



Syvästabiloinnin suunnitteluohje



Syvästabiloinnin suunnitteluohje

Suunnitteluvaiheen ohjaus

ISBN 951-726-823-8
TIEH 2100008-01

Editä Oyj
Helsinki 2001

Julkaisua myy/saatavana:
Tiehallinto, julkaisumyynti
Telefaksi 0204 22 2652
S-posti julkaisumyynti@tiehallinto.fi
www.tiehallinto.fi/julk2.htm

Tiehallinto

Tie- ja liikennetekniikka
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 22 150

VASTAANOTTAJA
Tiepiirit

SÄÄDÖSPERUSTA

KORVAA/MUUTTA
Syvästabiloinnin mitoitusohje TIEL 3200465

KOHDISTUVUUS
Tiehallinto

VOIMASSA
1.1.2002-toistaiseksi

ASIASANAT
Pohjarakennus, syvästabilointi

Syvästabiloinnin suunnitteluohje, TIEH 2100008-01

Ohje käsittelee syvästabiloinnin suunnittelun ja mitoituksen. Ohjeessa on myös selostettu tuotantotekniikkaa, joka on tarkoitettu suunnittelijalle taustatiedoksi suunnitelmaa laadittaessa. Ohjeen tapaan käytetty ja Tielaitoksen selvityksiä –sarjassa julkaistu informaatiojulkaisu Syvästabiloinnin mitoitusohje TIEL 3200465 poistetaan käytöstä.

Varsinainen ohjeteksti on esitetty normaalilla palstaleveydellä. Kaapealstaisessa kursiivilla painetussa tekstissä annetaan käsiteltävästä asiasta taustatietoja ja lisäinformaatiota.

Ohjetta myy Tiehallinnon julkaisumyynti, email: julkaisumyynti@tiehallinto.fi. Se on myös kopioitavissa internetistä osoitteesta: <http://www.tiehallinto.fi/thohje/>.

Apulaisjohtaja
Tie- ja liikennetekniikka

Pauli Velhonoja

Tieinsinööri

Pentti Salo

TIEDOKSI

Hte, Hsi, Htl

Kirjasto

Rakennusteollisuus RT ry

Suomen Maarakentajien Keskusliitto SML

Suomen toimitila- ja rakennuttajaliitto RAKLI ry

Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL

Suomen Kuntaliitto

Ratahallintokeskus

VTT, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Korkeakoulut ja ammattikorkeakoulut

Helsingin kaupungin geotekninen osasto

Tie- ja geokonsultit

ESIPUHE

Ohjeen laatimista varten perustettiin työryhmä, johon ovat kuuluneet ohjeen kirjoittaja Antti Junnila Innogeo Oy:stä sekä Mikko Smura ja Jyrki Nikkinen Tieliikelaitoksesta, Leena Korkiala-Tanttu Valtion teknistä tutkimuskeskuksesta sekä Petter Sandin ja Pentti Salo Tiehallinnosta.

Ohjeluonnosta käsiteltiin seminaarissa, johon osallistui kymmenen kutsuttua syvästabiloinnin asiantuntijaa korkeakouluista, konsulttitoimistoista ja eräistä kaupungeista. Laajempi lausuntokierros järjestettiin seminaarin jälkeen. Ohje on viimeistelty työryhmässä ja tie- ja liikennetekniikkayksikössä.

