

AALTO-YLIOPISTO

Insinööritieteiden korkeakoulu

Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma

Geotekniikan pääaine

Mikko Möttönen

Suihkuinjektoinnissa syntyvän paluuvirtauslietteen jatkokäsittelymahdollisuudet

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Espoossa 16. toukokuuta 2013

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Juha Vunneli

Tekijä Mikko Möttönen

Työn nimi Suihkuinjektioinnissa syntyvän paluuvirtauslietteen jatkokäsittelymahdollisuudet

Laitos Rakennustekniikan laitos

Professori Pohjarakennus ja maamekaniikka**Professuurikoodi** Rak-50

Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t) DI Juha Vunneli

Päivämäärä 16.05.2013**Sivumäärä** 82+1**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Suihkuinjektointi on injektointimenetelmä, jolla voidaan valmistaa työmaaolosuhteissa maa-aineksesta ja sementistä koostuvia matalalujuuksisia betonipilareita. Suihkuinjektioinnin ohessa syntyvä paluuvirtausliete on yksi menetelmän haittapuolista. Tässä tutkimuksessa etsittiin uusia keinoja paluulietteen määrän vähentämiseksi sekä sen jatkokäsittelylle.

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää lietteelle vaihtoehtoisia loppusijoituspaikkoja ja hyödyntämismenetelmiä sekä tutkia ja vertailla vaihtoehtojen soveltamismahdollisuuksia. Tutkimuksessa perehdyttiin suihkuinjektointimenetelmään sekä paluuvirtauslietteen käsittelyyn liittyviin säännöksiin, ohjeisiin ja nykyisiin toimintatapoihin. Esiin nousseiden kehittämisehdotusten pohjalta tarkasteltiin kolmea mahdollista käsittelymenetelmää. Kirjallisuudessa tutkittiin sitoutuneen betonijätteen murskaamista ja jatkokäyttöä betonimurskeen materiaalina sekä bentoniittilietteen kierrättämiseen suunniteltujen laitteistojen soveltuvuutta suihkuinjektioinnissa syntyvän paluulietteen käsittelyyn. Empiirisessä osiossa tutkittiin sementtimassalle ja paluuliettele suoritettavien mittausten avulla lietteen soveltumista vedenpitävän patoseinän materiaaliksi.

Tutkimus selvitti, millä edellytyksillä injektointilietteen sitouttaminen ja murskaaminen sekä lopputuotteena saatavan betonimurskeen tuotteistaminen ja käyttö on lainsäädännön puitteissa mahdollista. Lisäksi tutkimus osoitti, että bentoniittilietteen kierrätyslaitteistot soveltuvat tietyin varauksin myös suihkuinjektointilietteen käsittelyyn. Suihkuinjektointi- ja injektointistandardeihin perustuvat empiiriset kokeet osoittivat, että paluuliete soveltuu patoseinämateriaaliksi tietyissä maaperäolosuhteissa.

Avainsanat betonijäte, betonimurske, injektointi, jalostus, jätteenkäsittely, kehittäminen, laadunvarmistus, laitteisto, liete, maabetoni, patoseinä, suihkupaalutus, uusiomateriaali, vedenerotus

Author Mikko Möttönen

Title of thesis Development of Backflow Treatment in Jet Grouting

Department Department of Civil and Structural Engineering

Professorship Soil Mechanics and Foundation Engineering

Code of professorship Rak-50

Thesis supervisor Professor Leena Korkiala-Tanttu

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) M. Sc. Juha Vunneli

Date 16.05.2013

Number of pages 82+1

Language Finnish

Abstract

Jet grouting is a method that is used in situ to create soilcrete columns consisting of soil and cement. A negative aspect of the method is backflow slurry that is created in the process. In this study, new ways of reducing and treating the backflow were examined.

The goal of the study was to find out new options for placement and utilization of the slurry and to examine and compare the possibilities to apply them in practice. This study explored the jet grouting method as well as the laws, ruling and current practice concerning the backflow treatment. Three new possible treatment options were being examined. Firstly, the study investigated the process of using the hardened backflow as a material for crushed concrete. Secondly, the equipment used in treating the slurry wall material was examined to find out if it is applicable in jet grouting method. Thirdly, the properties of the grout and the backflow were being measured to study the use of backflow as a material for waterproof underground walls.

The study explained the requirements for the process of manufacturing and using of crushed concrete in terms of legislation. In addition, the study indicated that it may be possible to use the slurry wall equipment for recycling the material used in jet grouting. The empiric tests indicated that the jet grouting backflow can be applied as a material for waterproof underground walls when the ground properties are of certain type.

Keywords equipment, grout, HDI, improvement, processing, reclaimed concrete, slurry, soilcrete, waste treatment, water removal, water separation

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty YIT Rakennus Oy:lle kevään 2013 aikana.

Haluan erityisesti kiittää diplomityöni valmistumisesta diplomityön ohjaajaa Juha Vunnelia sekä työn valvojaa Leena Korkiala-Tanttua.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia niitä henkilöitä, jotka ovat edesauttaneet diplomityöni valmistumista vastaamalla haastattelukysymyksiin tai avustamalla muuten työn edetessä.

Lopuksi haluan vielä antaa erityiskiitokseni vaimolleni Ilonalle hänen kannustuksestaan ja ymmärryksestään kaikkien opiskeluvuosieni aikana.

Helsingissä, 16.5.2013

Mikko Möttönen

Sisällys

Tiivistelmä	2
Abstract	3
Alkusanat	4
1. Johdanto	7
2. Suihkuinjektointi	9
2.1. Suihkuinjektointimenetelmä	9
2.2. Suihkuinjektointilaitteisto	14
2.3. Suihkuinjektointiparametrit	16
2.4. Suihkuinjektoinnin laadunvalvonta	18
2.5. Nykyinen tilanne ja haasteet	21
3. Paluulietteen hyödyntäminen betonimurskeen valmistamisessa	25
3.1. Betoroc-betonimurske	25
3.2. Lainsäädäntö, määräykset ja ohjeet	26
3.2.1. Nestemäisen jätteen loppusijoitus	26
3.2.2. Ympäristölupa	27
3.2.3. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä	28
3.3. Betonimurskeen laadunhallinta, käyttöohjeet ja rajoitukset käytölle	30
3.3.1. SFS-standardi	30
3.3.2. Pohjarakennusohjeet	31
3.3.3. Ohjeet jakavan kerroksen materiaalien käytölle	32
3.3.4. CE-merkintä	34
3.4. Paluuvirtauslietteen murskaustoiminnan edellytykset	36
4. Nestemäisen paluulietteen käsittely koneellisesti	39

4.1.	Lietteenkäsittelylaitteistot	39
4.1.1.	Hiekan- ja siltinerotuslaitteistot	39
4.1.2.	Dekantterilingot.....	41
4.1.3.	Tyypillinen lietteenkäsittelyjärjestelmä.....	42
4.1.4.	Veden sakkauttaminen kemiallisesti	43
4.2.	Laitteistojen soveltaminen suihkuinjektioinnissa	45
4.2.1.	Suihkuinjektioilietteen puhdistaminen uudelleenkäyttöä varten	45
4.2.2.	Suihkuinjektioilietteen seulonta ja käyttö esileikkauvaiheessa	47
4.2.3.	Suihkuinjektioilietteen koneellinen vedenerotus	48
4.2.4.	Paluulietteen käsittely työmaaolosuhteissa	51
4.2.5.	Erilaiset laitteistoyhdistelmät.....	52
5.	Paluulietteen hyödyntäminen patoseinien materiaalina.....	54
5.1.	Työkohteessa käytetyt mittausmenetelmät	54
5.1.1.	Marsh-viskositeetti.....	55
5.1.2.	Tiheyden mittaus.....	57
5.1.3.	Tihkumisnopeus.....	58
5.1.4.	Sitoutumisaika	59
5.1.5.	Puristuskokeet.....	60
5.2.	Koekohteen ja työmenetelmän esittely.....	61
5.3.	Suihkuinjektioimassan ominaisuudet.....	65
5.4.	Nestemäisen paluulietteen ominaisuudet.....	70
5.5.	Koekappaleiden puristuslujuustulokset.....	70
6.	Yhteenvedo ja johtopäätökset	73
	Lähdeluettelo.....	76

1. Johdanto

YIT Rakennus Oy toteuttaa muun muassa perustusten vahvistuksia, patoseiniä ja teräsponttiseinien juurten injektointia suihkuinjektoinnilla. Suihkuinjektoinnissa syntyvän paluuvirtauslietteen käsittely on usein haastavaa tilanpuutteesta ja lietteen suuresta määrästä johtuen. Nykyisin paluuliete joudutaan joko poistamaan imuautolla suihkutustyön ohessa tai ohjaamaan työmaalla tilapäiseen altaaseen kuivatusta varten. Lietettä ei voida tällä hetkellä käyttää juurikaan hyväksi, vaan se siirretään jätteenä kaatopaikalle. Jätteen kuljetus on hidasta kaupunkiympäristössä, loppusijoitus on kallista sekä lietettä vastaanottavia toimijoita on vähän. Lisäksi lietteen kuljetus ja loppusijoitus kuormittavat ympäristöä.

Tutkimuksen tavoite oli löytää paluuvirtauslietteelle vaihtoehtoisia loppusijoituspaikkoja ja hyödyntämismenetelmiä sekä tutkia ja vertailla eri vaihtoehtojen soveltamismahdollisuuksia. Tutkimuksessa perehdyttiin suihkuinjektointimenetelmään, paluuvirtauslietteen käsittelyyn liittyviin säännöksiin ja ohjeisiin sekä nykyisin käytössä oleviin toimintatapoihin. Esiin nousseiden kehittämisvaihtoehtojen pohjalta tarkasteltiin kolmea mahdollista käsittelymenetelmää.

Tutkimus on jaettu kirjalliseen ja kokeelliseen osioon. Kirjallisuuslähteinä käytettiin sekä suomalaisia että ulkomaisia aihetta koskevia aiempia tutkimuksia ja artikkeleita sekä suihkuinjektointimenetelmään liittyviä virallisia standardeja ja ohjeita. Tutkimuksessa perehdyttiin myös Suomen ympäristölainsäädäntöön betonijätteiden käsittelyn osalta. Tutkimusta varten haastateltiin eri aloilla toimivia henkilöitä Suomessa ja Saksassa johtuen suihkuinjektointimenetelmän pitkälti kokeellisesta ja kokemukseen perustuvasta luonteesta sekä lietteen käsittelyyn liittyvän kirjallisuuden puutteesta. Verkkolähteinä käytettiin lietteenkäsittelylaitteistojen ja materiaalivalmistajien tuotetietoja ja ohjeita.

Kirjallisessa tutkimusosuudessa perehdyttiin suihkuinjektointimenetelmään, siihen liittyviin laitteistoihin, määräyksiin ja ohjeisiin, laadunvarmistukseen sekä nykyisiin paluulietteen käsittelyn haasteisiin. Osiossa tutkittiin myös, millä edellytyksillä voidaan aloittaa sitoutuneen paluuvirtauslietteen käsittely ja jatkokäyttö betonimurskeena.

Lisäksi perehdyttiin tiivispystyseinien rakentamisessa käytetyn bentoniittise-
menttiseoksen käsittelyyn kehitettyihin laitteistoihin ja tutkittiin niiden
soveltuvuutta suihkuinjektointissa syntyvän paluulietteen jatkokäsittelyyn.

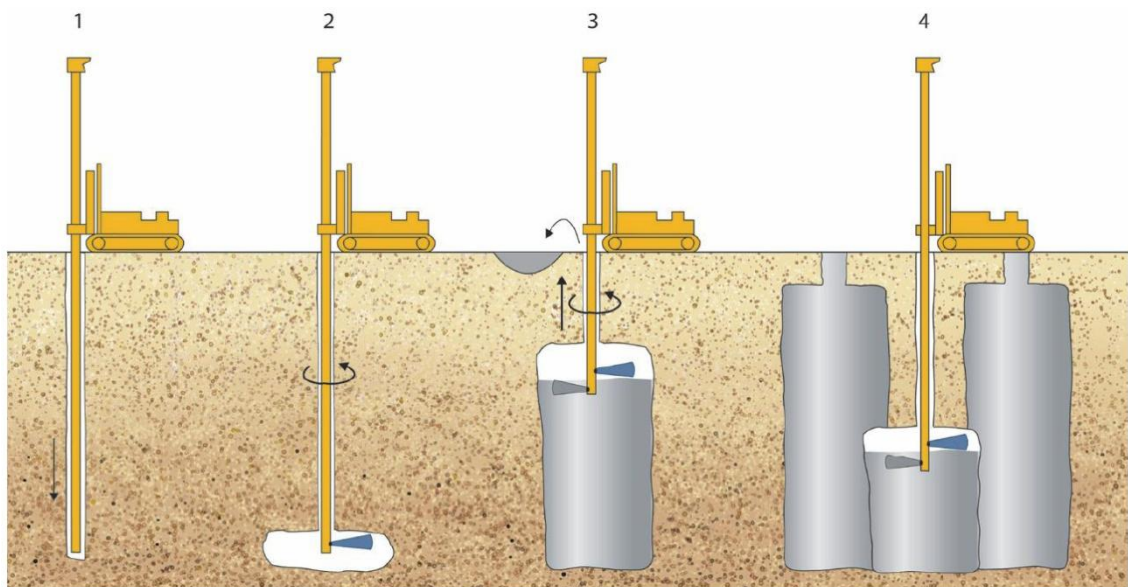
Kokeellisessa osuudessa tutkittiin paluulietteen loppusijoittamista vedenpitävän
patoseinän materiaaliksi lietteen syntypaikalla suihkuinjektointityökohteessa.
Työkohteessa ja laboratoriossa suoritettujen mittausten avulla tarkasteltiin
käytettävän suihkuinjektointimassan ja paluulietteen ominaisuuksia sekä
nestemäisessä että sitoutuneessa muodossa sekä tutkittiin lopullisen rakenteen laatua
ja toteuttamisedellytyksiä tulevaisuudessa.

Tutkimus rajattiin paluuvirtauslietteen jatkokäsittelyn osalta koskemaan ainoastaan
yksittäisjärjestelmällä syntyvän lietteen ominaisuuksia ja käsittelyä johtuen
käytettävissä olevasta kalustosta. Lisäksi lietteenkäsittelyn ja loppusijoituksen
pitkäaikaisvaikutusten arviointi rajattiin työn ulkopuolelle.

2. Suihkuinjektointi

2.1. Suihkuinjektointimenetelmä

Suihkuinjektointi (engl. jet grouting) on injektointimenetelmä, jolla voidaan valmistaa työmaaolosuhteissa maa-aineksesta ja sementistä koostuvia matalalujuuksisia betonipilareita. Maahan porattujen tankojen kärkiosaan sijoitettujen suuttimien kautta syötetyllä suurinopeuksisella suihkulla leikataan ja syrjäytetään maa-ainesta. Suihkutuksessa käytetään vesisementtisuspensiota, jolloin osa maa-aineksesta korvautuu sideaineella. Pyörittämällä ja nostamalla suihkua saadaan aikaiseksi pyöreä betonikappale, jossa maa-aines toimii runkoaineena ja sementtisuspensio sitovana ainesosana. (Hayward Baker 2004, Viitala 1993, 3, Riikonen 2012, 2.) Kuvassa 1 on esitetty suihkuinjektoinnin pääperiaate.



Kuva 1: Suihkuinjektoinnin periaate: 1) Poraus, 2) Esileikkaus vedellä, 3) Suihkutus sementtimassalla, 4) Patoseinän rakentaminen limittyvistä pilareista. (Burke 2009, 51.)

Suihkuinjektointi suoritetaan vaiheittain. Ensimmäiseksi tankoa pyöritetään ja painetaan alaspäin huuhtelemalla reikää vedellä. Tarvittaessa voidaan käyttää iskuporausta. Porakruunun läpimitta on tankoa suurempi, jolloin poratankojen ulkopuolelle jää tyhjää tilaa, jota pitkin ylimääräinen sementtiliete voi purkautua maan pinnalle. Tässä vaiheessa voidaan suorittaa myös esileikkaus suihkuttamalla samalla korkeapaineista vettä tai sementtiä, mikä suurentaa muodostuvan

suihkuinjektointikappaleen läpimittaa. Poraus lopetetaan kallioon tai tavoitesyvyyteen siten, että alimmat suuttimet ovat pilarin halutussa alapinnassa. (Viitala 1993, 3.)

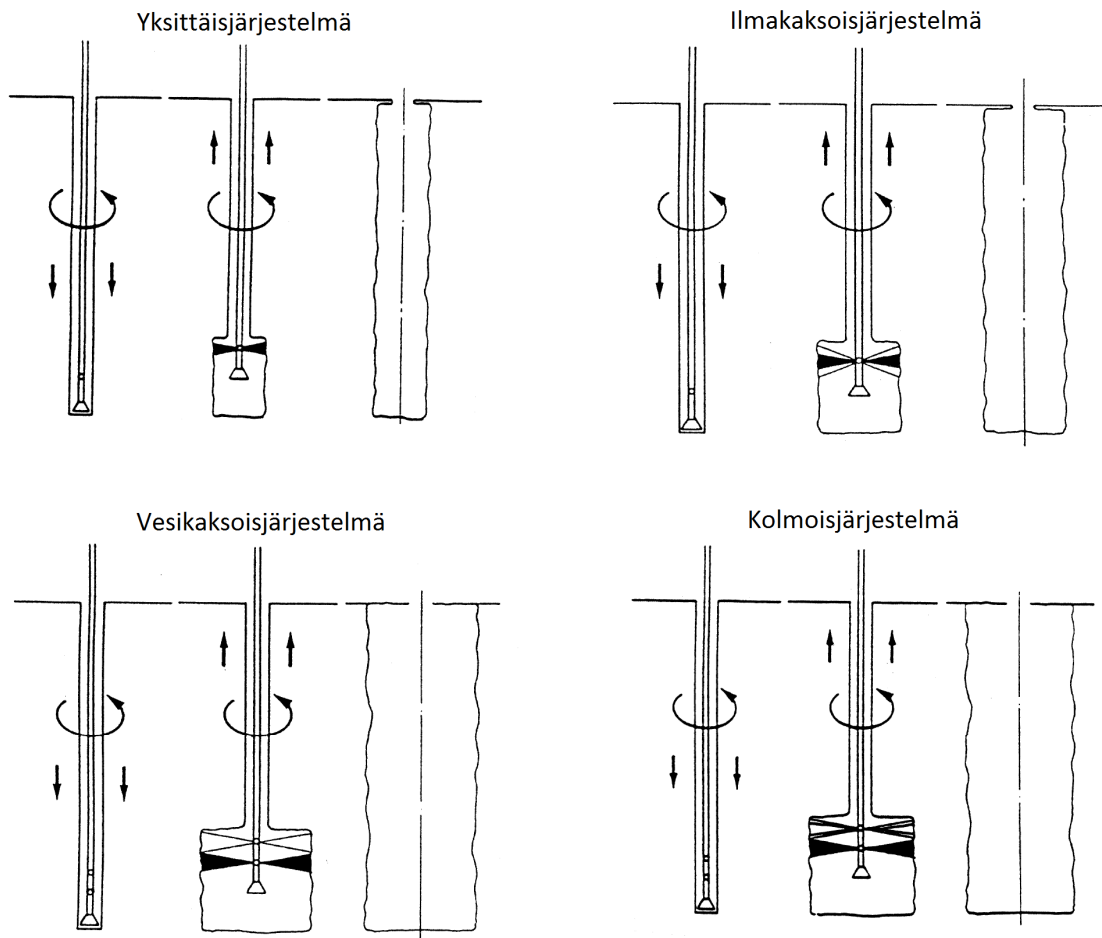
Seuraavaksi tankoa pyöritetään ja nostetaan samaan aikaan, kun korkeanopeuksinen suihku leikkaa ympäröivää maata ja sementtisuspensio sekoittuu maa-ainekseen. Ylimääräinen liete purkautuu reikää pitkin ylöspäin. Suihkutus lopetetaan haluttuun syvyyteen siten, että ylimmän suuttimen ja maanpinnan välillä on riittävä etäisyys ehkäisemään paikallista hydraulista murtumista. Lopetussyvyys voi vaihdella suihkutuskulmasta riippuen 0,5 metristä 2,0 metriin. Tuoreen pilarin voidaan katsoa olevan nestemäisessä tilassa eli sillä ei ole käytännöllisesti katsoen lainkaan lujuutta. Kovettuneena suihkuinjektoitu pilari on matalalujuuksista betonia, jonka lujuus vaihtelee maalajin ja suihkutusparametrien valinnan mukaan ja sitä voidaan pitää raudoittamattomana betonikappaleena. Mikäli raudoitusta tarvitaan, se voidaan asentaa tuoreeseen suihkuinjektoituun materiaaliin suihkuinjektointin aikana tai välittömästi sen lopettamisen jälkeen. Raudoite voidaan myös vaihtoehtoisesti asentaa rakenneosaan kovettumisen jälkeen porattuun reikään. (Viitala 1993, 3–4, SFS-EN 12716:2001, 19.) Raudoituksena voidaan käyttää esimerkiksi yksittäistä harjaterästä, joka syötetään tuoreeseen pilariin porareian läpi.

Suihkuinjektointi voidaan suorittaa neljällä eri menetelmällä riippuen maalajista ja injektointin tarkoituksesta:

- Yksittäisjärjestelmässä vesisementtiseos suihkutetaan suoraan maa-aineksen sekaan
- Ilmakaksoisjärjestelmässä maaperä injektoidaan suspensiota ympäröivän ilmasuihkun avulla
- Vesikaksoisjärjestelmässä maa-aines esileikataan ylempänä injektointijohteessa sijaitsevan erillisen vesisuihkun avulla ennen vesisementtiseoksen suihkutusta
- Kolmoisjärjestelmässä poravarressa on erillinen maa-ainesta leikkaava ilma- ja vesisuihku vesisementtisuuttimen yläpuolella. (Hayward Baker 2004, SFS-EN 12716:2001, 5.)

Yksittäis- ja kaksoisjärjestelmät sopivat parhaiten kitkamaille. Kolmoisjärjestelmällä voidaan valmistaa korkealaatuisempia suihkuinjektointielementtejä ja se sopii

paremmin hienorakeisille koheesiomaille. (Drooff, Furth & Scarborough 1995, 3.) Eri järjestelmien toimintaperiaatteet esitetään kuvassa 2.



Kuva 2: Neljä tyypillisintä suihkuinjektointimenetelmää (SFS-EN 12716:2001, 8–9).

Perinteisin menetelmin valmistetun suihkuinjektoidun pilarin halkaisija on maalajista ja injektointimenetelmästä riippuen n. 0,4–2,5 metriä (Burke 2004, 882). Lämpimittaan vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat valittu suihkutuksen menetelmä, maalaji, suihkutuksen suunta maakerroksessa, suihkutuspaine ja -määrä sekä sideaineen viskositeetti. Esileikkaus vedellä tai sementillä suurentaa läpimittaa. (Viitala 1993, 15.) Suihkuinjektoidun materiaalin lujuus riippuu valitusta suihkuinjektointijärjestelmästä, käytetyistä parametreista, maa-aineksen tyypistä sekä sen heterogeenisyydestä (SFS-EN 12716:2001, 15). Tyypilliset valmiin elementin puristuslujuudet vaihtelevat välillä 5–20 MPa maalajista riippuen (Burke 2009, 52).

Suihkuinjektointia voidaan soveltaa sekä tilapäisissä että pysyvissä rakenteissa, kuten:

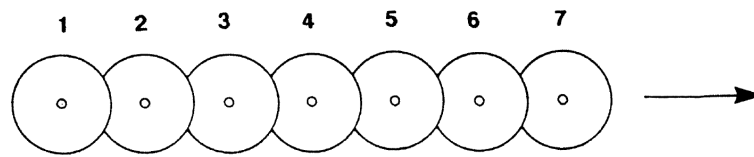
- pystytettävien rakenteiden perustukset
- aiemmin rakennettujen perustusten vahvistus
- heikosti vettäläpäisevien patoseinien muodostus
- myötäävien ja tukevien rakenteiden muodostus
- muiden geoteknisten töiden täydentäminen
- maa-aineksen lujittaminen. (SFS-EN 12716:2001, 13.)

Pilareita limittämällä voidaan valmistaa erilaisia vesitiiviitä betoniseinämiä. Mikäli porakankea ei pyöritetä ylösnoston aikana, voidaan valmistaa suihkuinjektoituja paneeleja. (SFS-EN 12716:2001, 4, 16.) Suihkuinjektointia voidaan suorittaa myös vaakatasossa. Vaakainjektointeja on suoritettu laajasti ulkomailla tunneliprojekteissa. Menetelmää on käytetty myös Suomessa esimerkiksi vanhojen paaluhatturakenteille perustettujen ratapenkereiden korjaamisessa. (Ranin 2009, 60–73.) Harvinaisemmilla menetelmillä voidaan valmistaa tavallista suurempia ja parempilaatuisia suihkuinjektointipilareita: SuperJet-menetelmällä voidaan saavuttaa jopa 5 metrin pilarihalkaisijoita, ja X-Jet -menetelmällä voidaan saavuttaa muodoltaan ja halkaisijaltaan hallitumpia suihkuinjektointielementtejä. (Burke 2004, 877.)

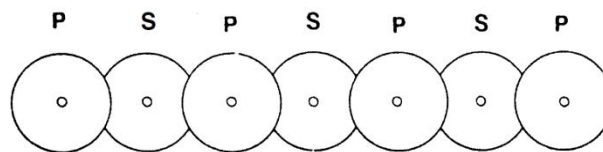
Seinän valmistamisessa voidaan noudattaa kahta eri työjärjestystä kuvien 3 ja 4 mukaisesti. Tuore-tuore -työjärjestyksessä suihkuinjektoidut elementit rakennetaan perätysten odottamatta limittyvien elementtien injektointiaineen kovettumista. Primaari-sekundaari -työjärjestystä noudatettaessa on odotettava, että ennalta määritelty kovettumisaika on kulunut tai aiemmin rakennetut viereiset elementit ovat saavuttaneet ennalta määritetyn lujuuden ennen limittyvän elementin valmistusta. (SFS-EN 12716:2001, 6.)

Suihkuinjektointimenetelmällä on useita etuja. Suihkutus aiheuttaa vain vähän tärinää ympäröivään maaperään ja rakenteisiin. Injektointi on toteutettavissa ahtaissa paikoissa, koska itse suihkutukseen käytettävä laitteisto on pieni ja erillään sekoitusasemasta. Menetelmällä voidaan suihkuttaa esteiden ja rakenteiden ohi esiporattujen reikien avulla. Suihkuinjektointiparametreja muuttamalla voidaan vaikuttaa pilareiden muotoon ja ominaisuuksiin suihkutustyön aikana sekä sovittaa

menetelmä erityyppisille maalajeille. Lisäksi suihkuinjektointi on sopivaa sideainetta käytettäessä pysyvä maanvahvistuskeino. (Ranin 2009, 47.)



