



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MATTI HOLOPAINEN
STABILOIDUN 0-KUIDUN GEOTEKNISET OMINAISUUDET JA
PITKÄAIKAISKESTÄVYYS

Diplomityö

Tarkastaja: professori
Tim Länsivaara
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
taneuvoston kokouksessa
4.11.2015

TIIVISTELMÄ

MATTI HOLOPAINEN: Stabiloidun 0-kuidun geotekniset ominaisuudet ja pitkäaikaiskestävyys

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 102 sivua, 24 liitesivua

Helmikuu 2016

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: professori Tim Länsivaara

Avainsanat: massastabilointi, stabiloituvuustutkimukset, 0-kuitu, ylijäämämaat, UUMA-materiaalit

Korvaamalla luonnon kiviaineksia esimerkiksi teollisuuden sivutuotteilla, voidaan säästää merkittäviä kustannussäästöjä samalla vähentäen luonnon kiviainesten käyttöä. Tampereen Lielahdessa Näsijärven pohjassa makaavan paksun kuitulietekerrostuman aiheuttaman vesistö rakentamisongelman ratkaisuvaihtoehdoksi on tutkittu niin kutsutun 0-kuidun stabilointia muiden ylijäämämaiden kanssa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ja tarkentaa stabiloidun 0-kuidun hyötykäyttömahdollisuutta Lielahden alueella luonnon kiviaineksia korvaavana maarakennusmateriaalina. Tutkimuksen taustalla on Lielahden 0-kuidun stabiloituvuus -selvitys, joka on toiminut tämän diplomityön esiselvityksenä. Tutkimus on osa laajempaa selvityssaineistoa, jonka perusteella on arvioitu Tampereen Lielahden alueen kehittämistä sekä 0-kuidun hyötykäyttöä.

Tutkimukseen liittyvässä kirjallisuusselvityksessä käytiin läpi ruoppaus- ja läjitysmenetelmiä sekä niihin liittyviä reunaehtoja. Lisäksi osiossa esiteltiin massa- ja prosessistabilointimenetelmiä sekä niiden käyttökohteita. Osiossa on myös esitelty muutamia toteutuneita suomalaisia stabilointikohteita.

Työn varsinaisessa tutkimusosiossa tehtiin laboratorio-olosuhteissa stabiloituvuuskokeita eri resepteillä ja sideainemäärillä stabiloidulle 0-kuidulle. Tutkimuksessa 0-kuituun seostettiin lähialueelta saatavia ylijäämämaita ennen stabilointia. Tulosten perusteella 0-kuidun hyötykäyttöä edellyttävät ominaisuudet paranevat merkittävästi seostamisella ja stabiloinnilla. Geoteknisten ominaisuuksien lisäksi stabiloinnilla voidaan vaikuttaa myös materiaalin ympäristöominaisuuksiin. Tulosten perusteella 0-kuidussa esiintyy materiaalivaihtelua, joka tulee ottaa huomioon mahdollista luonnossa tehtävää stabilointia suunniteltaessa. 0-kuidun laadullisella vaihtelulla havaittiin olevan suuri merkitys materiaalin stabiloituvuuteen.

Stabiloidun 0-kuidun geotekniset ominaisuudet riippuvat 0-kuidun sekä reseptissä seostettavan materiaalin laadusta sekä käytettävästä sideainemäärästä. Lujuustulosten perusteella jo suhteellisen alhaisilla sideainemäärillä on merkittävä vaikutus stabiloidun 0-kuidun lujuuteen. 0-kuidun hyötykäyttöä arvioitaessa, tulee geotekniset mitoitusparametrit määrittää kohdekohtaisesti tuleva stabiloitu rakenne huomioiden. Geoteknisten ominaisuuksien lisäksi materiaalin ympäristökelpoisuus tulee jatkossa selvittää.

ABSTRACT

MATTI HOLOPAINEN: Geotechnical Properties of Stabilized Paper Mill Sludge
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 102 pages, 24 Appendix pages
February 2016
Master's Degree Programme in Civil Engineering
Major: Municipality Engineering
Examiner: Professor Tim Länsivaara

Keywords: mass stabilization, stabilization tests, paper mill sludge, surplus soils, UUMA materials

Natural rock materials can be replaced with industrial by-products. When utilizing recovered materials in groundworks, significant savings could be achieved and the use of rock and gravel materials reduced. According to studies, one solution for utilization of paper mill sludge in Lielähti is mass stabilization.

The objective of this thesis was to study and define the possibilities to replace natural rock materials with stabilized paper mill sludge in groundworks in Lielähti. There has been also made other studies of development of Lielähti and utilization of paper mill sludge.

Literature research contains the introduction of dredging and landfilling soil masses. In this section there are also described different stabilization methods and uses.

In laboratory research stabilization test were made by varying stabilization recipes and binder amount. Paper mill sludge was mixed with other surplus soils before adding the binder. Based on stabilization tests results, technical and environmental properties improve due to mixing and stabilization. The results showed that variations of quality of paper mill sludge occur. The variations of quality have a significant impact on the stabilization and it should be taken into account when planning large scale site stabilization.

Properties of stabilized paper mill sludge depend on quality of aggregate and binder amount in recipe. Strength of paper mill sludge increases significantly by stabilization with relatively small binder amounts. Determination of dimensioning parameters should be made according to the final structure. Besides the examination of geotechnical properties, the environmental properties should be investigated.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:ssä ja työn tilaajana on ollut Tampereen kaupunki. Työ on tehty osana Tampereen Lielahden kehittämistä koskevaa selvitysaikainetta.

Työtä ovat ohjanneet Juho Mansikkamäki sekä Ari Simonen Ramboll Finland Oy:stä. Haluan esittää kiitokseni ohjaajille työn valmistumisen kannalta välttämättömistä neuvoista sekä palautteesta. Lisäksi haluan kiittää työn tarkastajaa professori Tim Länsiväaraa (TTY) työn aikana saaduista neuvoista ja ideoista.

Haluan kiittää myös Ramboll Finland Oy:n Luopioisten yksikön väkeä saamistani neuvoista laboratoriotutkimuksissa.

Tampereella, 24.2.2016

Matti Holopainen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TUTKIMUKSEN TAUSTA JA LÄHTÖKOHDAT	3
2.1	Hiedanrannan alueen kehittäminen	4
2.2	Alueen pohjaolosuhteet ja rakennettavuus	6
2.3	0-kuidun stabiloituvuuden esiselvitys	9
2.3.1	Yleistä	9
2.3.2	Stabiloituvuustutkimuksen vaiheet	9
2.3.3	Yhteenvedo 0-kuidun alustavasta stabiloituvuustutkimuksesta.....	14
2.4	Tutkimuksen rajaukset	15
3.	0-KUITU MATERIAALINA	17
4.	RUOPPAUS JA LÄJITYS.....	18
4.1	Yleistä.....	18
4.2	Käytössä olevat ruoppaustekniikat.....	19
4.2.1	Kauharuoppaus.....	19
4.2.2	Imuruoppaus.....	20
4.3	Läjitys.....	21
5.	SYVÄSTABILOINTI.....	22
5.1	Yleistä.....	22
5.2	Massastabilointi.....	23
5.3	Prosessistabilointi.....	26
5.4	Laadunvarmistus	27
5.5	Stabiloinnissa käytettävät sideaineet.....	29
5.5.1	Sementti	30
5.5.2	Muut sideaineet	31
6.	TOTEUTUNEITA SUOMALAISIA STABILOINTIKOhteita.....	33
6.1	Veittostensuon syvästabilointi.....	33
6.2	Pansion satama	36
6.3	Kokkolan satama	37
7.	0-KUIDUN STABILOITUVUUSTUTKIMUKSET.....	41
7.1	Näytteenotto	41
7.2	Luokittelukokeet.....	43
7.2.1	Yleistä	43
7.2.2	Luokittelukokeiden tulokset.....	44
7.3	Stabiloituvuuskokeet	47
7.3.1	Tutkimuksessa käytetyt runko- ja täyteaineet.....	47
7.3.2	Koekappaleiden valmistus	48
7.3.3	Painumaseuranta	49
7.3.4	Yksiaksiaaliset puristuskokeet	49
7.3.5	Kolmiaksiaalikokeet.....	51

7.3.6	Ödometrikokeet.....	52
8.	HIEDANRANNAN KOESTABILOINTI	53
8.1	Kohteen esittely	53
8.1.1	Kohteen sijainti	53
8.1.2	Koerakenteen periaate.....	54
8.2	Koerakentamisen toteutus	56
8.2.1	Valmistelevat työt	58
8.2.2	0-kuidun ruoppaus ja massojen käsittely	59
8.2.3	Massastabilointityö	60
8.2.4	Stabilointityön aikana ja jälkeen tehtävät työt	63
8.3	Koekohteen seuranta ja laadunvarmistus	65
9.	STABILOIDUN 0-KUIDUN GEOTEKNISET OMINAISUUDET.....	66
9.1	Lujuusominaisuudet	66
9.1.1	Yksiaksaalinen puristuslujuus.....	67
9.1.2	Kolmiaksaalikoetulokset.....	69
9.2	Muodonmuutosominaisuudet	75
9.2.1	Esikuormituksen aikana tapahtuva kokoonpuristuminen	75
9.2.2	Portaittaiset ödometrikokeet	79
9.2.3	Viruma	84
9.2.4	Kimmomoduuli	87
9.3	Muut ominaisuudet.....	89
9.4	Tulosten arviointi	91
9.4.1	Mitoitusominaisuuksien määrittäminen	93
9.4.2	Arvio pitkäaikaisominaisuuksista	95
10.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	97
	LÄHTEET.....	99

LIITE 1: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	testikappaleen pinta-ala
c'	tehokas koheesio
E	kimmomoduuli
H	hydraulinen paine-ero
h	testikappaleen korkeus
k	vedenläpäisevyys
Q	testikappaleen läpäisseen veden määrä
q_u	puristuslujuus
r_s	virumaluku
w	vesipitoisuus
ε	muodonmuutos
μ^*	virumaindeksi
σ_1	pystysuuntainen pääjännitys
σ_3	vaakasuuntainen pääjännitys
τ	leikkauslujuus
φ'	tehokas leikkauskestävyyskulma

1. JOHDANTO

Suomessa rakentamiseen käytetään nykyisin kiviaineksia yli 100 miljoonaa tonnia vuodessa, josta luonnon kiviaineksen osuus on noin 70–80 miljoonaa tonnia. Maarakentamisessa käytettäviä kiviaineksia voidaan korvata esimerkiksi ylijäämämailla, teollisuuden sivutuotteilla tai jätteillä. Uusiokäytettäessä sivutuotteita tai jätteitä maanrakentamisessa, voidaan niitä kutsua infrarakentamisen uuden materiaaliteknologian mukaan UUMA-materiaaleiksi. Hyödyntämällä UUMA-materiaaleja voidaan edistää kestävästä kiertotalouden tavoitteiden saavuttamista. Erilaisten UUMA-hankkeiden avulla on edistetty uusiomateriaalien käyttöä maarakentamisessa sekä lisätty tietoisuutta uusiomateriaaleilla saavutettavista eduista sekä koko ajan kehittyvistä uusiomateriaalien hyödyntämistekniikoista.

Tampereen uutta kantakaupunkia koskevan yleiskaavan tavoitteita ovat olemassa olevien alueiden uudistaminen sekä kasvattaminen täydentämällä. Tähän tutkimukseen liittyvän Lielahden alueen kehittämisen sekä maankäytön haasteena on vanhan tehdasalueen edustalla Näsijärven pohjassa makaava kuitupitoinen liete. 0-kuiduksi kutsuttua selluloosatehtaasta peräisin olevaa jätettä on kertynyt Näsijärveen satojen metrien etäisyydelle tehdasalueesta aina 1980-luvulle saakka. Lielahden alueen 0-kuitukerrostumat aiheuttavat moniulotteisen ranta- ja vesistö rakentamisongelman, koska nykyisellään jopa 10 metriä paksu kuitupitoinen lietekerros estää vesialueen hyödyntämisen virkistys- sekä satama-alueena.

Tämän työn tavoitteena on selvittää ja tarkentaa 0-kuidun hyötykäyttömahdollisuutta alueella tehtävässä maanrakentamisessa stabiloinnin avulla. Tutkimuksen tärkeimpänä tavoitteena on esittää edellytykset sekä reunaehdot Lielahden vesialueen pohjassa olevan 0-kuidun käytölle. Tutkimuksessa otetaan huomioon 0-kuidun hyötykäytön mahdollisuus geoteknisestä sekä teknistaloudellisesta näkökulmasta. Teknistaloudellinen näkökulma korostuu lähialueelta saatavien ylijäämämaiden hyödyntämisessä stabiloinnin runkoaineena olevan 0-kuidun täyteaineena.

Diplomityö koostuu kirjallisuusselvityksestä, kokeellisesta tutkimusosioista sekä tutkimustulosten arvioinnista. Kirjallisuusselvityksessä on esitelty käytössä olevia ruoppausmenetelmiä sekä kerrottu massa- ja prosessistabiloinnista sekä niiden työvaiheista ja -tekniikoista. Kyseisessä osiossa on myös esitelty toteutuneita suomalaisia stabilointikohteita. Tutkimusosiossa esitellään stabiloidun 0-kuidun geoteknisten ominaisuuksien selvittämiseen käytetyt laboratoriotutkimukset sekä niiden periaatteet. Ramboll Finland Oy:n Luopioisten laboratoriossa tehdyissä tutkimuksissa selvitetään seostetun ja stabiloidun 0-kuidun muodonmuutos- sekä lujuusominaisuuksia. Laboratoriotutkimuksia on

tarkennettu Tampereen teknillisen yliopiston geolaboratoriossa. Stabiloituvuustutkimusten lisäksi kyseisessä osiossa on esitetty tämän diplomityön ja Lielahden 0-kuidun stabiloituvuus -selvityksen yhteydessä tehdyn 0-kuidun massastabiloinnin koerakenteen toteutus työvaiheineen.

0-kuidun hyödyntämistä on tutkittu vuonna 2015 valmistuneessa Lielahden 0-kuidun stabiloituvuus -selvityksessä. Selvityksestä on vastannut Ramboll Finland Oy:n Luopioisten yksikkö. Selvityksen perusteella potentiaalinen ratkaisuvaihtoehto 0-kuidun hyödyntämiselle voi olla muiden ylijäämämaiden kanssa seostettu ja stabiloitu 0-kuitu. Stabiloinnilla voidaan parantaa heikkolaatuisten ylijäämämaiden ominaisuuksia sekoittamalla niihin sideainetta.

Tämän diplomityön yhteydessä on selvitetty lisäksi Lielahden vesialueen rakennettavuutta. Rakennettavuusselvityksessä on pyritty löytämään geoteknisesti soveltuvimmat täyttöalueet sekä tehty arvio 0-kuidun massamäärästä. Kyseisen selvityksen pohjalta on arvioitu UUMA-potentiaalin merkitystä tulevan Hiedanrannan kehittämistä koskevassa hankkeessa.

2. TUTKIMUKSEN TAUSTA JA LÄHTÖKOHDAT

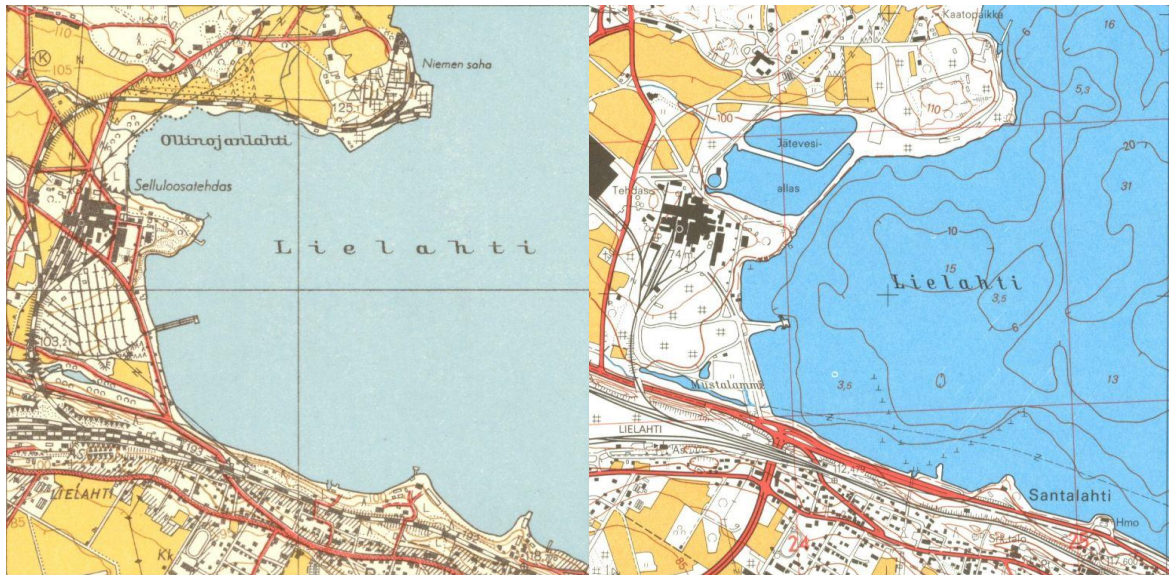
Tampereen kaupunki valmistelee uutta kantakaupunkia koskevaa yleiskaavaa, jonka tavoitevuodeksi on asetettu 2040. Kantakaupungin yleiskaavassa tullaan määrittämään asuinalueet sekä työpaikat ja palvelut sekä niiden sijoittuminen. Tampereen asukasluvun odotetaan kasvavan vuoteen 2040 saakka vuosittain noin 1400–2200 asukkaalla. Kasvu tapahtuu olemassa olevan rakenteen sisällä täydentämällä sekä uudistamalla olemassa olevia alueita. Lielahdi kuuluu yleiskaavan tärkeimpiin muutoskohteisiin. Entisen teollisuusalueen siirryttyä Tampereen kaupungin omistukseen, alueen potentiaalia tulevaisuuden merkittävänä kaupunginosana on alettu selvittää. Kuvassa 2.1 on merkitty Lielahden vesialueen sijainti.



Kuva 2.1. Lielahden sijainti kartalla (Karttapohja: Maanmittauslaitos).

Lielahden alueella on ollut teollista toimintaa jo vuodesta 1889 saakka, jolloin Niemen saha aloitti toimintansa alueen koillisosassa. Sahan toiminta päättyi vuonna 1965. Lielahden alueella lisäksi toimineen sellutehtaan rakentaminen aloitettiin vuonna 1913. Sellutehtaan toiminta lopetettiin vuonna 1986, jonka jälkeen sen tilalla aloitti kemihierretehdas. Sellutehtaan vieressä toimi myös 1965 perustettu ligniinitehdas. Teollinen toiminta alueella päättyi kemihierretehtaan lopettamisen myötä vuonna 2008. (Pulkinen 2012)

Alueella sijainneesta sellutehtaasta syntyvää kuitulietettä johdettiin Lielahteen vuoteen 1981 saakka. 1950-luvulle saakka kuituliete johdettiin käsittelemättömänä vesistöön. Myöhemmässä vaiheessa Ollinojanlahti erotettiin Näsijärvestä maapadolla. Kuvassa 2.2 on esitetty Lielahden pohjukka ennen ja jälkeen maapadon rakentamista. Lisäksi entisellä tehdasalueella sijaitti myös maankaatopaikka. Tehtaiden kuitulietevaluat sekä maankaatopaikka ovat syntyneet Lielahden maa- ja vesialuetta täyttämällä. Lietevaluiden sijainti on esitetty kuvassa 2.2. (Pulkinen 2012)



Kuva 2.2. Lielahden alueen peruskartat eri vuosilta. Vasemmalla vuodelta 1953 ja oikealla vuodelta 1975 (Kartat: Maanmittauslaitos).

2.1 Hiedanrannan alueen kehittäminen

Lielahden alue sijaitsee noin 6 km päässä Tampereen keskustasta. Alueesta on laadittu vuonna 2014 kehittämissisio, joka toimii alueen kehittämisen lähtökohtana. Visiossa on erityisesti pohdittu Lielahden rantavyöhykkeen kehittämistä ja vesialueen täyttömahdollisuutta. Näsijärven rannalla sijaitseva alue on nimetty Hiedanrannaksi.

Tarkasteltava alue rajautuu eteläosassa Paasikiventiehen sekä Santalahden satama-alueeseen. Pohjoisessa alue rajautuu Niemenrannan osayleiskaava-alueeseen. Kehittämissision mukaiset täyttöalueet on esitetty kuvassa 2.3.

Vesialueelle tehtävien täyttöjen lisäksi Hiedanrannan alueen kehittämisen taustalla on myös tulevan aluekeskuksen aseman vahvistaminen uudella asumisella sekä tehokkailla joukkoliikennepalveluilla kuten raitiotiellä sekä pikajunalla.



Kuva 2.3. Lielahden kehittämissuunnitelman mukaiset yleissuunnitelmaluonnokset (Kuvat: Lielahden rannan kehittämissuunnitelma).

Vesistötäyttö on suunniteltu tehtäväksi pääosin Vaitinaron rantaan sekä osittain Niemenrannan vesialueelle. Täyttöjen on arvioitu ulottuvan enimmillään 250–300 m etäisyydelle nykyisestä Vaitinaron rantaviivasta. Tulevan Hiedanrannan alustava aluerajaus on esitetty kuvassa 2.4. Täyttöjen laajuudesta johtuen rakentaminen tulee tehdä vaiheittain. Vaiheittain rakennettaessa täyttöalue jaetaan pienempiin osiin louheesta tehtävillä reunapenkereillä.

Reunapenkereiden sisäpuolinen täyttö on tässä vaiheessa suunniteltu tehtäväksi karkearakeisesta maasta tai vaihtoehtoisesti massastabiloinnilla. Täytön rakentaminen massastabiloimalla heikkolaatuisia maa-aineksia edellyttää laajoja ennakkotutkimuksia, joita on tehty tämän diplomityön lisäksi myös vuonna 2015 valmistuneessa selvityksessä Lielahden 0-kuidun stabiilituvedusta. Alustavien stabiilituvedustutkimusten perusteella tehdystä selvityksestä on vastannut Ramboll Finland Oy:n Luopioisten yksikkö.

Tutkimuksilla pyritään selvittämään ylijäämämaiden sekä 0-kuidun hyötykäytön mahdollisuutta tulevan Hiedanrannan alueella tehtävissä täytöissä. Lisäksi tutkimusten perusteella voidaan rajata epäsuotuisimmat ratkaisuvaihtoehdot pois jatkosuunnittelusta.



Kuva 2.4. Hiedanrannan alustava aluerajaus.

2.2 Alueen pohjaolosuhteet ja rakennettavuus

Maankäytönsuunnittelun tueksi sekä tämän tutkimuksen esiselvityksenä on laadittu rakennettavuusselvitys, jossa on arvioitu Lielahden vesialueen rakennettavuutta sekä kuitupitoisen lietteen hyötykäyttömahdollisuutta alueella tehtävissä täytöissä. Lisäksi on arvioitu alustavasti 0-kuidun massamääriä.

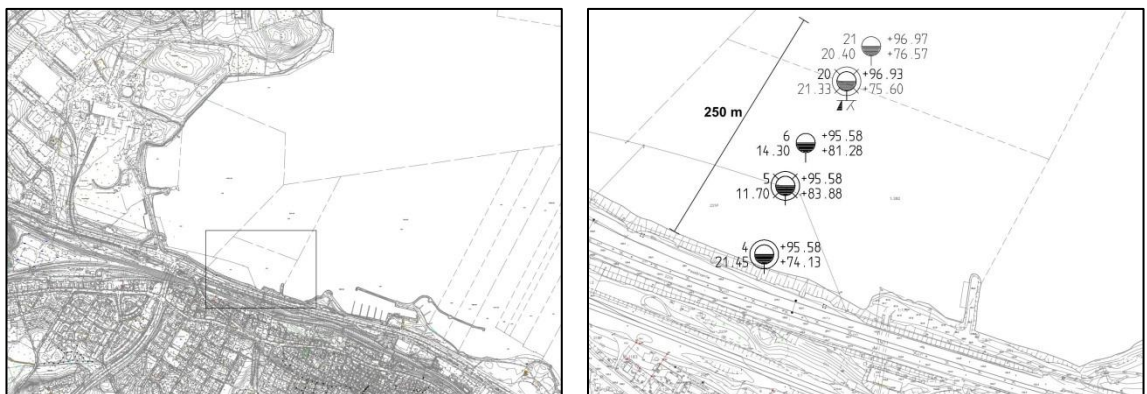
Vesialueella tehdyt pohjatutkimukset ovat peräisin eri aikakausilta. Pääosa tutkimuksista on tehty vuosina 2009–2011. Lisäksi alueen rakennettavuusselvitystä varten on tehty pohjatutkimuksia talvella 2014–2015. Pohjatutkimuksia jatkettiin kesällä 2015, jolloin otettiin myös 0-kuitunäytteitä materiaalin geoteknisten ominaisuuksien sekä stabiloituvuuden selvittämiseksi. Pohjatutkimukset tehtiin pääosin painokairauksin. Lisäksi kahdessa pisteessä tehtiin siipikairauksia sekä otettiin häiriintyneitä ja häiriintymättömiä maaperänäytteitä.

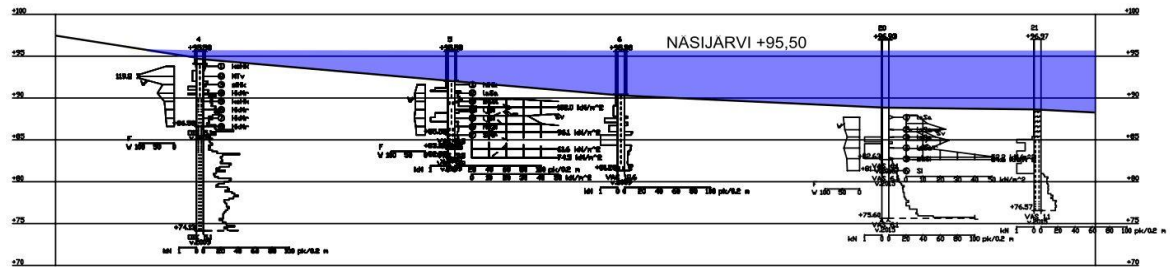
Pohjaolosuhteiden perusteella alue voidaan jakaa kahteen osaan. Vaitinaron rantavyöhyke sijaitsee tarkasteltavan alueen eteläosassa Paasikiventien suuntaisesti. Vaitinaron vesialue sijaitsee pääosin 0-kuidun levinneisyysalueen ulkopuolella. Kuvassa 2.5 on esitetty tehdasalueen edustalla olevan 0-kuitualueen laajuus sekä aikaisemmin lietealtaina toimineen alueen sijainti. Kyseisellä alueella 0-kuitukerroksen paksuus vaihtelee 2...11 metrin välillä.



Kuva 2.5. 0-kuidun arvioitu levinneisyys sekä tarkasteltavat ranta-alueet. Kuvaan merkitty myös tehdasalueen lietealtaiden sijainti.

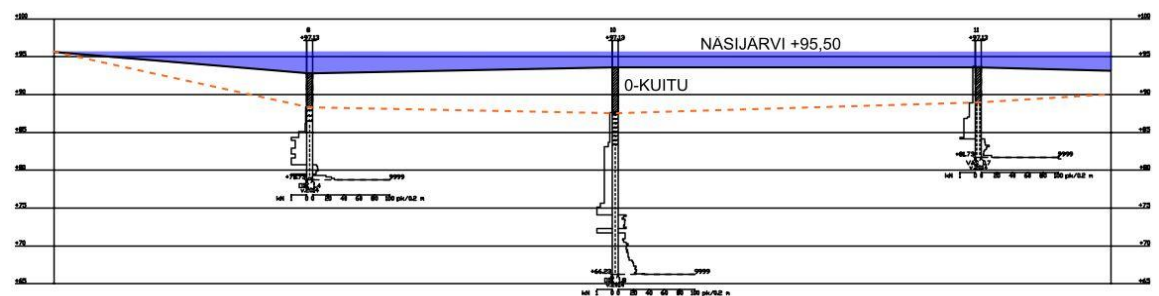
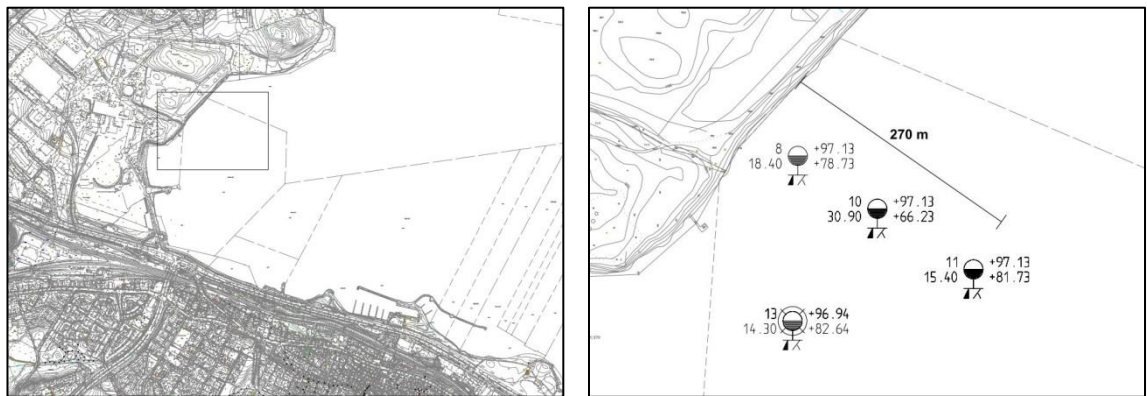
Vaitinaron vesialue sijaitsee luode-kaakko -suuntaisen harjumuodostelman lievealueella. Näsijärven pohjassa päällimmäiset maakerrokset ovat pääosin liejua tai siltistä liejua. Liejuisen kerroksen paksuus alueella vaihtelee pääosin 0,5...4,0 metrin välillä. Päällimmäisenä olevan pehmeän maakerroksen alapuolella on vaihtelevan paksuisia silttisiä maakerroksia, joiden paksuus vaihtelee 2...7 metrin välillä. Silttisten maakerrosten alapuolella on karkeampia siltti- tai hiekkakerroksia jotka rajautuvat alapuoliseen moreenikerrokseen. Mentäessä kauemmaksi rantaviivasta liejuisten pintakerrosten alapuolella on paikoittain myös savisia maakerroksia. Savikerroksesta määritetty redusoidun leikkauslujuus vaihtelee siipikairausten perusteella 15...30 kPa välillä. Kuvassa 2.6 on esitetty alueelta tehtyjä pohjatutkimuksia.





Kuva 2.6. Vaitinaron rannasta tehtyjä pohjatutkimuksia 250 m etäisyydeltä nykyisestä rantaviivasta.

Niemenrannan vesistöalueella Näsijärven pohjassa olevan 0-kuitukerroksen alapuolella on pääosin liejua sekä vaihtelevan paksuisia savikerroksia, jotka rajautuvat alapuoliseen silttikerrokseen. Silttikerroksen alapuolella on moreenia. Niemenrannan edustalta tehtyjä kairauksia on esitetty kuvassa 2.7.



Kuva 2.7. Niemenrannan ranta-alueelta tehtyjä pohjatutkimuksia 270 metrin etäisyydeltä nykyisestä rantaviivasta..

Hiedanrannan alueen rakentamisessa tulee ottaa huomioon täyttöjen alapuolelle jäävien hienorakeisten maakerrosten painuminen. Ennen rakentamista maapohjaa tulee esikuormittaa. Esikuormituksella voidaan pienentää tai poistaa lopullisen rakenteen aiheuttamia painumia. Rakenteet joille ei voida sallia painumia, tulee perustaa paaluille. Kevyet rakenteet voidaan perustaa maanvaraisesti, mikäli voidaan varmistua siirtymien pysähtymisestä riittävillä mittausjärjestelyillä. Tässä vaiheessa tulevien rakennusten ja

rakenteiden sijainti ei ole tiedossa, joten rakenteet ja niiden perustaminen tulee suunnitella myöhemmässä vaiheessa.

2.3 0-kuidun stabiloituvuuden esiselvitys

Tässä kappaleessa on kerrottu tämän diplomityön esiselvityksenä toimineen julkaisemattoman Lielahden 0-kuidun stabiloituvuus -selvityksen keskeisimmät vaiheet sekä tulokset. Selvityksestä saatuja tuloksia on hyödynnetty tämän diplomityön tutkimusosuuden lähtötietona. Lähtötietojen perusteella ratkaisuvaihtoehdoiksi valittiin ainoastaan teknistaloudelliselta kannalta potentiaalisimmat stabilointireseptit.

2.3.1 Yleistä

Lielahden 0-kuidun hyötykäyttömahdollisuuksien tutkimukset aloitettiin keväällä 2015. Tutkimuksista on laadittu selvitys, joka käsittelee Lielahden 0-kuidun stabiloituvuutta. Stabiloituvuustutkimuksista on vastannut Ramboll Finland Oy:n Luopioisten yksikkö. Keväällä 2015 tehdyt tutkimukset ja niiden tulokset toimivat lähtötietoina jatkotutkimusten suunnittelussa. Alustavan stabiloituvuustutkimuksen perusteella on arvioitu ja tehty päätelmiä potentiaalisimmista stabilointiresepteistä sekä sideainemääristä. Lisäksi alustavien tutkimustulosten perusteella on valittu tässä jatkotutkimuksena tehtävässä diplomityössä käytettävät seossuhteet sekä stabilointireseptit.

0-kuidun näytteenotto suoritettiin joulukuussa 2014. Näytteenottovälineenä käytettiin kaivinkoneen kauhaa sekä kaivinkoneella painettavaa teräsputkea, jolla mahdollistettiin näytteenotto myös syvemmistä kerroksista. Näytteitä otettiin kolmesta pisteestä erikseen laaditun näytteenottosuunnitelman mukaisesti.

0-kuitu- sekä savi- ja silttinäytteiden geotekniset luokitteluparametrit määritettiin Ramboll Finland Oy:n Luopioisten geo- ja materiaalitekniikan laboratoriossa. Luokitteluparametreina aistinvaraisten havaintojen lisäksi määritettiin vesipitoisuus, humuspitoisuus sekä pH. Lisäksi sedimenttinäytteistä määritettiin rakeisuudet areometrikokeella.

2.3.2 Stabiloituvuustutkimuksen vaiheet

Stabiloituvuustutkimukset toteutettiin vaiheittain jolloin materiaalin tuntemuksen lisääntyessä stabilointireseptejä voidaan optimoida teknistaloudellisesta kannattavammiksi jo ennakkotutkimusvaiheessa. Tutkimusten ensimmäisessä vaiheessa käytetyt sideainemäärät olivat suuntaa-antavia ja tutkimusten edetessä sideainemäärää tarkennettiin. Tutkimuksia tarkennettiin vaiheittain siten, että viimeisessä vaiheessa pyrittiin saamaan selville potentiaalisimmat stabilointireseptit sekä sideainemäärät.

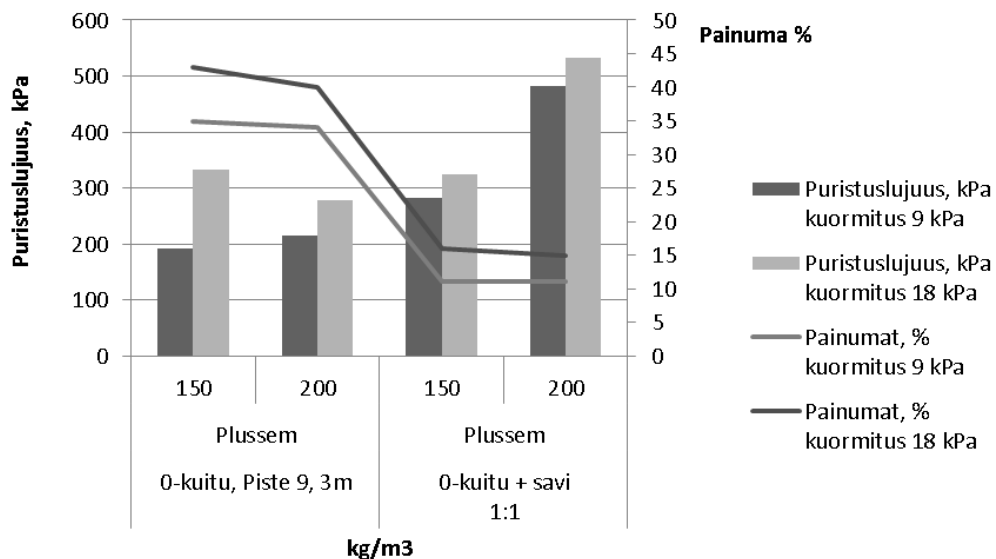
Tässä tutkimuksessa stabiloituvuuskokeisiin valittiin luokittelukokeiden perusteella pisteestä 9 otettu 0-kuitujae. Kyseisen 0-kuitunäytteen vesipitoisuus oli 1226 % ja hehku-

tushäviö 92,2 %. Stabiloituvuustutkimuksissa runkoaineena käytetään usein arviolta hankalinta materiaalia, kuten myös tässäkin tutkimuksessa.

Vaihe I

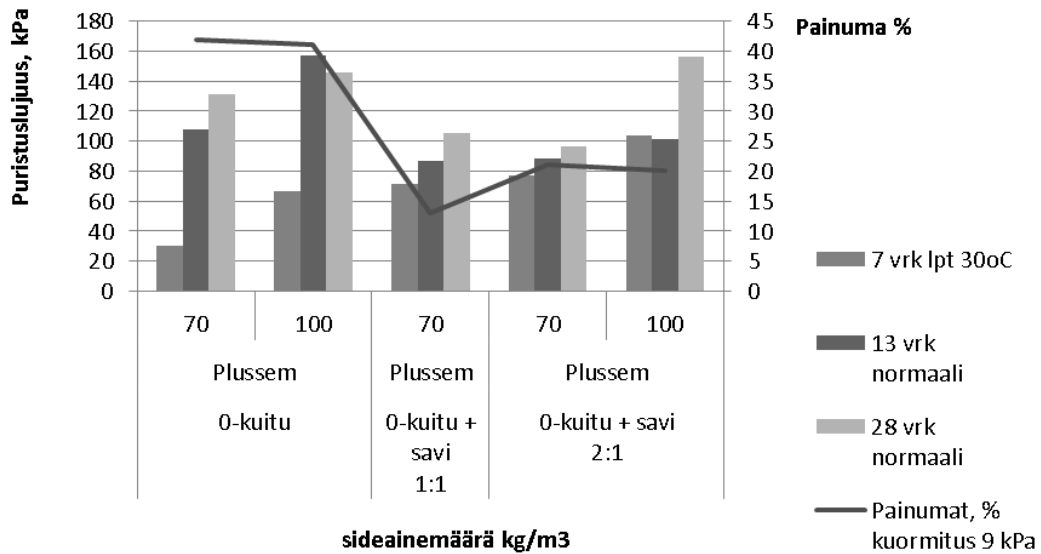
Ensimmäisessä vaiheessa testattiin pelkän 0-kuidun stabiloituvuutta sekoittamalla runkoaineeseen Plussementtiä. Sideainemääränä ensimmäisessä vaiheessa käytettiin 150 kg/m^3 ja 200 kg/m^3 . Koekappaleita kuormitettiin ennen yksiakiaalisia puristuskokeita 9 kPa ja 18 kPa pystykuormituksilla.

