



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

RIINA RASIMUS
KIVITUHKAN HYÖDYNTÄMINEN MASSASTABILOINNISSA
Diplomityö

Tarkastajat: professori Pauli
Kolisaja, diplomi-insinööri Pirjo
Kuula
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
4. joulukuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

RIINA RASIMUS: Kivituhkan hyödyntäminen massastabiloinnissa

Diplomityö, 71 sivua, 15 liitesivua

Maaliskuu 2014

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastajat: professori Pauli Kolisoja, diplomi-insinööri Pirjo Kuula

Avainsanat: kivituhka, murskausprosessi, massastabilointi, turve, ruoppausmas-
sa, täyteaine, puristuslujuus, kokoonpuristuma

Kivituhka on kiviainestuotannossa katkaistujen kiviainestuotteiden jalostuksen yhteydessä jakoseulan alitteena syntyvä murskaustuote. Kivituhkana pidetään nollapohjaista mursketta, jonka maksimiraekoko on 2...6 millimetriä. Kivituhka on suuren hienoainespitoisuutensa takia routiva materiaali. Routivuus rajoittaa sen käyttöä huomattavasti. Kivituhka onkin kiviainestuottajalle ongelmallinen materiaali, koska sen käyttö maarakentamisessa on vähäistä ja sitä näin ollen kerääntyy kiviainesten ottopaikoille varastokasoihin.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, soveltuuko kivituhka massastabiloinnin täyteaineeksi ja parantaako kivituhkan lisääminen heikompileatuksen pohjamaan ominaisuuksia ja stabiloinnin lopputulosta. Opinnäytetyössä on esitelty kiviainesten tuotantoprosessia, kivituhkan muodostumista murskausprosessin aikana ja kivituhkan käytön nykytilaa, jotta voidaan paremmin ymmärtää kivituhkan muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä. Opinnäytetyössä on esitelty myös massa- ja prosessistabilointimenetelmät, stabiloinnissa käytettävät sideaineet ja täyteaineet sekä niiden vaikutus stabiloitavaan maa-ainekseen.

Tutkimusosassa selvitettiin kivituhkan lisäämisen vaikutusta sekä savipitoisen ruoppausmassan että humuspitoisen turvemaan stabiloinnissa. Laboratoriotutkimuksessa käytettiin tavanomaisen massastabilointiin liittyvän stabiloitavuustestauksen menetelmiä. Tutkimuksissa käytettävät kivituhkamäärät valittiin massastabilointimenetelmän rajoitusten mukaisesti. Täyteaineen lisäämisen vaikutuksia tutkittiin ruoppausmassoilla 200 ja 400 kg/m³ kivituhkamäärillä ja turpeella 100, 200 ja 300 kg/m³ kivituhkamäärillä ja 200 kg/m³ hiekkamäärillä. Tutkimustuloksia verrattiin ilman täyteainetta valmistettujen koekappaleiden tuloksiin. Kaikkien koekappaleiden puristuslujuus määritettiin 28 vuorokauden kuluttua sekoittamisesta. Turpeesta valmistettuja koekappaleita kuormitettiin niiden lujittumisen ajan esikuormituspenkissä. Koekappaleiden kokoonpuristumaa seurattiin tutkimusohjelman mukaisesti.

Tutkimuksen perusteella kivituhkan lisäyksellä ei havaittu olevan merkittäviä vaikutuksia ruoppausmassojen stabiloinnissa. Puristuslujuustulokset olivat lähes samoja eri täyteainemäärillä. Turpeen stabiloinnissa täyteaineen lisäämisen havaittiin pienentävän kokoonpuristumaa ja kasvattavan puristuslujuutta. Tutkimustulosten mukaan täyteaineen lisäyksellä voidaan saavuttaa pieniä säästöjä tarvittavan sideaineen määrässä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

RIINA RASIMUS: Utilisation of fine crushed aggregate in mass stabilisation

Master of Science Thesis, 71 pages, 15 Appendix pages

March 2014

Major: Municipality Engineering

Examiners: Professor Pauli Kolisoja, Master of Science Pirjo Kuula

Keywords: fine crushed aggregate, crushing process, mass stabilisation, peat, dredged mass, filler material, compressive strength, compressibility

Fine crushed aggregate is an end product of the aggregate processing, and is produced as undersized material of the screen. Fine crushed aggregate is all-in aggregate which maximum grain size is usually between 2...6 millimetres. Fine crushed aggregate is a frost susceptible material because of the high fines content, which limits the applicability of this material. For the aggregate producers this creates a problematic situation where the excess fine crushed aggregate accumulates in the production areas.

In this thesis the fine crushed aggregate applicability as a filler material in mass stabilisation applications was experimented. Further the property improvements of mass stabilised poor soil were examined when fine crushed aggregate was added. The aggregate processing, production of fines during the crushing process, and the current state of the utilisation of fine crushed aggregate were introduced to help to understand the generation process of fine crushed aggregate. The mass and process stabilisation techniques, the common binders used in stabilisation, and the effect of adding filler material were presented as background for the laboratory experiment.

In the laboratory experiment was found out the effect of adding fine crushed aggregate in the dredged mass and in peat. The experiment was carried out with the same procedure as the regular pre-studies in mass stabilisation. The specimens were made with different binders and different amount of binders. In the dredged mass experiment the added amounts of fine crushed aggregate were 200 and 400 kg/m³. In the peat experiment the specimens were made with the amounts of 100, 200 and 300 kg/m³ fine crushed aggregate and the amount of 200 kg/m³ sand. The test results were compared with the test results of the specimens made without the filler material. The compressive strength of the specimens was tested at the age of 28 days. The peat specimens were loaded with the pre-compression during the strengthening time, and their compressibility was monitored according to the test process.

According to test results adding the fine crushed aggregate did not improve the properties of dredged mass. In the stabilisation of peat the adding of the fine crushed aggregate decreased the compressibility of the samples during the pre-compression. The results of compressive strength tests showed a slight improvement compared to the results of the samples made without filler material. According to test results adding fine crushed aggregate during the mass stabilisation process can save small quantities of binder.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lemminkäinen Infra Oy:lle syksyn 2013 ja talven 2014 aikana.

Haluan kiittää professori Pauli Kolisojaa ja diplomi-insinööri Pirjo Kuulaa Tampereen teknilliseltä yliopistolta työn tarkastamisesta ja ohjaamisesta sekä diplomi-insinööri Minna Leppästä uusista näkökulmista ja ideoista.

Lisäksi haluan kiittää Ville Niutasta Lemminkäinen Infra Oy:sta työn aikana antamastaan avusta ja ohjauksesta. Kiitän myös Lemminkäinen Infra Oy:n kiviaines- ja murskaustoiminnan ammattilaisia mielenkiintoisista keskusteluista ja neuvoista murskaukseen ja kivituhkan käyttöön liittyen. Haluan esittää kiitokseni myös Ramboll Finland Oy:n Luopioisten laboratorion henkilökunnalle osallistumisesta työn tutkimusvaiheeseen sekä tutkimustulosten läpikäynnistä.

Lopuksi haluan vielä kiittää perhettäni, erityisesti Iikkaa, tuesta ja kannustuksesta opiskeluvuosiini ja diplomityön tekemisen aikana.

26.3.2014

Riina Rasimus

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Kivituhka kiviainestuotannon sivutuotteena	3
2.1	Kiviainestuotteiden valmistusprosessi	4
2.1.1	Kiviaineksen irrotus	4
2.1.2	Murskausprosessi	4
2.1.3	Käytettävät murskaintyytit sekä niiden toimintaperiaate	8
2.2	Kivituhkan muodostuminen ja murskaukseen vaikuttavat tekijät	11
2.2.1	Kiven ominaisuuksien vaikutus hienoaineksen ja kivituhkan syntymiseen	12
2.2.2	Hienoaineksen ja kivituhkan syntyminen murskausprosessissa	15
2.3	Kivituhkan käyttö maarakentamisessa	17
2.3.1	Kivituhkan nykyiset käyttökohteet	18
2.3.2	Kivituhkan jatkojalostaminen murskattuna materiaalina	18
2.3.3	Kivituhkan tuotteistaminen seoksissa	19
3	Massa- ja prosessistabilointitekniikka	23
3.1	Massastabilointi	24
3.1.1	Massastabilointimenetelmä ja -kalusto	24
3.1.2	Massastabiloinnin hyödyntämiskohteet ja edut	25
3.2	Prosessistabilointi	27
3.2.1	Prosessistabilointitekniikka ja -kalusto	27
3.2.2	Prosessistabiloinnin käyttökohteet ja edut	28
3.3	Stabilointityön laadunvalvonta	31
3.4	Stabiloinnissa käytettävät sideaineet	32
3.4.1	Kalkki	32
3.4.2	Sementti	33
3.4.3	Masuunikuona	34
3.4.4	Lentotuhka	34
3.4.5	Rikinpoiston lopputuote ja kipsi	35
3.4.6	Palavan kiven tuhka	36
3.5	Sideaineen valinta ja stabiloinnin tavoitteet	36
3.6	Stabiloinnin täyteaineet	38
4	Kivituhkan vaikutus lujittumiseen stabiloitavuustestauksessa	40
4.1	Tutkimuksissa käytetyt täyteaineet	40
4.2	Jätkäsaaren allasmassojen tutkimusohjelma	41
4.2.1	Runkoaineen näytteenotto ja laboratoriotutkimukset	41
4.2.2	Käytetyt runko-, side- ja täyteaineet	42
4.2.3	Koekappaleiden valmistus	43
4.2.4	Puristuslujuuden määrittäminen	44
4.3	Turpeen tutkimusohjelma	45

4.3.1	Runkoaineen näytteenotto ja laboratoriotutkimukset	45
4.3.2	Käytetyt runko-, side- ja täyteaineet	45
4.3.3	Koekappaleiden valmistus	46
4.3.4	Koekappaleiden esikuormittaminen	47
4.3.5	Puristuslujuuden määrittäminen	48
5	Kivituhkan soveltuvuus massastabiloinnin täyteaineeksi	49
5.1	Laboratoriokokeiden tulokset.....	49
5.1.1	Stabiloinnin osakomponenttien tilavuusosuudet koekappaleissa	49
5.1.2	Koekappaleiden maksimipuristuslujuus	51
5.1.3	Koekappaleiden käyttäytyminen kuormituksessa.....	54
5.1.4	Turvekoekappaleiden kokoonpuristuma.....	57
5.2	Tulosten ja testausmenetelmien arviointi	60
5.3	Kivituhkan soveltuminen massastabiloinnin täyteaineeksi.....	61
5.4	Jatkotutkimustarpeet	62
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	63
7	Lähteet.....	66

Liite 1: Hiekan ja kivituhkan rakeisuuskäyrät

Liite 2: Jätkäsaaren allasmassojen näytteenottosuunnitelma

Liite 3: Jätkäsaaren allasmassoista valmistettujen koekappaleiden jännitys-
muodonmuutoskuvaajat

Liite 4: Turpeesta valmistettujen koekappaleiden jännitys-muodonmuutos-
kuvaajat

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Aktivaattori	Sideaine, joka käynnistää ja kiihdyttää piilevästi hydraulisten tai potsolaanisten sideaineiden sitoutumisreaktiota.
Alite	Jakoseulalla alimman seulaverkon läpi putoava, nollapohjainen eli hienoaineksen sisältävä aines.
Anisotrooppisuus	Mineraalin tai kalliomassan ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi suunnan mukaan.
Autogeeninen murskaus	Kivien välisistä iskuista ja puristuksesta johtuvaa murskautumista. Rock-on-rock –murskaus.
CSS-asetus	Puristumurskaustekniikkaa käyttävien murskainten suljetun puolen asetus. Suljetun puolen asetus määrittää murskaussuhteen, lopputuotteen enimmäiskoon ja vaikuttaa merkittävästi kapasiteettiin, tuotteen raekokoon, tehonkulutukseen ja kulumiseen. Kartiomurskaimilla CSS-asetus mitataan kartion alaosaan vaipan alaosaan, kun ne ovat murskaussyklin aikana lähimpänä toisiaan. (Closed-Side Setting)
d/D	Kiviaineksen rakeisuuden ilmoittaminen kiviaineksen sisältämän pienimmän raekoon (d) ja maksimiraekoon (D) mukaan. Esimerkiksi KaM 0/3.
Diffuntoituminen	Ioneiden epätasaisten pitoisuuksien luontaista tasoittumista. Syvästabiloinnissa kalkilla stabiloitaessa kalsiumionien epätasaiset pitoisuudet tasoittuvat luontaisesti ajan myötä, jolloin sekoitustyön lopputulos tasoittuu.
Ex-situ-massastabilointi	Siirrettyjen massojen, kuten kaivettujen tai ruopattujen massojen, stabilointi läjitysalueella.
Flokkuloituminen	Savimineraalien yhteenkokoontumista ja järjestäytymistä sähköisten voimien vaikutuksesta.
Hienoaines	Kiviaineksen sisältämä maksimiraekooltaan alle 0,063 mm kokoinen materiaali.
HSI-murskain	Iskumurskaustekniikkaa hyödyntävä vaaka-akselinen iskupalkkimurskain. (Horizontal Shaft Impactor)
Hydrataatioreaktio	Sementin reaktio veden kanssa, jonka seurauksena sementti sitoutuu ja kovettuu.
Hydraulinen sideaine	Sideaine, joka reagoidessaan veden kanssa sitoutuu ja kovettuu. Esim. sementti.
In-situ-massastabilointi	Työkohteessa tapahtuva maaperän stabilointi paikalleen.
Iskumurskaus	Murskauksessa kivi murskataan iskemällä se pyörivää vasaraa vasten.

Iskunpituus	Kartiomurskaimilla on avoimen ja suljetun puolen asetusten välinen erotus
Katkaistu lajite	Murskausprosessin lopputuote, josta on seulomalla poistettu liian pienet ja suuret raekokojakeet.
Kutous	Mineraalien yhteenliittymistapa. Kutouksella kuvataan, kuinka mineraalit ovat liittyneet toisiinsa. Mineraalit voivat liittyä toisiinsa esimerkiksi suorien ja tasaisten tai särmikkäiden ja epätasaisten pintojen kautta. Kutous vaikuttaa kiven lujuuteen.
Lajite	Tiettyä raekokoa noudattava murskausprosessin lopputuote. Lajitteen raekoko ilmoitetaan minimiraekoon (d) ja maksimiraekoon (D) avulla, d/D.
Murskauspiiri	Murskausvaiheista muodostuvan prosessin kuvaus. Murskauspiiri voi olla avoin tai suljettu, jolloin lopputuotekokoa suurempi materiaali palautetaan uudelleen murskattavaksi. Kivi kiertää murskauspiirissä niin kauan, kunnes se on lopputuotekokoinen. Avoimessa murskauspiirissä kiveä murskataan vain kerran.
Murskaussuhde	Murskaimeen tulevan syötteen ja lopputuotteen maksimiraekokojen välinen suhde.
Nollapohjainen lajite	Murskausprosessi lopputuote, joka sisältää myös tuotannossa syntyvän hienoaineksen.
OSS-asetus	Leuka-, kara- ja kartiomurskainten avoimen puolen asetus. Määrää suljetun puolen asetuksen kanssa kartion murskaussyklin laajuutta. (Open-Side Setting)
Potsolaaninen sideaine	Sideaine, joka reagoi maa-aineksen sisältämien mineraalien kanssa sitoen ja lujittaen maa-ainesta. Esim. kalkki.
Puristumurskaus	Kivi murskataan puristamalla sitä kahden metallipinnan välissä.
Rikotus	Murskaimen kitaan ylisuurten kivien, rikkojen, pienentämistä esimerkiksi iskuvasaran avulla tai räjäyttämällä.
Runkoaine	Stabiloinnilla parannettava maa-aines.
Sideaine	Stabiloinnissa runkoaineeseen sekoitettava materiaali, joka reagoi runkoaineen veden kanssa hydraulisesti tai runkoaineen maapartikkelien kanssa potsolaanisesti kovettaen stabiloitua massaa.
Syvästabilointi	Pohjamaan ominaisuuksien parantamista sekoittamalla sen sekaan sideainetta. Syvästabilointimenetelmiä ovat pilaristabilointi ja massasyvästabilointi.

TBT-yhdiste	Tributyylitina-yhdiste, jota esiintyy paljon esimerkiksi satama-alueiden ruopattavissa sedimenteissä. TBT:n pitoisuudelle on määritetty raja-arvo, jonka ylittyessä materiaali luetaan pilaantuneeksi.
Tukahduttava syöttö	Murskaimen kammio pidetään mahdollisimman täynnä koko murskauksen ajan. Parantaa varsinkin leukamurskaimen kapasiteettia.
Täyteaine	Stabiloinnissa lisättävä kivennäismaa-aines, jolla pyritään parantamaan runkoaineen ominaisuuksia.
VSI-murskain	Iskumurskaustekniikalla toimiva pysty akselinen keskipakoismurskain. (Vertical Shaft Impactor)

1 JOHDANTO

Kivituhka on raekokojakautumaltaan katkaistujen kiviainestuotteiden, sepeleiden, jalostuksen yhteydessä syntyvä murskaustuote. Kivituhka erotetaan murskausprosessin loppuvaiheilla muista lopputuotteista seulomalla. Kivituhkan määritelmä ei ole täysin yksiselitteinen; kivituhkana pidetään katkaistujen kiviaineslajitteiden tuotannossa syntyvää nollapohjaista murskaustuotetta, jonka maksimiraekoko on 2...6 millimetriä. Yleisimmin tuotetaan 0/2 mm, 0/3 mm tai 0/6 mm kivituhkaa. Joissakin tapauksissa voidaan kivituhkaksi määritellä karkeampia tuotteita, kuten maksimiraekooltaan 8 mm murskaustuote. Kiviainestuottajan kannalta kivituhka on ongelma, koska nykyisin sille ei ole sellaisenaan merkittäviä käyttökohteita.

Katkaistuja kiviaineslajitteita valmistetaan pääasiassa asfaltin ja betonin tuotannon tarpeisiin, mutta niitä tuotetaan myös talvikunnossapidon, lähinnä liukkaudentorjunnassa käytetyn hiekoituksen, tarpeisiin. Syntyvän kivituhkan määrät voivat paikallisesti olla hyvinkin suuria suhteessa menekkiin. Esimerkiksi asfalttikiviainesten tuotannossa kivituhkaa 0/3 voi syntyä 40 prosenttia kokonaistuotannosta, kun halutuinta lopputuotelajitetta 8/16 saadaan saman verran. Ongelmallisimpia kivituhkan syntypaikkoja ovatkin juuri ensiluokkaisen asfalttikiviaineksen tuotantopaikat, joissa tuotantokustannukset nostavat kiviaineksen hintaa ja etäisyys käyttöpaikkoihin on suuri. Tällöin kivituhkaa jääkin usein ylijäämämateriaalina varastoon tuotantopaikalle. Kiviainesten käyttö on merkittäväntä alueilla, joissa rakentaminen on voimakasta ja aiheuttaa tällöin myös kysyntää kiviaineksille. Lähempänä kiviainesten keskeisiä käyttöalueita kivituhkallekin voidaan löytää käyttökohteita. Kivituhkan osalta tuotteen saatavuus ja kysyntä eivät usein kohtaa.

Suomessa vuodenajat, erityisesti talvi, rajoittavat kivituhkan hyödyntämistä. Kivituhkan hienoainespitoisuus on sen verran korkea, että materiaali on usein routivaa. Nykyisin kivituhkaa hyödynnetään toissijaisissa käyttökohteissa, joissa materiaalin routiminen ei aiheuta haittaa muille rakenteille. Kivituhkaa käytetään putkikaivantojen täytöissä, kuten vesijohtojen ja kaukolämpöputkien sekä kaapeleiden asennus- ja ympäristäytymateriaalina, ja luiskien täyttö- ja pintamateriaalina. Kivituhkaa hyödynnetään myös viherrakentamisessa ja liikuntapaikkarakentamisessa kulutuskerrosmateriaalina. Asfaltti- tai betonikiviaineksena kivituhkaa ei juuri käytetä.

Viime vuosikymmeninä kiviainestuotannossa syntyvä hienoaines ja kivituhka on havaittu ongelmaksi myös muualla maailmassa. Esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Isossa-Britanniassa on selvitetty kansallisella tasolla kiviainestuotannossa sekä vuosittain syntyvän että käytettävän hienoaineksen ja kivituhkan määrää. Tuotettavat määrät ovat

usein merkittävästi hyödynnettäviä määriä suurempia. Yhdysvalloissa tutkimus keskittyi kiviainestuotannossa syntyvän hienoaineksen ja hienomman kiviaineksen, jonka maksimirakeisuus on pienempi kuin 3/8” eli noin 10 mm, hyödyntämiseen. Isossa-Britanniassa tutkittiin maksimiraekooltaan 4 mm kivituhkan hyödyntämistä. Molemmissa tutkimuksissa pyrittiin löytämään mahdollisia käyttökohteita hienolle kiviainekselle. (Hudson et al. 1997; Manning 2004; Mitchell et al. 2008)

Kivituhkan hyödyntämistä ja tuotteistamista on tutkittu myös Suomessa. Juha Uotila on selvittänyt diplomityössään kivituhkalisäyksen vaikutuksia turpeen ominaisuuksiin. Kivituhkan havaittiin parantavan turpeen rakennettavuusominaisuuksia. Se esimerkiksi pienensi turpeen kokoonpuristumista ja kasvatti vedenläpäisykykyä. Kivituhkalla voitaisiin parantaa heikkolaatuisen maaperän rakennettavuusominaisuuksia. (Uotila 2004)

Myös Metsäntutkimuslaitos on testannut kivituhkan ja puunpoltossa syntyvän lentotuhkan seoksen hyödyntämismahdollisuuksia metsätiekohteissa. Keskeneräisessä tutkimuksessa on seurattu koetiealojen kantavuutta pudotuspainolaitteella tehtävien mittausten avulla. Kivituhkan ja puunpolton tuhkan seoksilla on saavutettu parempia kantavuuksia kuin pelkästään kivituhkalla tai tuhkalla valmistetuilla koetiealoilla. Toistaiseksi keskeneräinen tutkimus raportoidaan syksyllä 2014. (Metla 2014)

Tässä opinnäytetyössä selvitetään kivituhkan hyödyntämismahdollisuuksia massa- ja prosessistabiloinnin täyteaineena. Massastabilointi on pohjanvahvistusmenetelmä, jossa maa-aineksen joukkoon lisätään sideainetta, joka reagoi maaperän mineraalien tai veden kanssa muodostaen kestävämmän ja lujemman kerroksen. Massastabiloinnissa sideainereseptiikka ja stabiloitavuustutkimukset ovat olennainen osa työkohteiden suunnittelua ja valmistelua. Tässä opinnäytetyössä selvitetään tavanomaisten stabiloitavuustutkimusten avulla, voidaanko stabiloinnin runkoaineen eli heikkolaatuisen maaperän laatua parantaa kivituhkan avulla ja vähentääkö kivituhkan lisäys esimerkiksi sideaineen tarvetta. Tutkimuksessa stabiloitavana materiaalina käytetään sekä savipitoista ruoppausmassaa että humuspitoista turvetta. Keskeisimpänä tutkimusmenetelmänä käytetään koekappaleiden puristuslujuusmäärittämiä, joilla selvitetään kivituhkan vaikutusta puristuslujuustuloksiin. Turpeesta valmistettujen koekappaleiden osalta seurataan myös koekappaleiden kokoonpuristumista lujittumisen aikana, kun koekappaleisiin kohdistetaan staattinen kuormitus.

Laboratoriotutkimusten ja massa- ja prosessistabilointimenetelmien lisäksi tässä opinnäytetyössä kuvataan myös kiviainesten tuotantoprosessi kalliosta murskauksen lopputuotteeksi ja selvitetään murskausprosessin ja kallioperän laadun vaikutuksia syntyvän kivituhkan määrään. Lisäksi pohditaan ja selvitetään kivituhkan nykyisiä käyttökohteita sekä kivituhkan jatkojalostus- ja tuotteistusmahdollisuuksia.

2 KIVITUHKA KIVIAINESTUOTANNON SIVUTUOTTEENA

Kiviaineksilla tarkoitetaan soraa, hiekkaa ja kalliomurskeita, joita käytetään joko jalostettuina tai sellaisenaan. Suomessa kiviaineksia kuluu noin 90 miljoonaa tonnia vuosittain rakentamiseen ja olemassa olevien rakenteiden ylläpitoon. Yli puolet käytetyistä kiviaineksista on jalostettu murskaamalla kalliosta. Kalliokiviainesten osuus on lisääntynyt viimeisen vuosikymmenen aikana. Kalliokiviaineksen kasvaneeseen osuuteen on vaikuttanut eniten se, että pohjavesiensuojelu on rajoittanut merkittävien pohjavesialueiden hyödyntämistä maa-ainesten ottotarkoituksiin. Lisäksi kalliokiviaineksen louhinta- ja murskaustekniikat ovat kehittyneet entistä taloudellisemmiksi. Kallio- ja kierrätyskiviaineksen osuuden arvioidaan lisääntyvän lähivuosina vielä merkittävästi. (Rintala 2013, SYKE 2010)

Suomessa suurin kiviainesten käyttökohde on liikenneverkkojen, kuten teiden, katujen ja rautateiden, rakentaminen ja ylläpito. Lisäksi kiviaineksia käytetään rakenteiden ja rakennusten perustuksiin. Suomessa talviolosuhteet lisäävät huomattavasti rakentamisen kustannuksia ja kiviainesten kulutusta, koska rakenteet täytyy suojata routaa vastaan. Betonin ja asfaltin valmistuksessa käytetään myös jalostettuja ja laadukkaita kiviaineksia. (SYKE 2010)

Kiviainesten ottotoiminta on luvanvaraista toimintaa. Kiviainesten ottamistoiminta vaatii maa-aineslain (555/1981) mukaisen maa-ainestenottoluvan. Lupaa haetaan kunnan toimivaltaiselta viranomaiselta, esimerkiksi rakennus- tai ympäristölautakunnalta. Kiviainesten louhinta ja murskaus vaativat ympäristönsuojelulain (86/2000) mukaisen ympäristöluvan. Ympäristölupaa voi hakea kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselta tai erityistapauksessa aluehallintovirastolta. Lisäksi kiviainestuotantoa ohjaavat myös laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä (468/1994), vesilaki (264/1961) ja edellä mainittuihin lakeihin liittyvät asetukset ja muut säädökset. (SYKE 2010, Ympäristöministeriö 2009)

Ympäröivä maankäyttö ja rakentaminen, teknisesti sopivan kiviaineksen saatavuus ja lupaprosessien venyminen rajoittavat kiviainestuotantoa. Lainsäädännön tavoite on turvata kiviaineshuolto ympäristön kestävästä kehitystä tukevalla tavalla. Arvokkaat geologiset luontotyypit ja pohjavesialueet halutaan säilyttää mahdollisimman luonnontilaisina. Maa-aineksia tulisi käyttää säästävästi ja taloudellisesti niin, että aineksia kierrätettäisiin ja hyvälaatuisia aineksia ei tuhlattaisi toisarvoisiin käyttökohteisiin. Tulevaisuudessa onkin tärkeää selvittää maankäyttöön liittyvät ristiriidat, yhdenmukaistaa lupakäsittelyä ja huolehtia ottamisalueiden jälkihoidosta. (Ympäristöministeriö 2009)

2.1 Kiviainestuotteiden valmistusprosessi

Kiviainesten tuotantoprosessiin vaikuttavat merkittävästi kiviaineksen ottoalueen laatu ja valmistettaville tuotteille asetetut vaatimukset. Sora- ja hiekka-alueilla ei jouduta tekemään merkittävää irrotustyötä, kun taas kallioalueilla kiviaines joudutaan ensin irrottamaan kalliosta louhimalla. Murskauslaitoksessa kiviaines murskataan murskauskalustolla lopputuotteeksi. Tyypillinen murskauslaitos on kolmivaiheinen ja sen tuotantokapasiteetti vaihtelee 150-400 t/h välillä. Karkeita lopputuotteita murskattaessa laitoksen kapasiteetti voi olla suurempi 500 t/h. (ASKO 2006; Hakapää & Lappalainen 2011)

Suomessa kiviainestuotannon käytössä on pääasiassa liikuteltavia pyöräalustaisia murskauslaitoksia tai tela-alustaisia track-tyyppisiä murskauslaitoksia, koska louhokset ovat usein pieniä ja niissä murskataan melko vähäisiä määriä kerrallaan muutaman viikon tai kuukauden ajan vuodessa. Suurimmissa louhoksissa voidaan käyttää myös kiinteitä murskauslaitoksia. Murskauslaitokset vaativat energiaa toimiakseen, joka tuotetaan useimmiten joko polttomootorilla tai sähköllä. Sähkö voidaan tarpeen vaatiessa tuottaa aggregaatilla tai liittymällä verkkovirtaan. (Hakapää & Lappalainen 2011)

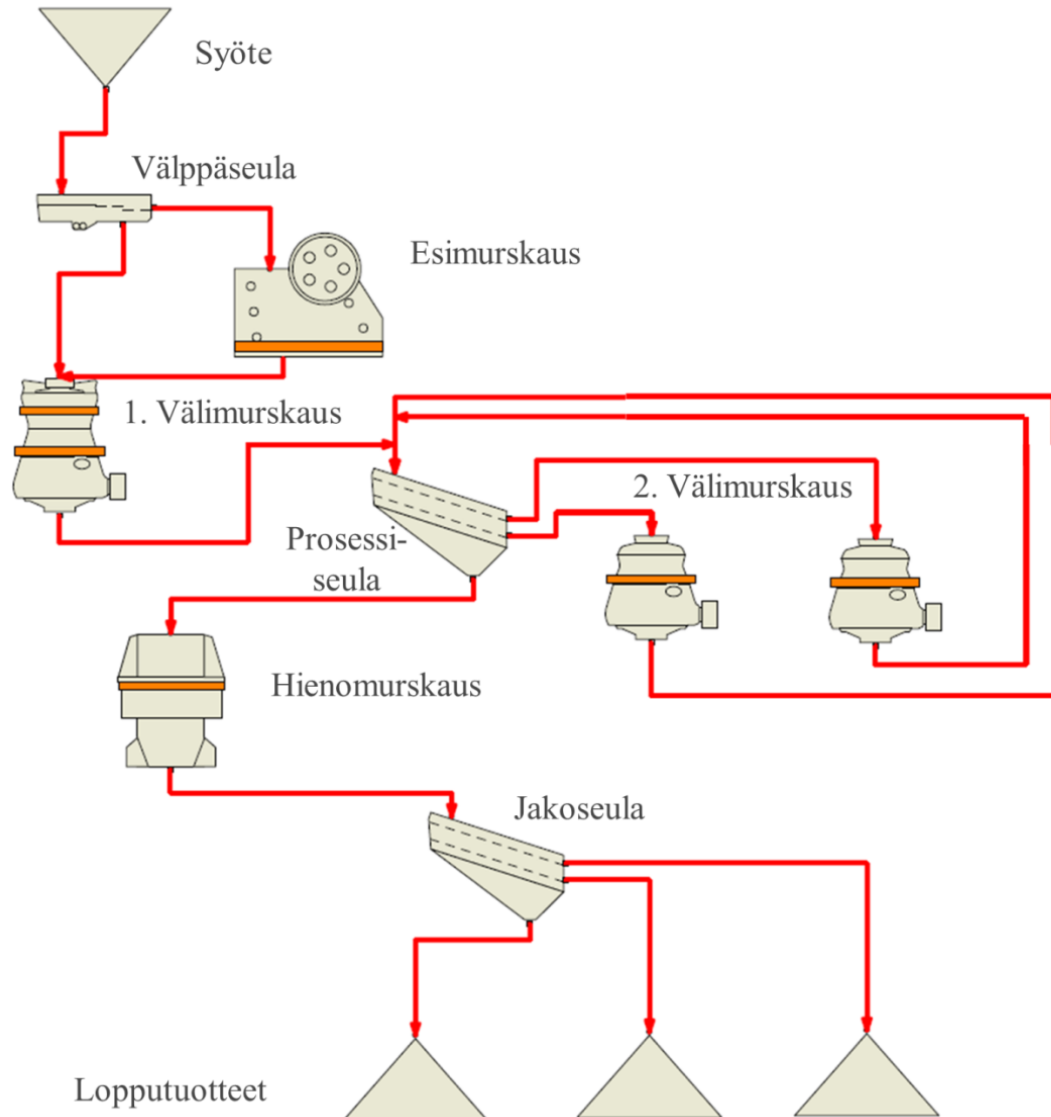
2.1.1 Kiviaineksen irrotus

Suomessa kalliokiviaineksen irrotuksessa käytetään pengerialouhintamenetelmää. Kiviaines irrotetaan poraus-räjäytysmenetelmällä. Louhinta aloitetaan penkereen yläosasta ja se etenee tasapaksuina penkereinä tasoittain alaspäin. Paljastettuun kallioon porataan reikä päältätyöväällä iskuporakoneella. Porauskalusto on usein tela-alustainen, jolloin sen liikuttaminen onnistuu epätasaisellakin kallion pinnalla. Porareikien määrä ja niiden väliset etäisyydet määräytyvät louhittavan kallion laadun ja penkereen korkeuden perusteella. Lisäksi yhdellä kerralla irrotettavan materiaalin määrä, käytettävä räjähdysaine ja haluttu lohkokoko vaikuttava reikien määrään ja etäisyyksiin. Reikä panostetaan pohjapanoksella ja räjähdysaineella ja yhdistetään räjäytyskuntoiseksi kentäksi nallien ja sytytyslankojen avulla. Räjähdysainemäärään vaikuttavat yhdellä kerralla irrotettavan kallion määrä ja laatu. (Hakapää & Lappalainen 2011)

2.1.2 Murskausprosessi

Kiviaineksen irrotuksen jälkeen louhetta, hiekkaa tai soraa voidaan jalostaa lopputuotteeksi murskaamalla ja seulomalla. Murskaukseen kuuluu usein kahdesta neljään vaihetta: esimurskaus, välimurskaukset ja hienomurskaus. Yhdellä murskauksella saavutetaan harvoin haluttua lopputuotekokoa, koska yhdessä murskausvaiheessa murskaussuhde on 5:1 - 6:1 eli syötteen maksimiraekoko on viisintai kuusinkertainen murskauskerran lopputuotteen raekokoon verrattuna. Näin ollen murskausketju tai -piiri koostuu useammasta eri murskausvaiheesta. Kuvassa 1 on esitetty Metson BRUNO Process Simulation -ohjelmistolla tehty

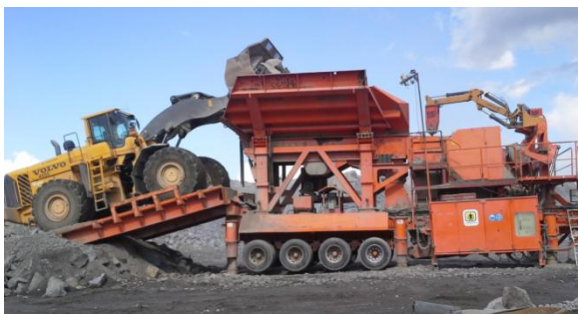
murskausprosessikaavio. Kyseisessä murskausprosessissa tuotetaan kolmea kiviaineslajitetta, joista kaksi on katkaistuja lajitteita ja kolmas jakoseulan alite. Murskausprosessi muodostuu syöttimestä ja välppäseulasta, esimurskaimesta, välimurskaimesta, prosessiseulasta, rinnakkaisista välimurskaimista, hienomurskaimesta sekä jakoseulasta. Murskaimet ja seulat yhdistetään kuljettimien avulla. Kuljettimien ja syöttimien avulla voidaan säädellä murskausprosessin kulkua ja nopeutta. (Hakapää & Lappalainen 2011)



Kuva 1 Murskausprosessikaavio (kuva: Metso BRUNO Process Simulation -ohjelmisto 2013)

Irrotuksessa syntynyt louhe kannetaan pyöräkuormaajalla, kaivinkoneella tai dumperilla syöttimelle, joka annostelee raaka-aineen tasaisesti esimurskaimelle (kuva 2a). Syöttimen avulla prosessi pysyy tasapainoisena ja lopputuotteen laadunvaihtelut vähäisinä. Syötteen hienorakeisempi osa voidaan ohjata välppäseulalla esimurskaimen ohi. Esimurskaimena käytetään usein leukamurskainta, jonka kiinteän ja liikkuvan leuan välissä materiaali puristuu rikki. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää esikaramurskainta.

Esimurskauksen tehtävänä on pienentää syötämateriaalin kokoa niin, että se mahtuu jatkokäsittelyssä käytettäviin laitteistoihin. Esimurskauksessa murskaussuhde eli murskaimelle tulevan ja lähtevän aineksen raekoon välinen suhde on tavallisesti 5:1 - 6:1. Leukamurskaimilla syötteen suositeltu maksimiraekoko on noin 80 prosenttia syöttöaukon syvyydestä. Käytännössä syötettävän louheen koko on 500 - 700 mm. Esimurskain voi tukkeutua, jos sitä syötetään ylisuurilla kivillä. Esimurskain on usein varustettu kauko-ohjattavalla puomilla, johon on kiinnitetty iskuvasara rikkojen hajottamiseksi. Rikot pyritään erottelemaan syötteestä ennen syöttämistä. Rikotukseen käytetään kaivinkoneeseen kiinnitettävää iskuvasaraa. (Mitchell et al. 2008; Hakapää & Lappalainen 2011)



Kuva 2 a) Kiviaineksen syöttö esimurskaimelle, b) Välikartiomurskaimet (kuva: Riina Rasimus 2013)

Välimurskauksessa jatketaan kiviaineksen murskausta (kuva 2b). Prosessista riippuen voidaan käyttää useampia välimurskausvaiheita. Välimurskaimena käytetään usein kara- tai kartiomurskaimia. Materiaali murskautuu, kun se puristuu toistuvasti oskilloivaan akseliin kiinnitetyn sisäkartioiden, manttelin, ja ulkokuoren kiinteän kartion välissä tai muita murskattavia partikkeleita vasten. Välimurskauksen tavoite on valmistella keskeneräistä tuotetta hienomurskausta varten tai tuottaa karkeita murskaustuotteita mahdollisimman alhaisin kustannuksin. Käytettävä murskaussuhde vaihtelee täysin muun prosessin ja halutun lopputuotteen mukaan ollen 5:1 - 2:1. (Mitchell et al. 2008; Hakapää & Lappalainen 2011)

Viimeisellä murskausvaiheella, hienomurskauksella saavutetaan lopputuotteen laatu. Hienomurskauksella eli kuutioinnilla voidaan parantaa kiviaineksen muotoarvoa ja lujuusominaisuuksia. Kuutiointia hyödynnetään pääasiassa vain asfalttikiviainesten tuotannossa. Kartio- ja iskumurskaimet sopivat parhaiten tähän työvaiheeseen. Hienomurskauksessa käytetään usein pientä murskaussuhdetta, esimerkiksi 2:1 tai 3:1. Pieni murskaussuhde parantaa lopputuotteen muotoa ja lujuusominaisuuksia. Taulukossa 1 on esitetty kussakin murskausvaiheessa tyypillisimminkin käytettävät murskaimet sekä syöttömateriaalin ja lopputuotteen koot. Murskaintyyppit on esitelty tarkemmin kappaleessa 2.1.3. (Mitchell et al. 2008; Hakapää & Lappalainen 2011)

Taulukko 1 Eri murskausvaiheissa tyypillisimminkin käytettävät murskaimet ja tavoitellut lopputuotekoot (mukaan Mitchell et al. 2008)

Murskausvaihe	Murskaintyyppi	Syötteen maksimiraekoko [mm]	Lopputuotteen maksimiraekoko [mm]
Esimurskaus	Leukamurskain Karamurskain	700 - 1000	100 - 300
Toinen vaihe (Välimurskaus)	Kartiomurskain HSI-murskain Leukamurskain (harvoin)	100 - 250	20 - 100
Kolmas vaihe (Välimurskaus)	Kartiomurskain VSI-murskain	14 - 100	10 - 50
Neljäs vaihe (Hienomurskaus)	VSI-murskain Kartiomurskain	10 - 40	10 - 20

Eri murskausvaiheissa voidaan hyödyntää seuloja jakamaan erikokoiset rakeet toisistaan tai tasapainottamaan murskausprosessia. Yksinkertaisimmillaan seula on vain säleikkö, joka koostuu tasavälein sijoitetuista vierekkäisistä tangoista, joiden läpi seulan aukkokokoa pienemmät kivet putoavat. Staattisia seuloja hyödyllisempiä ovat dynaamiset täryseulat, jotka värähtelevät tai tärisevät. Seulojen sisällä seulan verkon aukkokokoa pienemmät materiaalit putoavat seuraavalle tasolle aukkokokoa suurempien kivien liikkeessä tärinän myötä kuljettimille. Seulatasoja voi olla useampia. Seulojen verkkomateriaalina käytetään metallia, kumia tai polyuretaania. Tuotannossa seulat jaetaan prosessi-, jako- ja välppäseuloihin. Välppäseulojen avulla riittävän hienorakeinen aines voidaan erottaa louheesta jo ennen murskausvaihetta, jolloin murskaimen kapasiteetti kasvaa. (Hakapää & Lappalainen 2011)

Prosessiseulaa käytetään murskausprosessin tasapainottamiseen eri murskausvaiheiden välissä (kuva 3a). Prosessiseulan avulla muodostetaan tarvittaessa suljettu murskauspiiri, jossa lopputuotekokoa suuremmat kivet ohjataan seulalta uudelleen murskattaviksi ja lopputuotekokoon murskattu kiviaines voidaan siirtää prosessin seuraavaan vaiheeseen. Prosessiseulan alimman seulaverkon aukkojen koko määrittää lopputuotteen maksimiraekoon (kuva 1 - murskausprosessikaavio). Jakoseulaa käytetään prosessin päätteeksi, kun halutaan erottaa lopputuotteen eri lajitteet toisistaan. Kuvan 1 mukaisessa murskausprosessissa lopputuotekokoinen murske jaetaan jakoseulalla kahteen katkaistuun lajitteeseen ja seulan alitteeseen. Seulottu kiviaines siirtyy kuljettimien mukana eri kasoihin raekoon mukaan. (Hakapää & Lappalainen 2011)

Murskattu lopputuote siirretään pyöräkuormaajalla varastokasoihin (kuva 3b). Tuotteiden varastoinnissa pyritään estämään tuotteiden sekoittuminen ja lajittuminen. Lajittumisen ehkäisemiseksi materiaali tulisi varastoida noin metrin paksuisina kerroksina ja kerroksien väliin tulisi jättää puoli metriä leveä jätjänpolku.