Kuva 3: Tuore-tuore -työjärjestys (SFS-EN 12716:2001, 10).



Kuva 4: Primaari-sekundaari -työjärjestys (SFS-EN 12716:2001, 10).

Menetelmän haittoja ovat ylijäämälietteen muodostuminen, soramaan murtuminen väärin valitun sideainesuspension takia pystysuuntaisessa suihkuinjektointissa sekä poraustarkkuuden heikentyminen pitkissä suihkuinjektointirakenteissa (Ranin 2009, 47). Lisäksi ongelmaksi voi muodostua ympäröivän maaperän ja rakenteiden nouseminen. Suomessa nousu voi johtua lähinnä kahdesta eri seikasta: maaperään muodostuvista ylipaineisista tiloista suihkuinjektointilietteen kulkeutuessa ympäröiviin maakerrokseen sekä sementin hydrataatioprosessissa syntyvästä ettringiittimineraalista johtuvasta paisumisesta. (Riikonen 2012, 19.) Ettringiitistä johtuva paisuminen vaikuttaa pääasiassa suihkutettavaan pilariin ja sen kannattelemiin rakenteisiin, kun taas porareian tukkeutumisen seurauksena karkaava poraliete voi vaikuttaa laajemmalla alueella (Teikari 2013). Lisäksi rakenteiden ulkopuoliset salaojat ja viemäriinlinjat saattavat tukkeutua ylijäämälietteen vaikutuksesta, jolloin ne joudutaan uusimaan injektointityön päätteeksi (Enne 2011, 16). Perinteiset suihkuinjektointimenetelmät soveltuvat huonosti alueille, joissa on kova pohjaveden virtaus (Collins 2011, 54). Virtauksen aiheuttamia ongelmia voidaan välttää käyttämällä rapid-sementtiä tai erittäin vaikeissa olosuhteissa orgaanisia kovettimia (Viitala 1993, 41).

Menetelmä sai alkunsa Japanissa 1960-luvun puolivälissä. Kemiallinen injektointi oli jo tuolloin laajasti käytössä, mutta kyseisen menetelmän ongelmiksi todettiin

injektoitujen elementtien epäsäännöllinen muoto ja riittämätön lujuus. Suihkuinjektointimenetelmän ajatus kehittyi hydraulisessa louhinnassa käytettyjen vesisuihkujen pohjalta, ja kahteen eri menetelmään perustuneet ensimmäiset suihkuinjektioinnit suoritettiin 1970-luvun alkupuolella. Toinen menetelmästä muistutti yksittäisjärjestelmää, jossa suutin sijaitsi porakruunun kärjessä. Toinen menetelmästä oli periaatteeltaan lähellä nykyistä kolmoisjärjestelmää, jossa esihuuhtelu suoritettiin vesi-ilmasuihkulla ennen suspension syöttämistä. Molemmissa tapauksissa pilari syntyi suihkuinjektiointijohdetta nostamalla ja pyörittämällä. (Choi 2005, 2–3.)

Suihkuinjektointimenetelmä sai nopeasti hyväksynnän Japanissa 1970-luvulla ja levisi muualle maailmaan seuraavina vuosikymmeninä. Ensimmäisinä menetelmän käyttö keskittyi Saksaan, Italiaan, Ranskaan, Singaporeen ja Brasiliaan. Yhdysvalloissa menetelmä otettiin käyttöön vuoden 1987 jälkeen. (Choi 2005, 3.) Suomessa suihkuinjektointi on yleistynyt 2000-luvulla.

2.2. Suihkuinjektointilaitteisto

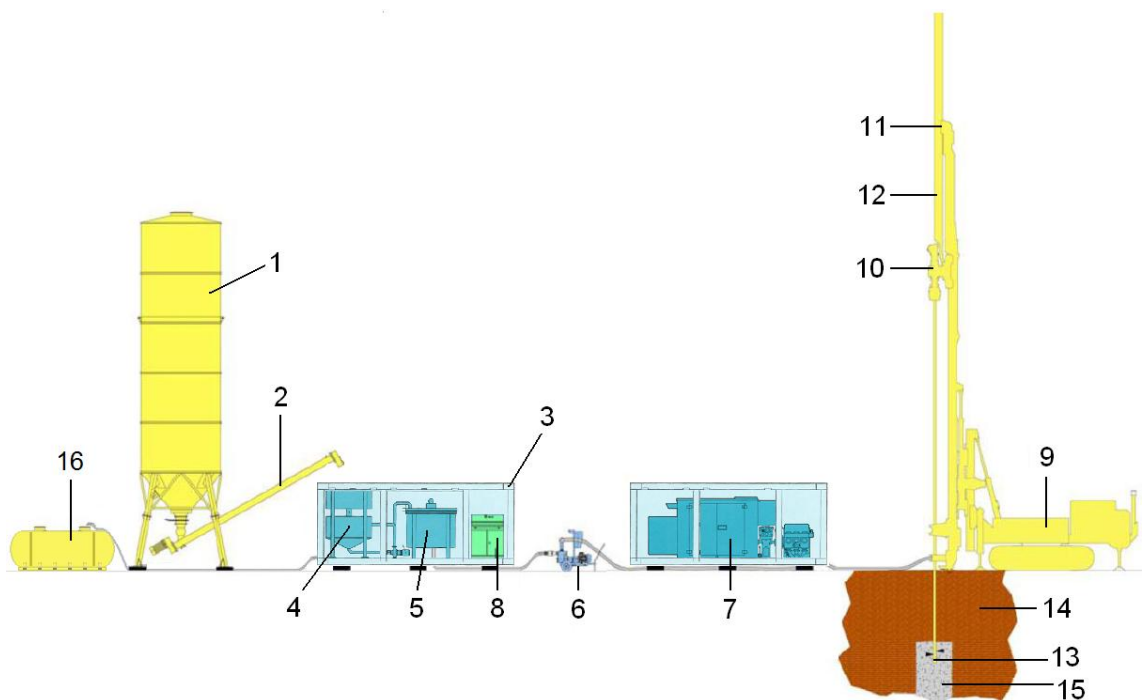
Suihkuinjektointilaitteisto voidaan jakaa kahteen osaan: kiinteään suihkuinjektiointiasemaan, jossa vesisementtisuspensio valmistetaan sekä liikkuvaan poraus- ja suihkutuskalustoon, joka suorittaa injektioinnin (Choi 2005, 38). Tyypillisesti sekä poraaminen että suihkuinjektointi tehdään samalla laitteistolla, jonka erikoisvalmisteiset poratangot ja -kruunu mahdollistavat molempien toimenpiteiden suorittamisen (Riikonen 2012, 3). Sekoitus- ja pumppuasema vaatii tyypillisesti tilaa n. 150–200 neliometriä (Enne 2011, 20).

Suihkuinjektointilaitteisto koostuu tavallisesti kokonaisuudessaan seuraavista osista:

- liikkuva poraus-/suihkuinjektiointikalusto, johon on asennettu suihkuinjektiointijohde, porakruunu ja laitteet, jotka pystyvät tunkemaan suihkuinjektiointijohdetta ennalta määritellyllä pyörimis- ja siirtymänopeudella
- sekoitus- ja pumppuasema, joka syöttää suihkuinjektiointinestettä (tai - nesteitä)
- korkeapainejohtimet, jotka liittävät suihkuinjektiointipumpun laitteistoon

- laitteet, joiden avulla seurataan paineita, nesteiden virtausnopeuksia ja tilavuuksia, pyörimis- ja ulosvetonopeutta sekä syvyyttä. (SFS-EN 12716:2001, 17.)

Yksittäisjärjestelmässä suihkuinjektioinnin sekoitus- ja injektointiasema käsittää pääasiassa sementin ja muiden materiaalien varaston, kolloidisekoittimen, sekoitinsäiliöt sekä korkeapaineisen injektointiainepumpun. Ilmakaksoisjärjestelmä sisältää myös ilmakompressorin. Vesikaksoisjärjestelmään sisältyy yksittäisjärjestelmän laitteiden lisäksi korkeapaineinen vesipumppu ja injektointiainepumppu. Kolmoisjärjestelmä käsittää kaikki edellä mainitut laitteet. (SFS-EN 12716:2001, 17–18.) Esileikkauksessa, sementtiseoksen valmistamisessa sekä kaluston ja sekoitusaseman puhdistamisessa käytettävä vesi varastoidaan tyypillisesti erilliseen vesisäiliöön. Tällöin voidaan varmistua sekoitusaseman riittävästä ja tasaisesta vedensaannista. Vesi syötetään säiliöstä sekoitusasemalle uppopumppujen avulla. Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen yksittäisjärjestelmässä käytetty kalustokokonaisuus.



Kuva 5: Esimerkki suihkuinjektointilaitteistosta: 1) sementtisiilo, 2) ruvikuljetin, 3) sekoitusasema, 4) sekoitin, 5) välisäiliö, 6) lisäpumppu, 7) injektointipumppu, 8) hallintapaneeli, 9) suihkuinjektointivaunu, 10) pyöritinlaitteisto, 11) pyörivä injektointiliitin, 12) suihkuinjektointijohde, 13) porakruunu ja suuttimet, 14) maaperä, 15) suihkuinjektoitu pilari, 16) vesisäiliö. (Riikonen 2012, 4, Geoinvest 2013.)

YIT Rakennus Oy on uusinnut suihkuinjektointikalustoaan vuonna 2008. Uuteen, italialaisyritys Metaxin valmistamaan kalustoon kuuluvat korkeapainepumppu, sekoitusasema, välisekoitin, kuljetusruuvi ja syöttöpumppu. Itse suihkutukset suoritetaan käytettävissä olevasta tilasta riippuen joko suurella, 43-tonnisella poravaunulla tai pienillä, noin 2-tonnisilla kellariporavaunuilla. (Mitrofanov 2009, 12–33.)

2.3. Suihkuinjektointiparametrit

Suihkuinjektoidun pilarin ominaisuudet riippuvat maaperästä ja siinä olevista epäpuhtauksista, pohjavedestä, sideaineesta, laitteistosta ja työn suoritustavasta. Näiden perusteella suunnitellaan injektointityössä käytettävät parametrit. Parametreilla tarkoitetaan suihkuinjektointin yhteydessä erilaisia säädeltäviä tekijöitä, jotka oikein valitsemalla pyritään saavuttamaan suunnittelussa määritetyt vähimmäisarvot pilareiden lujuudelle ja läpimitalle. Uudessa kohteessa parametrien soveltuvuus tarkistetaan tekemällä koepilareita ja tutkimalla niiden perusteella haluttujen ominaisuuksien riittävyys. Suihkuinjektointielementin valmistuksessa käytettävien erilaisten säädeltävien parametrien määrä on huomattava, ja lopputuotteen laadun arvioimiseksi oikeat suihkuinjektointiparametrit voidaan valita vain kokemukseen perustuen. Kokeneimmatkin suihkuinjektointiurakoitsijat voivat ainoastaan likimääräisesti ennustaa suihkuinjektointielementin muodon ja lujuuden tietyillä menetelmillä, kalustolla ja parametreilla maanalaisissa olosuhteissa. (Burke 2009, 50, Havinen 2003, 15.) Taulukossa 1 on esitetty suihkuinjektointinissa huomioitavia muuttujia.

Suomalaisen standardin mukaan suihkuinjektointiparametrit määritellään seuraavasti:

- nesteen (tai nesteiden) paine suihkuinjektointijohteessa
- nesteen (tai nesteiden) virtausnopeus suihkuinjektointijohteessa
- injektointiaineen koostumus
- suihkuinjektointijohteen pyöritysnopeus
- suihkuinjektointijohteen ulosveto- ja sisäänpanonopeus. (SFS-EN 12716:2001, 5–6.)

Taulukko 1: Eri muuttujat suihkuinjektointielementin valmistamisessa (Burke 2009, 50).

Eri muuttujat suihkuinjektointielementin valmistamisessa	
Suihkuinjektointimenetelmä	Yksittäisjärjestelmä (S), Kaksoisjärjestelmä (D), Kolmoisjärjestelmä (T), Muu
Komponentit	Tartuntaleuat, porakanget, monitori (porakruunu)
Monitori (porakruunu):	
Kaikki järjestelmät	Sementtisuuttimien määrä
Kaikki järjestelmät	Sementtisuuttimien koko
Kaikki järjestelmät	Sementtisuuttimien tyyppi
Kaksois- ja kolmoisjärjestelmät	Ilmasuuttimien määrä
Kaksois- ja kolmoisjärjestelmät	Ilmasuuttimien koko
Kolmoisjärjestelmät	Täyttösuuttimien määrä
Kolmoisjärjestelmät	Täyttösuuttimien koko
Suihkutettava suspensio	Määrä ja nopeus (syöttöpaine) Tiheyteen perustuva suspension paino
Suihkutettava ilma (D & T -järjestelmät)	Määrä ja nopeus (syöttöpaine)
Täyttöseos (T-järjestelmä)	Määrä ja nopeus (syöttöpaine) Tiheyteen perustuva suspension paino
Menettelytavat	Leikkausvoima maahan tunkeutumisen aikana Leikkausvoima ylösnoston aikana Esileikkaus ennen injektointia Asteittainen tai jatkuva ylösnostonopeus Asteittaisen noston korkeus, aikaväli ja pyöritysnopeus
Maanalaiset olosuhteet	Kerroksellisuus Pohjavesi Laadunvaihtelut Lujuus ja häiriintyminen Plastisuus (juoksu- ja kieritysraja, kosteuspitoisuus)
Paluuliete	Porareian kaulukselta maanpinnalle nousevien nesteiden ja maa-ainesten yhdistelmä suihkuinjektointielementin laatimisen yhteydessä (tilavuuden tulisi olla määrältään yhtä suuri kuin maahan injektoitujen nesteiden yhteenlaskettu tilavuus)

Taulukossa 2 on esitetty suihkuinjektointiparametrin tyypilliset vaihteluvälit eri järjestelmillä.

Taulukko 2: Suihkuinjektointiparametrien vaihteluvälit (SFS-EN 12716:2001, 26).

Suihkuinjektointiparametrit	Yksittäisjärjestelmä	Ilmakaksoisjärjestelmä	Vesikaksoisjärjestelmä	Kolmoisjärjestelmä
Injektointiaineen paine (MPa)	30...50	30...50	> 2	> 2
Injektointiaineen virtausnopeus (l/min)	50...450	50...450	50...200	50...200
Vedenpaine (MPa)	-	-	30...60	30...60
Veden virtausnopeus (l/min)	-	-	50...150	50...150
Ilman paine (MPa)	-	0,2...1,7	-	0,2...1,7
Ilman virtausnopeus (m ³ /min)	-	3...12	-	3...12

Yksittäisjärjestelmissä ja ilmakaksoisjärjestelmissä injektointiaineen paineen vaihteluväli on yleensä 30–50 MPa. Erityisissä tapauksissa on käytetty alempia rajoja paineeseen 10 MPa saakka, esimerkiksi jos kyseessä ovat läpimitaltaan pienet suihkuinjektoidut pilarit erittäin löyhässä maassa. Uusimmilla kehittyneillä pumppauslaitteilla hajotusnesteelle on mahdollista saavuttaa jopa 70 MPa paine tai virtausnopeus 650 l/min. (SFS-EN 12716:2001, 26.)

2.4. Suihkuinjektoinnin laadunvalvonta

Laadunvalvontatoimenpiteillä varmistetaan, että suihkuinjektointiparametrit on valittu oikein ja että tavoitelujuudet saavutetaan riittävällä varmuudella.

Ellei toisin ole määritelty, materiaaliominaisuuksien tulee olla eurooppalaisten standardien mukaisia. Suihkuinjektoinnissa käytettävien tuotteiden kelpoisuus osoitetaan ensisijaisesti CE-merkinnällä. Sideaineena käytetään yleensä vedestä ja sementistä koostuvia seoksia. Seoksissa käytetään tyypillisesti standardisoitua matalan lämmöntuoton sementtiä ja lisäaineena voidaan käyttää bentoniittia. Sementin lisäksi voidaan käyttää myös muita hydraulisia sideaineita. Seokseen voidaan lisätä vettä vähentäviä, stabiiliutta parantavia, notkeuttavia, vedenpitäväksi tekeviä tai huuhtoutumista estäviä lisäaineita. Vedeneristysrakenteisiin voidaan käyttää reagoidessaan paisumattomia seosaineita, kuten jauhettua kalkkikiveä. (SFS-EN 12716:2001, 12, InfraRYL 2006, 14142.1.)

Ympäristöä pilaavien sideaineiden ja lisäaineiden käyttö on kielletty. Sideaineen raekoon on oltava sellainen, että tuotanto-olosuhteisiin nähden riittävän stabiilin suihkutussuspension sekoittaminen on mahdollista. Sideaineessa esiintyvien suurimpien jakeiden tulee mahtua esteettä kulkemaan suihkutussuuttimien läpi. Vesisementtiseoksissa vesisementtisuhteen tulisi painon perusteella olla välillä 0,5...1,5. Juomakelpoinen vesi on yleensä hyväksyttävää suihkuinjektointiseosten valmistamista varten. (SFS-EN 12716:2001, 12, InfraRYL 2006, 14142.1.)

Suihkuinjektoituun rakenteeseen ei saa hydrataatioprosessin aikana syntyä haitallisia määriä paisuvia reaktiotuotteita. Paisuvien reaktiotuotteiden määrästä huolehditaan hallitsemalla suihkuinjektoidun elementin hydrataatiolämpötila. Sideainesuspension

suihkutuksen jälkeen lämpötila suihkuinjektoidussa pilarissa ei saa nousta yli + 70 °C:n. (InfraRYL 2006, 14142.1.)

Valvontaa varten tulisi seurata suihkuinjektoitujen rakenneosien muotoa ja tarvittaessa suihkuinjektoidun materiaalin lujuutta, muovautuvuutta, läpäisevyyttä tai tiheyttä. Yleensä on epäkäytännöllistä tai mahdotonta mitata mittoja ja materiaaliominaisuuksia suoraan tilastollisesti merkittävästä määrästä suihkuinjektoituja pilareita, joten laadunvalvonnan tulee koostua vähintään suihkuinjektointiparametrien raportoinnista ja ylijäämälietteen havainnoinnista kaikkien rakenneosien osalta. Oletuksena on, että vertailukelpoisissa maaperäolosuhteissa samat suihkuinjektointiparametrit tuottavat samat rakenneosan mitat, ominaisuudet ja ylijäämälietteen. Jos tehdään alustavia kokeita ja kaivaukset ovat mahdollisia, tulisi suihkuinjektoitujen rakenneosien muoto ja mekaaniset ominaisuudet arvioida paljastetun suihkuinjektoidun rakenneosan silmämääräisellä tarkastuksella ja porausnäytteillä tai kaivamalla saatujen näytteiden laboratoriokokeilla. (SFS-EN 12716:2001, 20.)

SFS-standardin mukaan suihkuinjektointityön toteutuksesta tulee koota dokumentointi vastaisuuden varalle. Dokumentoinnin tulee kattaa kunkin rakenneosan kohdalla:

- suihkuinjektointiparametrit
- ylijäämälietettä koskevat huomautukset
- odottamattomat piirteet
- toteutuspäivämäärä ja -kellonaika. (SFS-EN 12716:2001, 23.)

Suihkuinjektoitujen pilareiden laadunvalvontaan on kehitetty myös rakennetta rikkomattomia menetelmiä, joita voidaan suorittaa ilman pilareiden esiin kaivua. Lupaavimpia tuloksia on saatu sähköisen tomografiakuvauksen avulla. Menetelmän tarkkuudessa ja luotettavuudessa eri maalajien alueella on kuitenkin vielä kehitettävää. (Havinen 2003, 82–83.)

Suihkuinjektointistandardissa vaadittavat mittaukset sideainesuspensiolle ovat seuraavat:

- Alustavat kokeet: Tiheys, tihkuminen, Marshin viskositeetti, sitoutumisaika, yksiakksiaaliset puristuskokeet
- Töiden aikana suoritettavat kokeet: Tiheys (vähintään kahdesti vuorossa), Marshin viskositeetti (päivittäin), tihkuminen (päivittäin). (SFS-EN 12716:2001, 21.)

Suihkuinjektoinnin aikana tulee havainnoida silmämääräisesti ylijäämälietteen virtausta ja ominaisuuksia reiän kauluksella. Maanpinnan alapuolisen eroosioprosessin hallitsemiseksi ja ylläpitämiseksi paluulietteen virtauksen tulee olla jatkuvaa. Mikäli näin ei ole, syntyy hydraulinen murtuma, joka johtaa maanpinnan paikalliseen nousuun ja eroosioprosessin hallinnan menettämiseen. Lisävalvontaa voidaan tehdä mittaamalla määritellyjä ylijäämälietteen fysikaalisia tai kemiallisia ominaisuuksia. Jos paluulietteen käyttäytyminen ei ole odotetun kaltaista, suihkuinjektointiparametrit tai -menetelmä tulisi tarkistaa. Ylijäämälietteen väheneminen tulee tutkia ja käsitellä välittömästi, sillä se saattaa johtua suihkutusporeiän kehän tukkeutumisesta. Paluuvirtauksen tyrehtyessä porausreikä huuhdellaan ja tarpeen mukaan vähennetään suihkutuspainetta. Suihkutustyön aikana seurataan jatkuvasti mahdollisten lähirakenteiden liikkeitä. (InfraRYL 2006, 14142.3, SFS-EN 12716:2001, 19, Burke 2009, 50.)

Mahdollisia syitä paluuvirtauslietteen tyrehtymiseen ovat porareian ahtaus (jonka voivat aiheuttaa perustuksen läpäisevän esireian liian pieni halkaisija, pehmeä ja pusertuva savi sekä porareian tukkeutuminen ympäröivän soran pettäessä), paluuilmavirran häviäminen (jonka aiheuttajia ovat mm. avoimet huokoiset sorakerrokset, erittäin pehmeät savet tai kuituinen turve) sekä koheesiomaan leikkautuminen (plastinen maa-aines leikkautuu lohkoittain tukkien paluuvirtausreitit tai paluulietteen tiheys on niin suuri, että paluuilmavirta etsii vastukseltaan pienemmän poistumisreitit). (Burke 2004, 881.)

SFS-standardin mukaan (SFS-EN 12716:2001, 21) ylijäämälietteelle tulee suorittaa seuraavat mittaukset:

- Ylijäämälietteen virtausta ja ominaisuuksia tulee havainnoida silmämääräisesti, ja niiden kuvaus tulee dokumentoida
- Ylijäämälietteen tiheys tulisi mitata ja dokumentoida säännöllisesti
- Ylijäämälietteestä tulisi ottaa edustavat näytteet, ja niille tulisi tehdä puristuskokeet.

Ylijäämälietteen käsittelymenettelyjen tulee olla sellaisia, että ne minimoivat haitalliset ympäristövaikutukset. Menettelyihin sisältyy lietteen kerääminen porareialtä, tilapäinen varastointi rakennuspaikalla, mahdollinen käsittely sekä loppusijoitus. (SFS-EN 12716:2001, 24.) Suihkuinjektioinnissa syntyvä liete kerätään työpisteen läheisyydessä lietealtaisiin, jotka ovat riittävät käsittely- ja kuljetuskapasiteettiin nähden (InfraRYL 2006, 14142.3).

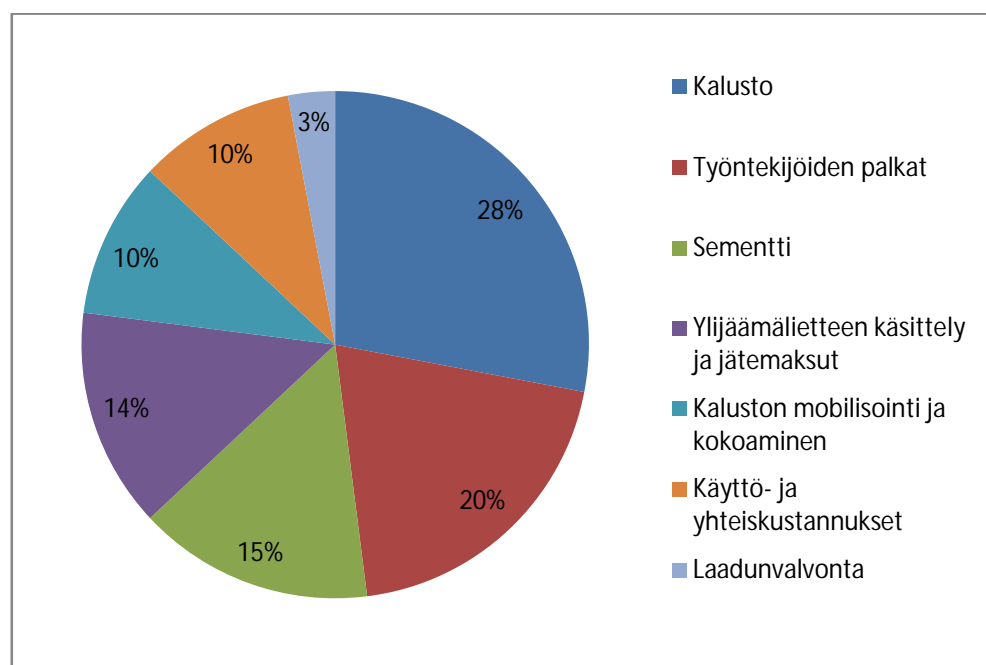
2.5. Nykyinen tilanne ja haasteet

YIT Rakennus Oy käyttää suihkuinjektioinneissa yksittäisjärjestelmää. Suuttimet sijaitsevat porakruunussa samassa tasossa noin 20 asteen kulmassa. Tämä mahdollistaa sen, että porakruunu saadaan tarvittaessa syötettyä haluttuun syvyyteen ilman poraamista pelkän vesisuihkun avulla. Alaspäin tunkeuduttaessa voidaan samalla suorittaa esisuihkutus vedellä, mikäli se on työjärjestyksen mukaan mahdollista. Tavoitesyvyyydessä vesisuihku muutetaan vesisementtisuihkuksi ja pilari muodostetaan normaaliin tapaan nostamalla ja pyörittämällä injektointijohdetta.

Syntyvä liete joko ohjataan työmaalla ojituksen avulla altaisiin tai pumpataan korkealaitaisiin, siirreltäviin vaihtolavasäiliöihin. Työkohteesta riippuen (esimerkiksi kellarikohteet) liete saatetaan imeä suoraan porauspaikalta imuautoon ja kuljettaa kaatopaikalle. Työmaalla sitouttaessa ongelmaksi muodostuvat lietteen verrattain hidas sitoutuminen ja tilanpuute. Hienoainesta sisältävän veden osuus poisajettavasta lietteestä on huomattava, arviolta jopa 60–70 prosenttia kokonaistilavuudesta. Vesipitoisuutta kasvattaa porauskaluston huuhtelu suihkutuksen yhteydessä sekä lietteen laimentaminen vedellä juoksevuuden parantamiseksi. Sitouttamisaltaan

pinnalle erottuvaa vettä voidaan jossain määrin puhdistaa siirrettävien sakka-altaiden avulla, mikä on kuitenkin hidaskäyttöinen menetelmä pienen kapasiteetin vuoksi. Aikanaan kokoamisaltaan pohjalle kokonaan tai osittain sitoutunut betoni rikotetaan, kuormataan ja kuljetetaan joko jatkokäsittelyä varten tai kaatopaikalle. Altaan koko, sijainti ja sitoutumiseen kuluva aika saattavat haitata muita alueella käynnissä olevia rakennustöitä. (Teikari 2013.) Mikäli ylijäämälietteen käsittely viivästyy ja liete saavuttaa liikaa lujuutta jätelavan pohjalla, joudutaan jätteen irrottamisessa käyttämään kaivinkoneen kauhaa tai hydraulivasaraa, mikä heikentää nopeasti altaiden kuntoa (Nissi 2013).

