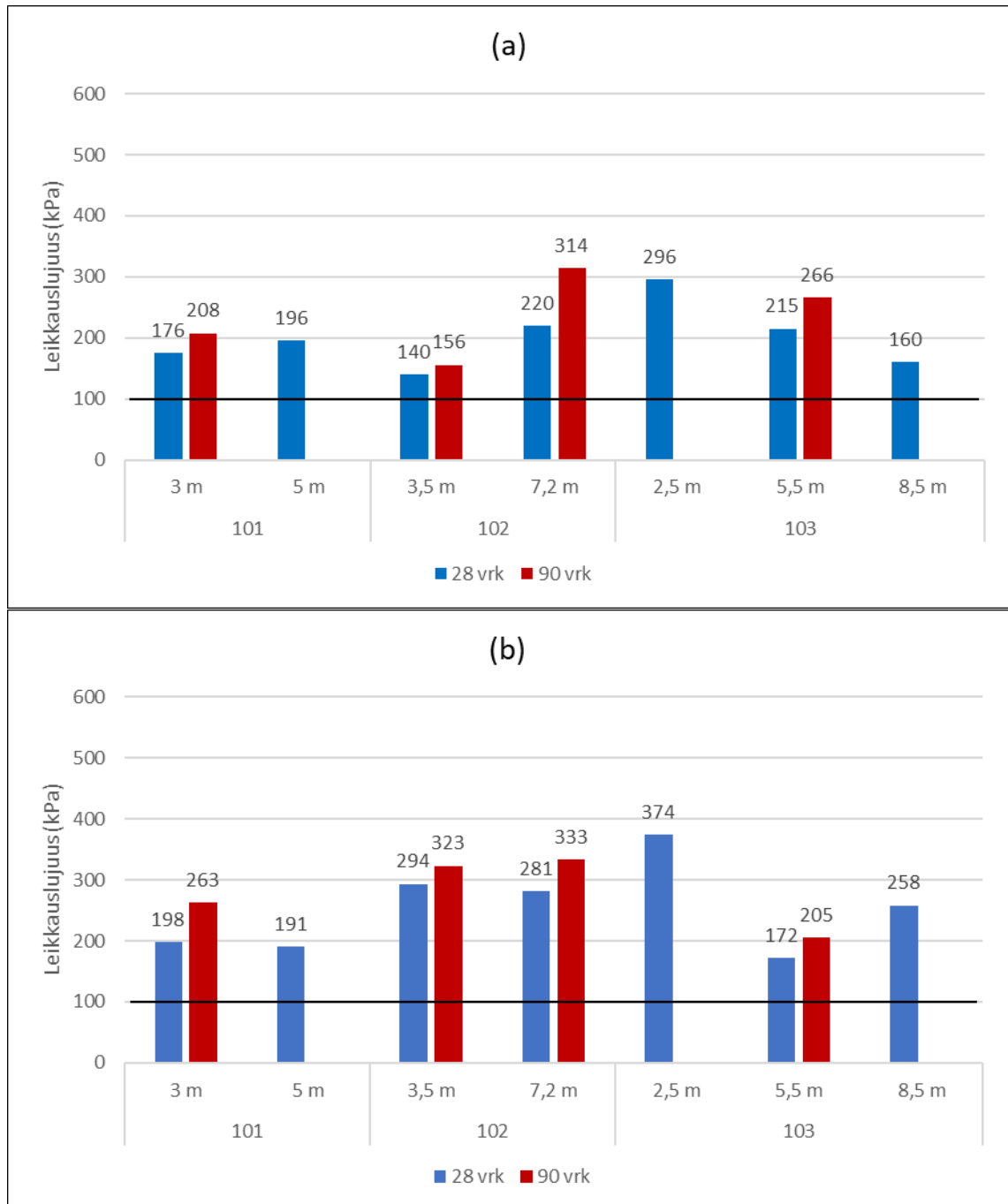
Kuvassa 4.3 on esitetty Staran tekemät stabiloitavuuskokeiden puristuskokeista määritetyt leikkauslujuuksien keskiarvot. Kuvassa on Terra GTC:n ja kalkkisementti-sideaineseoksen (KC 3:7) tulokset. KC 3:7 ei ollut koestabiloinnissa mukana. Staran stabiloitavuuskokeet on tehty runkoaineena savi pisteiltä 101, 102 ja 103 syvyyksiltä 3, 5, 7,2 ja 8,5 m.



**Kuva 4.1: Kuninkaantammi. Stabiloitavuuskokeiden 28 ja 90 vrk puristuskoetulokset (puristuskoetulosten keskiarvo), sideainemäärä 120 kg/m<sup>3</sup>. (a) 2,5 m syvyydeltä ja (b) 5,0 m syvyydeltä. Sideaineseosta KC50 ei käytetty koestabiloinnissa. Nordkalk teki stabiloitavuuskokeet sideaineista Terra GTC, Terra Green, Terra POZ ja KC50, Ramboll Finland teki Ecolanin ja UPM:n stabiloitavuuskokeet.**



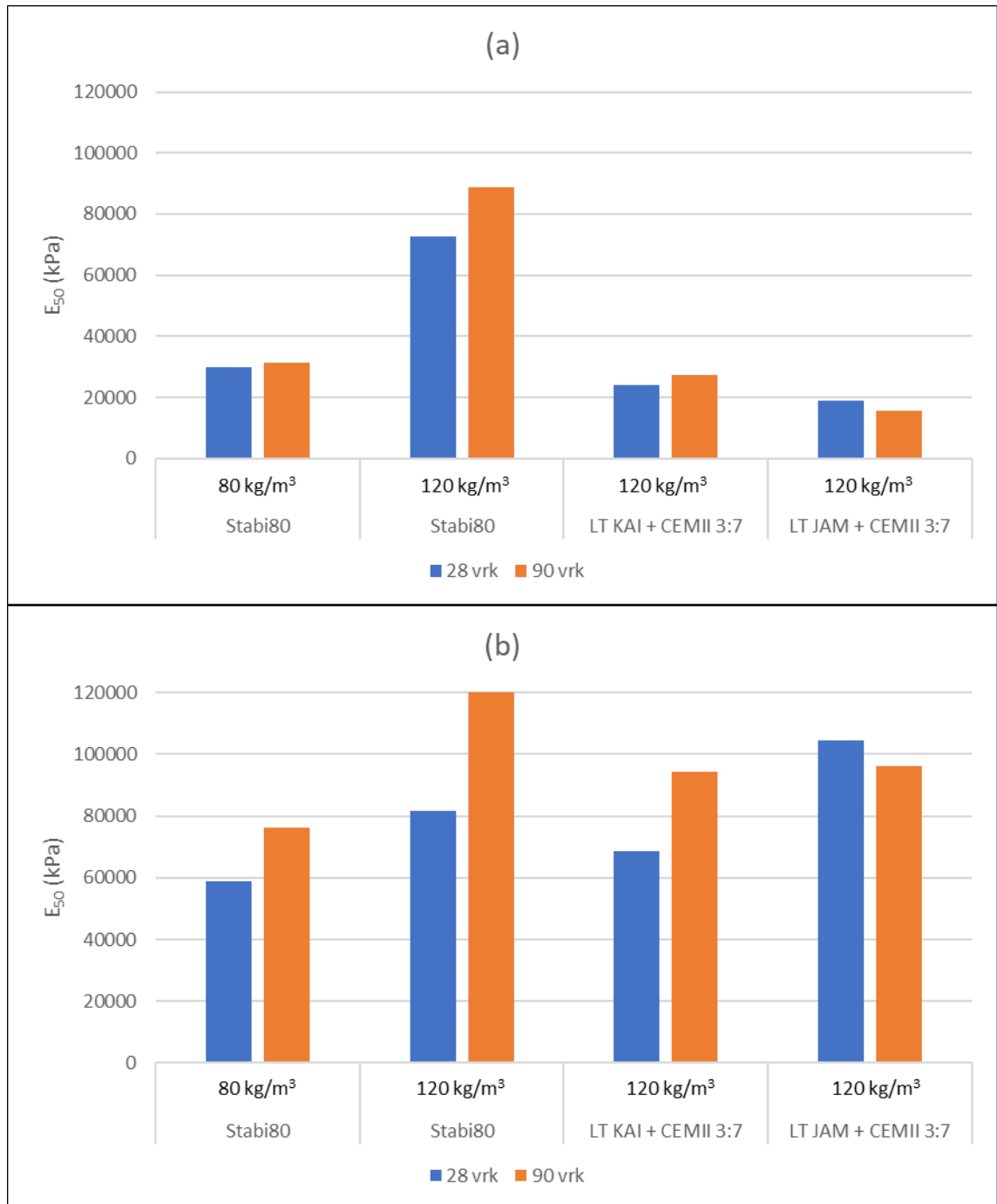
**Kuva 4.2: Kuninkaantammi. Stabiloitavuuskokeiden 28 ja 90 vrk puristuskoetulokset (puristuskoetulosten keskiarvo), sideainemäärä 80, 150 tai 160 kg/m<sup>3</sup>. (a) Näytteet 2,5 m syvyydeltä ja (b) 5,0 m syvyydeltä.**



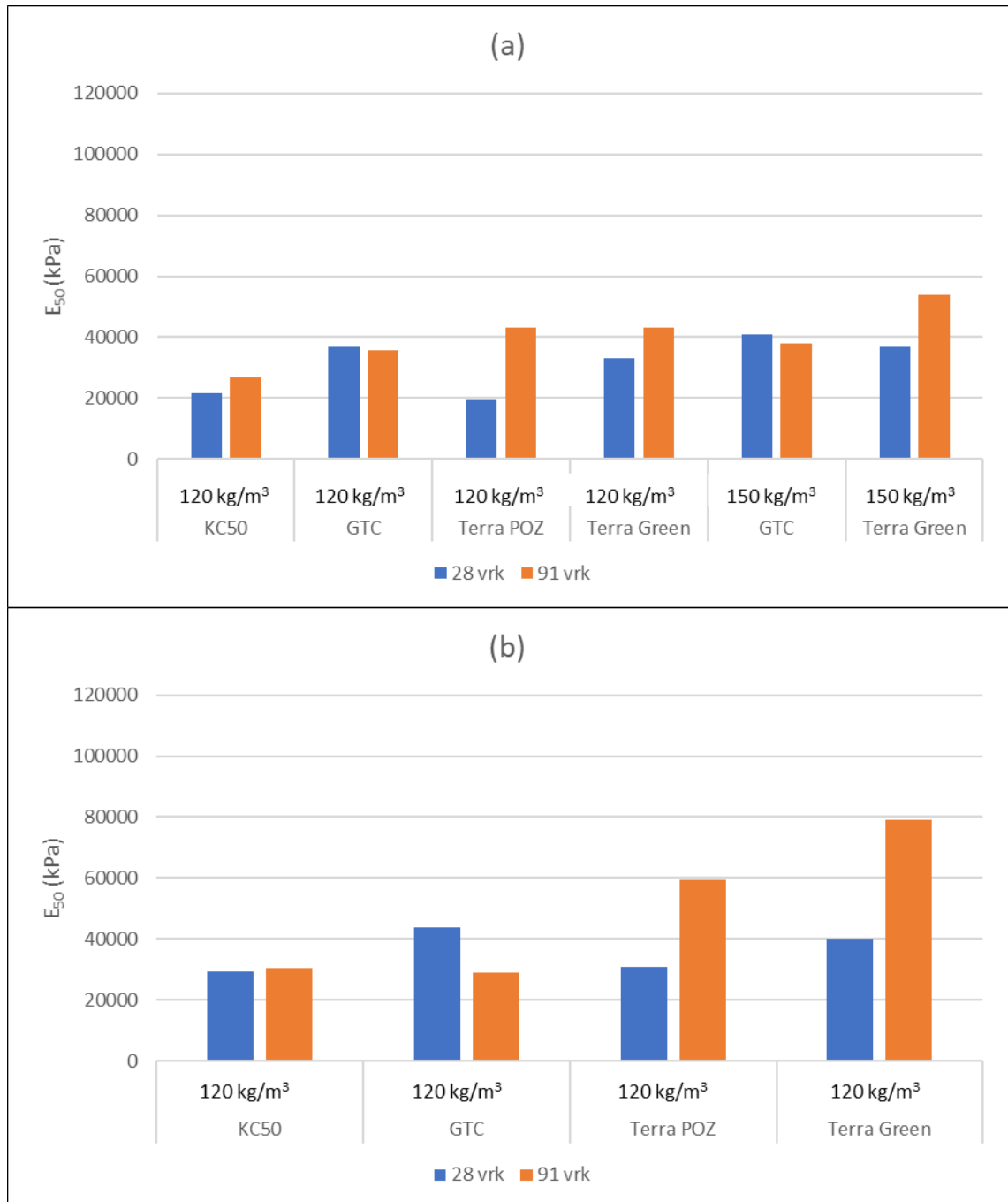
**Kuva 4.3: Kuninkaantammi. Staran stabiloitavuuskokeiden 28 ja 90 vrk puristuskoetulokset (puristuskoetulosten keskiarvo), sideainemäärä 120 kg/m<sup>3</sup>. (a) Terra GTC ja (b) KC 3:7, näytteet syvyyksiltä 3, 5, 7,2 ja 8,5 m. Sideaineseosta KC 3:7 ei käytetty koestabiloinnissa.**

#### Muodonmuutosmoduuli

Kuvissa 4.4 ja 4.5. on esitetty stabiloitavuuskokeiden puristuskoetulosten  $\varepsilon$ - $\sigma$  -kuvaajista määritettyjen moduulien keskiarvo ( $E_{50}$ ). Tulokset ovat syvyyksiltä 2,5 m ja 5,0 m. Kuvassa 4.4 on Ecolanin ja UPM:n sideaineilla tehtyjen näytteiden koetuloksista määritetyt  $E_{50}$ -arvot sideainepitoisuuksilla 80 ja 120 kg/m<sup>3</sup> ja kuvassa 4.5. Nordkalkin tulokset ovat kokeista sideainepitoisuuksilla 120 ja 150 kg/m<sup>3</sup>.



**Kuva 4.4: Kuninkaantammi.  $E_{50}$ -moduuli stabiilitavuuskoetuloksista, 28 ja 90 vrk tulokset (puristuskoetulosten  $\epsilon$ - $\sigma$ -kuvaajista määritettyjen moduulien keskiarvo), sideainemäärä 80 ja 120 kg/m<sup>3</sup>. (a) Näytteet 2,5 m syvyydeltä ja (b) 5,0 m syvyydeltä.**



**Kuva 4.5: Kuninkaantammi. E<sub>50</sub>-moduuli stabiilitavuuskoetuloksista, Nordkalkin sideaineiden 28 ja 91 vrk tulokset (puristuskoetulosten  $\epsilon$ - $\sigma$ -kuvaajista määritettyjen moduulien keskiarvo), sideainemäärä 120 ja 150 kg/m<sup>3</sup>. (a) Näytteet 2,5 m syvyydeltä ja (b) 5,0 m syvyydeltä.**

### Aikalujittumiskerroin

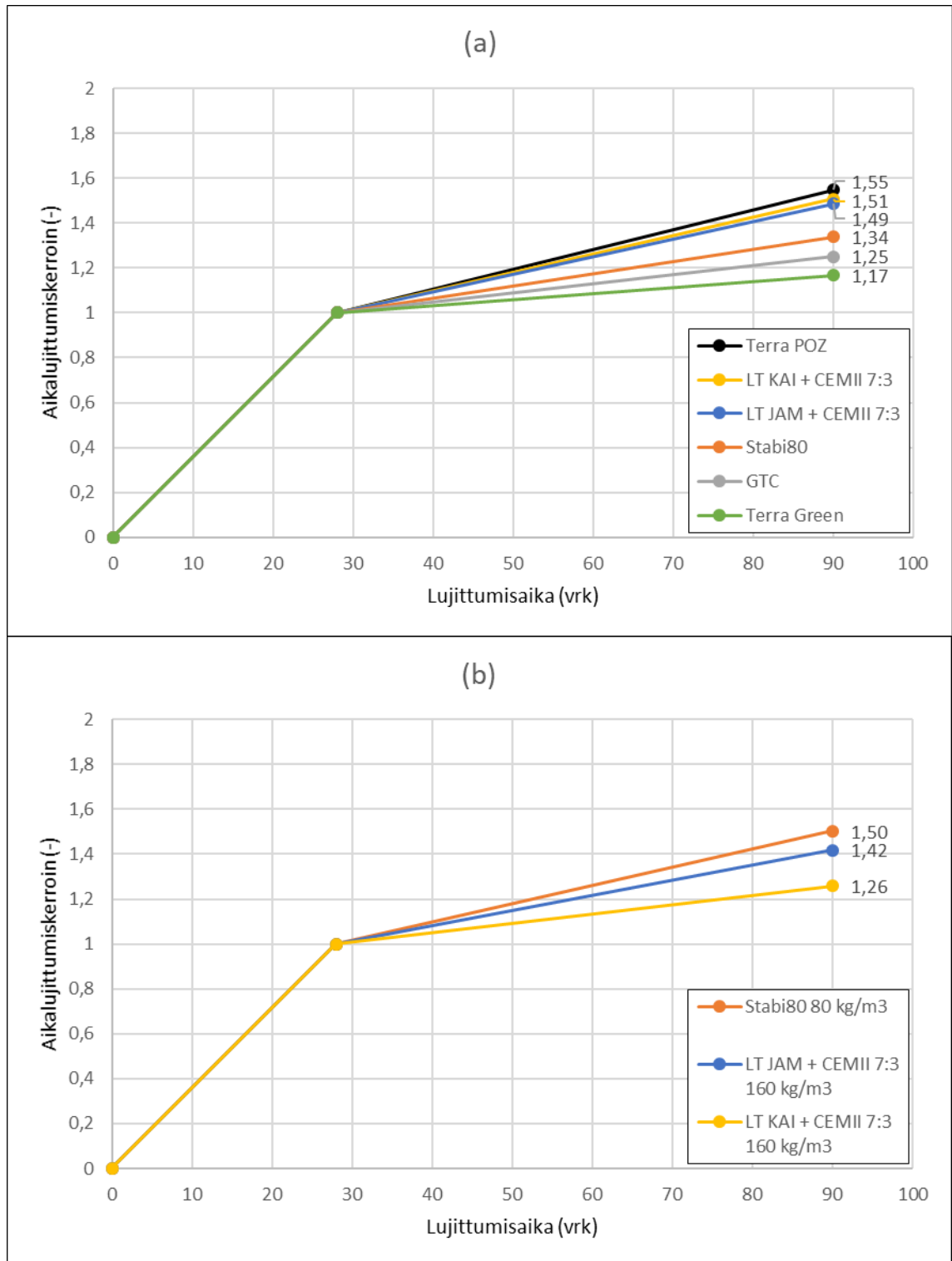
Kuvissa 4.6 ja 4.7 on esitetty aikalujittumiskertoimet stabiloitavuuskoetuloksista. Määritetyt aikalujittumiskertoimet ovat 90 vrk:n lujuus suhteessa 28 vrk:n lujuuteen. Yli yhden aikalujittumiskertoimet tarkoittavat sitä, että lujuudet ovat kehittyneet 28 - 90 vrk:n aikana. Mitä suurempi aikalujittumiskerroin sitä suuremmin lujuus on kehittynyt 28 – 90 vrk:n aikana. Rambollin ja Nordkalkin stabiloitavuuskokeiden tuloksista määritetyt aikalujittumiskertoimet on koottu taulukkoon 4.1 ja Staran taulukkoon 4.2.

**Taulukko 4.1: Kuninkaantammi. Rambollin (Stabi 80, LT KAI ja LT JAM) ja Nordkalkin (GTC, Green, POZ ja KC) tekemien stabiloitavuuskokeiden tuloksista määritetyt aikalujittumiskertoimet.**

Syvyys [m]	Sideaineaine	Sideainemäärä	Aikalujittumiskerroin $\tau_{90}/\tau_{28}$
2,5	Stabi80	80/120	1,50/1,34
5	Stabi80	80/120	1,33/1,47
2,5	LT KAI + CEMII 7:3	120/160	1,51/1,26
5	LT KAI + CEMII 7:3	120/160	1,49/1,38
2,5	LT JAM + CEMII 7:3	120/160	1,49/1,42
5	LT JAM + CEMII 7:3	120/160	1,24/1,37
2,5	Terra GTC	120/150	1,25/1,95
5	Terra GTC	120	1,16
2,5	Terra Green	120/150	1,17/1,33
5	Terra Green	120	1,76
2,5	Terra POZ	120	1,55
5	Terra POZ	120	1,53
2,5	KC50	120	1,02
5	KC50	120	1,37

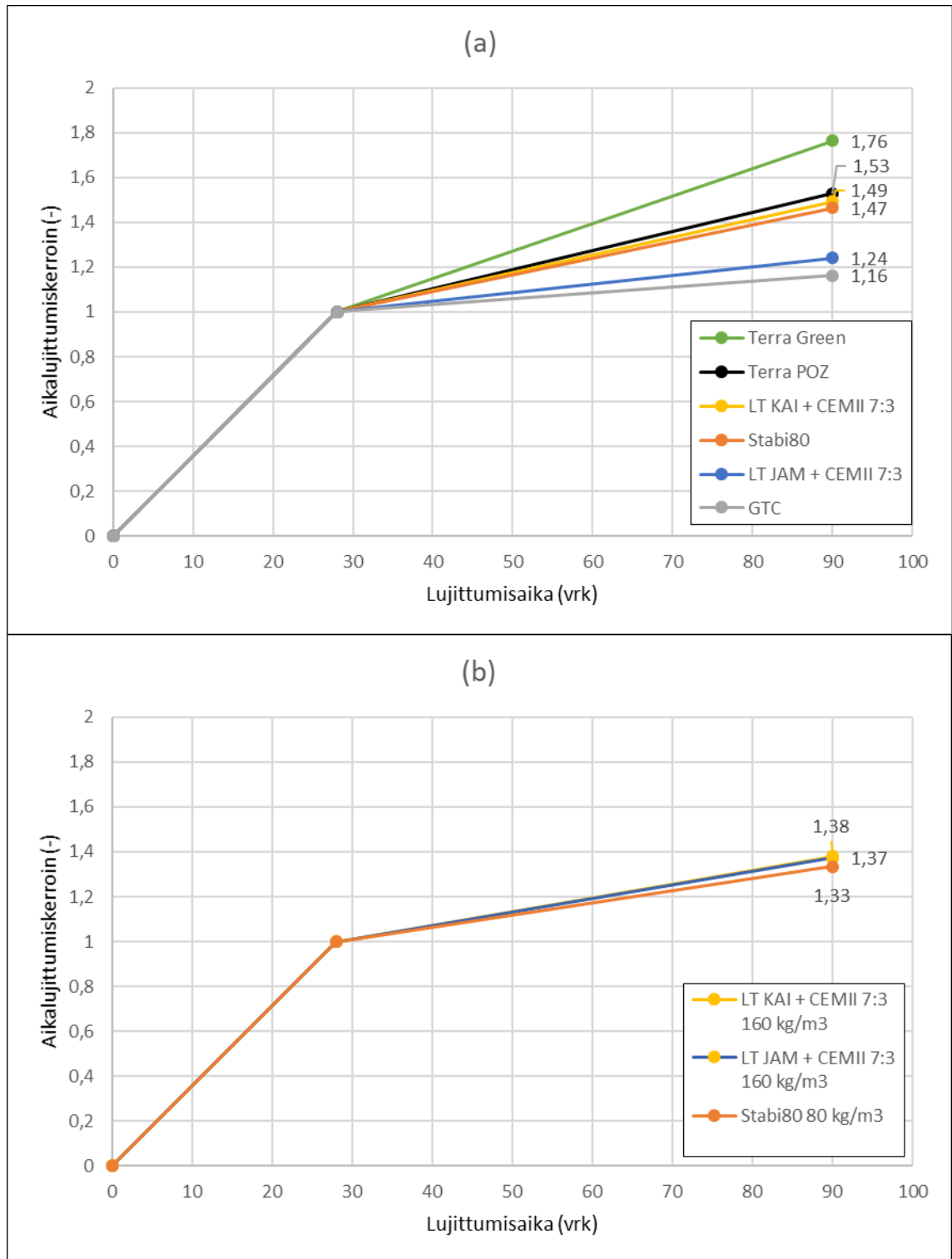
**Taulukko 4.2: Kuninkaantammi. Staran tekemien stabiloitavuuskokeiden tuloksista määritetyt aikalujittumiskertoimet.**

Syvyys [m]	Sideaineaine	Sideainemäärä	Aikalujittumiskerroin $\tau_{90}/\tau_{28}$
3	Terra GTC	120	1,18
3,5	Terra GTC	120	1,11
7,2	Terra GTC	120	1,42
5,5	Terra GTC	120	1,24
3	KC 3:7	120	1,33
3,5	KC 3:7	120	1,10
7,2	KC 3:7	120	1,19
5,5	KC 3:7	120	1,20



**Kuva 4.6: Kuninkaantammi. Stabiloitavuuskokeet. Aikalujittumiskerroin 90 vrk / 28 vrk. Sideainemäärä (a) 120 kg/m<sup>3</sup> (b) 80 ja 160 kg/m<sup>3</sup>. Näytteet 2,5 m syvyydeltä.**





**Kuva 4.7: Kuninkaantammi. Stabiloitavuskokeet. Aikalujittumiskerroin 90 vrk / 28 vrk. Sideainemäärä (a) 120 kg/m<sup>3</sup> (b) 80 ja 120 kg/m<sup>3</sup>. Näytteet 5,0 m syvyydeltä.**

## 4.2 Valvontakairaukset

### 1 kk ikäiset pilarit

1 kk ikäiset koepilarit kairattiin kesäkuun alussa pilarikairalla (48 pilaria) ja pilarisiipikairalla (12 pilaria). Ennen kairaamista maan pinta avattiin kaivinkoneella noin 1 m syvyyteen pilarien yläpäiden löytämiseksi (kuva 4.8). Koekairaukset toteutettiin samassa järjestyksessä kuin pilaristabilointi eli alueelta E alueelle A, jotta koepilarit olisivat mahdollisimman lähellä 28 päivän ikää. Pilareiden yläpäissä oli jonkin verran kiviä, jotka saattoivat ohjata kairankärkeä siten, että osassa kairauksista oli vaikeuksia kairakärjen pilarissa pysymisessä.



(a)

(b)

**Kuva 4.8: Laadunvalvontakairaukset 1kk ikäisille pilareille. (a) Täytemaata leikattiin kaivinkoneella ja mittamies merkitsi pilarien sijainnit (x,y). (b) Kaksi päivää myöhemmin leikkauspinnan kuivumisen jälkeen pilareiden yläpäät näkyivät selkeästi.**

### 3 kk ikäiset pilarit

Elokuun alkupuolella 2020 kairattiin 3 kk ikäiset koepilarit pilarikairalla (38 pilaria). Puristinkairaukset (CPTu) toteutettiin ennen pilareiden ylösnostoa 26.8.2020 kolmeen ylösnostettavaan pilariin. Puristinkairauksia tehtiin kaksi jokaiseen tutkittavaan pilariin 1,0 t kärjellä. Pilarikairaukset ja pilarisiipikairaukset teki Ramboll Finland Oy. Puristinkairaukset teki Stara. Puristinkairausten tulokset löytyvät liitteestä 13.

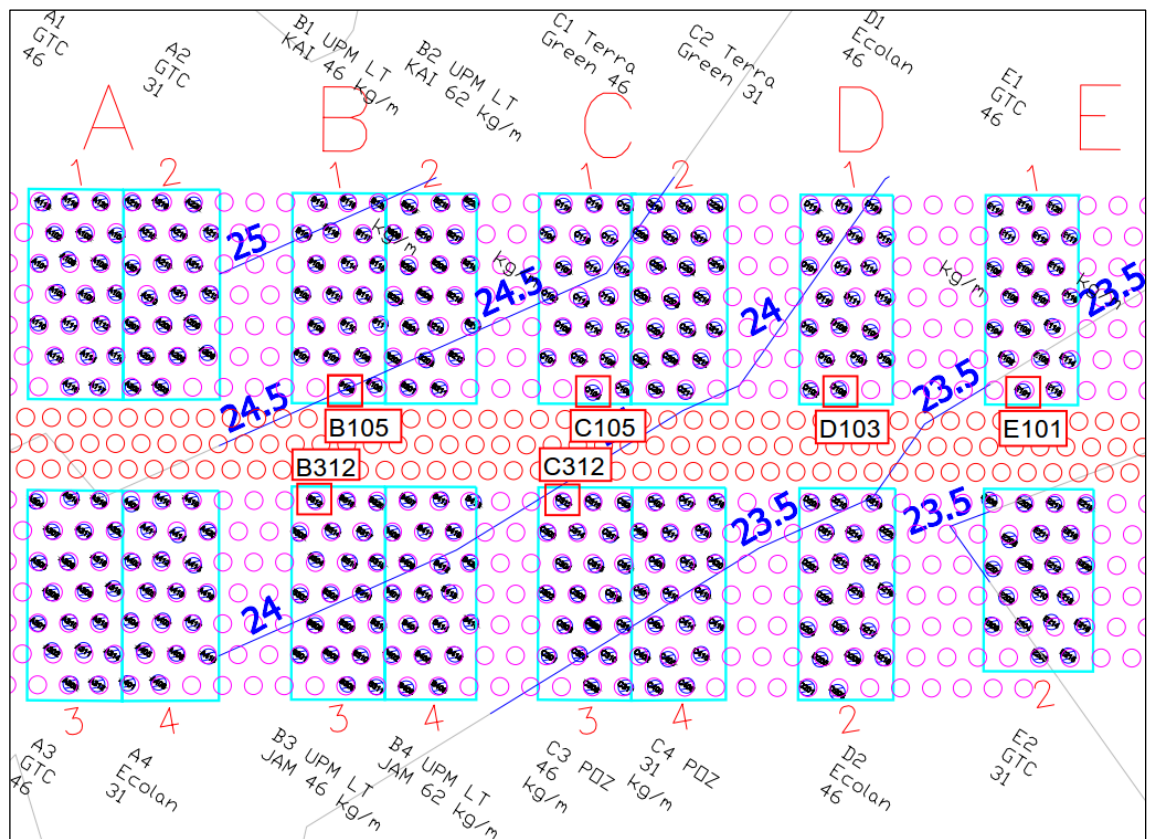
### Kairaustulokset

Kaikki kairaustulokset on raportoitu Helsingin kaupungille raportissa ”Koestabilointitöiden laadunvalvontatutkimusten yhteenvetoraportti 05.11.2020”. Tässä työssä on esitetty vain keskiarvokuvaajia sekä kaikista kairauksista on laskettu keskihajontoja ja kovarianssin arvoja. Kairaustulokset on esitelty luvussa 5.

### 4.3 Pilareiden yläpäiden ylösnosto

Kuusi koepilaria nostettiin 31.8. ja 1.9.2020 kaivinkoneella noin 0,5-1,0 metrin pätkinä noin kolmen metrin syvyyteen asti. Valituilla koepilareilla on samat sideainepitoisuudet  $120 \text{ kg/m}^3$ , jotta tulokset olisivat verrattavissa toisiinsa. Kun sideaine vaihtuu ja stabilointikoneen asetukset muuttuvat, ensimmäisen pilarin laatu ei välttämättä vastaa suunniteltua laatua. Sen vuoksi valitut koepilarit eivät ole osa-alueensa ensimmäinen stabiloitu pilari.

Nostettujen pilarien yläpäiden sijainnit on esitetty kuvassa 4.9 ja taulukkoon 4.3 on koottu nostettujen pilarien yläpäiden tiedot. Taulukossa on esitetty pilarien sideaineet, syvyysvälit, nostetun pilaripätkän korkeus sekä kommentit siitä pysyivätkö ne ehjinä ylösnostettaessa.



Kuva 4.9: Pilarien, joiden yläpäät nostettiin, sijainnit pilarikartassa.

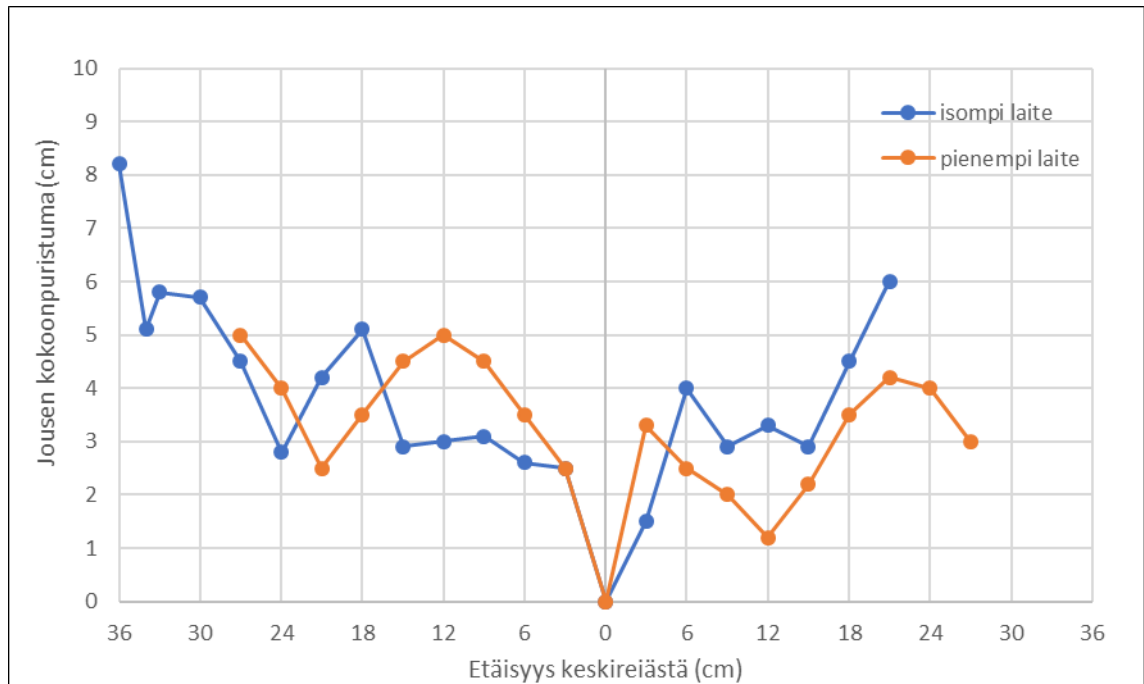
**Taulukko 4.3: Nostetut pilareiden yläpäät. Nosto tehtiin kaivinkoneella. Alimmalla rivillä on esitetty havainnot kaivinkoneen ja putken avulla tehdystä nostosta.**

Pilari	Sideaine	Syvyysväliä [m]	Korkeus [cm]	Kommentit
C105	Terra Green	noin 0 – 1	noin 40	kokonainen pilarin pätkä
C105	Terra Green	noin 1 – 1,9	noin 25	paloina, isoin yksittäinen pala noin 25 cm (korkeus)
C105	Terra Green	noin 1,9 – 2,7		pieninä paloina
B312	LT JAM + CEM II 7:3	noin 0 – 1		tästä aloitettiin, ei nostettu ylös vaan jatkettiin kaivamista
B312	LT JAM + CEM II 7:3	noin 1 – 2		paloina
B312	LT JAM + CEM II 7:3	noin 2 – 3		paloina
B105	LT KAI + CEM II 7:3	noin 0,2 – 1		Iso pala
B105	LT KAI + CEM II 7:3	noin 1,5 – 2	noin 45	kokonainen pilarin pätkä
B105	LT KAI + CEM II 7:3	noin 2,4 – 3,4		paloina
C312	Terra POZ	noin 0 - 1	noin 50	kokonainen pilarin pätkä
C312	Terra POZ	noin 1 – 2	noin 90	kokonainen pilarin pätkä
C312	Terra POZ	noin 2 – 3	noin 50	kokonainen pilarin pätkä
D103	Infra Stabi80	noin 0 -1	noin 60	kokonainen pilarin pätkä
D103	Infra Stabi80	noin 1 – 2		pieniä paloja
D103	Infra Stabi80	noin 2 – 3		pieniä paloja, pieni reunapala pysyi ehjänä
E101	Terra GTC	noin 0 – 1		pieniä paloja
E101	Terra GTC	noin 1 – 3		Noin 2 m pilaripala mureni nosto- taessamme putkea (iv-putki, halkaisija 1 m)

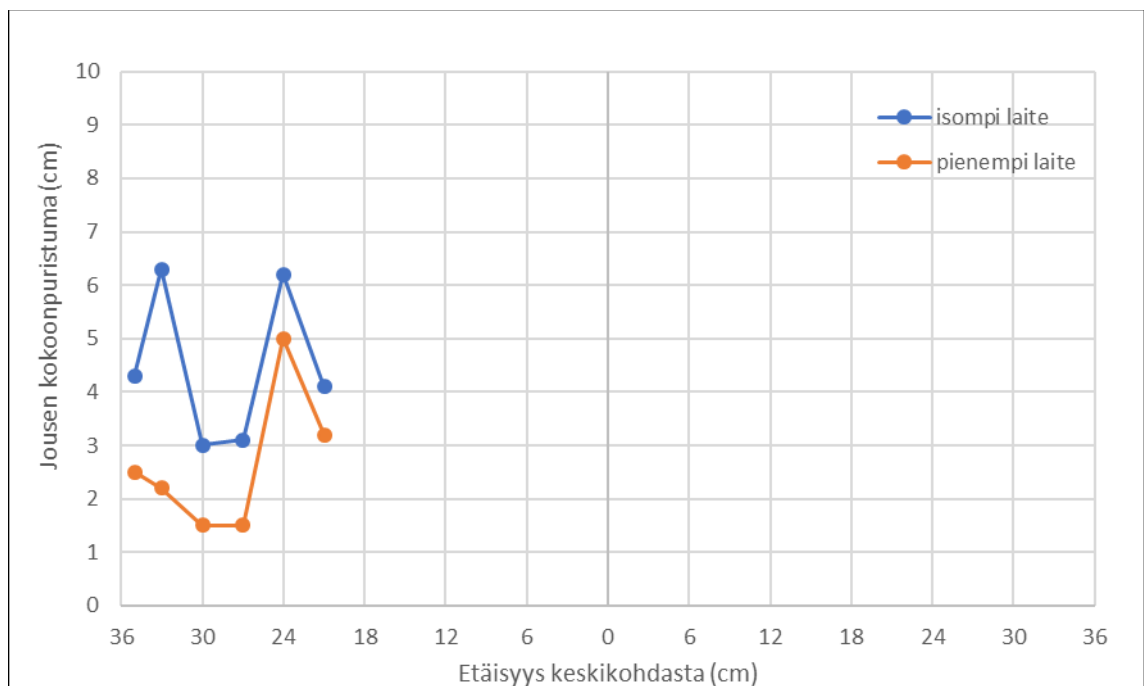
#### Penetrometrimääritys – kenttätutkimus

Ylösnostetuista pilarien yläpäistä tutkittiin pilarin poikkisuuntaista lujuuden vaihtelua penetrometrillä. Pilarien nostossa vain pieni osa pysyi ehjänä ja niistäkin vain osa soveltui penetrometrimääritykseen, jonka vuoksi penetrometrimääritystä toteutettiin vain muutamalle pilaripätkälle. Penetrometrillä saa nopeasti tutkittua kenttätöissä suuntaa antavasti poikkileikkauksen suhteellista lujuuden vaihtelua mutta absoluuttista lujuutta tällä ei haeta.

Työssä käytettiin kahta Eijkelkampin valmistamaa penetrometriä, joiden mallit ovat pocket penetrometer ja hand-penetrometer for top layers, type IB. Pocket penetrometer on kuvassa 4.10 ja kuvassa 4.11 viitattu pienempi laite ja hand penetrometer isompi laite. Kuvassa 4.10 ja kuvassa 4.11 on esitetty mitatut penetrometrin kärjen painumat eli penetrometrissä olevan jousen kokoonpuristumat kahdella eri aiemmin mainituilla penetrometreillä kahdelle pilaripätkälle C312 ja D103. C312-pilari on stabiloitu sideaineella Terra POZ ja D103-pilari on stabiloitu sideaineella Infra Stabi80, molemmat sideainemäärällä 120 kg/m<sup>3</sup>.



**Kuva 4.10: C312 (Terra POZ), syvyys 2-3 m, tutkimus tehty 4.9.2020 kahdella penetrometrilaitteella.**

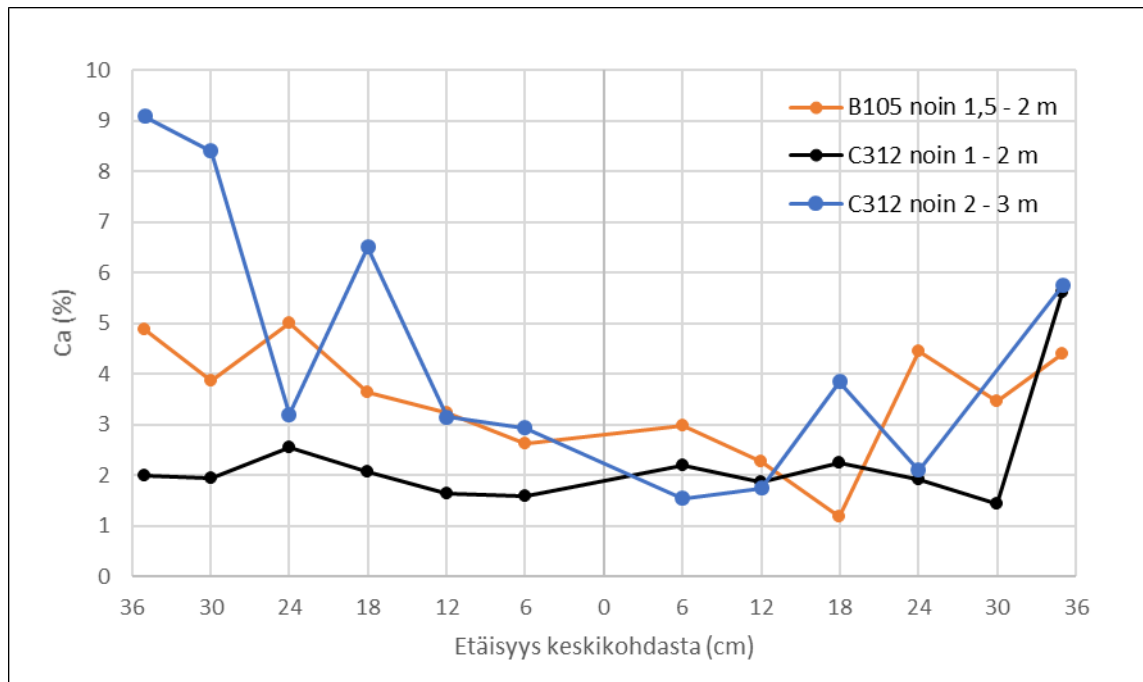


**Kuva 4.11: D103 (Infra Stabi80), syvyys 2-3 m, tutkimus tehty 4.9.2020 kahdella penetrometrilaitteella.**

Penetrometrimääritystä yritettiin tehdä myös pilaripätkille C312 (Terra POZ) syvyydeltä 1-2 m ja B105 (LT KAI + CEM II 7:3) syvyydeltä 1,5-2 m mutta nämä eivät onnistuneet. C312 pilaripätkä ei soveltunut penetrometrimittaukseen, koska sen poikkileikkauksessa oli kiviä ja savea seassa, joten penetrometrimäärityksen tulos saattoi olla liian heikko saveen kohdalla tai liian luja kiven kohdalla. B105 pilarin pätkä ei soveltunut penetrometrimittaukseen, koska se oli liian luja ja sen päällä oli myös savea. Pilaripätkien päiden tasaaminen ja siistiminen ei auttanut penetrometrimäärityksen onnistumisesta. (Nämä tutkimukset tehtiin 4.9.2020 ja 8.9.2020.)

### XRF-mittaus – kenttätutkimus

XRF-mittauksella selvitetään sideaineen jakautumisen tasaisuutta ylösnostettujen pilaripätkien poikkileikkauksessa. Mittaus toteutettiin pilarin poikkileikkauksen halkaisijasta noin 6 cm välein (periaatekuva kuvassa 4.16). XRF-mittalaitteella mitattiin kalsiumin pitoisuutta pilarin poikkileikkauksessa. Pilarin yläpäiden nostossa vain Terra POZ:n ja LT KAI + CEMII 7:3 sideaineilla stabiloidut pilaripätkät soveltuivat tähän mittaukseen. Tähän mittaukseen ehtona oli ehjä pilaripätkä poikkisuunnassa. Kalsiumin pitoisuudet pilareille B105 ja C312 on esitetty kuvassa 4.12.



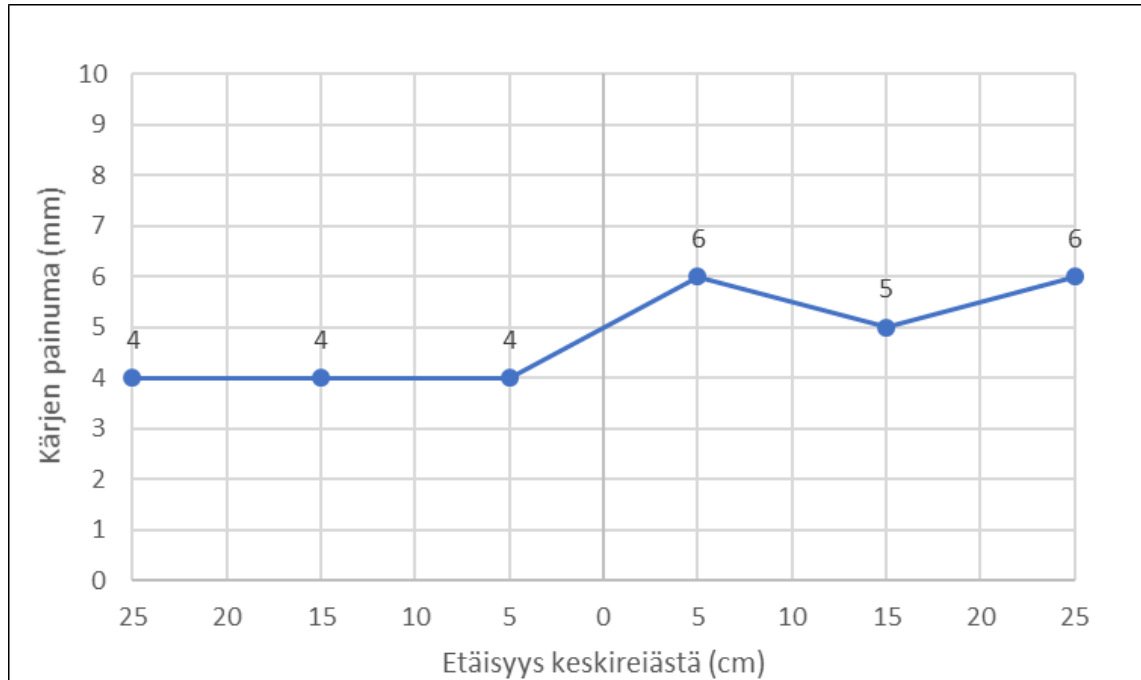
**Kuva 4.12: XRF-mittaus. Kalsiumin pitoisuus pilarin C312 (Terra POZ) ja B105 (LT KAI + CEM II 7:3) poikkisuunnassa. Pilarin keskikohta on x-akselissa 0 ja 35 kuvaa pilarin reunaa. Tutkimukset on tehty 4.9.2020 (C312) ja 8.9.2020 (B105). C312 syvyysväleiltä noin 1-2 m ja noin 2-3 m. B105 syvyysväleiltä noin 1,5-2 m.**

#### 4.4 Pilarinäytteiden laborioriotutkimukset

##### Kartiokoe

Kuvassa 4.13 on esitetty kartiokokeesta saadut tulokset kärjellä 400g/30°. Esitetyt arvot edustavat 1-3 koetulosten keskiarvoja.

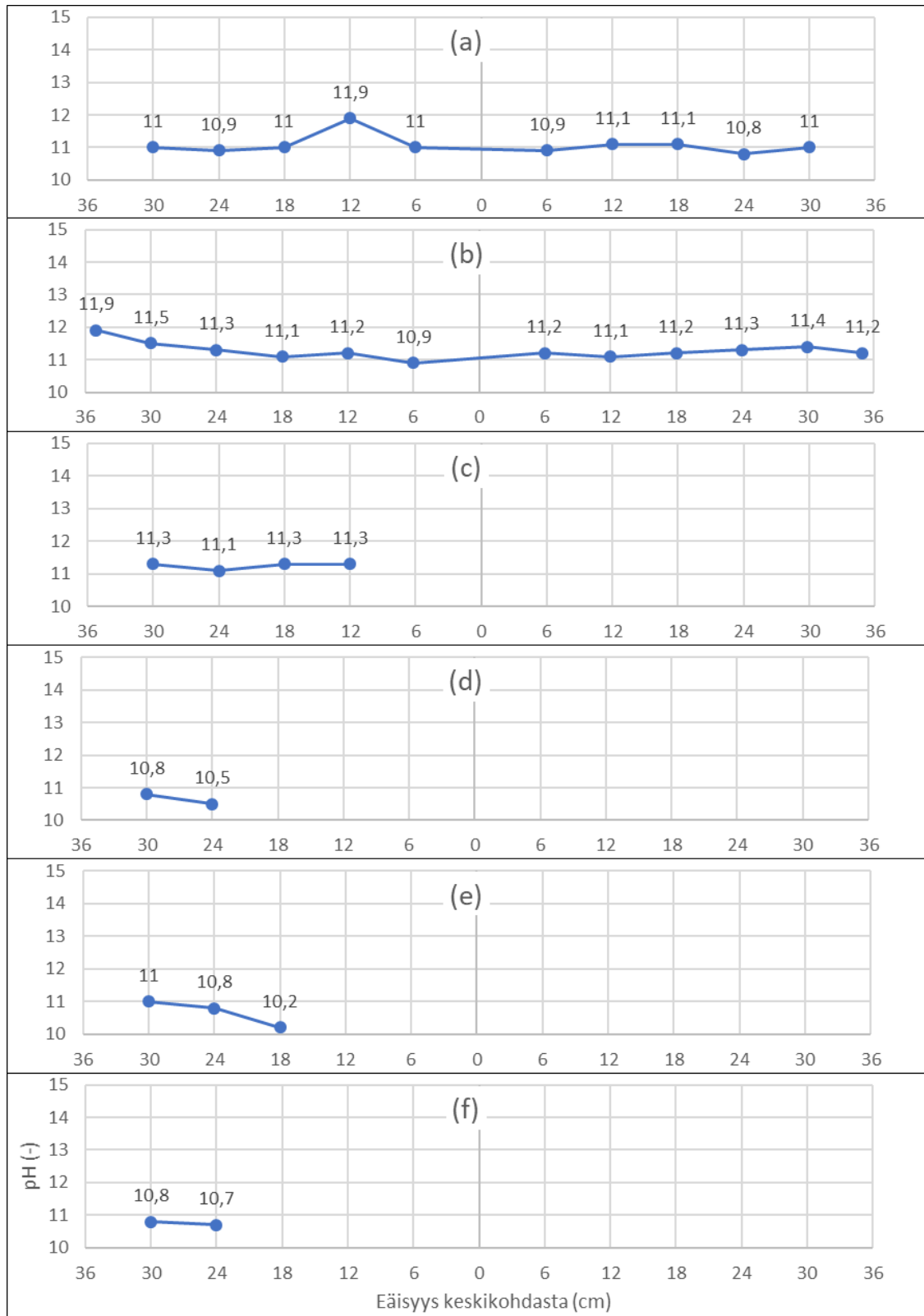
Kartiokoe tehtiin myös pilaripätkälle B105 (sideaine LT KAI + CEM II 7:3) syvyysväliltä noin 1,5 – 2 m. Nämä näytteet olivat liian lujia kartiokokeeseen 400 g / 30 ° -kärjellä.



**Kuva 4.13: Kartiokoe 400 g / 30 ° -kärjellä (sideaine Terra POZ). Pilarin keskikohta on etäisyyden 0 cm kohdalla ja pilarin reuna 35 cm kohdalla. Pilaripätkä on noin syvyydeltä 2-3 m. (Tutkimus tehty 4.9.2020). Arvot edustavat 1 – 3 koetulosten keskiarvoja.**

##### pH-mittaus

Ylösnostetuista pilareista otettiin näytteet pilarin poikkisuunnassa. Pilarin näytteistä tehtiin pH-mittaukset laboratoriossa (kuva 4.14). Tavoitteena oli tutkia sideaineen jakautuminen pilarin poikkisuunnassa sekä tutkia onko pH-arvojen tutkiminen hyvä indikaattori sideaineen jakautumiselle pilarin poikkisuunnassa. Koska pilarien ylösnostossa vain osa pilaripätkistä pysyi ehjänä, pH-arvoja ei ole kaikilla tutkituilla pilaripätkillä koko poikkisuunnassa, osassa on vain pH-arvot pilarin reunasta. pH-arvojen vaihtelevuus pilareiden poikkileikkauksessa on selkeästi pienempi kuin XRF-mittalaitteella tutkittu kalsiumin pitoisuus.



**Kuva 4.14: Pilarinäytteiden pH-mittaus laboratoriossa. Pilarin keskikohta on etäisyyden 0 cm kohdalla ja pilarin reuna 35 cm kohdalla. (Tutkimus tehty 23.9.2020)**

(a) B105 (LT KAI) syvyys n. 1,5-2 m

(b) C312 (Terra POZ) syvyys n. 2-3 m

(c) B312 (LT JAM) syvyys n. 2-3 m

(d) E101 (Terra GTC) syvyys n. 2-3 m

(e) C105 (Terra Green) syvyys n. 1,9-2,7 m

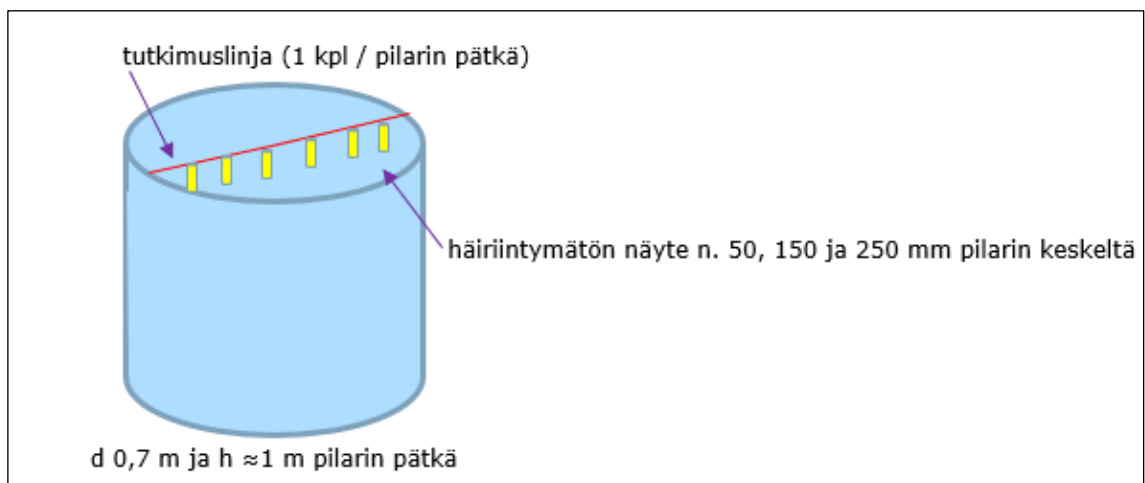
(f) D103 (Infra Stabi80) syvyys n. 2-3 m



### Yksiakselialinen puristuslujuuskoe

Pilarin C312 syvyydeltä n. 2-3 m ja pilarin B105 syvyydeltä n. 1,5-2 m otettiin metalliputkilla (halkaisija 60 mm) pilarinäytteet, yhteensä kuusi näytettä molemmista pilaripätkistä. Näytteet otettiin pilarien keskikohdista 50, 150 ja 250 mm molemmilta puolilta (näytteenottoperiaate metalliputkilla kuvassa 4.15).

Taulukkoon 4.4 on koottu pilarin C312 puristuskokeen tulokset. Osa näytteistä olivat lyhyitä suhteessa näytteen halkaisijaan, jonka vuoksi niiden puristuslujuudet on kerrottu vielä korjauskertoimella. Pilarin C312 puristuskokeista saadut tulokset puristusjännitys-suhteellinen muodonmuutos -kuvaajassa löytyy liitteestä 5. Pilarin B105 (sideaine LT KAI + CEM II 7:3) näytteistä (syvyydeltä n. 1,5-2 m) yritettiin tehdä puristuskokeet mutta näytteet murenevät, kun näytteet otettiin metalliputkista pois ja viimeistään kun kappaleet tasattiin päistä puristuskokeita varten.



**Kuva 4.15: Ylösnostettu pilarin pätkä ja tutkimuslinjat pilarin yläpinnassa.**

**Taulukko 4.4: Puristuskokeen tulokset pilarille C312 (sideaine Terra POZ). Näytteet ovat syvyydeltä n. 2-3 m, poikkisuunnassa 50, 150 ja 250 mm pilarin keskikohdasta molemmilta puolilta pilarin poikkileikkausta.**

Koekappalenumero	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6
Näytteen etäisyys pilarin keskikohdasta	50	150	250	50	150	250
Puristuslujuus [kPa]	84,4	169,0	224,0	75,2	106,0	108,0
L/D	2,0	1,8	1,4	2,0	1,82	2,1
Korjauskertoimet* kun L/D < 2	-	0,972	0,900	-	0,976	-
Puristuslujuus [kPa] korjauskertoimella		164,3	201,6		103,5	

\*(Liikennevirasto 2018b)

## **4.5 Ympäristöseurantamittausten tulokset**

### Pintavesi

Rajaojan pH-mittaustulokset on esitetty taulukossa 4.5 ja taulukossa 4.6. Molemmissa pintavesipisteissä vedenlaatu oli tyyppillisellä tasolla.

### Pohjavesi

Pohjavesiseurannan tulokset raportoidaan ympäristökeskukselle 2021. Tuloksia ei esitetä tässä työssä. Pohjavesinäytteet otettiin viidestä pohjavesiputkesta (PVP1, PVP2, PVP3, PV5 ja PV 6) (kuva 3.9).

**Taulukko 4.5: pH-mittaustulokset ojasta 1 ja 2 viikon välein stabiloinnin aikana (kuva 3.9). Vedenlaatua seurataan ojasta koetoiminta-alueen ylä- (Oja 1) ja alajuoksulla (Oja 2). Mittaukset tehtiin Milwaukee 802 pH-mittarilla ja pH-liuskoilla (Testeri).**

pvm	Oja 1 (yläjuoksu) MW-802 / Testeri	Oja 2 (alajuoksu) MW-802 / Testeri	Lämpötila
29.4.2020	7,6 / 8,0	7,6 / 8,0	+3
7.5.2020	7,5 / 7,5	7,6 / 8,0	+13
14.5.2020	7,7 / 7,5	7,8 / 8,0	+9
20.5.2020	8,0 / 8,0	8,1 / 8,0	+12
28.5.2020	8,2 / 8,0	8,0 / 8,0	+17
4.6.2020	8,3 / 8,0	8,1 / 8,0	+20
11.6.2020	8,4 / 8,5	8,2 / 8,5	+18
18.6.2020	8,6 / 8,5	8,5 / 8,5	+20

**Taulukko 4.6: pH-mittaustulokset ojasta 1 ja 2, ennen ja jälkeen koestabilointialueen. Vesinäytteet analysoitiin laboratoriossa.**

pvm	Oja 1 (yläjuoksu)	Oja 2 (alajuoksu)	Lämpötila (Oja 1/2)
20.4.2020	6,56	7,39	7,6 / 9,1
17.6.2020	7,51	7,16	22,1 / 12,5

### Ympäristötutkimukset

Pilareita nostaessa otettiin savinäytteitä pilareiden ulkoreunan vierestä noin 0-12 cm etäisyydeltä molemmilta puolilta pilaria. Sen lisäksi otettiin pilarista näyte. Savi- ja pilari-näytteistä tehtiin ympäristötutkimuksia laboratoriossa. Tavoitteena oli tutkia sideaineen leviäminen pilarin ulkopuolelle. Näytteistä tehdyt analyysit laboratoriossa:

#### Pilarinäytteet:

- Metallit sis. Vna 214/2007 mukainen lista – kuningasvesihajotus
- pH
- 2-vaiheinen ravistelutesti, sis. metallit, anionit ja DOC
- Geotekninen vesipitoisuus

#### Savinäytteet:

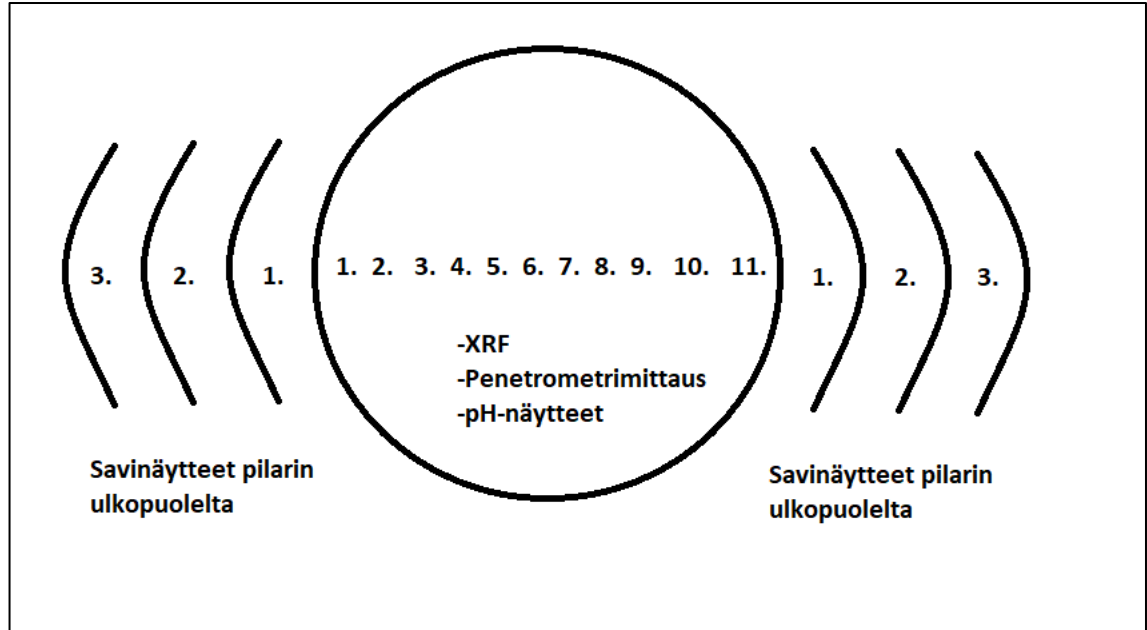
- Metallit sis. Vna 214/2007 mukainen lista – kuningasvesihajotus
- pH
- Geotekninen vesipitoisuus

#### Koetoiminnan ympäristötutkimusten tulokset 6 kk jälkeen (Inka Reijonen 16.12.2020)

- Ravinteet tai orgaanisen aineksen pitoisuus ei ole lisääntynyt
- Koetoiminta ei ole lisännyt pohjavesien liukoisten metallien pitoisuutta
- PAH ja öljyhiilivedyt ei ole lisääntynyt koetoiminnan vaikutuksesta.
- PCB:t tai BTEX-yhdisteet tai eettereiden pitoisuus ei ole lisääntynyt

- Metallien diffuusio ei ollut havaittavissa ympäröivän maan kokonaispitoisuuksissa

Tässä työssä ei raportoida ympäristötutkimustuloksia yksityiskohtaisemmin vaan ne raportoidaan erikseen keväällä 2021.