Ensimmäisessä vaiheessa testattiin myös 0-kuidun ja saven seosta stabiloinnin runkoaineena. Kuvassa 2.8 on esitetty ensimmäisen vaiheen lujuudet tulokset 7 vuorokauden ikäisille koekappaleille tehtyjen yksiakiaalisten puristuskokeiden perusteella. Koekappaleet säilytettiin tässä vaiheessa $30 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa sementin lujittumisreaktion nopeuttamiseksi. Tulosten perusteella mineraaliaineksen lisääminen kasvattaa seostetun ja stabiloituneen massan lujuutta.



Kuva 2.8. Vaiheessa I 0-kuidun stabiloituvuuskokeet aloitettiin varsin suurilla sideainemäärillä. Koekappaleet säilytettiin $30 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa ennen puristuskokeita.

Tutkimuksia jatkettiin pienentämällä sideainemäärää. Lisäksi tutkittiin ylijäämämaiden, kuten saven ja siltin käyttöä yhdessä 0-kuidun kanssa stabiloinnin runkoaineena. Tutkimuksissa saatujen puristuslujuustulosten perusteella kappaleiden lujuus kasvaa ajan myötä. Kuvassa 2.9 on esitetty yksiakiaalisten puristuskokeiden tulokset pelkälle stabiloituneelle 0-kuidulle sekä 0-kuidun ja saven seokselle. Kuvasta havaitaan että mineraaliaineksen käyttö osana stabiloinnin runkoainetta pienentää massan kokoonpuristumista.



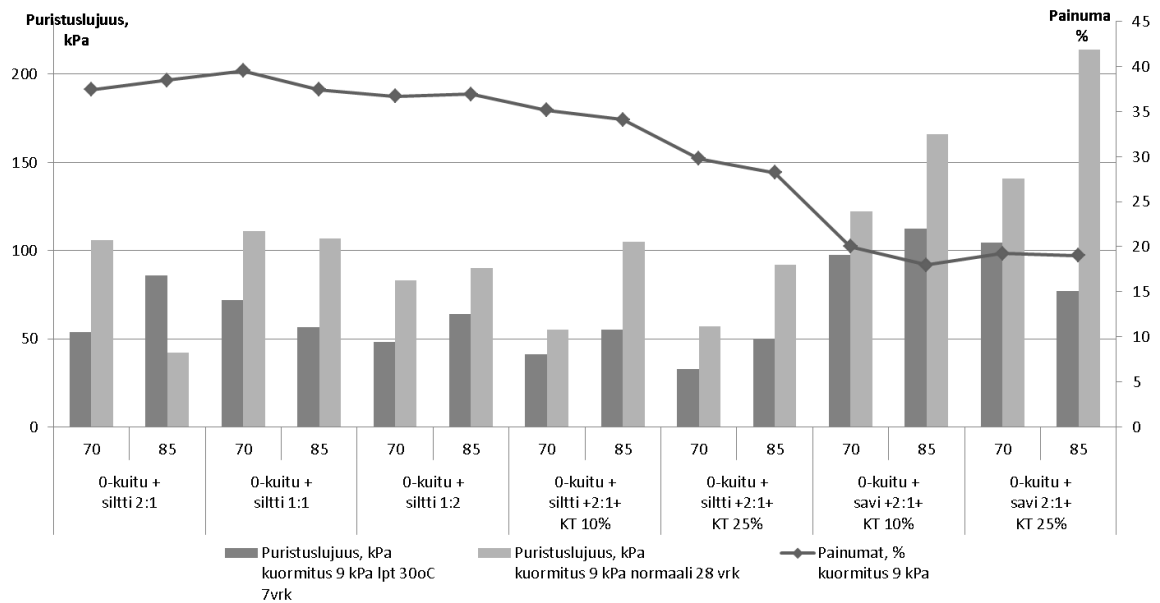
Kuva 2.9. Sideainemäärää sekä esikuormituksen suuruutta pienennettiin ensimmäisessä vaiheessa saatujen positiivisten tulosten perusteella.

Vaihe II

Toisessa vaiheessa tutkittiin tarkemmin aikaisemmin potentiaalisimmiksi havaittuja seoksia sekä kasatuhkan käyttöä yhdessä muiden ylijäämämaiden kanssa. 0-kuidun alueellisen vaihtelun takia koekappaleita tehtiin myös eri 0-kuitujakeille.

Erityisesti tutkittiin saven ja siltin käytön vaikutusta seostetun ja stabiloidun 0-kuidun ominaisuuksiin. Tulosten perusteella sekoittamalla savea 0-kuituun saavutettavat lujuudet ovat korkeampia kuin sekoitettaessa siltiä. Toisaalta saven kanssa sekoitettuna 0-kuitu painuu ja tiivistyy hitaammin kuin 0-kuitu-siltti -seokset.

Kuvasta 2.10 on nähtävissä, että tässä vaiheessa tutkimuksia käytettyyn 0-kuituun seostetun siltin lisääminen ei kasvata merkittävästi stabiloidun materiaalin lujuutta. Lisäksi on havaittavissa UPM Tervasaaren kasatuhkan (KT) lisäyksen vaikutus 0-kuitu-savi -seoksiin. Tulosten mukaan näyttäisi siltä, että kasatuhkalla voidaan korvata savea stabiloitavan seoksen täyteaineena.

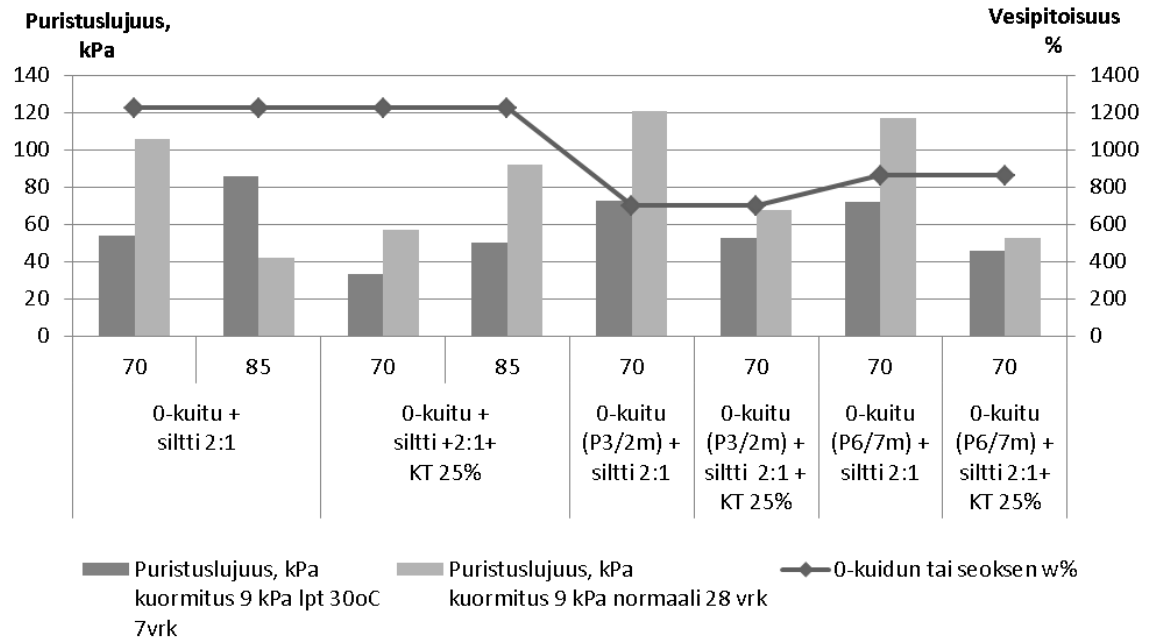


Kuva 2.10. Siltin määrän vaikutus stabiloidun massan lujuuteen eri-ikäisillä koekappaleilla. Kuvaajasta on havaittavissa että kasatuhkan lisäys 0-kuitu-savi -seoksiin kasvattaa massan lujuutta.

Ylijäämämaiden hyödyntämismahdollisuuksien lisäksi tutkittiin eroja erilaisten 0-kuitujakeiden ominaisuuksia stabiloituna. Tutkimuksissa käytettyjen runkoaineiden vesipitoisuudet eri näytteenottopisteissä ja -syvyyksissä vaihtelivat seuraavasti:

- P9 / 3m (päärunkoaine), $w = 1200 \%$
- P6 / 7m, $w = 862 \%$
- P3 / 2m, $w = 700 \%$

Kuvassa 2.11 esitettyjen tulosten perusteella vesipitoisuuden laskiessa puristuslujuudet kasvavat samalla sideainemäärällä. Poikkeuksen muodostaa 0-kuitu + siltti -seos, joka on seostettu massasuhteessa 2:1. Sideainemääränä kyseisessä reseptissä on 85 kg/m^3 . Kyseisellä seoksella lujuus jää alhaisemmaksi kuin vastaavalla pienemmällä sideainemäärällä (70 kg/m^3) stabiloituna. Tähän syynä voi olla epäedustavuus kyseisessä koekappaleessa.



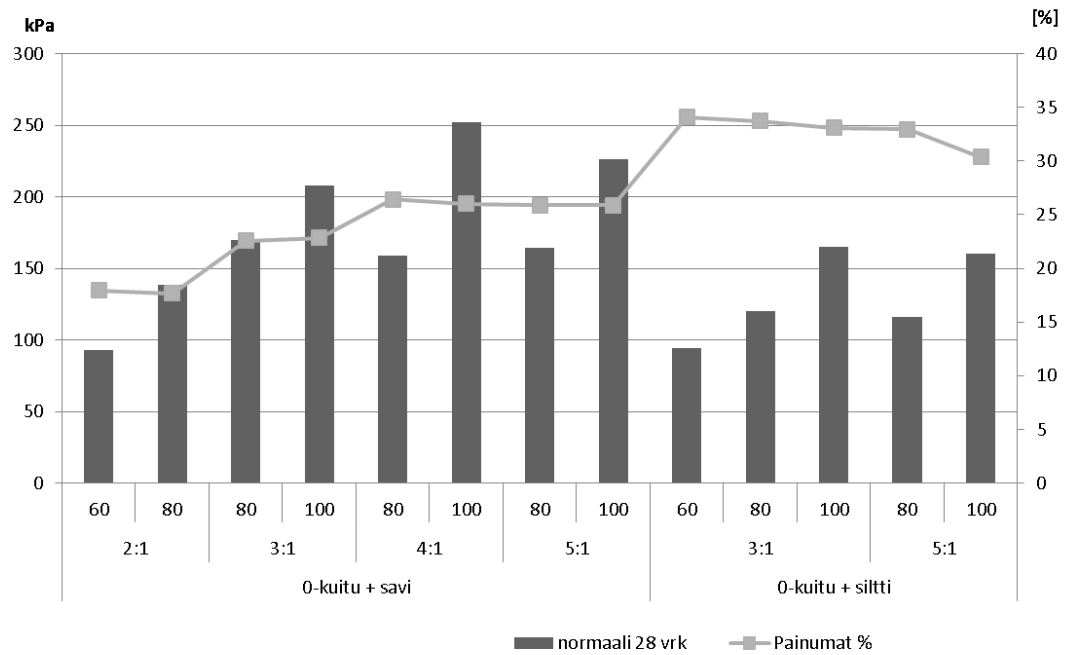
Kuva 2.11. Seostetun 0-kuidun vesipitoisuuden vaikutus stabiloidun massan lujuudenkehitykseen. Tutkimuksessa käytetyillä 0-kuitumassoilla vesipitoisuuden laskiessa lujuus kasvaa samalla sideainemäärällä.

Vaihe III

Kolmannessa vaiheessa pyrittiin optimoimaan tähän mennessä saatujen tulosten perusteella potentiaalisimpien reseptien seossuhteita ja sideainemääriä. Sideainemääräksi tässä vaiheessa valittiin 60...100 kg/m³ riippuen 0-kuidun ja täyteaineen seossuhteesta. Kuvassa 2.12 on esitetty 28 vuorokauden ikäisille koekappaleille tehdyt puristuslujuustulokset sekä painumat.

Kolmannessa vaiheessa saatujen tulosten perusteella seostettaessa päärunkoaineena käytettyä 0-kuitua (P9 / 3m) siltin kanssa, sementillä stabiloidun materiaalin kokoonpuristuminen on nopeampaa kuin seostettaessa 0-kuitua saveen kanssa. Lisäksi ulkoisesta kuormituksesta johtuva poistuvan veden määrä on suurempi, johtuen siltin suuremmasta vedenläpäisevyydestä verrattuna saveen.

Yksiaksiaalisten puristuskokeiden perusteella seostetun ja stabiloidun 0-kuidun jännitys-muodonmuutos -käyttäytyminen riippuu runkoaineeseen seostettavasta täyteainees-tä. Seostettaessa 0-kuitua ja silttiä, koekappale käyttäytyy kuormituksessa hauraasti ja murtuminen on selvästi havaittavissa. Saveen käyttäytyminen kuormituksessa on myötö-lujittuva.



Kuva 2.12. Vaiheessa III tehtyjen puristuskokeiden tulokset sekä kokonaispainumat 28 vuorokauden iässä sideainemäärillä 60...100 kg/m³.

Tuloksista havaitaan että 0-kuituun sekoitettavan saven määrän kasvattaminen pienentää stabiloidun massan kokoonpuristumista. Puristuslujuudet ovat kuitenkin pysyneet lähes ennallaan samalla sideainemäärällä. 0-kuitu + siltti -seoksissa kokoonpuristuminen on ollut suurempi verrattuna 0-kuitu + savi -seoksiin. Lisäksi lujuudet ovat jääneet vastaavilla sideainemäärillä pienemmiksi kuin seostettaessa 0-kuitua ja savea. 0-kuidun alueellisen laatuvariaation vuoksi tuloksissa on huomioitava että erilaisten 0-kuitujakeiden käyttäytyminen kuormituksessa eroaa riippuen 0-kuidun kanssa seostettavasta materiaalista. Tätä havaintoa tukee myös tässä diplomityössä myöhemmin esitetyt tulokset.

2.3.3 Yhteenveto 0-kuidun alustavasta stabiloituvuustutkimuksesta

Stabiloituvuuden esiselvityksen tulosten perusteella 0-kuidun käsiteltävyyttä voidaan parantaa stabiloinnilla. Muiden ylijäämämaiden kuten saven ja siltin käyttö seosaineena yhdessä 0-kuidun kanssa pienentää stabiloidun massan kokoonpuristumista sekä pidättää 0-kuidussa olevaa vettä. Stabiloituvuustutkimusten yhteydessä koekappaleiden kokoonpuristuminen on tapahtunut ensimmäisen vuorokauden aikana. Koekappaleiden käyttäytyminen puristettaessa riippuu seosmateriaalista sekä sideainemäärästä.

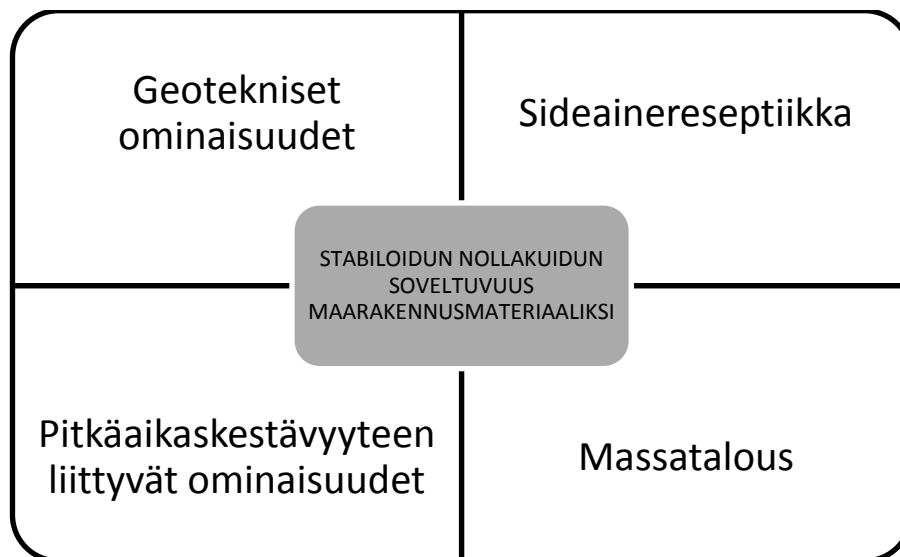
Stabiloituvuustutkimusten lisäksi 0-kuidusta tehtiin kemiallisia analyysejä ympäristökelpoisuuden selvittämiseksi. Nollakuidusta tutkittiin haitta-ainepitoisuudet sekä vesinäytteestä että kiinteästä näytteestä. Tämän diplomityön ohessa haitta-ainepitoisuuksia

tutkitaan stabiloiduista ja puristetuista koekappaleista. Lisäksi 0-kuidusta analysoidaan myöhemmässä vaiheessa mahdolliset hajunaiheuttajat.

Lielahten 0-kuidun stabiloituvuus -selvityksen perusteella yksi potentiaalinen ratkaisu 0-kuidun hyötykäyttöä ajatellen on materiaalin seostaminen ja stabilointi. Hiedanrannan kehittämistoimenpiteiksi suunniteltujen vesistötäyttöjen yhteydessä mahdollisesti tehtävät ruoppaukset mahdollistavat ylijäämämaiden toimituksen varsinaisen stabiloitavan alueen läheltä. Saven ja siltin lisäksi hyödynnettävä kasatuhka on saatavilla lähiympäristössä sijaitsevilta voimalaitoksilta.

2.4 Tutkimuksen rajaukset

Tässä tutkimuksessa käsitellään erityisesti 0-kuidun geoteknisiä sekä pitkäaikaiskestävyyteen liittyviä ominaisuuksia. Stabiloidun 0-kuidun soveltuvuutta maarakennusmateriaaliksi tulee tarkastella myös ympäristönäkökulmasta, jossa tulee ottaa huomioon ainakin 0-kuidun ruoppauksen sekä täyttöjen vaikutukset vesistön ja pohjaveden tilaan. Kyseiset seikat on huomioitu tässä diplomityössä täydentävinä ja rinnakkaisina tutkimuksina. Diplomityön ohessa tullaan tekemään ympäristöselvityksinä esimerkiksi liukoisuus- sekä hajututkimuksia. Tutkimustulokset on esitetty Hiedanrannan kehittämistä varten tehdyissä selvityksissä ja raporteissa. Kuvassa 2.13 on esitetty tässä tutkimuksessa käsiteltävät seikat stabiloidun 0-kuidun osalta.



Kuva 2.13. Stabiloidun 0-kuidun tutkimuksen viitekehys.

Tutkimuksessa on keskitytty kappaleessa 2.3. esitetyn 0-kuidun stabiloituvuuden esiselvityksen perusteella valittuihin potentiaalisimpiin seossuhteisiin ja stabilointiresepteihin. Tutkimukseen on valittu kolmesta eri pisteestä otetuista 0-kuitunäytteistä tehdyt kokoomanäytteet. 0-kuidun kanssa yhdessä käytettäväksi seosaineiksi valittiin kahdesta eri pisteestä otetut savi- ja siltinäytteet.

Geoteknisten ominaisuuksien lisäksi tämän diplomityön puitteissa tullaan tekemään arvio stabiloidun O-kuidun pitkäaikaiskestävyydestä. Pitkäaikaiskestävyyteen liittyvien ominaisuuksien tarkentamiseksi tutkimustuloksia voidaan hyödyntää mahdollisen koekohteen suunnittelussa. Sideainereseptiikan ja massatalouden osalta tutkimuksessa huomioidaan teknistaloudellinen näkökulma esimerkiksi sideainemäärän optimoinnissa sekä ylijäämämaiden hyötykäytössä O-kuidun stabiloinnin yhteydessä. Tarkempi kustannuslaskenta on rajattu tämän diplomityön ulkopuolelle.

3. 0-KUITU MATERIAALINA

Kuituliete on metsäteollisuuden aiemmissa prosesseissa syntynyttä hienojakoista puuainesta sisältävää lietettä. Liete on poistettu tehdasalueelta vesilietteenä ja myöhemmässä vaiheessa vedenpuhdistuksen kautta järveen tai laskeutusaltaaseen. Lielahden 0-kuitu on peräisin alueella toimineesta selluloosatehtaasta. Materiaalin laatu vaihtelee alueella riippuen syntyajankohdasta ja sijainnista sekä syvyydestä. Tehdasalueen edustalla Näsijärven pohjassa päällimmäisenä kerroksena on pääosin karkeaa ja tikkumaista materiaalia. Karkean kerroksen paksuus vaihtelee arviolta 1,0...2,0 metrin välillä. Karkean ja löyhän pintakerroksen alapuolisissa kerroksissa materiaali muuttuu hienokuituisemmaksi ja huopamaiseksi.

Tehdasalueen edustalla 0-kuidun puuaines on karkean pintakerroksen alapuolella pääosin huopamaista. Kauempana tehdasalueen lietealtaiden edustalta materiaali on liete-mäistä ja selvästi kosteampaa. 0-kuidun alueellisen laatuvaihtelun syynä voi olla esimerkiksi Näsijärven virtaukset, jolloin karkea ja raskaampi materiaali on kerrostunut entisen tehdasalueen lietealtaiden edustalle ja hienokuituisempi materiaali on kulkeutunut kauemmaksi kuitulietteen purkukohdasta.

0-kuidun luokittelukokeiden tulokset on esitetty tarkemmin kappaleessa 7.2.

4. RUOPPAUS JA LÄJITYS

Ruoppauksella tarkoitetaan vedenalaisen maan, louheen, kivien tai lohkkareiden irrottamista, siirtämistä ja läjittämistä vedenalaiseen maansiirtoon erityisesti tarkoitettulla kalustolla. Edellä mainittujen toimenpiteiden lisäksi myös sedimenttien liikuttaminen tai syrjäyttäminen rinnastetaan ruoppaamiseen. (Hartikainen 2007; Ympäristöministeriö 2015)

Ruoppausprosessi voidaan jakaa neljään työvaiheeseen (Ympäristöministeriö 2015):

- Ruoppausmassan irrottaminen ja nostaminen
- Ruoppausmassan siirtäminen
- Ruoppausmassan välivarastointi sekä
- Ruoppausmassan sijoittaminen ja käsittely

Ruoppaus- ja läjitystoiminnassa tulee hyödyntää parasta käyttökelpoista tekniikkaa (BAT) sekä ympäristön kannalta parhaita käytäntöjä (BEP). Tämä tarkoittaa esimerkiksi ruoppausmassan tehokasta hyödyntämistä ja laadun parantamista sekä ruoppauksesta ja läjityksestä aiheutuvien vaikutusten minimointia. Ruoppauksesta ympäröivään veteen leviävän sedimentin määrää voidaan vähentää huomioimalla sääolot sekä ruoppausnopeuden optimoinnilla. Lisäksi tulee varautua suojaustoimenpiteisiin ennen työn aloittamista ja käyttää esimerkiksi siltti- tai kuplaverhoa sedimenttien leviämisen estämiseksi. (Ympäristöministeriö 2015)

Ruoppaukseen ja läjitykseen liittyy useita säännöksiä, joista merkittävin sääntely liittyy vesi-, jäte- ja ympäristölainsäädäntöön (Ympäristöministeriö 2015). Lainsäädännön mukaan ruoppauksesta ja läjityksestä on tehtävä yleensä ilmoitus tai toiminnalle on haettava lupa. Hankkeesta vastaavalla on velvollisuus hankkia tarvittavat luvat. Suurissa ruoppaus ja -läjityshankkeissa vuoropuhelu hankkeesta vastaavan ja ELY -keskuksen välillä on suositeltavaa jo ennen varsinaisen lupaprosessin aloittamista.

4.1 Yleistä

Vedenalaisen maan siirtämiseen käytetään pysyvästi uivalle lautalle rakennettua työkonetta, jota kutsutaan ruoppaajaksi. Työskennellessään ruoppaaja tarvitsee tietyn apukaluston. Apukalustona käytetään yleensä erilaisia maankuljetusproomuja sekä hinaajia (Hartikainen 2007, s.159). Ruoppaukseksi voidaan kutsua myös vedenalaisen maan siirtämistä rannalta, jäältä tai matalassa vedessä tavallisesti kuivalla maalla työskentelevillä maansiirtokoneilla. (Hartikainen 2007, s.151)

Suomessa merkittävimmät ruoppauskohteet liittyvät vesiväylien rakentamiseen, parantamiseen ja kunnossapitoon. Ruoppauskalustoa käytetään lisäksi muun muassa vesistöjen säännöstelyyn, rakennusmateriaalin talteenottoon, vesistön tilan parantamiseen sekä teollisuusjätteiden käsittelyyn, kuten paperi- ja selluloosatehtaista peräisin olevien jätteiden poistamiseen jätealtaista. (Hartikainen 2007, s. 157)

4.2 Käytössä olevat ruoppustekniikat

Ruoppaajat voidaan jakaa toimintatavan perusteella kauharuoppaajiin sekä imuruoppaajiin. Kauharuoppaajat siirtävät irrotetun maan suoraan esimerkiksi läjitykseen tai maaruumaan. Imuruoppauksessa irrotettu maa nostetaan ja siirretään putkistoa pitkin. (Hartikainen 2007, s.151)

Edellä mainitut ruoppauskalustot voidaan jakaa lisäksi eri tyypeihin niiden liikkumistavan, maanirrotusmenetelmän ja läjitystavan perusteella. Sama ruoppaaja voi lisäksi toimia usealla eri tavalla. (Hartikainen 2007, s. 151)

4.2.1 Kauharuoppaus

Kauharuoppaajat ovat mekaanisesti toimivia ruoppauslaitteistoja, joita käytetään erityisesti vaihtelevien sedimenttien ja kitkamaalajien ruoppaukseen. Kauharuoppauslaitteistot voidaan jakaa seuraavasti (Hartikainen 2007, s.152):

- Pistoruoppaajat
- Kuokkaruoppaajat
- Kahmariruoppaajat
- Ketjukauharuoppaajat

Erilaisia ketjukauharuoppaajia on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Kauharuoppauskalustoa (Vlasblom 2003, muokattu).

Kauharuoppauksessa irrotettava ruoppausmassa saadaan yleensä siirrettyä kuivempaan kuin käytettäessä imuruoppauslaitteistoa. Lisäksi kauharuoppauksessa ruoppausmassaa ei irroteta jatkuvana virtana. Käytettäessä kauharuoppaajaa on pyrittävä estämään mah-

dollisten haitallisten aineiden ja kiintoaineksen leviäminen veteen eristämällä ruopattava alue. Vesimassan huuhtoutumista kauhan nostovaiheessa voidaan vähentää käyttämällä suljettua kauharakennetta (kuokkakauha / kahmarikauha). (Ympäristöministeriö 2015)

Pisto-, kuokka- ja kahmariruoppaajat toimivat vastaavien maalla toimivien kaivukoneiden tavoin (Hartikainen 2007, s.152). Pistoruoppaajalla työskennellessä ruoppausmassan irrotus tapahtuu työntämällä kauhaa eteenpäin ja kauhan ollessa täysi, se nostetaan ylös ja tyhjennetään kauhassa olevan pohjaluukun kautta ruoppaajan sivulla olevaan proomuun. Pistoruoppaajien käyttö on vähentynyt koska kuokkaruoppaajien hyödyntäminen on havaittu taloudellisemmaksi menetelmäksi. Kuokkaruoppaaja toimii hydraulisen kuokkakaivukoneen tavoin ja sillä voidaan ruopata taloudellisesti sekä pehmeitä sedimenttejä että kitkamaalajeja. Monipuolisuutensa takia siitä on tullut yleisin Suomessa käytettävistä ruoppauslaitteistoista. Kahmariruoppaajat soveltuvat pääsääntöisesti pehmeiden maalajien ruoppaukseen, mutta kauhatyyppiä ja -painoa säätämällä voidaan laitteistolla ruopata myös louhetta. Kahmariruoppaajia voidaan käyttää esimerkiksi kohteissa, jossa tilaa on rajoitetusti ja ruoppausvyvyys on suuri.

Ketjukauharuoppaaja irrottaa maata jäykkään puomiin kiinnitetyn kauhakuljettimen avulla. Kuljetin sijaitsee kantoaluksen keskellä noin 45 asteen kulmassa. Ruoppausvyvyttä voidaan säätää nostamalla tai laskemalla kuljettimen alapäätä. Ketjukauharuoppaaja etenee pohjassa oleviin ankkureihin kiinnitettyjen vajereiden ja vintturin avulla. (Hartikainen 2007, s.153)

Pisto- ja kuokkakauharuoppaajat etenevät kaivujalkojen avulla ja pysyvät työskennellessä paikallaan tukipaalujen varassa. Kahmariruoppaajan eteneminen voi tapahtua edellä mainitun menetelmän lisäksi myös vajereiden varassa. Ketjukauharuoppaajat soveltuvat parhaiten pehmeiden maalajien ruoppaukseen. (Hartikainen 2007, s.152–153)

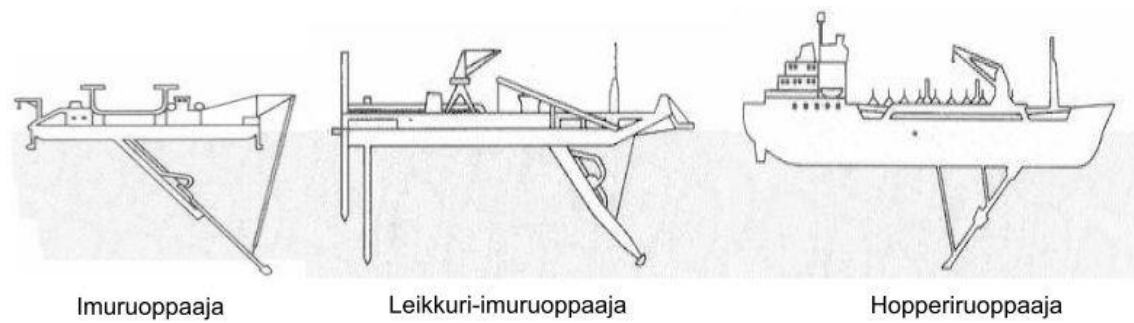
4.2.2 Imuruoppaus

Imuruoppaus on hydraulinen menetelmä, joka soveltuu erityisesti hienorakeisten ja pehmeiden maakerrosten poistamiseen. Imuruoppauksessa irrotettu sedimentti pumpataan lietteenä kuljetusvälineeseen, jatkokäsittelyyn tai läjitysalueelle. (Ympäristöministeriö 2015, s.155)

Imuruoppaajat voidaan jakaa maan irrotusmenetelmän mukaan seuraavasti (Hartikainen 2007):

- Pohjaimurit
- Leikkuri-imurit
- Kauhapyöräimurit
- Suihkuimurit

Erilaisia imuruoppaajia on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Imuruoppauskalustoa (Vlasblom 2003, muokattu).

Pohjaimurimenetelmällä maa irrotetaan pelkän imuvoiman avulla. Leikkuri- ja kauha-pyöräimurissa maa irrotetaan pyörivien terien tai kauhojen avulla. Suihkuimurilla maa irrotetaan vesisuihkun avulla. (Hartikainen 2007, s.155)

Imuruoppausmenetelmät ovat herkkiä pohjassa oleville kappaleille, kuten puun juurille ja kiville sekä imuputken tukkeutumiselle. Nykyisin on olemassa myös erikoisruoppaajia, joissa on pyritty yhdistämään sekä kauharuoppauksen että imuruoppauksen ominaisuuksia. Edellä mainittujen lisäksi ruoppauksessa voidaan käyttää myös hopperikalustoa, joka imee ruoppausmassan ensin aluksen ruumaan, josta se siirretään läjitysalueelle pumppaamalla tai ruuman pohjaluukkujen kautta. (Ympäristöministeriö 2015)

4.3 Läjitys

Ruoppausmassoja voidaan sijoittaa veteen sekä maalle. Ruopattu massa voidaan siirtää läjitysalueelle muun muassa suoraan kauhalla, proomulla kuljettamalla tai putkea pitkin pumppaamalla. Ruoppausmassoja voidaan tarvittaessa myös välivarastoida maalle tai veteen ennen niiden siirtämistä lopulliseen sijoituspaikkaan. Suomessa merialueilla ruoppausmassoja on sijoitettu useissa kohteissa vesiläjitysalueille esimerkiksi satama-alueiden laajentamisen yhteydessä. Vesiväylien ja satama-alueiden kunnossapidon yhteydessä ruopattuja massoja on läjitetty maa-alueille rakennettuihin läjitysaltaisiin (Ympäristöministeriö 2015).

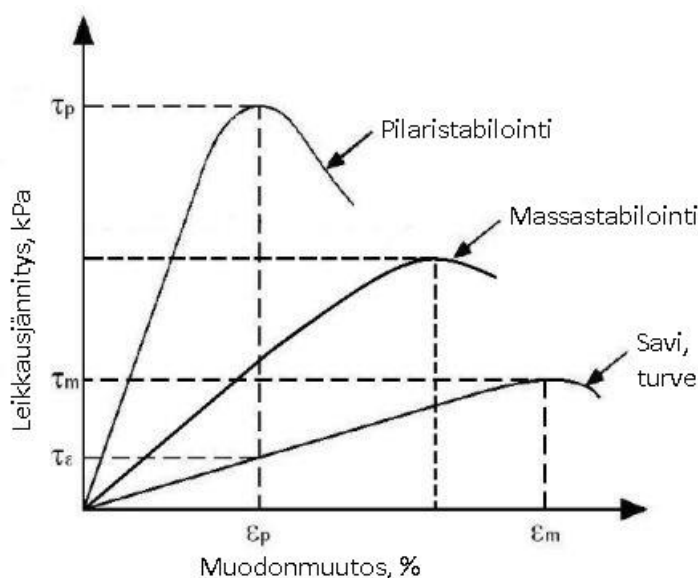
Vesialueelle tehtävien täyttöjen yhteydessä ruoppausmassoja voidaan sijoittaa myös louheesta rakennetun reunapenkereen taakse. Reunapenkereen taakse tehtävän läjityksen suunnittelussa tulee ottaa huomioon alueen tuleva käyttötarkoitus sekä sijoitettavien ruoppausmassojen laatu ja määrä. Pengerrakenteen suunnittelussa on huomioitava mahdollisten haitta-aineiden pääsyn estäminen vesistöön sekä esimerkiksi penkereen geotekninen stabiliteetti. (Ympäristöministeriö 2015)

5. SYVÄSTABILOINTI

Syvästabilointimenetelmät voidaan jakaa pilaristabilointiin (column stabilisation) sekä massastabilointiin (mass stabilisation). Pilaristabiloinnissa sideaine sekoitetaan maahan pilarointikoneen sekoitinkärjen kautta. Sekoitinkärki upotetaan pilarin suunnitellun alapään tasolle ja vedetään samalla sekoittaen ylös. Sideainetta syötetään yleensä sekoitinkärkeä vedettäessä. Massastabiloinnissa sideainetta sekoitetaan stabiloitavaan maakerrokseen samalla kun sekoitinkärkeä liikutetaan sekä pysty- että vaakasuunnassa.

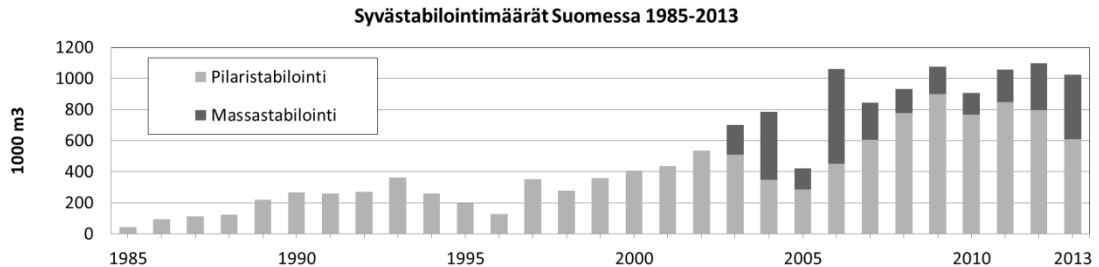
5.1 Yleistä

Syvästabilointi on pohjanvahvistusmenetelmä, jossa heikkolaatuisen pohjamaan ominaisuuksia voidaan parantaa sekoittamalla siihen sideainetta. Syvästabiloinnilla voidaan lisätä maan lujuutta ja dynaamista kuormituskestävyyttä sekä parantaa maan muodonmuutosominaisuuksia. Kuvassa 5.1 on esitetty stabiloinnin periaatteellinen vaikutus käsiteltävään materiaaliin. Vaikutukset geoteknisiin ominaisuuksiin riippuvat esimerkiksi käytetystä sideaineesta ja sideainemäärästä, runkoaineesta sekä lujittumisajasta. Edellä mainittujen lisäksi voidaan sideainetta sekoittamalla sitoa haitta-aineita stabiloitavaan maahan ja estää niiden leviäminen ympäristöön. (EuroSoilStab 2002; Liikennevirasto 2010)



Kuva 5.1. Stabiloinnin vaikutus saven ja turpeen ominaisuuksiin (Forsman et al. 2015, muokattu).

Syvästabiloinnin määrä on viimeisten vuosien aikana pysynyt ennallaan noin 1,0 miljoonassa stabiloidussa kuutiometrissä. Toisaalta massastabiloinnin osuus on kasvanut viimeisen 3 vuoden aikana, ollen vuonna 2013 noin 420 000 m³. (Kuusipuro 2014) Kuvassa 5.2 on esitetty syvästabilointimäärän kehitys Suomessa vuosina 1985–2013.



Kuva 5.2. Syvästabilointimäärät Suomessa 1985–2013 (Kuusipuro 2014, muokattu).