Kuvassa 6 on esitetty suihkuinjektoinnin kustannusjakauma. Ylijäämälietteen käsittelykustannukset jätemaksuineen ovat merkittävät, kokonaisuudessaan noin 14 prosenttia suihkuinjektoinnin kokonaiskustannuksista. Osuuden kustannusvaihtelu on viiden prosentin luokkaa riippuen muun muassa lietteen käsittelyprosessista, suihkutuksen menetelmästä, loppusijoituspaikasta ja työmaan sijainnista. Sementin osuus kustannuksista on noin 15 prosenttia. (Riikonen 2012, 23.) Osa maahan suihkutetusta sementistä nousee suihkutustyön aikana lietteen mukana maan pinnalle.



Kuva 6: Suihkuinjektoinnin kustannusjakauma (Riikonen 2012, 23).

YIT Rakennus Oy on suorittanut suihkuinjektoinnin laadunvarmistuksia seuraamalla paluulietteen koostumusta, valamalla siitä edustavia näytteitä sekä poraamalla näytekappaleita valmiista pilareista. Riittävien lujuuksien saavuttaminen perustuu pitkälti työntekijöiden ammattitaitoon ja kykyyn tulkita paluulietteen koostumusta, maaperän käyttäytymistä ja suihkuinjektointilaitteiston antamaa palautetta. Lisäksi varmuutta haetaan käyttämällä suuria sementtimääriä. (Teikari 2013.) Eri maalajeissa valmistettujen suihkuinjektointipilareiden tavanomaiset sementtipitoisuudet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3: Suihkuinjektoidun elementin keskimääräinen sementtipitoisuus (Burke 2004, 883).

Maalaji	Suihkuinjektoidun elementin sementtipitoisuus (kg/m ³)
Hiekka	150–250
Siltti ja silttinen hiekka	200–275
Savi	250–350
Orgaaninen siltti ja turve	300–400

Aiemmissä tutkimuksissa on noussut esille ajatuksia suihkuinjektointilietteen jatkokäytölle. Vaihtoehtoiksi on esitetty muun muassa sitoutuneen lietteen murskaamista ja käyttöä uusiomateriaalina sekä lietteen käyttöä suoraan työmaa-alueella kohteissa, joissa voidaan käyttää matalalujuuksista betonia (Riikonen 2012, 27). Alla on listattu lietteen käsittelyn ja loppusijoituksen kehittämiskohteita ja menetelmiä:

- nestemäisen paluulietteen vesipitoisuuden pienentäminen ennen poisajoa
- osittain tai kokonaan sitoutuneen paluulietteen vesipitoisuuden pienentäminen ennen poisajoa
- nestemäisen paluulietteen koostumuksen käsittely
 - o käytettäväksi uudestaan suihkuinjektointielementin materiaalina
 - o käytettäväksi uudestaan suihkuinjektointielementin esileikkausvaiheessa
 - o sitoutuneen lietteen materiaaliominaisuuksien parantamiseksi ja jatkojalostuksen kannattavuuden lisäämiseksi

- paluulietteen sementtipitoisuuden vähentäminen
- sitoutuneen paluulietteen murskaaminen omaperustaisena toimintana sekä käyttö uusiomateriaalina tai ympäristölupaan perustuva betonijätteen uudelleensijoitus esirakentamiskohteessa
- lietteen käyttö työmaa-alueella matalalujuksisen betonin valmistukseen.

3. Paluulietteen hyödyntäminen betonimurskeen valmistamisessa

3.1. Betoroc-betonimurske

Rudus Oy valmistaa betonijätteestä murskaamalla, seulomalla tai muulla mekaanisella käsittelyllä kivipohjaisista materiaaleista valmistettuja tuotteistettuja Betoroc-betonimurskeita. Betoroc-murskeiden pääasialliset käyttökohteet ovat katu-, tie- ja kenttärakenteiden jakavat ja kantavat kerrokset sekä esimerkiksi putkikaivantojen täytöt. (Rudus Oy 2008.) Taulukossa 4 on esitetty eri tuotteiden ominaisuuksia.

Taulukko 4: Betoroc-murskeiden perusominaisuuksia (Rudus 2008, 4).

	RAKEISUUS [MM]	LUJITTUMINEN	ROUTIVUUS	E-MODUULI* [MPA]	PÄÄASIALLINEN KÄYTTÖKOHDE
Betoroc M1	0/45	lujittuu*	routimaton*	700	kantava kerros
Betoroc M2	0/45	lujittuu*	routimaton*	500	kantava - / jakava kerros
Betoroc M3	0/45	vaihtelee	routimaton*	280(TieH)/ 300(KT)	jakava kerros
Betoroc M4	vaihtelee	vaihtelee	vaihtelee	-	pengertäyte
Betoroc Hk	0/8...0/12	vaihtelee	vaihtelee	50...70	täyte
Betoroc Sr	0/20... 0/65	vaihtelee	vaihtelee	70...150	jakava kerros / pengertäyte
Betoroc Lo	0/90... 0/150	vaihtelee	routimaton*	150...200	penger

* normaaleissa käyttöolosuhteissa ohjeen mukaisesti rakennettuna sekä ohjeen mukaisessa vesipitoisuudessa ja tiiveydessä

Betoroc-murskeet on valmistettu siten, että ne täyttävät Valtioneuvoston asetuksen 591/2006 vaatimukset ja niitä voidaan käyttää asetuksen mukaisissa maarakentamiskohteissa ilman ympäristölupaa. Betoroc-murskeen käytöstä on kuitenkin tehtävä ilmoitus alueelliselle ympäristökeskukselle. (Rudus Oy 2008.) Rudus Oy:llä on kierrätystoiminnalle ja Betoroc-murskeen valmistukselle viranomaisen hyväksymä laadunhallintajärjestelmä. (Rudus Oy 2013.)

Teknologian tutkimuskeskus VTT on tehnyt Rudus Oy:lle tutkimuksen suihkuinjektointilietteen kaatopaikkakelpoisuudesta vuonna 2000. Tutkimuksen perusteella sitoutunutta lietettä käsitellään betonijätteenä ja siten se kuuluu Valtioneuvoston asetuksen 591/2006 piiriin. Tutkimus toteaa, että liete ei sovellu runkomateriaaliksi kantavissa rakenteissa, mutta sitä voidaan käyttää kaivantojen

täytöissä ja rakenteissa, joilta ei vaadita suurta kantavuutta ja joille sallitaan muodonmuutoksia. (Pykälämäki 2012, 32–33.)

Rudus Oy:n tuotepäällikön mukaan Rudus Oy on ottanut viime vuosina sitoutunutta lietettä vastaan ainakin YIT Rakennus Oy:ltä ja Lemminkäinen Oy:ltä. Kuivunutta suihkuinjektointiliettä on mahdollista murskata ja käyttää Betoroc Sora -tuotteen valmistuksessa. (Pieksamä 2013.) Kyseisessä tuotteessa murskatun tiilen, laastin tai kevytbetonin osuus on enintään 30 % valmiin tuotteen painosta. Tuote soveltuu jakavaan kerrokseen tai pengertäyttöihin. (Pieksamä 2013, Rudus Oy 2008.)

Injektointilietteen vastaanotossa ja hyödyntämisessä on ollut haasteita, minkä vuoksi Rudus Oy:n kanta on varauksellinen lietteen vastaanotolle. Työmaalta tulee usein lietettä kerrallaan huomattavia määriä, mikä aiheuttaa ongelmia varastoinnille. Lisäksi sitoutuneenkin lietteen vesi- ja maa-ainespitoisuus on tavanomaista betonijätettä suurempi, mikä heikentää lopputuotteen laatua. Siten suihkuinjektointiliete ei sovellu ns. 1-laadun Betoroc-murskeiden valmistukseen. Betoroc Soran valmistus puolestaan vaatii jätteiden yhdistelyn vuoksi paljon konetyötä, mikä kasvattaa tuotteen valmistuskustannuksia sekä heikentää sen myyntimääriä ja käsittelytoiminnan kannattavuutta hinnan kohotessa. (Pieksamä 2013.)

3.2. Lainsäädäntö, määräykset ja ohjeet

3.2.1. Nestemäisen jätteen loppusijoitus

Valtioneuvoston päätöksen 1049/1999 mukaan kaatopaikoille ei saa sijoittaa nestemäistä jätettä. Kielto tuli kaikille kaatopaikoille voimaan alkaen 1.1.2002. Päätöksen mukaan ”nestemäisellä jätteellä tarkoitetaan jätevettä ja muuta nestemäisessä muodossa olevaa jätettä, ei kuitenkaan lietettä”. Lietteen tulisi säännöksen mukaan olla suotopuristimella tai muulla tavoin mekaanisesti kuivattua. Vuonna 2003 ympäristöministeriön teettämässä selvityksessä on pyritty määrittelemään tarkemmin, mitä nestemäisellä jätteellä kyseisessä yhteydessä tarkoitetaan. Selvityksessä nestemäiseksi jätteeksi katsotaan jäte-erät, jotka sisältävät kaatopaikkapenkkään sijoitettaessa jätteestä välittömästi pois virtaavaa vettä,

jätevettä tai muuta viskositeetiltaan veden kaltaista jätettä yli 200 litraa. (VNp 861/1997, 2 §, Salonen & Salminen 2003, 3.)

Selvityksen mukaan teollisuudessa syntyvät nestemäiset jätteet ja lietteet voidaan jakaa elintarviketeollisuudessa syntyviin ja muussa teollisuudessa syntyviin nestemäisiin jätteisiin ja lietteisiin. Betoniliete on lueteltu tyypilliseksi kaatopaikalle sijoitettavaksi muussa kuin elintarviketeollisuudessa syntyväksi nestemäiseksi jätteeksi tai lietteeksi. Tällaiset jätteet sisältävät useammin haitta-aineita, kuten liuottimia ja metalleja, minkä katsotaan mahdollisesti olevan niiden kaatopaikalle sijoittamista rajoittava tekijä. (Salonen & Salminen 2003, 10.) Käytännössä injektointilietettä nestemäisenä loppusijoittaneet kaatopaikat ovat joutuneet hankkimaan ELY-keskukselta työmaakohtaisia erikoislupia sen vastaanottamiseen. Menettely vähentää toimijoiden halukkuutta vastaanottaa injektointilietettä nestemäisessä muodossa. (Pykälämäki 2012, 31–32.)

3.2.2. Ympäristölupa

Ympäristönsuojelulakia 4.2.2000/86 ja sen muutosta 253/2010 sovelletaan jätteen käsittelyyn. Ympäristön pilaantumisen vaaraa aiheuttavaan toimintaan on oltava ympäristölupa. Ympäristölupa on lisäksi oltava mm. jätelain soveltamisalaan kuuluvan jätteen laitos- tai ammattimaiseen käsittelyyn. (Ympäristönsuojelulaki 86/2000, 28 §.)

Lakiin on merkitty poikkeukset luvanvaraisuudesta. Ympäristölupaa ei tarvita toimintaan, jonka ympäristönsuojeluvaatimukset on säädetty erikseen ympäristönsuojelulakiin viittaavalla valtioneuvoston asetuksella. Lupaa ei myöskään tarvita koeluonteiseen lyhytaikaiseen toimintaan, jonka tarkoituksena on käsitellä jätettä laitospäisesti tai ammattimaisesti toiminnan vaikutusten tai käyttökelpoisuuden selvittämiseksi. Koeluonteisesta toiminnasta on tehtävä kirjallinen ilmoitus ympäristölupaviranomaiselle viimeistään 30 vuorokautta ennen toiminnan aloittamista. Ympäristölupaa ei myöskään tarvita jätteiden hyödyntämiseen syntypaikalla, jos toimintojen ympäristönsuojeluvaatimuksista on säädetty valtioneuvoston asetuksella jätteiden hyödyntämisestä. (Ympäristönsuojelulaki 86/2000, 30 §.)

3.2.3. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä

Jätelain mukaan (Jätelaki 646/2011, 5 §) jätteellä tarkoitetaan ainetta tai esinettä, jonka sen haltija on poistanut tai aikoo poistaa käytöstä taikka on velvollinen poistamaan käytöstä. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa mahdollistaa tiettyjen jätteiden käytön maarakentamisessa ilman ympäristönsuojelulain mukaista ympäristölupaa. Asetuksiin kuuluviin jätteisiin kuuluu myös betonimurske. Asetuksessa todetaan: "Betonimurskeella tarkoitetaan jätettä, joka on valmistettu puretuista betonirakenteista tai uudisrakentamisen ja betoniteollisuuden betonijätteistä murskaamalla enintään 150 millimetrin kappalekokoon. Murskattu betonijäte saa sisältää enintään 30 painoprosenttia tiilimursketta." (VNa 591/2006, 1 §, 9 §.)

Tällaista betonimursketta voidaan asetuksen mukaan käyttää ammattimaisesti seuraavissa kohteissa:

- yleiset tiet, kadut, pyörätiet ja jalkakäytävät sekä niihin välittömästi liittyvät tienpitoa tai liikennettä varten tarpeelliset alueet, pois lukien meluesteet
- pysäköintialueet
- urheilukentät sekä virkistys- ja urheilualueiden reitit
- ratapihat sekä teollisuus-, jätteenkäsittely- ja lentoliikenteen alueiden varastointikentät ja tiet. (VNa 591/2006, 2 §.)

Jätteen hyödyntämisessä on huolehdittava seuraavista asioista:

- Jätteen haitta-ainepitoisuuksien tulee olla raja-arvojen sisällä
- Eri jätteitä sekoitettaessa haitalliset päästöt eivät lisäänty
- Käytettävää jätettä sisältävän rakenteen paksuus on enintään 150 millimetriä
- Jätteitä ei hyödynnetä pohjavesialueilla tai talousvesikaivojen lähetyvillä
- Jätettä sisältävä rakenne peitetään asfaltilla tai 100 mm paksuisella kerroksella luonnonkiviainesta
- Väliaikainen varastointi ei aiheuta vaaraa ympäristölle
- Jätettä ei varastoida suojaamattomana yli neljää viikkoa tai suojattuna yli kymmentä kuukautta pidempään hyödyntämispaikalla. (VNa 591/2006, 5 §.)

Lisäksi hyödyntämispaikan haltijan on tehtävä toiminnasta ilmoitus elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselle. (VNa 591/2006, 6 §.)

Valtioneuvoston asetuksen mukaan (VNa 591/2006, Jätteen laadunvalvonta) betonijätteen luovuttajalla tulee olla olemassa laadunvalvontajärjestelmä jätteen laadun varmistamiseksi. Lisäksi jätteen laatu tulee selvittää laadunvalvontatutkimuksilla. Laadunvarmistusjärjestelmään tulee sisältyä seuraavat kohdat:

- 1) laadunvalvontatutkimukset
 - a. näytteenottosuunnitelma ja arvio näytteenoton edustavuudesta sekä ohjeet näytteenotosta, näytteiden valmistuksesta ja näytteiden toimittamisesta analysoitaviksi
 - b. tutkimus- ja määrittämissuunnitelmat, seurattavat haitalliset aineet ja muut seurattavat ominaisuudet sekä seurantaohjeet
 - c. tutkittavien haitallisten aineiden raja-arvot
 - d. laatueroavuuksien käsittely ja hyväksyttävät poikkeamat
 - e. näytteenoton ja tutkimusten laadunvarmistus
 - f. laadunvalvonnan seuranta-asiakirjat ja raportointiohje
- 2) vastuhenkilöt ja näiden pätevyys
- 3) ohjeet jätteen vastaanotosta, varastoinnista, käsittelystä ja toimittamisesta hyödyntämispaikkaan
- 4) laadunvarmistusjärjestelmän arviointi- tai auditointisuunnitelma
- 5) tarvittaessa erityiset puhtausvaatimukset, kuten jätteeseen kuulumattoman aineksen osuus
- 6) seuranta ja raportointi
 - a. laadunvalvontapöytäkirja kultakin näytteenotto- ja tutkimuskerralta
 - b. havaitut laatueroavuuksien ja niiden johdosta tehdyt toimenpiteet
 - c. hyödynnettäväksi toimitettavan jätteen määrä ja laatu sekä toimituskohteet.

Perustutkimuksilla osoitetaan jätteen kuuluvan asetuksen soveltamisalaan. Perustutkimuksissa selvitetään vakioiduin analyysi- ja testausmenetelmin ainakin

jätteen koostumus ja haitallisten aineiden liukoisuus. Perustutkimus on suoritettava vähintään viiden vuoden väliajoin. Samalla on tarkistettava ja tarvittaessa uusittava laadunvarmistusjärjestelmä. (VNa 591/2006, Jätteen laadunvalvonta.)

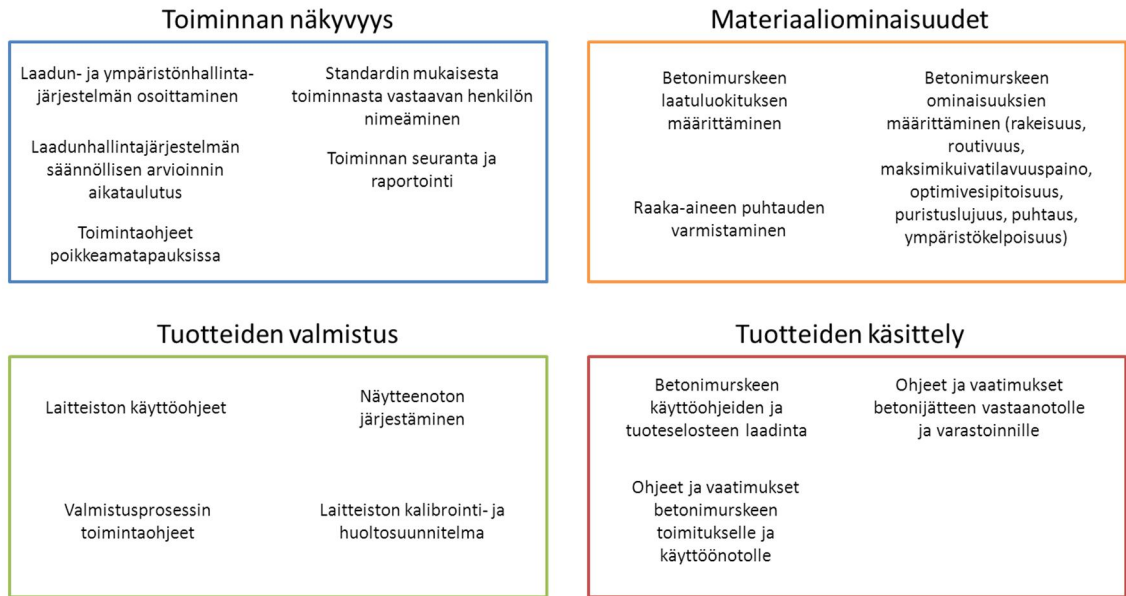
Laadunvalvontatutkimuksin seurataan jätteen laatua riittävän pitkän ajan laadunvarmistusjärjestelmän mukaisesti. Vähimmäisvaatimus on viisi peräkkäistä näytteenottosuunnitelman mukaista tutkimuskertaa. Jos jätteen laatua ei ole seurattu riittävän pitkältä ajalta, voidaan jätteen hyväksyttävyyttä asetuksen mukaiseen käyttöön arvioida jäte-erittäin tehtävien perustutkimusten perusteella. (VNa 591/2006, Jätteen laadunvalvonta.)

3.3. Betonimurskeen laadunhallinta, käyttöohjeet ja rajoitukset käytölle

3.3.1. SFS-standardi

Tuotantotoiminnan jätteistä jalostettujen uusiotuotteiden käyttö edellyttää, että niistä ei aiheudu haittaa ympäristölle tai ihmisen terveydelle. Lisäksi uusiotuotteiden on täytettävä käyttökohteen asettamat tekniset vaatimukset. Laadunhallintajärjestelmä antaa materiaalien jalostajalle mahdollisuuden osoittaa, että materiaalin tekniset ja ympäristöominaisuudet ovat käyttötarkoitukseen riittäviä. Betonimurskeen maarakennuskäytön laadunhallintajärjestelmälle on olemassa standardi, joka on tarkoitettu sovellettavaksi rakennustyömailla ja kiinteillä vastaanottoalueilla maarakennuskäyttöön jalostettavan betonimurskeen kaupallisessa tuotannossa, kaupassa ja käytössä. (SFS 5884:2001, 1–2.)

Betonijätteen jalostusprosessin päävaiheet ovat betonijätteen talteenotto, kuljetukset, jätteen vastaanotto, välivarastointi, betonimurskeen valmistus, murskeen välivarastointi ja toimitus käyttäjille. Jalostajan laadunhallintajärjestelmä kattaa toimintavaiheet jätteen vastaanotosta toimitukseen käyttäjille. Jalostajan on varmistettava, että vastaanotettu raaka-aine on vaatimusten mukainen ja laadittava tuotteelle tuoteseloste sekä suunnittelu- ja työohjeet. Käyttäjä vastaa siitä, että vastaanotettua tuotetta käytetään ohjeiden mukaisesti. (SFS 5884:2001, 3.) Kuvassa 7 on jaoteltu kategorioittain standardin määrittelemät vaatimukset laadunhallinnalle.



Kuva 7: Standardinmukainen betonimurskeen tuotannon laadunhallinta järjesteltynä kategorioittain (SFS 5884:2001, 3–8).

3.3.2. Pohjarakennusohjeet

Maarakenteissa käytettävien kierrätysmateriaalien on teknisiltä ominaisuuksiltaan ja maarakennuskelpoisuudeltaan sovelluttava käyttökohteeseen ja oltava riittävän tasalaatuisia. Käytettäessä kierrätysmateriaaleja kuormitettuihin maarakenteisiin niiden pitkäaikaiskestävyys on testattava sillä rasitusmäärän ja -tason yhdistelmällä, joka maarakenteeseen voi kohdistua sen käyttöaikana. Kierrätysmateriaalien käytöstä ei saa aiheutua haittaa tai vaaraa rakennuksessa oleskeleville henkilöille eikä niiden käyttö saa aiheuttaa rakennuspaikalla tai sen ympäristössä pohjaveden tai maapohjan pilaantumisen vaaraa eikä vaurioita, esimerkiksi korroosiota, niiden kanssa kosketuksiin tuleville rakenteille. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2006, 50–51.)

Kierrätysmateriaaleja voidaan usein käyttää maarakenteissa sellaisenaan, mutta toisinaan niiden käytön edellytyksenä on joko bitumisella tai hydraulisella sideaineella tapahtuva sitominen. Kun käytetään pölyä muodostavia materiaaleja, ne tulee peittää riittävän tiiviillä ja pysyvällä maa-, murske- tai päällystekerroksella. Pääsääntöisesti kierrätysmateriaalien maarakennuskelpoisuuden arviointiin voidaan käyttää samoja kenttä- ja laboratoriotutkimusmenetelmiä kuin maa- ja murskatuille materiaaleillekin. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2006, 51.)

3.3.3. Ohjeet jakavan kerroksen materiaalien käytölle

InfraRYL:n mukaan betonimursketta voidaan käyttää uusiomateriaalina jakavassa kerroksessa. Uusiomateriaalin käyttö edellyttää materiaalikohtaisia ennakkokokeita. Laatuvaatimuksina käytetään soveltuvien osin vastaavia luonnonkiviaineksille annettuja laatuvaatimuksia ja ympäristölupien ehtoja. Lisäksi jakavan kerroksen murskeen on täytettävä sille asetetut rakeisuusvaatimukset. (InfraRYL 2010, 21210.1.1.)

Ohjeet toteavat, että murske voi olla markkinoilla olevaa tuotetta tai esimerkiksi tielinjalta tai muusta tilaajan raaka-aineesta tehtävää mursketta. Tilaajan materiaalista valmistettujen murskeiden on täytettävä samat laatuvaatimukset kuin markkinoilla olevien murskeiden. Työn suorittajan on tutkittava ne samoin kuin markkinoilla olevat murskeet ja esitettävä tulokset tilaajalle. (InfraRYL 2010, 21210.1.1.)

Suomen Kuntaliiton (Eerola ym. 2000, 6) mukaan betonimursketta on teknisesti mahdollista käyttää kaikissa alus- ja päällysrakenteen kerroksissa pengertäytteestä ja suodatinkerroksesta kantavaan kerrokseen saakka. Betonimurskeet jaotellaan neljään eri luokkaan käytetyn raaka-aineen ja materiaaliominaisuuksien mukaan. Jaottelu ja murskeiden ominaisuuksille annetut vaatimukset on esitetty taulukoissa 5 ja 6.

Taulukko 5: Betonimurskelajitteiden raaka-aineiden kuvaus (Eerola ym. 2000, 7).

Lajite	Raaka-aine
BeM I	Epäpuhtauksista vapaa betonijäte, joka on peräisin esim. betonituoteteollisuudesta
BeM II	Purkutyömailta tai muualta peräisin oleva betonijäte
BeM III	Purkutyömailta tai muualta peräisin oleva betonijäte, jonka uudelleenlujittuminen rakenteessa on epävarmaa
BeM IV	Purkutyömailta tai muualta peräisin oleva betonijäte, joka ei lujitu rakenteeseen tiivistettynä ja voi olla routivaa

Taulukko 6: Betonimurskeiden perusominaisuudet (a), epäpuhtaudet (b) ja suositeltavat käyttökohteet (c) (Eerola ym. 2000, 7–8).

a)	Rakeisuus**	Lujittuminen	Routivuus	E-moduuli
BeM I	0–45 mm	Lujittuu	Routimaton	700 MPa
BeM II	0–45 mm	Lujittuu	Routimaton	500 MPa
BeM III	0–45 mm	Epävarmaa	Routimaton	280 MPa
BeM IV	Vaihtelee	Ei lujitu	Vaihtelee	≤ 200 MPa*

* harkittava tapauskohtaisesti ottaen huomioon mahdollinen routivuus

b)	Tiilen max. Osuus [paino-%]	Muiden materiaalien max. Osuus * [paino-%]	Liukoisuuskokeet murskausvaiheessa
BeM I	0	0,5	ei vaadita
BeM II	10	1	vaaditaan
BeM III	10	1	vaaditaan
BeM IV	30	1	vaaditaan

* puu, muovi, yms. Tämän paino-% vaatimuksen lisäksi erityisen keveitä materiaaleja (esim. EPS- ja vuorillaeristeet) ei saa olla haitallisessa määrin.

c) Eri betonimurskelajitteiden soveltuvuus		
Kantava kerros	Jakava kerros	Pengertäyte
I, II, (III)	(I), II, III, (IV)	(I-III) IV

c-taulukossa I...IV tarkoittavat betonimurskelajitteita, joita voidaan suositella kuhunkin kohteeseen, ympäristökelpoisuus on kuitenkin otettava huomioon. Betonimurskelajitteiden tunnuksen ollessa suluissa, kyseessä ei ole taloudellisesti tai teknisesti optimaalisin käyttökohde.