**Kuva 4.16: Kuninkaantammi. Periaatekuva, jossa on esitetty tutkimus- ja näytenäytteiden sijainnit pilaripoikkileikkauksessa ja sen ympärillä. Pilarin kohdalle tehdyt mittaukset, näytteenotot ja tutkimustulokset on esitelty luvuissa 4.3 ja 4.4. Pilarin ulkopuolelta tehdyt tutkimukset on esitelty luvussa 4.5.**

## 5 Stabiloinnin lujittuminen Kuninkaantammessa

Kuninkaantammen koestabiloinnin laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuudet on esitetty osa-alueittain liitteessä 4. Kuvissa on esitetty keskiarvoleikkauslujuuksien lisäksi kairausten lukumäärä lasketussa keskiarvossa sekä tavoiteleikkauslujuus 100 kPa. Näiden lisäksi kuvissa on esitetty stabiloitavuuskokeiden tulokset yksiaksiaalisten puristuskokeiden tuloksista määritetyt leikkauslujuudet syvyyksiltä 2,5 ja 5,0 m. Laadunvalvontakairausten sekä stabiloitavuuskokeiden esitetyt leikkauslujuudet ovat 1 ja 3 kk ikäisten pilareiden leikkauslujuudet. Laadunvalvontakairaustuloksille on laadittu erillinen laadunvalvontakairausten yhteenvetoraportti, jossa on esitetty mm. yksittäisten kairausten tulokset. Taulukoissa 5.1 ja 5.2 ovat yhteenvedot laadunvalvontatutkimusten ja koestettujen pilareiden tiedoista. Taulukot löytyvät myös laadunvalvontakairausten yhteenvetoraportista.

**Taulukko 5.1: Laadunvalvontatutkimusten ja pilarikairattujen pk2/100 pilareiden tiedot. Osa-alueet A2, A3, A4, B1, B2, B3 ja B4. 3 kk ikäiset pilarit.**

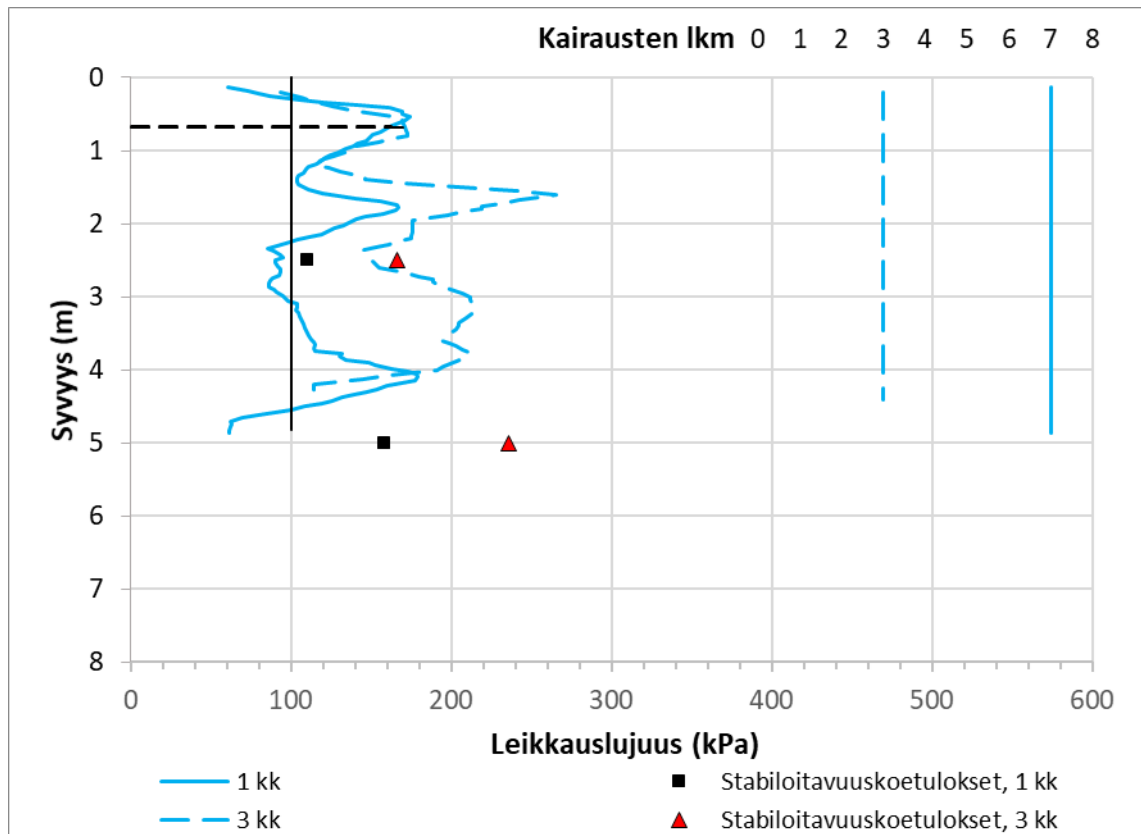
Koealue	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
<b>Tutkimusmäärä</b>							
PK2/100	2	2	3	3	3	3	3
PS130/65	-	-	-	-	-	-	-
Tutk. yht.	2	2	3	3	3	3	3
Tutk. pilareita yht.	2	2	3	3	3	3	3
<b>Halkaisija</b>	700 mm						
<b>Suunniteltu sideaine ja määrä(kg/m<sup>3</sup>)</b>	GTC 80	GTC 120	Stabi80	LT KAI 120	LT KAI 160	LT JAM 120	LT JAM 160
<b>Koestusikä</b>							
yksittäiset (vrk)	98	96	97	99	99	94-99	99
keskiarvo (vrk/kk)	98	96	97	99	99	97	99
<b>Koestettujen pilarien hyötypituudet</b>	5,5-5,7	6,5-6,6	6,3-6,6	4,5-4,6	4,9-5,0	5,5-5,8	5,5-5,5
yksittäiset keskiarvo	5,6	6,5	6,5	4,6	5,0	5,7	5,5
<b>Tavoiteleikkauslujuus</b>	100 kPa (3 kk)						

**Taulukko 5.2: Laadunvalvontatutkimusten ja pilarikairattujen pk2/100 pilareiden tiedot. Osa-alueet C1, C2, C3, C4, D1, E1 ja E2. 3 kk ikäiset pilarit.**

Koealue	C1	C2	C3	C4	D1	E1	E2
<b>Tutkimusmäärä</b>							
PK2/100	3	3	3	3	3	3	2
PS130/65	-	-	-	-	-	-	-
Tutk. yht.	3	3	3	3	3	3	2
Tutk. pilareita yht.	3	3	3	3	3	3	2
<b>Halkaisija</b>	700 mm						
<b>Suunniteltu sideaine ja määrä(kg/m<sup>3</sup>)</b>	Terra Green 120	Terra Green 80	Terra POZ 120	Terra POZ 80	Stabi80 120	GTC 120	GTC 80
<b>Koestusikä</b>							
yksittäiset (vrk)	99-100	99-100	98-99	98	99-100	100	98
keskiarvo (vrk/kk)	99	99	98	98	99	100	98
<b>Koestettujen pilarien hyötypituudet</b>	5,0-5,4	5,3-5,8	5,8-6,3	6,3-6,4	5,6-5,9	6,0-6,2	7,0-7,0
yksittäiset keskiarvo	5,2	5,5	6,0	6,4	5,8	6,1	7,0
<b>Tavoiteleikkauslujuus</b>	100 kPa (3 kk)						

Laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuudet on esitetty liitteessä 4, esimerkkinä kuva 5.1. Kuvaajien tulkitsemiseen tarvittavat selitteet:

- Sininen käyrä  
= laadunvalvontakairauksista saatu keskiarvoleikkauslujuus, 1 kk
- Sininen käyrä katkoviivalla  
= laadunvalvontakairauksista saatu keskiarvoleikkauslujuus, 3 kk
- Musta vaakasuuntainen katkoviiva  
= sideaineen syötön lopetustaso
- Musta pystysuuntainen viiva  
= 3 kk ikäisille pilareille esitetty tavoiteleikkauslujuus 100 kPa
- Kairausten lkm  
= kairausten lukumäärä, jotka mukana keskiarvokuvaajassa, 1 kk ja 3 kk (katkoviiva)
- Musta neliö  
= stabiloitavuuskokeista määritetyt leikkauslujuudet 1 kk lujittuneille näytteille
- Punainen kolmio  
= stabiloitavuuskokeista määritetyt leikkauslujuudet 3 kk lujittuneille näytteille
- B1 = koestabilointialueen osa-alue
- LT KAI + CEMII 7:3 = sideaineseos
- $120 \text{ kg/m}^3$  = pilarin sideainemäärä

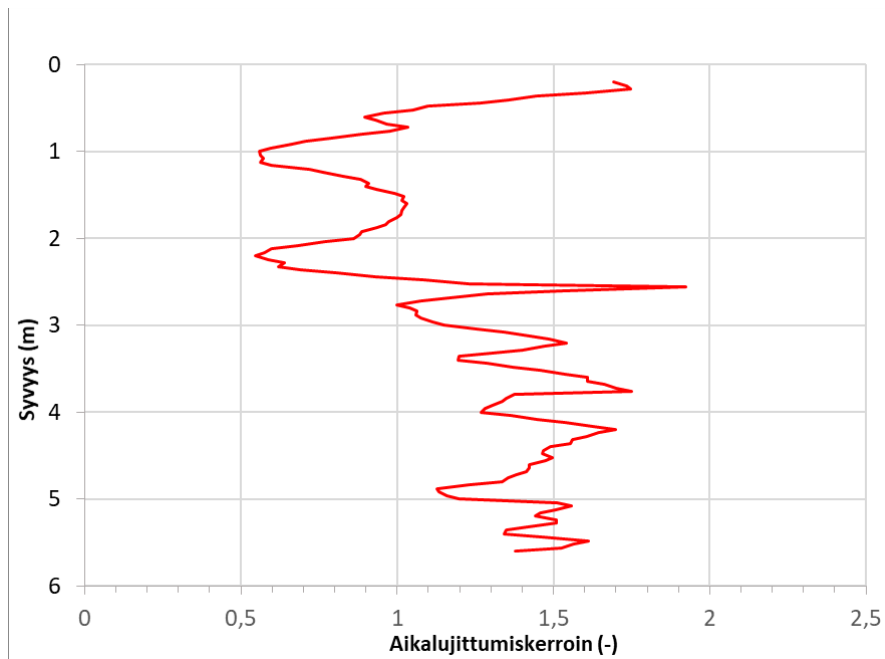


**Kuva 5.1: Esimerkki laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuskuvaajasta. Kuvassa alueen B1, sideaineella LT KAI + CEMII 7:3 ja sideainemäärällä  $120 \text{ kg/m}^3$  stabiloitujen pilareiden laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuudet sekä stabiloitavuuskoetulokset syvyyksiltä 2,5 m ja 5,0 m, 1 ja 3 kk.**

## 5.1 Aikalujittuminen

Laadunvalvontakairausten keskiarvolujuuksista on määritetty aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen, 3 kk keskiarvoleikkauslujuudet jaettuna 1 kk keskiarvoleikkauslujuudet. Kuvassa 5.2 on esitetty esimerkki aikalujittumiskertoimista syvyyden suhteen kenttälujuuksista sideaineella Terra GTC. Loput kuvaajat löytyvät liitteestä 6. Taulukkoon 5.3 on koottu aikalujittumiskertoimien minimi, maksimi ja keskiarvot.

Kun aikalujittumiskerroin on tasan 1, lujuus on pysynyt samana 1 kk lujuudesta 3 kk lujittumisen jälkeen. Kun aikalujittumiskerroin on suurempi kuin 1, lujuus on kehittynyt 1 kk lujuudesta 3 kk lujuuteen. Kun aikalujittumiskerroin on pienempi kuin 1, lujuus on heikentynyt 3 kk lujittumisen jälkeen suhteessa 1 kk lujuuteen.



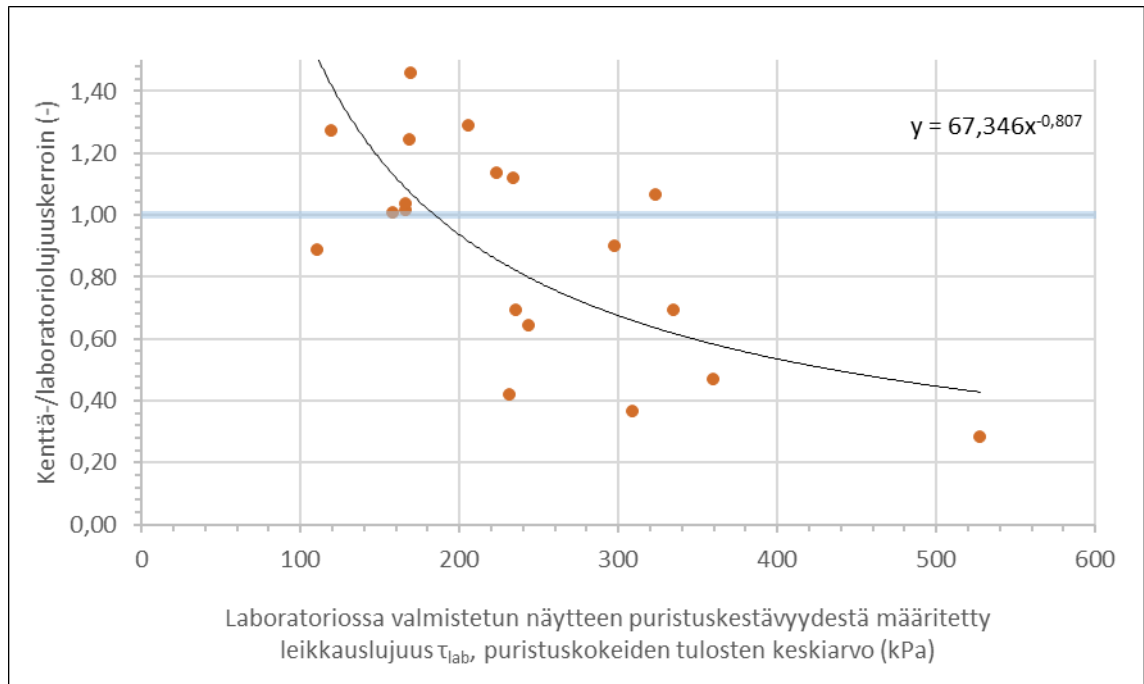
**Kuva 5.2:** Esimerkkikuva aikalujittumiskertoimista syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Kuvassa alue A2, sideaineella Terra GTC ja sideainemäärällä 80 kg/m<sup>3</sup>.

**Taulukko 5.3: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen 3 kk ja 1 kk laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista. Taulukossa min, max ja keskiarvo.**

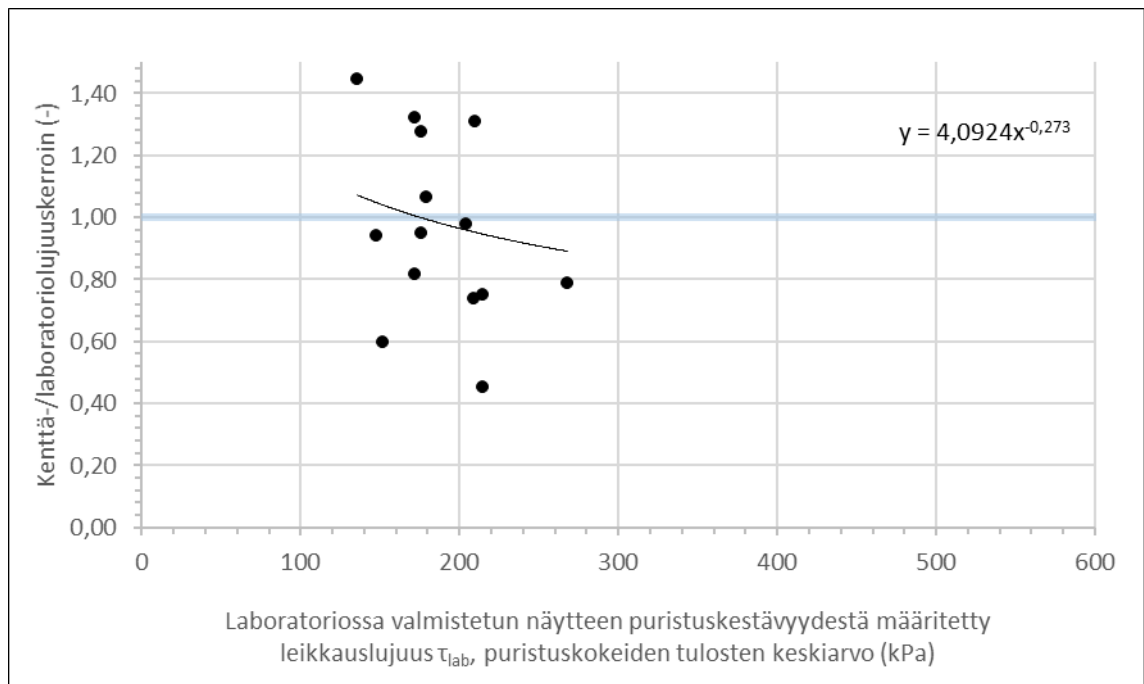
	Sideaine	Sideaine- määrä [kg/m <sup>3</sup> ]	3 kk / 1 kk		
			MIN	MAX	Ka
A2	Terra GTC	80	0,55	1,93	1,19
A3	Terra GTC	120	0,42	2,11	0,97
A4	Infra Stabi80	80	0,63	1,97	1,17
D1	Infra Stabi80	120	0,68	1,50	1,09
B1	LT KAI + CEMII 7:3	120	0,71	2,25	1,45
B2	LT KAI + CEMII 7:3	160	0,36	1,88	1,06
B3	LT JAM + CEMII 7:3	120	0,73	2,08	1,28
B4	LT JAM + CEMII 7:3	160	0,72	2,06	1,31
C1	Terra Green	120	0,44	1,59	0,99
C2	Terra Green	80	0,34	1,16	0,77
C3	Terra POZ	120	0,69	1,70	1,32
C4	Terra POZ	80	0,41	1,59	1,10
E1	Terra GTC	120	0,43	1,73	1,02
E2	Terra GTC	80	0,61	1,37	1,04

## 5.2 Kenttä/laboratoriolujuuskerroin

Kuvassa 5.3 ja kuvassa 5.4 on esitetty laadunvalvontakairausten ja stabiloitavuuskokeiden tuloksista määritetyt kenttä-/laboratoriolujuuskertoimet sekä niitä edustavat trendkäyrät. Kuvassa 5.3 on kenttä-/laboratoriolujuuskertoimet sideaineseoksille, joissa on 70-80 % lentotuhkaa eli sideaineseoksille Stabi80, LT KAI + CEMII 7:3 ja LT JAM + CEMII 7:3. Kuvassa 5.4 on Nordkalkin sideaineseosten kenttä-/laboratoriolujuuskertoimet. Eritellyt kenttä-/laboratoriolujuuskertoimet eri sideaineseoksille on esitetty liitteessä 7.



**Kuva 5.3: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskertoimet sideaineseoksille, joissa on 70-80 % lentotuhkaa. Stabi80, LT KAI + CEMII 7:3 ja LT JAM + CEMII 7:3 -sideaineseokset.**



**Kuva 5.4: Kenttä-/laboratoriolujuuskertoimet Nordkalkin sideaineille Terra GTC, Terra Green ja Terra POZ.**

### 5.3 Lujittumisen tasalaatuisuus (Pilarin pituus- ja poikkisuunnassa)

#### Pilarin pituussuuntainen lujittumisen tasalaatuisuus

Laadunvalvontakairaukset suoritettiin pilarikairalla pk2/100 ja pilarisiipikairalla ps130/65 1 ja 3 kk ikäisille pilareille. Laadunvalvontakairauksista on esitetty keskiarvoleikkauslujuudet luvussa 5 sekä liitteessä 4. Helsingin kaupungille on laadittu erillinen



koestabilointitöiden laadunvalvontatutkimusten yhteenvetoraportti, jossa on esitetty yksittäiset kairaustulokset sekä keskiarvotulokset. Pilarikairausten pk/100 tulosten tulkinassa kantavuuskertoimen  $N_c$  on käytetty arvoa 10. Keskiarvoleikkauslujuuksien määrittämisessä on käytetty kaavojen 2-9 – 2-12 lisäksi Ramboll Finland Oy:n omia lisäyksiä kaavoissa vaippakitkan ja tankokitkan huomioimiseksi. Nämä laskukaavat on esitetty liitteessä 12.

Kokonaisuudessaan pilarit saavuttivat riittävät leikkauslujuudet. Osittain tarpeettoman lujia ja osassa oli pieniä lujuuden alituksia, joita sideainemäärää optimoimalla voidaan saada sopivat lujuudet.

#### Pilarin poikkisuuntainen lujuus

Pilareiden yläpäiden nostaminen oli haastavaa ja aikaa vievää. Useimmat nostetut pilarin pätkät murenivat, kun niitä asetti kaivinkoneen kauhalla maahan. Ehjistä pilaripätkistä, jotka eivät olleet täytetasosta (syvyydeltä n. 0-1 m) tutkittiin poikkisuuntaista suhteellista lujuutta (penetrometri työmaalla ja kartiokoe laboratoriossa), puristuslujuutta (laboratorion puristuskoe) sekä sideaineen sekoittumista (kalsiumin pitoisuus XRF-mittauslaitteella). Penetrometrillä mitattu lujuus riippui siitä mihin penetrometrin pienen kärjen sijoitti pilarin pinnalle. Pilaripätkien pinnat olivat hyvin epätasaisia.

Puristuskokeiden tulokset pilarista C312 (Terra POZ) suurimmat lujuudet ovat pilarin reunoissa ja keskemältä heikommät lujuudet. Kalsiumin määrät C312 (Terra POZ) ja B105 (LT KAI + CEMII 7:3) pilareiden poikkisuunnassa viittaavat myös siihen, että reunoissa on enemmän sideainetta kuin keskemällä pilaria. pH-arvot eivät näytä suurta eroa pilarin poikkisuunnassa. pH-arvo näyttää olevan huono mittari sideaineaineen jakautumisen tutkimiseen.

#### Keskihajonta ja variaatiokerroin (COV)

Geotekniikassa epävarmuuksia ja hajontaa on kaikkialla ja tämä näkyy myös tämän työn tuloksissa. Tässä työssä on pieni määrä koehavaintoja, maan ominaisuuksiin liittyvä epävarmuuksia sekä mitattujen arvojen perusteella määritetyt arvot sisältävät useita epävarmuuden lähteitä.

Maan ominaisuuksien vaihtelua voidaan kuvata tilastollisen menetelmän COV-arvolla (coefficient of variation). Lasketut COV-arvot ovat laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksien keskihajonta jaettuna keskiarvoleikkauslujuudella. Suuri COV-arvo indikoi suurta hajontaa. COV-arvo kuvaa tulosten kokonaisepävarmuutta. (Liikennevirasto 2018b) Laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista on määritetty keskihajonta ja COV-arvot (liite 8, 9 ja 10). Taulukossa 5.4 on esitetty COV-arvojen minimi-, maksimi- ja keskiarvot laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista.

1 kk keskiarvoleikkauslujuuksien COV-arvot ovat 0-74 % ja keskiarvot 13-41 %. 3 kk keskiarvoleikkauslujuuksien COV-arvot ovat 0-65 % ja keskiarvot 11-36. 3 kk keskiarvoleikkauslujuuksilla on pienemmät COV-arvot kuin 1 kk tuloksilla. Näin ollen keskiarvoleikkauslujuuksien kokonaisepävarmuus pieneni pilarien lujuuksien kehittyessä 1 kk:sta 3 kk:n.

**Taulukko 5.4: Kovarianssin (COV) minimi- ja maksimiarvot sekä keskiarvot prosentteina laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 1 ja 3 kk. Arvoissa ei ole huomioitu syvyysvälin 0-1 m (täytömaan) tuloksia.**

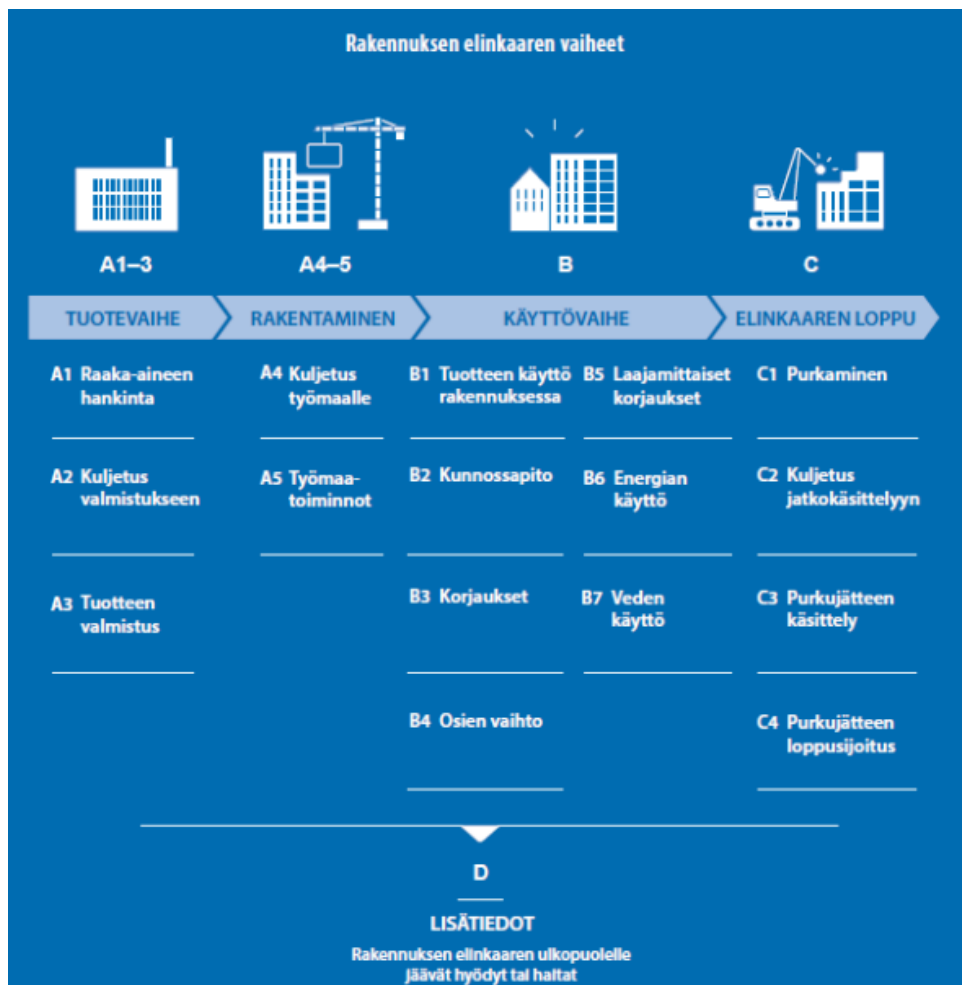
Osa- alue	Sideaine	Sideaine- määrä [kg/m <sup>3</sup> ]	1 kk			3 kk		
			Min [%]	Max [%]	Ka [%]	Min [%]	Max [%]	Ka [%]
A2	Terra GTC	80	0	67	29	0	35	16
A3	Terra GTC	120	0	43	16	0	44	15
A4	Infra Stabi80	80	5	54	21	4	48	29
D1	Infra Stabi80	120	12	74	41	1	65	22
B1	LT KAI + CEMII 7:3	120	12	52	30	3	55	23
B2	LT KAI + CEMII 7:3	160	11	68	36	2	58	28
B3	LT JAM + CEMII 7:3	120	4	42	23	13	50	36
B4	LT JAM + CEMII 7:3	160	7	46	22	2	48	23
C1	Terra Green	120	12	44	31	1	54	18
C2	Terra Green	80	4	44	23	4	33	16
C3	Terra POZ	120	4	36	17	6	43	22
C4	Terra POZ	80	5	42	19	1	33	18
E1	Terra GTC	120	8	32	17	11	34	20
E2	Terra GTC	80	0	48	13	0	23	11

## 6 Syvästabiloinnin kasvihuonekaasupäästöt

### Sideaineiden CO<sub>2</sub>-ekv.-päästöjen määrittäminen

Pilaristabiloinnin kasvihuonekaasupäästöt muodostuvat sideaineen tuotannossa, kuljetuksessa työmaalle sekä itse stabilointityössä. Sideaineiden tuotanto on selkeästi päästöintenssiivisin vaihe. Syvästabiloinnissa tyypillisesti käytetyt sideaineet kalkki ja sementti omaavat korkeat päästöarvot. Tuotantoprosessissa muodostuvat kasvihuonekaasut katsotaan kuuluvan tuotteen hiilijalanjälkeen ja sivutuotteena/jätteenä syntyvälle materiaalille ei jyvitetään tuotannon päästöjä. Näin ollen pilaristabiloinnin hiilijalanjälkeä on mahdollista pienentää sivutuote-/jätepohjaisilla sideaineilla, joiden päästöarvot muodostuvat mahdollisesta jalostamisesta stabilointia varten.

Ympäristöministeriö on esittänyt ohjeistuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmälle (kuva 6.1). Stabiloinnin sideaineiden tuotannon päästöt sovelletaan elinkaaren vaiheita A1-A3 eli tuotevaihetta. Jätepohjaisen sideaineen tapauksessa raaka-aineen hankinta eli vaihe A1 ei tuota päästöjä, koska muodostuvat kasvihuonekaasut kuuluvat valmistettavalle tuotteelle. Uusiosideaineille päästöarvot muodostuvat vaiheista A2, A3, A4 ja A5. Rakentamisen vaiheeseen kuuluvat materiaalin kuljetus työmaalle (A4) ja työmaatoiminnot (tässä tapauksessa pilaristabilointi) (A5). Kuljetusmatkan päästöt riippuvat kuljetusmatkan pituudesta sekä kuljetusajoneuvon kantokyvystä. Vaiheen A2 ja A3 päästöjä voi tulla jätepohjaisen sideaineen käsittelystä uusiokäyttöä varten. Tämä prosessi nostaa intensiivisyytensä mukaan materiaalin hiilijalanjälkeä. (UUMA3 2020, 10-13, 17-19).



**Kuva 6.1: Rakennuksen tai rakenteen elinkaaren vaiheet (Ympäristöministeriö 2019, 14). Tässä työssä huomioidaan vaiheet A2-A5 päästölaskennassa.**

## 6.1 Sideaineiden valmistuksen päästöjen määrittäminen

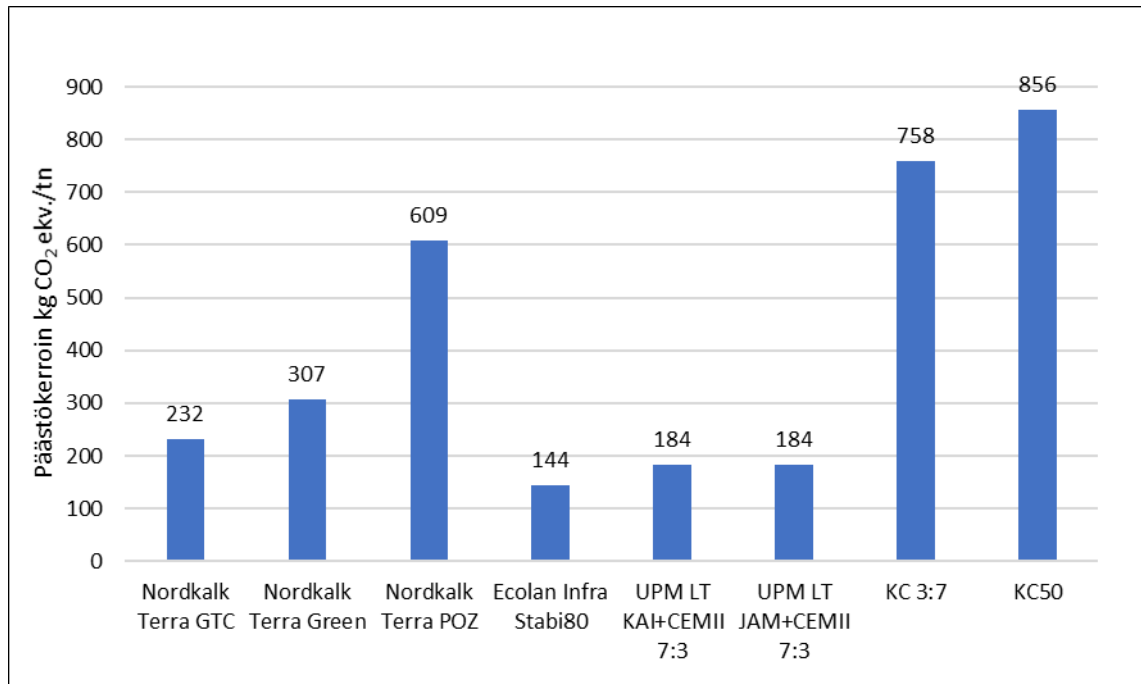
### Sideaineiden valmistuksen päästöt

Taulukkoon 6.1 ja kuvaan 6.2 on koottu sideaineiden valmistuksen päästökertoimet. Päästöarvot ilmoitetaan yksikkönä kilo hiilioksidiekvivalentti per tonni sideainetta (kg CO<sub>2</sub>-ekv./tn).

UPM:n sideaineseosten valmistuksen päästökertoimet on laskettu käyttäen Finnsementin Paraisen tehtaan Plussementin päästökerrointa. Ecolanin Intra Stabi80 -sideaineseoksen valmistuksen päästökertoimen laskemisessa on käytetty Schwenkin Rapid-sementtiä Schwenkin ilmoittamalla päästökertoimella 700 kg CO<sub>2</sub>-ekv /tn. Myöhemmin laskelman jälkeen päästökerroin tarkentui Schwenkin EPD-dokumentissa (Environmental Product Declaration) päästökertoimella 681 kg CO<sub>2</sub> ekv./tn (Schwenk 2019, 9). Ecolanin päästölaskelma Intra Stabi80 -sideaineseokselle löytyy liitteestä 14. Nordkalkin sideaineiden päästökertoimet ovat Nordkalkin ilmoittamia päästökertoimia sisältäen sideaineiden valmistuksen ja kuljetuksen työmaalle.

**Taulukko 6.1: Sideaineiden valmistuksen päästökertoimet.**

Materiaali	Päästökerroin kg CO <sub>2</sub> -ekv / tn	Päästökertoimen lähde
Plussementti (Finnsementti)	612	Finnsementin ympäristöseloste 2019. UPM:n sideaineseokset on laskettu tämän sementin päästökertoimen mukaan.
Rapid-sementti (Schwenk)	700	Ecolanin ilmoittama Intra Stabi80:n päästökerroin laskettu tämän sementin päästökertoimen mukaan.
Poltettu kalkki	1100	Nordkalk ympäristöraportti 2019.
Kalkkiuunin sähkösuodin pöly	0	Tuotantoprosessissa muodostuville jätepohjaisille uusiomateriaaleille ei muodostu niille jyvitetäviä päästöjä.
LT KAI	0	
LT JAM	0	
LT KAI + CEMII 7:3	184	0,3*611,7
LT JAM + CEMII 7:3	184	0,3*611,7
Terra GTC	235	Nordkalkin ilmoittamat päästökertoimet 14.4.2020. Päästökertoimet sisältävät sideaineseosten valmistuksen ja kuljetuksen työmaalle.
Terra Green	310	
Terra POZ	612	
Intra Stabi80	151	Ecolanin ilmoittama päästökerroin, joka sisältää sideaineseoksen valmistuksen sekä tuhkaseoksen käsittelyn uusiokäyttöä varten.



**Kuva 6.2: Sideaineiden valmistuksen päästöarvot. Nordkalkin ja Ecolanin ilmoittamista päästökertoimista on vähennetty kuljetus työmaalle (laskettu luvussa 6.2). Kuvassa on esitetty myös vertailuksi kalkkisementti-sideaineseos (Finnsementin Plussementin ja Nordkalkin poltetun kalkin päästökertoimilla) seossuhteilla 30 / 70 % sekä 50 / 50 %.**

## 6.2 Sideaineiden kuljetuksen päästöjen määrittäminen

### Kuljetuspäästöt

Päästöt sideaineiden kuljetuksesta tehtaalta työmaalle esitetään sideainetonnia kohden. Päästölaskelmien yksikkönä käytetään hiilidioksidiekvivalenttia (kg CO<sub>2</sub>-ekv. / tn-sideaine). Tähän päästölaskelmaan ei sisällytetä mitään työmaalla tapahtuvan toiminnan päästöjä, jotka lasketaan erikseen. Päästölaskelmissa käytetyt laskentaperiaatteet, tehdyt oletukset ja laskelmissa käytetyt kertoimet ja arvot on esitetty taulukossa 6.2 ja sen alla sekä taulukossa 6.3. Laskelmat on esitetty taulukon 6.3 alla. Sideaineiden lasketut kuljetuspäästöt on esitetty taulukossa 6.3 ja kuvassa 6.3. Taulukossa 6.3 esitettyjen päästökertoimien laskelmat löytyvät liitteestä 16.

Päästölaskelmissa on oletettu, että kuljetusmatkasta 80% on maantieajoa ja 20 % katuajoa. Kuljetusten päästöt on laskettu käyttäen VTT:n LIPASTO-tietokannan päästökertoimia liikennevälineiden yksikköpäästöistä. Päästöarvot on esitetty täydelle ja tyhjälle kuormalle (kuormausaste).

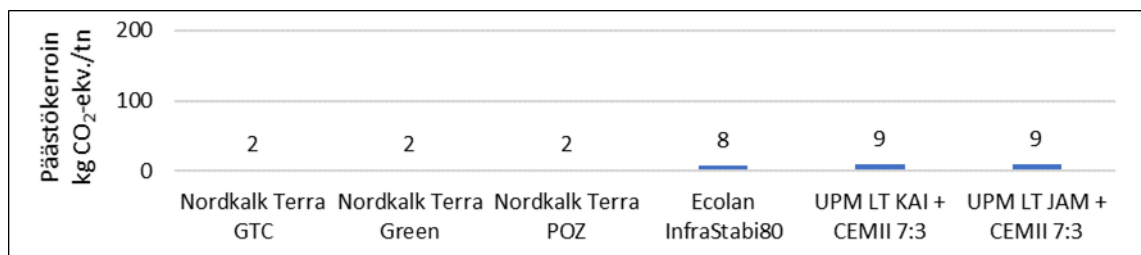
- Oletetaan, että matkasta 80 % maantieajoa ja 20 % katuajoa.
- Oletetaan, että menomatalla on täysikuorma ja paluumatkalla tyhjäkuorma.
- Oletetaan, että ajoneuvo palaa tyhjänä tehtaalle.

**Taulukko 6.2: Sideaineiden kuljetuspäästökertoimet VTT:n LIPASTO-tietokannasta.**

	Päästökerroin kg CO <sub>2</sub> -ekv. /tn/ km	
	Täysi kuorma	Tyhjä kuorma
Kuormausaste		
Maantieajo	0,022	0,014
Katuajo	0,04	0,022

**Taulukko 6.3: Sideaineiden kuljetuspäästöt Kuninkaantammen koestabilointialueelle. Plussementti sekoitettiin työmaalla UPM:n lehtotuhkan sekaan.**

	Tehdas	Yhden suuntainen matka	Menomatka	Paluumatka	Yhteensä
		[km]	[kg CO <sub>2</sub> - ekv. /tn]	[kg CO <sub>2</sub> - ekv. /tn]	[kg CO <sub>2</sub> - ekv. /tn]
<b>UPM LT KAI</b>	Kaipolan tehdas, Jämsä	220	5,63	3,43	9,06
<b>UPM LT JAM</b>	Jämsänkosken tehdas, Jämsä	220	5,63	3,43	9,06
<b>Nordkalk Terra GTC</b>	Tytyrin tehdas, Lohja	60	1,54	0,94	2,47
<b>Nordkalk Terra Green</b>	Tytyrin tehdas, Lohja	60	1,54	0,94	2,47
<b>Nordkalk Terra POZ</b>	Tytyrin tehdas, Lohja	60	1,54	0,94	2,47
<b>Ecolan Infra Stabi80</b>	Nokian tehdas, Nokia	183	4,68	2,85	7,54
<b>Plussementti</b>	Paraisen tehdas, Parainen	200	5,12	3,12	8,24
<b>UPM LT KAI + CEMII 7:3</b>	Sekoitus työmaalla	0,7×9,06+0,3×8,24			8,81
<b>UPM LT JAM + CEMII 7:3</b>	Sekoitus työmaalla	0,7×9,06+0,3×8,24			8,81



**Kuva 6.3: Sideaineiden kuljetuksen päästöarvot sideainetonnia kohti.**

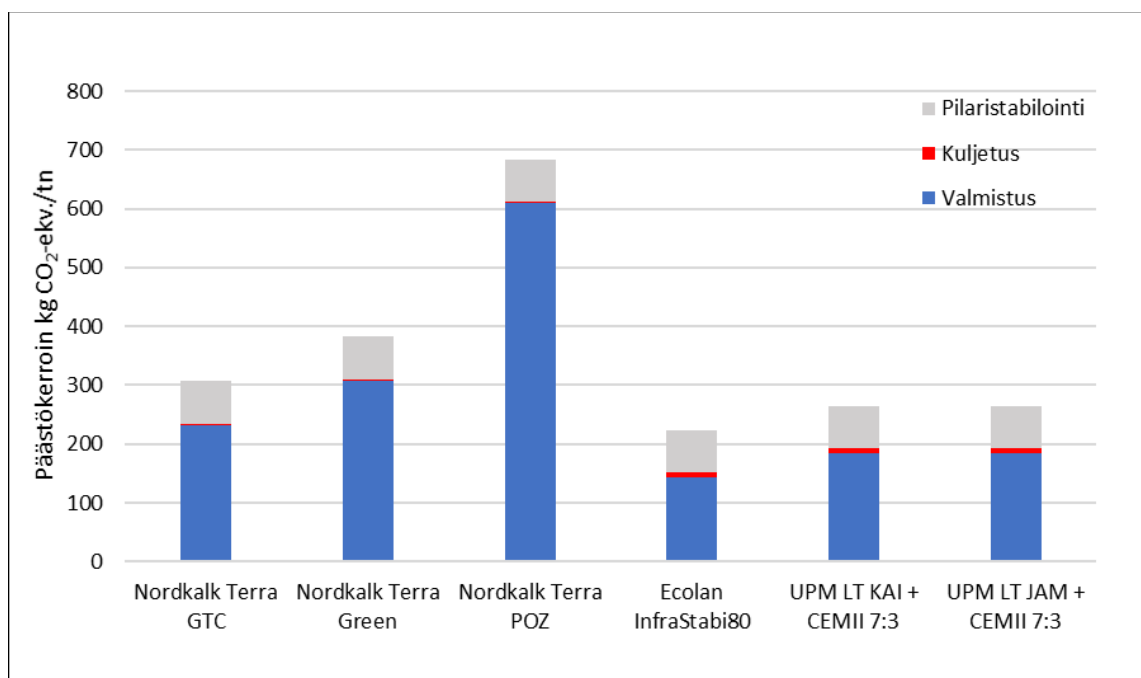
### 6.3 Pilaristabiloinnin päästöjen määrittäminen

Koestabiloinnissa meni noin 50 h jakautuen tasaisesti sideaineiden määrien mukaan. Ennen koestabilointia ja sen aikana täytemaasta piti kaivaa isot kivet ja roskat pois, tämä kesti noin 70 h. Nordkalkin ja Ecolanin sideaineet tuotiin työmaalle valmiina stabiloitavaksi mutta UPM:n lentotuhkat (LT KAI ja LT JAM) sekoitettiin Plussementtiin työmaalla sekoitussuhteella 7:3. Sideaineseokset sekoitettiin siirtämällä seokset säiliöstä toiseen kolme kertaa ja juuri ennen stabilointia kerran. UPM:n sideaineseosten sekoittamisessa meni yksi työvuoro. Kaivinkoneena toimi Volvo ECR235EL ja sen keskikulutus on noin 10 l/h. Stabilointikoneena toimi Cat 328+kompressori, joiden keskikulutus on noin 20-30 l/h. Päästöt laskettiin 30l/h kulutuksen mukaan.

Laskelmissa on käytetty VTT:n LIPASTO-tietokannan päästökertoimia diesel käyttöille työkoneille 2,672 kg CO<sub>2</sub>-ekv./l. Pilaristabiloinnin lasketut päästökertoimet on esitetty taulukossa 6.4. Yhteenveto sideaineseosten päästökertoimista sisältäen sideaineen valmistus, kuljetus työmaalle sekä pilaristabilointi on esitetty kuvassa 6.4.

**Taulukko 6.4: Pilaristabiloinnin päästöt (kg CO<sub>2</sub>-ekv./sideaine-tn).**

Koestabiloinnissa toteutuneet määrät:	
Pituus yht. [m]	1874
Kok. sideainemäärä yht. [kg]	81264
Pilarimäärä yht. [kpl]	321
Stabiloinnin päästöt:	
Kok. stabilointityö [h]	50
Stabilointikoneen kulutus [l/h]	30
<b>Stabilointikoneen kulutus yhteensä [l]</b>	<b>1500</b>
Kaivinkoneen käyttöaika yhteensä [h]	70
Kaivinkoneen kulutus [l/h]	10
<b>Kaivinkoneen kulutus yhteensä [l]</b>	<b>700</b>
<b>Päästöt yhteensä [kg CO<sub>2</sub>-ekv.]</b>	<b>5878</b>
<b>Päästöt yhteensä [kg CO<sub>2</sub>-ekv./m]</b>	<b>3</b>
<b>Päästöt yhteensä [kg CO<sub>2</sub>-ekv./sideaine-tn]</b>	<b>72</b>

**Kuva 6.4: Sideaineseosten päästökertoimet (sisältäen sideaineen valmistus, kuljetus työmaalle sekä pilaristabilointityö).**

#### 6.4 Päästöjen arviointi saavutettua lujuutta kohden (g CO<sub>2</sub>-ekv. /m/kPa)

Uusiosideaineiden käyttöä halutaan vaikuttaa mm. hankintamenettelyillä. Hankinnan kriteereiksi tarvitaan asiaa käsitteleviä tunnuslukuja perinteisen päästöt/sideainetonnin lisäksi. Tämän työn aikaansaatu tutkimustieto käytetään lähtötietona hankintamenettelyjen kehittämiseksi. Näin ollen tässä työssä kokeillaan saadaanko mm. tällä tavalla mielekkäitä arvoja, joita voisi mahdollisesti hyödyntää tulevaisuudessa hankinnan kriteerinä. Kuvassa 6.5 on esitetty päästökertoimet saavutetuille leikkauslujuuksille laadunvalvontakäytäntöjen keskiarvoleikkauslujuuksista ja tavoiteleikkauslujuudelle yksikkönä ”g CO<sub>2</sub>-

ekv./m/kPa”. Esitettyjen arvojen määrittämisessä on käytetty luvun 6 sideaineseosten päästökertoimia sekä laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksia.

Loput kuvaajat löytyvät liitteestä 11. Kuvassa 6.5 esitetty punainen käyrä on päästökerroin saavutetulle lujuudelle, kun taas musta pystysuuntainen viiva kuvaa päästökerrointa tavoiteleikkauslujuudelle 100 kPa. Taulukkoon 6.5 on koottu sideaineiden päästökertoimet saavutetuille lujuuksille min- ja max-arvot.

3 kk ikäisille pilareille on esitetty suunnitelmissa tavoiteleikkauslujuudeksi 100 kPa. Tavoiteleikkauslujuudelle on laskettu päästöt lujuutta kohti eri sideainereseptille. Esimerkiksi sideaineella Terra GTC sideainemäärällä  $80 \text{ kg/m}^3$  päästöt tavoiteleikkauslujuutta 100 kPa kohden on laskettu näin:

---

Päästökerroin:  $235 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /sideaine-t} = 0,235 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./sideaine-kg}$

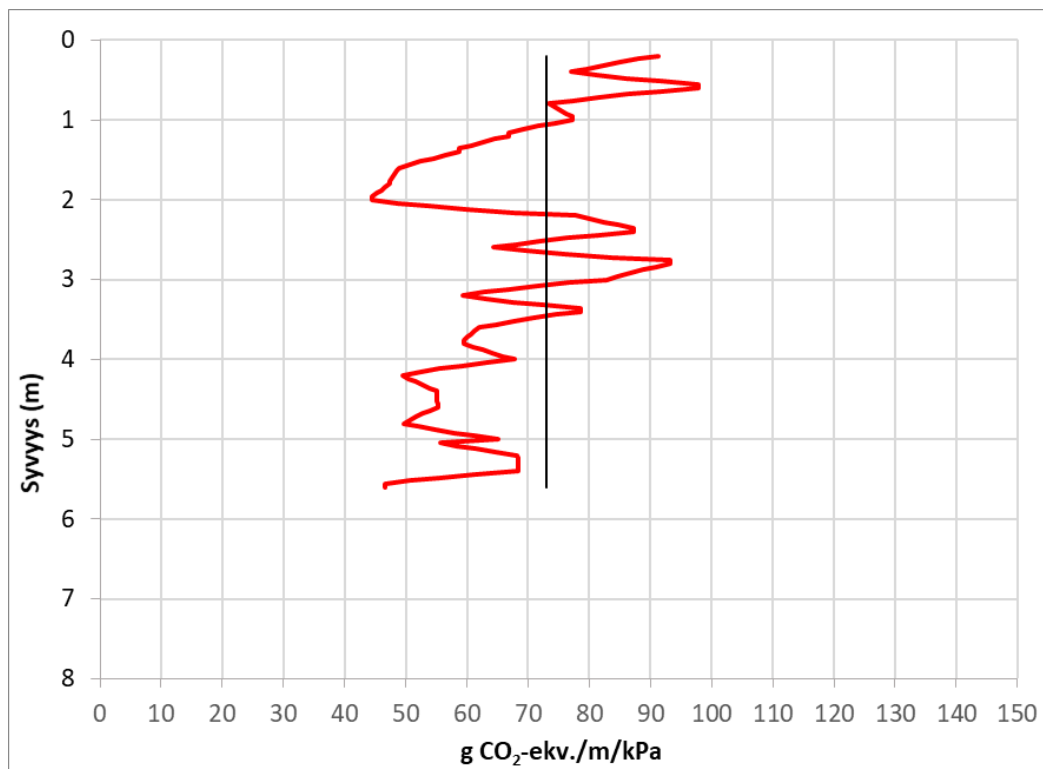
---

Sideainemäärä:  $80 \text{ kg/m}^3 = 30,8 \text{ kg/m-pilari}$  (pilarille, jonka halkaisija on 700 mm)

---

Laskelma:  $0,235 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./-sideaine-kg} \times 30,8 \text{ kg/m} / 100 \text{ kPa} = 0,072 \text{ kg CO}_2\text{-ekv./m/kPa} = 72 \text{ g CO}_2\text{-ekv./m/kPa}$

---



**Kuva 6.5:** Esimerkkikuva  $\text{CO}_2\text{-ekv. -päästöt saavutettua (punainen viiva) ja tavoiteleikkauslujuutta (musta viiva) kohden. Kuvassa alue A2, Terra GTC,  $80 \text{ kg/m}^3$ , 3 kk tuloksille.$



Selitteet taulukon 6.5 sarakkeille vasemmalta oikealle:

1. Sideaineseoksen päästökerroin (sisältäen valmistuksen ja kuljetuksen työmaalle) yksikkönä kg CO<sub>2</sub>-ekv./sideaine-t
2. Sideaineseoksen päästökerroin eri yksikössä 0,001 kg CO<sub>2</sub>-ekv. / sideaine-kg
3. Suunniteltu sideainemäärä kg/m<sup>3</sup>
4. Suunniteltu sideainemäärä eri yksikössä, kg/m-pilari
5. Päästö per pilarimetri
6. Saavutettu leikkauslujuus min-arvot laadunvalvontakairausten keskiarvotuloksista kPa
7. Saavutettu leikkauslujuus max-arvot laadunvalvontakairausten keskiarvotuloksista kPa
8. Päästöt per pilarimetri per leikkauslujuus (min) g CO<sub>2</sub>-ekv. / m-pilari / kPa
9. Päästöt per pilarimetri per leikkauslujuus (max) g CO<sub>2</sub>-ekv. / m-pilari / kPa
10. Päästöt per pilarimetri per tavoiteleikkauslujuus (100 kPa) g CO<sub>2</sub>-ekv. / m-pilari / kPa

**Taulukko 6.5: Päästöt saavutettua lujuutta kohden g CO<sub>2</sub>-ekv. /m/kPa**

	1	2	3	4	5	6 7		8 9		10
	kg CO <sub>2</sub> - ekv. /tn	kg CO <sub>2</sub> - ekv. /kg	kg/m <sup>3</sup>	kg/m- pilari	kg CO <sub>2</sub> - ekv. /m-pi- lari	saavutettu leik.lujuus		CO <sub>2</sub> -päästö / lujuus		
						Min [kPa]	Max [kPa]	Min [g CO <sub>2</sub> -ekv. /m/kPa]	Max	
Terra GTC	235	0,235	80	30,8	7	100	300	72	24	72
	235	0,235	120	46,2	11	90	360	121	30	109
Terra Green	310	0,310	80	30,8	10	70	180	136	53	95
	310	0,310	120	46,2	14	90	230	159	62	143
Terra POZ	612	0,612	80	30,8	19	140	300	135	63	188
	612	0,612	120	46,2	28	200	400	141	71	283
LT KAI + CEMII 7:3	193	0,193	120	46,2	9	130	210	69	42	89
	193	0,193	160	61,6	12	300	450	40	26	119
LT JAM + CEMII 7:3	193	0,193	120	46,2	9	130	300	69	30	89
	193	0,193	160	61,6	12	220	300	54	40	119
Infra Stabi80	151	0,151	80	30,8	6	180	350	26	13	46
	151	0,151	120	46,2	9	100	200	70	35	70

## 7 Uusiomateriaalit syvästabiloinnin sideaineena – hankinta ja taloudellisuus

### 7.1 Syvästabiloinnin hankintavaihtoehdot

Perinteisesti Suomessa syvästabilointi hankitaan menettelyllä, jossa syvästabilointiurakoitsija toteuttaa stabiloinnin tilaajan laatiman suunnitelman mukaisesti. Menettelyssä tilaaja laatii yksityiskohtaisen stabilointisuunnitelman ja työselostuksen laatuvaatimukseen ja urakoitsija tarjoaa ja toteuttaa stabiloinnin suunnitelmassa esitetyn sideainereseptin (laatu ja määrä) ja sekoitustyön vaatimusten mukaisesti. Menettelyssä tilaaja määrittelee sideainereseptin ja vastaa siitä, että sideaineresepti toimii kohteessa, kun sekoitustyö on tehty suunnitelman mukaisesti. Urakoitsija vastaa siitä, että toteuttaa stabilointityön suunnitelman mukaisesti ja osoittaa näin tapahtuneen mm. stabilointipöytäkirjoilla, tarkepiirustuksilla ja valvontakirjojen tuloksilla. (Liikennevirasto 2018)

Yleensä käytetään edellä kuvattua perinteistä hankintamenettelyä (ve 1), ja esim. Liikenneviraston julkaisema Syvästabiloinnin suunnitteluohje (Liikennevirasto 2018) on laadittu ko. menettelyä ajatellen. Muita menettelyjä ovat mm.:

- Syvästabilointi toteutetaan tilaajan suunnitelman mukaisesti, mutta urakoitsija valitsee sideainereseptin (laatu + määrä) ja sekoitustyön parametrit. Urakoitsija vastaa sideaineen toimivuudesta ja sekoitustyön onnistumisesta valitsemillaan sekoitustyön parametreilla sekä osoittaa laadunvalvontakirjoilla lujittuneen syvästabiloinnin täyttävien vaatimukset (ve 2).
- Tilaaja esittää vain tekniset vaatimukset, jotka pohjarakenteen tai pohjanvahvistuksen on täytettävä ja urakoitsija vastaa rakenteen suunnittelusta ja esim. pilaristabiloinnin tapauksessa määrittää pilarihalkaisijan, k/k-välin, tavoitetasot, sideainereseptin, yms. Urakoitsija osoittaa mm. mitoituslaskelmilla, laadunvalvontakirjoilla, painumamittauksilla, siirtymämittauksilla, tms., että valmis rakenne täyttää tilaajan asettamat vaatimukset (mm. varmuus liukupintasortumaa vastaan, painuma, yms., ve 3).

Edellä kuvattuja kuvauksia (ve 1-ve 3) Syvästabilointiohjeeseen kirjoitettaessa syvästabiloinnin sideaineiden kasvihuonekaasujen päästöjä ei ajateltu hankinnan kriteerinä. Julkiset tilaajat ovat tuon ohjeen laatimisen aikana tai julkaisun jälkeen sitoutuneet kasvihuonepäästöjen merkittävään vähentämiseen, joten myös syvästabiloinnissa käytettävien sideaineiden CO<sub>2</sub>-päästöt ovat nousseet mielenkiinnon kohteeksi. Julkisten tilaajien kestävän kehityksen strategisia tavoitteita esitetään esimerkiksi kaupunkien ilmasto-ohjelmissa tai resurssiviisauden tiekartoissa, joista esimerkkeinä voidaan mainita: Espoon ilmasto-ohjelma 2016-2020, Hiilineutraali Helsinki 2035 -toimenpideohjelma, Hiilineutraali Vantaa 2030, Kestävä Tampere 2030 -tiekartta, Hiilineutraali Turku vuoteen 2029 mennessä, kaupungin ilmastosuunnitelma, Hiilineutraali Hämeenlinna 2035, Resurssiviisas Riihimäki 2030, Kehto-foorumi (Kuntaliitto ja 21 kaupunkia, 2012-...) (Forsman et al. 2020).

CO<sub>2</sub>-päästöjen huomioimista edellä kuvatuissa hankintavaihtoehdoissa on esitelty joissakin alustuksissa ja käytetty joissakin kohteissa, mutta asiaan ei ole vielä alalle yleisesti vakiintunutta menettelyä. On kuitenkin odotettavissa, että hankintamenettelyjä ja -kriteerejä kehitetään tähän aktiivisesti lähiaikoina. Kaikkiin edellä kuvattuihin hankinnan vaihtoehtoihin on mahdollista käyttää sideaineiden valmistuksen CO<sub>2</sub>-päästöjen vähentäviä tai kierrätysmateriaalien osuuden edistämiseen kannustavia kriteerejä. (Forsman & Korhonen-Tanttu 2020.)

## **7.2 Hankinnan päästökriteerit koestabilointiin perustuen**

Kuninkaantammen koestabiloinnissa tarkasteltiin sideaineiden valmistuksen ja kuljetuksen sekä itse pilarointityön CO<sub>2</sub>-ekv.-päästöjä. Tarkastelujen perusteella sideaineen työmaalle kuljetuksen ja pilarointityön päästöt ovat vähäiset verrattuna sideaineen valmistuksen päästöihin. Työmaalle kuljetuksen päästöiksi arvioitiin n. 2,5-9,1 kg CO<sub>2</sub>-ekv./ t-sideaine ja pilarointityön n. 72 kg CO<sub>2</sub>-ekv. / t-sideaine. Tuotantostabiloinnissa päästöt pilarimetriä kohden ovat todennäköisesti pienemmät.

Sideaineen valmistuksesta aiheutuu selvästi suurimmat CO<sub>2</sub>-ekv.-päästöt. Kuninkaantammessa käytettyjen sideaineseosten päästöt vaihtelivat välillä n. 144-307 kg CO<sub>2</sub>-ekv. / t-sideaine lukuun ottamatta sideainetta Terra POZ, jolla päästöt olivat n. 609 kg CO<sub>2</sub>-ekv. / t-sideaine. Suomessa valmistetulla kalkkisementti sideaineseoksella päästöt ovat 758-856 kg CO<sub>2</sub>-ekv. / t-sideaine seossuhteesta (1:1-1:4) riippuen. Infra Stabi80:n päästökerroin (144 kg CO<sub>2</sub>-ekv./tn) on noin 17 % KC50:n päästökertoimesta. Nähdäänkin selvästi, että uusiomateriaalien hyödyntämisellä sideaineseoksessa, voidaan vaikuttaa kg CO<sub>2</sub>-ekv. / t-sideaine -päästöjen suuruuteen.

Työssä tarkasteltiin myös saavutettuun pilareiden leikkauslujuuden saavuttamiseksi muodostuvaa päästöä, jonka arvot vaihtelivat välillä 18-160 g CO<sub>2</sub>-ekv. / m / kPa. Tämä saavutettuun lujuuteen suhteutettu CO<sub>2</sub>-päästö määrä olisi siinä mielessä mielenkiintoinen, että se sisältäisi myös tarvittavan sideainemäärän halutun lujuuden saavuttamiseksi. Kokemusperäisesti on tiedossa, että useissa tapauksissa eri sideaineilla tietyn lujuuden saavuttamiseksi tarvittava sideainemäärä voi vaihdella.

## **7.3 Uusiosideaineiden jatkotutkimustarpeet**

Toteutetun koestabiloinnin tarkasteluissa on havaittu mm. seuraavia jatkotutkimustarpeita:

### Mitoitus:

- Väyläviraston ohjeistuksessa kenttä-/laboratoriolujuuskertoimelle ei ole esitetty arvoja uusiomateriaalipohjaisille sideaineille.
- Väyläviraston ohjeistuksessa ei ole esitetty aikalujittumiskertoimia uusiosideaineille.
- Edellä esitetyt puutteet tulisi korjata toteutettuihin ja käynnissä oleviin koe- ja tuotantostabilointeihin ja stabiloitavuuskokeisiin perustuen.

### Hankintamenettelyt:

- Sideaineiden CO<sub>2</sub>-päästöt ja/tai kierrätysmateriaalien osuus voisivat olla syvästabiloinnin hankinnan kriteerejä.
- Kriteerit voivat olla yksinkertaisesti hankinnan kohteen vähimmäisvaatimuksia tai kriteerit voivat olla vertailuperusteita.
- Silloin, kun mitoituslujuuden saavuttamiseksi tarvittava sideainemäärä poikkeaa toisistaan eri sideaineilla, tulisi myös sideainemäärä huomioida kriteereissä.

Ympäristökelpoisuus:

- Jotta sideaineseokset olisivat vapaasti hyödynnettävissä, tulee materiaalit tuotteistaa (EoW) tai muu menettely, jolloin eri tuotteet olisivat hyödyntämisen kannalta ”samalla viivalla”.
- Syvästabiloitu kaivumaa (esim. putkilinjojen kohdalta) kaivettu, on usein teknisesti käyttökelpoinen materiaali, mutta saattaa olla myös ongelmallinen materiaali, koska sen hyödyntäminen maarakentamisessa saattaa vaatia ympäristöluvittamisen ja sen sijoittaminen kaikille maankaatopaikoille ei ole mahdollista.
- Syvästabiloitujen kaivumaiden, niin perinteisillä kuin uusiomateriaalipohjaisilla sideaineilla, hyödyntäminen maarakentamisessa tulisi mahdollistaa ja yksinkertaistaa nykyistä selkeämmin.

#### **7.4 Uusiomateriaalien arvonlisäys teollisuudelle**

Tilastokeskuksen (2020) määritelmän mukaan ”arvonlisäys (brutto) tarkoittaa tuotantoon osallistuvan yksikön synnyttämää arvoa. Se lasketaan markkinatuotannossa vähentämällä yksikön tuotoksesta tuotannossa käytetyt välituotteet (tavarat ja palvelut) ja markkinattomassa tuotannossa laskemalla yhteen palkansaajakorvaukset, kiinteän pääoman kuluminen ja mahdolliset tuotannon ja tuonnin verot.”

