

# Syvästabilointi kehittyvänä pohjavahvistusmenetelmänä

International Conference IS-Tokio '96



Tielaitoksen  
selvityksiä  
77/1996

Helsinki 1996

Geokeskus

Tielaitoksen selvityksiä  
77/1996

**Syvästabilointi kehittyvänä  
pohjavahvistusmenetelmänä**

International Conference IS-Tokio '96

**Tielaitos**  
Geokeskus

Helsinki 1996

ISSN 0788-3722  
ISBN 951-726-305-8  
TIEL 3200444  
Oy Edita Ab  
Helsinki 1997

Julkaisun kustannus ja myynti:  
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,  
painotuotepalvelut  
Telefax 0204 44 2652

Joutsenmerkin arvoinen paperi

**Tielaitos**  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. vaihde 0204 44 150

## Alkusanat

Tämä julkaisu on laadittu kansainvälisen konferenssin IS-TOKIO '96 (Second International Conference on Ground Improvement Geosystems "Grouting and Deep Mixing" pohjalta. Konferenssi pidettiin toukokuussa 1996 Tokiossa. Osanottajia oli listan mukaan noin 460 ja heistä suurin osa niinkuin myös kirjoittajista oli japanilaisia. Suomesta osanottajia oli 10. Special Lectures -istunnoissa esitettiin yleiskatsaus syvästabilointitekniikoihin Japanissa ja pohjoismaissa sekä injektointitekniikoihin Japanissa, Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa. Japanin geoteknisen yhdistyksen teknisen komitean laatimat syvästabilointiraportit olivat istunnoissa vahvasti esillä.

Konferenssin kaksi pääaihetta olivat syvästabilointi ja Jet Grouting. Tässä julkaisussa on keskitytty selostamaan lähinnä konferenssin syvästabilointiantia. Japani on Pohjoismaiden ohella maailman johtava maa syvästabilointitekniikan soveltamisessa. Kohteet ovat pohjoismaisen mittapuun mukaan suuria.

Japanilainen syvästabilointitekniikka perustuu pääasiassa märkämenetelmään eli slurryn käyttöön. Etuna kuivamenetelmään verrattuna on sideaineen parempi käsiteltävyys ja sekoitettavuus. Kuivasekoitusmenetelmän etuja ovat alhaiset kustannukset ja nopea rakentaminen mutta haittoina on alhainen lujuustaso ja epätasainen laatu.

Stabilointimenetelmää on käytetty Japanissa savipitoisten maalajien lujitukseen ja juoksettumisen estämiseen yli 20 vuotta. Kuitenkin menetelmässä on vielä paljon ongelmia ratkottavana. Menetelmän kustannuksia pidetään suhteellisen korkeina muihin vahvistusmenetelmiin verrattuna.

Kovia pilareita (puristuslujuus 1 MPa:n suuruusluokkaa tai yli ja muodonmuutos 0,1 %:n luokkaa) käytettäessä rakenne mitoitetaan jäykkänä rakenteena. Tällöin pilarin taipuvuusvetolujuus ja rakenteen vaakakuormien sietokyky voivat olla suunnittelussa mitoitettavina tekijöinä. Ongelma voi olla ratkaistavissa ainoastaan blokkistabiloinnin tai seinämäisen stabiloinnin avulla.

Panostus tuotantomenetelmien parantamiseen ja erityisesti sekoituksen tehokkuuden lisäämiseen koettiin tärkeäksi. Laadun oikea arviointi koetaan menetelmän tulevaisuuden kannalta tärkeäksi, koska laadun aliarviointia tapahtuu mm. näytteenoton kehittymättömyyden takia.

Tämän julkaisun kirjoitustyön ovat tehneet Hans Rathmayer VTT Yhdyskuntateknikasta (kappale 1.1), Markku Tuhola OL-Consulting Oy:stä (kappaleet 1.3, 1.4 ja luku 2) sekä Pentti Salo Tielaitoksen geopalveluista (kappale 1.2 ja luku 3). Rathmayerin osuus perustuu hänen konferenssissa pitämäänsä ja konferenssiraportissa julkaistuun Special Lecture -esitykseen Deep Mixing Methods for Soft Soil Improvement in the Nordic Countries. Muiden kirjoittajien osuus perustuu konferenssianttiin.

Helsingissä joulukuussa 1996

Geopalvelut



<b>1 SYVÄSTABILOINTIMENETELMÄT</b> .....	<b>5</b>
1.1 SYVÄSTABILOINTI POHJOISMAISSA.....	5
1.1.1 Alustus.....	5
1.1.2 Stabiloidun pilarin ominaisuudet ja käyttäytyminen.....	5
1.1.3 Pilaristabinoinnin merkittävimmät kehitysvaiheet.....	7
1.1.4 Pohjoismaisen syvästabilointiteknologian tutkimus- ja kehittämissvaiheet.....	9
1.1.5 Sideaineisiin kohdistunut T & K- toiminta.....	10
1.1.6 Tutkimusten soveltaminen käytännön mitoitukseen.....	13
1.1.7 Laadun toteaminen in-situ.....	14
1.1.8 Massastabilointi.....	16
1.2 JAPANILAINEN SYVÄSTABILOINTIMENETELMÄ (DEEP MIXING METHOD; DMM).....	17
1.2.1 Taustaa.....	17
1.2.2 Yleistietoa syvästabilointimenetelmistä ja niiden käytöstä.....	17
1.2.3 Stabiloidun maan ominaisuuksista.....	19
1.2.4 Stabiloidun maan lujuudesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Sideainetyypit..	21
1.2.5 Suunnittelumenetelmät.....	23
1.2.6 Koneet ja tuotantomenetelmät.....	25
1.2.7 Laatu ja laadunvalvonta.....	27
1.2.8 Ympäristövaikutukset.....	27
1.2.9 Muita käyttökohteita.....	28
1.2.10 Yhteenveto japanilaisista kokemuksista.....	29
1.3 JET GROUTING.....	29
1.4 MAALUISKAN NAULAUS.....	31
1.4.1 Bauer'in kehittämä menetelmä.....	31
1.4.2 Radish - ankkurit.....	31
<b>2 TUOTANTOTEKNIikka</b> .....	<b>34</b>
2.1 DRY JET MIXING ( DJM).....	34
2.2 CEMENT DEEP MIXING ( CDM ).....	39
2.2.1 Sekoitustuloksen riippuvuus työkalun siipien paksuudesta ja muodosta.....	39
2.2.2 Halkaisijaltaan suurten pilarien valmistus Deep Mixing - menetelmällä.....	40
2.2.3 Syvästabilointi levitettävän sekoitustyökalun avulla ( Deep mixing by Spreadable Wing Method ).....	41
2.2.4 Suorakulmaisten lamellien valmistus uudella Deep Mixing-menetelmällä.....	43
2.3 JET GROUTING.....	44
2.3.1 Suuriläpimittainen korkeapaineinjektointi - kaupalliselta nimeltään Superjet..	44
2.3.2 Vähän maata syrjäyttävä korkeapaineinjektointi ( Low Displacement Jet Column Method ; LD-method).....	45
<b>3 LAADUNVALVONTA</b> .....	<b>47</b>
3.1 STABILOIDUN MAAN LUJUUDEN ARVIOINTI.....	47
3.2 LAATUUN VAIKUTTAVISTA TEKIJÖISTÄ.....	50
3.2.1 Laaduntarkkailu.....	50
3.2.2 Sekoituksen aikana laatuun vaikuttavat tekijät.....	50
3.3 SEISMINEN LUOTAUSTEKNIikka (PS-LOGGING).....	53

# 1 SYVÄSTABILOINTIMENETELMÄT

## 1.1 SYVÄSTABILOINTI POHJOISMAISSA

### 1.1.1 Alustus

Pohjoismaissa käytetään syvästabiloinnissa lähes yksinomaan Kjeld Pausin vuonna 1967 kehittämä kuivamenetelmää (KP - kalkkipilarimenetelmä) tai siitä tehtyjä muunnelmia. Yhteisenä piirteinä eri menetelmillä on sideaineen syöttö paineilman avulla. KP-menetelmässä sideaineen syöttö on sidoksissa vispilä-osan kierto liikkeen kanssa, mikä tarkoittaa, että stabiloitavan maamassan sisällä tapahtuvan sekoittamistyön energiasisältö on vakinaistettu tietyn tyyppiselle KP-pilarille.

KP-menetelmän pohjalta on Suomessa ja Ruotsissa kehitetty uusia muunnelmia, joilla pyritään lisäämään stabilointiprosessin tehokkuutta. Muutokset koskevat mm. stabilointiaineen syöttöprosessia, syöttöaukon kokoa ja sijaintia vispiläosassa, vispilän muotoa, vispilän halkaisijaa, sekoitusvaiheen kierto- ja nousunopeutta ja pyörivän keiliputken muotoa.

KP-menetelmällä tehtyjen kalkkipilareiden ominaisuuksista on olemassa tutkittua tietoa yli 15 vuoden käyttöajalta, ja tästä syystä mitoituskäytäntö on jo vakiintunut. Sen sijaan seos- ja sementtipilareiden osalta on suhteellisesti hyvin vähän luotettavaa tutkimustietoa käytettävissä. Ominaisuuksia käsiteltäessä pyrin pitämään erillään KP-kalkkipilarimenetelmän muista kuivamenetelmistä, joissa sekä stabilointiprosessin ajoparametrit että stabilointiaineen koostumukset vaihtelevat.

### 1.1.2 Stabiloidun pilarin ominaisuudet ja käyttäytyminen

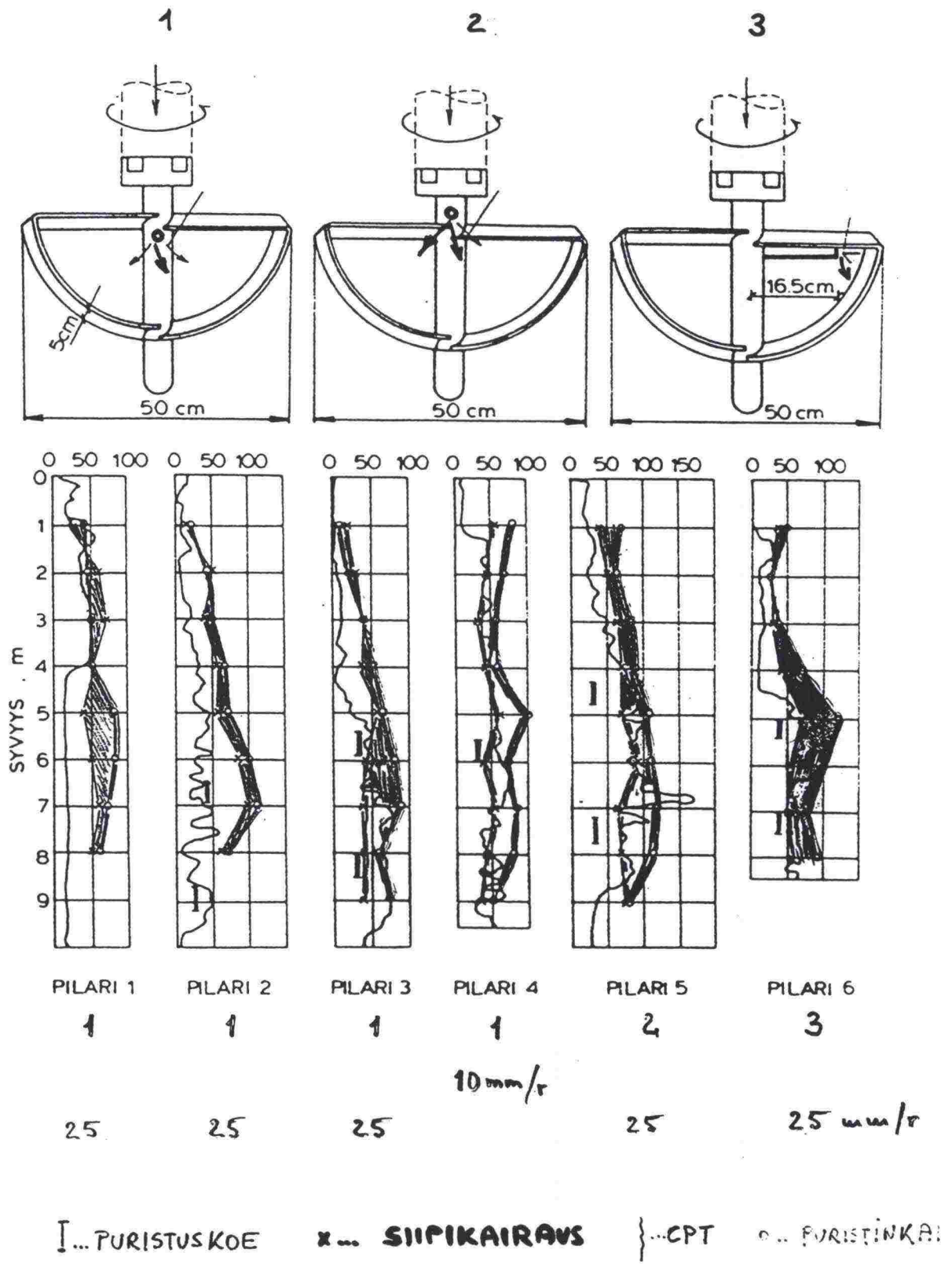
Kalkilla stabiloitu pilari toimii ympäröivää maata jonkin verran lujempaan pystysuorana vyöhykkeenä. Kalkkipilarin vaipan ulkopuolelle mentäessä leikkauslujuus alenee jo varsin kapealla vyöhykkeellä saven alkuperäiseksi leikkauslujuudeksi. Asennuksen yhteydessä usein tapahtuvan häiriintymisen takia (paineilman jatkuva syöttö syöttöaukon auki pysymiseksi) saven leikkauslujuus saattaa olla pilarin ulkopuolella jopa alkuperäistä alemmalla tasolla.

Valmistustavasta johtuen pilarin ominaisuudet vaihtelevat sekä sen pysty- että vaakasuunnassa. Pilarin homogeenisuuteen vaikuttaa sekä stabiloitavan maapohjan kerallisuus että sekoitusmenetelmän tehokkuus.

Sideaineen leviäminen pilarissa on riippuvainen vispiläosan siivekkeiden muotoilusta, syöttöreian paikasta, syöttönopeudesta, paineesta ja syöttöaukon sijainnista sekä sekoittamistyön energiasisällöstä ja tehokkuudesta.

Kuvassa 1 on esitetty B. Broms et al. tekemien vertailukokeiden tuloksia sideaineen syöttöreian ja sekoitusnopeuden vaikutuksesta kalkkipilarin lujuteen. Tuloksia muista, systemaattisesti suoritetuista sekoitusmenetelmän kehittämiskokeista ei ole saatu käsiin.





Kuva 1. Sideainesytön ja sekoitusnopeuden vaikutus pilarin lujuuteen.

### 1.1.3 Pilaristabinoinnin merkittävimmät kehitysvaiheet

LINDEN ALIMAK Ab kehitti neljä stabilointikoneen sukupolvea, mutta konserni lopetti sitten toimintansa maarakennussektorilla. Ensimmäiset koneet ulottuivat vain 10 m syvyyteen, mikä rajoitti menetelmän käytön laajemmin. Alkuvaiheen tärkeimmät sovellutukset löytyivät tierakennuksessa sekä putkilinjojen ja pientalojen perustusten vahvistamisissa.

Menetelmän ensimmäinen käyttöopas ilmestyi vuonna 1974 (Assarsson et al.) ja siinä kuvataan halkaisijaltaan 500 mm ja 15 metrin syvyyteen ulottuvia pilareita. Pilariväli määräytyi kuormitusolosuhteista sekä pilareiden lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksista. Pilarissa stabiloidun saven rakenne muistutti kuivakuorisavea, ja blokkimaisten rakenne-elementtien takia lähinnä kitkamaalajia. Sammuttamattomalla kalkilla aikaansaatuun lujittamisreaktioon todettiin vaikuttavan saven vesipitoisuus, humuspitoisuus sekä maassa vallitseva lämpötila.

Ensimmäinen kalkkipilari-käsikirja ilmestyi sitten vuonna 1977, ja sen tekijät olivat B. Broms ja P. Boman. Murtotilatarkastelussa pilareiden ja stabiloimattoman maan ei otaksuttu toimivan yhdessä. Käyttötilan käsittelytapa muistuttaa kivipilareiden mitoittamista superpositioperiaatteella (Mitchell 1981). Painumatarkastelussa sovellettiin kahta lähestymistapaa riippuen siitä, ylitettiinkö myötökuorman tai ei. Toisessa kalkkipilarin otaksuttiin käyttäytyvän pystyjojan tapaan.

Vuonna 1974 rakennettiin Suomessa ensimmäisen koealueen Helsingin Itäkeskuksen alueella (Rathmayer & Leminen). Koepenkereiden avulla tutkittiin sekä määrämittaisten että kovaan pohjaan ulottuvien kalkkipilareiden kantokyky sekä niiden toimintaa pystyjojana. Mitatut myötökuormat olivat 500 mm pilareille 35 - 40 kN.

Mitchell (1981) esitti pääraportissaan (10th ICSMFE, Stockholm) hienorakeisten maalajien kalkki- ja sementtistabiloinnin mahdollisuudet ja rajoitukset. 3...8 % kalkin lisäyksellä saadaan hyvin sekoittuneessa ja tiivistetyssä massassa suljettu leikkauslujuus kasvamaan tasoon 70 kPa. Suurempia lujuusarvoja saavutetaan vähäplastisissa koheesiomaalajeissa lisäämällä 3...10 % sementtiä maan kuivatilavuuspainosta laskettuna. Lopputulokseen vaikuttaa eniten sekoittamisen huolellisuus, siis sekoitus-koneen kyky tuottaa mahdollisimman homogeenisia pilareita. Lisäksi Mitchell toteaa, että laboratoriokokeisiin perustuvaa lujuustasoa on vaikea saavuttaa maastossa vesipitoisuusvaihtelujen ja sekoitustyön epähomogeenisuuden takia.

Stabiloidun massan vedenläpäisevyydestä Mitchell toteaa, että pelkästään kalkilla stabiloimalla  $k$ -arvo saattaa nousta jopa 1000 kertaiseksi. Käyttämällä sementtiä, lentotuhkaa ja /tai muita lujittuvia teollisuuden sivutuotteita stabiloinnin lopputulokseksi saattaa olla täysin läpäisemätön massaa. Tästä syystä voidaan kalkkistabilointia käyttää myös pystyjojittamiseen. Muilla stabilointiaineilla voidaan sitoa ympäristölle vaarallisia tai haitallisia aineita.

Eggestad (1983) mainitsi omassa pääraportissaan (8th ECSMFE, Helsinki) uusien sideaineiden käyttömahdollisuuksista. Silloin kokeiltiin Suomessa ja Ruotsissa 25...50 % hemihydraattikipsin lisäämistä kalkkipilaristabiloinnissa. Kipsin lisäyksellä saatiin lujittumisreaktiot nopeutetuksi mutta samalla putosi myös ensi vaiheen reaktiolämpötila. Holm et al. (1983) suosittelivat < 25 % kipsilisäystä tapauksiin, joissa loppulujuuden pysyvyydellä oli rakenteen kannalta merkitystä. Noin 50 % kipsilisäyksillä saavutettiin lyhytikäistä lujuutta nopeammin, mikä perustui lähinnä

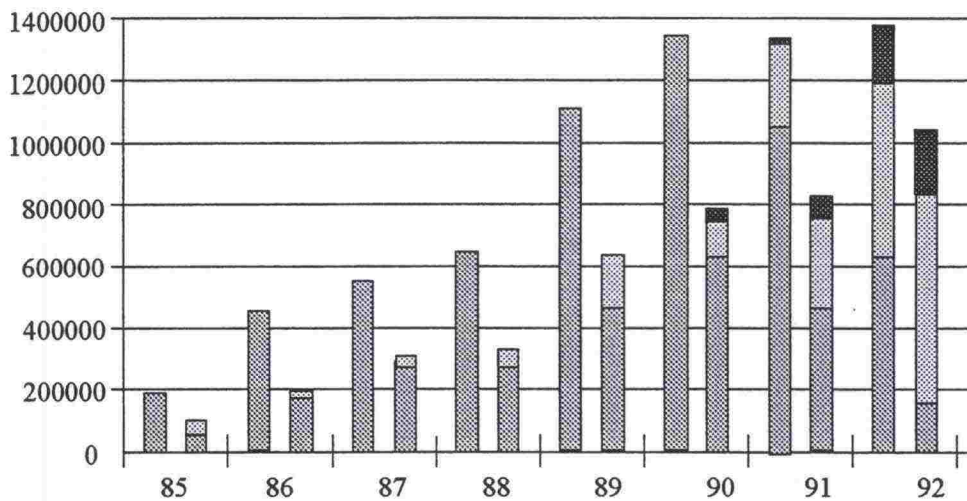


epästabiilien ettringiittikiteiden muodostukselle. Reaktiolämmön vaikutusta lopputulokseen ei vielä oikein ymmärretty. Vuosia myöhemmin muutettiin myös laboratorioäytteidensä säilytyslämpötilat vastaamaan paremmin in-situ käyttäytymistä.