Suomen kuntaliitto (Eerola ym. 2000, 9) toteaa myös, että betonimurskeen toimittaja vastaa tuotteen ympäristökelpoisuudesta. Murskeen ympäristökelpoisuus tutkitaan betonin murskausvaiheessa. Luokkien BeM II...IV betonia murskattaessa on ympäristökelpoisuus aina tutkittava tapauskohtaisesti.

Ympäristöministeriön mukaan (Alasaarela ym. 2011, 39) ympäristökelpoisuuden arviointi on välttämätön osa maarakentamisen uusiomateriaalin tuotteistamista

teknisen kelpoisuuden arvioinnin rinnalla. Suomessa tai EU:ssa ei ole yhtä yleistä menettelyä, joka soveltuisi kaikkien uusiomateriaalien ympäristökelpoisuuden arviointiin. Arviointiperusteet riippuvat pitkälti materiaalin luonteesta ja ominaisuuksista sekä käyttökohteista. Vaatimukset uusiomateriaalien hyödyntämiseen ja siihen liittyvien haitallisten ympäristövaikutusten vähentämiseen määritellään lainsäädännön ja ympäristöpoliittisten tavoitteiden kautta. Jätteen hyödyntämisen ensisijaisena tarkoituksena on vähentää luonnonvarojen käyttöä ja syntyvän jätteen määrää. Toisaalta on pyrittävä varmistamaan, että hyödyntämisestä ei aiheudu vaaraa ympäristölle tai ihmisen terveydelle.

3.3.4. CE-merkintä

Rakennustuotteissa tulee olla CE-merkintä 1.7.2013 alkaen. CE-merkinnällä valmistaja osoittaa, että rakennustuotteen keskeiset ominaisuudet on selvitetty siihen sovellettavan harmonisoidun tuotestandardin mukaisesti. Harmonisoitu tuotestandardi ilmoittaa tuoteryhmäkohtaisesti tuotteilta selvitettävät ominaisuudet ja muut vaatimukset. CE-merkinnällä valmistaja vakuuttaa näiden vaatimusten toteutuvan. (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2011, 1–2.)

CE-merkintä tulee pakolliseksi kaikille niille rakennustuotteille, jotka saatetaan markkinoille ja joihin sovelletaan eurooppalaisia harmonisoituja tuotestandardeja. Rakennustuotteiksi katsotaan rakennuskohteeseen kiinteäksi osaksi tulevat tuotteet, mukaan lukien kiviaines. Eurooppalainen tekninen arviointi eli ETA voidaan myöntää rakennustuotteille, joille ei ole olemassa harmonisoitua tuotestandardia. ETA on vapaaehtoinen, CE-merkintään johtava tekninen arviointi, joka on tarkoitettu erityisesti uusille, innovatiivisille tuotteille. (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2011, 2–3.)

Myös laki eräiden rakennustuotteiden tuotehyväksynnästä on voimassa 1.7.2013 lähtien. Laissa säädetään menettelyistä sen toteamiseksi, täyttääkö rakennustuote maankäyttö- ja rakennuslaissa tai sen nojalla säädetyt olennaiset tekniset vaatimukset. Lakia sovelletaan sellaiseen rakennustuotteeseen, joka ei kuulu harmonisoidun tuotestandardin soveltamisalaan ja jonka valmistaja ei ole hankkinut tuotteelleen eurooppalaista teknistä arviointia. Lain mukaan rakennustuotteen kelpoisuus voidaan

todeta tyyppihyväksynnällä, varmennustodistuksella tai valmistuksen laadunvalvonnalla. (L 954/2011, 1§–3§.)

Tyyppihyväksynnän myöntää tyyppihyväksyntälaitos tai tarvittaessa ympäristöministeriö, jos siihen on erityinen syy. Tyyppihyväksyntää hakee tuotteen valmistaja, se annetaan määräajaksi ja hyväksytty tuote merkitään tyyppihyväksynnässä edellytetyllä tavalla. (L 954/2011, 5§–10§.)

Varmennustodistuksella todetaan tuotteen kelpoisuus seuraavissa tapauksissa:

- Rakennustuote teknisiltä ominaisuuksiltaan vaikuttaa rakennuskohteen olennaisten teknisten vaatimusten täyttymiseen.
- Tuote ominaisuuksiensa vuoksi soveltuu varmennustodistuksella hyväksyttäväksi.
- Rakennustuotetyyppejä käytetään laajasti.
- Varmennustodistuksella voidaan yksinkertaistaa tai yhtenäistää rakennusvalvontaviranomaisen toimenpiteitä. (L 954/2011, 4–12§.)

Varmennustodistuksen käyttämisen edellytyksenä on lisäksi valmistajan ylläpitämä tuotannon sisäinen laadunvalvonta ja testaus. Varmennustodistus myönnetään joko tuotteen valmistuksen jatkuvan varmentamisen tai toimituseräkohtaisen näytetarkastuksen perusteella. (L 954/2011, 4–12§.)

Jos rakennustuotteen kelpoisuutta ei voida osoittaa tyyppihyväksynnällä tai varmennustodistuksella, rakennustuotteen olennaisten teknisten vaatimusten täytyminen todetaan valmistuksen laadunvalvonnan perusteella. Laadunvalvonnan varmentaja varmentaa sisäisen laadunvalvonnan tekemällä sitä koskevan alkutarkastuksen, valvomalla sitä jatkuvasti sekä arvioimalla ja hyväksymällä sen. (L 954/2011, 15§–16§.)

YIT Rakennus Oy on hankkinut CE-merkinnän Tikkurilan K3-alueella Vantaalla valmistamilleen ja käyttämilleen kalliomurskeille. Kiviainesten laadun standardinmukaistamiseksi läpikäydyn prosessin kokemuksia voitaisiin hyödyntää tuotehyväksynnän saamiseksi myös itse valmistettavalle betonimurskeelle. CE-merkintä ei ole pakollinen, mikäli rakennustuotetta ei saateta markkinoille (Suomen

Standardisoimisliitto SFS 2011, 2). Tuotehyväksynnän hankkiminen tekisi kuitenkin omatuotantoisen betonimurskeen vertailukelpoiseksi tämänhetkisten tuotteistettujen kaupallisten vaihtoehtojen (esimerkiksi Betoroc-murske) kanssa. Samalla merkintä helpottaisi oman tuotteen käytön hyväksyttämistä kohteissa, joissa betonimurskeen käyttö on sallittua. (Vanhanen 2013.)

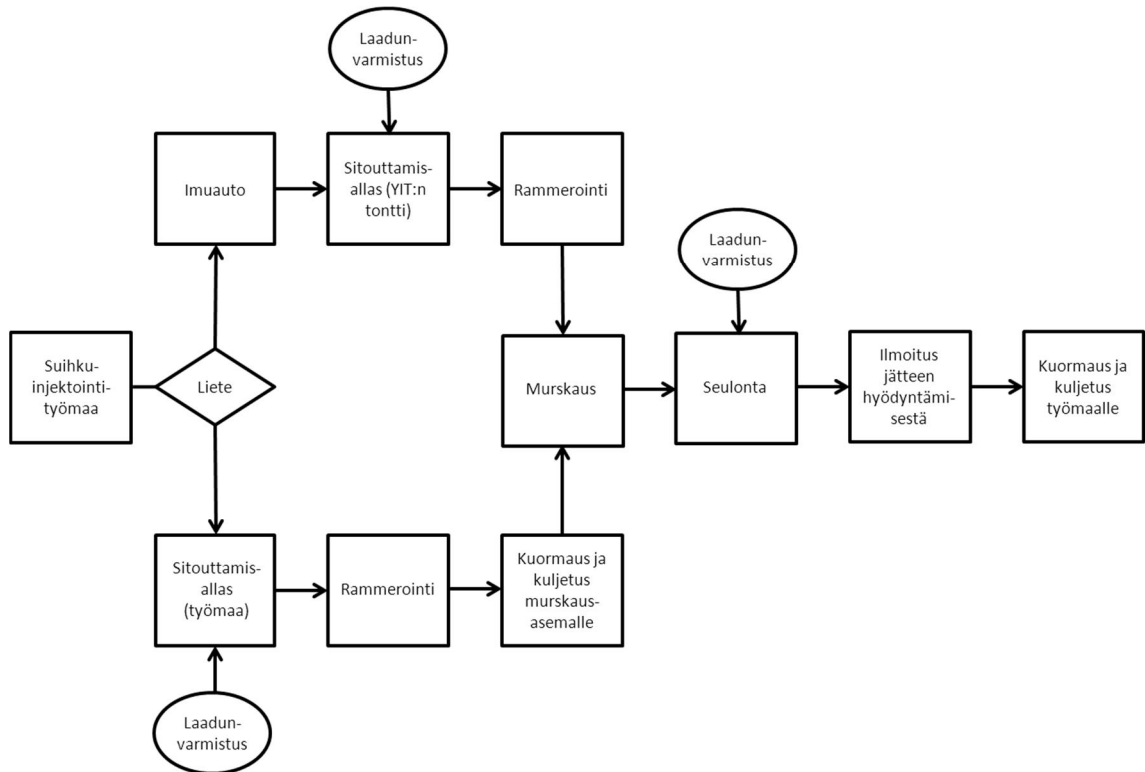
3.4. Paluuvirtauslietteen murskaustoiminnan edellytykset

Laki mahdollistaa suihkuinjektointilietteen hyödyntämisen betonimurskeen tekoon. Toiminta vaatisi alueen, jonne paluuvirtausjäte voitaisiin kuljettaa suoraan syntypaikalta. Sitoutuneen lietteen murskaus ja seulonta tulisi voida suorittaa samalla alueella kuljetuskustannusten minimoimiseksi. Lietteiden järjestelmällinen käsittelytoiminta vaatii ympäristöluvan. Jätteen hyödyntämistä ja jatkokäsittelyä saa kuitenkin suorittaa koeluonteisesti käyttökelpoisuuden tutkimiseksi pelkällä ilmoitusmenettelyllä. Ympäristölupaa ei tarvitse erikseen hankkia lopputuotteen eli betonimurskeen käytölle. Siten ympäristöluvan hankkiminen ainoastaan jatkokäsittelypaikalle riittää. Kuvassa 8 on esitetty prosessikaavio paluuvirtauslietteen käsittelemiseksi joko nestemäisenä tai sitoutuneessa olomuodossa.

Tässä tapauksessa betonijätteen luovuttaja toimii lainopillisesti myös sen hyödyntäjänä. Siten vaaditaan laadunvarmistusjärjestelmä, joka hyväksytetään ELY-keskuksella. Järjestelmän mukaan suihkuinjektointilietteelle tulee suorittaa viiden vuoden välein perustutkimus, jolla todetaan lietteen koostumus ja haitta-ainepitoisuudet. Laadunvalvontaa pidetään yllä ottamalla lietteestä säännöllisesti näytteitä. Haitta-ainepitoisuuksien raja-arvot on kirjattu lakiin, mikä yksinkertaistaa lietteiden ympäristövaikutusten arviointia. Suihkuinjektointilietteiden koostumus ei aiheuttane ongelmia haitta-ainepitoisuuksien suhteen, ellei suihkuinjektointia suoriteta pilaantuneiden maiden alueella.

Sitoutuneen injektointilietteiden murskauksen ja seulonnan tulisi tapahtua välivarastointialueella. Betonimurskeelle tulisi suorittaa säännöllisesti tarvittavat laatumittaukset, jotka ovat pitkälti vastaavat kuin luonnonkiviaineille. Olemassa olevia murskaamoja voitaisiin hyödyntää, mikäli sitouttamisalueen sijainti olisi edullinen. Rudus Oy:n kokemusten perusteella oletettavaa on, että valmistuva

betonimurske soveltuisi jakavaan kerrokseen ja penger- tai putkitäyttöihin. Betonijätteen käsittelyyn ja erotteluun liittyvä työmäärä lienee kevyempi kuin heikkolujuuksisten Betoroc-murskeiden valmistuksessa, sillä paluuvirtauslietteen seassa ei ole terästä tai muuta kaivinkoneella eroteltavaa jätettä. Betonimurskeen käyttöä ohjaavat viranomaisten määräämät käyttörajoitukset.



Kuva 8: Prosessikaavio suihkuinjektointilietteen hyödyntämiseksi.

Toimintaan liittyviä epävarmuustekijöitä on useita. Lietteen sitouttamiseen soveltuvan tontin löytyminen kohtuullisin kustannuksin tiheään asutulta pääkaupunkiseudulta on epävarmaa. Myös ympäristöluvan saaminen voi olla hankalaa sijainniltaan sopivalle alueelle. Lietteen tuotanto on työmaiden suhteellisen lyhyestä kestosta ja töiden epäsäännöllisyydestä johtuen epätasaista ja lietteen hyödyntämisestä saatava tuotto kuluu nopeasti tontin vuokrakustannuksiin, mikäli alueelle ei kehitetä myös muuta sellaista käyttöä, jonka toiminnot eivät haittaa kohtuuttomasti lietteen jalostusta.

Betonimurskeen valmistamisen aloittaminen vaatii myös huomattavasti viranomaisia varten tuotettavia selvityksiä, ennakkokokeita ja suunnittelua. Vaikka uusiomateriaalien käyttöä pyritään edistämään sekä EU- että kansallisella lainsäädännöllä, niihin liittyvät käytännöt eivät ole vielä vakiintuneet ja ovat

paikoitellen epäselviä. Alueellisilla ELY-keskuksilla on suuri rooli uusiomateriaalien hyödyntämisessä ja jätteenkäsittelyssä, joten toimintojen käyttöönotto vaatii tiivistä yhteistyötä kyseisten viranomaisten kanssa.

Suihkuinjektointilietteen heikohkosta lujuudenkehityksestä johtuen sitä ei voida nykyisten tietojen mukaan käyttää kuin lujuudeltaan heikoimpien betonimurskeiden valmistamiseen, jotka soveltuvat pääosin pengertäyttöihin ja jakavaan kerrokseen tierakenteissa. Julkiset toimijat ovat pyrkineet mahdollistamaan luonnonkiviainesten korvaamista betonimurskeilla, mutta on epäselvää, kuinka innokkaita muut toimijat ovat ottamaan vastaan heikkolujuuksista betonimursketta. Betonimurskeen hyödyntäminen voi olla hankalaa alueilla, joissa täyttöihin on käytettävissä lähialueilta saatavia tai rakennusalueelta kaivettuja luonnollisia maa-aineksia.

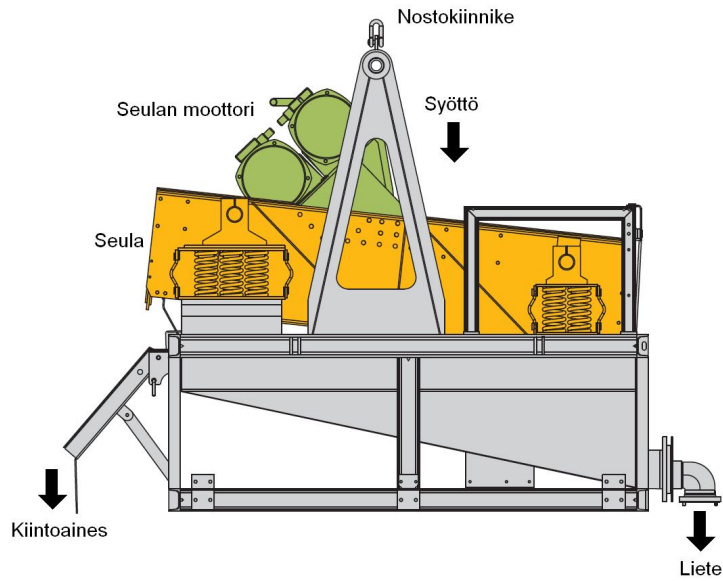
4. Nestemäisen paluulietteen käsittely koneellisesti

4.1. Lietteenkäsittelylaitteistot

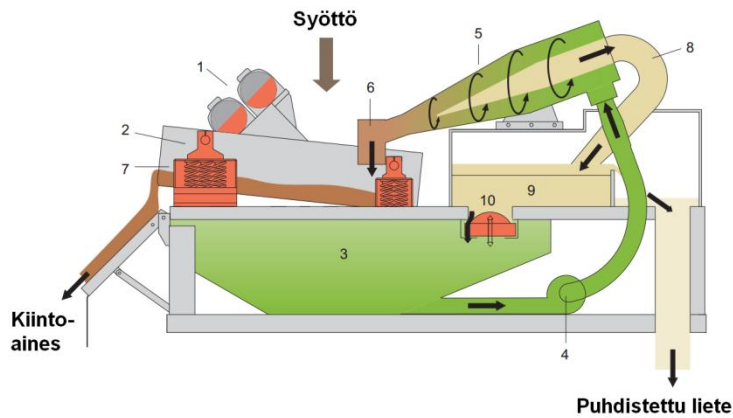
4.1.1. Hiekan- ja siltinerotuslaitteistot

Eurooppalaiset pohjarakennusurakoitsijat käyttävät maarakennustöissä syntyvien lietteiden käsittelyyn erilaisia hiekan- ja siltinerotuslaitteistoja. Laitteistoja hyödynnetään laajalti ainakin tiivispystyseinien eli lieteseinien (engl. slurry wall) materiaalin kierrätyksessä. (Nissi 2013.) Menetelmällä valmistetaan maanalaisia patoseiniä, joilla estetään pohjaveden virtausta tai tuetaan kaivantoja tai rakenteita. Kaivinkoneen kaivama ura täytetään välittömästi kaivun yhteydessä bentoniitti- tai bentoniitti-sementtilietteellä maaleikkauksen vakavuuden säilyttämiseksi. (Hayward Baker 2013.) Bentoniitti on hiukkaskooltaan erittäin hienoa luonnonsavea, jolla on kyky laajentua huomattavasti joutuessaan kosketuksiin veden kanssa (Suomalainen 2012, 21). Juokseva bentoniittiliete sekoittuu osittain myös pois kaivettavaan maa-ainekseen, jolloin materiaalin hukkaprosentti kasvaa. Bentoniittisaven kustannusvaikutus on merkittävä, joten kaivettua materiaalia kierrätetään jatkokäsittelylaitteistojen avulla. (Nissi 2013.)

Hiekanerotuslaitteistoja (engl. desanding system) valmistavat ainakin saksalaisyritys Bauer Maschinen GmbH sekä italialaisyrietykset Casagrande ja Soilmec. Laitteille syötettävät sementtimassat voivat sisältää vettä, sementtiä, bentoniittia ja polymeerejä. Laitteiden toiminta perustuu seuloihin sekä keskipakoisvoimaisiin pyörrepuhdistimiin. (Bauer 2012, Casagrande 2013, Soilmec 2010.) Eri laitetyypit on esitelty kuvissa 9 ja 10. Suomessa lietteiden puhdistuslaitteistoja valmistaa ainakin Outotec Oy. Suomalainen teknologia on kehitetty lähinnä kaivostoiminnassa syntyvien poralietteiden käsittelyyn (Raappana, 2013).



Kuva 9: Seulaan perustuvan hiekanerotimen osat (Bauer 2012).



Kuva 10: Pyörrepuhdistinlaitteiston osat: 1. Moottorit, 2. Karkea seula, 3. Lietesäiliö, 4. Pumppu, 5. Pyörrepuhdistin, 6. Palautusputki, 7. Kuivatusseula, 8. Poistoputki, 9. Välisäiliö, 10. Automaattinen pintavahti. (Bauer 2012.)

Pyörrepuhdistimiin perustuvat hiekanerotuslaitteistot pystyvät erottelemaan lietteestä halkaisijaltaan 0,02–0,06 mm olevia partikkeleita. Pelkkään seulaan perustuvilla laitteistoilla pienimpien eroteltavien partikkelien halkaisija jää 0,16–0,40 millimetriin. (Bauer 2012, Ostermeier 2013.) Taulukossa 7 esitetyn geoteknisen maalajiluokituksen perusteella hiekanerotuslaitteistot eivät siis kykene erottelemaan savisen tai silttisen lietteen ainesosia.

Taulukko 7: Geotekninen maalajiluokitus (Ronkainen 2012, 9).

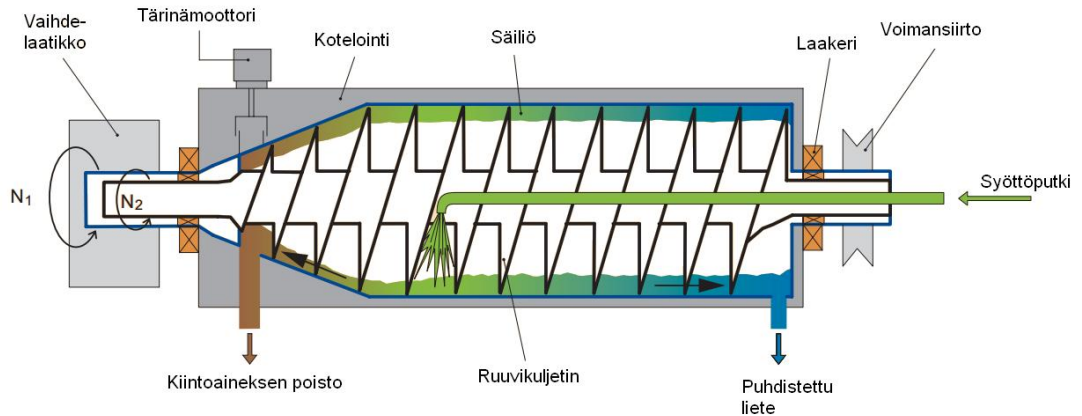
Maalaji	Lyhennys	Rakeiden läpimitta (mm)
Savi	Sa	≤ 0,002
Siltti	Si	> 0,002...0,06
Hiekka	Hk	> 0,06...2,0
Sora	Sr	> 2,0...60,0
Kivet	Ki	> 60...600
Lohkareet	Lo	> 600

Siltinerotuslaitteistolla (engl. desilter) voidaan erottaa hienompirakeisia lietteitä (rakeiden suurin läpimitta 0,02–0,03 mm). Toimintaperiaate on pääosin sama kuin hiekanerotuslaitteistolla. Laitteistojen erot löytyvät lähinnä pyörrepuhdistimien lukumäärästä ja koosta. Hiekan- ja siltinerotuslaitteistojen teoreettiset käsittelykapasiteetit vaihtelevat noin 50 m³/h ja 400 m³/h välillä. (Bauer 2012, Bauer 2013.)

4.1.2. Dekantterilingot

Apuna lietteen käsittelyssä voidaan käyttää dekantterilinkoja (engl. decanter). Dekantterilingon toiminta perustuu keskipakoisvoimaan. Sementtimassa, johon on sekoittunut maa-ainespartikkeleita, syötetään ruuvikuljettimen keskiöön. Sieltä massa lingotaan ruuvin ympärillä pyörivän säiliön reunoille ja se erottuu keskipakoisvoiman vaikutuksesta kiintoaineeksi ja nesteeksi. Ruuvin ja säiliön pyörimisnopeudet poikkeavat toisistaan, jolloin ruuvikuljetin siirtää kiintoaineet omalle poistoaukolleen samalla kun puhdistettu neste virtaa ulos päinvastaiseen suuntaan. (Bauer 2008.) Dekantterilingon poikkileikkaus on nähtävissä kuvassa 11.

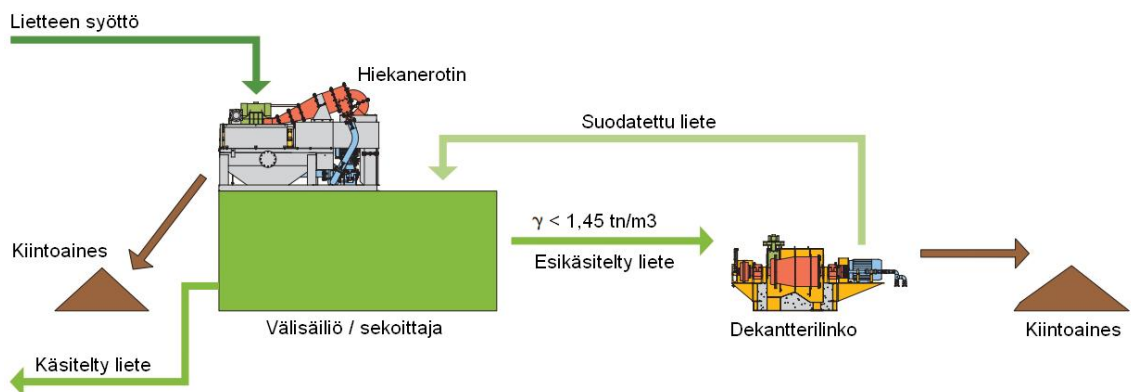
Dekantterilingon erottelukyky riittää siltin käsittelyyn (rakeiden läpimitta 0,01–0,06 mm). Sitä voidaan käyttää joko lietteen puhdistamiseen uudelleenkäyttöä varten tai lietteen erotteluun vedeksi ja kiintoaineeksi. Lingon lietteenkäsittelykapasiteetti on n. 50 m³/h. (Bauer 2008.)



Kuva 11: Dekanterilingon toimintaperiaate (Bauer 2008).

4.1.3. Tyypillinen lietteenkäsittelyjärjestelmä

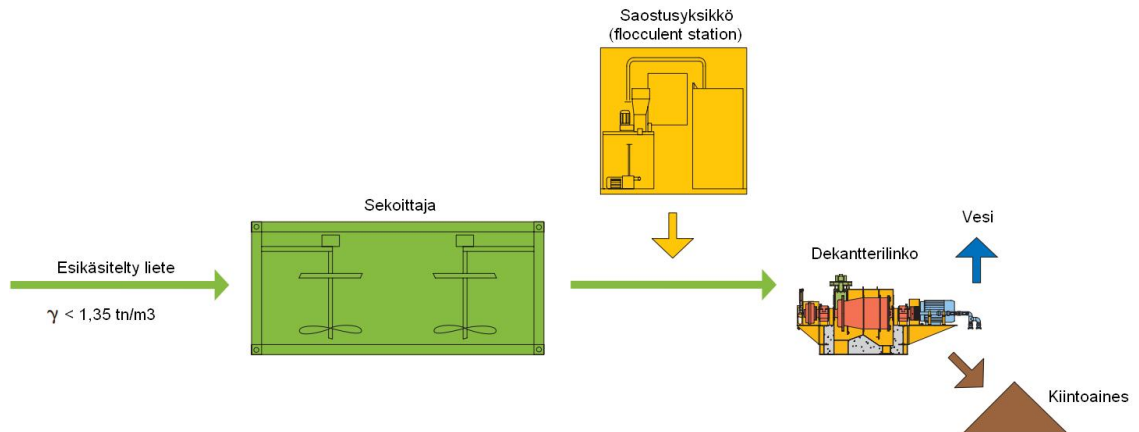
Kun lietettä halutaan puhdistaa uudelleenkäyttöä varten, voidaan käyttää kuvan 12 mukaista lietteenkäsittelyjärjestelmää, jossa juokseva seos esikäsitellään hiekanerotuslaitteistolla ja syötetään välisäiliön kautta dekanterilingolle. Dekanterilingo syöttää suodatetun aineksen takaisin välisäiliöön erotettuaan silttiä karkeammat ainesosat kiintoaineeksi. Jatkuvan käsittelyn seurauksena välisäiliö sisältää lopulta uudelleen käytettäväksi kelpaavaa puhdistettua suspensiota. Dekanterilingolle syötettävä maksimiraekoko on 8 mm, joten esikäsittely hiekanerotuslaitteistolla lienee yleensä tarpeellista. (Bauer 2008.)