Helsinki, joulukuu 2001

Tiehallinto
Tie- ja liikennetekniikka

Sisältö

1	JOHDANTO	9
1.1	Ohjeen soveltamisala	9
1.2	Ohjeen liittyminen muihin ohjeisiin	9
2	SYVÄSTABILOINTIMENETELMÄ	10
2.1	Pilaristabilointi	10
2.1.1	Tuotantotekniikan perusteet	10
2.1.2	Sideaineet	11
2.1.3	Pilarin ja maan yhteistoiminta	11
2.1.4	Pilaroinnin käyttö stabiliteetin parantamiseen	11
2.1.5	Pilaroinnin käyttö painumien rajoittamiseen	12
2.1.6	Myötäävät pilarit	12
2.1.7	Määrämittaisten pilarien käyttö	12
2.1.8	Pilarien käyttö yhtenäisinä rakenteina	12
2.2	Massasyvästabilointi	13
2.3	Stabilointia käyttäen perustettavat rakenteet	13
3	MITOITUKSEN LÄHTÖTIEDOT	14
3.1	Pohjatutkimukset	14
3.2	Stabiloidun maan mitoitusparametrien määrittäminen	15
3.3	Kuormitusotaksumat	17
3.4	Rakentamisen reunaehdot	17
4	STABILOIDUN POHJARAKENTEEN VAKAVUUS	18
4.1	Erlaiset kohteet ja vaatimukset	18
4.2	Vakavuustarkastelut	18
4.3	Seinämärakenteiden mitoitus	21
5	PILARIVÄLIN MITOITUS	22
5.1	Pilarityypit ja niiden mitoitus	22
5.2	Kimmoisan pilaroinnin painumamitoitus	23
5.3	Myötäävän pilaroinnin painumamitoitus	27
5.4	Pilaritiheyden tarkistaminen	29
5.5	Pilarien keskinäinen sijoitus	29
6	MÄÄRÄMITTAISEN STABILOINNIN MITOITUS	30
6.1	Määrämittaisten pilarien käytön edellytykset	30
6.2	Stabiliteetti ja mitoitus pilariryhmänä	30
6.3	Painuman laskenta	31
6.4	Painuma-aika ja painumanopeuden laskenta	32

7	MASSASYVÄSTABILOINNIN SUUNNITTELU	33
7.1	Massasyvästabiloidut rakenteet	33
7.2	Tutkimusten erityispiirteet	33
7.3	Massasyvästabiloinnin mitoituslaskelmat	34
8	STABILOIDUN RAKENTEEN SUUNNITTELUN YKSITYISKOHTIA	35
8.1	Stabiloinnin leveyden määrittäminen	35
8.2	Pilarien kaltevuus	35
8.3	Lujitteiden käyttö	35
8.4	Esikuormituksen käyttö	36
8.5	Siirtymärakenteet syvästabiloinnin yhteydessä	36
8.6	Ympäristövaikutukset	37
9	SYVÄSTABILOINTISUUNNITELMAN SISÄLTÖ	38
9.1	Piirustukset	38
9.2	Laatuvaatimukset ja työselitykset	38
10	KIRJALLISUUS	39
11	LIITTEET	41

1 JOHDANTO

1.1 Ohjeen soveltamisala

Tässä julkaisussa esitetään vaatimukset ja ohjeet tiehankkeiden syvästabilointien suunnittelulle ja mitoitukselle.

Tässä ohjeessa käsitellään ns. kuivamenetelmällä tehtävä pilaristabilointi sekä massasyvästabilointi. Tässä ohjeessa käsitellään pilareita, joiden

- maksimileikkauslujuus on 200 kPa
- halkaisija on 500-800 mm
- maksimipituus on 20 m.

Tätä ohjetta voidaan soveltaa käytettäessä sideaineena kalkkia tai kalkkisementtiä sekä myös muita sideaineita edellyttäen, että niistä tunnetaan:

- seoksen osa-aineet, jotta voidaan arvioida työturvallisuustekijät sekä ympäristökelpoisuus
- lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet (erityisesti mahdollinen murtumisen hauraus)
- työtekniinen kelpoisuus, joka on todettu työmaaolosuhteissa

Ohjeessa esiintyvät keskeiset termit ovat:

Kimmoisa pilari	Pilarikuorma ei ylitä myötörajaa.
Myötäävä pilari	Pilarikuorma ylittää myötörajan ja rakenne painuu rakennusaikana.
Määrämittainen pilari	Pilarien alapuolelle jätetään painuvia maakerroksia ja rakenne painuu myös käyttöaikana.

1.2 Ohjeen liittyminen muihin ohjeisiin

Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Perustus- ja vahvistamistyöt. Tiehallinto. Helsinki 2001. TIEH 2200002-01.

Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. Tiehallinto. Helsinki 2001. TIEH 2100002-01.