Eggestad kiteytti syvästabiloinnin tavoitteet seuraavasti: pilaristabiloinnilla tavoitellaan korkea lujuus ja pieni kokoonpuristuvuus, mutta edelleen halutaan massan käyttäytyvän plastisena. Korkeampi vedenläpäisevyys katsotaan eduksi, että pilari voisi toimia myös pystyोजना. Stabiloidun massan halkeilemisen takia hän ei suositellut käyttäviä yksittäisiä pilareita luiskien stabiliteetin parantamiseksi. Syvästabilointia Eggestad katsoi olevan hyödyllistä seuraavissa käyttösovellutuksissa.

1. Painuman vähentämiseksi tiepenkereiden, sillan maatumien, pientalojen, teollisuuden varastokenttien ja maanvaraisten perustusten osalta.
2. Putkijohtojen perustuksiin ja kaivantoseinien tukemiseen.
3. Stabiliteetin parantamiseksi tiepenkereissä, leikkausluiskissa tai sortumien ehkäisemiseksi.
4. Kaivumassojen kuljetus- ja läjityskelpoiseksi muuttamiseen.
5. Liikennetärinän pienentämiseksi.

1980-luvulla toteutettiin monia käyttösovellutuksia kalkkipilaristabiloinnilla, ja 1000 km pilarimäärän ylitettiin nopeasti sekä Suomessa että Ruotsissa.



Kuva 2. Syvästabilointimäärien (pilarimetreinä) kehitys Suomessa (vasen pylväs) ja Ruotsissa (oikea pylväs) vuosina 1985 - 92.

Ruotsin geoteknillinen yhdistys julkaisi 1995 uuden suunnittelu- ja mitoitusoppaan kalkki- ja kalkki-sementtipilareille, jonka päätekijä oli P. Carlsten SGI:sta. Opas kertoo nykytietämyksen suunnittelusta, toteutuksesta ja laadunvalvonnasta. Siinä käsitellään pehmeitä ja puolikovia pilareita (maksimileikkauslujuus 150 kPa) jotka toimivat yhdessä niitä ympäröivään maan kanssa. Ns. kovia pilareita ei käsitellä. Mitoituksen periaatteena on otaksuma, että pilarin murtolujuutta ei ylitetä, ja että pilarin ja ympäröivän maan kokoonpuristuma on samansuuruinen. Tämän kriteerin mukaan määräytyy myös kuormitusjakautuma pilarin ja maan välillä. Vakavuustarkastelussa pilarin suljettu leikkauslujuus rajoitetaan tasoon 100 kPa riippumatta siitä, olisiko laboratorio- tai maastomittauksissa saatu tätä korkeampia lujuusarvoja. Aika-painumatarkastelussa oletetaan, että pilari toimii paremman vedenläpäisevyydensä ansiosta pystyोजना.

Laaduntarkkailun osalta suositellaan maastossa aika-painuma-, vaakasiirtymä- ja huokospainehavaintojen suorittamista. Tuotantotekniikan osalta olisi tehtävä havaintoja sideainemäärästä pilarimetriä kohti, pilareiden sijainnista ja suunnasta sekä mahdollisista häiriötekijöistä. Leikkauslujuuden kehityksen seurantaan suositellaan pilarisiipikairauksia ja pilarikairauksia, joita on kahta tyyppiä. Alaspäin työnnettävä pilarisondi, jonka mittauskapasiteetti loppuu n. 150 kPa kohdalla, ja vajjerivetoinen, käännetty pilarisondi, jonka kapasiteetti loppuu noin 600 kPa leikkauslujuuden tasolla. Vajjerivetoinen on pilarikoneen avulla asennettava pilarin alapäähän ennen sen tekemistä.

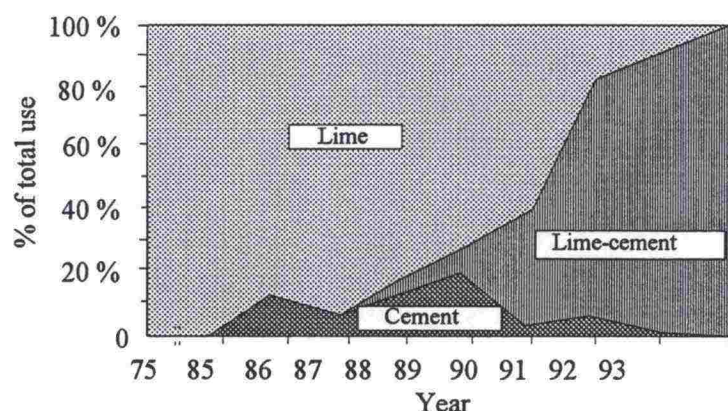
#### 1.1.4 Pohjoismaisen syvästabilointitekniikan tutkimus- ja kehittämisvaiheet

Tutkimus- ja kehityshankkeet keskittyivät 1970- ja 1980-luvuilla yksinomaan stabilointiaineisiin. Alussa tutkittiin sammuttamattoman kalkin koostumus sekä sen reaktiivisuus ja juoksevuus putkistoissa. Silloin todettiin, että stabiloidun saven lujittumisprosessiin vaikuttaa myös saven humuspitoisuus ja humuksen laatu sekä esim. saven rikki-/ sulfaattipitoisuus. Lujittumisprosessin perusreaktioksi katsottiin savi-mineraalien puzzolaanireaktio, jossa lujittuminen tapahtuu tunnetusti hitaasti. Stabiloinnin homogenisuutta yritettiin parantaa kiinnittämällä huomioon kalkin puhtautteen, jauhatuksen hienoutteen ja kuivan jauheen juoksevuuheen stabilointikoneen putkistoissa. Annostuksen perustaksi otettiin käyttöön puhtaan kalkin pitoisuus, jolloin esim. MgO- osuutta ei laskettu tavoitemäärässä mukaan.

Tavoitteena saavuttaa korkeampia lujuuksia nopeammin alettiin lisätä seoksiin ensiksi kipsiä ja 1980-luvun puolessavälissä sementtiä. Vasta 80-luvun loppupuolella alettiin stabilointiaineisiin lisätä myös teollisuuden sivutuotteita. T & K-toiminnassa siirryttiin sideaineseosten optimointivaiheeseen, joka toi mukanaan rekisteröityjä tuotenimiä sideainemarkkinoille. Sideaineseoksista tuli kauppatavaraa ja reseptitietoja haluttiin pitää salana. Sen seurauksena tutkimus- ja kehitystyö suuntautui sekä stabiloitujen tuotteiden materiaaliparametrien selvityksiin että syvästabiloinnin suunnittelu- ja mitoituskäytännön varmistamiseen.

Ruotsissa tapahtunut stabilointiaineiden kehitys nähdään kuvasta 3.





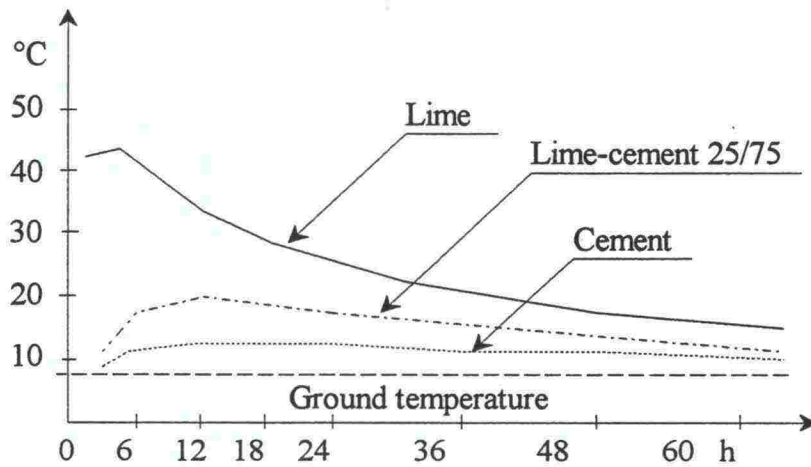
Kuva 3. Ruotsissa käytettyjen stabilointiaineiden koostumus.

Sideaineseoksen koostumus sovitettiin aina kulloiseen työkohteeseen erikseen, minkä seurauksena kehitettiin joidenkin stabilointikoneiden annostelujärjestelmät. Koneisiin tuli pieniä muutoksia tuotantotekniikassa, joista merkittävimmät pilarihalkaisijan kasvattaminen ensiksi 600 ja sitten 800 mm sekä mahdollisuus sideaineiden erillissyöttöön. Syöttövaiheessa voitiin nyt sekoittaa kahta sideainetta halutun reseptin mukaan koneessa olevien erillissäiliöiden ansiosta. Koneiden sekoitusteho ja nopeus oli myös kasvatettu reippaasti ja vispilän muotoiluun alettiin tehdä pieniä muutoksia. Uusi teknologia ajateltiin tuovan uusia käyttösovellutuksia, kuten vesitiiviitä seinämiä ja tukiseiniä, parantaa luiskien stabiliteettiongelmia tai korvata laajemmin paalutusta. 20 m syvyiset pehmeiköt tulivat 90-luvun alussa myös stabilointitekniikan ulottuville.

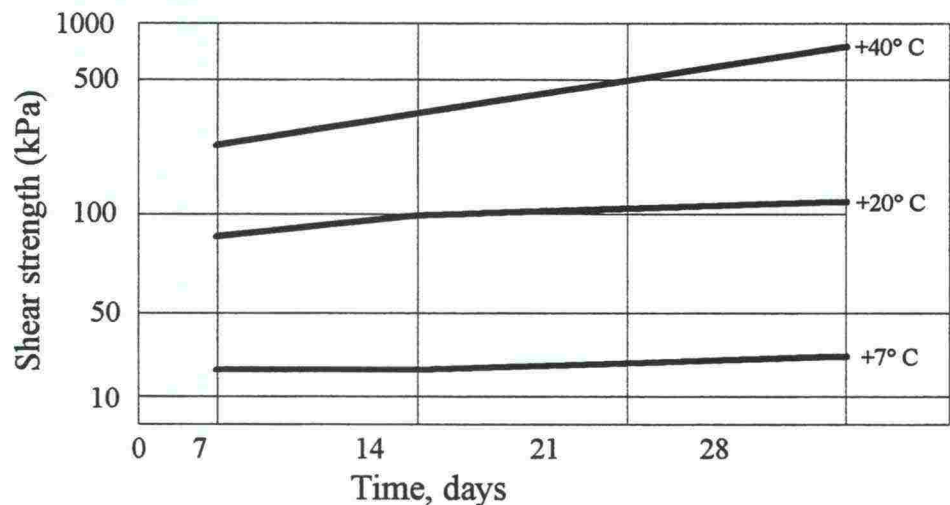
Massastabilointitekniikka on kehityksen uusin askel. Pehmeikön tai turvesuon pinta-kerroksia voidaan 5 m syvyyteen asti stabiloida kaivinkoneen puomiin kiinnitettävällä hydraulisesti toimivalla sekoitusyksiköllä. Lähinnä massanvaihtoa korvaava menetelmä on osoittautunut taloudelliseksi ja teknisesti toimivaksi erilaisissa infrastruktuurin rakennushankkeissa.

### 1.1.5 Sideaineisiin kohdistunut T & K- toiminta

Kalkkipilarimenetelmän alkuvaiheessa katsottiin, että ainoastaan sammuttamaton kalkki olisi sopiva sideaine koheesiomaalajien stabiloimiseksi. Broms & Boman (1977) esittivät ensimmäisessä käsikirjassaan erilaisiin käyttösovellutuksiin liittyvät suunnittelu-, mitoitusmenetelmät, laboratorio- ja maastokokeiden koetekniikkaa ja laadunvalvontatoimenpiteitä. Lujittumisreaktion nopeuttamiseksi alettiin kiinnostua kalkin ja kipsin seoksista. Nieminen (1977) ja Viitanen (1977) tutkivat kipsin ja lentotuhkan käyttömahdollisuuksia sideainesseoksissa, myöhemmin myös Kujala (1982) ja Holm et al. (1983). Kipsin tai sementin lisäys kalkin sekaan vaikuttaa oleellisesti lujittumisreaktiossa kehittyvään lämpötilaan (kuva 4) ja näin myös lujittumisnopeuteen (kuva 5)



Kuva 4. Stabiloidun saven reaktiolämpötilan kehitys eri sideaineen koostumuksella.



Kuva 5. Stabiloidun saven lujuuskehityksen riippuvuus näytteen säilytyslämpötilasta.

1980 -luvulla hankitun kokemukseen ja laajahkon tutkimusaineiston tuloksiin perustuen julkaistiin Suomessa STO-91 stabilointiohje vuonna 1992. Vaikka Kujala & Lahtinen olivat vuosina 1987 - 89 tutkineet noin 3000 näytettä 29:sta eri savikosta selkeitä suosituksia sideainesvalinnalle ei pystytty siinä antamaan. Edelleen sideaineen koostumuksen valinta on tehtävä kohdekohtaisesti.

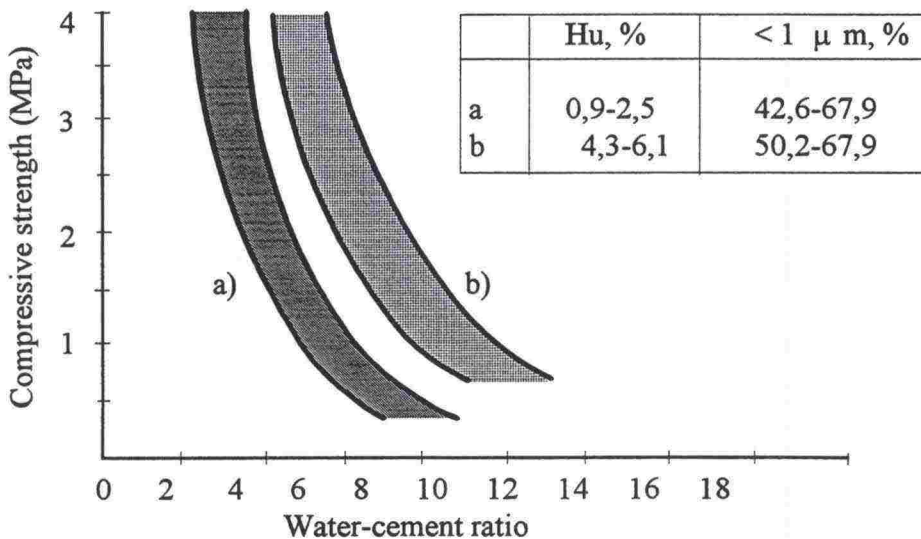
Stabiloitaessa maa-ainesta kalkilla ja sementillä on havaittu huomattavia kovettumiseroja. Kovettumisreaktioihin vaikuttavia tekijöitä ei näiden sideaineiden osalta ole vielä täysin selvitetty eikä stabiloitavuuden selvittämiseksi tällä hetkellä ole nopeaa menetelmää. VTT:n Rakennustekniikan Geotekniikan yhteisprojektissa tutkittiin perusteellisesti niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat sideaineiden kovettumisreaktioihin. Lisäksi kehitettiin menetelmä, jolla sideaineen soveltuvuus maa-aineksen kovettamiseen voidaan testata. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös teollisuuden sivutuotteisiin perustuvia uusia sideainevaihtoehtoja pääpainon ollessa jauhetussa granuloidussa masuunikuonassa eri tavoin aktivoituna sekä lentotuhkaan ja rikinpoistojätteeseen perustuvissa sideaineyhdistelmissä.



Tutkimuksessa tehtiin lujittumiskokeita 21 erilaisella suomalaisella savella. Savet tutkittiin tarkoin: kustakin määritettiin yli kolmekymmentä geoteknistä, kemiallista ja fysikaalista ominaisuutta. Näytteistä määritettiin mm. vesipitoisuus, humuspitoisuus, sitoutunut vesi, karbonaattipitoisuus, hiukkaskokojakauma, mineraloginen koostumus, rikkipitoisuus, vaihtuvien Ca-, Mg-, Na- ja K-ionien pitoisuudet, vaihtohappamuus, ioninvaihto- ja Ca:n vaihtokapasiteetit, kalsiumin adsorptio. Geoteknisistä indeksiominaisuuksista määritettiin häirityn näytteen leikkauslujuus, juoksuraja kartiokokeella sekä kieritysraja. Voimakkaimmin lujutta selittävät tekijät olivat:

- sideaine
- vesi/sementti-suhde
- humuspitoisuus raekokojakaumassa
- kalsiuminvaihtokapasiteetti
- kalsiumin adsorptio.
- alle 1  $\mu\text{m}$ :n osuus

Laboratoriokoetulosten perusteella voidaan todeta, että stabiloidun saven lujuus riippuu voimakkaasti vesi/sementti-suhteesta. Kuvasta 6 nähdään kuinka vesi-sideainesuhteen ja puristuslujuuden välinen riippuvuusikäyrä on samanmuotoinen vaikka absoluuttiset arvot vaihtelevat runsaastikin.



Kuva 6. Vesi/sementti - suhteen vaikutus puristuslujuuteen. Säilytyslämpötila 20 °C ja testausikä 7d. Eri käyrät kuvaavat eri näytesavia.

Tutkimustulosten perusteella laskettiin regressioanalyysiä käyttäen mallit, joiden mukaan stabiloidun saven lujuus riippuu vesi-sideainesuhteen ja humuspitoisuuden lisäksi hienoainesmäärästä (partikkelikoko alle 1  $\mu\text{m}$ ). Mallit perustuvat laboratoriokokeiden tuloksiin. Työmaalla stabilointitulos riippuu käytettävästä stabilointitekniikasta ja kalustosta. Mallit kuvaavat käytettävien materiaalien potentiaalista lujutta.

Sementtiä käytettäessä malli on seuraava:

$$f_c = 0,347\mu \cdot e^{-0,57w} + 0,372h^2 \cdot e^{-0,27w}$$

- $f_c$  on puristuslujuus 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>:n prismoilla määritettynä,  
 $w$  on vesi/sementti-suhde,  
 $\mu$  on alle 1 µm:n fraktion osuus savesta,  
 $h$  on saven humuspitoisuus ja  
 $e$  on Neperin luku.

Kirjallisuuden mukaan humus häiritsee sementin kovettumisreaktioita. Tutkituilla savilla (humuspitoisuudet 0,9 % - 6,1 %) humus kuitenkin oli sementtiä sideaineena käytettäessä lujuutta lisäävä tekijä. Tämä lujuutta lisäävä vaikutus perustuu todennäköisesti humusta sisältävien orgaanisten aineosien kykyyn muodostaa komplekseja metalli-ionien (Ca, Mg, Na, K, Fe) kanssa sekä kykyyn sitoa vettä, jolloin todellinen vesi/sementti-suhde pienenee. Jos veden sitoutuminen humukseen on suoraan verrannollinen humuksen määrään, kasvaa lujuus jyrkästi humuspitoisuuden kasvaessa eli todellisen vesi/sementti-suhteen pienentyessä. Mitä pienempi on vesi/sementti-suhde eli mitä jyrkemmällä osalla lujuuskäyrää ollaan sitä voimakkaampi on lujuuden riippuvuus humuspitoisuudesta (eli todellisesta vesi-sementtisuhteesta).

Stabiloinnin työtekniikan kannalta on tämän tutkimuksen tuloksissa merkittävintä vesi/ sideainesuhteen suuri vaikutus lujuuteen. Käytännössä tuntemalla vesimäärä ja sen muutokset tarkemmin, voidaan sideainemäärää säätämällä hallita lujuudenkehitystä nykyistä paremmin. Ongelmina ovat vesipitoisuuden vaihtelujen toteaminen ja hallitun sideainemäärän sekoittaminen vesipitoisuuden vaihtelujen mukaan. Vesimäärän vaihtelut voidaan periaatteessa hallita tuntemalla stabiloitavan maaperän eri kerrosten vesipitoisuudet riittävän tarkasti kenttätutkimuksen perusteella, mittamalla vesipitoisuutta stabiloinnin aikana tai homogenisoimalla stabiloitava materiaali stabiloinnin yhteydessä. Samoin sekoitustekniikkaa tulisi kehittää tarkemmaksi, jotta sideainemäärän säätö sideainetarpeen mukaan olisi käytännössä mahdollista.

### 1.1.6 Tutkimusten soveltaminen käytännön mitoitukseen

KP-kalkkipilarimenetelmän osalta on käytettävissä yli 15 vuoden käyttökokemus ja vankka tutkimuspohja. KP-menetelmälle jo vuonna 1979 Planvärketin myöntämä tyyppihyväksyntä on vaikuttanut siihen, että mitoituksen käytäntö on Ruotsissa nykyään jo vakiintunut. Tyyppipilarin - esim. 500 K 16 -keskimääräisillä ominaisuuksilla saavutetaan tietyllä peitolla haluttu lopputulos. Tulos varmistetaan laboratorio - ennakkokokein sekä seurantamittauksin kentällä.

Laboratoriotulokset ja in-situ mittaustulokset poikkeavat monessa kohteessa toisistaan. Laboratoriomittakaavassa on vaikea mallintaa epähomogeenisen pilarin rakennetta ja näin myös luonnollisen pilarin ominaisuuksia. Stabiloituvuuskokeista saadaan lähinnä optimiolosuhteita vastaavia tutkimustuloksia.