Kun tarkastellaan maarakennuksen rakennusosien kustannuksia (materiaali ja asentaminen, havaitaan taulukosta 7.1, että rakennusosien yksikkökustannukset ovat tyypillisesti suuruusluokkaa 1-20 €/m<sup>3</sup>rtr ja päällysrakenteessa 10-20 €/m<sup>3</sup>rtr kantavan kerroksen alapuolella. Syvästabiloinnissa käytettävien sideaineiden hinta kohteeseen toimitettuna on arvioitu olevan suuruusluokkaa 60-120 €/tn. Mikäli sideaineseoksen tilavuuspaino olisi n. 1,5 t/m<sup>3</sup>, olisi sideaineseoksen hinta toimitettuna n. 90-180 €/m<sup>3</sup>. Tämän perusteella voidaan arvioida, että sideainekäyttöön soveltuvan uusiomateriaalin arvonlisäys on syvästabiloinnin sideaineen raaka-aineena mahdollisten jalostustoimenpiteidenkin jälkeen merkittävästi suurempi kuin hyödynnettäessä uusiomateriaali massiivirakenteena (esim. pengertäyttö).

**Taulukko 7.1: Joidenkin rakennusosien tyypillisiä kerrospaksuuksia, käyttöikävaatimuksia ja yksikkökustannuksia (materiaali + asentaminen). Taulukossa sarakkeen ”Kerrospaksuus” tiedot on arvioitu ohjeiden perusteella sekä kokemusperäisesti, sarakkeen ”Käyttöikä” tiedot ovat InfraRYL 2006:sta ja sarakkeen ”Yksikkökustannus” tiedot ovat FOREsta (01/2016). Kerrospaksuudet ja yksikkökustannukset voivat poiketa tässä esitetystä hankekohtaisesti merkittävästikin. (Koivisto et al. 2016)**

Rakennusosa	Kerrospaksuus	Käyttöikä	Yksikkökustannus
Pilaristabilointi*	3 – 18 m	50 – 100 v	7 - 18 €/m-pilari
Massastabilointi, in situ**	2- 6 m	50 – 100 v	16 - 26 €/m <sup>3</sup> rtr
Maatiivisterakenne	0,5 - 1 m	-	-
Kuivatuskerros (mineraalinen)	0,5 - 0,6 m	-	-
Maapenger, tie tai katu	0,5 - 2 m	-	7 - 12 €/m <sup>3</sup> rtr
Maapenger, meluvalli	4 - 7 m	-	1 - 9 €/m <sup>3</sup> rtr
Maapenger, tulvapenger	1 - 5 m	-	-
Maapenger, maisemointi	1 - 5 m	-	-
Kevennetty pengerr ***	0,5 - 1,5 m	50 v	9 - 87 €/m <sup>3</sup> rtr
Vastapenger	1 - 2 m	-	11 - 17 €/m <sup>3</sup> rtr
Putkikaivannon lopputäyttö	0,5 - 2 m	-	4 - 8 €/m <sup>3</sup> rtr # 11 €/m <sup>3</sup> rtr
Massanvaihto kaivamalla, täyttö ****	2 - 5 m	50-100 v	4 - 6 €/m <sup>3</sup> rtr
Suodatinkerros	0,2 - 0,4 m	###	7 - 10 €/m <sup>3</sup> rtr
Jakava kerros	0,2 - 0,5 m	###	11 - 20 €/m <sup>3</sup> rtr
Kantava kerros	0,15 - 0,2 m	###	15 - 23 €/m <sup>3</sup> rtr
Stabiloitu kantava kerros ##	0,15 - 0,2 m	30 v	4 - 8 €/m <sup>3</sup> rtr
Pengertäyttö	0,5- 2 m	-	-

\* sideainemäärä norm. 80-130 kg/m<sup>3</sup>-maa; kerrospaksuus = pilaripituus;  $\phi$  0,5-0,8 m; k/k 1-1,3 m; pilarimäärä <2000 – 30 000 jm

\*\* kohdekoko välillä alle 1000 - yli 20 000 m<sup>3</sup>

\*\*\* kevennysmateriaali vaihtelee kokonaisista renkaista (pieni yksikköhinta) EPS-solumuovikevennysiin (suuri yksikköhinta)

\*\*\*\* ei sisällä kaivumaiden poisajoa ja vastaanottomaksuja maankaatopaikalle

# lopputäyttö kaivumassoilla

## pelkkä stabiloinnin kustannus, ei sisällä stabiloitavan kerrosmateriaalin kustannuksia

### määritetään hankkeittain, päällysrakenteen vaatimus 30 v.

## 8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän diplomityön tavoite oli esitellä ja raportoida Kuninkaantammen koestabilointi ja siihen liittyvät tutkimukset sekä tutkimustulokset. Työn tavoitteena oli edistää uusiomateriaalien käyttömahdollisuuksia pilaristabiloinnissa siten, että työssä aikaansaatu tutkimusaineisto voidaan hyödyntää mm. sideaineseosten tuotteistamisessa, ympäristökelpoisuuden osoittamisessa sekä syvästabiloinnin hankinnan ja hankintakriteerien kehittämisessä. Työssä syntyneet havainnot luvuittain ovat:

### Kuninkaantammen koestabilointi

- Kaikkien koestabiloinnissa käytettyjen sideaineseosten juoksevuus oli riittävä ja logistiikka toimi hyvin ko. mittakaavassa.
- Sideaineiden sekoittaminen työmaalla säiliöstä toiseen ei ollut mielekästä urakoitsijan mielestä. Se lisäsi työtä, vei paljon aikaa ja sekoittamisen riittävyys tasalaatuisen lopputuloksen saavuttamiseksi sisälsi epävarmuutta (työmaalla sekoitus toteutettiin kahdella sideaineseoksella).
- Tuotantostabilointia ajatellen sideaineen komponenttien sekoitus tulisi toteuttaa ”tehdasolosuhteissa” siihen tarkoitetuilla laitteilla ja sideaine toimittaa työmaalle valmiina sekoituksena.
- Tuhka on kevyempää kuin muut sideaineet, karkeasti 60-70 % ”perinteisten” sideaineiden painosta. Tämä tulee huomioida tuhkasideaineen logistiikassa (kuljetus, välivarastointi, yms.).

### Kuninkaantammen laadunvalvonta

- Maan paikallinen työn aikana ilmennyt heterogeenisuus saattoi vaikuttaa joidenkin laadunvalvontakairauksilla määritettyjen lujuuksien hajontaan tai epäloogisiin tuloksiin.
- Pilareiden poikkileikkauksen tutkiminen vaati pilarien ylösnostoa. Kaivinkoneella toteutetussa ylösnostossa pilarien saaminen ehjänä ylös oli haastavaa.
- Sideaineen jakaantumista pilarin poikkisuunnassa mitattiin XRF:llä (kalsiumin pitoisuus) sekä pH-mittauksilla pilarinäytteistä.
- pH-arvot eivät eronneet juurikaan pilarin poikkisuunnassa, mutta kalsiumin pitoisuudet erot erottuivat enemmän. Kalsiumin pitoisuus vaikuttaisi olevan parempi indikaattori sideaineen jakautumisen määrittämiselle kuin pH.
- Tehtyjen tutkimusten perusteella sideainetta näytti olevan enemmän pilarin reunoilla ja vähemmän pilarin keskiosilla.

### Stabiloinnin lujittuminen Kuninkaantammessa

- Tavoiteleikkauslujuus 3 kk ikäisille pilareille saavutettiin kaikilla koestabiloinnissa mukana olevilla sideaineseoksilla. Joitakin paikallisia vähäisiä alituksia esiintyi.
- Useilla sideaineseoksilla saavutettiin selvästi tavoiteltua suurempia ljujuuksia, joten stabiloitavuuskokeiden perusteella arvioitua sideainemäärää olisi ollut mahdollista optimoida.
- Työssä määritettiin uusiosideaineille aikalujittumiskertoimia sekä kenttä-/laboratoriokertoimia, joita tarvitaan stabiloinnin mitoituksessa.
- Väyläviraston ohjeissa ei ole erikseen uusiosideaineille aikalujittumiskertoimia eikä kenttä-/laboratoriokertoimia. Työssä määritetyt kertoimet toimivat hyvänä lähtötietona, kun ohjetta tulevaisuudessa päivitetään (luonnollisesti tarvitaan tietoja myös muista kohteista).

#### Syvästabiloinnin kasvihuonekaasupäästöt

- Työssä laskettiin sideaineseoksille päästökertoimet sisältäen valmistuksen, kuljetuksen työmaalle sekä stabilointityön. Sideaineen valmistuksen päästöt muodostavat selvästi merkittävimmän osan kokonaispäästöistä. Kuljetuksen osuus päästöistä oli pieni.
- Uusiomateriaalipohjaisten sideaineseosten päästökertoimet ovat merkittävästi pienemmät kuin perinteisesti käytetyllä kalkkisementti-sideaineseoksella. Käytetyillä uusiosideaineilla valmistuksen päästöt ovat merkittävästi pienempiä kuin perinteisesti käytetyllä suomalaisella kalkkisementillä (144-307 kg CO<sub>2</sub>-ekv./tn ⇔ 758-856 kg CO<sub>2</sub>-ekv. / tn, seossuhde 1:1-1:4).
- Työssä määritetyt päästöt pilarimetriä kohden tavoiteleikkauslujuudelle 100 kPa olivat eri sideaineille 46-283 g CO<sub>2</sub>-ekv. / m / kPa (huomioiden valmistuksen ja kuljetuksen päästöt).

#### Uusiomateriaalit syvästabiloinnin sideaineena – hankinta ja taloudellisuus

- Hiilidioksidipäästöjen vähentämistavoitteiden saavuttamiseksi tulisi edistää uusiomateriaalipohjaisten sideaineiden käyttöä. Tätä varten tarvitaan mm. hankintamettelyjen kehittämistä nykyisestä mallista, jossa ei huomioida sideaineiden päästöjä.
- Uusiomateriaalien käyttö pilaristabiloinnissa mahdollisten valmistuksessa tarvittavien jalostustoimenpiteidenkin jälkeen tuottaa suuremman arvonlisäyksen kuin hyödynnettäessä uusiomateriaalia massiivirakenteena (esim. pengertäyttö).

Tehty Kuninkaantammen koestabiloinnin perustuva tutkimus osoittaa, että uusiosideaineiden käyttäminen syvästabiloinnissa on mahdollista ja tarkoituksenmukaista stabiloinnissa saavutetun leikkauslujuuden ja lujuuden tasalaatuisuuden kannalta.

## Lähdeluettelo

Aalto, A. 2002. Syvästabilointitutkimus – yhteenveto projektin III vaiheesta, 11.12.2002. TKK. 75 s.

Cooper, P. 2011. Raaka-aine-erien kertanäytteiden epäpuhtauksien ja koostumuksen analysointi XRF:llä standarditonta menetelmää käyttäen. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.8.2020]. Pro- gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos. Jyväskylä. 124 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:juu-2011100311486>

Dettenborn, T., Kohonen, R., Känkänen, R. & Niemelin, T. CO<sub>2</sub>-päästölaskennan kehittäminen Skanssin alueella ja Turun kaupungin infrarakentamisessa. [Verkkodokumentti]. Raportti. Turun Kaupunki. Turku. 27 s. Saatavissa: [https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files//skanssin\\_alueen\\_co2-laskenta\\_loppuraportti.pdf](https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files//skanssin_alueen_co2-laskenta_loppuraportti.pdf)

Ecolan Oy. 2020. Nurmi Jenni. [Sähköpostiviesti 19.8.2020].

Ecolan Oy. 2020. Nurmi Jenni. [Sähköpostiviesti 21.12.2020]

Finnsementti Oy. 2020. Ympäristöraportti 2020. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 3.7.2020]. 30 s. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/palvelut/ymparisto/ymparistoraportit/>

Finnsementti Oy, 2020b. Environmental Data Sheet. Finnsementin vuoden 2019 ympäristöseloste, julkaistu 15.5.2020. [Verkkodokumentti], [Viitattu 14.12.2020]. 1 s. Saatavissa: [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019\\_Parainen-Plus.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019_Parainen-Plus.pdf)

Finnsementti Oy. 2012. Suomalainen sementti. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.8.2020]. Saatavissa: [http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS\\_Suomalainen\\_sementti\\_kirjainen\\_071112.pdf](http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS_Suomalainen_sementti_kirjainen_071112.pdf)

Forsman, J. & Korkiala-Tanttu, L. 2020. Hankintamenettelyjen kehittäminen. Kuninkaantammen koestabilointi – infotilaisuus 16.12.2020. PP-esitys. 17 s.

Forsman, J., Dettenborn, T., Suikkanen, T., Harju, I., Järkkä, H., Kivimäki, J., Teittinen, T., Koivulahti, M. & Lahtinen, P. 2020. Uusiomateriaalit kaupunkien infrarakentamisessa – käsikirja. UUMA3-hanke. 104 s. Saatavissa: <http://www.uusiomaarakentaminen.fi/uuma-k%C3%A4sikirjasto>

Hainari, S. 2015. Massastabiloinnin vaikutus maan indeksi- ja geoteknisiin ominaisuuksiin. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 121 s. [Viitattu 27.5.2020]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/10024/123452/1/Sideaineen+ja+tyotavan+vaikutus+pilaristabiloinnissa.pdf>

Hautalahti, P., Halkola, H. & Puumalainen, N. 2007. Kivikon teollisuusalueen stabiloinnin koerakentaminen. [Verkkodokumentti]. Tiedote. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto. Geotekninen osasto julkaisu 92. 105 s. [Viitattu 10.6.2020]. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu92.pdf>

Helsingin karttapalvelu. 2020. Pohjavedenpinta. Kuninkaantammi, Helsinki. [Viitattu 11.12.2020]. Saatavissa: <https://kartta.hel.fi>



Holger Hartmann Oy. 2020. Niton XRF. [Verkkosivu]. Saatavissa: <https://www.holgerhartmann.fi/niton-xrf>

Kangas, H. & Paatsema, M. 2003. Syvästabiloinnin pitkäaikaiset seurantatutkimukset. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto. [Verkkójulkaisu]. Geotekninen osasto julkaisu 87. 94 s. [Viitattu 7.11.2020]. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu87.pdf>

Kitazume, M. & Terashi, M. 2013. The Deep Mixing Method. CRC Press / Balkema, Leiden, Hollanti. s. 407. ISBN: 978-0-203-58963-2 (eBook)

Knauf. 2020. Kipsi. [Verkkosivu]. [Viitattu 8.7.2020]. Saatavissa: <https://knauf.fi/knauf-oy/ymparisto-laatu-ja-turvallisuus/kipsi>

Koivisto, K., Forsman, J. & Vaajosaari, K. 2016. Uusiomateriaalien tuotteistamisohje maarakentamiseen. UUMA2. 76 s. Saatavissa: <http://www.uusiomaarakentaminen.fi/uuma-k%C3%A4sikirjasto>

Kujala, K. 1982. Kipsin käyttö syvästabiloinnissa. Tie- ja maarakennustekniikan laitos, julkaisu 42. Oulu. 157 s. ISBN 951-42-1407-2.

Janz, M. & Johansson, S-E. 2002. The Function of Different Binding Agents in Deep Stabilization. Report 9. Linköping. Swedish Deep Stabilization Research Centre. 47 s. ISSN 1402-2036

Junttan. 2020. Deep stabilization technology, Stabilization (Dry method). [Verkkosivu]. Kuva. [Viitattu 4.6.2020]. Saatavissa: <https://junttan.com/piling-specialist/piling-applications/>

Lahtinen, P & Parkkinen, E. 1992. Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. [Verkkodokumentti]. Tielaitoksen selvityksiä 46/1992. Tielaitos. Helsinki. 53 s. [Viitattu 3.8.2020]. Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/10024/138441/1/3631tie.pdf>

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

Liikennevirasto. 2018b. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 32/2018. Betonin puristuslujuus. Esiselvitys: Tausta ja määrittäminen koetuloksista. Helsinki. 71 s. ISBN 978-952-317-555-6.

Makusa, G.P. 2012. Soil Stabilization Methods and Materials, In Engineering Practice. [Verkkodokumentti]. State of Art Review. Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering, Division of Mining and Geotechnical Engineering. Luleå, Ruotsi. s. 35. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997144/FULLTEXT01.pdf>

Melander, M. 2017. Massastabiloinnin laadunvarmistuskairaukset. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 68 s. Saatavissa: [https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/28507/master\\_Melander\\_Markus\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/28507/master_Melander_Markus_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Melander, M. 2018. Kivituhkan soveltuminen sidotun kantavan kerroksen runkoaineeksi. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. s. 68. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/32423>

Mäntynen, T. 2020. Keskustelua Kuninkaantammen koestabiloinnista 16.12.2020 Kuninkaantammen koestabiloinnin tulosten esittely- ja keskustelutilaisuudessa. YIT Suomi Oy.

Nordkalk Oy. 2006. Ympäristöraportti 2006. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.12.2020]. 12 s. Saatavissa: [https://www.nordkalk.fi/document/1/353/258f594/Ymparistoraportti\\_2006.pdf](https://www.nordkalk.fi/document/1/353/258f594/Ymparistoraportti_2006.pdf)

Nordkalk. 2019. Käyttöturvallisuustiedote, Nordkalk Terra GTC – Versio 1. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.7.2020]. 15 s. Saatavissa: [https://www.nordkalk.fi/document/1/1687/c97db7f/607e\\_upload\\_6ec785b\\_nordkalk\\_terra\\_gtc\\_ktt\\_fi\\_5\\_3\\_2019.pdf](https://www.nordkalk.fi/document/1/1687/c97db7f/607e_upload_6ec785b_nordkalk_terra_gtc_ktt_fi_5_3_2019.pdf)

Nordkalk Oy. 2019b. Sideainekehitystyötä ja stabiloinnin määrä vuosien varrella. Pohjanvahvistuspäivä 2019. Kuusipuro Kari. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.12.2020]. 6 s. Saatavissa: <https://sgy.fi/wp-content/uploads/2019/06/kuusipuro.pdf>

Nordkalk Oy. 2019c. Sustainability report 2019. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.12.2020]. 48 s. Saatavissa: [https://www.nordkalk.fi/document/1/1995/f121adb/b32d\\_upload\\_0a11c4c\\_nordkalk\\_sustainability\\_report\\_2019.pdf](https://www.nordkalk.fi/document/1/1995/f121adb/b32d_upload_0a11c4c_nordkalk_sustainability_report_2019.pdf)

Nordkalk Oy. 2020. Nordkalkin ilmoittamat sideainereseptit (Nordkalkin Terra -tuotteet), Kuusipuro Kari - Key Account Manager. [Sähköpostiviesti 22.1.2020]

Nordkalk Oy. 2020b. Terra GTC -sideaineseoksen suhteet. Kuusipuro Kari - Key Account Manager. Ilmoitettu 16.12.2020.

Nordkalk Oy. 2020c. Sideainekehitystyötä ja stabiloinnin määrä vuosien varrella. Pohjanvahvistuspäivä 2020. Kuusipuro Kari. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.1.2021]. Saatavissa: [https://sgy.fi/wp-content/uploads/2020/05/04-kuusipuro\\_sgy\\_pv\\_2020\\_08\\_20.pdf](https://sgy.fi/wp-content/uploads/2020/05/04-kuusipuro_sgy_pv_2020_08_20.pdf)

Piispanen, P. 2017. Massastabiloinnin pitkäaikaistoimivuus. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 92 s. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/28497>

Schwenk. 2019. Environmental Product Declaration. In accordance with EN 15804 for: CEM II A-M (S-LL) 52,5 N, CEM I 52,5 N, CEM I 42,5 R, CEM I 42,5 SR-3. 13 s.

Selänpää, J. 2015. CPTu-kairauskokeen käyttäminen liikenneväylien pohjatutkimusmenetelmänä. [Verkkodokumentti]. Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. Helsinki. 2015. [Viitattu 10.8.2020]. 59 s. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2015-25\\_cptu-kairauskokeen\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2015-25_cptu-kairauskokeen_web.pdf)  
ISBN 978-952-317-092-6

Suomen geoteknillinen yhdistys SGY 2001. Kairausopas VI, CPTu/Puristinkairaus, Puristinheijarikairaus, versio 1.00, 7.6.2001. 91 s. ISBN 951-98818-1-6 (PDF)

SoundingsWED. 2020. ArcGIS Web Application. Rambollin työkalu: Pohjatutkimukset karttapalvelussa.

Tilastokeskus. 2020. Käsitteet: Arvonlisäys. [Verkkosivu]. [Viitattu 31.12.2020]. Saatavissa: <http://www.stat.fi/meta/kas/arvonlisays>

Törnqvist, J. & Juvankoski, M. 2003. KT51 Kirkkonummen syvä- ja massastabiloitu koe-rakenne. Loppuraportti. Tiehallinnon selvityksiä 29/2003. ISBN 951-803-080-4

Uotinen, V.-M. 1994. Syvästabiloinnin ennakkokokeet, Sideaineen valinta maalajin ja vesipitoisuuden perusteella. Tielaitos, Uudenmaan tiepiiri. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, pohjarakennus- ja maamekaniikka. s. 27.

UPM-Kymmene Oyj. 2020. UPM:n ilmoittamat sideainereseptit: LT KAI + CEMII 7:3 ja LT JAM + CEMII 7:3. Yhteyshenkilöt: Rantala Pekka ja Silmu Riikka. [Sähköpostiviesti 3.4.2020]

UUMA3. 2020. Uusiomaarakentamisen päästölaskentaraaportti. [Viitattu 14.12.2020]. [Verkkodokumentti]. 23 s. Saatavissa: <http://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Uusiomaarakentamisen%20p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6laskenta.pdf#overlay-context=uusiomateriaalirakentaminen-ohjejulkaisu>

Vilenius, M. 2019. Valimohiekan tekniset ominaisuudet ja uusiokäyttö maarakentamisessa. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 71 s. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/40951>

VTT:n lipasto. 2017. LIPASTO Yksikköpäästöt. [Verkkosivu]. LIPASTO yksikköpäästötietokanta. [Viitattu 29.6.2020]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/index.htm>

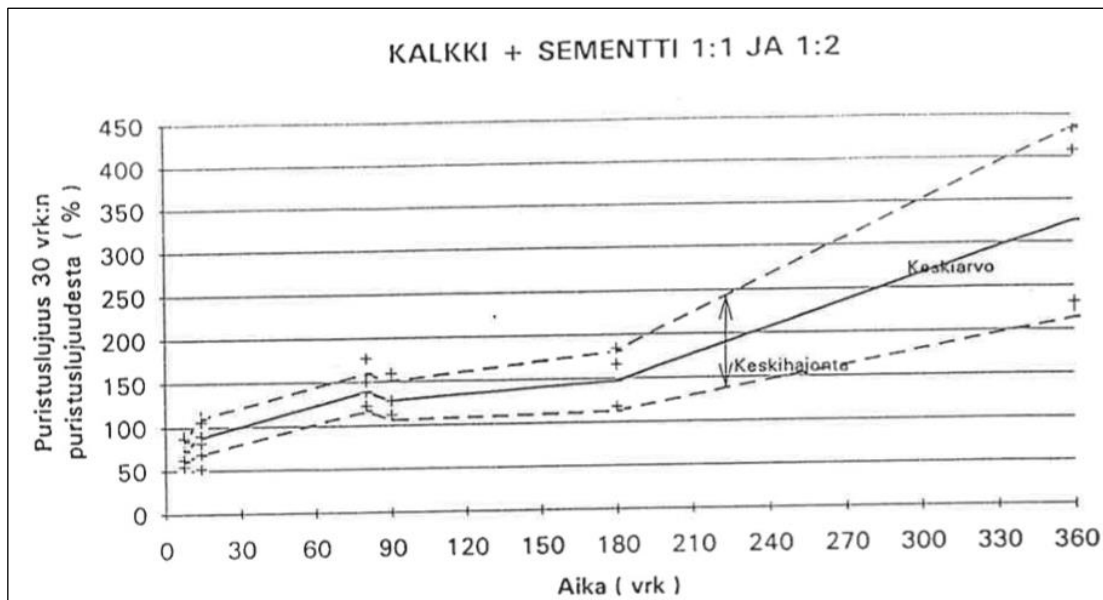
Ympäristöministeriö. 2019. Rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmä. Helsinki. 54 s. ISBN: 978-952-361-029-3

Åhnberg, H. 2006. Strength of Stabilized soils - A laboratory report on clays and organic soils stabilized with different types of binder. Väitöstyö. Lund University, Ruotsi. 80 s. ISBN 978-91-628-6790-4

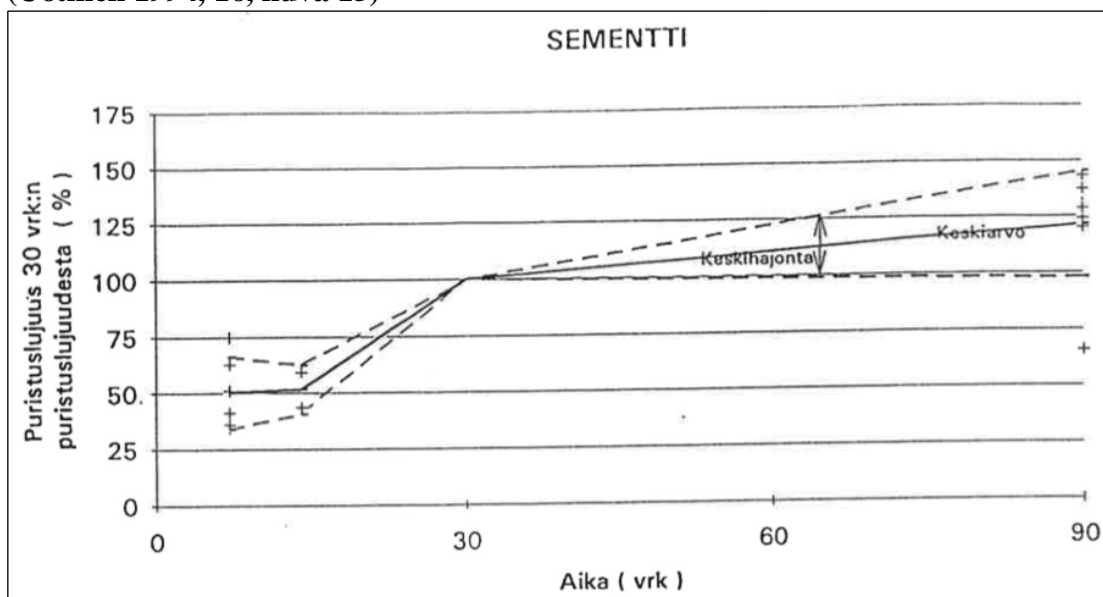
## **Liiteluettelo**

- Liite 1: Aikalujittumiskertoimet, Uotinen 1994
- Liite 2: Materiaalitoimittajien stabiloitavuuskokeiden tulokset
- Liite 3: Staran stabiloitavuuskokeiden tulokset
- Liite 4. Laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuudet, 1 ja 3 kk
- Liite 5: Puristuskoetulokset C312 (Luopioinen)
- Liite 6: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen kenttälujuuksista 3 kk / 1 kk
- Liite 7. Kenttä-/laboratoriolujuuskertoimet
- Liite 8: Keskihajonnat
- Liite 9: Keskihajonnat – min ja max – keskiarvot
- Liite 10: COV
- Liite 11: Päästökertoimet tavoite- ja saavutetuille leikkauslujuuksille g CO<sub>2</sub>-ekv/m/kPa
- Liite 12: Leikkauslujuuden tulkinta
- Liite 13: CPTu-kairaustulokset
- Liite 14: Päästölaskelma, Infra Stabi80
- Liite 15: Kuninkaantammen koestabiloinnin toteutuksen vaiheet ja aikataulu
- Liite 16: Sideaineiden kuljetus työmaalle päästölaskelmat

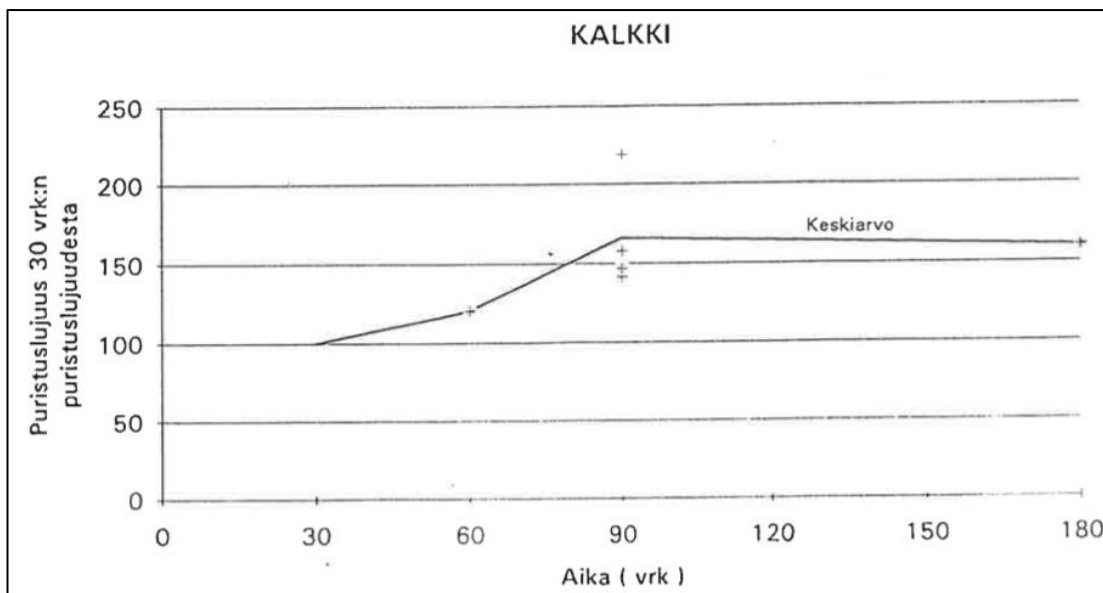
Seuraavassa on esitetty Uotisen (1994, 16-18, kuvat 15-19) esittämät aikalujittumiskertoimet kalkki-sementti -sideaineseokselle 1:1 ja 1:2 (kuva 1), sementille (kuva 2), kalkille (kuva 3), Finnstabi + kalkki-sideaineseokselle 1:1 (kuva 4) ja LohjaMix-sideaineelle (kuva 5). Kuvissa vertailuaika on 30 vrk. Tulokset ovat laboratoriossa tehtyjen stabiloitavuuskokeiden puristuskokeista.



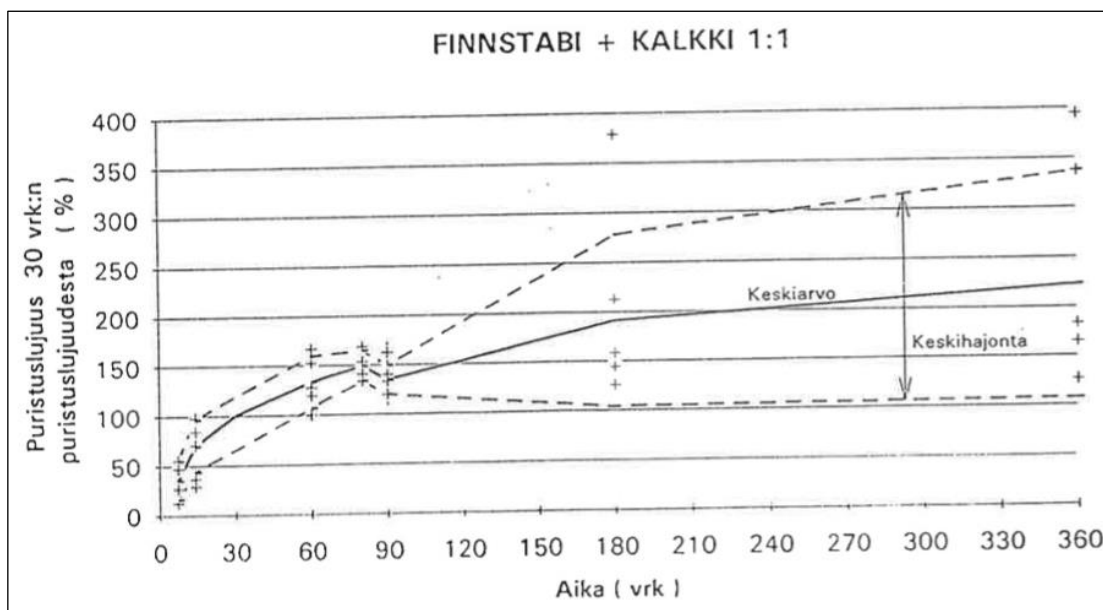
**Kuva 1: Aikalujittuminen sideaineseoksella kalkki + sementti 1:1 ja 1:2. (Uotinen 1994, 16, kuva 15)**



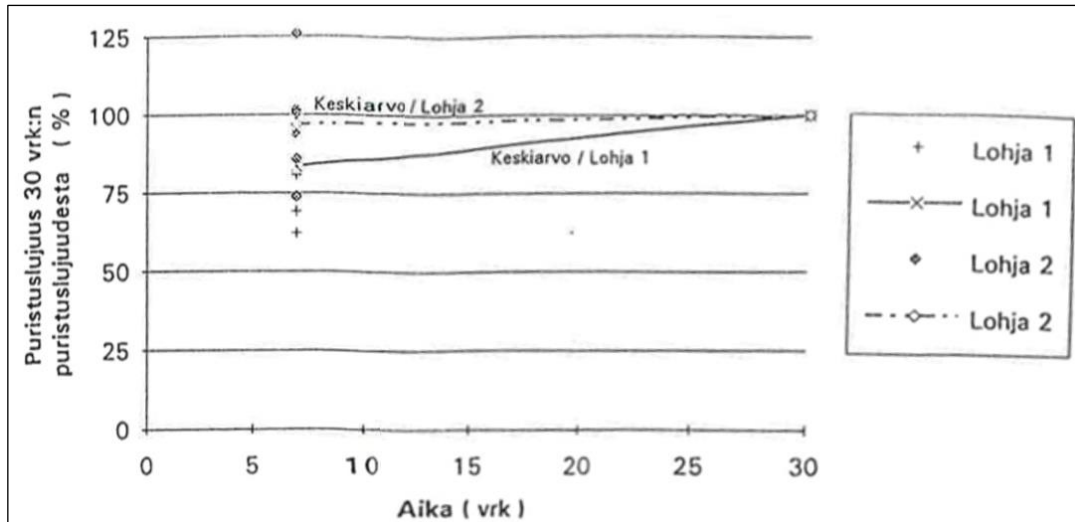
**Kuva 2: Aikalujittuminen sementillä. (Uotinen 1994, 17, kuva 17)**



**Kuva 3: Aikalujittuminen kalkilla. (Uotinen 1994, 17, kuva 18)**



**Kuva 4: Aikalujittuminen sideaineseoksella Finnstabi80 + kalkki 1:1. (Uotinen 1994, 16, kuva 16)**



**Kuva 5: Aikalujittuminen sideaineseoksella Lohjan sideaineilla (LohjaMix).  
(Uotinen 1994, 18, kuva 19)**

## Sideaine Terra KC50

Tutk.piste	P701	P701	P701	P701		
Syvyys [m]	2,5	5	2,5	5		
Lujittumisaika [d]	28	28	90	90		
Sideainemäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	120	120	120	120		
Leikkauslujuus [kPa]	174,5	114,5	177,5	157		
E <sub>50</sub> -moduuli [kPa]	21700	29500	26800	30600		
E / τ -suhde [-]	124	258	151	195	ka	182
					min.	124
					max.	258

## Sideaine Terra Green

Tutk.piste	P701	P701	P701	P701	P701	P701		
Syvyys [m]	2,5	2,5	5	2,5	2,5	5		
Lujittumisaika [d]	28	28	28	90	28	90		
Sideainemäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	120	150	120	120	150	120		
Leikkauslujuus [kPa]	179	276,5	152	209	367,5	268		
E <sub>50</sub> -moduuli [kPa]	33000	36800	39900	43100	54000	79000		
E / τ -suhde [-]	184	133	263	206	147	295	ka	205
							min.	133
							max.	295

## Sideaine Terra GTC

Tutk.piste	P701	P701	P701	P701	P701	P701		
Syvyys [m]	2,5	2,5	5	2,5	2,5	5		
Lujittumisaika [d]	28	28	28	90	28	90		
Sideainemäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	120	150	120	120	150	120		
Leikkauslujuus [kPa]	172	151	176	215	294	205		
E <sub>50</sub> -moduuli [kPa]	36800	41100	43900	35800	38100	29000		
E / τ -suhde [-]	214	272	249	167	130	142	ka	196
							min.	130
							max.	272

## Sideaine Terra POZ

Tutk.piste	P701	P701	P701	P701		
Syvyys [m]	2,5	5	2,5	5		
Lujittumisaika [d]	28	28	90	90		
Sideainemäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	120	120	120	120		
Leikkauslujuus [kPa]	135,5	147,5	209,5	225,5		
E <sub>50</sub> -moduuli [kPa]	19400	30900	43300	59500		
E / τ -suhde [-]	143	209	207	264	ka	206
					min.	143
					max.	264





## Sideaine GTC

Tutk.piste	101	101	101	101	102	102	102	102	103	103	103	103	103	103	101	102	102	103
Syvyys [m]	3	3	5	5	3,5	3,5	7,5	7,5	2,5	2,5	5,5	5,5	8,5	8,5	3	3,5	7,2	5,5
Lujittumisaika [d]	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	90	90	90	90
Sideainemäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	80	120	80	120	80	120	80	120	80	120	80	120	80	120	120	120	120	120
Leikkauslujuus [kPa]	132	176	124	196	130	140	199	220	161	296	111	215	125	160	208	156	314	266
E <sub>50</sub> -moduuli [kPa]	73038	83788	43750	80212	45744	46669	106481	89493	24629	64206	100658	73976	40931	37162	99153	42408	104197	109603
E / τ -suhde [-]	567	479	354	405	348	329	536	398	153	219	910	343	326	238	478	272	329	415

ka. 394

min. 153

max. 910

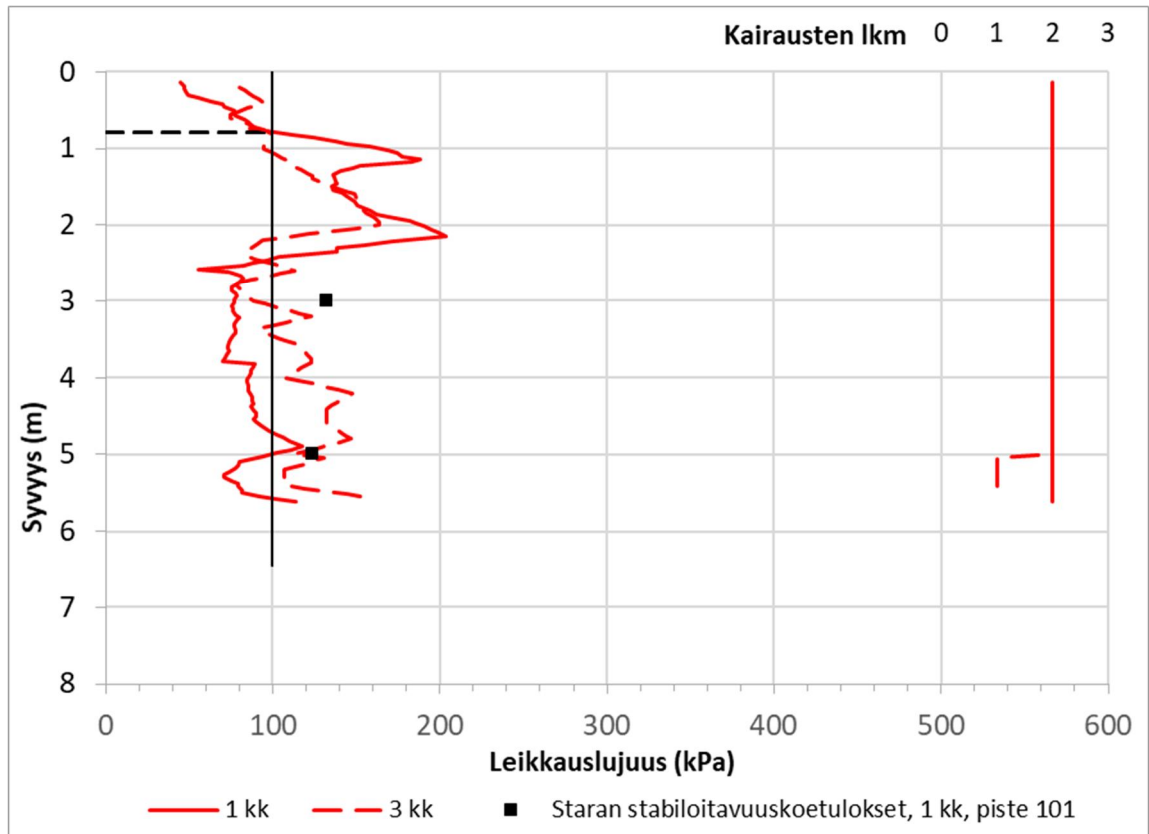
## Sideaine KC 30/70 %

Tutk.piste	101	101	101	101	102	102	102	102	103	103	103	103	103	103	101	102	102	103
Syvyys [m]	3	3	5	5	3,5	3,5	7,2	7,2	2,5	2,5	5,5	5,5	8,5	8,5	3	3,5	7,2	5,5
Lujittumisaika [d]	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	90	90	90	90
Sideainemäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	80	120	80	120	80	120	80	120	80	120	80	120	80	120	120	120	120	120
Leikkauslujuus [kPa]	133	198	128	191	189	294	174	281	285	374	118	172	142	258	263	323	333	205
E <sub>50</sub> -moduuli [kPa]	39325	78834	80212	75188	37274	43344	59767	52358	48371	85830	40826	37428	32407	81455	62905	49132	52664	40953
E / τ -suhde [-]	292	402	621	380	199	148	342	188	166	219	342	213	226	315	238	152	149	199

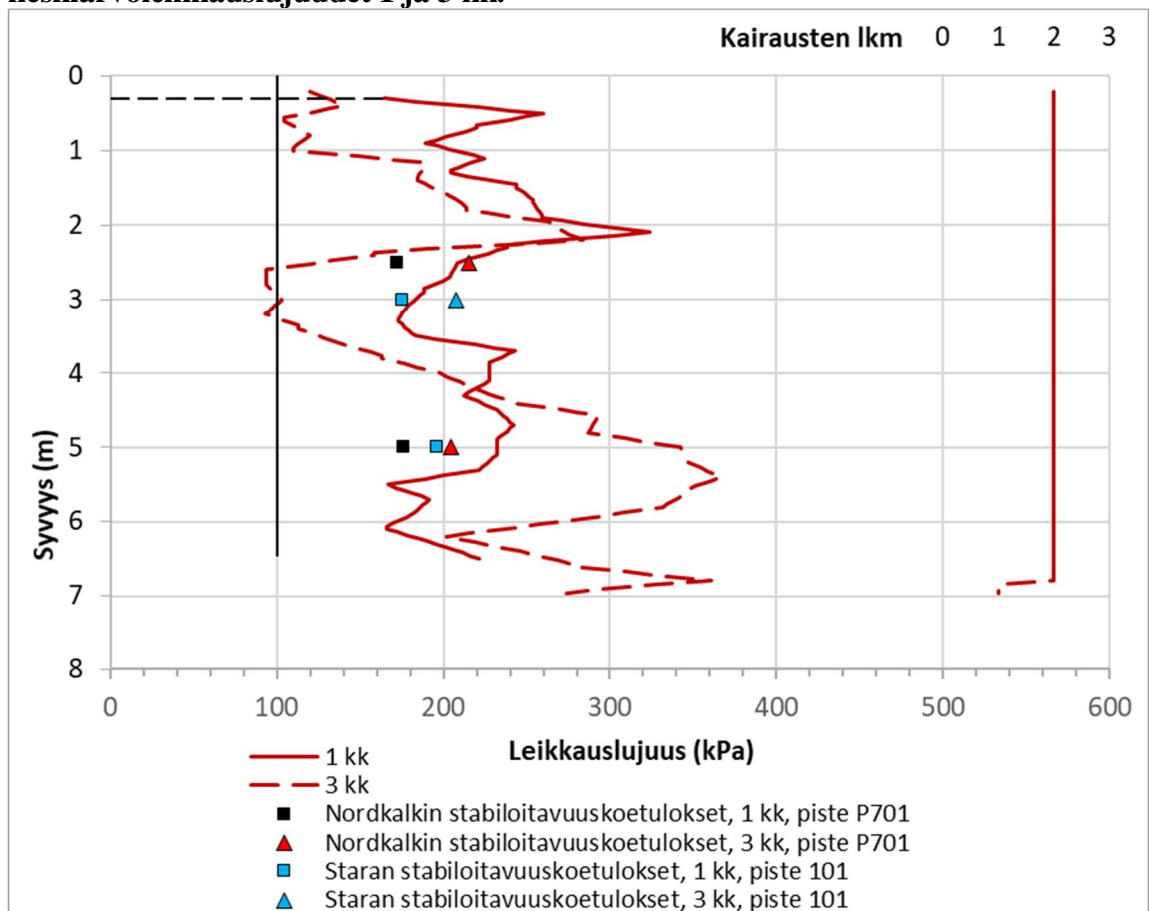
ka. 266

min. 148

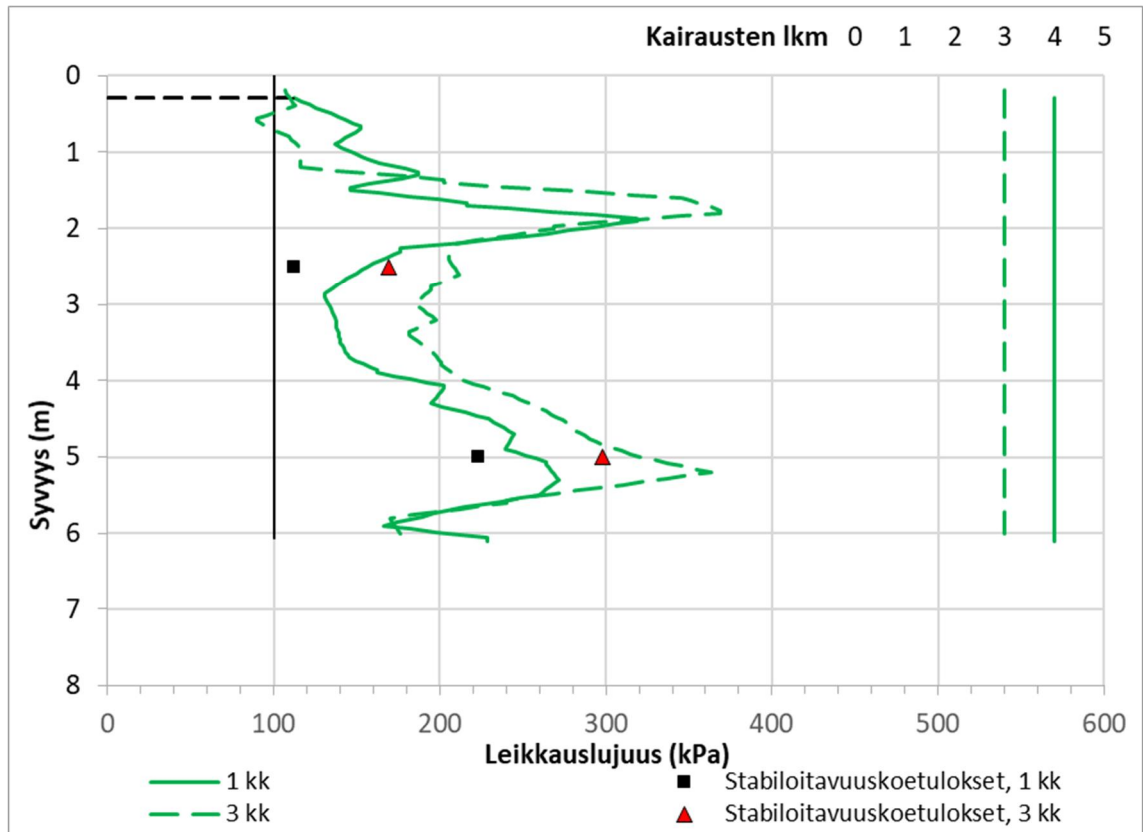
max. 621



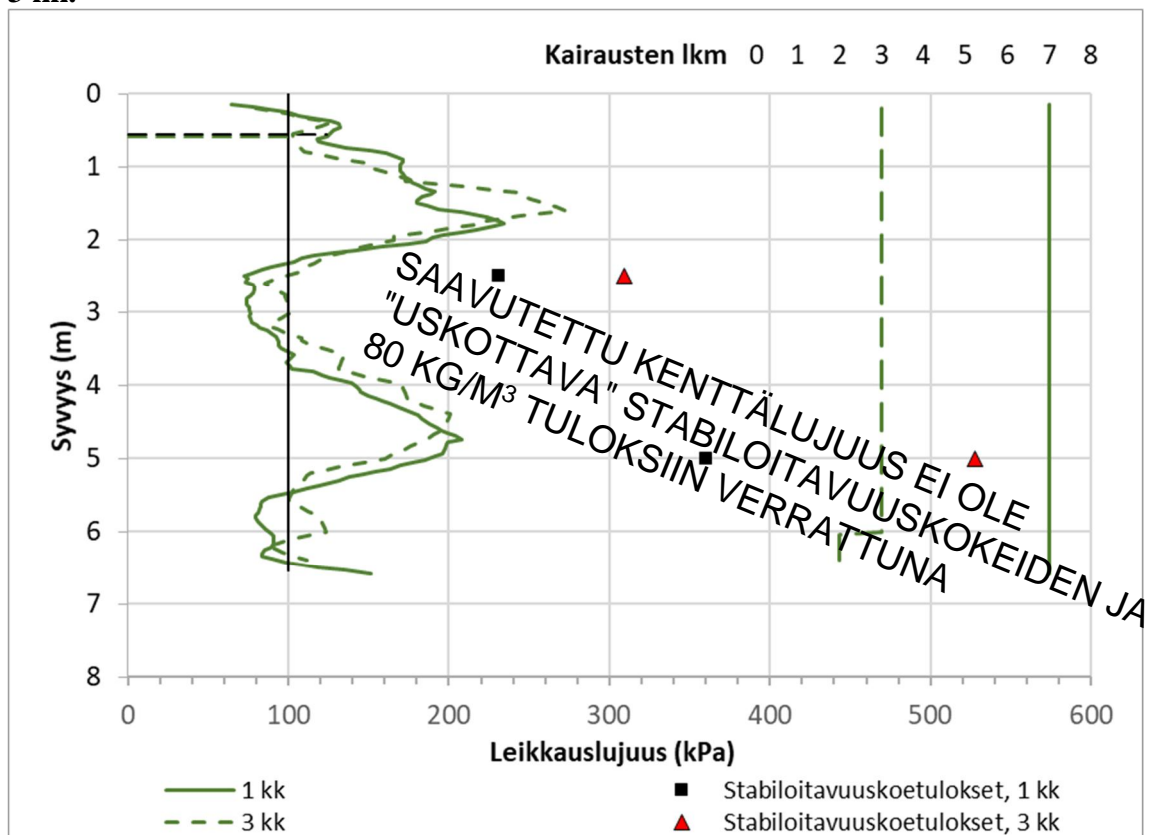
**Kuva 5.1: Alue A2, Terra GTC, 80 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.**



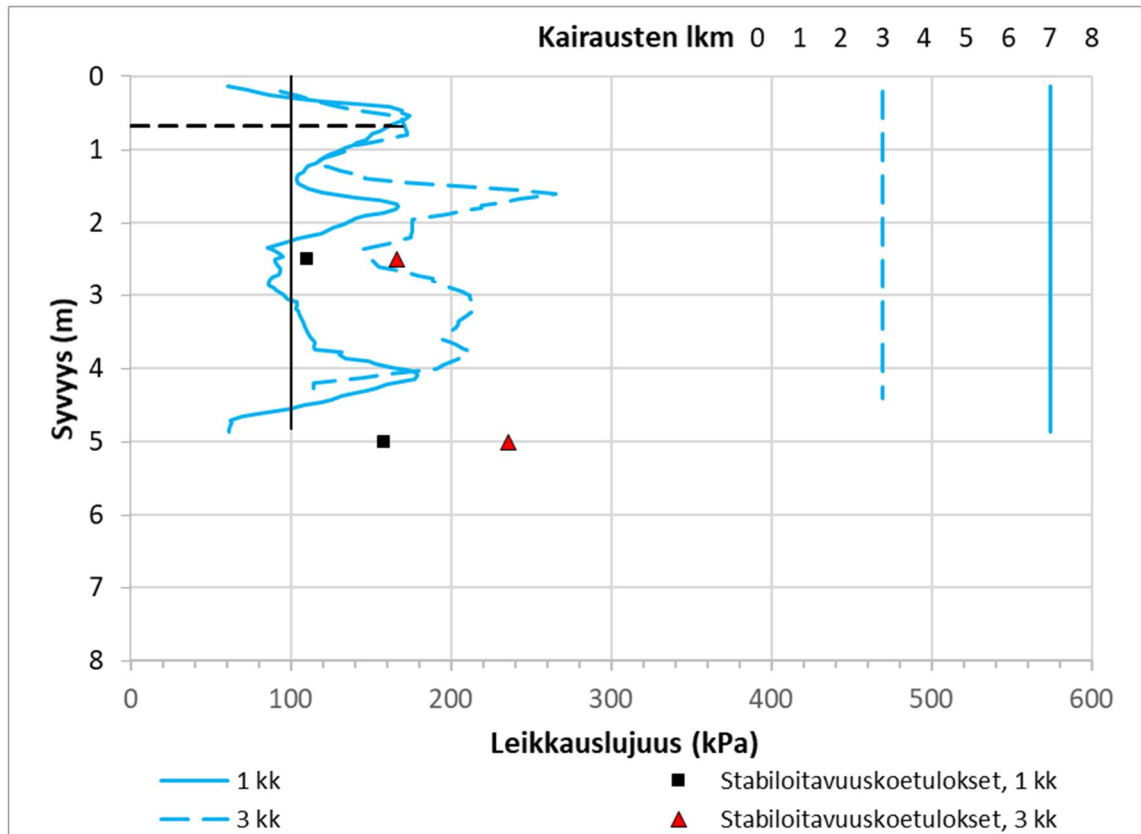
**Kuva 5.2: Alue A3, Terra GTC, 120 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet**



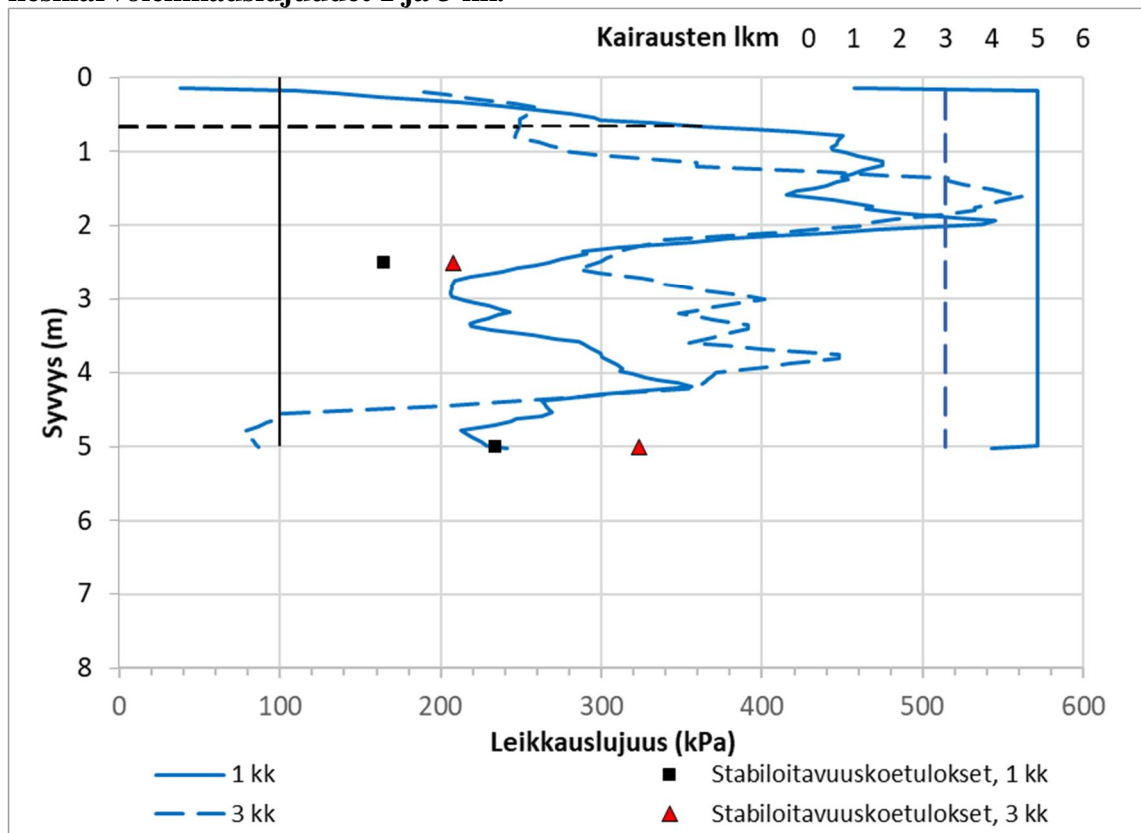
Kuva 5.3: Alue A4, Stabi80, 80 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.



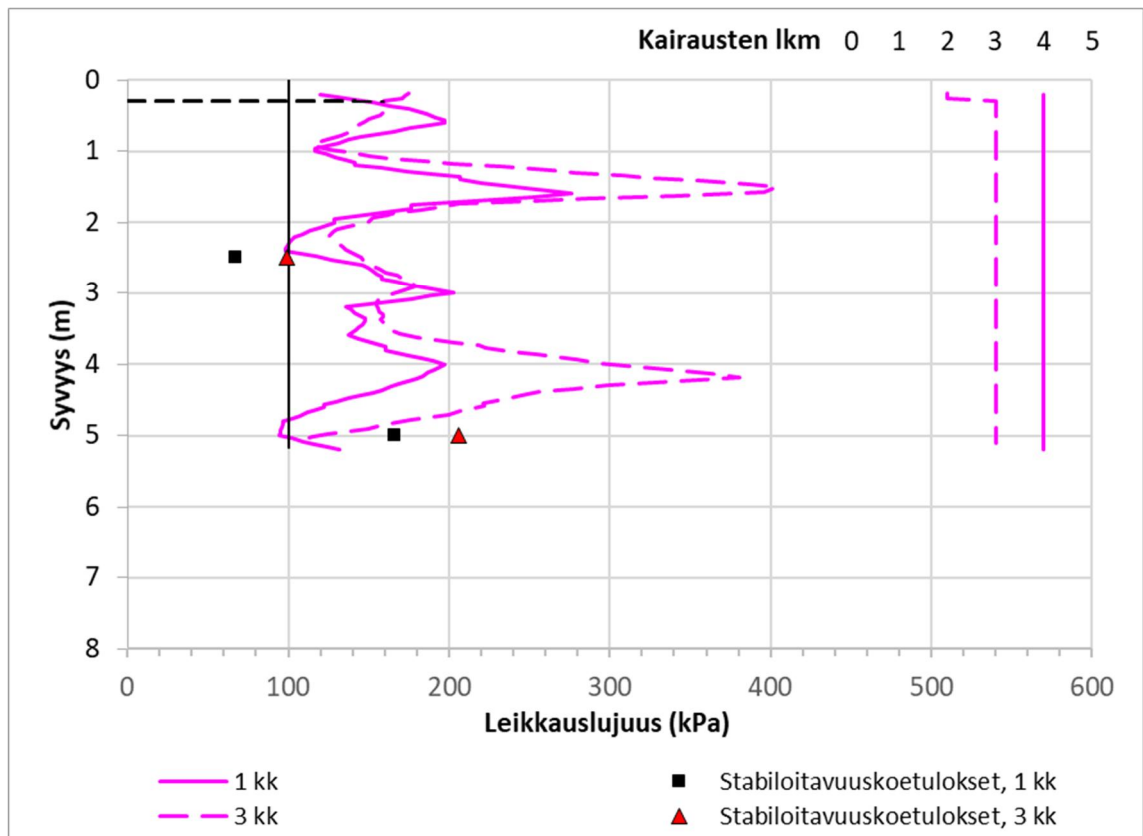
Kuva 5.4: Alue D1, Stabi80, 120 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.



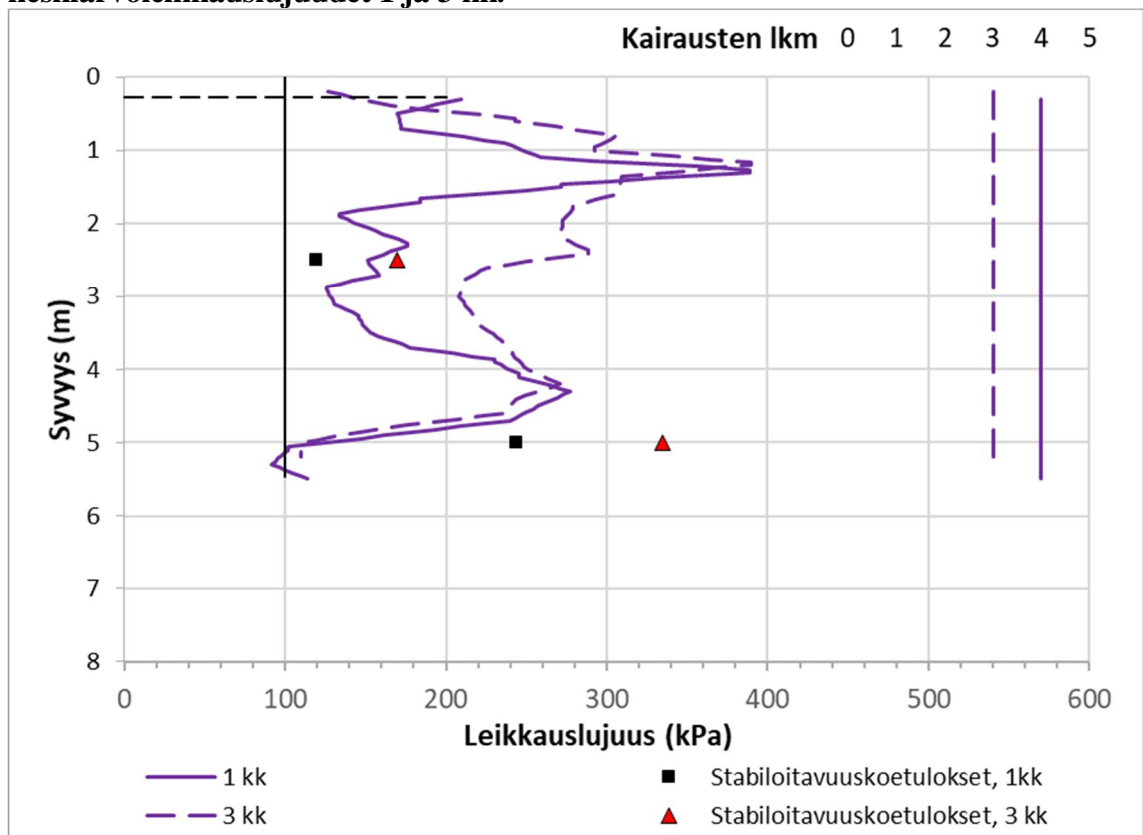
Kuva 5.5: Alue B1, LT KAI + CEMII 7:3, 120 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.