Kasavarastoinnin tehtävä on tuotteen säilyttämisen lisäksi tasata lopputuotteen laatuvariaatioita. (Tielaitos 1999; Asfalttinormit 2011)



Kuva 3 a) Prosessiseula, b) Valmiin lopputuotteen siirto pyöräkuormaajalla varastokasalle (kuvat: Riina Rasimus 2013)

Murskausketjun kokoon vaikuttaa eniten halutut lopputuotteet. Maksimiraekooltaan suuria eli karkeita murskeita tuottaessa välttämättömien vaiheiden määrä on pinempi. Yksinkertaisimmillaan murskauslaitos voi muodostua yhdestä leukamurskaimesta, kun syöte halutaan murskata sopivaan kuljetuskokoon. Useamman vaiheen käyttäminen lisää murskaustuotteen laadun tasaisuutta. Maksimiraekooltaan pienempien ja hienempien tuotteiden valmistus vaatii useamman välivaiheen. Lisäksi useampaa murskausvaihetta käytetään, kun lopputuotteen muodolla on merkitystä. Laitoksen teho pienenee huomattavasti, kun murskausvaiheiden määrä kasvaa ja murskataan hienompia lajitteita. Kiven lisämurskaus nostaa aina murskauskustannuksia, joten materiaali halutaan mahdollisimman nopeasti ulos prosessista. (Eloranta 1995)

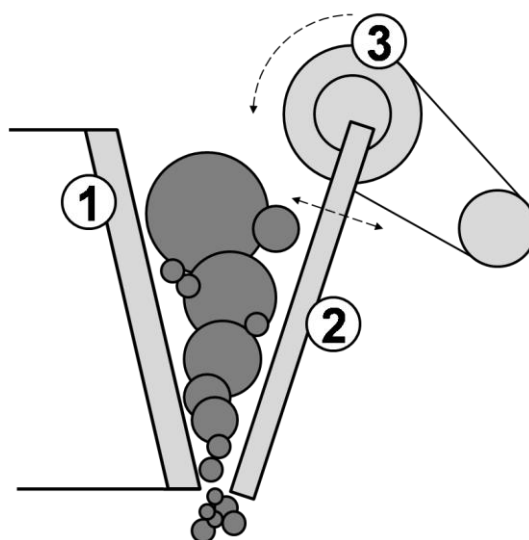
2.1.3 Käytettävät murskaintyytit sekä niiden toimintaperiaate

Kiveä voidaan murskata iskemällä tai puristamalla. Iskumurskauksessa kivi särjetään pyörivän vasaran avulla. Puristumurskauksessa kivi puristuu kahden metallipinnan välissä, kunnes se murskautuu. Murskaustekniikan valintaan vaikuttaa eniten kiven ominaisuudet ja haluttu lopputuote. Iskumurskaus soveltuu paremmin pehmeille, vähän kuluttaville kiville. Puristumurskaus sopii kovien kivien murskaukseen. Autogeenisellä murskautumisella tarkoitetaan kivien välisistä iskuista ja puristuksesta aiheutuvaa murskautumista. Kyseinen ”rock-on-rock”-murskaus on tavoiteltavaa, sillä siten murskainten kulutusosien kuluminen vähenee ja lopputuotteen muoto on edullisempi. (Mitchell et al. 2008; Hakapää & Lappalainen 2011)

Iskumurskaimia ovat vasaramyllyt ja iskupalkkimurskaimet. Iskupalkkimurskaimet siirtävät nopeasti iskuenergian kivimateriaaliin. Kyseisiä murskaimia on saatavilla sekä pystyakselisina keskipakoismurskaimina (VSI eli Vertical Shaft Impactor) ja vaakakselisina iskupalkkimurskaimina (HSI eli Horizontal Shaft Impactor). VSI-murskaimessa materiaali syötetään roottorin keskelle. Roottori pyörii pystyakselin ympäri nopeasti. Materiaali poistuu roottorissa olevien aukkojen kautta. Materiaali murskautuu osuessaan vasten toisia kiviä tai murskaimen rungon kulutuspinnoja vasten. VSI-murskaimet sopivat erinomaisesti kovien kivien hienomurskaukseen, kun tavoitellaan kuutiomaista muotoa. HSI-murskaimessa roottori pyörii vaakakselinsa

ympäri. Roottorin vasarat ja palkit rikkovat syötemateriaalia nopean pyörimisliikkeen aiheuttamalla iskuilla. Kivet murskautuvat edelleen, kun ne törmäävät toisiinsa tai murskaimen sisäosiin. HSI-murskaimia käytetään vähemmän kuluttavassa murskaustyössä, kuten asfaltti- ja betonijätteen murskauksessa. (Hakapää & Lappalainen 2011)

Puristusmurskaimia ovat leuka-, kara- ja kartiomurskaimet. Periaatteena on, että kiveä puristetaan kahden metallipinnan välissä, kunnes se murtuu. Leukamurskaimissa kiven murtaminen tapahtuu kiinteän ja liikkuvan leuan välissä. Toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4. Liikkuva leuka liikkuu joko heilurin mukaan tai epäkeskoakselin liikkeen ja työnninlaatan vaikutuksesta, jolloin materiaaliin kohdistuu puristusta sen tullessa sisään ja poistuessa. Leukamurskaimen käyttö vaatii aina syöttimen, sillä leukamurskain toimii parhaiten tukahduttavan syötön alla. Syöttimellä varmistetaan murskaimen tasainen syöttö. Tällöin kapasiteetti on parhaimmillaan ja materiaali rikkoutuu tasaisesti ja järjestelmällisesti. Syötteen maksimikoko on noin 80 prosenttia syöttöaukon syvyydestä. Suljetun puolen asetus määrittää leukamurskaimen lopputuotteen enimmäiskoon. Leukamurskaimia käytetään pääasiassa vain esimurskauksessa. (Mitchell et al. 2008; Hakapää & Lappalainen 2011)

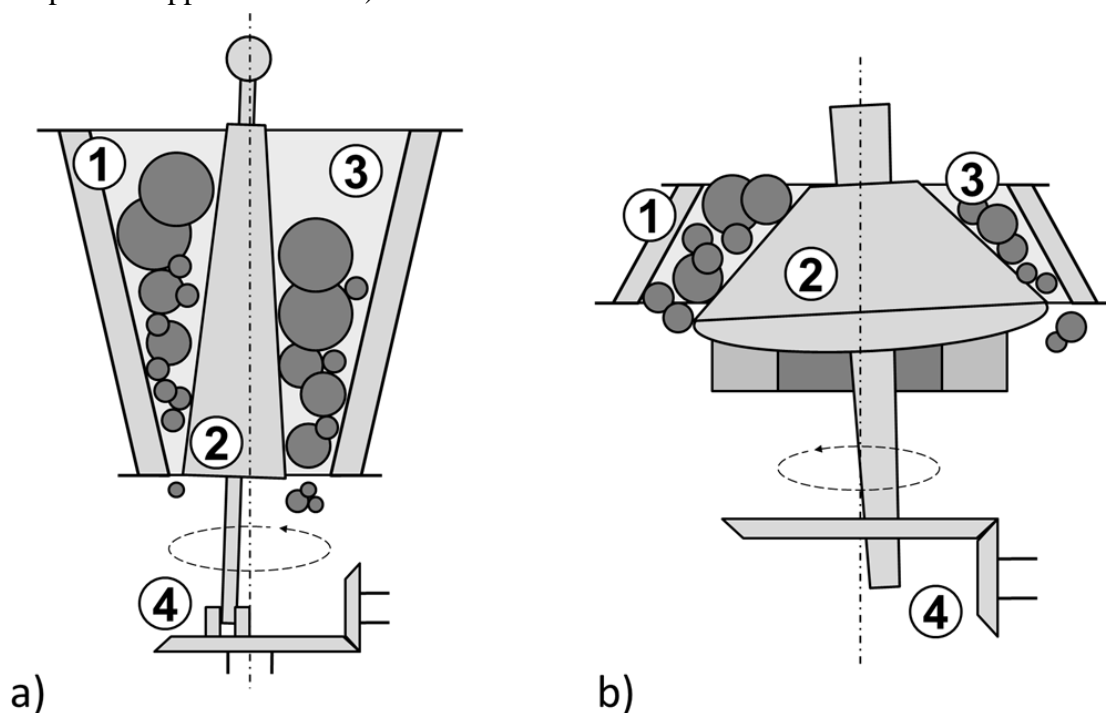


Kuva 4 Leukamurskaimen toimintaperiaate: syöte murskautuu kiinteän leuan (1) ja liikkuvan leuan (2) välissä. Liikkuva leuka liikkuu epäkeskoakselin (3) liikkeen vaikutuksesta. (kuva: Riina Rasimus 2014)

Kara- ja kartiomurskaimilla syötemateriaali murskataan murskauskammiossa ulkoisen kiinteän kartion ja sisäisen, kara-akseliin kiinnitetyn liikkuvan kartion välissä. Kara-akselia pyöritetään epäkeskoakselilla, josta kara-akseli saa oskilloivan liikkeensä. Oskilloiva liike saa kartion pään liikkumaan OSS- (avoimen puolen) ja CSS- (suljetun puolen) asetuksen välillä. Avoimen ja suljetun puolen asetusten välinen etäisyys on iskunpituus. Murskainten kapasiteetti riippuu suljetun puolen asetuksesta, kartion halkaisijasta ja iskusta. Syötemateriaali siis rikkoutuu, kun siihen kohdistuu toistuvaa puristusta ja vetoa ympäröivistä kulutuskartioista ja toisista partikkeleista. Materiaali ei pääse murskaimen läpi ennen, kuin se on murtunut riittävän pieniksi kappaleiksi.

Manttelin ja ulkokartion kulutuspinnot kuluvat murskauksessa ja niitä täytyy vaihtaa tarvittaessa. (Mitchell et al. 2008; Hakapää & Lappalainen 2011)

Karamurskaimen liikkuvan kartion akseli on laakeroitu molemmista päistä; kartiomurskaimella akseli tai kartio on laakeroitu ainoastaan alhaalta. Karamurskain pystyy käsittelemään karkeampaa syötettä, koska sen kammio on pystympi. Suuren syöttöaukon ja lyhyen yhdensuuntaisen murskauskammion takia karamurskaimella on suuri kapasiteetti. Karamurskain onkin edukseen, kun vaaditaan suurta kapasiteettia esimurskausvaiheessa, mutta sitä voidaan käyttää myös välimurskauksen alkuvaiheissa. Kartiomurskaimen yhdensuuntainen murskauskammio on pitkä, jolloin murskaimen kapasiteetti on vastaavasti pienempi ja murskaussuhde suurempi. Kara- ja kartiomurskainten toimintaperiaate on esitetty kuvissa 5a ja b. (Mitchell et al. 2008; Hakapää & Lappalainen 2011)



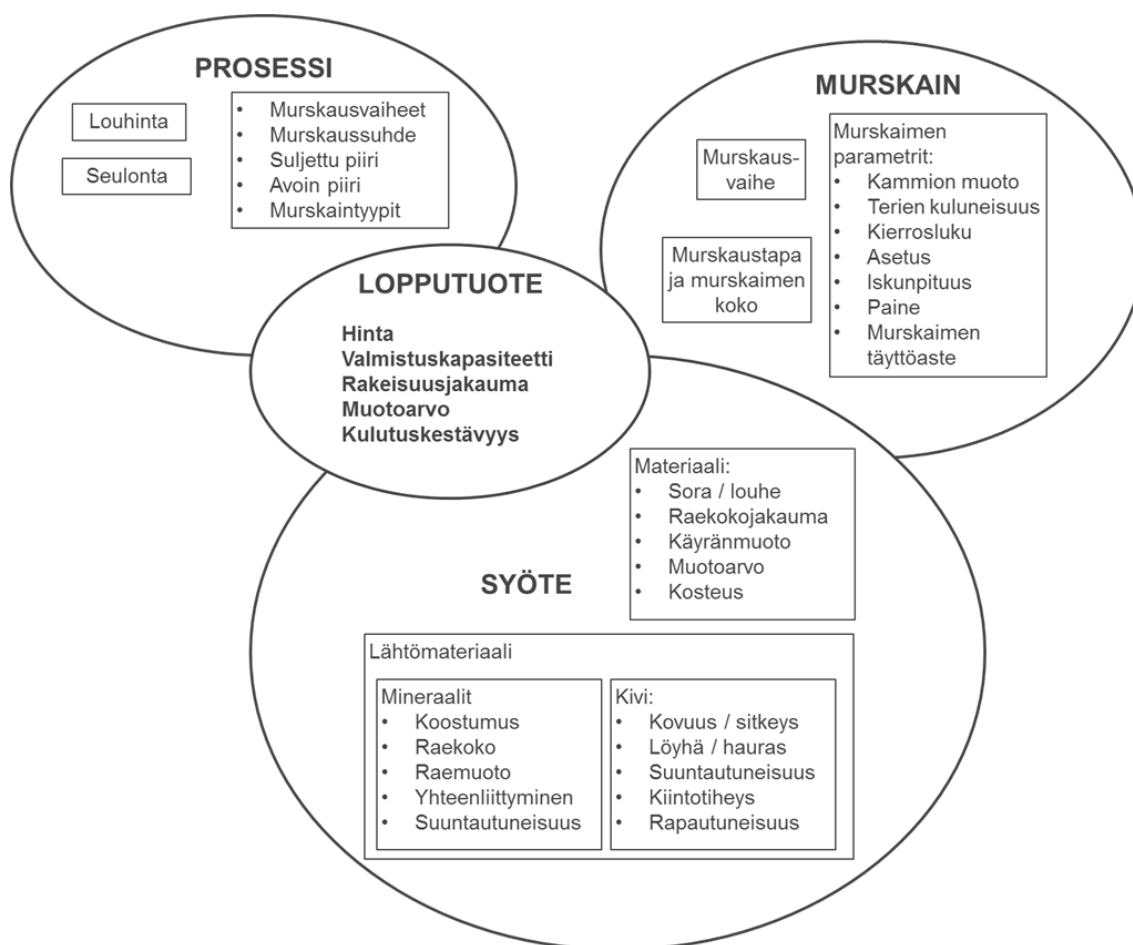
Kuva 5 a) Karamurskaimen toimintaperiaate; b) Kartiomurskaimen toimintaperiaate. Kiviaines murskautuu kiinteään ulkoisen kartion (1) ja liikkuvan sisäkartion (2) välissä. Karamurskaimella oskilloiva akseli (4) on laakeroitu molemmista päistä; karamurskaimilla oskilloiva akseli (4) on laakeroitu vain alhaalta. Karamurskaimen murskauskammio (3) on pystympi kuin kartiomurskaimella, jolloin murskaussuhde ja kapasiteetti ovat suuremmat. (kuvat: Riina Rasimus 2014)

Karamurskainta käytetään esimurskauksessa, kun vaaditaan suurta kapasiteettia, kuten kaivoksissa. Sitä voidaan käyttää myös välimurskauksessa. Kartiomurskaimia käytetään väli- ja hienomurskauksessa. (Mitchell et al. 2008; Hakapää & Lappalainen 2011)

2.2 Kivituhkan muodostuminen ja murskaukseen vaikuttavat tekijät

Kivituhkalla tarkoitetaan hienoimpia kiviaineslajitteita, jotka syntyvät katkaistuja kiviaineksia valmistettaessa jakoseulan alitteena. Kivituhka -nimitystä käytetään Suomessa kiviaineslajitteista, joiden maksimirakeisuus on yleensä 2...6 millimetriä. Yleisimmin kivituhkaa tuotetaan raekoissa 0/2 mm, 0/3 mm ja 0/6 mm. Joissakin tapauksissa myös karkeampaa lajiketta, kuten KaM 0/8, voidaan kutsua kivituhkaksi. Kivituhkaa syntyy merkittäviä määriä, kun tuotetaan hyvälaatuisten asfalttikiviaineslajikkeita, betonikiviaineksia ja talvikunnossapidossa tarvittavia hiekoitussepeleitä.

Murskauksessa syntyvän hienoaineksen ja kivituhkan määrään vaikuttaa yleisesti murskaukseen vaikuttavat tekijät (kuva 6). Lopputuotteen hinta, valmistuskapasiteetti, rakeisuusjakauma, muotoarvo ja kulutuskestävyys määräytyvät murskattavan syötteen, murskausprosessin ja käytettävien murskainten parametrien perusteella (Ruuskanen 1999). Murskattavan materiaalin vaikutusta hienoaineksen syntyyn on käsitelty kappaleessa 2.2.1. Murskausprosessin sekä käytettävien murskainten vaikutusta syntyvän hienoaineksen määrään on käsitelty kappaleessa 2.2.2.



Kuva 6 Murskaukseen vaikuttavat tekijät (Ruuskanen 1999)

Kiviaineksen käyttökelpoisuus määräytyy pääasiassa kiven lujuuden ja tuotannon taloudellisuuden mukaan. Kiven täytyy olla riittävän lujaa ja kestävä, jotta sitä voidaan hyödyntää. Kiven mineraalikoostumus vaikuttaa paljon kiven mekaaniseen lujuuteen ja kulutuskestävyyteen. Kulutuskestävyyteen vaikuttaa myös muut kiviainestekijät, kuten kiven rakenne, mineraalien suuntautuneisuus sekä kiven rikkonaisuus ja rapautuneisuus. (Alkio & Vuorinen 1989)

Kestävän kehityksen periaatteiden mukaisesti parhaita kiviaineksia säästetään vaativimpiin käyttökohteisiin. Kiviainekselta vaadittavat ominaisuudet määräytyvät tarkemmin käyttökohteen mukaan. Kiviaineksen raekokojakauma sekä lujuus ja kestävyys ovat keskeisimpiä kiven käyttöön vaikuttavia tekijöitä. Joissakin käyttökohteissa on edullista, että kiven muoto on optimaalinen. (Uusinoka 1989; Eloranta 1995)

Halutun lopputuotteen ja raaka-ainekiven ominaisuudet vaikuttavat murskausprosessin suunnitteluun ja sen laajuuteen. Esimerkiksi kovemmat kivet vaativat useampia murskausvaiheita, koska ne murskautuvat helpommin litteiksi tai liuskeisiksi rakeiksi. Kuutiomainen muoto koville kiville saadaan hienomurskauksen avulla. Lisäksi kovemmat kivet ovat murskausprosessissa kuluttavampia. (Eloranta 1995)

Kiviainesten valmistuksen kustannukset ja hinta muodostuvat louhinnasta, murskauksesta ja kuljetusmatkasta. Murskaustoimintaan liittyvät kustannukset muodostuvat energiasta (polttoaineesta), kulutus- ja varaosista, palkoista, murskauslaitoksen siirroista ja koneinvestointeihin liittyvistä poistoista sekä kiven raaka-ainekustannuksesta. Murskauslaitoksen tarvitsema energiamäärä ja siirtojen määrä riippuvat murskauslaitoksen koosta. Haluttu lopputuote määrää tarvittavan murskausprosessin laajuuden. Lisäksi murskauksen määrä vaikuttaa kiviainesten hintaan. Mitä enemmän lopputuotetta tehdään, sitä suuremmalle erälle työmaan perustamiseen ja koneiden siirtoihin liittyvät kustannukset jakautuvat. Louhinta- ja murskauskustannukset ovat vertailukelpoisia eri tuotantopaikkojen välillä. Kuljetuskustannukset taas riippuvat lopputuotteen käyttökohteen sijainnista ja ovat kuljetusmatkaan sidoksissa. (Alkio & Vuorinen 1989)

2.2.1 Kiven ominaisuuksien vaikutus hienoaineksen ja kivituhkan syntymiseen

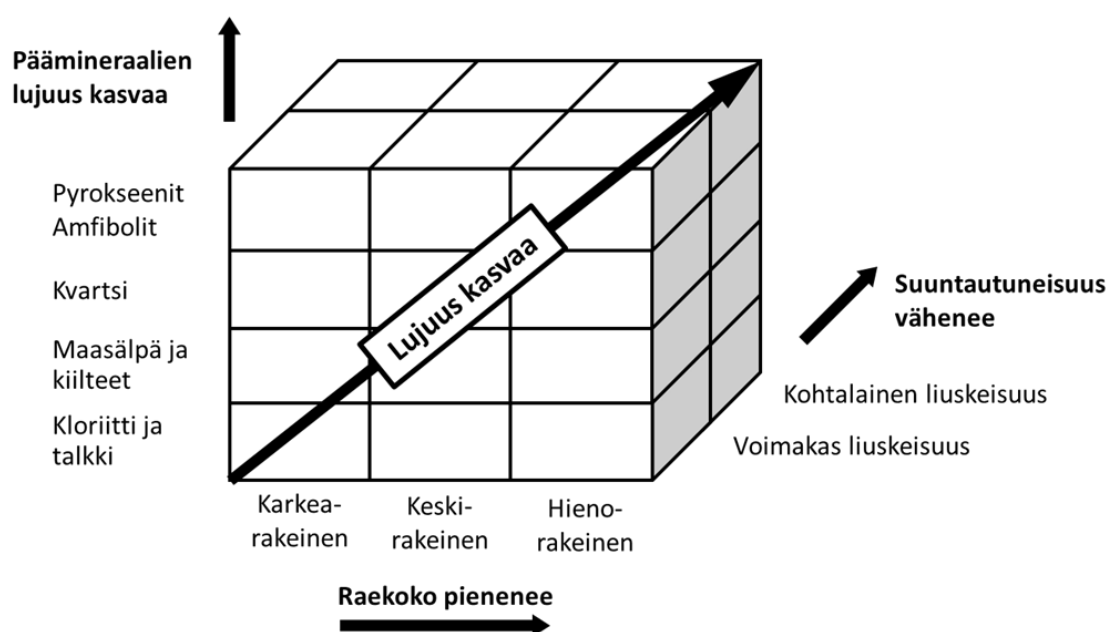
Kiven ominaisuudet vaikuttavat hienoaineksen syntymiseen murskauksessa. Esimerkiksi kiven raekoko, mineraalien välisten sidosten lujuus ja syntyvän hienoaineksen määrä ovat jossain määrin sidoksissa toisiinsa. Kiven rakenteeseen ja ominaisuuksiin vaikuttavat merkittävästi mineraalien kiteytymisolosuhteet eli kiven syntyminen. (Korhonen et al. 1974; Mitchell 2009)

Suomen kallioperä on pääasiassa 1,8 miljardia vuotta vanhaa peruskalliota. Yli 50 prosenttia Suomen kallioperästä muodostuu syväkivilajeista, joista yleisin on graniitti. Syväkivet ovat kiteytyneet syvällä maankuoren uumenissa kovassa paineessa ja korkeassa lämpötilassa. Muita syväkivilajeja ovat esimerkiksi syeniitti, dioriitti ja

gabro. Lähempänä maanpintaa tulivuortenpurkausten yhteydessä syntyneet magmakivet ovat vulkaanisia kivilajeja eli vulkaniitteja. Kutakin syväkiveä kohti on mineraalikoostumukseltaan vastaava vulkaniitti. Noin 40 prosenttia Suomen kallioperästä on muuttuneita, metamorfisia kivilajeja. Muuttuneet kivilajit ovat syntyneet, kun aiemmin muodostunut kivilaji on joutunut maankuoren laattojen liikkeiden takia uudelleen vuoristojen poimutukseen ja mineraalirakeet kovassa puristuksessa ja korkeassa lämpötilassa kääntyvät tiettyyn suuntaan. Muuttuneita kivilajeja ovat kiilleliuskeet ja kiillegneissit, amfiboliitit ja kvartsiitit. Suomessa esiintyy joissakin osissa myös sedimenttikivilajeja, kuten Satakunnan hiekkakivialueella ja Muhoksen savikivialueella. Sedimenttikivet eli kerrostuneet kivet syntyvät maanpinnassa olevan kallion rapautuessa, kulkeutuessa ja kasautuessa uudelleen kovettumalla tai kemiallisesti liuoksista saostumalla. (Korhonen et al. 1974)

Kiven synty tapa vaikuttaa sen ominaisuuksiin. Syväkivet ovat usein karkearakeisia ja massamaisia. Vulkaniitit ovat taas usein niin hienorakeisia, että yksittäisiä mineraalirakeita on paljain silmin vaikea erottaa. Muuttuneet kivilajit kalliomassa on usein selvästi suuntautunutta ja liuskeita eli suomalaiset ja sälöiset mineraalit ovat asettuneet tiettyyn tasoon. Suuntautumisen takia kiven ominaisuudet vaihtelevat suunnan mukaan. Sedimenttikivien rakenne taas on usein löyhä, jolloin ne murenevät herkästi ja niiden lujuus on heikko. (Korhonen et al. 1974)

Kiven käyttökelpoisuus määräytyy sen lujuuden ja kestävyuden mukaan. Kiven lujuus- ja kestävyysominaisuuksiin vaikuttavat mineraalikoostumus, mineraalien raekoko, liuskeisuus, yhteenliittymistapa eli kutous, suuntaus ja jakautuminen kivimassassa sekä mineraalien ehjyys. Kuvassa 7 on esitetty mineraalikoostumuksen, raekoon ja liuskeisuuden vaikutus kiven lujuuteen. (Maijala et al. 1973; Uusinoka 1989)



Kuva 7 Kiven lujuuteen vaikuttavat tekijät (muokattu Maijala et al. 1973)

Kivilajin sisältämien päämineraalien määrien perusteella kivilaadut voidaan erotella pehmeiksi, hauraiksi, sitkeiksi ja koviksi. Mineraalien kovuutta arvioidaan Mohsin asteikon perusteella. Yleisesti pehmeät mineraalit (kuten kloriitti tai talkki), joiden kovuus Mohsin asteikon mukaan on 1-3, kestävät hyvin iskuja, mutta hiovan kulutuksen kesto on heikko. Kovat mineraalit (kuten kvartsi), joiden kovuus on Mohsin asteikon mukaan 5-6, kestävät hyvin raapivaa hiontaa, mutta iskuja heikommin. Kiven kovuutta ja lujuutta voidaan arvioida päämineraalien avulla. Kivi luokitellaan kovaksi, jos sen kvartsipitoisuus ylittää 40 prosenttia. Pehmeässä kivessä kiilteen, talkin tai kloriitin määrä ylittää 40 prosenttia. Yli 40 prosenttia maasälpää sisältävät kivet ovat kovia, mutta murtuvat hauraasti. Kiven käyttäytyminen on sitkeätä, kun amfibolien ja pyrokseenien määrä on yli 25 prosenttia. (Korhonen et al. 1974)

Pehmeiden mineraalien suuri määrä ja niiden heikot kestävyysominaisuudet tekee kiven pehmeäksi ja heikoksi, vaikka mineraalirakeet olisivat tiukastikin kiinni toisissaan. Kovemmat mineraalit kestävät kulutusta paremmin. Kaikkien mineraalien ei kuitenkaan tarvitse olla kovia tai sitkeitä; pieni pehmeiden mineraalien osuus voi jopa parantaa kiven elastisuutta, jos ne ovat jakautuneet tasaisesti kalliomassaan. Pehmeiden mineraalien määrän tulisi kuitenkin olla alle 10 prosenttia. (Maijala et al. 1973; Uusinoka 1989)

Mineraalien raekoon pieneneminen parantaa kiven lujuusominaisuuksia. Hienorakeisilla kivillä rakeiden ominaispinta-ala on suurempi, jolloin mineraalien välinen koheesio on suurempi. Hienorakeisilla kivillä mineraalit ovat liittyneet toisiinsa lujasti. Mineraalien yhteenliittymistapaa eli kutoukseen vaikuttaa myös mineraalien muoto. Epäsäännöllisen muotoiset ja sälöiset rakeet muodostavat lujemman kutouksen kuin sileäpintaiset ja pyöreät rakeet. Mineraalit lohkeavat helposti sileitä rajapintoja pitkin. Kiven suuntautuneisuus ja liuskeisuus vaikuttavat myös sen lujuuteen. Liuskeinen kivi on usein etevästi lohkeava liuskeisuuden suuntaan. Lisäksi tällöin kalliomassa on anisotrooppista eli kiven lujuus vaihtelee selvästi heikkoussuunnan ja kuormitusvoiman välisen kulman mukaan. Suuntautuneilla kivillä kiven lujuus voi olla heikoimmassa suunnassa vain 10 - 25 prosenttia vahvimmassa suunnassa mitatusta lujuusarvosta. (Korhonen et al. 1974; Uusinoka 1989)

Kalliomassan lujuus voidaan määrittää puristuslujuutena, jossa kiveä puristetaan joko yksiakiaalisesti tai kolmiakiaalisesti. Testauksessa kivi leikkautuu murtotilanteessa eli kyse on leikkausmurtumasta. Yleisesti kiven vetomurtolujuus on alle viidennes puristusmurtolujuudesta. Murskauksessa tapahtuu sekä puristus- että vetomurtumista. Suomessa kallion puristusmurtolujuus vaihtelee 40...300 MN/m² välillä. (Ruuskanen 1999)

Kiviainesten tuotannossa kiven lujuus- ja kestävyysominaisuudet rajaavat merkittävästi sen hyödyntämismahdollisuuksia. Kiviainesten tuotannossa kiven lujuuden mittarina käytetään lopputuotteen iskunkestävyyttä tai kulutuskestävyyttä. Iskunkestävyys määritetään yleensä Los Angeles -testin avulla (SFS-EN 1097-2). Kulutuskestävyyttä arvioidaan yleensä nastarengaskulutuskestävyytenä, joka määritetään pohjoismaisen kuulamylymenetelmän avulla (SFS-EN 1097-9).

Kiven ominaisuuksista mineraalikoostumus, mineraalien raekoko sekä mineraalien yhteenliittymistapa ja niiden välisten sidosten lujuus vaikuttavat syntyvän hienoaineksen määrään kiveä murskattaessa. Karkearakeisen kallion murskaus tuottaa yleensä vähemmän hienoainesta kuin hienorakeisen kallion murskaus. (Alkio & Vuorinen 1989)

Mineraalien välinen sidos vaikuttaa rikkoutumisherkkyyteen: heikosti kiinni toisissaan olevat mineraalit irtautuvat herkemmin toisistaan. Pehmeiden mineraalien välisten sidosten rikkominen vaatii vähemmän energiaa. Pehmeiden mineraalien irrottaminen toisistaan tuottaa myös enemmän hienoainesta kuin kovempien materiaalien murskaus. (Mitchell 2009)

2.2.2 Hienoaineksen ja kivituhkan syntyminen murskausprosessissa

Hienoainesta syntyy kiviainestuotannon kaikissa vaiheissa: räjäytyksessä, murskausprosessissa sekä kiviaineksen käsittelyn ja kuljettamisen aikana. Tuotantoprosessin aikana syntyvän hienoaineksen määrään vaikuttavat kallion geologiset ominaisuudet, halutun lopputuotteen raekoko, käytetyt murskaintyyppit, murskausvaiheiden määrä ja murskaussuhde, syötteen maksimikoko, räjäytysprosessi ja materiaalin käsittely. Räjäytyksessä voi syntyä suuria määriä hienoainesta kiven rikkoutuessa. (Mitchell 2009)

Suurin osa hienoaineksesta ja kivituhkasta syntyy murskausprosessin aikana. Käytettävä murskaintyyppi vaikuttaa syntyvän kivituhkan määrään eri murskausvaiheissa. Puristumurskauksessa syntyy iskumurskausta vähemmän hienoainesta. Puristumurskauksessa syöttemateriaali puristuu rikki metallileukoja vasten. Iskumurskauksessa päästään hyödyntämään enemmän kiviainesrakeiden välisiä iskuja, jolloin hienoainesta syntyy enemmän. Esimurskauksessa leukamurskaimella saavutetaan pienimmät hienoainesmäärät. (Mitchell et al. 2008)

Englantilaisen tutkimuksen mukaan vulkaanisia ja metamorfisia kivilajeja murskattaessa leukamurskaimella syntyvän hienoaineksen osuus on 3 - 6 massaprosenttia, kun taas karamurskaimilla se on 10 - 15 prosenttia. Toisessa murskausvaiheessa kartiomurskaimilla hienoainesta tuotetaan jo 10 - 23 prosenttia. Eniten kivituhkaa syntyy loppuvaiheen murskauksessa. Kartiomurskaimilla hienomurskauksessa syntyvän hienoaineksen osuus voi olla 5 - 30 massaprosenttia, VSI-iskumurskaimilla osuus voi olla jopa 40 prosenttia. Syntyvän hienoaineksen määrä vaihtelee käytetyn murskaimen mukaan. Koska suuri osa hienoaineksesta syntyy murskausprosessin loppuvaiheissa, hienoaineksen määrän vähentämisessä olisi hyvä keskittyä murskausprosessin loppupään vaiheisiin. (Mitchell et al. 2008)

Heikkilän väitöskirjatutkimuksessa, jossa tutkittiin raekooltaan 12 – 20 mm sepelin laadun parantamista eri murskausvaiheissa, määritettiin myös alle 8 mm raekokoisen materiaalin määrä eri murskausvaiheissa. Tutkimuksessa lopputuotekokoinen materiaali eli alle 20 mm kiviaines erotettiin murskauksessa jatkavasta materiaalista. Esimurskaus- ja välimurskausvaiheissa 34 prosenttia syöttestä murskautui lopputuotekokoon ja 66 prosenttia täytyi syöttää jälkimurskaimeen. Murskauksen alkuvaiheissa esi- ja

välimurskauksessa 19 prosenttia syötemateriaalista oli seulonnan perusteella murskautunut alle 8 mm raekokoon. Jälkimurskauksen jälkeen 21 prosenttia läpäisi 8 mm seulan. Yhteensä noin 40 prosenttia lopputuotteesta oli raekooltaan pienempää kuin 8 mm. Tutkimuksessa havaittiin myös, että murskauksen loppuvaiheissa lopputuotekokoon murskautuvan materiaalin laatu on parempi. Kiven rakenteellinen lujuus paranee hienonnuskertojen mukaan, koska murskauksessa kivi rikkoutuu heikkouskohtia pitkin. (Heikkilä 1991)

Tuotettavan kiviaineksen maksimiraekoon perusteella voidaan karkeasti arvioida syntyvän kivituhkan määrää. Lopputuotteen maksimiraekoon pienentyessä tuotettavan hienoaineksen ja kivituhkan määrä kasvaa. Esimerkiksi, kun tuotetaan maksimiraekooltaan 40 mm lopputuotetta, hienoaineksen määrä on 5-10 massaprosenttia koko tuotannon massasta. Maksimiraekooltaan 20 mm lopputuotteen valmistuksessa hienoainesta syntyy jo 15 - 20 prosenttia. Maksimiraekooltaan 10 mm lopputuotteen valmistuksessa hienoaineksen määrä on noin 35 - 40 prosenttia. (Mitchell et al. 2008)

Syntyvän kivituhkan määrää voidaan kiviainestuotannossa optimoida, mutta kivituhkan määrään vaikuttaminen usein heikentää lopputuotteiden muita ominaisuuksia. Murskauskammion tulisi olla koko ajan mahdollisimman täynnä murskattavaa materiaalia, jotta murskainten käyttökulut ja lopputuotteen muoto olisivat optimaalisia. Tasainen ja riittävän täysi, tukahduttava syöttö vähentää murskaimen kuluvien osien kulumista, kun syötemateriaalia murskautuu myös partikkelien välisessä puristuksessa ja iskuissa. Tasainen syöttö myös parantaa läpimenokapasiteettia ja vähentää litteiden rakeiden määrää. Tasaisella syötöllä varmistetaan lopputuotteen tasainen laatu ja murskaimen kuluvien osien tasainen kuluminen. Epätasaisella murskaimen syötöllä tai alentamalla murskausnopeutta voidaan pienentää hienoaineksen määrää, mutta lopputuotteen saanti, tasalaatuisuus ja muoto-ominaisuudet sekä tuotannon kapasiteetti kärsivät. (Eloranta 1995; Mitchell et al. 2008; Mitchell 2009)

Ylisuurten kivien poisseulonnalla ja uudelleenmurskauksella syntyvän hienoaineksen määrä kasvaa, mutta näillä keinoilla lopputuotteelle voidaan saavuttaa parempi muoto ja raekoko. Leukamurskaimella suurempi suljetun puolen arvo pienentää hienoaineksen määrää, mutta esimurskauksessa saavutettavan hienoainessäästön vaikutus hienoaineksen lopulliseen määrään on vähäinen. Hienomurskauksessa iskumurskainten, kuten VSI-murskaimen, käyttö lisää syntyvän hienoaineksen määrää kartiomurskaimen verrattuna, mutta niitä käytetään, kun lopputuotteen muoto on kriittinen. Hienoaineksen määrään voidaan vaikuttaa pienentämällä roottorin pyörintänopeutta, mutta partikkelien muoto jää tällöin huonommaksi. Periaatteessa iskumurskaimen tilalla voidaan käyttää kartiomurskainta, jolloin syntyvän hienoaineksen määrä voi vähentyä jopa 50 prosenttia. Murskattaessa kiveä metallia vasten syntyvän hienoaineksen määrä on pienempi kuin ”rock-on-rock” -murskauksessa. Tällöin myös kustannukset ovat murskainten kulutuspinnojen nopeamman kulumisen takia suuremmat. (Mitchell et al. 2008)

Lopputuotteen ominaisuudet ovat usein määrääviä ja ensisijaisesti tavoiteltavia tekijöitä. Kivituhkan ja hienoaineksen määrä minimointi vaikuttaa usein ensisijaisesti tuotettavien, karkeampien katkaistujen lopputuotteiden ominaisuuksiin heikentävästi. Murskauksessa olisi kuitenkin hyvä pyrkiä lopputuotteen ominaisuuksien ja murskauskustannusten optimoinnin lisäksi myös kivituhkan määrän minimointiin. (Mitchell et al. 2008)

2.3 Kivituhkan käyttö maarakentamisessa

Kaiken kaikkiaan kivituhkan tuotannon ja käytön alueellinen vaihtelu on suurta. Kiviainesten markkinat ovat kuljetuskustannuksien vuoksi selvästi alueelliset. Kalliokiviaineksia harvoin kannattaa kuljettaa kovin kauas tuotantopaikalta. Soraa ja hiekkaa kannattaa halvempien tuotantokustannusten takia kuljettaa jonkin verran murskattuja kiviaineksia kauemmas. Pääkaupunkiseudulla tilanne on toinen, koska hyödynnettäviä kiviainesvarantoja ei ole lähellä enää jäljellä ja kiviaineksia on pakko tuoda kauempaa. Kiviainesten kulutus keskittyy merkittävästi rakentamisen ja kaupunkien lähelle, jonne voi muodostua merkittävä alueellinen markkinaosuus. Myös esimerkiksi yksittäiset betonituotteiden valmistukseen keskittyvät tehtaat saattavat aiheuttaa merkittävää kiviainesten paikallista kysyntää.

Kiviainesten saatavuus myös vaihtelee alueellisesti. Joillakin alueilla käytetään pääasiassa sora- ja hiekkamuodostumia, kun taas toisilla alueilla hyödynnettävät kiviainekset ovat saatavilla ainoastaan kalliosta. Vaikka Suomen kallioperä on varsin kovaa peruskalliota, laadukkaita, vaativiin käyttökohteisiin tarvittavia kiviaineksia ei ole aina saatavissa läheltä käyttökohteita. Kovien kivien tuotantopaikkojen sijainnin takia kuljetuskustannukset nousevat merkittäviksi. Kyseisten tuotantopaikkojen laadukkaimpia tuotteita kannattaa kuljettaa niistä saatavan hinnan takia. Kaukana kaupungeista ja muista keskeisistä kiviainesten käyttöalueista sijaitsevilla tuotantopaikoilla tuotettavan kivituhkan kannalta ongelmaksi muodostuu se, että kyseisestä materiaalista saatava hinta ei ole riittävä kattamaan murskauksesta ja kuljetuksesta aiheutuvia kustannuksia. Kivituhkaa ei siis kannata kuljettaa kaukaisiin käyttökohteisiin. Lähempänä kiviaineksen keskeisiä käyttöalueita kivituhkallekin voidaan löytää käyttökohteita.