Stabiloidun pilarin laadun ja lujuuden selvittämiseksi kehitetyt in-situ tutkimusvälineet (pilarikaira ja pilarisiipikaira) antavat luotettavia tuloksia KP-menetelmän kalkkipilareissa. Seospilareissa pilarikairaa käytettäessä tutkimustulokset on ensiksi kalibroitava joillakin muilla, luotettavilla mittausten menetelmillä.



Varmin kalibrointimenetelmä on maasta nostetun, täysimittakaavaisen pilariosan koekuormitus, tai pilarista otettujen näytteiden testaus laboratoriossa.

Laboratorio- ja in-situ tutkimuksiin perustuva luotettava mitoitusmenetelmä edellyttää tilastollista käsittelyä varten riittävää tutkimusaineistoa. Stabiloitavan saven indeksiominaisuuksien ja stabiloidun saven ominaisuuksien välinen riippuvuus on selvitettävä sekä eri savityypeille että eri sideaineille erikseen. Koneessa tapahtuvan stabilointiprosessin erikoispiirteet on lisäksi huomioitava kokemusperäisillä kertomilla.

### 1.1.7 Laadun toteaminen in-situ

KP-pilarien aikana, jolloin sammuttamaton kalkki oli sideainesseosten pääkomponentti, voitiin pilaritutkimuksiin soveltaa tavanomaisia geoteknisiä tutkimusmenetelmiä. KP-pilareihin muodostui heikkousvyöhyke keskelle, jonka läpi voitiin erilaisia tutkimusvälineitä ohjata. Alkuvaiheessa käytettiin seuraavia tutkimusmenetelmiä:

- levykuormituskoe pilarin yläpäässä
- ruuvilevykoe noion 1 metrin välein pilarissa
- näytteenotto ja puristuskokeita laboratoriossa
- CPT- kairaus pilarissa.

Näytteiden laatu tai CPT-kairausten tulokset vaihteli suuresti lähinnä ohjausvaikeuksien takia. (Holm et al., 1981)

Pilarin kokoonpuristuvuus voidaan määrittää in-situ levykuormituskokeen avulla. Ehjä pilaripinta saattaa sijaita varsin syvällä maanpinnasta, mikä vaatii erikoisjärjestelyjä kokeen suorituksessa. Levykuormituskoe on testattavan pilarin suhteen kertakäyttökoe, jokaista ajankohtaa varten on kuormitettava uusi pilari.

Ruuvikompressiomietrikokeessa saadaan pilarin kokoonpuristuvuusominaisuuksia tutkituksi eri syvyystasossa. Hyvin lujittuneissa pilareissa saattaa olla vaikeata kiertää ruuvi haluttuun syvyyteen siten, että ruuvilevy pysyy myös pilarin keskikohdassa.

Pilarin leikkauslujuuden määrittämiseksi in-situ soveltuvat pilarisiipikairaus, puristinkairaus tai kairaus pilarikairalla. Onnistuneilla tarkkailumittauksilla on helppoa varmistaa stabiloidun kohteen mitoitustaksumia.

Lujien pilarien (seos-, sementti-) osalta stabiloitu materiaali ei käyttäydykään enää kitkamaalajin tapaan, vaan niiden käyttäytymismalli muistuttaa haurasta laastia tai asfalttia. Tällöin perinteiset tutkimusmenetelmät ei enää korreloi tuttuun tapaan.

Seuraavassa on luettelo kalkki- ja seos/sementtipilareiden testaukseen soveltuvista menetelmistä. In-situ kokeiden edellytyksenä on, että pilarin keskellä tehdyn kokeen tulos on riittävän edustava kuvaamaan pilarin ominaisuuksia. Suurin osa tehtävistä laboratoriotutkimuksista edellyttää stabiloidusta pilarista otettuja häiriintymättömiä näytteitä.

**KP-pilari (CaO)**

**Seospilari**

**Sementtipilari**

IN-SITU KOKEET

**KOKOONPURISTUVUUS, KOKOONPURISTUVUUSMODULI**

- |                        |                            |                    |
|------------------------|----------------------------|--------------------|
| - levykuormituskoe     | - levykuormituskoe         | - levykuormituskoe |
| - ruuvikompressiometri | - ruuvikompressiometri (?) |                    |

**LEIKKAUSLUJUUS**

- |                      |                          |
|----------------------|--------------------------|
| - pilarisiipikairaus | - pilarisiipikairaus (?) |
| - puristinkairaus    | - puristinkairaus (?)    |
| - pilarisondi        | - pilarisondi (?)        |

**LÄPÄISEVYYS**

- pressiopermeameter (itseporautuva pietsometri)

**MUUT VÄLILLISET TESTAUSMENTELMÄT**

- |  |                |                         |
|--|----------------|-------------------------|
| - (pressiometri) - (pressiometri) - (pressiometri) |                |                         |
|  | - vesipainekoe | - vesipainekoe          |
|  |                | - radiometrinen sondaus |
|  |                | - vesipainekoe          |

LABORATORIOKOKKEET

**KP-pilari (CaO)**

**Seospilari**

**Sementtipilari**

**KOKOONPURISTUVUUS, LEIKKAUSLUJUUS, VEDENLÄPÄISEVYYS**

- |                               |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| - yksiaksiaalinen puristuskoe | - yksiaksiaalinen puristuskoe | - yksiaksiaalinen puristuskoe |
| - kolmiaksiaaliskoe           | - kolmiaksiaaliskoe           | - kolmiaksiaaliskoe           |
| - suora leikkauskoe           | - suora leikkauskoe           | - suora leikkauskoe           |
| - ödometrikoe - ödometrikoe   | - ödometrikoe                 |                               |
| - läpäisevyyskoe              | - läpäisevyyskoe              | - läpäisevyyskoe              |

**KEMIALLISET JA MIKROSKOOPPISET ANALYYSIT**

- |                                    |                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| - sideaineen laatu                 | - sideaineen laatu                 | - sideaineen laatu                 |
| - sideaineen määrä                 | - sideaineen määrä                 | - sideaineen määrä                 |
| - kemialliset reaktio-<br>tulokset | - kemialliset reaktio-<br>tulokset | - kemialliset reaktio-<br>tulokset |

**PILARIN TASALAATUISUUS JA SEN TUTKIMINEN in-situ**

**KP-pilari (CAO)**

**Seospilari**

**Sementtipilari**

PILARIKAIIRA  
PURISTINKAIIRAUS  
RUUVIKOMPRESSIOM.  
SIIPIKAIIRAUS  
NÄYTTEENOTTO  
LAB.TUTKIMUKSET

pilarisondi  
pressiometri  
  
nosto: kokonaisena, palana  
silmämääräinen tark.  
kartiokoe

vesipainekoe  
pressiometri

TUTKIMUSTIHEYYS: 1 PILARI /työvuoro

tiekohteessa esim 50 m välein



## SIDEAINEMÄÄRÄ

LAATU: CaO-puhtaus, CaO- määrä seoksessa, rakeisuus  
MÄÄRÄ: tavoite ja poikkeama /m,  
jakautuminen pilarin poikkileikkauksessa

### MÄÄRITYSTAVAT:

Standardimenetelmä kalkkisementtilaastien kalkin ja sementin määrittämisessä on liuottaa suolahapolla pois kalsiumkarbonaatti (= kemiallinen laastianalyysi); em. sideaineiden määrät pystytään määrittämään punnitsemalla ja mikroskopoimalla.

Lentotuhka (masuunikuona) voidaan tunnistaa ohuthieestä. Määrittämällä pistematriisin alla olevien lentotuhkapartikkelien lukumäärä voidaan lentotuhkan tilavuusosuus laskea. Jos tunnetaan lentotuhkan pitoisuus sideaineessa ennen pilarointia, voidaan sideainetiheys rakenekoeikkaleeessä laskea.

Kalkin ja sementin pitoisuuden määrittäminen erikseen on hankalaa ellei kalkilla ole vastaavaa omaa indikaattoria. Tällainen voisi olla esim fysikaalinen mikrohuokostin, ts. muovikuulia.

Ongelmana on indikaattoriaineen tiheys sideaineeseen nähden, mistä saattaa seurata erottuminen, indikaattoriaineen osallistuminen kemialliseen prosessiin, ohuthienäytteen edustavuus pilaripoikkileikkauksessa ja myös saven kalsiittipitoisuus taustavirheenä.

## KOEPILAREIDEN KÄYTTÖ

Peruslähtökohtana on riittävä pilari-koemäärä testattavaa vaihtoehtoa kohti. Tulos on pystyttävä käsittelemään tilastollisesti. Koepilaroinnista haettavat parametrit ovat:

- stabilointiaineen laatu ja koostumus ( CaO, kipsi, sementti, CaO + sem, lentotuhka etc.)
- ainesmäärät
- käytettävä sekoittamistyökalu
- käytettävä sekoittamistyö (tiivistämis- tai vatkaamisteho)
- koneen ajoparametrit
  - \* kiertonopeus:= KP-menetelmässä kytketty kalkin syöttöön
  - \* nousunopeus
  - \* ilmapaineen suuruus prosessin eri vaiheissa

## NÄYTTEENOTTO

Kalkki- (=CaO-)	SEOS-	SEMENTTIPILARI
Norjal.mäntäkaira		pilari nostettava kokonaisena
Ø = 80..100 mm		näytteenotto blokista
Routakaira		trimmaus esim routakairalla
		näytteenotto timanttikairalla

### 1.1.8 Massastabilointi

Blokki- tai massastabilointi perustuu uuteen sekoitustekniikkaan, jossa kaivinkoneen puomiin kiinnitettyä sekoitinta pyöritetään hydraulimoottorin avulla. Sekoitustyö tapahtuu lamelleittain pysty- ja vaakasuuntaisin liikkein. Sideaine puhalletaan sekoitusliikkeiden aikana stabiloitavaan pintamaahan. Maahan syntyy sideaineen vai-

kutuksesta laattamainen, lujittunut vyöhyke kuivakuoren tapaan. Massastabilointia on sovellettu pehmeään liejusaveen ja turpeseen, jolloin on säästyty massanvaihoilta sekä hankalien kaivumassojen kuljetuksilta. Menetelmässä käytetyt sideainemäärät ovat suuria ja edustavat noin 70 % stabiloinnin kustannuksista. Sideaineen koostumus ja optimimäärät joudutaan määrittämään tapauskohtaisesti laboratorio-koesarjojen avulla.

## 1.2 Japanilainen syvästabilointimenetelmä (Deep Mixing Method; DMM)

### 1.2.1 Taustaa

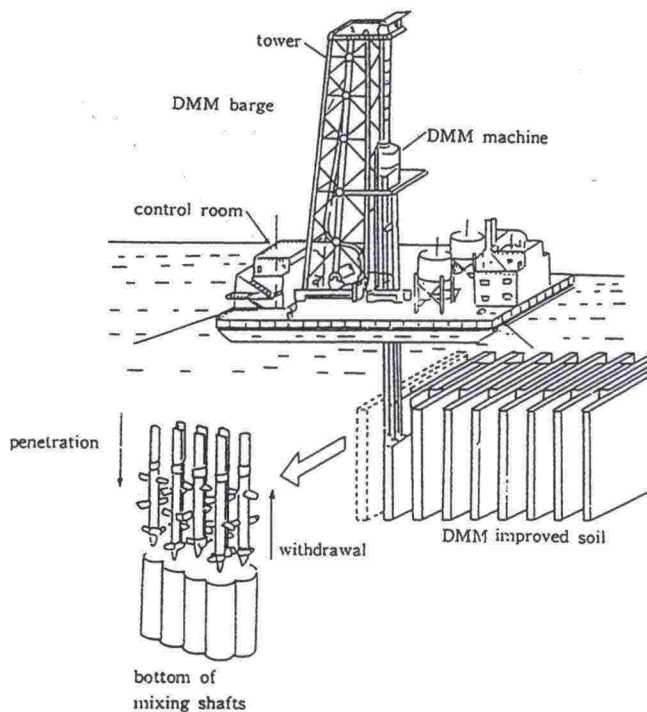
Tämä luku perustuu pääasiassa Tatsuo Okumuran (Environmental Science and Technology, Okayama University) konferenssissa pitämään lähinnä yleiskatsauksen luonteiseen erikoisluentoon aiheesta, joka käsitti Japanissa käytettyjen syvästabilointimenetelmien nykytilanteen ja jonkin verran historiaa. Japanissa sideaine vietään maahan pääasiassa nestemäisessä muodossa (slurry). Tässä luvussa selostetaan tämän menetelmän eri puolia myös muiden japanilaisten kirjoittajien artikkelien näkökulmasta.

### 1.2.2 Yleistietoa syvästabilointimenetelmistä ja niiden käytöstä

Syvästabilointimenetelmä tunnetaan Japanissa 60-luvulta lähtien. The Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport käytti rakeista tai jauhettua kalkkia stabiloivana aineena. Menetelmä tunnettiin nimellä Deep Lime Mixing. Menetelmä otettiin varsinaisesti käyttöön 1974 ja tuolloin käytettiin rakeista, sammuttamatonta kalkkia. Jälkeenpäin markkinoille tuli slurry-tyyppisiä sideaineita. Monenlaisia slurry-menetelmiä kehitettiin, mutta koska suunnittelumenetelmät ja tuotantotavat sekä käyttökohteet olivat samanluonteisia, menetelmiä ryhdyttiin kutsumaan yhteisellä nimellä Cement Deep Mixing -menetelmä (CDM).

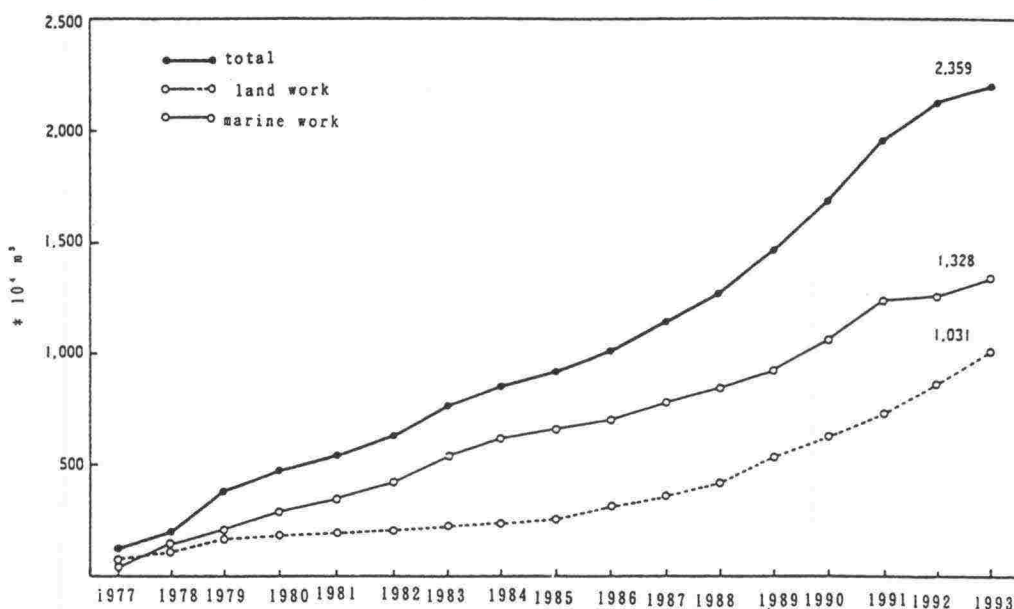
Kalkkipilarimenetelmää kehitettiin 80-luvulla ja tuolloin otettiin käyttöön pohjoismaista kalkkipilarimenetelmää vastaava kuivamenetelmä Dry Jet Mixing (DJM). CDM- ja DJM-menetelmiä kutsutaan yhteisesti DMM-menetelmäksi (Deep Mixing Method). Usein käytetään nimitystä DMM-menetelmä, vaikka tarkoitetaan pelkästään CDM -menetelmää.

Nykyisin sementtipohjainen slurry-menetelmä on laajalti käytössä sekä vesistö- ja rakentamiskohteissa että kuivan maan kohteissa (kuva 7). Kuivamenetelmää käytetään kuivan maan töissä. Sideaineena on jauhettu sementti tai kalkki.



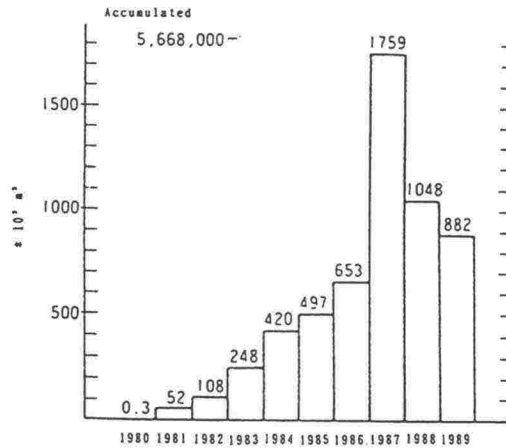
Kuva 7. Deep Mixing Method (DMM) -menetelmän periaatteet (T Okumura)

Stabiloidun maamassan määrät on esitetty kuvissa (kuvat 8 ja 9). CDM -menetelmällä stabiloidaan vuosittain yli 20 milj  $m^3$  (90-luvun alussa) kun DJM:n vuosittainen määrä on ollut alle 1 miljoona  $m^3$  (1989) ja määrä on laskenut viime vuosina. Volyymi Suomessa on ollut 80/90 -lukujen taitteessa 1 - 1,5 milj j-m, mikä vastaa noin 0,4 milj  $m^3$ :ä. Ruotsissa tehtiin pilareita vuonna 1992 noin 0,3 milj  $m^3$ . Ruotsissa volyyymi on myöhemmin selvästi kasvanut ja on tällä hetkellä suurempi kuin Suomessa.



Kuva 8 CDM -menetelmällä tehtyjen stabilointitöiden määrä

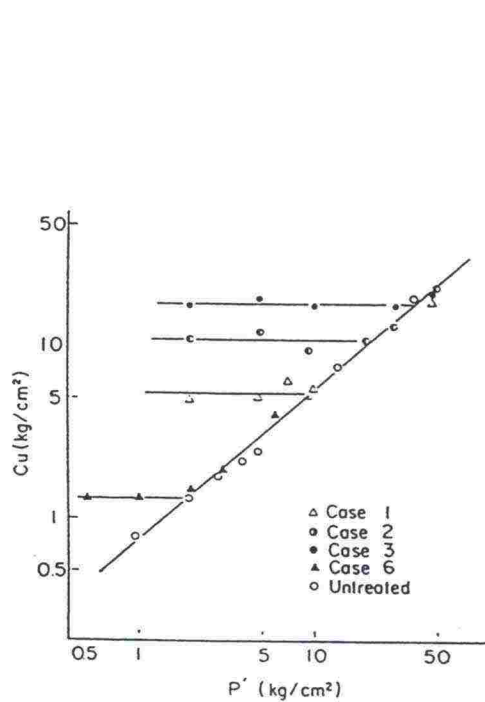




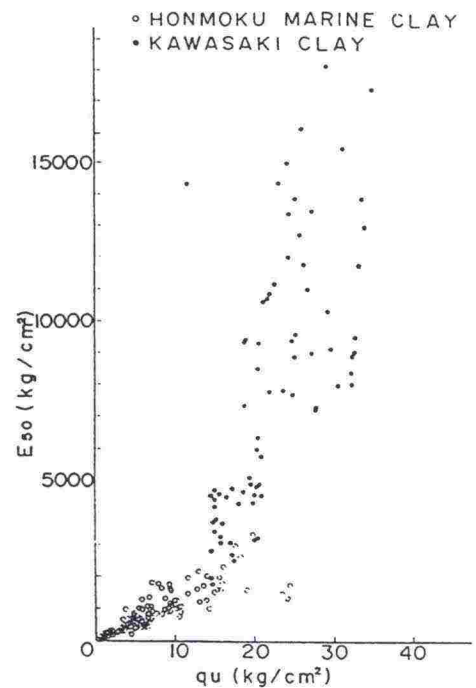
Kuva 9 DJM -menetelmällä tehtyjen stabilointitöiden määrä

### 1.2.3 Stabiloidun maan ominaisuuksista

Stabiloitua maata voidaan verrata ylikonsolidoituneeseen, sementoituneeseen tai ikääntyneeseen maalajiin. Kuvassa 10 on esitetty kolmiakσιαalikokeiden tuloksia. Siitä voidaan todeta, että vahvistetun maan lujuus muodostuu myötörajan alapuolella pelkästään koheesiosta. Vetolujuus on Terashin et al (1983) mukaan 10 - 20 % puristuslujuudesta. Muodonmuutosmoduuli kasvaa eksponentiaalisesti suhteessa stabiloidun maan lujuuteen (kuva 11).