Tiesuunnitelman pohjatutkimukset. Tielaitos. Helsinki 1998. TIEL 2180003.

Teiden pehmeikkötutkimukset. Tielaitos. Helsinki 1998. TIEL 3200520.

2 SYVÄSTABILOINTIMENETELMÄ

2.1 Pilaristabilointi

2.1.1 Tuotantotekniikan perusteet

Pilaristabiloinnissa pilarointikoneen sekoitinkärki upotetaan pilarin suunnitellun alapään tasoon ja sideaineen syöttö ja pilarin sekoitus aloitetaan yleensä sekoitinta ylös vedettäessä. Suomessa on käytetty lähes yksinomaan kuivamenetelmää, jossa jauhemainen sideaine syötetään paineilmaa käyttäen. Mm. Japanissa yleinen märkämenetelmä on Suomessa ainakin toistaiseksi rajoittunut muutamaan kokeiluun.

Pilarin halkaisijana on käytetty 500-800 mm. Yleisimpiä ovat 1990-luvun alkupuolelta asti olleet 600-700 mm pilarit. Mitä suurempi pilarin halkaisija on, sitä vaikeammaksi voi tulla kovan kuivakuorikerroksen tai muiden lujien maakerrosten läpäisy. Suurilla pilarihalkaisijoilla saattaa myös tulla ongelmalliseksi saada sideaine jakautumaan tasaisesti koko pilarin poikkileikkausalueelle. Pilarien maksimipituus nykyisellä kalustolla on noin 18-20 m, mutta maksimia lähenlevät pilaripituudet ovat harvoin taloudellisia.

Sideaineen sekoituksella on suuri merkitys pilarin lujuuteen ja tasa-laatusuuteen. Oleellisimpia asioita ovat sideaineen syötön tasaisuus ja hallittavuus, riittävän tehokas sekoitustyö sekä paineilman käytön minimointi.

Sideaineen syöttömäärä rekisteröidään nykyisin yleensä 0,2 metrin mittaista pilarinosaa kohden. Mittaus perustuu yleensä säiliön massan vähenemiseen sideainetta syötettäessä, mikä asettaa rajoitukset todelliselle mittaustarkkuudelle. Tyypillisiä nykyhetken realistisia vaatimuksia sideaineen syöttötarkkuudelle ovat 5 % poikkeama pilarikohtaisesti ja 8-10 % poikkeama pilarimetrikohtaisesti.

Sideaineen syöttömäärää pystytään säätämään syvyysuunnassa, mutta tätä mahdollisuutta on toistaiseksi käytetty harvoin.

Sekoitustyön tehokkuus (terätasokierrosta/pilarimetri) on riippuvainen terän noususta kierrosta kohti ja sekoittimen terätasomäärästä kaavan 1 mukaisesti.

sekoitustyön tehokkuus = n/nousu kierrosta kohti (1)

n on terätasojen määrä sekoitinkärjessä (nykyisin tavallisesti 2-4) terän nousu/kierros (nykyisin yleensä 8-15 mm/r)

Pilarikoneen terää maahan upotettaessa ilmaa työnnetään suuttimista ulos niiden tukkeutumisen estämiseksi. Tarvittavaa ilmamäärää voidaan pienentää mm. terän nopealla upottamisella sekä mahdollisesti myös kehittämällä suljettavat suuttimet. Sekoitustyön aikana syöttöpaine pyritään pitämään siinä minimiarvossa, jolla sideaine juoksee häiriöttä. Suuret pilarointisyvyydet lisäävät tarvittavaa painetta. Työssä noudatettava paine määritetään ennen varsinaisen työn aloitusta. Pilarin syötetyn ilman poistumista voidaan edistää käyttämällä nelikulmaista sekoittimen tankoa.

2.1.2 Sideaineet

Pelkkä poltettu kalkki oli 1980-luvun loppupuolelle asti selvästi yleisin sideaine. Kalkin hyviä ominaisuuksia on hyvä diffuntoituvuus, joka saattaa jossain määrin kompensoida epätasaista sekoitustyötä, sekä kalkkipilarien sitkeysominaisuudet ja lujittumisen jatkuminen vielä käyttöaikana. Huonoja puolia ovat yleensä melko matalaksi jäävä lujuus sekä soveltumattomuus humuspitoisten savien stabilointiin.