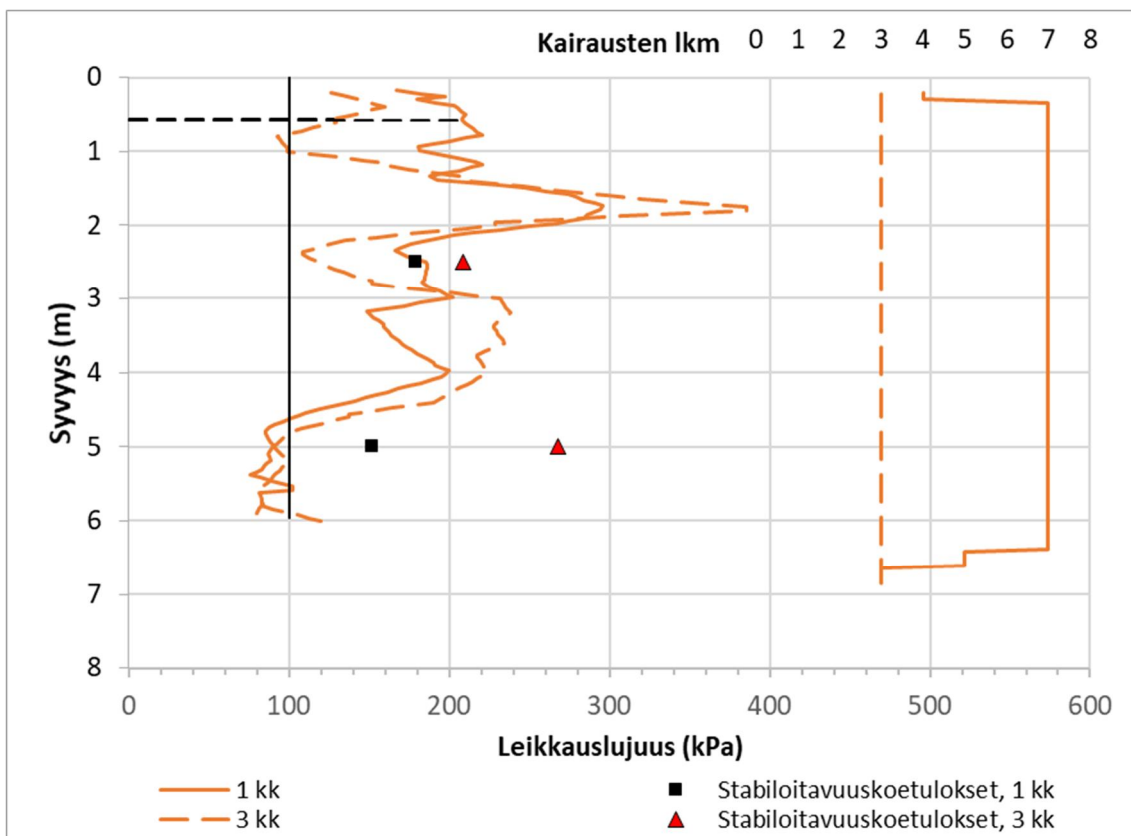
Kuva 5.6: Alue B2, LT KAI + CEMII 7:3, 160 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.



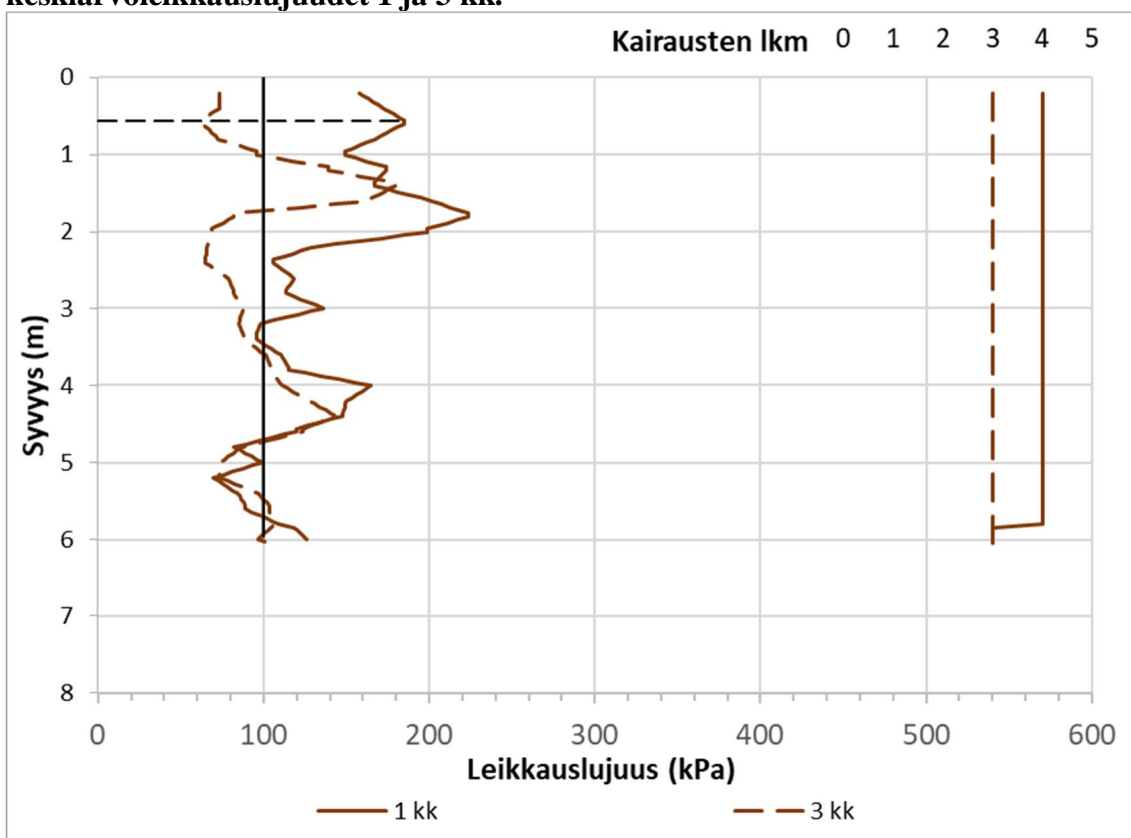
Kuva 5.7: Alue B3, LT JAM + CEMII 7:3, 120 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.



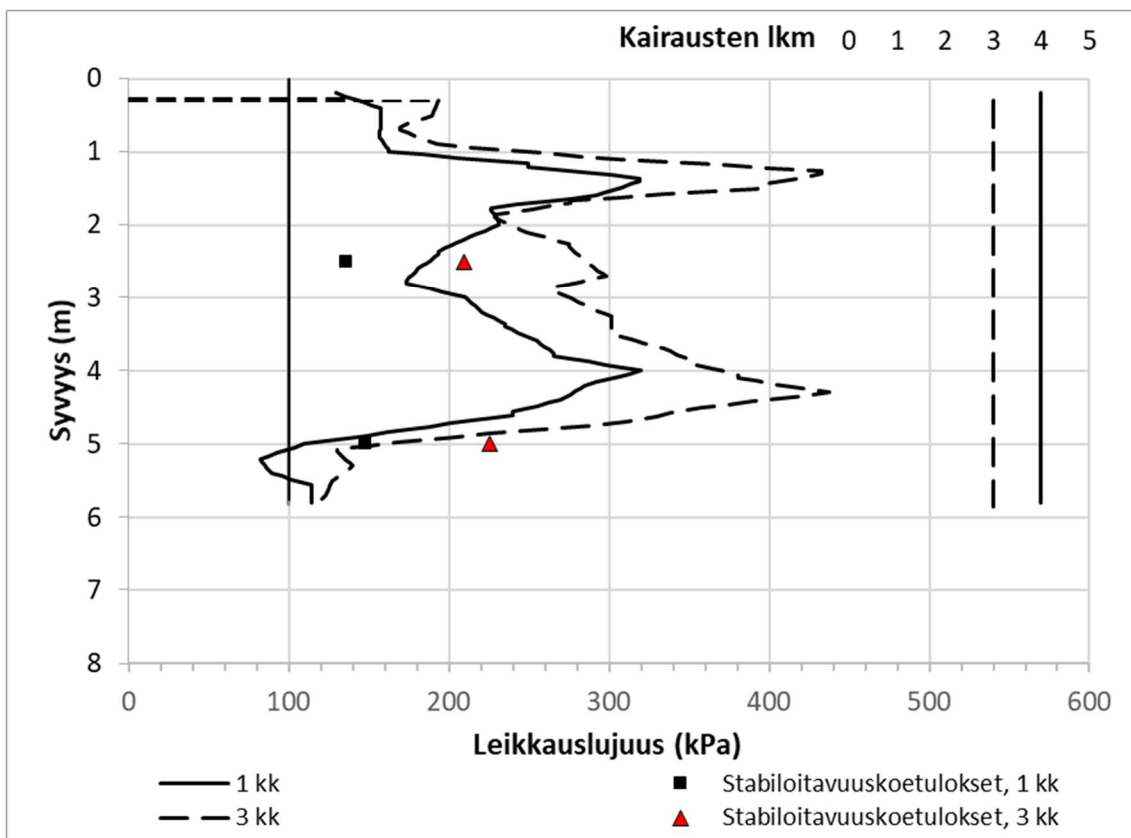
Kuva 5.8: Alue B4, LT JAM + CEMII, 160 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.



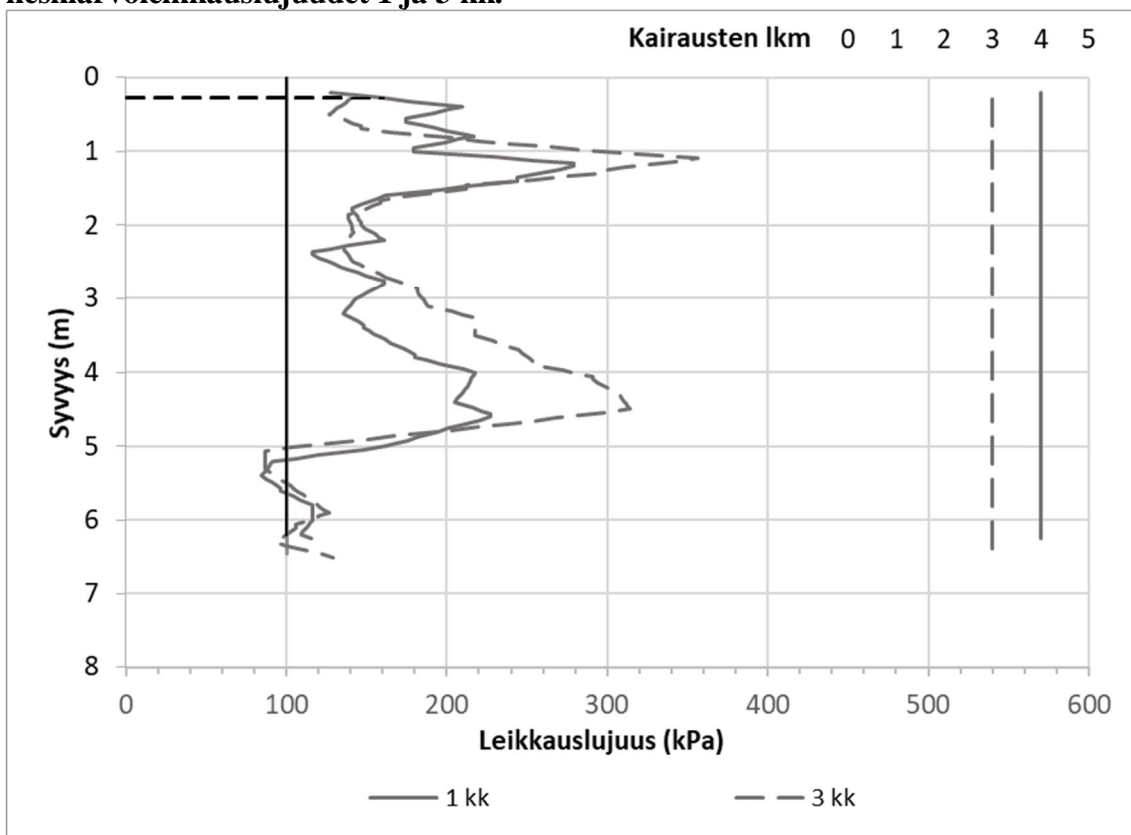
**Kuva 5.9:** Alue C1, Terra Green, 120 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.



**Kuva 5.10:** Alue C2, Terra Green 80 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.

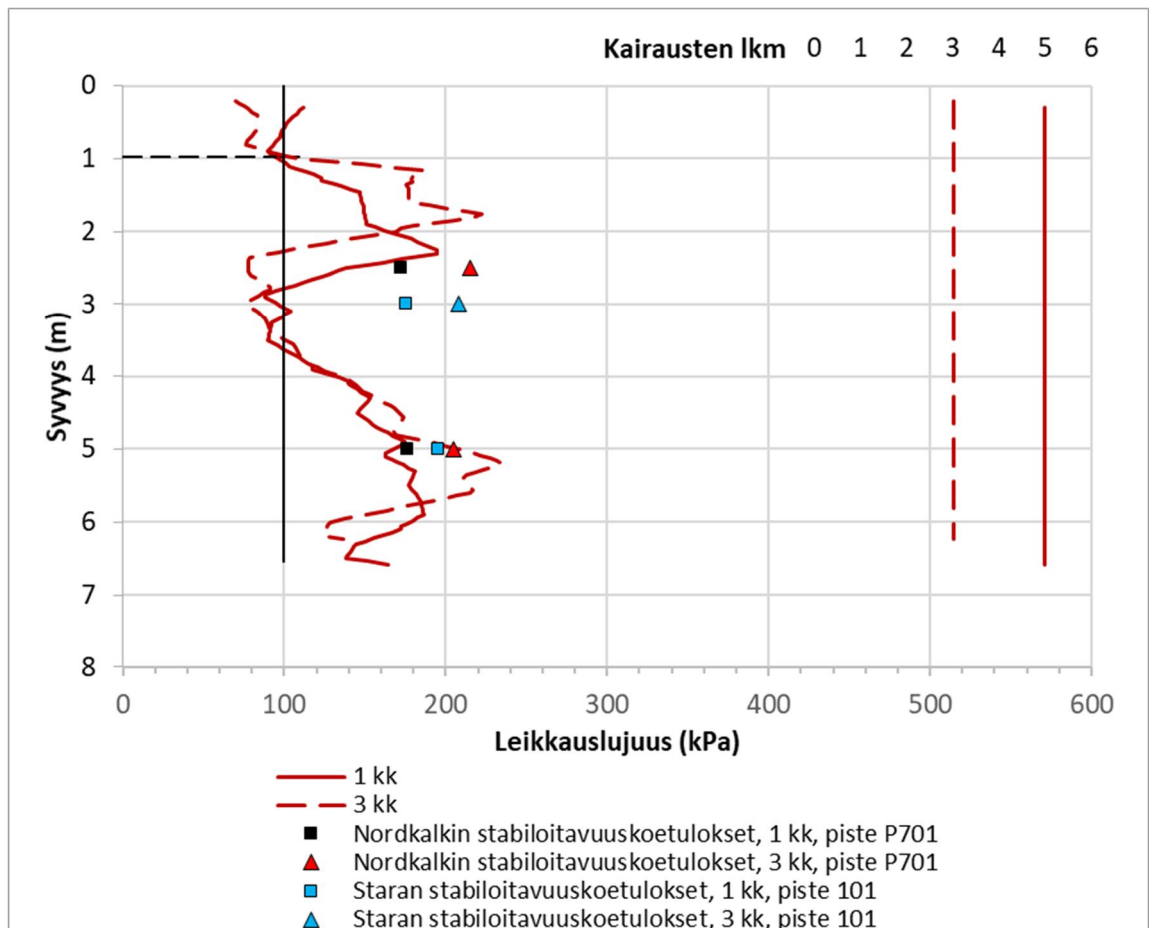


**Kuva 5.11: Alue C3, Terra POZ, 120 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.**

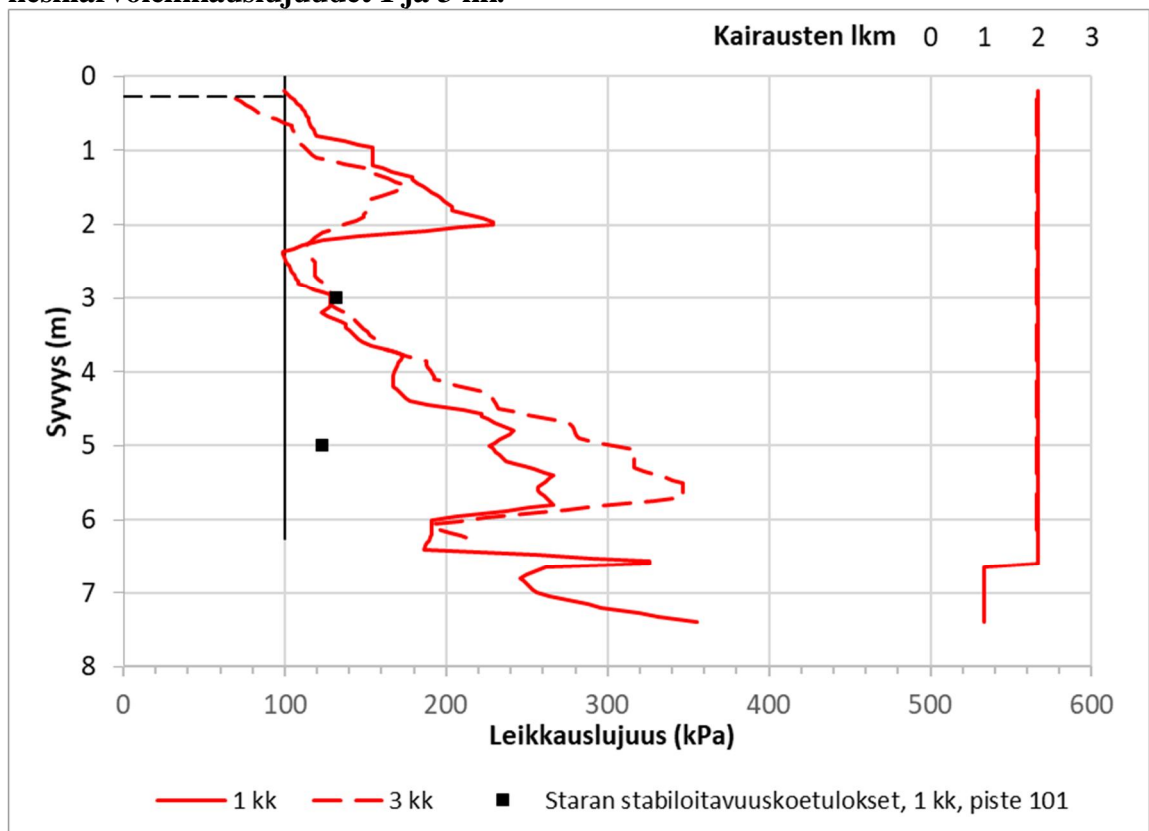


**Kuva 5.12: Alue C4, Terra POZ, 80 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.**





**Kuva 5.13: Alue E1, Terra GTC, 120 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.**



**Kuva 5.14: Alue E2, Terra GTC, 80 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk.**

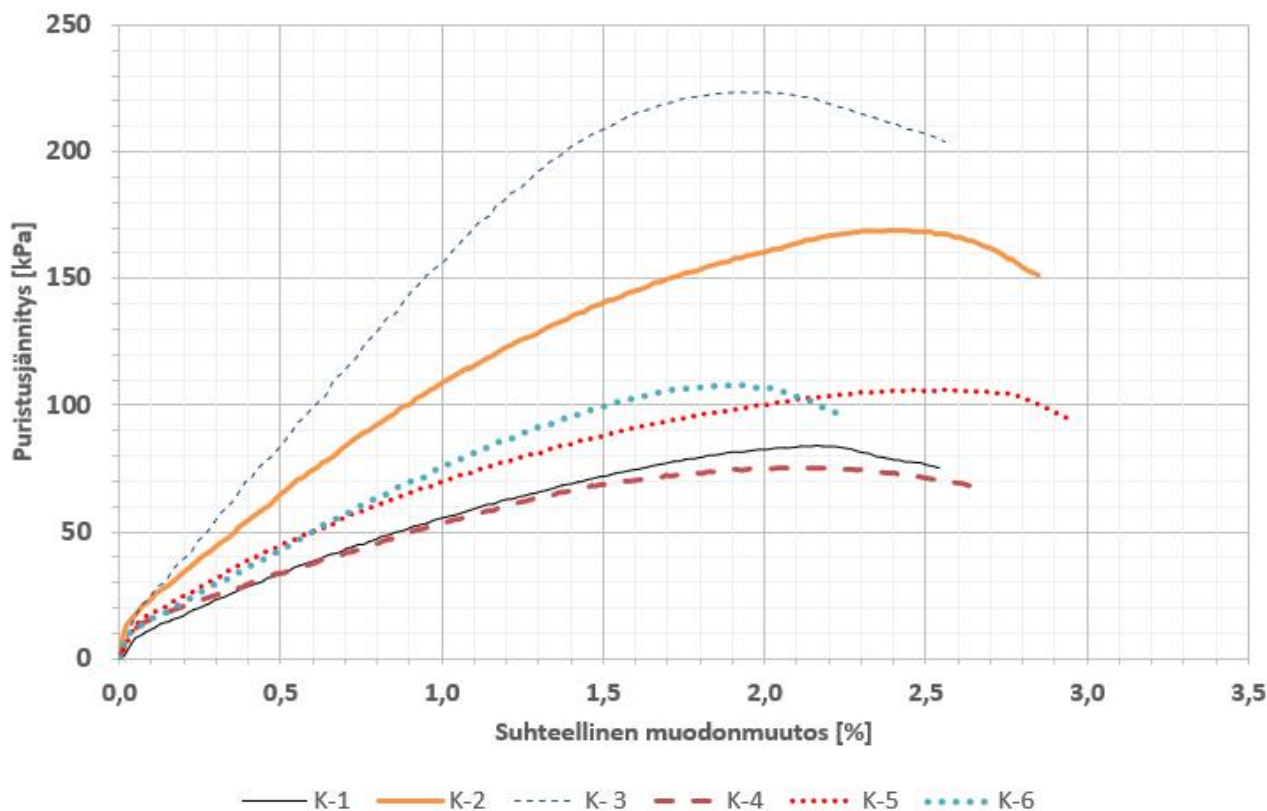
# Puristuslujuusmääritys

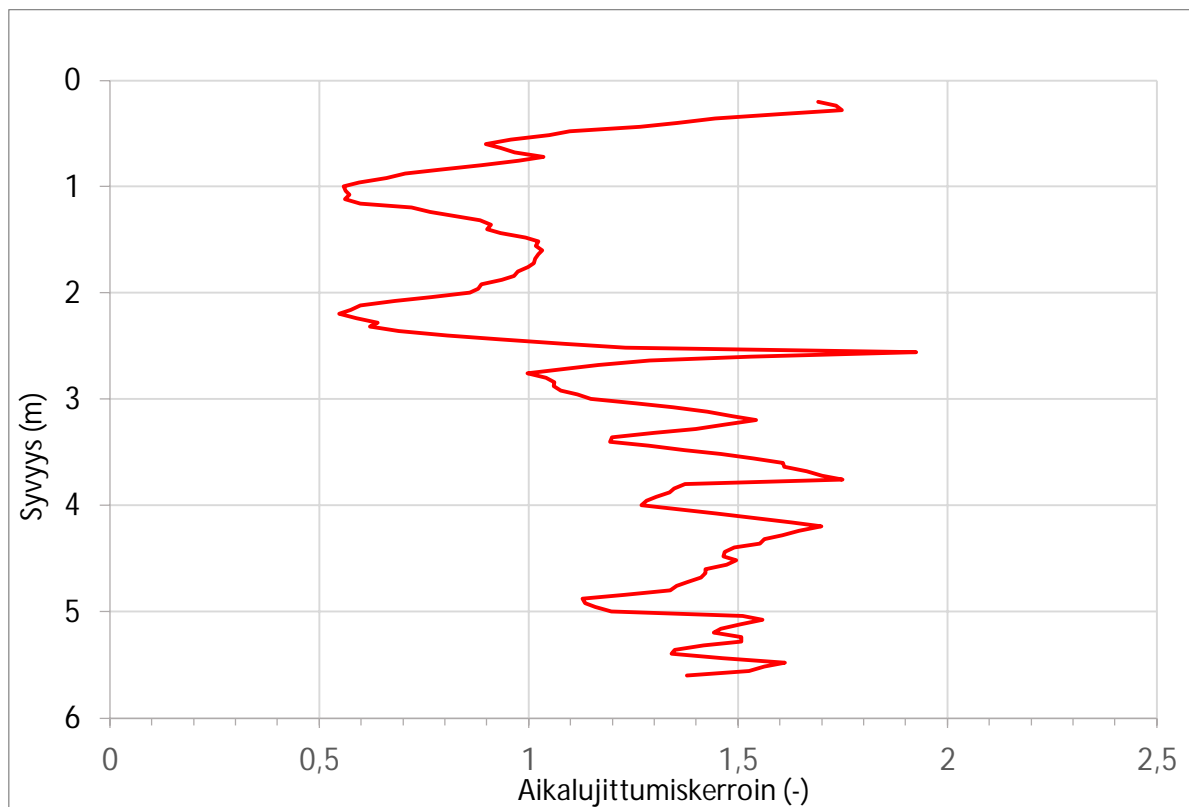


Laboratorio: Ramboll Luopioinen 23.9.2020

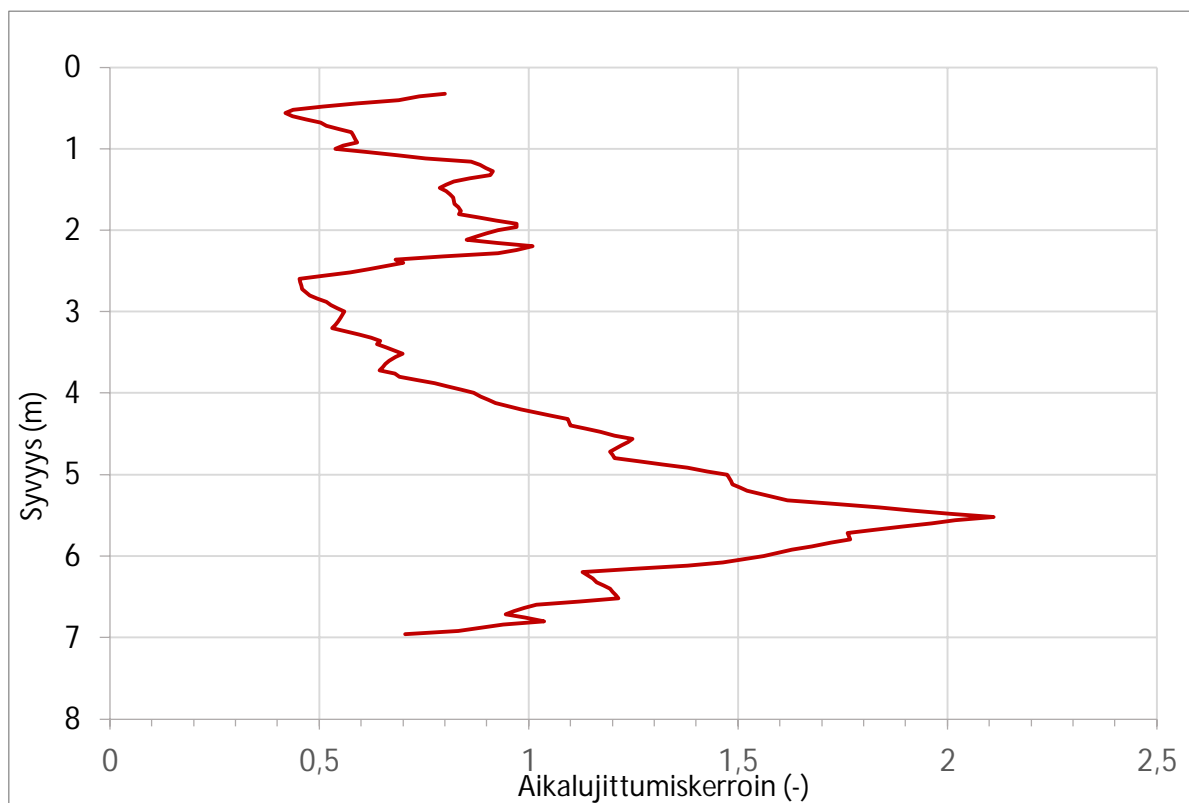
Projekti: 1510039828-005 Kuninkaantammi, pilaristapilointi

Koekappalenumero:	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6		
	C312 vasen, s.-2-3 m (4.9.2020)			C312 oikea s.-2-3 m (4.9.2020)				
	50 mm	150 mm	250 mm	50 mm	150 mm	250 mm		
Puristuslujuus [kPa]:	84,4	169,0	224,0	75,2	106,0	108,0		
ε murtotilassa [%]:	2,16	2,39	2	2,04	2,47	1,90		
Runkoaine:								
Sideaine:								
Sideainemäärä [kg/m <sup>3</sup> ]:								
Kappaleen tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]:	1607	1622	1589	1567	1562	1521		
Koestusikä [vrk]:								
Kuorm.nopeus [mm/min]:	1							
Halkaisija [mm]:	60	60	60	60	60	60		
Korkeus [mm]:	121,5	108,5	84	118	109	126		
Säilytystapa:								
Säilytislämpötila [°C]:								
Tekijä:								
Lisätietoja:	Poikki			Poikki				

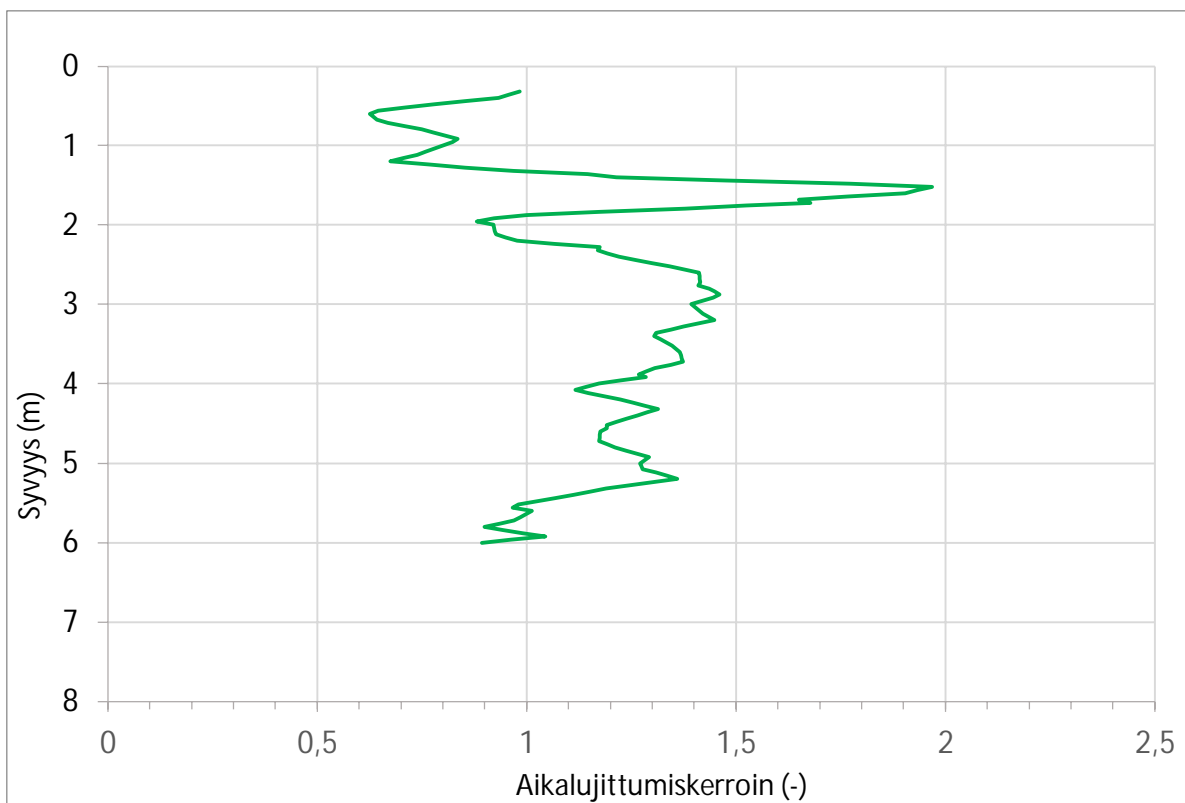




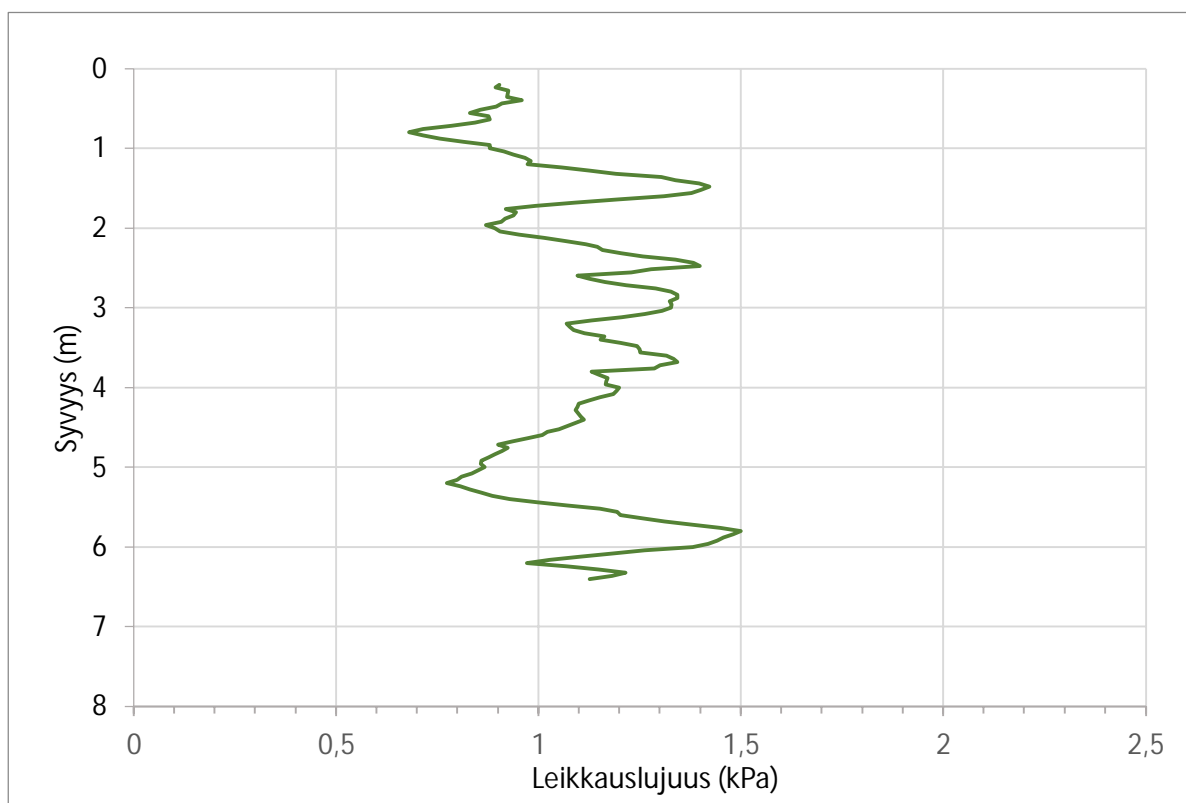
Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue A2, Terra GTC, 80 kg/m<sup>3</sup>.



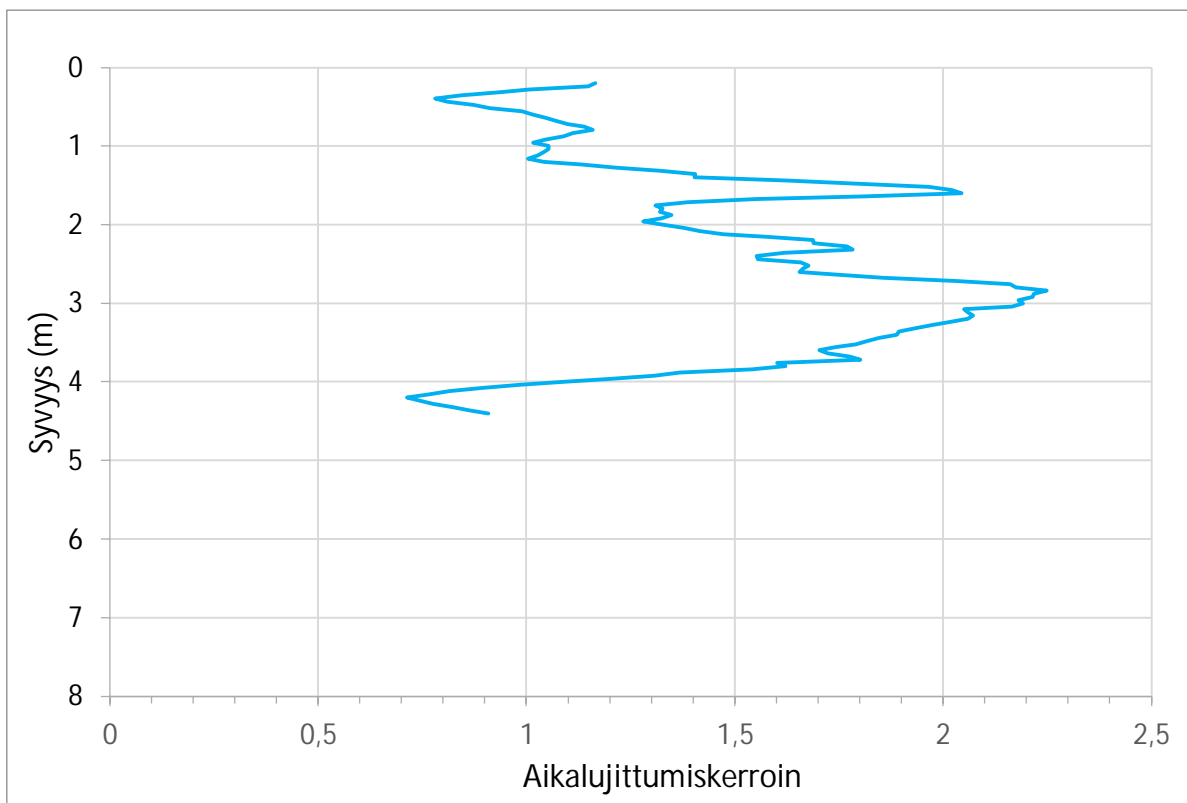
Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue A3, Terra GTC, 120 kg/m<sup>3</sup>.



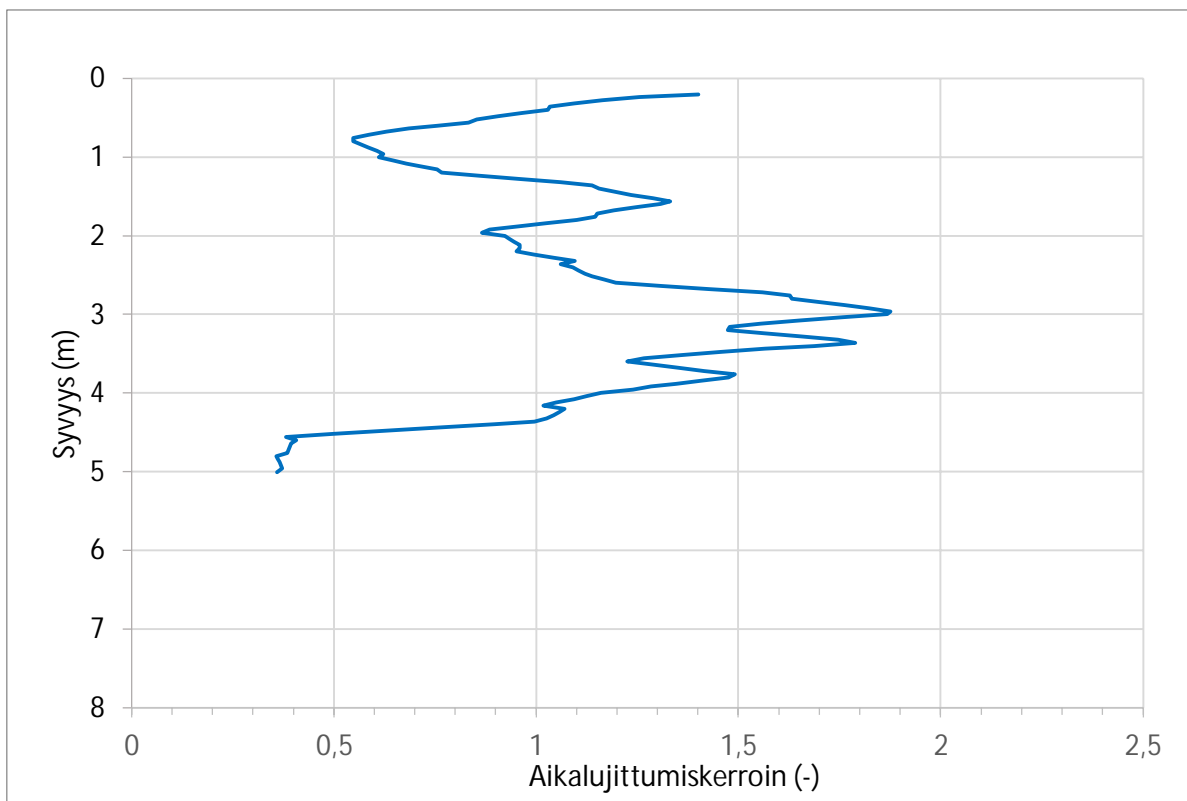
Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue A4, Infra Stabi80, 80 kg/m<sup>3</sup>.



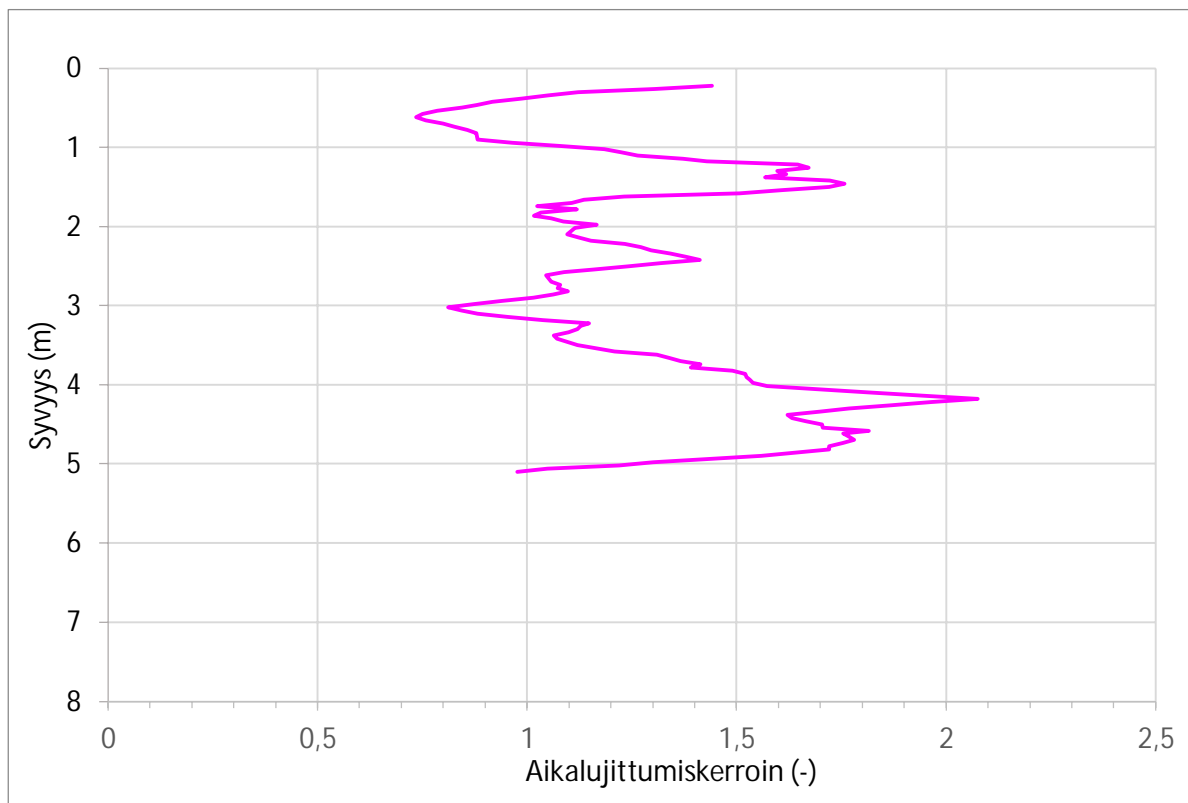
Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue D1, Infra Stabi80, 120 kg/m<sup>3</sup>.



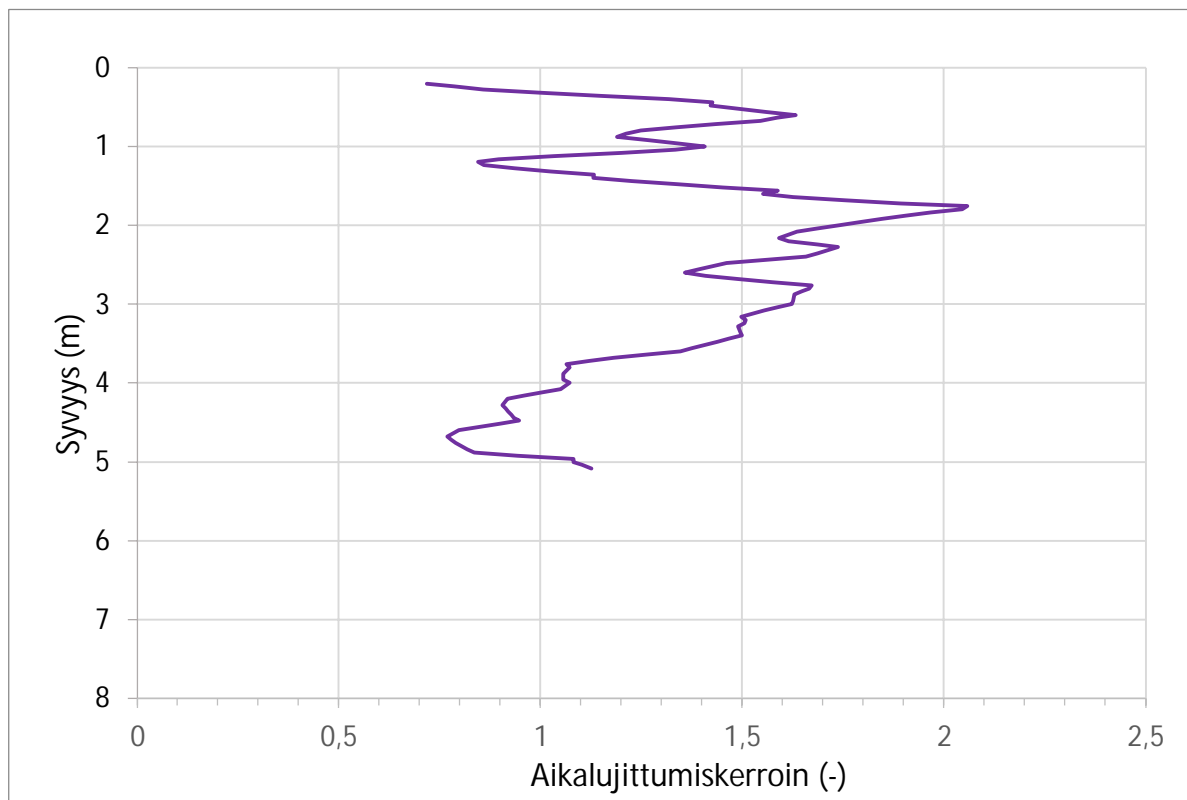
Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvovoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue B1, LT KAI + CEMII 7:3, 120 kg/m<sup>3</sup>.



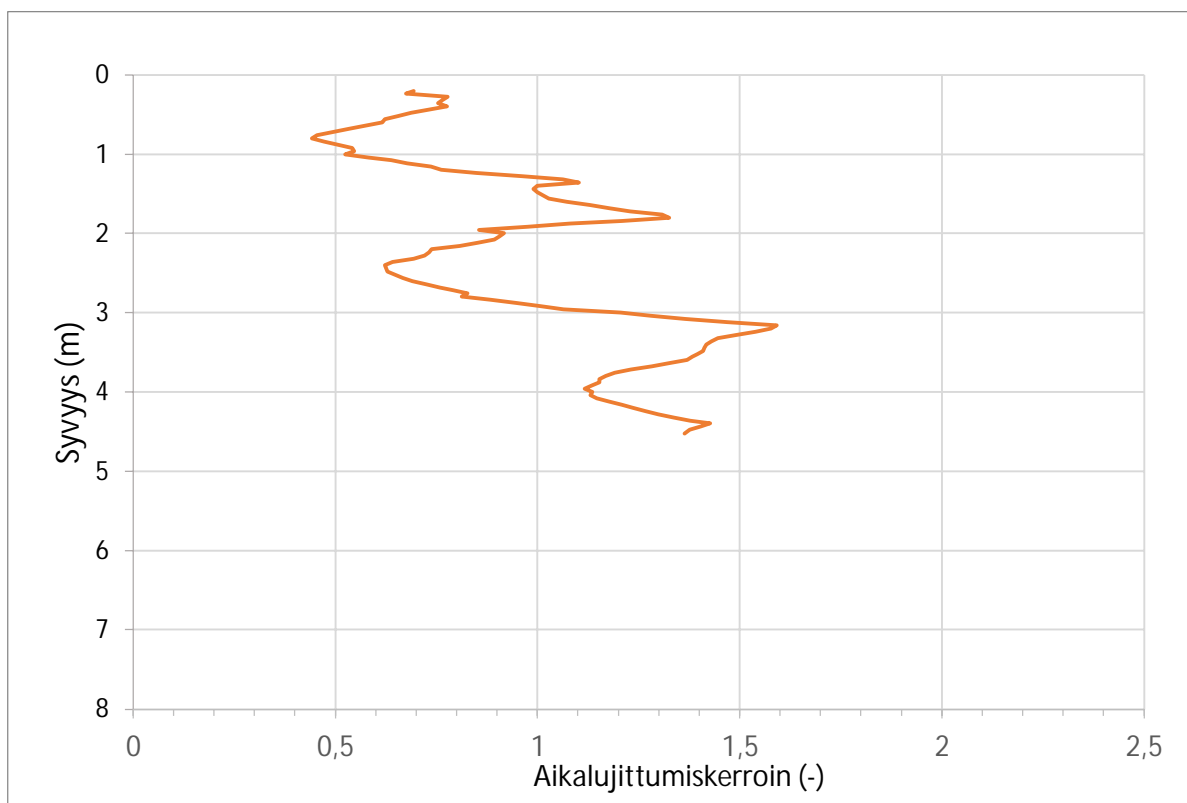
Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvovoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue B2, LT KAI + CEMII 7:3, 160 kg/m<sup>3</sup>.



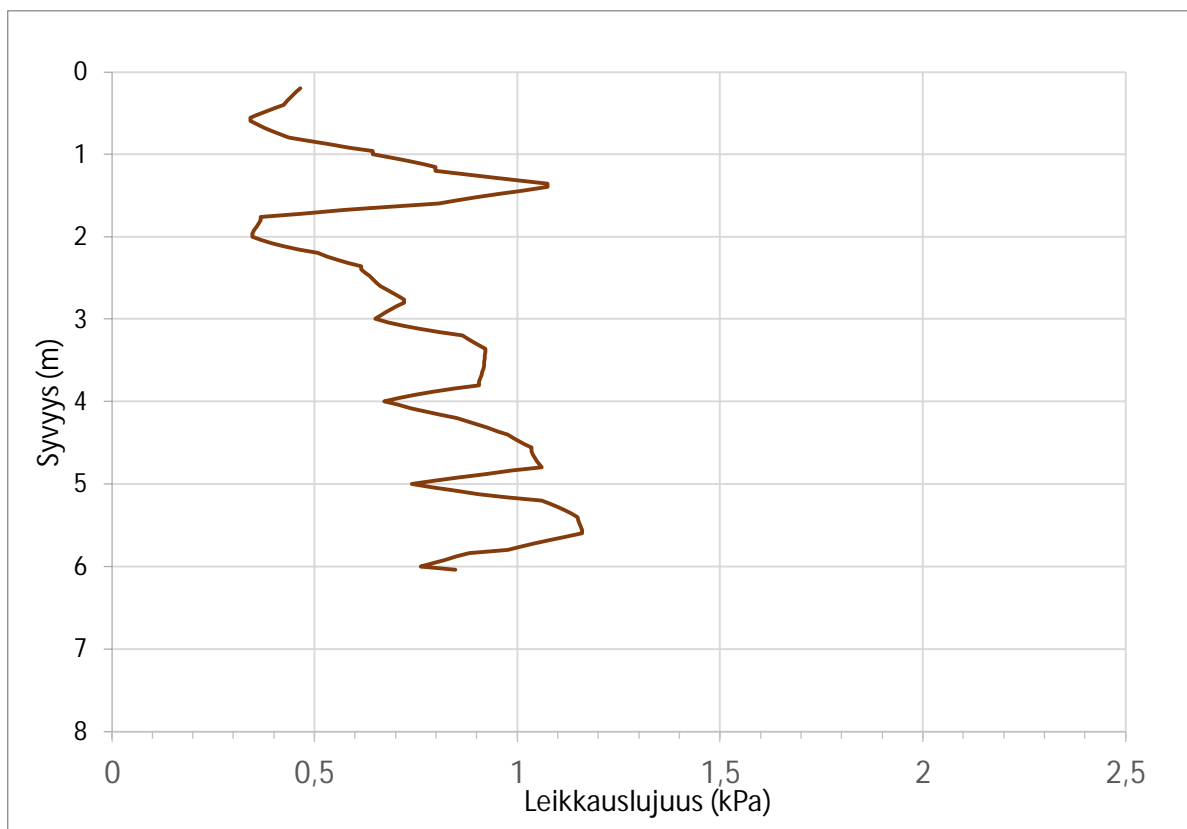
Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvovoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue B3, LT JAM + CEMII 7:3, 120 kg/m<sup>3</sup>.



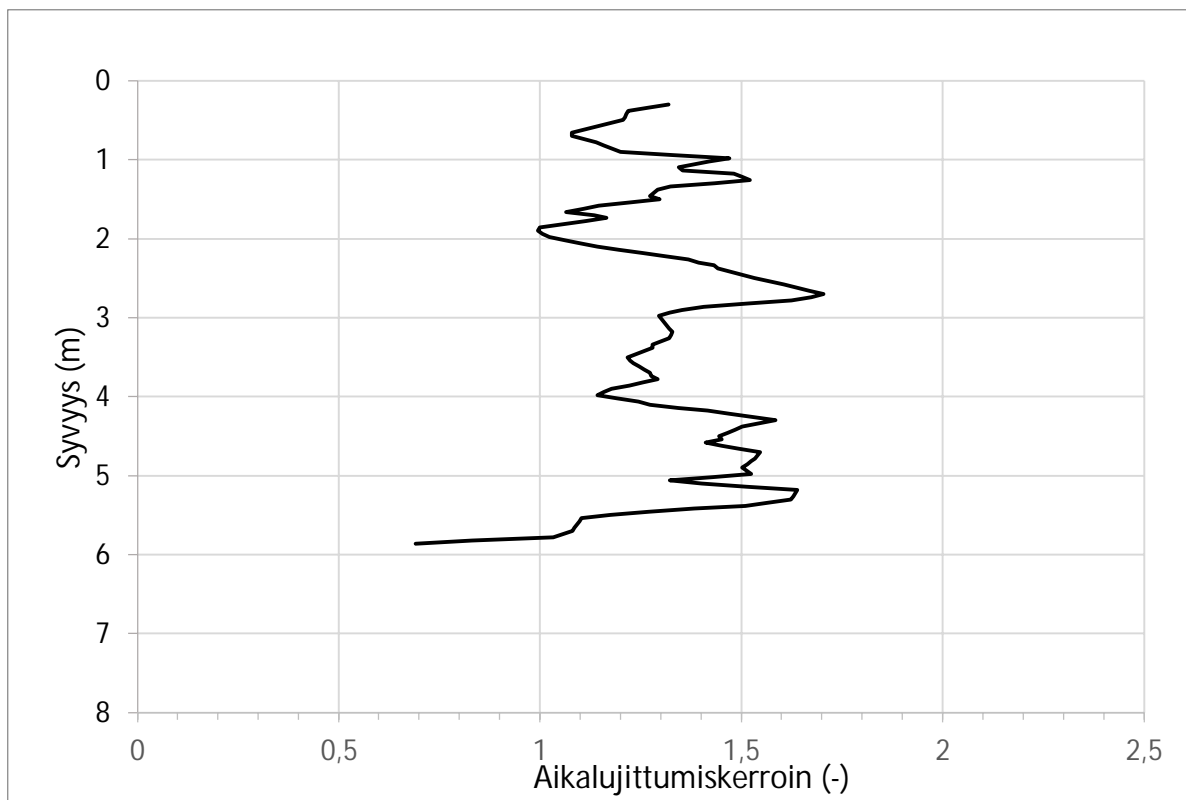
Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvovoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue B4, LT JAM + CEMII 7:3, 160 kg/m<sup>3</sup>.



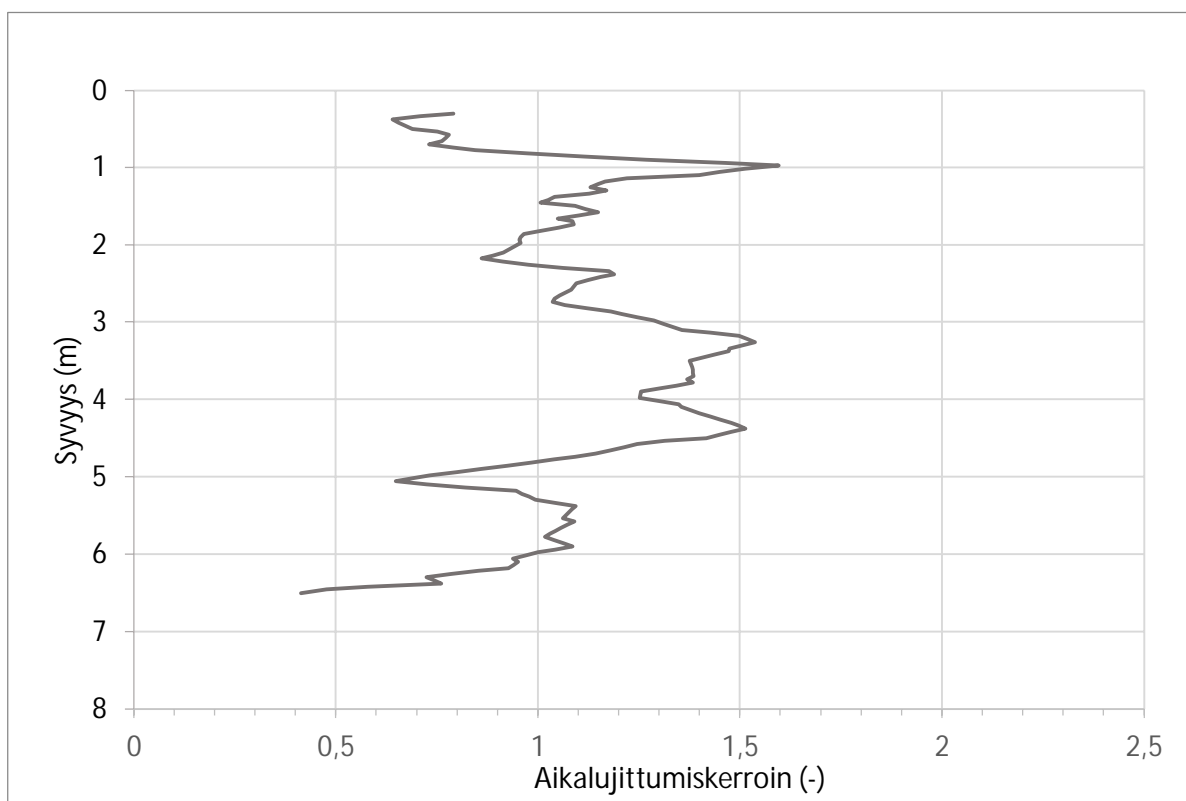
Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue C1, Terra Green, 120 kg/m<sup>3</sup>.



Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue C2, Terra Green, 80 kg/m<sup>3</sup>.

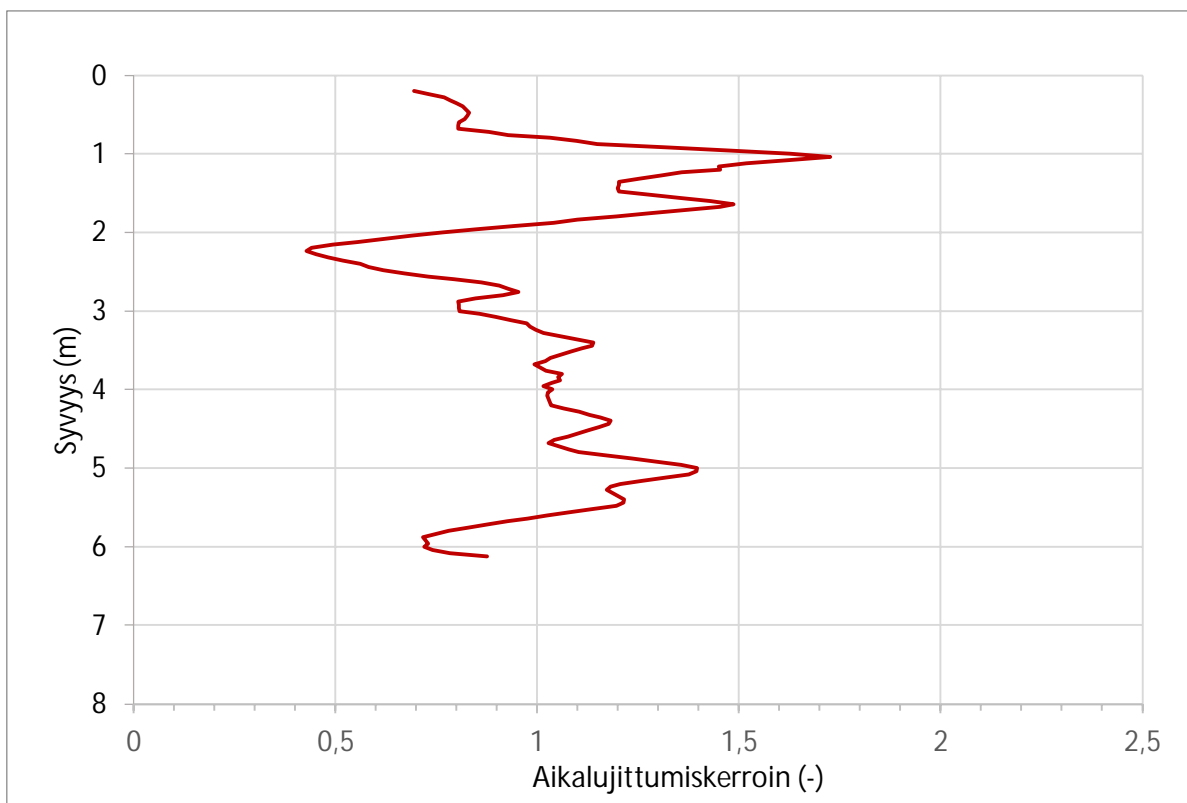


Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue C3, Terra POZ, 120 kg/m<sup>3</sup>.