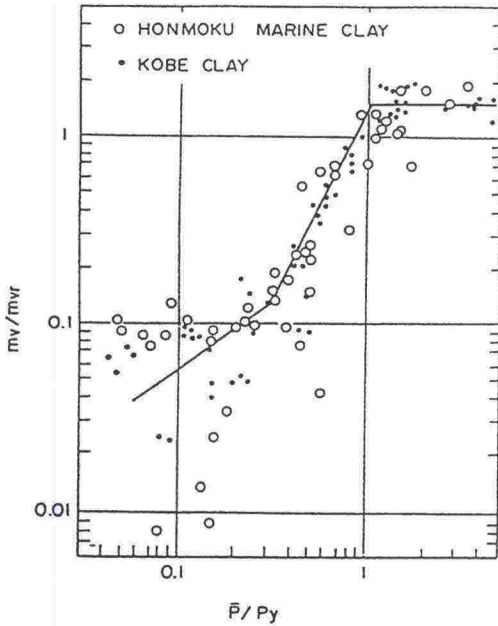
Kuva 10 Kolmiakσιαalikokeiden (CU) tuloksia



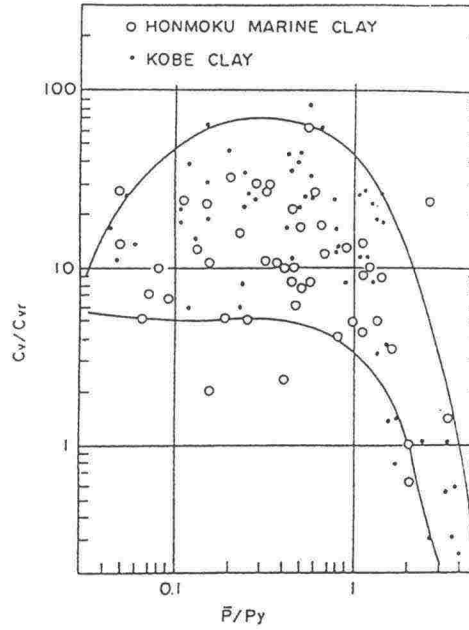
Kuva 11 Muodonmuutosmoduulin riippuvuus yksiakσιαalisesta puristuslujuudesta



Stabiloidun maan kokoonpuristuvuus on hyvin pieni myötörajän alapuolella (kuva 12). Stabiloidun maan vedenläpäisevyys on myötörajän alapuolella suurempi kuin maan vedenläpäisevyys. Myötörajän yläpuolella tilanne kääntyy päinvastaiseksi (kuva 13). Okumura toteaa, että stabiloidun maan vedenjohtavuus on huono eikä se sovellu käytettäväksi pystyjojana.



Kuva 12 Kalkkistabiloidun maan kokoonpuristuvuuskerroin



Kuva 13 Kalkkistabiloidun maan konsolidaatiokerroin

Kuvissa 12 ja 13 esiintyvien merkintöjen selityksiä:

$m_v$	on stabiloidun maan kokoonpuristuvuuskerroin
$m_{vr}$	on häiriintyneen maan kokoonpuristuvuuskerroin
$P_y$	on jännitys myötörajalla
$\bar{P}$	on tehokas pystysuora jännitys
$C_v$	on stabiloidun maan konsolidaatiokerroin
$C_{vr}$	on häiriintyneen maan konsolidaatiokerroin

#### 1.2.4 Stabiloidun maan lujudesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Sideainetyypit

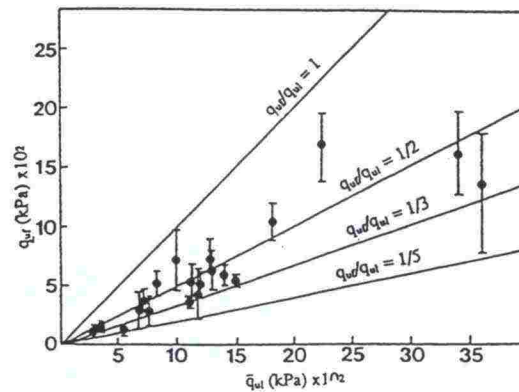
Stabiloidun maan lujuteen vaikuttavat tekijät on listattu taulukossa 1. Tekijät jaetaan kolmeen ryhmään: maalajiominaisuudet, tuotantoprosessi ja olosuhteet kovettumisaikana.

Taulukko 1 Maan lujuuteen vaikuttavia tekijöitä

A) Properties of soft soil	
1)	Type and content of clay minerals and allophanes
2)	Cation exchange capacity
3)	Amount of soluble silica and alumina
4)	Grain size distribution
5)	pH of pore water
6)	Organic matter content
7)	Water content
8)	Atterberg limits
9)	Others
B) Conditions of manufacturing	
1)	Type of stabilizing agent
2)	Quality of stabilizing agent
3)	Amount of stabilizing agent
4)	Mixing water and additives
5)	Mixedness
6)	Compactness
C) Conditions of curing	
1)	Curing time
2)	Curing temperature
3)	Humidity (land work)
4)	Others

Kvantitatiivisia yhtälöitä ei ole kuin joidenkin tekijöiden vaikutukselle. Suositellaan kuitenkin standardisoitujen laboratoriokeiden suorittamista stabiloidun maan ominaisuuksien määrittämiseksi. Laboratoriotulosten ja kentällä saavutettavien lujuusparametrien välinen yhteys tulee selvittää.

Kamon et al esittää, että kuivalla maalla tehdyissä stabilointitoissa kentällä todettu lujuus (kuva 14) vaihtelee vain noin viidesosasta puoleen siitä, mitä laboratoriossa on saavutettu. Massiivisissa vesistöissä voi lopullinen lujuus olla suurempi kuin laboratoriossa saavutettu.



Kuva 14 Kentällä ( $q_{uf}$ ) ja laboratoriossa ( $q_{ul}$ ) saavutetun lujuuden suhde

Babasakin et al mukaan viime aikoina on kehitetty sideaineita mm erittäin vesipitoisille saville ja humuspitoisille maalajeille. On myös kehitetty sideaineita, joiden lujuushajontaa voidaan kontrolloida niin, että saavutettu lujuus pysyy tavoitellulla lujuusalueella. Sivutuotteita on myös käytetty.

Slurryn käytön etuna kuivamenetelmään verrattuna Babasaki mainitsee helpon sideaineen käsiteltävyys ja paremman sekoitettavuuden. Slurryn vesisementtisuhde on tärkeä lujuuteen vaikuttava tekijä.

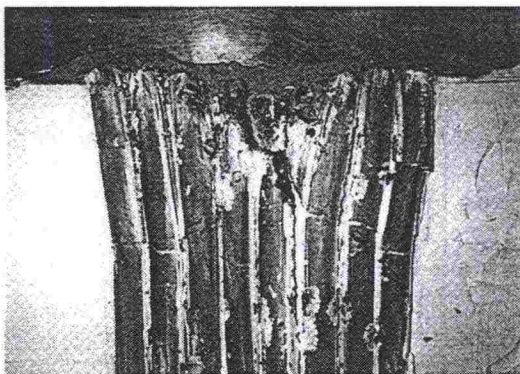
Tatsuoka et al mainitsee kuivasekoitusmenetelmän etuina alhaiset kustannukset ja nopean rakentamisen. Haittoja ovat saavutettu lujuustaso ja epätasainen laatu.

Okumuran mukaan sideaineena käytetään tavallisesti kalkkia tai sementtiä. Kalkkina käytetään sammuttamatonta tai sammutettua kalkkia. Sementti on Portland-sementtiä tai masuunikuona sementtiä. Joissain tapauksissa voidaan teollisuusjätteitä kuten lentotuhka ja kipsi käyttää lisäaineina. Sideaineen määrä riippuu tavoitelujuudesta ja on monissa tapauksissa kuivapainona mitattuna 100 - 200 kg/stabiloitu maamassam<sup>3</sup>.

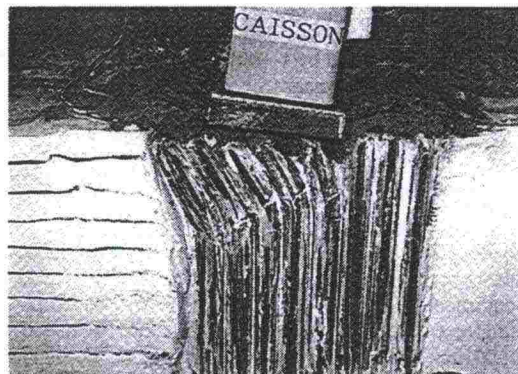
### 1.2.5 Suunnittelumenetelmät

Okumura toteaa, että stabiloidun massan puristuslujuus ylittää usein 1 MPa:n suuruusluokan. Tällöin murtovenymä on tasoa 0,1 %. Tämän takia suunnittelun lähtökohtana on jäykkä rakenne. Taivutusvetolujuus ja samalla vedenläpäisevyys ovat pieniä. Kuormitukset kerääntyvät tällaisesta massasta tehtyyn pilariin, jolloin raskeasti kuormitetun pilarikentän yksittäiset pilarit sortuvat progressiivisesti. Ongelma on ratkaistavissa ainoastaan blokkistabiloinnin tai seinämäisen stabiloinnin avulla.

Kitazume, Ikeda et al käsittelevät artikkelissaan stabiloidun maan kantavuutta. Asiaa tutkittiin sentrifuugikokeena ja rakenteena käytettiin kasuunin pienoismallia. Havaittiin, että pilarityyppisessä perustuksessa taivutusvetolujuus oli leikkauslujuuden ohella merkittävä kantavuuteen vaikuttava tekijä (kuvat 15 ja 16).



Kuva 15 Sortumismekanismi kun kuorma on pystysuora



Kuva 16 Sortumismekanismi kun kuorma on vaakasuora

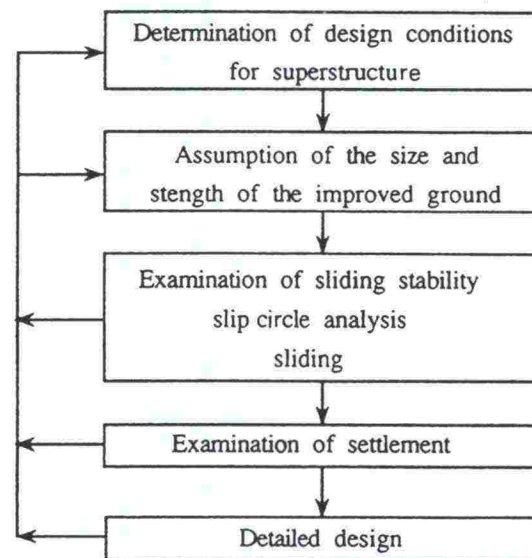


Kitazumen, Miyaken et al artikkelissa on kuvattu kolme suunnitteluprosessia pääpiirteissään:

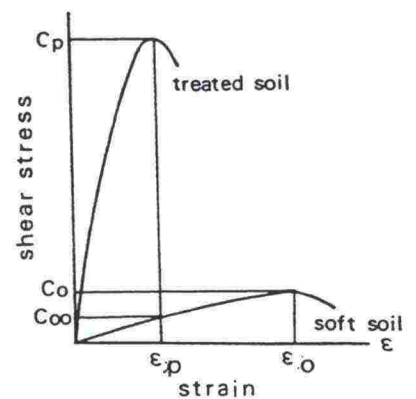
- satamarakenteet
- penkereet
- kaivannot, luiskat

Lisäksi on mainittu pintastabilointi ja vedenpitävät seinät.

Penkereen vahvistamisessa käytetään yleensä pilarityyppistä rakennetta. Penkereiden suunnitteluprosessi on esitetty kuvassa (kuva17). Pilarin puristuslujuus on yleensä alle 500 kPa. Pilarien suhteellinen osuus koko pinta-alasta on tavallisesti suurempi kuin 0,5. Tällöin voidaan pilarien ja maan katsoa toimivan yhdessä. Suomessa suhdeluku on tavallisesti välillä 0,2 - 0,3. Penkereen vakavuus lasketaan ympyränmuotoista liukupintaan käyttäen. Mitoituslujuutena käytetään keskimääräistä leikkauslujuutta, joka saadaan painottamalla pilarien ja käsiteltävän maan lujuuksia pintaalojen suhteessa. Pilarin ominaislujuutena käytetään murtolujuutta ja saven/siltin ominaislujuutena pilarin murtolujuutta vastaavalla muodonmuutoksella mobilisoituvaa jännitystä  $c_{00}$  (kuva 18). Pilareille ja maalle tulevien kuormien laskenta perustuu ns "equal settlement" -periaatteelle, jonka teoria on selitetty esim Tiepenkereen holvautumistutkimuksen loppuraportissa (Tielaitoksen tutkimuksia -sarja, Hki 1992). Perusoletuksena on, että pilarit ja pilarien väliin jäävä maa painuvat yhtä paljon.



Kuva 17 Suunnitteluprosessi



Kuva 18 Mitoituslujuuden määrittäminen

Matsuo (Tokio '96) toteaa, että pilarityyppistä vahvistamisesta käytetään kun yksiaksiaalinen puristuslujuus on 200 - 500 KPa. Mitoitus tapahtuu olettamalla pilarien ja maan toimivan yhdessä.

### 1.2.6 Koneet ja tuotantomenetelmät

Okumuran artikkelissa todetaan stabilointikoneiden olevan kahta tyyppiä: niitä, jotka käyttävät slurry-tyyppistä sementtiä (CDM) tai kuonaa ja niitä, jotka käyttävät jau-

hettua sideainetta sementtiä tai kalkkia (DJM). DJM-sekoitusmenetelmän etuna on se, että vettä ei käytetä, koska stabiloidun maan lujuus on kääntäen verrannollinen maan vesipitoisuuteen. Toisaalta kuivamenetelmässä maan ja sideaineen sekoitettavuus usein huonompi kuin slurry-tyyppisissä. Slurry-tyypin tehokkuus on kaikenkaikkiaan parempi monissa tapauksissa. Asiaan vaikuttavat myös lujitettavan maaperän vesipitoisuus, rakeisuus ja lujuus.

Seuraavassa eräitä koneiden suoritusarvoja:

- Ulottuvuus syvyys suunnassa on maakoneissa max 40 m ja työskentelyteho 100 - 150 m<sup>3</sup>/vrk
- Slurry-koneita käytetään vesistökohteissa. Maksimi sekoitus syvyys on 70 m merenpinnan alapuolella. Päiväteho on noin 1000 m<sup>3</sup>.
- Yhteen sekoitusvarteen kuuluu tavallisesti 4 - 6 sekoitusterää (halkaisija on tavallisesti 1,0 - 2,0 m) ja sekoitusvarsia on tavallisesti 2 - 8 per kone vesistöissä ja 1-2 maatöissä
- Terän halkaisija on tavallisesti 1,0 - 2,0 m vesistöissä ja 0,7 - 1,5 m maatöissä.

Sekoittimien alastyöntö/ylösnostonopeus riippuu vallitsevista olosuhteista mutta on yleensä 1,0 (0,5 - 2,0) m/min. Sekoitinta pidetään syvimmällä tasolla 2 - 8 min, jotta saataisiin riittävä sekoittuminen pilarin alapäässä.

Terän pyörimisnopeus on yleensä 20 - 60 rpm. Alas painettaessa pyörimisnopeus on yleensä alhaisempi, koska maan vastus on suurempi ja ylösnostettaessa nopeus on suurempi, jotta saataisiin parempi sekoitus.

Vertailua Suomessa vallitsevaan käytäntöön on esitetty taulukossa 2.

Slurryn vesisementtisuhde vaihtelee Okumuran mukaan yleensä 1,0 ja vaihtelee välillä (0,6 - 1,3). Slurry syötetään maahan joko alastyöntön tai ylösnoston yhteydessä mutta myös molemmilla kerroilla.

Taulukko 2. Eräitä yleispiirteisiä vertailuarvoja stabilointikaluston välillä Japani/Suomi

	Okumura		Japani/muut	Suomi. 1)
	Vesistö	Kuiva		
Säiliöiden lkm				1 - 3
Kierrosnousu [mm/r]				10 - 50
Sekoittimen kierrosnopeus [r/min]	20 - 60		20 - 45 4)	60 - 210
Terätasokierrosten määrä [kpl/m] 2)			360 4)	2 terätasoa/ 0,02m = 100 3)
Alastyöntö/ylösnostonopeus [m/min]	1,0 (0,5-2,0)		1,0 (0,5 - 1,5) 4)	0,02m * 150 r/min = 3,0 3)
Sekoitus aika pilarin pohjalla [min]	2-8		2-8 merellä, 2 maalla 4)	
Max pilaripituus [m]	70,00	40,00		15 - 30
Kovan pohjan toteaminen			Kuorma-anturi mittaa vastusta	
Puomin kallistusmahd. sivusuunn. [°]				12 - 18
Max sideaineen syöttö fii 500 (800) mm:n pilareiden teossa (kg/m <sup>3</sup> )				150 - 510
Sekoitusjärjen läpimitta [mm]	1000 - 2000	700 - 1500		500 - 1000
Kärjen syöttöaukon fii [mm]				20 - 30
Talvikärjen hampaat				sekä että
Syöttöpaine [kPa]			700	0 -500
Teho [m <sup>3</sup> /vrk]	1000,00	100 - 150		
Sekoitusvarsien määrä	2 - 8	1 - 2		
Terätasojen määrä	4 - 6			

1) Lahtinen/Parkkinen 1992

2) Terätasokierrosten määrä [kpl/m] = sekoittimen terätasojen lkm jaettuna kierrosnousulla (mikäli sideaine syötetään alaspainettaessa, kerrotaan luku kahdella)

3) Laskettu keskimääräisistä arvoista (Lahtinen/Parkkinen 1992)

4) Yoshizawa et al



### 1.2.7 Laatu ja laadunvalvonta

Tekemisen aikana rekisteröidään mm seuraavia tekijöitä (Okumura):

- sekoituskärjen pyörimisnopeus
- alastyöntö/ylösnostonopeus
- pilarin alapään taso
- sekoitusaika pilarin alapään tasolla
- työntövastus
- vääntövastus
- ym

Työntövastusta ja vääntövastusta käytetään hyväksi arvioitaessa, milloin terä on saavuttanut kovan kerroksen.

Myös muita tekijöitä kuten veden laatua, melua ja tärinää ym tarkkaillaan ja mitataan työn aikana.

Työn laatua arvioidaan tavallisesti suorittamalla yksiaksiaalisia puristuskokeita pilarista otetuille sydännäytteille. Tiheys on vesistötoissa 1 näyte/10 000 m<sup>3</sup>/stabiloitua maata ja kuivatöissä 1 näyte/3 000 m<sup>3</sup>/stabiloitua maata. Jos on tarpeellista, näytteistä selvitetään RQD -luku (kuvaa näytteiden ehjyyttä) ja sementtipitoisuus. Voidaan tehdä myös täysmittakaavaisia koekuormituksia sekä kaivannoissa että penkeillä.

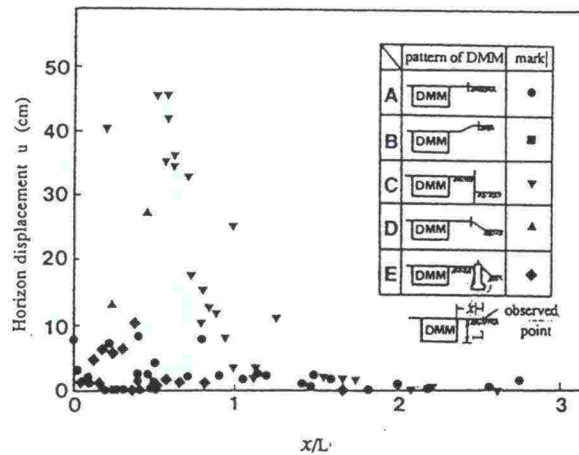
Laadunvalvonnan ongelma on näytteiden halkeilu. Halkeamia voi olla alunperin stabiloidussa maassa tai ne voivat syntyä näytteenoton yhteydessä. Jos stabiloitun maan halkeilua ei ole otettu mitoituksessa huomioon, voi rakenteen vakavuus alittaa vaaditun varmuuden. Toisaalta näytteenoton yhteydessä syntyvä halkeilu voi johtaa menetelmän epätaloudelliseen soveltamiseen. Konferenssiaineistossa esiteltiin "hellävarainen" näytteenotin, jolla on saatu hyviä tuloksia näytteen ehjyyden suhteen (Sugawara et al).

### 1.2.8 Ympäristövaikutukset

Ympäristövaikutuksia käsitellään Kamonin artikkelissa.

Stabilointimenetelmän ympäristövaikutuksia pidetään vähäisinä muihin pohjavahvistusmenetelmiin verrattuna. Päästöille asetettavia raja-arvoja ei artikkeleissa ole annettu mutta tiedetään, että Japanissa likaajan vastuu on suuri, koska hänellä on näyttövelvollisuus, jos jotain epäillään.

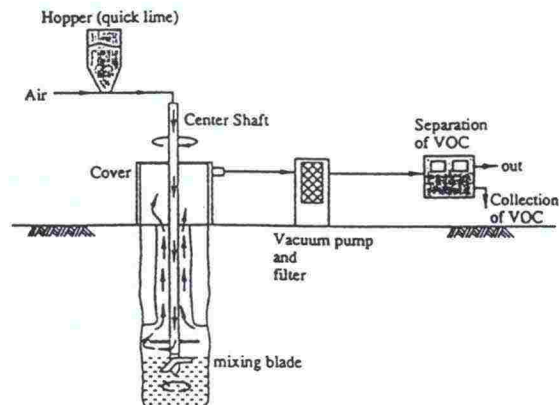
Kuvassa 19 (Kamon) on esitetty erilaisissa tapauksissa todettuja vaakasiirtymiä. Siirtymän suuruus riippuu kohteen etäisyyden ja syvästabilointimassan syvyyden suhteesta. Siirtymät eivät ole suuria mutta erityisesti kaivantojen ja luiskien läheisyydessä stabiloitaessa tulisi työ suunnitella huolellisesti.