Pelkällä sementillä voidaan laboratorio-olosuhteissa saavuttaa erittäin hyviä lujuuksia, mutta maastossa tehtävän sekoitustyön epätasaisuus aiheuttaa maastolujuuksien jäämisen yleensä selvästi pienemmiksi. Pilarit ovat yleensä hauraita ja lähinnä puristusrasituksia kestäviä.

Yleisin sideaine on 1990-luvun alusta asti ollut kalkin ja sementin seos, jota käytettäessä saadaan useimmiten parempi lujuus kuin pelkällä kalkilla ja hyvä lujittuminen myös humuspitoisissa savikerroksissa, ainakin riittäviä sideainemääriä käyttäen. Lisäksi kalkin mukanaolo estää edellä mainittuja pelkän sementin epäedullisia vaikutuksia. Yleisin kalkin ja sementin seossuhde on 1:1, mutta nykyisin muutkin sekoitussuhteet ovat työteknisesti mahdollisia.

On myös käytetty uusia sideaineita, joissa em. ainesten lisäksi voi olla mm. jauhattua masuunikuonaa, lentotuhkaa ym. teollisuuden sivutuotteita. Ennestään tuntemattomalla sideaineseoksella saavutettavan lujuuden määritys ja sideaineen työteknisen kelpoisuuden selvittäminen vaativat maastossa tehtäviä koestabilointeja. Lisäksi sideaineen ympäristökelpoisuus on selvitettävä.

2.1.3 Pilarin ja maan yhteistoiminta

Pilaroidussa maassa jännitykset jakautuvat pilareille ja pilareita ympäröivälle maalle muodonmuutosmoduulien suuruudesta riippuvalla tavalla. Pilaroinnin mielekäs toimintatapa saavutetaan, kun ei pyritä kohtuuttoman suuriin pilarilujuuksiin hyvin pehmeässä pohjamaassa. Pilari on lujitettua maata eikä kantava rakenne.

2.1.4 Pilaroinnin käyttö stabiliteetin parantamiseen

Stabilointi lisää maapohjan lujuutta, sillä pilarien lujuus on yleensä 5-15-kertainen alkuperäisen pehmeän pohjamaan lujuuteen nähden. Koska pilarien laatu vaihtelee ja koska pilarit kestävät varsin heikosti muita kuin puristusrasituksia, stabiloinnin vaikutus stabiliteettiin voi kuitenkin jäädä tavoiteltua heikommaksi.

Stabiloinnilla voidaan varsin hyvin parantaa tasaiselle maalle tehtävän penkereen vakavuutta, kun varmuus sortumista vastaan on ilman stabilointiakin suurempi kuin 1,0-1,2. Jos alkutilanteen vakavuus on huonompi, maanpinta on kalteva taikka penkereen sivulle tehdään kaivanto, stabiloinnin tehokkuus on huonompi ja lopputulos on herkempi stabiloinnin epäonnistumiselle. Tällaisissa tapauksissa pilareista yleensä muodostetaan yhtenäisiä seinämärakenteita, jotka paremmin kestävät sivusuuntaisia kuormia.

Käytettäessä stabilointia luiskien vahvistamiseen erillisiä pilareita ei käytetä, vaan pilareista muodostetaan aina seinämärakenteita.

2.1.5 Pilaroinnin käyttö painumien rajoittamiseen

Pilarointia käytetään eniten penkereiden painumien rajoittamiseen, jolloin samalla stabiliteetti paranee huomattavasti. Käytettäessä kimmoisia pilareita, jolloin pilarien myötörajaa ei ylitetä, penkereen painumat rajoittuvat rakennusaikana lähes välittömästi tapahtuvaan pieneen painumaan. Myös silloin, kun pilarit mitoitetaan myötäämään, penkereen painumat pienenevät selvästi ja ne tapahtuvat yleensä rakennusaikana muutamassa kuukaudessa.