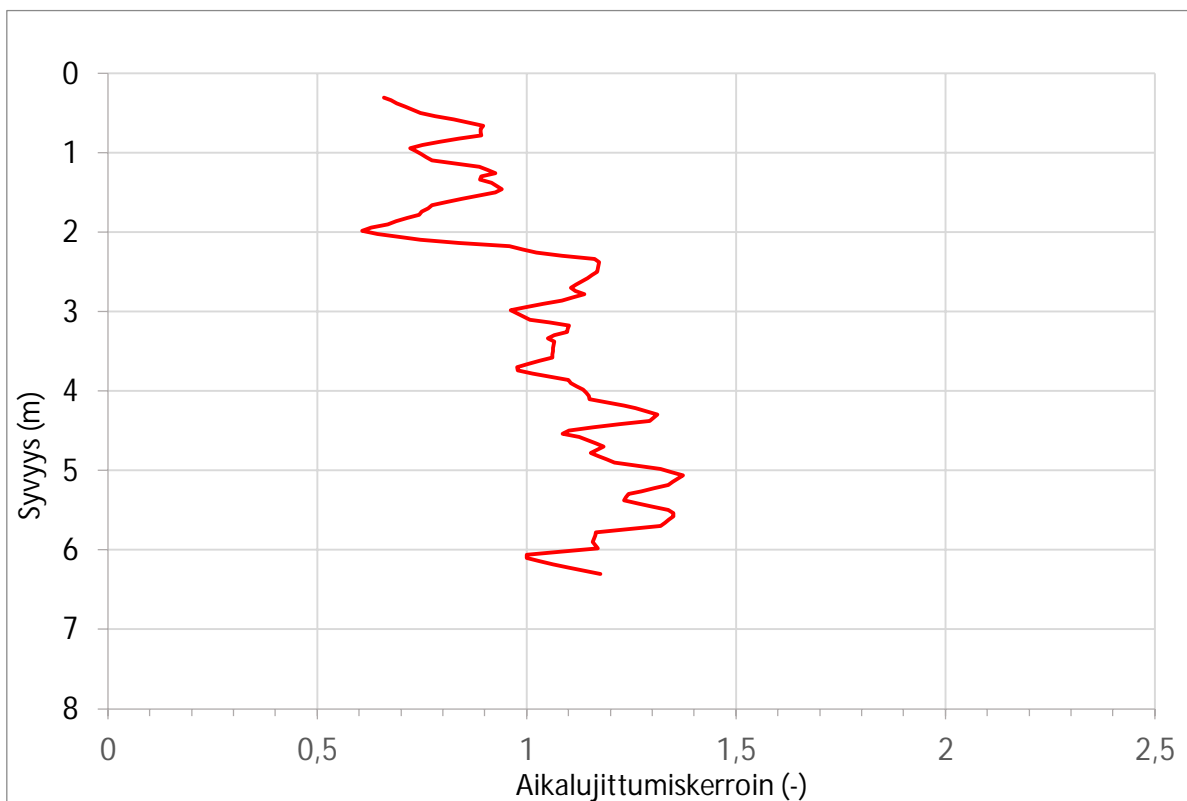


Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue C4, Terra POZ, 80 kg/m<sup>3</sup>.



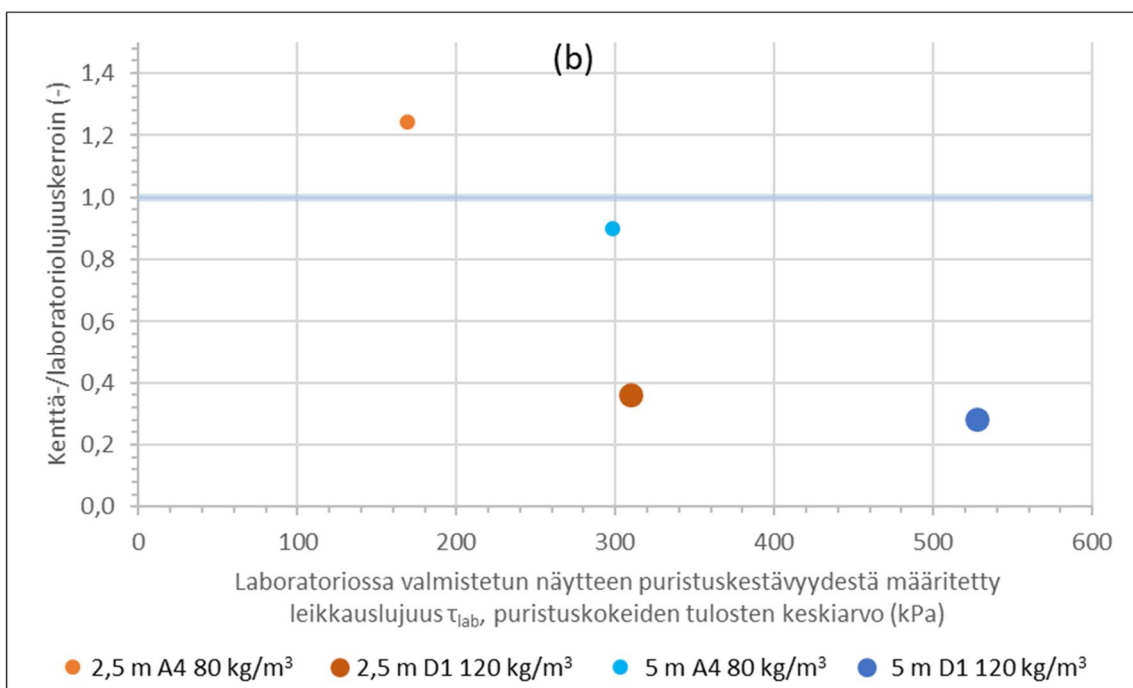
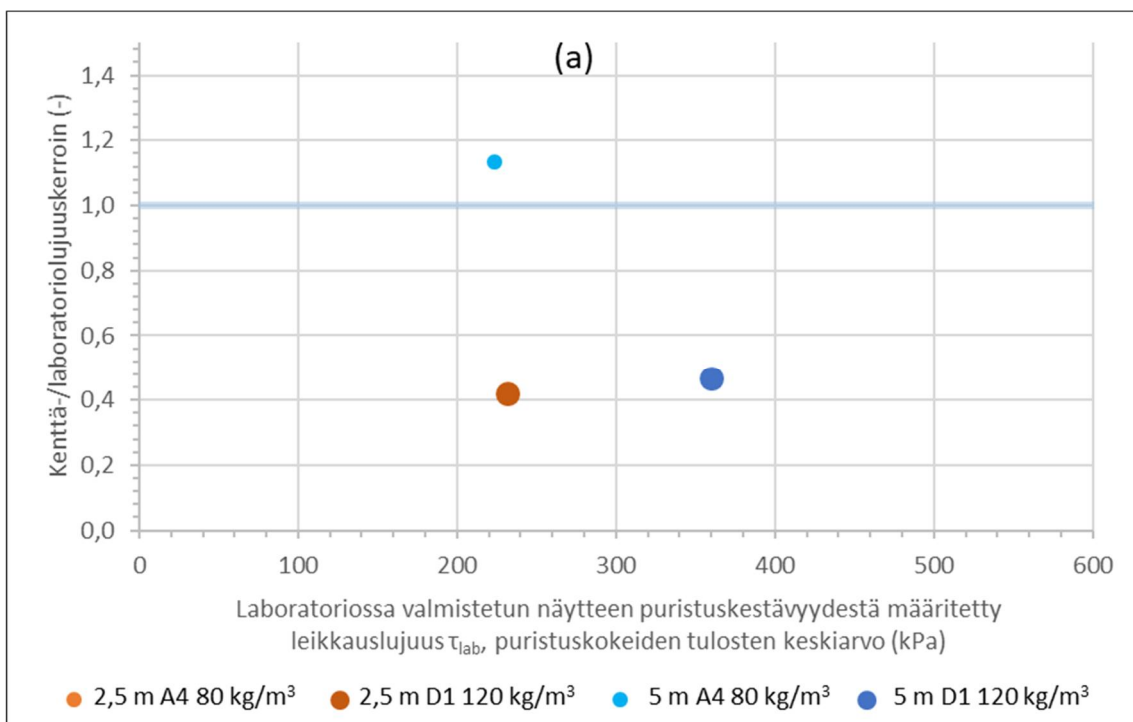


Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue E1, Terra GTC, 120 kg/m<sup>3</sup>.

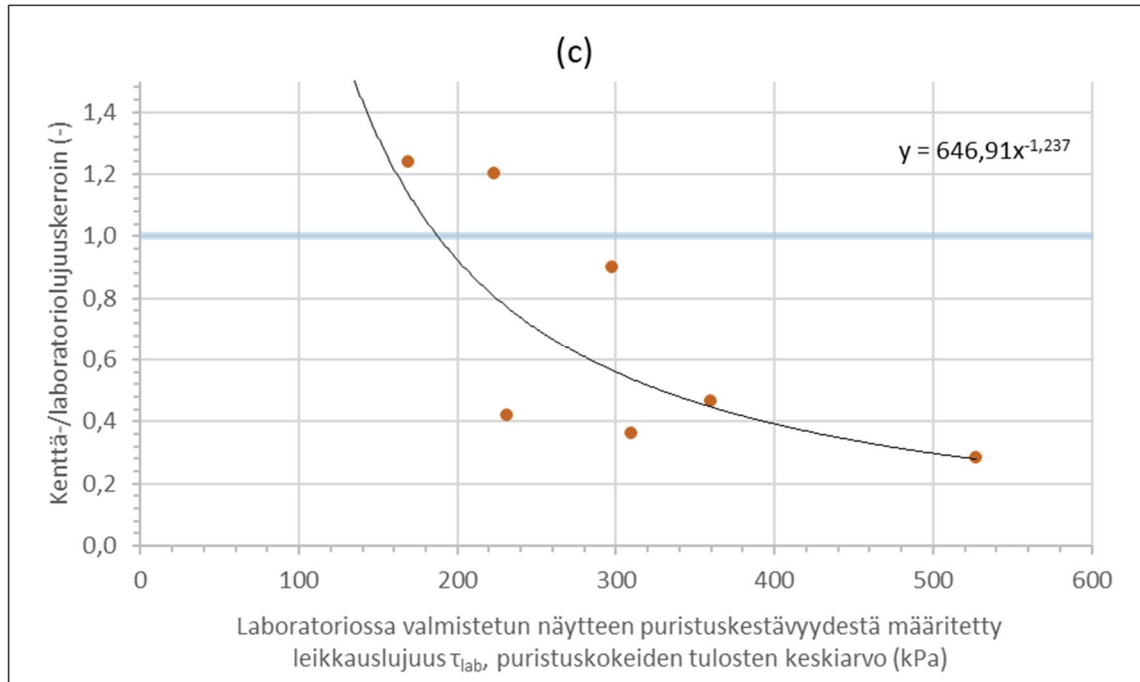


Kuva: Aikalujittumiskertoimet syvyyden suhteen laadunvalvontakairausten keskiarvoleikkauslujuuksista 3 kk / 1 kk. Alue E2, Terra GTC, 80 kg/m<sup>3</sup>.

**Ecolan Oy: Stabi80**

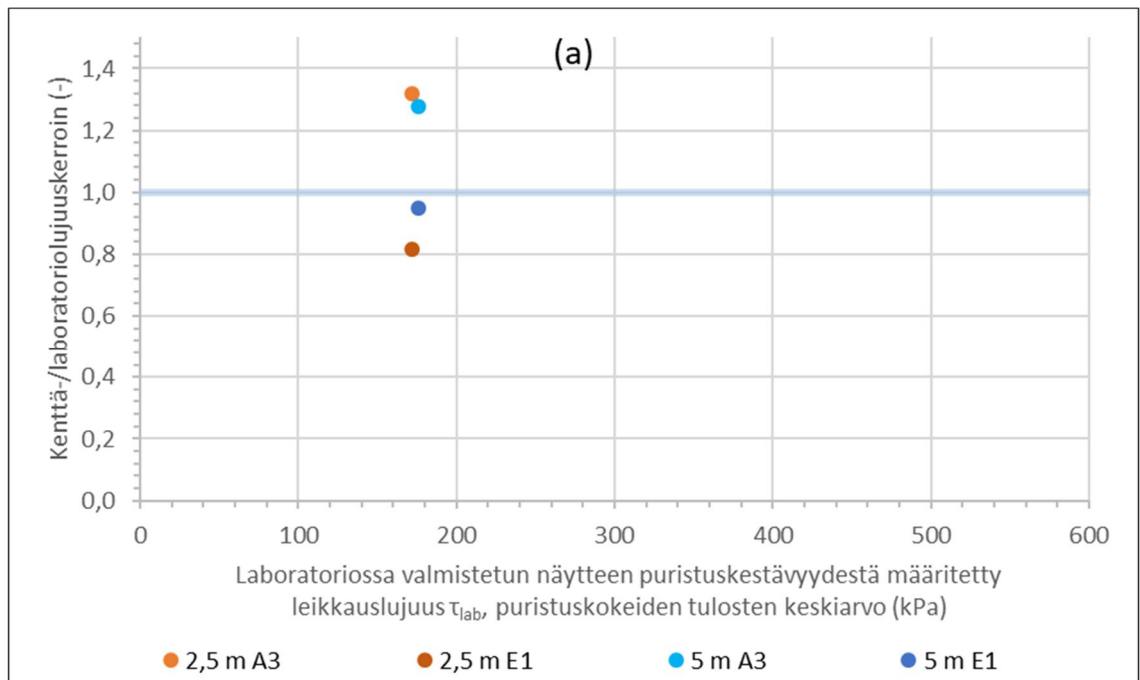


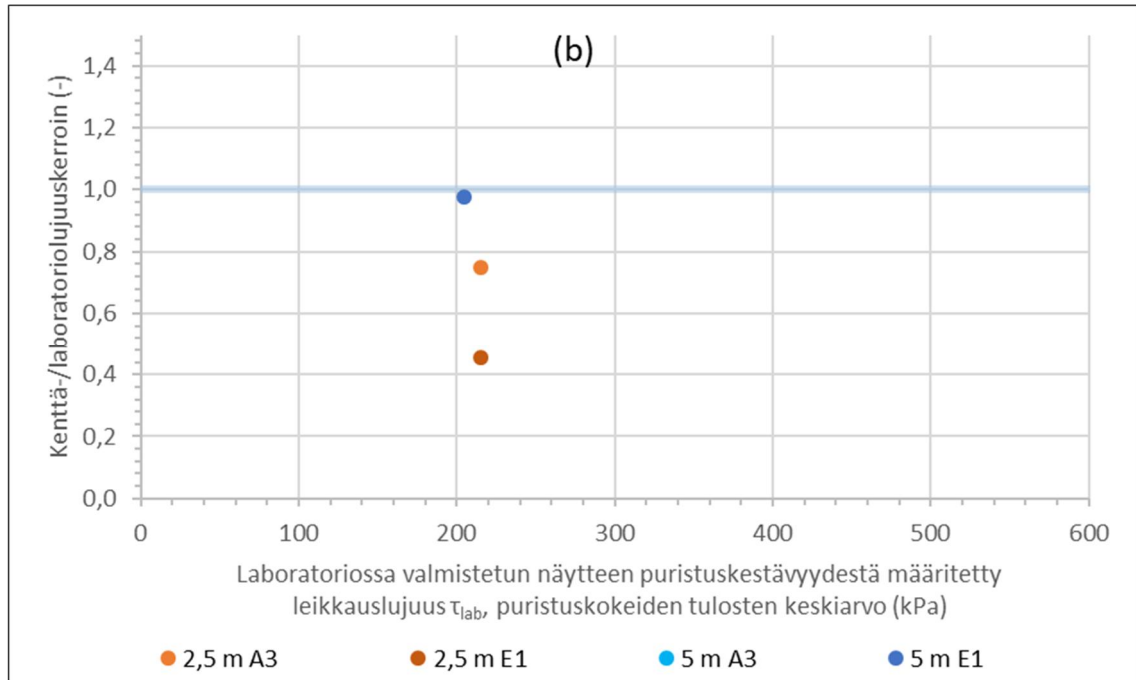
**Kuva 5.17: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$ . Stabi80. 80 ja 120 kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet 1 ja 3 kk (a) 1 kk ja (b) 3 kk tulokset.**



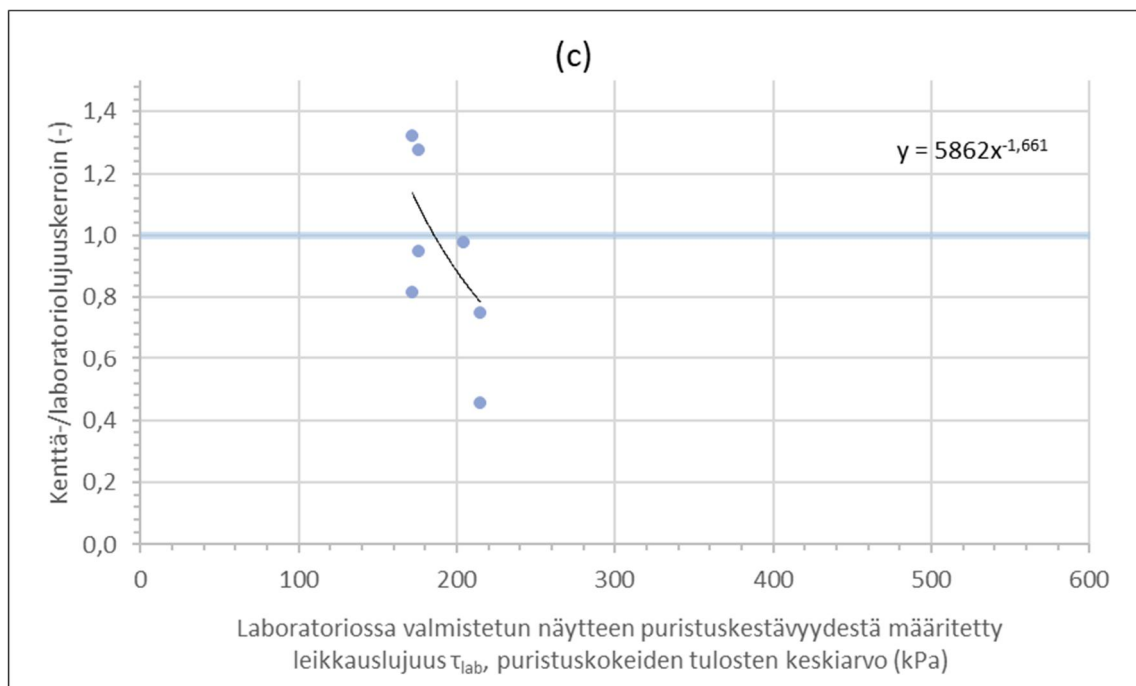
**Kuva 5.18: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$ . Stabi80. 80 ja 120 kg/m<sup>3</sup>. 1 ja 3 kk tulokset sekä kaikkien pisteiden perusteella määritetty trendiviiva ja sen yhtälö.**

**Nordkalk Oy: Terra GTC**



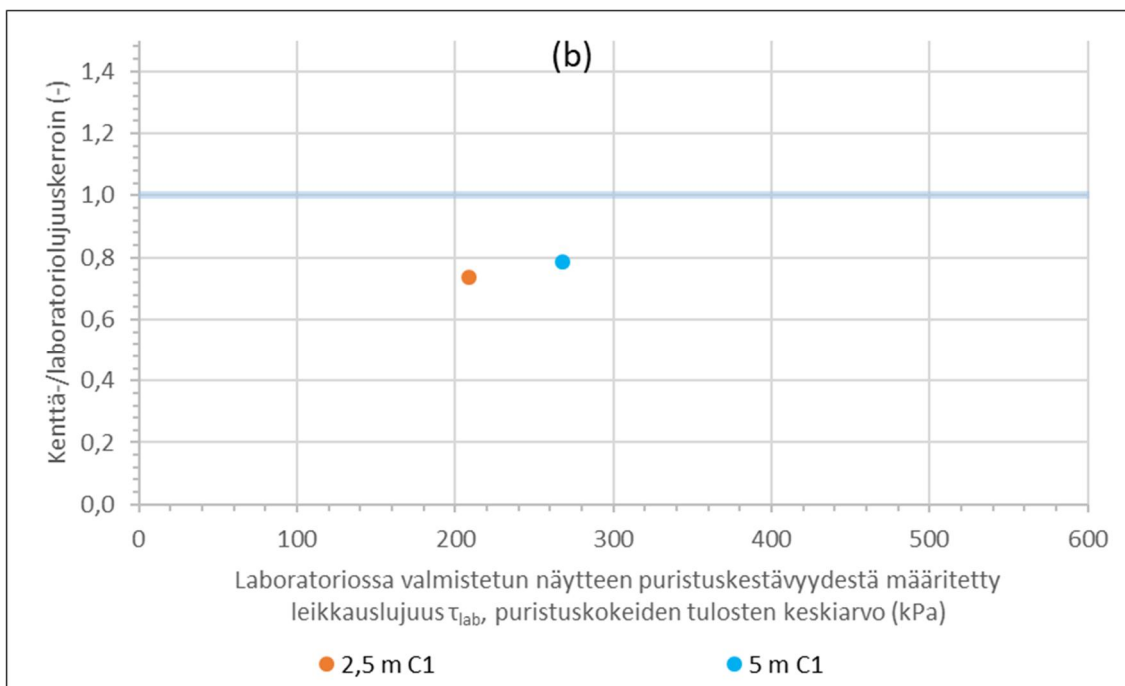
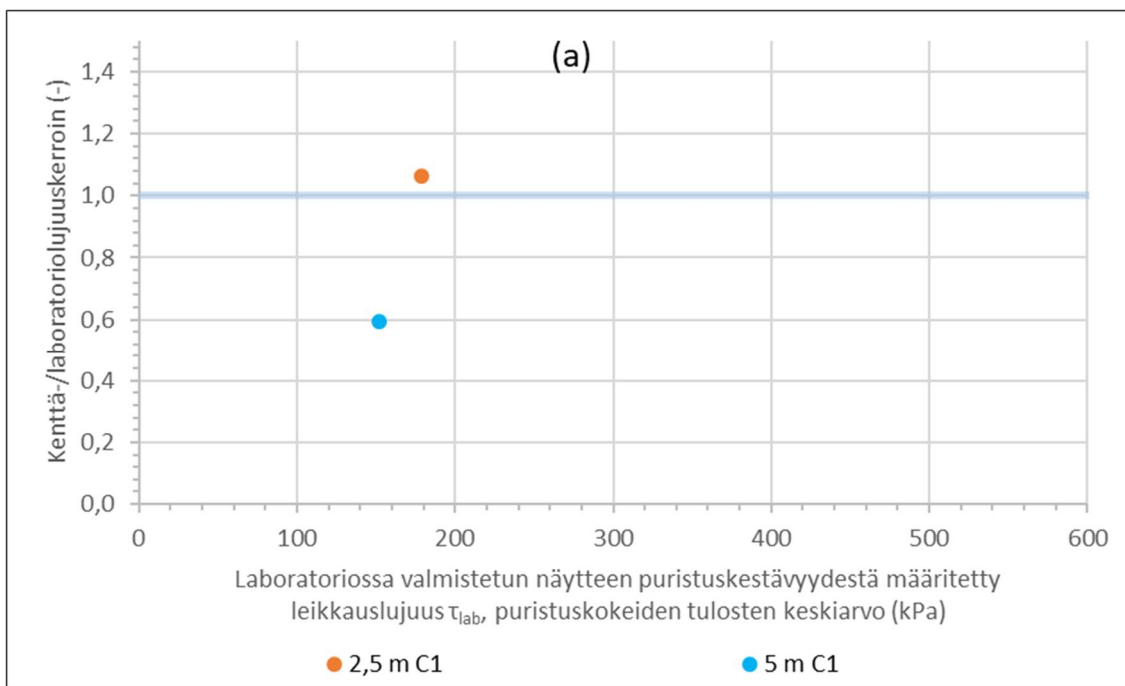


**Kuva 5.19: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_K/L$ . Terra GTC.  $120\text{kg/m}^3$ . Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet (a) 1 kk, (b) 3 kk tulokset.**

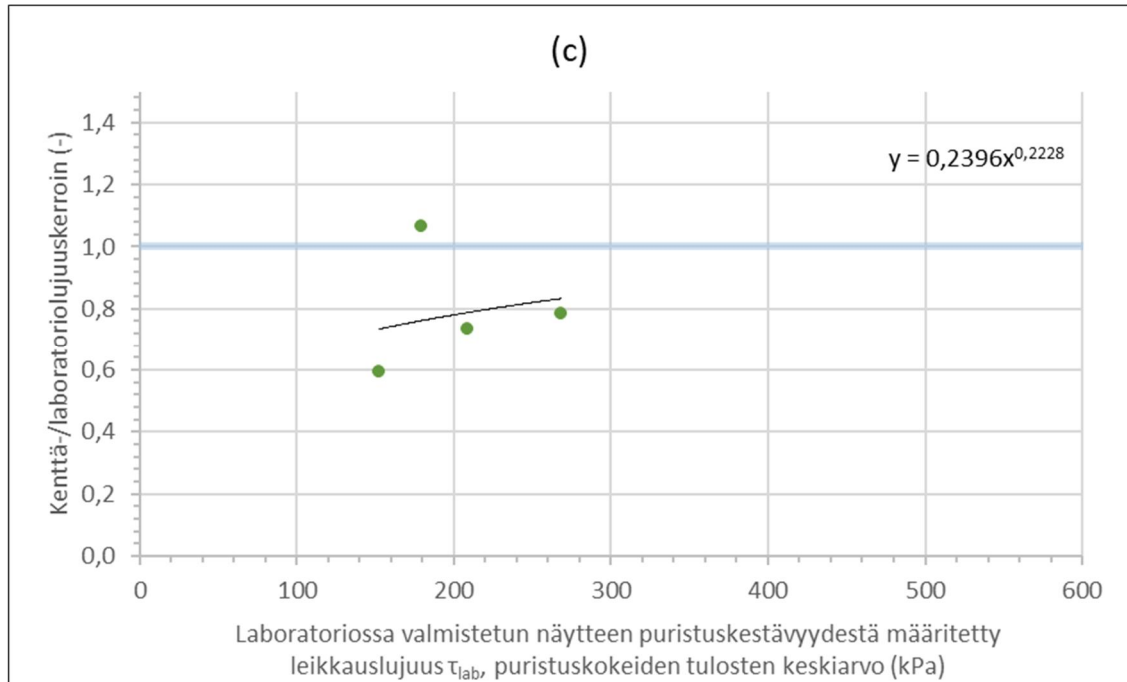


**Kuva 5.20: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_K/L$ . Terra GTC.  $120\text{kg/m}^3$ . 1 ja 3 kk sekä kaikkien pisteiden perusteella määritetty trendiviiva ja sen yhtälö**

**Nordkalk Oy: Terra Green**

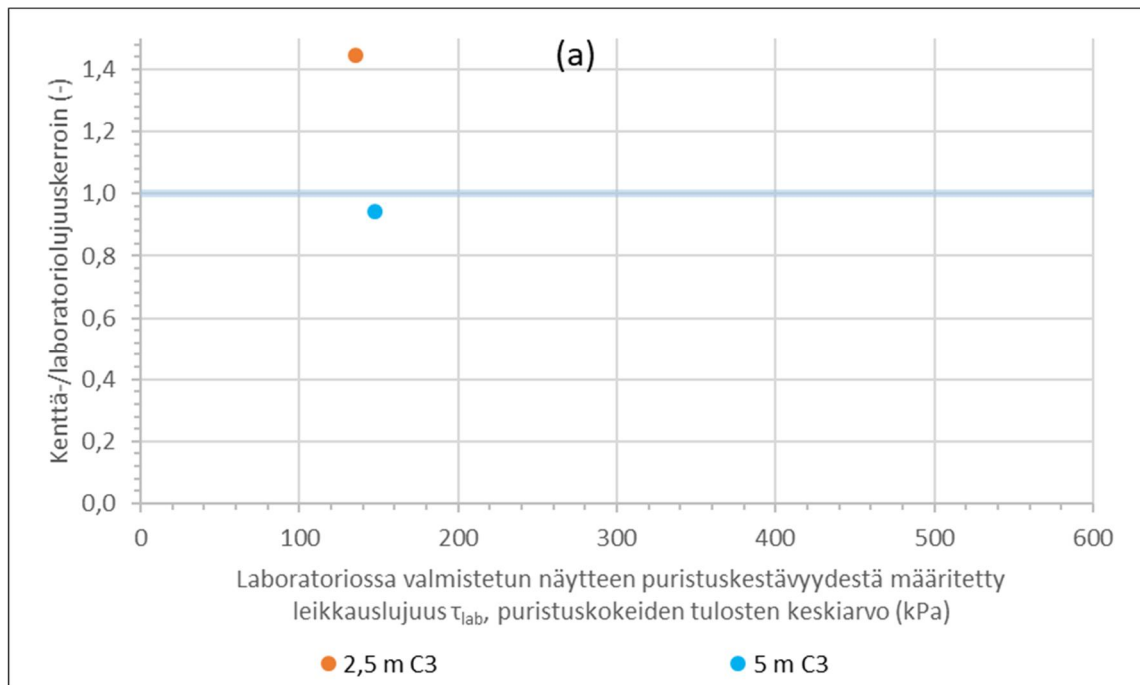


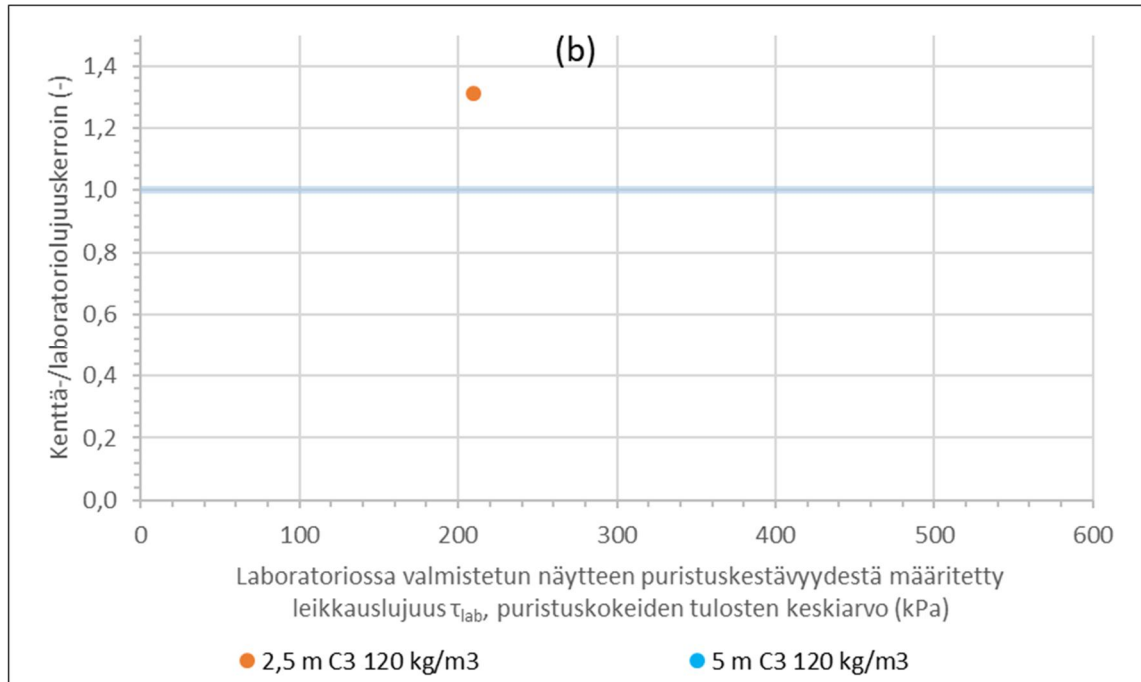
**Kuva 5.21: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$ . Terra Green. 120kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet (a) 1 kk, (b) 3 kk tulokset.**



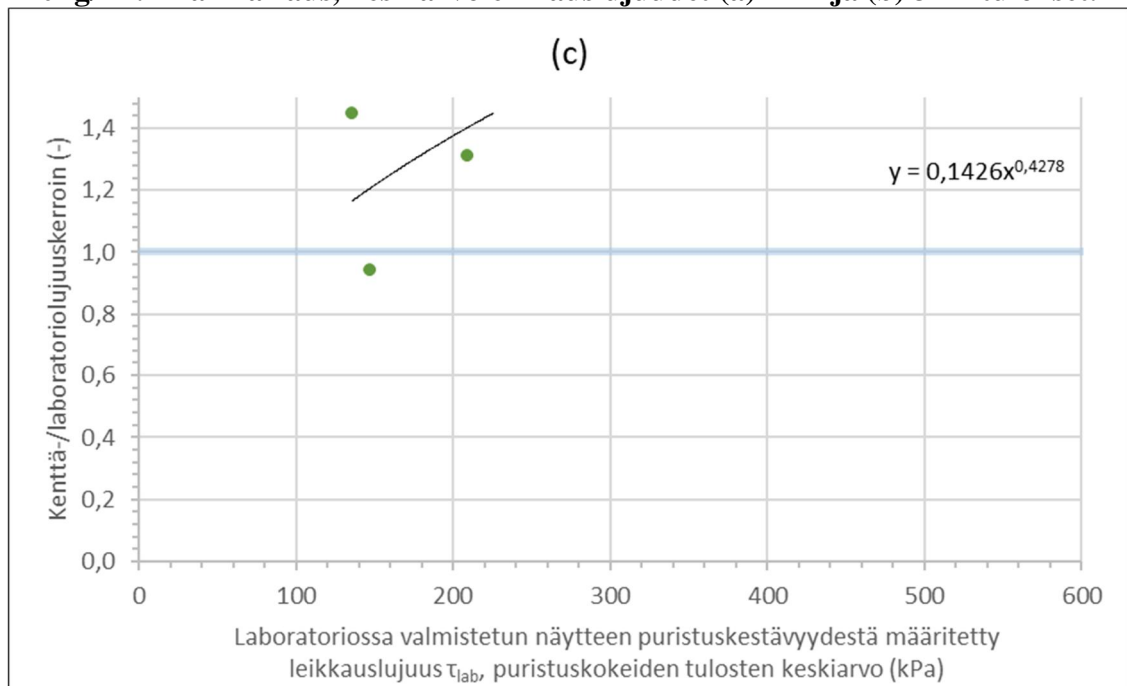
**Kuva 5.22: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{KL}$ . Terra Green.  $120\text{kg/m}^3$ . 1 ja 3 kk sekä kaikkien pisteiden perusteella määritetty trendiviiva ja sen yhtälö.**

**Nordkalk Oy: Terra POZ**



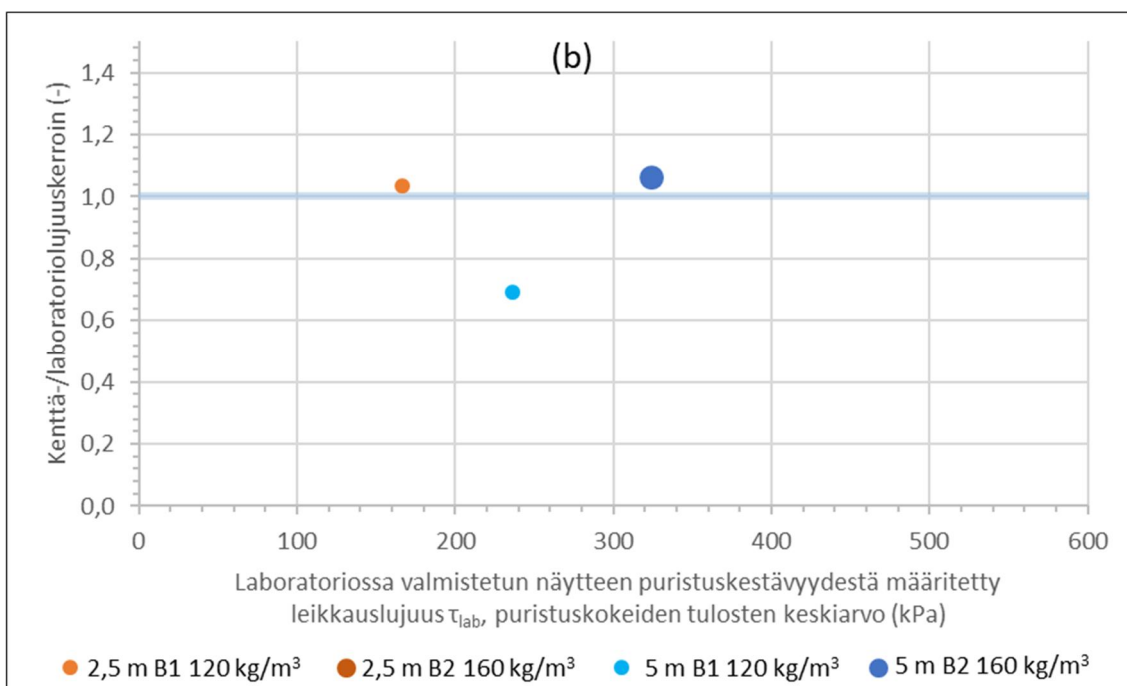
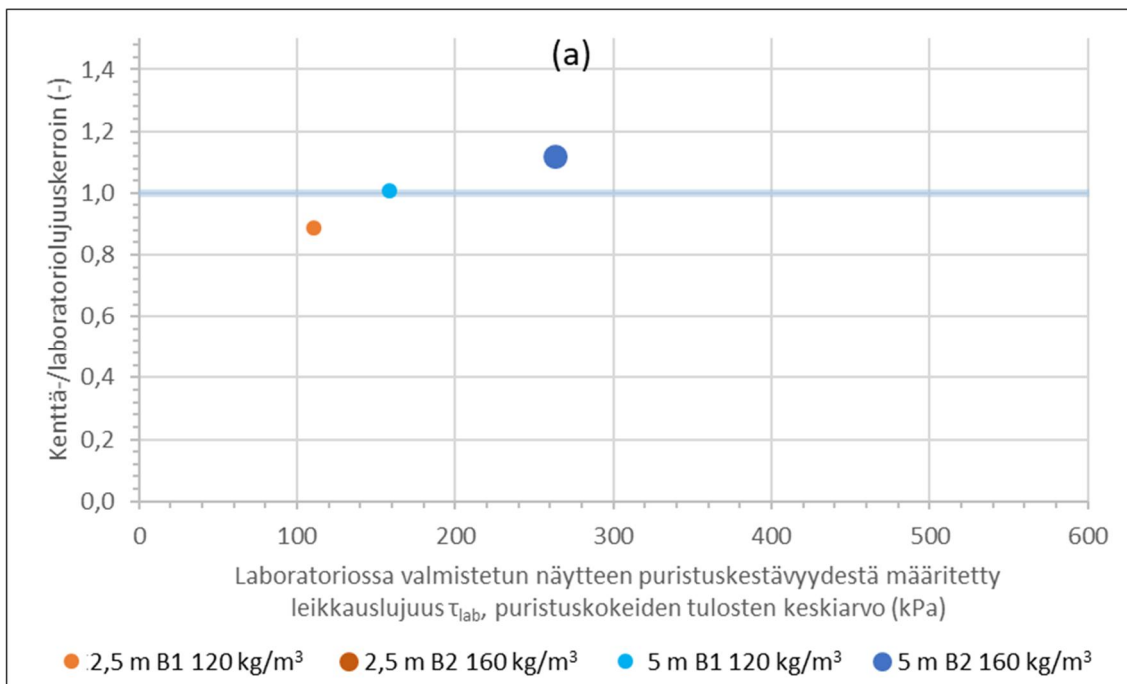


**Kuva 5.23: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$ . Terra POZ. 120kg/m<sup>3</sup>. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet (a) 1 kk ja (b) 3 kk tulokset.**



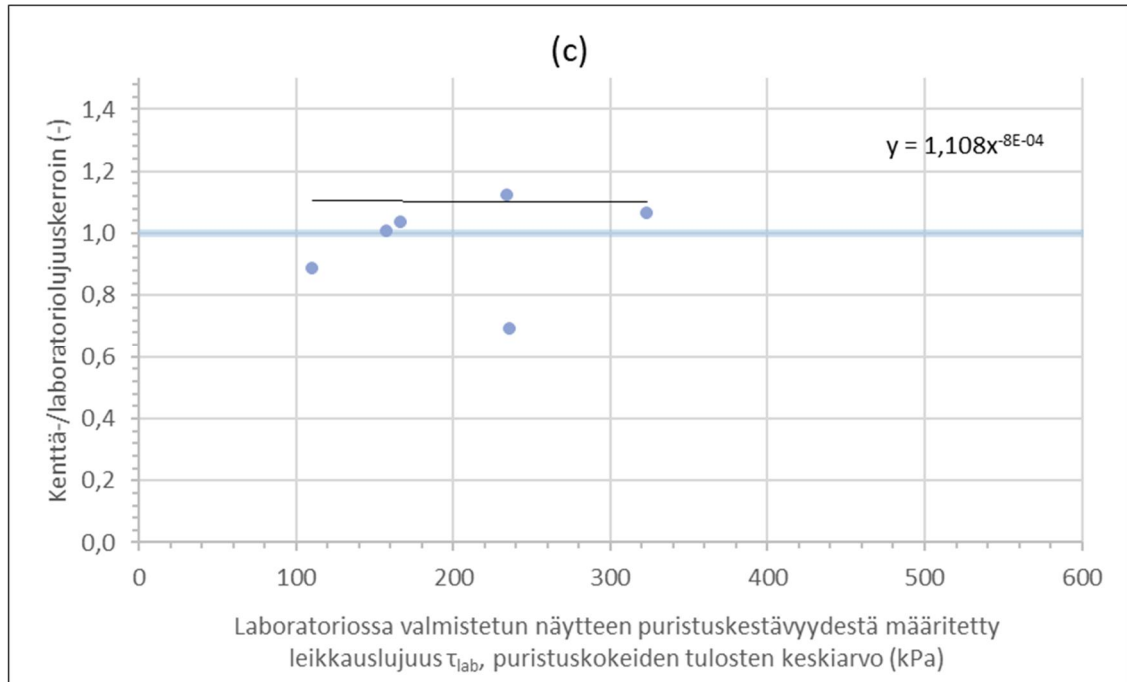
**Kuva 5.24: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$ . Terra POZ. 120kg/m<sup>3</sup>. 1 ja 3 kk sekä kaikkien pisteiden perusteella määritetty trendiviiva ja sen yhtälö.**

**UPM Kymmene Oyj: LT KAI + CEMII 7:3**



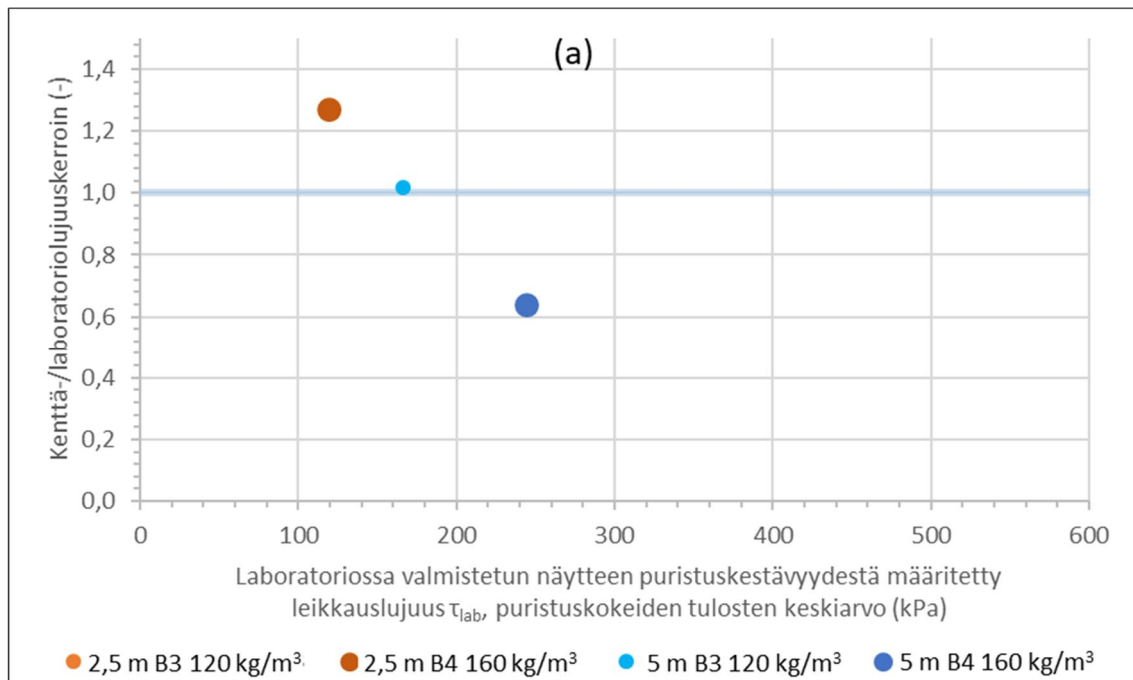
**Kuva 5.25: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$ . LT KAI + CEMII 7:3. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet (a) 1 kk ja (b) 3 kk tulokset.**

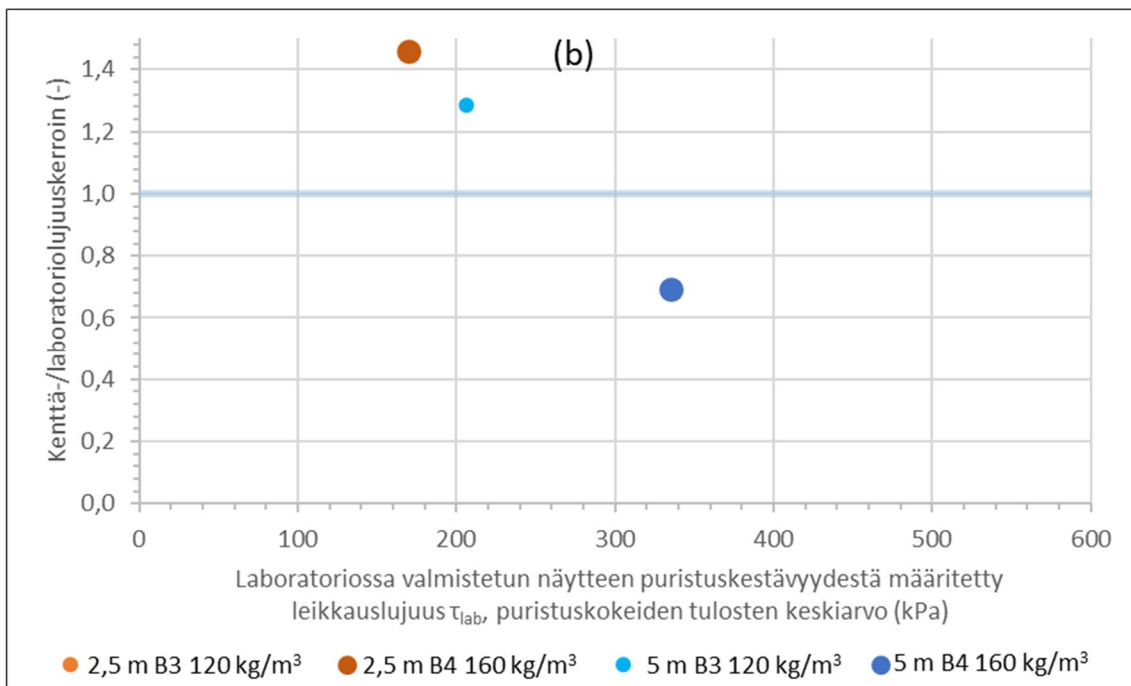




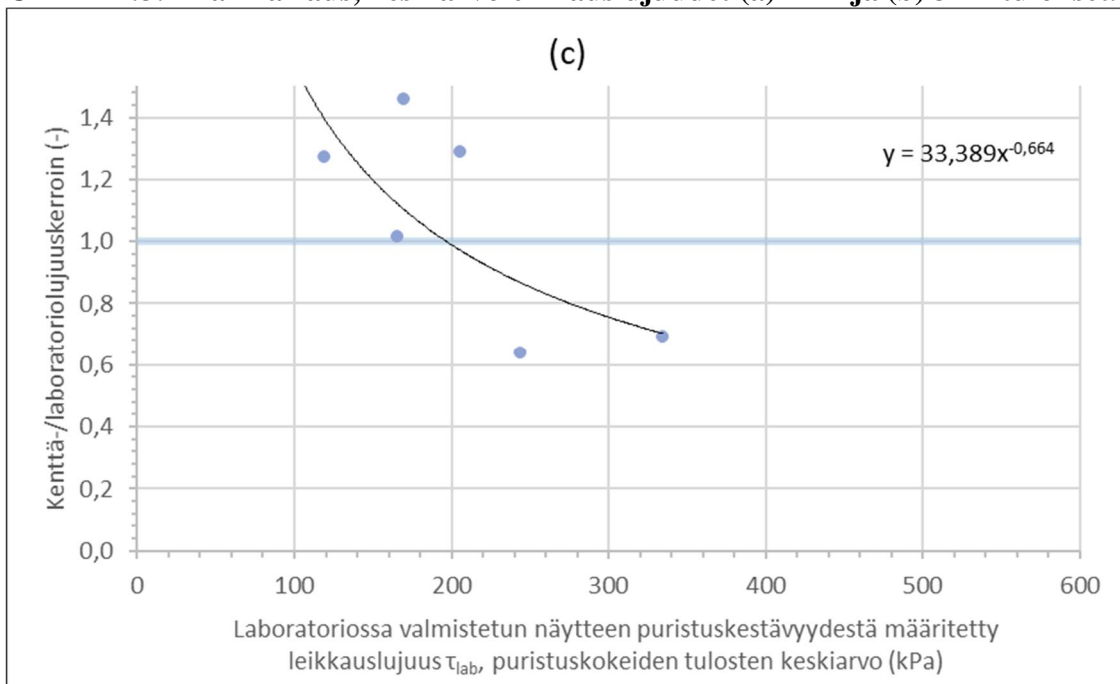
**Kuva 5.26 Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$ . LT KAI + CEMII 7:3. 1 ja 3 kk sekä kaikkien pisteiden perusteella määritetty trendiviiva ja sen yhtälö.**

**UPM Kymmene Oyj: LT JAM + CEMII 7:3**



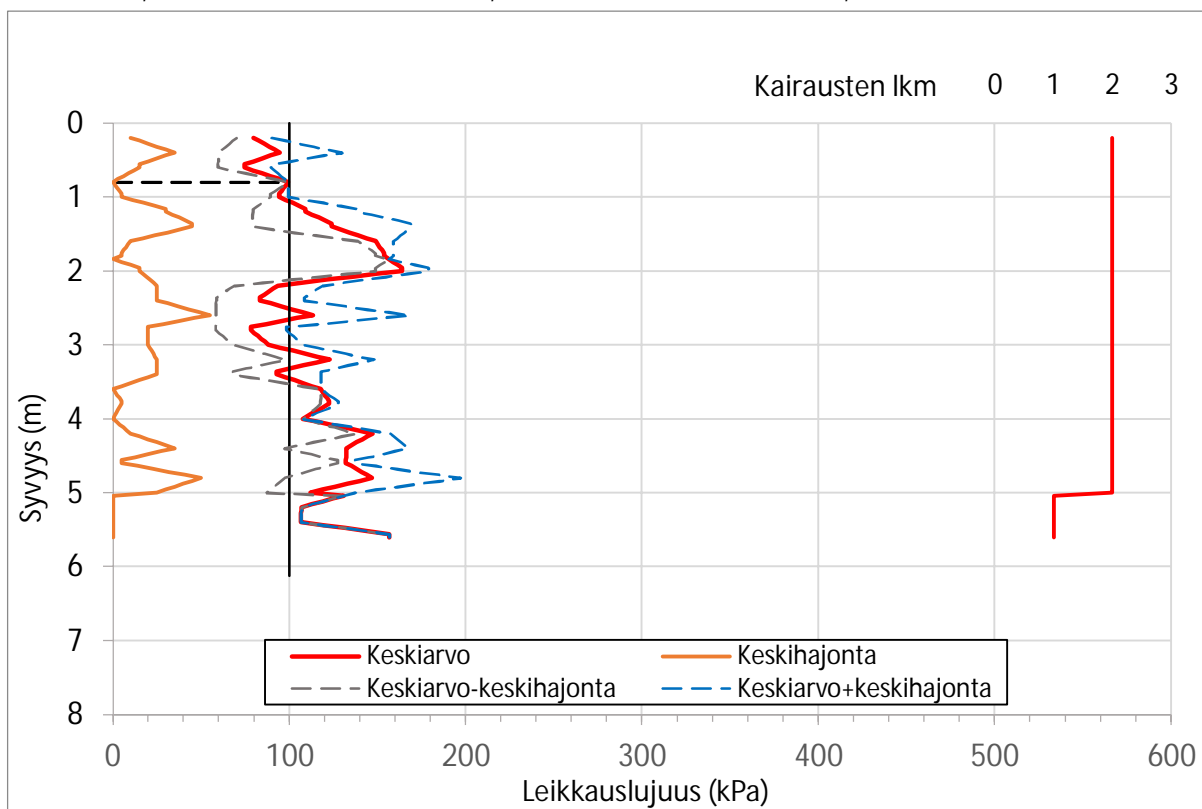


**Kuva 5.27: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$ . LT JAM + CEMII 7:3. Pilarikairaus, keskiarvoleikkauslujuudet (a) 1 kk ja (b) 3 kk tulokset.**

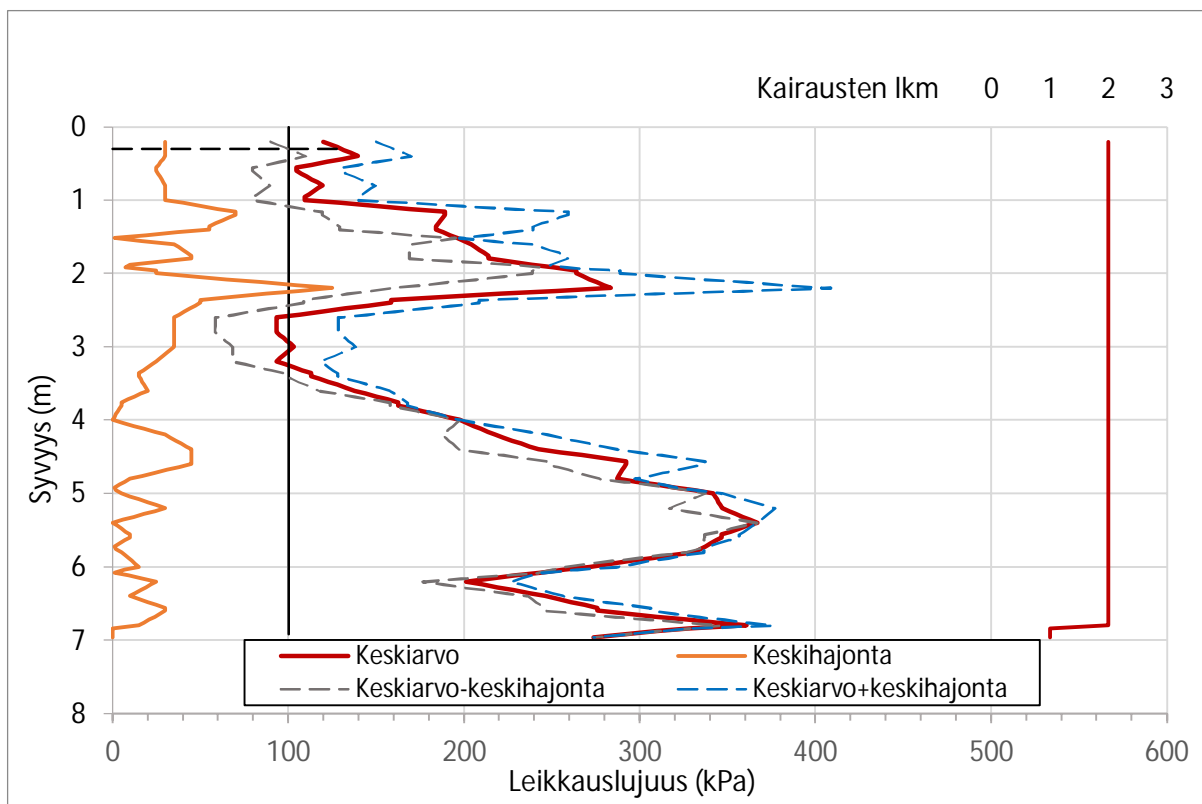


**Kuva 5.28: Kuninkaantammi. Kenttä-/laboratoriolujuuskerroin  $k_{K/L}$ . LT JAM + CEMII 7:3. 1 ja 3 kk sekä kaikkien pisteiden perusteella määritetty trendiviiva ja sen yhtälö.**

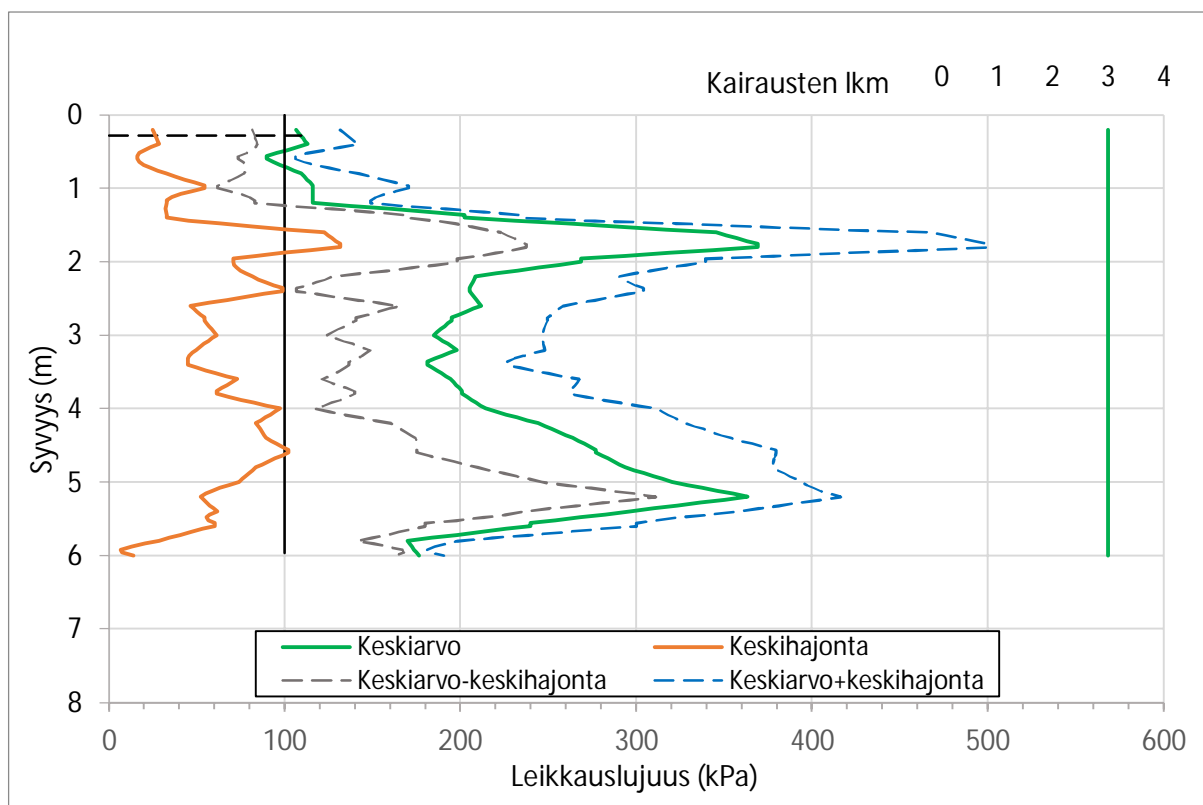
KESKIARVO, KESKIARVO-KESKIHAJONTA, KESKIARVO+KESKIHAJONTA, KESKIHAJONTA



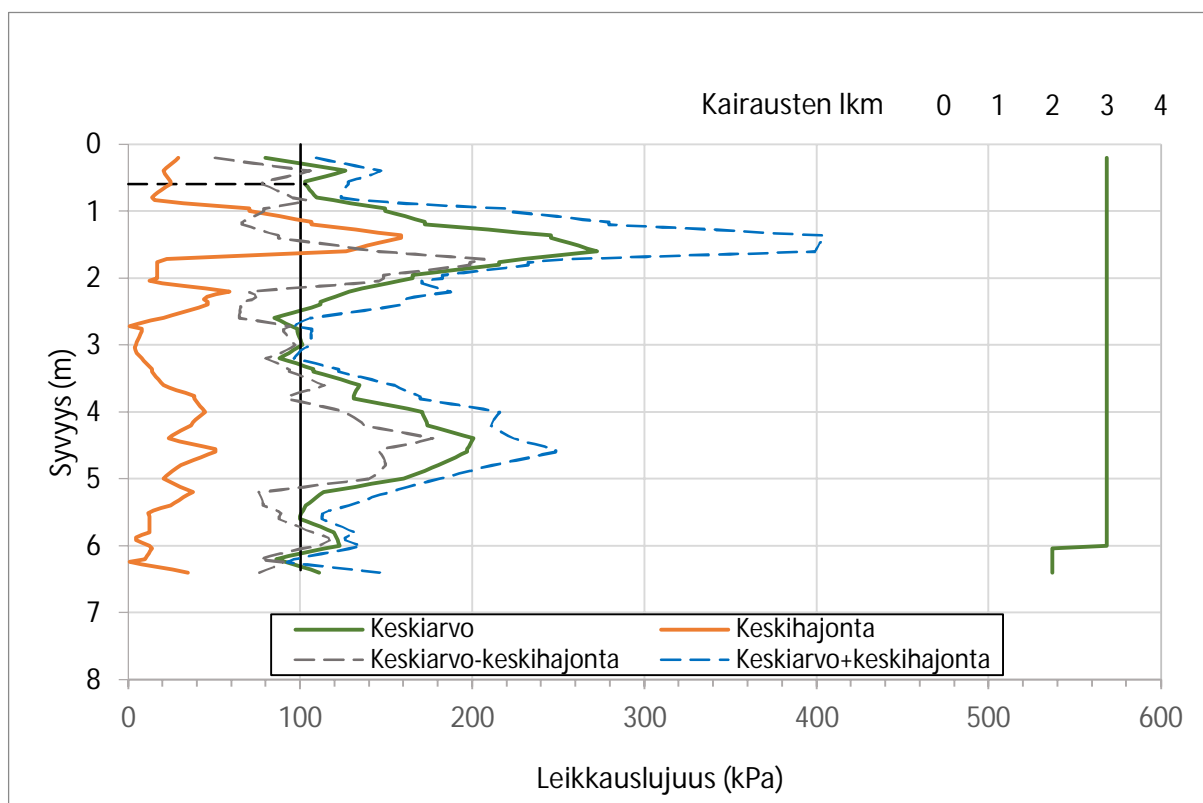
Kuva: A2, GTC, 80kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



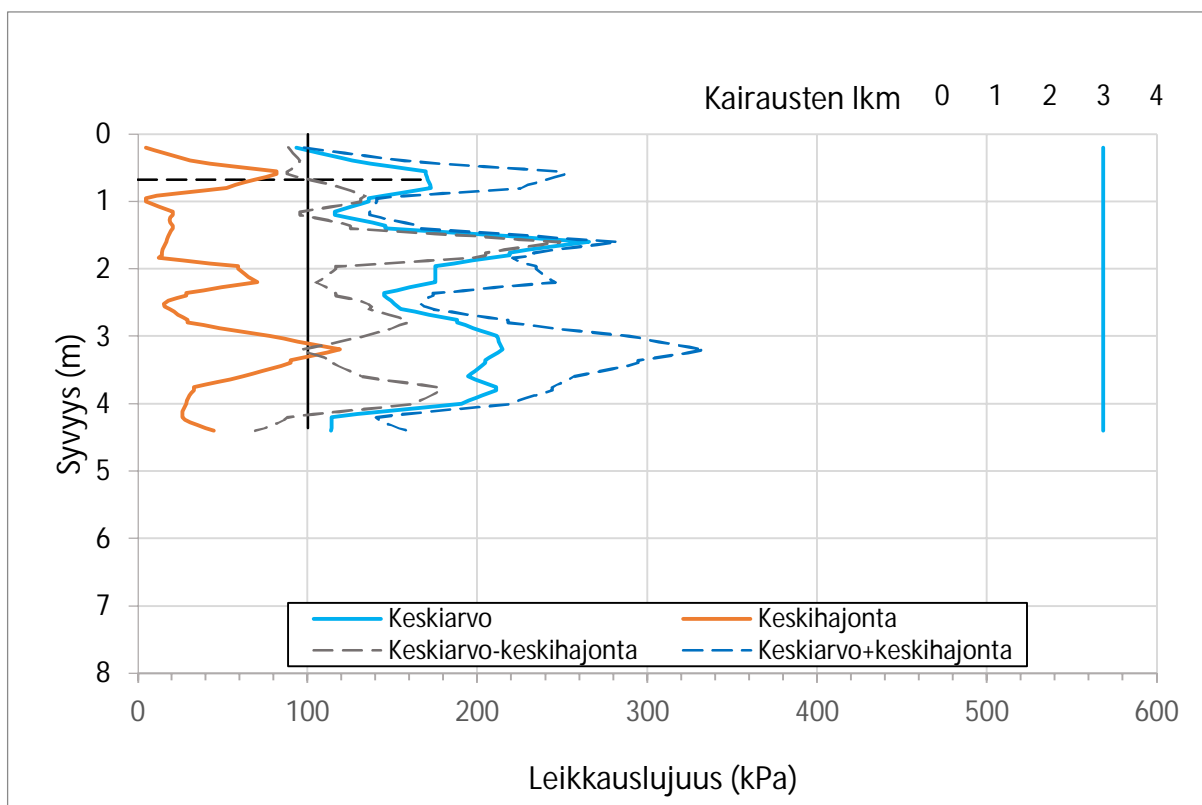
Kuva: A3, GTC, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