Kiviainestuotannossa syntyvä hienoaines ja kivituhka on myös maailmalla havaittu ongelmaksi. Esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Isossa-Britanniassa on tehty tutkimuksia, joissa on selvitetty vuosittain kiviainestuotannossa syntyvän hienoaineksen ja hyödyntämättömän hienon kiviaineksen määrää ja käyttöä. Tutkimuksissa myös havaittiin kivituhkan tuotantopaikkojen ja merkittävimpien käyttöalueiden eli saatavuuden ja kysynnän alueellinen ja paikallinen vaihtelu. (Hudson et al. 1997; Manning 2004; Mitchell et al 2008; Mitchell 2009)

Kivituhkan tuotanto- ja käyttömäärät vaihtelevat reilusti vuosittain. Tuotantoon vaikuttaa erityisesti muiden tuotettavien kiviainesten tarve. Käyttömääriin taas vaikuttaa esimerkiksi paikallisen rakentamisen volyyymi. Esimerkiksi suuria infrahankkeita, kuten

teitä, ei välttämättä ole joka vuosi. Toisaalta suurten infrahankkeiden rakentaminen kestää useamman vuoden.

Kivituhkasta tutkitaan tuotantovaiheessa vain rakeisuus ja hienoainespitoisuus. Lisäksi ottoaluekohtaisesti tutkitaan kiven mineralogia ja lujuusominaisuuksia. Kivituhkan sisältämän hienoaineksen takia materiaali on usein routivaa. Routiminen rajoittaa käyttökohteita. Useimmissa käyttökohteissa kiviainekset ovat harmonisoidun tuotestandardin mukaisia rakennustuotteita, joiden laatu täytyy osoittaa CE-merkinnällä. Lisäksi rakentamisen yleiset laatuvaatimukset, kuten InfraRYL ja MaaRYL, ja kansalliset ohjeistukset, kuten Asfalttinormit, asettavat vaatimuksia kiviainesten ominaisuuksille ja laadulle käyttökohteen mukaan. Kivituhkan hyödyntämiskohteet ovatkin lähinnä toissijaisia kohteita, joissa routivuus ei rajoita materiaalin käyttöä.

2.3.1 Kivituhkan nykyiset käyttökohteet

Merkittävimmät kivituhkan käyttökohteet ovat kunnallistekniikan kaivantojen täytöt ja luiskatäytöt. Kivituhkaa käytetään esimerkiksi kaukolämpöputkien asennus- ja ympäristäyttömateriaalina. Myös muissa kunnallistekniikan kaivannoissa kivituhkaa voidaan käyttää. Kivituhkaa ei voida käyttää esimerkiksi talojen perustuksissa, koska materiaali saattaa routia voimakkaasti. Kivituhkaa käytetään pihojen täyttö-, viher- ja kulutuskerrosrakenteissa sekä liikuntapaikkarakentamisessa, joissa routivuus ei aiheuta ongelmia. Kivituhkan käyttömäärät jäävät näissä kohteissa pieniksi.

Asfaltin runkoaineena kivituhkaa ei käytetä. Periaatteessa kivituhkaa voitaisiin käyttää, kun runkoaines muodostetaan kiviaineslajitteista. Asfalttinormien asfalttien runkoaineen rakeisuuksien ohjekäyrien mukaan käytettävän kivituhkan osuus olisi pieni. Ylenmääräisen kivituhkan käyttö heikentäisi asfaltin kulutuskestävyyttä, koska karkean kiviaineksen määrä putoaisi. Usein asfaltin valmistuksessa hienoaineksena käytetään kalkkifillieriä tai lentotuhkaa (ASKO 2006). Öljysoran valmistuksessa voidaan hyödyntää kivituhkaa KaM 0/6, mutta koska öljysoraa käytetään lähinnä pienissä paikkauksissa ja ”reunakiviasfalttina”, kokonaiskäyttömäärät jäävät pieniksi. Betonikiviaineksena kivituhkaa ei käytetä merkittäviä määriä. Suomessa betonissa käytetään eniten hiekka- ja sora-aineita. Samoin kuin asfaltissa, kivituhkan osuus betonissa olisi pieni.

2.3.2 Kivituhkan jatkojalostaminen murskattuna materiaalina

Periaatteessa kivituhkaa voitaisiin jatkojalostaa esimerkiksi seulomalla selkeästi eri lajitteiksi, vaikka 0/2 ja 2/4, tai jauhamalla rakeita pienemmäksi, esimerkiksi fillerikokoon. Seulonnassa kivituhkan pitäisi olla kuivaa, sillä kosteana kivituhkan seulominen on hankalaa, koska kostea hienoaines tarttuu herkästi seulan verkkoihin ja tukkii verkon aukot.

Jauhamisessa syötteen maksimiraekoko on pienempi kuin 10 mm. Jauhamisen ongelmana on, että energiakustannukset kasvavat räjähdysmäisesti, kun tavoitellaan alle 1 millimetrin raekokoa. Mitä pienempää raekokoa tavoitellaan, sitä suuremmiksi

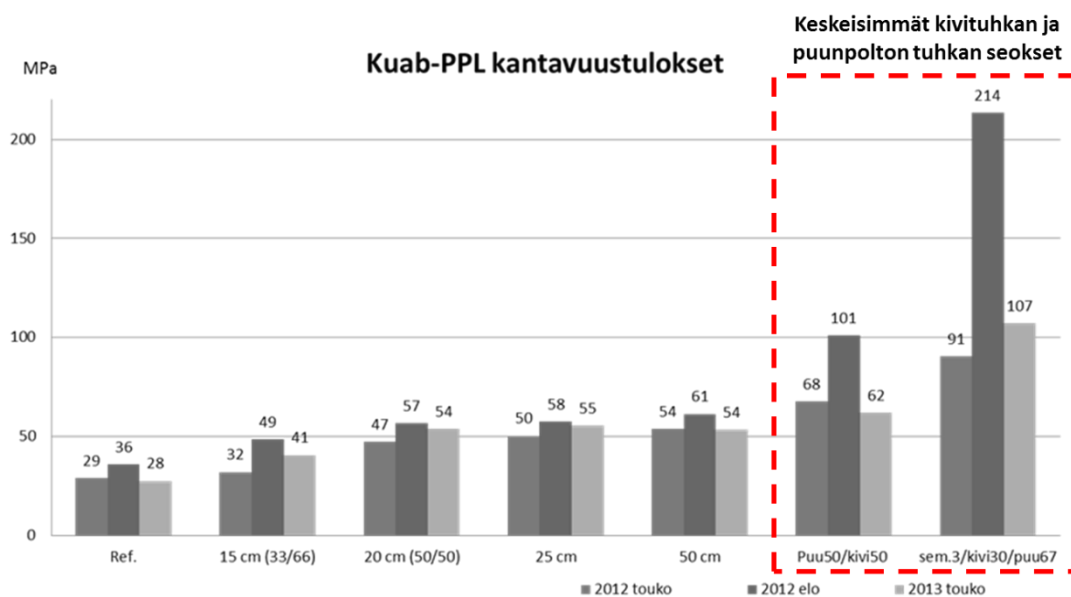
rakeiden murskattavan tai jauhetavan ominaispinta-alan määrä kasvaa. Jatkojalostamiseen liittyvät kustannukset ovat usein suuria verrattuna murskeen tuotantoon. Jotta jalostaminen olisi kannattavaa, tulisi tuotteesta saatavan hinnan ylittää jalostuskustannukset. (Eloranta 1995)

2.3.3 Kivituhkan tuotteistaminen seoksissa

Kivituhkasta ei saada yksinään laadullisesti korkealuokkaista rakentamiseen sopivaa materiaalia. Kivituhkan ominaisuuksia voitaisiin parantaa sekoittamalla sitä muiden materiaalien joukkoon. Tällöin myös kivituhka voisi vaikuttaa muiden seosaineiden rakennettavuusominaisuuksiin parantavasti. Kivituhkan ja puunpolton tuhkan seoksen soveltuvuutta on kokeiltu esimerkiksi metsätiekohteissa, joissa on saatu hyviä kokemuksia. Myös kivituhkan ja turpeen seoksen soveltuvuutta kaatopaikan tiivistyskerroksen materiaaliksi on kokeiltu, mutta tutkimuksessa todettiin, että liian suuren vedenläpäisevyyden takia se ei tiivistysrakenteisiin sovellu.

Metsäntutkimuslaitos (Metla) on tutkinut kivituhkan ja puunpolton tuhkan muodostaman seoksen soveltuvuutta metsäautoteiden rakennusmateriaaliksi UPM:n Kaipolan tehtaassa puutuhkien hyötykäyttöä metsäautoteissä tutkineessa hankkeessaan. Metla on perustanut muutaman metsäkoetiealan useilla eri seossuhteilla ja eri paksuisilla rakenteilla. Parhaimmat tulokset saatiin seoksilla, joissa kivituhkaa ja puunpolton tuhkaa sekoitettiin tilavuussuhteessa 1:1 ja 1:2. Jälkimmäiseen seokseen lisättiin kolme prosenttia sementtiä. Muilla koelaitteilla testattiin puunpolton tuhkaa ja kivituhkaa yksinään sekä muita seossuhteita. Kaikkien rakenteiden päälle levitettiin ohut murskekerros. (Metla 2014)

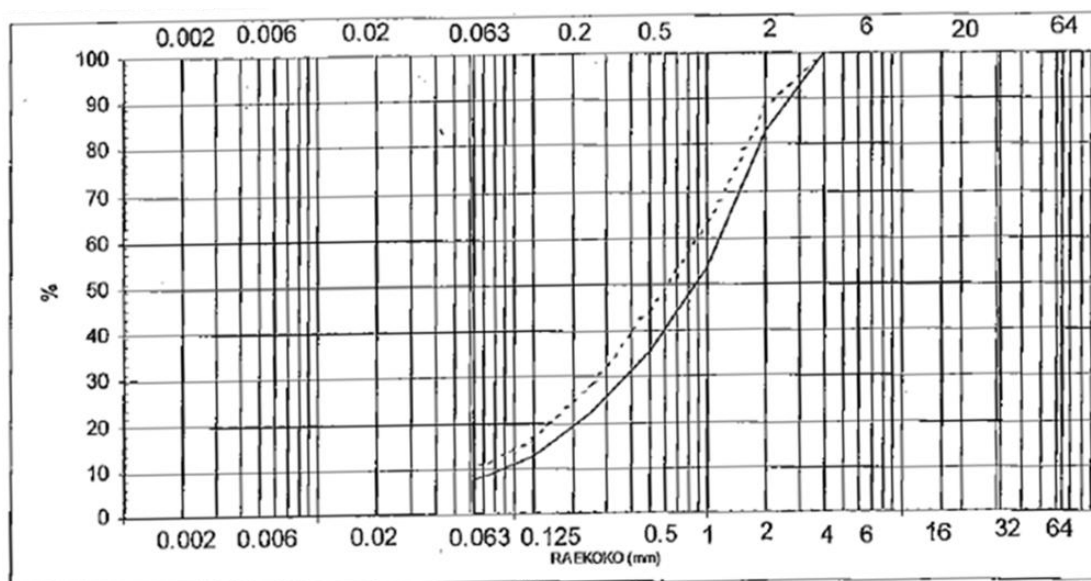
Koelat tehtiin syksyllä 2011, minkä jälkeen koelaitteille tehdään pudotuspainolaitteella kantavuusmittauksia kolmen vuoden ajan. Pudotuspainolaitteen tulosten mukaan kivituhkan ja puunpolton tuhkan seoksilla saavutettiin parempia kantavuuksia kuin muilla koelaitteilla. Kivituhkarakenteiden tulokset eivät ole sellaisenaan vertailukelpoisia muiden koelaitteiden kanssa, sillä ne sijaitsevat rinteessä muista koelaitteista poikkeavissa ja suotuisammassa maaperäsuhteissa. Lopulliset tulokset raportoidaan syksyllä 2014. Kantavuusmittausten tulokset on esitetty kuvassa 8. (Metla 2014)



Kuva 8 Pudotuspainolaitteella mitatut kantavuustulokset Metlan koetiealoilta (muokattu Metla 2014)

Juha Uotila tutki diplomityössään erilaisten turveseosten soveltuvuutta kaatopaikan tiivistysrakenteisiin. Mukana tutkimuksissa oli myös turpeen ja kivituhkan seos, jossa kivituhkaa oli lisätty turpeen sekaan 10 tilavuusprosenttia. Seosten soveltuvuutta kaatopaikan tiivistysrakenteisiin selvitettiin määrittämällä seoksen kokoonpuristumisominaisuuksia ödometrilla sekä vedenläpäisevyys ja vedenpidätyskyky. Muita tutkimuksissa käytettyjä seosaineita olivat bentoniitti, lentotuhka, savi, fosfokipsi, soodasakka ja kuituliete. (Uotila 2004)

Tutkimuksissa käytetty kivituhkanäyte on peräisin Tampereen Lakalaivasta. Kivituhkan maksimiraekoko oli 3 mm. Kivituhkan pesuseulonnalla määritetty raekokojakauma on esitetty kuvassa 9. Kivituhkasta on määritetty indeksiominaisuuksia, kuten vesipitoisuus (0,30 %), hehkutushäviö (0,70 %), pH (8,3) ja sähköjohtavuus (91 $\mu\text{S}/\text{cm}$). (Uotila 2004)



Kuva 9 Uotilan tutkimuksissa käytetyn kivituhkan rakeisuuskäytä (Uotila 2004)

Tutkimuksissa käytetty turve on peräisin Rastunsoolta Vaajasalmelta. Turve on toimitettu laboratorioon kahdessa erässä. Materiaalin toimittaja (Vapo Oy) toimitti turve-eristä seuraavia tietoja: maatumisaste (6-7), kuivatilavuuspaino (175 kg/m^3) ja tuhkapitoisuus (5,5 %). Lisäksi turpeesta määritettiin laboratoriossa tiettyjä indeksiominaisuuksia, kuten rakeisuus, vesipitoisuus, hehikutushäviö, pH, sähköjohtavuus ja maatuneisuus. Turpeen indeksiominaisuudet on esitetty taulukossa 2. (Uotila 2004)

Taulukko 2 Uotilan tutkimuksissa kivituhkaseoksessa runkoaineena käytetyn turpeen indeksiominaisuudet (Uotila 2004)

Ominaisuus	Turve
Maatuneisuus	6
Vesipitoisuus	285,90 %
Hehikutushäviö	82,60 %
Märkäirtotiheys	$1,00 \text{ g/cm}^3$
Märkätilavuuspaino	$9,76 \text{ kN/m}^3$
Kuivairtotiheys	$0,40 \text{ g/cm}^3$
Kuivatilavuuspaino	$3,91 \text{ kN/m}^3$
pH	3,7
Sähkönjohtavuus	$651 \text{ } \mu\text{S/cm}$

Sekä pelkkää turvetta että turveseoksia yritettiin tiivistää Proctor-menetelmällä, mutta sullonta osoittautui hankalaksi, koska turpeiden tilavuus muuttuu paljon sullottaessa niitä muottiin. Lisäksi havaittiin, että tiivistystyön jälkeen näytteet pyrkivät hieman paisumaan ulos muotista. Lisäksi kappaleiden yläpinnan tasaaminen ei onnistunut kovin tarkasti, sillä materiaalit sisälsivät risuja, puunkappaleita sekä isompia turvepaakkuja. Sullonnan yhteydessä havaittiin turpeesta poistuvan vettä. Sama ilmiö

toistui myös seosten tiivistyksessä, mutta seosaineiden ja seoksen kosteuden havaittiin vaikuttavan veden poistumiseen. (Uotila 2004)

Kokoonpuristuvuus ja vedenläpäisevyys määritettiin sekä turve-kivituhka-koekappaleille että turvekoekappaleille. Tulokset on esitetty taulukossa 3. Tutkittujen seoskoekappaleiden korkeus oli 30 mm. Tutkimusten mukaan 10 prosentin kivituhkalisäys pienensi turpeen kokoonpuristumista. Kivituhkan lisääminen myös kasvatti vedenläpäisevyyttä. Seoksen vedenläpäisevyys oli tutkimuksen suurimpia. (Uotila 2004)

Taulukko 3 Ödometri- ja vedenläpäisevyydestien tulokset (Uotila 2004)

Seos		Nopeus [mm/min]	Kokoonpuristuvuus [%]			Vedenläpäisevyys k [m/s]	
			$\sigma' = 25$ kPa	50 kPa	100 kPa	$\sigma' = 50$ kPa	100 kPa
Turve + kivituhka	1	0,06	7,3	12,0	19,1	$4,3 * 10^{-8}$	$2,8 * 10^{-8}$
	2	0,06	7,9	13,1	20,2	$1,1 * 10^{-8}$	$7,6 * 10^{-8}$
Turve (h~60 mm)	1	0,06	10,5	15,7	23,7	$2,2 * 10^{-8}$	$7,6 * 10^{-9}$
	2	0,06	9,8	15,0	22,9	$2,6 * 10^{-8}$	$8,7 * 10^{-9}$
Turve (h~30 mm)	1	0,06	15,1	23,1	32,3	$1,4 * 10^{-8}$	$4,2 * 10^{-9}$
	2	0,06	15,4	23,4	32,8	$1,4 * 10^{-8}$	$4,5 * 10^{-9}$

Tutkimuksissa havaittiin, että turve-kivituhkaseos oli käsiteltävyydeltään ja kokoonpuristumisominaisuuksiltaan tutkimuksen parhaimpia seoksia. Lisäksi kivituhka vähensi turpeen kokoonpuristumista. Kaatopaikan mineraalisen tiivistyskerroksen vedenläpäisevyyden, k-arvon, tulisi olla pienempi kuin 10^{-9} m/s. Turve-kivituhka-seos ei ole sellaisenaan soveltu kaatopaikan mineraaliseksi tiivistyskerrokseksi. (Uotila 2004)

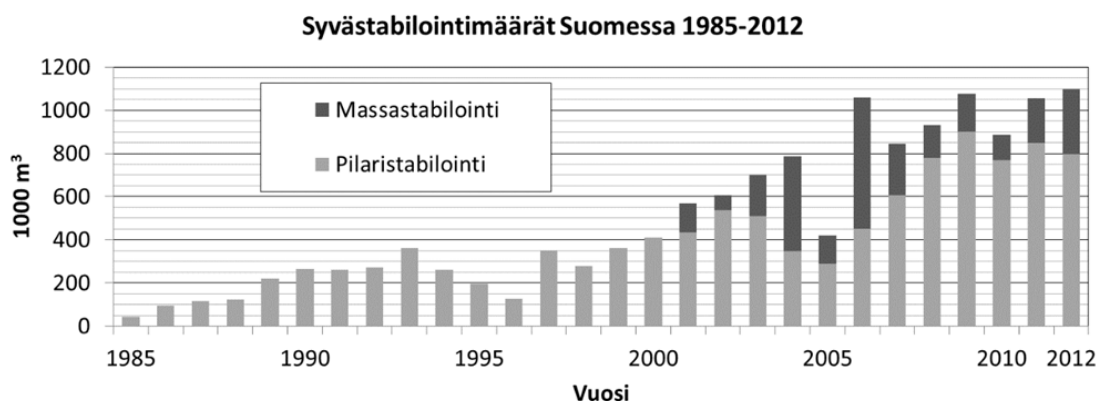
3 MASSA- JA PROSESSISTABILOINTITEKNIikka

Syvästabilointi on pohjanvahvistusmenetelmä, jota hyödyntämällä voidaan lujittaa heikosti kantavaa pohjamaata sekoittamalla sen sekaan sideainetta. Syvästabilointi lisää pohjamaan lujuutta, parantaa sen muodonmuutosominaisuuksia ja dynaamista kuormituskestävyyttä. Syvästabilointia voidaan myös käyttää pilaantuneiden maiden käsittelyyn, sillä sideaineilla voidaan sitoa maaperässä olevia haitta-aineita. (EuroSoilStab 2002, Liikennevirasto 2010)

Syvästabilointimenetelmät jaetaan perinteisesti pilaristabilointiin ja massasyvästabilointiin. Pilaristabiloinnissa maaperään sekoitetaan sideainetta pilarointikoneen avulla. Kovettunut sideaine muodostaa pohjamaahan sekoittuneena pystysuuntaisia pilareita, joiden pituus voi olla jopa 24 metriä. Massastabiloinnissa sideainetta sekoitetaan pohjamaahan tasaisesti niin, että massastabiloitu kerros muodostaa laattamaisen rakenteen. (Liikennevirasto 2010)

Syvästabilointimenetelmien lisäksi on olemassa erilaisia asema- ja aumasekoitteisia stabilointimenetelmiä läjitettävien massojen stabilointiin. Stabiloinniksi kutsutaan myös teiden rakennekerrosten kantavuusominaisuuksien parantamiseksi käytettävää kerrosstabilointia, jossa vanhan rakennekerros materiaalin sekaan sekoitetaan sideainetta, useimmiten bitumia. Tässä opinnäytetyössä esitellään tarkemmin massastabilointimenetelmä ja asemasekoitteinen prosessistabilointimenetelmä.

Syvästabiloinnin eli pilari- ja massastabiloinnin määrästä pidetään vuosittain tilastoa. Vuonna 2012 massastabiloinnin määrä oli noin 300 000 m³. Kaikkiaan stabilointiin noin 1 100 000 m³. Stabilointimäärät ovat viime vuosikymmenenä kasvaneet. Vuosittainen vaihtelu on merkittävää. Vuosittainen syvästabiloinnin määrä Suomessa on esitetty kuvassa 10. (Kuusipuro 2013)

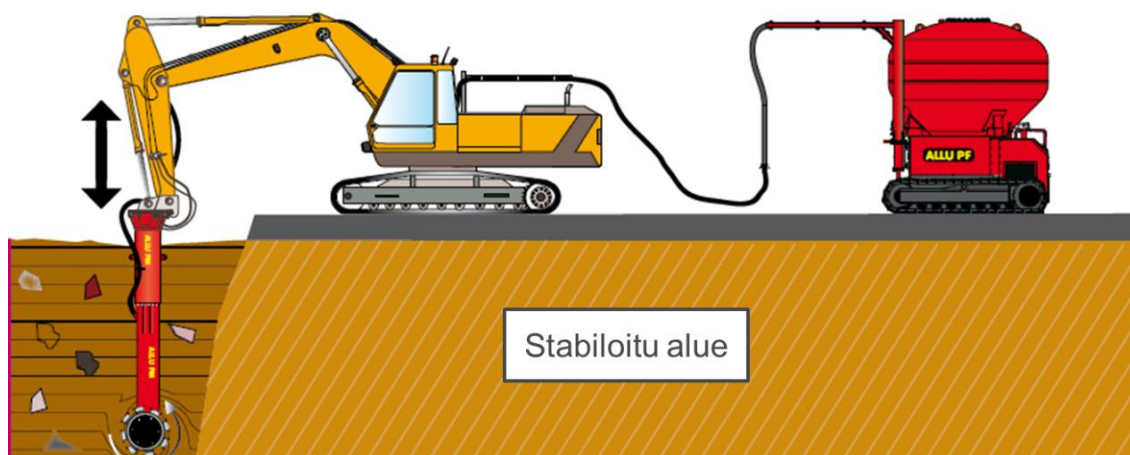


Kuva 10 Syvästabilointimäärät Suomessa 1985 - 2012 (muokattu Kuusipuro 2013)

3.1 Massastabilointi

3.1.1 Massastabilointimenetelmä ja -kalusto

Massastabilointimenetelmässä pohjamaan kantavuutta vahvistetaan sekoittamalla sideainetta tietyssä seossuhteessa maaperään sekoitustyöhön suunnitellulla kalustolla. Massastabilointikalusto koostuu sideaineen varastosäiliöistä, paineistussäiliöistä, kaivinkoneesta, kaivinkoneeseen kiinnittävästä sekoituspuomista ja paineen kestävästä letkuista (kuva 11). Sideaine tuodaan työmaalle perävaunuissa, jotka toimivat sideainevarastoina työmaalla. Ennen stabilointia sideaineen paineistussäiliöt, niin sanotut sipulit, tankataan täyteen varastoperävaunuista. (Hartikainen 2000; Jääskeläinen 2009a; Liikennevirasto 2010)



Kuva 11 Massastabilointitekniikka (muokattu ALLU 2013)

Ennen stabilointia stabiloitava alue esihomogenisoidaan kaivinkoneeseen kiinnitetyn sekoituspuomin avulla. Homogenisointitarve riippuu maaperästä. Stabilointityötä haittaavat esteet, kuten kivet tai puunrungot, harataan pois. Varsinainen stabilointityö tapahtuu liikuttamalla hydraulisen kaivinkoneen puomiin kiinnitettyä sekoituspuomia, ns. myyrää (kuva 12b), maaperässä sekä vaaka- että pystysuuntaan lamelleittain tai lohkoittain. Sideainetta syötetään koko ajan sekoituspuomin kärjessä olevan rummun läheisyyteen paineilman avulla. Rummun hampaat sekoittavat maan ja sideaineen keskenään. Massastabiloinnin lopputuloksena saavutetaan noin viiden metrin paksuinen, alkuperäistä pohjamaata kantavampi ja lujempi kerros. Ihanneolosuhteissa voidaan saavuttaa 7-8 metrin syvyys. Työskentelyolosuhteet ja käsiteltävän pohjamaan laatu vaikuttavat maksimisyvyyteen. Massastabiloinnissa käytettävä kalustoa on esitelty kuvissa 12a ja b. (Hartikainen 2000; Liikennevirasto 2010; Jääskeläinen 2009a)



Kuva 12 a) Massastabilointikalusto; b) sekoituspuomi. (kuvat: Ville Niutanen)

Työn aikana kalustoon liitetty ohjausjärjestelmä kerää tietoa stabilointiprosessista. Esimerkiksi syötettävän sideaineen määrää ja sekoituskärjen syvyyttä tarkkaillaan, jotta voidaan varmistaa stabilointityön tasaisuus ja onnistuminen. Suomessa massastabilointilaitteistoja on saatavilla kaupallisilta toimittajilta, kuten ALLU Finland Oy, mutta joillakin urakoitsijoilla on olemassa myös omia, itse kehitettyjä stabilointilaitteistoja (Seppälä 2012). (ALLU 2007)

Sekoitustyön jälkeen stabiloidun massan päälle levitetään suodatinkangas. Kankaan tehtävä on estää stabiloidun massan ja työpenger materiaalin sekoittuminen. Suodatinkankaat asetellaan limittäin, jotta sekoittumista ei tapahdu saumakohdistakaan. Kankaan päälle levitetään usein 0,5 - 1 metrin paksuinen työalusta sorasta tai murskeesta. Työpenger toimii samalla painopenkereen tavoin. Stabiloitu massa on huokoista ja se sisältää paljon ilmaa. Työpenger tiivistää stabiloitua massaa ja aiheuttaa riittävän kuormituksen myös stabiloidun kerroksen alapuolisiin maakerroksiin niin, että ne painuvat penkereen painon vaikutuksesta ennen varsinaista rakentamista. Työpengeren päältä stabilointia voidaan jatkaa eteenpäin. (EuroSoilStab 2002; Ojala 2002)

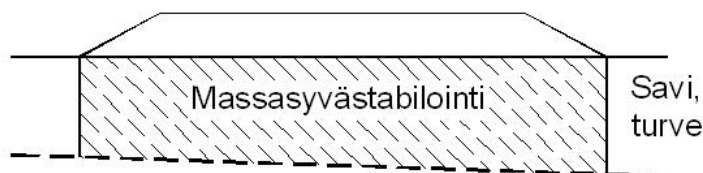
3.1.2 Massastabiloinnin hyödyntämiskohteet ja edut

Massastabiloinnilla voidaan parantaa pehmeän pohjamaan lujuutta, muodonmuutosominaisuuksia sekä kuormituskestävyyttä. Massastabilointi soveltuu hyvin saven, liejun ja turpeen stabilointiin käytettävästä sideaineesta riippuen. Massastabilointia käytetään usein vaativissa olosuhteissa ja maalajeissa, joiden stabilointi ei onnistu pilaristabiloinnilla. (Lahtinen & Niutanen 2009; Liikennevirasto 2010)

Massastabiloitu rakenne voidaan toteuttaa eri tavoin (kuva 13). Massasyvästabiloitu rakenne voidaan tehdä joko määräsyyvyisenä tai ulottaa pehmeän maakerroksen alapintaan. Massasyvästabiloinnista eli paikalleen stabiloitavan maan massastabiloinnista voidaan käyttää myös nimitystä in-situ massastabilointi. Pelkkien massastabilointien lisäksi voidaan tehdä yhdistelmä rakenne, jossa käytetään sekä

massa- että pilaristabilointimenetelmiä. Yhdistelmä rakenteessa ensin maaperän yläosa stabiloidaan massastabilointimenetelmällä määräsyyvyyteen. Pilaristabilointi tehdään massasyvästabiloinnin läpi syvempiin maakerroksiin. (Liikennevirasto 2010)

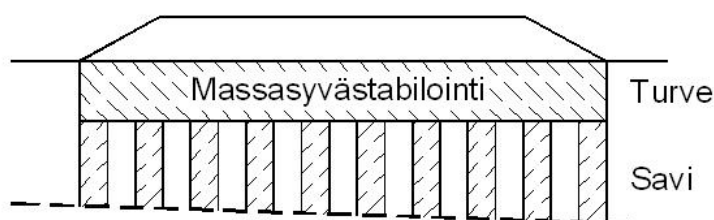
a) Massasyvästabilointi pehmeän kerroksen pohjaan asti



b) Massasyvästabilointi määräsyyvyyteen



c) Massasyvästabiloinnin ja pilaroinnin yhdistelmä



Kuva 13 Massasyvästabiloinnilla tehtävät rakenteet; a) Massastabilointi pehmeän kerroksen pohjaan asti; b) Massastabilointi määräsyyvyyteen; c) Massastabiloinnin ja pilaroinnin yhdistelmä. (Liikennevirasto 2010)

Paikallaan stabiloitavien massasyvästabilointirakenteiden lisäksi massastabilointimenetelmää voidaan käyttää myös muualta kaivettujen tai ruopattujen ja läjitettyjen maiden lujittamisessa. Tällöin puhutaan ex-situ massastabiloinnista.

Massastabilointia on hyödynnetty esimerkiksi seuraavissa käyttötarkoituksissa (ALLU 2007):

- teiden ja rautateiden perustamisessa
- pihoissa, pysäköintialueilla, urheilukentillä ja varastoalueilla
- teollisten rakennusten ja siltojen perustamisessa, altaissa ja täyttömaa-alueilla
- meluvalleissa ja jokien ja järvien rantaluiskissa sekä tieluiskissa, pengertäytöissä ja kaivantojen tukemisessa
- liikenteestä aiheutuvan tärinän eliminoinnissa
- ruoppausmassojen kiinteyttämisessä ja sitomisessa
- pohjavesisuojuuksissa
- jätteiden ja pilaantuneiden maiden käsittelyssä, kuten kiinteyttämisessä, eristämässä ja neutraloinnissa

Massastabiloinnin päälle ei voida suoraan perustaa rakennuksia tai perustuksia, koska stabiloinnin alapuoliset kerrokset saattavat painua. Massastabiloitua rakennetta voidaan kuitenkin hyödyntää esimerkiksi lyönti- tai porapaalutuksen työalustana paikoissa, joihin paalutuskonetta ei heikkojen maaperäolosuhteiden takia voida viedä suoraan. Tällöin täytyy kuitenkin huomioida, että stabiloidun kerroksen tulee olla läpäistävissä paaluilla eli stabilointia ei tehdä liian lujaksi, jotta paalutuksen kustannukset eivät kasva liian suuriksi.

Massastabilointi on usein vaihtoehtoinen ja edullinen pohjanvahvistusmenetelmä massanvaihdon alueilla, joissa kantavat maakerrokset ovat muutaman metrin syvyydessä. Massanvaihdossa työmaalla muodostuu ylijäämämaita, jotka joudutaan sijoittamaan läjitysalueille ja kaatopaikoille. Lisäksi alueelle pitäisi tuoda korvaavia luonnonkiviaineksia. Massastabiloinnissa kuljetus- ja raaka-ainekustannukset sekä niistä aiheutuvat haitat ovat massanvaihtoa pienemmät. Massastabiloinnin etuihin voidaan laskea maankäytön tehostuminen, koska rakentamista voidaan ulottaa tähän asti kelpaamattomille ja soveltumattomille alueille. (Hartikainen 2000; Axelsson et al. 2002)

Massastabilointimenetelmä on sovellettavissa vaihteleviin olosuhteisiin sideainetta tai sideaineen määrää vaihtamalla. Stabiloinnin vaikutukset ympäristöön ovat melko vähäisiä. Melu ja tärinä ovat usein pieniä massastabilointiprosessin aikana. (ALLU 2007)

3.2 Prosessistabilointi

3.2.1 Prosessistabilointitekniikka ja -kalusto

Prosessistabilointi on Suomessa 2000-luvulla kehitetty asemasekoitteinen stabilointimenetelmä. Prosessistabiloinnissa stabiloitava massa, runkoaines, nostetaan kaivinkoneella stabilointiaseman syöttötasolle. Ruoppausmassan nostamiseen voidaan käyttää myös syöttöpumppua. Syöttötasolla on välppäseula, jolla runkoaineen seasta poistetaan isommat esineet ja kivet. Homogenisoinnin jälkeen runkoaineen joukkoon lisätään sideaine. Kuivat sideaineet lisätään siloista. Samaan aikaan voidaan käyttää useampaa eri siloa eri sideainekomponenteille. Kosteat sideaineet lisätään hihnakuljettimella prosessistabilointilaitteistolle. Runkoaines ja sideaine sekoitetaan homogeeniseksi massaksi paineistetussa kaksoisakselisekoittimessa. Stabiloitu massa puretaan sekoitusasemasta pumpun ja putkistojen tai kuorma-autojen avulla läjitysalueeseen. Täytön yltäessä määräkorkeuteen stabiloidun massan päälle levitetään suodatinkangas ja riittävän paksuinen työalusta murskeesta. Kuvassa 14 on esitetty Suomessa käytetty prosessistabilointikalusto. (Autiola 2009)



Kuva 14 Prosessistabilointikalusto (muokattu Autiola 2009)

3.2.2 Prosessistabiloinnin käyttökohteet ja edut

Prosessistabilointimenetelmä on kehitetty erityisesti ruoppausmassojen ja pilaantuneiden sedimenttien sekä muiden pehmeiden, kaivettujen massojen stabilointiin sekä niiden sisältämien haitta-aineiden sitomiseen. Ruoppausmassojen käsittelyn ongelmana ovat ruoppausmassojen suuret haitta-ainepitoisuudet sekä veden sekoittuminen massaan. Ruoppausmassojen haitta-aineiden määrän takia ne voidaan joutua luokittelemaan vaaralliseksi jätteeksi. Esimerkiksi satama-alueilla merenpohjan sedimentit sisältävät usein huomattavia määriä TBT- eli tributyyliini-yhdistettä. (Autiola 2009; Lahtinen & Niutanen 2009)

Haitta-aineiden sitominen prosessistabilointimenetelmällä perustuu yleisesti stabiloinnin keskeiseen piirteeseen, sideaineen sekoittamiseen maahan. Sideaineen lisääminen ja sen sitoutumisreaktiot maaperässä muuttavat stabiloitavan massan kemiallisia olosuhteita, kuten pH:ta. Lisäksi sideaineen sitoutumisreaktio pienentää stabiloitavan massan vedenläpäisevyyttä, jolloin rakenteen läpi suotautuvien suotovesien määrä on pienempi. Stabilointi myös sitoo osan haitta-aineista kemiallisesti tai fysikaalisesti niukkaliukoisempaan muotoon. Haitta-aineiden sitomisen onnistuminen riippuu sideaineen sekoitustyön onnistumisesta. Prosessistabilointimenetelmällä sideaineen sekoitus onnistuu massastabilointia paremmin ja tasaisemmin, jolloin se toimii massastabilointimenetelmää paremmin pilaantuneiden ruoppausmassojen ja sedimenttien käsittelyssä. (Autiola 2009)

Prosessistabiloitujen massojen hyödyntämistä rajoittavat mahdollisten haitta-aineiden pitoisuudet ja niiden liukoisuudet. Yleisesti pilaantuneiden maiden käsittely vaatii ympäristönsuojelulain mukaisen ympäristöluvan tai PIMA-ilmoituksen ja

stabiloidut massat voidaan tällöin sijoittaa vain ympäristöluvan mukaiseen sijoituspaikkaan. Sedimenttien ruoppauksessa ja ruoppausmassojen läjittämisessä sovelletaan vesi- ja jätelainsäädäntöä. Vesilain mukaan ruoppaustoiminta vaatii ympäristölupaviranomaisen myöntämän luvan. Luvantarpeeseen vaikuttavat ruopattavan massan määrä, työn toteuttamispaidan olosuhteet, ajankohta ja työn vaikutukset sekä ruoppausalueen luontoarvot. Merialueella ruoppaustoiminnalle vaaditaan lupa, kun ruopattavan massan määrä ylittää 1000 m³. Sisävesialueilla sallittu määrä on pienempi. Ruoppausmassojen läjitys vaatii myös ympäristölupaviranomaisen myöntämän luvan. Ruoppausmassoille on laadittu laatuksiteerit, jotka perustuvat haitta-aineiden pitoisuusraja-arvoihin. Raja-arvot perustuvat korrelaatioihin ruoppausmassasta mitattujen pitoisuuksien ja havaittujen ekotoksilogisten vaikutusten välillä. Jos haitta-aineiden määrä ylittää alemman pitoisuusraja-arvon, ruoppausmassaan ei saa läjittää vesialueelle. Maa-alueella ruoppausmassojen läjittämiseen vaikuttaa ympäristönsuojelulaki ja -asetus. Eli pilaantuneiden ruoppausmassojen sijoittaminen tai käsittely (stabilointi) vaatii ympäristöluvan. Pilaantumattomat ruoppausmassat luokitellaan pilaantumattomaksi maa-ainesjätteeksi eli ylijäämämaaksi. Lupakäytännöstä voidaan tällöin poiketa. (Ympäristöministeriö 2004)

Prosessistabiloituja massoja on käytetty esimerkiksi satamakenttien ja muiden alueiden täyttörakenteissa. Stabiloituja massoja ei ole tällöin tarvinnut kuljettaa kauas ruoppausalueelta, jolloin kuljetuskustannuksissa on säästetty. (Autiola 2009)

Prosessistabilointimenetelmän etuihin kuuluu myös useamman sideainekomponentin käyttäminen. Prosessistabilointikaluston suunnittelussa on huomioitu, että voidaan käyttää useamman eri sideaineen sekoituksia. Sideainesiiloja on useita. Lisäksi sideaineen kosteus ei haittaa sen hyödyntämistä. Prosessistabilointikohteet ovat sen verran suuria, että sideaineina kannattaa hyödyntää myös teollisuuden sivutuotteiden mahdollisuudet. Käyttämällä sideaineena teollisuuden sivutuotteita sideainekustannuksia voidaan merkittävästi pienentää. Sementin käyttöä vähentämällä voidaan myös säästää energiaa ja ympäristöä. (Autiola 2009)

Prosessistabilointimenetelmää on testattu muun muassa Turun Sataman STABLE-hankkeessa, joka toteutettiin EU:n LIFE Ympäristö -rahoituksen turvin vuosina 2006 - 2009. Hankkeessa ruopattiin ja stabiloitiin Turun Pansion Sotasataman ja Aurajoen alajuoksun pilaantuneita pohjasedimenttejä. Sedimentit sisälsivät suuria määriä haitallista TBT-yhdistettä. STABLE-hankkeessa etsittiin ympäristöystävällistä, kustannustehokasta ja toimivaa ratkaisua pilaantuneiden sedimenttien käsittelyyn ja testattiin uutta prosessistabilointimenetelmää. Hankkeessa pohjasedimenttien stabilointi käsitti useamman työvaiheen; pohjasedimenttien ruoppauksen, kuljetuksen proomuilla Pansioon, stabiloinnin prosessistabilointikalustolla sekä läjityksen täyttöaltaisiin. (Autiola 2009)

STABLE-hankkeessa ruopattiin yhteensä 90 000 kuutiota pohjasedimenttejä. Ruoppauksessa käytettiin ympäristökauhaa, jolloin ruoppauksen aikana sedimenttiin ei päässyt lisävettä. Massat siirrettiin proomujen avulla noin neljän kilometrin etäisyydelle Pansioon. Kuljetuksen aikana ruoppausmassasta erottui jonkin verran vettä. Osassa

kuormista erottunutta vettä jouduttiin pumpaamaan pois. Massa homogenisoitiin massastabilointilaitteen sekoitinkärjellä proomuissa. Ruopattu massa stabiloitiin prosessistabilointiasemassa (kuva 15). (Autiola 2009)



Kuva 15 STABLE-hankkeessa käytetty prosessistabilointikalusto (kuva: Ville Niutanen)

STABLE-hankkeessa osoitettiin, että prosessistabilointi on teknisesti tehokas ja toimiva keino pilaantuneiden pohjasedimenttien stabilointiin. Prosessistabilointilaitteistolla saavutetaan erittäin homogeeninen sekoitustulos, jolloin sideainetta tarvitaan massastabilointimenetelmää vähemmän ja sideainekustannuksissa voidaan säästää massastabilointiin verrattuna. Esimerkiksi STABLE-hankkeen esipilotissa, Pansion Sotasataman prosessistabiloinnissa havaittiin, että prosessistabiloinnissa tarvittavan sideaineen määrä oli pienempi ja sekoituksen lopputulos silminnähdessä homogeenisempi kuin massastabiloinnissa. Prosessistabiloinnissa käytettiin 75 kg/m^3 yleissementtiä ja 50 kg/m^3 lentotuhkaa. Massastabiloinnissa sideainemäärät olivat 90 kg/m^3 yleissementtiä ja 60 kg/m^3 lentotuhkaa. Ruoppausmassan vesipitoisuus oli alle 150 prosenttia. Seurantanäytteistä määritettiin vedenläpäisevyydet, puristuslujuudet ja haitta-aineiden liukoisuudet 3 ja 6 kuukauden ikäisinä. Vedenläpäisevyydet olivat hyvin alhaisia. Vaaditut lujuudet saavutettiin ja aikalujittuminen oli tulosten perusteella havaittavissa. Seurantanäytteiden haitta-aineiden liukoisuus määritettiin diffuusiotesteillä. Tuloksia verrattiin ekologisiin tavoitepitoisuuksiin ja suomalaisiin 64 vuorokauden diffuusiotestin enimmäisliukoisuusohjearvoihin kiinteytetylle materiaalille (Liukoisuusohjearvot kiinteytetylle materiaalille 2000). Liukoisuudet eivät ylittäneet vertailuarvoja. Haitta-aineiden kokonaispitoisuuksia ei määritetty. (Autiola 2009)