5.2 Massastabilointi

Massastabiloinnintekniikan tutkimus- ja kehitysprosessi on aloitettu Suomessa vuonna 1989. Tutkimus- ja kehitysprosessi jakautui kolmeen vaiheeseen, joista ensimmäisessä keskityttiin kaupallisten sideaineiden käyttöön heikkolaatuisen maan stabiloinnissa. Toisessa vaiheessa sideaineena käytettiin kaupallisten sideaineiden lisäksi erilaisia teollisuuden sivutuotteita. Kolmannessa vaiheessa havaittiin, että sideaineen laadun ja määrän lisäksi esikuormituksella voidaan vaikuttaa stabiloiduilla massoilla saavutettaviin lujuuksiin. (Lahtinen & Niutanen 2009)

Massastabilointi voidaan jakaa kahteen pääryhmään:

- Paikalla tehtävä massastabilointi eli *in situ* -stabilointi
- Kaivettujen tai ruopattujen massojen stabilointi eli *ex situ* -stabilointi

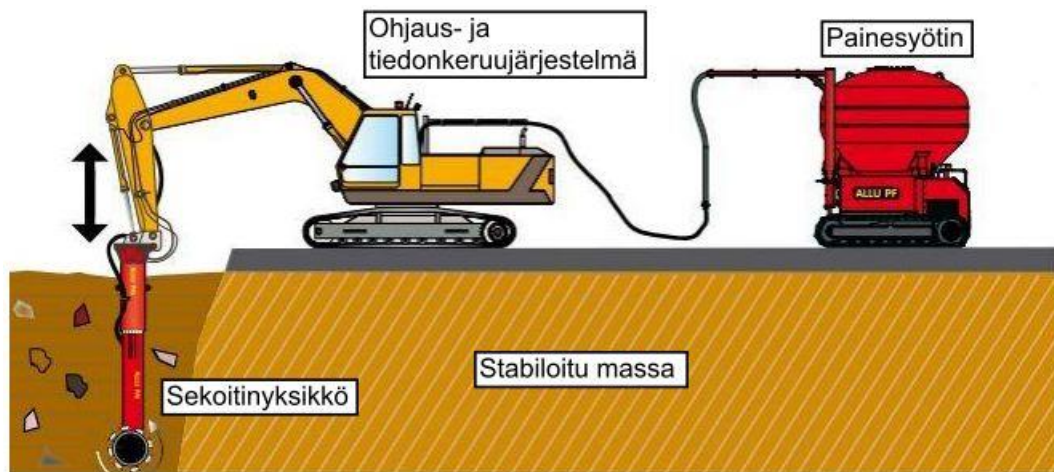
Paikalla tehtävässä massasyvästabiloinnissa heikkolaatuista pohjamaata vahvistetaan sekoittamalla siihen sideainetta kaivinkoneeseen kiinnitetyn sekoitinkärjen avulla. Kaivetuille tai ruopatuille massoille on kehitetty erilaisia *ex situ* -stabilointimenetelmiä, joissa sideaineen sekoitus käsiteltävään massaan tapahtuu erityisessä sekoitusasemassa tai altaaseen läjitettynä. Stabilointimenetelmän valinta riippuu kohteen luonteesta sekä teknis-taloudellisista seikoista. Menetelmän valintaan vaikuttaa esimerkiksi käsiteltävän massan määrä sekä stabilointisyvyys.

Massastabiloinnissa sideaineen syöttäminen ja sekoittaminen tehdään ruuduittain, joiden koko määräytyy koneen ulottuman perusteella. Tyypillisesti stabiloitavan ruudun koko on noin 3...5 × 3...5 m ja kerralla stabiloitavan kerroksen paksuus nykyisellä laitteistolla enimmillään 7...8 metriä. (EuroSoilStab 2002; Liikennevirasto 2010)

Massastabilointimenetelmän periaate sekä kalusto on esitetty kuvassa 5.3. Massastabilointikalustoon kuuluu perusyksikkönä käytettävän kaivinkoneen lisäksi (ALLU 2007):

- Sekoitinyksikkö
- Painesyötin
- Ohjaus- ja tiedonkeruujärjestelmä

Massastabiloinnissa sideaine syötetään sekoitinyksikköön painesyöttimen avulla. Sideaine voi koostua yhdestä tai useammasta aineesta. Sideaineen syöttöä ja sekoitusprosessia seurataan ohjausyksikön avulla. Stabilointityöstä saatavan tiedon perusteella voidaan muuttaa sideainevirtausta sekä kontrolloida stabilointisyvyyttä sekä sekoitustyötä jokaisen stabilointiblokin kohdalla. Sideaine sekoitetaan maahan sekoitinyksikön kärjen kautta samalla kun rumpusekoitin homogenisoi stabiloitavaa maata. Sekoitinyksikköä liikutetaan maassa sekä pysty- että vaakasuunnassa. (ALLU 2007, Forsman *et al.* 2015)



Kuva 5.3. Massastabilointikalusto (ALLU 2013, muokattu)

Massastabilointia voidaan hyödyntää myös ruopattujen ja kaivettujen massojen käsittelyyn. Ruopattujen ja kaivettujen massojen stabilointiin on kuitenkin kehitetty prosessistabilointimenetelmä, jossa runkoaine ja sideaine sekoitetaan sekoitusasemassa. Prosessistabilointimenetelmä on esitetty tarkemmin kappaleessa 5.3.

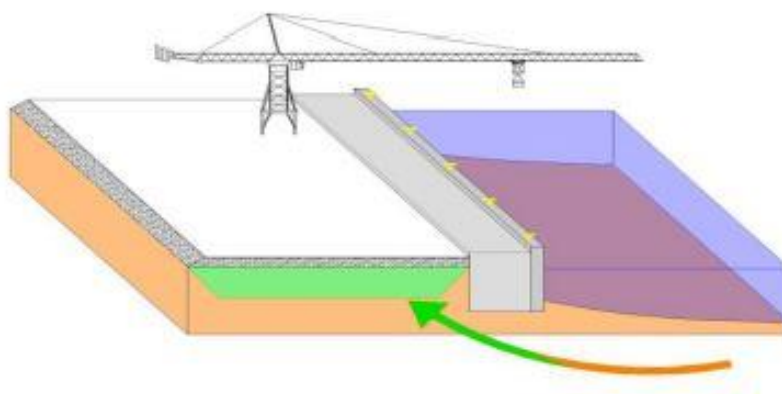
Ruopattujen tai kaivettujen massojen massastabiloinnissa käsiteltävä massa voidaan siirtää kuljetusvälineestä suoraan esimerkiksi läjitäytysaltaaseen, jossa varsinainen stabilointityö suoritetaan. Käsiteltävä massa voidaan siirtää lopulliseen sijoituspaikkaan kuorma-autolla tai pumppaamalla. Ruopatun tai kaivetun massan stabilointi voidaan tämän jälkeen tehdä kaivinkoneen puomin päässä olevalla sekoitinyksiköllä. (Autiola 2009)

Stabiloinnin edettyä ruuduista koostuvan rivin matkan, käsitellyn massan päälle levitetään suodatinkangas ja työpenger. Työnpenkereen paksuus on yleensä 0,5 – 1,0 m. Työpenger toimii työskentelyalustana stabilointikalustolle sekä esikuormituspenkereenä.

Esikuormituksella voidaan rajoittaa myöhemmässä vaiheessa tapahtuvia painumia. Työpenkereen tarkoituksena on myös tiivistää käsiteltyä materiaalia stabiloinnin lujittumisen aikana. (Forsman *et al.* 2015)

Massastabilointia voidaan hyödyntää monipuolisesti sekä yhdyskunta- että ympäristörakentamisessa. Massastabilointia on käytetty esimerkiksi tie- ja katurakentamisessa sekä nykyisten ja uusien ratarakenteiden pohjanvahvistuksessa. Lisäksi massastabilointia voidaan käyttää piha-alueiden pohjanvahvistusmenetelmänä sekä maisemoinnissa käytettävien pehmeiden massojen käsittelyyn. (Forsman 2015)

Perinteisen luonnontilaisen, puhtaan maa-aineksen lisäksi massastabilointia on käytetty satama-alueiden kunnostuksessa, jolloin pilaantuneet tai heikkolaatuiset ruoppausmassat on voitu hyödyntää esimerkiksi alueella tehtävissä täytöissä satama-alueiden laajennusten yhteydessä (Lahtinen 2015). Suomessa vastaavia toimenpiteitä on tehty esimerkiksi Vuosaaren satamassa. Kuvassa 5.4. on esitetty periaate ruoppausmassojen hyödyntämisestä satama-alueella tehtävissä täytöissä.



Kuva 5.4. Satama-alueiden kunnostushankkeissa ruopattuja massoja voidaan stabiloida ja hyödyntää alueella tehtävissä täytöissä. (Lahtinen 2015)

Pilaantuneiden ruoppausmassojen stabiloinnilla voidaan sitoa haitta-aineita käsiteltävään massaan ja ehkäistä niiden kulkeutuminen ympäristöön (Autiola 2009). Lisäksi stabiloinnilla voidaan muuttaa massan geoteknisiä ominaisuuksia lopullisen rakenteen vaatimusten mukaiseksi. Stabiloitujen massojen lujuus- ja painumaominaisuudet riippuvat siten rakenteen käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi maisemoinnissa käytettävänä stabiloidun massan lujuustavoitteet voivat olla selvästi alhaisempi kuin raskaasti kuormiteuilla kenttärakenteilla. Stabiloinnin tavoitteena voi olla esimerkiksi käsiteltävän massan kiinteyttäminen helpommin käsiteltäväksi läjitysvaiheessa.

5.3 Prosessistabilointi

Prosessistabiloinnilla tarkoitetaan *ex situ* -stabilointia, joka on kehitetty erityisesti ruoppausmassojen stabilointiin. Menetelmässä ruopattu tai kaivettu massa siirretään proomulla sekoitusasemalle, josta se siirretään aseman syöttötasolle esimerkiksi kaivinkoneella tai pumppaamalla. Ennen syöttötasoa stabiloitavasta massasta erotetaan suurimmat kivet sekä epäpuhtaudet. Sideaine syötetään joko suoraan siiloista tai hihnakuljettimilla. Sideaineen annostelu stabiloitavaan massaan tapahtuu syöttötasolla, jonka jälkeen massa sekoitetaan sekoitustasolla paineistetussa kaksoisakselisekoittimessa. Käsitelty massa voidaan purkaa purkutasolta joko kuorma-autoihin tai suoraan pumppaamalla lopulliseen sijoituspaikkaan. Prosessistabilointiyksikkö on esitetty kuvassa 5.5. (Autiola 2009)



Kuva 5.5. Prosessistabilointia sekoitusasemassa Pansion satamassa Turussa. (Autiola 2009, muokattu)

Käsiteltävä materiaali välpätään ennen massan siirtämistä syöttötasolle. Sideaineen annostelu tehdään syöttötasolla laboratoriossa tehtyjen stabiloituvuustutkimusten perusteella määritetyn reseptin mukaisesti. Sekoitusasemassa tehtävässä prosessistabiloinnissa voidaan käyttää sekä kostutettuja että kuivia sideaineita. Prosessistabiloinnissa on mahdollista hyödyntää useita eri komponentteja sideaineseoksessa, jolloin esimerkiksi kaupallisia sideaineita voidaan korvata teollisuuden sivutuotteilla. Reseptiä ja sideainemäärää säätämällä voidaan vaikuttaa käsitellyn massan lujuuteen esimerkiksi sijoitusyvyyden mukaan. Läjitysaltaan syvyyden ollessa riittävä, voidaan tulevasta alueen käyttötarkoituksesta riippuen sallia pohjalla olevalle massalle alhaisempi lujuustaso kuin pintakerrokselle. (Autiola 2009)

Käsitellyn massan siirto lopulliseen sijoituspaikkaan voidaan tehdä massan ominaisuuksista riippuen kuorma-autolla tai pumppaamalla suoraan esimerkiksi läjitysaltaaseen. Pumppauksessa tulee ottaa huomioon läjitettävän massan riittävä stabiliteetti esimerkiksi pumppaamalla massa kerroksittain altaaseen. Käsitellyllä massalla tehtävän täytön stabiliteetista tulee varmistua laskelmin ennen kuin työskentelyä voidaan jatkaa läjitetyn materiaalin päältä.

Stabiloidun massan päälle levitetään suodatinkangas. Tarvittaessa tulee käyttää vahvistekankaita. Suodatinkankaan päälle levitetään työpenger, joka toimii esikuormituspenkereinä stabiloidulle massalle. Laboratoriossa tehtyjen stabiloituvuustutkimusten perusteella esikuormituksen voidaan saavuttaa merkittävästi suurempia lujuuksia stabiloiduille turvekappaleille. Esikuormituspenkerein paksuus riippuu stabiloitavan massan ominaisuuksista. (Autiola 2009; Lahtinen & Niutanen 2009)

Prosessistabilointi sopii kaivettujen ja ruopattujen massojen käsittelyyn. Prosessistabilointimenetelmää on käytetty Suomessa erityisesti pilaantuneiden maa-ainesten stabilointiin. Stabiloitua materiaalia voidaan hyödyntää esimerkiksi satama-alueiden täyttöjen rakentamisessa. Prosessistabiloinnissa voidaan käyttää samoja kuivia sideaineita kuin massastabiloinnissa. Tarvittava sideainemäärä voi olla kuitenkin pienempi kuin massastabiloinnissa, koska prosessistabiloinnissa sekoitustyön tulos on yleensä tasalautuisempi (Kiviniemi *et al.* 2012). Aikaisemmin toteutetuista kohteista tehtyjen havaintojen perusteella prosessistabilointi voi olla kustannustehokkaampi vaihtoehto massastabilointiin verrattuna, mikäli stabiloitavan massan määrä on suuri ja massan syöttö voidaan toteuttaa tehokkaasti (Autiola 2009).

Prosessistabiloinnin etuna voidaan tehokkaan sekoituksen lisäksi pitää asemasekoituksesta saavutettavia ympäristöhyötyjä. Sekoituksen tapahtuessa lopullisen sijoituspaikan ulkopuolella, mahdollisia haitallisia aineita ei pääse suotautumaan ympäristöön. Lisäksi prosessistabiloinnilla voidaan pienentää kaupallisten sideainekomponenttien määrää sideaineseoksessa käyttämällä erilaisia teollisuuden sivutuotteita. Stabiloinnin kustannuksista suuri osa muodostuu sideainekustannuksista, joten menetelmällä voidaan saavuttaa merkittäviä taloudellisia hyötyjä. Prosessistabiloinnin yhdistämisellä ympäristökauhalla tehtävään ruoppaukseen voidaan saavuttaa merkittäviä ympäristöllisiä sekä taloudellisia hyötyjä. (Autiola 2009)

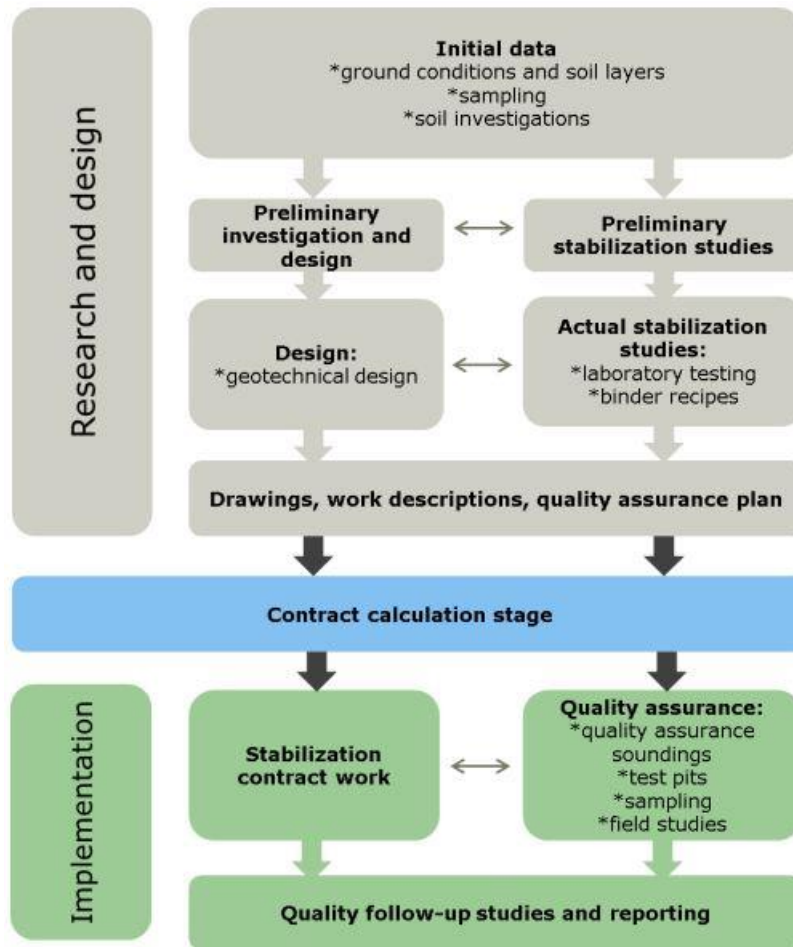
5.4 Laadunvarmistus

Laadunvarmistus on tärkeää stabilointityön onnistumisen kannalta. Laadunvarmistus voidaan jakaa kentällä tehtäviin kokeisiin sekä laboratoriotutkimuksiin. Laboratoriotutkimuksiin kuuluu esimerkiksi stabiloituvuustutkimukset, stabiloidun massan homogeenisuuden arviointi sekä mahdolliset liukoisuustutkimukset. Kenttäkokeisiin kuluvat koekuopat ja näytteenotto sekä kairaukset ja painumaseuranta.

Stabilointityön onnistuminen edellyttää riittävän laajoja ennakkotutkimuksia ennen varsinaisen suunnittelun aloittamista. (Hautalahti *et al.* 2007) Ennakkokokeita varten tulee tehdä suunnittelualueelta edustavia maaperätutkimuksia, joilla selvitetään stabiloitavan alueen maakerrosrajat sekä laboratoriossa tehtävillä peruskokeilla stabiloitavan maan geokemialliset sekä geotekniset ominaisuudet. Peruskokeiden perusteella voidaan arvioida sideaineiden toimivuutta stabiloitaville maalajeille sekä mahdollisen koestabilointikohteen edustavaa sijaintia.

Stabiloitavalla maalle tehtyjen peruskokeiden jälkeen tehdään laboratorio-olosuhteissa stabiloituvuustutkimuksia, joilla selvitetään stabiloinnissa käytettävä soveltuvin sideaine sekä sen määrä. Stabiloituvuuskokeet tulee aloittaa riittävän ajoissa ennen suunnittelun aloittamista. Tutkimukset tehdään yleensä vaiheittain jolloin tarkempiin tutkimuksiin valitaan potentiaalisimmat seokset sekä sideaineet. Tutkimuksissa tulee lisäksi huomioida sideaineiden soveltuvuusalueet mahdollisesti poikkeavien pohjasuhteiden varalta. Tutkimusten laajuus riippuu stabilointikohteen laajuudesta sekä vaativuudesta. Stabiloituvuustutkimukset tulee tehdä vähintään kahdella rinnakkaisella koekappaleella sekä kolmella eri sideainereseptillä. Tutkimuksilla selvitetään yleensä sideaineiden vaikutus stabiloitavan maan ominaisuuksiin sekä stabiloidun massan lujuudenkehitys ajan funktiona. Lujuudenkehitys määritetään normaalisti eri-ikäisille koekappaleille tehtävillä yksiaksiaalisilla puristuskokeilla. Suunnittelukohteen vaativuudesta riippuen lujuusominaisuuksien määrittämiseksi tehdään tarvittaessa myös kolmiaksiaalikokeita.

Stabilointikohteen luonteesta riippuen muita stabiloidusta massasta määritettyjä ominaisuuksia ovat esimerkiksi vedenläpäisevyys sekä kokoonpuristuvuus. Suunnittelussa käytettävät mitoitusparametrit voidaan määrittää laboratoriotutkimusten lisäksi myös koestabiloinnilla. Koestabilointeja tehdään erityisesti suurissa ja vaativissa stabilointikohteissa. Mitoitusparametrien määrittämisessä voidaan myös hyödyntää vastaavissa olosuhteissa tehdyistä stabilointikohteista saatuja kokemuksia ja tuloksia. Stabiloinnin ennakkotutkimukset ovat merkittävä osa stabilointityön suunnittelua ja laadunvalvontaa jatketaan myös työnaikaisesti stabilointityön onnistumisen varmistamiseksi. Kuvassa 5.6 on esitetty periaatteellinen kaavio stabilointiprosessin vaiheista. (InfraRYL 2010, Hautalahti *et al.* 2007)



Kuva 5.6. Stabilointiprosessin vaiheet (Lahtinen 2015).

Työnaikainen stabilointityön laadunvalvonta suoritetaan erilaisilla kentällä tehtävillä tutkimuksilla. Kenttätutkimuksia ovat esimerkiksi kairaukset, painumalevyt sekä näytteenotto. Kairauksilla selvitetään stabiloidulle rakenteelle suunnitteluvaiheessa asetetun tavoitelujuuden saavuttamista. Kairaukset toteutetaan hankekohtaisen työselityksen mukaisesti yleensä 7...90 vuorokauden lujittumisen jälkeen. Tarvittaessa valvontakairauksia voidaan jatkaa myöhemmässä vaiheessa lopullisen lujuuden selvittämiseksi. Kairausten lisäksi stabilointityön laadunvarmistukseksi voidaan ottaa näytteitä stabiloidusta massasta. Näytteistä määritetään esimerkiksi sideainemäärän vaihtelu eri syvyystasoilla. Näytekappaleiden lujuusominaisuuksien määrittäminen suositellaan tehtäväksi kolmiaksaalikokeella, jolla saadaan luotettavampi tulos yksiaksaaliseen puristuskokeeseen verrattuna. (Forsman *et al.* 2015)

5.5 Stabiloinnissa käytettävät sideaineet

Sideaineet voidaan jakaa niiden toimintaperiaatteen perusteella hydraulisiin sekä ei-hydraulisiin sideaineisiin. Hydrauliset sideaineet sitoutuvat reagoidessaan veden kanssa. Ei-hydrauliset sideaineet tarvitsevat jonkin katalyytin, kuten savimineraalin, sitoutumiseen. Kaupallisten sideaineiden lisäksi syvästabiloinnissa voidaan käyttää myös teolli-

suuden sivutuotteita. Korvaamalla perinteisiä sideaineita teollisuudesta saatavilla sivutuotteilla, voidaan saavuttaa huomattavia kustannussäästöjä. Lisäksi eräät teollisuuden sivutuotteet voivat soveltua kaupallisia sideaineita paremmin esimerkiksi turpeen ja muiden orgaanista ainesta sisältävien maalajien stabilointiin. (EuroSoilStab 2002; ALLU 2007)

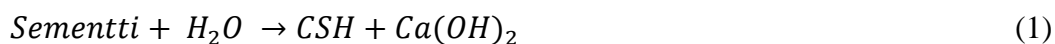
Sideaineiden vaikutus eri luonnontilaisiin maalajeihin vaihtelee. Sideaineen laatu ja määrä riippuu esimerkiksi stabiloitavan maan rakeisuudesta, vesipitoisuudesta sekä orgaanisen aineksen määrästä. Eri sideaineet toimivat siten eri tavoin maalajien ominaisuuksista riippuen. (Åhnberg 2006)

5.5.1 Sementti

Sementti on hydraulinen sideaine, joka veden kanssa reagoidessaan muodostaa sementtiliimaa sitoen maapartikkeleita toisiinsa. Sementtiä voidaan käyttää useimpien maalajien stabiloimiseen, koska stabiloidun maan lujuuden kehittyminen perustuu sementin ja runkoaineessa olevan veden väliseen reaktioon. (Axelsson *et al.* 2002)

Hydrataatioksi kutsutussa reaktiossa sementin sisältämät kalsiumsilikaatit reagoivat veden kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraattia (CSH), joka sitoo maapartikkeleita yhteen lisäten käsitellyn materiaalin lujuutta. Hydrataatioreaktio on esitetty kaavassa (1). Sementillä saavutettavat lujuudet ovat yleensä esimerkiksi lentotuhkalla stabilointia suurempia erityisesti ensimmäisten kuukausien aikana. Tämä johtuu siitä, että sementin ja veden hydrataatio tapahtuu selvästi nopeammin kuin esimerkiksi kalkin sisältämän kalsiumhydroksidin ja stabiloitavan maan savipartikkeleiden välinen pozzolaaninen reaktio. Sementin hydrataatiossa muodostuu myös kalsiumhydroksidia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), joka reagoi myöhemmässä vaiheessa pozzolaanisesti. Pozzolaanireaktio on esitetty tarkemmin kappaleessa 5.5.2. kaavassa (3). Reaktion vaikutus stabiloidun maan lujuuteen on kuitenkin pieni erityisesti vähän kivennäisainesta sisältävien orgaanisten ainesten stabiloinnissa. (Axelsson *et al.* 2002; Janz & Johansson 2002)

Sementin hydrataatioreaktio on esitetty seuraavassa kaavassa (Janz & Johansson 2002)



Sementtiliiman lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi materiaalin huokoisuus sekä vesipitoisuus. Eloperäisten maalajien kuten turpeen ja liejun stabiloinnissa tarvittava sideainemäärä on yleensä suurempi kuin stabiloitaessa savea tai silttiä. Tähän syynä on turpeen ja liejun suurempi orgaanisen aineksen määrä verrattuna saveen ja silttiin, jolloin kivennäisaineksen osuus on myös pienempi. Lisäksi eloperäisten maalajien vesipitoisuus on usein moninkertainen saveen ja silttiin nähden, mikä pienentää samalla sideainemäärällä seoksen vesi-sementti -suhdetta ja saavutettava lujuus jää alhaisemmaksi. (Janz & Johansson 2002)

5.5.2 Muut sideaineet

Sementin lisäksi stabiloinnin sideaineena voidaan käyttää kalkkia tai teollisuuden sivutuotteita kuten masuunikuonaa tai lentotuhkaa. Lisäksi voidaan käyttää sideaineseoksia, jotka koostuvat useasta sideainekomponentista. (Liikennevirasto 2010)

Stabiloinnissa käytettävä kalkki on pääosin poltettua kalkkia. Sammutettu kalkki muodostuu kalkkikiveä polttamalla, jolloin kalkkikiven sisältämän kalsiumkarbonaatin reagoissa lämmön kanssa muodostuu kalsiumoksidia (CaO) sekä hiilidioksidia (CO₂). Kalsiumoksidista käytetään nimeä poltettu kalkki. Poltettu kalkki reagoi veden kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia, jota kutsutaan sammutetuksi kalkiksi. Reaktio on esitetty kaavassa (2). Reaktiossa muodostuu lisäksi lämpöä, joka nopeuttaa myöhemmin tapahtuvia reaktioita. Sammutettu kalkki ei itsessään ole sitoutuva aine, vaan sitoutuminen ja maan lujittuminen tapahtuu pozzolaanireaktiossa kalsiumhydroksidin reagoissa esimerkiksi käsiteltävän maan sisältämien alumiinaattien ja silikaattien tai muun sideainekomponentin kanssa. Tällöin reaktiossa muodostuu sementin ja veden reaktion tavoin kalsiumsilikaattihydraattia tai kalsiumalumiinisilikaattihydraattia (CASH), jotka sitovat maapartikkeleita yhteen lisäten maan lujuutta. Kalkkia käytetäänkin nykyisin usein stabiloinnissa yhtenä sideainekomponenttina sideaineseoksissa. (Axelsson *et al.* 2002; Janz & Johansson 2002)

Käytettäessä sideaineena kalkkia, stabiloinnin aikana tapahtuva reaktio voidaan esittää seuraavasti (Janz & Johansson 2002)



Teollisuuden sivutuotteista yleisin stabiloinnissa käytetty sideaine lienee lentotuhka, jota syntyy esimerkiksi kivihiilen polton sivutuotteena. Tuhkat koostuvat pääosin piidioksidista ja alumiinidioksidista sekä muiden metallien, kuten raudan ja kalsiumin oksideista. Lentotuhkan koostumus sekä metallipitoisuus vaihtelevat esimerkiksi hiilen koostumuksesta tai palamisolosuhteista riippuen. Lentotuhka on pozzolaaninen sideaine, joten se ei reagoi itsestään vaan tarvitsee kalkkia lujittuakseen. (Janz & Johansson 2002; Mäkelä *et al.* 1999)

Masuunikuona on raakaraudan valmistuksessa syntyvä sivutuote, joka sisältää piileviä hydraulisia ominaisuuksia. Piilevillä hydraulisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan, että materiaali voi reagoidessaan esimerkiksi kalsiumhydroksidin kanssa tuottaa maan lujuutta parantavia tuotteita. Masuunikuona sitoutuu itsestään reagoidessa veden kanssa, mutta käytännössä tarvitsee aktivaattorin, joka kiihdyttää sitoutumisreaktiota. Aktivaattorina käytetään yleisimmin sementtiä. (Mäkelä *et al.* 2000)

Teollisuuden sivuotteiden, kuten lentotuhkan ja masuunikuonan, ominaisuudet stabiloinnin sideaineina voivat vaihdella merkittävästi riippuen esimerkiksi tuotantoprosessista sekä materiaalin alkuperästä. Tästä syystä samasta laitoksesta saapuneissa tuotteissa voi olla laadullisia vaihteluja jotka vaikuttavat stabilointiin. Masuunikuonan ja lentotuhkan sitoutumisominaisuudet ovat riippuvaisia materiaalin rakeisuudesta. Hienojakoisempi materiaali on reaktiivisempi stabilointityön aikana. Lisäksi molempien teollisuuden sivutuotteiden reaktionopeudet riippuvat lämpötilasta. Tämä johtuu pozzo-
laanireaktion lämpötilariippuvuudesta, jolloin lämpötilan kasvaessa myös reaktionopeus kasvaa. (Janz & Johansson 2002; Åhnberg *et al.* 1995)

6. TOTEUTUNEITA SUOMALAISIA STABILOINTIKOHTTEITA

Tässä osiossa on esitelty muutama toteutuneista suomalaisista stabilointikohteita. Suomessa on toteutettu lukuisia muitakin stabilointihankkeita ja tässä esitellyt kohteet on valittu pääosin siten, että kohteissa käytetyt työtekniikat ja -menetelmät vastaisivat Tampereen Hiedanrannassa mahdollisesti toteutettavaa stabilointihanketta sekä stabilointityön laadunvarmistusta.

Koekohteista saatujen toteumatietojen sekä tutkimustulosten perusteella voidaan arvioida eri työtapojen sekä -menetelmien soveltuvuutta samankaltaisissa hankkeissa. Veittostensuon syvästabilointikohteesta saatujen tulosten perusteella turpeen stabilointi voidaan toteuttaa teknistaloudellisesti kannattavalla tavalla. Lisäksi kohteessa käytetty massa-stabilointimenetelmä osoittautui onnistuneeksi työtavaksi turpeen stabilointiin.

Pansion sekä Kokkolan sataman stabilointikohteissa stabiloitiin ruopattuja massoja sekä prosessi- että massastabiloinnilla. Molemmissa kohteissa pilaantuneiden massojen käsittelystä johtuen, ympäristötekniset seikat olivat merkittävässä osassa. Kohteista saatujen tutkimustulosten perusteella stabilointi osoittautui ympäristövaikutusten kannalta soveltuvaksi menetelmäksi pilaantuneiden massojen käsittelyyn. Lisäksi kohteiden perusteella havaittiin prosessistabiloinnista saavutettavat edut erityisesti kohteissa, joissa käsiteltävät massamäärät ovat suuria.

6.1 Veittostensuon syvästabilointi

Tämä kappale perustuu Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi -tutkimusraporttiin. Raportti on osa Tielaitoksen selvityksiä (81/1993).

Yleistä

Veittostensuon pehmeikkö sijaitsee valtatie 12 osuudella Jokue-Tillola. Suunnittelukohte liittyy osaksi valtatie 12 parantamista moottoriliikennetieksi. Suunnittelualueella sijaitseva pehmeikköalue oli 1,2 km pitkä ja pohjaolosuhteiltaan erittäin vaativa. Pinnassa oli 3–5 m paksu turvekerros jonka alla oli 10–20 m paksu pehmeä savikerros. Yleissuunnitelmavaiheessa pohjanvahvistusmenetelmiksi valittiin pohjaantäyttö sekä syvästabilointi. Projektin alkuvaiheessa tehtyjen stabiloituvuuskokeiden ja laboratoriotulosten perusteella päätettiin rakentaa Suomen ensimmäinen instrumentoitu koepenger, jossa stabilointimenetelminä käytettiin lamelli- sekä pilaristabilointia. (Tielaitos 1993)

Rakenne ja toteutus

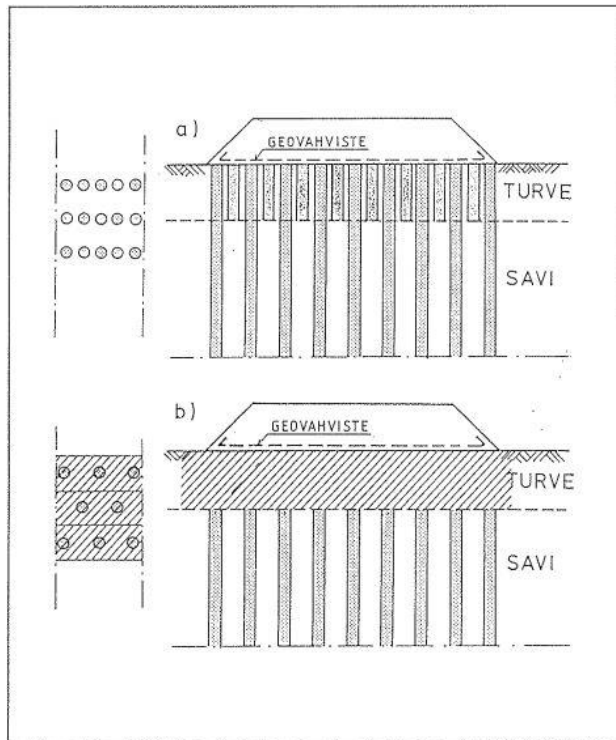
Instrumentoitu koerakenne koostui pintakerroksessa olevaan turpeeseen tehdystä massastabiloinnista sekä alapuolisen savikerroksen pilaristabiloinnista. Massastabiloidun blokin pinta-ala oli noin $3 \times 3 \text{ m}^2$ ja stabiloidun pilarin halkaisija 700 mm. Rakenneratkaisut on esitetty kuvassa 6.1.

Sideaineina koerakentamisessa käytettiin kipsipohjaista Finnstabi -sideainetta, yleis- ja pikasementtiä sekä masuunikuonaa ja poltettua kalkkia. Stabiloinnissa käytetyt sideaineyhdistelmät ja -määrät on esitetty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1. Koerakenteessa käytetyt sideaineyhdistelmät.

	Sideaineyhdistelmä	Lamellistabilointi	Pilaristabilointi
Turve	Finnstabi + pikasementti	250 kg/m ³	95 kg/m ³
	Pikasementti + masuunikuona	300 kg/m ³	114 kg/m ³
Savi	Finnstabi + CaO	-	125 kg/m ³
	Pikasementti + CaO	-	125 kg/m ³

Työn aikana seurattiin sekoitustyön tasalaatuisuutta, sideaineen syöttöä sekä määrää. Stabiloidun rakenteen päälle asennettiin vahvistekangas sekä painumalevyt ja haitariletkut. Tiivistyspenker rakennettiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisen 30 d aikana penkereen paksuus oli 0,5 m. Tämän jälkeen ensimmäisessä vaiheessa rakennetun penkereen päälle tehtiin 1,0 m korotuspenger.



Kuva 6.1. Veittostensuon koerakenteen periaateleikkaukset. Leikkauksessa a) on esitetty turpeen sekä saven pilaristabilointi ja leikkauksessa b) turpeen lamellistabilointi sekä saven pilaristabilointi.

Koerakenteen seuranta

Painumatarkkailu aloitettiin heti penkereen rakentamisen jälkeen. Painumamittausten perusteella stabiloidun rakenteen painumat tapahtuvat pääosin ensimmäisten vuorokausien aikana. Stabiloidun massan lujuusominaisuuksia selvitettiin pilari- sekä pilariisiipikairauksilla, jotka tehtiin 30 vuorokauden ikäisille pilareille.

Lujuus- ja painumamittausten lisäksi stabilointikohteesta otettiin sideainenäytteitä sideaineyhdistelmien osakomponenttien määrän varmistamiseksi. Kentältä otetuista näytteistä otettiin myös mikroskooppikuvia, joista tutkittiin tarkemmin lujittumisreaktioita. Seuranta- ja laadunvalvontatutkimusten perusteella koerakenne täytti lyhytaikaiselle seurantajaksolle asetetut vaatimukset lujuus- sekä painumatulosten osalta. (Tielaitos 1993)

Veittostensuon koerakenteen pitkäaikaista seuranta on jatkettu aina vuoteen noin 2006 saakka. Koerakenteen osalta tavoitteena on kuitenkin tehdä kairauksia sekä painumamittauksia vielä vuoden 2016 aikana (Forsman 2015). Tutkimusten avulla voidaan tehdä päätelmiä stabiloidun massan pitkäaikaiskestävyydestä.

6.2 Pansion satama

Tässä osiossa käsitellään Turun Pansiossa ruoppausmassojen käsittelyä prosessistabiloimalla. Osio perustuu Ruoppausmassojen käsittely prosessistabiloimalla Pansion altaaseen -raporttiin, joka on osa EU-LIFE STABLE -projektia. Raportin kirjoituksesta on vastannut Merja Autiola Ramboll Finland Oy:stä.

Yleistä

Pilottikohde sijaitsee Turussa. Pansion satamassa stabiloidut pilaantuneet massat ovat peräisin Aurajoen pohjasta 4 km päästä varsinaisesta stabilointikohteesta. Aurajoen pohjasta ruopatut sedimentit stabiloitiin Pansiossa ja sijoitettiin louhepenkereellä merestä eristettyyn veden täyttämään altaaseen.

Kohteen stabiloituvuustutkimukset tehtiin vaiheittain. Ennakkotutkimusten perusteella sedimenttien stabilointiin tarvittava sideainemäärä osoittautui merkittäväksi, joten stabiloituvuustutkimusten seuraavassa vaiheessa pyrittiin selvittämään eri sideainelaatujen ja -määrien toimivuutta. Jatkotutkimuksissa pyrittiin lisäksi selvittämään sedimenttien alueellista laatuvahtelua, jolloin stabilointireseptiä voitiin optimoida eri alueilta peräisin olevien massojen mukaan. (Autiola 2009)

Rakenne ja toteutus

Sedimenttien ruoppaus tehtiin suljettavalla ympäristökauhalla, jolloin veden samentuminen voitiin minimoida sekä ruoppauksesta aiheutuvan ylimääräisen veden määrä jäi mahdollisimman pieneksi. Ruoppausmassa lastattiin proomuihin ja kuljetettiin ruoppausalueelta varsinaiselle stabilointikohteelle.

Stabilointityö aloitettiin syksyllä 2008 prosessistabilointilaitteiston testauksen jälkeen. Prosessistabilointilaitteisto on esitetty tässä työssä aikaisemmin kappaleessa 5.3. Stabiloinnin sideaineyhdistelmät koostuivat seuraavista komponenteista:

- Yleissementti (CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N)
- Pikasementti (CEM I 52,5 R)
- Masuunikuonajauhe (K400)
- Lentotuhka (Fortum Naantalın kivihiihivoimalaitos)

Ruoppausmassojen ja sideaineiden sekoituksen jälkeen massat siirrettiin dumppereilla läjitysaltaaseen.

Altaan täytyessä täyttöä tehtiin myös työntämällä massaa aiemmin läjitetyn ja muutama vuorokauden ajan lujittuneen massan päältä kohti altaan keskustaa. Prosessistabilointilaitteiston huoltotoimenpiteiden aikana sedimenttien stabilointia tehtiin myös masstabilointikalustolla suoraan proomussa. Proomusta stabiloitu massa siirrettiin kuor-

ma-autolla läjitysaltaaseen. Läjitysaltaan täytön ollessa suunnitellussa korkeudessa, massan päälle levitettiin suodatinkangas sekä 30 cm paksu murskekerros työpenkereeksi.

