

MÄRKÄSTABILOINTI



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Hämeen ammattikorkeakoulu Visamäen kampus, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Kevät, 2018

Oskari Muttonen

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Visamäki

Tekijä	Oskari Muttonen	Vuosi 2018
Työn nimi	Märkästabilointi	
Työn ohjaaja/t	Jari Mustonen, Matti Virolainen	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön laatimisen tarkoituksena oli selvittää märkästabiloinnin hyödyntämismahdollisuuksia Suomessa sekä selvittää mitä käytännön eroja sillä on Suomessa käytettyyn kuivastabilointiin verrattuna. Työ kertoo Suomen stabilointitekniikan nykytilasta, märkästabiloinnista yleisesti, märkästabilointikalustosta, märkästabiloinnin käyttökohteista, laadunvarmistusmenetelmistä, sideaineista, käytetystä kalustosta sekä vertailee märkä- ja kuivamenetelmiä.

Työn aikana päädyin johtopäätökseen, että työmenetelmät eivät kilpaile keskenään. Kyseessä on kaksi menetelmää, joilla pystytään tekemään maabetonia eri tarkoituksiin. Kuivamenetelmällä tuotetaan kosteaan koheesiomaahan heikkoa maabetonia, kun taas märkämenetelmällä pystytään valmistamaan kuivaan tai kosteaan maaperään paljon lujempaa maabetonia. Maa voi olla koheesiomaata tai rakeista maata. Toimeksiantaja KFS Finland Oy pyrkii kehittämään osaamistaan ja tuomaan Suomeen muualla maailmalla käytettyä stabilointitekniikkaa.

Avainsanat Märkästabilointi, sementtislurri, maabetoni, käyttötarkoitukset, laatu

Sivut 35

Degree Programme in Construction Engineering
Visamäki

Author	Oskari Muttonen	Year 2018
Subject	Wet stabilization	
Supervisors	Jari Mustonen, Matti Virolainen	

ABSTRACT

The purpose of this Bachelor's thesis was to study possible applications and uses of wet stabilization in Finland and to find out which practical differences it has compared to the dry stabilization method used in Finland. The thesis discusses the current situation of Finnish stabilization technology, general information on wet stabilization, possible applications and uses, quality control methods and practices, binders and the equipment used. The thesis was commissioned by KFS Finland Oy with the aim to improve their knowledge and practices on stabilization and to introduce new technology from abroad to Finland.

Based on the results of the thesis it can be concluded that the two methods do not compete with each other. There are two different methods which are used to make soilcrete with different requirements. The dry method can be used to produce soilcrete for cohesive soils with a high moisture content with weaker strength values while the wet method can be used in dry or wet soils to produce soilcrete with much higher strength values. Soil can be both cohesive or coarse.

Keywords Wet stabilization, cement slurry, soilcrete, applications, quality

Pages 35

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	STABILOINNIN NYKYTILA SUOMESSA.....	2
2.1	KFS FINLAND OY.....	2
2.2	STABILOINTI SUOMESSA.....	2
2.2.1	Pilaristabilointi.....	4
2.2.2	Massastabilointi.....	7
3	MÄRKÄSTABILOINTI.....	7
3.1	MÄRKÄSTABILOINTIKALUSTO.....	9
3.2	SIDEAINEET MÄRKÄSTABILOINNISSA.....	10
3.3	MÄRKÄSTABILOINNIN TYÖMENETELMÄ.....	13
3.4	MÄRKÄSTABILOINNIN KÄYTTÖKOHTEET.....	16
3.4.1	Maaperän vakauttaminen ja painaumien vähentäminen.....	18
3.4.2	Kaivanto- ja liuskatuennat sekä vedeneristys.....	18
3.4.3	Maankäsittely.....	19
3.4.4	Saastuneiden maiden käsittely.....	19
4	MÄRKÄ- JA KUIVAMENETELMÄN VERTAILU.....	20
4.1	KUSTANNUKSET.....	20
4.2	MÄRKÄSTABILOINNIN TYÖSAAVUTUKSET.....	21
4.2.1	Perustukset.....	21
4.2.2	Luiskan stabilointi.....	23
4.2.3	Saastuneen maan käsittely.....	24
4.2.4	Satama-alueen laajentaminen.....	24
4.2.5	Sivuttaissiirtymän estäminen.....	26
4.3	LAATU MÄRKÄ- JA KUIVASTABILOINNISSA.....	28
4.3.1	Ennen urakkaa.....	28
4.3.2	Urakan aikana.....	29
4.3.3	Urakan jälkeen.....	32
5	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	33
	LÄHTEET.....	34

1 JOHDANTO

Syvästabiloinnin tavoitteena on parantaa maaperän ominaisuuksia kuten leikkaus- ja puristuslujuutta ja/tai vähentää kokoonpuristuvuutta sekoittamalla maaperään kemiallisia lisäaineita, jotka reagoivat maaperän kanssa. Ominaisuuksien parantuminen johtuu sähköisistä sidoksista savissa, maainespartikkelien sitoutumisesta kemiallisissa reaktioissa ja/tai tyhjätavuuden täyttämällä kemiallisten reaktioiden lopputuotteilla. Syvästabilointi jaetaan käytettävän sidosaineiden, mahdollisen lisäaineiden sekä sekoitustavan mukaan eri menetelmiin. (SFS-EN 14679/2005, A.1)

Syvästabiloinnin kehittäminen aloitettiin Ruotsissa ja Japanissa 1960-luvun lopulla. Niin sanottu kuivamenetelmä otettiin käyttöön Japanissa ja Ruotsissa 1970-luvun puolivälissä. Kuivamenelmässä käytettiin kalkkia saviin painumisen estämiseen. Märkämenetelmä otettiin käyttöön Japanissa myös 1970-luvun puolivälissä. Märkästabiloinnissa käytettiin sementtislurria. Syvästabilointi on levinnyt maailmanlaajuisesti käytettäväksi työmenetelmäksi. Uudempia lisäaineita ovat mm. kipsi, lentotuhka sekä teollisuuden kuona-aineet. Ihmisten huolestuminen ympäristöstä on aikaansaanut kehitystä syvästabiloinnin hyödyntämiseen maaperän kunnan parantamisessa, saastuneiden alueiden eristämisessä ja saasteiden sitomisessa. (mt.)

Tämä opinnäytetyö käsittelee märkästabilointimenetelmää, jota pystytään käyttämään sekä pilaristabilointi- että massastabilointimenetelmässä. Opinnäytetyön tarkoituksena on tuoda esille vaihtoehtoinen työmenetelmä maaperän stabilointiin Suomessa. Suomessa ja Pohjoismaissa yleisesti stabiloinnissa on käytössä kuivamenetelmä. Opinnäytetyössä esitellään maailmanlaajuisesti enemmän käytettyä märkämenetelmää, jossa stabilointiin käytettävä sideaine on sekoitettu veteen ennen maaperään sekoittamista. Tarkoituksena on selvittää märkämenetelmään tarvittava kalusto, työmenetelmä itsessään, potentiaaliset käyttökohteet, niistä esimerkkejä sekä vertailla märkä- ja kuivamenetelmien kustannuseroja, saavutuksia sekä laatuvaatimuksia. Opinnäytetyö toteutetaan tilaajan pyynnöstä, sillä heidän on tarkoituksenaan edistää stabilointitekniikkaa Suomessa sekä tutkia ja ottaa käyttöön vaihtoehtoisia menetelmiä.

Opinnäytetyössä on käytetty lähdemateriaalina CEN:n englanninkielistä sekä suomennettua työstandardia syvästabilointiin, eri urakoitsijoiden työkuvaus- ja raportteja, haastatteluja, urakoitsijan työohjeita, stabilointikonferenssien pöytäkirjoja sekä eri laitosten tutkimusmateriaalia.

2 STABILOINNIN NYKYTILA SUOMESSA

2.1 KFS FINLAND OY

KFS Finland Oy on vuonna 2012 perustettu Fin-Seula Oy:n ja Keller Groupin Lime Column Method Ab:n yhteisyritys. Nykyiset omistajat ovat Kreate Oy ja Keller Grundläggning Ab. Keller Group on maailmanlaajuinen konserni, joka toimii maaperä- ja pohjarakennusongelmien ratkaisujen parissa mm. Pohjois-Amerikassa, Euroopassa, Aasiassa sekä Afrikassa. KFS Finland Oy hyödyntää konsernin kansainvälistä yhteistyötä ja osaamista omien ratkaisujensa kehittämiseksi. KFS Finland Oy on erikoistunut stabilointiin, suihkuinjektointiin sekä geotekniseen monitorointiin. KFS Finland Oy toimii sekä päätoteuttajana että aliurakoitsijana niin pienissä kuin suurissa hankkeissa ympäri Suomea. (KFS Finland Oy 2018)

2.2 STABILOINTI SUOMESSA

Stabilointi on pohjanvahvistusmenetelmä, jossa maaperä lujitetaan kantavaksi rakenteeksi sekoittamalla siihen sideainetta. Sideaine on Suomessa tyypillisesti kalkki-sementtiseosta, jossa käytetyn aineksen suhdeluku vaihtelee kohteen tarpeen mukaan. Sideaine puhalletaan paineilmalla kairalle ja sekoitetaan sellaisenaan maa-ainekseen, joka toimii runkoaineena. Sementti ottaa hydratoitumiseen vaadittavan kosteuden maaperästä, jonka kosteusprosentti on Suomessa luonnostaan hyvin korkea. (Partanen, haastattelu 10.4.2018). Suomessa käytetään kalkista ja sementistä poikkeavia lisäaineita muita maita useammin. Tällaisia sideaineita ovat mm. masuuni-kuona, eri tuhkat tai kipsi. Sideaineet sekoitetaan keskenään joko tehtaalla tai työmaalla. Etuna näiden aineiden käyttämiseen on edullisempi hinta sementtiin verrattuna. (Bruce 2000.)

Maa-ainestyyppi	Sopiva sideaine
Savi	Kalkki tai kalkki/sementti
Erittäin sensitiivinen savi	Kalkki tai kalkki/sementti
Orgaaninen savi ja lieju	Kalkki/sementti tai sementti/ masuuni-kuona tai kalkki/kipsi
Turve	Sementti tai sementti/ masuuni-kuona tai kalkki/kipsi/sementti
Sulfiittimaa	Sementti tai sementti/ masuuni-kuona
Siltti	Kalkki/sementti tai sementti

Kuva 1 Kuivameneltemässä yleisesti käytetyt sideaineet (SFS-EN 14679/2005, Taulukko B.1)

Stabilointi tehdään joko syvästabilointina tai massastabilointina. Pilaristabilointi toteutetaan painamalla sekoitustanko suunniteltuun syvyyteen, josta tankoa nostetaan sen samalla sekoittaessa sideainetta maaperään. Sideaine hyödyntää maaperän kosteutta ja lujittuu runkoaineeseen muodostaen sylinterimäisiä pilareita. (EN 14679/2005, A.3.1.)

Massastabilointi on työmenetelmä, jossa sideaine sekoitetaan maaperään erityisellä kaivinkoneeseen kiinnitetyllä sekoitinlaitteistolla. Sekoitus tapahtuu pysty- ja vaakasuunnassa lamelleittain. Maahan muodostuu laattamainen alue, jonka varaan eri rakenteet voidaan perustaa. Massastabilointia käytetään maalajeissa, joissa stabiloitavuus on huono pilaristabilointia ajatellen. Massastabilointia käytetään esimerkiksi satamien ruoppaus sedimenttien tai turpeen kiinteyttämiseen tai läjitettäväksi suunniteltujen kaivuumaiden muuttamiseen käyttökelpoisiksi. Maa-aineksen kosteuspitoisuuden tulee olla yli 20 % kuivamenetelmää käytettäessä. (mt.)

Yleensä yhtä työkonetta kohden työmaalla toimii kuljettaja, työnjohto sekä mahdollisesti huoltomies. Töitä pystytään tekemään -15 °C:en asti. Tämän jälkeen sekoitusterä ei enään uppoa maa-ainekseen. Sideainetta syötetään liikkuvalla tela-alustaiselta vaunulta, joka taas tarpeen tullen hakee ainetta työmaalle toimitetulta tankkerilta. Työkoneen GPS ottaa pilarien sijainnin ylös ja merkitsee ne tietokoneohjelmaan. Data voidaan lähettää pilveen tai noutaa paikanpäältä. (Partanen, haastattelu 10.4.2018.)



Kuva 2. Kuivaa sideainetta käyttävä pilaristabilointityökone ja sideaineen mobiilivälisäiliö eli "possu"



Kuva 3. Varastointisäiliö, josta ”possu” noutaa sideainetta. Tavarantoimittaja täyttää säiliön säännöllisesti. Esim. kerran viikossa.

2.2.1 Pilaristabilointi

Pohjoismaissa asennettavien pilarien tyypillinen halkaisija on 0,6-1,0 metriä sekä kaluston asennussyvytydet ylettävät jopa 25 metriin. Pilarit voidaan myös asentaa 70° kulmaan. Kalustoon kuuluu sekoitustanko/-kaira, jonka päässä on sideainetta maahan syöttävä suutin. Sekoitustehoa ja syötetyn aineksen määrää valvotaan sähköisesti. Näin varmistetaan mahdollisimman homogeenisen maabetonipilarin syntyminen. (EN 14679/2005, A.3.2.2.)