Kuva 12: Sementtilietteen puhdistaminen käytettäväksi uudelleen suihkuinjektointielementtien materiaalina (Bauer 2008).

Lietteen erottelu vedeksi ja kiintoaineeksi onnistuu lisäämällä dekanterilingolle syötettävään massaun ennen linkousta saostusaineita, jotka reagoivat lietteessä

sekoittuneena olevan kiintoaineksen kanssa. Välisäiliön ja dekantterilingon väliin tulee tällöin asentaa sekoittaja ja saostusyksikkö (engl. flocculent station) kuvan 13 mukaisesti. Sekoittaja varmistaa seoksen tasaisen koostumuksen ja syötön saostusyksikölle, jossa seokseen syötetään hienoaineen polymerisoivia kemiallisia yhdisteitä. Tämän jälkeen lingon erottelukyky riittää kaikkien kiintoainepartikkeleiden erottamiseen. (Bauer 2008, Ostermeier 2013.)



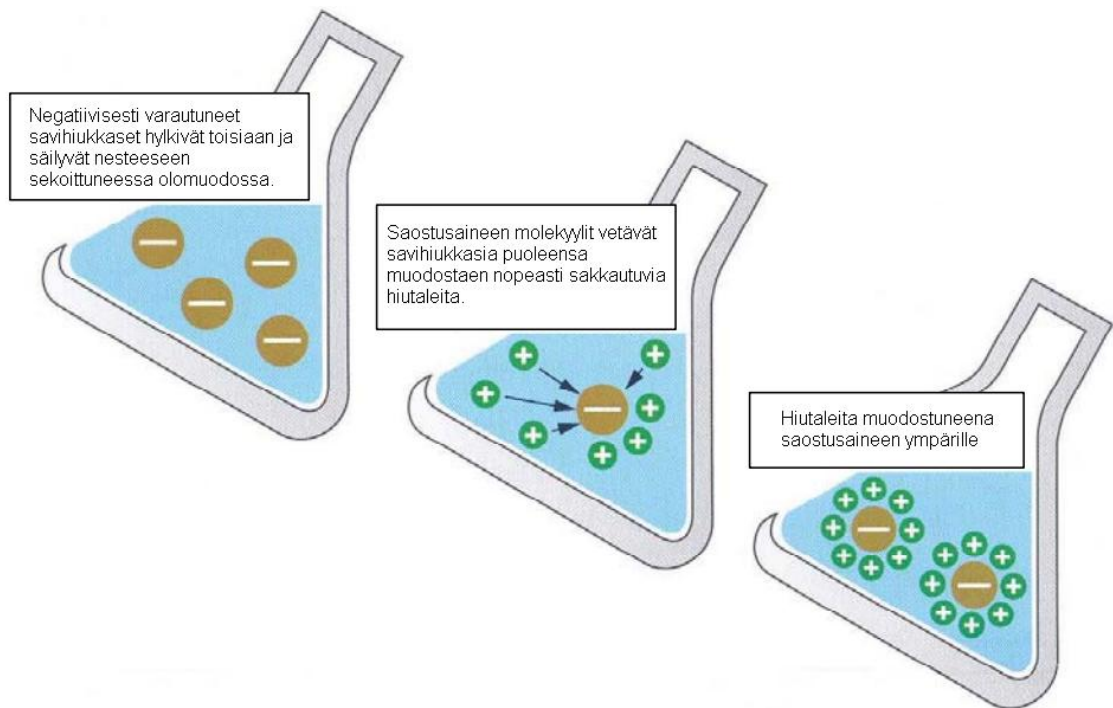
Kuva 13: Veden erottaminen lietteestä (Bauer 2008).

Hiekanerottimen perässä oleva välisäiliö voidaan korvata suoraan sekoittajalla, jolloin voidaan varmistua massan jatkuvasta liikkuvuudesta käsittelyn aikana ja ehkäistään sementtiä sisältävän suspension enneaikaista sitoutumista (Ostermeier 2013). Samalla saadaan vähennettyä käsittelylinjaston tilantarvetta. On varmistettava, että sekoittajalle saapuva liete on koostumukseltaan tarpeeksi hienojakoista ja juoksevaa. Tarvittaessa lietettä on ohennettava vedellä.

4.1.4. Veden sakkauttaminen kemiallisesti

Lietteen sakkauttamiseen voidaan tyypillisesti käyttää kahdenlaista saostusmenetelmää, koagulaatiota (kuva 14) ja flokkulointia (kuva 15). Kolloidiset partikkelit kuten savihiukkaset ovat erittäin hienojakoisia ainesosia, joilla on elektrostaattinen pintavaraus. Kaikista kolloidisimmilla materiaaleilla varaus on tyypillisesti negatiivinen. Hiukkaset, joilla on sama varaus, hylkivät toisiaan estäen materiaalin saostumisen ja erottumisen nesteestä. Koagulaatiossa seokseen lisätään kemikaaleja, jotka tuottavat nesteeseen positiivisesti varautuneita ioneja. Seurauksena

kolloidiset partikkelit muuttuvat epästabiileiksi ja alkavat saostua. (Beca Carter Hollings & Ferner Ltd 2004, 3.)



Kuva 14: Koagulaatio (Beca Carter Hollings & Ferner Ltd 2004, 3).

Flokkuloinnissa seokseen lisätään kemikaaleja, jotka häiritsevät kolloidisten partikkelien elektrostaattista pintavarausta. Savihiukkasten pinnalle kiinnittyy kemikaalin tuottamia positiivisia ioneja, joihin puolestaan kiinnittyy uusia negatiivisesti varautuneita savihiukkasia. Tuloksena on suurempia, tiheämpiä ja nopeammin saostuvia hiutaleita kuin koagulaatiossa. (Beca Carter Hollings & Ferner Ltd 2004, 4.)



Kuva 15: Flokkulointi (Beca Carter Hollings & Ferner Ltd 2004, 4).

Anioniset polyakrylamidit ovat negatiivisesti varautuneita saostajia, joita käytetään teollisesti juomaveden puhdistamiseen sekä jäteveden ja lietteen puhdistamiseen ja vedenpoistoon. Kyseiset polymeerit kiinnittyvät herkästi kiintoainekseen, jolloin puhdistettuun nesteeseen jäävä kemikaalipitoisuus on erittäin alhainen. Kationisilla

polyakrylamideilla on positiivinen varaus ja niitä käytetään julkisessa vesihuollossa kiintoaineksen poistamiseen. Niillä on suurempi myrkyllinen vaikutus kaloihin ja muihin vedessä eläviin organismeihin kuin anionisilla ja ei-ionisilla polyelektrolyyteillä. (Beca Carter Hollings & Ferner Ltd 2004, 4.)

4.2. Laitteistojen soveltaminen suihkuinjektointinnissa

4.2.1. Suihkuinjektointilietteen puhdistaminen uudelleenkäyttöä varten

Suihkuinjektointipaluulietteen koostumuksessa on yhtäläisyyksiä tiivispystyseinien valmistuksessa käytettävien lietteiden kanssa. Suomalaisissa kohteissa paluuliete sisältää usein hienoa savea, silttiä, jonkin verran karkeampaa maa-ainesta sekä runsaasti vettä ja sementtiä, joten paluuliete ei eroa oleellisilta osiltaan esimerkiksi bentoniitti-sementtilietteestä. Suomessa ei ole ainakaan laajamittaisesti kokeiltu koneellista lietteenkäsittelyä suihkuinjektointin yhteydessä (Nissi 2013). Ulkomaisen urakoitsijan kokemusten perusteella hiekan- ja siltinerotuslaitteistot soveltuvat myös suihkuinjektointilietteen käsittelyyn. (Ostermeier 2013.)

Mikäli sementtiä sisältävä liete aiotaan puhdistaa ja käyttää uudelleen suihkuinjektointielementtien valmistusaineena, puhdistetun lietteen sementtipitoisuuden varmistaminen on olennaista riittävän lujuuden saavuttamiseksi. YIT Rakennus Oy on käyttänyt suihkuinjektointinnissa tyypillisesti yleis- tai plussementtiä (Teikari 2013). Sementin hienous arvioidaan yleensä sen ominaispinta-alan mukaan ilmanläpäisevyyteen perustuvilla menetelmillä. Yleisimmin käytössä on Blainen kehittämä menetelmä. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005b, 56.) Menetelmässä hienous ilmoitetaan Blaine-luvun avulla. Finnsementin valmistamalla yleissementeillä Blaine-luku on 370–440 m²/kg ja plussementillä vastaavasti 440–460 m²/kg (Finnsementti Oy 2012). Blaine-luku voidaan muuttaa partikkelihalkaisijaksi (seulan läpäisevyys 85 %) kaavan (1) avulla.

$$P = \left(\frac{20303}{\text{Blaine-luku}} \right)^2 \mu\text{m} \quad (\text{George C. Hawley \& Associates 2012}). \quad (1)$$

Sementtipartikkelien keskimääräiseksi halkaisijaksi saadaan n. 0,02–0,03 millimetriä, johon dekantterilingon erottelukyky teoriassa riittää. Yksittäisten partikkelien koon voi

olettaa vaihtelevan massan sisällä. Edellä esitetty kaava olettaa partikkeleiden olevan muodoltaan täysin pyöreitä. Lisäksi huomattavaa on, että erilaiset hienoaineiden rakeisuuksien määrittelylaitteet antavat ominaispinta-aloja, jotka ovat eri suuruusluokassa kuin Blainen menetelmällä saatavat arvot (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005b, 56). Laskennallisesti saatua partikkelihalkaisijaa on siis syytä pitää suuntaa-antavana.

On epäselvää, miten tehokkaasti mekaaninen käsittely erottaa paluulietteestä veden kanssa kosketuksiin joutunutta sementtiä, jonka kemiallinen sitoutuminen on jo osittain alkanut. Mikäli sementti erottuu edes osittain dekantterilingossa kiintoaineen joukkoon, säiliössä olevan massan sementtipitoisuus alenee progressiivisesti käsittelyn jatkuessa johtuen suodatetun lietteen syötöstä takaisin säiliöön. Siten massan laatu uudelleenkäyttöä ajatellen heikkenee. Massan riittävän sementtipitoisuuden varmistaminen vaatii käytännön kokeita uudelleenkäytettävälle lietteelle. Mikäli uudelleenkäytettävän lietteen ominaisuudet vaihtelevat selvästi eri maalajien mukaan, tasaisen sideainesuspension laadun varmistaminen on haastavaa työmaaolosuhteissa, mikä lisää laatupoikkeamien riskiä.

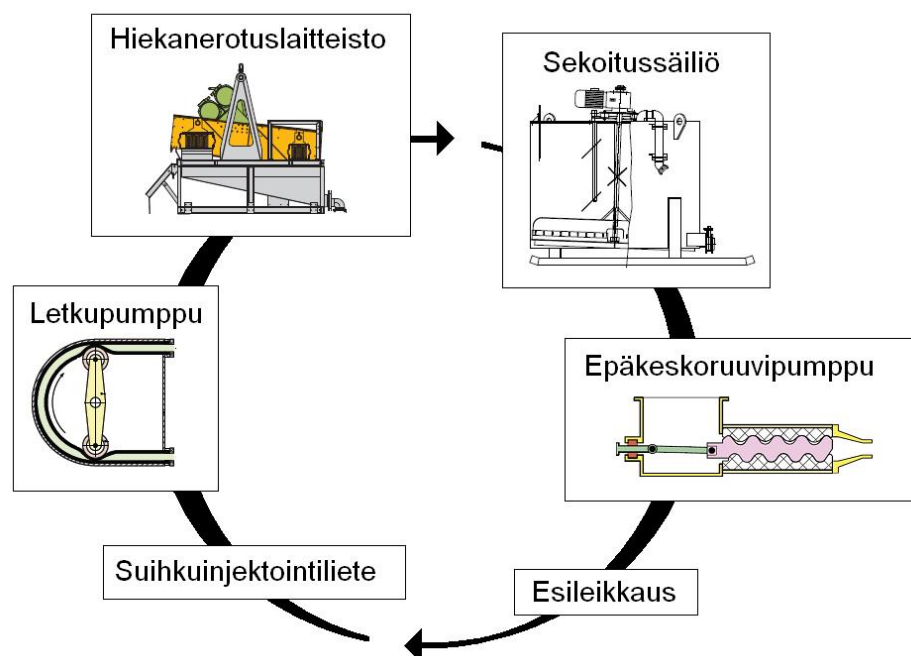
Koska dekantterilinko ainoastaan laimentaa välisäiliössä olevan massan kiintoainespitoisuutta, säiliöstä lopputuloksena saatava liete sisältää aina jonkin verran käsittelemättömiä partikkeleita. Joidenkin partikkelien halkaisija voi olla suurempi kuin hiekanerotuksen 0,06 mm seulakoko johtuen laitteen läpäisyprosentista. Nämä partikkelit saattavat tukkia suihkuinjektointijohteen päässä sijaitsevat pieniläpimittaiset suuttimet. Suuttimien aukaisu hidastaa merkittävästi suihkutustyötä (Teikari 2013). Suihkutuskatkos saattaa aiheuttaa myös ongelmia injektointielementin jatkuvuuden kannalta (SFS-EN 12716:2001, 19).

Saksalainen laitevalmistaja on suorittanut kokeita erilaisilla hiekanerotuslaitteistoilla ja seulaerottimilla suihkuinjektointilietteen puhdistamiseksi uudelleenkäyttöä varten. Parhaat tulokset valmistaja on saanut seuloihin perustuvilla erottimilla johtuen seulojen paremmasta puhdistettavuudesta pyörrepuhdistimiin verrattuna. Lietteiden maa-ainespitoisuus on kahdella rinnan asennettavalla pyörrepuhdistimella mahdollista saada alle yhden prosentin, mutta käsittelyyn kuluva aika on huomattava ja siten

erottelussa saavutettavat kustannussäästöt eivät valmistajan mukaan kata laitteiston käyttö- ja hankintakustannuksia. (Ostermeier 2013.)

4.2.2. Suihkuinjektointilietteen seulonta ja käyttö esileikkauksessa

Toinen vaihtoehto suihkuinjektointilietteen jalostamiseksi on sen seulominen ja uudelleenkäyttö esileikkauksessa kuvan 16 mukaisesti. Järjestely vaatii suihkutettavien materiaalien siirtoon kaksi eri linjaa. Ensimmäinen linja käsittelee puhdasta vettä ja seulan tai pyörrepuhdistimen läpi pumpattua lietettä, toinen linja käsittelee varsinaista suihkuinjektointielementin valmistamiseen käytettävää tuoretta vesisementtisuspensiota. Järjestelyssä paluuliete pumpataan letkupumpulla porareialtä hiekanerottimelle, joka poistaa lietteestä partikkelikooltaan suuret kiintoaineet. Käsitelty liete varastoidaan sekoitusaltaseen, jossa liete on jatkuvassa liikkeessä sitoutumisen ehkäisemiseksi. Sekoitusaltaasta liete voidaan pumpata eteenpäin epäkeskoruuvipumpulla. Epäkeskoruuvipumput soveltuvat erityisen hyvin viskositeetiltaan vaihtelevien nesteiden pumppaamiseen ja ovat toiminnaltaan yksinkertaisia. (MAT Mischlagentechnik 2010, Ostermeier 2013.)



Kuva 16: Suihkuinjektointilietteen käyttö esileikkauksessa (MAT Mischlagentechnik 2010, Ostermeier 2013, Bauer 2013).

Kyseinen järjestely vähentää käytettävän veden ja siten myös syntyvän paluulietteen määrää. Esileikkauksessa käytettävän nesteen sementti- tai maa-ainespitoisuudella ei ole suihkuinjektointipilarin laadunvarmistuksen kannalta ainakaan heikentävää vaikutusta, joten menetelmä ei vaadi uudelleenikäytettävän lietteen koostumukselle suoritettavia mittauksia. Tarvittava laitteisto on yksinkertainen ja sovitettavissa YIT Rakennus Oy:n nykyiseen järjestelmään, jossa on jo tällä hetkellä erilliset linjat esileikkauksessa käytettävälle vedelle sekä suihkuinjektointisuspensiolle. Euroopassa menetelmästä on ollut myönteisiä kokemuksia useammalta työmaalta (Ostermeier 2013).

Mahdollinen ongelmatekijä kyseisessä menetelmässä on suurimpien partikkelien koko, joka saattaa aiheuttaa suutinten tukkeutumisen. Suihkuinjektoinnissa käytettävän suuttimen halkaisija on tyypillisesti 2–4 mm (Mitrofanov 2009, 14). Hiekanerotuslaitteiston seulassa on käytetty Euroopassa silmäkokoja 0,4 mm (Ostermeier 2013), joten teoriassa tukkeutumiseen vaaditaan useamman partikkelin aiheuttama tukos tai sementin sitoutuminen sekoitussäiliössä seulomisen jälkeen. Ongelman esiintyvyyttä voidaan vähentää käyttämällä tarkempia erotuslaitteistoja, jolloin kuitenkin laitteiston ylläpito on työläämpää. Suuritiheyksistä lietettä kannattanee laimentaa vedellä juoksevuuksensa parantamiseksi, jolloin suuret partikkelit läpäisevät suuttimen helpommin. Lisäksi vesipitoisuuden kasvattaminen hidastaa sideaineen sitoutumista (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005b, 74).

4.2.3. Suihkuinjektointilietteen koneellinen vedenerotus

Koneellinen veden erottaminen nestemäisestä suihkuinjektointilietteestä on mahdollista. Laittevalmistaja Bauer Maschinen GmbH on suorittanut kokeita suihkuinjektointilietteen kiintoaineksen erottamiseksi dekantterilingolla ilman kemiallisia lisäaineita. Valmistajan mukaan kiintoaineen erottuminen prosessissa on niin tehokasta, että mikäli sementin sitoutumista ei ole pysäytetty, sementti saattaa erottuessaan kovettua lingon sisällä olevan ruuvikuljettimeen ja rikkoa laitteiston. Jos sementin hydrataatioprosessi saadaan pysäytettyä, dekantterilinko toimii tehokkaasti sementin erottamisessa. Puhtaan veden erottamiseksi savesta kemiallisten lisäaineiden käyttö on kuitenkin välttämätöntä. (Ostermeier 2013.)

Finnsementin edustajan mukaan sementin sitoutumista voidaan hidastaa merkittävästi tai mahdollisesti jopa pysäyttää hidastusaineiden avulla (Heikkilä 2013). Hidastimet siirtävät sitoutumisen alkua, jolloin lujuudenkehitys alkaa myöhemmin. Normaalisti hidastusaineita käytetään pidentämään betoninkuljetusmatkoja, sillä hidastin estää massan sitoutumisen kuljetuksen aikana. Lisäksi niitä voidaan käyttää kohteissa, joissa halutaan välttää työsaumoja. Alhaisessa lämpötilassa hidastimen vaikutusaika yleensä kasvaa. (Suomen Rakennusinsinöörien liitto 1995, 66–214, Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005, 67.) Annostelusta riippuen sitoutumista voidaan tyypillisesti hidastaa tunneista vuorokauteen. Annostelu perustuu sementtipitoisuuteen ja on käytännön kohteissa 0,3–1,5 prosenttia sementin painosta. Hidastimien annostukseen vaikuttavat mm. lämpötila, sementti, seosaineet ja haluttu hidastusaika. Lisäämällä hidastusainetta huomattavia määriä saattaa olla mahdollista pysäyttää sitoutuminen kokonaan, mutta sen todentaminen vaatii ennakkokokeita. Hidastusaineen määrä vaikuttaa myös erotettavan kiintoaineen sitoutumiseen, mikä saattaa heikentyä oleellisesti hidastusaineiden vaikutuksesta. Hidastusaine on olomuodoltaan kirkasta nestettä, jonka pääsy ympäristöön on estettävä ja jonka käsittely vaatii suojarusteiden käyttöä. (Heikkilä 2013, Finnsementti 2004, Finnsementti 2008, Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005b, 67.)

Hidastusaineiden käytöllä työmaaolosuhteissa on ympäristövaikutusten ja työturvallisuuden lisäksi muitakin riskejä. Normaalilla annostelulla hidastusaineet eivät pysäytä sitoutumista kokonaan. Laitteistovalmistajalla on kokemuksia dekantterilingon rikkoutumisesta inhimillisen annosteluvirheen seurauksena. Hidastusaineiden sijaan voidaan käyttää aineita, jotka pysäyttävät sitoutumisen enemmän tai vähemmän pysyvästi. (Ostermeier 2013.) Tällaisia aineita ovat humus, sokeri, öljy ja rasvat (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005b, 62). Myös käytetyn veden määrä vaikuttaa sitoutumisaikaan jonkin verran. Mitä enemmän vettä, sitä kauemmin kestää ennen kuin kiteet kasvavat yhteen. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005b, 75.)

Jo pienikin määrä (0,1 %) sokeria vedessä tai tuoreessa betonissa voi estää betonin kovettumisen kokonaan. Öljyt ja rasvat voivat kiinnittyä sementtihiukkasten pinnalle ja estää reaktion kulun tai heikentää tartuntaa runkoainerakeisiin tai ne voivat aiheuttaa ylimääräistä ilmaa betoniin. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005b, 62–63.) Tarvittaessa

ainakin sokeria on saatavilla suhteellisen edullisesti Euroopasta suursäkeissä (Ässämäki 2013). Sitoutumisen estävät aineet voidaan lisätä lietteen sekaan sekoitussäiliössä (Ostermeier 2013).

Lietteen kirkastamiseen käytettävät kemialliset lisäaineet on valittava sementin ja maa-aineksen mukaan. Sideaineen osalta suurin vaikutus on sementin pH-arvolla, joka vaikuttaa saostusaineen toimintaan (Ostermeier 2013). Kemiallisen käsittelyn jälkeen dekantterilingon kautta saatava vesi lienee aiheellista tutkia, jotta voidaan varmistua, ettei se sisällä haitallisessa määrin hienoaainesta tai muita loppusijoitusta hankaloittavia aineksia kuten saostusainetta.

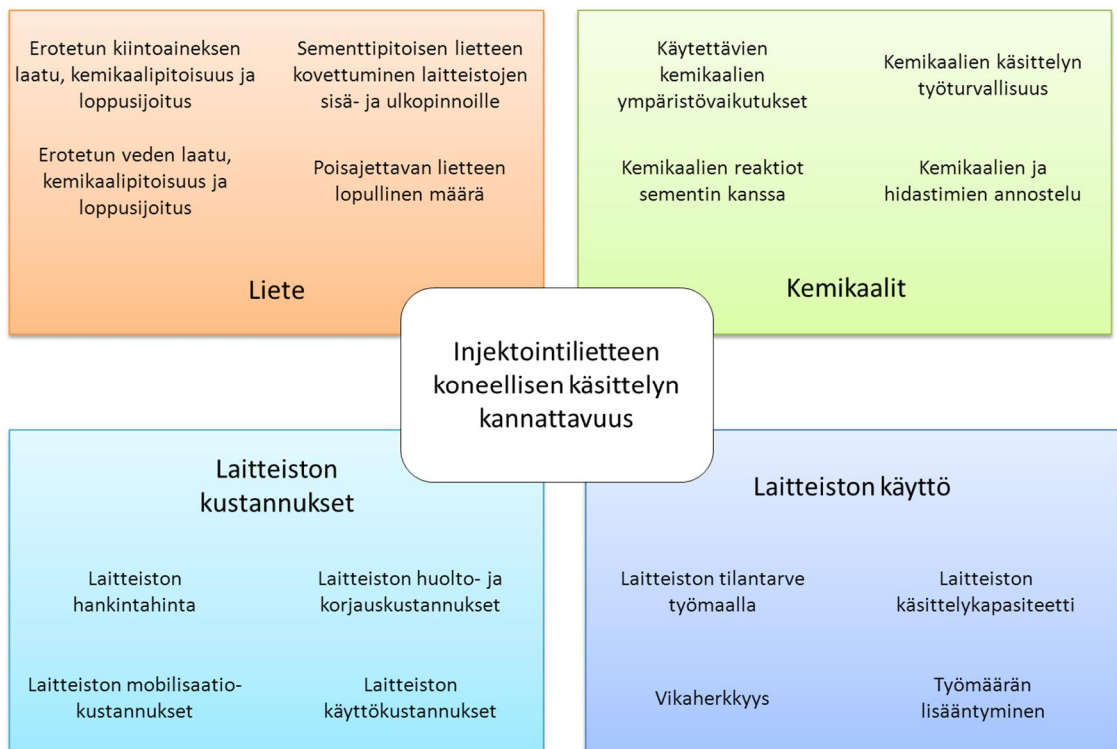
Injektointityön ohessa suoritetun veden erottamisen voidaan olettaa nopeuttavan kiintoaineksen kuivumista ja käsittelyä. Sementti reagoi veden kanssa kemiallisesti, joten kiintoaineksen joukkoon jäänee kemiallisesti sitoutunutta vettä, minkä myötä ylijäämäaineen voidaan olettaa ainakin osittain kovettuvan (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005b, 74). Erotetun kiintoaineksen sitoutumisajasta ja loppulujuudesta ei ole kuitenkaan varmuutta, varsinkaan hidastusaineita lisättäessä. Syntyvän jätteen kelpoisuutta jatkojalostusta varten (esimerkiksi Rudus Oy:lle) ei tiedetä. Jäte voidaan joka tapauksessa ajaa betonijätteenä kaatopaikalle. Kuivan jätteen osuus voi parhaimmillaan olla pieni ylös nousseen lietteen määrästä, millä voidaan saavuttaa kustannussäästöjä pienenevien jätemaksujen ja kuljetuskustannusten muodossa (Teikari 2013).

Järjestelmään liittyviä potentiaalisia ongelmia ovat annostelun mitoittaminen siten, että hidastimien syöttö on riittävä määrältään ja tasaisuudeltaan, sillä laitteiston rikkoutuminen lietteen kovettuessa dekantterilingon sisälle lienee kustannuksiltaan suurin riski. Lisäksi menetelmä sisältää saostavien kemikaalien säilytykseen, käsittelyyn ja annosteluun liittyviä haasteita. Jatkuva koneellinen vedenerotus vaatii suhteellisen paljon miestyötä sekä hidastimia ja saostuskemikaaleja työvuoron aikana. Laitteistorikko saattaa vaikuttaa negatiivisesti suihkutustyön suorittamiseen. Menetelmän vikaherkkydestä ei ole tietoa.