Pilottikohteen laadunvalvonta ja seuranta

Työnaikaista laadunvalvontaa tehtiin seuraamalla ruoppausmassan laatua ennen stabiointia sekä sen jälkeen. Ruoppausmassan vesipitoisuus vaikutti käytettyihin sideaineresepteihin. Tästä syystä massan vesipitoisuus määritettiin kentällä ennen stabiointia. Taulukossa 6.2. on esitetty käytetyt sideaineresepit alueittain.

Taulukko 6.2. Stabiointisuunnitelman mukaiset reseptit ruoppausalueittain. (Autiola 2009, muokattu)

Ruoppaus- alue	Ruoppausmassan w (%)	Sideaineresepti, altaan yläosa 0...2 m (kg/m ³)	Sideaineresepti, al- taan alaosa > 2 m (kg/m ³)
Alue I ja II	160...180	55Pika+105KJ+100LT	45Pika+105KJ+100LT
	180...220	60Pika+105KJ+100LT	50Pika+105KJ+100LT
Alue III	< 260	55Pika+105KJ+100LT	45Pika+105KJ+100LT
	260...300	60Pika+105KJ+100LT	50Pika+105KJ+100LT
Alue II	< 220	45Pika+105KJ+100LT	45Pika+105KJ+100LT

Ruoppausmassan laadun lisäksi seurattiin sekoitustyön laatua määrittämällä stabiloidun massan Ca-pitoisuudet Niton-XRF analysaattorilla sekä laboratoriossa titraamalla.

Pilottikohteen seuranta tutkimuksissa määritettiin stabiloidun massan lujuusominaisuuksia yksiaksiaalilla puristuskokeella 28, 90 ja 150 vuorokauden iässä. Laadunvalvontatutkimusten aikana otetuista näytteistä määritettiin lisäksi laboratoriossa vedenläpäisevyys. Vedenläpäisevyysmääritykset tehtiin 1 ja 3 kuukauden ikäisille koekappaleille.

Laadunvalvontakairaukset tehtiin pilarikairauksina noin vuoden ikäisestä stabiloidusta massasta. Pilarikairauksilla määritetty leikkauslujuuden keskiarvo oli noin 50 kPa koko syvyydellä. Koska sedimentti oli pilaantunut erityisesti organotinoilla, työ sisälsi myös ympäristöseurantaa työn aikana.

6.3 Kokkolan satama

Tämä luku perustuu Sustainable Management of Contaminated Sediments -projektiin (SMOCS) liittyvää Kokkolan sataman pilaantuneiden sedimenttien ruoppausta ja stabiointia käsittelevään loppuraporttiin.

Yleistä

Kokkolan satama on yksi Itämeren suurimmista satamista. Koerakenteen massat ruopattiin rakenteilla olevan laiturin alta ja läjitettiin merestä reunapenkereellä eristettyyn altaaseen. Pilaantuneita sedimenttejä ruopattiin Hopeakiven alueelta yhteensä 12 550 m³. Ruoppaus ja stabilointi toteutettiin vuonna 2011. (Autiola 2012)

Rakenne ja toteutus

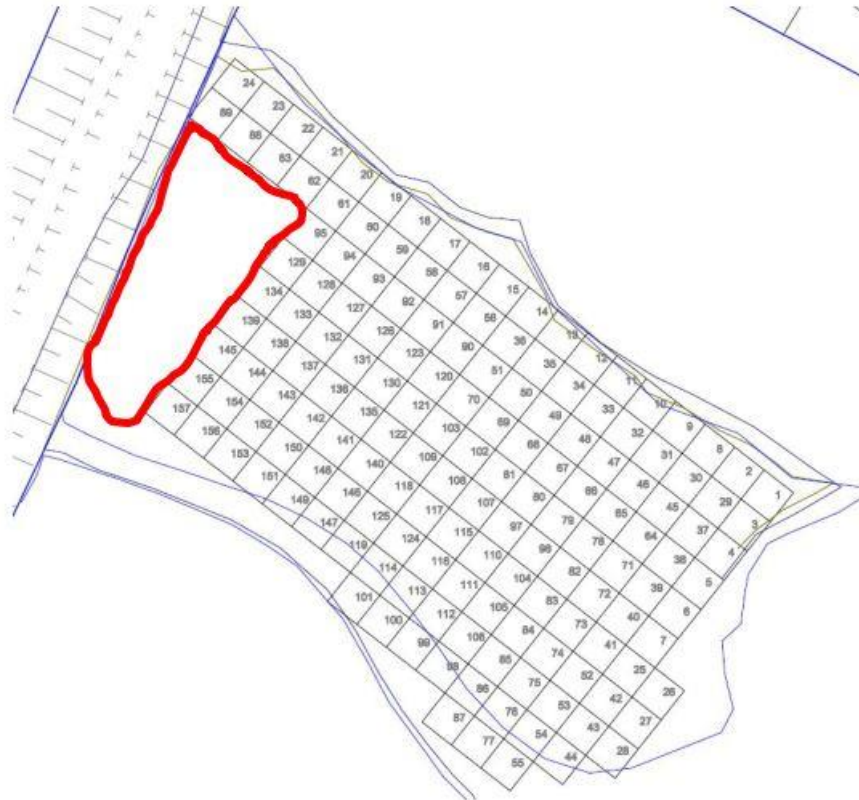
Ruopatut sedimentit stabiloitiin reunapenkereen taakse tehdyssä altaassa massastabilointitekniikalla. Ennen stabilointityön aloittamista sedimenteistä otettiin näytteitä laboratorioissa tehtäviä stabiloituvuustutkimuksia varten. Laboratoriotutkimuksissa tutkittiin geoteknisten ominaisuuksien lisäksi sedimenttien ympäristökelpoisuutta. Stabiloituvuustutkimuksissa sideaineyhdistelmissä käytettiin kaupallista Pikasementtiä sekä Pietarsaassa sijaitsevan Alholmens Kraftin voimalaitokselta peräisin olevaa lentotuhkaa.

Stabilointi tehtiin noin 5 x 5 m² ruuduissa stabilointisyvyyden ollessa noin 2,5 m. Yhteensä ruopattuja ja pilaantuneita sedimenttejä stabiloitiin noin 10 000 m³. Massastabilointitekniikalla toteutetussa stabiloinnissa käytetyt sideainemäärä on esitetty taulukossa 6.3.

Taulukko 6.3. Kokkolan sataman stabiloinnissa käytetyt sideaineet ja määrät. (Autiola 2012, muokattu)

Sideaine	Määrä (kg)
Pikasementti	43 050
Lentotuhka	1 225 900

Alussa stabilointi suoritettiin sideaineyhdistelmällä Pikasementti (30 kg/m³) + Lentotuhka (100 kg/m³). Työnaikaisten havaintojen perusteella reseptiä optimoitiin siten, että kentällä suoritettujen testien jälkeen stabiloidun massan tavoitelujuus todettiin voitavan saavuttaa pelkällä lentotuhkalla. Ruopatun sedimentin ominaisuuksista riippuen lentotuhkan määrä vaihteli 150...200 kg/m³ välillä. Kuvassa 6.2. on esitetty stabilointialtaan kartta johon merkitty numeroidun ruuduin stabilointijärjestys.



*Kuva 6.2. Kokkolan sataman massastabilointiallas. Karttaan merkitty numeroidut stabi-
lointiruudut sekä punaisella viivalla stabiloimatta jäänyt alue. (Autiola 2012)*

Laadunvalvonta ja seuranta

Seuranta aloitettiin jo ruoppauksen ja läjityksen aikana. Ruoppauksen aikaista samentumista sekä vedenlaatua tutkittiin yhteensä 18 tutkimuspisteestä. Tutkimusten perusteella ympäristökauhalla tehty ruoppaus ei aiheuttanut normaalia laivaliikennettä suurempaa samentumista edes ruoppausaluetta lähimmissä tutkimuspisteissä.

Stabiloidun massan lujuudenkehitystä, sideaineen määrää sekä vedenläpäisevyyttä tutkittiin laboratoriossa stabilointikohteessa valmistetuista koekappaleista. Sekoitustyön onnistumista ja stabiloidun massan homogeenisuutta valvottiin Niton-alkuaineanalysaattorilla sekä laboratoriossa titrauksin. Stabiloidusta massasta tehdyistä eri-ikäisistä koekappaleista määritettiin laboratoriossa yksiakiaaliset puristuslujuudet, joiden perusteella arvioitiin massan lujuudenkehitystä. Puristuslujuudet määritettiin 7...180 vuorokauden ikäisistä kappaleista. Taulukosta 6.4 nähdään, että käytettäessä sideaineena pelkkää lentotuhkaa, ennakkoon asetettu tavoitelujuus (100 kPa) saavutettiin 90 vuorokauden kuluttua stabiloinnista.

Taulukko 6.4. Koekappaleista määritetyt puristuslujuudet määritettynä eri-ikäisten kappaleiden keskiarvona. (Autiola 2012, muokattu)

Ikä	Puristuslujuus (kPa)	
	Pikasementti + Lentotuhka	Lentotuhka
7 d	113	49
28 d	225	72
90 d	372	103
180 d	457	122

Stabiloidun massan leikkauslujuutta arvioitiin kentällä käsikäyttöisellä pienoissiipikairalla. Leikkauslujuus määritettiin sekä stabiloimattomasta että stabiloidusta massasta eri syvyyksiltä. Leikkauslujuudet määritettiin 0...2 vuorokauden kuluttua stabiloinnista jolloin leikkauslujuus vaihteli pääosassa allasta 15...50 kPa välillä riippuen syvyydestä.

Kentällä tehdyistä koekappaleista määritettiin lisäksi vedenläpäisevyydet pehmeäseinämaisellä kolmiakksiaalilaitteistolla. Kuukauden kuluttua stabiloinnista määritetyt vedenläpäisevyyden arvot vaihtelivat $1,9...3,5 \cdot 10^{-8}$ m/s välillä.

7. 0-KUIDUN STABILOITUVUUSTUTKIMUKSET

Stabiloituvuustutkimuksen tarkoituksena on löytää Lielahden alueen 0-kuidun stabiloinnin kannalta teknis-taloudellisesti kilpailukykyisimmät vaihtoehdot. Tutkimusten tavoitteena on löytää 0-kuidun stabilointiin soveltuvimmat seossuhteet ja sideaineet sekä niiden määrät. Lisäksi tavoitteena on määrittää stabiloidun massan materiaaliominaisuudet siten, että geotekniset laskelmat voidaan tehdä riittävällä tarkkuudella.

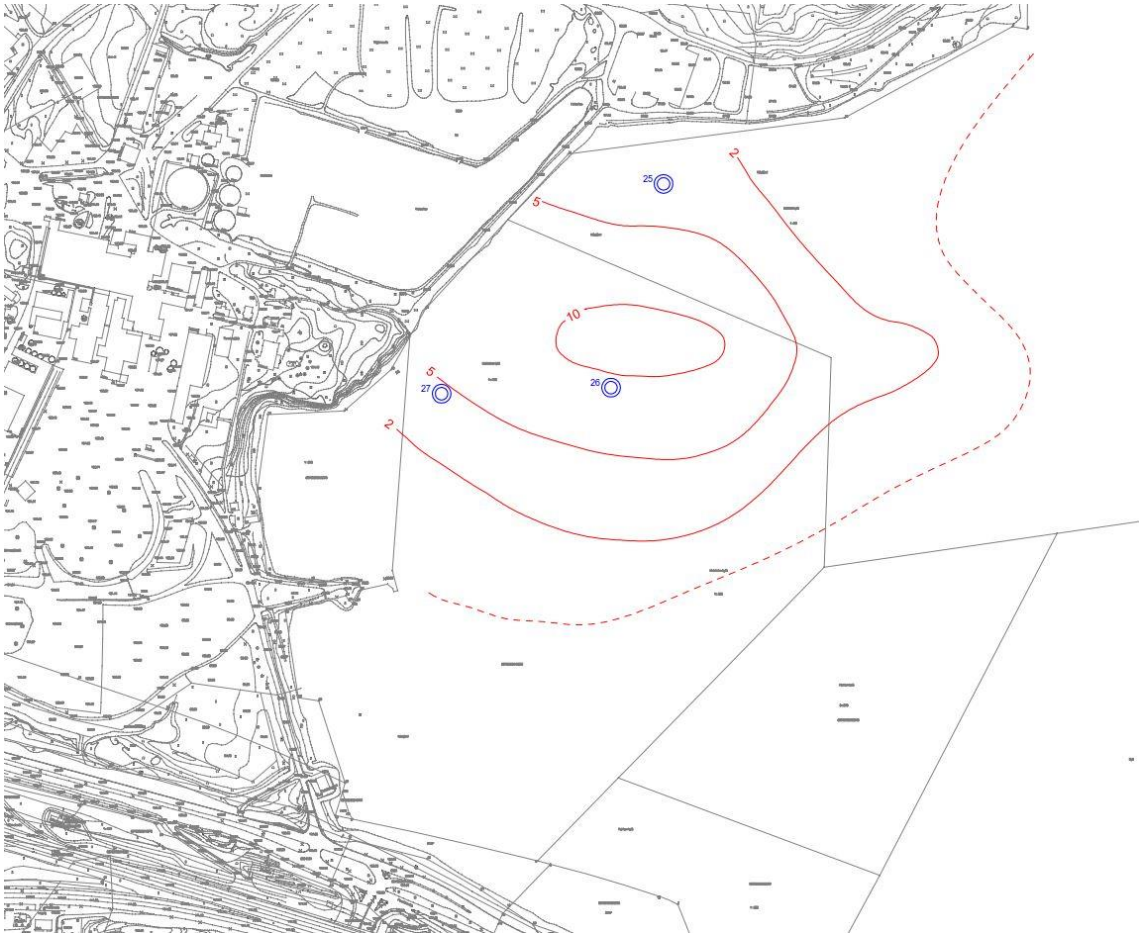
Tässä tutkimuksessa on keskitytty Lielahden 0-kuidun stabiloituvuus -selvityksen perusteella valittuihin potentiaalisimpiin seossuhteisiin sekä sideainemääriin. Diplomityönä tehtävää tarkempaa selvitystä varten otettiin lisänäytteitä laboratoriossa tehtäviä stabiloituvuustutkimuksia varten. Näytteenotto on kuvattu tarkemmin kappaleessa 7.1.

Stabiloituvuustutkimukset tehdään yleensä vaiheittain siten, että tutkimusten edetessä voidaan rajata epäsuotuisimmat reseptit ja sideaineet pois jatkotutkimuksista. Tämä tutkimus on myös jaettu kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa pyrittiin optimoimaan potentiaalisimmiksi havaittujen stabilointireseptien sideainemäärää sekä selvittämään 0-kuidun alueellisen laatuvaihtelun merkitystä stabilointireseptejä määrittäessä. Toisessa vaiheessa tarkoituksena oli tarkentaa ensimmäisessä vaiheessa saatujen tulosten perusteella potentiaalisimpien seosten lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia kolmiakksiaalikoikeilla sekä ödometrikokeilla.

Näytteenoton suunnittelussa pyrittiin huomioimaan mahdollinen 0-kuidun alueellinen laatuvaihtelu. Määrittämällä stabiloinnin kannalta hankalimmat alueet ja kerrokset, voidaan reseptointi tehdä aluekohtaisesti. Mikäli stabiloinnin mitoitus tehdään heikoimman ja hankalimman runkomateriaalin mukaan, saatetaan osalla alueesta päätyä merkittävään ylimitoitukseen. (Forsman *et al.* 2015)

7.1 Näytteenotto

Tutkimuksessa käytetyt 0-kuitu- sekä sedimenttinäytteet on otettu Näsijärven pohjasta Tampereen Lielahdesta. Näytteenotto suoritettiin 15.7.–16.7.2015. Näytteitä otettiin Näsijärven pohjassa olevasta 0-kuidusta sekä alapuolisista savi- ja silttikerroksista yhteensä kolmesta pisteestä. Jokaisesta pisteestä otettiin näytteitä eri syvyyksiltä 0-kuidun ja pohjasedimentin laadullisten vaihtelujen selvittämiseksi. Näytteet otettiin lauttakalustolta kaivinkoneen kauhalla painettavalla putkinäytteenottomella sekä kaivamalla. Näytteenottoa varten käytetyn putken pituus oli noin 9,5 m ja halkaisija 0,4 m. Kalustona käytettiin Finnsukellus Oy:n jalallisia työlauttoja sekä pitkäpuomista kaivinkonetta. Kuvassa 7.1 on esitetty 0-kuidun näytteenottopisteiden sijainnit.



Kuva 7.1. Lielahden 0-kuidun tutkimusohjelma. Karttaan merkitty katkoviivalla arvioitu 0-kuidun levinneisyysalue, jonka ulkopuolella 0-kuidun paksuun on alle 0,5 m. Yhtenäisellä viivalla aikaisempien tutkimusten perusteella arvioitu 0-kuitukerroksen paksuus eri alueilla.

Putkinäytteenotossa putki nostettiin ensin kaivinkoneen kauhaan kiinnitetyn ketjun avulla pystysuoraan. Tämän jälkeen putki painettiin kauhalla 0-kuitukerroksen läpi alapuoliseen savikerrokseen saakka. Putken ollessa riittävän syvällä, yläpäässä oleva reikä tulpattiin ennen putken ylösnostamista. Kuvassa 7.2 on esitetty putkinäytteenoton periaate.



Kuva 7.2. Näytteenotto kaivinkoneen kauhalla painettavalla putkella, jonka halkaisija on 400 mm.

Näytteenotto suoritettiin kaivamalla niistä tutkimuspisteistä, missä putkea ei ollut mahdollista työntää riittävän syvälle 0-kuitukerroksen alapuoliseen saveen saakka. Paikoitain materiaalin huopamaisen rakenteen takia 0-kuitu ei pysynyt putkessa enää putkea nostettaessa. Putkella saatiin otettua näytteitä päällimmäisistä 0-kuitukerroksista, jotka olivat koostumukseltaan selkeästi karkeampia kuin alapuolella olevat kerrokset. Näytteitä varten varattiin 45 litran saaveja, joissa tutkittavat materiaalit toimitettiin Ramboll Finland Oy:n Luopioisten geo- ja materiaalitekniikan laboratorioon.

7.2 Luokittelukokeet

7.2.1 Yleistä

Luokittelukokeina 0-kuitu- ja sedimenttinäytteille tehtiin aistinvaraisten havaintojen lisäksi vesipitoisuuden, humuspitoisuuden ja rakeisuuden määrittämiä. 0-kuidusta määritettiin ainoastaan vesi- ja humuspitoisuus, koska orgaanisen aineksen takia siitä ei voida määrittää rakeisuutta. Näytteet homogenisoitiin ennen luokittelukokeiden aloittamista.

Aistinvaraisten havaintojen perusteella Näsijärven pohjassa päällimmäisenä kerroksena on karkeaa, puuainesta sisältävää kuitua. Alemmissa 0-kuitukerroksissa puukuitu oli selvästi hajonneempaa ja materiaali oli huopamaista ja vanunutta. Kyseinen havainto voidaan tehdä kuvasta 7.3. Tässä vaiheessa tarkempiin stabiloituvuustutkimuksiin valittiin huopamainen aines, jonka oletettiin olevan vallitseva materiaali kyseisellä alueella.

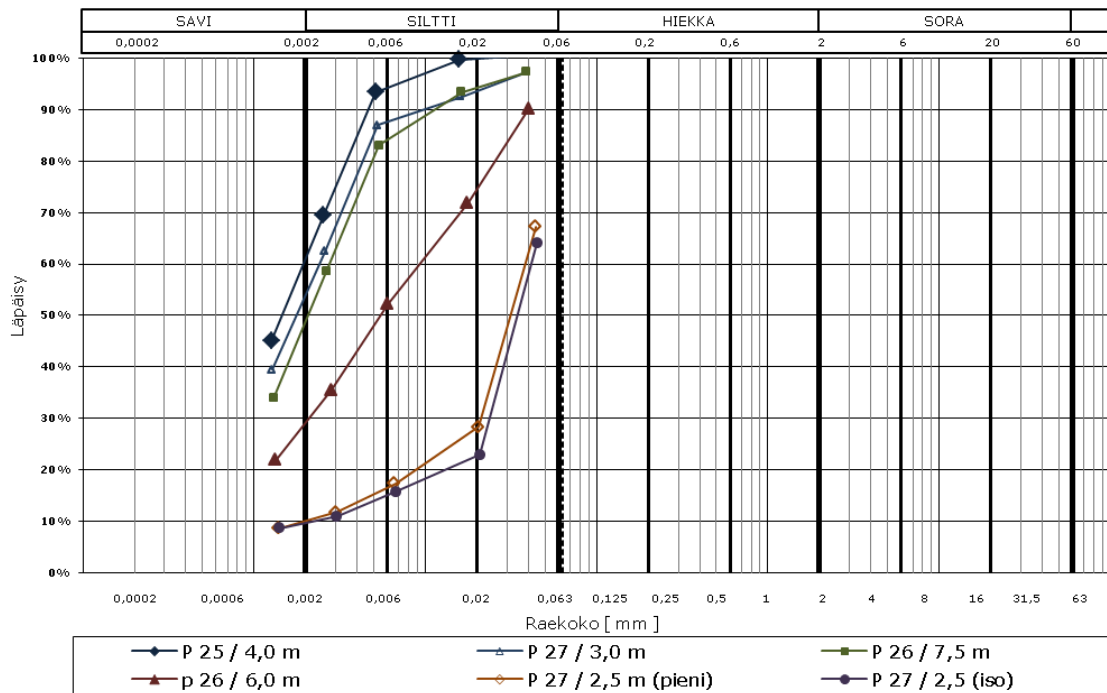


Kuva 7.3. 0-kuitukerroksia tutkimuspisteestä 25.

Silmämääräisten maalajiarvioiden perusteella 0-kuitukerrosten alapuolisena sedimenttinä esiintyi savea ja silttiä. Luokittelukokeiden tulokset on esitetty kappaleessa 7.2.1.

7.2.2 Luokittelukokeiden tulokset

Indeksiominaisuudet määritettiin jokaisesta pisteestä otetuista 0-kuidun alapuolisista maakerroksista. Rakeisuusmääritysten perusteella 0-kuidun alla olevat maakerrokset ovat savea tai silttiä. 0-kuidusta otetuista näytteistä määritettiin vesi- ja humuspitoisuudet. Areometrikokeella määritetyt rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 7.4.



Kuva 7.4. 0-kuidun alapuolisten maakerrosten rakeisuuskäyrät.

Pohjasedimenteille tehtiin rakeisuusmäärittysten lisäksi vesipitoisuuden sekä humuspitoisuuden määritykset. Vesipitoisuus määritettiin laboratoriossa CEN ISO/TS 17892-1:fi -standardin mukaisesti. Näytteet kuivattiin uunissa noin 110 celsiusasteessa. Vesipitoisuudet vaihtelivat eri pisteiden ja näytteenottosyvyyden mukaan. Näytteiden humuspitoisuus eli orgaanisen aineksen määrä määritettiin hehkutushäviön perusteella. Näytteitä hehkutettiin uunissa 550 celsiusasteessa, jonka jälkeen humuspitoisuus lasketaan vertaamalla näytteestä poltetun orgaanisen aineksen massaa alkuperäisen, kuivatun näytteen massaan. Pohjasedimenttien indeksiominaisuudet on esitetty kootusti taulukossa 7.1. Näytteenottosyvyydet on ilmoitettu Näsijärven pohjan tasosta.

Taulukko 7.1. 0-kuidun alapuolisten maakerrosten indeksiominaisuudet.

Tutkimuspiste / Syvyys	Maalaji, areometrikoe	Vesipitoisuus, w (%)	Humuspitoisuus, h _h (%)
P25 / 4,0 m	liSa	35,7	2,4
P26 / 6,0 m	saSi	-	7,3
P26 / 7,5 m	laSa	61,8	3,1
P27 / 2,5 m (2)	Si	86,9 ^{*)}	3,9
P27 / 2,5 m (1)	Si	45,6 ^{*)}	2,1
P27 / 3,0 m	liSa	41,9	2,4

^{*)} Samasta syvyydestä otettujen näytteiden selkeä ero vesipitoisuuden osalta johtuu todennäköisesti näytteenoton yhteydessä tulleesta ylimääräisestä vedestä.

Pohjasedimenttien näytteenoton yhteydessä havaittiin, että pisteessä 26 0-kuitukerroksen paksuus oli odotettua pienempi. Tutkimuskartan 0-kuitukäyrästä perusteella 0-kuidun paksuudeksi arvioitiin 8...9 metriä. Kaivinkoneen kauhalla otettujen näytteiden perusteella 0-kuidun paksuus kyseisen pisteen kohdalla oli 6...7 m.

0-kuidusta otetuista näytteistä määritettiin laboratoriossa vesipitoisuudet sekä humuspitoisuudet edellä kuvatuilla menetelmillä. 0-kuitu on suurelta osin orgaanista ainesta, joten siitä ei voida määrittää rakeisuutta. Vesipitoisuudet vaihtelivat huomattavasti eri pisteistä otettujen näytteiden välillä riippuen materiaalin koostumuksesta. Laboratoriossa määritetyt vesipitoisuudet vaihtelivat 670...1200 % välillä. 0-kuitunäytteiden humuspitoisuus vaihteli pääosin 89...95 % välillä. Näytteenoton perusteella voitiin myös arvioida 0-kuidun alueellista laatuvahtelua. 0-kuidusta laboratoriossa määritetyt ominaisuudet on esitetty taulukossa 7.2.

Taulukko 7.2. 0-kuidun luokittelukokeiden tulokset.

Tutkimuspiste / Syvyys	Vesipitoisuus, w (%)	Humuspitoisuus, H _h (%)
P25 / 3,0 m	665,8	89,2
P26 / 3,5 m	716,3	95,3
P26 / 4,5 m	775,2	93,9
P26 / 5,5 m	688,6	89,8
P27 / 1,0 m	1163,1	94,9
P27 / 1,5m	1195,0	94,8
P27 / 2,0 m	765,7	52,9

0-kuidusta tehdyt aistinvaraiset havainnot on esitetty taulukossa 7.3. Haju on luokiteltu siten, että +++ -merkintä tarkoittaa hajultaan voimakkainta materiaalia.

Taulukko 7.3. 0-kuidusta tehdyt aistinvaraiset havainnot

Tutkimuspiste / Syvyys	Haju	Väri	Ulkonäkö	Kiintoaineksen koostumus
P25 / 3,0 m	+	harmaa	huopam.	Kuitu
P26 / 3,5 m	+	harmaa	tikkum.	Kuitu
P26 / 4,5 m	+++	ruskea	huopam.	Kuitu
P26 / 5,5 m	++	musta	lietem.	Kuitu
P27 / 1,0 m	++	ruskea	lietem.	Liete
P27 / 1,5 m	+++	ruskea	lietem.	Liete
P27 / 2,0 m	+++	harmaa	lietem.	Liete

0-kuidusta tehtyjen luokittelukokeiden sekä silmämääräisten havaintojen perusteella voidaan todeta että eri alueilta ja syvyyksistä otetut 0-kuitujakeet erosivat toisistaan paikoittain selvästi. Pisteestä 27 syvyyksiltä 1,0...2,0 m otetut 0-kuitujakeet olivat koostumukseltaan lietemäisiä, josta kertoo myös 0-kuidusta määritetyt vesipitoisuudet jotka olivat selvästi korkeampia kuin pisteistä 25 ja 26 otetuissa näytteissä. Poikkeuksen muodosti pisteestä 27 syvyydeltä 2,0 m otettu näyte, jossa vesipitoisuus oli lähempänä muista pisteistä otettujen näytteiden vesipitoisuuksia. Lisäksi näytteestä hehikutushäviön perusteella määritetyn orgaanisen aineksen pitoisuus oli huomattavasti pienempi muihin samasta pisteestä otettuihin näytteisiin verrattuna. Vesipitoisuuden vaihtelua voidaan selittää sillä, että pisteestä 27 syvyydeltä 2,0 m otettuun näytteeseen oli todennäköisesti sekoittunut 0-kuidun alapuolisesta silttikerroksesta kivennäisainesta. Näytteenoton perusteella, pisteessä 27 0-kuitukerroksen paksuus on pienempi kuin tutkimuskartassa esitettyjen käyrien mukaan voitiin olettaa.

7.3 Stabiloituvuuskokeet

Varsinaisissa stabiloituvuuskokeissa määritettiin eri suhteissa seostetun 0-kuidun geoteknisiä ominaisuuksia. Lujuusominaisuudet määritettiin tutkimusten ensimmäisessä vaiheessa eri-ikäisille koekappaleille yksiaksiaalisina puristuskokeina. Puristuskokeiden perusteella arvioitiin eri seossuhteissa valmistettujen massojen lujittumiseroja. Puristuskokeita varten valmistettujen koekappaleiden kokoonpuristumista seurattiin niiden esikuormituksen aikana. Toisessa vaiheessa kahdelle seokselle tehtiin kolmiaksiaalikokeita lujuusominaisuuksien tarkentamiseksi. Lisäksi tutkittiin kokoonpuristuvuusominaisuuksia portaittaisella ödometrikokeella.

Stabiloituvuustutkimuksissa noudatettiin turvenäytteille tyypillistä koemenettelyä. Näytesylintereihin valmistetut koekappaleet asetettiin esikuormituspenkkiin, jossa seostettuun ja stabiloituun massan kohdistui 9 kPa pystykuormitus. Normaalisti pystykuormituksena turvekappaleille käytetään 18 kPa, mutta 0-kuitumassan lietemäisen koostumuksen takia esikuormituksen suuruutta pienennettiin. Koekappaleissa esikuormituksen vaikutuksesta tapahtuvia painumia seurattiin puristuskokeisiin saakka. Stabiloituvuuskokeet suoritettiin laboratorio-olosuhteissa 20...22 °C lämpötilassa.

Lujuusominaisuuksien lisäksi osasta tutkittavista massoista määritettiin vedenläpäisevyys sekä mahdollisten haitta-aineiden liukoisuus ravistelutestillä.

7.3.1 Tutkimuksessa käytetyt runko- ja täyteaineet

Stabiloituvuustutkimuksissa käytettävät runko- ja täyteaineet päätettiin näytteistä tehtyjen peruskokeiden perusteella. Kokoomanäytteet valmistettiin osanäytteiden indeksiominaisuuksien sekä näytepisteiden sijaintien perusteella. Seostettaviksi valmistetut 0-kuidun kokoomanäytteet valmistettiin siten, että eri pisteistä otetut osanäytteet muodostivat kokoomanäytteen. Kokoomanäytteen valmistukseen vaikutti pääosin näytteenoton

yhteydessä havaittu 0-kuidun alueellinen laatuvaihtelu. Täyteaineena käytetyt savi ja siltti valittiin peruskokeiden perusteella siten, että kokoomanäytteet edustaisivat mahdollisimman hyvin alueella käytettävissä olevia massoja. Taulukossa 7.4 on esitetty stabiloituvuuskokeissa käytetyt seokset massasuhteineen ja sideainemäärineen. Sideaineena kaikissa resepteissä on käytetty Plussementtiä.

Taulukko 7.4. *Stabiloituvuustutkimuksissa käytetyt reseptit sekä sideainemäärät*

Kokoomanäyte	Runkoaine *)	Massasuhte	Sideainemäärä
1 (P25 3,0m)	0-kuitu + savi 0-kuitu + siltti	2:1	50 kg/m ³ 70 kg/m ³ 90 kg/m ³
2 (P26 3,5m; 4,5m; 5,5m)	0-kuitu + savi 0-kuitu + siltti	2:1	50 kg/m ³ 70 kg/m ³ 90 kg/m ³
3 (P27 1,0m; 1,5m)	0-kuitu + savi 0-kuitu + siltti	2:1	50 kg/m ³ 70 kg/m ³ 90 kg/m ³

*) Savi (P26 7,5m) / Siltti (P27 2,5m)

7.3.2 Koekappaleiden valmistus

Stabiloituvuustutkimuksissa käytettävien massojen esivalmistelujen jälkeen valmistettiin seostettavat kokoomanäytteet. Kokoomanäytteet seostettiin työohjelman mukaisessa massasuhteessa. Seostuksen jälkeen massoista määritettiin irtotiheydet oikean sideainemäärän varmistamiseksi. Käytettävä sideainemäärä valittiin esiselvityksenä tehdyn 0-kuidun stabiloituvuustutkimuksen perusteella. Tutkimuksessa käytettävät sideainemäärät olivat 50, 70 ja 90 kg/m³.

Koekappaleet valmistettiin pareittain, jolloin rinnakkaisnäytteet olivat peräisin samasta sekoituskerrasta. Seostetut massat sekä oikea sideainemäärä punnittiin suoraan sekoitusastiaan. Laboratoriossa tehtävä sekoitustyö perustuu vakioituun menetelmään. Stabiloitavaa massaa sekoitetaan yleiskoneella 1 minuutin ajan, jonka jälkeen sekoitusta jatketaan käsin sekoitustyön onnistumisen varmistamiseksi. Käsin sekoituksen jälkeen sekoitusta jatketaan yleiskoneella vielä 1 minuutin ajan.

Sekoituksen jälkeen massa sullottiin näytesylinteriin. Näytesylinterinä käytettiin turvekoekappaleille suunniteltua muottia, jonka sisähalkaisija on 68 mm ja korkeus 200 mm. Näytettä ei pyritty tässä vaiheessa tiivistämään vaan sullomalla poistettiin näytteeseen mahdollisesti muodostuneet ilmakuplat.

Näytesylinterin pohjalle asetettiin verkko, jonka kautta esikuormituksen aikana vettä pääsi poistumaan koekappaleesta. Täyteen sullotun näytesylinterin päälle asetettiin kan-

si, jota vasten laitettiin kuormitusylinteri. Kuormitusylinterin aiheuttama pystysuuntainen jännitys koekappaleeseen oli 9 kPa, joka vastaa noin 0,5 m korkeaa tiivistyspengeriä.

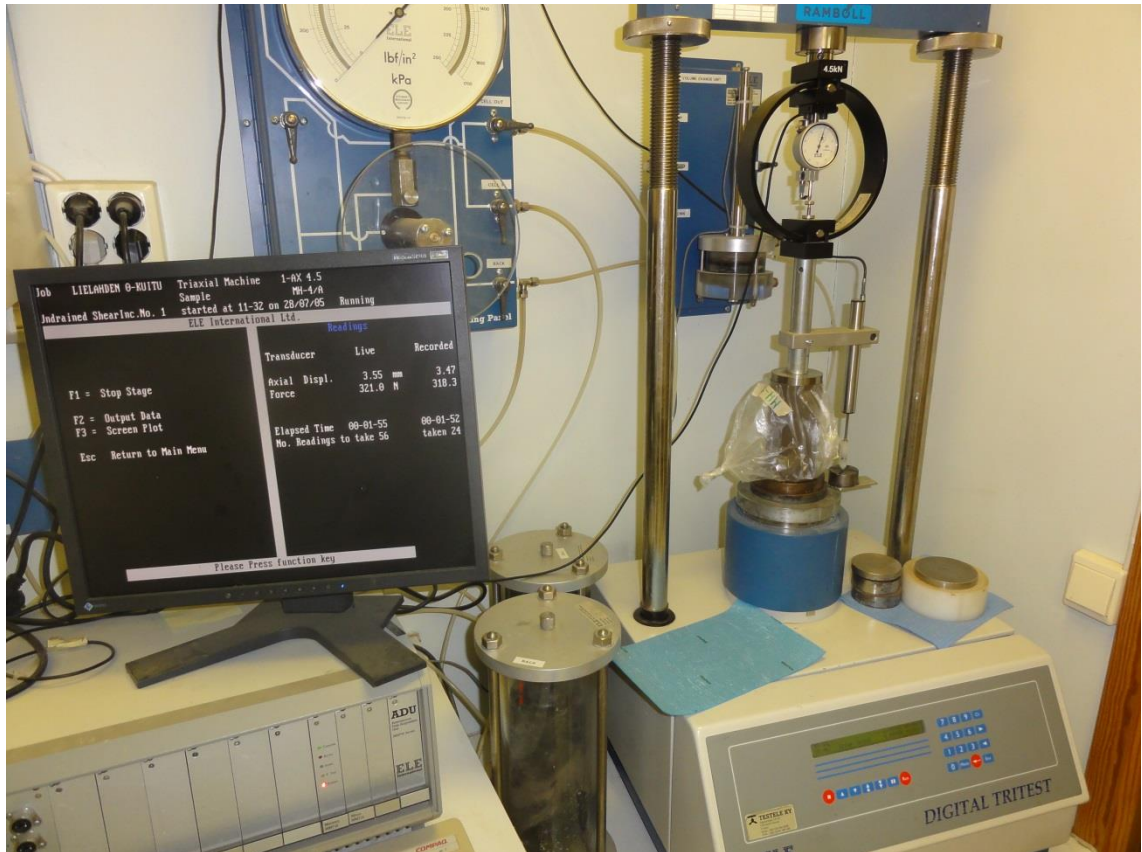
7.3.3 Painumaseuranta

Näytesylintereihin tehdyt koekappaleet siirrettiin sekoituksen jälkeen esikuormituspenkkiin, jossa näytteitä säilytettiin huoneenlämmössä (+21 °C) puristuskokeisiin saakka. Näytesylinterin alaosa pidettiin vedessä, jolloin vesi pääsi virtaamaan sylinterin pohjaan asetetun verkon läpi.

Näytesylintereihin tehtyjen koekappaleiden kokoonpuristumista seurattiin valmistushetkestä puristuskokeisiin saakka. Kokoonpuristumista seurattiin lujittumisen alkuvaiheessa 1, 3 ja 7 vuorokauden jälkeen sekoituksesta. Tämän jälkeen lukemat kirjattiin ylös 14, 28, 60 sekä 90 vuorokauden ikäisistä koekappaleista. Lähes kaikissa koekappaleissa kokoonpuristuminen tapahtui ensimmäisen vuorokauden aikana. Painumaseurannan tulokset on esitetty tarkemmin kappaleessa 9.2.

7.3.4 Yksiaksaaliset puristuskokeet

Koekappaleiden puristuslujuus q_u määritettiin yksiaksaalisella puristuskokeella (mukailtu SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-7: fi). Puristukset tehtiin eri-ikäisille kappaleille, jolloin voitiin arvioida eri seosten ja sideainemäärien vaikutusta stabiloidun massan lujuuden kehitykseen. Koekappaleiden puristuskokeet tehtiin 7, 14, 28, 60 sekä 90 vuorokauden ikäisille seoksille. Kuvassa 7.5 on näytetty yksiaksaalisessa puristuskokeessa käytetty laitteisto.



Kuva 7.5. Puristuskokeissa käytetty laitteisto.