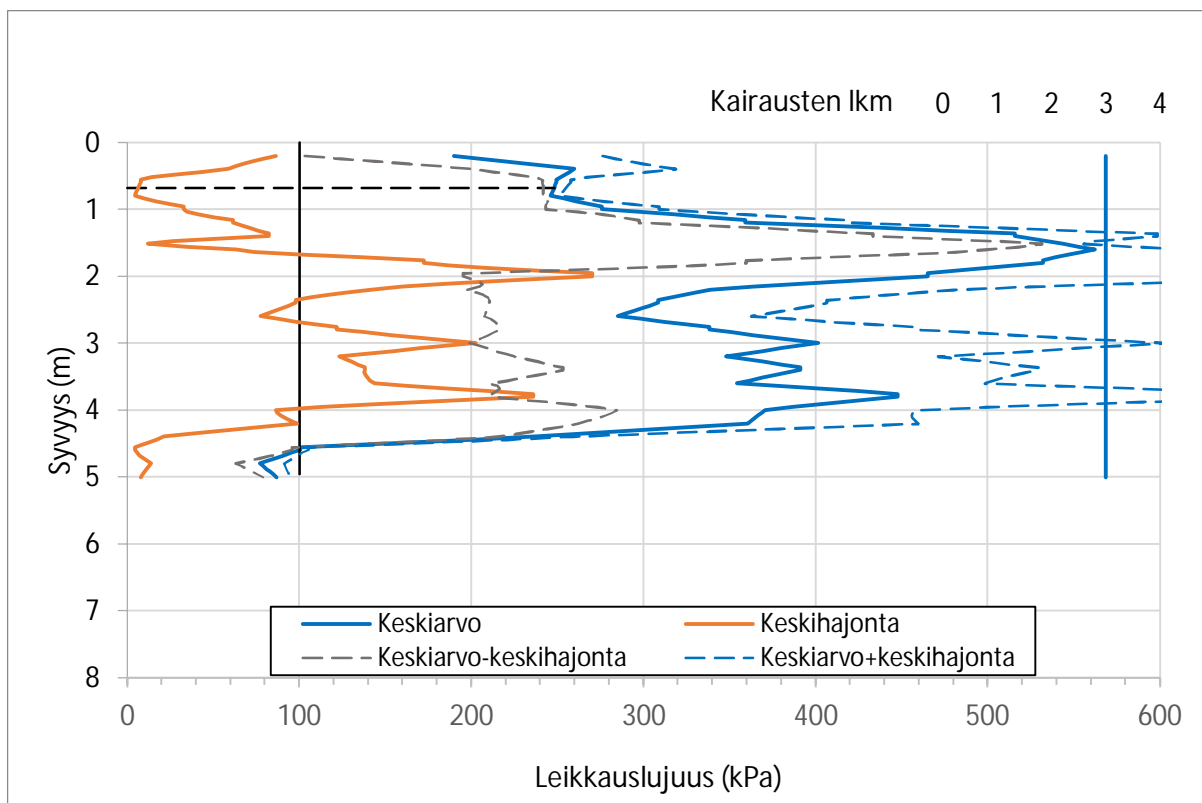
Kuva: A4, Stabi80, 80kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



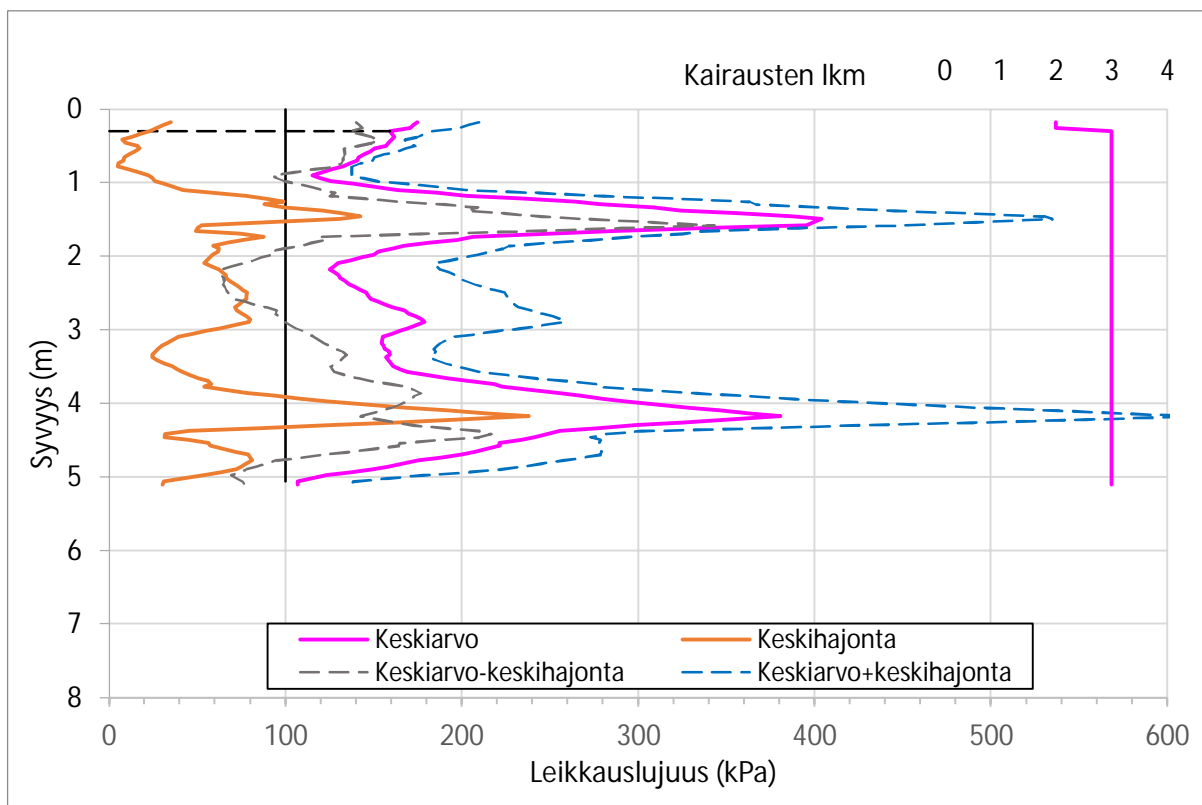
Kuva: D1, Stabi80, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



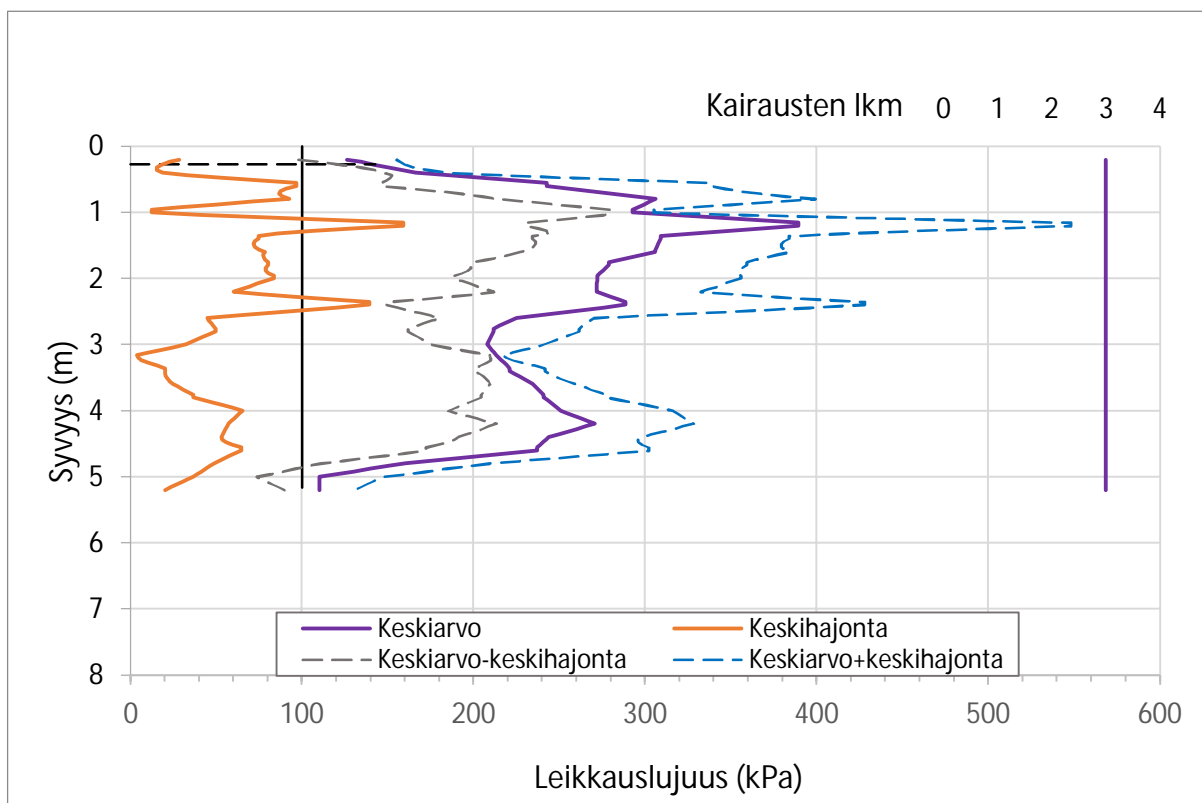
Kuva: B1, LT KAI, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



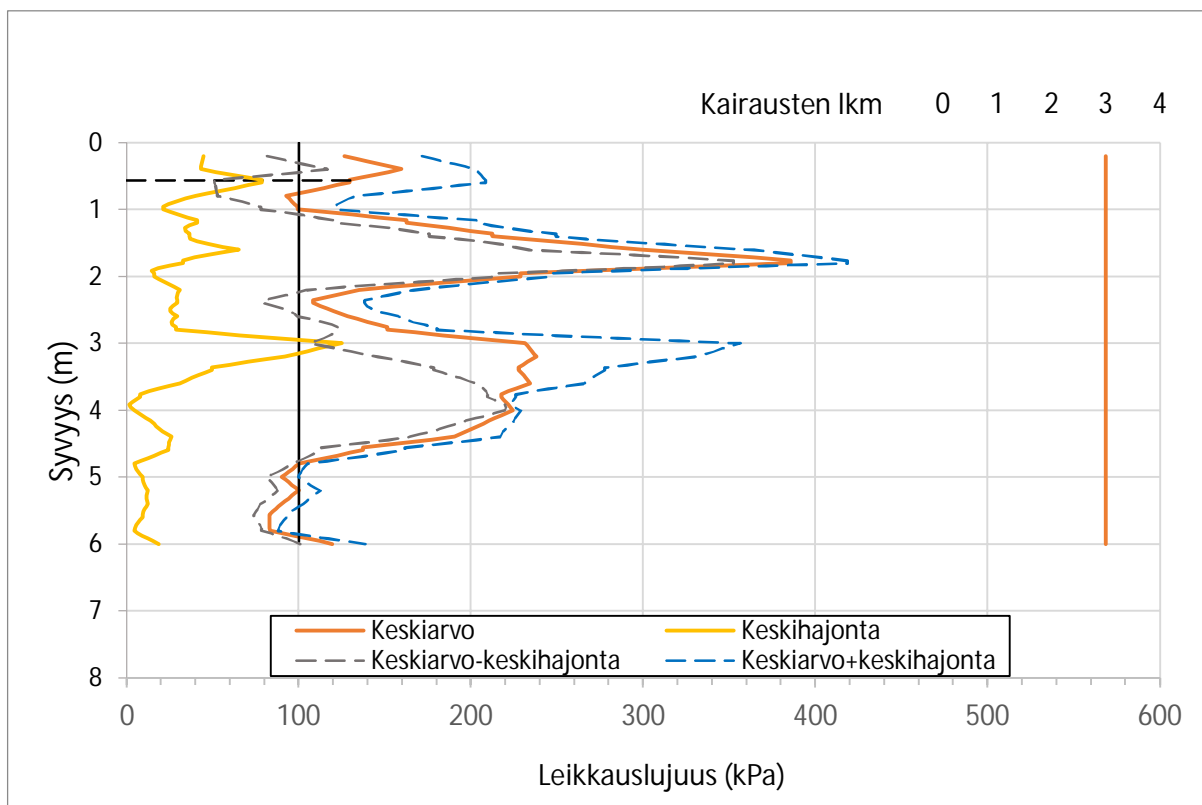
Kuva: B2, LT KAI, 160kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



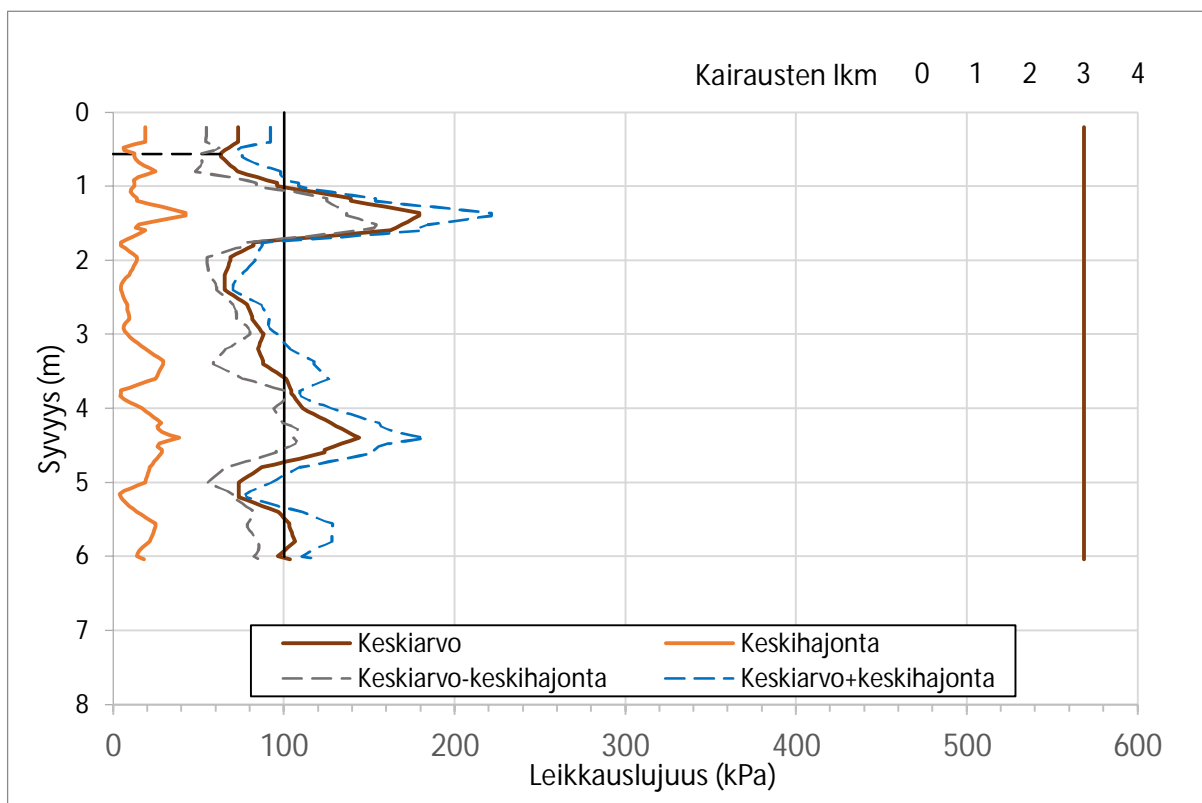
Kuva: B3, LT JAM, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



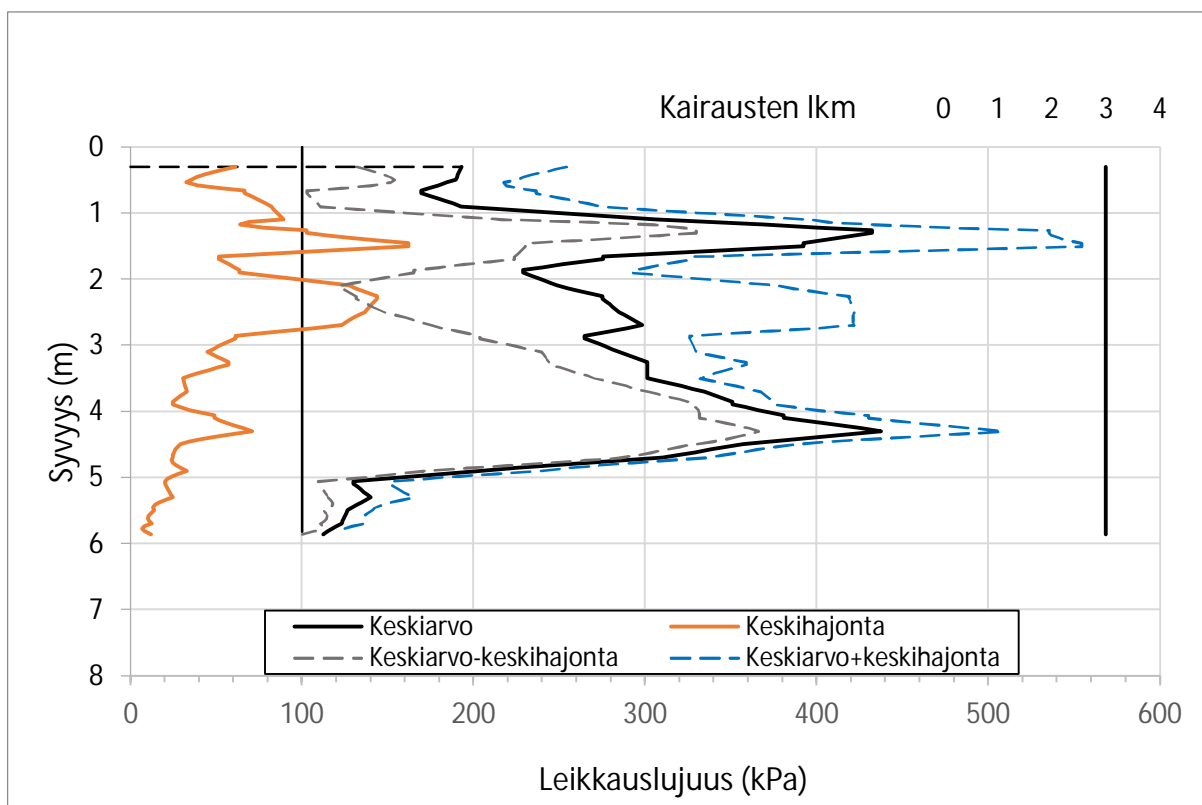
Kuva: B4, LT JAM, 160kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



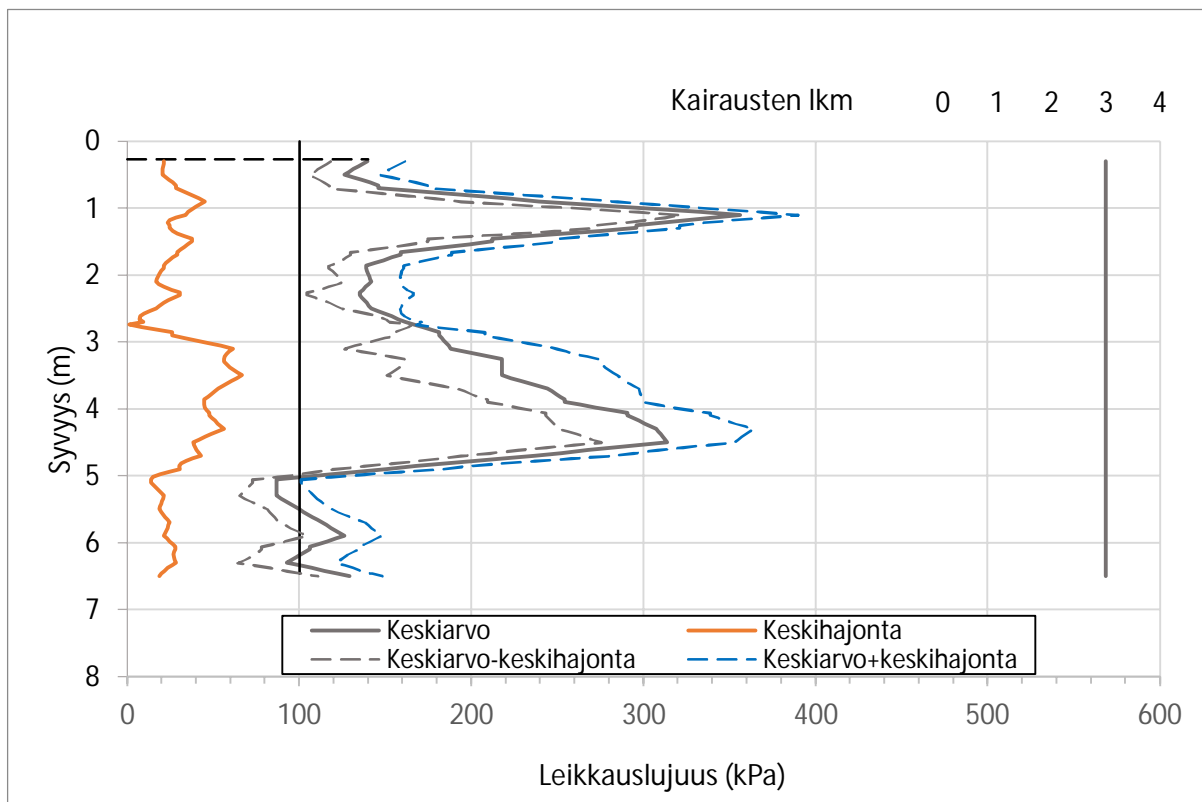
Kuva: C1, Terra Green, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



Kuva: C2, Terra Green, 80kg/m<sup>3</sup>, 3 kk

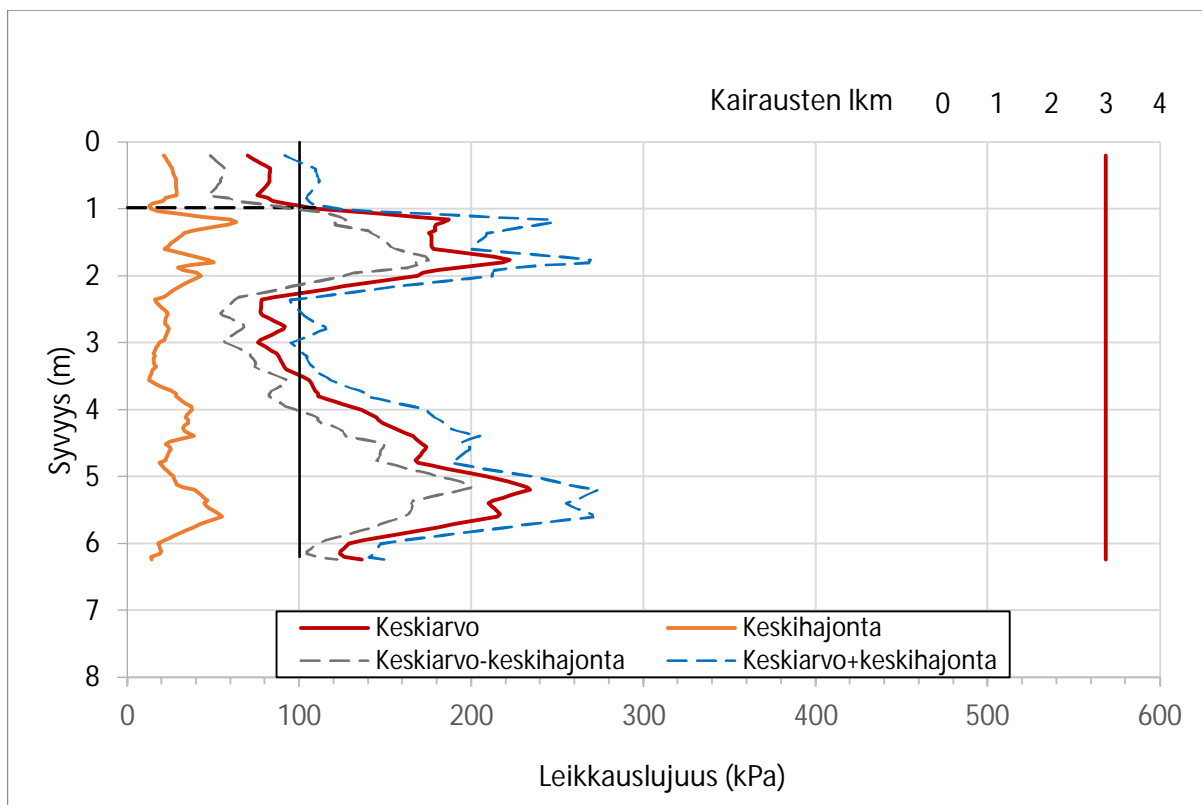


Kuva: C3, Terra POZ, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk

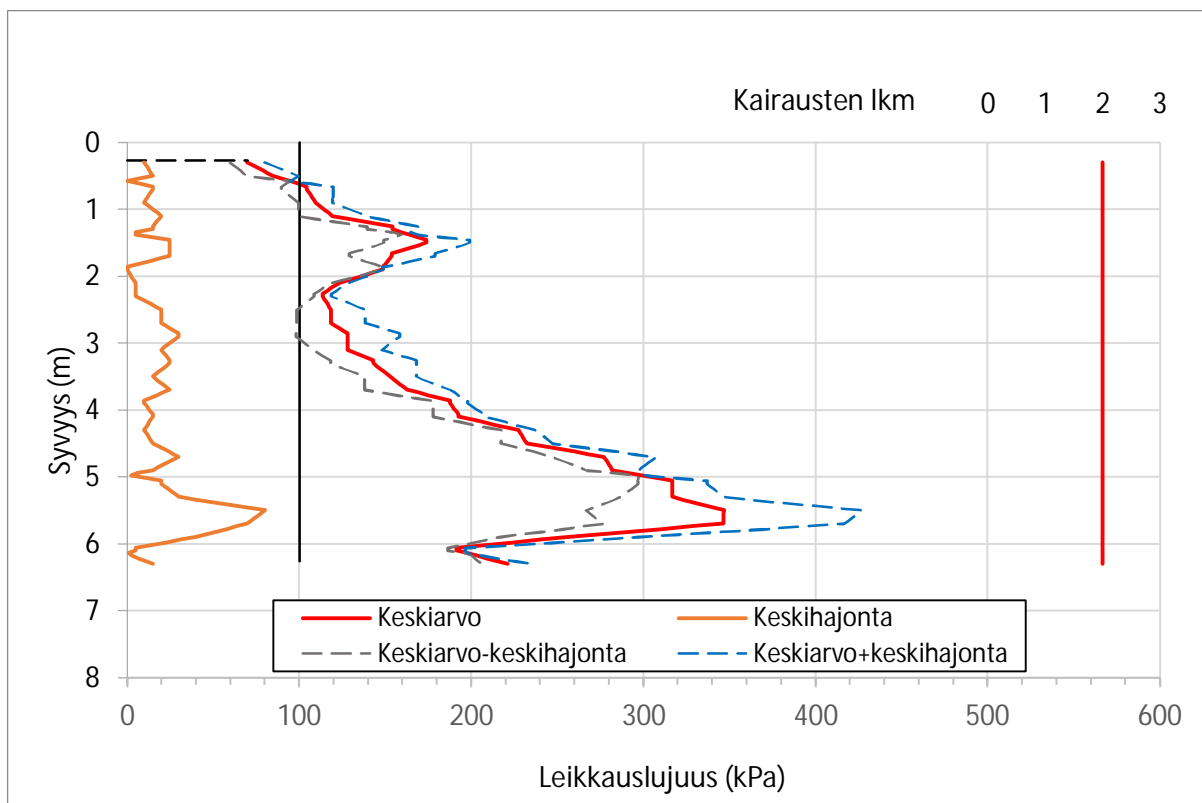


Kuva: C4, Terra POZ, 80kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



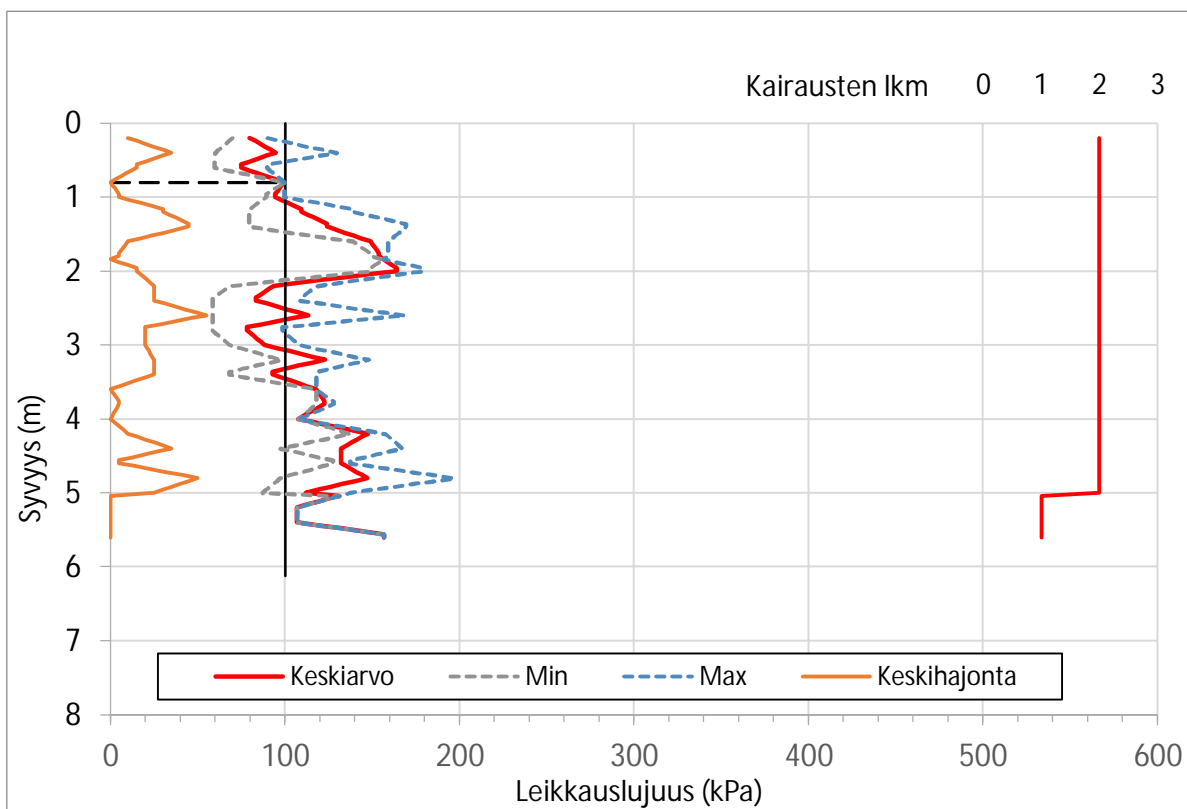


Kuva: E1, GTC, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk

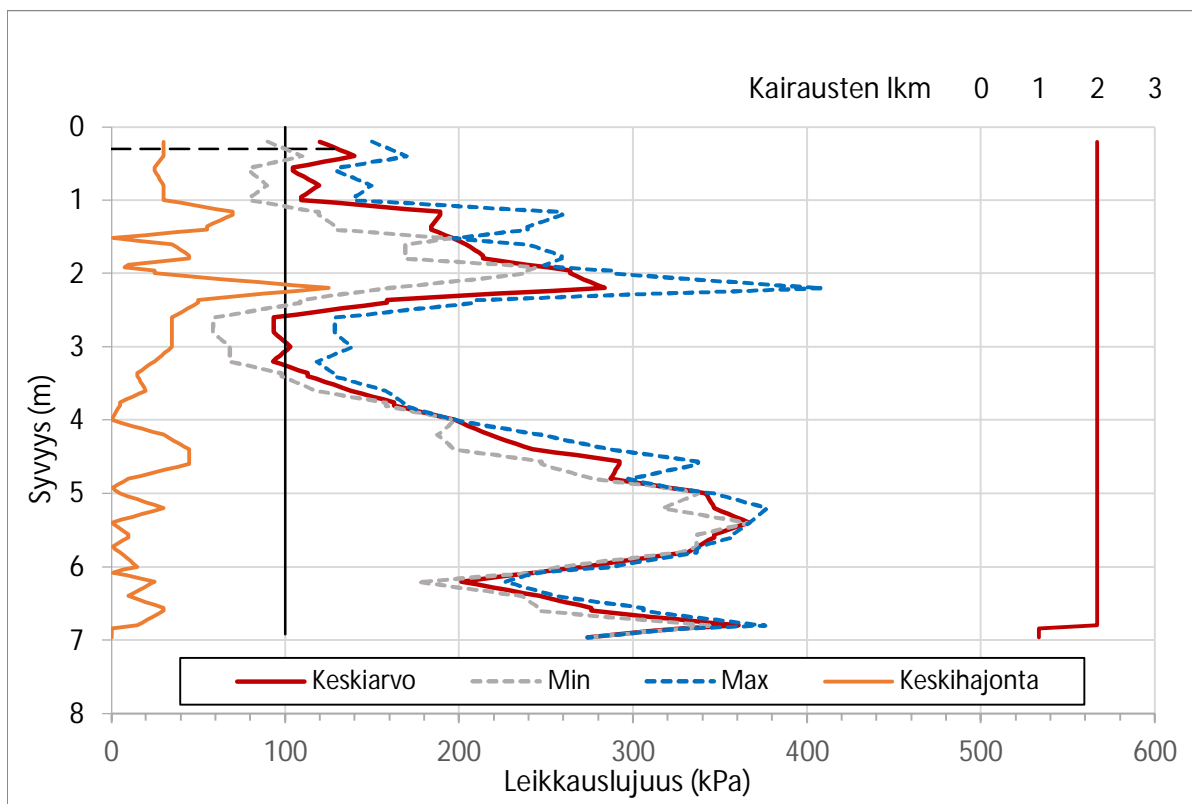


Kuva: E2, GTC, 80kg/m<sup>3</sup>, 3 kk

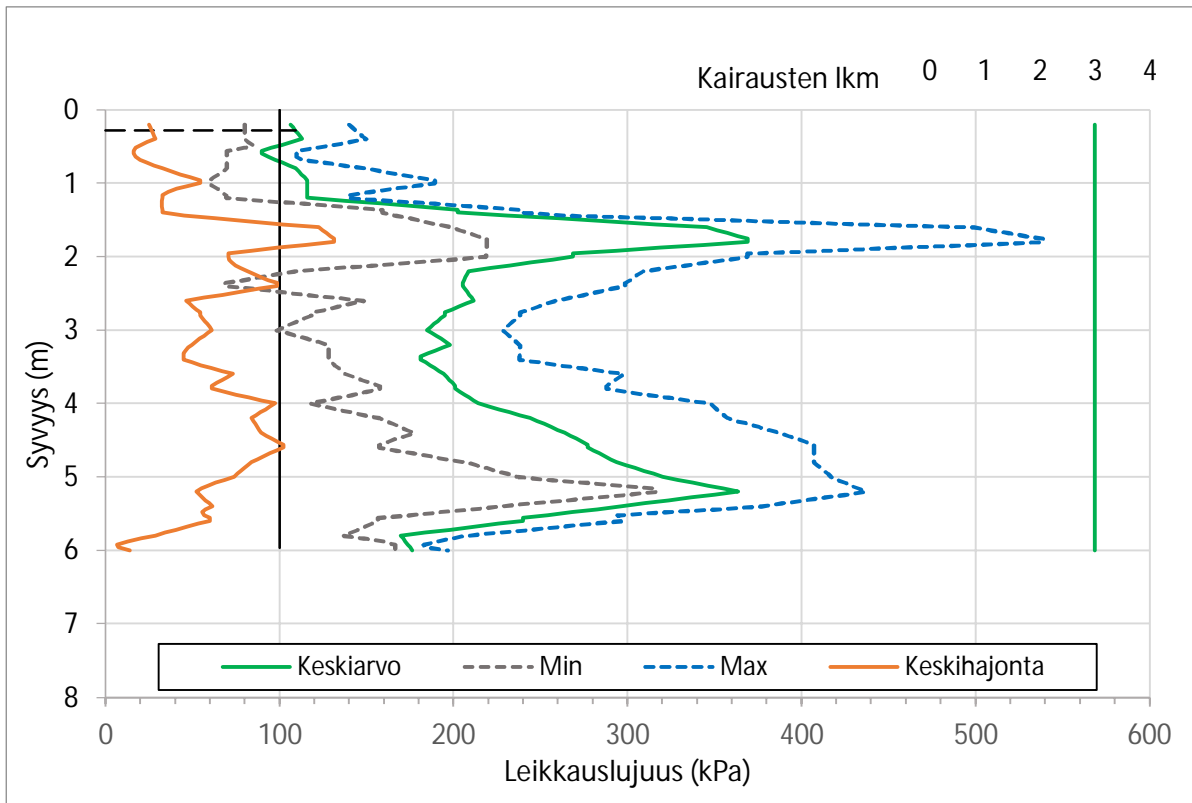
KESKIARVO, MIN - MAX, KESKIHAJONTA



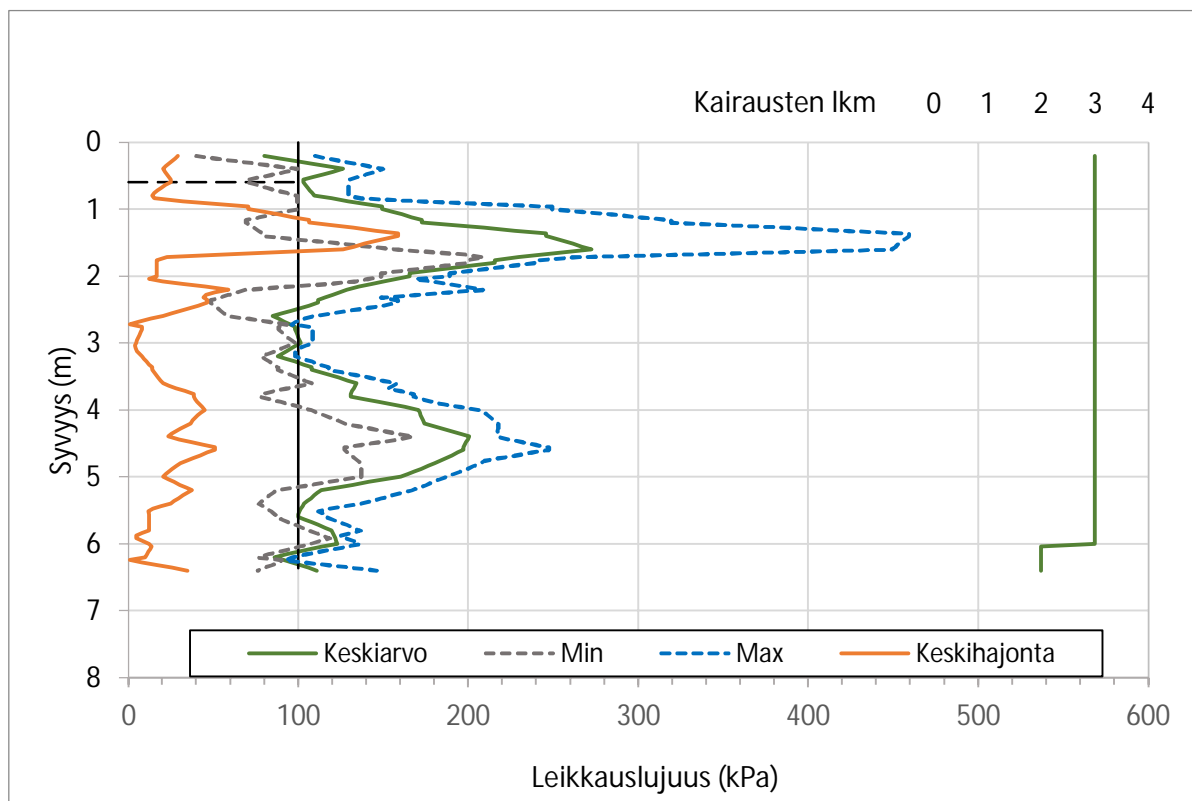
Kuva: A2, GTC, 80kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



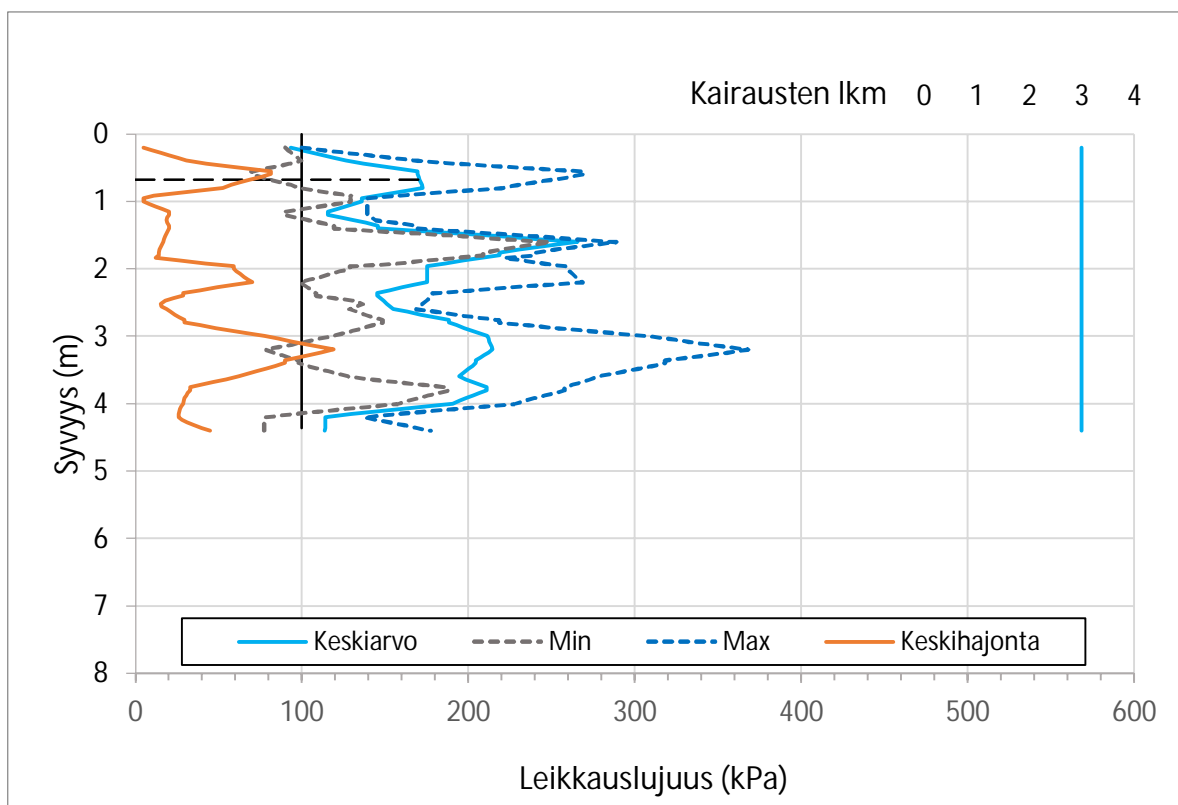
Kuva: A3, GTC, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



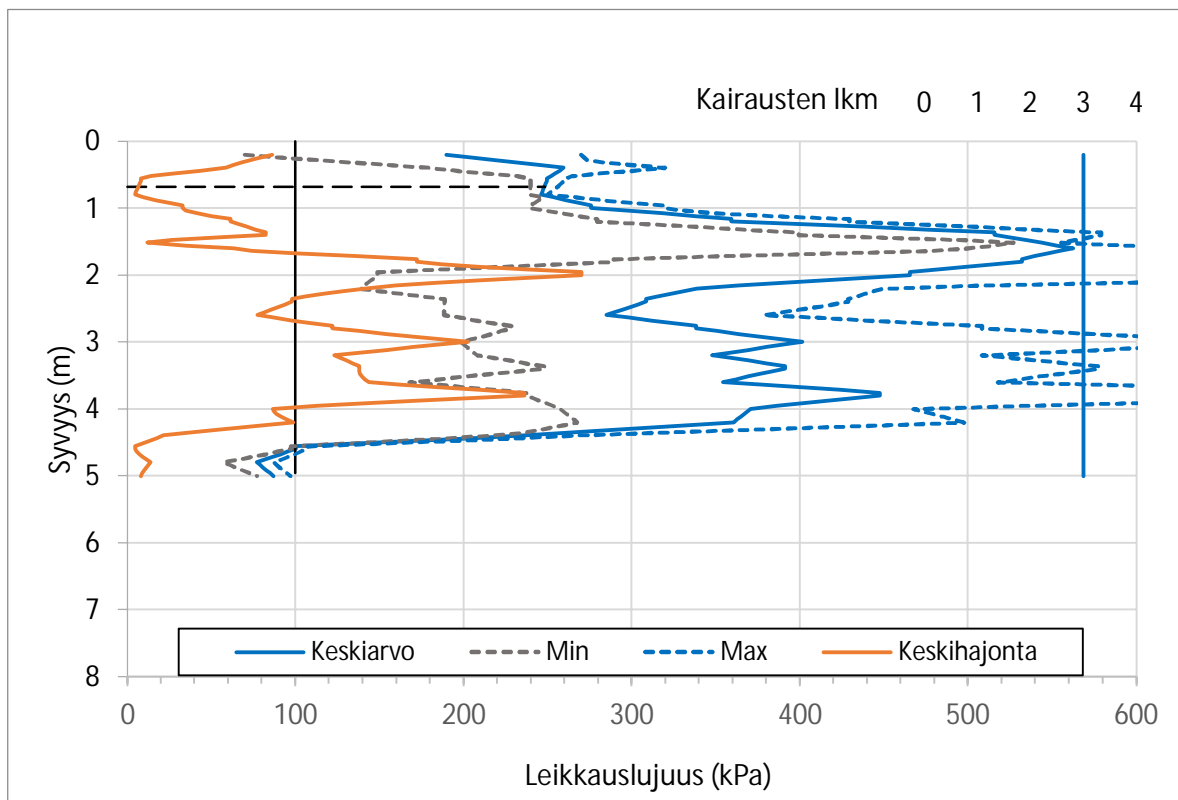
Kuva: A4, Stabi80, 80kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



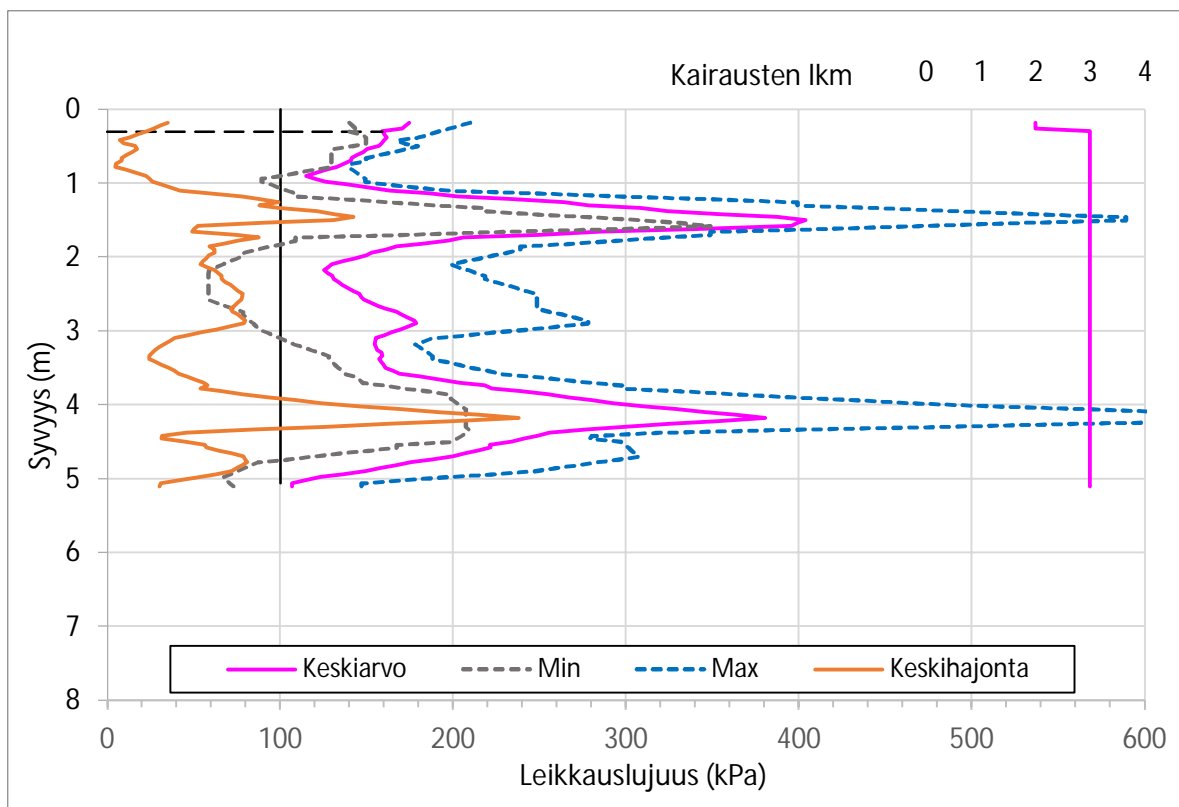
Kuva: D1, Stabi80, 120kg/m<sup>3</sup>, 3kk



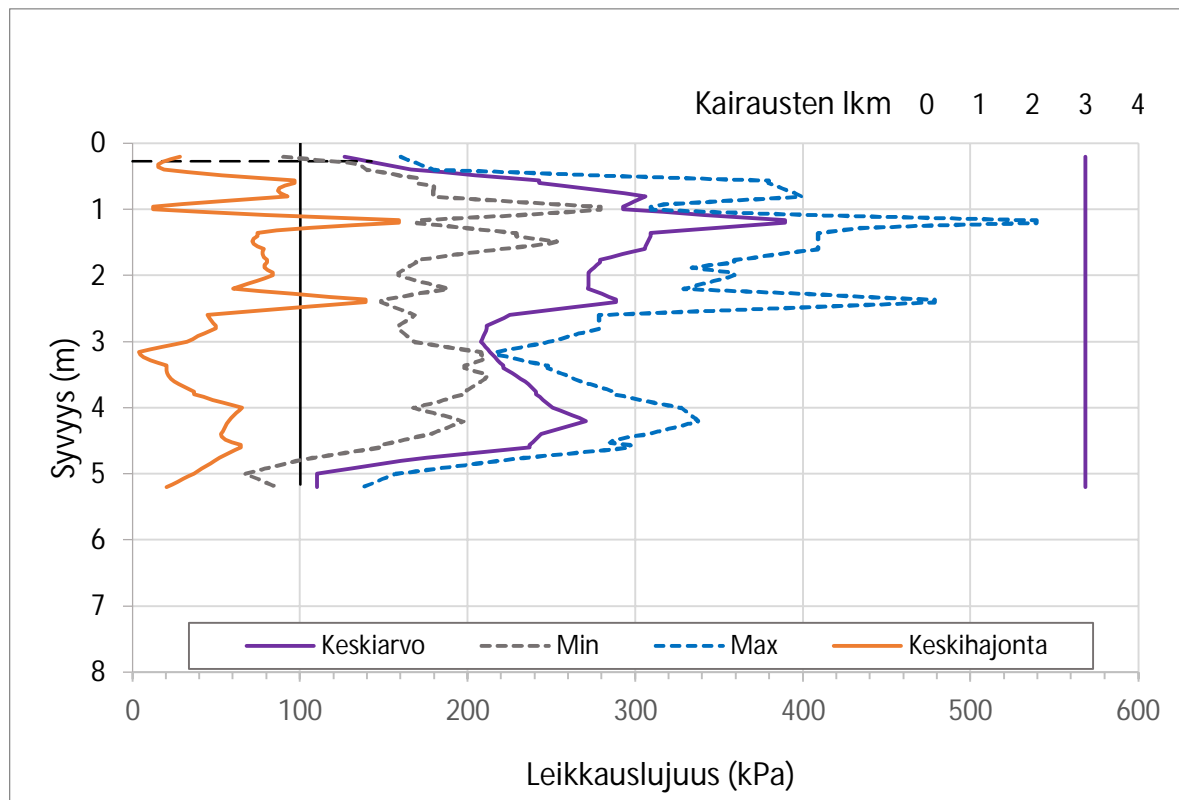
Kuva: B1, LT KAI, 120kg/m<sup>3</sup>, 3kk



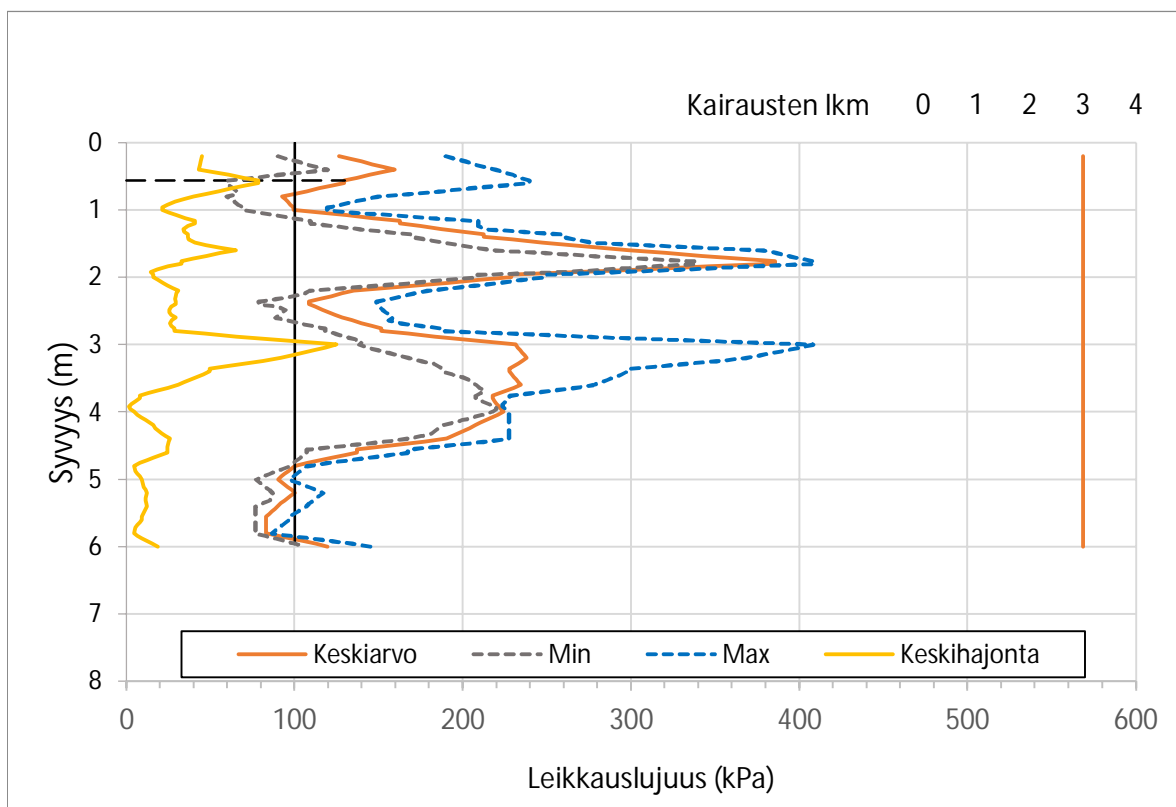
Kuva: B2, LT KAI, 160kg/m<sup>3</sup>, 3kk



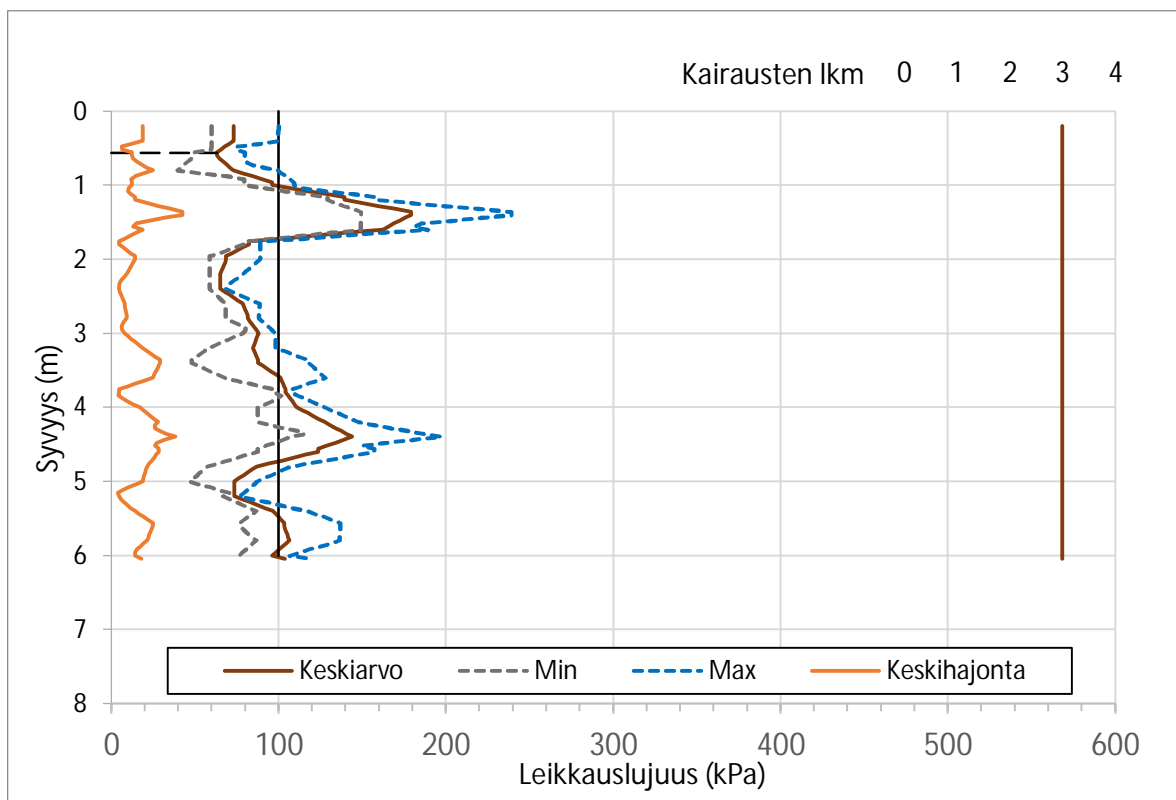
Kuva: B3, LT JAM, 120kg/m<sup>3</sup>, 3kk



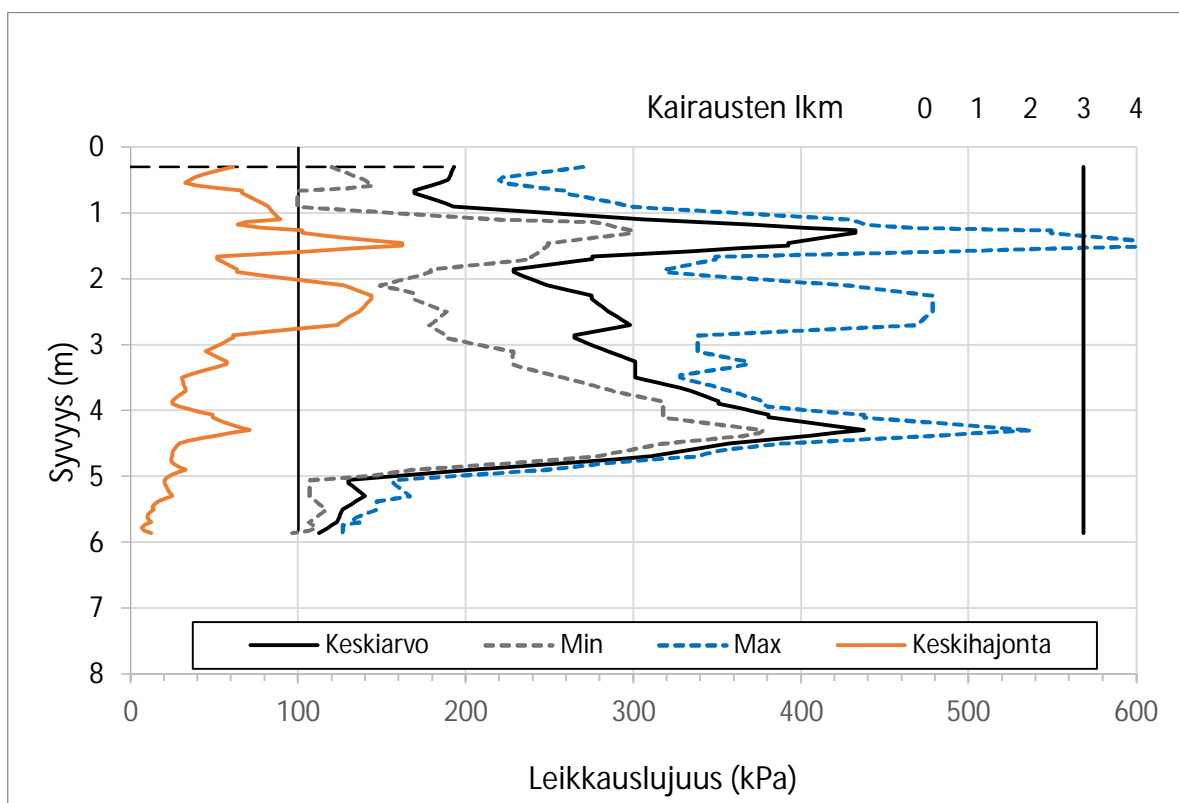
Kuva: B4, LT JAM, 160kg/m<sup>3</sup>, 3kk