Pilaristabiloinnissa sekoitustanko painetetaan suunniteltuun syvyyteen ja aineen syöttäminen aloitetaan sekoitustangon noston yhteydessä. Sideaine puhalletaan suutinkoloista paineilmalla maaperään sekoitustangossa sijaitsevien terien samalla sekoittaessa maata. (mt.) Kolot sijaitsevat sekoitusterien yläpuolella sekoituksen laadun parantamiseksi. Sekoitustangolle sopivaksi muodoksi on havaittu neliskulmaisuus, sillä se päästää puhaltamiseen käytetyn paineilman ylös, mikä estää ilmahuokosten syntymisen maabetonipilariin. (Partanen, haastattelu 10.4.2018.)



Kuva 4. Sekoitinkärki, jossa on 3 tasoa sekoitusteriä ja 30 mm syöttöaukko sideaineelle



Kuva 5. Sekoitustankoina toimineita teräsputkia. Isomman putken leveys 100 mm ja teräksen paksuus 15 mm. Sisemmän putken leveys 70 mm ja teräksen paksuus 10 mm.

Sekoittaminen tapahtuu katkeamatta koko työn ajan. Työvaihe voidaan toistaa tarvittaessa samassa kohdassa. Tangon pyörimis- ja nostonopeutta säädetään tasalaatuisen ja yhtenäisen lopputuloksen saavuttamiseksi. Tarvittavan sekoituksen määrä riippuu sideaineen tyypistä ja määrästä sekä

maalajista. Esimerkiksi pelkkää sementtiä käytettäessä kalkin sijaan tarvittavan sekoitusenergian määrä on suurempi. (EN 14679/2005, A.3.2.2.) Pilaristabiloinnilla aikaansaatu työsaavutus on keskimäärin 750-1000 m/vuoro, mutta parhaimmillaan on pystytty yli 2000 m/vuoro suorituksiin olosuhteiden ollessa optimi. Työvuoron päätteeksi kalusto puhalletaan paineilmalla puhtaaksi sideaineesta. (Sauli Partanen, haastattelu, 10.4.2018.)



Kuva 6. Suutinaukon koko ja sijainti sekoittimessa.

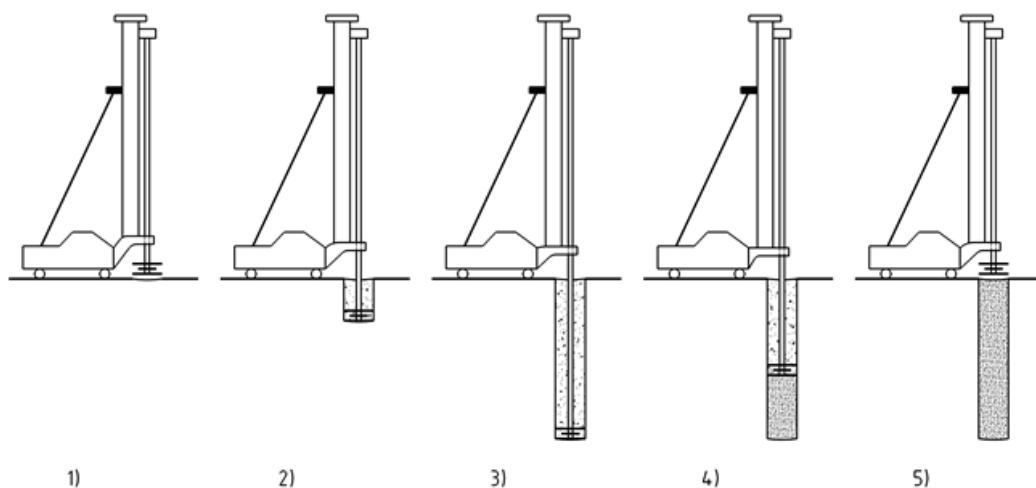
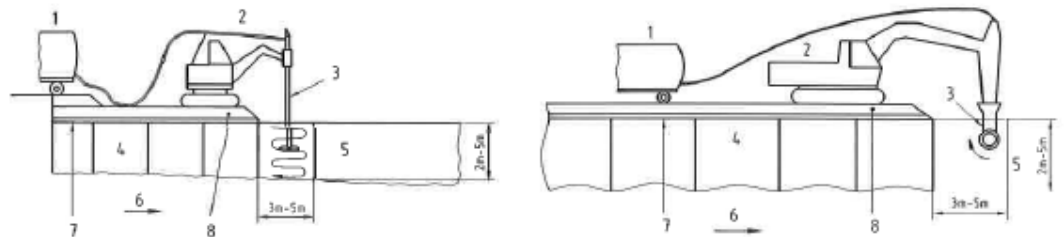


Figure A.5 — Sequence of installation

Kuva 7. Pilaristabiloinnin kulkukaavio: 1) työkonene asettelu 2) painaminen 3) loppusyvyys 4) nosto sekä sideaineen lisääminen 5) valmis pilari (EN 14679/2005, Kuva A.5.)

2.2.2 Massastabilointi

Massastabilointia käytetään maaperän olosuhteiden ollessa erittäin huonot, esimerkiksi silloin, kun maa-aineksena on mm. turve, lieju, orgaanista ainetta sisältävä tai muutoin pehmeä erittäin savi. Työstetty syvyys on useimmiten 2-3 metriä, mutta menetelmällä pystytään tekemään sekoitusta 5 metrin syvyyteen. Massastabiloinnissa käytettävän työkonteen sekoitinosa eroaa olennaisesti pilaristabiloinnissa käytettävästä kärjestä. Sideaine syötetään sekoitinosaan sekoittajan samalla pyörittäessä ja liikkuessa sekä vertikaalisesti että horisontaalisesti. Tyypillisesti massastabilointiin käytetty työkonne on kaivinkone, johon on kiinnitetty massastabilointisekoittaja. (EN 14679/2005, A.3.5.2.)



Merkinnät

- | | |
|---|----------------------------|
| 1 Stabilisointiaineen säiliö ja vaaka | 5 Turve, lieju, savi |
| 2 Massastabilointikone | 6 Massastabiloinnin suunta |
| 3 Sekoitustyökalu | 7 Geotekstiili (lujite) |
| 4 Massastabiloitu turve, lieju tai savi | 8 Esikuormituspenker |

Kuva 8. Kaksi massastabilointitapaa. (SFS-EN 14679/2005, Kuva A.3)

3 MÄRKÄSTABILOINTI

Märkämenetelmä on työtekniikkana hyvin samanlainen kuivamenetelmään verrattuna. Sideainetta sekoitetaan maaperään sekoituskalustolla ja lopputuloksena on maabetonia, jonka puristuslujuus vaihtelee 0,5...5 MPa välillä. Saavutettavat lujuudet voivat olla huomattavasti suurempia rakeisissa maa-aineksissa. (Keller Product Guide for Soil Mixing 7.1 2017)

Märkämenetelmä on yleisesti käytetössä Keski- ja Etelä-Euroopassa, Pohjois-Amerikassa sekä Japanissa. Euroopassa märkämenetelmä toteutetaan sekoitusruuvilla tai -tangolla, jossa on yksi tai useampi teräsiipi. Tankoja voi myös olla yksi tai useampi. Käytetyn sekoitustyökalun tyyppi riippuu maa-aineksesta ja pilarien käyttötarkoituksesta. Tarvittaessa tuoreisiin pilareihin voidaan lisätä raudoitusta tai teräspalkkeja. Asennuksessa usein hyödynnetään vibraamista. Japanissa märkämenetelmää käytetään tavallisesti sekä maan- että vedenalaiseen rakentamiseen. (EN 14679/2005, A.3.3.)

Maanrakentamisessa käytetyissä työkoneissa on 1, 2 tai 4 sekoitustankoa. Niiden päässä on useampi taso sekoitusteriä paremman sekoittumisen ja yhtenäisen pilarirakenteen saavuttamiseksi. Kaksi sekoitustankoa pidetään yhtä kaukana toisistaan teräspalkin avulla. Teräspalkin sekä mahdollisen vapaasti ilman voimansiirtoa pyörivän lisäsekoitusterän tarkoituksena on estää maa-ainesta tarttumasta pyöritettäviin sekoitusteriin tai sekoitustankoihin. (mt.)

Sekoitukseen käytetyn energian määrää seurataan teräsiipikierröksillä $T = \Sigma M(N_d/V_d + N_u/V_u)$, missä T = teräsiipikierrös "Blade rotation number" (lukumäärä/painettu metri), ΣM = terien määrä yhteensä, N_d = terien pyörimisnopeus (rotaatio/min), V_d = terien uppoamisnopeus (m/min), N_u = terien pyörimisnopeus nostossa (rotaatio/min) ja V_u = terien nostonopeus (m/min). Jos aineen syöttö tapahtuu vain noston aikana, $N_d = 0$. Teräsiipikierrösten sekä sideaineen määrä ovat automaattisesti hallittuja homogeenisen pilarirakenteen saavuttamiseksi. Teräsiipien halkaisija on Japanissa 1,0...1,6 m ja koneen on mahdollista sekoittaa pilareita, joiden enimmäispituus on 48 m. Euroopassa halkaisijat ovat 0,4...0,9 m sekä syvyys 25 m. (mt.)

Vedenalaisessa rakentamisessa työkoneet ovat suuria aluksia, joilla pystytään käsittelemään suuria määriä maa-aineksia nopeasti. Alukseen on asennettu syvästabilointityökone, annostelulaitos, varastointisäiliöt ja valvomo. Stabilointityökoneissa on 2...8 sekoitustankoa. Ohjeen laatimisen hetkellä Japanissa pystyttiin valmistamaan pilareita, joiden poikkipinta-ala oli 1,5...6,9 m² ja laitteet ylettyivät jopa 70 m syvyyteen merenpinnan tasosta. Sekoitusterien halkaisijat ovat 1,0...1,6 m. (EN 14679/2005, A.3.3.)

Erilaiset maa-ainekset vaativat eri tyyppisiä sekoittimia. Voidaan vaikuttaa mm. teräsiipien muotoon, järjestykseen ja aseteluun varressa. Voidaan myös käyttää tietynlaiseen sekoittamiseen tarkoitettuja kärkiä. Esim. kairamaiset tai paneeleja sekoittavia kärkiä. Sekoitusvartta pyörittävän roottorin on oltava tarpeeksi tehokas maaperän rakenteen rikkomiseen, jotta sementtislurri voi sekoittua perusteellisesti. (mt.)

Maa-aineksesta sekä slurrista syntyy laastimainen seos, joka kovettuu hydrataation edetessä. Syntyneen pilarin lujuus sekä läpäisevyys riippuvat olennaisesti maa-aineksen koostumuksesta sekä ominaisuuksista kuten hienoaineiden määrästä, orgaanisen aineen määrästä, saven tyyppistä, kiviaineen muodosta, kiviaineksen koosta, kiviaineen kovuudesta sekä maa-aineksen rakeisuudesta. Lisäksi siihen vaikuttaa lisäaineen määrä ja tyyppi sekä sekoitustyövaiheen työsuoritus. (mt.)

Märkämenetelmän saa keskeyttää, jos työ jatkuu ennen kuin slurrin lujittuminen on alkanut ja sekoitusta jatketaan vähintään 0,5 m matkalta jo

käsiteltyä maa-ainesta. Jotta sementtislurria saadaan kuljetettua sekoitus-työkalun suuttimelle rittävästi, tarpeeksi nopeasti ja korkealla paineella käytettyjen pumppujen on oltava tarpeeksi tehokkaita. (mt.)

3.1 MÄRKÄSTABILOINTIKALUSTO

Märkästabiloinnin toiminta alkaa sekoituslaitoksesta, jossa varmistetaan sideaineen, veden ja lisäaineiden oikea seossuhde. Laitos ottaa ainesosat tietokoneohjatusti säiliöiltä ja punnitsee ne. Jokaisella aineella on oma säiliönsä. Slurri siirtyy sekoituslaitoksesta välivarastoon, jossa sitä sekoitetaan jatkuvasti jähmettymisen estämiseksi. Painepumppu ottaa slurria ja syöttää sitä eteenpäin. Pumput ovat yleensä kaksi- tai kolmiosaisia mäntäpumppuja tai nopeutta vaihtelevia yksittäisiä ruuvipumppuja. Pumppujen syöttönopeus vaihtelee 0,15...0,25 m³/min välillä tarpeen mukaan. Pumput voivat olla sähkö, polttoaine tai paineilmakäyttöisiä. (Keller product guide 7.1 2017)

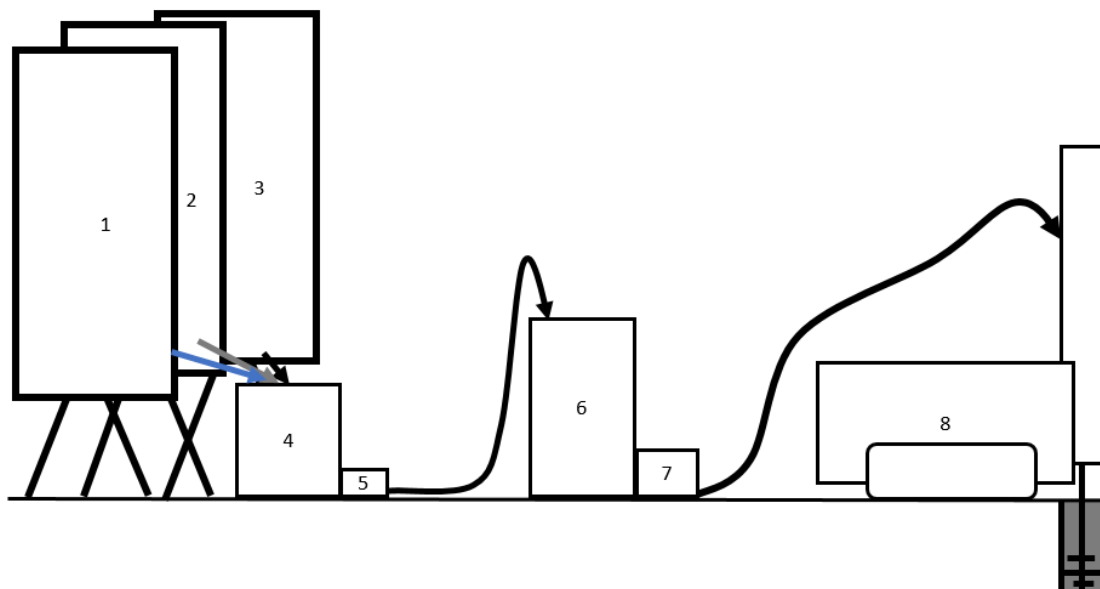
Sekoituslaitteissa voi olla yhdestä kolmeen vartta, joissa jokaisessa on tilanteeseen sopiviksi arvioidut sekoittimet. Painamisnopeus voi vaihdella 0,3...1,5 m/min ja sekoitustankoa nostettaessa se on yleensä nopeampi 3,0...5,0 m/min. Tankojen pysyminen yhdensuuntaisina varmistetaan vaakasuuntaisilla teräksillä välikappaleilla. Slurrin syötön nopeutta, kairan pyörimisnopeutta sekä syvyyttä pystytään ohjaamaan työkoneelta käsin. (SFS-EN 14679/2005, A.3.3.)