3.3 Stabilointityön laadunvalvonta

Massastabilointityön onnistumisesta voidaan varmistua sekä suunnittelun aikaisen, työnaikaisen että lopputuotteen laadunvalvonnan avulla. Suunnitteluvaiheessa määritetään käytettävät sideaineet ja sideainemäärät stabiloitavuustestauksen avulla. Tavanomaisimmin laborioritestauksessa määritetään stabiloitavan maaperän indeksiominaisuudet ja koekappaleiden aikalujittumista yksiakksiaalisella puristuslujuuskokeella. Puristuslujuustestien perusteella tiedetään, millä sideaineella ja sideainemäärällä saavutetaan työkohteessa vaadittava lujuus. Tavanomaisessa stabiloitavuustestauksessa käytettävät tutkimusmenetelmät on esitetty tarkemmin luvussa 4 ja sideaineen valintaan liittyviä tekijöitä kappaleessa 3.5. (Hautalahti et al. 2007)

Massastabilointityön aikana työmaalla seurataan maahan syötettävän sideaineen määrää ja sekoitustyön onnistumista. Sekoitustyön onnistuminen vaikuttaa suoraan lopputuloksen ominaisuuksiin. Mitä tasaisempi lopputulos saadaan aikaan, sitä parempi lujuus voidaan saavuttaa. Tasainen sideaineen levittyminen pienentää lujittumisen vaihtelua massassa. Sekoitustyön tasaisuus varmistetaan sekoittamalla sideainetta huolellisesti riittävän monta kertaa pysty- ja vaakasuunnassa. (InfraRYL 2010)

Massastabilointityön onnistuminen ja kelvollisuus on osoitettava myös jälkikäteen tehtävällä testauksella. Laadunvarmistuksessa käytetään valvontakairauksia, jotka tehdään tietyn ikäisille massastabilointilohkoille. Valvontakairauksilla määritetään stabiloidun maan leikkauslujuus. Suunnitelma-asiakirjoissa on esitetty stabiloidulle maalle tavoitearvo, jonka kairausten keskiarvon pitäisi ylittää. Kairaukset voidaan toteuttaa pilarikairauksena tai siipikairauksena. Pilarikairauksessa stabiloitu kerros läpäistään painamalla tai tarvittaessa lyömällä kaira kerroksen läpi. Kerroksen lävistämiseen vaadittavaa voimaa mitataan ja sen perusteella voidaan laskennallisesti määrittää leikkauslujuus. Laadunvalvontaa voidaan tehdä myös ottamalla näytteitä stabiloidusta massasta ja tutkimalla esimerkiksi näytteen sideainepitoisuus tai koekappaleen puristuslujuus laboratoriossa. (InfraRYL 2010; Hautalahti et al. 2007)

Asemasekoitteisissa stabilointimenetelmissä syötettävän sideaineen määrän, stabiloitavan massan vesipitoisuuden ja sekoitustyön tasalaatuisuuden tarkkailu on myös keskeisessä osassa. Stabiloitavan massan vesipitoisuus vaikuttaa sideaineiden reaktioon. Vesipitoisuuden kasvaessa tarvitaan enemmän sideainetta, jotta saavutetaan sama lopputulos kuin pienemmissä vesipitoisuuksissa. Vesipitoisuus voi maaperässä vaihdella huomattavasti. Sekoitustyön epäonnistuessa sideaine ei leviä tasaisesti massaan. Stabiloitu massa ei lujitu tasaisesti. (Autiola 2009)

Pilaantuneiden maiden stabiloinnissa keskeisintä on haitta-aineiden liikkuvuuden ja liukoisuuden vähentäminen. Stabiloinnin lopputuotteen ympäristökelpoisuudesta tulisi varmistua tutkimalla maa-ainesten haitta-ainepitoisuus sekä käsittelemättömän ja stabiloidun materiaalin sisältämien haitta-aineiden liukoisuus sekä stabiloidun massan pakkasenkestävyys. Onnistunut, tasalaatuinen sekoitustyö edesauttaa haitta-aineiden sitoutumisen onnistumista. (Mroueh et al. 2004)

3.4 Stabiloinnissa käytettävät sideaineet

Stabiloinnissa voidaan käyttää erilaisia sideaineita. Yleisimmät ovat sementti, kalkki ja näiden seokset. Lisäksi sideaineina voidaan käyttää teollisuuden sivutuotteita, kuten masuunikuonaa, lentotuhkaa tai rikinpoiston lopputuotetta, joilla on piileviä potsolaanisia ominaisuuksia. (EuroSoilStab 2002; Lahtinen & Niutanen 2009)

Kaupallisten sideaineiden, kuten kalkin, sementin ja erilaisten sementtiseosten, vaatimuksenmukaisuus osoitetaan CE-merkinnällä. Muiden sideaineiden osalta vaatimuksenmukaisuus osoitetaan sideainevalmistajan dokumenteilla tai rakennuspaikkakohtaisilla kokeilla tai molemmilla. Esimerkiksi masuunikuona on tuotteistettu tuotelainsäädännön mukaan valmistuspaikkakohtaisesti (Tiehallinto 2007b). Sideaineiden stabiloivien aineiden koostumus ja ympäristön kannalta merkittävien kemiallisten aineiden määrät ja käyttäytyminen on tunnettava. Laboratoriokokeilla ja tarvittaessa koestabiloinnilla osoitetaan sideaineen soveltuvuus käyttökohteeseen. (Liikennevirasto 2010)

Tuotteistamattomien sivutuotteiden, kuten lentotuhkan, käyttö stabiloinnin sideaineena edellyttää kohdekohtaista ympäristölupaa, koska niiden hyödyntäminen stabiloinnin sideaineena ei ole Mara-asetuksen (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 591/2006 ja 403/2009) mukaista toimintaa. Koetoimintatyypissä käyttökohteissa voidaan käyttää koetoimintailmoituksen mukaista menettelyä. Joissakin kunnissa on käytössä myös rekisteröintimenettely pienille sivutuotemäärille. Luvissa ja ilmoituksissa määritetään, kuinka paljon tuotteistamatonta teollisuuden sivutuotetta saa käyttää stabiloinnin sideaineena. (Kiviniemi et al. 2012; Suominen & Forsman 2013)

3.4.1 Kalkki

Kalkki on mineraalinen sideaine, joka valmistetaan kalkkikivestä polttamalla eli kalsinoimalla. Polttoprosessissa kalkkikivestä erottuu hiilidioksidi ja jäljelle jää vain kalsiumoksidi CaO . Kalsiumoksidi eli poltettu kalkki on reaktiivinen kemikaali; se reagoi veden kanssa muodostaen sammutettua kalkkia Ca(OH)_2 . Sammutettu kalkki on myös reaktiivinen tuote. Stabiloinnissa voidaan käyttää molempia kalkkilaatuja: poltettua ja sammutettua kalkkia. Kalkin tuotannossa syntyy myös muita stabiloinnin sideaineseoksiin sopivia tuotteita, kuten kalkkiuunin sähkösuodinpölyä. (Hartikainen 2000; EuroSoilStab 2002)

Maaperässä poltettu kalkki reagoi hydraulisesti veden kanssa vapauttaen samalla lämpöä ja muuttuen sammutetuksi kalkiksi. Lämpötilan nousu nopeuttaa lujuuden kehitystä. Lisäksi kalkki nostaa maaperän pH:ta, jolloin savimineraalien kiderakenne alkaa murtua ja ioninvaihtoreaktiot kalkkiyhdisteen ja savimineraalien välillä ovat mahdollisia. Saven sisältämät pii- ja alumiiniyhdisteet reagoivat kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraattia ja kalsiumalumiinisilikaattihydraattia, jotka kovettuvat sementtiliimaksi ja sitovat maarakeet yhteen. Potsolaanireaktion seurauksena savipartikkelit flokkuloituvat eli kokoontuvat yhteen sähköisten voimien

vaikutuksesta ja muodostavat laattamaisia rakenteita. Näin savet muuttuvat kuivemmiksi ja vähemmän herkiksi vesipitoisuuden muutoksille. (EuroSoilStab 2002; Axelsson et al. 2002; Makusa 2012)

Pitkäaikainen lujittuminen ja sitoutuminen ovat kalkin tapauksessa merkittäviä ja voivat jatkua jopa vuosia. Kalsiumioneille on myös ominaista diffuntoituminen eli kalsiumioneita siirtyy korkeamman pitoisuuden alueelta matalampiin pitoisuuksiin eli maaperään epätasaisesti sekoittunut kalkki leviää ympärilleen ja pitoisuudet tasoittuvat. Diffuntoituminen parantaa stabiloidun massan sekoitustyön tulosta. Reaktio ulottuu myös stabiloidun alueen ulkopuolelle. Diffuntoimisen seurauksena ympäröivän maan pH ja kalsiumionien määrä kasvaa, joten kalkin leviämistä voidaan seurata mittaamalla stabiloidun pH:ta tai kalsiumioneiden määrää (EuroSoilStab 2002)

Pilaristabiloinnin alkuaikoina kalkkia hyödynnettiin lähes ainoana sideaineena. Nykyään kalkkia käytetään yksinään lähinnä maaperän neutralointiin. Massastabiloinnissa kalkkia käytetään sideaineseosten osakomponenttina, esimerkiksi sementin tai muiden sideaineseosten kanssa. Tällöin kalkki toimii muiden potsolaanisten sideaineiden sitoutumisreaktion aktivaattorina. (Hartikainen 2000; Lahtinen & Niutanen 2009; Jääskeläinen 2010b)

Kalkki sopii hyvin savisen maaperän stabilointiin. Stabiloidun maan kantavuus paranee ja routivuus pienenee. Vesipitoisuuden kasvaessa kalkki reagoi heikommin. Maaperän sisältämä rikki ja orgaaninen aines saattavat estää kalkin sitoutumisprosessia. Näin ollen turpeen stabilointiin kalkki ei sovellu. (Hartikainen 2000; Lahtinen & Niutanen 2009; Jääskeläinen 2010b)

3.4.2 Sementti

Sementti on hydraulinen sideaine, joka valmistetaan kalkkikivestä, seosaineista ja kipsistä murskaamalla ja jauhamalla. Sementti sisältää pääosin kalsium-, pii-, alumiini- ja rautaoksidgeja. Sementti reagoi hydraulisesti veden kanssa. Hydrataatioreaktio alkaa, kun sementti sekoitetaan veden ja muiden komponenttien kanssa. Sementin sisältämät silikaatit ja aluminaatit muodostavat veden kanssa reagoidessaan hydrataatiotuotteita: kalsiumsilikaattihydraattia ja kalsiumoksidia, jotka ajan kuluessa kovettuvat sementtiliimaksi. Seos kovettuu ja liimaa maarakeet toisiinsa. Hydrataatioreaktio alkaa hitaasti sementtirakeiden pinnalta ja ydin voi jäädä reagoimatta. Sementin ei tarvitse reagoida maaperän savimineraalien kanssa, jolloin se ei muuta maaperän rakennetta kalkin tapaan. Hydrataatioprosessin lopputuote, kalsiumhydroksidi, voi reagoida vielä potsolaanisten materiaalien kanssa. (EuroSoilStab 2002; Axelsson et al. 2002; Makusa 2012)

Sementin ja kalkin reaktioissa syntyy lopulta samanlaisia lopputuotteita. Sementin hydraulinen reaktio tapahtuu vain huomattavasti kalkin potsolaanista reaktiota nopeammin. Sementillä lujuus myös kehittyy kalkkia nopeammin. Korkeamman sitoutumislämpötilan takia sementillä voidaan saavuttaa suurempia lujuuksia, varsinkin ensimmäisten kuukausien aikana. (Axelsson et al. 2002)

Markkinoilla on tarjolla useita erilaisia CE-merkittyjä sementtejä. Perinteinen portland-sementti sopii yksinäänkin hyvin stabilointiin. Sementin sekaan voidaan lisätä muita sideaineita, kuten masuunikuonaa, kalkkia tai silikaa, ja lisäaineita, mikä muuttaa sementin reaktioita. Seosaineilla voidaan vaikuttaa esimerkiksi sementin lujuuden kehittymisen nopeuteen (rapidsementti, pikasementti) tai kemiallisten rasiusten sietokykyyn (sulfaatin kestävä sementti). (EuroSoilStab 2002)

Sementti soveltuu lähes kaikkien maalajien stabilointiin. Maaperän humus voi kuitenkin rajoittaa sementin käyttöä. Turpeen sisältämät hapot saattavat estää sementin hydratoitumista ja alentaa lopputuotteen lujuutta tai estää lujuuden kehittymisen kokonaan. Sideaineseoksissa sementti toimii kalkin tavoin sitoutumisreaktion aktivaattorina. (Hartikainen 2000)

3.4.3 Masuunikuona

Masuunikuona on raudanvalmistuksessa syntyvä sivutuote, jolla on piileviä hydraulisia ominaisuuksia. Sideainemateriaaliksi masuunikuona jalostetaan granuloidulla eli masuunikuona jäähdytetään paineellisen vesisuihkun avulla noin 1350 °C asteesta. Vesisuihku rikkoo sulan kuonan masuunihiekaksi. Nopea jäähdytys estää masuunihiekan kiteytymisen; materiaali jäähmettyy huokoiseksi, terävsärmäiseksi, lasimaisiksi rakeiksi. Masuunihiekka jauhetaan edelleen pienemmäksi. Hienojakoinen kuona reagoi karkearakeista paremmin. Masuunikuonan laatu voi vaihdella raudan valmistusprosessista, raaka-aineista ja käytetyistä lisäaineista johtuen. Masuunikuona sisältää rautarikasteen sivukiveä sekä masuuniin lisättyä kuonanmuodostajaa, usein kalkkikiveä. (Mäkelä & Höynälä 2000; EuroSoilStab 2002)

Masuunikuona on piilevästi hydraulinen materiaali. Se ei ole reaktiokykyinen yksinään. Sitoutumisreaktion aloittaminen ja kiihdyttäminen vaatii aktivaattorin. Usein kuonan kanssa käytetäänkin sementtiä tai kalkkia. Masuunikuonan kemiallinen koostumus ja sitoutumislämpötila vaikuttavat sitoutumisherkkyyteen. Rikkipitoisuuden kasvu vaikuttaa edullisesti sitoutumiseen. Korkeammassa lämpötiloissa masuunikuona reagoi paremmin ja saavuttaa korkeamman lujuuden. Kuonalla stabiloidussa maaperässä sitoutumisreaktio on pitkäaikainen ja lujuuden kehitys voi jatkua vuosia stabiloinnin jälkeen. (Mäkelä & Höynälä 2000; Axelsson et al. 2002)

Masuunikuona on teollisuuden sivutuote, materiaali, jolla on jätestatus. Masuunikuona on tuotteistettu tuotelainsäädännön mukaan valmistuspaikkakohtaisesti. Jotkut kaupalliset sementtiseokset voivat jo valmiiksi sisältää masuunikuonaa. Useimpien kokeiden ja tutkimusten mukaan masuunihiekka ei sisällä haitallisia määriä haitta-aineita. (Mäkelä & Höynälä 2000; Tiehallinto 2007b)

3.4.4 Lentotuhka

Lehtotuhkaa syntyy kivihiilen, turpeen tai muiden biopolttoaineiden polttoprosessin jäännöksenä. Polttotekniikka vaikuttaa olennaisesti syntyvän lentotuhkan määrään ja laatuun. Suomessa ja muissa Pohjoismaissa kivihiilen poltossa syntyvä tuhka on

enimmäkseen lentotuhkaa. Myös turpeen poltossa käytetään pölypolttoa, jolloin lentotuhkan osuus on suuri. Lentotuhka kerätään talteen savukaasujen joukosta suodattimilla. (Mäkelä & Höynälä 2000; Axelsson et al. 2002)

Lentotuhkat ovat potsolaanisia, mutta sitoutumisreaktion voimakkuus vaihtelee. Vapaan poltetun kalkin määrä vaikuttaa eniten reaktion voimakkuuteen. Poltetun kalkin määrään vaikuttaa taas eniten polttotekniikka. Varsinkin turvetuhkien parissa vaihtelua lujittumisessa esiintyy paljon. Kunkin tuotteen sitoutumisesta on varmistuttava erikseen. Yksinään lentotuhkat eivät ole kovin reaktiivisia ja sitoutumisreaktion nopeus ei ole kovin nopea. Lentotuhkan ja savimineraalien välisen reaktion nopeuttaminen vaatii aktivaattorin, kuten sementin, kalkin tai rikinpoiston lopputuotteen, lisäämistä. Lentotuhkan ominaisuuksia voidaankin parhaiten hyödyntää sideaineseoksissa. (Mäkelä & Höynälä 2000; Axelsson et al. 2002; Makusa 2012)

Lentotuhka on hienorakeinen materiaali. Sen raekokojakauma vastaa siltin rakeisuutta eli raekoko vaihtelee välillä 0,002...0,1 mm. Käytetty polttoaine ja polttoprosessi vaikuttavat tuhkan koostumukseen. Esimerkiksi turpeen polton lentotuhkan kemiallinen koostumus vaihtelee käytetyn turpeen ja apupolttoaineiden lähtöarvojen mukaan. Kemiallinen koostumus ja raskasmetallien määrä vaikuttavat eniten tuhkien ympäristökelpoisuuteen. Lentotuhkan käyttö sideaineena vaatii ympäristöluvan. (Mäkelä & Höynälä 2000; Kiviniemi et al. 2012)

3.4.5 Rikinpoiston lopputuote ja kipsi

Kivihiilen poltossa syntyy tuhkien lisäksi rikinpoiston lopputuotetta. Kivihiili sisältää vaihtelevia määriä rikkiä, joka kulkeutuu lentotuhkan tavoin savukaasujen mukana polttoprosessissa. Savukaasujen sisältämä rikki voidaan kerätä talteen erilaisilla menetelmillä. Suomessa käytetään eniten puolikuiva- ja kuivamenetelmää. Rikki absorboidaan absorbentin, esimerkiksi kalsiumoksidin, pinnalle suihkuttamalla absorbenttia savukaasujen joukkoon. Rikki sitoutuu kalsiumsulfidiksi tai -sulfaatiksi. Rikinpoiston lopputuote koostuu siis kalsiumsulfaattista ja -sulfiitista, reagoimattomasta kalkista ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), kalsiumkarbonaatista ja -kloridista. Lopputuotteen sisältämät kloridit ja sulfaatit saattavat rajoittaa sen käyttöä. (Mäkelä & Höynälä 2000)

Rikinpoiston lopputuotteen tekniset ominaisuudet lujuus- ja lujittumisominaisuuksia lukuun ottamatta muistuttavat lentotuhkan ominaisuuksia. Rikinpoiston lopputuotteen rakeisuus on vastaavasti lähellä siltin rakeisuutta. Koska rikinpoiston lopputuote on lajittumaton ja helposti liettyvä materiaali, jos vettä on liikaa saatavilla, sitä suositellaan käytettäväksi seoksena esimerkiksi lentotuhkan tai sementin kanssa. Kun rikinpoiston lopputuotetta yhdistetään lentotuhkaan, lopputuloksena voi olla pelkkää lentotuhkaa nopeammin lujittuva tuote. Hyödyntämisen ongelmana on laadun epätasaisuus. Parhaimmillaan lopputuote on puhdasta kipsiä; heikoimmillaan lopputuote voi olla lähes reagoimatonta kalsiumsulfaattia. (Mäkelä & Höynälä 2000; EuroSoilStab 2002)

3.4.6 Palavan kiven tuhka

Palavan kiven tuhka on öljyliuskeen eli palavan kiven poltossa syntyvää tuhkaa. Palavan kiven tuhkaa syntyy Virossa merkittäviä määriä vuosittain, koska Virossa sähkötuotanto perustuu öljyliuskeen polttamiseen voimalaitoksissa. Öljyliuskeen polttoprosessissa syntyy kivihiilen polttoprosessin tavoin erilaisia tuhkia: pohjatuhkaa ja suodattimilla savukaasuista erotettavaa tuhkaa. Sähkösuodattimilla erotettu tuhka sopii käytettäväksi stabiloinnin sideaineena sideaineseoksissa, sillä se on potsolaanisesti käyttäytyvä materiaali. Palavan kiven tuhalla voidaan korvata esimerkiksi osan sementistä. Sähkösuodattimilla erotetun tuhkan raekokojakauma vastaa silttiä. (Ollila & Kiviniemi 2011; Ronkainen et al. 2012)

Alkuaineanalyysin mukaan palavan kiven tuhka sisältää paljon kalsiumia ja jonkin verran metalleja. Polttotekniikka vaikuttaa tuhkan koostumukseen. OSAMAT-hankkeessa määritettiin palavan kiven tuhkan haitta-ainepitoisuuksia ja niiden liukoisuuksia. Kokonaispitoisuudet eivät ylittäneet Mara-asetuksen 403/2009 mukaisia raja-arvoja, mutta kloridin, fluoridin, kromin ja molybdeenin liukoisuuksien havaittiin olevan suuria. Koska palavan kiven tuhka luokitellaan jätemateriaaliksi lentotuhkien tapaan, sen käyttö sideaineena vaatii ympäristöluvan. (Ollila & Kiviniemi 2011; Ronkainen et al. 2012)

3.5 Sideaineen valinta ja stabiloinnin tavoitteet

Sideaineen valintaan vaikuttavat vallitseva maaperä sekä haluttu lopputulos. Eri sideaineiden sitoutumisreaktiot ovat erilaisia. Hydrauliset sideaineet reagoivat maaperän veden kanssa; ei-hydrauliset sideaineet reagoivat maaperän savimineraalien kanssa. Kovettuva sideaine sitoo maapartikkelit kiinni toisiinsa. Lujuuden kehityksen nopeus riippuu sitoutumisreaktion laadusta. Hydraulinen reaktio alkaa toimia heti, kun sideaine sekoitetaan maaperään. Potsolaaniset reaktiot vaativat enemmän aikaa. Tästä johtuen sementillä stabiloitaessa lujuuden kehitys on selvästi muita sideaineita nopeampaa ja sillä saavutetaan korkeampia lujuuksia. Kalkin, masuunikuonan ja lentotuhkan sitoutumisreaktiot ovat sementtiä hitaampia ja jatkuvat pidempään. (EuroSoilStab 2002; Axelsson et al. 2002; Lahtinen & Niutanen 2009)

Maaperän indeksi- ja geotekniset ominaisuudet vaikuttavat sideaineen reaktioihin. Turve- ja lieju sisältävät paljon eloperäistä ainesta. Orgaaninen aines sisältää humusta ja humushappoja, jotka alentavat pH:ta. Jos pH on liian matala, esimerkiksi sementti ei pääse tarttumaan maapartikkeleihin ja lujuus jää näin alhaisemmaksi. Orgaanisen aineksen suuren määrän takia turve voi myös sisältää huomattavia määriä vettä. Vesipitoisuuden kasvu vaatii aina enemmän sideainetta. Turpeessa vesipitoisuus voi vaihdella eri syvyyksillä. Lisäksi turpeessa maa-ainepartikkelien osuus voi olla pieni verrattuna eloperäisen aineksen määrään, jolloin sideaineelle ei ole riittävästi maa-ainesrakeita tarttumisalustoiksi. Tarttumapintojen vähäisyydestä johtuen sideainemäärän

täytyy olla suurempi. Tästä johtuen turpeen ja liejun stabilointi vaatii saven stabilointia enemmän sideainetta. (Axelsson et al. 2002; Ojala 2002)

Sideaineen reaktiot muuttavat pohjamaan kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia. Maaperän pH nousee noin tasolle 11 tai 12. Maarakeiden partikkelikoko kasvaa, kun ne sideaineen vaikutuksesta sitoutuvat toisiinsa. Raekoon kasvamisesta ja huokostilan vähenemisen takia maaperän leikkauslujuus kasvaa ja painumat pienenevät. (Ojala 2002)

Maalaji vaikuttaa sideaineen valintaan. Kalkki toimii hyvin savipitoisen maan stabiloinnissa. Sementti sopii lähes kaikkien maalajien stabilointiin. Turpeen sisältämät humushapot saattavat estää sementin hydratoitumista, mutta sideaineseoksissa sementti toimii tehokkaasti turpeessakin. Lentotuhkaa, masuunikuonaa ja kipsiä käytetään usein sementin kanssa sideaineseoksissa. (Lahtinen & Niutanen 2009)

Stabiloinnin kustannukset vaikuttavat sideaineen valintaan. Sideainekustannukset muodostavat jopa 70 - 80 prosenttia stabiloinnin kokonaiskustannuksista. Kaupallisten sideaineiden, kuten sementin ja kalkin, hankintakustannukset ovat niin merkittävät, että stabilointiin on kehitetty muita sideainevaihtoehtoja teollisuuden sivutuotteista. Teollisuuden sivutuotteiden kierrättäminen stabiloinnin sideaineeksi laskee huomattavasti stabiloinnin kustannuksia, sillä kaupallisia sideaineita tarvitaan tällöin vähemmän. Lisäsäästöjä muodostuu myös, kun hyödynnettäviä sivutuote- ja jätemateriaaleja ei tarvitse sijoittaa kaatopaikalle. Taloudellisista syistä voi olla perusteltua käyttää vaihtoehtoisia sideaineita. (EuroSoilStab 2002; Lahtinen & Niutanen 2009)

Sideaineiden ja sideaineyhdistelmien soveltuvuutta stabilointiin arvioidaan laboratoriossa tehtävien stabiloitavuuskokeiden perusteella. Käytännössä stabiloitavasta materiaalista ja eri sideaineista valmistetaan koekappaleita eri sideainepitoisuuksilla tarvittaessa eri vesipitoisuuksissa. Koekappaleet koestetaan eli niiden lujuusominaisuuksia testataan tietyn ajan kuluessa. Lujuuden määrittämiseen käytetään yleensä yksiaksiaalista puristuslujuuskoetta, jolla voidaan määrittää koekappaleiden saavuttama puristuslujuus riittävällä tarkkuudella. Kun samanlaiset koekappaleet testataan näin eri-ikäisinä, saadaan tietoa stabiloitavan materiaalin ja sideaineen ajallisesta lujittumisesta. Koska eri sideaineiden ja sideaineseosten lujittumisnopeus vaihtelee huomattavasti, koekappaleiden lujittumista tulisi seurata riittävä pitkään, useita kuukausia. (Hautalahti et al. 2007)

Tyypillisesti stabiloinnille asetetaan leikkauslujuustavoite, joka riippuu käyttökohteesta. Lujuustavoite huomioidaan jo stabiloitavuuskokeissa, jossa testataan koekappaleiden puristuslujuus. Leikkauslujuus on puolet puristuslujuudesta. Laboratoriossa puristuslujuustavoite on usein 150 - 200 kPa, kun stabiloidaan altaisiin läjitettyjä massoja. Jos massat aiotaan siirtää stabiloinnin jälkeen, pienemmät puristuslujuudet ovat perusteltuja. Täyttö- ja tasauskerroksissa alle 100 kPa:n puristuslujuus voi hyvin olla riittävä. Kenttärakenteiden alle tulevilla stabiloinneilla tyypillinen laboratoriossa tavoiteltu puristuslujuustaso on 150 - 200 kPa. (Jyrävä 2013)

Esimerkiksi STABLE-hankkeessa stabiloidun ruoppausmassan puristuslujuustavoite maastossa kahden vuoden ikäisenä oli 180 kPa läjitysaltaan yläosassa. Syvemmällä altaan alaosassa 100 kPa:n puristuslujuus oli riittävä. Tavoiteleikkauslujuus ympäristölupaviraston lupapäätöksen mukaan oli rakenteen yläosassa 50 - 70 kPa. (Autiola 2009)

Puristuslujuustestien perusteella tiedetään, minkälaisilla sideaineyhdistelmillä saavutetaan haluttu loppulujuus. Tulosten perusteella valitaan kohteessa käytettävä sideaine ja sen pitoisuus. Lisätestauksella voidaan vielä optimoida tarvittava sideainemäärä. Tyypillinen sideainepitoisuus on 100 - 250 kg/m³. Liejun stabiloinnissa tyypillisen sementtipohjaisen sideaineen määrä on 100 - 200 kg/m³. Turpeen stabiloinnissa sementtipohjaista sideainetta käytetään 150 - 250 kg/m³. Ruoppausmassojen stabiloinnissa käytetty sementtipohjaisen sideaineen määrä on 70 - 200 kg/m³. (Axelsson et al. 2002)

Puristuslujuustestien lopputulosta arvioitaessa on huomioitava, että laboratoriossa saavutetaan huomattavasti suurempia lujuuksia kuin lopullisessa rakenteessa, koska laboratoriossa olosuhteiden (maalaji, lämpötila) vaihtelu on minimaalista ja sekoitustyön määrä on vakioitu. Stabilointikohteessa sekoitustyön homogeenisuudesta ei voida olla täysin varmoja ja maalaji ominaisuuksineen vaihtelee laboratoriotesteissä käytettyyn kokoomanäytteeseen verrattuna. (Hautalahti et al. 2007)

Sopiva sideaineyhdistelmä on määritettävä jokaiseen stabilointikohteeseen erikseen. Stabiloitavuustestit ovat hyvin tärkeässä osassa etenkin prosessistabiloinnissa, jossa stabiloitavan ruoppausmassan laatu voi vaihdella ja stabiloinnilla tavoitellaan myös haitta-aineiden sitomista. Haitta-aineet tulisi stabiloida niin, että niiden huuhtoutuminen tai vapautuminen valmiista rakenteesta vähenisi merkittävästi. (Autiola 2009)

3.6 Stabiloinnin täyteaineet

Kokemusperäisesti on havaittu, että kivennäismaalajin lisäyksellä on suotuisa vaikutus sementillä stabiloidun orgaanisen aineksen hydrataatioreaktioon. Täyteaine ei reagoi sideaineen tavoin, vaan sen lisäys kasvattaa kovettuvalle sideaineelle otollisten tarttumapintojen määrää orgaanisen aineksen seassa. Jotta tarttumapintojen määrä lisääntyisi, lisättävän kiviaineksen tulisi olla riittävästi sementtirakeita suurempia ja karkeampia. (Ojala 2002)

Täytemateriaalin lisäyksestä onkin eniten hyötyä turve- ja liejupitoisten maiden stabiloinnissa, koska tällöin stabiloitavan massan maa-ainespartikkelimäärä kasvaa ja huokostila pienenee. Tällöin myös tarvittavan sideaineen määrä pienenee. Sideainetta halvemman täytemateriaalin lisäyksellä voidaan näin ollen saavuttaa kustannussäästöjä. Täytemateriaali myös lisää jonkin verran stabiloidun massan lujuutta, koska maaperässä oleva huokostila pienenee. Täytemateriaalin mineraalikoostumuksella on myös arveltu olevan vaikutusta lujittumisen tehokkuuteen. Kvartsipitoisella hiekalla tuntuisi olevan suurempi vaikutus kuin kalkkikiveä sisältävällä täyteaineella. Täyteaineen vaikutus ei kuitenkaan vastaa saman sideainemäärän vaikutusta. (Axelsson et al. 2002)

Lisättävän hiekan määrä on tyypillisesti ollut 100 - 150 kg/m³. Jos lisättävät kivennäismaalajimäärät ovat huomattavasti suurempia ja sideainemäärää samalla pienennetään, menetelmä alkaa muistuttaa massanvaihtoa. (Ojala 2002; ALLU 2007)

Toteutuneissa massastabilointikohteissa hiekka on levitetty ennen stabilointia patjaksi stabiloitavalle alueelle. Hiekka sekoitetaan maa-aineksen joukkoon samalla, kun sideaine lisätään. Tarvittaessa hiekka voidaan sekoittaa maaperään ennen sideainen lisäämistä homogenisoinnin yhteydessä. (Ojala 2002)

Kivennäismaalajin lisäystä on hyödynnetty turpeen stabiloinnissa esimerkiksi Helsingissä Kivikossa ja Tampereella Turvesuonkadulla. Ojalan diplomityössä raportoidussa Tampereen Turvesuonkadun massastabilointityössä hiekan lisäämisen havaittiin nopeuttavan alkuvaiheen lujittumista ja helpottavan stabilointityön suorittamista. Stabilointityö aloitettiin kohteessa ensin ilman hiekkaa, mutta havaittiin, että stabilointityön jatkaminen edellisenä päivänä stabiloidun maan päältä ei onnistunut. Sideainen (yleissementti 100 kg/m³) lisäksi maaperään sekoitettiin hiekkaa, jonka maksimirakeisuus oli 8 millimetriä. Alkuun lisättävän hiekan määränä kokeiltiin 50 kg yhtä turvekuutiota kohti, myöhemmin määrää kasvatettiin 150 kg/m³. (Ojala 2002)

Maa-aineksen sitoutumista seurattiin mittaamalla sitoutumislämpötilaa eri syvyyksiltä stabiloidussa massassa. Pelkällä sementillä stabiloidulla alueella lämpötila mitattiin 0,5 metriä ja 2,5 metriä stabiloidun kerroksen yläpinnasta alaspäin sijoitetuilla mittauspisteillä. Hiekkamäärällä 50 kg/m³ stabiloidulla alueella lämpötilaa mitattiin 1,5 metrin syvyydestä ja kolmannella alueella 1,4 metrin syvyydestä. Lämpötilamittausten perusteella hiekan lisäys tehosti lämmönkehitystä lujittumisen alkuvaiheessa. Korkein lämpötila, noin 17 °C, saavutettiin alueella, jossa hiekkaa lisättiin 150 kg/m³. Hiekkapitoisuudella 50 kg/m³ maksimilämpötila oli noin 13 °C astetta. Maksimilämpötila saavutettiin noin kahden viikon kuluessa sekoittamisesta. Pelkällä sementillä stabiloidulla alueella lämmönkehitys oli hitaampaa. Maksimilämpötila, noin 13 °C astetta, saavutettiin noin neljä viikkoa sekoituksen jälkeen. (Ojala 2002)

Työmaalla havaittiin myös, että edellisenä päivänä sekoitettu massa oli hiekan lisäyksen jälkeen kovempaa ja kantoi työkoneita paremmin kuin ennen hiekan lisäämistä. Hiekan lisäyksen siis havaittiin nopeuttavan lujittumista lujittumisen alkuvaiheessa ja parantaa näin ollen työtekniistä suoritusta. (Ojala 2002)

Ennen stabilointia tehtiin stabiloituvuustutkimus ennakkokokeilla. Ennakkokokekappaleilla saavutettiin 92 kPa:n puristuslujuus 28 vuorokauden lujittumisen jälkeen, kun sideaine oli yleissementtiä ja sideainemäärä 100 kg/m³. Stabiloidusta massasta valmistettiin stabiloinnin aikana laadunvalvontakokekappaleita, joista määritettiin myös 28 vuorokauden ikäisenä puristuslujuus sekä sideainepitoisuus. Laadunvalvontakokekappaleiden lujuustulokset jäivät ennakkokokeita alhaisemmiksi sekoitustavasta ja lämpötilasta johtuen. Hiekan lisäyksellä ei kuitenkaan havaittu olevan vaikutusta loppulujuuteen. (Ojala 2002)

4 KIVITUHKAN VAIKUTUS LUJITTUMISEEN STABILOITAVUUSTESTAUKSESSA

Kivituhkan soveltuvuutta massa- ja prosessistabiloinnin täyteaineeksi selvitettiin stabiloitavuustestauksena Ramboll Finland Oy:n Luopioisten laboratoriossa. Laboratoriossa tutkittiin saven ja turpeen lujittumista, kun runkoaineen ja sideaineen joukkoon lisättiin kivituhkaa (KaM 0/6). Stabiloitavuustestien tarkoituksena oli selvittää, saadaanko kivituhkan lisäyksellä kasvatettua koekappaleiden puristuslujuutta vertailukoesarjoihin nähden. Vertailukoesarjoissa käytettiin samoja sideaineita ja sideainemääriä ilman kivituhkaa.

4.1 Tutkimuksissa käytetyt täyteaineet

Laboratoriotutkimuksissa seurattiin kivituhkan vaikutusta stabiloidun massan lujittumiseen laboratorio-olosuhteissa. Ennen tutkimuksia oli odotettavissa, että kivituhkan lisäyksellä saavutetaan suurempia hyötyjä turpeen stabiloinnissa. Kivituhka lisää kivennäismaan osuutta turpeessa, jolloin sideaineella on enemmän maarakeita, joiden kanssa reagoida. Etukäteen on oletettu, että kivituhka saattaisi myös pienentää turpeen tiivistymistä kuormituksen alkuvaiheessa, koska kivituhkan lisäys täyttää turpeen huokostilaa.

Laboratoriotutkimuksissa käytettävä kivituhka (KaM 0/6) on peräisin Nokian Leukavahan kalliokiviaineksen ottoalueelta. Aiempien standardin SFS-EN 932-3+A1 mukaan tehtyjen petrografiitutkimusten perusteella kyseisen kiviaineksen ottoalueen kivi on arvioituna kvartsidioriittia. Päämineraalit ovat kvartsi, plagioklaasi, kiille ja sarvivälke.

Tutkimuksissa käytetty kivituhkanäyte on otettu varastokasalta syyskuussa 2013. Kivituhkan rakeisuus on määritetty standardin CEN ISO/TS 17892-4:fi mukaisesti. Raekokojakauma on esitetty liitteessä 1. Kivituhkan hienoainespitoisuus on noin 9 prosenttia ja maksimiraekoko on 6 mm.

Turpeelle tehdyissä stabiloituvuuskokeissa käytettiin vaihtoehtoisena täyteaineena hiekkää (Hk 0/2). Hiekka on alun perin peräisin Helsingistä Kivikon alueelta. Hiekan rakeisuus on määritetty seulomalla standardin CEN ISO/TS 17892-4:fi mukaan. Raekokojakauma on esitetty liitteessä 1 kivituhkan kanssa. Hiekan hienoainespitoisuus on hyvin pieni, lähes nolla ja maksimiraekoko on 2 mm. Kivituhka on selvästi tutkimuksissa käytettyä hiekkää karkearakeisempaa. Kuvissa 16a ja b ovat tutkimuksissa käytetyt täyteaineet: hiekka 0/2 mm ja kivituhka 0/6 mm.



Kuva 16 Käytetyt täyteaineet: a) Hiekka 0/2 mm; b) Kivituhka 0/6 mm. (kuvat: Riina Rasimus 2013)

4.2 Jätkäsaaren allasmassojen tutkimusohjelma

4.2.1 Runkoaineen näytteenotto ja laboratoriotutkimukset

Jätkäsaaren ruoppausmassojen stabiloitavuustutkimuksessa käytettävät näytteet ovat peräisin Helsingin Jätkäsaaren välivarastoalueen stabiloitavien sedimenttien kuivatusaltaasta 1, jonne sedimentit on varastoitu 10. - 19.6.2013 välisenä aikana. Sedimenttikerroksen paksuus on noin 3 metriä. Näytteet on otettu seitsemästä eri pisteestä. Näytteitä on pyritty ottamaan kerroksittain 0 - 1 m, 1 - 2 m ja 2 - 3 m syvyydestä. Pisteestä 6/13 on otettu vain kaksi näytettä syvyyksiltä 0 - 1 m ja 1 - 2 m. Näytteiden lukumäärä on 20 kappaletta. Näytemäärä on 10 litraa per näyte. Näytteenotto-ohjelma on esitetty liitteessä 2.

Näytteiden edustama maalaji on arvioitu kustakin näytteestä silmämääräisesti. Lisäksi on tutkittu keskeisiä indeksiominaisuuksia, kuten vesipitoisuus ja hehkutushäviö sekä rakeisuus kolmen näytteen osalta. Runkoaine on silmämääräisen maalajiarvion perusteella savea. Areometrikoe on tehty pisteiden 2/13, 5/13 ja 7/13 näytteistä, jotka on otettu 1 - 2 metrin syvyydestä. Areometrikokeen perusteella näytteiden savipitoisuus on 52, 78 ja 51 prosenttia eli näytteet ovat rakeisuudeltaan lihavaa savea.

Näytteiden vesipitoisuus on määritetty standardien SFS 179-2 ja CEN ISO/TS 17892-1:fi mukaisesti. Näytteet on kuivattu uunissa 105 °C asteen lämpötilassa. Näytteiden vesipitoisuus vaihtelee noin 52 ja 108 prosentin välillä. Runkoaineen vesipitoisuus siis vaihtelee kuivatusaltaan eri osissa.