Koekappaleet tunkattiin ulos näytesylinteristä, jonka jälkeen ne muotoiltiin puristuskoetta varten. Puristuskokeita varten koekappaleen korkeuden tuli olla 136 mm. Puristettavan koekappaleen päät muotoiltiin tasaiseksi ja suoruus tarkastettiin ennen näytteen asettamista kuormituslaitteistoon. 0-kuidun laadullisesta vaihtelusta johtuen eri koekappaleiden käsittely tässä vaiheessa erosi selvästi toisistaan. Mitä karkeampaa 0-kuitua stabiloitavassa seoksessa oli käytetty, sitä vaikeampaa oli koekappaleen päiden muotoilu tasaiseksi. Erityisesti karkean 0-kuidun sekä siltin seoksen käsittely oli huomattavasti vaikeampaa hauraan rakenteen takia. Näyte asetettiin muotoilun jälkeen muovipussiin puristuksen yhteydessä näytteestä erottuvan veden takia.

Yksiakselisessa puristuskokeessa koekappaleita puristetaan pystysuunnassa kappaleen murtumiseen saakka. Mikäli murtumista ei tapahdu, puristusta jatketaan kunnes saavutetaan 15 % suhteellinen muodonmuutos. Koekappaleita puristettiin nopeudella 2 mm/min. Puristuskokeessa koekappaleeseen ei kohdistu sivuttaista tukea. Koekappaleeseen vaikuttaa ainoastaan pystysuuntainen pääjännitys σ_1 ja tällöin $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

Puhtaan koheesiomaan tapauksessa Mohrin jännitysypyrän perusteella maan leikkauslujuus määritetään seuraavalla kaavalla:

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} \quad (5)$$

missä τ on leikkauslujuus (kPa)
 σ_1 on pystysuuntainen pääjännitys (kPa)
 q_u on puristuslujuus (kPa)

Murtotilanteessa leikkauslujuus on siis puolet pystysuuntaisen jännityksen maksimiarvosta. Mikäli selkeää leikkautumista ei tapahdu, määritetään puristuslujuus 10 % muodonmuutosta vastaavan jännityksen perusteella.

7.3.5 Kolmiaksiaalikoheet

Yksiaksiaalisten puristuskokeiden lisäksi lujuusominaisuuksien tarkempaa määrittystä varten stabiloiduille koekappaleille tehtiin kolmiaksiaalikoetta Tampereen teknillisten yliopiston maa- ja pohjarakenteiden laitoksen geolaboratoriossa.

Kolmiaksiaalikoekkeella voidaan määrittää maan lujuusparametreja. Vaativissa ja merkittävässä stabilointikohteissa lujuusparametrien määrittämiseen suositellaan kolmiaksiaalikoetta, jolla voidaan mallintaa stabiloidun maan todellista jännitystilaa paremmin kuin yksiaksiaalisessa puristuskokeessa. (Liikennevirasto 2010)

Kolmiaksiaalikoetta varten koekappaleet valmistettiin yksiaksiaalisista puristuskokeista poiketen St II -näyteputkiin, joiden halkaisija on 50 mm ja korkeus 170 mm. Koekappaleet säilytettiin esikuormituspenkissä Ramboll Finlandin Luopioisten laboratoriossa koestuksiin saakka. Koekappaleita esikuormitettiin 9,5 kPa vastaavalla kuormalla 28 vuorokauden ajan ennen stabiloitujen kappaleiden toimittamista kolmiaksiaalikoeksiin.

Kolmiaksiaalikoheet tehtiin kahdelle eri reseptillä stabiloidulle massalle. Kokeet tehtiin sekä saven että siltin kanssa seostetulle ja stabiloidulle 0-kuidulle. Taulukossa 7.5 on esitetty kolmiaksiaalikoeteissa käytetyt seokset sekä käytetyt sellipaineet. Koekappaleet konsolidoitiin koesellissä ennen koestusta.

Taulukko 7.5. Kolmiaksiaalikoeteissa käytetyt stabilointireseptit sekä sellipaineet.

Koekappaletunnus ja resepti	Sideainemäärä	Sellipaineet
MH-12 0-kuitu (P26 3,5m; 4,5m; 5,5m) + savi (P26 7,5m)	70 kg/m ³	35,2 kPa 50,0 kPa 71,5 kPa
MH-21 0-kuitu (P27 1,0m; 1,5m) + siltti (P27 2,5m)	70 kg/m ³	36,5 kPa 51,5 kPa 71,5 kPa

7.3.6 Ödometrikokeet

Seostetulle ja stabiloidulle 0-kuidulle tehdyt portaittaiset ödometrikokeet aloitettiin kolmiakksiaalikoekoiden tavoin 28 vuorokauden ikäisille seoksille. Ödometrikokeet tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston geolaboratoriossa. Esikuormituspenkissä säilytettyjen koekappaleiden osalta oli havaittavissa, että tasaisen 9 kPa kuormituksen alla kokoonpuristuminen oli tapahtunut pääosin ensimmäisen vuorokauden osalta. Ödometrikokeilla pyrittiin selvittämään stabiloidun massan pitkäaikaista painumakäyttäytymistä sekä mahdollista viruman aiheuttamaa sekundääristä painumaa.

Koekappaleet valmistettiin näytesylintereihin, joiden korkeus on 200 mm ja halkaisija 68 mm. Koekappaleet säilytettiin 9 kPa kuormituksen alla viikonlopun ajan, jonka jälkeen kuormitusta jatkettiin Tampereen teknillisen yliopiston geolaboratorion ödometrikoelaitteistossa. Näytekappaleet säilytettiin veden alla kuormitettuna 28 vuorokauden ajan ennen seuraavaa kuormitusporrasta.

Portaittaiseen ödometrikokeeseen valittiin 0-kuitu + savi -seos, jossa 0-kuitujae on peräisin pisteestä 26 ja savi kyseisestä pisteestä 26 muodostetun 0-kuidun kokoomanäytteen alapuolisesta maakerroksesta. Taulukossa 7.6. on esitetty ödometrikokekappaleet sekä niiden reseptit ja sideainemäärät.

Taulukko 7.6. Portaittaisessa ödometrikokeessa käytetyt stabilointireseptit ja sideainemäärät

Koekappaletunnus ja resepti	Sideainemäärä
MH-12 A1/A2 0-kuitu (P26 3,5m; 4,5m; 5,5m) + savi (P26 7,5m)	50 kg/m ³
MH-12 B1/B2 0-kuitu (P26 3,5m; 4,5m; 5,5m) + savi (P26 7,5m)	70 kg/m ³

Ödometrikokeessa näytekappaleen korkeus oli 20 mm ja pinta-ala 20 cm². Sylinterin muotoinen näytekappale tehtiin painamalla ödometrirenas suoraan alkuperäiseen näytesylinteriin.

Kokeessa käytettyjen kuormitusportaiden valinnassa pyrittiin mallintamaan stabiloidun rakenteen yläpuolisista täytöistä aiheutuvaa kuormitusta. Kuormitusportaiden suuruudet kokeessa vaihtelivat 20...160 kPa välillä. Yksittäisen kuormitusportaan kesto vaihteli 3...8 vuorokauden välillä.

8. HIEDANRANNAN KOESTABILOINTI

Tässä osiossa käsitellään Hiedanrantaan suunnitellun massastabiloinnin koerakenteen toteutusta sekä työvaiheita. Koestabiloinnilla pyritään saamaan tarkempaa tietoa stabiloidun massan käyttäytymisestä todellisissa olosuhteissa. Lisäksi pyritään arvioimaan laboratorio-olosuhteissa sekä maastossa saatujen koetulosten vastaavuutta. Osiossa kuvataan lisäksi koerakenteen seurantaohjelman sisältöä sekä laadunvalvontatutkimuksen vaiheistusta.

Koekohteen tavoitteena on saada luotettavampaa tietoa seostetun ja stabiloidun 0-kuidun lujuus- sekä kokoonpuristuvuusominaisuuksista. Geoteknisten ominaisuuksien lisäksi koekohteen yhteydessä stabiloidusta massasta määritetään sen ympäristökelpoisuuteen liittyvät ominaisuudet erillisen tutkimusohjelman mukaisesti. Lisäksi koerakentamisen yhteydessä tarkkaillaan mahdollisia vedenlaadun muutoksia Näsijärvestä otettavista vesinäytteistä. Kohteessa käytettävät reseptit ja sideaineet valittiin aikaisemmin keväällä 2015 tehdyn alustavan 0-kuidun stabiloituvuustutkimuksen sekä tässä diplomityössä tehdyn tutkimuksen perusteella. Erityisesti diplomityön yhteydessä havaitun 0-kuidun laatuvaihtelun vaikutus stabiloidun massan lujuus- ja kokoonpuristuvuusominaisuuksiin pyrittiin huomioimaan koekohteessa käytettävien stabilointireseptien suunnittelussa.

8.1 Kohteen esittely

8.1.1 Kohteen sijainti

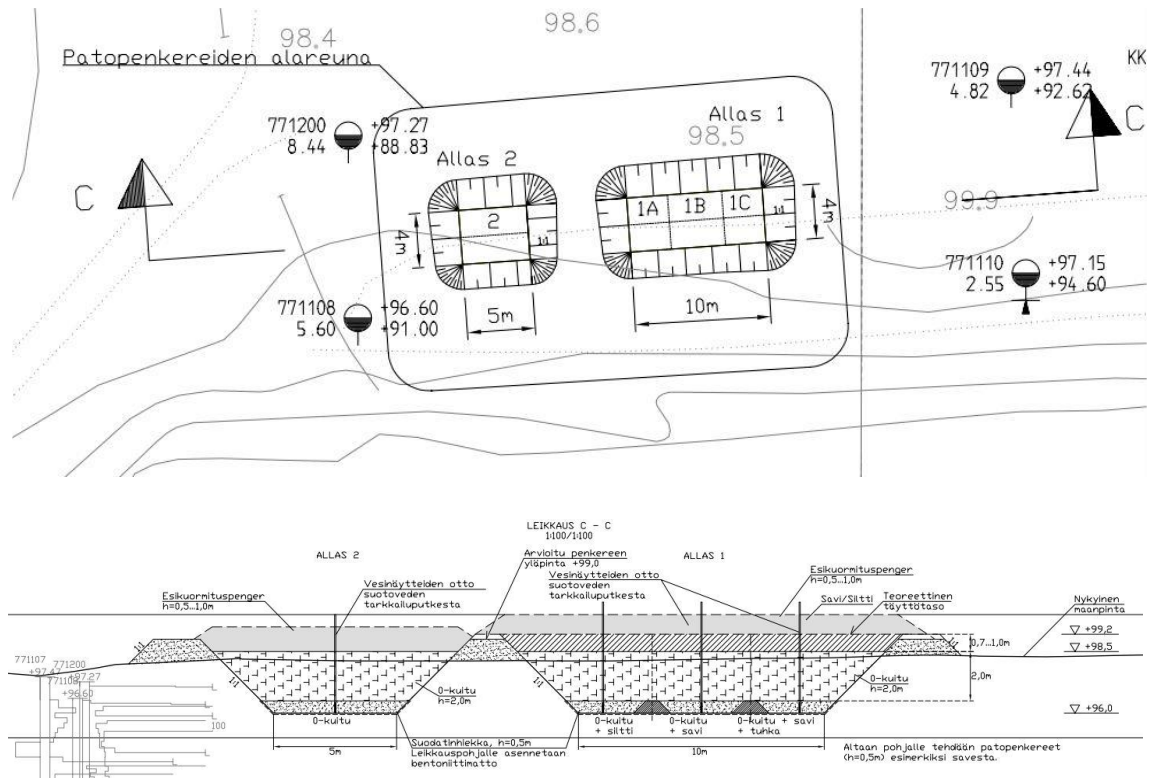
Koekohde sijaitsee Tampereen Niemenrannassa. Koekohteen sijaintiin vaikutti erityisesti alueen pohjaolosuhteet sekä alueen maankäyttö. Koekohteen vaatimia kaivuja ei voida suorittaa olemassa olevan suljetun kaatopaikan alueella, joten koekohteen sijainniksi valittiin Niemenrannan täyttöalue, jossa rakentamisen edellyttämät kaivut voidaan suorittaa turvallisesti sekä kaatopaikan pintarakenteita rikkomatta. Lisäksi koestabilointialtaiden sijainnissa on huomioitu pitkäpuomisen kaivinkoneen ulottuma siten, että 0-kuitu voidaan ruopata Näsijärvestä suoraan altaisiin. Täyteaineina käytettävät savi ja siltti toimitettiin alueelle ylijäämämaina muista kohteista. Kuvassa 8.1. on esitetty lähtötilanne, jossa kaivualue on merkitty.



Kuva 8.1. Koestabilointikohde sijaitsee Niemenrannassa nykyisellä täyttöalueella. Kuvassa lähtötilanne 23.11.2015, jolloin altaiden kaivuluiskien alakulmat oli merkitty maastoon.

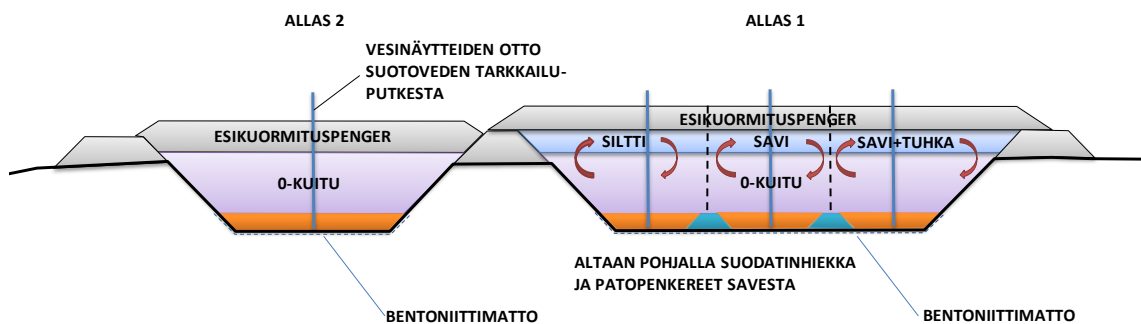
8.1.2 Koerakenteen periaate

Koerakenteen suunnittelun lähtökohtana oli eri sideainereseptien sekä seostettavien massojen vertailu. Koerakenne koostuu kahdesta erikokoisesta altaasta, joihin 0-kuidun sekä seostettavien täyteaineiden stabilointi tehdään. Altaat on jaoteltu siten, että pienemmässä altaassa on stabiloitu ja seostamaton 0-kuitu. Toisessa, suuremmassa altaassa käsitellään useampia massoja sekä stabilointireseptejä. Kuvassa 8.2 on esitetty massa-stabiloinnin koelaitteiden tarkempi sijainti sekä pituusleikkaus.



Kuva 8.2. Koerakenteen asemapiirros sekä pituusleikkaus C-C. Asemapiirroksessa on esitetty altaiden osastointi eri reseptien ja sideainemäärien mukaisesti.

Koekohteen suunnittelussa pyrittiin varmistamaan, että kaivut voidaan tehdä kuivatyönä pohjavedenpinnan yläpuolella. Alueen pohjavedenpinnan arvioitiin olevan lähes Näsijärven pinnan tasossa, eli korkeustasolla noin +95,70. Pohjavedenpinnan takia stabilointialtaiden reunoille suunniteltiin korotuspengerit, jolloin altaiden syvyys saadaan riittäväksi stabiloitavaa massamäärää varten. Korotuspengerit toimivat stabilointivaiheessa massastabilointikaluston työalustana. Ennen stabilointia 0-kuidun kanssa yhdessä seostettavat täyteaineet levitetään tasaisesti 0-kuidun päälle. Massoille tehdään ns. esihomogenisointi eli esisekoitus, jolla pyritään varmistamaan stabiloidun massan tasalaatuisuus.



Kuva 8.3. Periaatteellinen leikkaus koerakenteen stabilointialtaista.

Koestabiloinnissa käytettävät reseptit ja sideainemäärät on esitetty kappaleessa 8.2. Alustavissa suunnitelmissa esitettyjä sideainemääriä tarkennettiin laboratoriossa tehtyjen ennakkokokeiden tulosten perusteella. Lähtömateriaaleista tehtyjen sideainetarkistusten lisäksi tutkittiin myös stabiloidun materiaalin lujuudenkehitystä eri lämpötiloissa, jolloin pystytään arvioimaan paremmin massastabiloidun massan lujuutta todellisessa tilanteessa.

8.2 Koerakentamisen toteutus

Koerakenteen työvaiheet jaettiin suunnitteluvaiheessa seuraavasti

- Valmistelevat työt
- 0-kuidun ruoppaus ja massojen käsittely
- Massastabilointityö
- Stabiloinnin aikana ja jälkeen tehtävät työt
- Koekohteen seuranta ja laadunvalvonta

Koerakenteessa käytetty 0-kuitu ruopattiin rannalta pitkäpuomisella kaivinkoneella. Täyteaineena käytetty savi oli peräisin Tampereen Vehmaisista. Siltti toimitettiin stabilointia varten Niemenrannasta altaiden läheisyydessä olevalta kasalta.

Ennen varsinaista koealtaiden rakentamista, stabiloitavasta 0-kuidusta sekä seostettavista täyteaineista otettiin näytteet laboratoriossa tehtävää indeksiominaisuuksien määrittämistä varten. Peruskokeiden lisäksi koerakenteessa käytettävistä massoista tehtiin koekappaleet laboratorio-olosuhteissa lopullisessa koestabiloinnissa käytettävän sideainemäärän tarkistusta varten. Koekappaleet valmistettiin kappaleessa 7.3. esitetyllä tavalla muotteihin ($d = 68 \text{ mm}$), jotka asetettiin esikuormituspenkkiin jossa koekappaleeseen kohdistui 9 kPa pystykuormitus. Massat sekoitettiin tässä diplomityössä tehdyn tutkimuksen tavoin massasuhteessa 2:1.

Laboratoriossa tehtävillä ennakkokokeilla pyrittiin sideainemäärän tarkentamisen lisäksi arvioimaan lämpötilan vaikutusta massastabiloinnin lujuudenkehitykseen säilyttämällä koekappaleita eri lämpötiloissa. Normaalin huoneenlämpösäilytyksen lisäksi rinnakkaisia koekappaleita säilytettiin lämpötiloissa 10–12 °C sekä 5–7 °C.

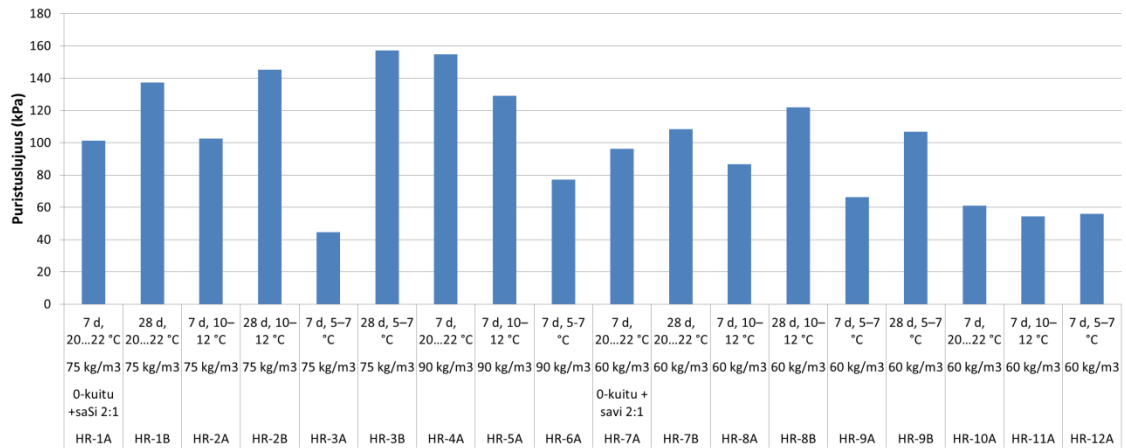
Taulukko 8.1. Laboratoriossa tehtyjen ennakkokokeiden perusteella määritetyt puristuslujuudet.

Koekappale	Resepti	Ikä, lämpötila	Puristuslujuus
HR-1A	0-kuitu + saSi 2:1	7 d, 20...22 °C	101,3 kPa
HR-1B	PlusSe 75 kg/m ³	28 d, 20...22 °C	137,4 kPa
HR-2A	0-kuitu + saSi 2:1	7 d, 10–12 °C	102,6 kPa
HR-2B	PlusSe 75 kg/m ³	28 d, 10–12 °C	145,3 kPa
HR-3A	0-kuitu + saSi 2:1	7 d, 5–7 °C	44,6 kPa
HR-3B	PlusSe 75 kg/m ³	28 d, 5–7 °C	157,1 kPa
HR-4A	0-kuitu + saSi 2:1 PlusSe 90 kg/m ³	7 d, 20...22 °C	154,9 kPa
HR-5A	0-kuitu + saSi 2:1 PlusSe 90 kg/m ³	7 d, 10–12 °C	129,2 kPa
HR-6A	0-kuitu + saSi 2:1 PlusSe 90 kg/m ³	7 d, 5-7 °C	77,2 kPa
HR-7A	0-kuitu + savi 2:1	7 d, 20...22 °C	96,2 kPa
HR-7B	PlusSe 60 kg/m ³	28 d, 20...22 °C	108,3 kPa
HR-8A	0-kuitu + savi 2:1	7 d, 10–12 °C	86,6 kPa
HR-8B	PlusSe 60 kg/m ³	28 d, 10–12 °C	121,9 kPa
HR-9A	0-kuitu + savi 2:1	7 d, 5–7 °C	66,4 kPa
HR-9B	PlusSe 60 kg/m ³	28 d, 5–7 °C	106,9 kPa
HR-10A *)	0-kuitu + savi 2:1 PlusSe 60 kg/m ³	7 d, 20...22 °C	61,1 kPa
HR-11A *)	0-kuitu + savi 2:1 PlusSe 60 kg/m ³	7 d, 10–12 °C	54,5 kPa
HR-12A *)	0-kuitu + savi 2:1 PlusSe 60 kg/m ³	7 d, 5–7 °C	55,9 kPa

*) Runkoaineen käytettiin lietemäistä 0-kuitua (HR-10...HR-12). Koekappaleissa HR-1...HR-9 on käytetty huopamaista ainesta.

Laboratoriossa tehtyjen ennakkokokeiden perusteella alhaisimmassa lämpötilassa säilytettyjen koekappaleiden yksiaksiaalinen puristuslujuus 7 vuorokauden kuluttua sekoituksesta jäi selvästi alhaisemmaksi kuin vastaavilla huoneenlämmössä säilytetyillä koekappaleilla. Koestabiloinnissa käytettävää sideainemäärää tarkennettiin laboratoriossa alhaisimmassa lämpötilassa (5–7 °C) säilytettyjen koekappaleiden puristuskokeiden tulosten perusteella. Koerakenteen massastabilointityön sekä massan lujudenkehityksen aikana kyseinen lämpötila vastasi parhaiten maastossa vallitsevia olosuhteita. Ennakkokokeiden tulosten perusteella koerakenteessa käytettäväksi sideainemääräksi valittiin 75 kg/m³. Kuvasta 8.4 nähdään, että samalla reseptillä tehtyjen koekappaleiden puristuslujuuteen vaikuttaa iän lisäksi myös säilytyslämpötila. Mitä alhaisemmassa lämpötilassa koekappale on säilytetty, sitä hitaampaa on lujudenkehitys. Kyseinen ilmiö joh-

tuu sideaineena käytetyn sementin hydrataatioreaktion lämpötilariippuvuudesta. Sementin hydrataatioreaktio on esitetty aiemmin kappaleessa 5.5.



Kuva 8.4. Yksiaksiaalisella puristuskokeella määritetyt puristuslujuudet eri-ikäisille ja eri lämpötiloissa säilytetyille ennakkokoe-kappaleille.

Taulukossa 8.2 on esitetty koestabiloinnissa käytetyt reseptit sekä sideainemäärät eri altaissa.

Taulukko 8.2. Koestabiloinnissa käytetyt reseptit sekä sideainemäärät.

Allas	Resepti	Sideainemäärä (Plussementti)
1A	0-kuitu + siltti 2:1	75 kg/m ³
1B	0-kuitu + savi 2:1	75 kg/m ³
1C	0-kuitu + savi 2:1 + tuhka 20 %	75 kg/m ³
2	0-kuitu	75 kg/m ³

Plussementin lisäksi stabiloinnissa käytettiin myös Naistenlahden voimalaitokselta saatavaa lentotuhkaa. Tuhka sekoitettiin jo aikaisemmin sekoitettuun 0-kuitu + savi -seokseen massasuhteessa.

8.2.1 Valmistelevat työt

Koestabilointirakenne koostui kahdesta altaasta, joihin sekoitettiin stabiloinnin runko- ja täyteaineet ennen stabilointia. Stabilointialtaiden pohjat olivat pinta-aloiltaan 20 m² ja 40 m². Altaiden tarkemmat mitat on esitetty aiemmin kuvan 8.2. asemapiirroksessa. Luiskakaltevuutena molemmissa altaissa käytettiin 1:1.

Kaivutöiden jälkeen altaan pohjan taso sekä luiskien sijainti kartoitettiin myöhemmässä vaiheessa tehtävää massojen sekoittamista ja massasuhteiden määrittystä varten. Mittausten jälkeen molempien altaiden pohjalle asennettiin bentoniittimatto, jonka päälle tehtiin suodatinkerros (h = 0,5 m) suodatinhiekkasta. Bentoniittimaton tehtävänä on muodostaa altaiden pohjalla vettä läpäisemätön kerros, jolloin myöhemmässä vaiheessa altaiden pohjalla olevasta suodatinkerroksesta voidaan ottaa vesinäytteitä stabiloidusta massasta suotautuvasta vedestä. Altaiden pohjalle bentoniittimaton päälle tehtiin patopenkereet savesta (h = 0,5 m) erottamaan eri resepteillä stabiloiduista massoista suotautuva vesi. Suodatinkerroksen päälle asennettiin suodatinkangas estämään ruopattavan 0-kuidun sekä suodatinhiekan sekoittuminen. Kuvassa 8.5. on esitetty patopenkereiden sijainti sekä suodatinkerroksen rakentaminen.



Kuva 8.5. Altaan 1 pohjalle asennettiin bentoniittimatto sekä rakennettiin patopenkereet savesta. Patopenkereiden välit täytettiin suodatinhiekkalla.

8.2.2 0-kuidun ruoppaus ja massojen käsittely

Koestabilointialtaiden kaivujen sekä suodatinkerroksen rakentamisen jälkeen aloitettiin massojen siirto altaisiin. Täyttö aloitettiin ruoppaamalla stabiloitava 0-kuitu pitkäpuomisella kaivinkoneella ranta-alueelta suoraan altaisiin. Osittain massa jouduttiin ruoppaamaan kauempaa ja kuljettamaan kuorma-auton lavalla altaisiin. Kuvassa 8.6. on esitetty pitkäpuomisella kaivinkoneella tehtyä 0-kuidun ruoppausta stabilointialtaisiin.



Kuva 8.6. 0-kuidun ruoppausta Näsijärvestä stabilointialtaaseen.

0-kuidun ruoppauksen jälkeen altaiden eri osastoihin sekoitettiin stabiloinnin täyteaineena käytettävät massat. Savi ja siltti sekoitettiin 0-kuidun kanssa massasuhteessa. Massastabiloinnin runko- ja täyteaineiden sekoitus tehtiin ensin varovasti kaivinkoneen kauhalla. Myöhemmässä vaiheessa sekoitus tehtiin tarkemmin massastabilointikaluston sekoitinlaitteistolla ennen sideaineen lisäämistä.

8.2.3 Massastabilointityö

Massastabilointityö tehtiin ruuduittain siten, että altaan 1 jokainen osasto (1A...1C) muodosti oman stabilointiruutunsa. Sekoitinkärjen ulottuman takia massastabilointi voitiin tehdä kokonaisuudessaan altaan toiselta reunalta. Massastabilointikalustoon kuului sekoitinkärjellä varustettu kaivinkone (kuva 8.7) sekä tela-alustainen painesyötin, jonka säiliön tilavuus on $6,5 \text{ m}^3$ (kuva 8.8). Lisäksi alueelle toimitettiin säiliövaunu sideaineen varastointia varten.



Kuva 8.7. Sekoitinkärjellä varustettu kaivinkone.

Ennen stabilointityön aloittamista massoja sekoitettiin kaivinkoneen sekoitinkärjellä syöttämällä massaan paineilmaa. Esisekoituksella pyrittiin homogenisoimaan runkoaineena käytetty 0-kuitu sekä täyteaineet, jolloin stabiloitava massa olisi mahdollisimman tasalaatuista. Esisekoituksen jälkeen sekoitusta jatkettiin syöttämällä samalla stabiloitavaan massaan sementtiä sekoitinkärjen kautta (kuva 8.9).



Kuva 8.8. Sideaineen syöttämiseen käytetty painesyötin. (Kuva: Juha Nikkilä, 8.12.2015)

Stabilointiin käytettävän sideaineen kulutusta seurattiin sekoitustyön aikana. Jokaiseen altaaseen tarvittava sideainemäärä määritettiin sekoitetun massan tilavuuden perusteella. Stabiloitavan massan tilavuuden määrittäminen tehtiin tarkemmittauksilla ennen massojen sekoittamista sekä seostetun massan pinnalta.

Taulukko 8.3. Koestabiloinnissa toteutunut sementtimäärä eri altaissa.

Allas	Tilavuus m ³	Sideainemäärä kg/m ³	Sideainemäärä kg
1 A	67	75 kg/m ³	5000
1 B	58	75 kg/m ³	4350
1 C	52	75 kg/m ³	3900
2	70	75 kg/m ³	5250
	247 m³		18500 kg

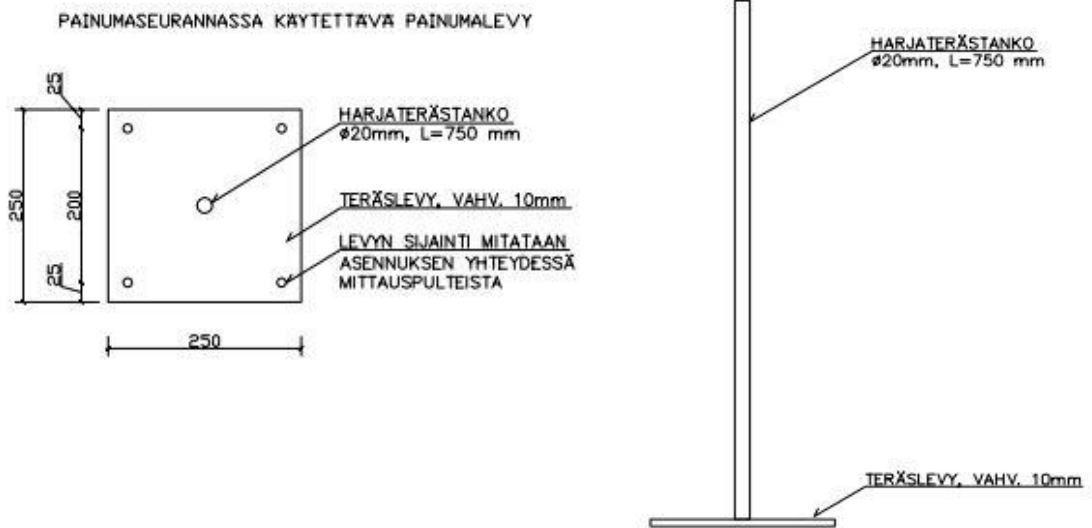


Kuva 8.9. Sideaine syötettiin sekoitinkärkeen säiliöstä painesyöttimen kautta. (Kuvat: Juha Nikkilä, 8.12.2015)

8.2.4 Stabilointityön aikana ja jälkeen tehtävät työt

Välittömästi massastabiloinnin jälkeen stabiloidusta massasta tehtiin kenttäolosuhteissa koekappaleet muotteihin, jotka toimitettiin Ramboll Finland Oy:n Luopioisten laboratorioon. Laboratoriossa koekappaleet asetettiin esikuormituspenkkiin, jossa koekappaleisiin kohdistettiin 9 kPa pystykuormitus.

Massastabiloinnin jälkeen molempiin altaisiin asennettiin lämpötila-anturit, joilla tarkkaillaan altaiden lämpötilaa ja näin ollen varmistetaan sementin sitoutumisreaktioiden käynnistymisestä sekä altaiden sulana pysymisestä talviaikaan. Tämän jälkeen stabiloidun massan päälle levitettiin suodatinkangas ja tiivistyspengeri, jonka paksuus on 0,5 m. Talvityönä tehtävien laadunvalvontatutkimusten takia tiivistyspenkereen materiaalina käytettiin murskettä, jolloin pengertä voidaan helpommin leikata tutkimusten yhteydessä. Ennen tiivistyspenkereen rakentamista stabiloidun massan päälle asennettiin painumalevyt, jotka on esitetty kuvassa 8.10. Painumalevyt asennettiin altaan 1 jokaisen osaston sekä altaan 2 keskelle. Yhteensä painumalevyjä asennettiin 4 kpl.



Kuva 8.10. Koerakenteen painumaseurannassa käytettävä painumalevy.

Kuvassa 8.11 on esitetty suodatinkankaan päälle rakennettu 0,5 m paksu tiivistyspenger. Pengermaalina käytettiin kalliomursketta 0/32 mm talvityönä tehtävien koekuoppien kaivujen takia.



Kuva 8.11. Stabiloidun massan päälle rakennettiin tiivistyspenger murskeesta. Kuvassa etuoikealla allas 1 ja suoraan edessä allas 2.

8.3 Koekohteen seuranta ja laadunvarmistus

Massastabiloinnin koerakenteesta on laadittu seurantaohjelma, johon kuuluu stabilointityön laadunvarmistus sekä stabiloidusta massasta tehtävät haitta-ainetutkimukset. Stabilointityön onnistumista seurataan siipikairauksin sekä painumalevyistä tehtävien painumahavaintojen perusteella. Lisäksi stabiloidun massan homogeenisuutta arvioidaan koekuopista tehtävien silmämääräisten havaintojen perusteella. Koekuopista otetaan myös koekappaleet laboratoriossa tehtäviä puristuskokeita varten.

Koekohteen seuranta- ja laadunvarmistustulokset on rajattu tämän diplomityön ulkopuolelle. Koekohteesta laaditaan seurantajakson jälkeen loppuraportti, jossa esitetään tiedot koekohteen toteutuksesta sekä seuranta- ja laadunvarmistustulokset. Tulosten perusteella raportissa arvioidaan massastabilointimenetelmän soveltuvuutta 0-kuidun hyötykäytön edistämiseksi.

9. STABILOIDUN 0-KUIDUN GEOTEKNISET OMINAISUUDET

Seostetun ja stabiloidun 0-kuidun stabiloituvuustutkimukset toteutettiin laaditun työohjelman mukaisesti. Työohjelmassa on esitetty valmistettavien koekappaleiden massasuhteet sekä sideainemäärät. Jokaiselle koekappaleelle muodostui oma koekappale-tunnus. Selvennykseksi tämän diplomityön kappaleissa 9 ja 10 on 0-kuitujakeiden sekä täyteaineena käytettyjen saven ja siltin näytteenottosyvyydet jätetty mainitsematta. Runko- ja täyteaineet seostettiin kaikissa resepteissä massasuhteessa 2:1 pois lukien kahta reseptiä, joissa 0-kuitu (P26) + savi (P26) -seokset valmistettiin massasuhteissa 1:1 ja 3:1 täyteaineen määrän vaikutuksen arvioimiseksi. Koekappaleiden tunnukset sekä näytteenottopisteet ja -syvyydet on esitetty taulukossa 9.1.

Taulukko 9.1. Stabiloituvuustutkimuksissa käytetyt reseptit sekä koekappaleetunnukset.

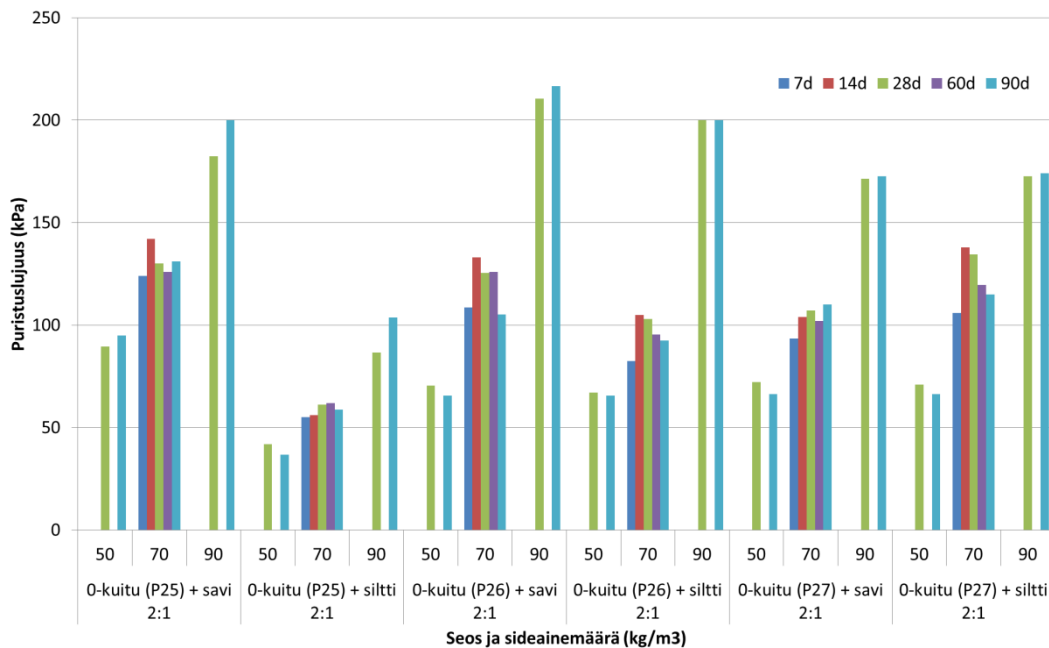
0-kuitu	Resepti			Koekappaleet		
Kokoomanäyte	Runkoaine + täyteaine	Massasuhte	Sideainemäärä (kg/m ³), Plussementti			
1 (P25 3,0m)	0-kuitu + Savi (P26 7,5m)	2:1	50	MH-5A...D		
			70	MH-6A...J		
			90	MH-7A...D		
	0-kuitu + Siltti (P27 2,5m)	2:1	50	MH-8A...D		
			70	MH-9A...J		
			90	MH-10A...D		
2 (P26 3,5m;4,5m;5,5m)	0-kuitu + Savi (P26 7,5m)	2:1	50	MH-11A...D		
			70	MH-12A...J		
			90	MH-13A...D		
	0-kuitu + Siltti (P27 2,5m)	2:1	50	MH14A...D		
			70	MH-15A...J		
			90	MH-16A...D		
3 (P27 1,0m;1,5m)	0-kuitu (P26 kokooma) + Savi (P26 7,5m)	1:1	70	MH-23A...D		
			0-kuitu + Savi (P26 7,5m)	2:1	50	MH17A...D
					70	MH18A...J
	90	MH19A...D				
	0-kuitu + Siltti (P27 2,5m)	2:1	50	MH20A...D		
			70	MH21A...J		
			90	MH22A...D		
	0-kuitu (P26 kokooma) + Savi (P26 7,5m)	3:1	70	MH-24A...D		

9.1 Lujuusominaisuudet

Lujuusominaisuudet määritettiin ensimmäisessä vaiheessa yksiakksiaalisina puristuslujuuksina sekä myöhemmässä vaiheessa kolmiakksiaalikokeilla. Kolmiakksiaalikokeisiin valittavissa koekappaleissa huomioitiin ensimmäisen vaiheen tulosten lisäksi käytetyn 0-kuitujakeen edustavuus.