Laite	Yksityiskohtaisia tietoja	Kuivalla maalla suoritettava, Eurooppa	Kuivalla maalla suoritettava, Japani	Vedenalainen, Japani
Syvästabilointikone	Sekoitustankojen lukumäärä	1...3	1...4	2...8
	Sekoitus työkalun halkaisija	0,4 m...0,9 m	1,0 m...1,6 m	1,0 m...1,6 m
	Suurin käsittelysyvyys	25 m	48 m	70 m meren pinnan alapuolella
	Syöttöaukon sijainti	Tanko	Tanko ja terä	Tanko ja terä
	Syöttöpaine	500 kPa...1 000 kPa	300 kPa...600 kPa	300 kPa...800 kPa
Annostelulaitteisto	Slurrisäiliön tilavuus	3 m ³ ...6 m ³	3 m ³	3 m ³ ...20 m ³
	Syöttöteho	0,08 m ³ /min...0,25 m ³ /min	0,25 m ³ /min...1 m ³ /min	0,5 m ³ /min...2 m ³ /min
Sideaineen varastointisäiliö	Suurin tilavuus		30 t	50 t...1 600 t

Kuva 9. Stabilointikaluston tyypillisiä kapasiteetti- ja suoritusarvoja Euroopassa ja Japanissa. (SFS-EN 14679/2005, Taulukko A.3.)

Syvästabilointikone	Kuivalla maalla suoritettava, Eurooppa	Kuivalla maalla suoritettava, Japani	Vedenalainen, Japani
Sekoitustangon painamisnopeus	0,5 m/min...1,5 m/min	1,0 m/min	1,0 m/min
Sekoitustangon nostonopeus	3,0 m/min...5,0 m/min	0,7 m/min...1,0 m/min	1,0 m/min
Sekoitusterien pyörimisnopeus	25 r/min...50 r/min	20 r/min...40 r/min	20 r/min...60 r/min
Teräsiipikierrosten lukumäärä	Pääasiassa jatkuva sekoitusruuvi	350/m	350/m
Syötetyn sideaineen määrä	80 kg/m ³ ...450 kg/m ³	70 kg/m ³ ...300 kg/m ³	70 kg/m ³ ...300 kg/m ³
Syöttövaihe	Painamis- ja/tai nostovaiheessa	Painamis- ja/tai nostovaiheessa	Painamis- ja/tai nostovaiheessa

Kuva 10. Märkämenetelmää käyttävän syvästabilointikoneen tyypillisiä ominaisuuksia ja suoritusarvoja Euroopassa ja Japanissa. (SFS-EN 14679/2005, Taulukko A.4.)



Kuva 11. Märkästabilointiin käytettävä kalusto. 1. Vesisäiliö 2. Sementtisäiliö 3. Muun mahdollisen lisäaineen säiliö 4. Sekoitin 5. Pumppu, voi olla valmiiksi osa sekoitinta 6. Välisäiliö sekoittimella 7. Korkeapaisempi pumppu, voi olla myös valmiiksi osa välisäiliötä 8. Poravaunu

3.2 SIDEAINEET MÄRKÄSTABILOINNISSA

Sementtislurrin koostumus määritetään laboratiokokeilla ennen töiden aloittamista. Samalla määritetään slurrin tilavuussuhde. Tilavuussuhde kertoo tarvittavan slurrin määrän per käsitelty tilavuus maa-ainesta. Slurri valmistetaan sekoitusasemalla, mistä se siirretään välivarastointisäiliöön, jossa sitä sekoitetaan jatkuvasti. Slurri pumpataan mitoitettulla nopeudella suunnitellun tilavuusosuuden saavuttamiseksi. Pumpkauksen nopeutta säädetään tarpeen tullen maan eri kerroksissa perustuen laboriotulok-

siin sekä havaintoihin työn aikana. Slurrin kuljetusketjussa seurataan slurrin syöttönopeutta, tiheyttä, kokonaismäärää sekä painetta. (Denies & Lysebetten 2012).

Slurrin tiheys on yleensä 1,45...1,65 g/cm³ ja vesi/sementti suhde vaihtelee välillä 1,1...0,7. Slurrin tiheys tulee tarkastaa vähintään kaksi kertaa työvuoron aikana, jos käytössä on automaattista annostelu. Käsien annostellessa tiheys tulee mitata sekoituksen yhteydessä ennen välisäiliöön pumpaamista. Mittauksen voi suorittaa tiheysmittareilla tai Baroidin mutavaa'alla. (Keller Product Guide for Soil Mixing 7.1 2017)

Slurri koostuu vedestä, sideaineesta sekä mahdollisesti turvotussavesta tai hiekasta. Sideaine on tyypillisesti portlandsementtiä, mutta on myös mahdollista käyttää lentotuhkaa, kalkkia tai rakeista masuunikuonaa. (Hayward Baker Inc – Wet Soil Mixing Brochure, 2014). Näitä lisäaineita on hyödyllistä käyttää sementin lisäksi, jos lopputuotteen vaadittava lujuus on matala. Bentoniittia on myös hyödynnetty slurriseosten stabiliteetin lisäämiseen. Orgaanista tai muuten pehmeää maaperää käsiteltäessä voidaan myös hyödyntää muita lisäaineita. (Denies, Lysebetten, 2012) Sementti on sideaineista selkeästi kalleinta ja sen osuus stabilointiprojektin kustannuksiin merkittävä. (Partanen, haastattelu 10.4.2018).

Table 1. Summary of the soil-mixes used throughout the research

Formulation	Kaolin clay (%)	Cement (kg/m ³ soilcrete)	Kaolin clay (kg/m ³ soilcrete)	Sand (kg/m ³ soilcrete)	Water (kg/m ³ soilcrete)	Cement/Water ratio (Mixing)	Water content (%)
K0/C200	0	200	0	1534	352	0.57	20.29
K10/C200	10	200	125	1144	451	0.44	30.69
K25/C200	25	200	243	743	557	0.36	46.94
K40/C200	40	200	318	487	625	0.32	62.20
K50/C200	50	200	347	353	664	0.30	73.70
K0/C150	0	150	0	1589	349	0.43	20.07
K10/C150	10	150	128	1178	455	0.33	31.22
K25/C150	25	150	255	781	556	0.27	46.85
K40/C150	40	150	336	514	625	0.24	62.49
K50/C150	50	150	366	373	667	0.23	74.97

Kuva 12. Koekappaleisiin käytettyjä maabetonin seossuhteita. (Oana Ca-
raşca, 2015, 87)

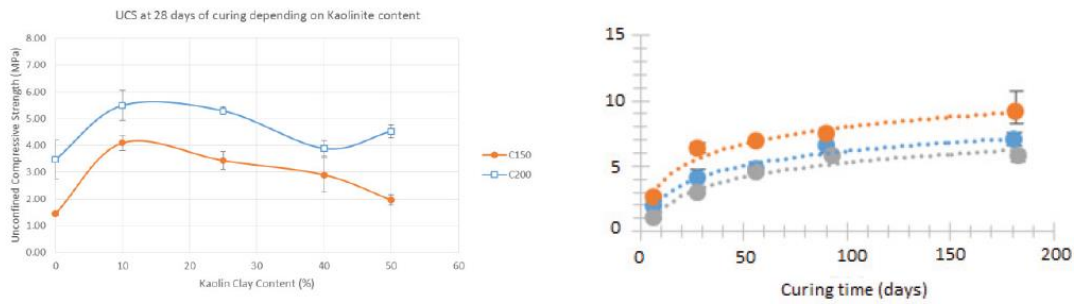


Fig. 4 – (a) UCS measured at 28 days curing age; (b) UCS for cement dosage 200 kg/m^3 by Helson [3]

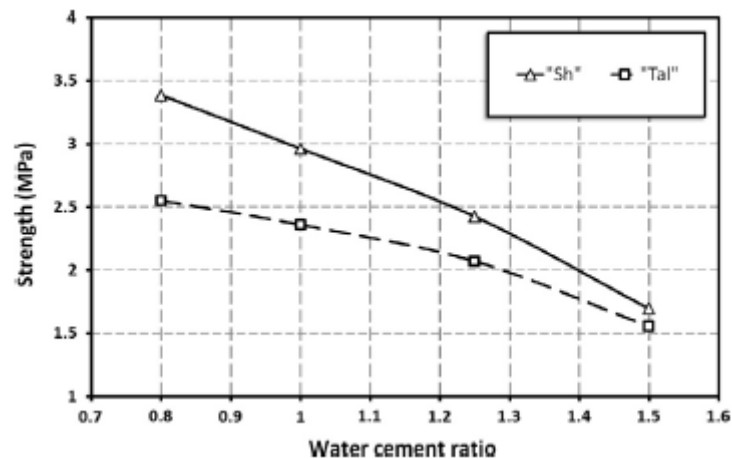
Kuva 13. Savipitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen 28 päivän näytteissä ja lujuuskehitys pidemmällä ajalla näytteille, joissa sementtiä 200 kg/m^3 (Oana Caraşca, 2015, 89)

Table 3: Factors affecting the strength of the DSM material, after Terashi (1997)

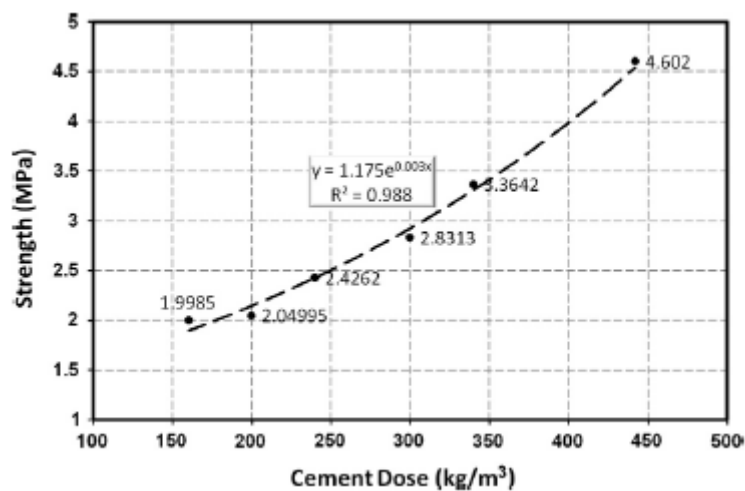
I. Characteristics of hardening agent	<ol style="list-style-type: none"> 1. Type of hardening agent 2. Quality 3. Mixing water and additives
II. Characteristics and conditions of soil	<ol style="list-style-type: none"> 1. Physical chemical and mineralogical properties of soil 2. Organic content 3. pH of pore water 4. Water content
III. Mixing conditions	<ol style="list-style-type: none"> 1. Degree of mixing (Mixing energy) 2. Timing of mixing/re-mixing 3. Quantity of hardening agent
IV. Curing conditions	<ol style="list-style-type: none"> 1. Temperature 2. Curing time 3. Humidity 4. Wetting and drying/freezing and thawing, etc.

Kuva 14. Syntyvän maabetonin lujuuteen vaikuttavia tekijöitä. (Denies, Lysebetten, 2012, 3.1)

Vesi-sementtisuhte vaikuttaa merkittävästi syntyneen lopputuotteen lujuuksellisiin ominaisuuksiin. Lisäksi maaperän tyyppi vaikuttaa erittäin paljon materiaalin lujuuteen ja yhtenäisyyteen. Esimerkiksi jäykkä koheesiomaa ei välttämättä sekoitu täydellisesti lisäaineiden kanssa, mikä jättää pilariin kohtia, jossa maa-ainesta on sellaisenaan. (Denies & Lysebetten, 2012, 6.)