Näytteiden humuspitoisuutta on arvioitu hehkutushäviön (SFS-EN 1997-2 5.6) perusteella. Hehkutushäviö kuvaa näytteen sisältämän orgaanisen materiaalin määrää. Näytettä hehkutetaan 550 °C asteen lämpötilassa. Hehkutushäviö lasketaan massan häviön alkuperäisen kuivamassan suhteena. Hehkutushäviö vaihtelee näytteissä noin 2,5

ja 4,0 prosentin välillä. Yhteenveto näytteiden laboratoriokokeiden tuloksista on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4 Jätkäsaaren allasmassojen näytteiden laboratoriokokeiden tulokset

Näytepiste	Syvyys	Vesipitoisuus w [%]	Silmämääräinen maalaji	Hehkutushäviö Hh [%]	Areometrikoe ¹⁾
1/13	0-1 m	85,7 %	Sa / ljSa	3,8	
	1-2 m	84,7 %	Sa	3,3	
	2-3 m	69,6 %	Sa	2,8	
2/13	0-1 m	70,3 %	Sa (+kiviä)		liSa (52 %)
	1-2 m	65,8 %	Sa	2,7	
	2-3 m	61,7 %	Sa		
3/13	0-1 m	71,2 %	Sa		
	1-2 m	78,3 %	Sa	3,2	
	2-3 m	79,7 %	Sa		
4/13	0-1 m	66,6 %	Sa		
	1-2 m	67,2 %	Sa	2,6	
	2-3 m	59,9 %	Sa		
5/13	0-1 m	91,3 %	Sa	3,6	liSa (78 %)
	1-2 m	99,5 %	Sa	3,7	
	2-3 m	108 %	Sa	4,0	
6/13	0-1 m	65,3 %	Sa		
	1-2 m	69,0 %	Sa	2,7	
7/13	0-1 m	64,0 %	Sa		liSa (51 %)
	1-2 m	56,5 %	Sa	2,4	
	2-3 m	51,9 %	Sa		

¹⁾ Suluissa esitetty savipitoisuus #0.002 mm.

4.2.2 Käytetyt runko-, side- ja täyteaineet

Stabiloitavuustestauksen runkomateriaalina käytettiin yhdeksän yksittäisen runkomateriaalinäytteen seosta. Seos oli sama kuin Helsingin kaupungin Jätkäsaaren kolmosvaiheen stabilointia varten tilaamissa stabiloitavuustutkimuksissa. Kaupungin tutkimuksissa ei käytetty kivituhkaa. Runkomateriaali koottiin ja sekoitettiin näytepisteiden 1/13, 4/13 ja 5/13 kaikista osanäytteistä tasasuhteessa.

Kokoomanäytteen vesipitoisuus säädettiin hanavedellä 95 prosenttiin. Jätkäsaaren aiempien stabilointikokemusten perusteella on odotettavissa, että käsiteltävien massojen vesipitoisuus on laboratorioon toimitettujen näytteiden vesipitoisuutta korkeampi. Vesipitoisuuden kasvaessa joudutaan sideaineen määrää kasvattamaan, jotta saavutetaan sama lujuus kuin pienemmällä vesipitoisuudella. Säättämällä vesipitoisuus laboratoriossa näytteiden vesipitoisuutta korkeammaksi, voidaan sideaineen määrää arvioida varmalle puolelle. Sideainemäärän valinnassa täytyy huomioida, että koko massa saadaan kaikilta osin lujitettua. (EuroSoilStab 2002; Jyrävä 2013)

Stabiloitavuustutkimuksessa käytettiin sideaineina sementtiä (lyhenteenä käytetty Se), palavan kiven tuhkaa (PKT), kalkkisementtiseosta (Ka-Se) ja Hanasaaren

lentotuhkaa (LT). Sementti ja kalkkisementtiseos ovat kaupallisia sideaineita. Tutkimuksessa käytetty sementti oli PlusSementtiä. Kalkkisementtiseoksen seossuhde oli 3:7. Palavan kiven tuhka on peräisin Eesti Energialta ja se on palavan kiven poltossa syntyvää sähkösuodattimilla pakokaasuista erotettavaa tuhkaa. Tutkimuksissa käytetty näyte on otettu helmikuussa 2013. Lentotuhkanäyte otettiin Helsingin Hanasaaren voimalaitoksessa loka-marraskuun vaihteessa 2013. Tutkimuksissa käytetty lentotuhka oli kivihiilen poltossa syntyvää lentotuhkaa.

Kivituhkan lisäyksen vaikutuksia testattiin kahdella eri pitoisuudella, 200 ja 400 kg/m³. Kivituhkamäärät valittiin työteknisin perustein. Pienempi määrä olisi vielä helpohkosti sekoitettavissa maahan massastabilointikalustolla. Suuremman määrän, 400 kg/m³, sekoittaminen massastabilointikalustolla on huomattavasti haastavampaa. Sekoitustulos ei ole todennäköisesti suuremmalla määrällä enää tasainen. Vertailuksi aiemmin turpeen massastabiloinnissa on käytetty 100 - 150 kg/m³ hiekkaa.

Kivituhkan ja sideaineiden määrät laskettiin suhteessa stabiloitavan runkoaineen tilavuuteen. Stabiloitavuustutkimuksessa käytettävät sideaineet, sideaineyhdistelmät, sideaineiden ja kivituhkan määrät sekä koekappalenumerointi on esitetty taulukossa 5. Tutkimuksissa käytettiin kahden rinnakkaiskoekappaleen sarjaa. Ilman kivituhkaa valmistettuja vertailukoekappaleita tehtiin vain yksi kullakin sideaineella.

Taulukko 5 Jätkäsaaren allasmassojen tutkimuksesta varten tehtyjen koekappaleiden numerointi

Sideaine	Sideainemäärä [kg/m ³]	Koekappalenumerointi		
		Ilman kivituhkaa	Kivituhkaa 200 kg/m ³	Kivituhkaa 400 kg/m ³
Sementti (Se)	50	JS-1a	KT-1a/b	KT-3a/b
	75	JS-2a	KT-2a/b	KT-4a/b
Palavan kiven tuhka (PKT)	100	JS-5a	KT-5a/b	KT-7a/b
	150	JS-6a	KT-6a/b	KT-8a/b
Sementti + Palavan kiven tuhka (Se+PKT)	30 + 50	JS-9a	KT-10a/b	KT-12a/b
	10 + 100	JS-8a	KT-9a/b	KT-11a/b
Sementti + Lentotuhka (Se+LT)	30 + 100	JS-27a / JS-39a	KT-13a/b	KT-17a/b
	50 + 100	JS-29a	KT-14a/b	KT-18a/b
Sementti + Lentotuhka + Palavan kiven tuhka (Se+LT+PKT)	30 + 50 + 50	JS-35a	KT-16 a/b	KT-20a/b
Kalkki-sementti + Lentotuhka (Ka-Se+LT)	50 + 100	JS-32a	KT-15a/b	KT-19a/b

4.2.3 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleiden valmistus aloitettiin sekoittamalla kokoomanäyte maastossa otetuista osanäytteistä. Kokoomanäyte homogenisoitiin ja sen vesipitoisuus säädettiin 95 prosenttiin hanavedellä. Lisäksi koekappaleiden valmistuspöytäkirjaan laskettiin tarvittavat näyteaine-, sideaine- ja täyteainemäärät kuhunkin koekappalepariin.

Kivituhkan ja sideaineiden määrät laskettiin suhteessa stabiloitavan materiaalin tilavuuteen.

Varsinainen koekappaleiden valmistus aloitettiin punnitsemalla savi suoraan sekoitusastiaan. Sideaineet ja täyteaineet punnittiin erikseen ja sekoitettiin ensin keskenään, minkä jälkeen ne lisättiin sekoitusastiaan (kuva 17a). Massan sekoituksessa käytettiin laboratoriosekoitinta (kuva 17b). Sekoitus perustuu vakiotyöhön; massaa sekoitettiin ensin yleiskoneella yksi minuutti, minkä jälkeen massan sekoittuminen varmistettiin kääntelemällä massaa sekoitusastiassa pohjia myöten. Tämän jälkeen massaa sekoitettiin yleiskoneella vielä toinen minuutti.



Kuva 17 Savikoekappaleiden valmistus: a) Sideaineen ja kivituhkan punnitus, b) laboratoriosekoitin massan sekoittamiseen, c) sekoitetun massan sullonta muottiputken sisään (kuvat: Riina Rasimus 2013)

Sekoituksen jälkeen koekappale rakennettiin sullomalla muoviputken sisälle. Muoviputken sisähalkaisija oli 42 mm. Sekoitettu massa sullottiin käsin lieriön sisälle (kuva 17c). Massaa ei varsinaisesti missään vaiheessa tiivistetty. Vastakappaleen avulla sekoitettu massa saadaan tasaisemmin muottiputken sisään niin, että ilmakuplat vältetään. Kun muoviputki oli täynnä stabiloitua massaa, molemmat päät tasoitettiin käsin. Rinnakkaiskoekappaleet valmistettiin samaan aikaan eli yhdellä sekoituksella tehtiin ainakin kaksi koekappaletta. Valmis koekappale suljettiin muovipussiin, jotta vältettäisiin koekappaleen kuivuminen. Koekappaleet varastoitettiin lämpöeristetyissä laatikoissa ensin kaksi vuorokautta huoneenlämmössä noin 20 °C asteessa, jotta lujittuminen käynnistyi. Koska lämpöeristetyssä laatikossa mahdollinen sitoutumisreaktiosta aiheutuva reaktiolämpö saattaa nostaa lämpötilaa, kussakin laatikossa säilytetään vain samalla sideaineella tehtyjä kappaleita, jotta eri sideaineilla stabiloidut kappaleet eivät saa etua toisen sideaineen aiheuttamasta lämpötilannoususta. Kahden vuorokauden jälkeen koekappaleet siirrettiin +8 °C asteeseen, jossa ne säilytettiin koestukseen asti.

4.2.4 Puristuslujuuden määrittäminen

Puristuslujuuden määrittämistä varten koekappaleet tunkattiin ulos muoviputkesta. Koekappaleet lyhennettiin oikean kokoisiksi ja leikkauspinnat tasattiin. Puristettavan kappaleen halkaisija on puolet korkeudesta. Savikoekappaleiden halkaisija oli 42 mm ja korkeus 84 mm. Leikkauspinnan tulisi olla tasainen ja kohtisuorassa korkeussuuntaan,

jotta kuormitus kohdistuisi tasaisesti koko kappaleeseen. Kappaleen eheys tarkastettiin koekappaleen lyhentämisen yhteydessä silmämääräisesti. Kuvissa 18a - d on esitetty koekappaleiden valmistelu puristuslujuustestaukseen ja puristuslujuuden määrittäminen.



Kuva 18 Savikoekappaleiden valmistelu puristuslujuuskokeeseen: a) Koekappaleen tunkkaus ulos muottiputkesta, b) Koekappaleen lyhennys oikeaan mittaan, c) Lyhennetty koekappale leikkausmuotissa, d) Savikoekappaleen puristus (kuvat: Riina Rasimus 2013)

Puristuslujuus määritettiin yksiakselisella puristuskokeella (mukailtu SFS 179-2 ja CEN ISO/TS 17892-7:fi) 28 vuorokauden iässä. Puristuskokeessa koekappaletta puristetaan pystysuunnassa tasaisella nopeudella, kunnes koekappale murtuu. Kuormitusnopeus on savilla 1 mm/min. Jos murtumista ei tapahdu, puristusta jatketaan, kunnes muodonmuutos on 15 prosenttia. Koekappaleeseen ei kohdistu kuormituksen aikana minkäänlaista sivutukea. Puristuslujuustulokset on esitetty kappaleessa 5.1.2.

4.3 Turpeen tutkimusohjelma

4.3.1 Runkoaineen näytteenotto ja laborioriotutkimukset

Laborioriotestauksessa käytettävä turve on peräisin Hämeenlinnasta. Näyte on ollut pitkään varastoituna laborioriossa. Näyte on otettu yhdestä tutkimuspisteestä 1-2 metrin syvyydestä. Turve on silmämääräisesti arvioituna keskikertaisesti maatunutta. Turpeen vesipitoisuudeksi (SFS 179-2 ja CEN ISO/TS 17892-1:fi) on määritetty 725 prosenttia ja hehikutushäviöksi (SFS-EN 1997-2 5.6) 95,2 prosenttia.

4.3.2 Käytetyt runko-, side- ja täyteaineet

Tutkimuksessa selvitettiin eri kivituhkamäärien vaikutusta turvekoekappaleen lujittumiseen. Sideaineena käytettiin ainoastaan PlusSementtiä. Tutkimuksessa tehtiin koekappaleet kahdella eri sideainepitoisuudella 100 ja 130 kg yhtä turvekuutiota kohti. Koekappaleita tehtiin kaksi rinnakkaiskappaletta.

Kivituhkan määrät olivat 100, 200 ja 300 kg yhtä turvekuutiota kohti. Kivituhkan määrä valikoitui jälleen työteknisin perustein. Aiemmin turpeen stabiloinnissa on käytetty hiekkaa täyteaineena. Käytetty hiekkamäärä on ollut yleensä 100-150 kg/m³. Kivituhkakoekappaleiden lisäksi tehtiin vertailukoekappaleet ilman kivituhkaa ja

hiekkalla, jonka määrä turveseoksessa on 200 kg/m^3 . Koekappaleita tehtiin yhteensä 20 kappaletta. Tutkimusohjelma ja koekappalenumerointi on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6 Turpeen tutkimusohjelman mukaiset sideaineet ja täyteaineet sekä niiden määrät

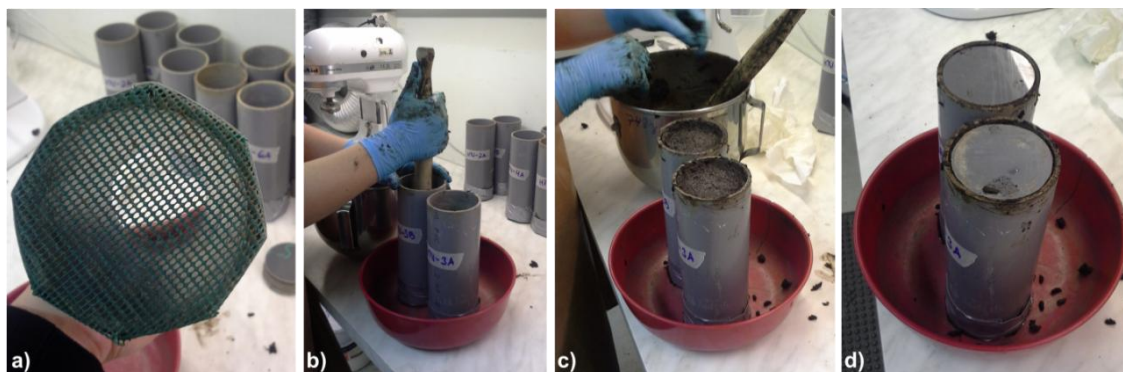
Sideaine	Määrä [kg/m ³]	Koekappalenumerointi				
		ei kivituhkaa	kituhka 100 kg/m ³	kituhka 200 kg/m ³	hiekkä 200 kg/m ³	kituhka 300 kg/m ³
PlusSementti	100	HTV-1a/b	HTV-3a/b	HTV-5a/b	HTV-7a/b	HTV-9a/b
	130	HTV-2a/b	HTV-4a/b	HTV-6a/b	HTV-8a/b	HTV-10a/b

4.3.3 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleiden valmistus aloitettiin homogenisoimalla kokoomanäyte ja valmistelemalla muottiputket, joiden sisähalkaisija on 68 mm. Turvekoekappaleet valmistettiin stabiloituvuustestauksessa vallitsevan käytännön mukaan savikoekappaleita isompina, jotta saadaan edustavammat näytteet heterogeenisten turpeiden osalta. Muovilieriöiden pohjaan teipattiin verkot. Kuhunkin koekappalepariin tarvittavan turpeen määrä selvitettiin turpeen tiheyden perusteella. Tarvittavan sideaineen ja täyteaineen määrä laskettiin turpeen tilavuutta kohti.

Massan valmistus tapahtui vastaavasti kuin savimassankin osalta. Määrät olivat koekappaleiden kokoeron vuoksi hieman suuremmat. Eli tarvittava turvemäärä punnittiin sekoitusastiaan. Sideaine ja täyteaine punnittiin erikseen ja sekoitettiin keskenään ennen turpeen joukkoon lisäämistä. Massaa sekoitettiin yleiskoneella 1 + 1 minuuttia. Välissä seosta käännettiin astian pohjia myöten, jotta varmistettiin koko massan sekoittuminen. Tarvittaessa massaa nosteltiin lähemmäs koneen sekoitusterää sekoituksen ajanakin. Laboratoriossa ei pyritä sekoittamaan täysin homogeenista massaa, vaan halutaan saada aikaan mahdollisimman paljon työmaata vastaavat olosuhteet. Sekoituksessa pyritään siis vakiotyöhön.

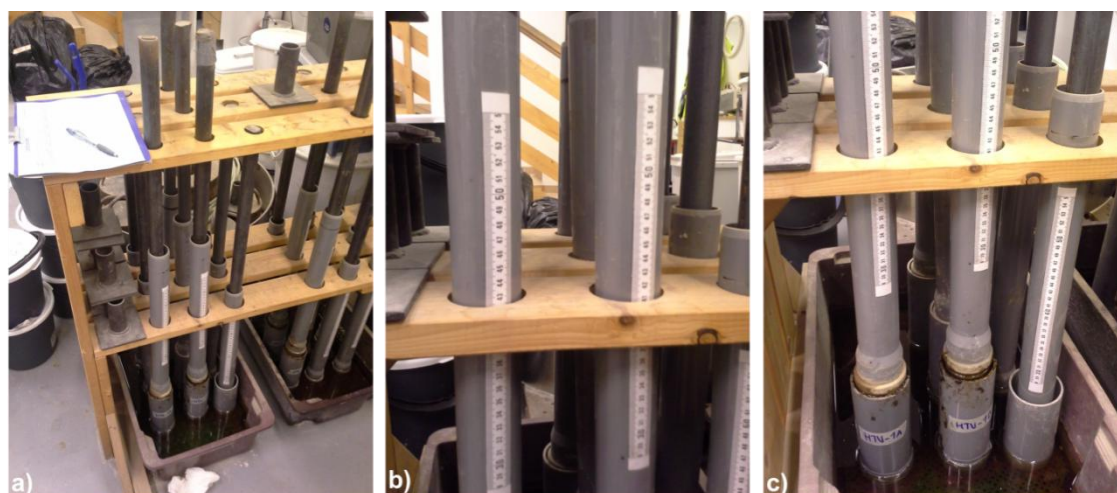
Sekoituksen jälkeen koekappaleet rakennettiin muottiputkiin. Sekoitettua massaa lisättiin pienissä erissä muottiin, minkä jälkeen sitä tiivistettiin nuijalla tasaiseksi. Samassa tahdissa tehtiin molemmat rinnakkaiskoekappaleet. Muotti täytettiin täyteen. Tiivistetyn koekappaleen päälle lisättiin vielä kansilevy, jonka halkaisija on muotin halkaisijaa pienempi. Kuvassa 19 on esitetty turvekoekappaleiden valmistuksen vaiheita.



Kuva 19 Turvekoekappaleen valmistus a) Muottiin teipattu verkko; b) Sekoitettun massan sullonta muottiin; c) Tiivistetyn koekappaleet; d) Valmiit koekappaleet kansineen. (kuvat: Riina Rasimus 2013)

4.3.4 Koekappaleiden esikuormittaminen

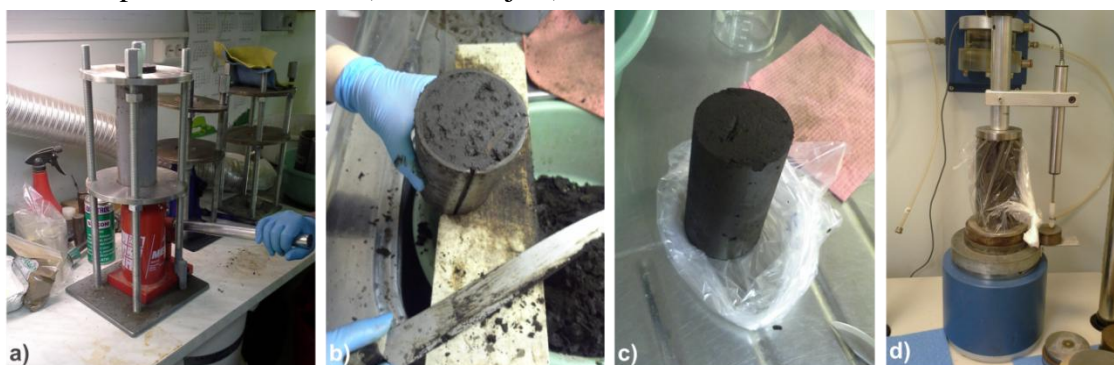
Valmiit turvekoekappaleet varastoitii esikuormituspenkissä (kuva 20), joka koostuu vesialtaasta, kuormitussyylinteristä ja sylinterin telineestä. Koekappale asetettiin muottiputkineen kuormitussyylinterin alle mahdollisimman suoraan. Kuormitussyylinteri on muottiputken halkaisijaa pienempi, jolloin se mahtuu painumaan putken sisään. Kuormitussyylinterin massa on 6,5 kg ja sillä aiheutetaan koekappaleeseen 18 kPa suuruinen kuormitus. Kuormitus vastaa noin yhden metrin korkuisen työpenkereen aiheuttamaa kuormitusta. Veden korkeus altaassa on noin 50 mm, jolloin vesi pääsee vapaasti imeytymään muottiputken alaosaan verkon läpi. Esikuormituspenkkiin on kiinnitetty mitta-asteikko, josta voidaan kätevästi seurata turpeen kokoonpuristumista. Turpeen kokoonpuristuma mitattiin 1, 7 ja 28 vuorokauden ikäisenä. Koekappaleita säilytettiin esikuormituspenkissä huoneen lämmössä noin 21 °C asteessa koko lujittumisvaiheen ajan eli 28 vuorokautta. Kokoonpuristumistulokset on esitetty kappaleessa 5.1.4.



Kuva 20 Esikuormituspenkki. (kuvat: Riina Rasimus 2013)

4.3.5 Puristuslujuuden määrittäminen

Turvekoekappaleiden puristuslujuus määritettiin samalla tavalla kuin savikoekappaleillakin. Koekappaleiden valmistelu ja puristaminen on esitetty kuvasarjassa 21. Koekappaleet tunkattiin ulos lieriöstä ja lyhennettiin oikean kokoisiksi. Turvekoekappaleiden halkaisija oli 68 mm, jolloin niiden korkeuden tuli olla 132 mm. Koekappaleen leikkauspinnan tulee olla kohtisuora, jotta kuormitus kohdistuu tasaisesti kappaleeseen. Turvekappale jää usein silminnähtävien huokoiseksi, vaikka sitä tiivistetäänkin valmistusvaiheessa. Kappaleiden pinnat olivat silmin nähtävien huokoisia. Suurimmilla kivituhkamäärillä suurempien kiviainesten määrän kasvu oli havaittavissa. Suurimmat kiviainesrakeet hankaloittivat kappaleen lyhentämistä ja leikkauspinta oli hankalampi saada tasaiseksi (kuva 21 b ja c).



Kuva 21 Turvekappaleiden valmistelu puristuslujuusmäärittäystä varten: a) Kappaleen tunkkaus ulos muottiputkesta, b) Koekappaleen lyhentäminen, c) Valmis koekappale, d) Koekappaleen kuormitus. (kuvat: Riina Rasimus 2013)

Puristuslujuus määritettiin yksiakselisella puristuskokeella mukailien standardeja SFS 179-2 ja CEN ISO/TS 17892-7:fi. Turvekoekappaleiden puristuksessa käytettiin samaa kuormituslaitteistoa kuin savikoekappaleiden puristamisessa. Puristusnopeus suurilla turvekoekappaleilla on 2 mm/min. Koekappaletta puristettiin pystysuunnassa tasaisella nopeudella, kunnes se murtui. Jos murtumista ei tapahdu, testauskäytännön mukaan puristusta jatketaan, kunnes muodonmuutos on 15 prosenttia. Koekappaleeseen ei kohdistunut kuormituksen aikana minkäänlaista sivutukea. Puristuslujuustulokset on esitetty kappaleessa 5.1.2.

5 KIVITUHKAN SOVELTUVUUS MASSASTABILOINNIN TÄYTEAINEEKSI

5.1 Laboratoriokokeiden tulokset

Seuraavassa on esitetty Jätkäsaaren ruoppausmassasta ja turpeesta tutkimusohjelmien mukaisesti valmistettujen koekappaleiden maksimipuristuslujuustulokset ja koekappaleiden käyttäytyminen murtotilassa. Lisäksi on esitetty stabiloinnin eri osakomponenttien laskennalliset tilavuusosuudet koekappaleissa kivituhkamäärän muuttuessa. Turvekoekappaleiden osalta esitetään myös esikuormituksen aikaiset kokoonpuristumat.

5.1.1 Stabiloinnin osakomponenttien tilavuusosuudet koekappaleissa

Laboratoriokokeissa käytetyn sideaineen ja täyteaineen määrät (kg/m^3) on laskettu runkoaineen tilavuutta kohti. Tällöin samalla sideaineyhdistelmällä ja -määrällä valmistetulla koekappalesarjalla sideaineen määrä ja tilavuus pysyy samana. Täyteaineen määrä sen sijaan vaihtelee.

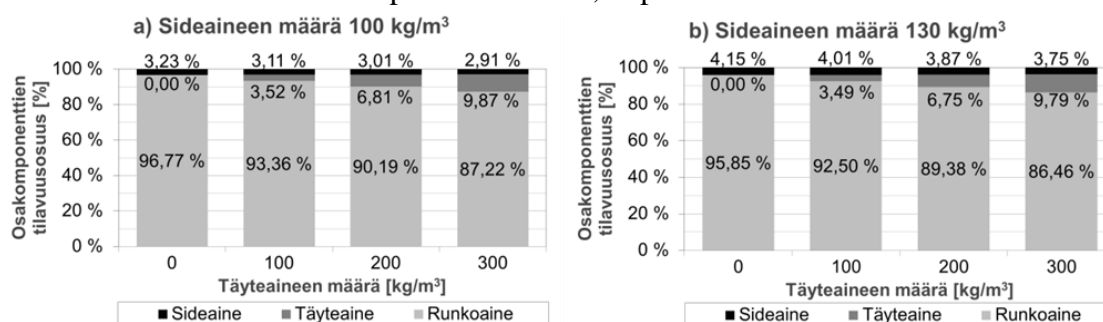
Stabiloinnin osakomponenttien tilavuusosuudet on laskettu side- ja täyteaineen määrän ja niiden kiintotiheyden sekä koko stabiloidun massan tilavuuden avulla. Sideaineena käytettiin PlusSementtiä, jonka kiintotiheys on 3000 kg/m^3 (Finnsementti 2013). Kun sementtiä käytetään 100 kg/m^3 , lisättävän sideaineen tilavuus on tällöin $0,033 \text{ m}^3$. Täyteaineena taas käytettiin kivituhkaa, jonka kiintotiheydeksi oletetaan 2650 kg/m^3 . Jos kivituhkaa käytetään 200 kg/m^3 , kivituhkan tilavuus on $0,075 \text{ m}^3$. Jos kivituhkaa käytetään 300 kg/m^3 , tilavuus on $0,113 \text{ m}^3$. Tällöin runkoaineen tilavuus on 1 m^3 . Taulukossa 7 on esitetty osakomponenttien tilavuudet ja tilavuusosuudet, kun sideaineena on käytetty sementtiä 100 kg/m^3 .

Taulukko 7 Stabiloinnin osakomponenttien tilavuudet ja tilavuusosuudet, kun sideaineen määrä on 100 kg/m^3 .

Sideaineen määrä [kg/m^3]		100					
Kivituhkan määrä [kg/m^3]	Tilavuudet [m^3]				Tilavuusosuus [%]		
	Sideaine	Täyteaine	Runkoaine	Seos	Runkoaine	Sideaine	Täyteaine
0	0,033	0,000	1	1,033	96,77 %	3,23 %	0,00 %
100	0,033	0,038	1	1,071	93,36 %	3,11 %	3,52 %
200	0,033	0,075	1	1,109	90,19 %	3,01 %	6,81 %
300	0,033	0,113	1	1,147	87,22 %	2,91 %	9,87 %

Tuloksista havaitaan, että stabiloidun massan kokonaistilavuus vaihtelee lisätyn kivituhkan määrän mukaan. Täyteaineen lisäys pienentää runkoaineen ja sideaineen suhteellisia tilavuusosuuksia. Täyteaineen lisäyksen vaikutusta eri sideainemäärillä on havainnollistettu kuvissa 22a ja b sekä 23a ja b. Kuvissa 22a ja b on esitetty osakomponenttien tilavuusosuudet turpeen tutkimusohjelman mukaisilla sideaine- ja täyteainemäärillä. Turpeen tutkimusohjelmassa tehtiin koesarjat 100 ja 130 kg/m³ sideainemäärällä. Koesarjoissa käytetyt täyteainemäärät olivat 0, 100, 200 ja 300 kg/m³. Pienemmällä sideaineen määrällä (100 kg/m³) tehdyssä koesarjassa sideaineen tilavuusosuus on pienempi kuin toisessa koesarjassa. Sideaineen tilavuusosuuden muutos on kuitenkin molemmissa koesarjoissa sama. Ilman täyteainetta valmistetulla koekappaleella sideaineen tilavuusosuus on 3,23 prosenttia. Suurimmalla täyteainemäärällä valmistetulla koekappaleella sideaineen tilavuusosuus on 2,91 prosenttia. Tällöin sideaineen tilavuusosuus pienenee noin 9,87 prosenttia.

Suuremmalla sideaineen määrällä (130 kg/m³) ilman täyteainetta valmistetun koekappaleen sideaineen tilavuusosuus on 4,15 prosenttia ja suurimmalla täyteainemäärällä valmistetun koekappaleen sideaineen tilavuusosuus 3,75 prosenttia. Näin ollen sideaineen tilavuusosuus pienenee noin 9,79 prosenttia.



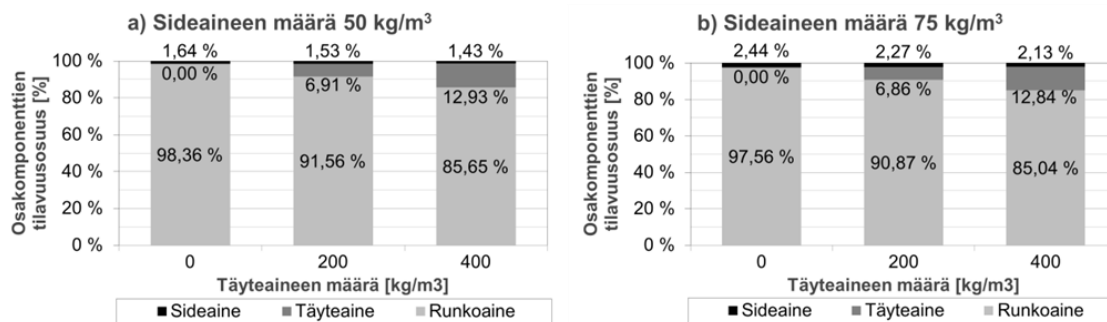
Kuva 22 Osakomponenttien tilavuusosuudet, kun sideaineen määrä on a) 100 kg/m³, ja b) 130 kg/m³ ja täyteaineen määrät ovat turpeen tutkimusohjelman mukaiset.

Kuvissa 23a ja b on esitetty Jätkäsaaren allasmassojen tutkimusohjelman mukaisilla täyteainemäärillä (0, 200 ja 400 kg/m³) eri osakomponenttien tilavuusosuudet. Tilavuusosuudet on määritetty niiden koekappaleiden osalta, joissa sideaineena käytettiin PlusSementtiä yksinään. Käytetyt sideainemäärät olivat 50 ja 75 kg/m³. Pienemmällä sideaineen määrällä sideaineen tilavuusosuus putoaa 12,93 prosenttia täyteainetta lisättäessä ja suuremmalla sideaineen määrällä 12,84 prosenttia. Sideaineen määrän kasvattaminen lisää sideaineen tilavuusosuutta koko stabiloidussa massassa ja pienentää täyteaineen lisäyksen vaikutusta muiden osakomponenttien tilavuusosuuksiin.

Osakomponenttien tilavuusosuudet muuttuvat aina saman verran kuin täyteaineen tilavuusosuus muuttuu. Kun täyteainetta lisätään 10 tilavuusprosenttia, sideaineen ja runkoaineen tilavuusprosentti pienenee 10 prosenttia.

Tilavuusosuudet ja niiden muutokset on määritetty ainoastaan koekappalesarjoille, joissa käytetään sideaineena pelkkää sementtiä. Sementtiä kevyemmällä sideaineilla, joiden kiintotiheys on pienempi, sideaineen tilavuus ja tilavuusosuus ovat laskettuja arvoja suurempia ja täyteaineen tilavuusosuus on vastaavasti pienempi. Sementtiä

kevyemmällä sideaineilla täyteaineen lisäys siis vaikuttaa vähemmän sideaineen tilavuusosuuteen. Sementtiä raskaammilla sideaineilla vaikutus on päinvastainen.



Kuva 23 Osakomponenttien tilavuusosuudet, kun sideaineen määrä on a) 50 kg/m^3 , ja b) 130 kg/m^3 ja täyteaineen määrät ovat Jätkäsaaren allasmassojen tutkimusohjelman mukaiset.

5.1.2 Koekappaleiden maksimipuristuslujuus

Laboratoriossa tutkittiin koekappaleiden maksimipuristuslujuuksia 28 vuorokauden ikäisinä yksiaksiaalisella puristuslujuuskokeella. Maksimipuristuslujuus luettiin puristuslujuustestauslaitteiston tulostamalta jännitys-muodonmuutos-kuvaajalta kuormituskäyrän huippupisteestä. Jännitys-muodonmuutos-kuvaajat on esitetty liitteissä 3 Jätkäsaaren allasmassojen osalta ja 4 turpeen osalta. Maksimipuristuslujuus on määritetty kahden rinnakkaiskoekappaleen keskiarvona. Jätkäsaaren allasmassoista valmistettiin ilman kivituhkaa vain yksi koekappale. Näin vertailukoekappaleiden puristuslujuustulos perustuu vain yhteen tulokseen.

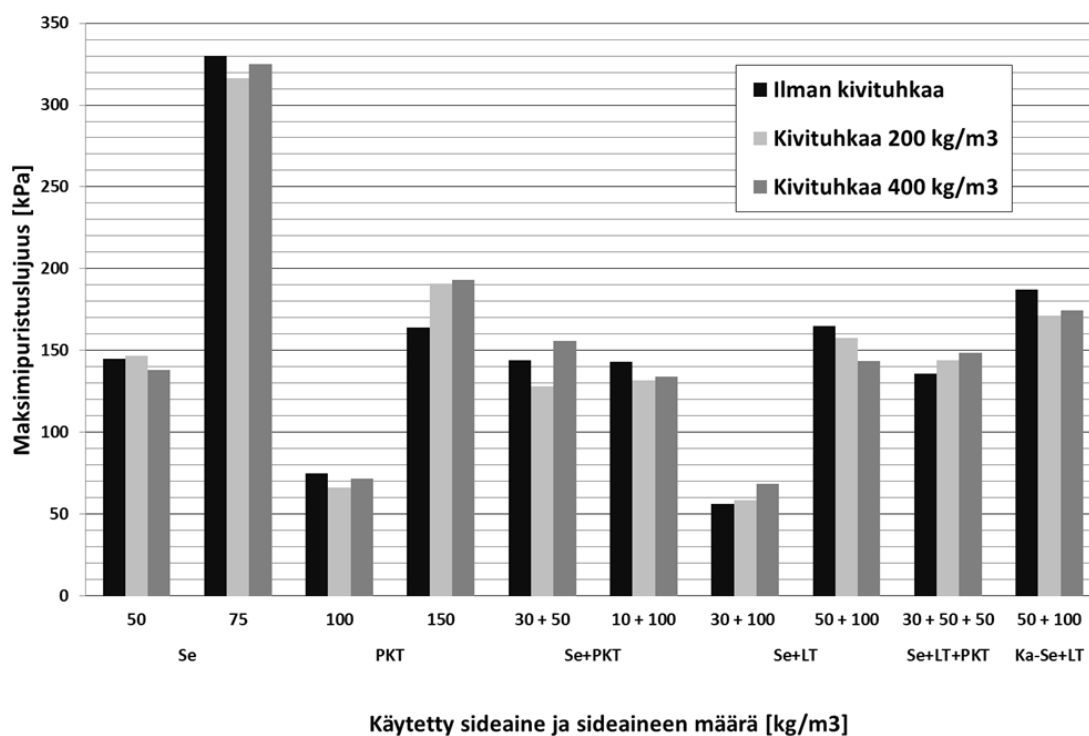
Jätkäsaaren allasmassoista valmistettujen koekappaleiden maksimipuristuslujuustulokset 28 vuorokauden ikäisinä on esitetty taulukossa 8. Rinnakkaiskoekappaleiden puristuslujuustulosten välinen hajonta on suurimmillaankin alle 10 kPa. Rinnakkaiskoekappaleiden tulokset vastaavat siis varsin hyvin toisiaan. Ainoastaan KT-2 a ja b näytteet poikkeavat enemmän toisistaan (27 kPa), mutta kyseisellä sideainemäärällä (sementti 75 kg/m^3) koekappaleiden puristuslujuustulos (yli 300 kPa) on kaksinkertainen muihin sideaineversioihin verrattuna.

Taulukko 8 Jätkäsaaren allasmassoista valmistettujen koekappaleiden maksimipuristuslujuustulokset 28 vuorokauden iässä.

Sideaine	Sideainemäärä [kg/m ³]	Puristuslujuus [kPa]								
		Ilman kivituhkaa			Kivituhkaa 200 kg/m ³			Kivituhkaa 400 kg/m ³		
		A	B	ka	A	B	ka	A	B	ka
Sementti (Se)	50	145		145	147	146	147	133	143	138
	75	330		330	303	330	317	320	330	325
Palavan kiven tuhka (PKT)	100	75		75	69	63	66	70	73	72
	150	164		164	191	191	191	190	196	193
Sementti + Palavan kiven tuhka (Se+PKT)	30 + 50	144		144	132	124	128	155	157	156
	10 + 100	143		143	128	135	132	135	133	134
Sementti + Lentotuhka (Se+LT)	30 + 100	58	54	56	58	59	59	70	67	69
	50 + 100	165		165	155	160	158	144	143	144
Sementti + Lentotuhka + Palavan kiven tuhka (Se+LT+PKT)	30 + 50 + 50	136		136	145	143	144	152	145	149
Kalkki-sementti + Lentotuhka (Ka-Se+LT)	50 + 100	187		187	173	170	172	179	170	175

Kuvassa 24 on esitetty Jätkäsaaren allasmassoista valmistettujen koekappaleiden maksimipuristuslujuustulokset 28 vuorokauden iässä. Kuvan perusteella on helpompi vertailla eri sideaineiden ja sideainemäärän sekä täyteainemäärän vaikutusta maksimipuristuslujuuteen. Sementti vaikuttaa merkittävästi puristuslujuuden suuruuteen. Esimerkiksi palavan kiven tuhkaa tarvitaan lähes kolminkertainen määrä sementtiin verrattuna, jotta saavutetaan vastaava puristuslujuustulos ja -taso. Sementin määrän puolitoistakertaistaminen kasvattaa maksimipuristuslujuuden yli kaksinkertaiseksi. Palavan kiven tuhalla määrän puolitoistakertaistaminen vaikuttaa samalla tavalla. Lentotuhka ei näytä lisäävän puristuslujuutta sideaineseoksissa, joissa on käytetty lentotuhkan lisäksi sementtiä tai sementin ja palavan kiven tuhkan yhdistelmää (Se50- ja Se50+LT100-seokset; Se30+PKT50- ja Se30+PKT50+LT100-seokset).

Puristuslujuuskokeiden tulosten perusteella kivituhkan lisäys ei vaikuta Jätkäsaaren allasmassoista valmistettujen koekappaleiden maksimipuristuslujuuden suuruuteen. PKT150-, Se30+LT100- ja Se30+LT50+PKT50-sideaineyhdistelmillä valmistetulla koekappalesarjalla kivituhkan lisääminen näyttää kasvattavan puristuslujuustulosta: PKT150-koekappalesarjalla 29 kPa, Se30+LT100-koekappalesarjalla 13 kPa ja Se30+LT50+PKT50-koekappalesarjalla 13 kPa. Se50+LT100-sideaineyhdistelmällä valmistetulla koekappalesarjalla kivituhkamäärän kasvattaminen taas pienentää puristuslujuustulosta 21 kPa. Muilla sideaineyhdistelmillä puristuslujuustuloksien ja kivituhkan määrällä ei näytä olevan yhteyttä. Kivituhkan lisääminen ei kuitenkaan näytä järjestelmällisesti lisäävän tai laskevan maksimipuristuslujuutta.