2.1.6 Myötäävät pilarit

*Jos pilarien myötökuorma (noin 70 % murtokuormasta) ylittyy, oletetaan ylijäävän kuormituksen menevän pilareita ympäröivän maan kannettavaksi ja pilarien kantavan jatkuvasti myötökuorman suuruisen kuorman, ks. kuva 10. Pilareita ympäröivälle maalle tuleva kuormitus aiheuttaa konsolidaatiopainumaa, jonka pilarien pysty-
ojamainen vaikutus nopeuttaa ja painuma tapahtuu yleensä muutamassa kuukaudessa.*

Myötäävien pilarien käyttö edellyttää, että pilarien jäännöslujuus on vähintään oletetun myötörajan suuruinen ja että pilarien vedenläpäisevyys on riittävän suuri pysty-
ojamaisen vaikutuksen aikaansaamiseksi. Näiden vaatimusten voidaan katsoa täyttyvän ainakin käytettäessä sideaineena kalkkia tai kalkkisementtiä, josta vähintään puolet on kalkkia. Myötääviä pilareita on käytetty Ruotsissa laajasti, mutta Suomessa varsin harvoin.

2.1.7 Määrämittaisten pilarien käyttö

Määrämittaisilla pilareilla tarkoitetaan pilareita, joita ei uloteta painuvan maakerroksen alarajaan, vaan joiden alapuolelle jätettävissä maakerroksissa harkitusti sallitaan penkereen käyttövaiheen aikaisia painumia.

Määrämittaisten pilarien painumien laskenta on vaativaa laskentaotaksumien epätarkkuuden takia ja vaatii myös tavallista perusteellisempia pohjatutkimuksia painumaominaisuuksiltaan ratkaisevissa savikerrostumien alaosissa. Toisaalta jälkipainumat tapahtuvat syvällä ja paksu stabiloitu maakerros tasoittaa niiden heijastumista tienpintaan epätasaisuuksina. Siirtymärakenteiden suunnitteluun on näissä tapauksissa kiinnitettävä erityistä huomioita.

2.1.8 Pilarien käyttö yhtenäisinä rakenteina

Kun stabiloinnilta vaaditaan erityisen hyvää kestäkykyä vinoja kuormituksia vastaan, pilarit tehdään toisiinsa kiinni yhtenäisiksi rakenteiksi, jotka voivat olla seinämäisiä, blokkimaisia tai kaarevia. Pilarit voidaan tehdä toisiaan leikkaavina, jos stabilointityössä ei ole liian pitkiä taukoja.

2.2 Massasyvästabilointi

Massasyvästabiloinnissa sekoituskoneen kärkeä liikutellaan stabiloitavassa maakerroksessa sekä pysty- että vaakasuunnassa. Stabilointisyvyyden käytännöllinen raja on noin 5 metriä. Sekoitustyön tasa-laatuisuuden varmistaminen vaatii vielä kehittämistä. Massasyvästabilointia voidaan käyttää myös turpeessa.

2.3 Stabilointia käyttäen perustettavat rakenteet

Stabiloinnin pääasiallisia käyttökohteita ovat:

- penkereiden perustaminen*
- putkijohtojen perustaminen*
- leikkauspohjan vahvistaminen*

Stabiloinnin käyttökohteista selvästi yleisin on tie- ja katupenkereiden perustaminen. Perinteisesti on etenkin alle 2,5 m korkeita penkereitä on perustettu kimmoisia pilareita käyttäen. Kun käytettävät pilarilujukset ovat kasvaneet, menetelmän käyttöalue on laajentunut korkeampiinkin penkereisiin. Pilaroinnilla parannetaan penkereen stabiliteettia ja yleensä käytännöllisesti katsoen estetään käyttövaiheen aikaiset painumat. Myötääviä pilareita, määrämittäisiä pilareita taikka pilareita, jotka ovat tässä ohjeessa esitettyä lujempia, on käytetty muutamissa kohteissa.

Pilarointia käytetään usein putkijohtojen perustamiseen sekä nauhamaisena perustusrakenteena että muuta tarkoitusta varten tehtävän pilarointikentän osana.