9.1.1 Yksiaksiaalinen puristuslujuus

Yksiaksiaalisia puristuskokeita tehtiin eri massoista valmistetuille koekappaleille 7...90 vuorokauden ikäisinä. Kaikista resepteistä valmistettiin kaksi koekappaletta, joista osa oli varakappaleita. 28 ja 90 vuorokauden ikäiset koekappaleet puristettiin rinnakkaisina. Yksiaksiaalisissa puristuskokeissa 28 vuorokauden ikäisen koekappaleen puristuslujuus määritettiin jännitys-muodonmuutoskuvaajasta rinnakkaisten koetulosten keskiarvona. Kaikissa resepteissä sideaineena käytettiin Plussementtiä. Kuvassa 9.1. on esitetty eri seoksille määritetyt puristuslujuustulokset.



Kuva 9.1. Yksiaksiaalisella puristuskokeella määritetyt puristuslujuudet.

Puristuslujuustuloksista havaitaan että sideainemäärällä 70 kg/m³ saavutetaan lähes kaikilla seoksilla alustavasti määritetty puristuslujuustavoite $q_u = 100$ kPa. Stabiloidussa 0-kuitu (P25) + siltti -seoksessa lujuus on kuitenkin kyseisellä sideainemäärällä selkeästi muita seoksia pienempi. Seostettaessa ja stabiloitaessa samaa 0-kuitujaetta saven kanssa, saavutetut lujuudet silttiin verrattuna ovat lähes kaksinkertaisia. Muissa 0-kuitujakeissa täyteaineen laadun vaikutus lujuuteen on selvästi pienempi.

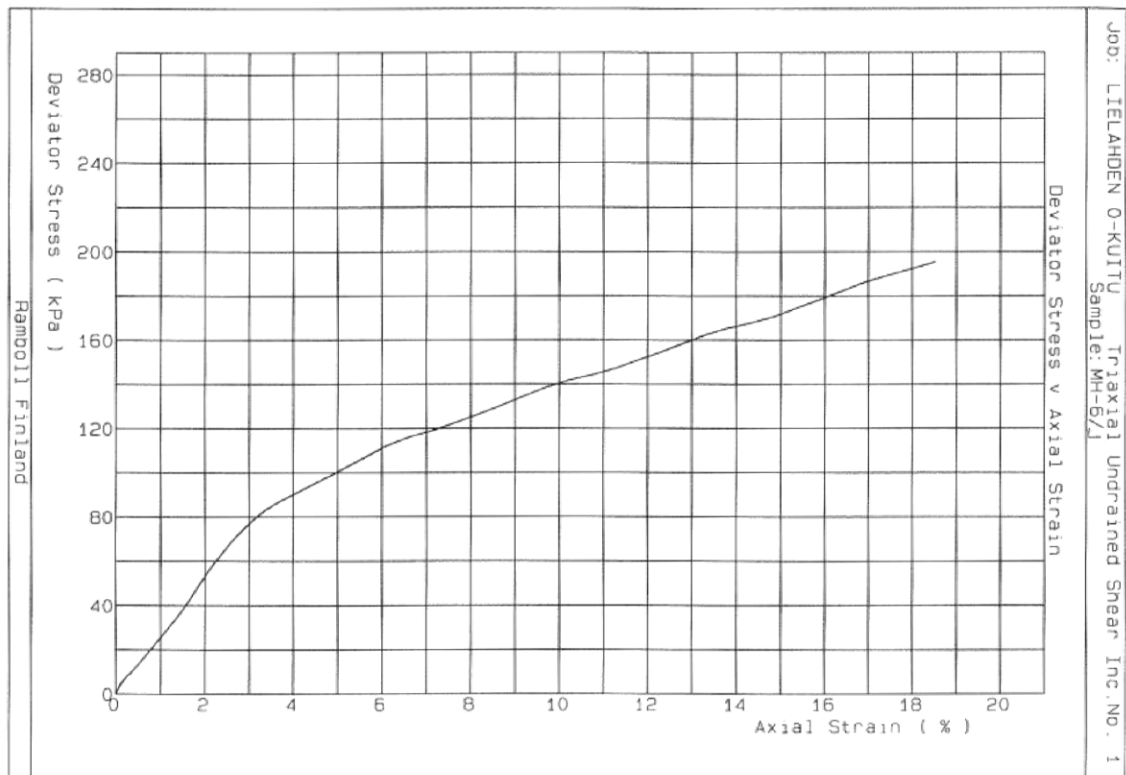
Tuloksista havaitaan myös että sideainemäärän vaikutus saavutettavaan puristuslujuuteen on merkittävä. Puristuslujuudet kasvavat vähintään kaksinkertaisiksi vertailtaessa minimisideainemäärällä (50 kg/m³) stabiloituja kappaleita vastaaviin maksimisideainemäärällä (90 kg/m³) stabiloituihin koekappaleisiin. Sideainemäärän kasvattaminen vaikuttaa myös koekappaleiden käyttäytymiseen puristuksen aikana. Mitä enemmän reseptissä oli käytetty sideainetta, sitä jäykempi oli muodostuva koekappale.

Yksiakiaalisen puristuskokeen tuloksissa oli hajontaa sekä rinnakkaisten että erikäisten kappaleiden osalta. Kaikkien tutkimuksessa käytettyjen seosten osalta havaitaan kuitenkin samankaltainen sideaineen kasvattamisesta johtuva ilmiö, jossa puristuskokeella määritetyt lujuudet kasvavat sideainelisäyksen myötä. Täyteaineen määrän vaikutusta stabiloidun massan lujuuteen tutkittiin seoksella 0-kuitu (P26) + savi (P26) massasuhteissa 1:1 ja 3:1. Määritetyt puristuslujuudet 28 vuorokauden iässä on esitetty taulukossa 9.2.

Taulukko 9.2. Massasuhteen vaikutus 28 vuorokauden puristuslujuuteen 0-kuitu (P26) + savi (P26) -seoksessa.

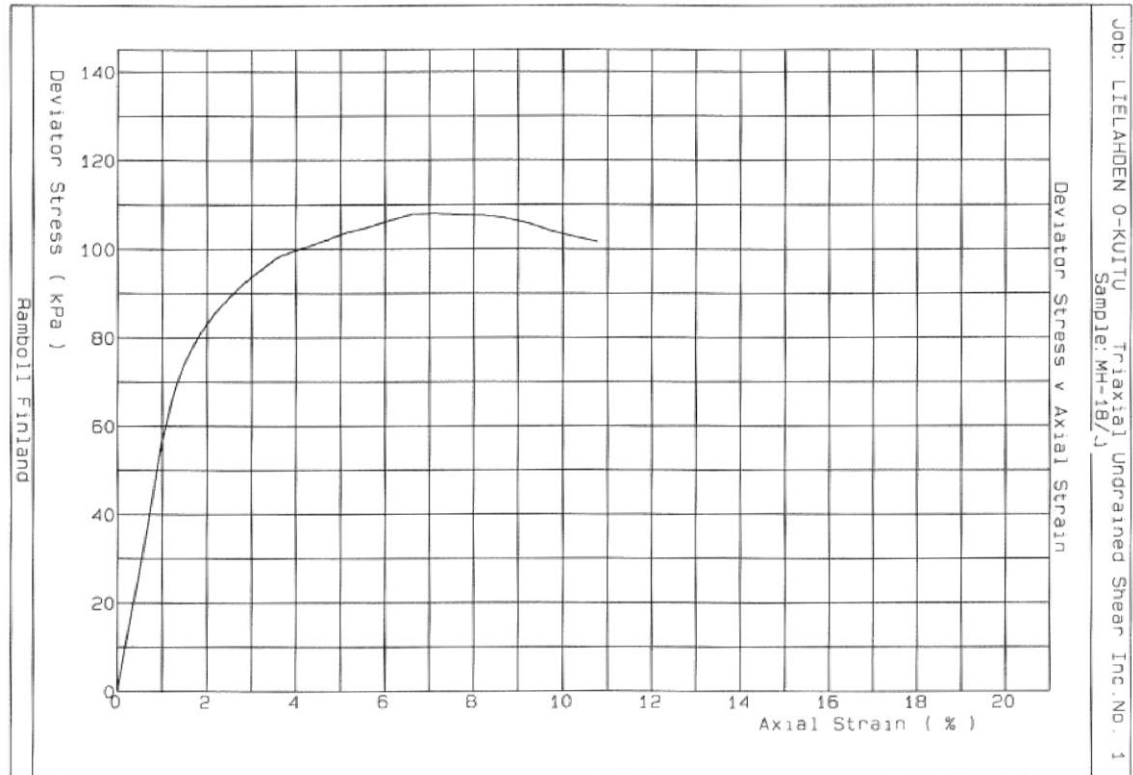
Resepti ja massasuhte	Sideainemäärä	Puristuslujuus
0-kuitu (P26) + savi (P26) 1:1	70 kg/m ³	124 kPa
0-kuitu (P26) + savi (P26) 3:1	70 kg/m ³	138 kPa

Normaalisti sementtistabiloidun materiaalin lujuus kehittyy ajan myötä. Vertailtaessa samalla reseptillä valmistettujen koekappaleiden eri-iässä määritettyjen puristuslujuuksia, havaitaan kuitenkin varsin epäloogisia tuloksia, joissa lujuus ei ole enää kehittynyt 14 d jälkeen. Tämä kertoo osaltaan orgaanista alkuperää olevan runkomateriaalin käyttäytymisestä. Kuvissa 9.2. ja 9.3. on esitetty jännitys-muodonmuutoskuvaajat kahden eri tavoin käyttäytyvän seoksen osalta.



Kuva 9.2. Stabiloidun 0-kuitu (P25) + savi -seoksen jännitys-muodonmuutoskuvaaja 90 d koekappaleella. Sideainemäärä reseptissä 70 kg/m³.

Kuvassa 9.2. esitetystä jännitys-muodonmuutoskuvaajasta nähdään koekappaleen muodonmuutuskäyttäytyminen yksiakiaalisen puristuskokeen aikana. Käyrän muoto kertoo suhteellisen pehmeästä ja sitkeästi käyttäytyvästä kappaleesta. Koekappale ei ole murtunut puristuskokeen aikana.



Kuva 9.3. Stabiloidun 0-kuitu (P27) + savi -seoksen jännitys-muodonmuutoskuvaaja 90 d koekappaleella. Sideainemäärä reseptissä 70 kg/m^3 .

Kuvassa 9.3. on esitetty suhteellisen jäykästi käyttäytyvän koekappaleen jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Koekappaleen murtuminen on tapahtunut suhteellisen muodonmuutoksen ollessa noin 7 %.

9.1.2 Kolmiakiaalikoetulokset

Kolmiakiaalikoeteet tehtiin seuraaville runko- ja täyteaineen seoksille

- 0-kuitu (P26) + Savi (P26), Plussementti 70 kg/m^3
- 0-kuitu (P27) + Siltti (P27), Plussementti 70 kg/m^3

Pisteestä 26 otetun 0-kuitujakeen arvioitiin edustavan parhaiten alueelta mahdollisesti ruopattavaa materiaalia. Pisteestä 27 0-kuitujake taas edustaa 0-kuidun lietemäisintä ääripäätä, jossa vesipitoisuus oli selvästi suurin tutkimuksissa käytetyistä 0-kuitumateriaaleista. Molemmista seoksista tehtiin yhteensä kuusi rinnakkaista koekappaleita. Koekappaleet valmistettiin kahdella sekoituksella, eli yhdestä sekoituksesta voi-

tiin valmistaa kolme koekappaletta. Sekoituskertojen minimoimisella pyrittiin mahdollisimman tasalaatuisiin koekappaleisiin, jolloin kolmiakksiaalikoetulokset olisivat vertailukelpoisia keskenään.

Molemmille seoksille tehtiin kolme suljettua leikkausta kolmiakksiaalikoelaitteistossa. Kolmiakksiaalikoeketta varten koekappaleet säilytettiin Luopioisten laboratoriossa esikuormituspenkissä, jossa koekappaleisiin kohdistui noin 9,5 kPa pystykuormitus. Kolmiakksiaalikoeketta varten koekappaleiden konsolidointi aloitettiin 28...32 iässä. Koekappaleista määritettiin laboratoriossa vesipitoisuus sekä tilavuuspaino ennen konsolidointia. Koekappaleet konsolidoitiin haluttuun jännitystilaan ennen leikkausta. Kolmiakksiaalikoekissa käytettyjen sellipaineiden valinnassa pyrittiin arvioimaan stabiloituun rakenteen kohdistuvaa kuormitusta ja tästä aiheutuvaa jännitystilaa. Sellipaineet molemmille seoksille tehdyissä kokeissa vaihtelivat 35...72 kPa välillä.

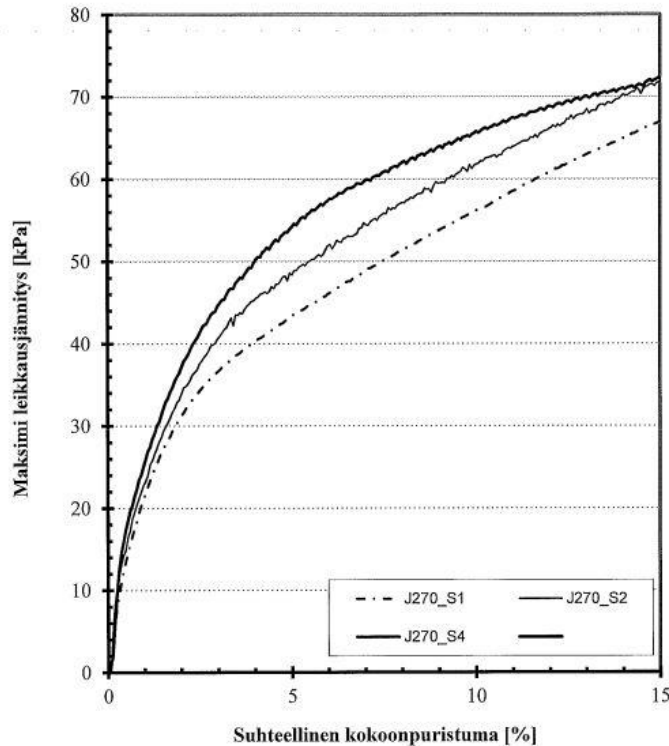
Kolmiakksiaalikoeket tehtiin isotrooppisina ja suljettuina kokeina (CICU). Koenopeus kaikissa leikkauksissa oli 0,01 mm/min. Lujuusparametrit on määritetty sekä Mohrin jännitysympyröiden avulla että jännityspolkukuvaajista. Jatkosuunnittelussa lujuusparametrit tulisi määrittää jännityspolkukuvaajista (Ratahallintokeskus 2005).

Kolmiakksiaalikoetulosten perusteella lujuusparametrien määrittäminen stabiloidusta 0-kuidusta on vaikeaa. Jännitys-muodonmuutoskuvaajista nähdään materiaalin myötölujittuva käyttäytyminen kuormituksen aikana, jolloin materiaalia kuormitettaessa murtoa ei voida havaita. Materiaalin todellinen lujuus muodostuu turpeen tavoin veden poistumisesta aiheutuvasta tiivistymisestä, täyteaineena käytettävästä kivennäismaasta sekä sideaineen sitoutumisen vaikutuksesta muodostuvista liitoksista. Stabiloidun 0-kuidun materiaaliominaisuudet riippuvat siis osittain sideaineen laadusta sekä määrästä. Huomioitavaa on myös, että stabiloidun 0-kuidun ominaisuudet muuttuvat sementin sitoutumisen sekä samanaikaisen kuormituksen aikana.

0-kuitu + Savi

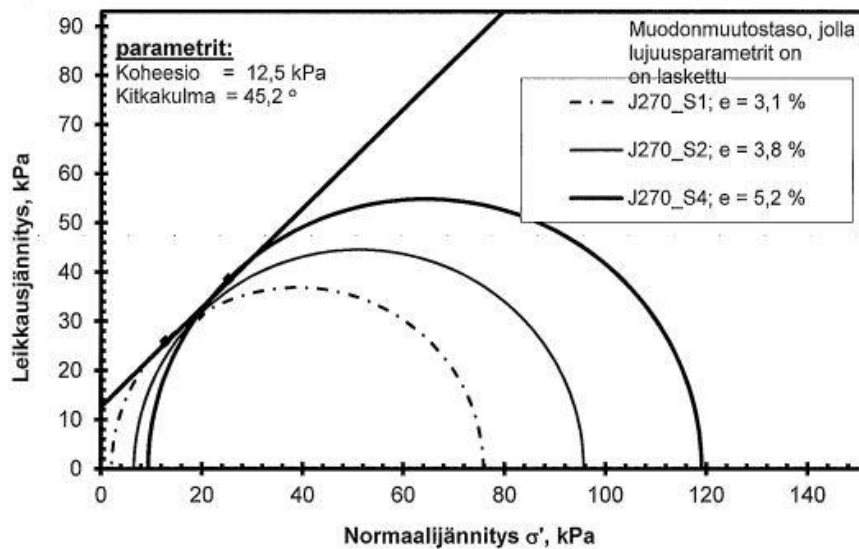
Kolmea kolmiakksiaalileikkausta varten koekappaleet valmistettiin Ramboll Finland Oy:n Luopioisten laboratoriossa. Valmiit koekappaleet asetettiin huoneenlämmössä olevaan esikuormituspenkkiin, jossa niitä säilytettiin leikkaukseen saakka. Kolmiakksiaalikoeketta varten koekappaleiden konsolidointi aloitettiin 28 ja 32 vuorokauden iässä. Kolmen leikkauksen sarjassa käytetyt sellipaineet olivat 35,5 kPa, 50 kPa ja 71,5 kPa. Ennen kokeen aloittamista 0-kuitu + savi -seoksesta valmistettujen koekappaleiden indeksiominaisuudet vastasivat hyvin toisiaan. Koekappaleiden vesipitoisuudet ennen konsolidointia vaihtelivat 157,6...158,9 % välillä. Koekappaleiden tilavuuspaino vaihteli 12,2...12,3 kN/m³ välillä.

Koekappaleet käyttäytyivät leikkauksen aikana myötölujittuvan materiaalin tavoin, eikä koestettavissa kappaleissa tapahtunut selkeää murtumista. 0-kuitu + savi -seoksen Jännitys-muodonmuutoskuvaaja on esitetty kuvassa 9.4.



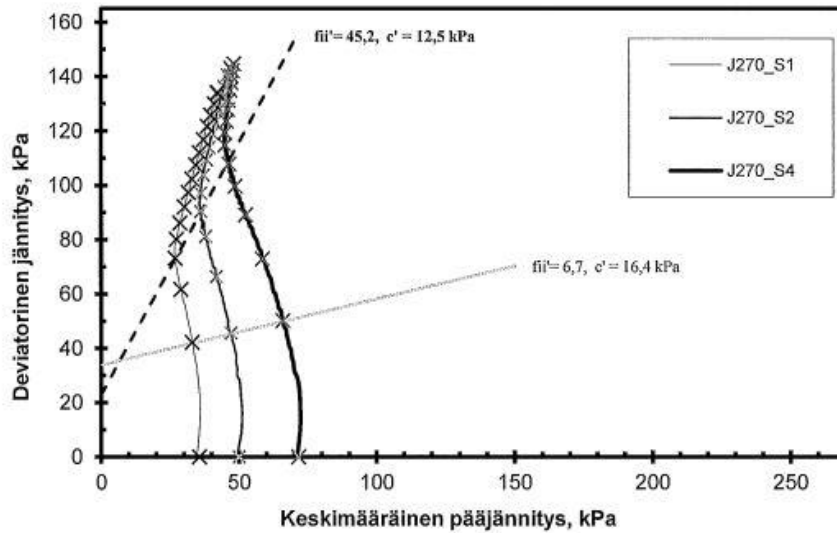
Kuva 9.4. 0-kuitu (P26) + savi -seoksen kolmiakselikokeiden yhdistetty jännitys-muodonmuutoskuvaaja.

Laboratoriossa määritetyt 0-kuitu + savi -seoksen lujuusparametrit on esitetty kuvissa 9.5...9.8. Mohrin jännitysympyröiden avulla määritetyt lujuusparametrit muodonmuutostasoilla 3,1...5,2 % on esitetty kuvassa 9.5. Leikkauskestävyyskulman arvoksi on saatu $45,2^\circ$ ja koheesioksi 12,5 kPa.



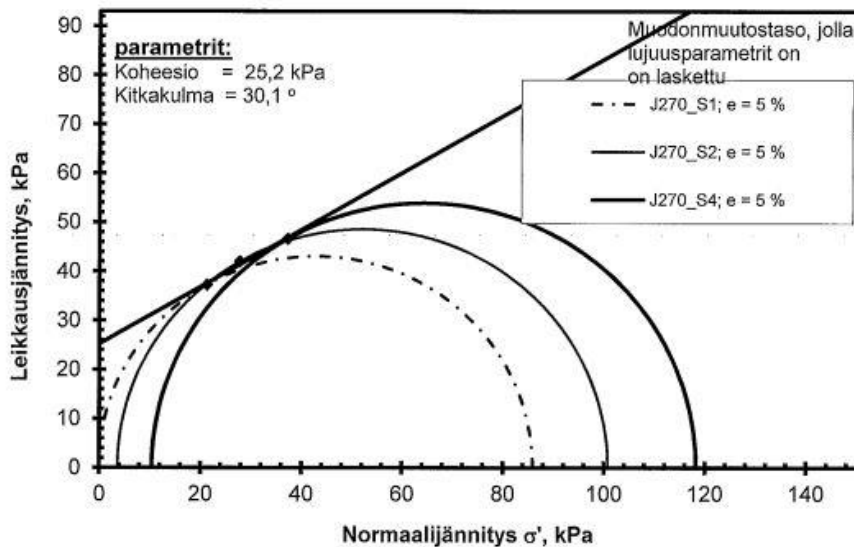
Kuva 9.5. 0-kuitu (P26) + savi -seoksen lujuusparametrit määritetty Mohrin jännitysympyröiden avulla.

Jännityspolkukuvaajasta saadaan samat lujuusparametrit sovitettaessa murtosuora tilanteeseen, jossa materiaali on alkanut myötää. Jännityspolkukuvaaja on esitetty kuvassa 9.6.



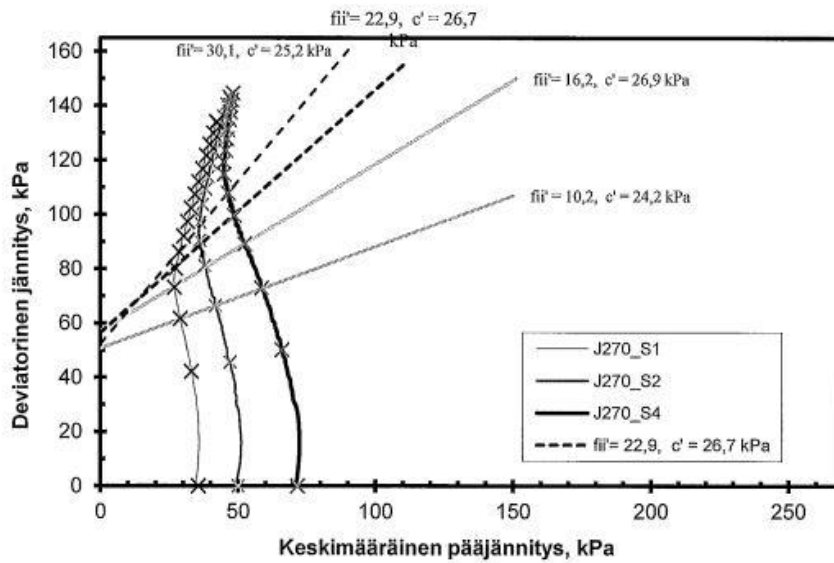
Kuva 9.6. 0-kuitu (P26) + savi -seoksen jännityspolkukuvaaja.

Muodonmuutostasolla 5 % Mohrin jännitysympyröiden avulla määritety lujuusparametrit on esitetty kuvassa 9.7. Leikkauskestävyyskulman arvoksi on saatu $30,1^\circ$ ja koheesioksi 25,2 kPa.



Kuva 9.7. 0-kuitu (P26) + savi -seoksen lujuusparametrit määritetty Mohrin jännitysympyröiden avulla.

Mohrin jännityspyöröiden avulla määritetyn murtosuoran sovitus jännityspolkukuvaajaan on esitetty kuvassa 9.8.

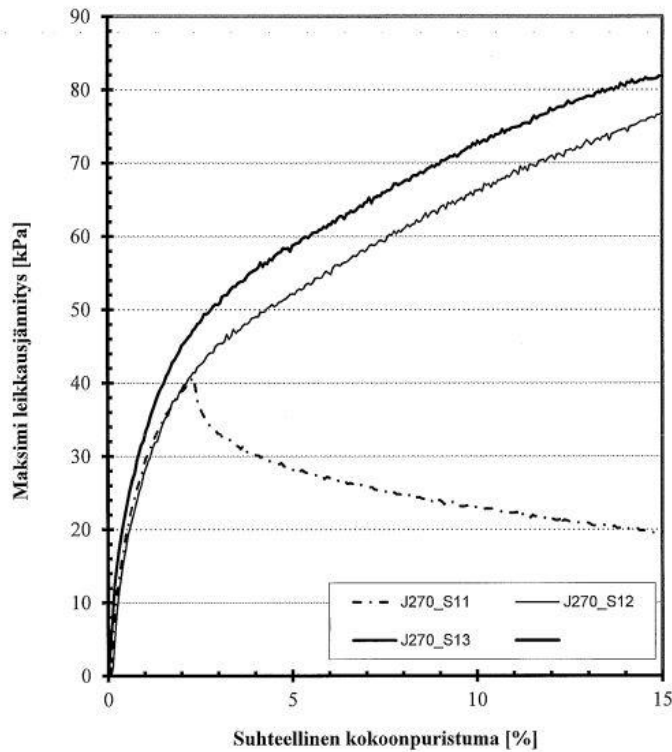


Kuva 9.8. 0-kuitu (P26) + savi -seoksen jännityspolkukuvaaja.

0-kuitu + Siltti

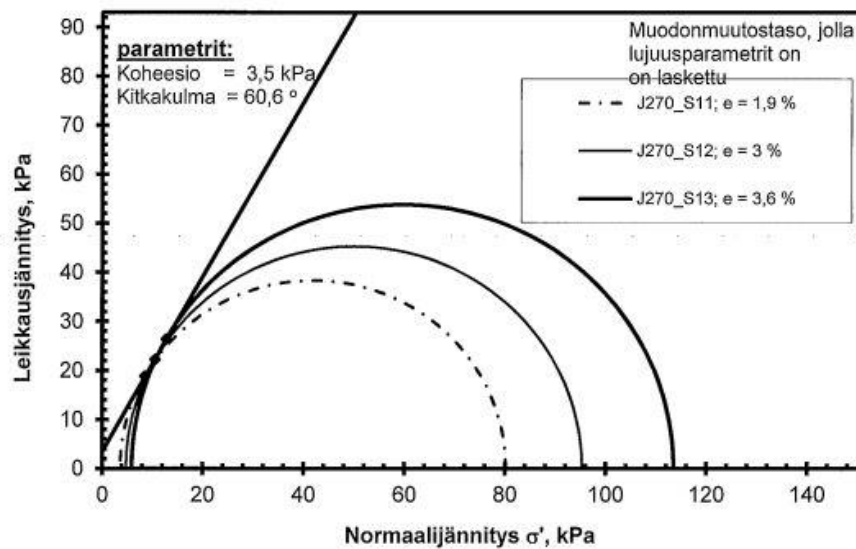
0-kuitu ja siltti -seokselle tehtiin myös kolmiakσιαalikokeessa kolme suljettua leikkausta. Koekappaleiden valmistuksen jälkeen ne siirrettiin esikuormituspenkkiin. Esikuormituspenkissä koekappaleisiin kohdistettiin noin 9,5 kPa pystykuormitus. Koekappaleet säilytettiin huoneenlämmössä kolmiakσιαalikokeisiin saakka. Kolmiakσιαalikokeet aloitettiin koekappaleiden ollessa 28 ja 29 vuorokauden ikäisiä. Kokeessa käytetyt sellipaineet olivat 36,5 kPa, 51,5 kPa ja 71,5 kPa. Koekappaleiden vesipitoisuudet olivat 122,6 %, 124,0 % ja 125,1 %. Tilavuuspaino vaihteli 13,0...13,1 kN/m³ välillä.

0-kuitu + siltti -seoksesta tehdyt koekappaleet käyttäytyvät leikkauksessa vaihtelevasti. Yksi koekappaleista käyttäytyi hauraasti ja selkeä murtokohta oli nähtävissä leikkauksen aikaisesta jännitys-muodonmuutoskuvaajasta joka on esitetty kuvassa 9.9. Kaksi muuta koekappaleita käyttäytyivät myötölujittuvasti.



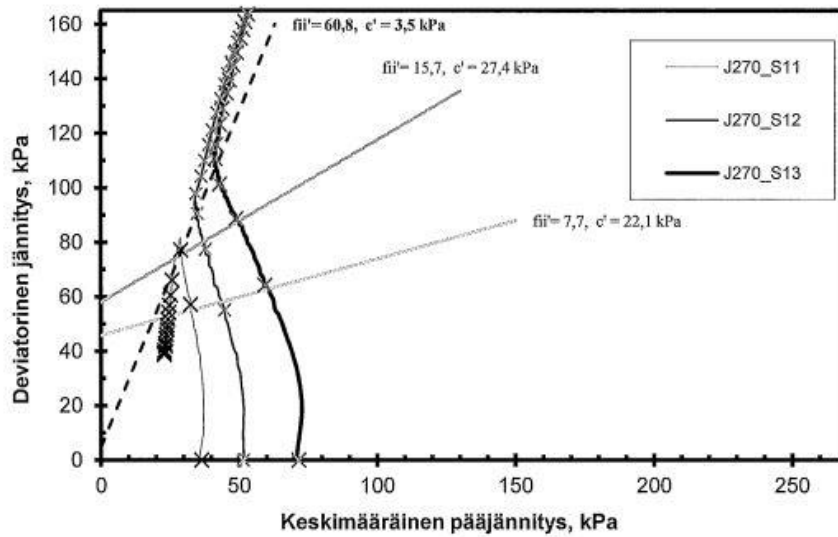
Kuva 9.9. 0-kuitu (P27) + siltti -seoksen kolmiaksaalikokeiden yhdistetty jännitys-muodonmuutoskuvaaja.

Kuvassa 9.10. on esitetty 0-kuitu + siltti -seoksesta valmistetun koekappaleen lujuusparametrit Mohrin jännitysypyröiden avulla määritettyinä. Muodonmuutostasoilla 1,9...3,6 % leikkauskestävyyskulman arvoksi on saatu $60,6^\circ$ ja koheesioksi 3,5 kPa.



Kuva 9.10. 0-kuitu (P27) + siltti -seoksen lujuusparametrit määritetty Mohrin jännitysypyröiden avulla.

Kuvassa 9.11. on esitetty jännityspolkukuvaaja, josta nähdään näytekappaleen käyttäytyminen kokeen aikana.



Kuva 9.11. 0-kuitu (P27) + siltti -seoksen jännityspolkukuvaaja.

9.2 Muodonmuutosominaisuudet

Seostetun ja stabiloidun 0-kuidun painumaominaisuuksia määritettiin koekappaleiden lujittumisen aikana laboratorioissa sekä portaittaisilla ödometrikokeilla. Laboratorioissa stabiloidun massan tiivistyspengertä mallintavassa esikuormituspenkissä seurattiin lujittumisaikana tapahtuvaa kokoonpuristumaa.

Esikuormituspenkissä koekappaleisiin kohdistuva 9 kPa pystysuuntainen kuormitus pidettiin vakiona koko seurantajakson ajan. Ödometrikokeilla pyrittiin mallintamaan todellista tilannetta kuormituslisäyksillä esikuormitusajan jälkeen.

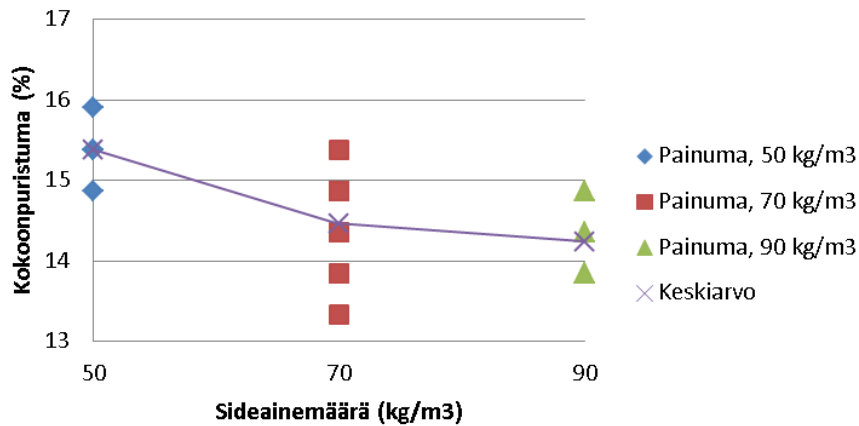
9.2.1 Esikuormituksen aikana tapahtuva kokoonpuristuminen

Laboratorioissa esikuormituksen aikaiset painumat ovat tapahtuneet ensimmäisen vuorokauden aikana. Kuvissa 9.12...9.17. on esitetty eri runkoaineilla ja resepteillä määritetyt kokonaispainumat.

0-kuitu (P25)

Pisteen P25 seostetun ja stabiloidun 0-kuitujakeen kokonaispainumat vaihtelivat pääosin 13...16 % välillä. 0-kuitu + savi -seoksen osalta sideainemäärän kasvattaminen vähensi keskimääräistä painumaa koekappaleissa.

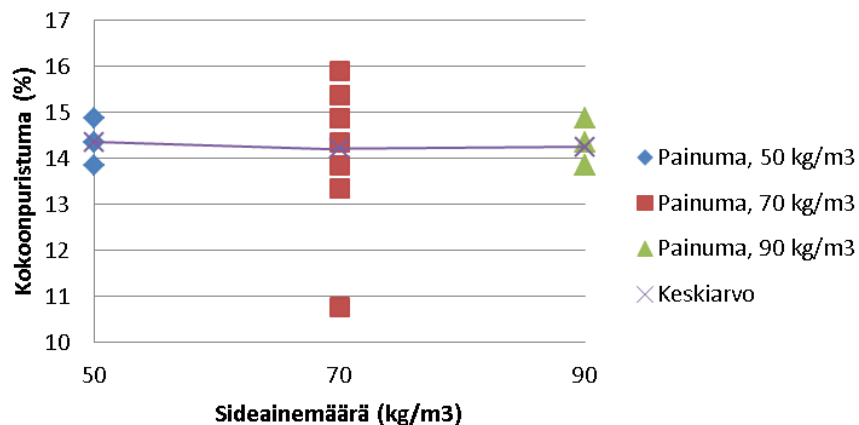
0-kuitu (P25) + Savi (P26)



Kuva 9.12. Sideainemäärän vaikutus lujittumisaikana tapahtuvaan kokoonpuristumaan 0-kuitu (P25) + savi -seoksessa

0-kuitu + siltti -seoksessa sideainemäärän kasvattamisen vaikutus on selvästi pienempi kuin seostettaessa 0-kuitua ja savea. Kuvasta 9.13. nähdään lujittumisaikaisen painuman vaihtelevan keskimäärin 14...14,5 % välillä. Sideainemäärällä 70 kg/m³ stabiloidun seoksen painumissa havaittiin yksi muista poikkeava koekappale, jonka painuma jäi selvästi muita pienemmäksi. Kuvaajassa esitetystä keskiarvosta on huomioitu kyseinen poikkeama. Mikäli kyseinen tulos jätetään huomioimatta, sideainemäärällä 70 kg/m³ stabiloitujen koekappaleiden keskimääräinen painuma on 14,6 %.

0-kuitu (P25) + Siltti (P27)

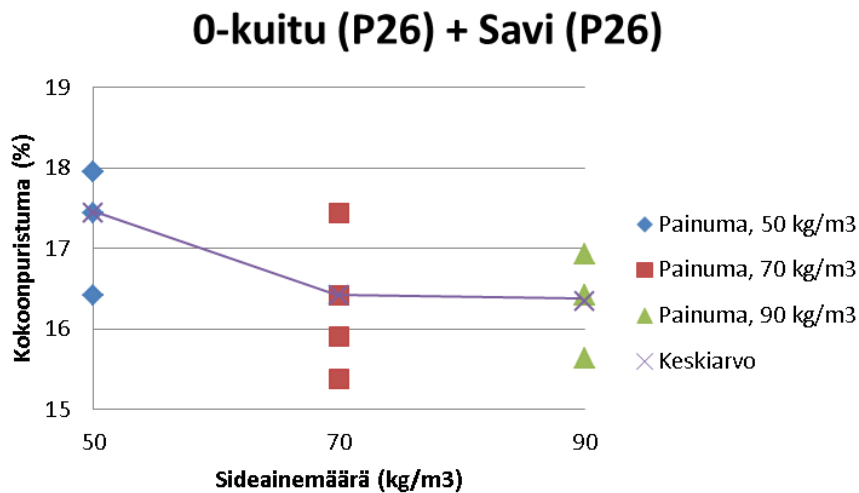


Kuva 9.13. Sideainemäärän vaikutus lujittumisaikana tapahtuvaan kokoonpuristumaan 0-kuitu (P25) + siltti -seoksessa.

Pisteen 25 0-kuitujakeen osalta painumakuvaajista nähdään, että stabiloiduista koekappaleista laboratorioissa esikuormituksen aikana mitatut painumat ovat suurempia 0-kuitu + savi -seoksissa verrattuna 0-kuitu + siltti -seoksiin.

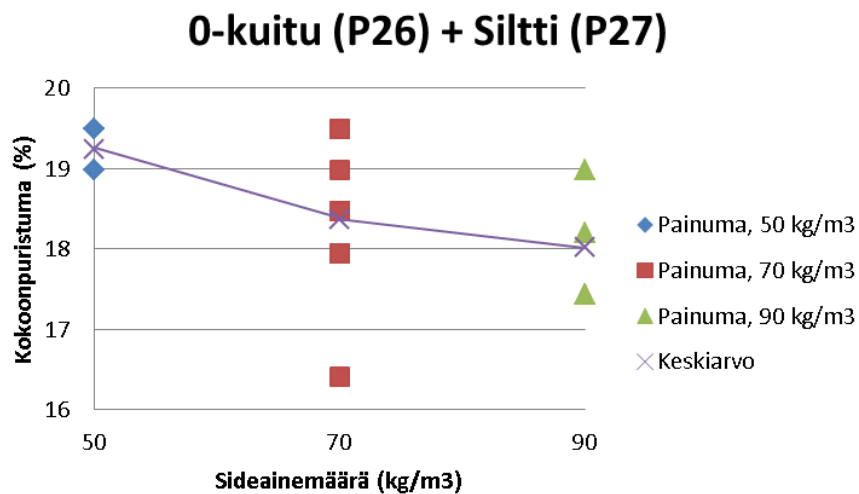
0-kuitu (P26)

Pisteen 26 stabiloidun 0-kuitujakeen esikuormituksen aikaiset painumat on esitetty kuvissa 9.14. ja 9.15. Esikuormituksen aikana tapahtuva kokoonpuristuma vaihteli pääosin 15...20 % välillä.