Kuva 15. Vesi-sementtisuhteen vaikutus puristuslujuuteen Egyptissä. Molempiin maa-ainestyyppiin lisättiin 240kg sementtiä per maakuutio. (Farouk, Shahien, 2013)



Kuva 16. Sementin määrän vaikutus puristuslujuuteen Egyptissä. Mitattu puristuslujuus 7 päivän jälkeen. (Farouk & Shahien 2013)

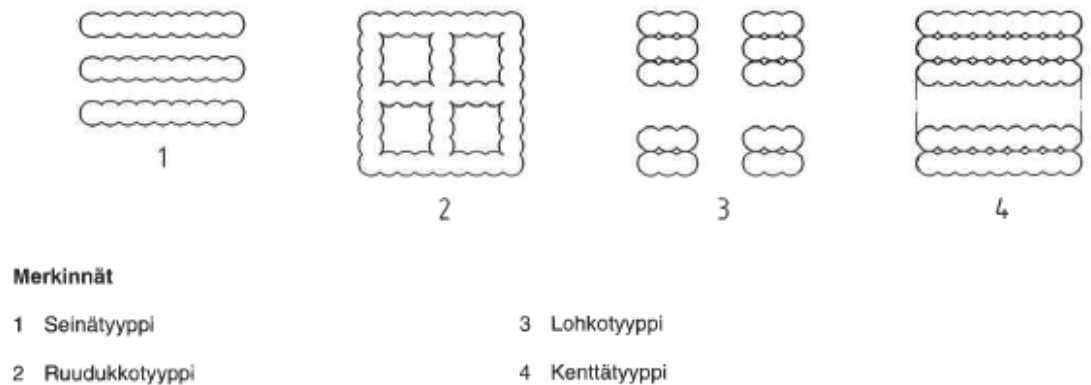
3.3 MÄRKÄSTABILOINNIN TYÖMENETELMÄ

Märkämenetelmä voidaan jakaa kohdistamiseen paalun porauspaikalle, painamisvaiheeseen ja nostovaiheeseen. Maan painamisvaiheen aikana sekoitustyökalu/-t leikaavat ja pilkkovat maa-ainesta suunniteltuun syvyyteen saakka. Noston aikana sideainetta pumpataan maaperään vakio virtausnopeudella, sekoittimen nostonopeuden ollessa vakio. (EN 14679/2005, A.3.3.)

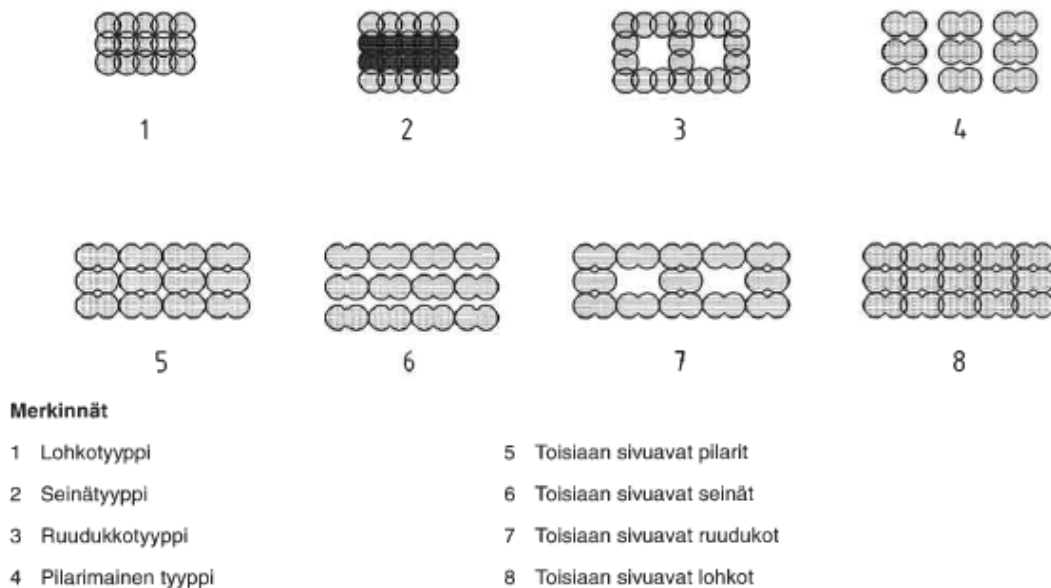
Sekoittimen terät pyörivät akselinsa ympäri vaakatasossa ja sekoittavat maa-aineksen ja sideaineen keskenään. On myös mahdollista käyttää koneita, joissa sideainetta syötetään sekä painamis- että nostovaiheessa tai pelkästään painamisvaiheessa. Jos syötön ulostulo on sekoitustyökalun alapuolella, sideainetta ei tarvitse lisätä nostovaiheessa. Käytännössä sideainetta kuitenkin lisätään sekä poraus- että nostovaiheessa mahdolli-

simman homogeenisen sekoittumisen saavuttamiseksi. (mt.) Stabiloinnista syntynyt ylijäämä maabetoniaines siivotaan pois jätteen käsittelyyn. Ylijäämä voi vaihdella 20-50% käsitellyn maa-aineksen tilavuudesta. (Hayward Baker Inc – Wet Soil Mixing Brochure 2014).

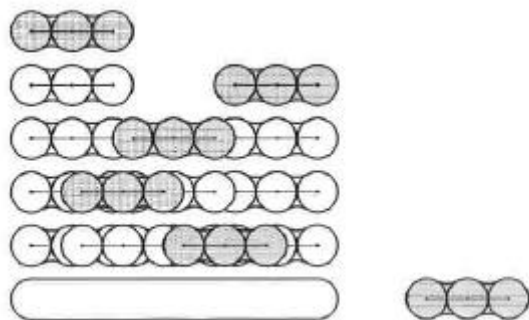
Kalusto voidaan järjestää kokoonpanoihin, joilla pystytään rakentamaan monipuolisia rakenteita erilaisiin maaperiin. Pilarit voidaan suunnitella yksittäisinä perustuselementteinä tai osana suurempia geometrisia kuvioita laajemmalla alueella. (mt.). Pilarien asennuskuvat riippuvat niiden käyttötarkoituksesta. Pilarit asennetaan tasasivuisen kolmion tai neliön muotoon, jos tarkoituksena on vähentää maan painauma. Jos tarkoituksena on varmistaa leikkauksen tai penkereen stabiilitetti, pilarit asennetaan seinämäksi, joka on kohtisuorassa oletettua murtopintaa vasten. (EN 14679/2005, A.3.4.)



Kuva 17. Maan päällä toteutettujen märkämenetelmäpilarien asennuskuvioita. (SFS-EN 14679/2005, Kuva A.10).



Kuva 18. Vedenalaisissa olosuhteissa stabiloitavien pilarien asennuskuvioita. (SFS-EN 14679/2005, Kuva A.11).

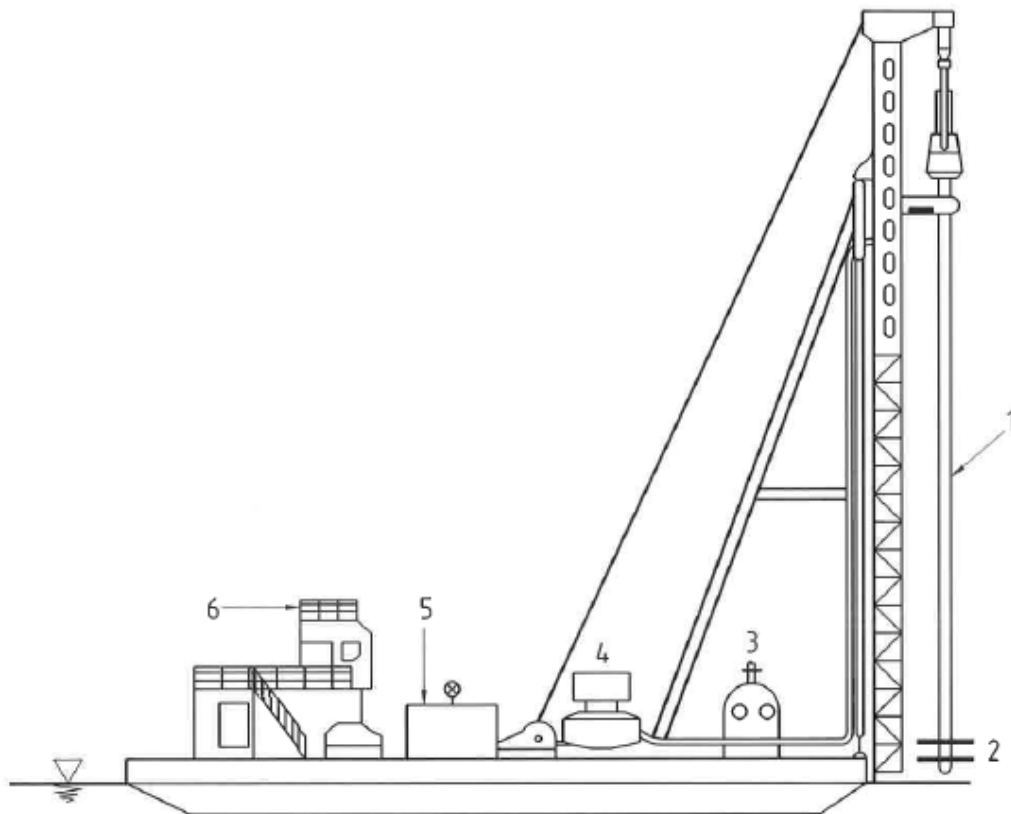


Kuva 19. Esimerkki märkästabiloitavan yhtenäisenseinän asennusjärjestyksestä. (SFS-EN 14679/2005, Kuva A.12).

Märkämenetelmällä toteutettua massastabilointia voidaan hyödyntää erittäin heikkojen tai saastuneiden pintamaiden käsittelyssä. Sekoittaminen toteutetaan joko pysty- tai vaakasuuntaan kaivinkoneen puomiin kiinnitetyllä sekoittimella. Jos maaperä on jäykkää, sitä voidaan valmiiksi sekoittaa tai välpätä kaivinkoneella. Tämä helpottaa ja parantaa stabilointikoneen työtä. (Keller Product Guide for Soil Mixing 7.5 2017)

Sideainetta syötetään samanlaisesta valmistuskalustosta kuin pilaristabiloinnissa, mutta itse sekoitustyökalu on erilainen. Sideaine levitetään maahan sekoittimessa sijaitsevasta suuttimesta. Työ toteutetaan työkoneen kapasiteetin mukaisissa soluissa. Tämä on yleensä 8...10 m² alue 7 m syvyyteen saakka. Orgaanista maa-ainesta, mm. turve, stabiloitaessa alueen syvyys on matalampi n. 1,5...3 m. Sekoittamista jatketaan solussa vaaditun sideaineen lisäämisen jälkeen mahdollisimman hyvän sekoittumisen varmistamiseksi. (mt.)

Keller arvioi vuoron työtulokseksi n. 500...700 m³ riippuen stabiloitavan alueen syvyydestä. Orgaanisissa maa-aineksissa taas työtulos on noin 200...300 m³/työvuoro. Stabiloitu alue on rajattava huolellisesti työn jälkeen. Avoimet pilarien päät on suojattava betoniin putoamisen estämiseksi. (mt.) Märkämenetelmää ei tule toteuttaa ympäristön lämpötilan ollessa alle -5°C sekä pilarien päät tulee suojata mahdolliselta jäätymiseltä. (Keller Product Guide for Soil Mixing 8.1.1 2017)



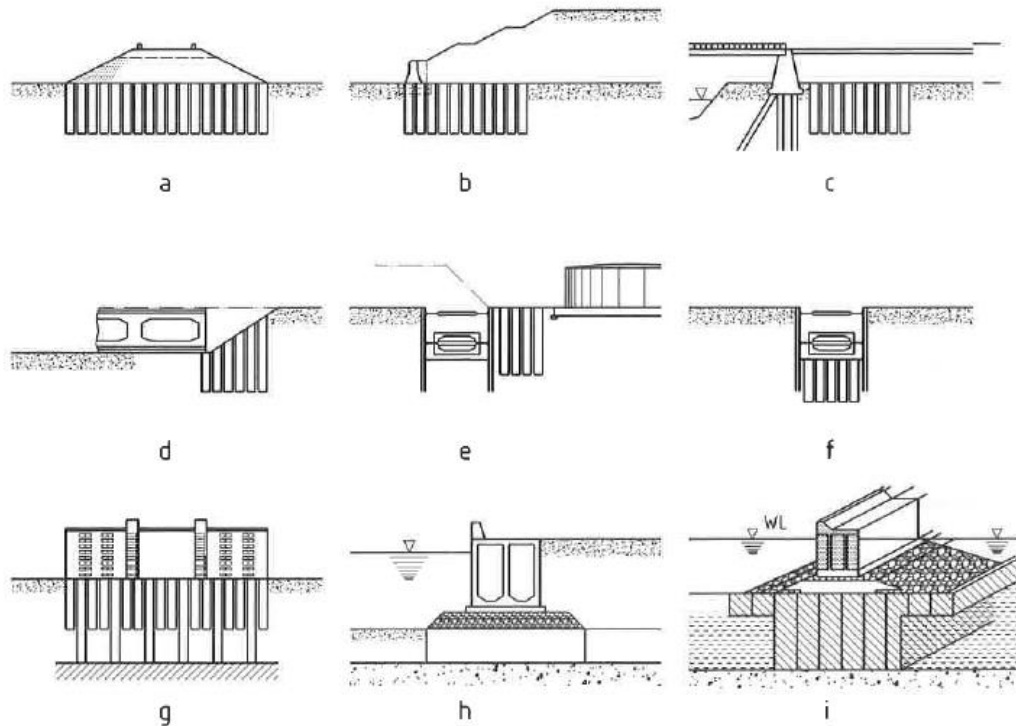
Merkinät

- | | |
|------------------|--------------------------------------|
| 1 Sekoitustangot | 4 Slurripumppu |
| 2 Sekoitusterät | 5 Stabilointiaineen valmistusyksikkö |
| 3 Voima-asema | 6 Ohjaushytti |

Kuva 20. Japanilainen merellä märkästabilointiin käytetty alus/lautta. (SFS-EN 14679/2005, Kuva A.7).