Kuva 19 Eräitä todettuja vaakasiirtymiä käytettäessä DMM -menetelmää

Rakennustyötä lähellä olevien rakenteiden siirtymistä on tutkineet myös Masuda et al ja päätyneet suurin piirtein samoihin johtopäätöksiin kuin Kamon.

Positiivisia ympäristövaikutuksia on saatu stabiloimalla saastunutta maata kalkilla. Orgaaniset saasteet (Volatile organic compounds = VOC) kerätään tyhjiöpumpun avulla stabilointivarren ympärille rakennellun kuvun kautta erottimeen, josta haitalliset yhdisteet otetaan talteen (kuva 20).



Kuva 20 Orgaanisten saasteiden kerääminen stabilointia hyväksi käyttäen

### 1.2.9 Muita käyttökohteita

Aikaisemmin DMM -menetelmää käytettiin pelkästään koheesiomaiden stabilointiin mutta viimeaikoina myös hiekkaa on stabiloitu tavoitteena nesteytymisen/juoksettumisen estäminen maanjäristyksen aikana. Myös karkeampia maalajeja on stabiloitu.

### 1.2.10 Yhteenveto japanilaisista kokemuksista

Stabilointimenetelmää on käytetty savipitoisten maalajien lujitukseen ja juoksettumisen estämiseen yli 20 vuotta. Kuitenkin menetelmässä on vielä paljon ongelmia ratkottavana. Tärkein on suhteellisen korkeat kustannukset muihin vahvistusmenetelmiin verrattuna (Okumura).

Suunnittelun ja toteutuksen tulisi olla rationaalista ja taloudellista. Kizumen et al. (Tokio '96) mukaan nykyiset suunnittelumenetelmät johtavat liian korkeaan varmuustasoon ja ovat epätaloudellisia. Enemmän tietoa tarvitaan stabiloidun maamassan ja luonnontilaisen maan dynaamisesta yhteistoiminnasta ja suurten vaakakuormien aiheuttamista stabiilisuus- ja siirtymäongelmista. Erityisesti tulisi panostaa sekoituksen työmäärän ja tehokkuuden tutkimiseen. Parannetun maan laadun arviointi on hyvin tärkeää mutta erityisen vaikeaa. Uusimpia "hellävaraisia" näytteenottomenetelmiä tulisi edelleenkehittää pikaisesti.

Kvantitatiivisia yhtälöitä ei ole kuin joidenkin tekijöiden vaikutukselle. Suositellaan kuitenkin standardisoitujen laboratoriokokeiden suorittamista stabiloidun maan ominaisuuksien määrittämiseksi.

Kamon et al esittää, että kuivalla maalla tehdyissä stabilointitöissä kentällä todettu lujuus (kuva 14) vaihtelee vain noin viidesosasta puoleen siitä, mitä laboratoriossa on saavutettu. Laajoissa vesistöissä voidaan saavuttaa jopa suurempia lujuuksia kuin laboratoriossa.

Slurryn käytön etuna kuivamenetelmään verrattuna Babasaki mainitsee helpon sideaineen käsiteltävyys ja paremman sekoitettavuuden. Slurryn vesisementtisuhde on tärkeä tekijä arvioitaessa lopputulosta. Tatsuoka et al mainitsee kuivasekoitusmenetelmän etuina alhaiset kustannukset, nopean rakentamisen. Haittoja ovat saavutettu lujuustaso ja epätasainen laatu.

Okumura toteaa, että stabiloidun massan puristuslujuus ylittää usein 1 MPa:n suuruusluokan. Tällöin murtovenymä on tasoa 0,1 %. Tämän takia suunnittelun lähtökohtana on jäykkä rakenne. Taivutusvetolujuus ja samalla vedenläpäisevyys ovat pieniä. Kuormitukset kerääntyvät tällaisesta massasta tehtyyn pilariin, jolloin raskaasti kuormitetun pilarikentän yksittäiset pilarit sortuvat progressiivisesti. Ongelma on ratkaistavissa ainoastaan blokkistabiloinnin tai seinämäisen stabiloinnin avulla.

Penkereen vahvistamisessa käytetään yleensä pilarityyppistä rakennetta. Penkereiden suunnitteluprosessi on esitetty kuvassa 17. Pilarin puristuslujuus on yleensä alle 500 kPa. Pilarien suhteellinen osuus koko pinta-alasta on tavallisesti suurempi kuin 0,5.

## 1.3 Jet Grouting

Jet grouting on normaalin injektointitekniikan jalostuneempi muoto. Japanilaisessa Jet grouting-tekniikassa injektointiputken (poraputken) alapäässä olevista suuttimista puhalletaan hyvin korkealla paineella maahan pelkästään injektointiainetta (slurry), injektointiainetta ja vettä tai injektointiaineen ja veden lisäksi myös ilmaa (Kamon, s 9). Masashi Kamon'in mukaan tavanomaisessa injektoinnissa on vaikeata ennakoita ja todeta injektointiaineen levinneisyys. Hänen mukaansa Jet-grouting tekniikalla toteutetussa injektoinnissa injektoinnin vaikutusalueen määrittäminen on verraten helppoa.

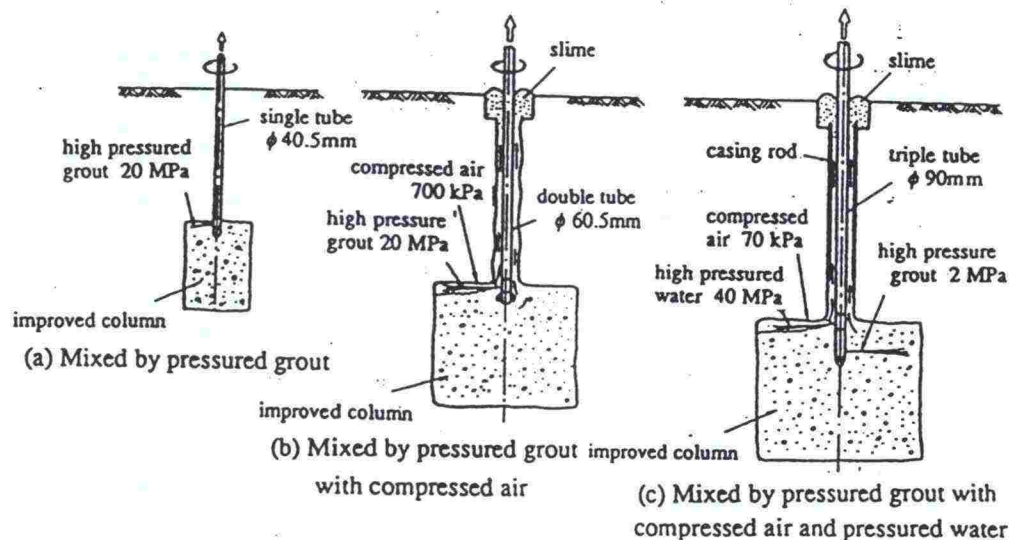


Maan ominaisuuksien parantamistekniikat (grouting and deep mixing) voidaan jakaa työtökniikaltaan ja vaikutustavaltaan viiteen ryhmään: syrjäyttävä, kuivattava, tiivistävä, lujittava (kiinteyttävä) ja raudoittava. Jet-grouting on luettavissa syrjäyttävään ryhmään. Jet grouting- menetelmässä injektointiputken ympärillä oleva maa puristautuu osittain putken vartta pitkin ylös suuripaineisen ruiskutuksen vaikutuksesta ja injektointiaine pusertuu tilalle ja sekoittuu maan kanssa. Näin pehmeään maahan saadaan muodostettua läpäisemättömiä ja kovia pilareita, seinämäisiä rakenteita ja yhtenäisiä massavyöhykkeitä. Jet grouting soveltuu käytettäväksi kaikenlaisille maatyypeille sorasta saveen.

Japanilaisella korkeapaineruiskutuksella ( jet grouting) voidaan saada aikaan pilareita, joiden halkaisija on yli 5 m. Jet grouting on injektointimenetelmänä paljon tehokkaampi normaaliin injektointiin verrattuna, mutta haittapuolena voidaan mainita syrjäytyvän lietteen suuri määrä.

Jet grouting-tekniikassa tunnetaan kolme eri tekotapaa:

- Maahan ruiskutetaan pelkkää injektointiainetta korkeapaineella ( 20 MPa ) . Injektointiputkessa (  $\varnothing$  40.5 mm ) on yksi ainoa tiehyt (kuva 1a).
- Maahan ruiskutetaan kaksoisputken (  $\varnothing$  60,5 mm ) kautta injektointiainetta 20 Mpa:n paineella ja paineilmaa 700 kPa:n paineella (kuva 1b).
- Maahan ruiskutetaan injektointiainetta 2 MPa:n, paineilmaa 700 kPa:n ja vettä 40 MPa:n paineella. Injektointiputki on kolmoisputki (  $\varnothing$  90 mm )

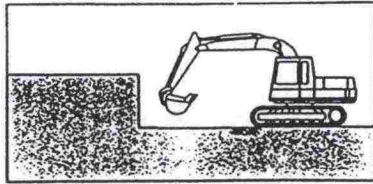


Kuva 21. Jet grouting-menetelmän kolme perustyyppiä.

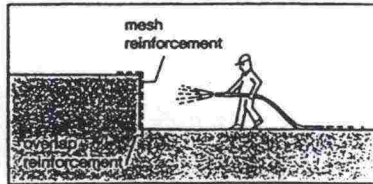
## 1.4 Maaluiskan naulaus

### 1.4.1 Bauer'in kehittämä menetelmä

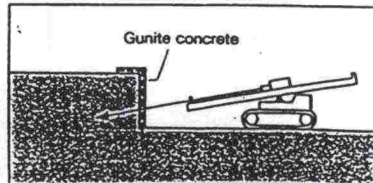
Japanilaisten käyttämässä maaluiskan naulauksessa ruiskubetonilla verhoillun luiskan lävitse porattuun reikään asennetaan teräs- tai muovitangot ja ne injektoidaan maahan kiinni. Naulattu maamassa muodostaa massiivisen tukiseinän, jolla voidaan tukea kaivantojen ja maaleikkausten luiskia.



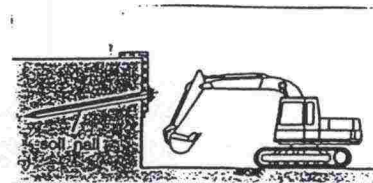
1. Vaihe: Maaluiskan naulaus tehdään samanaikaisesti maankaivutöiden kanssa. Maa kaivetaan vaiheittain jyrkästi luiskattuna tai pystysuorin luiskin. Kerralla paljastetun luiskan korkeus on maalajista ja sen kosteustilasta riippuen 1.2...1.5 m.



2. Vaihe: Paljastetun luiskan osuudelle asennetaan teräsverkko ja ruiskutetaan muutaman senttimetrin paksuinen ruiskubetonikerros.



3. Vaihe: Käytettävän naulatyypin ratkaisee tukirakenteen käyttötarkoitus sen mukaan, onko tukirakenne tilapäinen tai pysyvä. Naulateräset (tangot) porataan tai lyödään maahan ja injektoidaan kiinni.



4. Vaihe: Edellisen vaiheen luiskan naukauksen lujituttua jatketaan seuraavan vaiheen kaivulla, korkeus 1.2 ... 1.5 metriä.

Kuva 22 Maan naulaus

### 1.4.2 Radish - ankkurit

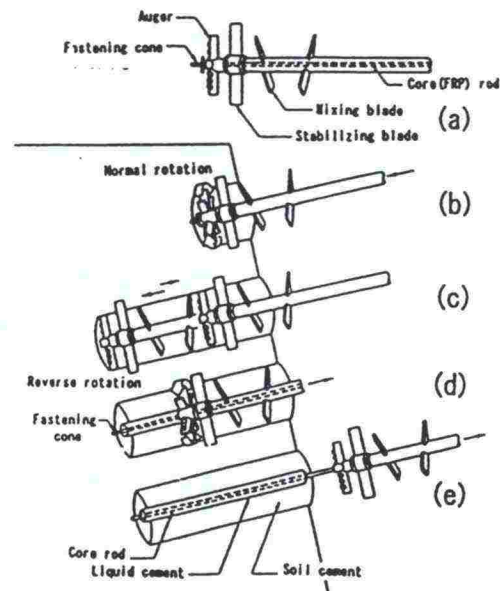
M. Tateyama & H. Tarumi ; A. Fakuda , s 759

Radish (Rational Dilated Short) - ankkuri edustaa uutta japanilaista maaluiskien naukausmenetelmää. Maanaulan muodostavat teräksinen (useimmiten ruostuma-

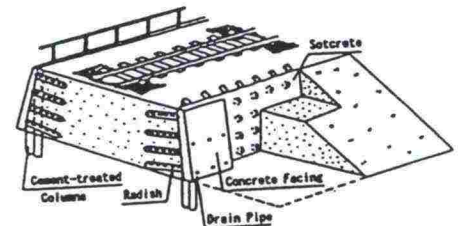
ton)sydäntanko ja sen ympärille mekaanisesti sekoitettu sementtipilari. Ankkuri on kehitetty Japanin rautateiden tarkoituksiin, koska raideliikenteen seassa tehtävissä tuentatöissä tarvittiin nopeasti rakennettavia luiskien tuentamenetelmiä. Vanhat luiskien tukemismenetelmät olivat liian hitaasti rakennettavia ja kalliita. Uuden menetelmän etuina voidaan pitää nopeaa asennettavuutta, taloudellisuutta, hyvää vetolujuutta ja pienehköjä vaakasiirtymiä menetelmällä tuetun penkereen yläosassa.

Radish-ankkurin asennusvaiheet (kuva 23):

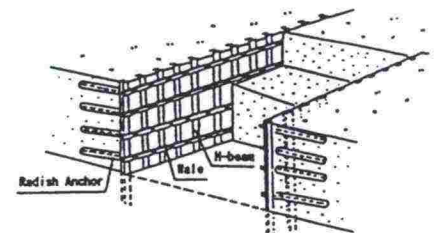
1. vaihe: Ankkuriteräs kiinnitetään porausauger`in kärkeen. Teräksen tulee olla noin metrin ankkuripituutta pidempi (kuva 23a).
2. vaihe: Sekoituslaite porataan maahan. Samalla maahan sekoitetaan sideaineena käytettyä sementtiä (slurry) (kuva 23b).
3. vaihe: Kun on saavutettu ankkurin tavoitetaso, sekoitusta jatketaan jonkin aikaa paikallaan (kuva 23c).
4. vaihe: Porauslaitteen sekoittimen kiertosuunta muutetaan ja porauslaite vedetään pois samalla pumppaamalla nestemäistä sementtiä maahan jäävän ankkuriteräksen ympärille (kuva 23d).
5. vaihe: Ankkuri on valmis. Sementtipilarin sisään on jäänyt sydänteräs (ankkuri-), joka on injektoitu sementtillaastilla pilariin kiinni (kuva 23e).



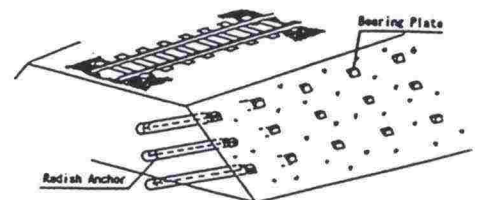
Kuva 23. Radish-ankkurin tekovaiheet.  
 ankkurien



(a) To steepen slopes of embankments



(b) Temporary reinforcement



(c) Reinforcements to strengthen embankment

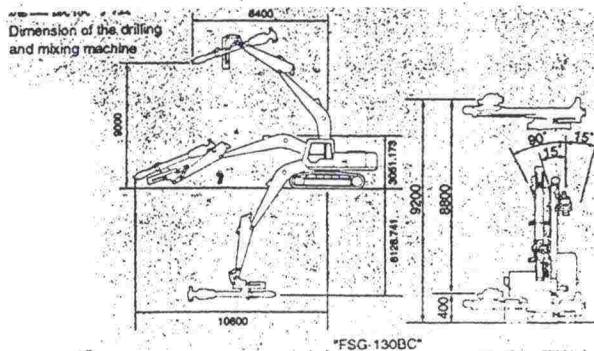
Kuva 24. Esimerkkejä Radish-käytöstä.



Ankkurien sementtipilarien halkaisijat vaihtelevat 300 ... 400 mm välillä. Ankkurite-  
rysten halkaisijat ovat 32...38 mm.

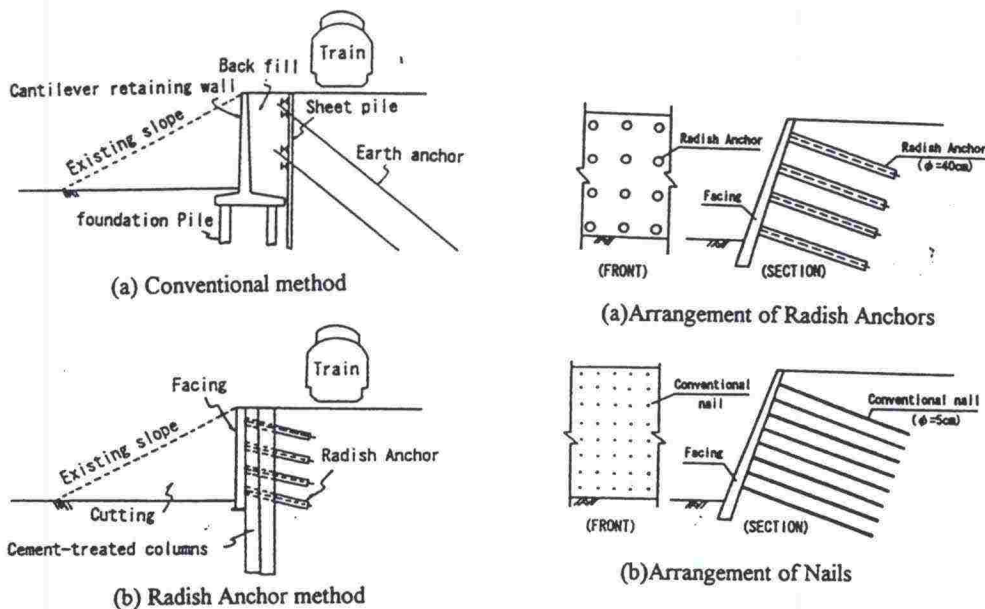
Esimerkkejä Radish-ankkurien käytöstä on esitetty kuvassa 24 .

Radish-ankkurien teossa tarvitaan hydraulinen porakonealustainen poraus- ja sekoit-  
tuskone, sideaineen sekoitusasema sekä syöttö- ja sekoituslaitteen toimintaa valvovat  
laitteet. Poraus- ja sekoituslaitteet voidaan kiinnittää myös kaivinkoneen työntöpuo-  
miin (kuva 25).



Kuva 25. Poraus- ja sekoituslaitteiden kiinnitys kaivinkoneen työntöpuomiin.

Kuvassa 26 on esitetty luiskan tuenta perinteisellä tavalla (26a) ja Radish-ankkureita  
hyväksikäyttäen (26b). Kuvassa 27 on puolestaan esitetty luiskan naulaus Radish-  
ankkureilla (27a) ja perinteisellä nauhaustekniikalla (27b).



Kuva 26. Luiskan tuenta perinteisellä  
tavalla ja Radish-ankkureilla.

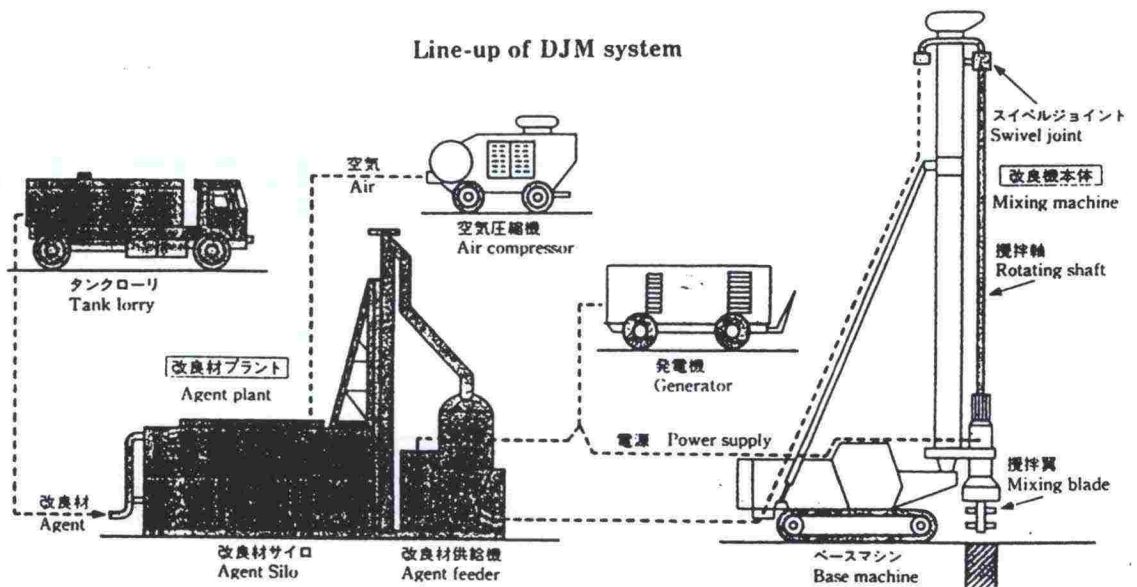
Kuva 27. Luiskan naulaus Radish-  
ankkureilla ja perinteisellä nauhaus-  
tekniikalla.