Kuva 9.14. Sideainemäärän vaikutus lujittumisaikana tapahtuvaan kokoonpuristumaan 0-kuitu (P26) + savi -seoksessa

Stabiloitujen 0-kuitu (P26) -seosten osalta havaitaan edellä esitettyjen tulosten tavoin sideainemäärän kasvattamisen pienentävän esikuormituksen aikaista kokoonpuristumaa.

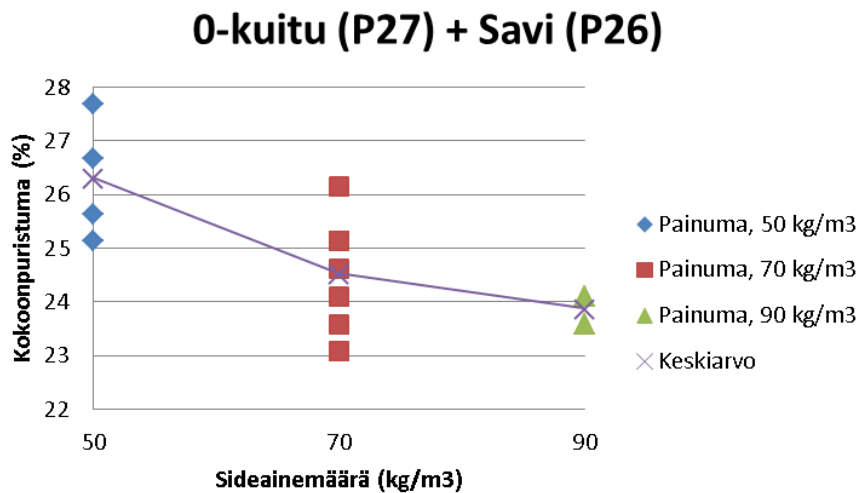


Kuva 9.15. Sideainemäärän vaikutus lujittumisaikana tapahtuvaan kokoonpuristumaan 0-kuitu (P26) + siltti -seoksessa.

Pisteen 26 0-kuitujakeen kokoonpuristuma on suurempi seostettaessa silttiä verrattuna 0-kuitu + savi –seokseen.

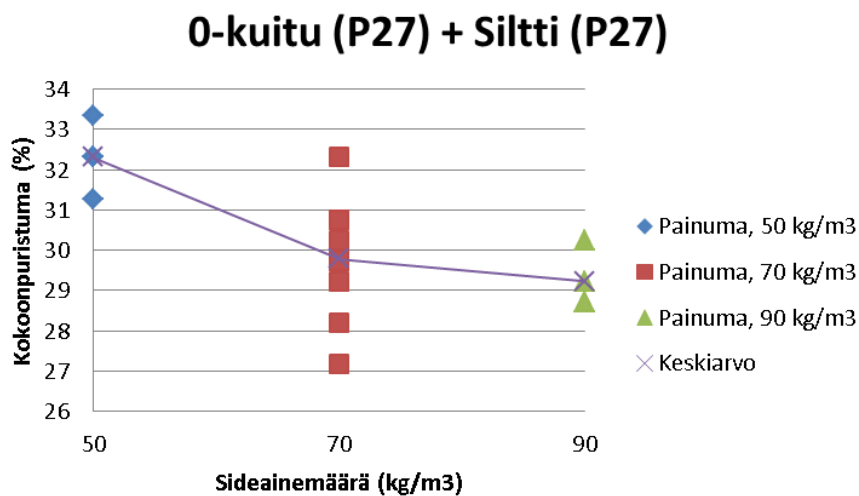
0-kuitu (P27)

Pisteen 27 osalta esikuormituksen vaikutuksesta tapahtuva kokoonpuristuma vaihteli 23...34 % välillä. Kuvista 9.16. ja 9.17. nähdään samankaltainen trendi kuin muissakin 0-kuitujakeissa. Mitä suurempi on reseptissä käytettävä sideainemäärä, sitä vähemmän kappaleessa tapahtuu kokoonpuristumaa.



Kuva 9.16. Sideainemäärän vaikutus lujittumisaikana tapahtuvaan kokoonpuristumaan 0-kuitu (P27) + savi (P26) -seoksessa.

Pisteen 27 osalta havaitaan kuitenkin selkein ero kokoonpuristuman suuruudessa vertailtaessa täyteaineena käytettyä savea ja silttiä.



Kuva 9.17. Sideainemäärän vaikutus lujittumisaikana tapahtuvaan kokoonpuristumaan 0-kuitu (P27) + siltti (P27) -seoksessa.

9.2.2 Portaittaiset ödometrikokeet

Näytesylintereihin valmistettuja koekappaleita kuormitettiin esikuormituspenkissä 9 kPa pystyjännitystä vastaavalla kuormituksella ennen varsinaisten ödometrinäytteiden valmistamista. Koekappaleista leikattiin näytteet ödometrenkaisiin, jonka jälkeen 9 kPa kuormitusta jatkettiin ödometrilaitteistossa. Ennen ödometrikokeiden aloittamista turvekoekappaleita varten tehdyissä näytesylintereissä tapahtuneet koekappaleiden kokoonpuristumat on esitetty taulukossa 9.3.

Taulukko 9.3. Koekappaleiden painumat ensimmäisen 3 vuorokauden aikana ennen ödometrikokeen aloittamista.

Koekappaleetunnus ja resepti	Sideainemäärä	Kokoonpuristuma 0d...3d
MH-12 A1/A2 0-kuitu (P26 3,5m; 4,5m; 5,5m) + savi (P26 7,5m)	50 kg/m ³	18,5 %
MH-12 B1/B2 0-kuitu (P26 3,5m; 4,5m; 5,5m) + savi (P26 7,5m)	70 kg/m ³	18,0 %

Ensimmäinen 20 kPa kuormitusporras aloitettiin näytekoekappaleiden ollessa 28 vuorokauden iässä. Kuormitusta jatkettiin kunnes kokoonpuristumista ei enää tapahtunut, kuitenkin vähintään 4 vuorokautta. Kuormitusta lisättiin siten, että edellisen kuormitusportaan suuruus kaksinkertaistettiin aina 160 kPa:iin saakka. Ensimmäisen 80 kPa kuormitusportaan jälkeen tehtiin välipalautus 40 kPa:iin. Lopussa kuormitus palautettiin taas 40 kPa:iin. Kuormitusportaiden suuruudet ja kestot on esitetty taulukossa 9.4.

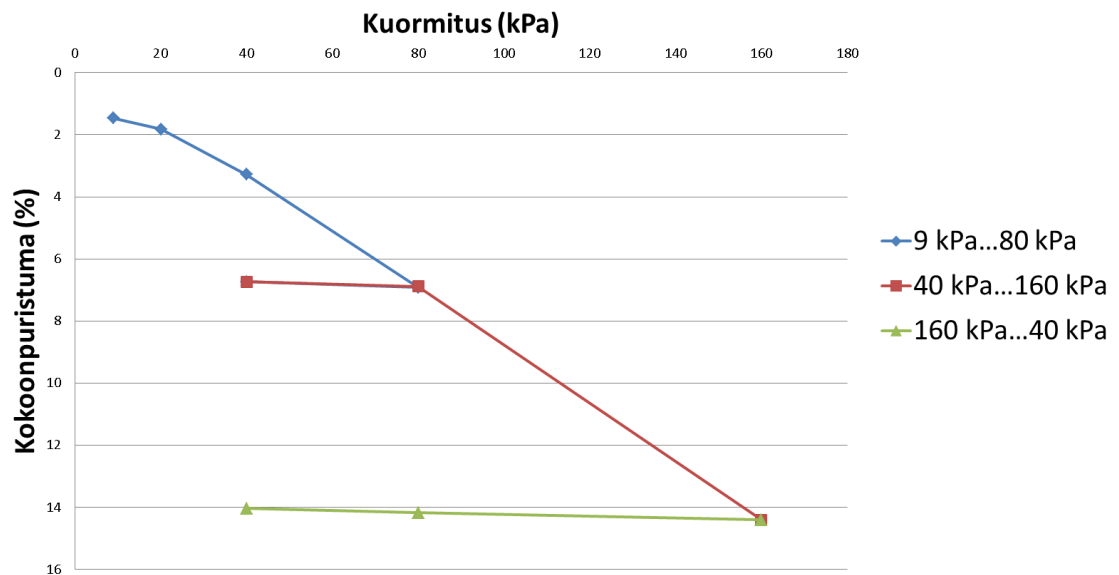
Taulukko 9.4. Portaittaisen ödometrikokeen kuormitusportaiden suuruudet ja kestot.

Kuormitus (kPa)	Kesto (h)
9	524
10	51
20	98
40	167
80	162
40	77
80	92
160	192
80	190
40	96

Kuvissa 9.18...9.25 on esitetty 0-kuitu + savi -seoksen painumakuvaajat ajan sekä kuormituksen funktiona. Ödometritulosten perusteella näytekkappaleiden kokoonpuristuminen on tapahtunut pääosin ensimmäisten vuorokausien aikana. Aikapainumakuvaajista havaitaan että tutkituissa näytekkappaleissa tapahtuu vähäistä sekundaäripainumaa.

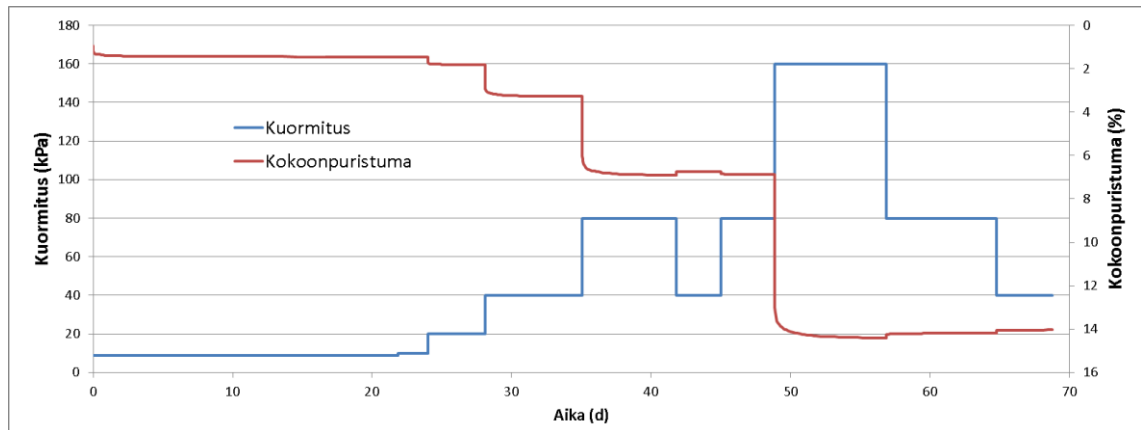
0-kuitu + savi (Plussementti 50 kg/m³)

Seoksessa jossa sidemääränä oli 50 kg/m³, ödometrikokeessa tapahtuva kokoonpuristuma vaihteli 14...21 % välillä. Kokonaispainuman suuruus vaihteli siis samasta seoksesta tehdyillä rinnakkaisilla näytekkappaleilla huomattavasti. Kuvassa 9.18 on esitetty näytekkappaleen kokoonpuristuma kuormituksen funktiona. Kuormitusportaita 9...80 kPa painumat ovat tapahtuneet 1...2 vuorokauden aikana.



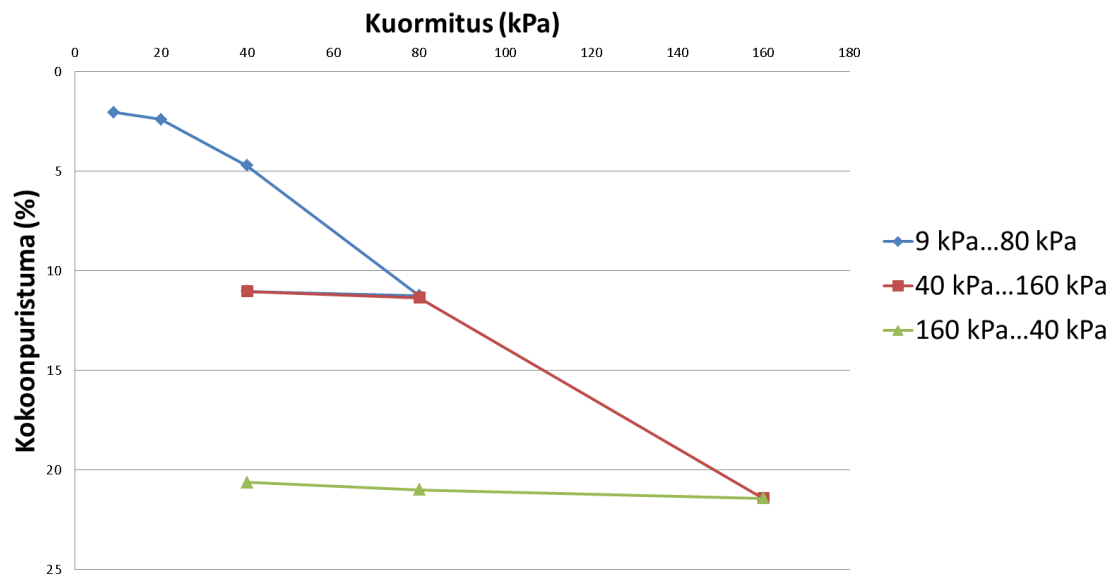
Kuva 9.18. Koekappale A1: Kuormitus-kokoonpuristumakuvaaja (0-kuitu + savi, Plussementti 50 kg/m³)

Kuvassa 9.19. on esitetty näytekkappaleen pystysuuntaisen muodonmuutoksen kehittyminen eri kuormitusportaita. Kuvasta nähdään että noin 50 % kokonaispainumasta on tapahtunut suurimmalla 160 kPa:n kuormitusportaita. Ödometrikokeessa tapahtuneen kokonaispainuman suuruus oli noin 14 %.



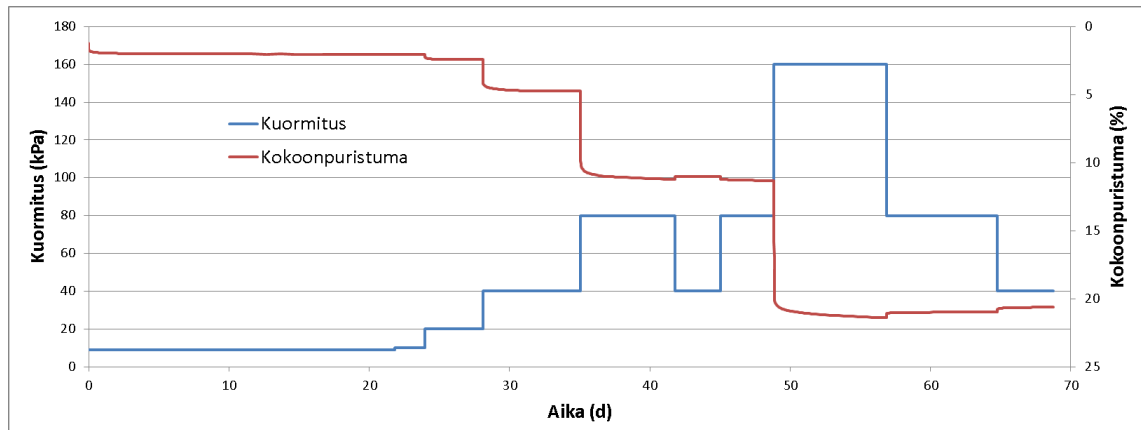
Kuva 9.19. Koekappale A1: Kuormitus ja kokoonpuristuma ajan funktiona (0-kuitu + savi, Plussementti 50 kg/m^3)

Samasta seoksesta tehdyn rinnakkaiskappaleen ödometrikoetulokset on esitetty kuvissa 9.20 ja 9.21. Samasta koekappaleesta valmistetun rinnakkaisten näytekappaleiden käyttäytyminen ödometrikoeksessä vastasivat toisiaan kokonaispainumaa lukuun ottamatta.



Kuva 9.20. Koekappale A2: Kuormitus-kokoonpuristumakuvaaja eri kuormitusportailta (0-kuitu + savi, Plussementti 50 kg/m^3).

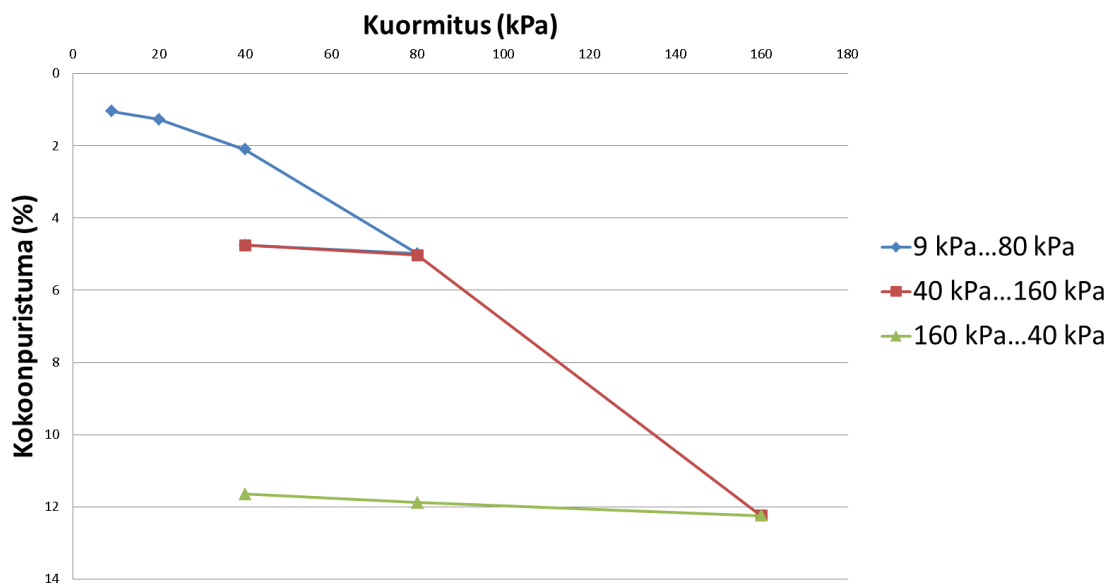
Aika-painumakuvaajan perusteella kokonaispainumasta noin puolet tapahtuu viimeisellä kuormitusportaalilla rinnakkaiskappaleen tavoin. Ödometrikoeken aikana tehtyjen palautuskäyrien perusteella näytekappaleissa on havaittavissa palautumaa, mikä näkyy painumakäyrän nousuna kuvaajassa.



Kuva 9.21. Koekappale A2: Kuormitus ja kokoonpuristuma ajan funktiona (0-kuitu + savi, Plussementti 50 kg/m³).

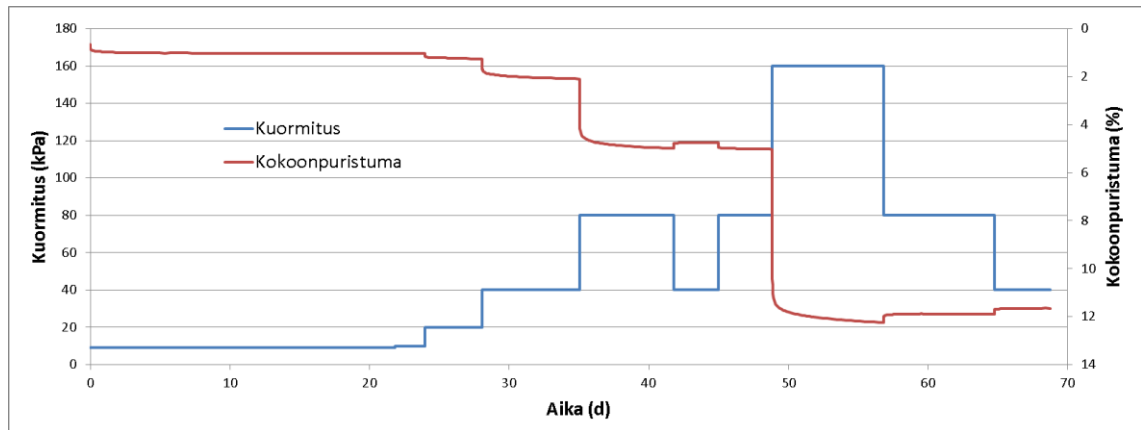
0-kuitu + savi (Plussementti 70 kg/m³)

Suuremmalla 70 kg/m³ sideainemäärällä stabiloitujen näytekappaleiden ödometrikoeutlokset on esitetty kuvissa 9.22...9.25. Tulosten perusteella kokonaispainuman suuruus ödometrikokeessa vaihteli 5...12 % välillä. Kuvassa 9.16. on esitetty aikapainumakuvaaja 0-kuitu + savi -seoksesta, jossa sideainemääränä oli 70 kg/m³.



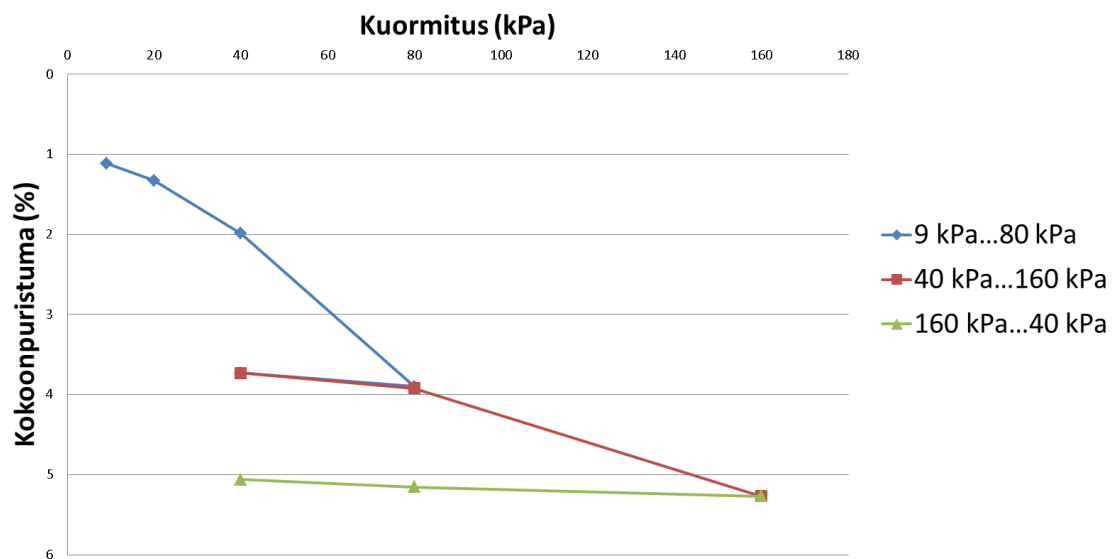
Kuva 9.22. Koekappale B1: Kuormitus-kokoonpuristumakuvaaja (0-kuitu + savi, Plussementti 70 kg/m³).

Kuten 50 kg/m³ sideainemäärällä, eri kuormitusportaiden painumat tapahtuvat nopeasti kuormituslisäyksen jälkeen. Kuormitusportailta 9...80 kPa painumat tasoittuvat pääosin ensimmäisten 1...2 vuorokauden aikana. Kuvassa 9.23 on nähtävissä kuormituslisäysten vaikutus näytekappaleen painumaan. Suurin osa painumasta on tapahtunut viimeisellä 160 kPa:n kuormitusportaalla.



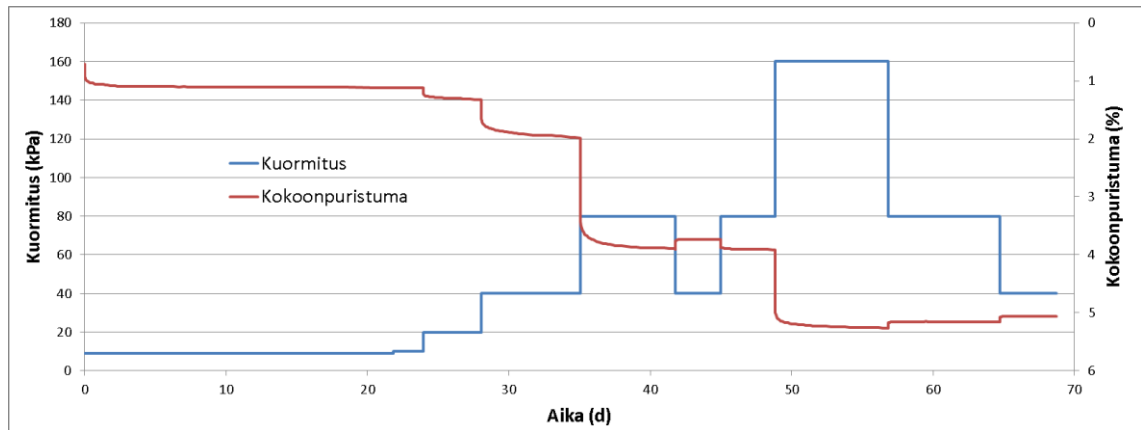
Kuva 9.23. Koekappale B1: Kuormitus ja kokoonpuristuma ajan funktiona (0-kuitu + savi, Plussementti 70 kg/m^3).

Sideainemäärällä 70 kg/m^3 stabiloidusta seoksesta tehdyn rinnakkaisen näytekappaleen kuormitus-painumakuvaajat on esitetty kuvissa 9.24 ja 9.25. Selkeimmät erot muodonmuutoskäyttäytymisessä rinnakkaisten koekappaleiden välillä näkyvät kokonaispainuman suuruudessa.



Kuva 9.24. Koekappale B2: Kuormitus-kokoonpuristumakuvaaja (0-kuitu + savi, Plussementti 70 kg/m^3).

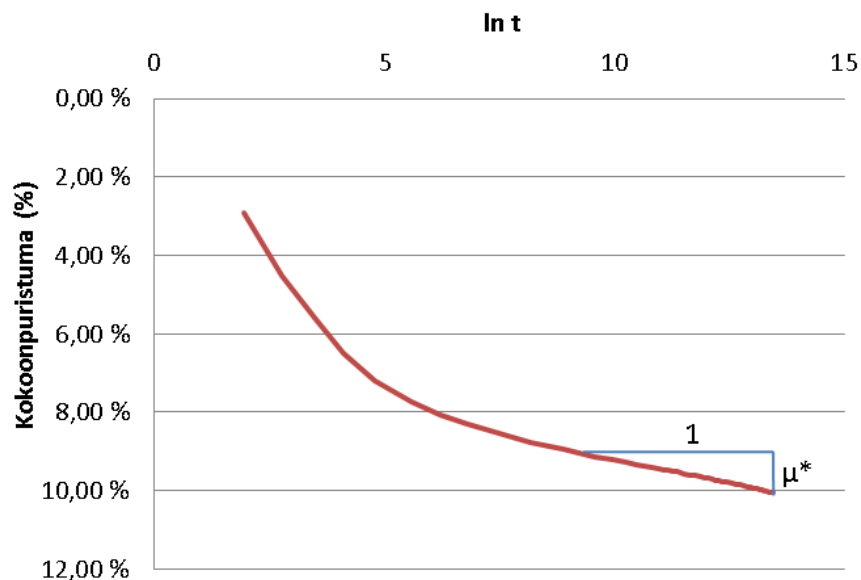
Vertailtaessa rinnakkaisten näytekappaleiden muodonmuutoskäyttäytymistä, havaitaan että jälkimmäisessä kappaleessa suurin osa painumasta on tapahtunut nopeasti nostettaessa kuormitusta 80 kPa :iin. Samalla viimeisellä kuormitusportaalla (160 kPa) painuma on jäänyt selvästi rinnakkaista näytekappaletta pienemmäksi.



Kuva 9.25. Koekappale B2: Kuormitus ja kokoonpuristuma ajan funktiona (0-kuitu + savi, Plussementti 70 kg/m^3).

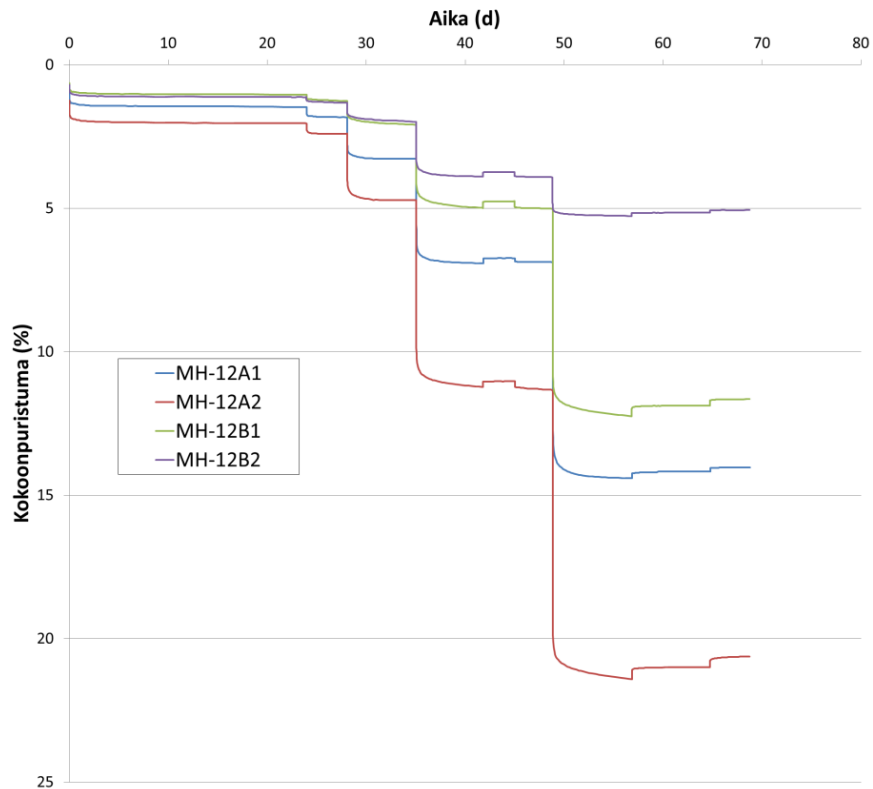
9.2.3 Viruma

Ödometrikokeiden tulosten perusteella seostetussa ja stabiloidussa 0-kuidussa esiintyy primäärinen painuman lisäksi viruman aiheuttamaa sekundääristä painumaa. Sekundäärinen painuman suuruutta voidaan arvioida virumaindeksin μ^* avulla. Virumaindeksi voidaan määrittää ödometrikoetulosten perusteella tehdystä $\ln t - \varepsilon$ -kuvaajasta (Plaxis 2D 2015). Tässä työssä virumaindeksi määritetty 40 kPa, 80 kPa ja 160 kPa kuormitusportailla tehdystä kuvaajista. Kuvassa 9.26 on esitetty virumaindeksi määrittäminen 160 kPa kuormitusportaalla.



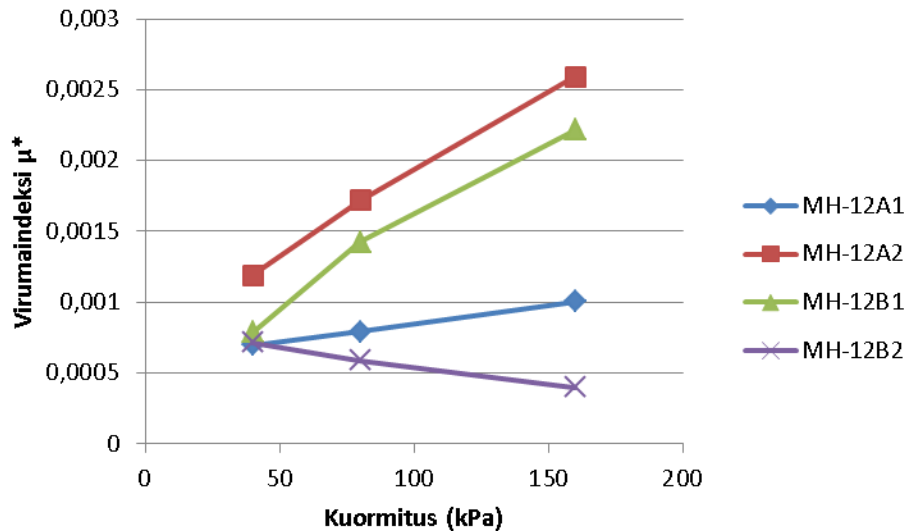
Kuva 9.26. Virumaindeksin määrittäminen $\ln t - \varepsilon$ -kuvaajasta käyrän loppupään kulmakerroimena 160 kPa:n kuormitusportaalla.

Kuvasta 9.27. nähdään näytekkappaleiden aika-painumakäyttäytyminen ödometrikokeen aikana. Käyrän muodosta voidaan havaita viruman aiheuttamaa sekundääripainumaa, jonka suuruus vaihtelee näytekkappaleen sekä kuormitusportaan suuruuden mukaan. Kuvasta nähdään myös näytekkappaleessa tapahtunut palautuma kuormituksen pienentämisen jälkeen



Kuva 9.27. Ödometrikokeen aikainen aika-muodonmuutoskuvaaja.

Kuvassa 9.28. on esitetty näytekkappaleista määritettyjen virumaindeksien arvot eri kuormitusportailla. Tuloksista nähdään että viruman suuruus kasvaa yhtä näytekkappaletta lukuun ottamatta kuormituksen kasvaessa.

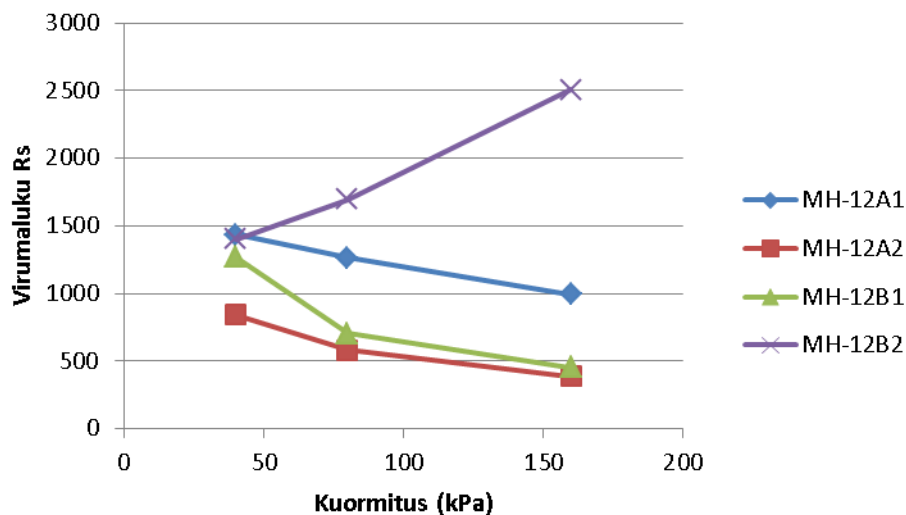


Kuva 9.28. Virumaindeksin μ^* arvo eri kuormitusportaitilla.

Virumaa voidaan kuvata myös virumaluvun r_s avulla, joka voidaan määrittää seuraavalla kaavalla (Havel 2004)

$$r_s = \frac{1}{\mu^*} \quad (6)$$

Virumaindeksi μ^* vaihteli 0,0005...0,002 välillä jännitystasoilla 40...100 kPa. Tällöin virumaluku kyseisellä jännitysvälillä on noin 500...2000. Tuloksissa oli selvästi havaittavissa hajontaa, mutta sideaineen lisäys näyttäisi kuitenkin pienentävän viruman suuruutta. Aika-painumakuvaajien perusteella stabiloidussa massassa tapahtuvaa virumaa voidaan ehkäistä ylikuormituksella.



Kuva 9.29. Virumaluku r_s eri kuormitusportaitilla.

9.2.4 Kimmomoduuli

Nykyisen ohjeistuksen (Forsman *et al.* 2015) mukaan laboratoriossa tehtävistä koekappaleista tulee määrittää yksiakσιαalisen puristuslujuuden lisäksi kimmomuutosmoduuli E , jolla kuvataan maan jäykkyyttä. Yleensä massastabiloinnin yhteydessä kimmomoduuli määritetään E_{50} -moduulina 50 % maksimipuristusjännityksen ja sitä vastaavan muodonmuutoksen suhteena.

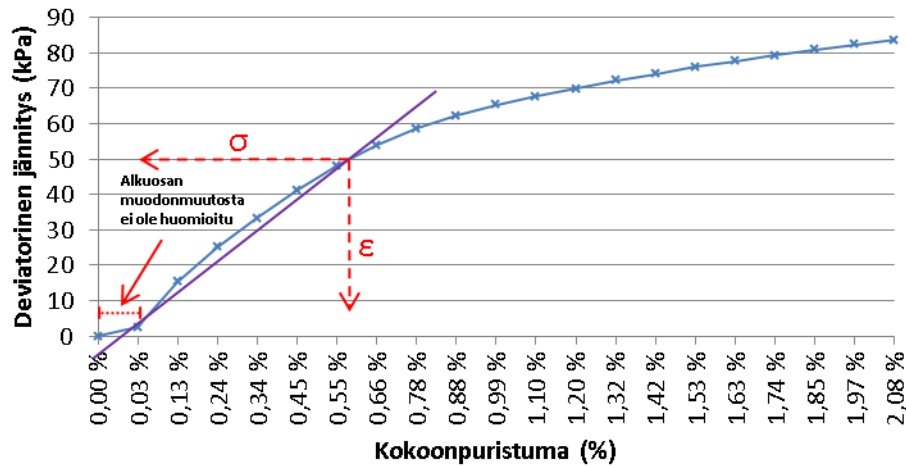
Maan muodonmuutoskäyttäytyminen kuormituksen yhteydessä riippuu vallitsevasta jännitystilasta sekä muodonmuutostasosta. Tämä ilmenee kuormituksen ja muodonmuutoksen kasvusta johtuvana jäykkyyden alenemisena.

Tässä työssä kimmomoduulit on määritetty 28 vuorokauden ikäisille koekappaleille, joissa sideainemääränä käytettiin 70 kg/m^3 . Kimmomoduulit on määritetty graafisesti yksiakσιαalisen puristuskokeen raakadatan perusteella määritetyistä jännitys-muodonmuutoskuvaajista. Kyseisessä määrittämisessä ei oteta huomioon puristuksen aikana koekappaleen poikkileikkauksessa tapahtuvaa pinta-alan kasvua, joka pienentää todellista kappaleeseen kohdistuvaa deviatorista jännitystä. Tämä ilmenee vertailtaessa koelaitteiston määrittämiä ja raakadatan perusteella piirrettyjä jännitys-muodonmuutoskuvaajia. Suhteellisen muodonmuutoksen kasvaessa erot koekappaleeseen kohdistuvissa jännityksissä kasvavat siten, että raakadatan perusteella määritetty jännitys on suurempi kuin koelaitteiston tulostamassa jännitys-muodonmuutoskuvaajassa. Syynä tähän on koelaitteiston tekemä pinta-alan korjaus puristuksen aikana.