3.4 MÄRKÄSTABILOINNIN KÄYTTÖKOHEET

Kuivamenetelmää voi hyödyntää koheesiomaissa kuten siltti- ja savi- maissa, kun taas märkämenetelmää pystytään myös käyttämään karkeissa rakeisemmissa maaperissä. (EN 14679/2005, A.3.1.). Märkästabilointia voidaan käyttää kaikenlaisissa maa-aineksissa mukaanlukien orgaaniset maa-aineksissa kuten turve. Orgaanisia maa-aineksia stabiloitaessa sideaineen menekki on kuitenkin erittäin korkea ja voi vaatia edellisistä maa-aineksista poiketen muuta käsittelyä ennen stabilointia. Erittäin pehmeissä savissa ja turpeissa kaikki maa-aines voi joutua käsittelyyn. (Hayward Baker Inc – Wet Soil Mixing Brochure 2014.)

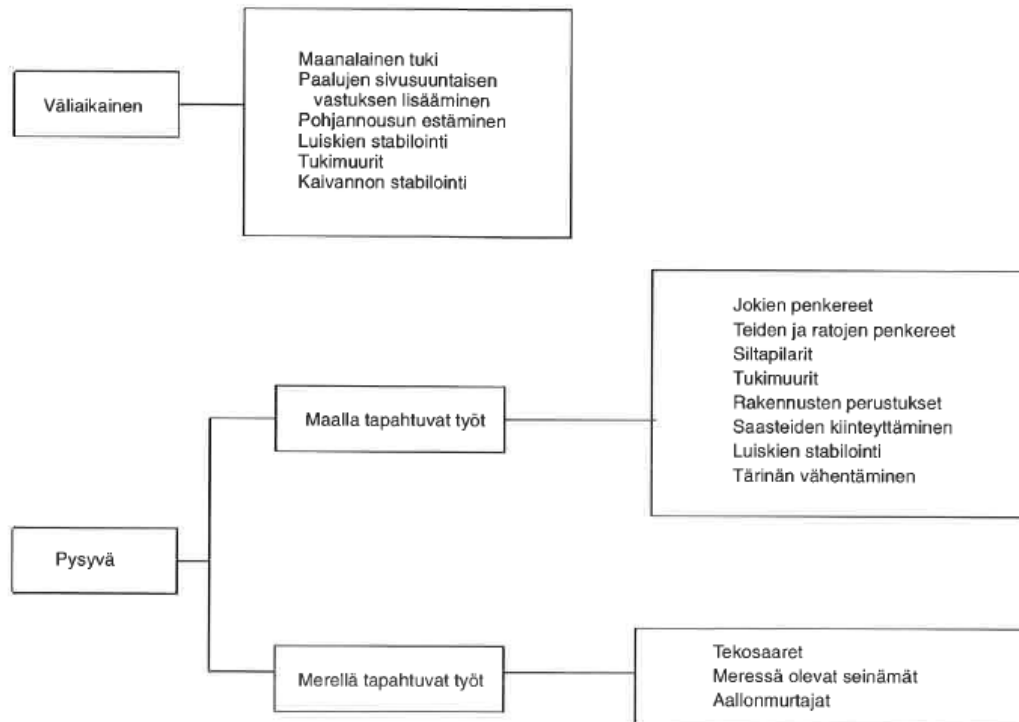


Merkinnät

- a Tiepenkereen vakavuus/painuma
- b Korkean penkereen vakavuus
- c Sillan maatuen epätasainen painuma
- d Leikkausluiskan vakavuus
- e Lähellä olevan rakenteen vaikutuksen vähentäminen
- f Tuetun kaivannon maan paine / maanpinnan nousu
- g Paaluperustuksen sivusuuntainen vastus
- h Laiturin kantokyky
- i Aallonmurtajan kantokyky

Kuva 21. Havainnollistava kuva syvästabiloinnin käyttökohteista. (SFS-EN 14679/2005, Kuva A.14).

Märkästabilointiin sopivia käyttökohteita ovat mm. kaivantotuennat, pohjaveden kulun katkaisu, luiskien stabilointi, maanpainaumisen estäminen, maaperän stabilointi sekä lujittaminen, saastuneiden maiden suojatömenpiteet sekä saasteiden sidonta, erittäin heikkojen maiden käsittely sekä maaperän vettymisen estäminen. (Bruce 2000, 40.)



Kuva 22. Syvästabiloinnin käyttökohteita. (SFS-EN 14679/2005, Kuva A.2).

3.4.1 Maaperän vakauttaminen ja painaumien vähentäminen

Pilarit sekoitetaan useimmiten seininä tai erimuotoisina kennoina. Maaperän lujittamista stabiloimalla hyödynnetään rakennusten ja säiliöiden perustuksiksissa sekä infrarakentamisessa ratateillä ja autoteillä. (Bruce 2000, s. 40). Vakauttamista ja painaumien vähentämistä hyödynnetään mm. tiepenkereissä, korkeissa penkereissä, sillan maatuilla, läheisten rakennusten/kuormien vaikutusten vähentämisessä, paaluperustusten sekä sivuttaissuuntaisen vastuksen, laiturin kantokyvyn sekä aallonmurtajien kantokyvyn lisäämisessä. (SFS-EN 14679/2005, Kuva A.14.)

3.4.2 Kaivanto- ja luiskatuennat sekä vedeneristys

Kaivantojen seinämä voidaan tehdä stabiloimalla pilarit lomittain tai osittain toistensa sisään. Luiskia stabiloimalla estetään mm. maanvyöryjä parantamalla luiskien leikkauslujuutta. Tarvittaessa märkään maabetoniin voidaan asentaa lisäraudoitusta sekä maa-ankkureita. Teräspalkkien asennusta voidaan helpottaa pidentämällä ja toistamalla sekoitusta. (Bruce 2000, 41.)

Rakenteellisen tuennan lisäksi pilariseinämä estää pohjaveden pääsyn kaivantoon. Veden kulun estämistä voidaan hyödyntää myös esimerkiksi patojen tai jokien läheisyydessä. Vaaditut puristuslujuudet ovat yleensä 0,7...3 MPa. Pilarien läpäisevyys on 10^{-8} ... 10^{-9} m/s ja se voidaan vähentää

10^{-9} ... 10^{-10} m/s käyttämällä bentoniittia, lentotuhkaa tai kivituhkaa. Tämä yleensä kuitenkin laskee pilarien puristuslujuutta. (mt.)

3.4.3 Maankäsittely

Maankäsittelyssä on kyse suuren pehmeän savimäärän käsittelystä maanpäällä, vesistöillä sekä vedellä sijaitsevalla alueella, kun kyseessä on laajoja pinta-aloja. Tyypillisiä käyttökohteita tälle ovat pehmeällä savelle rakennettavat ajoväylät tai tunnelit sekä ruopattujen vesialueiden pohjasedimenttien vahvistaminen ja ranta-alueen laajentaminen. Tarkoituksena on vähentää maanpainaumaa, parantaa maa-aineksen kantokykyä sekä estää maa-aineksen liukuminen. (Bruce 2000, 41.)

Maankäsittelyyn voidaan käyttää sekä pilari- että massastabilointia. Näissä kohteissa vaadittavat puristuslujuudet eivät ole korkeita vaan luokkaa 0,2...0,5 MPa, joten sementtiä voidaan korvata muilla sideaineilla kuten lentotuhka ja kipsi. Märkämenetelmässä tämä myös tarkoittaa, että käytettävän slurrin määrää voidaan lisätä maa-aineksen yhteneväisyyden parantamiseksi. (mt.)

3.4.4 Saastuneiden maiden käsittely

Saastuneita maita rajattaessa on kiinnitettävä erityisen suurta huomiota pilarien sekoittamiseen. Pilarien on oltava homogeenisiä ja tasalaatuisia, jotta niiden läpäisevyys olisi mahdollisimman pieni. Märkämenetelmässä voidaan hyödyntää bentoniittisavea läpäisevyyden minimoimiseksi. Saastuneita maita käsiteltäessä käsitellyn maan ja saasteen mahdollisiin kemiallisiin reaktioihin on kiinnitettävä huomiota erityisesti saasteen ollessa happanta. Saaste voi merkittävästi vaikuttaa pilarien lujuuteen. (Bruce 2000, 42.)

Pilarit voivat myös toimia suodattimina saasteille, jos pilarin läpäisevyyden annetaan olla samanlainen kuin muulla maaperällä. Tämä toimii erityisesti pohjavesialueilla. Stabilointiin voidaan myös käyttää eri reagentteja maa-aineksen neutralisointiin. Esim. happoja, emäksiä, hapettimia. Yleisiä käyttökohteita ovat jätteenkäsittelylaitokset ja kaatopaikat. (mt.)

Saasteiden sitominen stabiloimalla on havaittu erittäin hyödylliseksi maaperissä ja liejuissa, joissa on paljon metalleja, lievästi haihtuvia sekä alhaisesti radioaktiivisia materiaaleja. Etuina ovat mm. alhaisemmat terveysriskit, aineen hävittämistarpeen eliminointi, alhaisempi hinta sekä työnopeus. (mt.)

4 MÄRKÄ- JA KUIVAMENETELMÄN VERTAILU

4.1 KUSTANNUKSET

Märkä- ja kuivamenetelmien työkustannusten rakenteet ovat tyypeiltään samanlaiset. Molemmissa menetelmissä hinta koostuu pilarin koosta ja määrästä, sideaineesta ja sen seossuhteista, työkoneiden kustannuksista (huolto, polttoaine, vuokrat), työmaan perustus- ja ylläpitokustannuksista, koemittauksista, GPS:n kustannuksista sekä työntekijöiden että toimihenkilöiden palkoista. Kuivamenetelmässä stabilointikohteessa toimii useimmiten yksi työkone, kuljettaja, työmaatoimihenkilö sekä mahdollisesti huoltomies. (KFS Finland ja Keller Group urakoiden laskentataulukot 2018)

Märkämenetelmässä lisäkustannuksia aiheuttaa lisääntynyt miehityksen ja kaluston määrä, korkeampi polttoaineenkulutus kalustossa sekä kalliimpi sideainekustannus. Lisäkustannuksia aiheuttaa myös mahdollinen raudoitustyö, jota laskelmissa ei olla otettu huomioon. Sideaineen sekoitusaseman havaittiin olemaan lähes samanlainen Suomessa jo käytetyn suihkuinjektioinnin sekoitusaseman kanssa, joten tarpeen tullessa näiden projektien kalustoja voitaisiin sovittaa lomittain. (mt.)

Tilaaajan oletuksena oli, että märkämenetelmän työkustannukset olisivat kuivamenetelmän ja Suomessa entuudestaan käytetyn suihkuinjektioinnin välimaastossa. Tilaajalta oli toimittava yrityksen sisäiset laskentataulukot, joiden perusteella pystyin laskemaan seuraavat suuntaa antavat hinta-arviot per pilarimetri. Suihkuinjektioinnista myös annettiin hyvin karkea suuntaa antava hinta-arvio. Lasketun pilarin halkaisija oli 0,8 m. (Virolainen, haastattelu 27.4.2018)

Taulukko 1. Eri pohjavahvistusmenetelmien hintavertailu.

Pilarien kokonaispituus	Kuivamenetelmä (€/metri)	Märkämenetelmä (€/metri)	Suihkuinjektointi (€/metri)
500 m	35,30	150,10	300
1000 m	22,40	123,00	-
2000 m	16,00	99,60	250
5000 m	12,09	89,50	-
7500 m	11,23	85,80	-
10 000 m	10,80	84,40	230

Taulukko 2. Eri pohjavahvistusmenetelmien hintavertailu, kun mukaan huomioidaan lujuus.

Pilarien kokonaispituus	Kuivamenetelmä (€/kPa*m)	Märkämenetelmä (€/kPa*m)	Suihkuinjektointi (€/kPa*m)
500 m	0,44	0,05	0,1
1000 m	0,28	0,041	-
2000 m	0,2	0,0332	0,083
5000 m	0,15	0,0298	-
7500 m	0,14	0,0286	-
10 000 m	0,135	0,0281	0,077

Käytetyt arvot ovat keskimääräisiä huippulujuuksia: 80 kPa kuivastabiloinnissa, 3000 kPa märkästabiloinnissa ja 3000 kPa suihkustabiloinnissa.

4.2 MÄRKÄSTABILOINNIN TYÖSAAVUTUKSET

4.2.1 Perustukset

Projektin tarkoituksena oli rakentaa 78 m korkea tuuliturbiini 16,5x16,5 m neliskanttiselle jalustalle alueella, jossa maaperän olosuhteet olivat valmiiksi epäedulliset. Alueella oli hiekkaista savea n. -7,5 m syvyyteen saakka ja sitä syvemmällä oli tiivistä hienoa/keskirakeista hiekkaa sekä savista hiekkaa. Tietokoneohjelman laskelmien mukaan ilman stabilointia tai muuta perustamista, alusta olisi kuormista johtuen uponnut toisesta päästä 39,7 mm ja noussut toisesta päästä 19,5 mm.