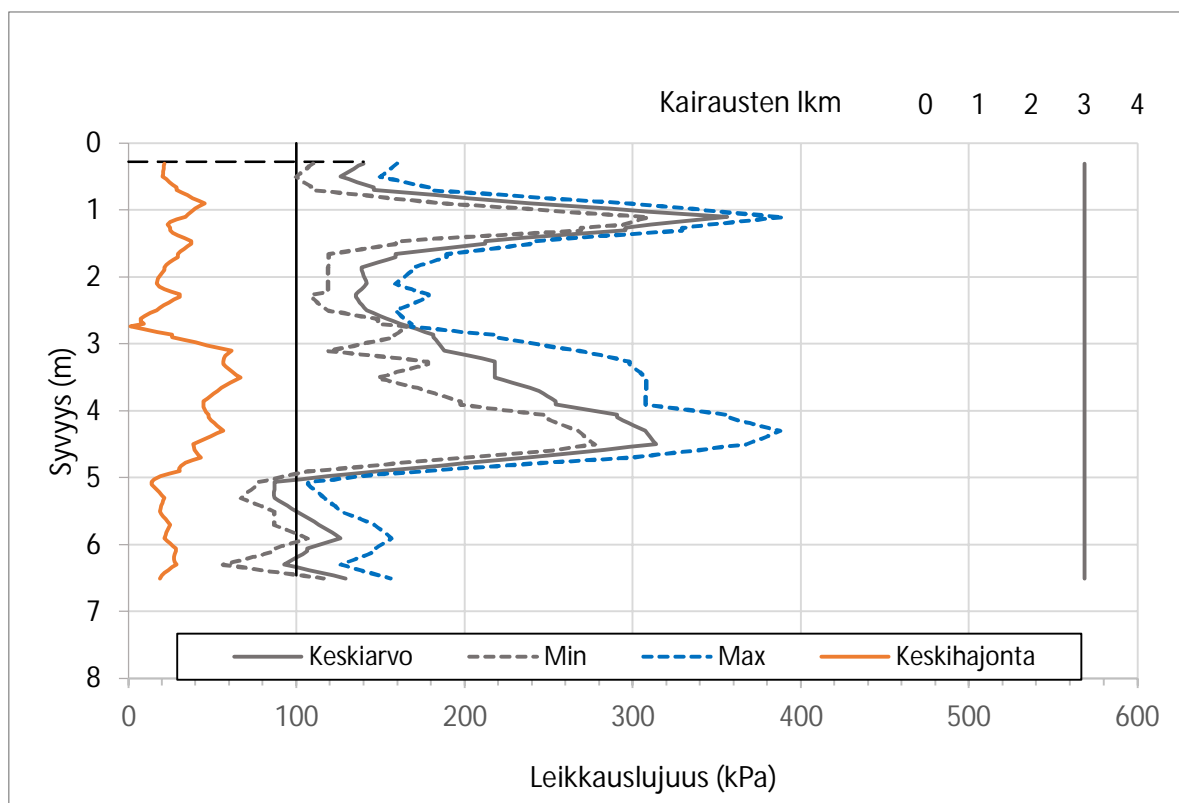
Kuva: C1, Terra Green, 120kg/m3, 3kk



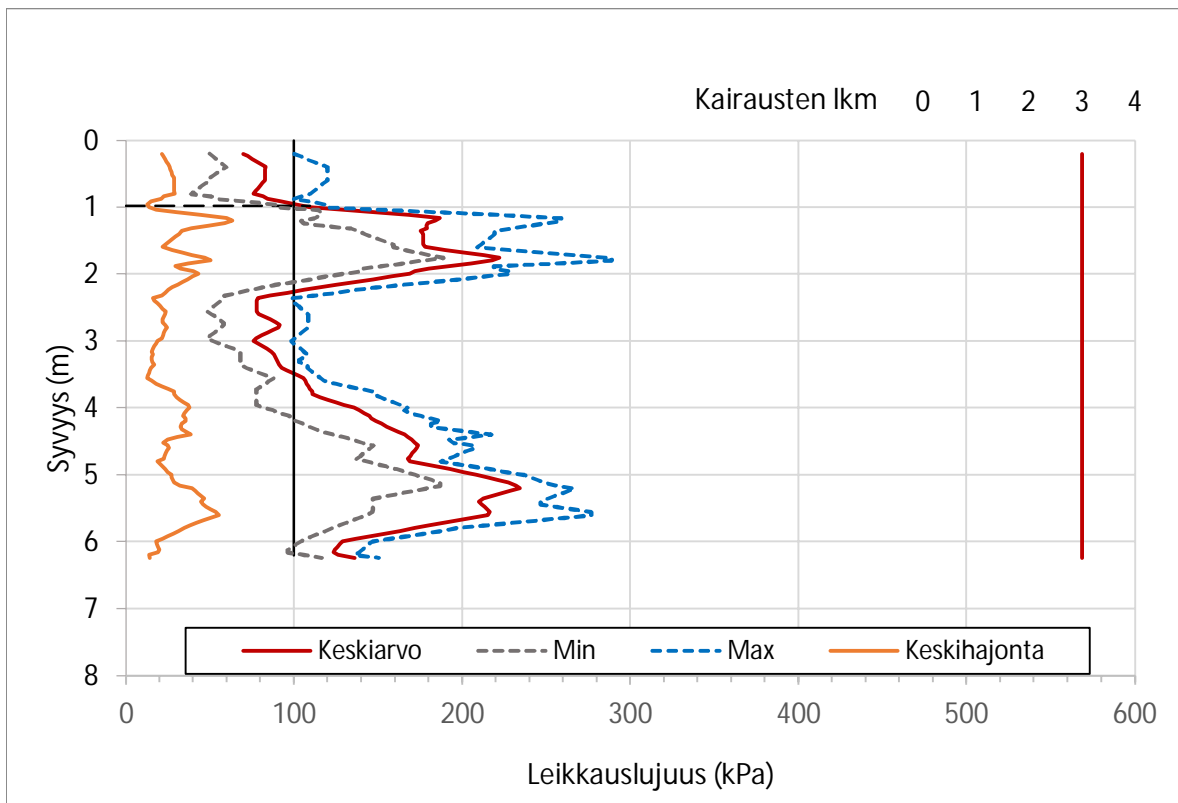
Kuva: C2, Terra Green, 80kg/m3, 3kk



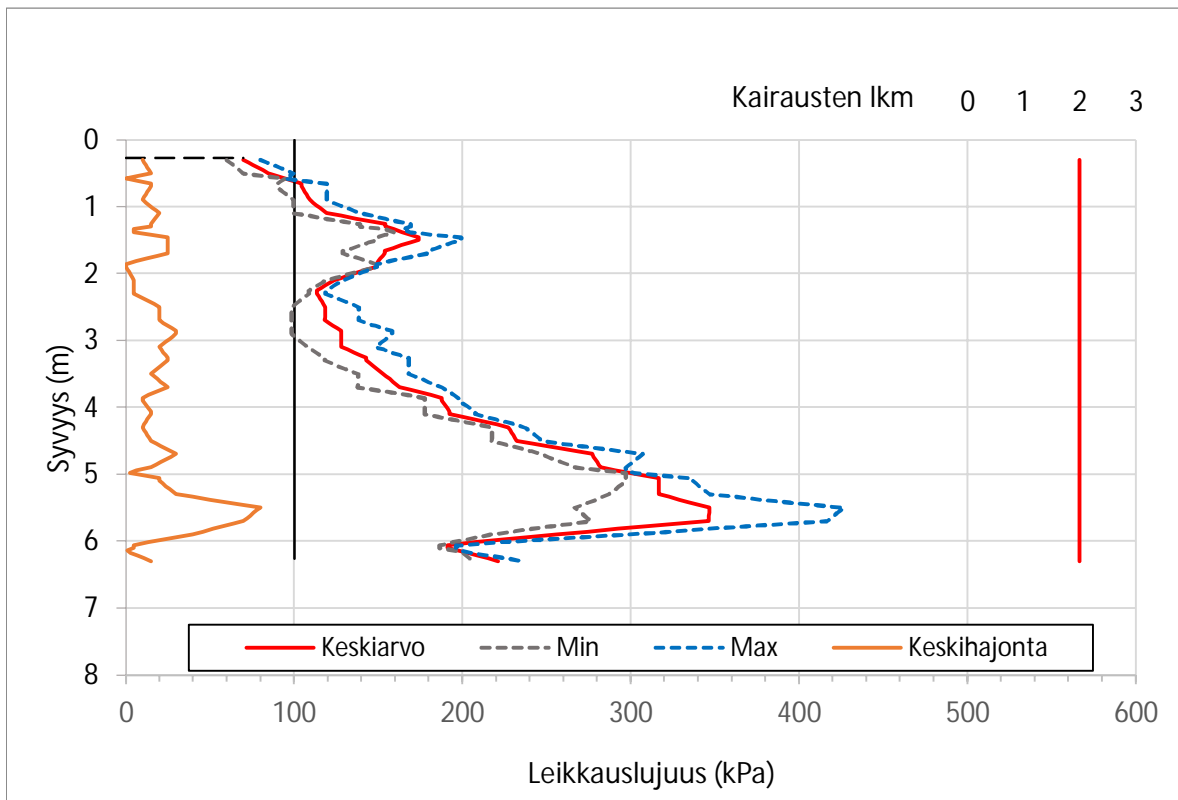
Kuva: C3, Terra POZ, 120kg/m<sup>3</sup>, 3kk



Kuva: C4, Terra POZ, 80kg/m<sup>3</sup>, 3kk



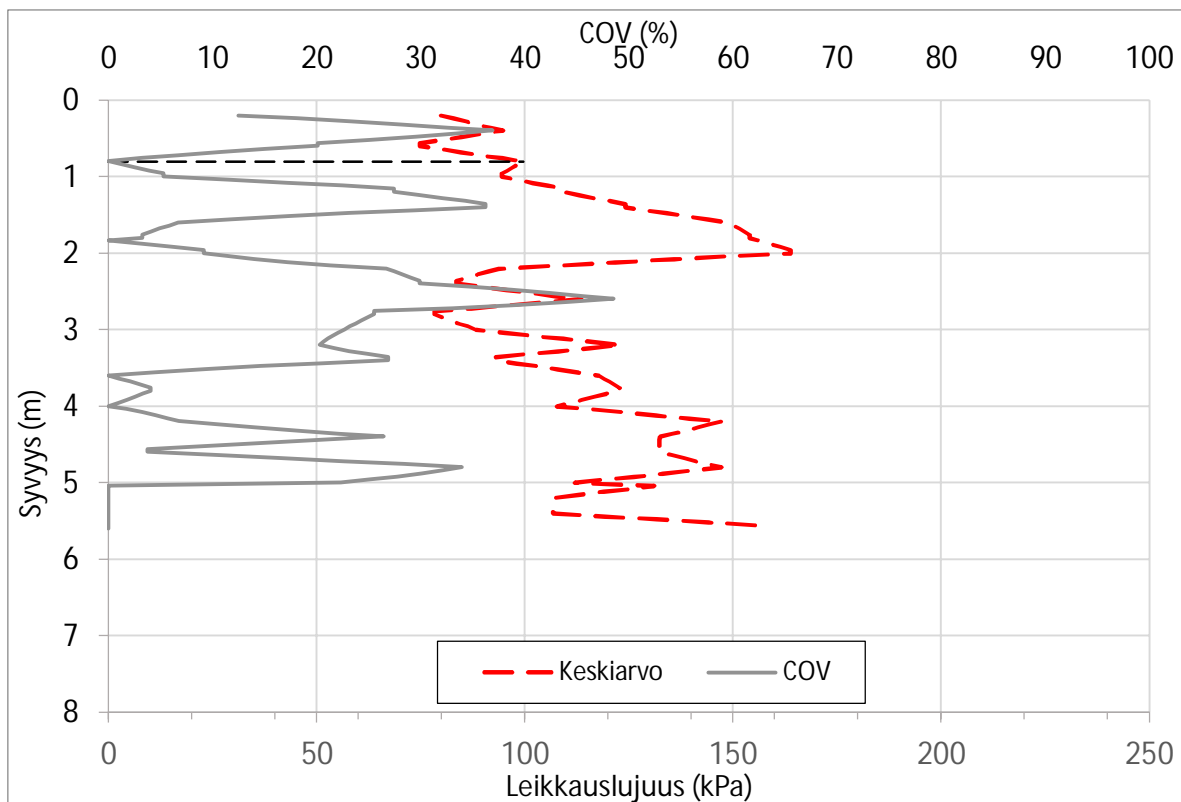
Kuva: E1, GTC, 120kg/m<sup>3</sup>, 3kk



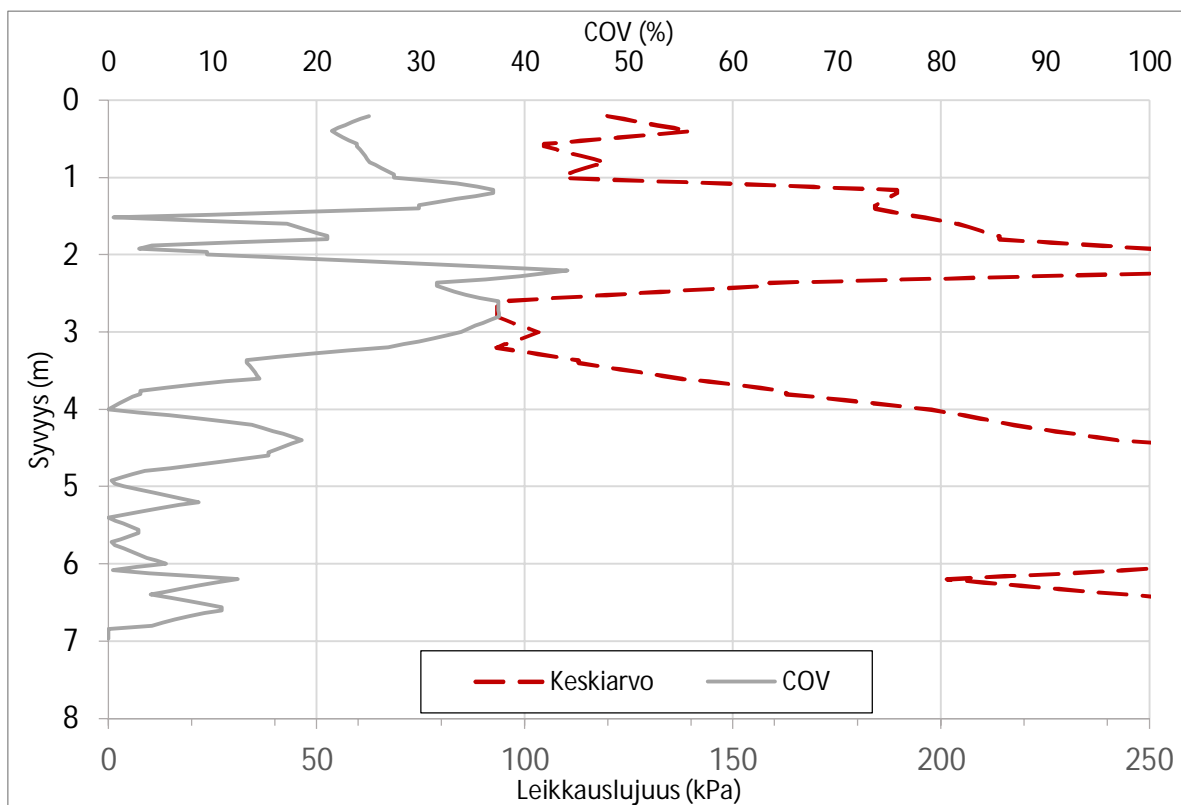
Kuva: E2, GTC, 80kg/m<sup>3</sup>, 3kk



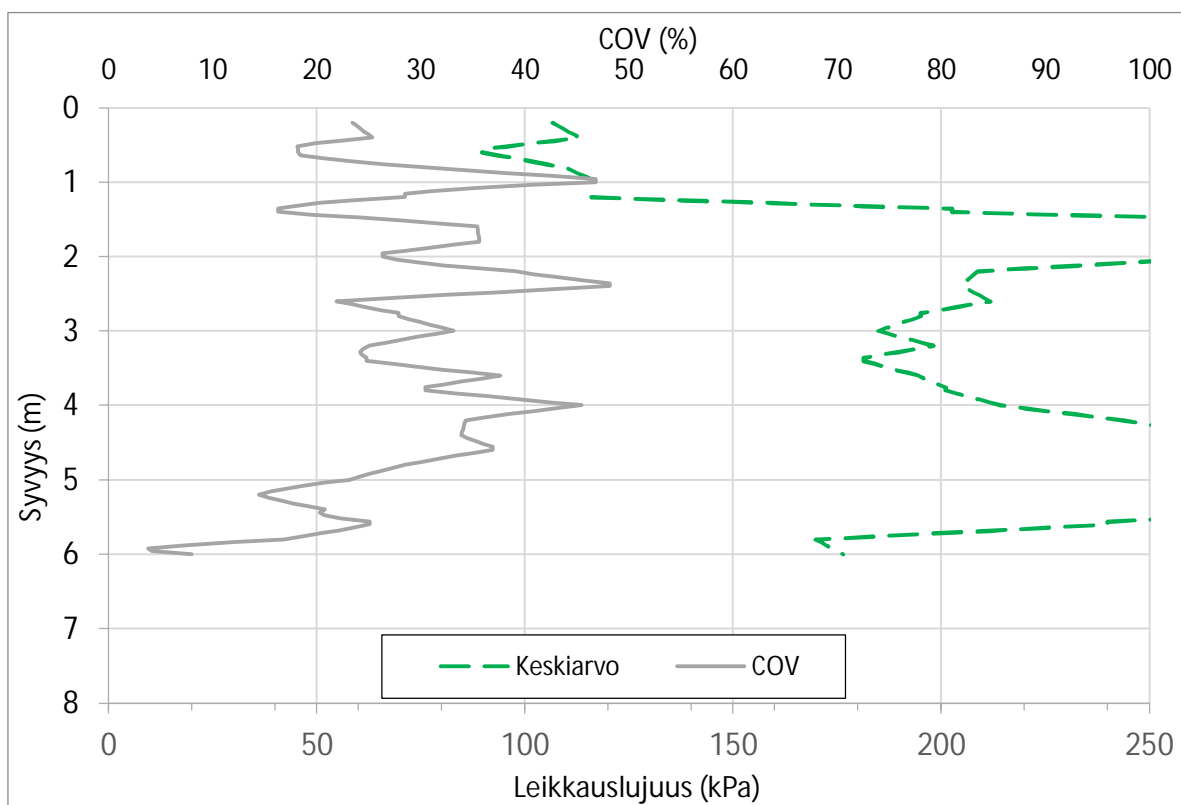
KESKIARVO - COV



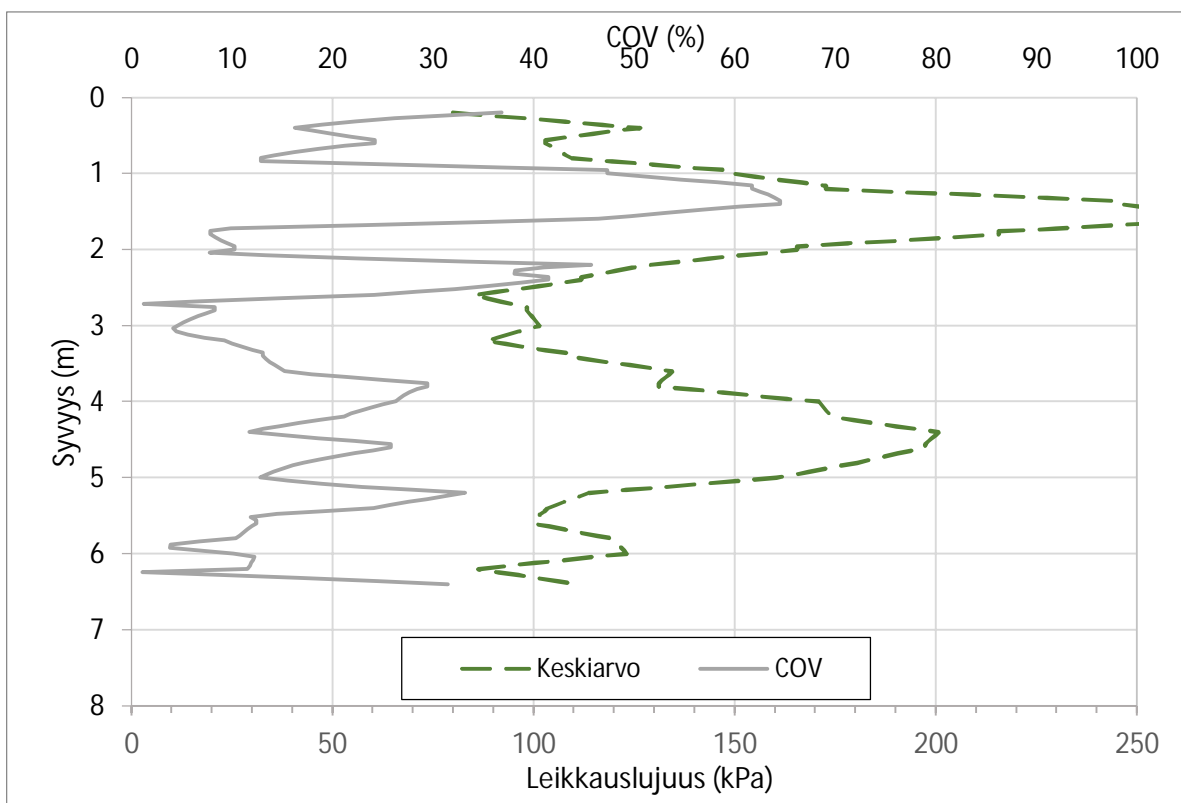
Kuva: A2, GTC, 80kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



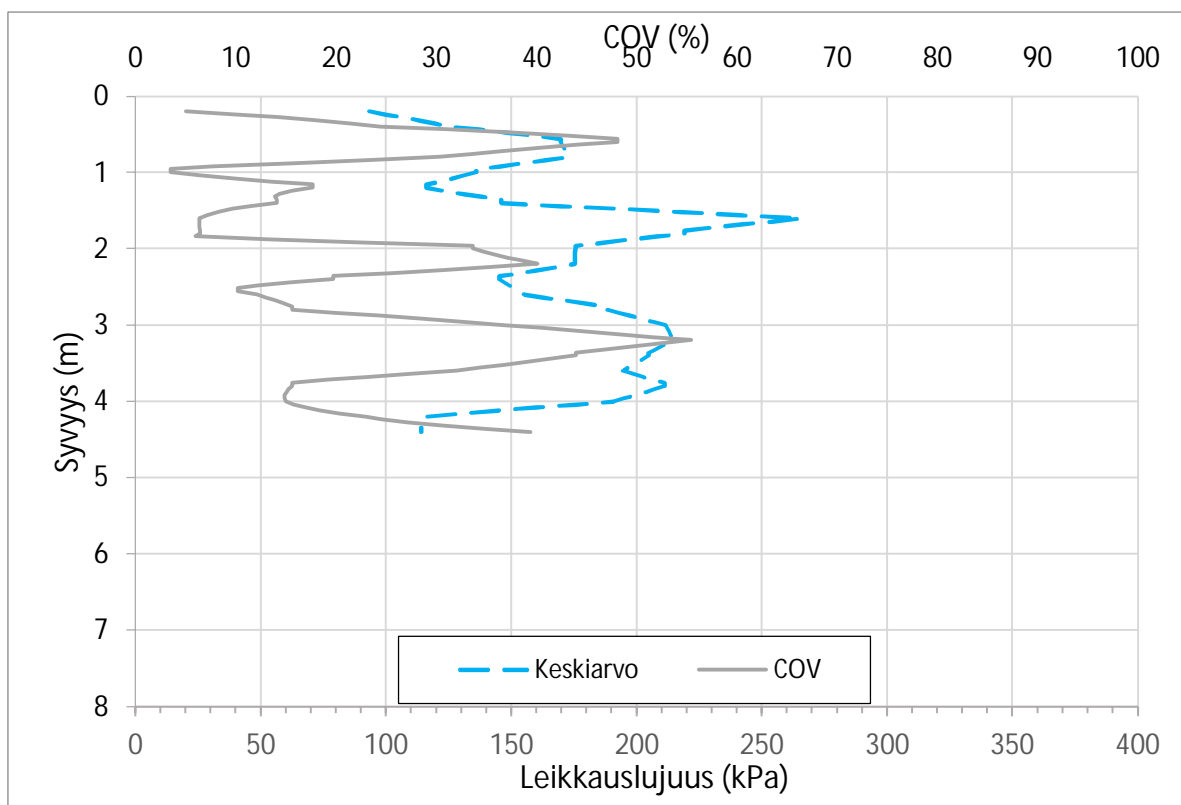
Kuva: A3, GTC, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



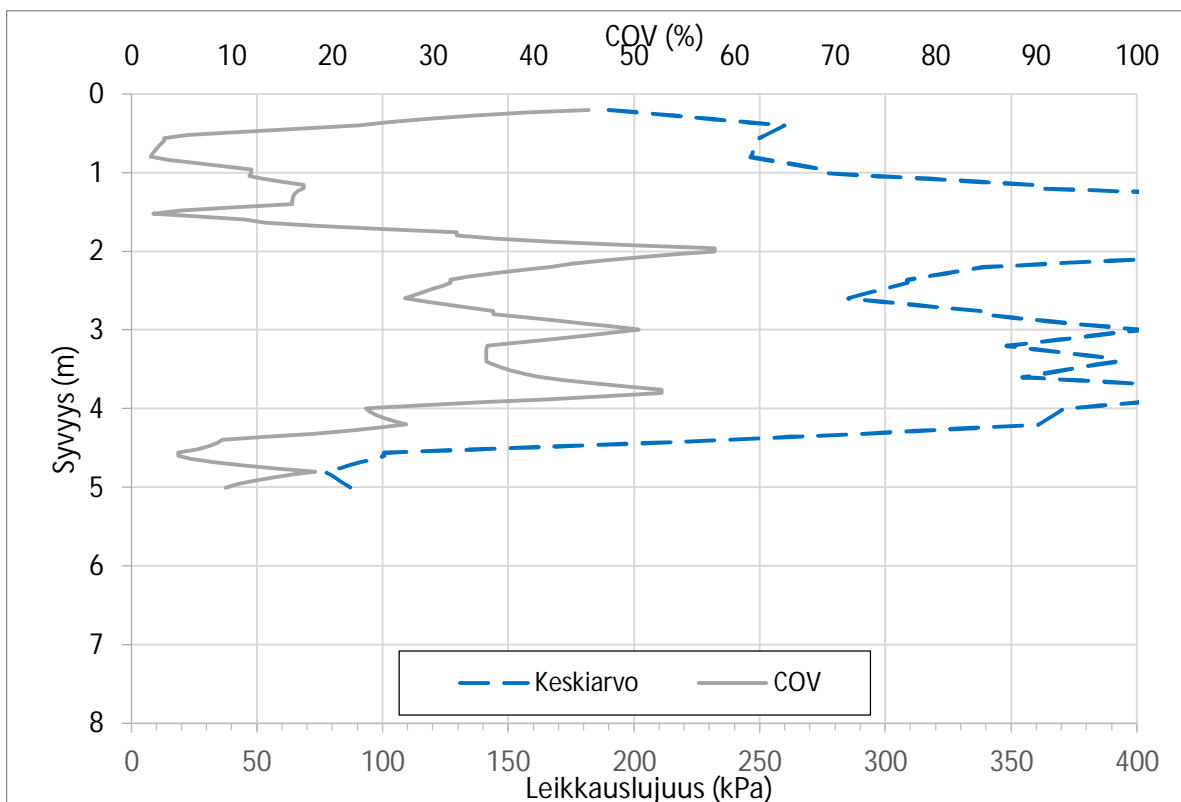
Kuva: A4, Stabi80, 80kg/m3, 3 kk



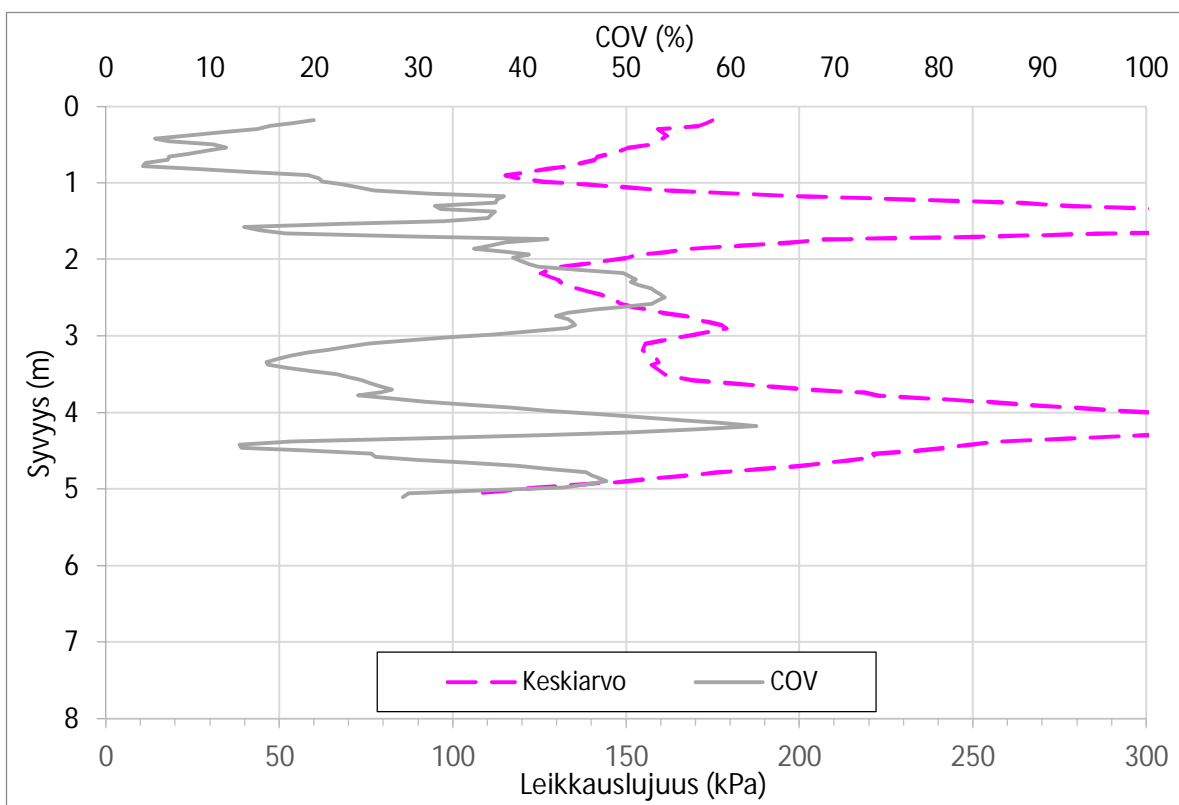
Kuva: D1, Stabi80, 120kg/m3, 3 kk



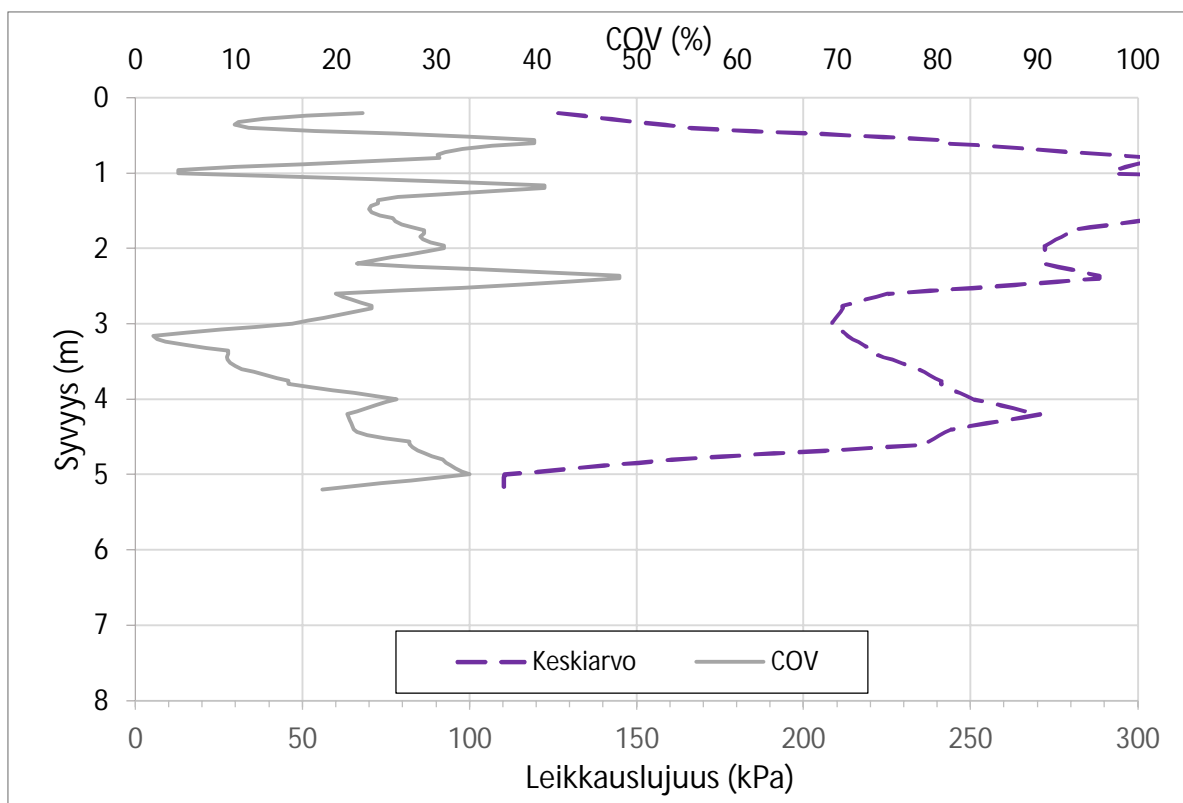
Kuva: B1, LT KAI, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



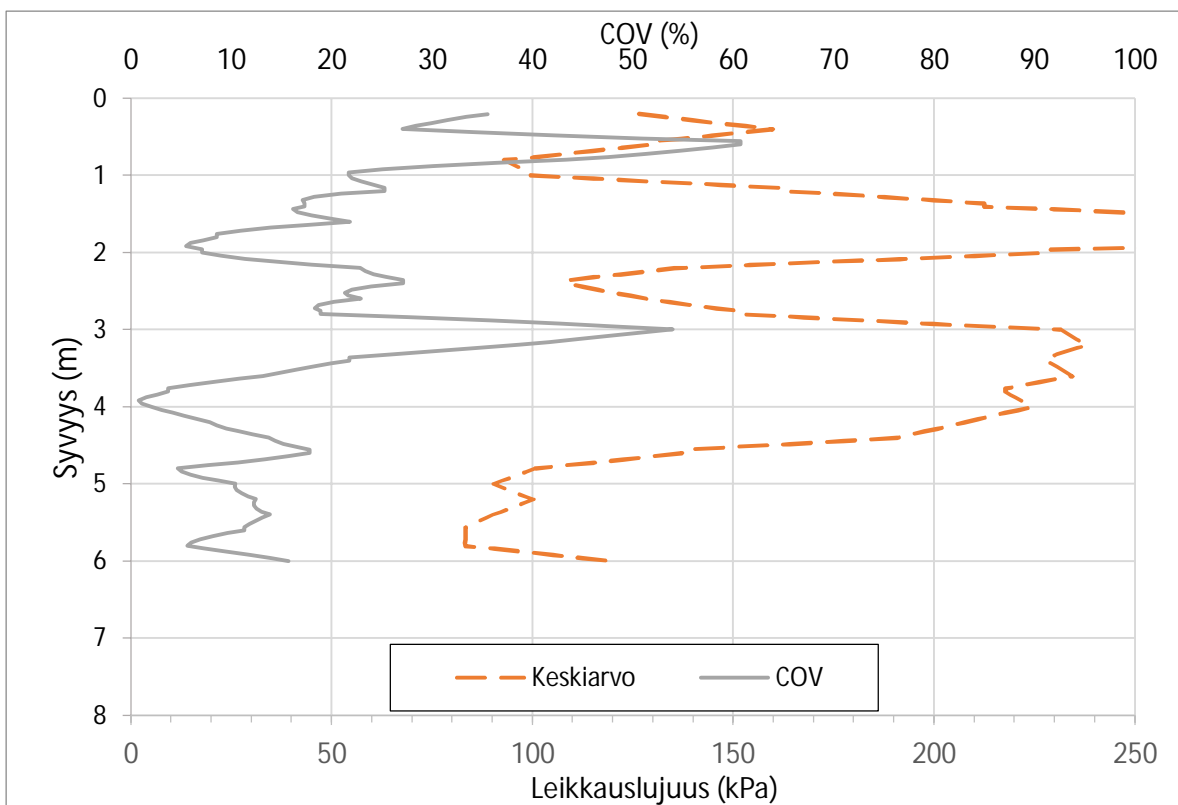
Kuva: B2, LT KAI, 160kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



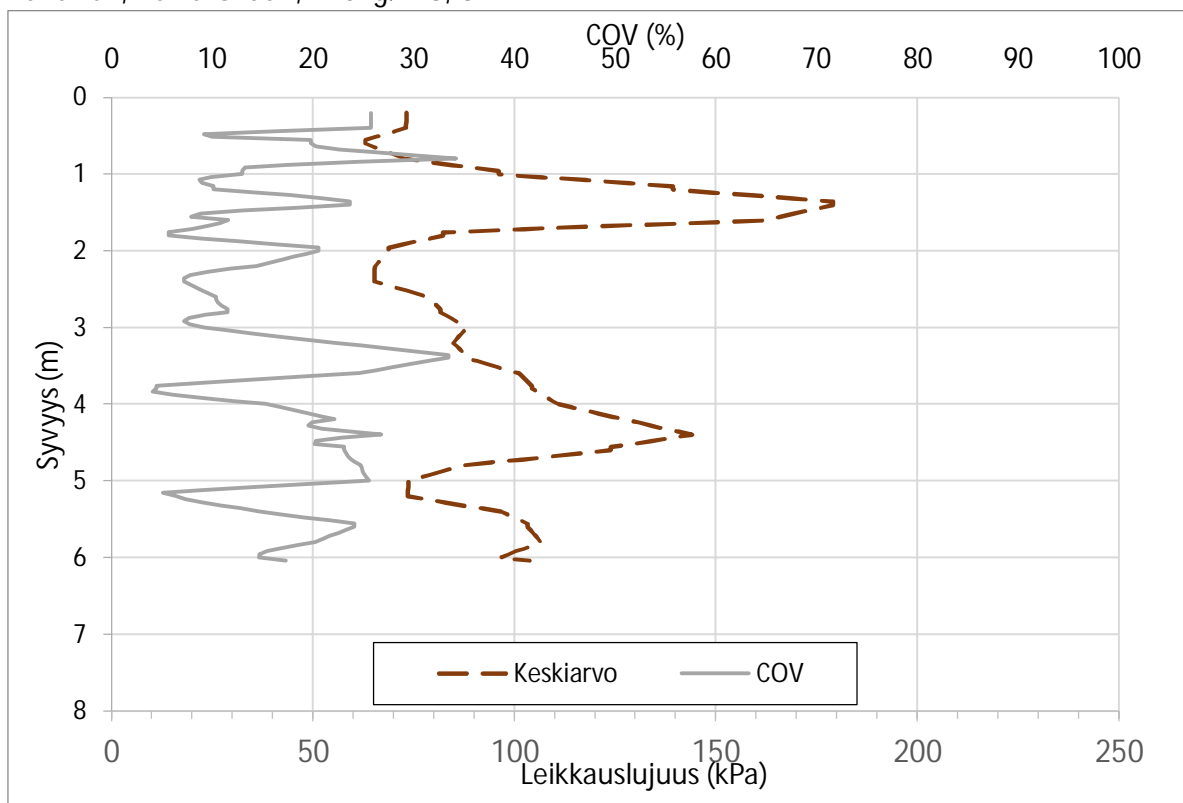
Kuva: B3, LT JAM, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



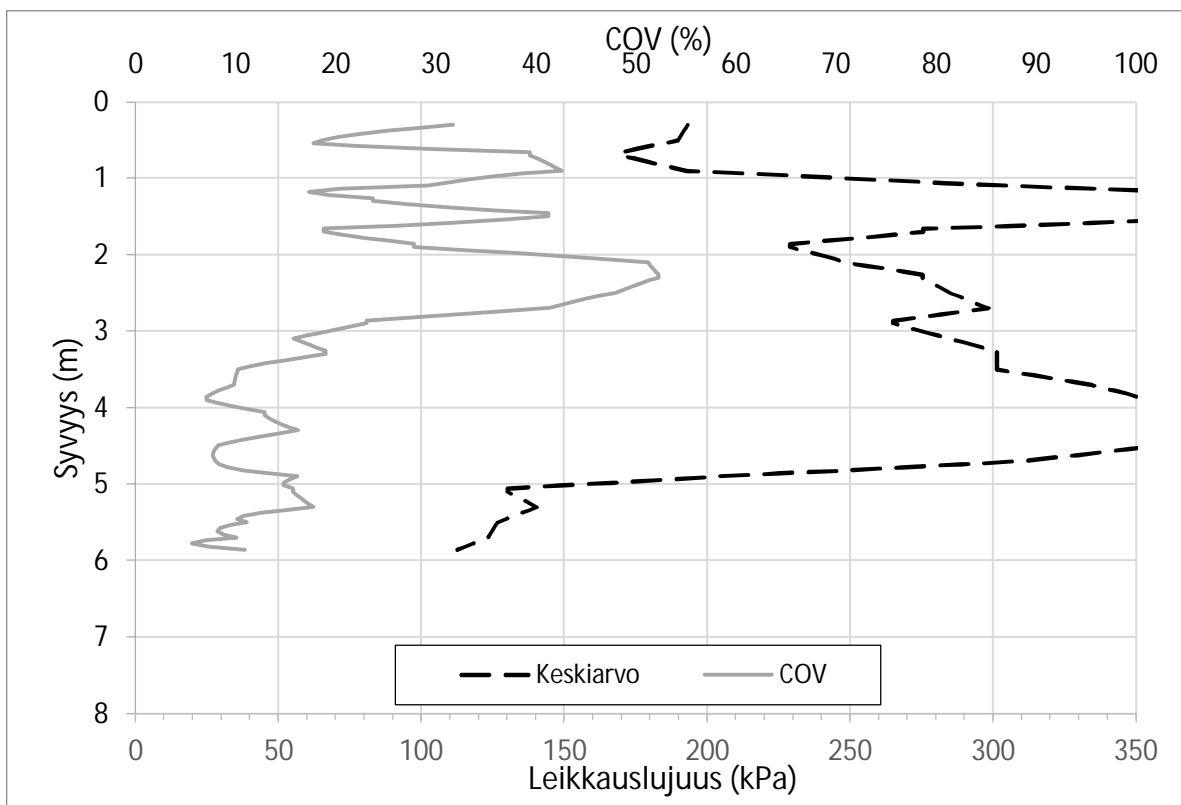
Kuva: B4, LT JAM, 160kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



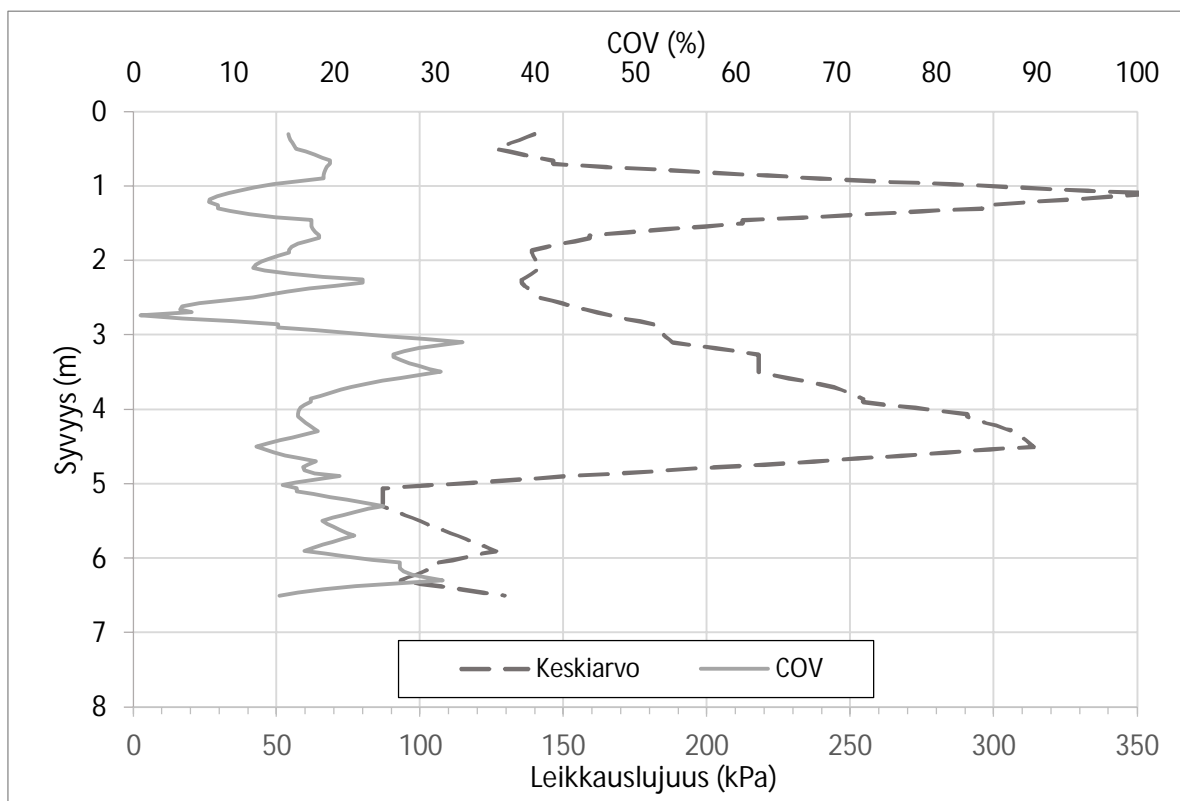
Kuva: C1, Terra Green, 120kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



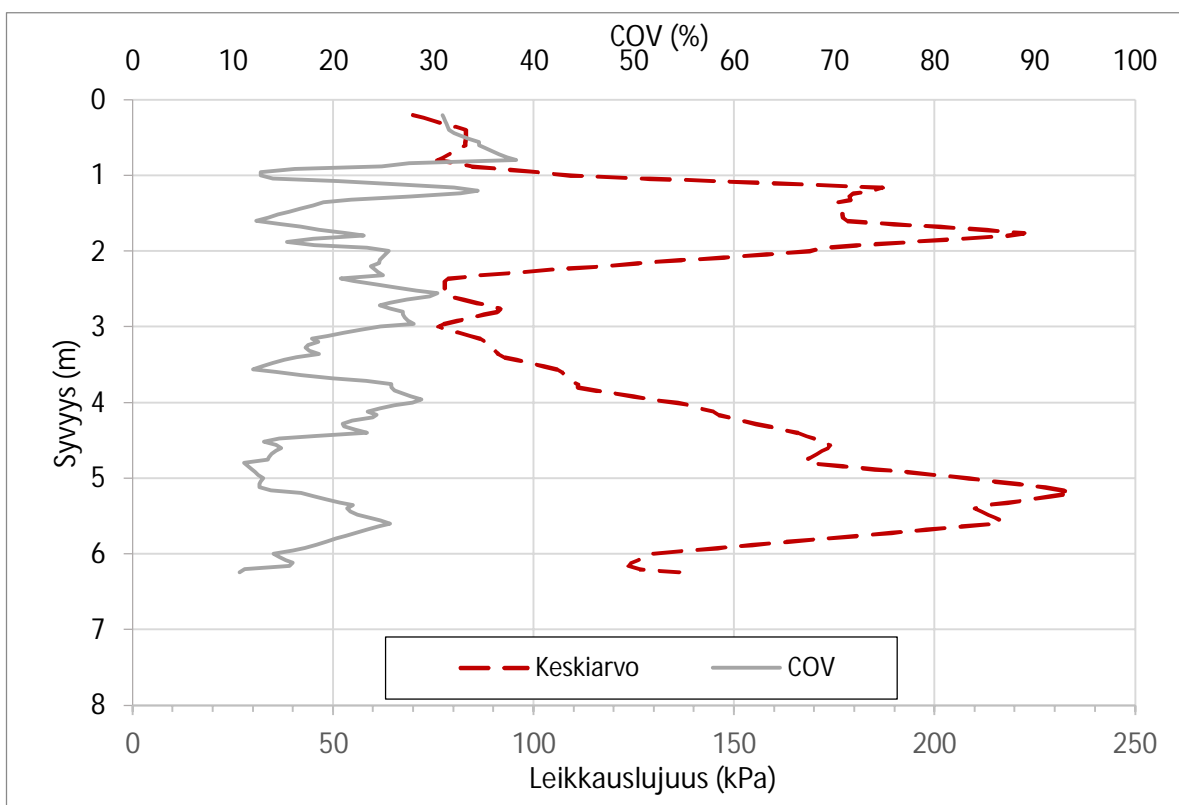
Kuva: C2, Terra Green, 80kg/m<sup>3</sup>, 3 kk



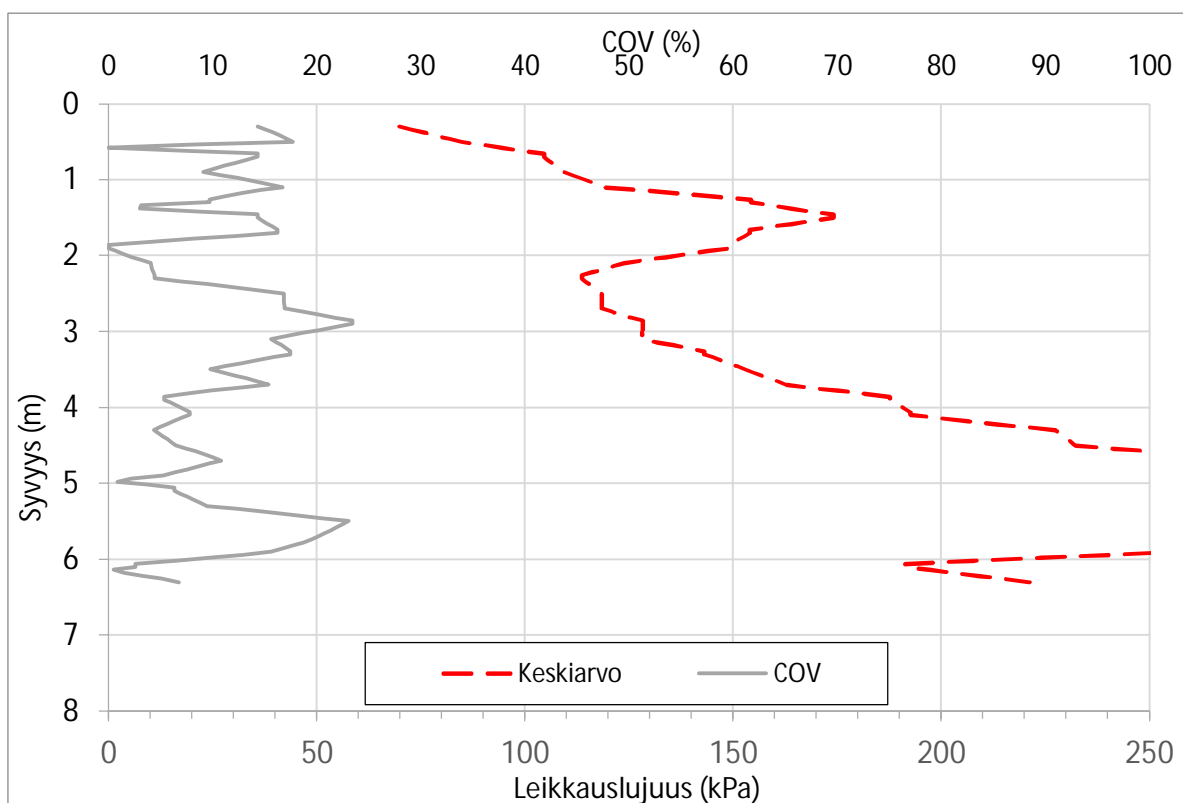
Kuva: C3, Terra POZ, 120kg/m3, 3 kk



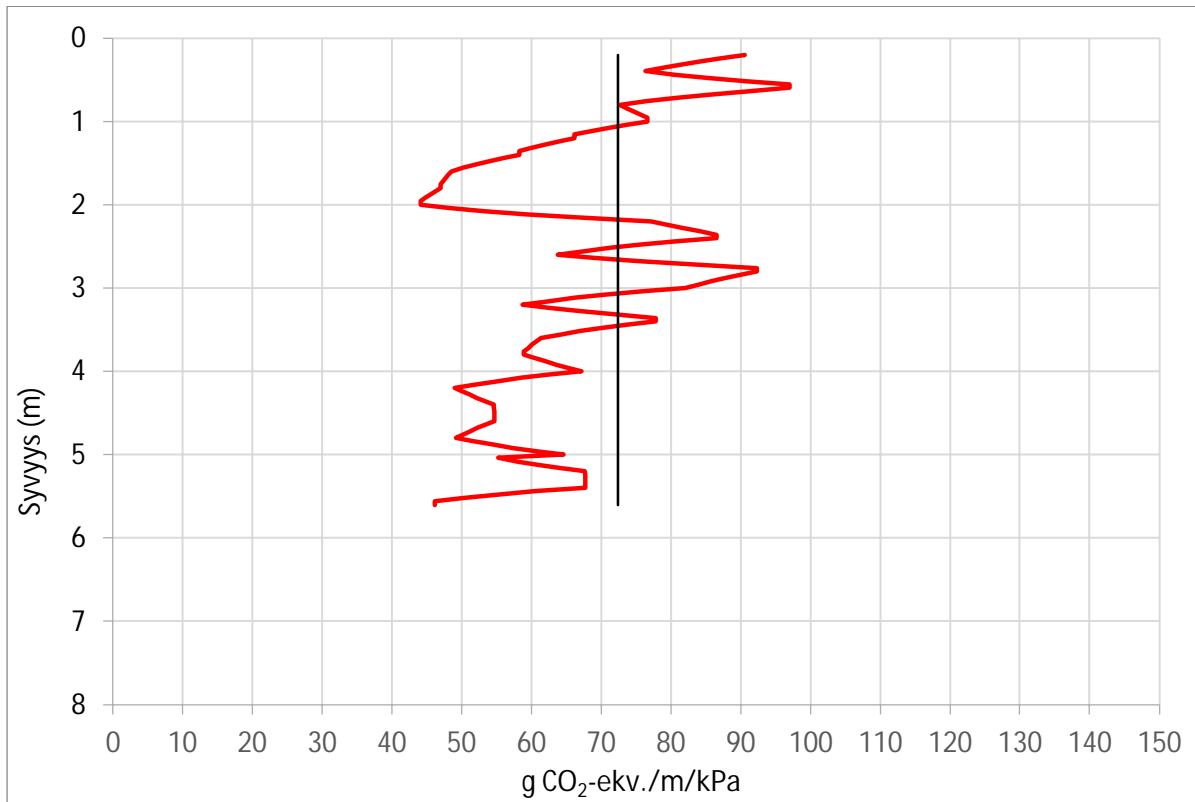
Kuva: C4, Terra POZ, 80kg/m3, 3 kk



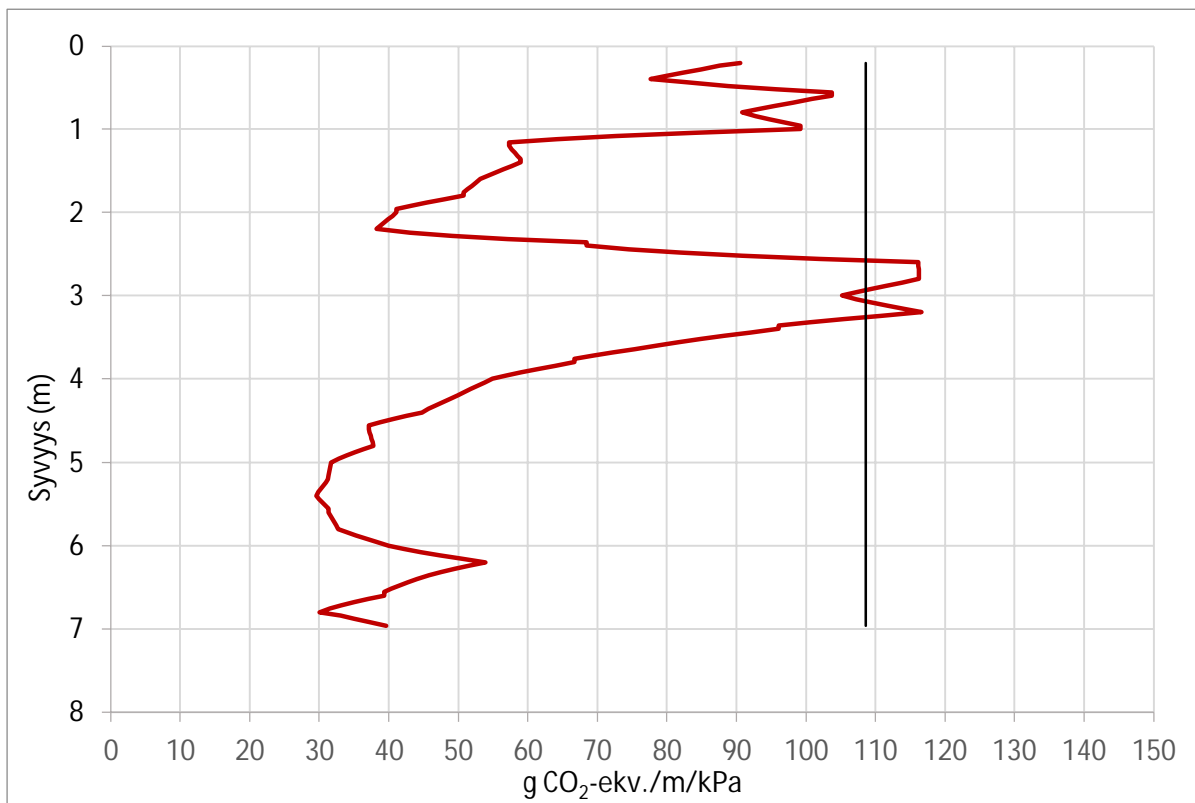
Kuva: E1, GTC, 120kg/m3, 3 kk



Kuva: E2, GTC, 80kg/m3, 3 kk

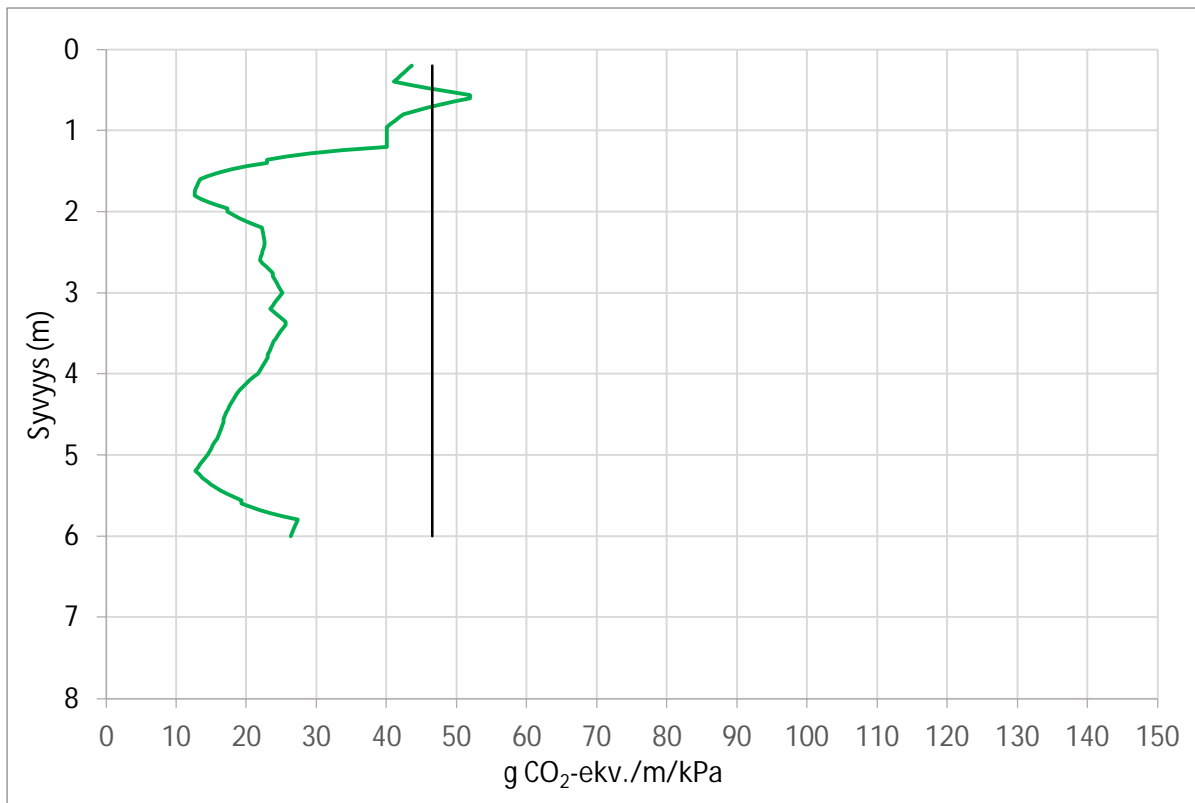


Kuva 6.8: Alue A2, 80 kg/m<sup>3</sup>, Terra GTC, 3 kk.

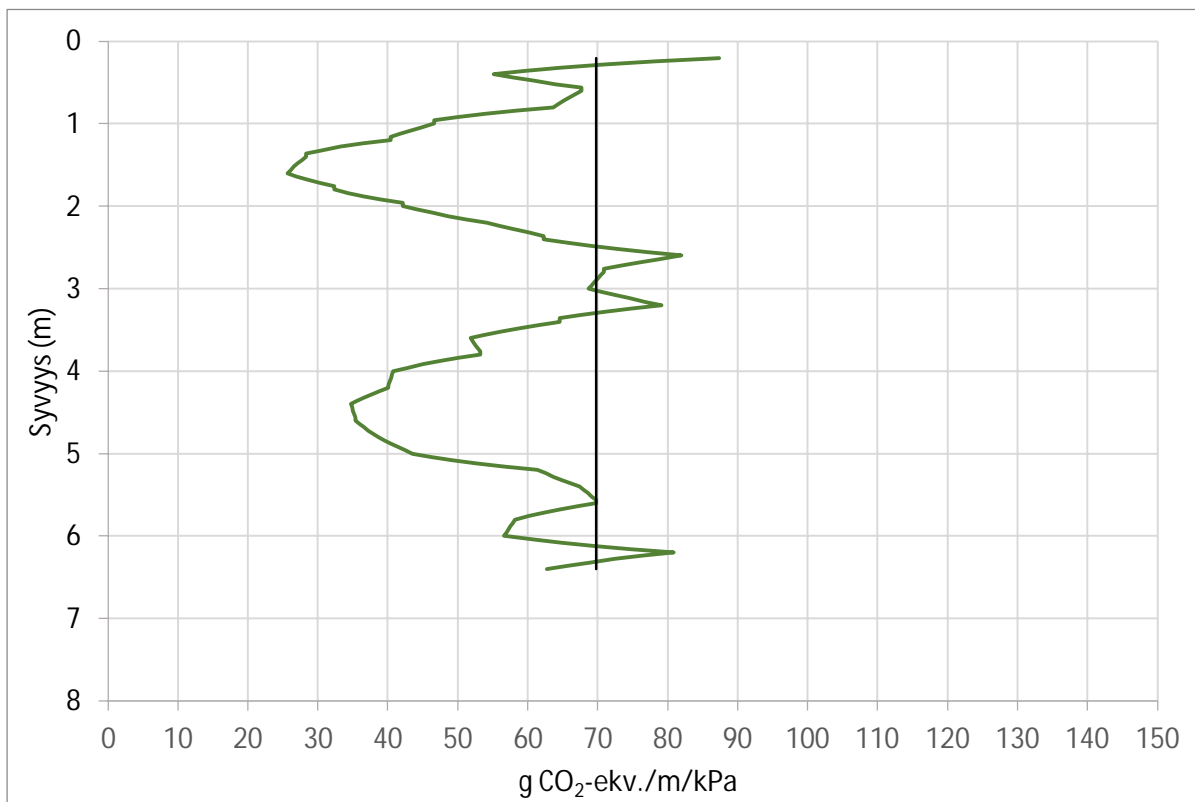


Kuva 6.9: Alue A3, 120 kg/m<sup>3</sup>, Terra GTC, 3 kk.