## 2 TUOTANTOTEKNIikka

### 2.1 Dry Jet Mixing (DJM)

Japanilaisen syvästabiloinnin (kuivamenetelmä = DJM) tuotantoyksikkö koostuu seuraavista koneista ja laitteista (kuva 28):

- Peruskone, jossa on yksi tai kaksi sekoitustyökalua pyörittävää putkivarretta. Peruskoneen kokonaispaino on 24...88 tn. Maksimi syvyysulottuma on 20...33 m. Sekoitustyökalun halkaisija on 1.0 m ja siinä on 4 sekoitusterää kahdessa tasossa.
- Erillinen sideaineen syöttölaite ja siilosto. Syöttölaitteen tilavuus on 2 m<sup>3</sup>. Laitteen syöttöteho vaihtelee 20...120 kg/min. Sideaineen syöttö tapahtuu paineilman avulla. Maksimi syöttöpaine on 700 kPa. Syöttölaitteeseen on kytketty myös syöttöä valvova kone (control machine).
- Sähköä tuottava aggregaatti ( 60 kVA ) ja paineilmakompressori ( 1050 kPa ).
- Sekoitustyökalun varren ja maan välistä nousevan sideainepitoisen paineilman keruulaitteisto.
- Sideaineen varastosiilo, tilavuus noin 30 tn.



Kuva 28. Japanilaisen syvästabiloinnin tuotantoyksikkö.

Oheisessa taulukossa 3 on eriteltyinä erityyppisten DJM-koneiden tekniset tiedot:

Taulukko 3. Erityyppisten DJM-koneiden tekniset tiedot.

Koneen tyyppi	Yhdellä sekoitusvarrella varustettu kone	Kahdella sekoitusvarrella varustettu kone
<b>SEKOITUSKONE</b>		
Sekoitusvarsien etäisyys toisistaan, mm	---	1000 , 1200 , 1500
Sekoitustyökalun halkaisija, mm	1000	1000
Maksimi syvyysulottuma, m	20	23 , 26 , 30 , 33
Sekoitustyökalun kierrosnopeus, rpm	5...50	24 , 32 , 48 , 64 (50 Hz)
Sekoitusvarren maksimi vääntömomentti, kpm	2000	2000...2520
Alastyöntö/ylösnostonopeus, m/min	0...7,0	0,5...3,0
Sekoitustyökalun käyttövoima	sähkömoottori-hydraulimoottori	alastyöntö/nosto: peruskoneen moottori, pyöritys: sähkömoottori
Moottorien tehot	70 kW	peruskoneen moottori: 130 PS sähkömoottori: 2 x 55...90 kW
Kokonaispaino, tn	24	67...87



### SIDEAINEEN SYÖTTÖLAITTEISTO

Syöttölaitteiden määrä	1	2
Syöttölaitteen säiliön tilavuus, m <sup>3</sup>	2	2 x 2
Syöttökyky, kg/min	20...120	(20...120) x 2
Tarvittava ilmamäärä, m <sup>3</sup> /min	2...9	(2...9) x 2
Maksimi syöttöilmanpaine, kp/cm <sup>2</sup>	7,0	7,0...9,8
Syöttöilman kuivaaja	2,2 kW x 1	2,2 kW x 2
Paineilmasäiliön tilavuus	4 m <sup>3</sup> x 1	4 m <sup>3</sup> x 2
Syöttölaitteiston mitat (koko), mm (Pituus x Leveys x Korkeus)	2400x1800x3650	4400x2500x3650
Kokonaispaino, tn	3	5,1...5,6

### SIDEAINEEN VARASTOSIILO

Siilon varastointikyky, tn	30	30
Siilon mitat, mm (Pituus x Leveys x Korkeus)	6500x2500x2600	7000x2500x2600
Siilon omapaino, tn	7,5	8,0

### PAINEILMAKOMPRESSORI

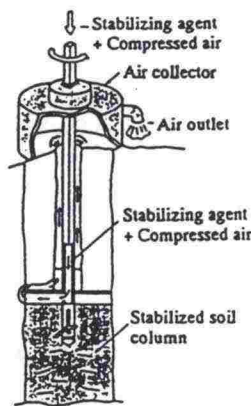
	7 kp/cm <sup>2</sup>	7 kp/cm <sup>2</sup>
	10,5 m <sup>3</sup> /min	10,5...17 m <sup>3</sup> /min
	x 1	x 2
SÄHKÖAGGREGAATTI	125 kVA x 1	300...350 kVA x 1
	60 kVA x 1	60 kVA x 1

Dry Jet Mixing (DJM) - menetelmässä maahan syötetään paineilman avulla kuivaa sideainetta, kuten suomalaisessakin pilaristabiloinnissa. Japanilaisten ( Minoru Aoi & Tsuyoshi Tsujii, s.579) mukaan DJM-menetelmän etuina voidaan mainita:

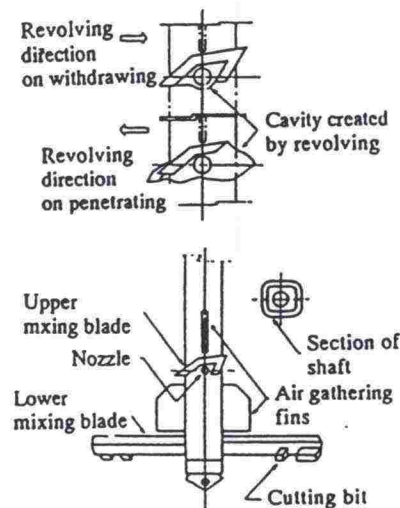
1. Voidaan valita useita eri sideaineita ja niiden käyttömääriä.
2. Näin on mahdollista saada aikaan laaja kirjo erilaisia pilarilujuuksia.
3. Lujuudet kehittyvät lyhyessä ajassa.

DJM-menetelmän käyttömäärät ovat vuosittain Japanissa (Aoi & Tsujii) 1,5 milj. m<sup>3</sup> stabiloitua maamassaa ja tähän päivään mennessä on Japanissa stabiloitu maata menetelmällä yhteensä noin 10 milj.m<sup>3</sup>.

Dry Jet Mixing - menetelmän periaate on esitetty kuvassa 29. Pulverimainen tai jauhemainen kuiva sideaine puhalletaan paineilman avulla sekoitustyökalun ontton varsi-putken sisällä olevan letkun kautta sekoitustyökaluun, josta se purkautuu syöttöaukon ja sekoitustyökalun ylimmän sekoitussiiven muodostaman "onkalon" kautta maahan. Sekoitustyökalun kiertoliike työkalua ylösvedettäessä sekoittaa sideaineen maahan. Sideaine erottautuu sitä kuljettaneesta paineilmasta välittömästi ylemmän sekoitussiiven yläpuolella ilmanpaineen laskiessa. Syöttöilma nousee lopulta sekoitustyökalun varren ympärille muodostunutta "onkaloa" myöten ylös maanpinnalla olevaan ilmankeräyslaitteistoon. Sekoitustyökalun rakenne on esitetty kuvassa 30.

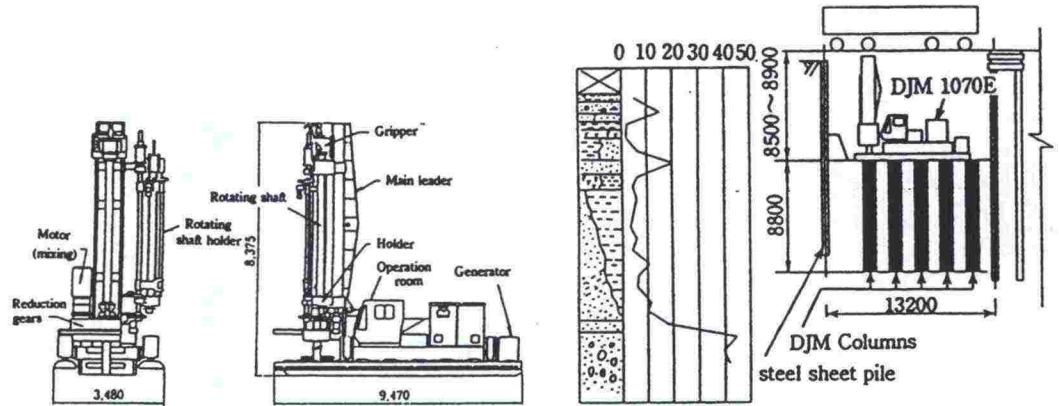


Kuva 29. DJM-menetelmän periaate.



Kuva 30. DJM-menetelmän sekoitustyökalun rakenne.

Japanilaiset ovat kehittäneet DJM-menetelmää varten erikoiskoneen, joka pystyy tekemään pilaristabilointia korkeudeltaan rajoitetussa tilassa ( Toshifumi Fujita, s. 591). Koneen sekoitustyökalun syöttövarren rakenne on teleskooppimallinen. Syöttövarren jatkososan pituus on 4 m ja niitä on yhteensä 5 kappaletta pyörivässä pääsyöttövarren viereisessä telineessä. Kun nämä kaikki viisi jatkososaa liitetään yhteen, on koneen maksimi työskentelysyvyys (pilaripituus) 23 m; kuvat 31 ja 32.



Kuva 31. Matalan tilan sekoitus-  
 kone, malli DJM 1070 E.

Kuva 32. Erään käyttökohteen  
 työskentelyolosuhteet.

Taulukko 4. Rajoitetun tilan koneen ( Model DJM 1070E) tekniset tiedot.

### SEKOITUSKONE

Sekoitusvarsien lukumäärä	1
Sekoitustyökalun halkaisija (mm)	1000
Maksimi työskentelysyvyys (m)	23
Sekoitutyökalun kierrosnopeus (rpm)	24, 48
Alastyöntö/ylösnostonopeus (m/min)	0 - 6,0
Sekoitusvarren maksimi vääntömomentti (Nm)	1250, 2500
Voimanlähteet	Hydraulimoottori Sähkömoottori (sekoitus)
Moottorien tehot (kW)	22 + 70 = 92
Kokonaispaino (tn)	35,25

### SIDEAINEEN KÄSITTELYLAITTEISTO

Sideaineen syöttölaitteen tilavuus (m <sup>3</sup> )	2
Sideainesilon varastointikyky (tn)	30
Syöttöilman kuivaajan teho (kW)	2,2
Paineilmasäiliön tilavuus (m <sup>3</sup> )	4,0
Paineilmakompressori	700 kPa
Sähköaggrekaatti	175 kVA 60 kVA



## 2.2 Cement Deep Mixing ( CDM )

Cement Deep Mixing - menetelmässä käytetään slurry-tyyppistä sideainetta. Menetelmässä käytetään sideaineena pääasiassa sementtiä, mutta myös kuonatuotteita. Slurry-tyyppistä sideainetta käytetään enimmäkseen vesistöissä, mutta myös maalla tapahtuvissa töissä.

Maalla tapahtuvissa töissä on sekoituskoneessa 1-2 sekoitusvartta ja vesistöissä 2-8 sekoitusvartta. Sekoitusvarren päässä olevassa sekoitustyökalussa on 4-6 sekoitus-siipeä. Sekoitustyökalun halkaisija on 1,0...2,0 m vesistöissä ja 0,7...1,5 m maalla tapahtuvissa töissä. Sekoituskoneen maksimi syvyysulottuma maalla tapahtuvissa töissä on 40 m ja se pystyy stabiloimaan maata 100-150 m<sup>3</sup> päivässä. Vesistöissä on sekoituskoneen maksimi syvyysulottuma 70 m ja se pystyy stabiloimaan maata noin 1000 m<sup>3</sup> päivässä ( T. Okumura, s 35).

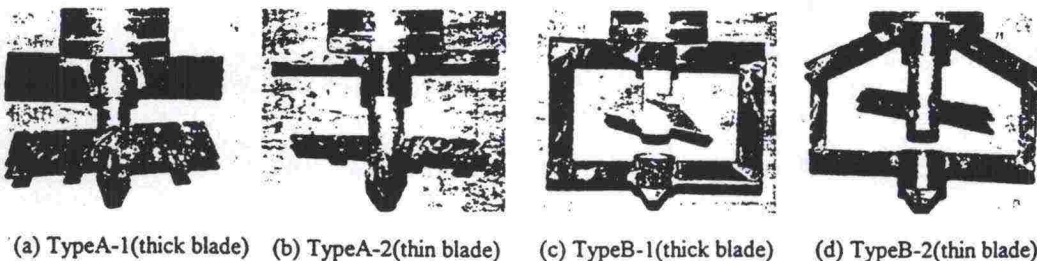
Sekoitustyökalun alastyöntö/ylösnostonopeus on maaperäolosuhteista riippuen yleensä 1,0 m minuutissa; vaihteluraja 0,5...2,0 m/min. Sekoitustyökalua pyöritetään paikallaan stabilointivyöhykkeen pohjalla 2-8 minuuttia riittävän hyvän sekoitustuloksen aikaansaamiseksi ( T.Okumura, s 35).

Käytettävän sideaineen määrä riippuu stabiloidun tuotteen lujuusvaatimuksista ja se vaihtelee useasti 100 - 200 kilon välillä käsiteltävän maakuutiota kohti. Sementti-slurry'n vesisementtisuhte vaihtelee yleensä välillä 0,6 - 1,3. Yleisemmin käytetty vesisementtisuhteen arvo on 1,0. Sideaine-slurry voidaan sekoittaa stabiloitavaan maahan sekoitustyökalua nostettaessa ja/tai maahan painettaessa (T.Okumura, s 35).

### 2.2.1 Sekoitustuloksen riippuvuus työkalun siipien paksuudesta ja muodosta

Japanilaiset Jun Dong, Keiji Hiroi ja Kazuyuki Nakamura ovat tekemissään tutkimuksissa tutkineet sekoitustuloksen riippuvuutta työkalun siipien paksuudesta ja muodosta. He ovat tutkimuksissaan käyttäneet varta vasten tarkoitukseen rakennettua mallikonetta. Sekoitustyökalun halkaisija vaihteli kokeissa 0,4 - 0,7 m.

Kuvassa 33 on esitetty kokeissa käytetyt sekoitustyökalujen tyypit ja taulukossa 5 on esitetty sekoitustyön tekniset arvot.

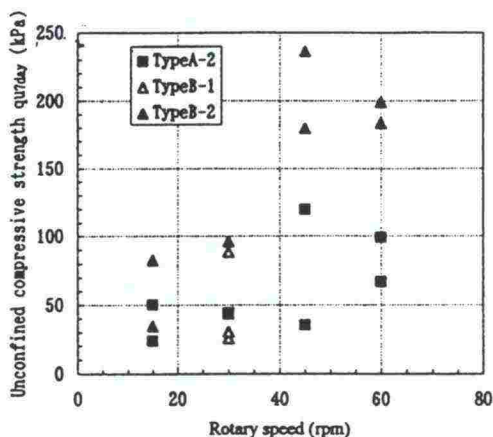


Kuva 33. Tutkittujen sekoitustyökalujen tyypit.

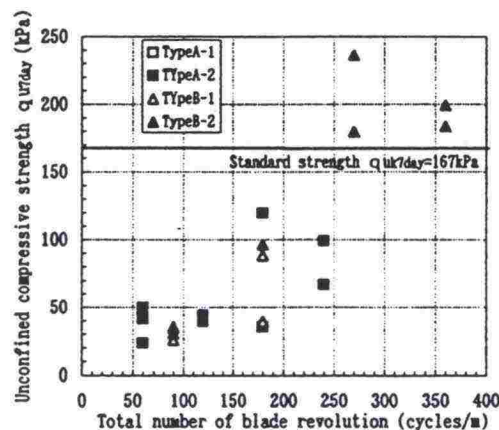
Taulukko 5. Koeolosuhteet.

Test No.	Shape of Mixing blade	Rotary speed (rpm)	Lifting speed (m/min)	Total number of blade revolution (cycles/min)	Injecting velocity of slurry (l/min)	Injecting volume of slurry (l/one column)
1	TypeA-1	30	1.0	60	2.8	2.8
2	TypeA-2	30	1.0	60	2.8	2.8
3	TypeA-2	15	0.5	60	1.4	2.8
4	TypeA-2	30	0.5	120	1.4	2.8
5	TypeA-2	45	0.5	180	1.4	2.8
6	TypeA-2	60	0.5	240	1.4	2.8
7	TypeB-1	30	1.0	90	2.8	2.8
8	TypeB-1	30	0.5	180	1.4	2.8
9	TypeB-1	60	1.0	180	1.4	2.8
10	TypeB-2	15	0.5	90	1.4	2.8
11	TypeB-2	30	0.5	180	1.4	2.8
12	TypeB-2	45	0.5	270	1.4	2.8
13	TypeB-2	60	0.5	360	1.4	2.8

Kokeiden tuloksena saatiin, että paras sekoitustulos saavutettiin ohuilla siivillä varustetulla B-2 - tyyppin sekoitustyökalulla ja että paras lujuus saavutettiin mahdollisimman hyvän sekoitustyön tuloksena. Hyvä sekoitustyö on sitä parempi mitä suurempi on työkalun kierrosnopeus (kuva 34) ja sekoitussiipien kierrosmäärä pilarimetriä kohti (kuva 35).



Kuva 34. Puristuslujuuden riippuvuus sekoitustyökalun kierrosnopeudesta.

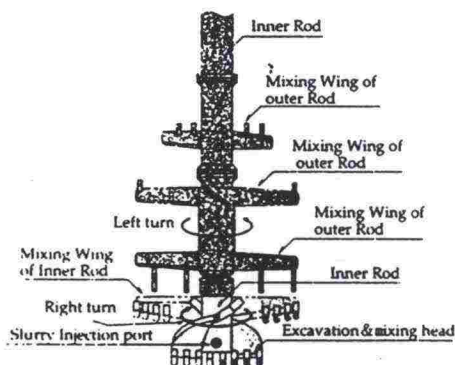


Kuva 35. Puristuslujuuden riippuvuus sekoitussiipien kierrosmäärästä pilarin pituusmetriä kohti.

### 2.2.2 Halkaisijaltaan suurten pilarien valmistus Deep Mixing - menetelmällä

Kaneharu Isobe, Yuji Samaru, Chisetsu Aoki, Kouichi Sogo ja Tetsuji Murakami s. 619

Cement Deep Mixing (CDM) - menetelmää käytettäessä on sekoitustyökalun halkaisija yleensä 1,0 m. Japanilaiset ovat testanneet vieläkin suurempien sekoitustyökalujen käyttöä, nimittäin halkaisijaltaan 1,5, 1,8 ja 2,0 m. Sekoituskoneessa on kaksi rinnakkaista sekoitusvartta ja varsien päissä kuvan 36 mukaiset sekoitustyökalut. Sekoitustyökalun alempi siipiosa pyöri eri suuntaan kuin muut työkalun siivet.



Kuva 36. Halkaisijaltaan suurten pilarien teossa käytetty sekoitustyökalu.

Seuraavassa joitakin lukuarvoja liittyen suurten pilarien tekemiseen:

- sekoitustyökalun halkaisija 1400...2000 mm
- sekoitustyökalun alastyöntönopeus 0,5 m/min
- sekoitustyökalun ylösnostonopeus 1,0 m/min
- koneen maksimi syvyysulottuma 24 m
- saavutetut puristuslujuudet 1,0...6,0 Mpa
- koneen maksimi vääntömomentti 175 kW (kNm)
- slurrin maksimi syöttöteho 500 l/min
- peruskoneen paino 120 tn

### 2.2.3 Syvästabilointi levitettävän sekoitustyökalun avulla ( Deep mixing by Spreadable Wing Method )

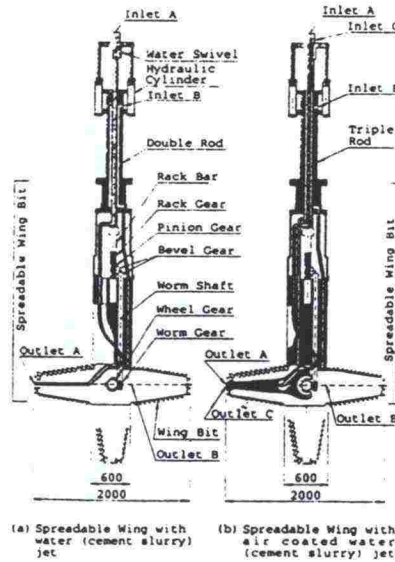
*Koji Kawasaki & Hidenori Kotera ; Koichi Nishida & Toshiaki Murase , s. 631*

Menetelmässä yhdistyvät mekaanisesti sekoitustyökalun siivillä tapahtuva sekoitus ja korkeapaineinjektointi ( jet grouting ). Aluksi pilarin valmistus tapahtui levitettävän sekoitustyökalun avulla mekaanisesti sekoittaen. Seuraavaksi levitettävän työkalun siipien päihin lisättiin korkeapaineinjektointia varten suuttimet (kuva 37). Suuttimien kautta voidaan maahan puhaltaa sementti-slurria, vettä tai paineilmaa. Kun sekoitustyökalu kierretään maahan on sen halkaisija 600 mm ja kun työkalun siivet levitetään täyteen mittaansa on halkaisija 2000 mm. Lisäksi korkeapaineruiskutuksella saadaan stabiloidun vyöhykkeen halkaisija kasvamaan 3200...3600 mm:iin. Kuvassa 38 on esitetty stabiloidun vyöhykkeen tekovaiheet.