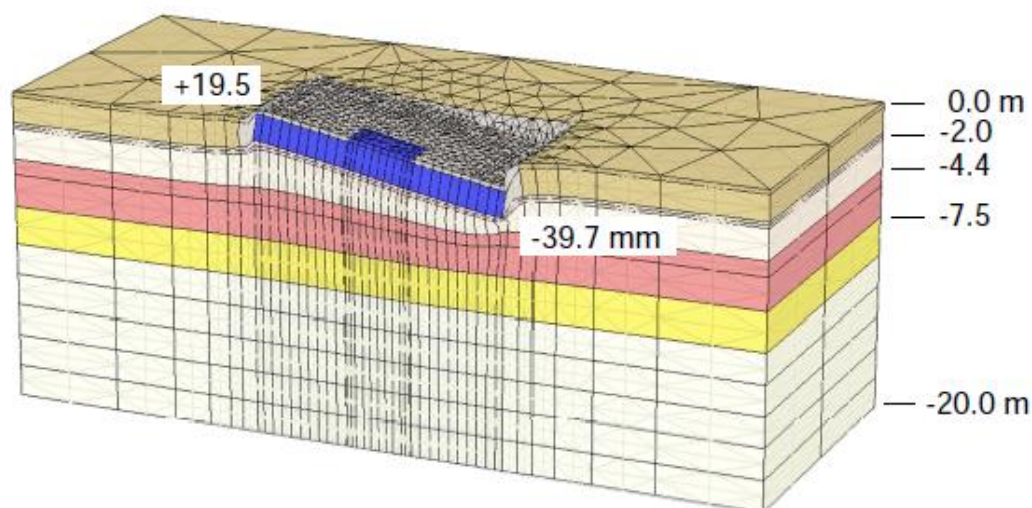
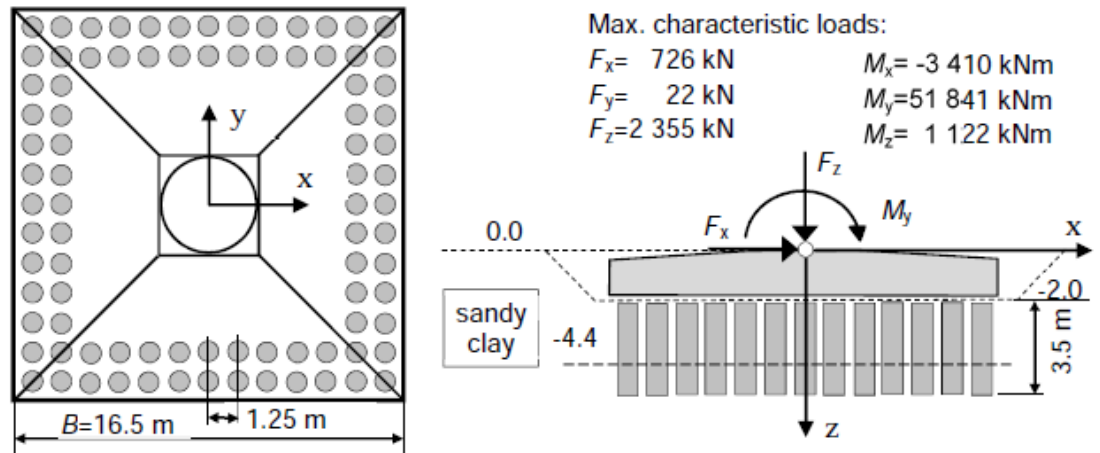


FIG. 4. Foundation tilt in case of unimproved ground (scaled 50 times).

Kuva 23. Turbiinin alustan mallinnettu kallistuminen. (Topolnicki & Soltys 2012)

Stabilointi toteutettiin 88 kappaleella märkästabiloituja, halkaisijaltaan 0,8 metrin pilareilla, jotka stabiloitiin kahdessa vierekkäisessä rivissä laatan ulkoreunalla. Käytetyn slurrin suhteellinen tiheys oli 1,6 ja sementtiä kului keskimäärin noin 320 kg per käsitelty maakuutio. Komposiittisementti

koostui Portlandsementistä CEM II/B-M 32,5R, josta klinkkeriä 67...79 %, lentotuhkaa sekä masuunikuonaa 21...35 % sekä muita lisäaineita 0...5%



Kuva 24. Pilarien stabilointikuvio sekä turbiinin oletetut kuormat ja momentit. (Topolnicki & Soltys 2012)

Stabiloinnin jälkeen uppoaminen vähenisi n. 17...20 mm ja nousu laskisi n. 7...10 mm tasoille. Pilarin olisivat painuneella puolella keskimäärin n. 340 kPa puristuksessa ja nousseella puolella keskimäärin n. 66 kPa vedossa. Turvallisuuskertoimella vaadittu lujuus pilareilla nousi 2,1 MPa:in. Tuorekauhamittausmenetelmällä otetuilla koekappaleilla päästiin kuitenkin 5 MPa keskilujuuteen 28 päivän kypsyamisajalla, mikä ylitti vaatimukset helposti. (Topolnicki & Soltys 2012.)

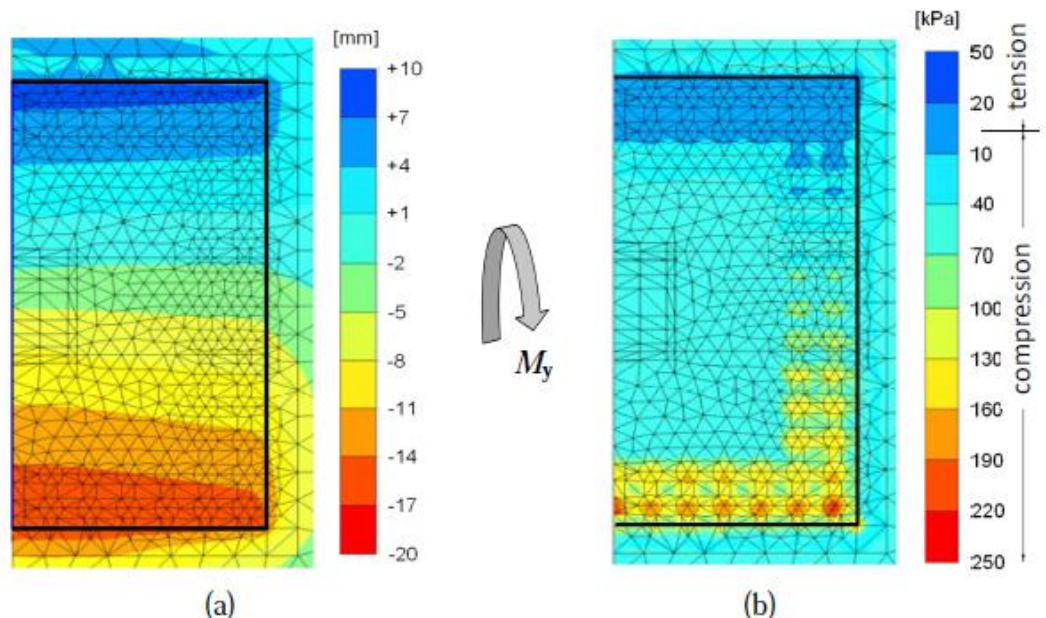
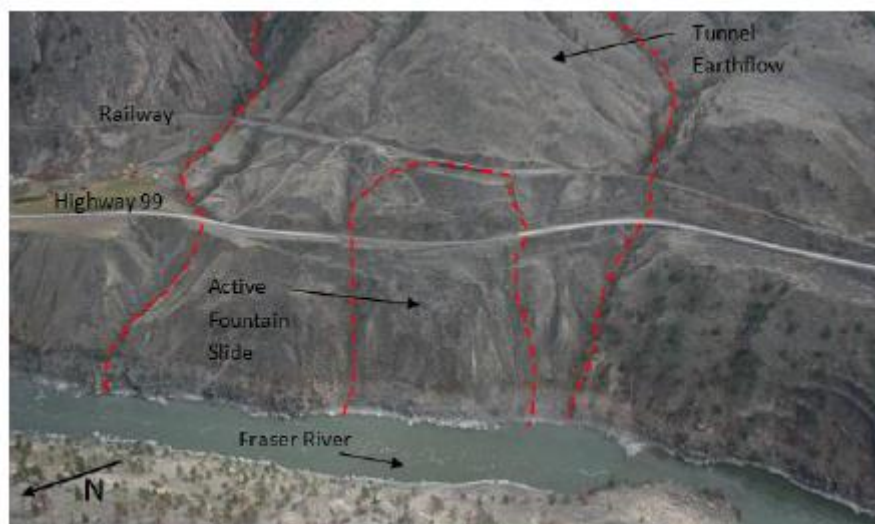


FIG. 6. (a) Vertical displacements after ground improvement, (b) corresponding vertical stress at the foundation level.

Kuva 25. Stabiloinnin jälkeinen siirtymä ja pilarikohtaiset kuormitukset. (Topolnicki & Soltys 2012)

4.2.2 Luiskan stabilointi

Kanadassa hyödynnettiin märkästabilointia maanluisun estämiseen maantien vieressä. Maa liikkui vuonna 2009 keskimäärin 5 mm/päivä ja enimmillään 10 mm/päivä. Maanluisumisen laajuus on arviolta 750 000 m³. Stabiloinnissa käytettiin leikkaavaa erikoistyökalua, jolla saadaan aikaan maabetonipaneeli. Paneelit olivat 8 m pitkiä ja niitä asennettiin yhteensä 60 kappaletta 3 paneelin ryhmissä kohtisuoraan luisua vastaan. (Denies 2012)



Kuva 26 Stabiloitava luiska ja maanluisun alue. (Denies, 2012)



Kuva 27. Paneelin sekoitustyökalu. (Denies 2012).

4.2.3 Saastuneen maan käsittely

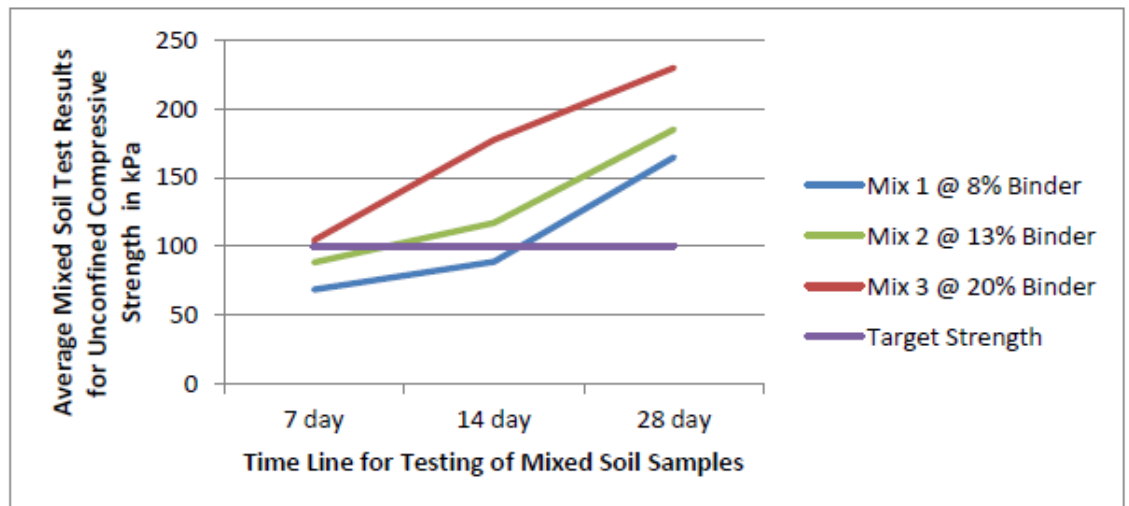
Lontoon West Traydonissa tehtiin vuonna 1996 stabilointia alueella, jossa maaperässä oli paljon metalleja kuten kuparia, nikkeliä, sinkkiä, lyijyä ja cadmiumia. Hankkeen onnistumista tutkittiin 17 vuotta sen valmistumisen jälkeen. Tutkimusella osoitettiin, että stabilointikäsittely pysyi toimivana pidemminkin ajan jälkeen ja se stabilointi todellakin estää metallien huuhtoutumisen ympäristöön. (Al-Tabbaa, 2014)

4.2.4 Satama-alueen laajentaminen

Poolen satama-alueella Englannissa suoritettiin saastuneiden silttien ja turpeiden massastabilointia kesäkuussa 2013. Projektissa oli alun perin tarkoituksena korvata massa rakeisilla täyttömailla, mutta ponttiseinän vaakaana pysyminen todettiin työnaikana ongelmaksi sekä menetelmä havaittiin erittäin kalliiksi toteuttaa 5 metrin syvyyteen laiturin tasosta. Massamenetelmällä pystyttiin eliminoimaan seinän sortumisriski sekä laskemaan työhön kuluva aika 4 viikosta 7 päivään. Työ toteutettiin ALLU sekoittimella, 35 tonnin kaivinkoneella sekä slurrin valmistusasemalla. Työ tehtiin soluittain laiturin päästä päähän. (Deep Soil Mixing Ltd 2013.)



Kuva 28. Vanha laituri ja pehmeää merenpohjasilttiä. (Deep Soil Mixing Ltd, 2013)



Kuva 29. Lujuusvaatimus ja laboratoriossa eri seossuhteilla saavutetut keskimääräiset lujuusarvot. (Deep Soil Mixing Ltd 2013).



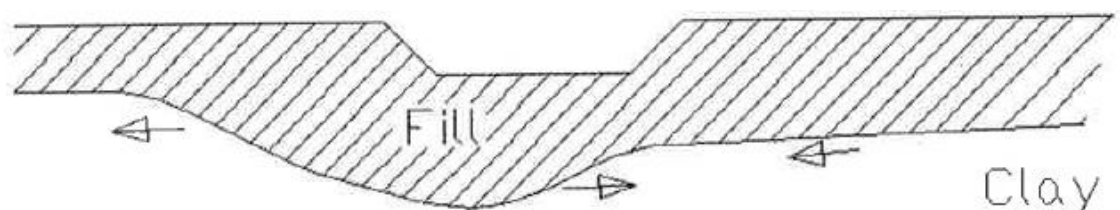
Kuva 30. Massastabilointikone ja avustava kaivinkone. Kaivinkone tarkistaa syvyyden hiekkaan saakka sekä poistaa mahdollisia sekoittamista haittaavia esteitä. (Deep Soil Mixing Ltd, 2013)



Kuva 31. Massastabilointityökone sekoittamassa solua 2. Taustalla on edellisenä päivänä sekoitettu solu 1, joka on jo alkanut kovettua. (Deep Soil Mixing Ltd 2013.)