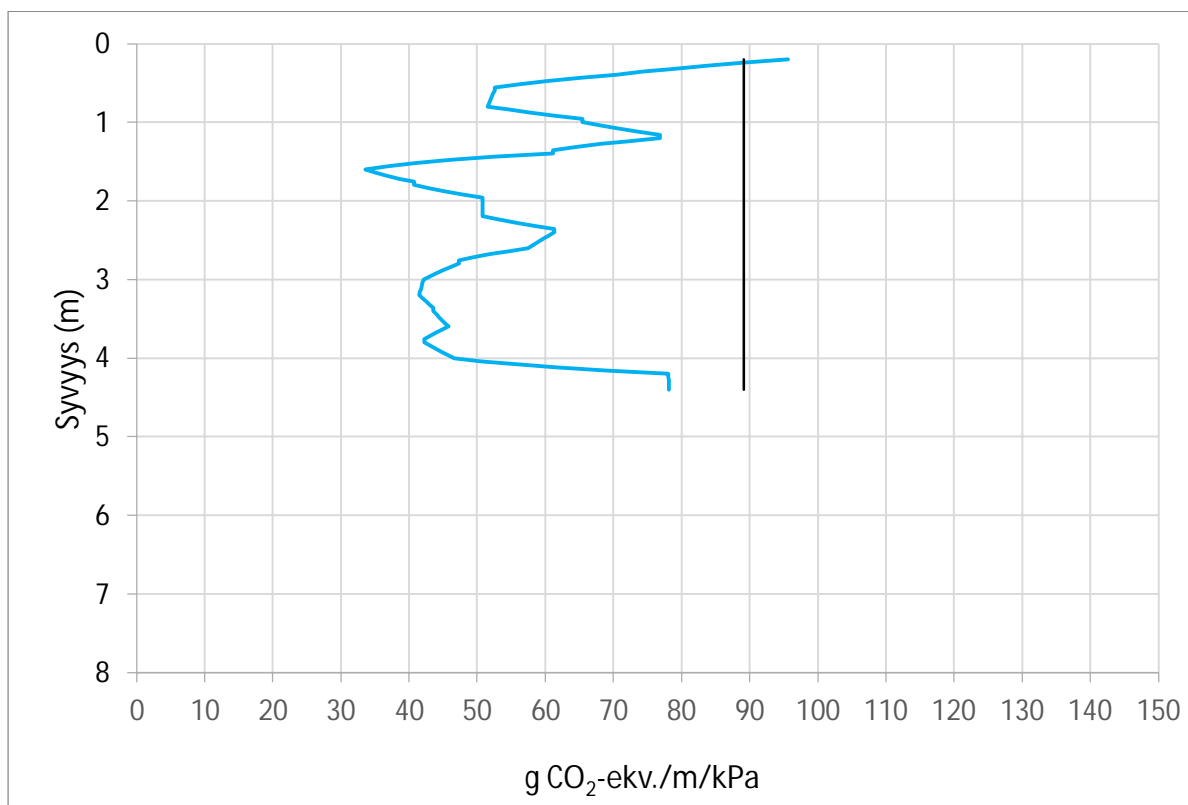




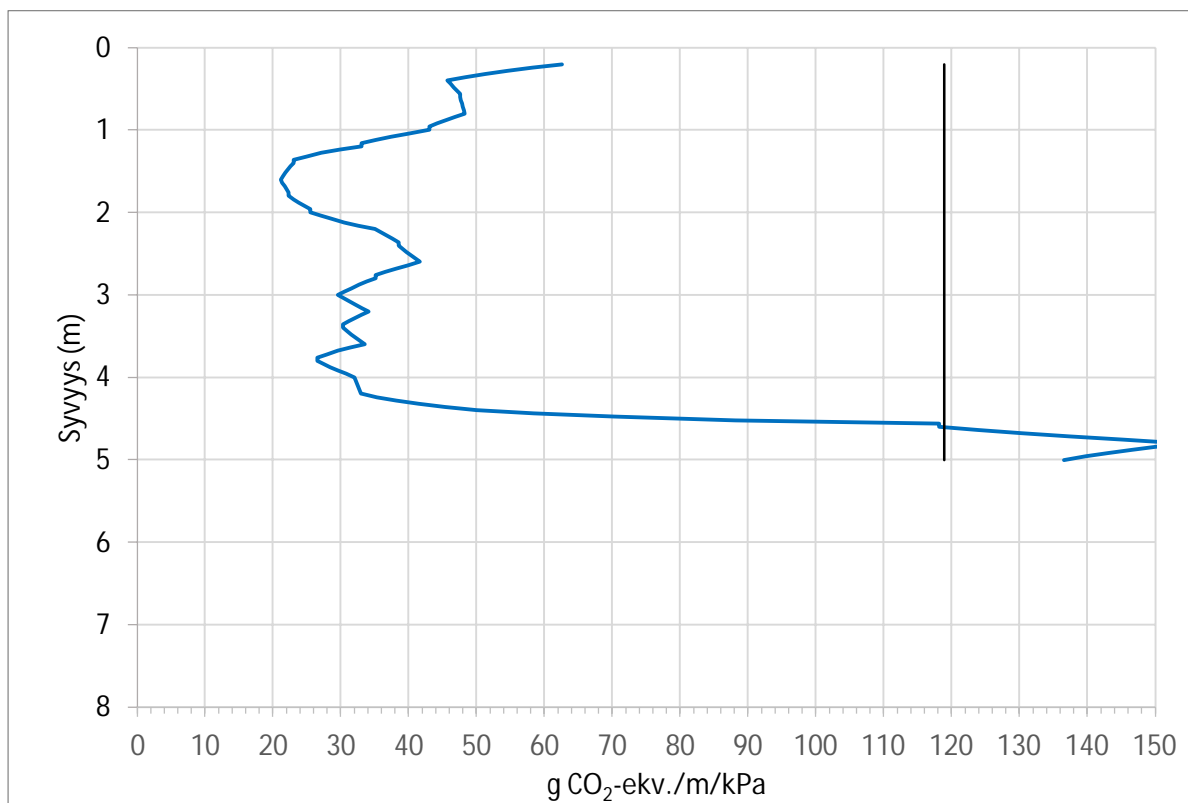
Kuva 6.10: Alue A4, 80 kg/m<sup>3</sup>, Infra Stabi80, 3 kk.



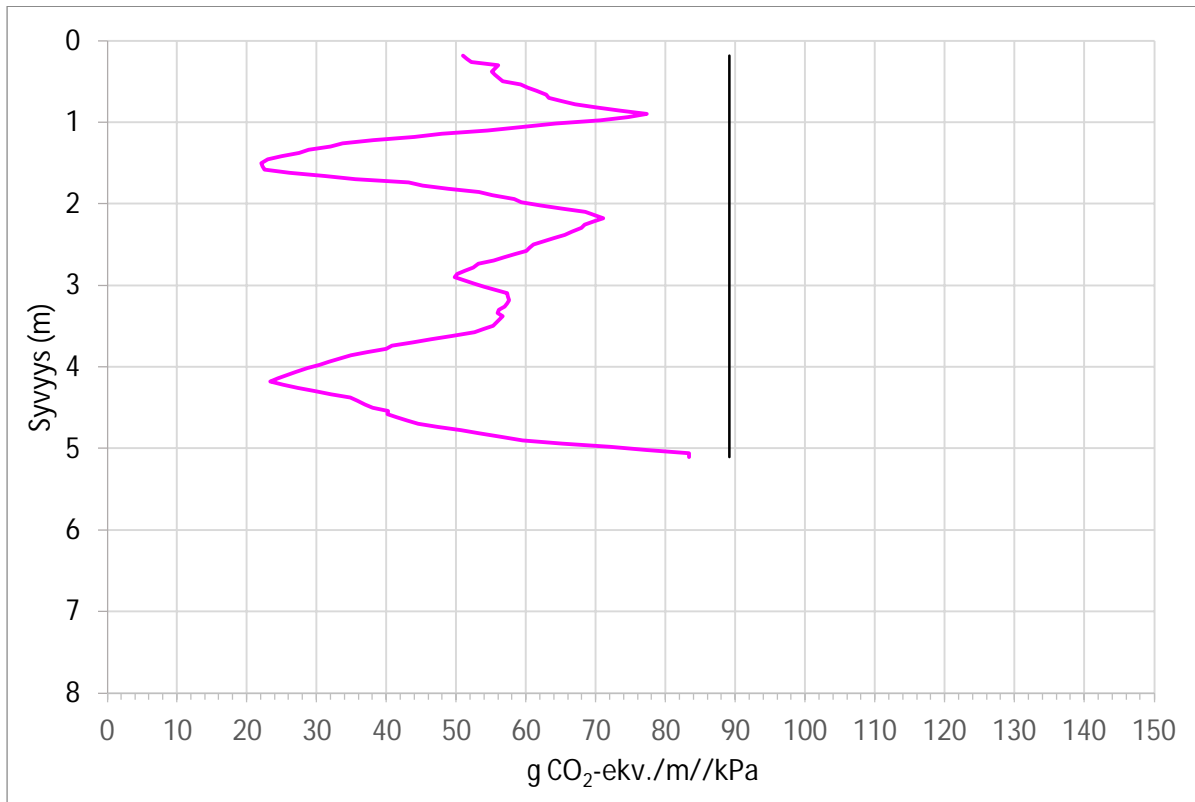
Kuva 6.11: Alue D1, Infra Stabi80, 120 kg/m<sup>3</sup>, 3 kk.



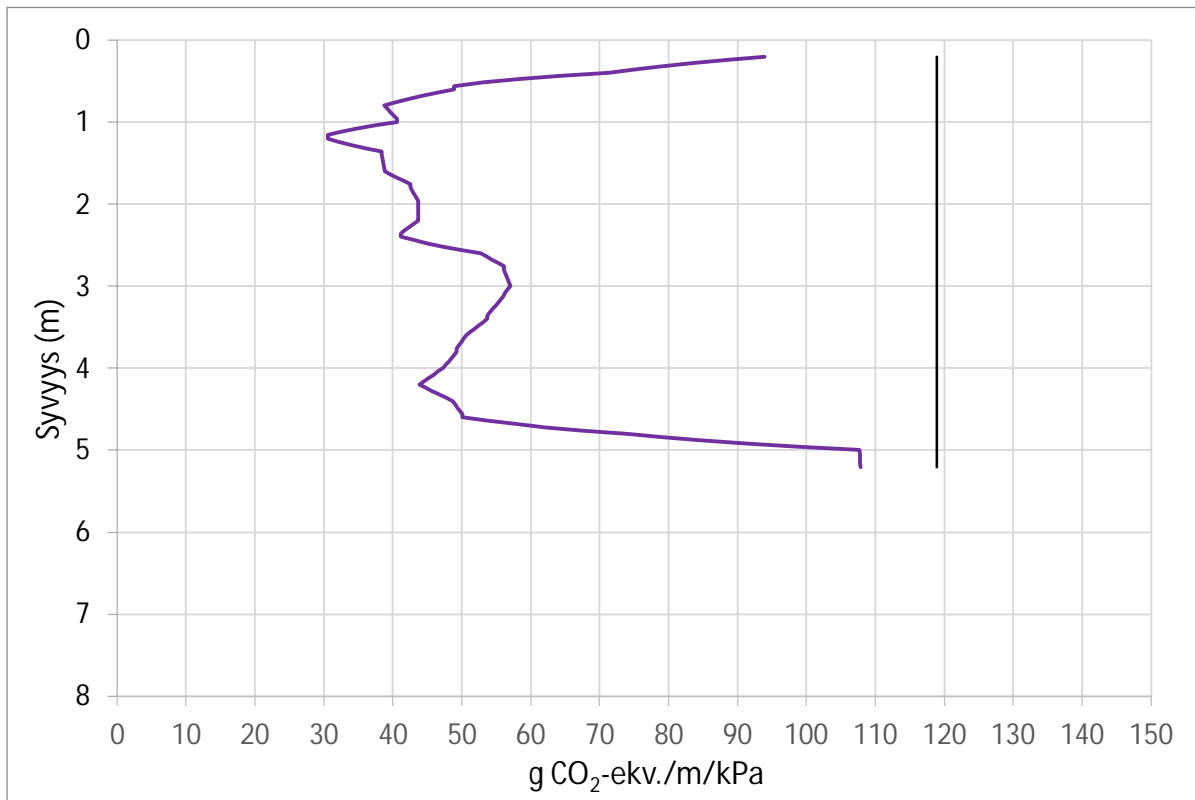
Kuva 6.12: Alue B1, 120 kg/m<sup>3</sup>, LT KAI + CEMII 7:3, 3 kk.



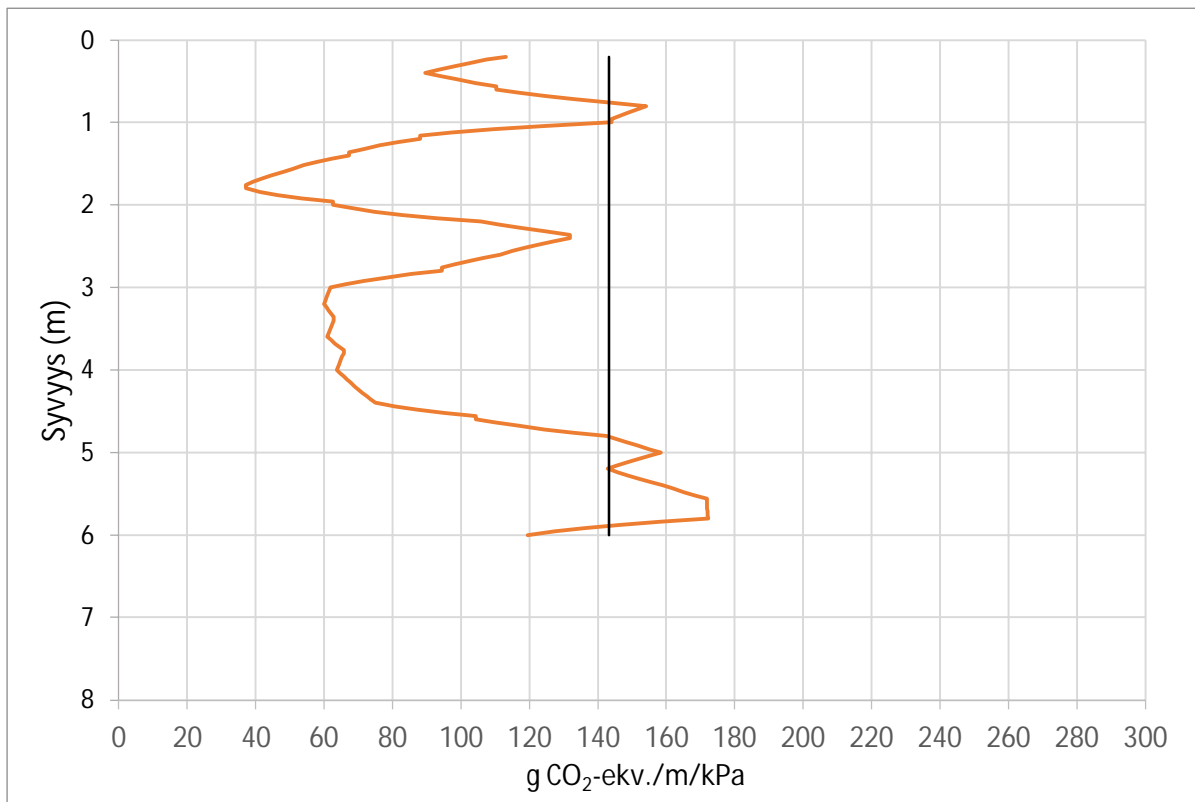
Kuva 6.13: Alue B2, 160 kg/m<sup>3</sup>, LT KAI + CEMII 7:3, 3 kk.



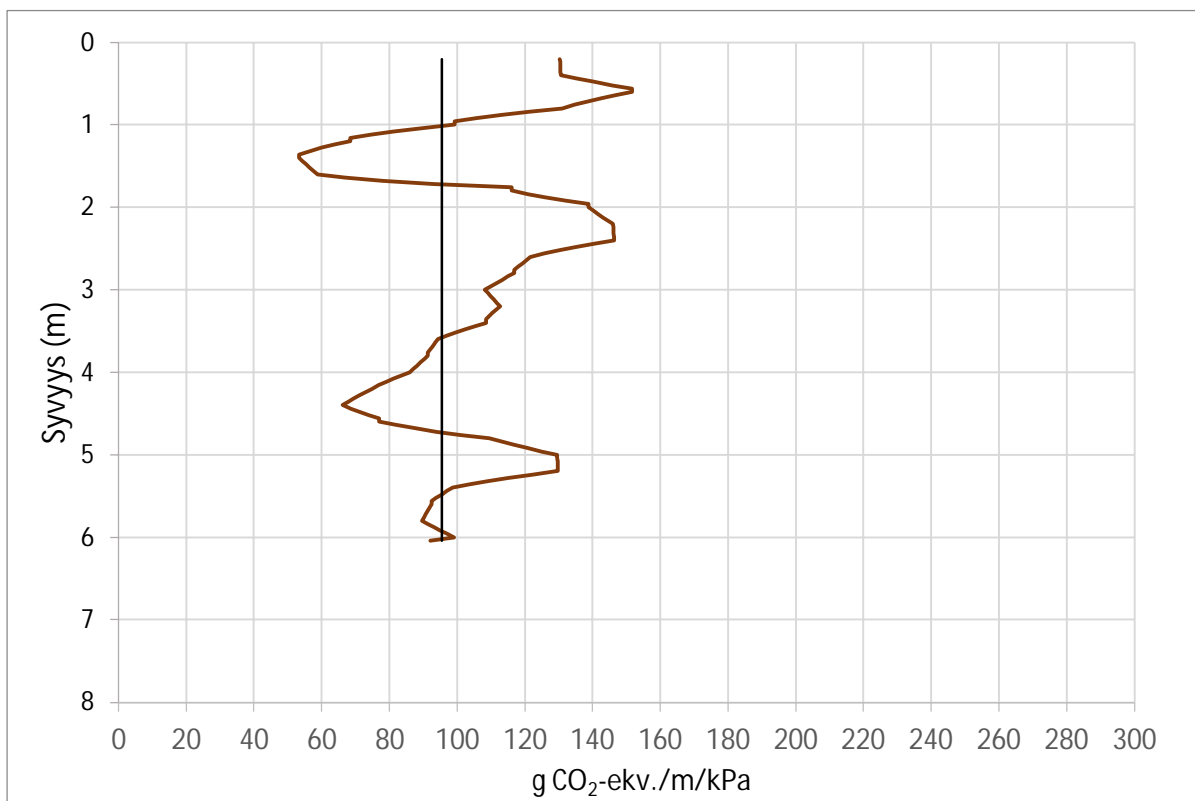
Kuva 6.14: Alue B3, 120 kg/m<sup>3</sup>, LT JAM + CEMII 7:3, 3 kk.



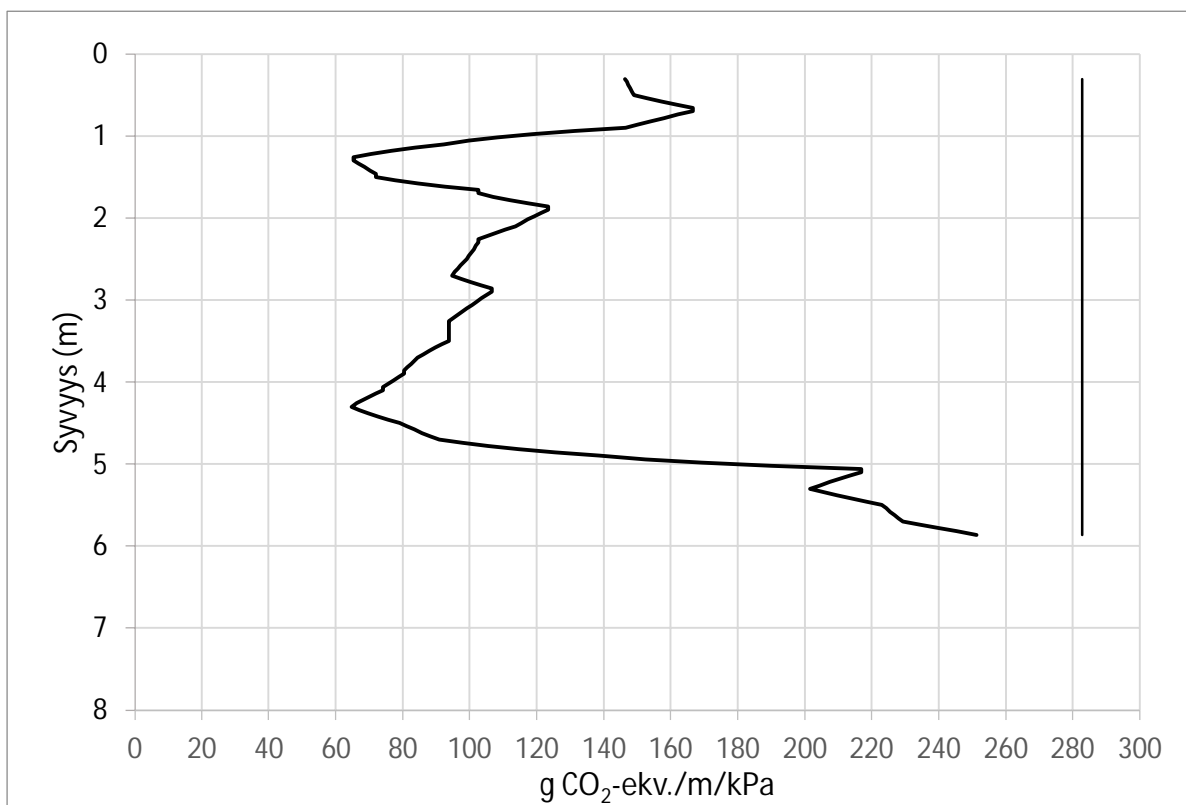
Kuva 6.15: Alue B4, 160 kg/m<sup>3</sup>, LT JAM + CEMII 7:3, 3 kk.



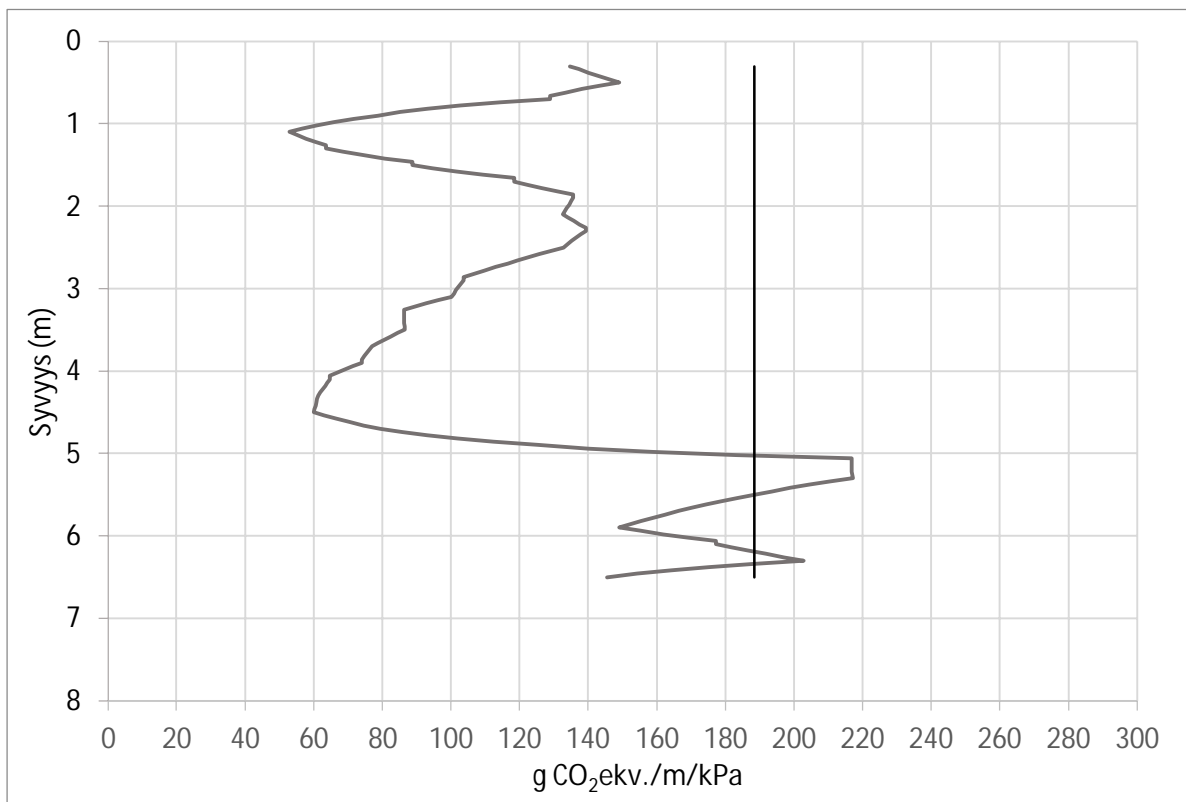
Kuva 6.16: Alue C1, Terra Green, 120 kg/m<sup>3</sup>, 3 kk.



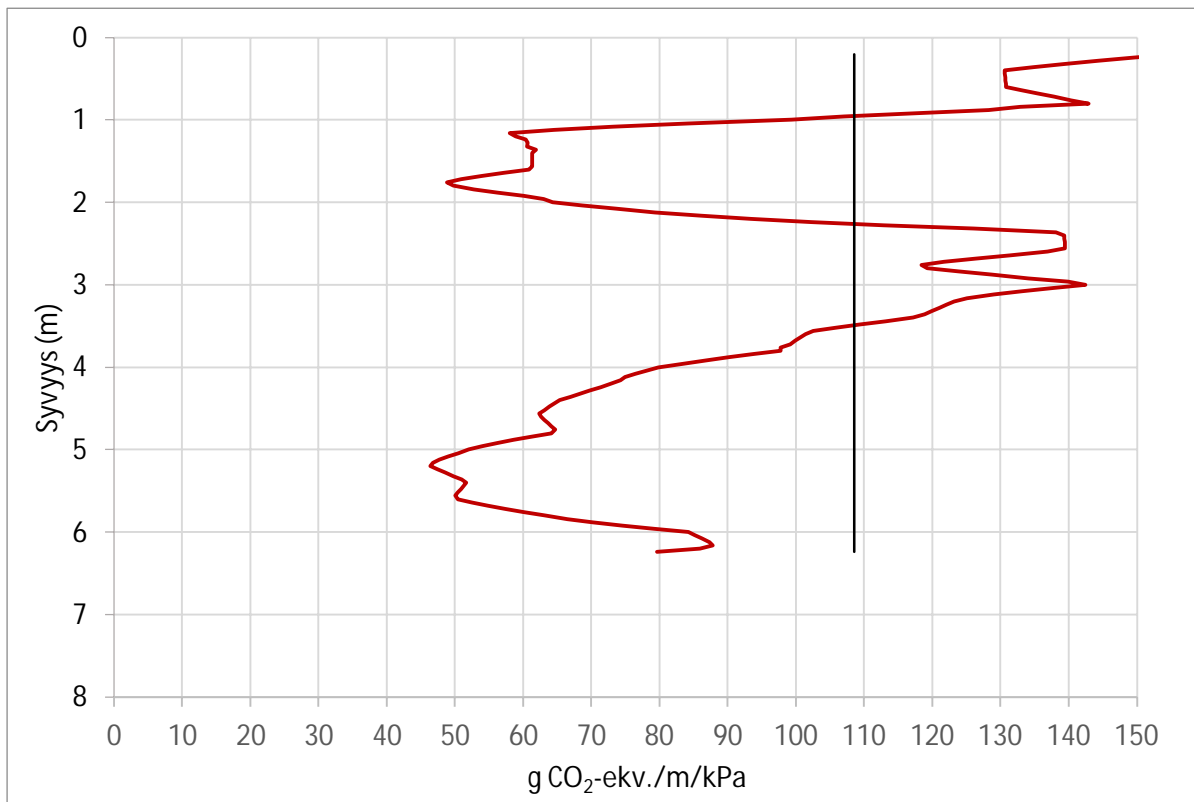
Kuva 6.17: Alue C2, Terra Green, 80 kg/m<sup>3</sup>, 3 kk.



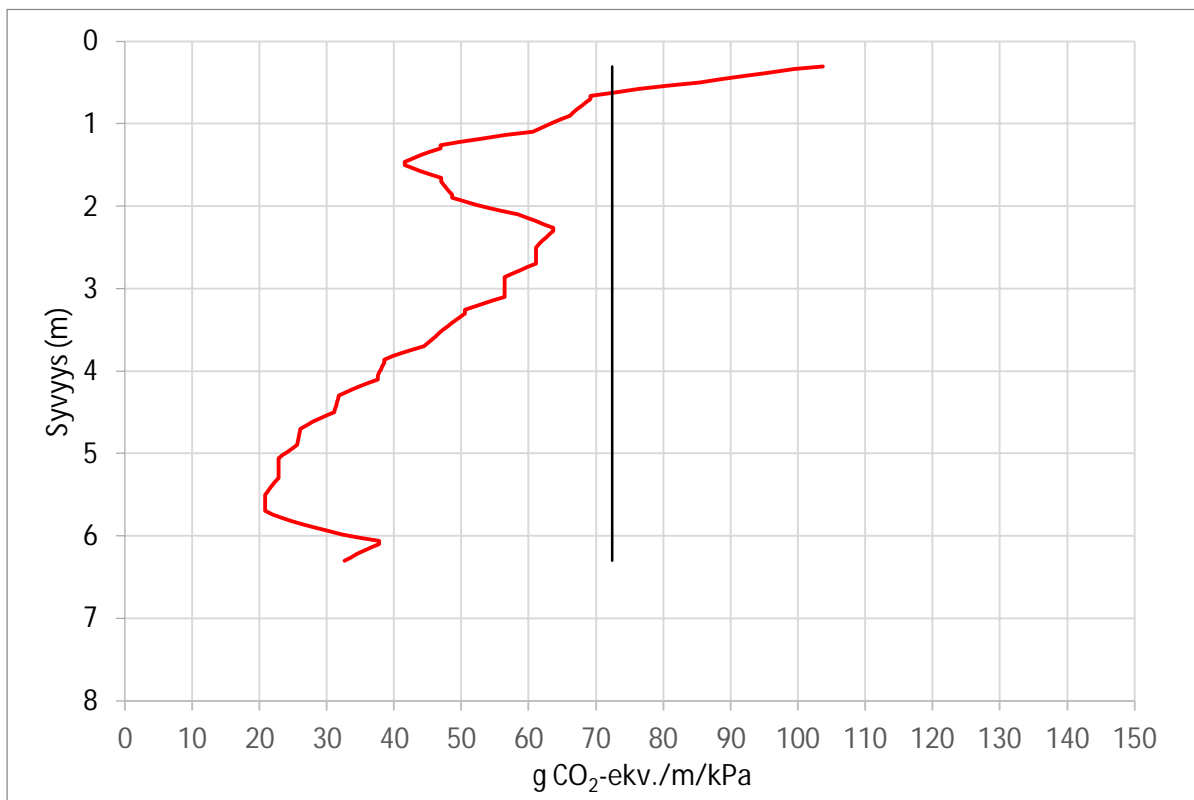
Kuva 6.18: Alue C3, Terra POZ, 120 kg/m<sup>3</sup>, 3 kk.



Kuva 6.19: Alue C4, Terra POZ, 80 kg/m<sup>3</sup>, 3 kk.



Kuva 6.20: Alue E1, Terra GTC, 120 kg/m<sup>3</sup>, 3 kk.



Kuva 6.21: Alue E2, Terra GTC, 80 kg/m<sup>3</sup>, 3 kk.

## **Leikkauslujuuden tulkinta sekä tehokkaan jännityksen ja vaippa- ja tankokitkan huomioiminen**

Tässä työssä tulokset on käsitelty Stabila-ohjelmassa, jossa tehokkaan jännityksen sekä vaippa- ja tankokitkan huomioiminen leikkauslujuuden tulkinnassa on mahdollista.

Yksittäiset kairausdiagrammit on esitetty mitattuina havaintoina ja leikkauslujuutena ilman, että leikkauslujuuden tulkinnassa on huomioitu tehokasta jännitystä tai vaippa- ja tankokitkaa.

Keskiaarvodiagrammeissa on tehokas jännitys sekä vaippa- ja tankokitka huomioitu. Huomiointi on tehty seuraavasti:

Leikkauslujuus  $S_u = (q_c - \sigma_o) / N_c$ , jossa kärkivastus  $q_c$  on joko lyönnin kärkivastus  $q_c = N_{20} / A$  tai puristuksen kärkivastus  $q_c = (F_{tot} - f_{sv}) / A - f_{st}$ .

Kaavoissa esiintyvät suureet ovat seuraavia

$\sigma_o$  = tehokas jännitys

$N_c$  = kantavuuskerroin

$N_{20}$  = heijarilyöntien lukumäärä 20 cm matkalla

$F_{tot}$  = mitattu puristusvoima

$A$  = kärjen pohjan pinta-ala

$f_{sv}$  = kärjen vaipan kitka

$f_{st}$  = tankokitka

Tehokas jännitys  $\sigma_o$  riippuu syvyydestä ja lasketaan pohjaveden pinnan alapuolella tilavuuspainon 16 kN/m avulla, kaavalla  $\sigma_o = 16 \text{ kN/m} \cdot \text{syvyys}$ .

Tankokitka lasketaan kaavalla  $f_{st} = 1 \text{ kPa/m} \cdot \text{tangon metrimäärä}$ . Kärjen vaippaan kohdistuva kitka lasketaan kaavalla

$f_{sv} = \sigma_o \cdot \text{kitkakerroin} \cdot \text{lepopainekerroin} \cdot A$ ,

jossa lepopainekerroin =  $1 - \sin(\varphi)$ .

Suure  $\varphi$  on maan kitkakulma, joka stabiloidun pilarin tapauksessa on 34 astetta. Kitkakertoimen arvona käytetään arvoa  $2/3 = 0,667$ .

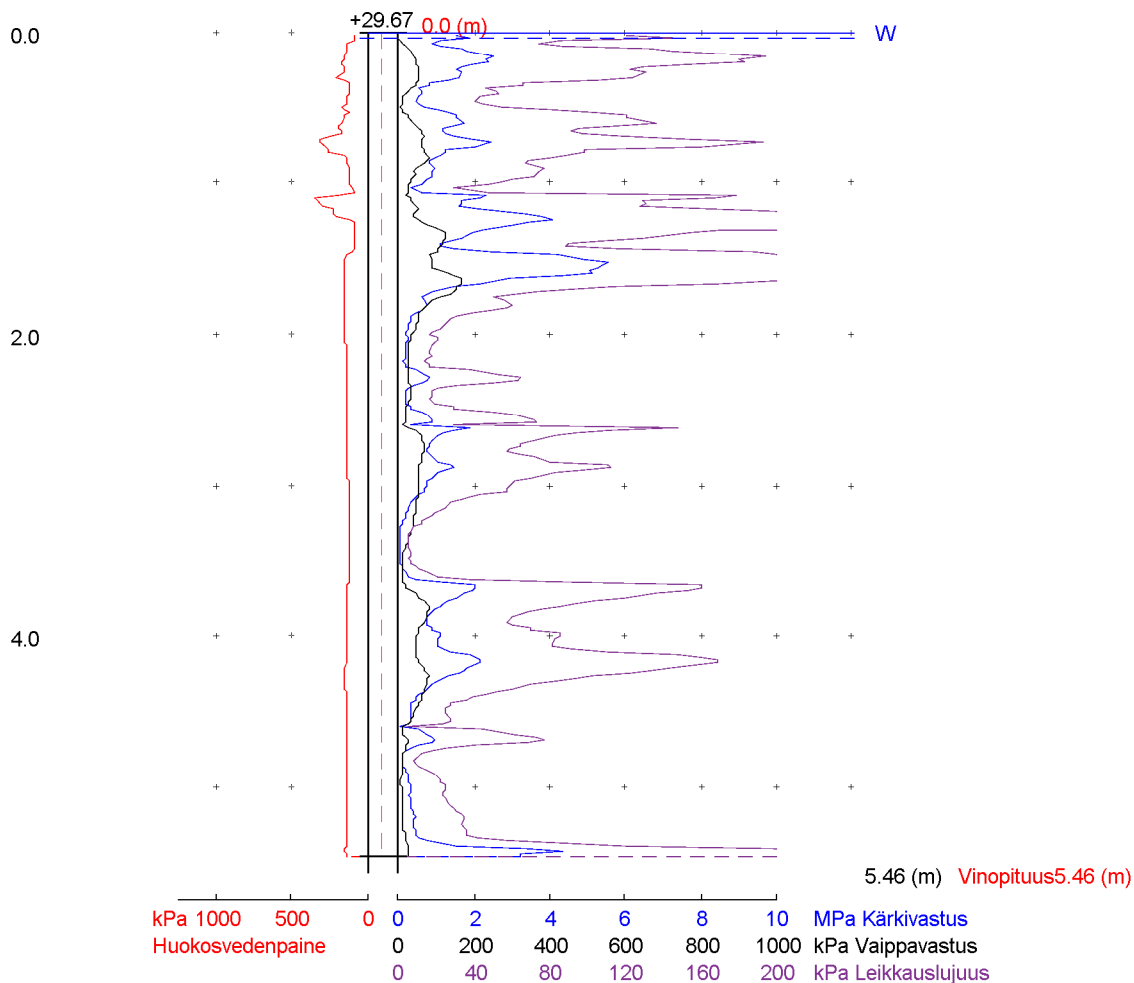


Pidetään Stadista huolta.

KOHDE Kuninkaantammi lammenranta ks, rs ja		SUUNN.	TNO 20325
PAIKKA PL B312 (3156)		POHJOINEN 6683350.87	ITÄ 25494384.18
TUTK. RRO	TUTK.PVM. 26.08.2020	MAANPINTA +29.67	PÄÄTTYMINEN +24.21
Cptu -kairaus		PVM 27.08.2020	IMK 1:50

Helsingin Kaupunki © (GEO)

GeoKaira 3.7.4 (02.06.2020)





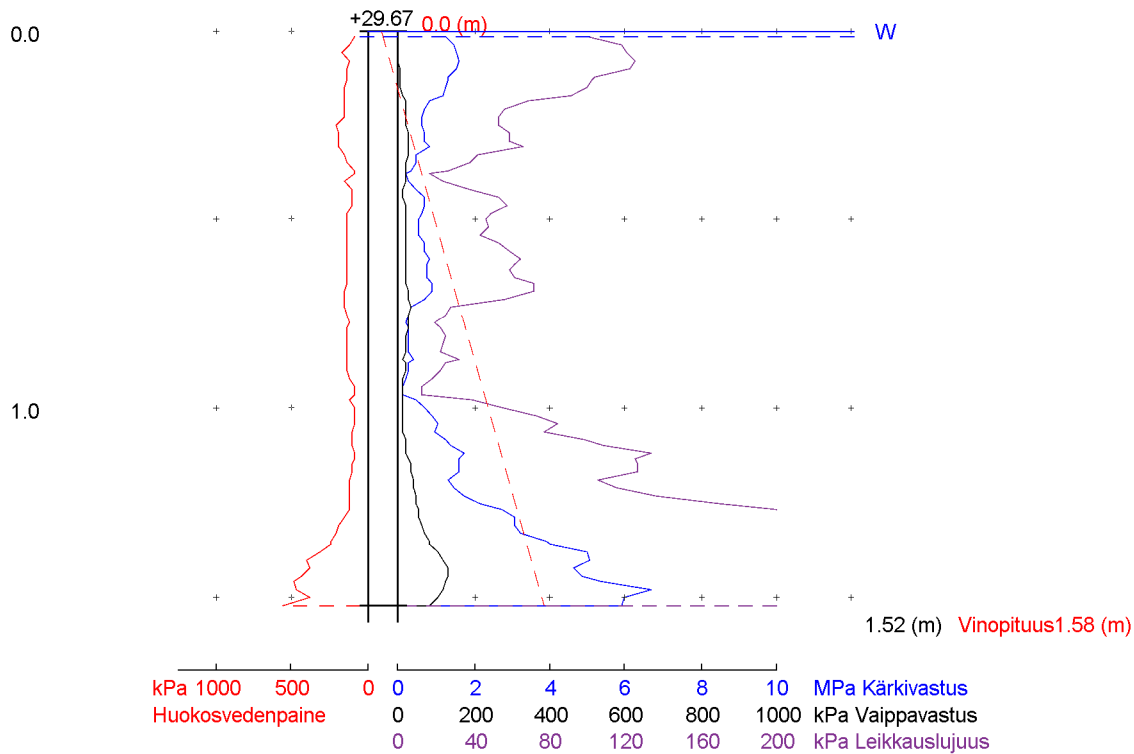


Pidetään Stadista huolta.

KOHDE Kuninkaantammi lammenranta ks, rs ja		SUUNN.	TNO 20325
PAIKKA PL B312B (3157)		POHJOINEN 6683350.87	ITÄ 25494384.18
TUTK. RRO	TUTK.PVM. 26.08.2020	MAANPINTA +29.67	PÄÄTTYMINEN +28.15
Cptu -kairaus		PVM 27.08.2020	MK 1:20

Helsingin Kaupunki © (GEO)

GeoKaira 3.7.4 (02.06.2020)



Maa- ja kallioperäyksikkö GEO, PL 2205, 00099 HELSINGIN KAUPUNKI www.geotekniikka.fi



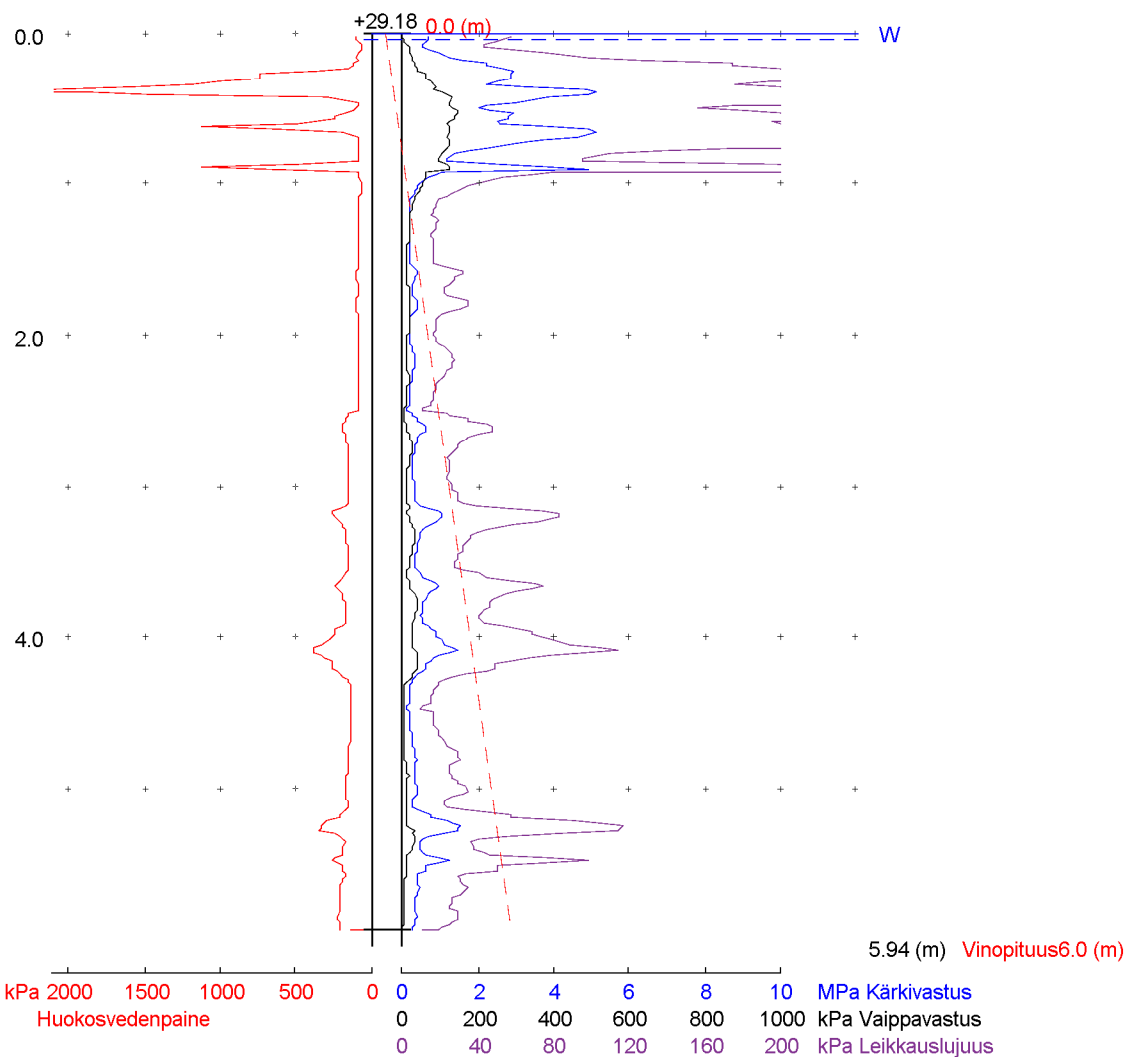
**STARA**

Pidetään Stadista huolta.

KOHDE Kuninkaantammi lammenranta ks, rs ja		SUUNN.	TNO 20325
PAIKKA PL D103 (3154)		POHJOINEN 6683365.51	ITÄ 25494399.04
TUTK. RRO	TUTK.PVM. 26.08.2020	MAANPINTA +29.18	PÄÄTTYMINEN +23.24
Cptu -kairaus		PVM 27.08.2020	IMK 1:50

Helsingin Kaupunki © (GEO)

GeoKaira 3.7.4 (02.06.2020)



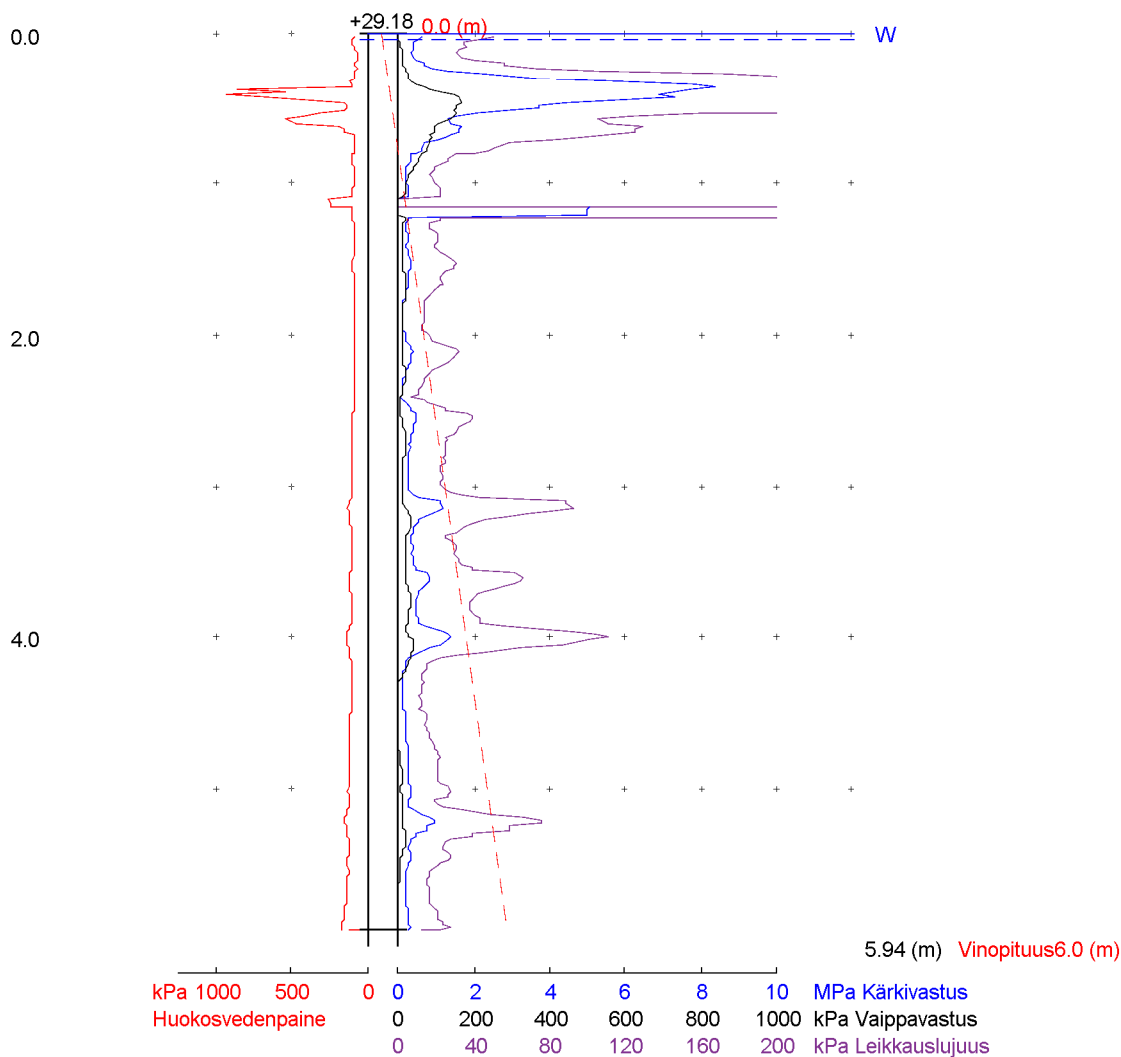


Pidetään Stadista huolta.

KOHDE Kuninkaantammi lammenranta ks, rs ja		SUUNN.	TNO 20325
PAIKKA PL D103B (3155)		POHJOINEN 6683365.51	ITÄ 25494399.04
TUTK. RRO	TUTK.PVM. 26.08.2020	MAANPINTA +29.18	PÄÄTTYMINEN +23.24
Cptu -kairaus		PVM 27.08.2020	IMK 1:50

Helsingin Kaupunki © (GEO)

GeoKaira 3.7.4 (02.06.2020)



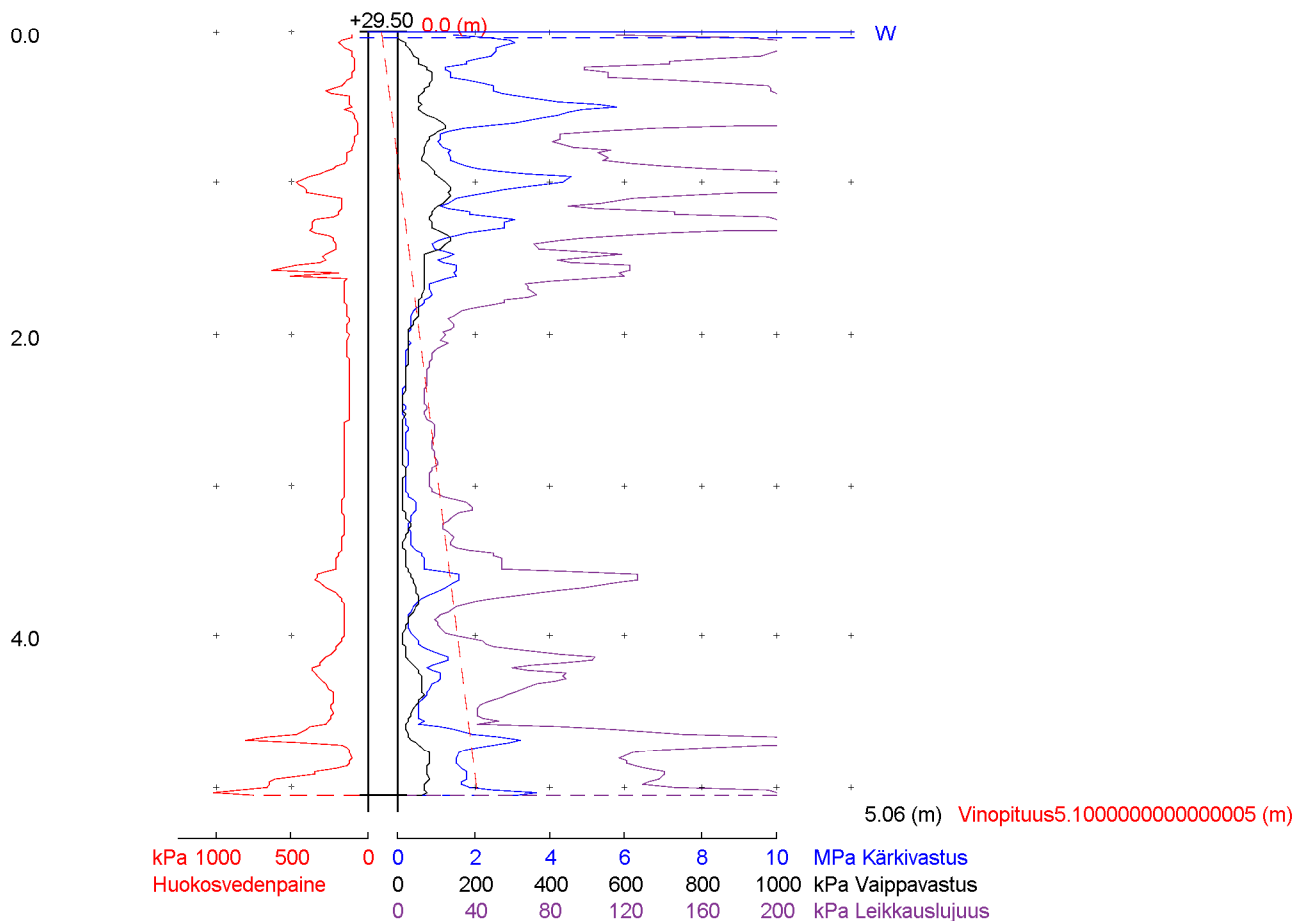


Pidetään Stadista huolta.

KOHDE Kuninkaantammi lammenranta ks, rs ja		SUUNN.	TNO 20325
PAIKKA PL E101 (3152)		POHJOINEN 6683369.44	ITÄ 25494405.05
TUTK. RRO	TUTK.PVM. 26.08.2020	MAANPINTA +29.50	PÄÄTTYMINEN +24.44
Cptu -kairaus		PVM 27.08.2020	IMK 1:50

Helsingin Kaupunki © (GEO)

GeoKaira 3.7.4 (02.06.2020)



Maa- ja kallioeräyksikkö GEO, PL 2205, 00099 HELSINGIN KAUPUNKI www.geotekniikka.fi

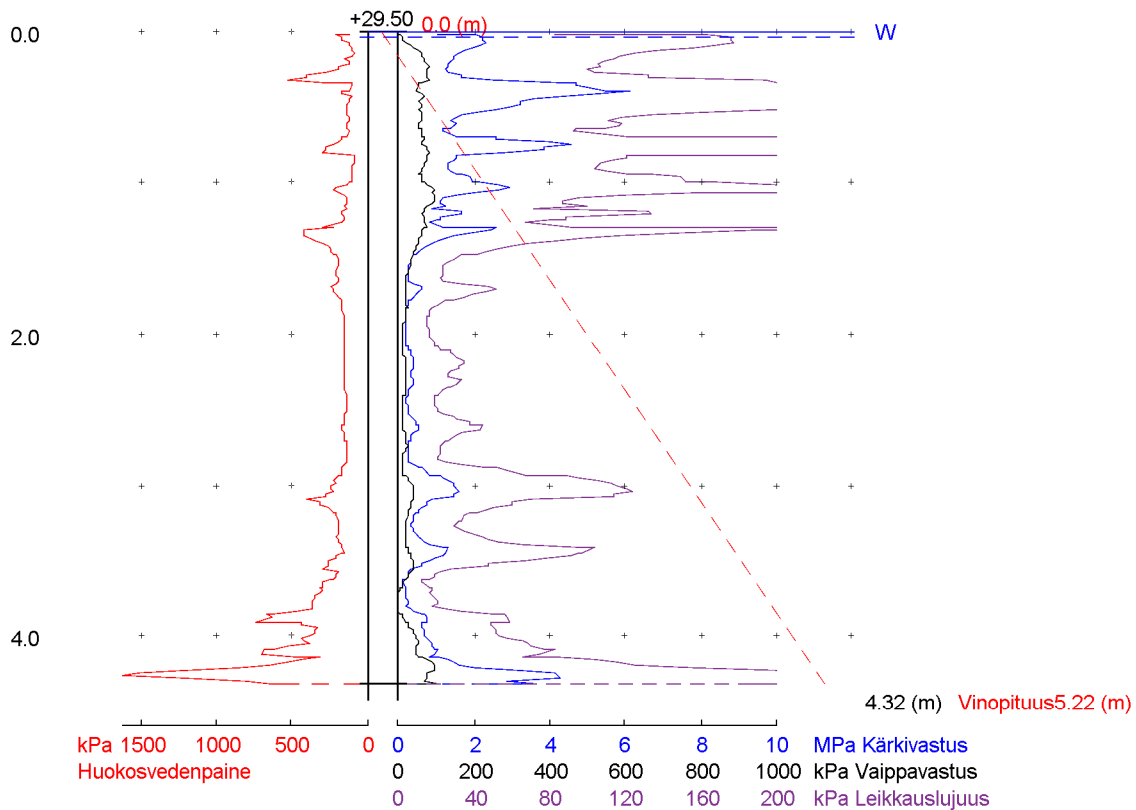
**STARA**

Pidetään Stadista huolta.

KOHDE Kuninkaantammi lammenranta ks, rs ja		SUUNN.	TNO 20325
PAIKKA PL E101A (3153)		POHJOINEN 6683369.44	ITÄ 25494405.05
TUTK. RRO	TUTK.PVM. 26.08.2020	MAANPINTA +29.50	PÄÄTTYMINEN +25.18
Cptu -kairaus		PVM 27.08.2020	IMK 1:50

Helsingin Kaupunki © (GEO)

GeoKaira 3.7.4 (02.06.2020)



<b>Infrastabi</b>	<b>80</b>	
<b>SIDEAINEEN</b>	Tuhka 1	0,80
<b>SEOSSUHDE</b>	Rapid sementti	0,20



TUOTEVAIHE				
RAAKA-AINE	A1 RAAKA-AINEEN HANKINTA	A2 KULJETUS VALMISTUKSEEN	A3 TUOTTEEN VALMISTUS	CO2 kg/ ekv
Tuhka 1	jäteraaka-aine	3,52	5,056	8,576
Rapid sementti	140	1,32	1,264	142,584
<b>TOTAL CO2 kg/ ekv</b>	<b>140</b>	<b>4,84</b>	<b>6,32</b>	<b>151,16</b>

KULJETUS KOHTEELLE		
A4 KULJETUS KOHTEELLE	REITTI	PITUUS KM
<b>Tonnit</b>	<b>55</b>	Testiradantie 2, Nokia -Kuninkaantammi, Helsinki
<b>Kuormausaste</b>	<b>100 %</b>	

Kuljetus kohteelle	PITUUS KM	CO2 kg/ekv
Maantieajo	180	217,8
Katuajo	2	4,4
<b>Kuljetus yhteensä</b>		<b>222,2</b>
<b>Kuljetuksen hiilidioksidipäästö/tn</b>		<b>4,04</b>

Kuljetus tyhjänä	PITUUS KM	CO2 kg/ekv
Maantieajo tyhjänä	180	138,6
Katuajo tyhjänä	2	2,42
<b>Kuljetus yhteensä</b>		<b>141,02</b>
<b>Kuljetuksen hiilidioksidipäästö/tn</b>		<b>2,564</b>

<b>A4 Kuljetuksen hiilidioksidipäästö CO2 kg/ekv per sideainetonni</b>	<b>6,604</b>
<b>A1-A3 Tuotevaiheen hiilidioksidipäästö CO2 kg/ekv per sideainetonni</b>	<b>151,16</b>
<b>KOHTEELLE TUODUN SIDEAINETONNIN HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖ</b>	<b>157,764</b>

CO2 PARAMETRIT				
Vaihe	Laji	CO2 kg/ ekv	Lähde	Vuosi
A1	Sementti	700	betoni.com	2020
A2	Kuljetus maantie täysi/km	0,022	Lipasto tietokanta	2020
	Kuljetus maantie tyhjä/km	0,014	Lipasto tietokanta	2020
	Kuljetus maantie 50%/km	0,018	Lipasto tietokanta	2020
A3	Sähköenergia Mwh	158	Motiva	2020

TUOTANNON PARAMETRIT		
Kuljetusmatka sementti	300 km	
Kuljetusmatka tuhka	200 km	
Sähköenergian käyttö/ tuotettu tn	0,04 Mwh	

KOHDEKULJETUKSEN PARAMETRIT				
Kuormausaste	Täysi	Tyhjä	50 %	
Maantie	0,022	0,014	0,018	
Katuajo	0,04	0,022	0,031	



**Koestabiloinnin toteutuksen vaiheet ja aikataulu:**

- Idea uusiosideainekoestabiloinnin toteutuksesta – syksy 2018
- Koestabilointihankkeesta tiedottaminen toimijoille  
(sideainetoimittajat, urakoitsijat, ...) 01/2019-03/2020
- Maanäytteidenotto sideainetoimittajille stabiloitavuuskokeita varten 05/2019
- Koetoimintaluvan haku 03/2020
- Urakkakysely 03/2020 ja urakoitsijan valinta
- Diplomityön aloitus 03/2020
- PV-putkien asennus ja mittauksen aloitus 03-04/2020
- Toimijoiden koetulosten toimitus Rambolliin viimeistään 04/2020
- Koestabilointi 05/2020
- 1 kk valvontakairaukset 06/2020
- Tuotantostabilointiurakka valmis 07/2020
- 3 kk valvontakairaukset 8/2020
- Pilareiden yläpäiden nostot, kenttä- ja laboratoriotutkimukset 08-09/2020
- Kenttänäytteiden ympäristölaboratoriotutkimukset 11-12/2020
- Diplomityö valmis 01/2021
- Hankintamenettelyjen kehitys 2021-2023

### **Sideaineiden kuljetus työmaalle päästölaskelmat:**

#### **UPM LT KAI ja LT JAM**

Menomatalla päästöjä muodostuu:

$$(0,022 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn/km} \times 220 \text{ km} \times 0,8) + (0,04 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. / tn/km} \times 220 \text{ km} \times 0,2) = 5,63 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn}$$

Paluumatkalla muodostuu:

$$(0,014 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn/km} \times 220 \text{ km} \times 0,8) + (0,022 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. / tn/km} \times 220 \text{ km} \times 0,2) = 3,43 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn}$$

Yhteensä päästöjä sideaineen kuljetuksessa muodostuu 9,06 kg CO<sub>2</sub>-ekv. /tn-sideaine.

#### **Nordkalk Terra GTC, Terra Green ja Terra POZ**

Menomatalla päästöjä muodostuu:

$$(0,022 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn/km} \times 60 \text{ km} \times 0,8) + (0,04 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. / tn/km} \times 60 \text{ km} \times 0,2) = 1,54 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn}$$

Paluumatkalla muodostuu:

$$(0,014 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn/km} \times 60 \text{ km} \times 0,8) + (0,022 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. / tn/km} \times 60 \text{ km} \times 0,2) = 0,94 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn}$$

Yhteensä päästöjä sideaineen kuljetuksessa muodostuu 2,47 kg CO<sub>2</sub>-ekv. /tn-sideaine.

#### **Ecolan Infra Stabi80**

Menomatalla päästöjä muodostuu:

$$(0,022 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn/km} \times 183 \text{ km} \times 0,8) + (0,04 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. / tn/km} \times 183 \text{ km} \times 0,2) = 4,68 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn}$$

Paluumatkalla päästöjä muodostuu:

$$(0,014 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn/km} \times 183 \text{ km} \times 0,8) + (0,022 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. / tn/km} \times 183 \text{ km} \times 0,2) = 2,85 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn}$$

Yhteensä päästöjä sideaineen kuljetuksessa muodostuu 7,54 kg CO<sub>2</sub>-ekv. /tn-sideaine.

#### **Plussementti**

Menomatalla päästöjä muodostuu:

$$(0,022 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn/km} \times 200 \text{ km} \times 0,8) + (0,04 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. / tn/km} \times 200 \text{ km} \times 0,2) = 5,12 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn}$$

Paluumatkalla päästöjä muodostuu:

$$(0,014 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn/km} \times 200 \text{ km} \times 0,8) + (0,022 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. / tn/km} \times 200 \text{ km} \times 0,2) = 3,12 \text{ kg CO}_2\text{-ekv. /tn}$$

Yhteensä päästöjä sideaineen kuljetuksessa muodostuu 8,24 kg CO<sub>2</sub>-ekv. /tn-sideaine.