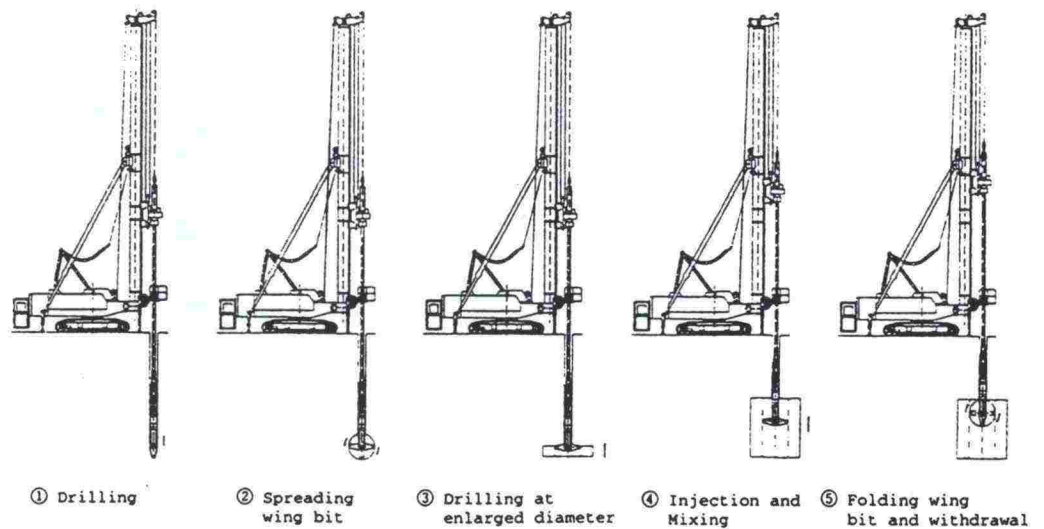


Menetelmän etuina voidaan pitää:

- pieniläpimittaisella maahanporauksella saadaan aikaan suuriläpimittainen stabiloitu vyöhyke.
- stabiloitu vyöhyke saadaan aikaan haluttuun maakerrostumaan ilman, että syvyssuunnassa olevat muut maakerrokset häiriintyvät.
- korkeapaineruiskutuksella voidaan kasvattaa mekaanisella sekoituksella aikaansaatua stabiloidun vyöhykkeen halkaisijaa.



Kuva 37. Leikkaukset sekoitustyökalusta.



Kuva 38. Stabiloidun vyöhykkeen tekovaiheet.

Seuraavassa muutamia menetelmään liittyviä lukuarvoja:

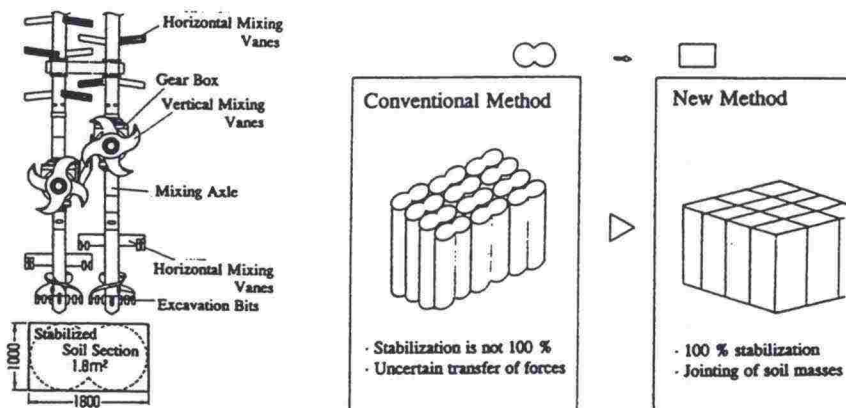
- |   |                              |
|---|------------------------------|
| • pilottiporan halkaisija (siivet sisäänvedettyinä) | 600 mm                       |
| • sekoitustyökalun halkaisija siivet levitettynä    | 2000 mm                      |
| • stabiloidun vyöhykkeen halkaisija                 | 2000...3600 mm               |
| • sideaineen (slurry) syöttöpaine                   | 200...400 kp/cm <sup>2</sup> |
| • sideaineen (slurry) syöttöteho                    | 50...110 l/min               |
| • paineilman paine                                  | 4...7 kp/cm <sup>2</sup>     |
| • sekoitustyökalun viipymä ylösnostossa             | 10...30 min/m                |

#### 2.2.4 Suorakulmaisten lamellien valmistus uudella Deep Mixing-menetelmällä

*T.Watanabe, S.Nishimura, M.Moriya & T.Hirai, s.783*

Menetelmä on kehitetty alkuperäisestä Deep Mixing-menetelmästä suorakulmaisten stabiloitujen lamellien muodostamiseksi. Näin saadaan stabilointi peittämään koko stabiloitavan alueen. aiemmassa tavanomaisessa menetelmässä pyöreiden pilareiden väliin jää aina stabiloimatonta maata. Uudella menetelmällä saavutetaan stabiloitavalla alueella 100 %:n peittävyys.

Menetelmää varten kehitetyssä sekoituskoneessa on kaksi sekoitusvartta ja varsissa on kahden tyyppisiä sekoitussiipiä; vaakasuoraan ja pystysuoraan sekoittavia (kuva 39).



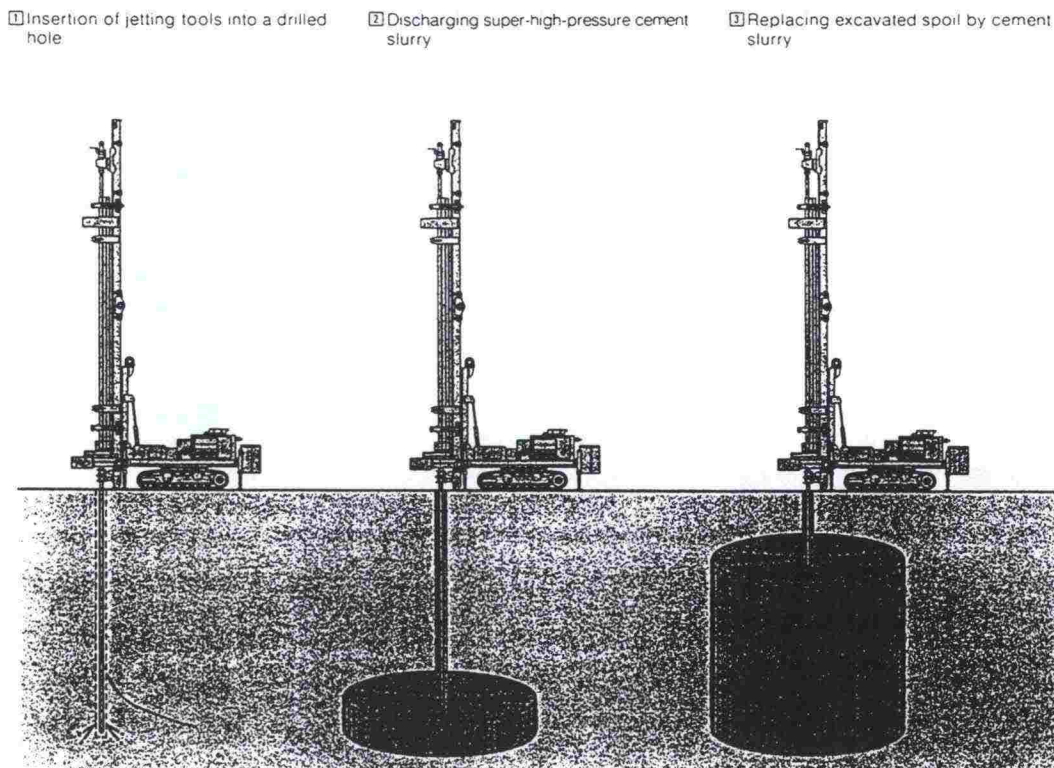
Kuva 39. Periaatekuva sekoitustyökalusta ja menetelmän peittävydestä.

## 2.3 Jet Grouting

### 2.3.1 Suuriläpimittainen korkeapaineinjektointi - kaupalliselta nimeltään Superjet

*H. Yoshida, S. Jimbo & S. Uesawa, s. 721*

Menetelmällä on mahdollista saada syntymään maahan suuriläpimittäisiä sementtipilareita, joiden halkaisijat ovat suurimmillaan 5 metriä. Superjet-pilarin valmistus tapahtuu seuraavasti: Maahan porataan haluttuun syvyyteen kolmiseinäminen (-tiehyeininen), halkaisijaltaan 150 mm:n putki. Putkeen on asennettu uudenlainen virtauksenmittauslaite. Injektointiputken alapäässä olevista suuttimista ruiskutetaan korkeapaineella sideaineslurryä ja paineilmaa samalla paineella ja sama määrä vastakkaisiin suuntiin. Menetelmässä käytetty syöttöpaine on 300 kp/cm<sup>2</sup> ja syöttöteho 300 ltr/min, molemmat arvot ovat arvoja suuntaansa. Injektointiputken ylösnostossa viipymä on 10 min/m. Menetelmän tehokkuus perustuu kaksisuuntaiseen ruiskutukseen. Jos ruiskutus tapahtuisi yhteen suuntaan olisi syöttöpaine 600 kp/cm<sup>2</sup> ja syöttöteho 600 ltr/min. Superjet-menetelmässä syntyy vähemmän ylijäämälietettä kuin perinteisissä menetelmissä. Superjet-pilarin valmistusvaiheet on esitetty kuvassa 40.



*Kuva 40. Superjet-pilarin valmistusvaiheet.*

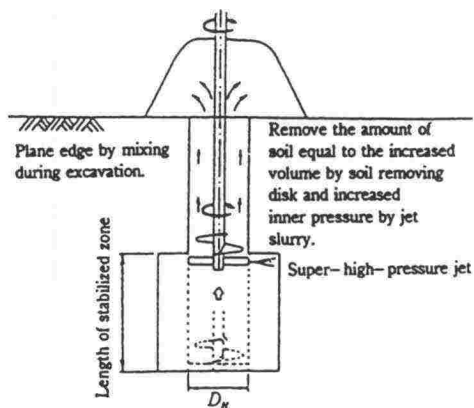


### 2.3.2 Vähän maata syrjäyttävä korkeapaineinjektointi ( Low Displacement Jet Column Method ; LD-method)

*Hiroshi Ueki & Kazuo Hasegawa ; Koichi Suzuki & Michio Bessho , s 767*

Perinteiset jet grouting - menetelmät ovat toimintavaltaan maata syrjäyttäviä. Stabiloidun pilarin valmistuksessa syntyy suuri määrä jätelietettä. Japanissa on ryhdytty kehittämään menetelmiä, joiden tavoitteena on jätelietteen määrän pienentäminen. Yksi tällainen menetelmä on LD-menetelmä.

Menetelmässä maahan sekoitetaan mahdollisimman vähän sementtislurppua, vain hie- man enemmän kuin mikä on poiskaivetun maan tilavuus. Perinteisessä menetelmässä paineilmapuhalluksen vaikutuksesta purkautuva (syrjäytyvä) maa poistetaan LD- menetelmässä auger-tyyppisellä kairalla. Lisäksi sideaineen ruiskutuksessa käytetään erityisen suuren paineen tuottavia pumppuja (kuva 41).

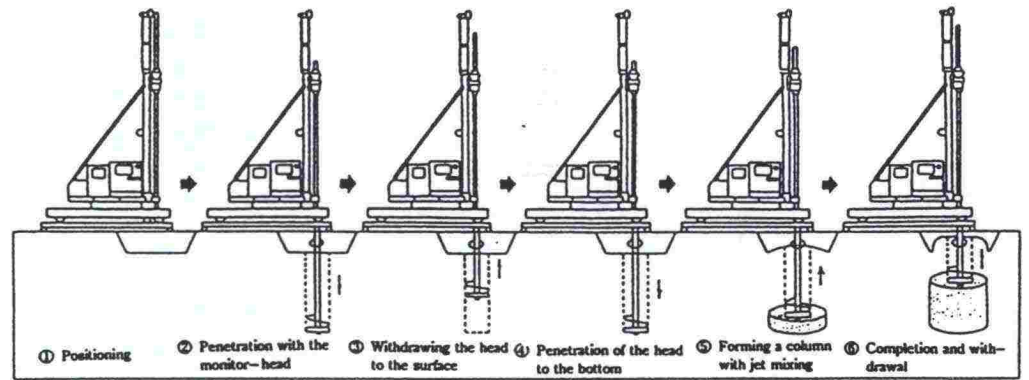


*Kuva 41. Syrjäytyvän maan poistomenetelmä auger-tyyppisellä kairalla.*

Kuvassa 42 on esitetty LD-menetelmällä valmistetun sementtistabiloidun pilarin tekovaiheet. Kun sekoituskone on saatu sijoitetuksi pilarintekokohdalle, sekoitustyökalu kairataan ensin maan häiritsemiseksi tavoitesyvyyteen ja nostetaan ylös. Sen jälkeen sekoitustyökalu kairataan uudestaan tavoitesyvyyteen ja nyt aloitetaan sideaineen syöttö korkeapaineella samalla kun sekoitustyökalua kierretään ja nostetaan ylös.

Seuraavassa on esitetty muutamia menetelmän lukuarvoja:

- syöttöpumpun paine 30...40 Mpa
- syöttöteho 100...200 l/min
- sekoituskoneen maks. syvyys-
- ulottuma 20 m
- stabiloidun vyöhykkeen halkaisija 1,0 m



Kuva 42. LD-menetelmällä valmistetun pilarin tekovaiheet

### 3 LAADUNVALVONTA

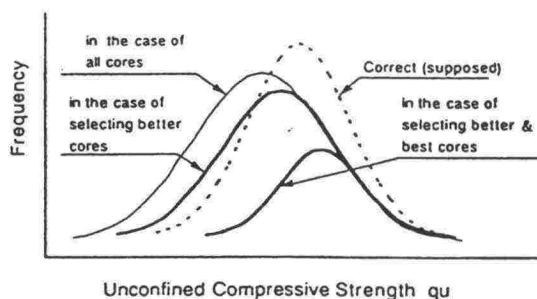
#### 3.1 Stabiloidun maan lujuuden arviointi

Kohata et al on todennut, että syvästabiloidun maan pääasiallinen laadunvalvonta perustuu pilarista tai stabiloidusta massasta porattujen näytteiden yksiaksiaaliseen puristukseen. Kolmiaksiaalikoetta käytetään enenevässä määrin mutta sitä ei ole standardisoitu. Näytekappaleiden tekemisestä on annettu Japanin geoteknisen yhdistyksen (JGS) ohjeet vuonna 1990. Kirjoituksessa, joka on laadittu JGS:n teknisen komitean raportin pohjalta esitetään laboratoriomenetelmien standardisointia

Hosoya et al artikkeli, jota jäljempänä selostetaan ellei toisin mainita, perustuu 84:ään artikkeliin, jotka on julkaistu Japanissa viimeisten kymmenen vuoden aikana. Työn tärkeimpänä tehtävänä on ollut analysoida sydännäytteistä tehtävää yksiaksiaalista puristuskoetta. Toiseksi artikkelissa käsitellään näyteenottotekniikan vaikutusta näytteen laatuun sekä yksiaksiaalisen puristuskokeen menetelmävirheiden vaikutusta stabiloidun maan lujuuteen ja sen hajontaan. Artikkelissa käsitellään myös staattisia tunkeutumiskokeita, seismisiä luotauksia, kuormituskokeita sekä ainetta rikkomattomia menetelmiä.

Yksiaksiaalista puristuskoetta pidetään yksinkertaisena ja taloudellisena menetelmänä määrittää stabiloinnin vaikutusta maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin. Stabiloidun maan laadunvarmistus aloitetaan ottamalla sydännäytteitä 2 - 3 viikkoa vanhasta stabiloidusta massasta tai pilareista. Näytteen ehjyyttä arvioidaan ulkonäön perusteella ja joskus RQD -arvon avulla (yli 100 mm pitkien ehjänä säilyneiden kappaleiden yhteenlaskettu osuus yhden metrin sydännäytteestä prosentteina). Stabiloidun maan laatu arvioidaan näytetulosten keskiarvosta ja hajonnasta.

Näytevalinnan problematiikkaa on esitelty kuvassa (kuva 43).



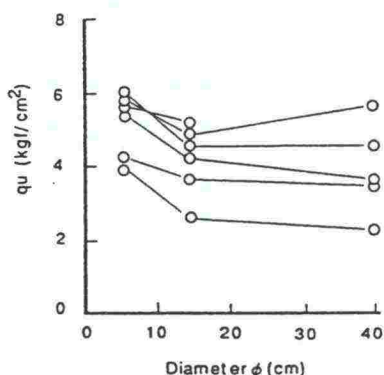
Kuva 43 Stabiloidun maan lujuusjakautumasta saatu kuva otettaessa näytteitä erilaisilla tekniikoilla



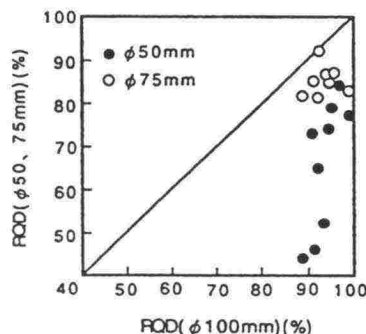
Näytteenoton suurimman ongelman syitä ovat:

- poranreiän kaareutuminen
- näytteenottimen jäykkyys
- näytteenottimen lukittuminen
- näytteen pyrkimys pyöriä näytteenottimen mukana

Näytteen halkaisija on tavallisesti 10 cm. Koon vaikutusta näytteen lujuuteen on tutkittu (kuva 44) ja sen mukaan näytteen pitäisi olla läpimitaltaan vähintään 150 mm. Näytetutkimuksissa saadaan sitä suurempia lujuuksia mitä suurempi näyte on. Yhtälöllä voidaan verrata kahden tietyn kokoisen näytteen lujuuksien suhdetta:  $q_{u400} = 0,87q_{u60}$ . Näytteen ehjyyttä kuvaava RQD-luku on läpimitaltaan isommilla näytteillä suurempi (kuva 45).

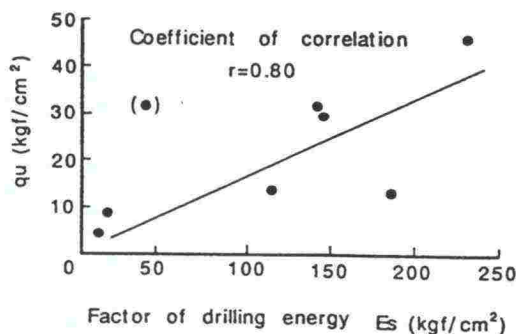


Kuva 44 Näytekkappaleen läpimitan ja puristuslujuuden suhde



Kuva 45 Näytekkappaleen läpimitan ja RQD-luvun suhde

Yksiaksiaalista puristuskoetta ja kolmiaksiaalikoetta on verrattu. Tulosten mukaan kolmiaksiaalikoetta antaa suurempi lujuuksia. Eräänä vaikuttavana tekijänä on näytteen halkeamien vaikutuksen poisjääminen. Kolmiaksiaalikoetta antaaakin luotettavampia tuloksia maan lujuudesta verrattuna yksiaksiaaliseen puristukseen. Stabiloidun näytteen halkeilua esiintyy sekä hiekkaa stabiloitaessa että savea stabiloitaessa. Savella esiintyy usein mikrohalkeilua, joka näytteenoton aikana entisestään lisääntyy (kuva 46).