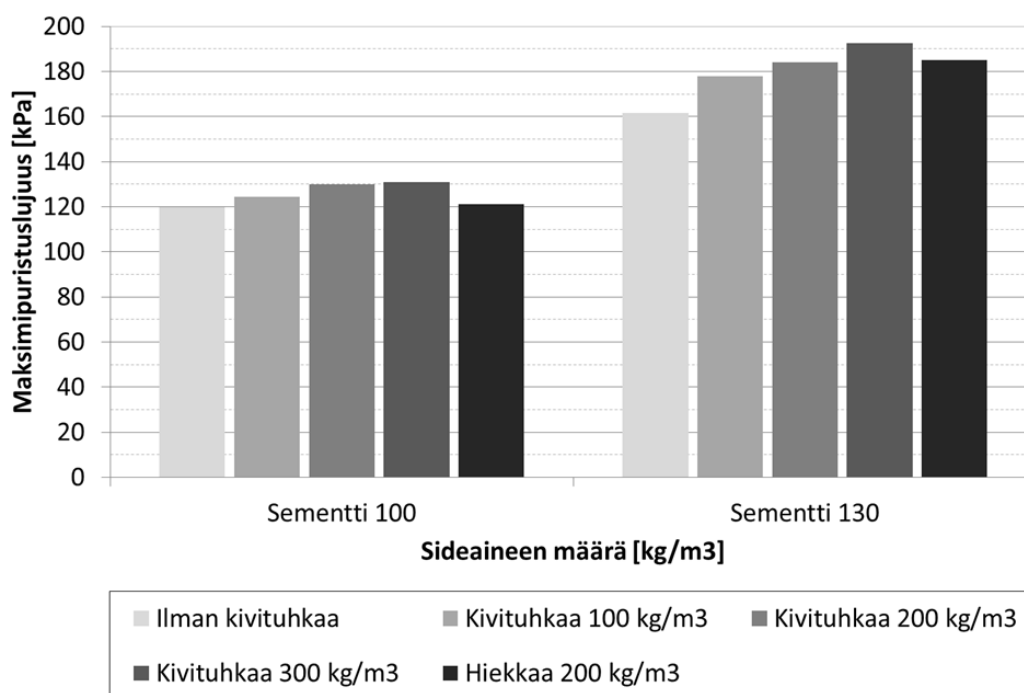
Kuva 24 Jätksaaren allasmasoista valmistettujen koekappaleiden maksimipuristuslujuuksien keskiarvo 28 vuorokauden iässä

Turvekoekappaleiden maksimipuristuslujuustulokset 28 vuorokauden ikäisinä on esitetty taulukossa 9. Pienemmällä sideainemäärällä (100 kg/m^3) valmistettujen rinnakkaiskoekappaleiden maksimipuristuslujuuden keskiarvo on kivituhkan määrästä riippuen 120...131 kPa. Tulosten hajonta eli rinnakkaiskoekappaleiden puristuslujuuden ero on suurimmillaan 6 kPa. Suuremmalla sideainemäärällä (130 kg/m^3) rinnakkaiskoekappaleiden maksimipuristuslujuuden keskiarvo on 162...193 kPa kivituhkan määrästä riippuen. Rinnakkaiskoekappaleiden tulosten välinen hajonta on suurimmillaan 22 kPa.

Taulukko 9 Turvekoekappaleiden puristuslujuustulokset 28 vuorokauden iässä

Sideaine	Sideaine määrä [kg/m³]	Puristuslujuus [kPa]														
		Ilman kivituhkaa			Kivituhkaa 100 kg/m³			Kivituhkaa 200 kg/m³			Hiekkaa 200 kg/m³			Kivituhkaa 300 kg/m³		
		A	B	ka	A	B	ka	A	B	ka	A	B	ka	A	B	ka
Sementti	100	121	119	120	125	124	125	133	127	130	122	120	121	133	129	131
	130	170	153	162	182	174	178	196	172	184	180	190	185	193	192	193

Pienemmällä sideainemäärällä ilman kivituhkaa puristuslujuus on 120 kPa. Suurimmalla kivituhkamäärällä puristuslujuus on 131 kPa. Puristuslujuustuloksissa on 11 kPa ero. Suuremmalla sideainemäärällä ilman kivituhkaa valmistetun koekappaleen puristuslujuus on 162 kPa. Suurimmalla kivituhkamäärällä puristuslujuus on 193 kPa. Puristuslujuustuloksissa on noin 30 kPa ero. Kivituhkan lisääminen vaikuttaa lisäävän koekappaleiden maksimipuristuslujuutta 28 vuorokauden iässä. Turvekoekappaleiden puristuslujuustulokset on esitetty kuvassa 25.

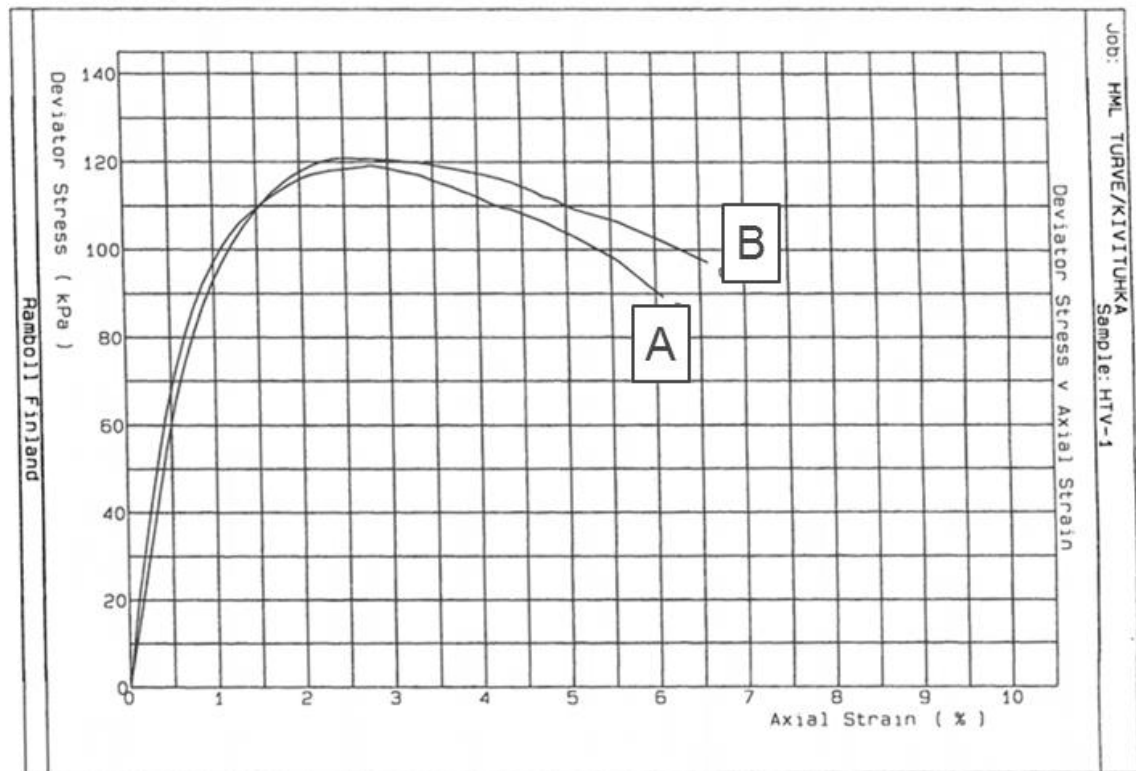


Kuva 25 Turvekoekappaleiden maksimipuristuslujuuksien keskiarvotulokset 28 vuorokauden iässä

Verrattaessa Jätkäsaaren allasmassoista ja turpeesta valmistettujen sementillä stabiloitujen koekappaleiden puristuslujuustuloksia toisiinsa havaitaan, että turve vaatii enemmän sideainetta kuin ruoppausmassat saman puristuslujuustason saavuttamiseksi. Ruoppausmassojen stabiloinnissa sementtimäärällä 50 kg/m^3 saavutetaan hieman suurempi puristuslujuustulos kuin stabiloitaessa turvetta kaksinkertaisella sementtimäärällä. Tarvittavan sideainemäärän ero johtuu turpeen sisältämästä vedestä ja eloperäisestä aineksesta.

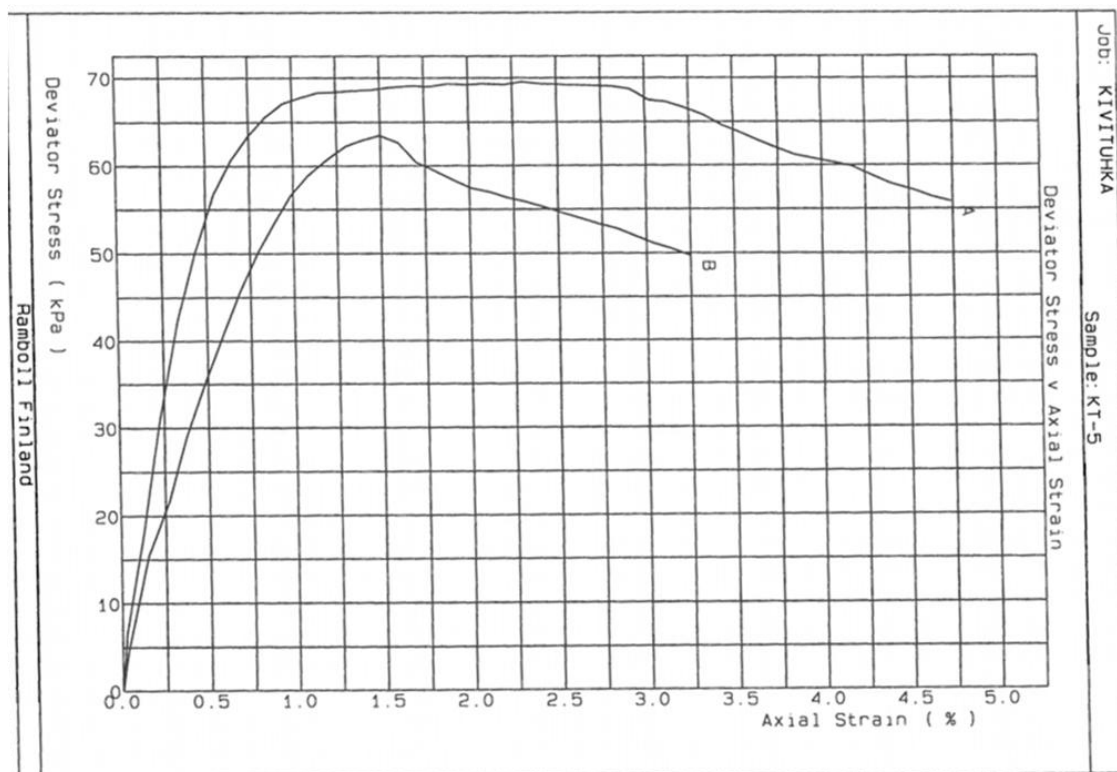
5.1.3 Koekappaleiden käyttäytyminen kuormituksessa

Puristuslujuuskokeessa testauslaitteiston tulostama jännitys-muodonmuutos-kuvaaja kuvaa kappaleiden murto- ja muodonmuutoskäyttäytymistä kuormituksen alla. Jännitys-muodonmuutos-kuvaajat on esitetty liitteissä 3 ja 4. Kuvaajien perusteella koekappaleiden käyttäytyminen riippuu sideaineesta, sideaineen määrästä ja täyteaineen määrästä. Useimmissa tapauksissa rinnakkaiskoekappaleet käyttäytyvät kuormituksessa samalla tavalla, kuten kuvassa 26. Yksittäisissä tapauksissa rinnakkaiskoekappaleiden käyttäytyminen poikkeaa toisistaan, esimerkiksi Jätkäsaaren ruoppausmassasta valmistetut koekappaleet, joissa sideaineena on käytetty palavan kiven tuhkaa 100 kg/m^3 ja täyteaineena kivituhkaa 200 kg/m^3 (kuva 27).



Kuva 26 Jännitys-muodonmuutos-kuvaaja. Koekappale on valmistettu turpeesta ja sideaineena on käytetty sementtiä 100 kg/m^3 . Rinnakkaiskoekappaleet käyttäytyvät samalla tavalla. Käyrän maksimikohta on selkeä.

Stabiloitavuustestauksessa ollaan ensisijaisesti kiinnostuneita koekappaleiden maksimipuristuslujuudesta, koska maksimipuristuslujuuden perusteella voidaan arvioida stabiloidun maan leikkauslujuutta. Laboratoriotestauksessa koekappaleiden kuormitus lopetetaan usein nopeasti murtumisen jälkeen. Tästä johtuen rinnakkaiskoekappaleiden käyttäytymistä murtumisen jälkeen voi olla paikoin vaikea vertailla.

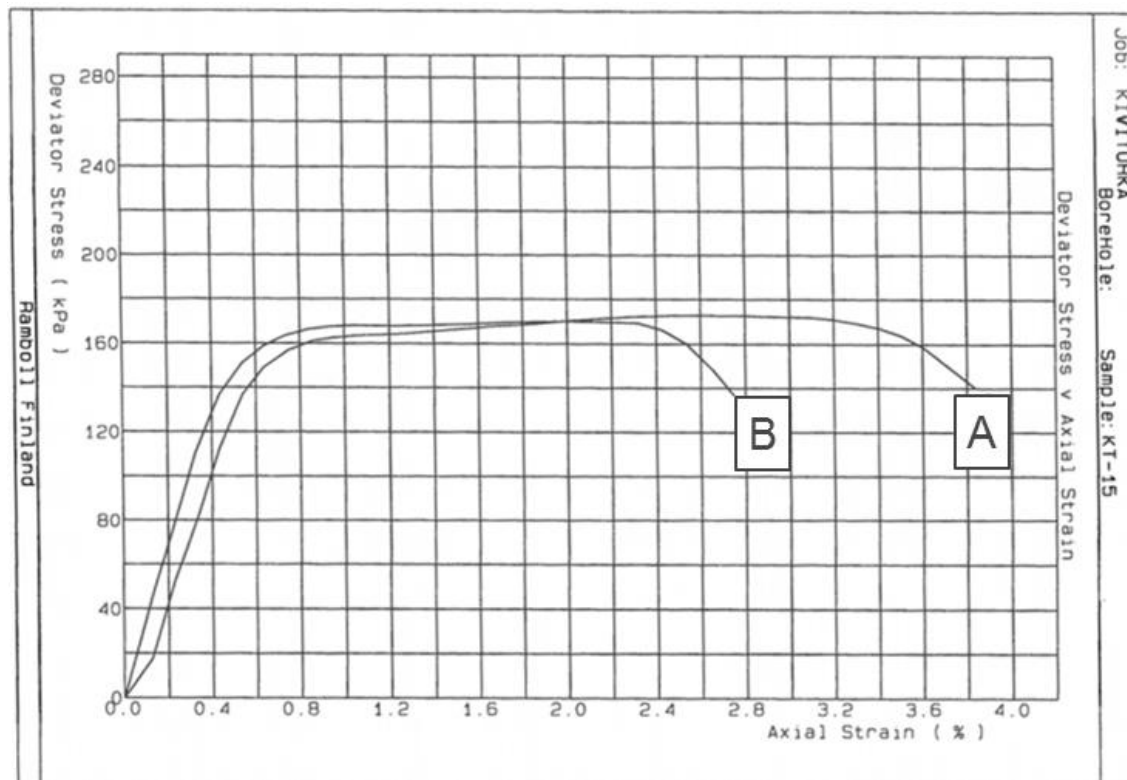


Kuva 27 Jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Koekappale on valmistettu ruoppausmassasta. Sideaineena on käytetty palavan kiven tuhkaa 100 kg/m^3 ja täyteaineena kivituhkaa 200 kg/m^3 . Rinnakkaiskoekappaleiden käyttäytyminen eroaa toisistaan. A-koekappale käyttäytyy sitkeämmin. B-koekappale murtuu hauraammin ja käyrän huippuarvo on selvästi erotettavissa.

Jännitys-muodonmuutos-kuvaajien perusteella turvekoekappaleet kestävät suurempia muodonmuutoksia kuin Jätkäsaaren allasmassoista valmistetut koekappaleet. Turvekoekappaleet murtuivat, kun muodonmuutos oli noin 2,5 prosenttia. Sementin lisäys pienensi vähän muodonmuutoksen sietokykyä eli enemmän sementtiä sisältävät koekappaleet murtuivat pienemmällä muodonmuutoksella. Koekappaleet eivät murtumisen jälkeen menettäneet lujuuttaan. Muutenkin turvekoekappaleiden käyttäytyminen ennen murtotilaa oli sitkeämpää. Kivituhkan tai hiekan lisääminen ei muuttanut murtokäyttäytymistä; jännitys-muodonmuutos-kuvaajan muoto pysyi samanlaisena.

Jätkäsaaren allasmassoista valmistettujen koekappaleiden jännitystilän ja muodonmuutostilan välinen suhde vaihteli. Kappaleiden muodonmuutosprosentti oli keskimäärin murtotilassa 1...2,5 prosentin välillä sideaineesta riippuen. Jännitys-muodonmuutos-kuvaajien perusteella sideaineella oli vaikutusta koekappaleiden muodonmuutoskestävyyteen. Sementtiä sisältävät koekappaleet murtuivat hauraammin; koekappaleet murtuivat nopeasti pienemmillä muodonmuutoksilla. Lisäksi koekappaleissa vallitseva jännitystila putosi nopeasti kappaleen murruttua. Jännitys-muodonmuutos-kuvaajissa oli havaittavissa selkeä huippu. Sementtimäärän kasvaminen myös pienensi muodonmuutosten sietokykyä; koekappaleet murtuivat pienemmillä muodonmuutoksilla. Sementtimäärän kasvattaminen lisää koekappaleiden jäykkyyttä.

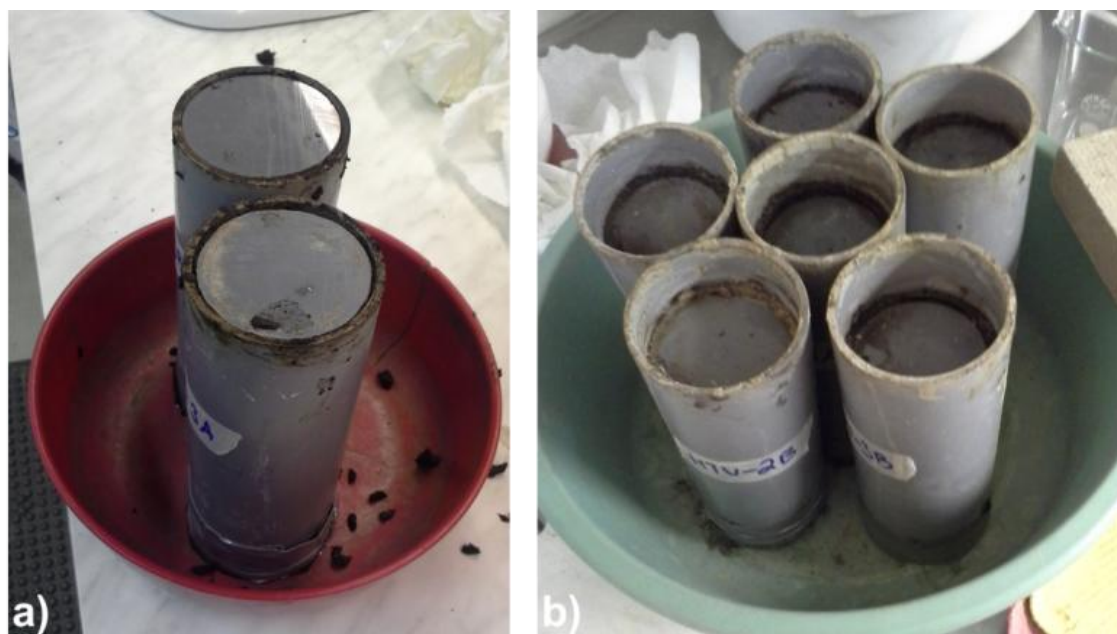
Palavan kiven tuhkaa tai lentotuhkaa sideainekomponenttina sisältävät koekappaleet käyttäytyivät sitkeämmin. Kappaleet kestivät lähellä murtotilaa sementtikoekappaleita suurempia muodonmuutoksia. Jännitys-muodonmuutos-kuvaajan huippu oli laakea ja jännitystila ei pudonnut heti kappaleen murtumisen jälkeen. Kivituhkan lisääminen tuntui lisäävän muodonmuutosten sietokykyä varsinkin sideaineseoksilla. Kuvassa 28 on esitetty kalkkisementtiseosta 50 kg/m^3 ja lentotuhkaa 100 kg/m^3 sisältävien koekappaleiden jännitys-muodonmuutoskuvaaja.



Kuva 28 Jännitys-muodonmuutos-kuvaaja. Koekappale on valmistettu ruoppausmassasta. Sideaineena on käytetty kalkki-sementtiseosta 50 ja lentotuhkaa 100 kg/m^3 , täyteaineena on kivituhkaa 200 kg/m^3 . Rinnakkaiskoekappaleet käyttäytyivät sitkeästi. Kuormituskäyrällä ei ole selvää huippua.

5.1.4 Turvekoekappaleiden kokoonpuristuma

Turvekoekappaleiden kokoonpuristumaa tarkkailtiin esikuormituksen aikana. Turvekoekappaleiden kokoonpuristuminen oli silmännähdn havaittavissa, kun koekappaleet otettiin pois esikuormituspenkistä (kuvat 29a ja b). Kuormitussylinterit painuivat selvästi muottiputkien sisään. Koekappaleet tiivistyivät useita senttejä kuormituksen aikana.



Kuva 29 Turvekoekappaleiden kokoonpuristuminen esikuormituksessa: a) Alkutilanne, b) Lopputilanne 28 vuorokauden kuluttua (kuvat: Riina Rasimus 2013)

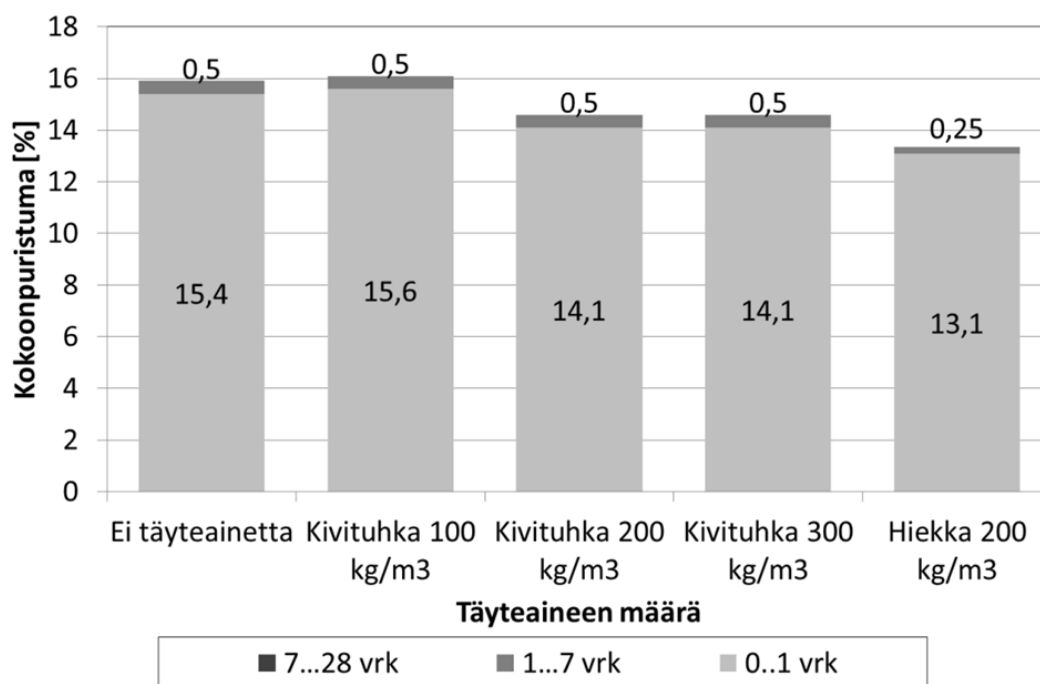
Turvekoekappaleiden kokoonpuristumaa seurattiin 1, 7 ja 28 vuorokauden ikäisenä. Turvekoekappaleiden kokoonpuristumatulosten keskiarvot on esitetty taulukossa 10. Kokoonpuristuma on eri ajankohtina luettujen mitta-asteikon arvojen erotuksen ja muottiputken korkeuden välinen suhde prosentteina. Turvekoekappaleiden tiivistyminen tapahtui pääosin ensimmäisen vuorokauden aikana. Loppuosa tiivistymisestä tapahtui ensimmäisen viikon loppuun mennessä. Todennäköisesti 1...7 vuorokauden välillä tapahtunut tiivistyminen on tapahtunut pääosin jo toisen vuorokauden alkupuolella.

Taulukko 10 Turvekoekappaleiden kokoonpuristuma esikuormituksen aikana prosentteina

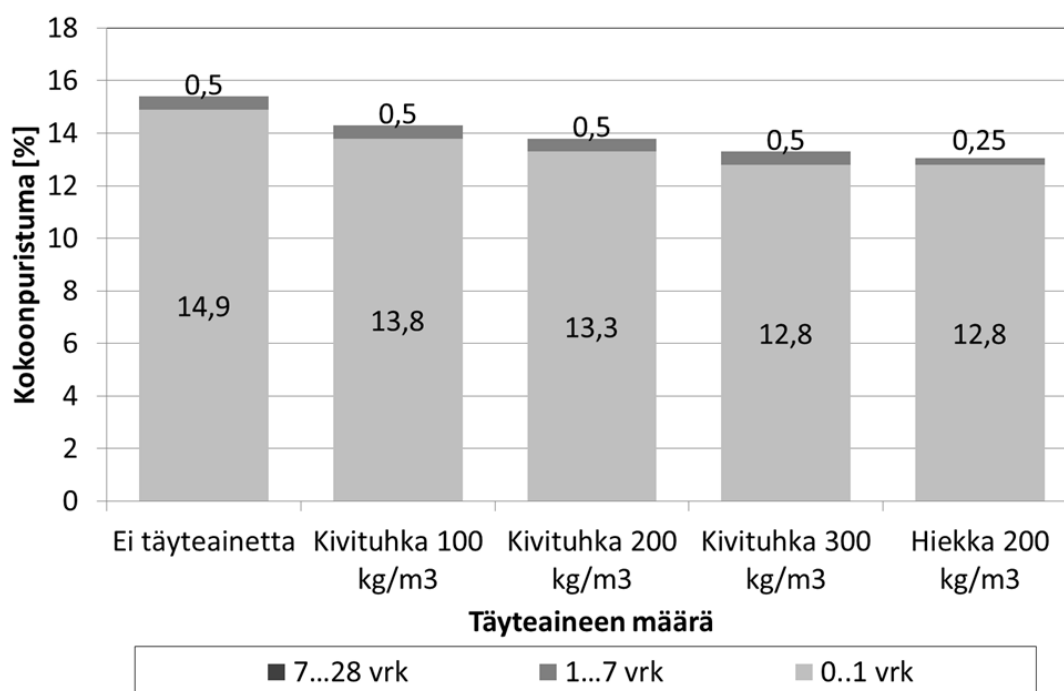
Kokoonpuristuma [%]						
Sideaine	Plusementti					
Sideaineen määrä [kg/m ³]	100			130		
Mittausaika	0..1 vrk	1...7 vrk	7...28 vrk	0..1 vrk	1...7 vrk	7...28 vrk
Ei kivituhkaa	15,4	0,5	0	14,9	0,5	0
Kivituhka 100 kg/m ³	15,6	0,5	0	13,8	0,5	0
Kivituhka 200 kg/m ³	14,1	0,5	0	13,3	0,5	0
Kivituhka 300 kg/m ³	14,1	0,5	0	12,8	0,5	0
Hiekka 200 kg/m ³	13,1	0,25	0	12,8	0,25	0

Tutkimustulosten perusteella sekä sideaineen että täyteaineen määrän kasvattaminen pienentävät kokoonpuristumaa. Pienemmällä sideainemäärällä kokoonpuristumat ovat järjestäen suuremmat. Myös kivituhkan määrän lisääntyessä kokoonpuristumat pienenevät molemmissa koesarjoissa. Hiekan vaikutus vaikuttaisi näiden tulosten perusteella olevan kivituhkaa suurempi samalla täyteainemäärällä (200 kg/m³).

Pienemmällä sideainemäärällä koekappaleiden kokoonpuristuma pieneni 8 prosenttia, suuremmalla sideainemäärällä 15 prosenttia. Kuvissa 30 ja 31 on esitetty koekappaleiden keskimääräinen kokoonpuristuma.



Kuva 30 Koekappaleiden kokoonpuristuma prosenteina. Sideaineen määrä 100 kg/m³.



Kuva 31 Koekappaleiden kokoonpuristuma prosenteina. Sideaineen määrä 130 kg/m³.

5.2 Tulosten ja testausmenetelmien arviointi

Laboratoriotutkimuksissa vertailtiin kivituhkaa ja sideainetta sisältävien sekä pelkkää sideainetta sisältävien kappaleiden puristuslujuustuloksia. Varsinaista tavoitelujuutta ei asetettu. Oikeassa hankkeessa stabiloinnille määriteltäisiin lujuustavoite, joka tulisi saavuttaa stabiloitavuustestauksessa. Lujuustavoite riippuu täysin stabiloidun massan suunnitellusta käytöstä. Esimerkiksi Jätkäsaaren allasmassoille lujuustavoite voisi olla yli 150 kPa, jos massat stabiloidaan altaaseen.

Jätkäsaaren allasmassojen tutkimuksen osalta kivituhkaa sisältämättömien vertailukoekappaleiden edustavuutta on vaikea arvioida rinnakkaiskoekappaleiden puuttumisen takia. Puristuslujuustulosten mukaan kivituhkan lisääminen ei kasvattanut tai alentanut koekappaleiden puristuslujuutta. Koekappaleiden puristuslujuustulokset olivat samaa luokkaa kaikissa vertailusarjoissa.

Etukäteen oletettiin, että kivituhkan lisäyksellä saavutettaisiin suurempi hyöty nimenomaan turpeen stabiloinnissa. Turvetutkimuksissa havaittiin, että kivituhkan lisääminen parantaa puristuslujuustuloksia. Pienemmällä sideainemäärällä (sementti 100 kg/m³) ja suurimmalla täyteainemäärällä valmistetulla koekappaleella puristuslujuus kasvoi 11 kPa eli noin 9 prosenttia vertailukoekappaleeseen nähden. Pienemmällä sideainemäärällä kivituhkalisäyksen tuoma lujuuden kasvu on pieni. Suuremmalla sideainemäärällä (sementti 130 kg/m³) saavutettiin jopa 31 kPa eli 19 prosentin lujuuden kasvu vertailukoekappaleeseen nähden. Suuremmalla sideainemäärällä lujuuden kasvu on jo huomattavampi. Suuremmalla sideaineen määrällä sekä kivituhkalla että hiekalla saavutetut puristuslujuustulokset olivat samaa suuruusluokkaa. Pienemmällä sideaineen määrällä hiekalla saavutettiin pienempi puristuslujuus. Turpeen stabiloinnissa täyteaineen lisääminen myös vähensi turpeen kokoonpuristumaa esikuormituksen aikana.

Tulosten tarkastelussa on otettava huomioon, että sideaineen ja täyteaineen lisäykset on tehty suhteessa runkoaineen tilavuuteen. Tällöin sideaineen osuus koko stabiloitavan massan tilavuudesta on pienempi, mitä enemmän täyteainetta lisätään. Puristuslujuustulokset kuitenkin osoittavat, että koekappaleiden puristuslujuus ei alene, vaikka täyteaineen määrä muuttuukin. Lujuuden säilyminen ja jopa kasvu selittyvät sillä, että täyteaineen lisääminen karkeuttaa alkuperäisen runkoaineen raekokoa ja lisää sideaineelle otollisten tarttumapintojen määrää etenkin turpeen stabiloinnissa, vaikka sideaineen suhteellinen tilavuus stabiloidussa massassa pienenee. Turpeen stabiloinnissa 10 tilavuusprosentin täyteainelisäyksellä voidaan kasvattaa koekappaleen puristuslujuutta verrattuna ilman täyteainetta valmistettuja kappaleita. Lisäämällä kivituhkaa stabiloitavaan massaan voidaan säästää lisäyksen suuruinen prosenttiosuus sideaineen määrässä. Jätkäsaaren ruoppausmassojen osalta puristuslujuuksissa ei ole niin suurta kasvua, että samanlainen sideaineen säästö olisi saatavissa.

Laboratoriotestaus on toteutettu stabiloitavuustestauksen normaalin ja vallitsevan käytännön mukaan. Savi-, lieju- ja ruoppausmassojen osalta käytetään pienempiä koekappalekokoja kuin turpeella ja koekappaleet säilytetään lujittumisen ajan viileässä.

Turve on luonnostaan heterogeenista materiaalia maatumattomien kasvinosien takia. Suuremmalla koekappalekoolla varmistetaan, että koekappaleesta saadaan edustavampi. Lisäksi turvekoekappaleet säilytetään huoneenlämpötilassa kosketuksissa veteen.

Testausmenetelmillä yritetään jäljitellä työmaaolosuhteita. Puristuslujuustuloksia arvioitaessa on kuitenkin hyvä pitää mielessä, että laboratoriossa saavutetut lujuudet ovat tyypillisesti jonkin verran työmaaolosuhteissa saavutettuja lujuuksia suuremmat. Laboratoriossa olosuhteet pysyvät tasaisina. Työmaalla stabilointityön onnistumista häiritsee esimerkiksi sekoitustyön onnistuminen ja maaperäolosuhteiden, kuten maalajin tai kosteuspitoisuuden, vaihtelu.

Testaustuloksiin vaikuttavat eniten koekappaleen tiivistämisen ja massan sekoittamisen onnistuminen. Koekappale tulisi sulloa riittävän tiiviisti koeputkeen, jotta huokosia jäisi mahdollisimman vähän. Varsinkin turvekoekappaleilla ylimääräiset huokokset ilmenevät kokoonpuristumana esikuormitusvaiheessa. Esikuormitus tiivistää turvekoekappaleita, kunnes sideaine on lujittanut massan. Suuri huokoisuus heikentää myös koekappaleen puristuslujuutta. Turvekoekappaleilla huokosia jää esikuormituksesta huolimatta, jolloin niitä ovat havaittavissa koekappaleiden pinnoilla. Koekappaleen eheyden tarkastaminen ennen kuormitusta on tärkeää, jotta varmistetaan puristuslujuustulosten vertailukelpoisuus.

Puristuslujuustuloksiin vaikuttaa leikkauspintojen tasaisuus. Epätasainen leikkauspinta johtaa epätasaiseen kuormituksen. Koko kappale voi murtua nopeammin pienemmällä kuormituksella tai jännitys-muodonmuutos-kuvaajassa voi esiintyä huippukohta alkukuormituksen kohdalla, jonka jälkeen jännitystila taas kappaleessa kasvaa.

Testauksen toistettavuuden ja luotettavuuden kannalta olisi ollut parempi, jos olisi käytetty kolmea tai useampaa rinnakkaiskoekappaletta. Stabiloitavuustestauksessa suositellaan tavallisesti vähintään kahden rinnakkaiskoekappaleen käyttämistä (Jyrävä 2013). Jätkäsaaren allasmassojen puristuslujuustestauksen luotettavuutta vähentää se, että vertailukoekappalesarja muodostui aina vain yhdestä testattavasta koekappaleesta.

Rinnakkaiskoekappaleiden vertailua myös haittaa se seikka, että rinnakkaiskoekappaleiden vastaavuutta ei seurata. Rinnakkaiskoekappaleiden valmistus tapahtuu samaan aikaan niin, että kumpaankin lisätään silmämääräisesti saman verran sekoitettua massaa, joka sullotaan samalla työmäärällä muottiputken sisään. Rinnakkaiskoekappaleiden vastaavuutta voitaisiin seurata esimerkiksi punnitsemalla valmiit koekappaleet, jolloin niiden massoja ja tilavuuspainoja voisi vertailla. Jos massat poikkeaisivat toisistaan, voisi helposti todeta, että jommankumman koekappaleen sullonta ei ole onnistunut.

5.3 Kivituhkan soveltuminen massastabiloinnin täyteaineeksi

Tutkituilla täyteainemäärillä kivituhka parantaa massastabiloitavan läjitetyn ruoppausmassan ominaisuuksia siinä määrin, että sen hyödyntämistä voisi harkita.

Eryityisesti turpeen stabiloinnissa kivituhkan hyödyntämisellä voidaan saavuttaa etuja ja säästöjä sideaineen määrässä. Kivituhkan lisääminen vähentää turpeen kokoonpuristumaa, jolloin voidaan säästää myös stabiloidun rakenteen päälle rakennettavan kerroksen materiaalimenekissä, kun stabiloitu kerros puristuu vähemmän kokoon.

Työteknisesti suurten kivituhkamäärien (suurempi kuin testattu maksimimäärä 400 kg/m³) hyödyntäminen massastabiloinnissa ei ole järkevää. Sekoitustyö kärsii kivituhkamäärien kasvaessa. Massastabilointimenetelmässä kivituhka levitettäisiin ensin tasaiseksi patjaksi homogenisoidun maaperän päälle. Kivituhka sekoitettaisiin maahan painelemalla ja sekoittamalla sekoituspuomin avulla syvemmälle. Lisäystavasta johtuen kivituhkaa olisi todennäköisesti eniten stabiloitavan kerroksen yläosassa. Kivituhkan sekoittaminen tasaisesti stabiloitavan kerroksen alapintaan asti ei onnistune. Prosessistabiloinnissa sen sijaan suurempienkin kivituhkamäärien sekoittaminen stabiloitavaan massa onnistuu helpommin asemasekoitustavasta johtuen.

5.4 Jatkotutkimustarpeet

Massastabiloinnin kannalta olisi hyvä selvittää, vaikuttaako kivituhkan lisäys stabiloidun maan lujuuskehitykseen. Aiemmissa turpeen stabilointikoekohteissa (Ojala 2002) on todettu, että kivennäismaalajin, hiekan, lisäys lisääi kantavuutta erityisesti lujittumisen alkuvaiheessa, jolloin stabilointityö olisi nopeampaa. Kivituhkan vaikutus alkuvaiheen lujittumiseen olisi hyvä selvittää, koska jos kivituhka parantaa alkuvaiheen lujittumista ja kantavuutta ja vähentää kokoonpuristumaa, sillä voisi olla merkitystä työtekniikan toteutuksen kannalta. Tässä tutkimuksessa ei tutkittu koekappaleiden lujuuden kehitystä ajan suhteen, vaan oltiin kiinnostuneita vain koekappaleiden puristuslujuustuloksista 28 vuorokauden ikäisinä.

Lisäksi olisi ollut mielenkiintoista vertailla erilaisten kivituhkien eli raekokojakauman ja mineralogian vaikutusta lujuustuloksiin. Suoritetuissa tutkimuksissa käytettiin täyteaineena vain yhtä kivituhkamateriaalia. Aiempien tutkimusten (Axelsson et al. 2002) perusteella on arvioitu, että täyteaineena lisätyn hiekan mineralogialla on vaikutusta sitoutumisreaktioon. Täyteaineen koostumuksen vaikutus on kuitenkin huomattavasti sideainepitoisuuden vaikutusta pienempi. (Axelsson et al 2002)

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kivituhkaa syntyy kiviainestuotannossa etenkin asfaltti-, betoni- ja hiekoituspelikiviainesten tuotannossa. Kivituhka on jakoseulan alite. Käytännössä kivituhkaksi katsotaan hieno kiviaines, jonka maksimiraekoko on 3...6 millimetriä. Kivituhkaa syntyy kiviainestuotannon kaikissa vaiheissa: räjäytyksessä, kaikissa murskausvaiheissa ja jonkin verran jopa kuljetuksessa. Suurin osa syntyvästä kivituhkasta ja hienoaineksesta syntyy kuitenkin murskausprosessin aikana. Syntyvän hienoaineksen määrään vaikuttavat kiven rikkoutumistapa ja murskaintyyppi. Yleisesti puristumurskauksessa syntyy vähemmän hienoainesta kuin iskumurskauksessa, koska murskattaessa kiveä metallia vasten syntyvän hienoaineksen määrä on pienempi kuin ”rock-on-rock” murskauksessa. Iskumurskauksessa kiviainesraaket iskeytyvät merkittävässä määrin toisiaan vasten; puristumurskauksessa kivi murskaantuu puristuessaan liikkuvan ja kiinteän metallipinnan välissä. Eniten kivituhkaa muodostuu murskausprosessin viimeisissä vaiheissa. Syntyvän hienoaineksen määrän optimoinnin tulisi keskittyä murskausprosessin viimeisiin vaiheisiin.

Murskattavan kiven ominaisuudet vaikuttavat syntyvän hienoaineksen määrään. Kiven mineraalikoostumus, kivilaji, mineraalien raekoko ja jakautuminen kivimassaan sekä mineraalien väliset sidokset vaikuttavat hienoaineksen syntyyn. Usein karkearakeisen kiven murskaus tuottaa vähemmän hienoainesta kuin hienorakeisen kiven murskaus. Mineraalikoostumus, mineraalien jakautuminen kivimassaan ja mineraalien välinen sidos määräävät kiven lujuuden. Kovempien ja lujempien kivien murskaus vie pehmeiden kivien murskausta enemmän energiaa, koska mineraalien väliset sidokset ovat voimakkaampia. Pehmeämpien kivien murskaaminen on lähtökohtaisesti helpompaa, kun heikosti toisissaan kiinni olevat mineraalit irtautuvat toisistaan helposti. Pehmeämpien mineraalien murskaaminen myös tuottaa enemmän hienoainesta.

Syntyvän kivituhkan ja hienoaineksen määrää voidaan jossakin määrin pienentää, mutta niiden määrän minimointia tavoittelevat toimenpiteet usein heikentävät lopputuotteiden muita ominaisuuksia ja tuotannon kapasiteettia. Hienoaineksen määrän pienentämiseen tähtäävät toimenpiteet vaikuttavat usein haitallisesti karkeampien lopputuotteiden muotoon. Haluttujen karkeiden lopputuotteiden määrän maksimointi ja niiden riittävien ominaisuuksien saavuttaminen sekä tuotannon taloudellisuus ovat murskauksessa usein määrääviä ja ensisijaisesti tavoiteltavia tekijöitä.