4.2.4. Paluulietteen käsittely työmaaolosuhteissa

Paluulietteen käsittely työmaalla vaatii laitteiston hankkimisen lisäksi suihkutustyön ohessa tehtävää mies- ja konetyötä. Liete tulee pumpata porareiältä hiekanerotuslaitteistolle. Hiekanerotin ja dekanterilinko tuottavat kiintoainesta, joka tulee poistaa laitteiston lähettyviltä tukkeutumisen estämiseksi. Sekoittimen ja saostusyksikön toimintaa tulee seurata, sillä saostusyksikön toiminta perustuu laadultaan ja määrältään tasaiseen massansyöttöön, jonka perusteella laitteisto on kalibroitu syöttämään jatkuvasti tietyn määrän lisäainetta (Bauer 2008, 6).

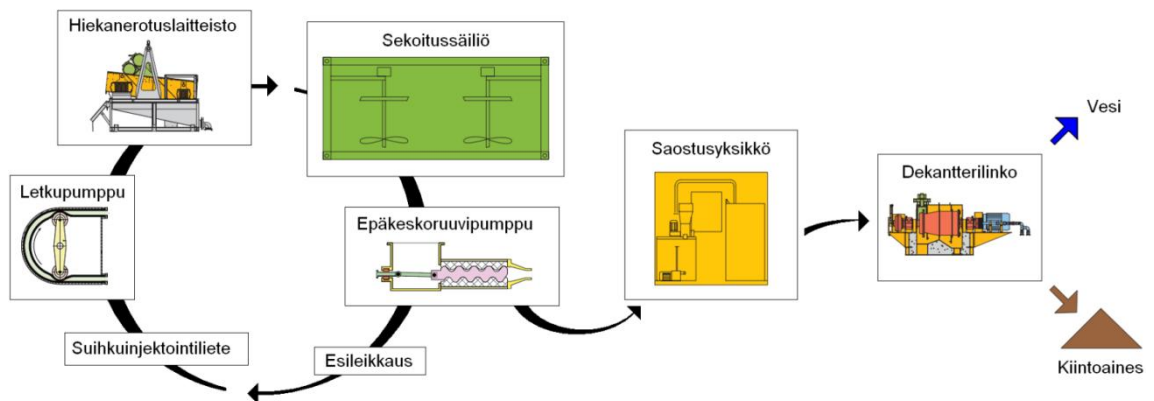
Paluulietteen käsittely samanaikaisesti suihkutustyön ohessa siirtää kellarikohteissa lietteeseen liittyvää työtä ulkopuoliselta toimijalta hankitusta imupalvelusta omaksi työksi. Laitteistot tulee puhdistaa huolellisesti päivittäin, jotta estetään sementtipitoisen lietteen kovettuminen laitteiston sisä- ja ulkopinnoille. Paluulietteen jatkokäsittelyyn voi olla syytä varata normaalin suihkuinjektointiryhmän lisäksi vähintään yksi ylimääräinen työntekijä (Teikari 2013). Kemikaaleja käsitellessä tulee kiinnittää erityistä huomiota työturvallisuuteen. Kuvaan 17 on koottu lietteenkäsittelyn kannattavuuteen liittyviä tekijöitä.



Kuva 17: Injektointilietteen käsittelyyn kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä.

4.2.5. Erilaiset laitteistoyhdistelmät

Lietemäärän vähentämisen kannalta tehokkain ratkaisu saattaisi olla paluulietteen kierrätyksen yhdistäminen koneelliseen vedenerotukseen työvuoron lopussa kuvassa 18 esitetyn periaatteen mukaisesti. Suihkuinjektointityön aikana syntyvä paluuliete kierrätetään hiekanerotuksen ja sekoitusaseman avulla käytettäväksi uudelleen esileikkauksessa. Työvuoron viimeisen pilarin suihkuttamisen jälkeen sekoitusaltaaseen kerääntyneeseen lietteeseen lisätään reilusti hidastimia sitoutumisen pysäyttämiseksi. Sekoitusaltaasta liete ohjataan saostusyksikölle, jossa lietteeseen syötetään kemiallisia saostusaineita. Saostusyksiköltä liete ohjataan dekantterilingolle, jolla erotetaan liete vedeksi ja kiintoaineeksi. Ylijäämävesi voidaan ottaa talteen seuraavan työvuoron ensimmäistä esihuuhtelua varten ja kiintoaines voidaan kuljettaa kaatopaikalle tai jatkokäsittelypaikalle sitoutettavaksi ja murskattavaksi.



Kuva 18: Paluulietteen kierrätyksen ja vedenerotuksen yhdistelmä (MAT Mischlagentechnik 2010, Ostermeier 2013, Bauer 2013).

Edellä kuvattu järjestelmä yhdistää molempien menetelmien hyötypuolia ja osittain myös poistaa erillisiin ratkaisuihin liittyviä haasteita:

- Menetelmässä syntyvä kokonaislietemäärä on suhteellisen vähäinen johtuen ylösnousseen lietteen uudelleenkäyttöön esileikkauksenvaiheessa ja maa-aineen jatkuvasta erottamisesta hiekanerotuslaitteistolla.
- Saostusvaiheessa käytettävien kemikaalien ja hidastimien määrä pienenee vastaavasti lietemäärän vähentyessä, jolloin saavutetaan säästöjä käsittelyainekustannuksissa, ja kemikaalien ja hidastimien käsittely ja varastointi helpottuu.

- Sekoitussäiliöön ei tarvitse suihkuinjektointityön ohessa lisätä kemikaaleja tai hidastimia, joten annostelussa ei tarvita jatkuvaa valvontaa. Inhimillisen virheen mahdollisuus annostelun määrässä tai ajoittamisessa pienenee.
- Riittävällä sekoitussäiliön kapasiteetilla laitteiston vikaherkkyys alenee: kierrätyslaitteistossa syntyvän vian seurauksena liete voidaan varastoida normaalisti sekoitussäiliöön ja tarvittaessa kuljettaa kaatopaikalle.
- Valitsemalla saostuskemikaali oikein voi olla mahdollista jättää saostusyksikkö pois järjestelmästä ja lisätä kemikaali sekoitussäiliöön kokonaislietemäärään perustuvalla annostelulla hidastusaineiden lisäämisen ohessa.
- Toimivuuden varmistamiseksi ja hankintojen kustannusriskien pienentämiseksi laitteistohankinnat voidaan aloittaa lietteenkierrätyslinjastolla ja myöhemmin laajentaa saostusyksiköllä ja dekantterilingolla mikäli käyttökokemukset ovat positiivisia.

Laitteistoyhdistelmän käyttöön ja hankintaan liittyviä epävarmuustekijöitä ovat:

- seulan erottelukyvyn riittävyys lietteen hiekanerotuksessa
- työvuoron aikana nousevan ja kiertävän lietteen kokonaismäärä ja siten sekoitussäiliön koon arvioiminen riittävän toimintavarmuuden aikaansaamiseksi
- kiintoaineksen ja veden erottamiseen kuluva aika käytännössä
- laitteiston hyötysuhde/erottelukyky ja käsittelykapasiteetti
- poisajettavan massan todellinen vähenevä määrä vedenerotuksen seurauksena
- riski uudelleenkäytettävän sementtilietteen ennen aikaisesta sitoutumisesta.

Lietteen käsittelyyn suunniteltujen laitteistojen korkea hankintahinta vaikuttaa vahvasti lietteenkäsittelyn kannattavuuteen. Dekantterilingon hankintakustannus uutena on lähtökohtaisesti huomattavasti muuta lietteenkäsittelykalustoa korkeampi. Käytettyjen laitteistojen hankinta Euroopasta tai yksinkertaisimpien laitteistojen kuten sekoitussäiliön rakentaminen YIT:n omana työnä saattaisi olla kannattavaa.

5. Paluulietteen hyödyntäminen patoseinien materiaalina

5.1. Työkohteessa käytetyt mittausmenetelmät

Suihkuinjektointistandardin vaatimat ennakkokokeet sideainesuspensiolle ovat tiheyden mittaaminen, tihkuminen, Marshin viskositeetti, sitoutumisaika ja lieriömäisen näytteen yksiakiaalinen puristuslujuuskoe (SFS-EN 12716:2001, 21). Taulukossa 8 on eritelty vaadittujen parametrien mittaukseen hyväksytyt menetelmät.

Taulukko 8: Injektointiparametrien mittausmenetelmät suihkuinjektointistandardissa vaadituilta osin (SFS-EN 12715:2000, 35, SFS-EN 12716:2001, 21).

Parametri	Yksikkö	Mittauslaite/metelmä	Sovellus
Ulosvirtausaika (kartioviskositeetti)	[s]	Marsh-kartio (suppilon halkaisija = 4,75 mm), muut virtauskartiot (halkaisija = 8, 10, 12 mm)	laboratorio ja rakennuspaikka
Tiheys	[kg/m ³]	pyknometri laboratoriolasi Baroid-vaaka	laboratorio ja rakennuspaikka
Tihkumisnopeus, kerrostuminen	[%] tai [m ³ /m ³] 2 tunnissa	mittasylinteri	laboratorio ja rakennuspaikka
Sitoutumisaika	[s]	ylösalaisin käännetty laboratoriolasi, Vicat'n neula	laboratorio ja rakennuspaikka
Kovettuminen Muodonmuutos Lopullinen lujuus		yksiakiaalinen puristuskoee jännitys- venymän kirjauksella kolmiakiaalikoee, pistekuormituskokeet	laboratorio

Suomen Betoniyhdistys r.y. (2006) on laatinut ohjeet kalliotilojen injektointin laadunvalvonnalle. Vesisementtiseoksen laadunvarmistuskokeiden ohjeita voidaan noudattaa täydentäviltä osin myös suihkuinjektointin laadunvalvonnassa, sillä injektointiaineiden koostumukset vastaavat toisiaan ja ne perustuvat yhteisiin injektointi- ja testausmenetelmästandardeihin.

Ennakkokokeita käsittelevien ohjeiden mukaan laboratoriokokeissa käytettävän sekoittimen on oltava riittävän tehokas, jotta sillä saadaan aikaan kolloidityyppinen sekoitus. Alustavat kokeet tehdään kolme kertaa käyttäen joka kerta uutta sekoitusta. Tuloksista lasketaan keskiarvo ja keskihajonta. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 29.)

Ennakkokokeena tehtävällä Marsh-viskositeetin mittauksella määritetään työmaan laadunvalvonnan rajat Marsh-viskositeetin mittauksille. Vastaavasti tiheyden mittauksella määritetään laadunvalvonnan rajat tiheyden seurannalle. Vedenerottumisen mittauksella varmistetaan, että injektointimassa täyttää asetetut tiiveysvaatimukset. Sitoutumisajan mittauksella määritetään työmaan sitoutumisajan seurantaan varten odotettavissa olevat ajat. Jos käytössä on aikaisemmin tehtyjä, samoilla osa-aineilla, massaresepteillä ja samoissa olosuhteissa tehtyjä koetuloksia, voidaan näitä käyttää ennakkokokeiden sijasta. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 29–30.) Tyypillisiä injektointimassojen mittaustuloksia on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9: Tyypillisiä injektointimassojen ominaisuuksia (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 52).

Vesisementtisuhde (v/s)	2,0	1,0	0,8
Marsh-viskositeetti	32 s	35 s	40 s
Myötöraja	0,15 Pa	3 Pa	8 Pa
Viskositeetti	8 mPas	27 mPas	50 mPas
Vedenerottuminen*	15 %	2 %	1 %

* riippuu sementistä, taulukossa sementti Ultrafine 12

5.1.1. Marsh-viskositeetti

Ulosvirtausajan eli kartio- tai Marsh-viskositeetin mittauksessa lasketaan tilavuudeltaan määritelty nestemäinen sementti-injektointiaine mitoiltaan standardoidun suppilon läpi ja mitataan siihen kulunut aika. Koe suoritetaan alustavana kokeena ennen suihkuinjektointitöiden aloitusta sekä suihkuinjektointityön suorittamisen aikana päivittäin. (SFS-EN 14117:2004, 4, SFS-EN 12716:2001, 21.) Taulukossa 10 on listattuna kokeen suorittamiseen tarvittavat välineet.

Kuiva-aineiden ja veden lämpötila tulee valita siten, että injektointiseoksen lämpötila on sekoittamisen alussa +21 °C. Injektointiseos sekoitetaan valmistajan ohjeiden mukaisesti. Jos seosta tai sen osaa on tarpeen säilyttää tavanomaista pidempään ennen kokeen suorittamista, jäljellä olevan injektointiseoksen sekoittamista tulee jatkaa hitaalla nopeudella huolehtien haihtumisen minimoimisesta. (SFS-EN 14117:2004, 5.)

Taulukko 10: Ulosvirtausajan määrittämiseen tarvittavat mittausvälineet (SFS-EN 14117:2004, 4–5).

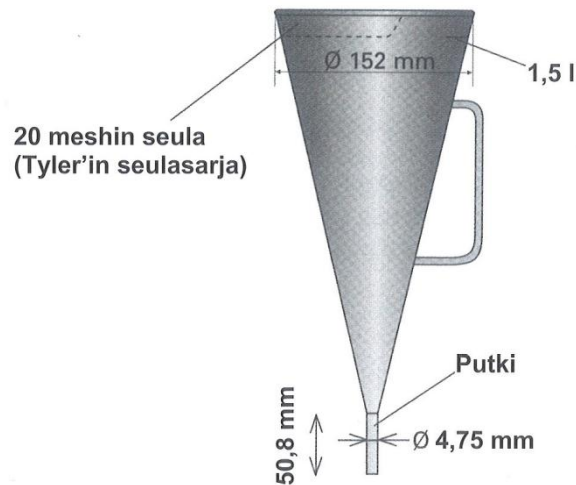
Väline	Vaatimukset/ominaisuudet
Marshin suppilo	Korroosion kestävää materiaalia Yläosassa puoliympyrän muotoinen siivilä, silmäkoko 2 mm Mitat standardin mukaiset
Kiinnitysvarsi	Suppilon kannattelemiseen tukevasti vaakatasossa 150 mm keräysastian yläpuolella
Keräysastia	Tilavuus vähintään 1000 ml, mittatarkkuus ± 10 ml.
Vesivaaka	Suppilon pystysuoruuden varmistamiseen
Kaadin	Tilavuus vähintään 1500 ml, tarkkuus ± 15 ml.
Sekuntikello	Tarkkuus 1 s.
Lämpömittari	Tarkkuus $\pm 0,5$ °C.
Sekoitin	Injektointiseoksen valmistusta varten

Koe suoritetaan +21 °C lämpötilassa. Ilman suhteellisen kosteuden tulisi olla n. 60 %. Suppilo kiinnitetään kiinnitysvarteen tiukasti siten, ettei se pääse värähtelemään. Suppilon yläreunan ja keräysastian vaakasuoruus tarkistetaan vesivaakan avulla. Suppilo täytetään vedellä, joka poistetaan suppilosta yhtä minuuttia ennen kokeen suorittamista. Suppilon pää tulpataan. Injektointiainetta kaadetaan suppiloon 1500 ml yläosassa sijaitsevan siivilän lävitse. (SFS-EN 14117:2004, 5.)

Sekuntikello käynnistetään samanaikaisesti kun tulppa poistetaan. Kello pysäytetään, kun 1000 ml injektointiseosta on läpäissyt suppilon. Laboratoriokokeissa mittaus suoritetaan kolmesti käyttäen jokaisella kerralla uutta sekoitusta. Ennen jokaista mittausta suppilon ja keräysastian tulee olla täysin puhtaita. Tuloksena saadaan ulosvirtausaika sekunteina. Tulokset kirjataan koeraporttiin. (SFS-EN 14117:2004, 5.)

Ulosvirtausajan laskennassa tulee ilmoittaa ilman lämpötila, injektointiaineen lämpötila, virtauskartion mitat, täyttökorkeus ja ulosvirtaustilavuus. Kartioviskositeetin arvo on viskositeetin ja koheesion funktio. Erilaiset viskositeetin ja myötörajan yhdistelmät saattavat johtaa samaan ulosvirtausaikaan. (SFS-EN 12715:2000, 36.) Suositeltava perusmassan Marsh-arvo on 32–35 sekuntia. Injektointityön ohessa mitatun arvon tulisi olla ± 2 sekuntia ennakkokokeiden perusteella määritetystä

arvosta. Ennen mittausta suppilo on tarkistettava mittaamalla ulosvirtausaika puhtaalla vedellä, jolloin arvon tulisi olla n. 28 sekuntia. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 29–33.)

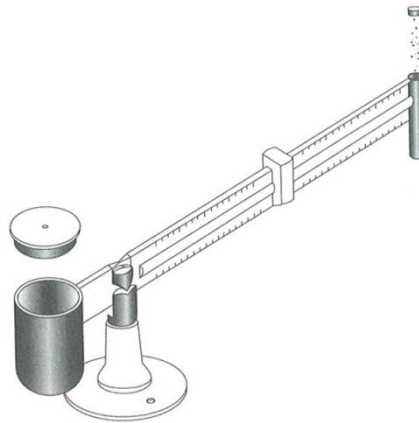


Kuva 19: Marsh-suppilo (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 33).

Marsh-suppilon puhtaudella on suuri merkitys mittaustulokseen. Jos suppiloa ei puhdisteta kunnolla mittauksen jälkeen, mitatut arvot ovat useita sekunteja suuremmat kuin puhtaalla suppilolla. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 33.) Marsh-suppilon standardinmukaiset mitat on esitetty kuvassa 19.

5.1.2. Tiheyden mittaaminen

Sementtipohjaisille injektointiaineille tehtävillä tiheyden mittauksilla varmistetaan, että veden ja sementin annostelulaitteet toimivat oikein ja että vesisementtisuhte on oikea (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 31). Tiheyttä voidaan mitata kuvassa 20 esitetyllä Baroid- eli lietevaaka'alla (engl. mud balance). Lietevaakaa käytetään poralietteiden tai sementtimassojen tiheyden tai painon määrittämiseen. Ennen mittauksia laite tulee kalibroida puhdistamalla se huolellisesti ja säätämällä vastapainoa. (Friedrich Leutert GmbH 2012, 2–3.)



Kuva 20: Tiheydenmittauslaite (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 32).

Menetelmässä laite asetetaan vaakatasoon. Lietekuppi täytetään sementtimassalla. Kupin päälle kierretään kansikappale, jossa olevasta reiästä ylimääräistä lietettä tulee hieman purkautua ulos. Vaa'an ulkopinnat puhdistetaan ja kuivataan. Varressa sijaitsevaa painoa säädetään siten, että laitteessa oleva vesivaaka näyttää varren olevan tasapainossa. Tuloksena laite näyttää lietteen tiheyden. (Friedrich Leutert GmbH 2012, 2–3.)

Mikäli mitattu arvo ei täytä vaatimuksia, massa hylätään. Vian tai virheen korjauksen jälkeen sekoitetaan uusi massa ja tehdään uusi tiheysmittaus. Tiheyden tulisi olla 50 kg/m^3 tarkkuudella ennakkokokeiden perusteella määritetty. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 32.)

Tavallisilla injektointimassoilla vesisementtisuhte v/s saadaan tiheydestä riittävällä tarkkuudella käyttämällä kaavaa (2).

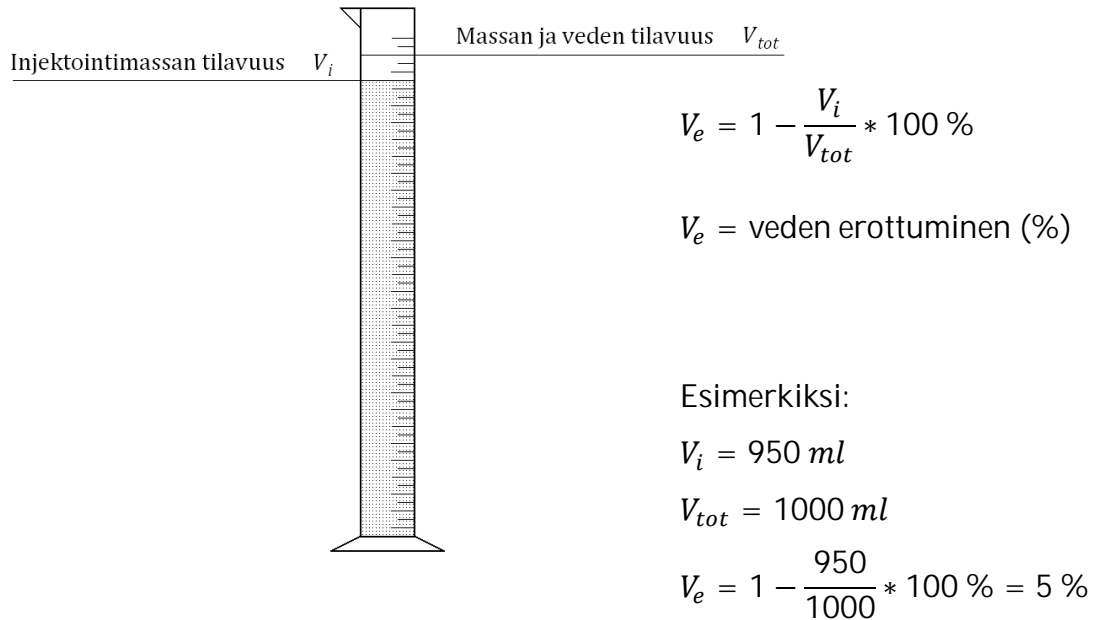
$$v/s = \frac{1}{\frac{6510}{3100 - \rho} - 3,1} \quad (2)$$

missä: ρ = mitattu tiheys kg/m^3 . (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 32.)

5.1.3. Tihkumisnopeus

Tihkumisnopeus eli sedimentaationopeus tulee määrittää säilyttämällä sementtimassaa kolme tuntia lieriössä, jonka tilavuus on 1000 ml ja sisähalkaisija

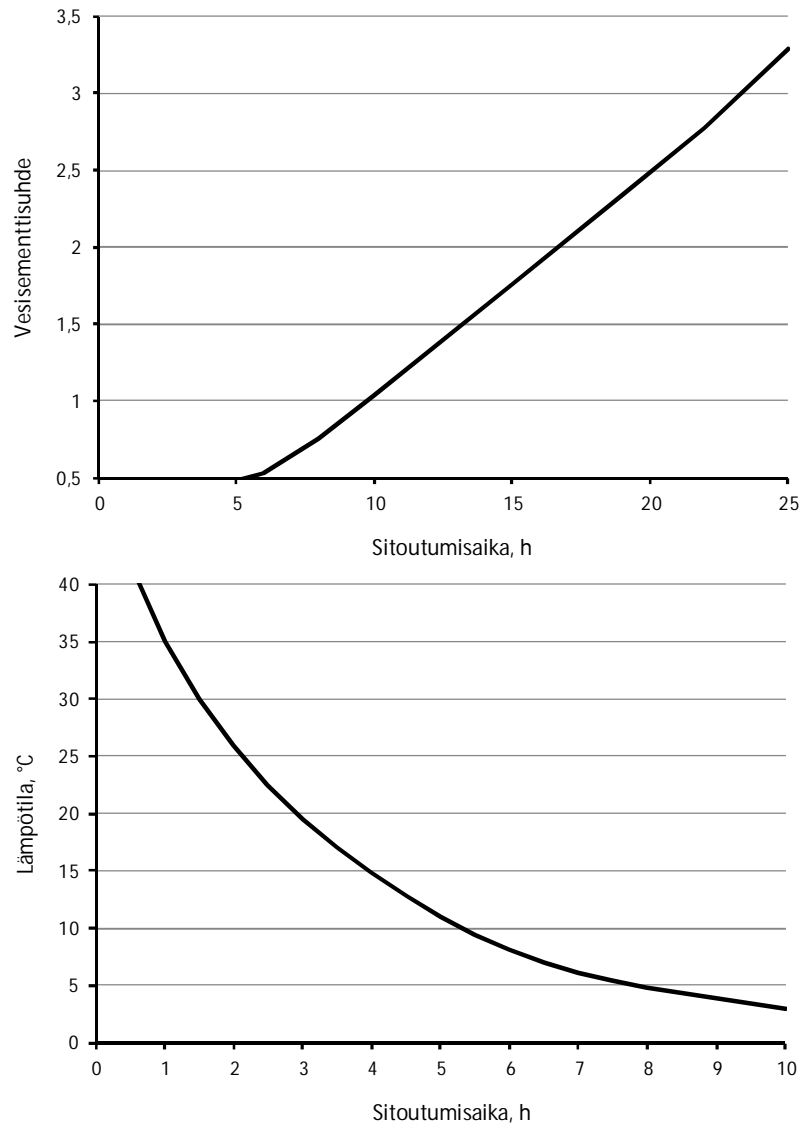
60 mm (SFS-EN 12716:2001, 21). Mittalasi asetetaan rauhalliseen, värinättömään paikkaan. Kolmen tunnin kuluttua mitataan mittalasisissa olevan aineen korkeus sekä massan pinnalle erottuneen vesikerroksen paksuus. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 34.) Vedenerottumisen mittaaminen esitetään kuvassa 21.



Kuva 21: Vedenerottumisen mittaaminen (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 35).

5.1.4. Sitoutumisaika

Sitoutumisaika riippuu sekä lämpötilasta että tilavuudesta kuvassa 22 esiteltujen kaavioiden mukaisesti. Injektointisovelluksen ja injektointiainetyypin perusteella käytetään erilaisia kokeita tämän ominaisuuden määrittelyyn. Koesylinteriä kallistetaan tai käännetään ja havainnoidaan, milloin injektointiaine ei enää käyttäydy nesteenä tai koeastiaa ravistetaan hieman, jotta nähdään, irtoaako injektointiaine reunoista. On myös mahdollista suorittaa alennettu tunkeumakoe esimerkiksi Vicat'n neulalla. Suunnittelussa tulee ilmoittaa käytettävät laitteet ja saavutettavat arvot. (SFS-EN 12715:2000, 36.) Suihkuinjektointistandardi ei erikseen määrittele sitoutumisajan mittaamiseen käytettävää menetelmää (SFS-EN 12716:2001, 21), joten edellä mainituista vaihtoehdoista voidaan valita työmaaolosuhteissa tilanteeseen parhaiten soveltuva koejärjestely.



Kuva 22: Periaatekuvaajat vesiseментtisuhteen ja lämpötilan vaikutuksista sitoutumisaikaan (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006, 53).