Kuva 46 Näytekkappaleen puristuslujuuden kairausenergian suhde

Näytteenotto ja yksiaksiaalinen puristuskoe ovat käytetyimpiä stabiloidun maan lujuuden määrittämisessä vaikka myös in-situ -menetelmiä käytetään. Seuraavassa on lueteltu näitä menetelmiä:

#### Kairausmenetelmät

- SPT-kairaus; harvoin sovellettu, korrelaatio yksiaksiaalisen puristuskokeeseen on todettu
- Heijarikairaus (Dynamic cone penetration test); helppo kairausyksikön liikuteltavuus ja toiminta, soveltuu kun  $q_{11} \sim 200..500$  kPa
- CPT-kairaus (Electric static cone penetration test); soveltuu alhaisille lujuuksille
- Poraus (Rotary penetrating test), parempi kairausyksikön liikuteltavuus kuin sydännäytekairalla, korrelaatio yksiaksiaaliseen puristuslujuuteen täytyy tutkia jokaisessa kohteessa erikseen

#### Sydänkairan reikää hyödyntävät menetelmät

- puristus/leikkausaalto (PS-logging); suspension -menetelmä on parempi kuin Down hole -menetelmä; korrelaatiota yksiaksiaaliseen puristuskokeeseen
- sähköinen luotaus (Electrical Logging); alhainen korrelaatio yksiaksiaaliseen puristuskokeeseen
- tiheyden mittaus; kalibrointi tärkeä, ei korrelaatiota yksiaksiaaliseen puristuskokeeseen

#### Kuormituskokeet

- vaakakuormituskoe näytteenottoreiästä; muodonmuutoksia mieluummin kuin lujuutta, korkeat kustannukset
- levykuormituskoe (pyöreä levy  $\varnothing$  30 cm) (plate loading test); kantavuus ja muodonmuutokset suoraan, stabiloidun maan ominaisuuksia voidaan arvioida vain 2-3 kertaa levyn syvyydeltä
- pilarin kuormituskoe (pilarinkokoinen levy) (Stabilized pile loading test); pilarin ominaisuudet suoraan, kallis ja kokeiden lukumäärä rajoitettu

#### Ainetta rikkomattomat menetelmät

- Ehjyyskoe (Integrity test); yksinkertainen, ei ole vielä standardisoitu
- Kimmoaalto tutkimus (Elastic wave exploration); Mittaus voidaan tehdä joko porareikästä tai maan pinnalta. Tomografialla parannetaan tulosta.

#### Muut menetelmät

- Tunkeutumiskoe (Penetration test); jonkinlainen pikatesti; yksinkertainen ja helppo, kokeita voidaan tehdä paljon, vain stabiloidun maan pintaa voidaan testata

Nishibayashi et al (1985) on esittänyt yhteyden SPT-kairauksesta saatavan N-arvon ja  $q_{11}$  -arvon välille. Porakonekairauksessa on esitetty kairausenergian ja  $q_{11}$  :n välinen yhteys (Shimotubo et al 1992).

#### Yhteenvedona tuodaan selkeästi esille kaksi asiaa:

- parempia näytteenottimia tulisi kehittää pikaisesti ja
- kolmiaksiaalikoetta tulisi käyttää enemmän halkeiluvaikutuksen vähentämiseksi

## 3.2 Laatuun vaikuttavista tekijöistä

### 3.2.1 Laaduntarkkailu

Stabiloidun maan lujuuteen vaikuttavat tekijät on listattu taulukossa 1, joista tässä käsitellään tuotantoprosessiin liittyviä tekijöitä. Esitys perustuu pääosin Yoshizawan, Okumura et al artikkeliin.

Sekoitusteholla on suurin vaikutus laatuun ja tekemisen aikaisessa laaduntarkkailussa kiinnitetään erityisesti huomiota seuraaviin seikkoihin ja ne rekisteröidään huolellisesti:

- sekoittimen kierrosnopeus
- alastyöntö/ylösnostonopeus
- terän asema syvyys suunnassa
- pilarin alapään laadun varmistaminen

Laaduntarkkailuun kuuluu osana sydännäytteiden ottaminen. Niistä tehdään yksiaksiaalisia puristuskokeita. Jos on tarpeellista, selvitetään vielä seuraavat asiat:

- otettavien lisäkokeiden määrä
- sementin määrä
- stabiloidun maan laadun arviointi kaivannosta tai koekuopasta
- täysimittakaavainen kuormituskoe

Otettavien näytteiden määrä vaihtelee työn mukaan ja on vesistöissä yksi/10000 m<sup>3</sup> ja kuivan maan töissä yksi/3000 stabiloitu maa-m<sup>3</sup>.

Vertailu Suomen käytäntöön voidaan tehdä esim Tielaitoksen selvityksiä -sarjassa julkaistun Syvästabiloinnin laadunvalvontaohjeessa (Lahtinen ja Parkkinen, 1992) esitettyyn käytäntöön. Sen mukaan otetaan näyte jokaista 15 000 j-metriä kohti. Tehtäessä läpimitaltaan 0,5 metrin pilaria tämä merkitsee yhtä näytettä 3000 m<sup>3</sup>:ä kohti. Kymmenen metriä syvässä kentässä tämä merkitsee yhtä tarkastettua pilaria 150 tehtyä pilaria kohti. Lahtisen/Parkkinen mukaan (1992) pilarikairauksia tai puristinkairauksia tulee tehdä 1 - 2 % pilarien määrästä eli 150 pilaria kohti 1,5 - 3 pilarikairausta. Lisäksi tehdään pilarisiipikairauksia kalibrointia varten.

Japanissa laaduntarkkailu on määrällisesti vähäisempää kuin Suomessa. Erot korostuvat, jos verrataan tilavuusyksikköä kohti tehtyä laaduntarkkailua mutta koska Japanissa tehdään isoläpimittaisempia pilareita (>1000 mm), ero tasoittuu pilarimetriä kohti laskettaessa. Kohteet ovat myös Japanissa laajempia, jolloin näytteitä tulee otettavaksi joka tapauksessa runsaasti hanketta kohti. Kohteiden laajuuden takia myös suunnitteluun (työnsuunnitteluun) ehkä satsataan enemmän, jolloin lopputuoteseen kohdistuva laadunvalvonnan tarve vähenee.

### 3.2.2 Sekoituksen aikana laatuun vaikuttavat tekijät

Sekoitustulokseen vaikuttavia tekijöitä tarkastellaan Yoshizawan, Okumuran et al artikkelissa ja ne on jaoteltu syöttötapahintaan ja sekoitustapahintaan. Seuraavassa näitä tekijöitä eritellään tarkemmin.



### Sideaineen syötön vaikutus

- sementin laatu

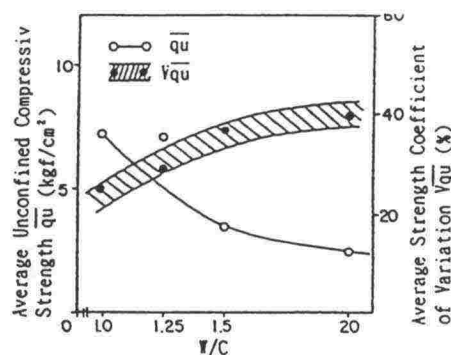
Artikkelissa todetaan laadun vaikutus ja siinä on esitetty eräs sementin ja masuunikuonan lujusvaikutuksia selittävä vertailtu. Todetaan myös aineen olomuodon vaikuttavan lujuteen: esim käytetäänkö kivi-vasementtiä vai sementtilietettä (slurria). Suomessa on melko paljon tutkittu eri sideaineita ja niiden vaikutusta lujuteen erilaisissa savissa ja silteissä sekä myös turpeissa.

- vesisementtisuhde

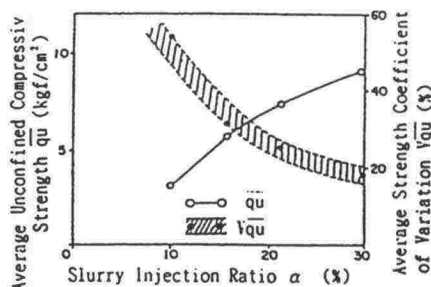
Kun vesisementtisuhde kasvaa lujuus vähenee ja samalla hajonta (kuva 47) vesisementtisuhde 1.0 on yleisesti käytetty.

- sideaineen määrä

Kun sideainetta lisätään lujuus kasvaa ja hajonta pienenee (kuva 48).



Kuva 47 Vesisementtisuhteen vaikutus lujuteen



Kuva 48 Sideaineen määrän vaikutus lujuteen

### Sekoitus

- Sekoitusvarsien lukumäärä

Vertailukokeessa käytettiin yhden varren ja neljän varren kokoonpanoja. Neljällä varrella tulos oli parempi (kuva 49). Viereiset terät pyörivät vastakkaisiin suuntiin ja leikkaavat toistensa sekoitusalueita. Tämä tehostaa sekoituksen yhteisvaikutusta.

- Sekoitusterien määrä ja muoto.

- Sekoittimen kierrosnopeus

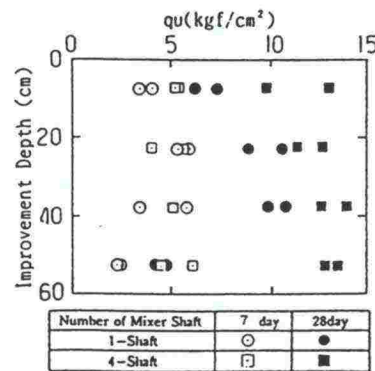
Kierrosnopeuden lisääminen parantaa sekoitustulosta ja sitä kautta maan lujutusta (kuva 50).

- vaihe, jossa sideaine syötetään

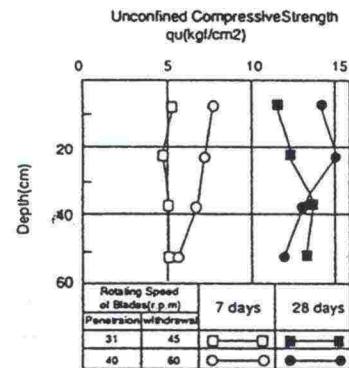
Yleisesti uskotaan, että sideaineen syöttö alastyöntövaiheessa parantaa sekoitustulosta. Sideaine sitkistää maata kuitenkin nopeasti. Varsinkin jos pilarin ovat pitkiä, työ voi vaikeutua. Suomessa on saatu

samansuuntaisia kokemuksia. Toisaalta ylösnostovaiheessa tapahtuva syöttö ei takaa tuloksen laatua. (kuva 51).

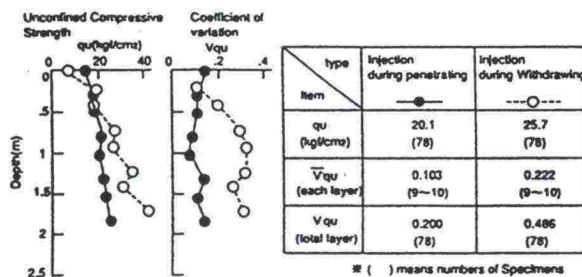
- alastyöntö/ylösnostonopeus  
 Savella ja siltillä on huomattu, että mitä hitaammin sekoitin työnnettään alas sitä suurempi lujuus saavutetaan (kuva 52).
- viive limityksessä  
 Tehtaässä limitys noin tunnin kuluessa ei ole huomattu merkittäviä lujuudenmuutoksia. Jos viive on 2 vrk, putoaa lujuus liitoksessa noin 60%:iin yleisestä tasosta.
- sekoitusaste  
 Sekoitusasteen mittarina käytetään eri terätasojen yhteenlaskettua pyörähdysmäärää metriä kohti. Yhteen lasketaan sideaineen syöttövaiheessa sekä sen jälkeen tapahtuvassa sekoituksessa tapahtuvat terätason pyörähdykset. Yleisesti käytetään pyörähdysmäärää 360. Kuvan 53 mukaan hyvä tulos näyttää vaativan suurempaa määrää.



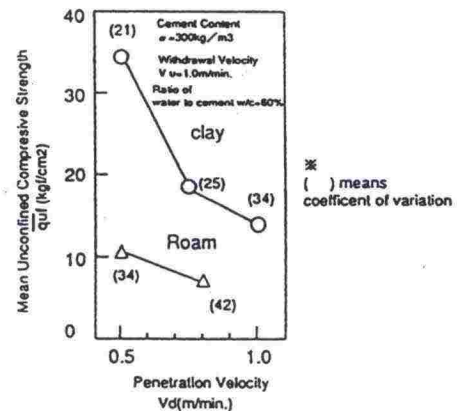
Kuva 49 Sekoitusvarsiin lukumäärän vaikutus lujuuteen



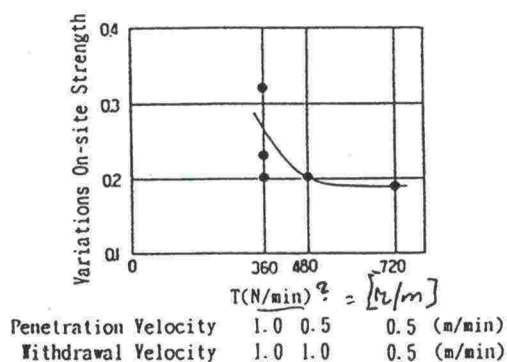
Kuva 50 Kierrosnopeuden vaikutus lujuuteen



Kuva 51 Sideaineen syöttöajankohdan vaikutus lujuuteen



Kuva 52 Sekoitussterän työntönopeuden vaikutus lujuuteen



Kuva 53 Terätasopyörähdysten määrän vaikutus lujuuteen

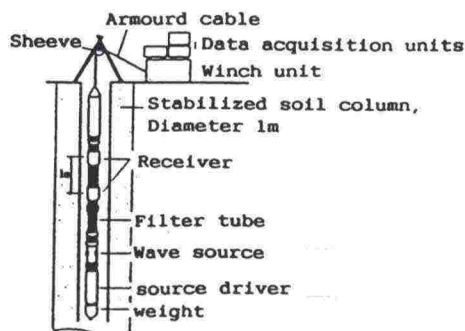
### 3.3 Seisminen luotaustekniikka (PS-logging)

Hiraide et al on tutkinut ultraäänellä ns down-hole-menetelmää (kuva 54) käyttäen leikkausaallon nopeuden ja yksiaksiaalisen puristuslujuuden välistä riippuvuutta. Kokeita suoritettiin sekä laboratoriossa että kentällä.

Hiraiden johtopäätökset olivat:

- Reikäluotaus on helppo suorittaa paikan päällä tarkasti
- Korrelaatio leikkausaallon ja yksiaksiaalisen puristuslujuuden välillä on hyvä
- Jatkuva laatutieto pilarin koko matkalta

Hiraden johtopäätökset lienevät optimistiset. Myös Nishikawa on suorittanut ultraäänimittauksia poratuista näytteistä laboratoriossa. Nishikawa painottaa, että ultraäänimittauksilla on mahdollista tutkia massan lujuutta mutta eri maalajeja koskeva lisätutkimus on tarpeen.



Kuva 54 PS-logging -laitteisto



## KOHTAAN 1.1 LIITTYVÄ KIRJALLISUUS

- Assarson, K.G. et al. 1974. Deep stabilization of soft cohesive soils. *Linden-Alimak*. Skellefteå.
- Broms, B., Boman, P., 1977. Stabilization of soil with lime columns. *Royal Institute of Technology*. Stockholm.
- Nieminen, P., 1977. Lentotuhkan ja kipsin käyttömahdollisuus ja vaikutus maalajien lujuusominaisuuksiin. *University of Turku*.
- Viitanen, H., 1977. Eri sideaineiden soveltuvuudesta maastabilointiin. *Tampere University of Technology. Building Dpt.* Tampere.
- Rathmayer, H., Leminen, K., 1980. Subsoil improvement by means of vertical drainage. Field test in Helsinki. *VTT Symposium 8. Technical Research Centre of Finland*. Espoo.
- Mitchell, J.K., 1981. Soil improvement - State-of-the-Art Report. *Proc. 10th ICSMFE*. Stockholm
- Holm, G., et al. 1981. Lime columns as foundations for light structures. *Proc. 10th ICSMFE*. Stockholm
- Kujala, K., 1982. The use of gypsum in deep stabilization (in Finnish). *Publ.42 Oulu University of Technology*. Oulu
- Eggestad, Å., 1983. Improvement of cohesive soils. State-of-the-Art Report. *Proc.8th ECSMFE*. Helsinki
- Holm, G., et al. 1983. Improving lime column strength with gypsum. *Proc.8th ECSMFE*. Helsinki
- Åhnberg, H., Holm, G. 1986. Kalkpelarmetoden. *Swedish Geotechnical Institute, Rep.31*. Linköping.
- Åhnberg, H. et al. 1995. Deep stabilization of different types of soils. *Proc. XI ECSMFE 7.167- 7.172*. Copenhagen, Danish Geotechnical Society.
- Åhnberg, H., et al. 1995. Cement och kalk för djupstabilisering av jord. *Swedish Geotechnical Institute, Rep.48*. Linköping.
- Carlsten, P., 1995. Kalk- och kalkcementpelare. *SGF Rapport 4:95*. Linköping. Swedish Geotechnical Society.
- Kukko, H., Ruohomäki, J. 1995. Savien stabilointi eri sideaineilla (Stabilization of clays with various binders. In Finnish). *VTT Research Notes 1682*. Espoo. Technical Research Centre of Finland.
- Syvästabilointiohje STO-91 (1992). *Rakennustieto Oy*. Helsinki.
- Karlstedt, P., Halkola, H. 1993. Ylijäämäsavien massastabilointi (Bulk stabilization of surplus clay. In Finnish) *City of Helsinki. Geotechnical Department. Informations 61/1993*. Helsinki

## TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005
- 5/1993 Arktinen tienrakentaminen, Kilpisjärven hankkeen yhteenveto. TIEL 3100011
- 2/1994 Routanousun mallintaminen, kirjallisuusselvitys. TIEL 3100013

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 38/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Kirjallisuusselvitys. TIEL 3200163
- 39/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. TIEL 3200164
- 40/1993 Teiden tasaisuusmittareiden vertailu; PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen. TIEL 3200165
- 41/1993 Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166
- 47/1993 Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. TIEL 3200172
- 59/1993 Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P - Virala. TIEL 3200184
- 60/1993 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä - Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 68/1993 Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 77/1993 Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201
- 81/1993 Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi, tutkimusraportti. TIEL 3200205
- 82/1993 Emulsiopäällysteiden suunnittelu ja rakentaminen. TIEL 3200206
- 4/1994 Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long-Term Pavement Performance (LTPP); Materiaalimodulin määrittäminen takaisinlaskentaohjelmalla sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit. TIEL 3200213
- 8/1994 Roudan vaikutusten mallintaminen. TIEL 3200219
- 12/1994 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1992-1993. Roudan sulamisen simulointi, pohjaveden pinnan vaikutus korkeassa lämpötilassa ja päällysteen reunan vaikutus. TIEL 3200223
- 28/1994 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Vuoden 1993 kuormituskokeet. TIEL 3200238
- 30/1994 Kallioleikkaukset. TIEL 3200240
- 45/1994 Maan routimisen termomekaaninen malli ja sen laskelmat. TIEL 3200254
- 47/1994 Masuunihiekan käyttö päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200256
- 53/1994 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, loppuraportti. TIEL 3200262
- 3/1995 Kuormituskestävyyden tavoitekriteerit. TIEL 3200281
- 15/1995 Betonipäällysteen seuranta, vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 2. TIEL 3200293
- 20/1995 Sään ja hydrologisten tekijöiden vaikutus kevätkelirikkoon. TIEL 3200298
- 30/1995 TPPT:n laatusuunnitelma. TIEL 3200308

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 43/1995 Tukitelineperustusten kantokyky. TIEL 3200319
- 44/1995 Kaltevan maanpinnan vaikutus perustusten kantokykyyn. TIEL 3200320
- 45/1995 Maanvaraisten perustusten kantokyvyn laskenta elementtimenetelmällä. TIEL 3200321
- 54/1995 Veittostensuon koerakenteen toiminta ja laadun arviointi. TIEL 3200330
- 58/1995 Kestävän kehityksen tierakenteet - ideakilpailu. TIEL 3200333
- 94/1995 Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus. TIEL 3200369
- 6/1996 Tuotannon laatu; Kuormitus ja routakestävyysrakenteet. TIEL 3200375
- 13/1996 Masuunihiekkastabilointi. TIEL 3200382
- 16/1996 Tavoitekriteerit (TPPT). TIEL 3200385
- 17/1996 Moreenin hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin (TPPT). TIEL 3200386
- 29/1996 Tien rakennekerrosmateriaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla. TIEL 3200397
- 32/1996 Häiriintymättömien maanäytteiden otto. TIEL 3200400
- 33/1996 Ödometrikoe. TIEL 3200401
- 34/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Täydentävien kuormituskokeiden tulokset, osa 1. TIEL 3200402
- 35/1996 Havaintoteiden asfalttipäällysteiden moduulit. TIEL 3200403
- 36/1996 Eriste- ja kevennysmateriaalien routakestävyys; Palaturve. TIEL 3200404
- 37/1996 Koerakennekohteiden materiaalien routakestävyys; Pohjoiset kohteet. TIEL 3200405
- 38/1996 Rakennerratkaisujen alustava suunnittelu ja kehittäminen. TIEL 3200406
- 44/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Muutosmoduulin arviointi korkearakeisilla kiviaineksilla, osa 2. TIEL 3200412
- 46/1996 LD-teräskuona tienrakennusmateriaalina. TIEL 3200414
- 70/1996 Kantavan kerroksen asfalttibetoni; Referenssimateriaalin ominaisuudet. TIEL 3200437
- 77/1996 Syvästabilointi kehittyvänä pohjavahvistusmenetelmänä; International Conference IS-Tokio '96. TIEL 3200444
- (*Geotekniikan informaatiojulkaisuja:*)
- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 23/1993 Pohjavahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150
- 39/1994 Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä. TIEL 3200248
- 42/1994 Nauhapystyöjitus. TIEL 3200251
- 67/1994 Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. TIEL 3200276
- 79/1995 Tieleikkausten pohjatutkimukset. TIEL 3200354