Syntyvän kivituhkan määrissä on havaittavissa merkittävää alueellista vaihtelua. Kiviainesmarkkinat ovat kuljetuskustannuksien vuoksi selvästi alueelliset. Kiviainesten saatavuus vaihtelee alueittain. Joillakin alueilla on saatavissa kalliokiviaineksia, toisaalla käytettävät kiviainekset voivat olla merkittävässä määrin peräisin sora- ja

hiekkamuodostumista paikallisten geologisten muodostumien mukaan. Syntyvän kivituhkan määrään vaikuttavat muiden raekokojakaumaltaan katkaistujen kiviaineslajitteiden kysyntä ja tuotanto, koska kivituhkaa ei erotella lopputuotteeksi, jos ei tuoteta katkaistuja kiviaineslajitteita. Esimerkiksi karkeiden nollapohjaisten murskeiden tuotannossa syntyvä hienoaines sekoittuu lopputuotteen sekaan.

Kivituhkalla ei ole nykyisin merkittäviä käyttökohteita, koska se on routiva materiaali. Materiaalin routivuus rajoittaa sen käyttöä esimerkiksi tie- ja katurakenteissa sekä talojen perustusten ympärystätyöissä. Kivituhkaa voidaan hyödyntää kunnallistekniikan kaivantojen täyttöissä sekä erilaisissa luiskatäyttöissä sekä kulutuskerrosmateriaalina esimerkiksi pihoilla. Kivituhkan käyttö asfaltin tai betonin runkoaineena on vähäistä.

Käytettävien kiviainesten laatu ja määrä vaihtelevat myös alueittain. Tähän vaihteluun vaikuttavat alueen rakentaminen ja esimerkiksi betonteollisuuden ja asfaltin valmistuksen määrä. Betonin ja asfaltin valmistuksessa käytetään usein katkaistuja kiviaineslajitteita. Korkealuokkaisen asfalttikiviaineksen tuotantopaikat sijaitsevat usein kaukana suurimmista markkinoista. Kivituhkan kannalta ongelmallisimmat alueet ovat kaukana kiviainesmarkkinoista sijaitsevat tuotantoalueet, koska kivituhkasta saatava hinta ei ole riittävän hyvä ja kuljetuskustannukset ovat kuljetusmatkan pituuden vuoksi korkeat.

Tulevaisuudessa kivituhkalle tulisi kehittää uudenlaisia käyttökohteita, jotta sitä voitaisiin hyödyntää nykyistä suurempia määriä. Kivituhkan ominaisuuksia voitaisiin parantaa esimerkiksi sekoittamalla sitä jonkin muun materiaalin sekaan. Kivituhka voi jopa parantaa muiden materiaalien ominaisuuksia. Tässä opinnäytetyössä on pyritty selvittämään, soveltuisiko kivituhka massastabiloinnin täyteaineeksi. Kivituhkan soveltuvuutta oli alun perin tarkoitus selvittää sekä laboratoriossa suoritettavan stabiloitavuustestauksen että työmaalla koejärjestelyin. Aikataulu- ja kustannustekijöistä johtuen työmaakoejärjestelyistä jouduttiin luopumaan.

Laboratoriossa testattiin koekappaleiden lujittumista eri kivituhkamäärillä ja eri sideaineilla. Runkoaineina käytettiin sekä Helsingin Jätkäsaaren täyttöaltaiden ruoppausmassanäytteitä että Hämeenlinnasta peräisin olevaa turvenäytettä. Jätkäsaaren massojen stabiloinnissa testattiin useita eri sideaineita ja sideaineyhdistelmiä kahdella eri kivituhkapitoisuudella (200 ja 400 kg/m³). Turvetestauksessa käytettiin kahta eri sementtisineainemäärää ja kolmea kivituhkamäärää (100, 200 ja 300 kg/m³). Lisäksi turvetestauksessa tehtiin vertailukoekappaleet, joissa kivituhkan sijaan käytettiin hiekkaa (200 kg/m³). Kumpaankin testausarjaan valmistettiin vertailukoekappaleet, joissa ei käytetty lainkaan kivituhkaa. Tutkimusohjelmaan kuului koekappaleiden yksiaksiaalinen puristuslujuuskoe mukailien standardeja SFS 179-2 ja CEN ISO/TS 17892-7:fi, kun koekappaleet olivat 28 vuorokauden ikäisiä. Turvetestauksessa koekappaleita esikuormitettiin lujittumisaikana erityisessä esikuormituspenkissä, jossa koekappaleiden kokoonpuristumaa seurattiin.

Puristuslujuustestien perusteella kivituhkan lisäämisellä ei todettu olevan merkittävää vaikutusta koekappaleiden puristuslujuuksiin Jätkäsaaren savipitoisia

ruoppausmassoja testattaessa. Turvetestauksessa suuremmalla sideainemäärällä havaittiin, että kivituhkan määrän lisääminen kasvattaa jonkin verran puristuslujuutta. Täyteaineen lisääminen pienentää sideaineen suhteellista osuutta stabiloitavassa massassa. Koska tutkimustulosten mukaan täyteaineen lisääminen kasvattaa puristuslujuutta, täyteainetta lisäämällä voidaan säästää tarvittavan sideaineen määrässä. Turvekappaleilla kivituhkan lisäämisen havaittiin myös pienentävän esikuormituksen aikaista kokoonpuristumaa.

Massastabiloinnin näkökulmasta kivituhkan lisäyksellä voidaan saavuttaa säästöjä sekä sideaineen määrässä että stabiloidun kerroksen päälle tulevan rakenteen materiaalimenekissä etenkin turpeen stabiloinnissa. Ruoppausmassojen stabiloinnissa kivituhkan lisäyksellä ei saavuteta yhtä suuria etuja. Tutkimukset tehtiin sellaisilla täyteainemäärillä, jotka ovat massastabiloinnin työteknisen suorituksen kannalta järkeviä. Suuremmilla täyteainemäärillä kivituhkan sekoittaminen pohjamaan joukkoon vaikeutuu ja sekoitustyön tasalaatuisuutta on vaikea varmistaa. Prosessistabilointimenetelmällä suurempien täyteainemäärien sekoitus onnistuu.

7 LÄHTEET

Alkio, R. & Vuorinen, J. 1989. Päälystekiviaineksen valintaan vaikuttavat tekijät. Asfalttipäälysteiden tutkimusohjelma, ASTO 1987-1992. Väliraportti TR 2 4. Espoo. PANK ry ja VTT. Tie- ja liikennelaboratorio n:o 753. 43 s. + liitt. 80 s.

ALLU. 2007. Mass Stabilisation Manual. ALLU Stabilisation System. ALLU Finland Oy. [verkkajulkaisu]. 57 p. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa: <http://www.allu.net/us/products/stabilization-system>

ALLU. 2013. ALLU Stabilisation Brochure. [verkkajulkaisu]. 8 p. [viitattu 23.8.2013]. Saatavilla: <http://www.allu.net/fi/tuotteet/stabilointijarjestelma>

Asfalttinormit. 2011. Päälystealan Neuvottelukunta. PANK ry. 118 sivua.

ASKO. 2006. Asfalttialan koulutusohjelma. Oppimateriaali. [verkkajulkaisu]. [viitattu 8.8.2013]. Saatavissa: http://www.infrary.fi/files/2520_ASKOpieni.pdf

Autiola, M. 2009. Demonstraatiohankkeen loppuraportti. LIFE06 ENV/FIN/000195-STABLE. [verkkajulkaisu]. 66 s. + liitt. 433 s. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa: http://projektit.ramboll.fi/life/stable/sf/images/loppuraportti%20liitteineen_suojattu.pdf

Axelsson, K., Johansson, S-V. & Andersson, R. 2002. Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolanic Reactions. Feasibility Study. Report 3. Swedish Deep Stabilization Research Centre. Stockholm. Sweden. [verkkajulkaisu]. 43 p. + appendices 6 p. [viitattu 23.9.2013]. Saatavissa: <http://www.swedgeo.se/sd/pdf/SD-R3E.pdf>

CEN ISO/TS 17892-1:fi. 2004. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokokeet. Osa 1: Vesipitoisuuden määrittäminen. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 11 s.

CEN ISO/TS 17892-4:fi. 2004. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokokeet. Osa 4: Rakeisuuden määrittäminen. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 28 s.

CEN ISO/TS 17892-7:fi. 2004. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 7: Hienorakeisen maan yksiakiaalinen puristuskoee. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 13 s.

Eloranta, J. 1995. Influence of crushing process variables on the product quality of crushed rock. Dissertation. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Julkaisuja 168. 118 p.

EuroSoilStab. 2002. Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design Guide Soft Soil Stabilisation. CT97-0351. Industrial & Materials Technologies Programme (Brite-EuRam III). Project No. BE 96-3177. European Commission. [verkkojulkaisu]. 94 p. [viitattu 29.8.2013]. Saatavissa: <http://spsiro.ru/files/stab.pdf>

Finnsementti. 2013. Plussementti. Käyttöturvallisuustiedote. Kemikaali-ilmoitus. [verkkojulkaisu]. 7 s. [viitattu 20.2.2014]. Saatavissa: Finnsementin verkkosivut. http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/Plus_ktt2010_2013_2.pdf

Hakapää, A. & Lappalainen, P. 2011. Kaivos- ja louhintatekniikka. 2. painos. Helsinki, Kaivannaisteollisuus ry ja Opetushallitus. 388 sivua.

Hartikainen, O-P. 2000. Maarakennustekniikka. 11. painos. Helsinki, Otatieto. 196 s.

Hautalahti, P., Halkola, H. ja Puumalainen, N. 2007. Kivikon teollisuusalueen stabiloinnin koerakentaminen. Helsinki, Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto. Geotekninen osasto julkaisu 92. [verkkojulkaisu]. 89 s. + liitt. 15 s. [viitattu 30.8.2013] Saatavissa: <http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/405977804a14e750b771f7b546fc4d01/Tiedote+92.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=405977804a14e750b771f7b546fc4d01>

Heikkilä, P. 1991. Improving the Quality of Crushed Rock Aggregate. Helsinki, The Finnish Academy of Technology. Acta Polytechnica Scandinavica. Civil Engineering and Building Construction Series No. 96. 169 p.

Hudson, W. R., Little, D., Razmi, A. M., Anderson, V. & Weissmann, A. 1997. An Investigation of the Status of By-Product Fines in the United States. Austin, Texas, USA, International Center for Aggregates Research and The University of Texas at Austin. Research Report ICAR-101-1. [verkkojulkaisu]. 133 p. + appendices 59 p. [viitattu 18.10.2013] Saatavissa: <http://www.icar.utexas.edu/publications/>

InfraRYL. 2010. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset 2010. Helsinki, Rakennustieto Oy.

Jyrävä, H. 2013. Diplomi-insinööri, projektipäällikkö, Ramboll Finland Oy. Ympäristögeotekniikka T&K. Keskustelu 26.9.2013 ja sähköpostikeskustelu 13.11.2013, 15.11.2013 ja 19.12.2013

Jääskeläinen, R. 2009a. Pohjarakennuksen perusteet. 3. painos. Jyväskylä, Amk-Kustannus Oy. 233 s.

Jääskeläinen, R. 2009b. Geotekniikan perusteet. 1. painos. Jyväskylä, Amk-Kustannus Oy. 332 s.

Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N., Lahtinen, P. & Forsman, J. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja. Energiantuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. Energiateollisuus ry, Metsäteollisuus ry, Infra ry, Yara Suomi Oy, Nordkalk Oy ja Ramboll Finland Oy. [verkkojulkaisu]. [viitattu 3.9.2013]. Saatavissa:

http://energia.fi/sites/default/files/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf

Korhonen, K-H., Gardemeister, R., Jääskeläinen, H., Niimi, H. & Vähäsarja P. 1974. Rakennusalan kallioluokitus. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Geotekniikan laboratorio, Tiedoksianto 12. 78 s.

Kuusipuro, K. 2013. Stabiloinnin määrä vuosien varrella. Nordkalk Oy Ab. Esitys Pohjanvahvistuspäivä 2013. Aalto-yliopisto, Espoo, 22.8.2013 [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.8.2013]. Saatavissa: <http://www.getunderground.fi/web/page.aspx?refid=309>

Lahtinen, P. & Niutanen, V. 2009. Development of In-Situ Mass Stabilization Technique in Finland. Proceedings of the 2009 Okinawa Symposium, International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, Okinawa, Japan, May 19-21, 2009. [verkkojulkaisu]. 6 p. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa: <http://projektit.ramboll.fi/life/stable/images/Okinawa-2009.pdf>

Liikennevirasto. 2010. Syvästabiloinnin suunnitteluohje. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston ohjeita 11/2010. [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. 79 s. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2010-11_syvastabiloinnin_suunnittelu_web.pdf

Liukoisuusohjeavot kiinteytetyille materiaalille. 2000. In: Sorvari, J. Ympäristökriteerit mineraalisten teollisuusjätteiden käytölle maarakentamisessa. Suomen ympäristö 421/2000.

Maijala, P., Kauranne, L., Lindholm, O., Matikainen, R., Mustala, J., Niini, H. & Peltola, E. 1973. Kallion rakenteellisten ominaisuuksien vaikutus louhittavuuteen. Vuorimiesyhdistys ry. Tutkimusseloste 27. 131 s. + liitt. 9 s.

Makusa, G. P. 2012. Soil Stabilization Methods and Materials. In Engineering Practice. State of Art Review. Luleå, Sweden, Luleå University of Technology. Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering. Division of Mining and Geotechnical Engineering. [verkkojulkaisu]. 35 p. [viitattu 13.9.2013]. Saatavissa: http://pure.ltu.se/portal/files/42050076/Soil_stabilization_methods_and_materials

Manning, D. 2004. Exploitation and Use of Quarry Fines. Final Report. Report No. 087/MIST2/DACM/01. United Kingdom, Mineral Solution Ltd. MIST Project Reference: MA/2/003. [verkkojulkaisu]. [viitattu 30.10.2013]. 52 p. + appendices 8 p. Saatavissa: <http://www.mineralsolutions.co.uk/mist/mist2.pdf>

Metla. 2014. Tuhkakoealojen kantavuusmittausten tulokset. Metsäntutkimuslaitos. Julkaisematon tutkimus. 1 s.

Mitchell, C. 2009. Quarry fines and waste. In: Quarries & Mines 2009. Ten Alps. pp. 63-67. 5p. [verkkojulkaisu]. [viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: NERC Open Research Archive, <http://nora.nerc.ac.uk/6290/>

Mitchell, C.J, Mitchell, P. & Pascoe, R. 2008. Quarry fines minimization: Can we really have 10 mm aggregate with no fines? In: Walton, Geoffrey, (ed.) Proceedings of the 14th Extractive industry geology conference. EIG Conferences, United Kingdom. pp. 37-44. [verkkojulkaisu]. [viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: NERC Open Research Archive, <http://nora.nerc.ac.uk/4932/>

Mroueh, U-M., Vahanne, P., Eskola, P., Pasanen, A., Wahlström, M., Mäkelä, E. & Laaksonen, R. 2004. Pilaantuneiden maiden kunnostushankkeiden hallinta. Espoo, VTT, Yleinen Teollisuusliitto YTL ja Ympäristöyritysten Liitto ry. VTT Tiedotteita 2245. [verkkojulkaisu]. [viitattu 27.2.2014]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2245.pdf>

Mäkelä, H. & Höynälä, H. 2000. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa. Materiaalit ja käyttökohteet. Helsinki, TEKES. Teknologiakatsaus 91/2000. 97 s.

Ojala, A-S. 2002. Turpeen massastabilointi. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 103 s.

Ollila, S. & Kiviniemi, O. 2011. Materials report. OSAMAT-project. Ramboll Finland Oy. [verkkojulkaisu]. [viitattu 28.2.2014]. Saatavissa: Projektin verkkosivut. <http://www.osamat.ee/en/documents>

Rintala, J. 2013. Arvio soran, hiekan ja kalliomurskeen kokonaiskäytöstä vuosina 2001-2011. Suomen Rakennusmedia Oy. Kivimieskalenteri 2014.

Ronkainen, M., Koroljova, A., Pototski, A., Puhkim, H., Lahtinen, P. & Kiviniemi, O. 2012. OSAMAT – Utilisation of oil shale ashes in road construction. In: Ed, by Arm, M., Vandecasteele, C., Heynen, J., Suer, P. & Lind, B. Proceedings of WASCON 2012 – Towards effective, durable and sustainable production and use of alternative materials in construction, 8th International conference on sustainable management of waste and recycled materials in construction, Gothenburg, Sweden, 30 May – 1 June, 2012. [verkkojulkaisu]. [viitattu 26.2.2014]. Saatavissa: http://www.ene.ttu.ee/maeinstituut/artiklid/2012/Pototski_WASCON_2012_OSAMAT_24022012_final.pdf

Ruuskanen, J. 1999. Syötteen vaikutus murskaimen tuotteeseen ja toimintaan. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 90 s.

Seppälä, J. 2012. Massastabilointijärjestelmän kehittäminen. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 97 s.

SFS 179-2. 2008. Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 2: Maan laboratoriokeet. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 216 s.

SFS-EN 932-3+A1. 2003. Kiviainesten yleisten ominaisuuksien testaus. Osa 3: Yksinkertaistetun petrografisen kuvauksen menettely ja terminologia. Suomen Standardisoimisliitto ry. 9 s.

SFS-EN 1097-2. 2010. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 2: Iskunkestävyyden määrittämismenetelmät. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 31 s.

SFS-EN 1097-9:en. 2014. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 9: Nastarengaskulutuskestävyyden määrittäminen. Pohjoismainen testi (kuula-myllymenetelmä). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 13 s.

SFS-EN 1997-2. 2007. Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus. 5.6.2 Orgaanisen aineksen pitoisuuden määrittäminen. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 156 s.

Suominen, M & Forsman, J. 2013. EU-Life ABSOILS, ”Savet hyötykäyttöön”. Esitys UUMA 2 - Vuosiseminaarissa 14.11.2013. [verkkajulkaisu]. [viitattu 7.2.2014]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/8202/EU-Life_Absoils_savet_hyotykyayttoon.pdf

SYKE. 2010. Ympäristöasioiden hallinta kiviainestuotannossa. Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT). Ympäristönsuojelu. Helsinki, Suomen ympäristökeskus. Suomen Ympäristö 25/2010. 87 s.

Tiehallinto. 2007. Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki, Tiehallinto. TIEH 2100041-07. [verkkajulkaisu]. 80 s. [viitattu 1.10.2013]. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100041-v-07-sivutuoteohje.pdf>

Tielaitos. 1999. Murskaustyöt. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Helsinki, Tielaitos ja Tiehallinto. TIEL 2212809-98. 30 s.

Uotila, J. 2004. Seostettu turve kaatopaikan tiivistysrakenteissa. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto.

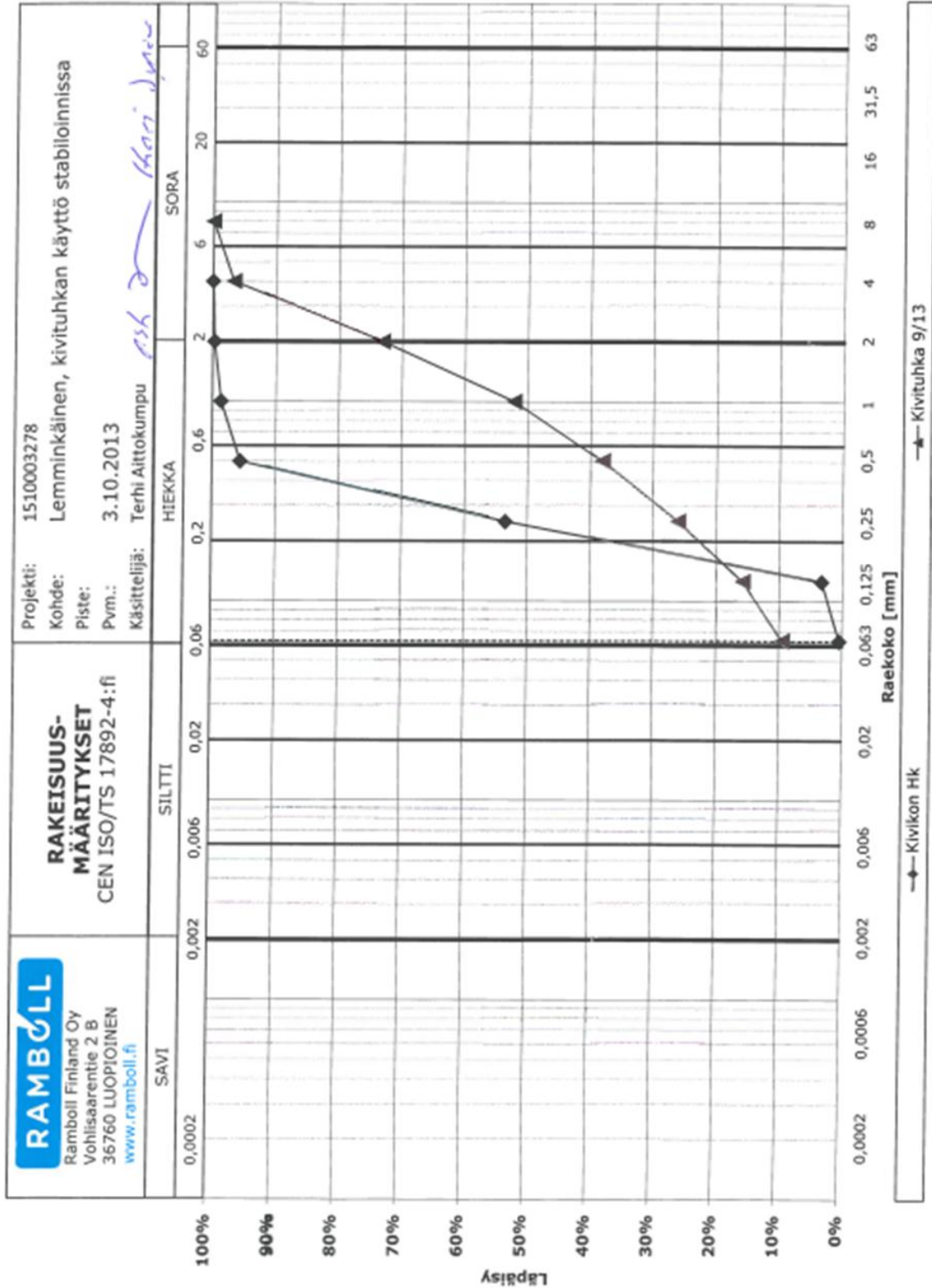
Uusinoka, R. 1989. Kiven lujuus ja siihen vaikuttavat tekijät. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Luentomoniste. Luento TTKK:n täyden-nyskurssilla, kivi- ja mineraaliainekset rakennustekniikassa. 15 s.

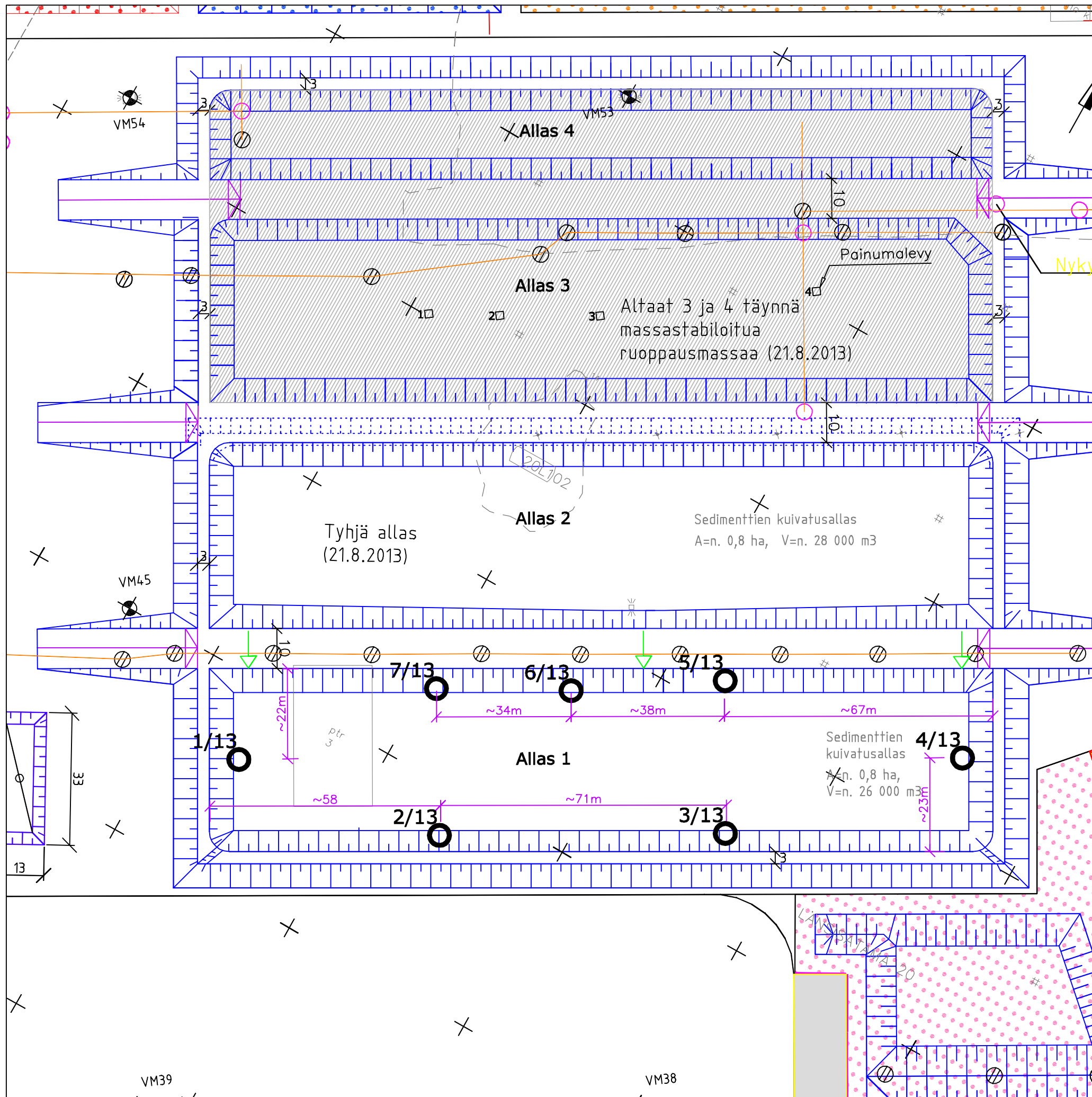
VNa 591/2006. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. [verkkajulkaisu]. [viitattu 3.9.2013]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060591>

VNa 403/2009. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa annetun valtioneuvoston liitteiden muuttamisesta. [verkkajulkaisu]. [viitattu 3.9.2013]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090403>

Ympäristöministeriö. 2004. Sedimenttien ruoppaus- ja läjitysohje. Helsinki, Ympäristöministeriö. Ympäristöopas 117. [verkkajulkaisu]. 121 s. [viitattu 27.2.2014]. Saatavissa: <http://www.ymp.fi/download/noname/%7B7DCA31D2-28A0-4459-B217-D898DDBFA60A%7D/31650>

Ympäristöministeriö. 2009. Maa-ainesten kestävä käyttö. Opas maa-ainesten ottamisen sääntelyä ja järjestämistä varten. Helsinki, Ympäristöministeriö. Ympäristöhallinnon ohjeita 1/2009. Luonnonvarat. [verkkajulkaisu]. 140 s. [viitattu 27.2.2014]. Saatavissa: <http://www.ymp.fi/download/noname/%7BD54254A5-77D5-4E95-9C7C-62AEB12E42B1%7D/37543>





Näytteet otetaan kerroksittain noin syvyyksiltä 0-1m, 1-2m, 2-3m, mikäli se on mahdollista (yht. 21 näytettä). Mikäli kerroksittainen näytteenotto ei ole mahdollista, otetaan kokoomanäyte syvyydeltä 0...3 m.

Näytemäärä 10 l / näyte.

Näytteistä määritetään vesipitoisuus, heikutushäviö ja silmämääräinen maalaji.

Kahdesta näytepisteestä määritetään rakeisuus (näyte kootaan kolmesta, samasta pisteestä eri syvyyksiltä otetusta näytteistä).

Näytteet toimitetaan Rambollin laboratorioon Luopioisiin.

Sedimenttinäytteistä tehdään seuraavat haitta-aineanalyysit:

- metallit ja puolimetallit (Sb, As, Hg, Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, V)
- Orgaaniset tinayhdisteet (TBT, TPT)
- Öljyhiilivedyt (C10-C40)
- PAH -yhdisteet
- VOC (C5-C10, sis BTEX -yhdisteet)

Haitta-aineanalyysit tehdään ALS Finland Oy:n laboratoriossa.

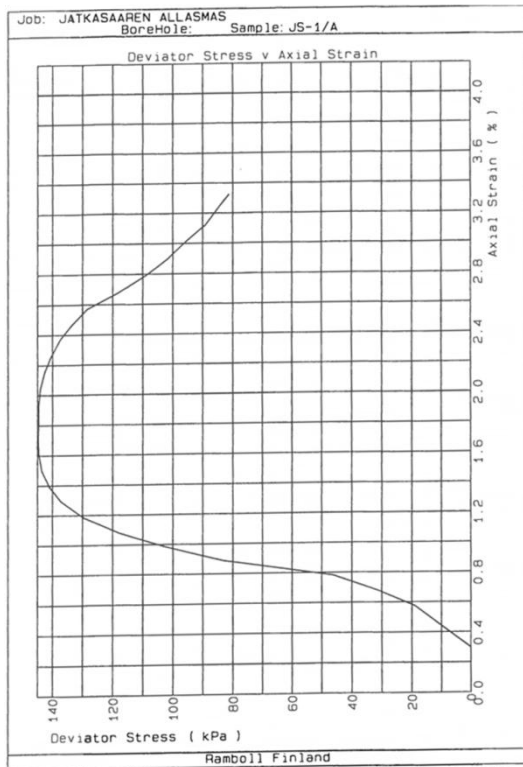
↓ = Sedimenttien kippauspaikka 10-19.6.2013
 ↓ Sedimenttikerroksen paksuus on n.3m

JÄTKÄSAAREN VÄLIVARASTOALUE
 Stabiloitavan sedimentin ominaisuustutkimukset
 Näytteenotto-ohjelma

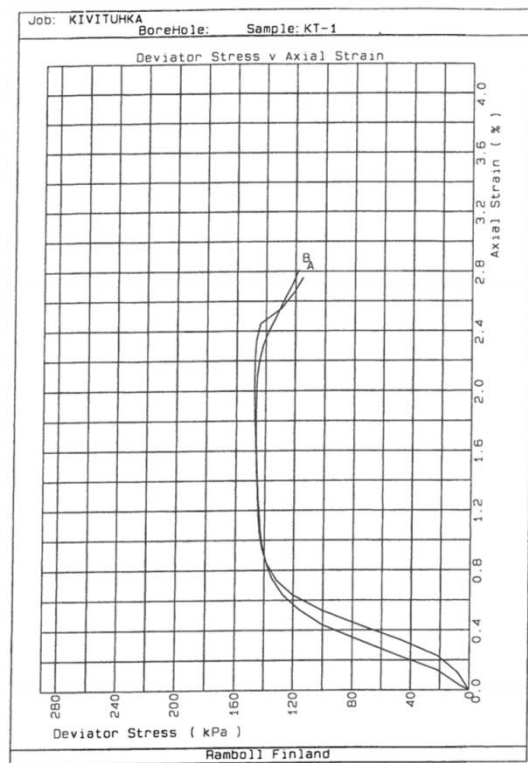
1:1000

23.8.2013 / J.Forsman,
 J.Laine, T.Moisio

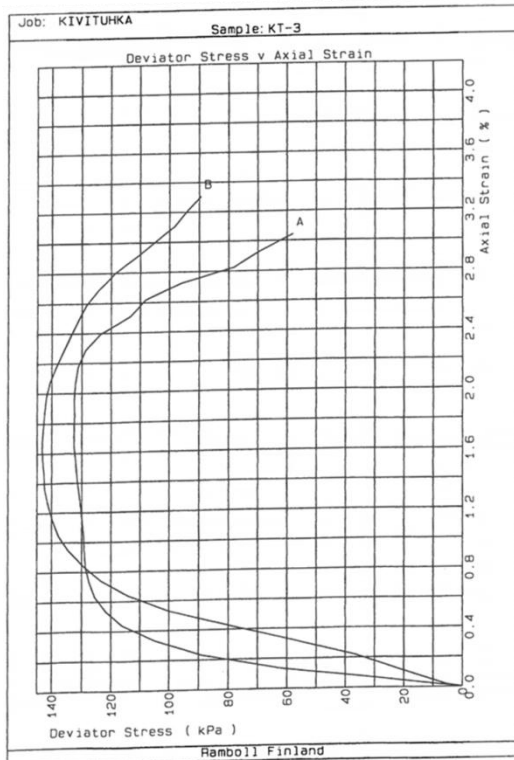
Sementti 50 kg/m³



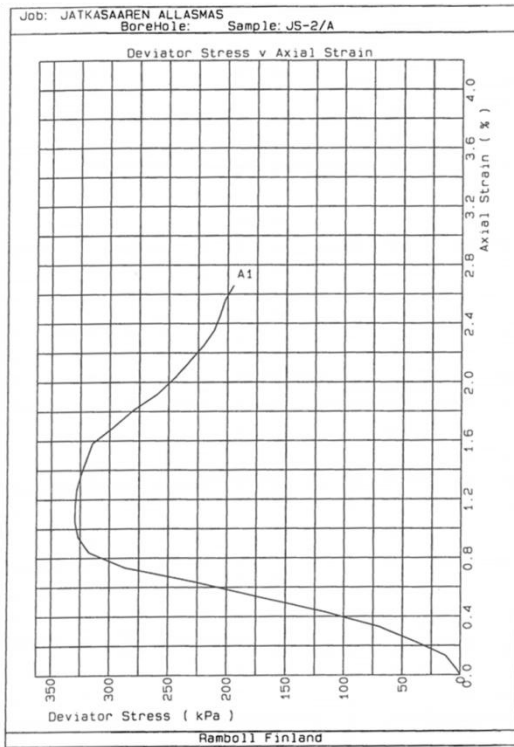
Sementti 50 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



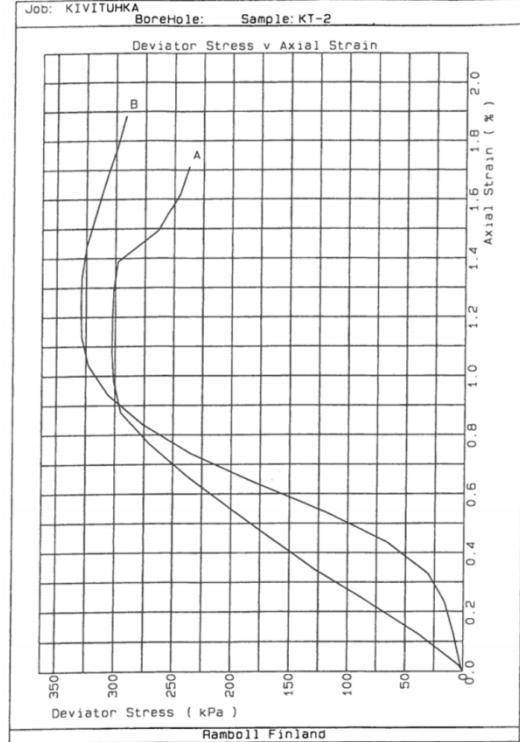
Sementti 50 kg/m³ + Kivituhka 400 kg/m³



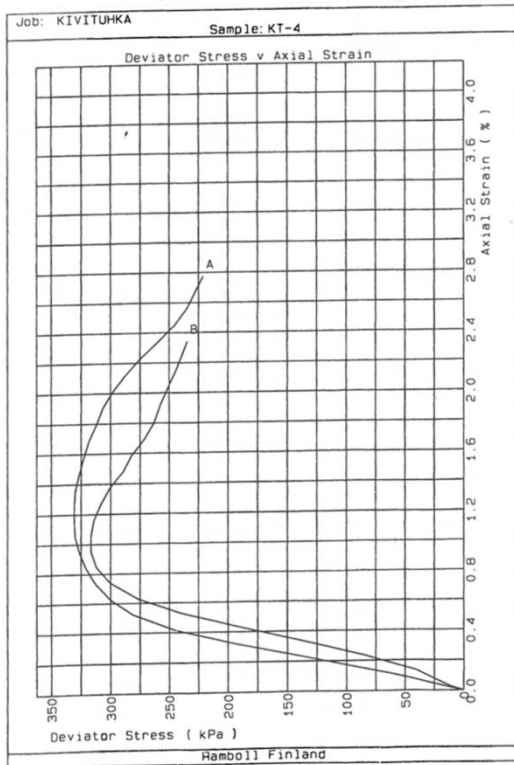
Sementti 75 kg/m³



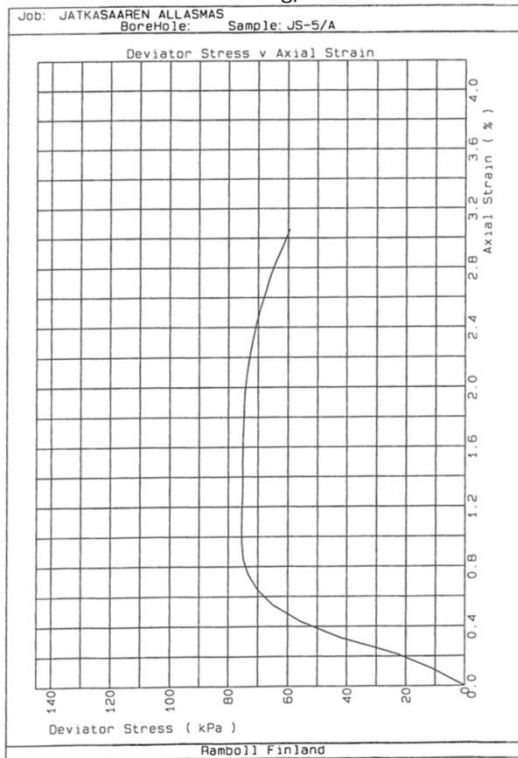
Sementti 75 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



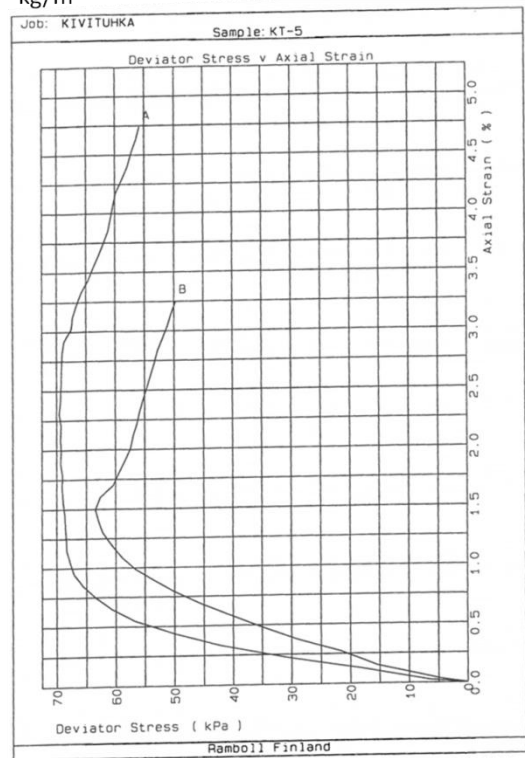
Sementti 75 kg/m³ + Kivituhka 400 kg/m³



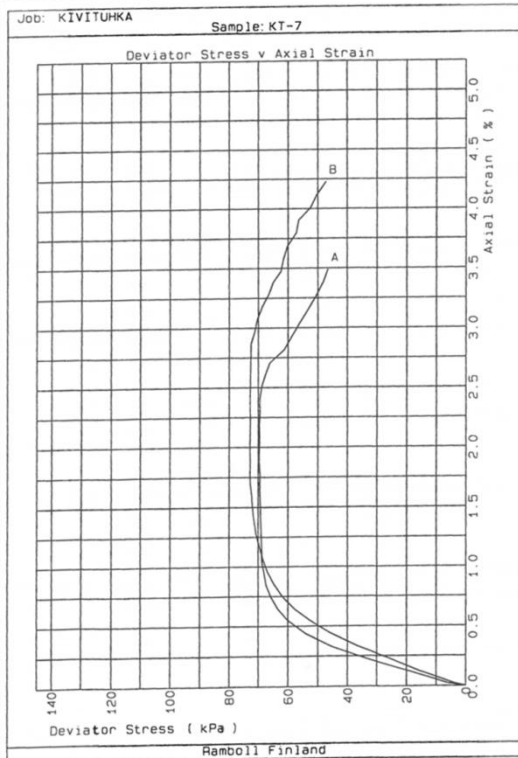
Palavan kiven tuhka 100 kg/m³



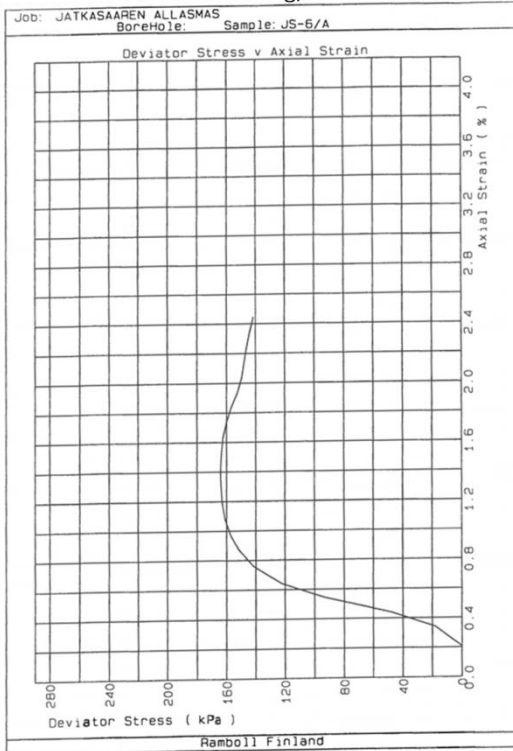
Palavan kiven tuhka 100 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