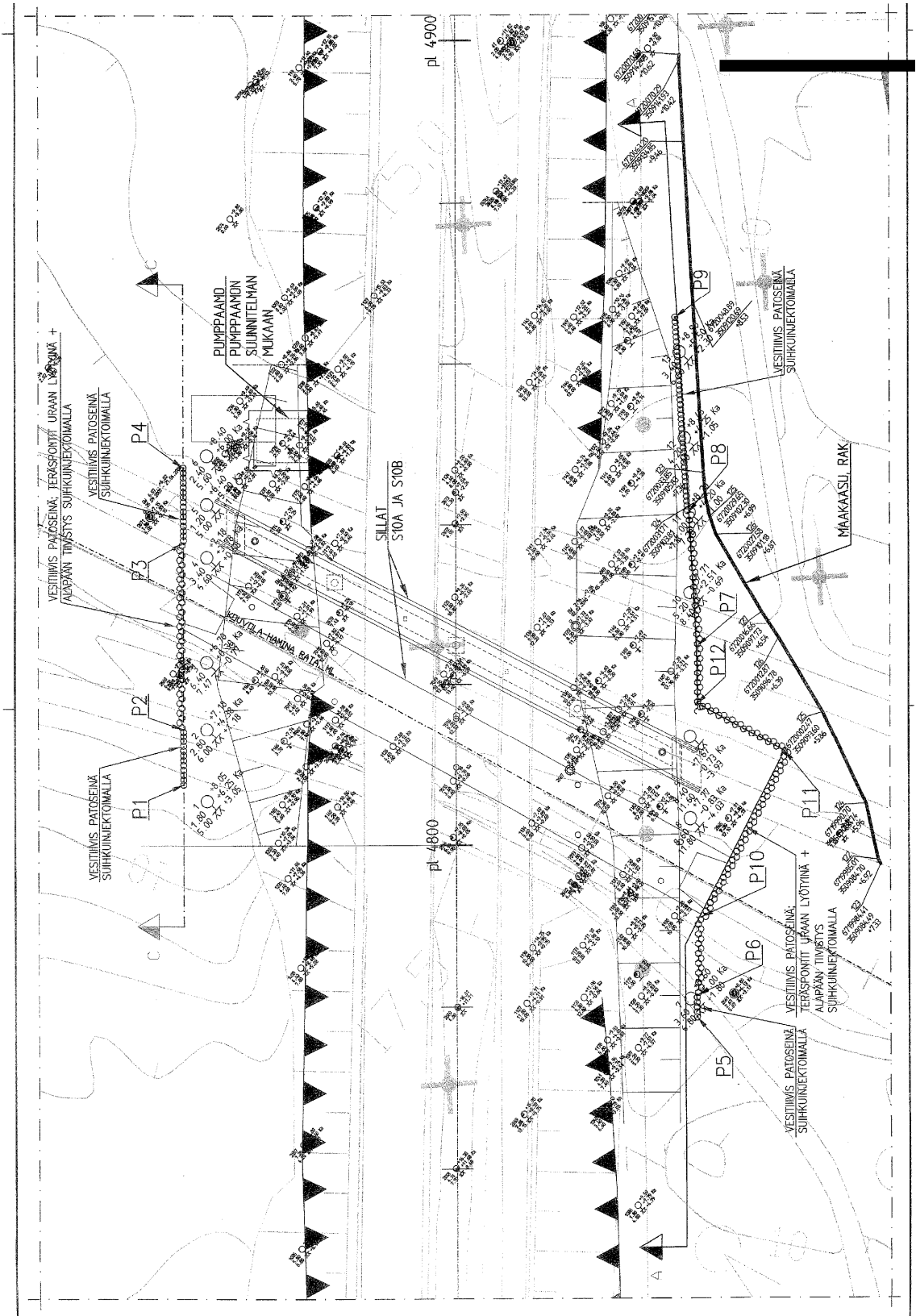
5.1.5. Puristuskokeet

Sementtimassalle suoritetaan lieriömäisten kappaleiden yksiakseliset puristuskokeet. Kovettumisen ja lopullisen lujuuden osalta tulee suunnittelussa määrittää testattavien näytteiden mitat ja koestusolosuhteet, kuten jännityksen kohdistamisen nopeus. (SFS-EN 12715:2000, 36.) Näytteiden korkeus-halkaisijasuhteen on oltava 2,0. Puristuskokeet tulee suorittaa 3, 7 ja 28 päivän kuluttua sekä 56 päivän kuluttua, jos käytetään hitaasti kovettuvia seoksia. (SFS-EN 12716:2001, 21.) Tyypillisesti näytteen halkaisija on 150 mm. Tarvittaessa mitoiltaan poikkeavan kappaleen puristuslujuustulos muunnetaan vastaamaan 150 mm kuution lujuutta.

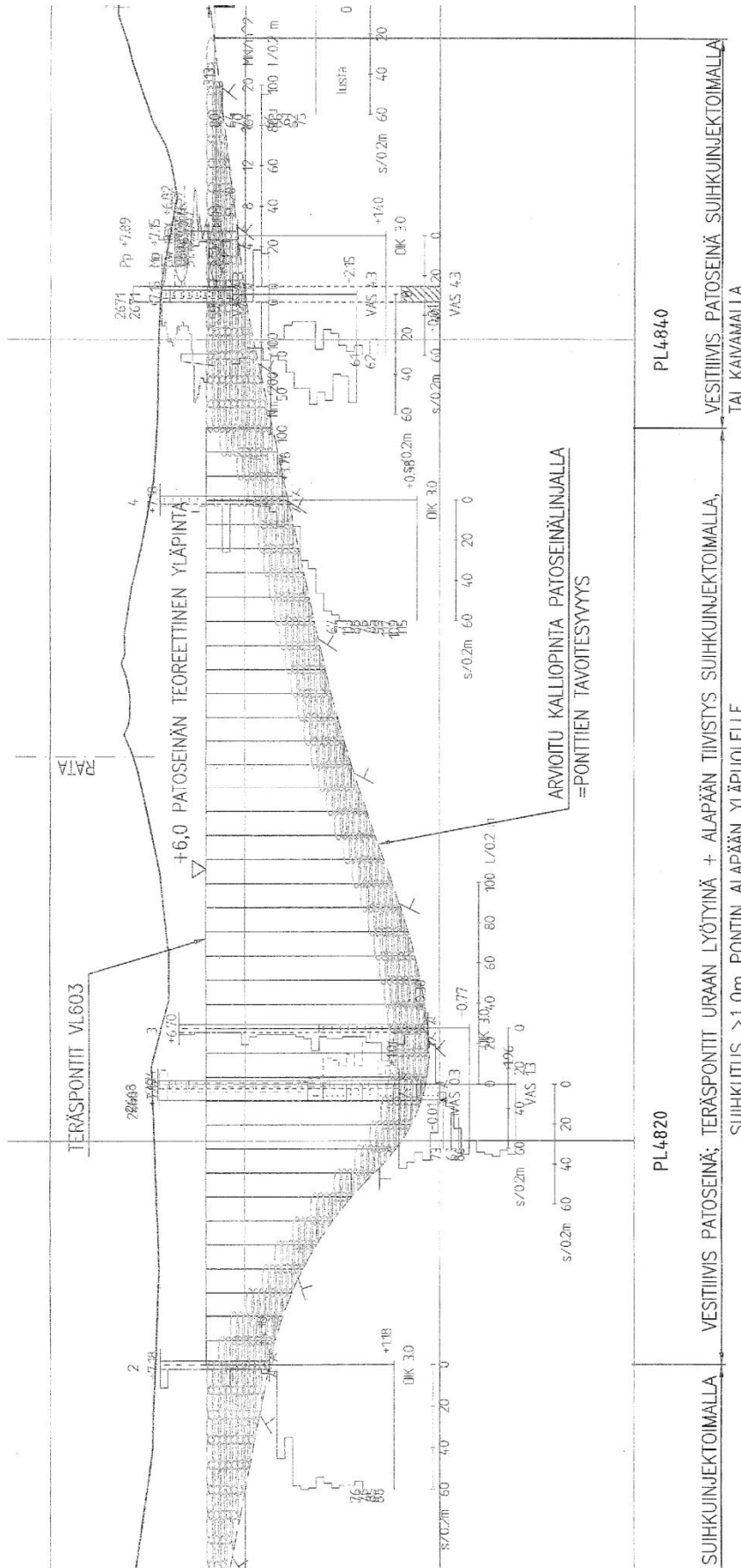
5.2. Koekohteen ja työmenetelmän esittely

Rakennuskohde oli Valtatie 7 (E18) parantaminen moottoritieksi Haminan kohdalla. Kohteen rakennuttaja oli Liikennevirasto ja päätoteuttajana toimi YIT Rakennus Oy:n ja Kesälahden Maansiirto Oy:n muodostama Työyhteenliittymä Haminan Kehä. Tutkimukseen liittyvät kokeet suoritettiin YIT Rakennus Oy:n toteuttaman suihkuinjektointialurakan yhteydessä. Urakan sisältönä oli kalliopintaan lyötyjen vesitiiviiden teräsponttiseinien juurten injektointi sekä ponttiseinien päädyissä olevien matalien seinäosuuksien patoseinien valmistaminen. Patoseinien tehtävä on padottaa ympäristön pohjavesien virtaaminen junaradan alittavaan moottoritieleikkaukseen ja estää pohjaveden aleneminen ympäristössä sekä työn aikana että pysyvässä tilanteessa. Kuvissa 23 ja 24 on esitelty työalueen kartta sekä rakenneleikkaus pohjoisesta patoseinästä. Koekohteen suihkuinjektointi suoritettiin pääosin maaliskuun 2013 aikana.

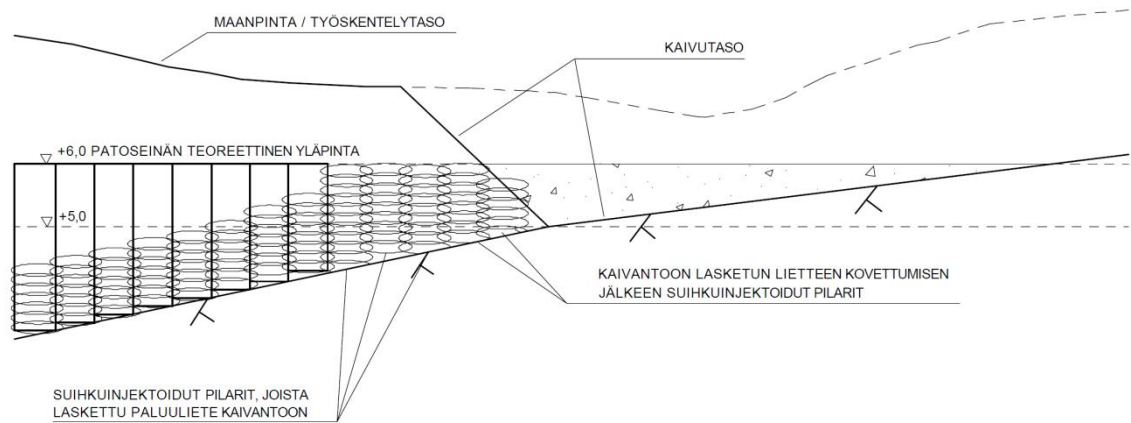
Suihkuinjektoituja pilareita valmistui yhteensä 204 kappaletta. Osa kohteessa syntyneestä paluulietteestä hyödynnettiin matalien, ponttiseinän molemmin puolin valmistettujen seinäosuuksien patoseinämateriaalina kuvan 25 mukaisesti. Pinnalle noussut liete ohjattiin ponttiseinän päädyissä kalliopintaan kaivettuihin kaivantoihin. Tuoreella lietteellä täyttynyt kaivanto on nähtävissä kuvassa 26. Lietteen jähmettymisen jälkeen suihkuinjektoitiin kaivannon ja teräsponttiseinän välinen alue. Lopputuloksena saavutettiin yhtenäinen patoseinärakenne, joka on nähtävissä kuvassa 27. Lietteen käyttö patoseinämateriaalina oli sallittua alueilla, joissa patoseinän korkeus on enintään yhden metrin. Kokonaisuudessaan lietteellä valmistettavaa patoseinää valmistui kahdella alueella yhteensä noin 10–15 metriä. Hyödynnetyn paluulietteen määrä oli arviolta noin 10 kuutiometriä.



Kuva 23: Työalueen kartta.



Kuva 24: Patoseinän rakenneleikkaus.



Kuva 25: Paluuvirtauslietteestä valmistetun patoseinäosuuden rakentaminen.

Pohjatutkimusten perusteella maalaji alueella oli vaihtelevaa. Ohuen pintakerroksen alla oli enintään neljän metrin vahvuinen savea ja savista liejua sisältävä kerros. Saven alla oli kalliota peittävä silttiä, hiekkaa, soraa ja kiviä sisältävä löyhä tai keskitiivis kittamaakerros. Suihkuinjektoitavien pilareiden pituudet vaihtelivat alueella yhden ja viiden metrin välillä. Kalliopinnan syvyys oli 2–10 metriä. Ilmaporauksessa ilmeni, että kallio oli ennakkotiedoista poiketen paikoitellen rikkonaista. Laadunvarmistustoimenpiteiksi oli määritelty suihkuinjektoimalla valmistettavien patoseinien esille kaivu ja silmämääräinen tarkastelu kahdesta kohdasta, kalliopinnan varmistusporaukset viidestä kohdasta sekä poraamalla otetun sydännäytteen yksiakksiaalinen puristuslujuuskoe.



Kuva 26: Tuoreella paluulietteellä täyttynyt kaivanto.

Suihkuinjektioinnissa käytettiin yksittäisjärjestelmää. Työjärjestyksenä käytettiin sekä tuore-tuore- että primaari-sekundaari -työjärjestystä. Osa suihkutetuista pilareista esileikattiin veden avulla ennen sementti-injektointia. Routaisesta maasta ja kallion rikkonaisuudesta johtuen kaikki suihkuinjektoitavat pisteet esiporattiin etukäteen ilmavasaralla ehjään kallioon saakka. Lietteestä valmistetun patoseinän vedenpitävyyden varmistamiseksi pohjalle jäänyt, kalliokontaktia heikentävä maa-aines sekoitettiin runkoaineeksi painamalla injektointiporakruunu kalliopintaan ja suihkuttamalla vesisementtiseosta nestemäisellä lietteellä täyttyneen kaivannon pohjalle. Suihkuinjektointi sekä ilmaporaukset suoritettiin 43 tonnin painoisella Zeppelinin ABI -poravaunulla. Suihkuinjektointiasema koostui kapasiteetiltaan 60 tonnin siilosta, Metaxin sekoitus- ja pumppuasemasta, korkeapainekompressorista, lisäpumpusta sekä n. 10 m³ vesisäiliöstä.



Kuva 27: Valmis patoseinäosuus.

5.3. Suihkuinjektointimassan ominaisuudet

Sementtiseoksen ominaisuuksia tutkittiin alustavien mittausten avulla vertailuarvojen saamiseksi ja koemenetelmiin tutustumiseksi ennen työmaan aloitusta. Mittaukset suoritettiin injektointistandardin mukaisilla menetelmillä, joita käytettiin myös työmaaolosuhteissa. Alustavissa mittauksissa ei mitattu kovettumista tai loppulujuutta.

Toteutetut mittaukset olivat:

- Tiheyden mittaaminen lietevaa'alla
- Ulosvirtausajan mittaaminen standardinmukaisella Marsh-kartiolla, kartion tilavuus 1500 ml, keräysastian tilavuus 1000 ml
- Tihkumisen eli vedenerottumisen mittaaminen säilyttämällä sideainesuspensiota 3 tuntia sylinterissä, jonka tilavuus on 1000 ml ja halkaisija 76 mm
- Sitoutumisajan mittaaminen kääntämällä mitta-astiaa 90 astetta ja havainnoimalla suspension käyttäytymistä.

Vesisementtiseoksen sideaineeksi valittiin Finnsementti Oy:n valmistama Plussementti, joka oli käytössä myös suihkunjektointikohteessa. Seoksen valmistamiseen käytettiin laastisekoitinta. Suihkuinjektointimassalle suoritettavien tutkimusten tulosten kirjaamista varten kehitettiin lomakepohja (liite 1), jota voidaan hyödyntää mittaustulosten systemaattiseen kirjaamiseen työmaolosuhteissa. Yhteen lomakkeeseen voidaan syöttää päivittäin suoritettavien kokeiden tulokset yhden työpäivän osalta.

Alustavat mittaukset suoritettiin lämpimässä teollisuushallissa (lämpötila +18 °C). Lietevaaka ja Marsh-suppilo kalibroitiin veden avulla ennen mittausten suorittamista. Jokaista koe-erää varten valmistettiin uusi injektointiaineseos. Annostelussa pyrittiin tiheydeltään vaihteleviin seossuhteisiin vertailupohjan saamiseksi. Koetulokset on lueteltu taulukossa 11.

Taulukko 11: Alustavien kokeiden tulokset.

Näyte	Tiheys [kg/m ³]	Vesisementti-suhde	Marsh-viskositeetti [s]	Veden-erottuminen	Sitoutumisaika
Vesi	1000	∞	27	-	-
1	1740	0,59	37	11 %	-
2	1640	0,74	60	2 %	-
3	1760	0,57	70	-	-
4	1600	0,81	35	16 %	8–24 h
5	1610	0,79	38	12 %	8–24 h
6	1620	0,77	36	4 %	8–24 h
7	1500	1,03	30	20 %	-
8	1380	1,46	28	28 %	-
9	1610	0,79	36	14 %	-

Näytteiden 2 ja 3 Marsh-viskositeetin mittaustulokset eivät ole vertailukelpoisia, sillä siivilään kerääntyi huomattavia määriä hiukkaskooltaan suuria sementtipartikkeleita, jotka estivät suspension tehokkaan läpipääsyn. Sementtisäkki oli varastoinnin aikana päässyt kosketuksiin kosteuden kanssa ja sementti oli osittain kovettunut. Sementti vaihdettiin kolmannen kokeen suorittamisen jälkeen.

Alustavien kokeiden lisäksi sideaineseokselle suoritettiin valmistusmenetelmältään, kalustoltaan ja olosuhteiltaan varsinaista injektointityötä vastaavat ennakkokokeet suihkuinjektointikohteessa ennen työn aloittamista. Ennakkokokeet suoritettiin kolmesta eri valmistuserästä. Ennakkokokeiden lisäksi sementtiseoksen laatua seurattiin työn edetessä. Mittauksiin käytettiin samoja välineitä kuin alustavissa kokeissa. Sementtiseoksen mittaustulokset esitetään taulukossa 12, jossa näytteet 1–3 kuvaavat ennakkokokeiden tuloksia ja näytteet 4–9 työnaikaisia mittaustuloksia.

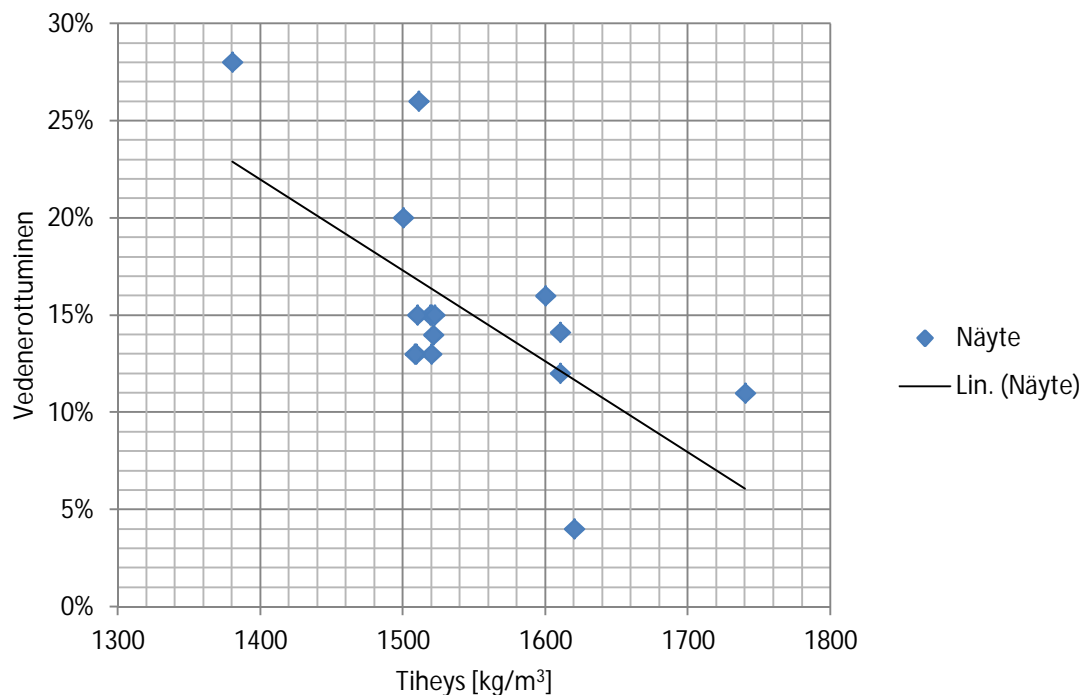
Taulukko 12: Sementtiseoksen mittaustulokset.

Näyte	Päivä-määrä	Tiheys [kg/m ³]	Vesi-sementti-suhde	Näytteen lämpötila [°C]	Marsh-viskositeetti [s]	Vedenerottuminen [%]	Sitoutumisaika [h]
1	6.3.2013	1510	1,00	10	31	26 %	6–18 h
2	6.3.2013	1520	0,98	10	31	14 %	6–18 h
3	6.3.2013	1520	0,98	9	31	15 %	6–18 h
4	7.3.2013	1510	0,98	6	32	13 %	-
5	11.3.2013	1520	0,98	10	31	15 %	6–16 h
6	12.3.2013	1510	1,00	11	31	15 %	6–16 h
7	13.3.2013	1520	0,98	10	32	13 %	6–16 h
8	14.3.2013	1520	0,98	14	32	15 %	6–16 h
9	21.3.2013	1510	1,00	12	32	13 %	-

Marsh-kokeet suoritettiin suihkuinjektointiasemalla, jotta koe saatiin suoritettua välittömästi sekoittamisen jälkeen. Vedenerottumisen ja sitoutumisajan mitta-astioita säilytettiin tärinättömässä tilassa +21 °C:n lämpötilassa. Tiheys mitattiin suihkuinjektointiasemalla Marsh-kokeen yhteydessä. Sitoutumisajan tarkka mittaaminen oli haastavaa ympärivuorokautisen seurannan puuttuessa.

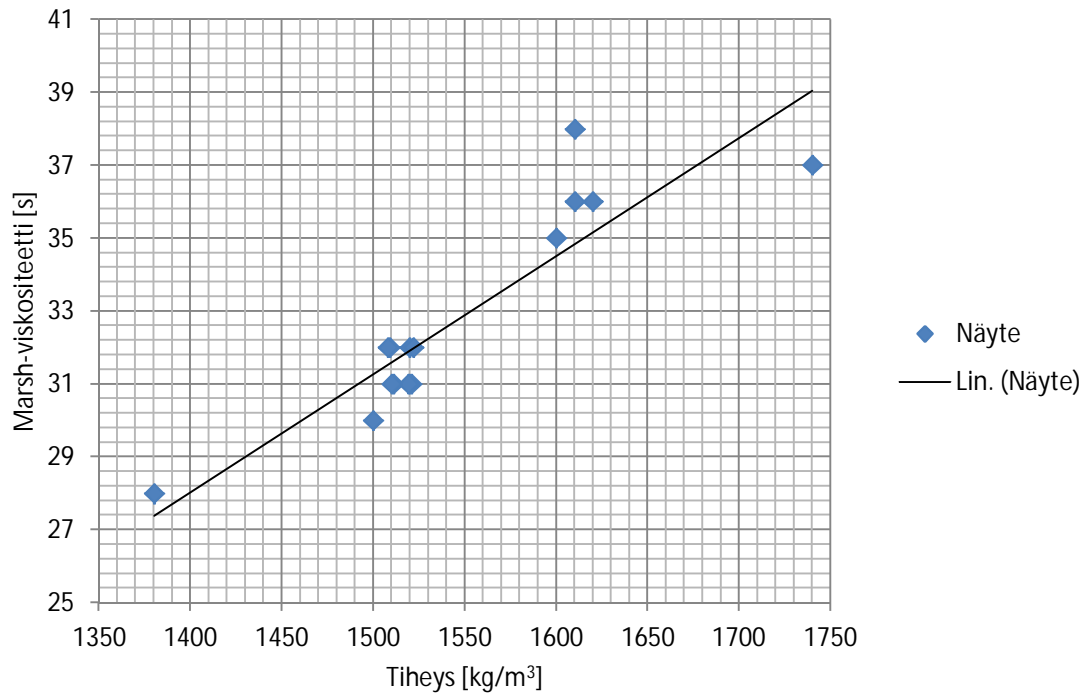
Työkohteessa suoritettujen tiheyden mittausten keskiarvoksi saatiin 1516 kg/m³ ja keskihajonnaksi 4,97 kg/m³. Vedenerottumisen keskiarvoksi saatiin 15 % ja

keskihajonnaksi 3,83 prosenttiyksikköä. Marsh-viskositeetin keskiarvo on 31,4 sekuntia ja keskihajonta 0,50 sekuntia. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että injektointiaineseos on ollut tasalaatuista koko suihkuinjektointityön ajan. Marsh-viskositeetin arvot noudattelevat Suomen Betoniyhdistyksen suositusarvoja. Massan tiheys on pysytellyt työn ajan sallitun poikkeaman 50 kg/m³ sisällä. Sitoutumisaikaa mitatessa havaittiin, että kuuden tunnin ikäinen seos oli jokaisessa mittauksessa jo osittain sitoutunutta. Alle vuorokauden ikäisenä seos oli täysin kovettunutta.



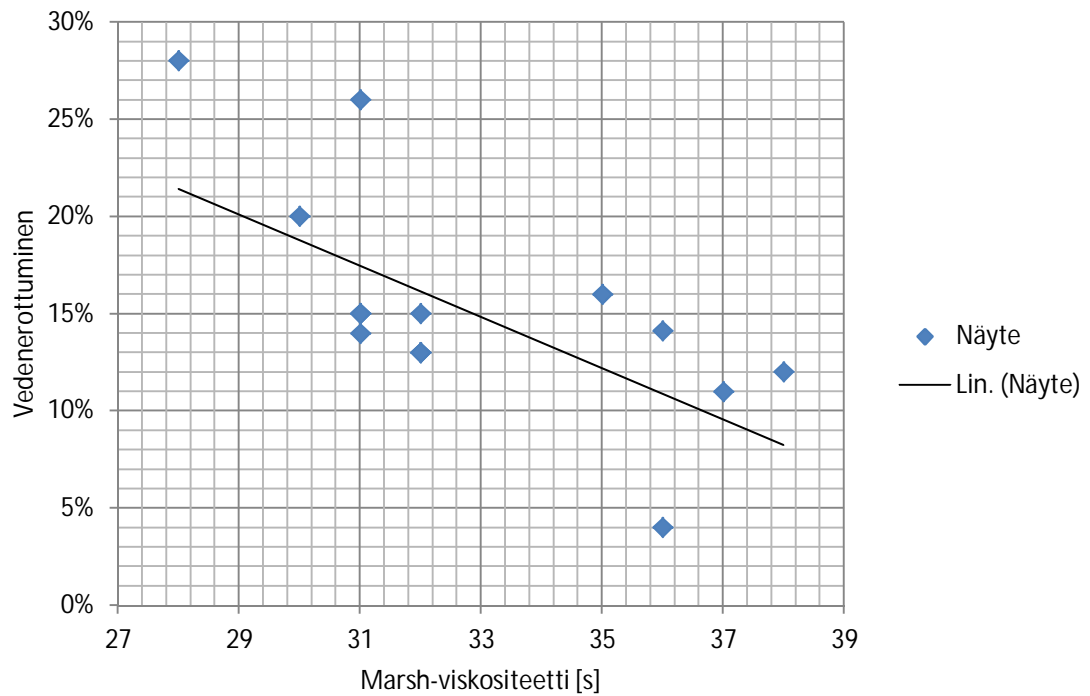
Kuva 28: Vesisementtiseoksen tiheyden ja vedenerottumisen välinen korrelaatio.