Kuvassa 9.30 on esitetty periaate kimmomoduulin määrittämisestä sekanttimoduulina. Määrittämisessä on huomioitu puristuksen alussa tapahtunut käyrän virheellinen muoto, jonka perusteella puristus ei ole tapahtunut alusta asti tasaisesti. Sekanttimoduulin määrittämisessä ei ole siis huomioitu alkuosan muodonmuutosta. Kimmomoduuli määritetään Hooken lain mukaisesti seuraavalla kaavalla

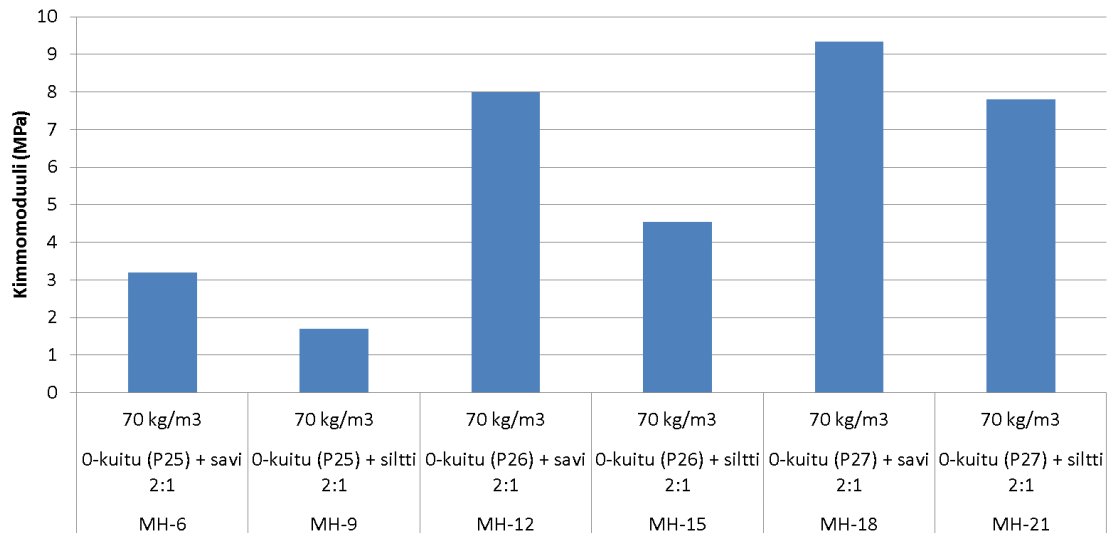
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

missä E on kimmomoduuli (kPa)
 σ on jännitys (kPa)
 ε on suhteellinen muodonmuutos



Kuva 9.30. Kimmomoduulin määrittäminen graafisesti sekanttimoduulina jännitys-muodonmuutoskuvaajasta.

Materiaalin jäykkyyden riippuessa vallitsevasta jännitystilasta, tulee kimmomoduuli määrittää todellisen rakenteessa vallitsevan jännitystilan mukaan. Kuvassa 9.31 on esitetty jännitys-muodonmuutoskuvaajista määritetyt kimmomoduulin arvot jännitystasolla $q = 50$ kPa 28 vuorokauden ikäisten rinnakkaisten koekappaleiden keskiarvona.



Kuva 9.31. Jännitys-muodonmuutoskuvaajista graafisesti määritetyt kimmomoduulit. Tulokset on esitetty kahden rinnakkaisen koekappaleen keskiarvona.

Kuvasta 9.31 havaitaan että kaikkien 0-kuitujakeiden osalta seostettaessa savea, saavutetaan suuremmat kimmomoduulin arvot kuin seostettaessa silttiä. Keskimääräiset kimmomoduulien arvot vaihtelevat 1,7...9,4 MPa välillä.

Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyys määritettiin 0-kuitu (P26) + savi (P26) -seoksesta. Sideaineena käytettiin Plussementtiä, jonka määrä reseptissä oli 70 kg/m^3 . Testattua koekappaletta säilytettiin esikuormituspenkissä 28 vuorokauden ajan ennen vedenläpäisevyydestin aloittamista.

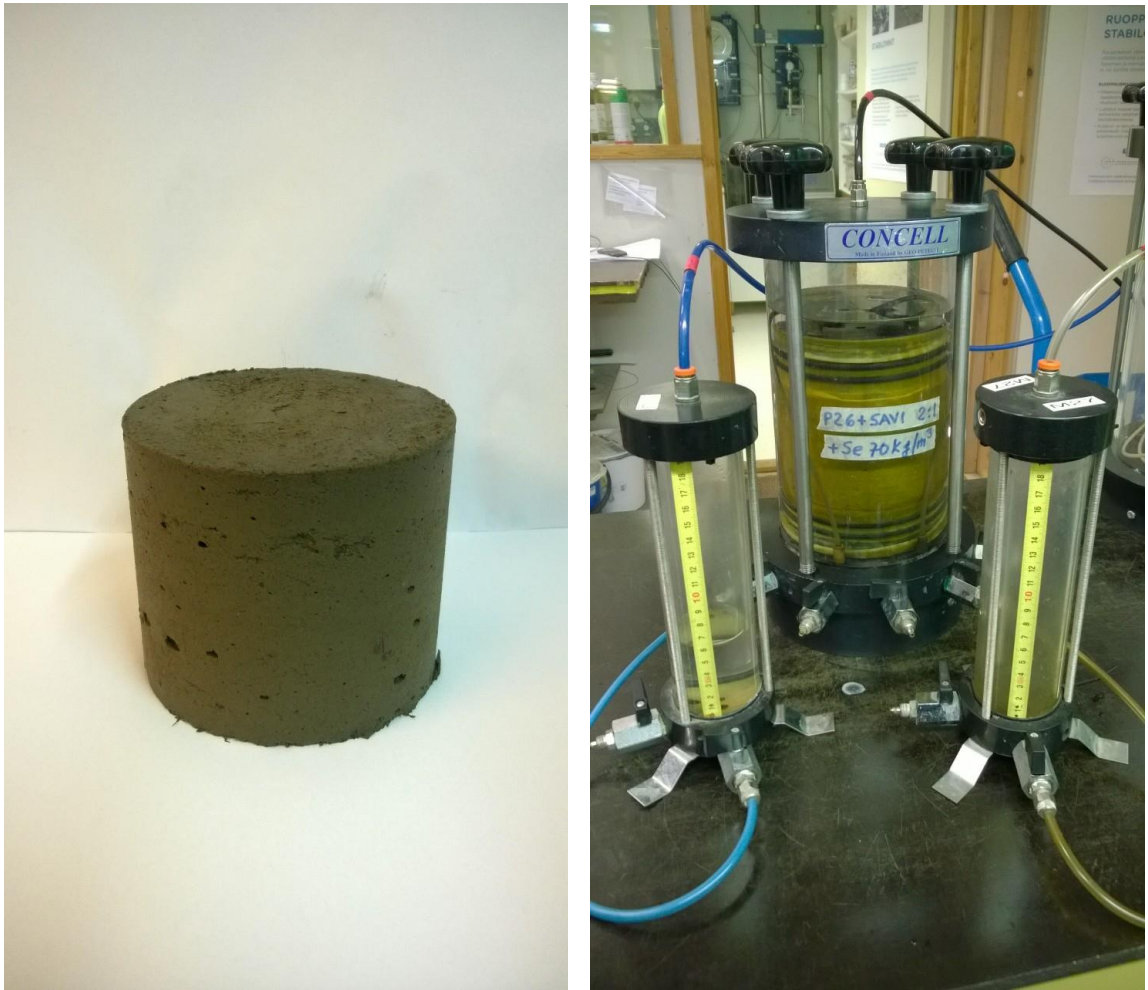
Testissä koekappale asetettiin membraanikalvon sisälle kolmiaksaalisellin. Kappaleen läpi johdettiin vettä etusäiliöstä takasäiliöön. Säiliöiden paine-erosta johtuvan veden virtauksen aikana säiliön vedenpinnan tasoja mitattiin. Testikappaleen vedenläpäisevyys lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$k = \frac{Q \cdot h}{A \cdot H} \quad (8)$$

missä

- k on vedenläpäisevyys
- Q on testikappaleen läpäisseen veden määrä
- h on testikappaleen korkeus
- A on testikappaleen pinta-ala
- H on hydraulinen paine-ero

Kuvassa 9.32 on esitetty vedenläpäisevyyskoetta varten tehty valmis testikappale sekä testauksessa käytetty kolmiaksaalilaitteisto. Testikappaleen halkaisija koevaiheessa oli 103 mm ja korkeus 92 mm. Kappaleen vesipitoisuus oli 145 %.



Kuva 9.32. Kuvassa vasemmalla vedenläpäisykoetta varten tehty koekappale ja oikealla koelaitteisto.

Pehmeäseinämäisellä koelaitteistolla määritetty testikappaleen vedenläpäisevyys oli $1,7 \cdot 10^{-8}$ m/s. Tulos on hyvin linjassa aiemmassa tutkimuksessa tehtyjen vedenläpäisevyyskokeiden tulosten kanssa. Lielahden 0-kuidun stabiloituvuus -selvityksessä massasuhteessa 2:1 seostetun ja stabiloidun 0-kuitu + savi -seoksen vedenläpäisevyudeksi määritettiin $1,9 \cdot 10^{-8}$ m/s. Sideainemäärä seoksessa oli 80 kg/m^3 .

9.4 Tulosten arviointi

Lujuusominaisuudet

Laboratoriossa seostettujen ja stabiloitujen koekappaleiden lujuusominaisuuksia määritettiin yksi- sekä kolmiaksisiaalisella puristuskokeella. Laboratorio-olosuhteissa tehtyjen kokeiden perusteella jo suhteellisen pienillä sideainemäärillä voidaan saavuttaa materiaalin hyötykäyttöä edellytettäviä lujuuksia. Alustavaksi tavoitelujuudeksi määritetty puristuslujuus 100 kPa saavutetaan yksiaksisiaalisessa puristuskokeessa yhtä seosta lu-

kuun ottamatta 70 kg/m^3 sideainemäärällä. Mitoituksessa käytettävä lujuus tulee kuitenkin arvioida tulevan rakenteen mukaan.

Puristuslujuustuloksista nähdään, että sideainemäärän lisäksi seostetun ja stabiloidun 0-kuidun lujuuteen vaikuttaa merkittävästi 0-kuidun sekä täyteaineen laatu. Selvästi hienoimmalla 0-kuitujakeella täyteaineen vaikutus lujuuteen samalla sideainemäärällä on suhteellisen pieni verrattuna karkeampiin ja huopamaisempiin 0-kuitujakeisiin. 0-kuitu + savi -seosten puristuslujuudet ovat 0-kuitujakeesta riippumatta samaa suuruusluokkaa. Täyteaineena käytettävän siltin osalta sen sijaan nähdään selkeä ero puristuslujuuksissa eri 0-kuitujakeiden välillä. Seostettaessa silttiä, suurimmat lujuudet saavutetaan kun runkoaineena on lietemäisin ja vesipitoisin 0-kuitujae (P27).

Puristuslujuustuloksista nähdään myös että lujuudenkehitys ajan suhteen on varsin vähäistä. Vertailtaessa eri-ikäisten kappaleiden puristuslujuuksia, havaitaan että 7...90 vuorokauden lujuudet ovat pääosin samaa suuruusluokkaa. Tässä tutkimuksessa merkittävimmät lujuuteen vaikuttavat tekijät ovat seostetun ja stabiloidun 0-kuidun ovat sideainemäärä sekä seostettujen runko- ja täyteaineiden laatu.

Muodonmuutosominaisuudet

Massastabiloidun kerroksen kokonaispainuma koostuu eri vaiheissa tapahtuvista painumista. Painuma voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin (Forsman *et al.* 2015):

1. Stabilointityö
2. Tiivistyspenger
3. Lopullinen pengeri
4. Esikuormituspenger

Stabilointityön aikana massastabiloidun kerroksen yläpinta nousee sekoitinkärjellä sekoitettaessa. Tämä johtuu stabiloitavaan maan kuohkeutumisesta, joka nostaa sekoitetun kerroksen pintaa. Massastabiloidun kerroksen suurimmat painumat tapahtuvat sekoitus-työn jälkeen rakennettavan tiivistyspenkereen vaikutuksesta stabiloidun massan lujittumisen aikana. Käytön aikaisten painumien minimoimiseksi voidaan massastabiloitua kerrosta kuormittaa ylipenkereellä ennen lopullisen penkereen rakentamista. Esikuormituspenkereen rakentaminen tulee kyseeseen erityisesti turvekerrosten stabiloinnissa. Ennen lopullisen penkereen rakentamista, tulee varmistua massastabiloidun kerroksen siirtymien pysähtymisestä. (Forsman *et al.* 2015)

Laboratorio-olosuhteissa tehtävissä stabiloituvuustutkimuksissa pyritään mallintamaan todellisia, maastossa tehtäviä työvaiheita. Esikuormituspenkissä koekappaleisiin kohdistuva pystykuormitus (9...20 kPa) vastaa stabiloinnin jälkeen rakennettavaa tiivistyspengertä (0,5...1,0 m). Tässä tutkimuksessa tehdyillä ödometrikokeilla pyrittiin lisäksi mallintamaan yläpuolisen rakenteen aiheuttamasta kuormituksesta aiheutuvaa kokoonpuristumista sekä virumasta aiheutuvaa sekundääristä painumaa.

Ödometritulosten tulkinnassa tulee ottaa huomioon 0-kuidun epähomogeenisuuden vaikutus ödometrikokeessa käytettävän näytekkappaleen käyttäytymiseen kuormitustilanteessa. Suhteellisen pienillä näytekkappaleilla tehdyissä ödometrikokeissa oli tulosten osalta odotetusti hajontaa. Lisäksi tulee ottaa huomioon sementin sitoutuminen ja tästä johtuva materiaalin ominaisuuksien muuttuminen ödometrikokeen aikana.

Esikuormituspenkissä koekappaleiden lujittumisen aikaisen kokoonpuristuman sekä ödometrikoetulosten perusteella sideainemäärän kasvattaminen pienentää stabiloidun massan kokonaispainumaa. Ödometrikokeiden perusteella havaitaan, että sekundääripainuman osuus kokonaispainumasta on vähäinen erityisesti pienillä kuormituksilla (9...80 kPa). Kuormituksen kasvaessa myös sekundääripainuma näyttäisi ödometrikoetulosten perusteella lisääntyvän. Pienillä kuormitusportailta painumat tapahtuivat nopeasti kuormituslisäyksen jälkeen.

9.4.1 Mitoitusominaisuuksien määrittäminen

Stabiloinnissa käytettävien mitoitusparametrien määrittäminen voidaan tehdä koestabiloinnilla sekä laboratorionkokeilla. Lisäksi voidaan hyödyntää samankaltaisista stabilointikohteista saatuja toteumatietoja (Liikennevirasto 2010). Nykyinen ohjeistus mitoitusominaisuuksien määrittämiseksi kattaa pääosin pilaristabiloidut rakenteet, joissa laboratoriossa määritetyt lujuustasot ovat selvästi massastabilointia suurempia. Ohjeistusta ollaan päivittämässä, jolloin massastabiloinnin laboratoriotulosten perusteella voidaan tarkemmin arvioida suunnittelussa käytettäviä mitoitusparametreja. Tämän diplomityön yhteydessä tehdystä koerakenteesta saatujen tutkimustulosten perusteella voidaan arvioida laboratorio-olosuhteissa saatujen tulosten vastaavuutta maastossa tehtävään stabilointiin. Tämän tutkimuksen sekä koerakenteen tuloksia tullaan käsittelemään myöhemmässä vaiheessa koerakenteesta tehtävässä loppuraportissa.

Massastabiloidusta rakenteesta sekä kuormituksesta riippuen mitoittavana tekijänä voi olla lujuus- tai painumaominaisuudet. Lisäksi tulee huomioida ympäristöominaisuudet, joiden käsittely on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Kuvissa 9.33 ja 9.34 on esitetty tutkimuksessa tehtyjen kolmiaksaalikokeiden jännityspolkukuvaajiin piirretyt murtosuoran sovituset. Suoran sovitus on tehty kriittisen tilan murtosuoran tavoin, jolloin suora kulkee origon kautta. Tällöin koheesio arvo $c = 0$. Lisäksi suorien sovituset on tehty koheesio huomioden lähelle kohtaa, jossa näytekkappaleet ovat alkaneet selvästi myötää. Kolmiaksaalikoetulosten perusteella voidaan lujuusparametrit määrittää kaavoilla 9 ja 10. Tehokas leikkauskestävyyskulma määritetään murtosuoran kaltevuuskulman avulla seuraavasti

$$\sin\varphi' = \frac{3k_1}{6+k_1} \quad (9)$$

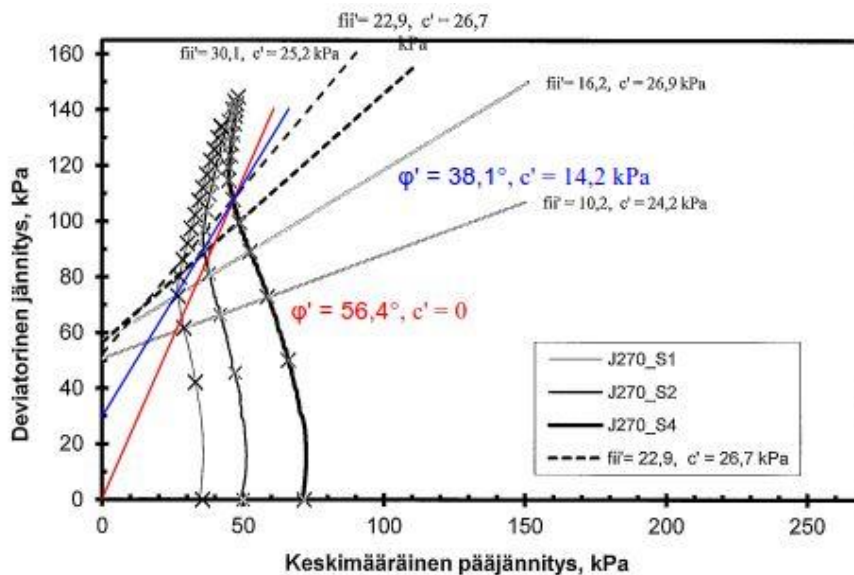
missä φ' on tehokas leikkauskestävyyskulma
 k_1 on murtosuoran kaltevuuskulma

Koheesio määritetään seuraavalla kaavalla

$$c' = \frac{3 - \sin \varphi'}{6 \cos \varphi'} q_0 \quad (10)$$

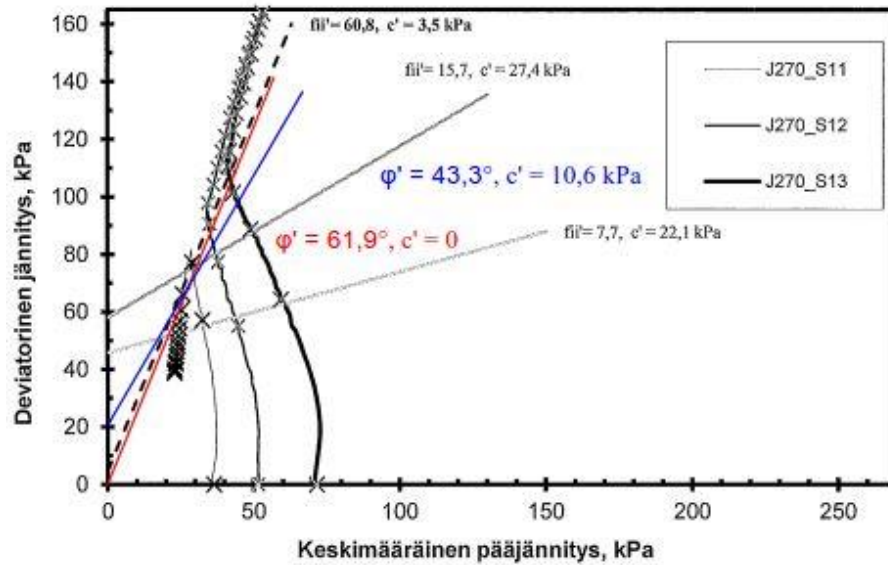
missä c' on tehokas koheesio
 q_0 on deviatorinen jännitys murtosuoran leikkauskohdassa

Jännityspolkukuvaajissa punaisella värillä on kuvattu murtosuora, jossa koheesio on pakotettu nolaksi. Sinisellä värillä piirretty suora kuvaa murtosuoraa, joka huomio materiaalin koheesio.



Kuva 9.33. Murtosuoran sovitus 0-kuitu (P26) + savi (P26) -seoksesta tehtyjen kolmiakσιαalikokeiden jännityspolkukuvaajaan.

Kun koheesio asetetaan nolaksi, saadaan kuvan 9.32 jännityspolkukuvaajasta määritettyä tehokkaaksi leikkauskestävyyskulman arvoksi $\varphi' = 56,4^\circ$. Kun koheesio otetaan huomioon, saadaan tehokkaiksi lujuusparametreiksi jännityspolkukuvaajasta $\varphi' = 38,1^\circ$ ja $c' = 14,2$ kPa.



Kuva 9.34. Murtosuoran sovitus 0-kuitu (P27) + siltti (P27) -seoksesta tehtyjen kolmiakσιαalikokeiden jännityspolkukuvaajaan.

0-kuitu (P27) + siltti (P27) -seoksen jännityspolkukuvaajasta (kuva 9.33) nähdään yhden koekappaleen murtuneen hauraasta kuormituksessa pienimmällä sellipaineella. Muiden koekappaleiden osalta murtumista ei havaittu. Tehokkaaksi leikkauskestävyyskulman arvoksi on määritetty $\varphi' = 61,9^\circ$. Koheesion huomioivan sinisen murtosuoran perusteella tehokas leikkauskestävyyskulman arvo $\varphi' = 43,3^\circ$ ja koheesio $c' = 10,6$ kPa.

Stabiloidun 0-kuidun lujuus muodostuu turpeelle tyypillisesti kuitujen välisistä sidoksista sekä sideaineen muodostamasta koheesiosta, joka kehittyy ajan funktiona. Materiaalilla ei ole rakeiden välistä kitkaa, mutta lujuus kasvaa jännitystilän kasvaessa pienillä jännitystasoilla. Mitoitusparametrit tulee määrittää kohdekohtaisesti ja lujuudenmääritys tulee tehdä valmiissa stabiloidussa rakenteessa vallitseva jännitystila huomioiden.

9.4.2 Arvio pitkäaikaisominaisuuksista

Stabiloidun 0-kuidun pitkäaikaisominaisuuksista voidaan tehdä arvio puristuskokeiden sekä pitkäaikaisten ödometrikokeiden perusteella. Tarkempien pitkäaikaisominaisuuksien määrittäminen edellyttää kuitenkin esimerkiksi koerakenteesta tehtäviä seurantatutkimuksia.

Laboratoriossa tehtyjen lujuuskokeiden perusteella sementtistabiloidun massan lopullinen lujuus on saavutettu suhteellisen nopeasti sekoituksen jälkeen, käytännössä jo 28 vuorokauden kohdalla. Sementin osalta pitkäaikaislujuutumisen osuus onkin todettu olevan pienempi muihin sideaineisiin nähden. Toisaalta sekoitustyön laadun vaikutus lopulujuuteen on voimakkaampi muihin sideaineisiin verrattuna, koska sementtien sisältämien kalsiumionien liikkuminen on vähäistä runkoaineessa. Tästä syystä sekoitustyöstä johtuva epähomogeenisuus ei korjaannu ajan vaikutuksesta. (Forsman et al. 2015).

Pitkäaikaisominaisuuksia arvioitaessa tulee ottaa huomioon myös stabiloidun kerroksen kuormituksesta aiheutuvat painumat. Laboratorio-olosuhteissa tiivistyspengertä vastaavan kuormituksen (9 kPa) vaikutuksesta painumat ovat tapahtuneet suhteellisen nopeasti sekoituksen jälkeen. Tutkimuksessa tehtyjen ödometrikokeiden perusteella stabiloiduissa näytekkappaleissa esiintyy kuitenkin myös pitkäaikaista, virumasta aiheutuvaa sekundaäripainumaa. Käytönaikaisten painumien estämiseksi massastabiloitu kerros voidaan esikuormittaa tulevaa rakennetta suuremmalla kuormituksella.

Massastabiloidun 0-kuidun muista pitkäaikaisominaisuuksista tulisi jatkosuunnittelun yhteydessä määrittää jäätymis-sulamiskestävyys sekä routimisominaisuudet routanousukokeella. Mikäli massastabiloidun kerroksen päälle tulevat rakenteet edellyttävät paalutusta, tulee mitoituksessa huomioida paalujen ympärillä mahdollisesti painuvan massastabiloidun kerroksen aiheuttama negatiivinen vaippahankaus.

10. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää ylijäämämaiden kanssa seostetun ja stabiloidun 0-kuidun hyötykäyttömahdollisuutta Tampereen Lielahden alueella tehtävässä maanrakentamisessa. 0-kuidun hyötykäytön edellytyksiä tutkittiin geoteknisestä näkökulmasta määrittämällä ja tarkentamalla stabiloidun massan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia laboratorio-olosuhteissa tehdyillä kokeilla. Varsinaisen laboratorio-tutkimuksen lisäksi diplomityössä esiteltiin kirjallisuusselvityksen avulla työtapoja sekä -menetelmiä mahdolliseen 0-kuidun ruoppaukseen ja stabilointiin. Diplomityössä on myös esitetty tutkimuksen yhteydessä tehdyn kenttäkoerakenteen periaate sekä työvaiheet.

Kirjallisuusselvityksen perusteella voidaan arvioida alustavasti Tampereen Lielahden vesialueella sijaitsevan 0-kuidun ruoppauksessa käytettäviä menetelmiä. Mikäli 0-kuitua tulevaisuudessa ruopataan, tulee arvioida myös ruoppauksen aikaiset vaikutukset vedenlaatuun sekä eri ruoppausmenetelmien soveltuvuus vesipitoiselle 0-kuitumassalle. Ruoppausmenetelmän valinnassa voi tulla tarpeen ottaa huomioon myös ruoppauksesta johtuvan ylimääräisen veden käsittely.

Laboratoriotutkimuksissa määritettiin 0-kuidun sekä seostettavien täyteaineiden laatu- vaihtelun merkitys materiaalin stabiloituvuuteen. Laboratoriossa tehtyjen stabiloitu- vuustutkimusten perusteella sementillä stabiloituna saavutettavat lujuudet ovat riippu- vaisia 0-kuidun materiaaliominaisuuksista, kuten vesipitoisuudesta sekä kiintoaineksen koostumuksesta. Runkoaineena käytettävän 0-kuidun ominaisuuksien lisäksi seostetun ja stabiloidun materiaalin stabiloituvuuteen näyttäisi vaikuttavan täyteaineen laatu. Tu- losten perusteella 0-kuitujakeen stabiloituvuus vaihteli huomattavasti käytettävän täyte- aineen mukaan. Näytteenoton perusteella 0-kuidun alueellinen laatuvaihtelu on merkit- tävää. 0-kuitualueen laajuuden takia laatuvaihtelun tarkempi määrittäminen lisänäyt- teenotolla voi olla tarpeen.

Tutkimustulosten perusteella ylijäämämaiden kanssa seostetulla ja stabiloidulla 0- kuidulla voidaan saavuttaa laboratorio-olosuhteissa jo suhteellisen pienillä sideainemää- rillä riittävä lujuustaso esimerkiksi virkistysaluetäytöissä käytettäväksi materiaaliksi. Tässä tutkimuksessa alustavaksi yksiaksisiaalisella puristuskokeella määritettäväksi pu- ristuslujuudeksi asetettiin 100 kPa. Sementtistabiloidun massan osalta tulee huomioida sementin sitoutumisreaktion lämpötilariippuvuus. Laboratoriossa lopulliset lujuudet saavutetaan todennäköisesti huomattavasti aikaisemmin kuin maastossa, jossa vallitseva lämpötila on laboratorio-olosuhteita alhaisempi.

Laboratorio-olosuhteissa esikuormituksen aikaiset painumat ovat tapahtuneet pääosin ensimmäisen vuorokauden aikana. Aikaisemmin tehtyjen tutkimusten mukaan esikuormituksella on huomattava vaikutus stabiloidun massan lujuudenkehitykseen. Tästä syystä tiivistyspengeri tulisi rakentaa mahdollisimman nopeasti massastabiloinnin jälkeen jo saman työvuoron aikana.

0-kuidun hyötykäytön edellytysten ja reunaehtojen selvittämiseksi jatkotutkimuksena tulisi tarkentaa stabiloidun 0-kuidun pitkäaikaisominaisuuksia sekä materiaalin ympäristökelpoisuutta. Pitkäaikaisominaisuuksia tullaan arvioimaan lisäksi tämän tutkimuksen yhteydessä rakennetusta koekohteesta saatavien laadunvarmistus- ja seuranta tutkimustulosten perusteella. Koerakenteessa saatujen toteumatietojen avulla voidaan myös arvioida laboratoriotulosten sekä maastossa määritettyjen tulosten vastaavuutta.

LÄHTEET

ALLU (2013). Stabilisation Brochure. ALLU Stabilisation System. [WWW]. [Viitattu 7.7.2015]. Saatavissa: <http://www.allu.net/us/products/stabilization-system>

ALLU (2007). Mass Stabilisation Manual. ALLU Stabilisation System. ALLU Finland Oy. [WWW]. [Viitattu: 7.7.2015]. Saatavissa: <http://www.allu.net/products/stabilisation-system>

Autiola, M. (2015). Selvitys Lielahden 0-kuidun stabiloituvuudesta. Loppuraportti. Ramboll Finland Oy.

Autiola, M. (2012). Field test in Port of Kokkola, Finland. SMOCS – Sustainable Management of Contaminated Sediments. Baltic Sea Region Programme Project No #39. [WWW]. [Viitattu: 29.1.2016]. Saatavissa: <http://www.smocs.eu/guideline/kokkola.pdf>

Autiola, M. (2009). Demonstraatiohankkeen loppuraportti. LIFE06 ENV/FIN/000195-STABLE. [WWW]. [Viitattu: 18.8.2015]. Saatavissa: http://projektit.ramboll.fi/life/stable/sf/images/loppuraportti%20liitteineen_suojattu.pdf

Autiola, M. (2009). Ruoppausmassojen käsittely prosessistabiloimalla Pansion altaaseen. Pilotoinnin, ympäristöllisen ja teknisen laadun seurannan raportti. EU-Life Stable Projekti. Ramboll Finland Oy. [WWW]. Saatavissa: http://projektit.ramboll.fi/life/stable/sf/images/Pilot%20hankkeen%20toteutus_%20ympäristön%20ja%20teknisen%20laadun%20seuranta.pdf

Axelsson, K., Johansson, S-E. & Andersson, R. (2002). Stabilization of Organic Soils by Cement and Puzzolanic Reactions. Feasibility Study. Report 3. Swedish Deep Stabilization Research Centre. [WWW]. [Viitattu: 9.7.2015]. Saatavissa: <http://www.swedgeo.se/sd/pdf/SD-R3E.pdf>

EuroSoilStab (2002). Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design Guide: Soft Soil Stabilisation. Industrial & Materials Technologies Programme (Brite-EuRam III). European Commission. CT97-0351. Project No. BE 96-3177. 94 p. [WWW]. [Viitattu 9.7.2015]. Saatavissa: <http://spsi-sro.ru/files/stab.pdf>

Forsman, J. (2015). Toimialapäällikkö. Ramboll Finland Oy. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 19.2.2016.

Forsman, J. Mass stabilization in infrastructure and environmental construction. Ramboll Finland Oy. Mass Stabilisation conference 2015. Lahti. 22.-24.4.2015. [WWW]. [Viitattu: 23.6.2015]. Saatavissa: <http://www.ladec.fi/massstabilisation/massstabilisation-downloadables>

Forsman, J., Kreft-Burman, K., Lindroos, N., Hämäläinen, H., Niutanen, V., Lehtonen, K. Experiences of Utilising Mass Stabilised Low-Quality Soils for Infrastructure Construction in the Capital Region of Finland – Case Absoils Project. The XXXVIII International Baltic Road Conference. Vilnius. 26.10.-28.10.2013. [WWW]. [Viitattu: 23.6.2015]. Saatavissa: http://www.balticroads.org/downloads/28BRC/101_T09.pdf

Hartikainen, O-P. (2007). Maarakennustekniikka. 11. Painos. Otatieto. Helsinki. 196 s.

Hautalahti, P., Halkola, H., Puumalainen, N. (2007). Kivikon teollisuusalueen stabiloinnin koerakentaminen. Helsingin kaupunki. Kiinteistövirasto. Geotekninen osasto. Julkaisu 92. Helsinki 2007. [WWW]. [Viitattu 30.9.2015]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu92.pdf>

Havel, F. (2004) Creep in soft soils. Doctoral thesis for the degree of doctor ingeniør. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim.

InfraRYL 2010. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 1: Väylät ja alueet. Rakennustieto Oy. Helsinki.

Janz, M., Johansson, S.-E. (2002). The Function of Different Binding Agents in Deep Stabilization. Swedish Deep Stabilization Research Centre. Report 9. Linköping. 2002. [WWW]. [Viitattu 2.9.2015]. Saatavissa: <http://www.swedgeo.se/sd/pdf/SD-R9E.pdf>

Jelusic, N. (2000). Masstabilisering. Svensk Djupstabilisering. Rapport 5. Linköping 2000. [WWW]. [Viitattu 27.8.2015]. Saatavissa: <http://www.swedgeo.se/sd/pdf/SD-R5.pdf>

Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, M., Lahtinen, P., Forsman, J. (2012). Tuhkarakentamisen käsikirja. Energiatuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. [WWW]. [Viitattu 20.8.2015]. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf

Kuusipuro, K. Stabiloinnin määrä vuosien varrella. Nordkalk Oy Ab. Pohjanvahvistuspäivä 2014. Aalto-yliopisto. Espoo. 21.8.2014. [WWW]. [Viitattu: 23.6.2015]. Saatavissa: <http://www.getunderground.fi/web/page.aspx?refid=326>

Lahtinen, P. Mass Stabilisation Opportunities. Ramboll Finland Oy. The 2nd International Mass Stabilisation Conference 2015. Lahti. 22.-24.4.2015. [WWW]. [Viitattu: 21.8.2015]. Saatavissa: <http://www.ladec.fi/masstabilisation/masstabilisation-downloadables>

Lahtinen, P., Forsman, J., Kiukkonen, P., Kreft-Burman, K., Niutanen, V. Mass stabilisation as a method of treatment of contaminated sediments. Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction. Rostock. 10.4.-

12.4.2014. [WWW]. [Viitattu: 23.6.2015]. Saatavissa: http://www.dredgdikes.eu/wp-content/uploads/16_Lahtinen_WEB.pdf

Lahtinen, P. & Niutanen, V. Development of In-Situ Mass Stabilisation Technique in Finland. International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization – DM'09. Okinawa. 19.5.-21.5.2009. [WWW]. [Viitattu: 23.6.2015]. Saatavissa: <http://projektit.ramboll.fi/life/stable/images/Okinawa-2009.pdf>

Liikennevirasto (2010). Syvästabiloinnin suunnittelu. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 11/2010. Liikennevirasto. Helsinki.

Forsman J., Jyrävä, H., Lahtinen, P., Niemelin, T., Hyvönen, I. (2015). Mass Stabilization Manual.

Mäkelä, E., Wahlström, M., Pihlajaniemi, M., Mromueh, U.-M., Keppo, M., Rämö, P. (1999). Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteet ja lentotuhka maarakentamisessa. Jatkotutkimus. VTT Tiedotteita 1952. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo. 1999. 61 s. [WWW]. [Viitattu: 3.9.2015]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1999/T1952.pdf>

Mäkelä, H., Höynälä, H., Halkola, H., Kettunen, A. (2000). Massastabiloitujen ylijäämäsavien käyttö maarakenteissa. Suunnitteluohjeet, työselitykset ja laatuvaatimukset. Helsingin kaupunki. Kiinteistövirasto. Geotekninen osasto. Julkaisu 82. Helsinki. 2000. [WWW]. [Viitattu 27.8.2015]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/kvv2/fi/organisaatio/geotekninen-osasto/julkaisut?1dmy&urile=wcm%3Apath%3A/wps/wcm/connect/HelsinkiV2/fi/paivahoitto-ja-koulutus/lukiot/apua/>

Nauska, J. & Havukainen, J. (1998). Esirakentaminen 1998. Helsingin kaupungin geotekninen osasto. Tiedote 77/1998. Helsinki.

Ojanen, P. (2001) Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat tekijät. Alueelliset ympäristöjulkaisut. Kaakkois-Suomen Ympäristökeskus. Kouvola. 2001. [WWW]. [Viitattu 29.9.2015]. Saatavissa: <http://www.doria.fi/handle/10024/113719>

Pulkinen, S. (2012). Lielahden vesialue. Sedimentin tila. Raportti. Ramboll Finland Oy.

Ratahallintokeskus (2005). Radan stabiiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B15. Helsinki.

Riipi, T. (1997). Ruoppaus- ja läjitystekniikoiden valinta maalajien ominaisuuksien ja ympäristövaikutusten perusteella. VTT Tiedotteita 1853. Valtion teknillinen tutkimus-

keskus. Espoo. 65 s. [WWW]. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1997/T1853.pdf>

Tielaitos (1993). Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi. Tutkimusraportti. Tielaitoksen selvityksiä 81/1993. Geokeskus. Oulun kehitysyksikkö. [WWW]. Saatavissa:
http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf2/0741_001_veittostensuon_syvastabilointi.pdf

Vlasblom, W.J. (2005). Lecture notes 1: Introduction to dredging equipment. Design of Dredging Equipment. Delft University of Technology. [WWW]. [Viitattu: 7.7.2015]. Saatavissa:
<http://ocw.tudelft.nl/courses/offshore-engineering/design-of-dredging-equipment/readings/lecture-notes-1-introduction-to-dredging-equipment/>

Ympäristöministeriö (2015). Sedimenttien ruoppaus- ja läjitysohje. Ympäristöhallinnon ohjeita 1/2015. Ympäristöministeriö. Helsinki. 72 s. [WWW]. Saatavissa:
https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/154833/OH_1_2015.pdf?sequence=1

Åhnberg, H., Johansson, S.-E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L., Holm, G. (1995). Cement och kalk för djupstabilisering av jord. En kemisk – fysikalisk studie av stabiliseringseffekter. Statens Geotekniska Institut. Report 48. Linköping. 1995. [WWW]. [Viitattu: 27.8.2015]. Saatavissa:
http://www.swedgeo.se/templates/SGIPublication____875.aspx?epslanguage=EN

Åhnberg, H. (2006). Strength of stabilised soils. A laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder. Doctoral Thesis. Lund. Lund University.

LIITE A: JÄNNITYS-MUODONMUUTOSKUVAAJAT