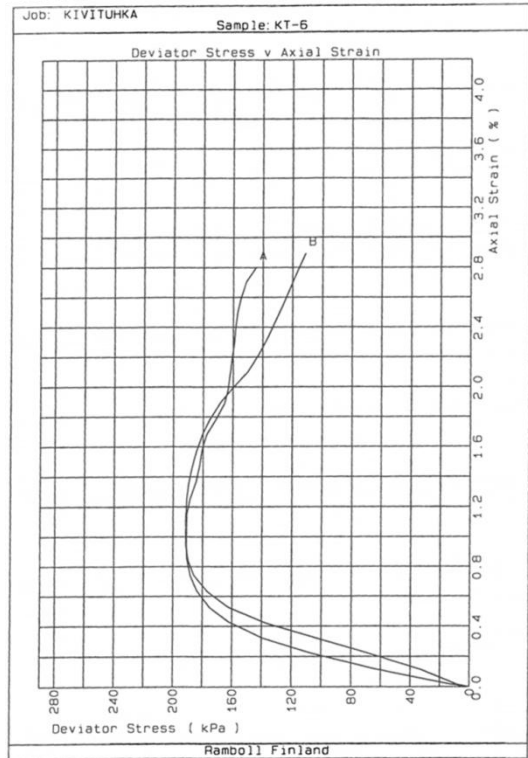
Palavan kiven tuhka 100 kg/m³ + Kivituhka 400 kg/m³



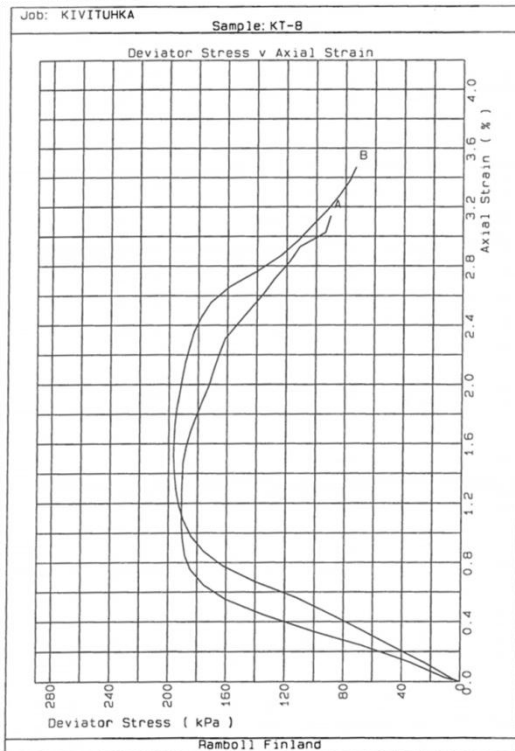
Palavan kiven tuhka 150 kg/m³



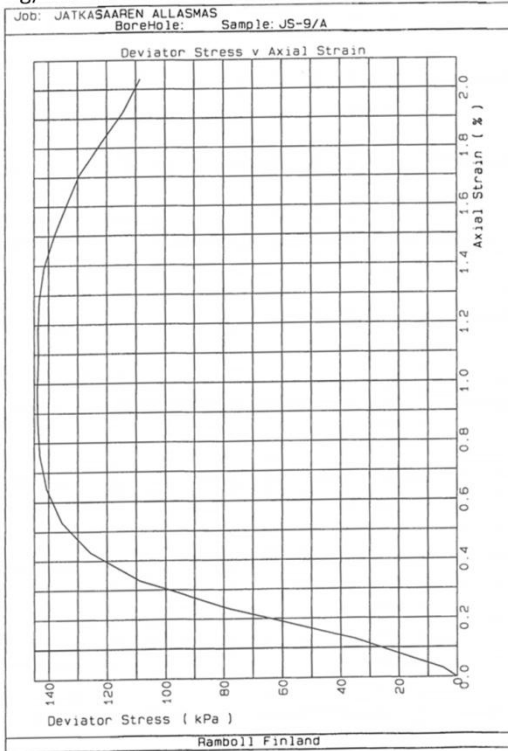
Palavan kiven tuhka 150 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



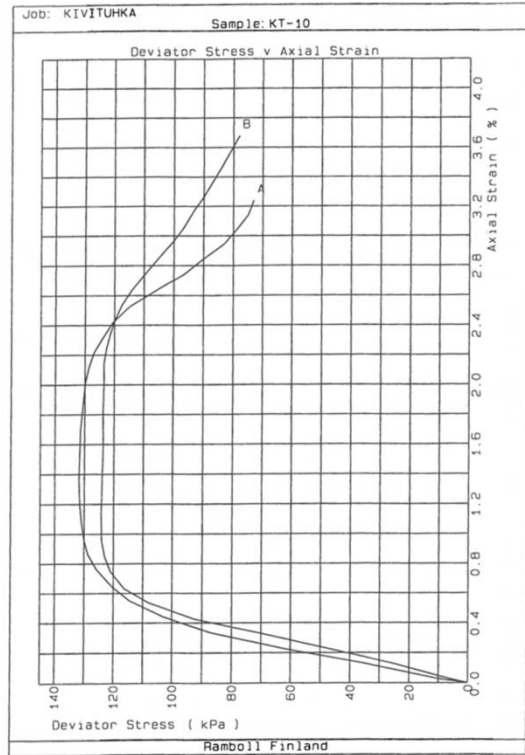
Palavan kiven tuhka 150 kg/m³ + Kivituhka 400 kg/m³



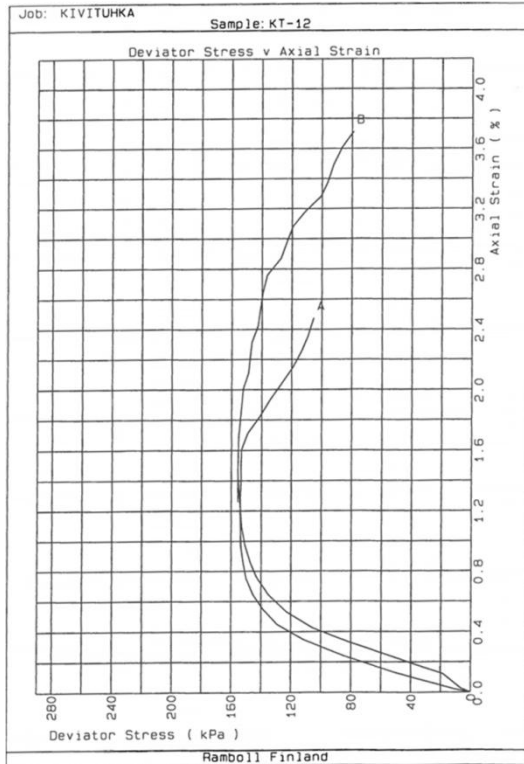
Sementti 30 kg/m³ + Palavan kiven tuhka 50 kg/m³



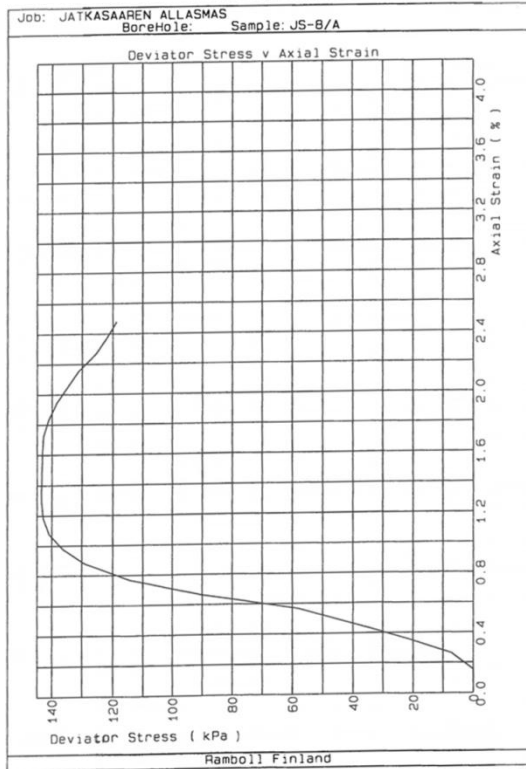
Sementti 30 kg/m³ + Palavan kiven tuhka 50 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



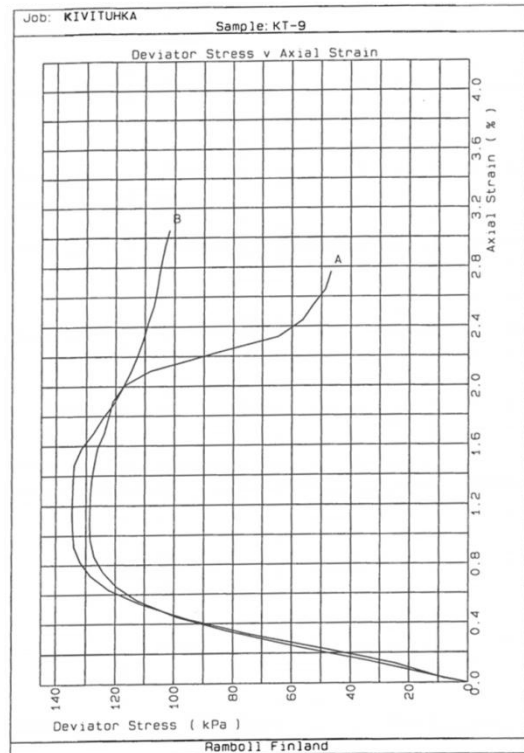
Sementti 30 kg/m³ + Palavan kiven tuhka 50 kg/m³ + Kivituhka 400 kg/m³



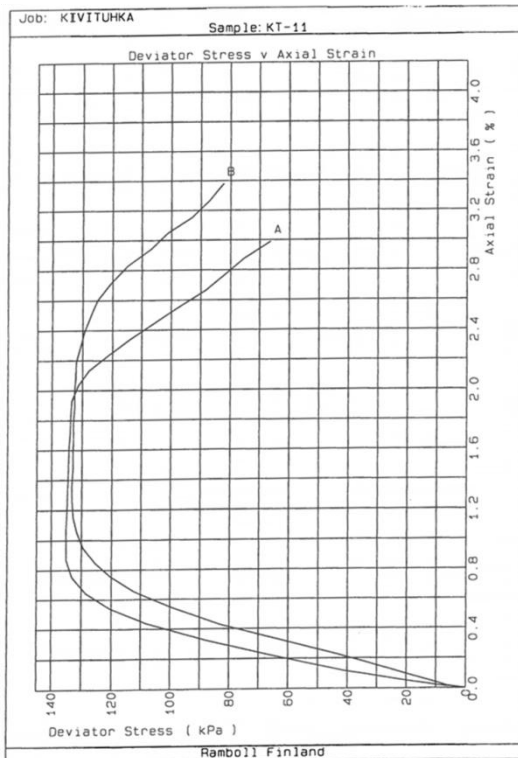
Sementti 10 kg/m³ + Palavan kiven tuhka 100 kg/m³



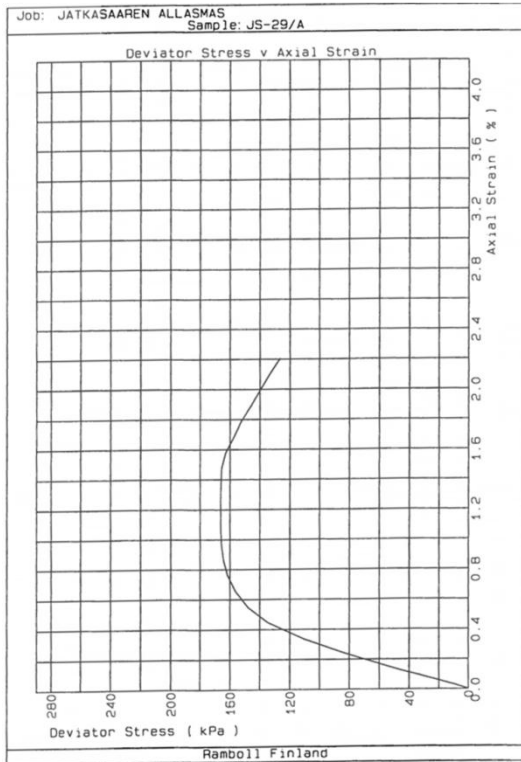
Sementti 10 kg/m³ + Palavan kiven tuhka 100 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



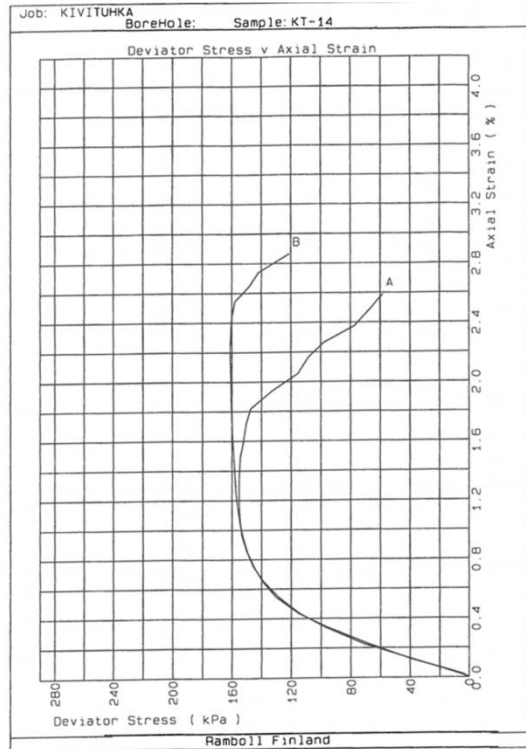
Sementti 10 kg/m³ + Palavan kiven tuhka 100 kg/m³ + Kivituhka 400 kg/m³



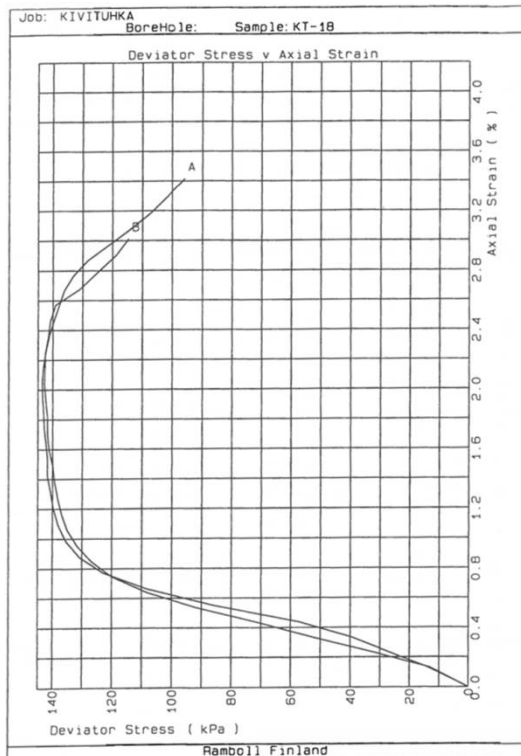
Sementti 50 kg/m³ + Lentotuhka 100 kg/m³



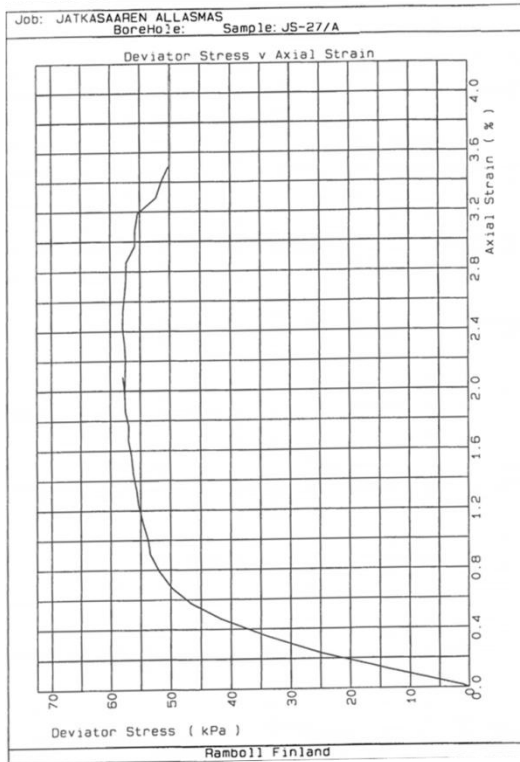
Sementti 50 kg/m³ + Lentotuhka 100 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



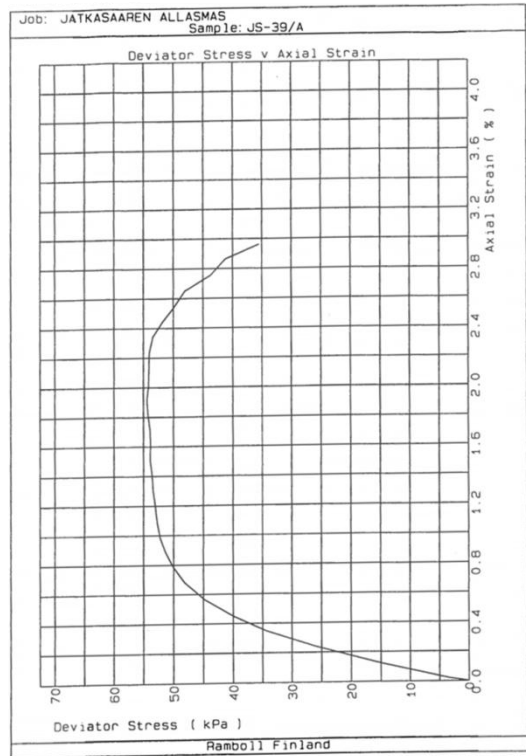
Sementti 50 kg/m³ + Lentotuhka 100 kg/m³ + Kivituhka 400 kg/m³



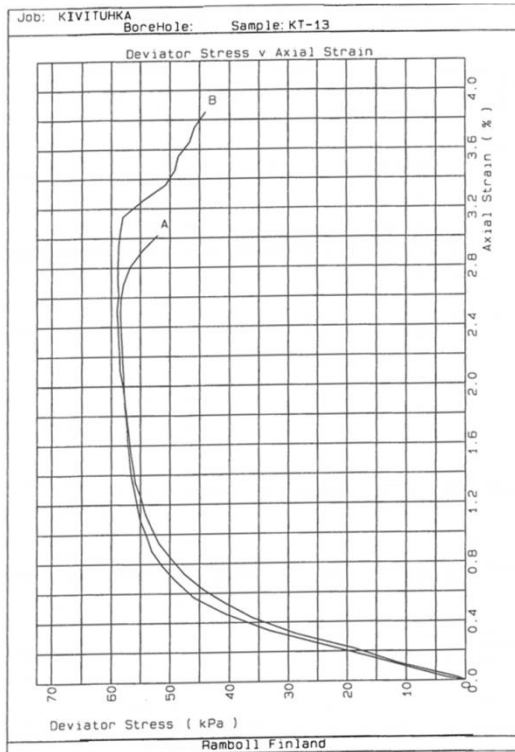
Sementti 30 kg/m³ + Lentotuhka 100 kg/m³



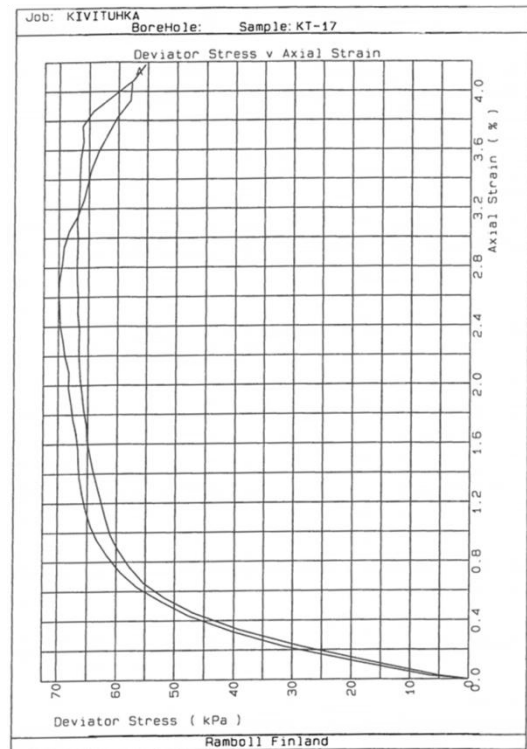
Sementti 30 kg/m³ + Lentotuhka 100 kg/m³



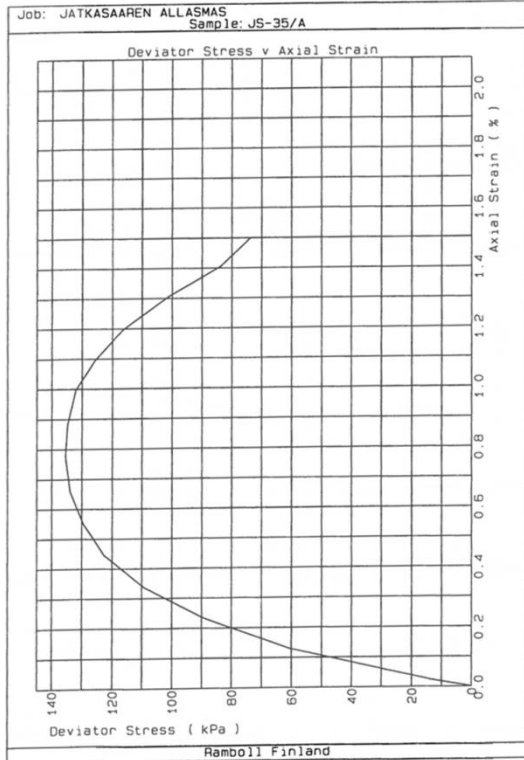
Sementti 30 kg/m³ + Lentotuhka 100 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



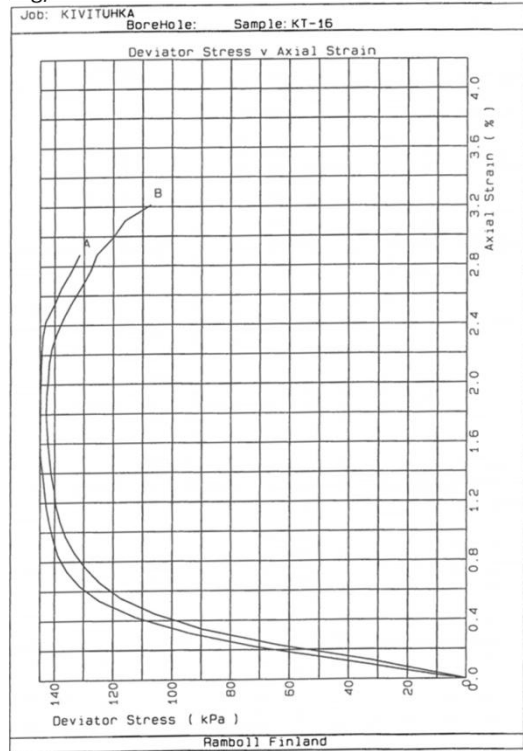
Sementti 30 kg/m³ + Lentotuhka 100 kg/m³ + Kivituhka 400 kg/m³



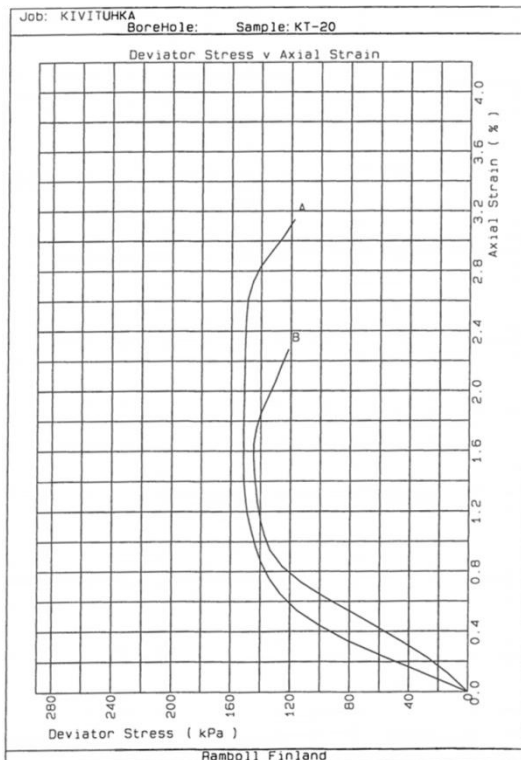
Sementti 30 kg/m³ + Lentotuhka 50 kg/m³ +
Palavan kiven tuhka 50 kg/m³



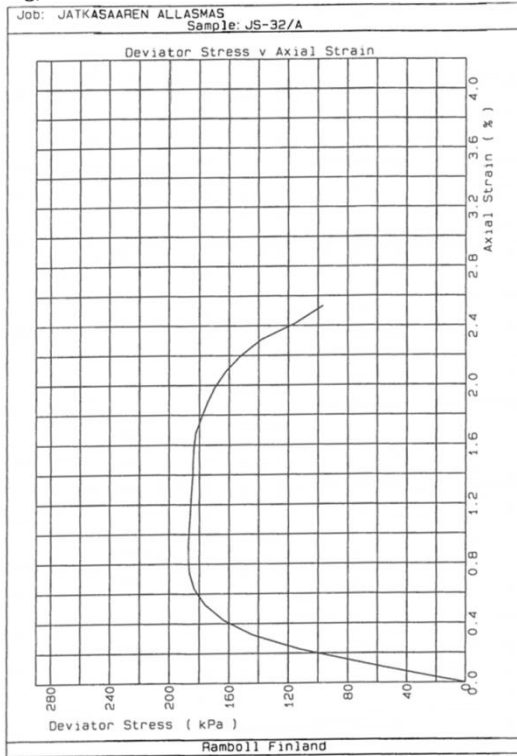
Sementti 30 kg/m³ + Lentotuhka 50 kg/m³ +
Palavan kiven tuhka 50 kg/m³ + Kivituhka 200
kg/m³



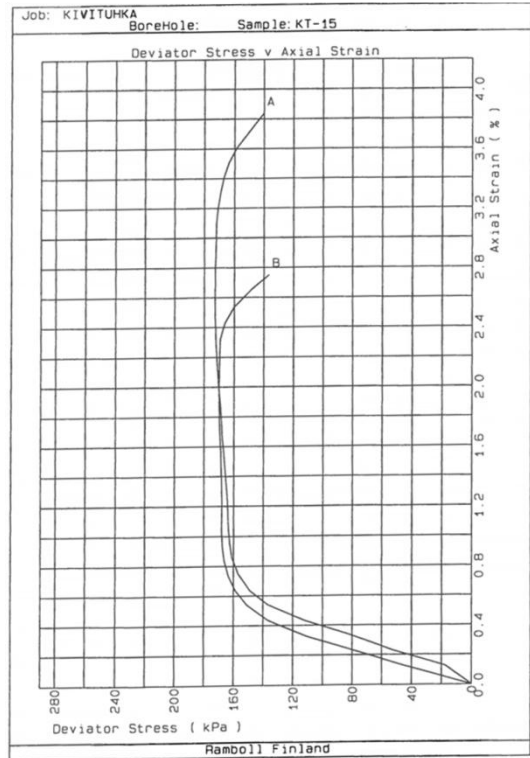
Sementti 30 kg/m³ + Lentotuhka 50 kg/m³ +
Palavan kiven tuhka 50 kg/m³ + Kivituhka 400
kg/m³



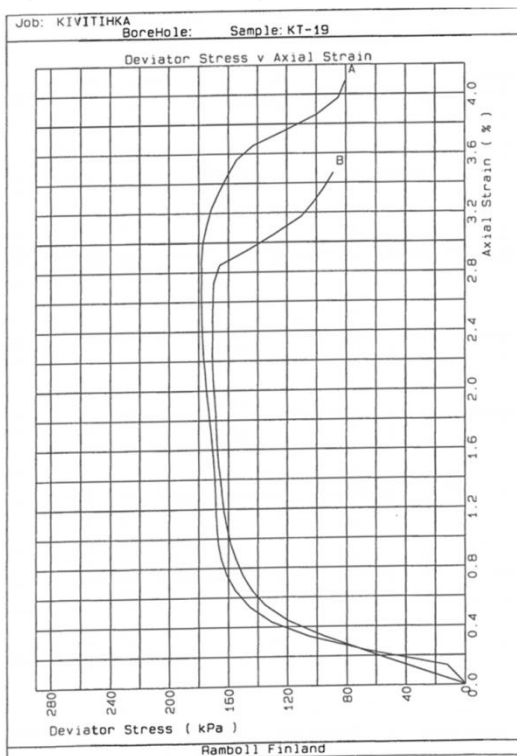
Kalkki-sementti 50 kg/m³ + Lentotuhka 100 kg/m³



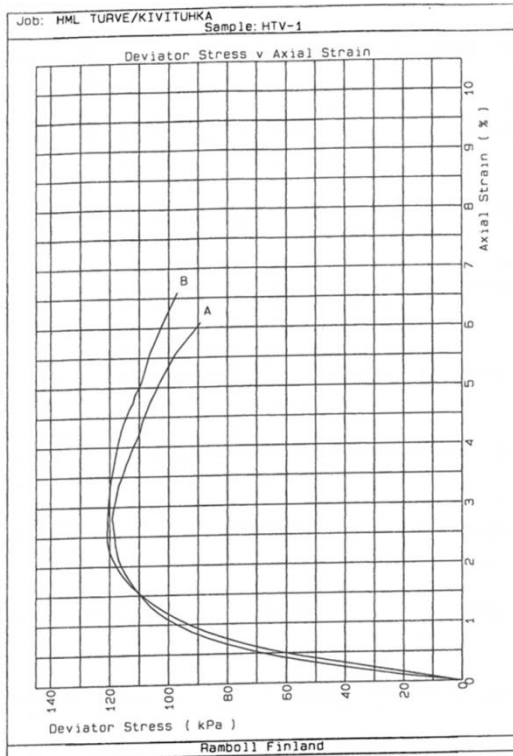
Kalkki-sementti 50 kg/m³ + Lentotuhka 100 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



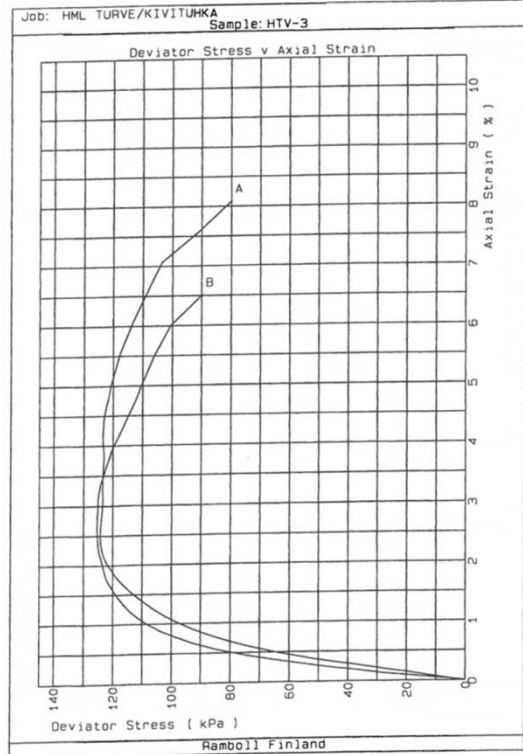
Kalkki-sementti 50 kg/m³ + Lentotuhka 100 kg/m³ + Kivituhka 400 kg/m³



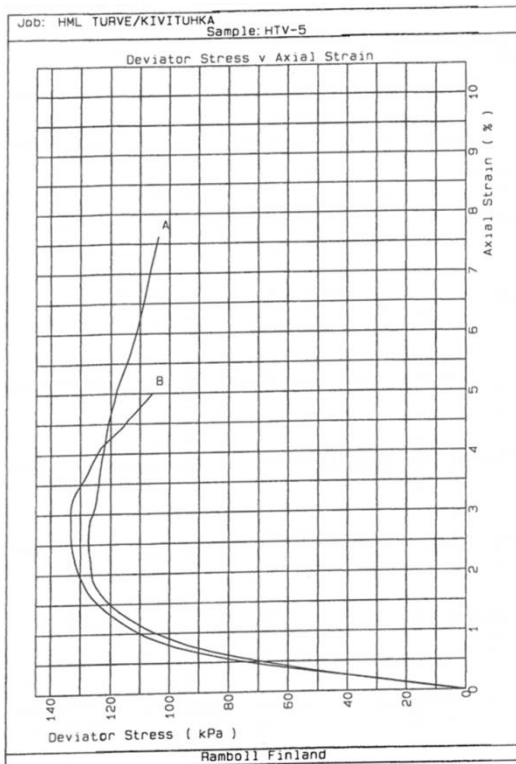
PlusSementti 100 kg/m³



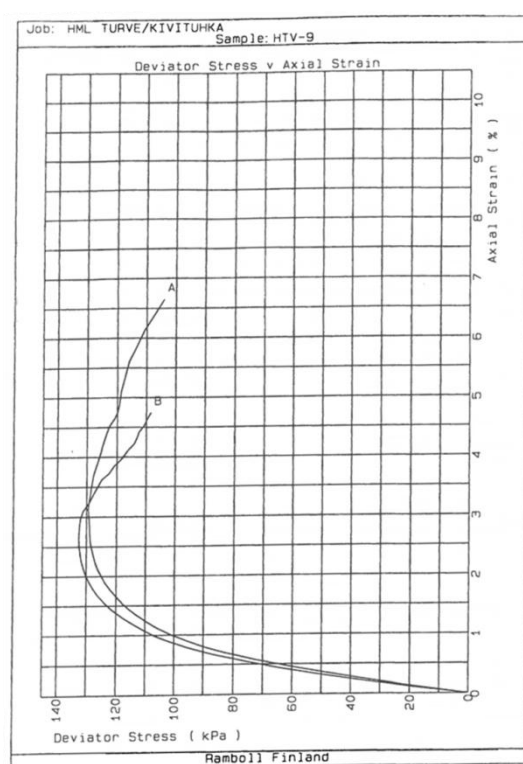
PlusSementti 100 kg/m³ + Kivituhka 100 kg/m³



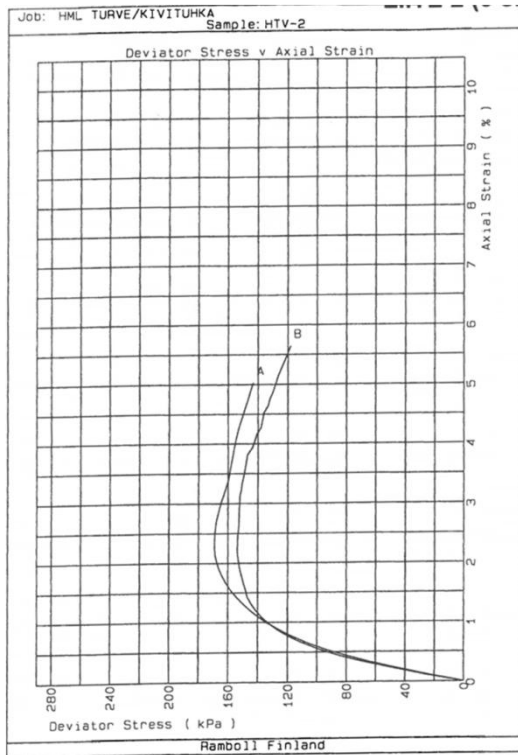
PlusSementti 100 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



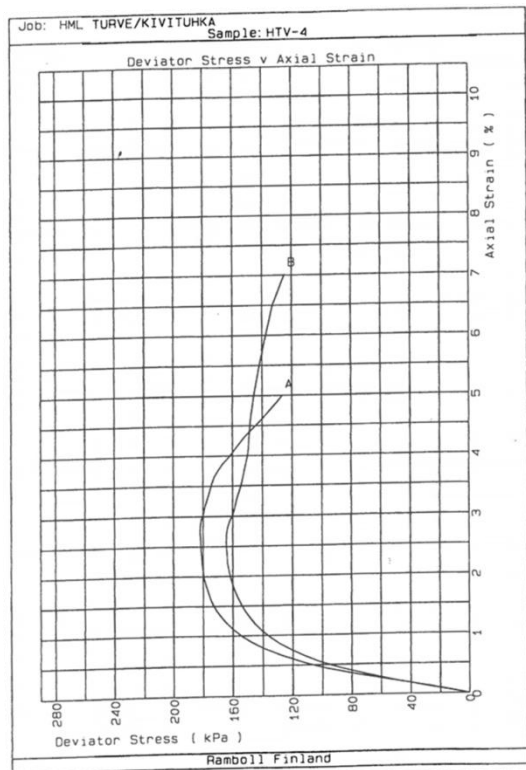
PlusSementti 100 kg/m³ + Kivituhka 300 kg/m³



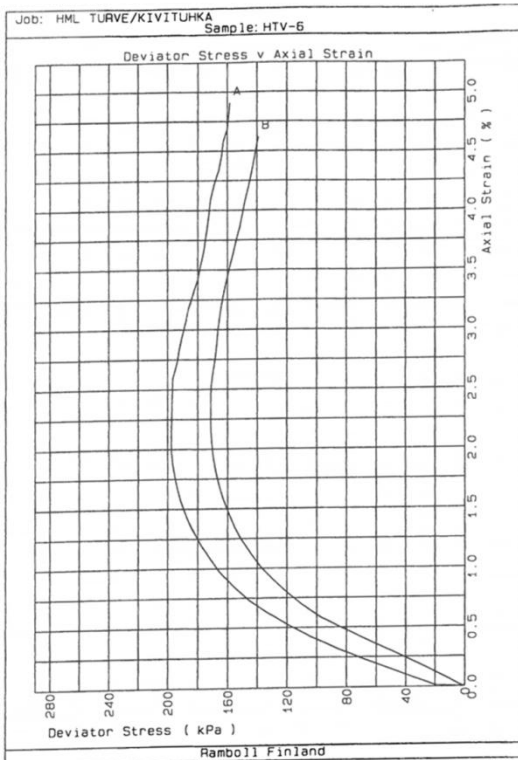
PlusSementti 130 kg/m³



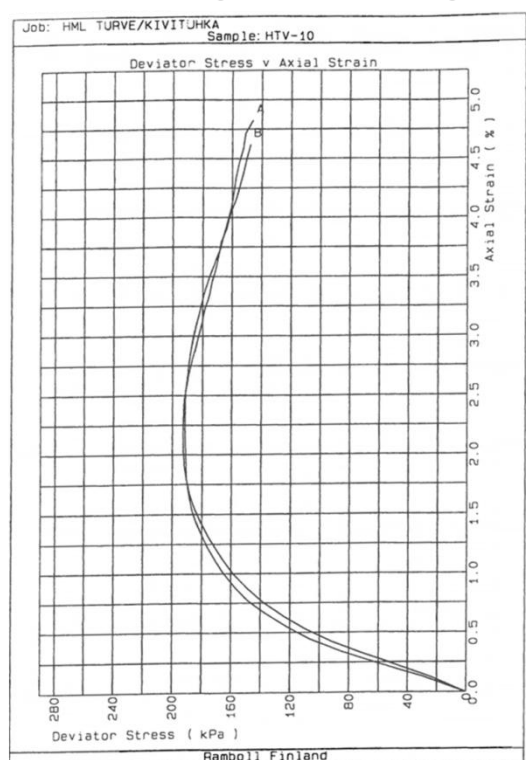
PlusSementti 130 kg/m³ + Kivituhka 100 kg/m³



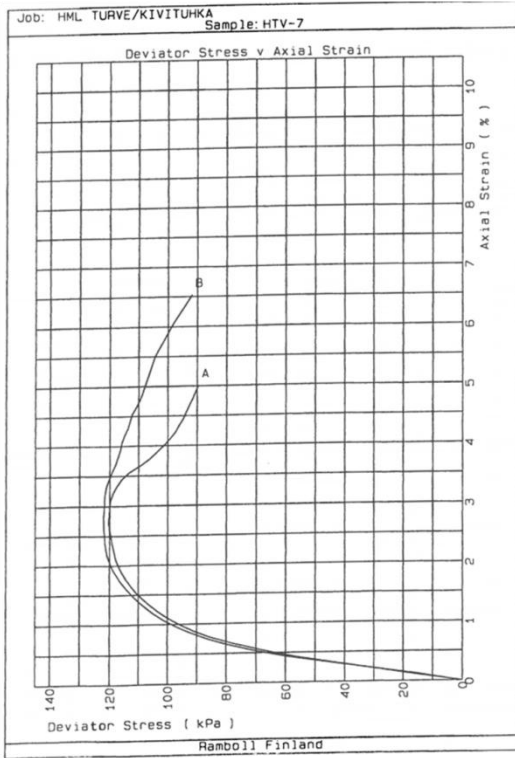
PlusSementti 130 kg/m³ + Kivituhka 200 kg/m³



PlusSementti 130 kg/m³ + Kivituhka 300 kg/m³



PlusSementti 100 kg/m³ + Hiekka 200 kg/m³



PlusSementti 130 kg/m³ + Hiekka 200 kg/m³