Kuvaan 28 on koottu vesisementtiseoksen tiheyden ja vedenerottumisen mittaustulokset sekä alustavista kokeista että työkohteesta. Tiheyden ja vedenerottumisen väliseksi korrelaatiokertoimeksi saadaan -0,69, mikä viittaa lineaarisen riippuvuuden olemassaoloon. Kuvassa 29 on vastaavasti esitetty vesisementtiseoksen tiheyden ja Marsh-viskositeetin tulosten välinen korrelaatio. Korrelaatiokertoimeksi saatiin 0,90, minkä perusteella voidaan todeta, että vahva lineaarinen riippuvuus vesisementtiseoksen tiheyden ja Marsh-viskositeetin välillä on olemassa.



Kuva 29: Vesisementtiseoksen tiheyden ja Marsh-viskositeetin välinen korrelaatio.

Kuvassa 30 on edelleen esitetty korrelaatio vesisementtiseoksen Marsh-viskositeetin ja vedenerottumisen välillä. Korrelaatiokertoimeksi saatiin $-0,66$. Suspension tiheys, Marsh-viskositeetti ja vedenerottuminen vaikuttavat kaikki siis korreloivan keskenään.



Kuva 30: Vesisementtiseoksen vedenerottumisen ja Marsh-viskositeetin välinen korrelaatio.

5.4. Nestemäisen paluulietteen ominaisuudet

Nestemäisestä paluulietteestä otettiin yhteensä 11 näytettä, joista seurattiin tiheyttä ja sitoutumisaikaa. Lisäksi patoseinän materiaaliksi lasketusta lietteestä (näytteet 4–6) mitattiin myös vedenerottuminen. Taulukossa 13 on esitetty lietekokeiden tulokset.

Taulukko 13: Nestemäiselle paluulietteelle suoritetut mittaukset.

Näyte	Tiheys [kg/m ³]	Sitoutumisaika	Veden- erottuminen
1	1990	6–18 h	-
2	1840	-	-
3	1500	< 14 h	-
4	1680	< 6 h	20 %
5	1620	< 4 h	17 %
6	1580	4–6 h	22 %
7	1720	6–18 h	-
8	1600	6–18 h	-
9	1780	6–18 h	-
10	1810	6–18 h	-
11	1670	6–18 h	-

Lietenäytteiden tiheys vaihteli 1500 ja 1990 kg/m³ välillä. Patoseinään laskettu liete oli pääosin peräisin ponttiseinän päädyissä sijaitsevista pitkistä suihkuinjektointipilareista, joista mitattujen kolmen lietenäytteen tiheys vaihteli 1580 ja 1680 kg/m³ välillä. Kaikkien lietenäytteiden tiheyden keskiarvo oli 1708 kg/m³ ja keskihajonta 139 kg/m³.

Sitoutumisaika oli pääosin 6–18 tuntia. Kaikki patoseinään lasketusta lietteestä otetut näytteet sitoutuivat alle kuudessa tunnissa. Tiheyden vaikutusta sitoutumisaikaan ei sitoutumisajan mittaustavan epätarkkuuden vuoksi voida tämän tutkimuksen perusteella päätellä luotettavasti.

5.5. Koekappaleiden puristuslujuustulokset

Yksiaksiaalisia puristuslujuuskokeita suoritettiin yhteensä seitsemälle koekappaleelle. Injektointiaineesta valettiin kaksi lieriötä, joille tehtiin puristuslujuuden mittaus 14 ja 28 vuorokauden iässä. Päätyalueiden patoseiniin lasketusta paluulietteestä otettiin kaksi näyte-erää, joista valetuista neljästä lieriöstä mitattiin lujuudet 14 ja 28 päivän

kuluttua. Lisäksi suihkuinjektoimalla valmistetusta patoseinästä porattiin noin yhden metrin syvyydeltä halkaisijaltaan 115 mm vaakasuora timanttinäyte, jonka lujuus mitattiin 28 päivän ikäisenä. Kuvassa 31 esitetyssä sydännäytteessä on selvästi näkyvissä, että suihkuinjektioinnin alueella on ollut huomattavan paljon runkoaineeksi sopivan kokoista kiviainesta. Valetut koekappaleet olivat halkaisijaltaan noin 110 mm ja koestettujen kappaleiden pituus-halkaisija-suhde oli 1:1. Betonikappaleiden koetuksen suoritti Contesta Oy:n Vantaan betonilaboratorio, joka on Suomen Rakentamismääräyskokoelman mukainen hyväksytty testauslaitos (Contesta 2013).



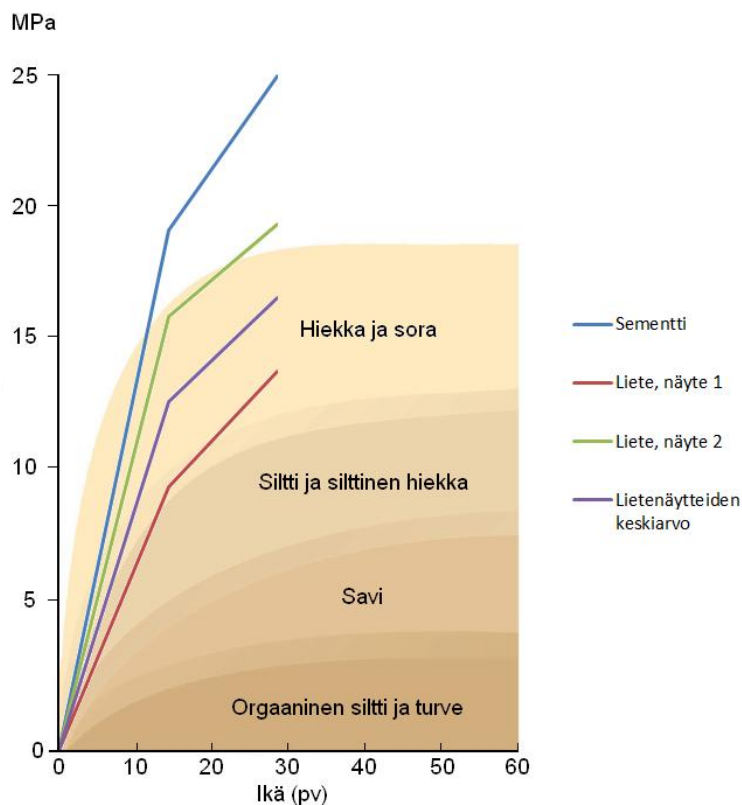
Kuva 31: Valunäytteet ja poranäyte ennen puristuskokeiden suorittamista.

Puristuslujuuskokeiden vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi tulee lieriöiden murtolujuus muuttua 150 mm:n kuutiota vastaavaksi. Kun lieriöiden halkaisija on 100...150 mm, kerrotaan yksittäinen lujuustulos luvulla 1,05. (Suomen Betoniyhdistys 2005a, 150.) Puristuslujuuskokeiden tulokset on koottu taulukkoon 14.

Taulukko 14: Puristuslujuuskokeiden tulokset.

Koekappale	Muunnettu puristuslujuus 14 d [Mpa]	Muunnettu puristuslujuus 28 d [Mpa]	Tiheys [kg/m ³]
Poranäyte 1	-	18,9	2240
Sementti	19,2	24,9	1665
Liete 1	9,7	14,0	1720
Liete 2	16,0	19,4	1750

Tutkimuksessa valettujen koekappaleiden lujuudenkehitys on esitetty kuvassa 32. Lietteestä valettujen koekappaleiden puristuslujuudet ovat selvästi korkeammat kuin pohjatutkimustiedoissa ilmoitetulle maalajille on tyypillistä. Mahdollisia syitä voivat olla tavanomaista suurempi käytetty sementtimäärä tai pohjaolosuhteiden poikkeaminen ennakkotiedoista.



Kuva 32: Työkohteessa valettujen koekappaleiden lujuudenkehitys. Vertailupohjana suihkuinjektoidujen pilareiden keskimääräiset puristuslujuudet eri maalajeissa (Burke 2009, 52).

6. Yhteenveto ja johtopäätökset

Suihkuinjektointimenetelmällä voidaan valmistaa työmaaolosuhteissa maa-aineksesta ja sementistä koostuvia matalalajuuksisia betonipilareita. Menetelmän yksi haittapuolista on injektointityön ohessa maan pinnalle porareikää pitkin nouseva paluuvirtausliete. Suihkuinjektointilietteen käsittely ja loppusijoitus on työlästä ja kasvattaa suihkuinjektointityön kokonaiskustannuksia. Tällä hetkellä paluulietteen hyödyntäminen on hankalaa ja liete on tyypillisesti kuljetettu kaatopaikalle. Tässä diplomityössä tarkasteltiin kolmea eri kehittämisvaihtoehtoa paluuvirtauslietteen käsittelylle.

Ensimmäisenä vaihtoehtona tutkittiin kovettuneen paluulietteen hyödyntämistä betonimurskeen valmistamisessa ja selvitettiin, millä edellytyksillä murskaustoiminnan aloittaminen yrityksen omana tuotantona olisi mahdollista. Lainsäädännön puitteissa betonimurskeen valmistaminen paluulietteestä ja hyödyntäminen penkereissä ja jakavassa kerroksessa on mahdollista. Suurimmat haasteet liittyvät riittävän suuren alueen hankkimiseen sijainniltaan sopivalta alueelta sekä ympäristöluvan saamiseen murskaustoiminnalle. Myös työmaiden jatkuvuuteen liittyvä epävarmuus voi vaikuttaa toiminnan kannattavuuteen.

Laki mahdollistaa koeluontoisen jätteenkäsittelyn ilman ympäristölupaa. Murskauksen kannattavuutta voitaisiin tutkia YIT:n hallussa olevilla tonteilla ilman raskaita lupakäytäntöjä. Esimerkiksi kiviainesten louhinnassa ja murskauksessa käytetyn Tikkurilan K3-alueen soveltuvuutta kokeellisena lietteen jatkokäsittelyalueena voidaan tulevaisuudessa harkita kiviainestoiminnan hiljentyessä. Omaperustaisen tuotannon aloittamisen sijaan voidaan harkita myös yhteistyön tiivistämistä nykyisten betonimurskeen toimittajien kanssa. Paluulietettä edelleen tutkimalla voidaan etsiä keinoa parantaa sitoutuneen lietteen lujuutta, vähentää vesipitoisuutta tai muuten varmistua lietteen riittävästä materiaaliominaisuuksista, jolloin lietteen vastaanottamisesta tulisi houkuttelevampaa.

Toisena vaihtoehtona tutkittiin bentoniittilietteen erotteluun suunniteltujen laitteistojen soveltuvuutta suihkuinjektoinnissa syntyvän paluulietteen käsittelyyn. Laitteistokokonaisuuksien muodostamiseksi on useita eri vaihtoehtoja. Suurimpia

epävarmuustekijöitä ovat hiekanerotuslaitteistojen seulantakyvyn riittävyys, laitteistojen korkea hankintahinta sekä järjestelmien vikaherkkyys. Suhteessa mahdollisesti saavutettaviin etuihin yksinkertaisimmalta vaihtoehdolta vaikuttaa järjestelmä, jossa liete seulotaan ja kierrätetään uudelleenkäyttöä varten esileikkausvaiheessa. Kyseisessä järjestelmässä ei vaadita kalliin ja herkästi vaurioituvan dekantterilingon hankintaa. Lisäksi laitevalmistajalla on lupaavia kokemuksia järjestelmän käytöstä työmaaolosuhteissa. Järjestelmän liittäminen nykyisin käytettävän esileikkausmenetelmän yhteyteen pienin muutoksin lienee mahdollista.

Lietteen hyödyntäminen esileikkausvaiheessa vaatii jatkotutkimuksia ennen mahdollista käyttöönottoa. Seulojen tehokkuus tulee varmistaa, sillä injektointisuutinten tukkeutuminen on kokonaisvaikutuksiltaan merkittävä järjestelmään liittyvä riski. Lisäksi lietteen koneellinen käsittely lisää miestyötä suihkuinjektointiasemalla ja mahdolliset häiriöt esileikkauslietteen käsittelyssä hidastavat suihkutustyötä. Mikäli edellä mainitut haasteet saadaan selvitettyä, lietteenkäsittelylaitteiston käytöllä voi olla mahdollista saavuttaa kustannussäästöjä. Laitteistojen kehittymistä kannattaa seurata aktiivisesti tulevaisuudessa.

Kokeellisessa osiossa tutkittiin eri mittausmenetelmin paluulietteen soveltuvuutta patoseinämateriaaliksi. Mittaukset suoritettiin suihkuinjektointityömaalla Haminassa. Lietteellä valmistetulle patoseinälle saatiin lupaavia mittaustuloksia. Paluulietteen sitoutuminen ja kovettuminen oli nopeaa talviolosuhteista riippumatta. Lietteestä valetuille kappaleille suoritettujen puristuslujuuskokeiden perusteella patoseinän lujuus on korkeampi kuin pohjatutkimusten perusteella oletetulle maalajille on tyypillistä. Myös alueelle suihkuinjektoidut pilarit ovat poranäytteen perusteella olleet lujuudeltaan tavanomaista korkeammat. Alueella myöhemmin suoritettavat kaivutyöt paljastavat, onko maaperä patoseinän alueella ollut mahdollisesti ennakkotiedoista poikkeavaa. Vedenerottumiskokeiden tulosten perusteella lietteellä valmistetun seinän vedenpitävyys on samaa luokkaa suihkuinjektoidujen elementtien kanssa.

Tutkimuksessa löydettiin korrelaatio vesisementtiseoksen tiheyden, vedenerottumisen ja Marsh-viskositeetin välille. Tiheydeltään matalat seokset läpäisivät Marsh-kartion

keskimäärin lyhyemmässä ajassa, mutta niiden pinnalle erottui enemmän vettä kuin tiheydeltään korkeissa seoksissa. Selityksenä voidaan pitää tiheyden suoraa verrannollisuutta seoksen vesipitoisuuteen. Seossuhteen laimentaminen parantaa juoksevuuutta, mutta massaan lisätty, hydrataatioprosessin kannalta ylimääräinen vesi ei lopullisesti sitoudu sementtimassaan, vaan nousee pintaan sekoittamisen loputtua.

Lietteen hyödyntäminen matalissa patoseinissä ja muissakin vastaavissa rakenteissa voi olla tilanteesta riippuen kannattavaa ja urakoitsijan kannattaa selvittää yhteistyössä tilaajan ja suunnittelijoiden kanssa mahdollisuudet lietteen käytölle. Tutkimus osoittaa, että parhaimmillaan paluulietteestä valetut elementit vastaavat lujuudeltaan suihkuinjektoitavia elementtejä. Saadut tulokset kuvastavat kuitenkin vain yhdellä alueella, tietyssä maaperässä ja tietyllä menetelmällä saatuja tuloksia. Tekniikan soveltaminen erilaisissa maaperäolosuhteissa vaatii lisätutkimuksia. Tässä työssä ei myöskään selvitetty kaivamalla tehtävän patoseinän ja kalliopinnan kontaktin laatua. Ennen tarkempia tutkimuksia lietteen käyttöä kannattaneekin harkita lähinnä matalissa patoseinissä, joissa vedenpaine ei pääse kasvamaan liian korkeaksi ja joissa mahdolliset vuotokohdat voidaan tarvittaessa kaivaa esiin tiivistämistä varten.

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää paluulietteelle vaihtoehtoisia loppusijoituspaikkoja ja hyödyntämismenetelmiä sekä tutkia lupaavimmilta vaikuttavien vaihtoehtojen soveltamismahdollisuuksia. Tutkimuksen tavoite pääosin saavutettiin. Työssä löydettiin uusia vaihtoehtoja paluuvirtauslietteen loppusijoitukselle ja mahdollisuudet eri menetelmien soveltamiseen selvitettiin. Tämän tutkimuksen tuloksena ei löytynyt kuitenkaan uutta hyödyntämismenetelmää, joka olisi ilman lisätutkimuksia tai lisäselvityksiä teknisesti tai taloudellisesti kannattavaa ottaa tällä hetkellä laajamittaisesti käyttöön.

Lähdeluettelo

Kirjallisuuslähteet:

Alasaarela, E., Pajukallio, A-M. & Wahlström, M. 2011. Maarakentamisen uusiomateriaalit. Helsinki: Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön raportteja 11/2011.

Beca Carter Hollings & Ferner Ltd. 2004. The Use of Flocculants and Coagulants to Aid the Settlement of Suspended Sediment in Earthworks Runoff – Trials, Methodology and Design. Technical Publication No. 227. Auckland, Uusi Seelanti: Auckland Regional Council.

Burke, G. 2004. Jet Grouting Systems: Advantages and Disadvantages. Geotechnical Special Publication No. 124. Teoksessa: GeoSupport 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems. American Society of Civil Engineers, 875–886.

Burke, G. 2009. Quality Control Considerations for Jet Grouting. The Groutline 12/2009, 49–53.

Collins, N. 2011. Support and sealing at the toe of a retaining wall extending to bedrock: theory and practice. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.

Drooff, E., Furth, A. & Scarborough, J. 1995. Jet Grouting to Support Historic Buildings. Teoksessa: Foundation Upgrading and Repair For Infrastructure Improvement Proceedings. San Diego, Kalifornia, USA. American Society of Civil Engineers.

Eerola, M., Forsman, J., Jokirinta, J., Juvankoski, M., Kivekäs, L., Leppänen, M., Markkanen, P., Määttänen, A. & Pekkala, J. 2000. Betonimurske kadun päällysrakenteessa 2000. Helsinki: Suomen Kuntaliitto.

Enne, J. 2011. Suihkuinjektointi, parametrit eri maaperäolosuhteissa ja laadunvalvonta. AMK-opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu.

Havinen, A. 2003. Geofysikaalisten mittausmenetelmien soveltuminen suihkuinjektoidun pilarin laadunvalvontaan. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.

Jätelaki. 2011. L 17.6.2011/646.

Laki eräiden rakennustuotteiden tuotehyväksynnästä. 2012. L 21.12.2012/954.

Mitrofanov, V. 2009. Uuden suihkuinjektointikaluston käyttöönotto. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.

Pykälämäki, M. 2012. Suihkuinjektointilietteen käsittelyn kehittäminen. Opinnäyte. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Rakennustietosäätiö RTS. 2006. InfraRYL 2006: Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 1: Väylät ja alueet. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Ranin, L. 2009. Junaratojen vahvistus suihkuinjektoinnilla. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.

Riikonen, M. 2012. Suihkuinjektointimenetelmä. Kandidaatintyö. Aalto-yliopisto.

Ronkainen, N. 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Salonen, S. & Salminen, E. 2003. Kaatopaikoille sijoittamista koskevat rajoitukset - nestemäisen jätteen sijoituskielto. Helsinki: Ympäristöministeriö.

SFS 5884. Betonimurskeen maarakennuskäytön laadunhallintajärjestelmä. (5884:2001). 2001. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS.

SFS-EN 12715: Pohjarakennustyöt. Injektointi. (12715:2000). 2001. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS.

SFS-EN 12716. Pohjarakennustyöt. Suihkuinjektointi. (12716:2001). 2001. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS.

SFS-EN 14117. Betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineet ja niiden yhdistelmät. Testausmenetelmät. Sementtipohjaisen injektointilaastin viskositeetin määrittäminen. (14117:2004). 2004. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS.

Suomalainen, O. 2012. Maa-ainesten hyötykäyttömenetelmät. AMK-opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005a. BY 50 Betoninormit 2004. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

Suomen Betoniyhdistys r.y. 2005b. BY 201 Betonitekniikan oppikirja 2004. 5. painos. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006. BY 53 Kalliotilojen injektointi 2006. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 1995. Betonityöohjeet.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 2006. Pohjarakennusohjeet. 3.painos.

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. 2006. VNa 28.6.2006/591 muutoksineen.

Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista. 1997. VNp 4.9.1997/861 muutoksineen.

Ympäristönsuojelulaki. 2000. L 4.2.2000/86 muutoksineen.

Verkkolähteet:

Bauer Maschinen GmbH. 2008. BD50 Decanter. Viitattu 24.1.2013.

http://www.bauer.de/export/shared/pdf/bma/products/905_567_1.pdf

Bauer Maschinen GmbH. 2012. BE Desander Systems. Viitattu 24.1.2013.

https://www.bauer.de/export/shared/pdf/bma/products/BE_gesamt_DE-EN_905-503-1_5-12.pdf

Bauer Maschinen GmbH. 2013. Desilter. Viitattu 24.1.2013. <https://www.bauer.de/>

Casagrande. 2013. The range of our product. Viitattu 24.1.2013.

<http://www.casagrandegroup.com/>

Choi, R. 2005. Review of the Jet Grouting Method. Opinnäytetyö. Viitattu 24.1.2013.

http://eprints.usq.edu.au/2236/1/CHOI_RichardFunYiu-2005.pdf

Contesta Oy. 2013. Viitattu 9.4.2013. <http://www.contesta.fi/>

Finnsementti Oy. 2004. Käyttöturvallisuustiedote. Viitattu 24.1.2013.

http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/jarrupar_ktt.pdf

Finnsementti Oy. 2008. Jarru-Parmix. Viitattu 24.1.2013.

http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/jarru-parmix_1_19112012_165403.pdf

Finnsementti Oy. 2012. Yleissementti. Viitattu: 24.1.2013.

http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/yleissementti_1_29112012_163338.pdf

Geoinvest d.o.o. 2013. Jet-grouting. Viitattu: 30.1.2013. <http://www.geoinvest.si/>

George C. Hawley & Associates. 2012. Particle Size Conversions. Viitattu 24.1.2013.

<http://www.geohawleyminerals.com/>

Friedrich Leutert GmbH & Co. KG. 2012. Mud Balance Product Information. Viitattu

8.2.2013. http://www.leutert.com/docs/cement/download/en/pi_mud-balance_en.pdf

Hayward Baker. 2004. Jet Grouting. Viitattu 14.1.2013.

<http://www.haywardbaker.com/>

Hayward Baker. 2013. Slurry Walls. Viitattu 24.1.2013.

<http://www.haywardbaker.com/>

MAT Mischanlagentechnik GmbH. 2010. Complete Programme. Viitattu 25.1.2013.

http://www.mat-oa.de/export/sites/www.mat-oa.de/pdf/mat_download.pdf

Rudus Oy. 2008. Betoroc-murskeohje. Viitattu: 24.1.2013.

www.rudus.fi/Download/24254/Betoroc-ohje.pdf

Rudus Oy. 2013. Betonimurskeiden laadunhallinta. Viitattu 24.1.2013.

<http://www.rudus.fi/tuotteet/kierratys/betorocmurskeet/laadunhallinta>

Soilmec. 2010. Ancillaries Equipment. Viitattu 24.1.2013. <http://soilmec.com/>

Suomen Standardisoimisliitto SFS r.y. 2011. CE-merkintä rakennustuotteisiin 2013 mennessä. Viitattu 4.2.2013. <http://www.sfs.fi/files/307/ce-merkinta2013.pdf>

Haastattelut:

Heikkilä, Esa. 2013. Tuotekehityspäällikkö. Finnsementti Oy. Skräbbölenie 18, 21600 Parainen. Puhelinhaastattelu 24.1.2013.

Nissi, Jouko. 2013. Kalustopäällikkö. YIT Kalusto Oy. Viinikankaari 11, 01530 Vantaa. Puhelinhaastattelu 22.1.2013.

Ostermeier, Kurt. 2013. Leiter Produktmanagement Misch- und Trenntechnik. Bauer Maschinen GmbH. Wittelsbacherstrasse 5, BAUER-Str. 1, 86529 Schrobenhausen, Deutschland. Sähköpostihaastattelu 24.1.2013.

Pieksemä, Jani. 2013. Tuotepäällikkö. Rudus Oy. Pronssitie 1, PL 49, 00441 Helsinki. Puhelinhaastattelu 2.1.2013.

Raappana, Petri. 2013. Kalustopäällikkö. YIT Rakennus Oy. Panuntie 11, PL 36, 00621 Helsinki. Puhelinhaastattelu 24.1.2013.

Teikari, Timo. 2013. Työnjohtaja. YIT Rakennus Oy. Panuntie 11, PL 36, 00621 Helsinki. Haastattelu 24.1.2013.

Vanhanen, Veli-Pekka. 2013. Työpäällikkö. YIT Rakennus Oy. Panuntie 11, PL 36, 00621 Helsinki. Haastattelu 17.1.2013.

Ässämäki, J. 2013. Ketjumyynti, markkinointi, logistiikka. Minestrone Oy. Vasarakatu 26, 40320 Jyväskylä. Puhelinhaastattelu 25.1.2013.

Liitteet:

Liite 1: Suihkuinjektointimassan laadunvarmistusraportti



Työmaa	Työnumero
Työmaan osoite	Koepäivämäärä
Kokeiden suorittaja(t)	

MARSH-VISKOSITEETTI

VALMISTUSTIEDOT	Vesisementtisuhte		$v/s = \frac{1}{\frac{6510}{3100 - \rho} - 3,1}$ $\rho = \text{tiheys kg/m}^3$
	Sekoituslaite		
	Sekoitus aika	s	
	Sekoituksen ja kokeen suorittamisen välinen aika	s	
KOETULOKSET	Näytteen lämpötilä	°C	
	Ympäristön lämpötilä	°C	
	Ulosvirtausaika	s	

TIHEYS

1. MITTAUS	Kellonaika		
	Tiheys	kg/m ³	
2. MITTAUS	Kellonaika		
	Tiheys (kg/m ³)	kg/m ³	

VEDEN EROTTUMINEN

VALMISTUSTIEDOT	Astian tilavuus	ml	
	Astian halkaisija	mm	
	Säilytyslämpötilä	°C	
KOETULOKSET	Nesteiden yhteistilavuus 3 h kuluttua	ml	
	Sementtipatsaan tilavuus 3 h kuluttua	ml	
	Veden erottuminen	% *	

* esim. jos vesikerroksen korkeus on 1000 ml:n mittalasissa 50 ml, veden erottuminen on 5 %.

POIKKEAMAT/ HUOMAUTUKSET	
PÄIVÄYS JA ALLEKIRJOITUS	Päiväys Kokeiden suorittaja Päiväys Vastaava työnjohtaja