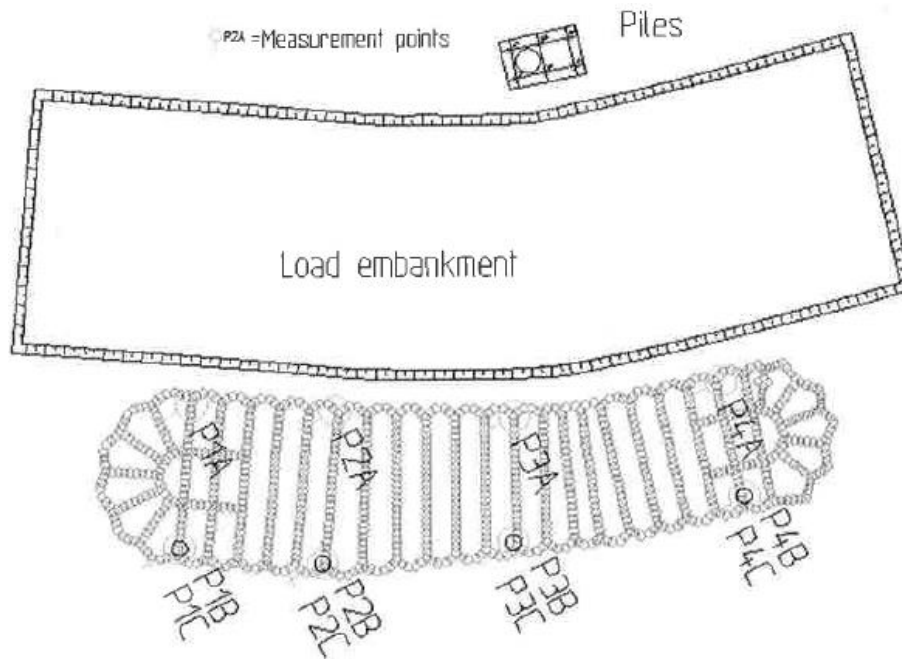
4.2.5 Sivuttaissiirtymän estäminen

Suomen ainoa tähänastinen märkästabilointihanke aloitettiin Helsingin Arabianrannassa kesällä 1997. Alueella on sinne tuotuja täytemaita sekä 5...6 m paksu orgaaninen savikerros. Savikerros on paksuimmillaan 25 m. Erityisesti ongelmaksi koettiin saven liikkuminen tulevasta kuormista johdettuna.



Kuva 32. Havainnoillistava poikkileikkaus Arabianrannan maaperästä. (Gulin & Wikström, 2000)

Alueelle päätettiin rakentaa kennomainen siirtymäeste, joka koostuu lo-mittain olevista 900 mm halkaisijan pilareista 625 mm jaolla. Esteen pituus on 70 m, leveys 15...18 m ja syvyys 21...26 m. Käytetyn slurrin vesi-sementti suhde oli 0,7 ja stabilointiin käytettiin 400 kg sementtiä per kuutio käsiteltä maata. Hanke toteutettiin märkämenetelmänä, sillä edeltävät kokeet osoittivat työn tuloksen olevan turvallisempaa sekä tasalaatuisempaa. (Gulin & Wikström 2000)

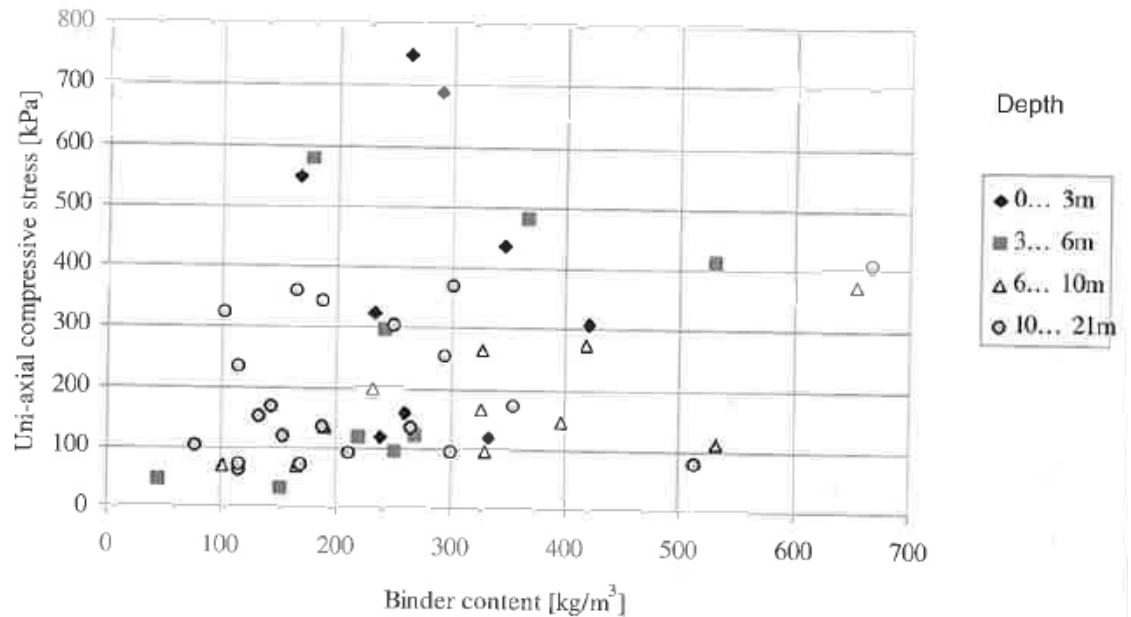


Kuva 33. Painopenkka, pilarien sekoituskuvio sekä siirtymää tarkkailevien inklinometriä asennuspisteet. (Gulin & Wikström 2000.)

Vuoden 1998 alussa aloitettiin pilarien kuormitus rakentamalla 2,6 m korkea painopenkka. Siirtymiä seurattiin 1,5 vuoden ajan ja stabiloidun esteen havaittiin liikkuneen 10...60 mm ja stabiloimattoman alueen liikkuneen 70...130 mm.

Ongelmaksi hankkeessa havaittiin odotettujen puristuslujuuksien alittuminen, jotka olivat toisaalta tarpeettoman korkeat (800/1500 kPa). Sideaineen määrä pilareissa vaihteli paljon eivätkä ne olleet tarpeeksi tasalaatuisia. Sideainetta oli keskimäärin 273 kg/m^3 (vaihteluväli 46...666 kg/m^3). Saavutettu lujuus 30...70 päivän näyteille oli keskimäärin 200 kPa (vaihteluväli 20...1531 kPa). Lisäksi pilarien alapäistä yritettiin tehdä lujempia kuin yläpäistä, mutta toteutuma oli päinvastainen.

Staattis-dynaamisia penetrometrikokeita tehtiin 200...330 päivän jälkeen valmistamisesta ja keskimääräinen leikkauslujuus oli 230...460 kPa. Terien pyörimisnopeus oli 60 kierrosta minuutissa, painamisnopeus 100 cm/min ja nostonopeus 180 cm/min. Yhden pilarin valmistamiseen meni keskimäärin 0,5...1,5 tuntia. Raportin arvion mukaan sekoitustehoa olisi pitänyt lisätä paremman lujuuden ja tasalaatuisuuden saavuttamiseksi. (Vähäaho 2000.)



Kuva 34. Sementin määrän ja puristusluuden suhde eri syvyyksissä. Koe-kappaleet kuukauden vanhoista pilareista. (Vähäaho 2000.)

4.3 LAATU MÄRKÄ- JA KUIVASTABILOINNISSA

InfraRYL ei erikseen ota kantaa märkästabilointiin millään tasolla. Kaikki InfraRYLin ohjeistus on joko yleistasolla tai kuivastabilointiin liittyvää. Pilaristabiloinniltiin kuitenkin sallitaan 0,2 m vaakapoikkeama suunnitelmien sijainnista (putkijohtojen alla 0,1 m), suurin sallittukaltevuus 20 mm/m, mittaustarkkuus vähintään 5 %/pilarimetri, sideaineen poikkeamasuunnitellusta -10...+20% sekä pilarin keskimääräinen sideaineen määrä saa poiketa suunnitelma-asiakirjoista enintään 5 %. Lujuudenalituksille on prosenttikohtaiset ohjeet. Sideaineilla vaaditaan CE-merkinnät ja sen reagoiminen maa-aineksen kanssa on tunnettava. (InfraRYL 14131/2017.)

4.3.1 Ennen urakkaa

Ennen urakkaa alueella on suoritettava pohjatutkimuksia, joilla selvitetään maa-aineksen raekoot, maatyyppejä, kosteusprosentti, tiiveys, jäykkyys, pohjaveden taso ja onko kyseessä paikallaan pysyvä vesi vai vuorovesi. Lisäksi on hyödyllistä selvittää leikkauslujuus, plastisuus, orgaanisen aineksen osuus, rikkipitoisuus ja mahdollisten saasteiden pitoisuus. (Keller Product Guide for Soil Mixing 5.2.1 2017)

Urakalla voi olla vaikutuksia läheisiin rakennuksiin, sillä märkästabilointi väliaikaisesti heikentää maankestävyyttä. Läheisiä rakennuksia tulee siis tarkkailla. Tulee myös ottaa huomioon mahdollinen meren vaikutus, kairavantojen syvyydet, työtason korkomuutokset ja vaikuttavat kuormat esim. seinämistä, teistä, liuiskista. On myös luonnollisesti tiedettävä tilaajan vaatimukset käsittelyn suhteen kuten käsittelyn tarkoitus, pilarien halkijat

sekä syvyydet sekä vaatimukset koestabiloinneille kuten lujuus, jäykkyys, läpäisevyys ja näytteiden minimimäärä. (mt.) Mahdollisia lyhyen tai pidemmän ajan maansiirtymiä voidaan seurata ennalta asennetuilla inklinometreillä tai kuormasoluilla. (Denies & Lysebetten, 2012, 29.)

Ennen urakkaa on myös tiedettävä maanalaiset rakenteet ja riskitekijät. On tiedettävä alueella mahdollisesti sijaitsevat viemärit, vesilinjat, puhelin- ja datakaapelit, kaasulinjat, jännitekaapelit ja niiden jännitteet sekä räjähteet, jos toimitaan riskialueella. On myös tiedettävä mahdolliset ristiriidat alueella toimivan maanomistajan, tilaajan tai muun auktoriteetin kanssa. (Keller Product Guide for Soil Mixing 5.2.1 2017) Maanalaiset riskitekijät saattavat olla saasteita tai muita esteitä. Näitä ovat mm. vanhat kaatopaikat, teollisuusjäte, kemian teollisuuden saasteet, puun juuret sekä isot kivet. (EN 14679/2005, A.3.1.)

Laboratoriokokeilla selvitetään nesteraja, plastisuusraja, plastisuus indeksi, kosteusprosentti, orgaanisen aineksen osuus, aineksen tiheys, hiukkauskoko sekä lujuuskoe kappaleet (esim. 7, 14 ja 28 päivää). Kokeilla määritetään alustava vaadittu sideaineen seossuhde ja määrä (Keller Product Guide for Soil Mixing 5.6 2017)

4.3.2 Urakan aikana

Urakan aikaiseen laadunvarmistukseen kuuluu työnsuunnitelmat mihin on esitetty työnlaajuus, riskiarviot (maanpainauma, kaapelit, työturvallisuus jne), työn laatuparametrit, aikataulu, maan olosuhteet, pohjaveden taso, laatusuunnitelma sekä siihen liittyvät kokeet ja mittaukset, ympäristön olosuhteet (perustukset, kuormat, maanalaiset rakennusten kerrokset, kadut, raiteet) sekä työmaalogistiikka. (Keller Product Guide for Soil Mixing 5.2.2 2017)

Taulukko 3. Valmistusparametrit mitataan 0,5 m välein (SFS-EN 14679/2005, 9.4.1.1)

Kuivastabilointi	Märkästabilointi
Tankin ilmanpaine	Slurrin paine + mahdollinen ilmanpaine
Kierrospainuma- ja kierrosnousunopeus	Kierrospainuma- ja kierrosnousunopeus
Pyörimisnopeus (r/min, painamis- ja nostovaiheessa)	Pyörimisnopeus (r/min, painamis- ja nostovaiheessa)
Sideaineen määrä syvyyden metriä kohden painamis- ja nostovaiheessa	Slurrin määrä syvyyden metriä kohden painamis- ja nostovaiheessa

Taulukko 4. Työnaikaiset tuotantoparametrit (SFS-EN 14679/2005, 10.1.2)

Kuivastabilointi	Märkästabilointi
Valmistuspäivä ja kellonaika	Valmistuspäivä ja kellonaika
Pilarin numero	Pilarin numero
Sekoitustangon ja sekoitustyökälun muoto	Sekoitustangon ja sekoitustyökälun muoto
Kierrospainuma- ja kierrosnopeus (mm/r) tai nopeus (m/min)	Kierrospainuma- ja kierrosnopeus (mm/r) tai nopeus (m/min)
Sideaineen tyyppi ja koostumus	Sideaineen tyyppi ja koostumus
	Vesi-sideainesuhde
Sideaineen määrä syvyyden metriä kohden painamis- ja nostovaiheessa	Slurrin määrä syvyyden metriä kohden painamis- ja nostovaiheessa
Valmistustoleranssit (pystysuoruus, halkaisija, sijanti)	Valmistustoleranssit (pystysuoruus, halkaisija, sijanti)
Valmistusjärjestys ja ajoitus	Valmistusjärjestys ja ajoitus
Pilarin yläpinnan ja kärjen taso	Pilarin yläpinnan ja kärjen taso

Kaikesta työmaalle toimitetusta sideaineesta ylläpidetään pöytäkirjoja. Jokainen työmaalle toimitettu sideainekuorma tarkistetaan ja toimitusasiakirja säilytetään sekä jokaisesta toimituksesta täytyy käydä ilmi toimitetun sideaineen määrä ja koostumus, esim. toimittajalta pyydetään laaducertifikaatti. (mt.)

Sekoituskaluston kuljettaja tai märkämenetelmässä mylläri ylläpitää pöytäkirjaa sideaineen sekoituksesta, syötöstä ja hukka-aineksesta. Pöytäkirja voi myös olla tietokoneen täyttämä, mutta varmuustoimenpiteenä suositellaan käsintehtyä pöytäkirjaa. (mt.)

Taulukko 5. Pöytäkirjaan merkittäviä tekijöitä. (Keller Product Guide for Soil Mixing 5.2.2.3 2017)

Testityyppi	Testaamismenetelmä	Mittaustaajuus
Valmiin slurrin tiheys	Hydrometri/Muta-vaaka	Kahdesti vuorossa automaattisekoituksella. Ennen pumpausta manuaalisekoituksella
Slurrerien kokonaismäärä	Käsin ylläpidetty pöytäkirja	Päivittäin
Sideaineen toimitus	Kuormakirjat/laatudokumentit sideaineista	Joka toimituksella

Työnjohtaja laatii pöytäkirjan, missä merkitään jokainen paalu. Pöytäkirjasta käy ilmi käytetty työkone, paalun sijainti, halkaisija, paalunumero, työtasonkorkeus, kulma, paaluun syötetyn sideaineen/slurrin määrä, koko painettu syvyys, lisäaineeton painettu osuus (jos on tarkoituksen mukaan/sattunut tapahtumaan), sekoitettu pituus sekä suunniteltu pilarin

ylä- ja alapinnan taso. Lisäksi kaluston kuljettaja tai työnjohtaja täyttää pilarin muuttunut ylä- ja alapinnan tasot mahdollisten maaolosuhteiden takia sekä huomiot ylijäämästä, tyhjättilavuudesta, maanalaisista esteistä ja/tai ym. työnaikaiset huomiot. (mt.)

Työkoneella seurataan digitaalisesti em. datan lisäksi aikaa, syvyyttä, painamisnopeutta, nostonopeutta, terän pyörimisnopeutta. Sideaineissa seurataan slurrin pumppausnopeutta märkämenetelmässä tai sideaineen syöttönopeutta ja ilmanpainetta kuivamentelmässä. Merkitään ylös myös GPS koordinaatit pilareille sekä kokonaisarvot kuten maksimisyvyys, pilarien pituudet, asennuksen kesto ja syötetyn sideaineen määrä yhteensä. Sekoituksen aikana seurataan vääntömomenttia ja alaspäin suunnattua voimaa maanalaisten olosuhteiden paremmin ymmärtämiseksi. Tästä tehdään pöytäkirjat käsin, jos tietokoneohjattu mittaaminen pettää. (mt.)

Koska laboratoriosta saadut tulokset ovat vain suuntaa antavia, täytyy myös tehdä koepilareita ja niille suoritettuja kenttäkokeita. Näillä kokeilla varmistetaan oikeanlaiset pilarilujuudet ja sideaineiden seossuhteet sekä määritetään em. syvästabilointityön valvotut laatuparametrit. Pilarien tasalaatuisuus voidaan selvittää kairaamalle, sydännäytteellä ja/tai nostamalla pilarit. Erilaisia kokeita ovat pressometri-, puristinkairaus-, staattiset/dynaamiset tunkeutumis- ja paineistettuja vedenläpäisykokeet. Pressometrikokeilla voidaan määrittää pilarin leikkauslujuus ja kokoonpuristuvuus. Puristinkairauskokeilla pystytään määrittämään lujuusominaisuuksia ja jatkuvuutta. Tunkeutumiskokeet ovat puristin- ja iskukairauksen välimuoto, jolla voidaan testata pilareita, joiden yksiakselinen puristuslujuus on ≤ 4 MPa. Vedenläpäisykokeilla määritetään veden läpäisevyyttä pilarin säteen suuntaan. (SFS-EN 14679/2005, B.5.3.)

Valmiista pilarista voidaan myös ottaa sydännäyte. Sydännäytteet pystytään ottamaan pyörivällä sydännäyteporalla ja se tehdään koko käsitellyn pilarin syvyydeltä. Näytteillä tutkitaan muodonmuutosominaisuuksia kuten lujuuksia, kimmomoduulia, hydraulista johtavuutta sekä tasalaatuisuutta. Sydännäytteen ottotekniikkaa ja näytteen halkaisijaa voidaan muuttaa käsitellyn maa-aineksen lujuuden ja rakeisuuden perusteella. Otettavien sydännäytteiden lukumäärä riippuu projektin koosta ja/tai monimuotoisuudesta maa-aineksen ja pilarien käyttötarpeen mukaan. Yhteen projektiin suositellaan kuitenkin tehtäväksi vähintään kolme sydännäytettä. Sydännäytteiden lisäksi tulee käyttää myös muita täydentäviä tutkimusmenetelmiä. (SFS-EN 14679/2005, B.5.2.3.)

Näytteistä laaditaan pöytäkirjat, johon luetellaan näytteenottopaikan nimi/numero, näytteen halkaisija, näytteenottoporan ja porausnesteiden tyyppi, näytteenoton suunniteltu sijainti pilarissa (sisältäen porauskulman) ja pilarin ikä näytteenottohetkellä. Lisäksi pöytäkirjaan liitetään näytteen pituuden/syvyyden kertova valokuva. Sydännäytteen ottaminen on kuitenkin erittäin hankalaa ja näytteenoton ollessa haastavaa voidaan käyttää pH indikaattoreita osoittamaan sementin olemassaolo näytekappaleessa,

poratut reiät voidaan myös kuvata porausnesteessä olleen hienoaineen asetettua. (Keller Product Guide for Soil Mixing, 5.2.2) Näytteet saattavat murentua ja katketa kohdissa, joissa on isompaa kiviainesta. Tämä tarkoittaa pienempää sydännäytekappaletta muutoin laadukkaasta pilarista. Heikommissa maa-aineksissa suositellaan kokenutta näytteenottoryhmää. (Hayward Baker Inc – Wet Soil Mixing Brochure 2014).

Tuorekauhanäyte on eurooppalainen näytteenottomenetelmä, jossa näytteenottokauha lasketaan halutulle syvyydelle ennen pilarin sitoutumista. Syyvyyden saavuttamisen jälkeen näyte ohjataan kauhan sisään ja kauha suljetaan. Maanpinnalla näyte laitetaan testaussylintereihin. Koekappaleiden annetaan kovettua 7 ja 28 päivän kypsyyteen ennen lujuusmittauksia. Yleensä näytteitä otetaan yksi per 500 m³ käsiteltyä maa-ainesta tai kerran vuorossa. (SFS-EN 14679/2005, B.5.2.4)

Työn aikana laitteisto on kalibroitava säännöllisesti. Keller group ohjeistaa seuraamaan seuraavia parametrejä heidän projektiansa aikana.

Taulukko 6. Kalibroitavia parametrejä sekä kalibrointimenetelmiä. (Keller Product Guide for Soil Mixing 5.4 2017)

Parametri	Kalibrointimenetelmä	Mittaustaaajuus
Painamissyvyys	Mittapisteet tangossa	Päivittäin
Pyörimisnopeus	Sekunttikello	Päivittäin
Painamis/nostonopeus	Sekunttikello	Päivittäin
Syöttönopeus	Määrän vertaaminen teoreettiseen	Päivittäin
Sekoittimen halkaisija	Mittanauha	Päivittäin
Vesi/sementtisuhde	Mutavaaka	Päivittäin
Sekoituslaitoksen vaaka	Tunnettuun painoon vertaaminen	Päivittäin
GPS/mittauskalusto	Tunnetut mittapisteet	Kerran viikossa
Tangon kallistus	Vatupassi	Joka pilarilla

4.3.3 Urakan jälkeen

Urakan jälkeiseen laadunvarmistukseen sisältyy koestabiloinneista laaditut raportit, joista ilmenevät pilarien sijanti ja, syvyys, valokuvat pilareista, em. työnaikaiset laatuparamerit, johtopäätökset, mahdolliset muutokset suunniteltuihin parametreihin sekä 28-päivän puristuslujuus. Toteutuneista pilareista on löydyttävä sijannit, mahdolliset muutokset suunnitelmiin hyväksyjän allekirjoituksella ja päivämäärällä, kunnallistekniikka, jos ne ovat syy muutoksiin stabiloinnissa sekä muut tärkeät työnaikaiset havainnot. Loppuraporttiin tulee sisällyttää kaikki toteutuneet parametrit. (Keller Product Guide for Soil Mixing 5.5 2017)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomessa on vain kerran tehty hanke märkästabiloimalla. Se ei kuitenkaan tuottanut toivottuja tuloksia, joten pysyttiin tutumpien työmenetelmien parissa. Opinnäytetyön aikasessa tiedonhaussa tuli selvästi esille, että työmenetelmät eivät selvästikään ole keskenään kilpailevia. Kuivastabiloinnilla pystytään edulliseen ja erittäin nopeaan maanominaisuuksien parantamiseen, kun lopputuotteen lujuuksilta ei vaadita erityisen paljoa. Sitä kuitenkin pystytään käyttämään vain koheesiomaissa kalustonmitoituksen ja sideaineiden takia. Suomessa savi- ja silttimaiden luonnollisen korkean kosteuden on myös katsottu olevan eduksi kuivastabiloinnille, joten märkästabilointiin perehtymistä ei olla selvästi koettu tarpeelliseksi.

Märkästabilointi tarjoaa mahdollisuuden kuivemman isompi rakeisen maa-aineksen stabilointiin koheesiomaan lisäksi, jolloin se tuottaa erittäin lujaa maabetonia. Lisämahdollisuuksia tarjoaa myös raudoituksen asentaminen tuoreeseen maabetoniin elementin leikkaus- ja vetolujuuden parantamiseksi. Olisi siis järkevämpää ajatella märkästabilointia vaihtoehdoksi perinteiselle putki-/betonipaaluutukselle, massojen vaihdolle tai pilaantumisen korvaamiselle sekä puhdistamiselle.

Märkästabilointi vaatii kuitenkin paljon opiskelua ja tutkimustyötä yrityksiltä oikeanlaisten työmenetelmien ja toimintatapojen löytämiseksi, jotta lopputuotteesta saadaan toivottujen tavoitteiden ja menetelmän mahdollisuuksien mukainen. Märkästabilointiin on mahdollista käyttää erikoisempaa sekoitustekniikka (mm. paneelimaiset sekoittimet) ja niiden lopputuloksiin olisi hyvä perehtyä. Märkämenetelmälle varmasti löytyy sopivia käyttökohteita Suomen tulevaisuudessa.

LÄHTEET

Al-Tabbaa A., Wang H. & Wang F. (2014). Leachability and heavy metal speciation of 17-year old stabilised/solidified contaminated site soils, abstractti.

Boehm D. W., Kiat J. H., Elliott D., Sobocinski R., Wackowski L. & Keslar N. (2017). Keller Product Guide for Soil Mixing. Saatavissa Keller Group Inc:lta

Bruce, D. A. (2000). Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Applications. Washington: U.S. Department of Transportation

Caraşca, O. (2015). Soil improvement by mixing: techniques and performances.

Denies N. & Lysebetten G. V. (2012). General Report SESSION 4 – SOIL MIXING 2 – DEEP MIXING. Bryssel: International Symposium on Ground Improvement

European Standard EN 14679 (2005), Execution of special geotechnical works. Deep mixing. Geotechnicaldesign. Haettu 14.3.2018 osoitteesta <https://geotechnicaldesign.info/en14679/2005.html#c1>

Farouk A. & Shahien M. M. (2013). Ground improvement using soil-cement columns: Experimental investigation.

Gulin K. & Wikström R. (2000). Grouting Soil Improvement Geosystems including Reinforcement: A full-scale test of a displacement barrier.

Hayward Baker Inc – Wet Soil Mixing Brochure (2014). Yrityksen esite.

InfraRYL (2017). Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. 14130 Stabiloidut maarakenteet. Helsinki: Rakennustieto

Keller Group Inc (2018). Laskentataulukko. Saatavissa Keller Group Inc:lta

KFS Finland Oy (n.d. a). Etusivu - KFS Finland Oy. Haettu 13.3.2018 osoitteesta <https://www.kfs.fi/>

KFS-Finland Oy (n.d. b). Stabilointi – KFS Finland Oy. Haettu 13.3.2018 osoitteesta https://www.kfs.fi/kfs_palvelut/syvastabilointi/

KFS Finland Oy (2018). Laskentataulukko. Saatavissa KFS Finland Oy:ltä

Poole Quay Extension – RNLI (2013) Birchwood: Deep Soil Mixing Ltd

Standardi SFS-EN 14679 Pohjarakennustyöt. Syvästabilointi. (2005) Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS

Swedish Deep Stabilization Research Centre (2005). International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances mixing, Report 13/2005. Linköping: Swedish Deep Stabilization Research, c/o Swedish Geotechnical Institute

Topolnicki, M. & Soltys, G. (2012). Novel Application of Wet Deep Soil Mixing for Foundation of Modern Wind Turbines.

Vähäaho I. (2000). Grouting Soil Improvement Geosystems including Reinforcement: Deep wet soil-mixing test at Old City Bay in Helsinki.

Haastattelut

Partanen, S. (2018). Vastaavatyönjohtaja, KFS Finland Oy. Haastattelu 10.4.2018

Violainen M. (2018). Projektipäällikkö, KFS Finland Oy. Haastattelu 27.4.2018