Pilarointia lyhyillä (esimerkiksi 2-3 m) pilareilla käytetään joskus pehmeän leikkauspohjan vahvistamiseen. Syyt ovat lähinnä työtekniset ja pilaroinnilla rajoitetaan pohjan häiriintymistä kaivutyön ja työkoneiden liikkumisen vaikutuksesta.

Luiskien ja kaivantojen vahvistamisessa pilarointi on osoittautunut epävarmaksi menetelmäksi, sillä luiskassa liukupinnat hakeutuvat stabiloinnin huonoimmin onnistuneisiin kohtiin aivan eri tavalla kuin penkereen alla olevassa maapohjassa, jossa satunnaiset laadunvaihtelut aiheuttavat stabiliteetin kannalta vaaratilanteita korkeintaan sivukaltevassa maastossa. Luiskastabilointien mitoitustapoja on muutettu epäonnistumisista saatujen kokemusten pohjalta ja riittävän varmaksi mitoitettu luiskastabilointi on usein taloudellisempaa korvata jollain muulla menetelmällä. Nykykäsityksen mukaan luiskissa ei tule käyttää yksittäisiä pilareita.

Pilarointia voidaan käyttää kevyiden kantavien rakenteiden perustamiseen. Tällaisia ovat alikulkukäytävät, porttaaliperustukset, pumppaamot jne. Yleensä pilaroinnille perustettavan rakenteen tulee olla staattisesti määrätty.

3 MITOITUKSEN LÄHTÖTIEDOT

3.1 Pohjatutkimukset

Pilarien tavoitetason määrittämiseen tarvittavat pohjatutkimukset vaihtelevat huomattavasti mm. seuraavissa eri tapauksissa:

- Pilarit ulotetaan selväpiirteiseen maakerrosrajaan (esimerkiksi savi/moreeni).
- Pilarit ulotetaan maakerrosrajaan, jonka toteaminen rakentamisvaiheessa on vaikeampaa (esimerkiksi savi/siltti).
- Pilarit tehdään määrämittäisinä ja niiden alle jää painuvaa maata.

Kun pilarit ulotetaan selväpiirteiseen ja toteutusvaiheessa selkeästi todettavaan maalajirajaan (esimerkiksi saven ja moreenin rajaan), pilaripituuden määrittämiseen riittävät painokairaukset. Jos pilarien alle jätetään jokseenkin painumatonta silttiä tai ylikonsolidoitunutta savea, pilarien tavoitetaso on määritettävä tiheämmin ja tarkemmin tutkimuksin, sillä ko. maakerrosraja ei ole pilarointikoneen sekoitinkärjellä todettavissa. Painokairausten tueksi pilarien alapään tason määrittämisessä tarvitaan tällöin myös näytteitä ja/tai CPTU-kairauksia.

Kun pilareiden alle jätetään painuvia maakerroksia, ko. kerrosten maalajit ja niiden vaihtelut on tutkittava sekä CPTU-kairauksin että näytteenotolla.

Stabiloitavien maakerrosten rakeisuus, humuspitoisuus, vesipitoisuus ja hienousluku on selvitettävä, jotta voidaan:

- alustavasti valikoida sopivimpia sideaineita
- valita edustavat kohdat stabiloinnin laboratorikokeille ja maastossa tehtäville koestabiloinneille
- arvioida stabiloinnin laboratorikokeiden ja maastossa tehtävien koestabilointien alueellista edustavuutta.

Maapohjan lujuusominaisuudet on selvitettävä.

Maapohjan lujuusominaisuudet määritetään useimmiten siipikairauksin ja erikoistapauksissa kolmiaksaalikokein.

Maapohjan painumaominaisuudet on selvitettävä ödometrikokein, joiden määräksi suositellaan:

- 1 piste/100-200 m tietä, kun kimmoiset pilarit ulotetaan painuvien maakerrosten alarajaan
- 1 piste/60-100 m tietä, kun pilarien suunnitellaan myötäävän
- 1 piste/40-80 m tietä, kun pilarit suunnitellaan määrämittäisiksi ja ödometrikokeet keskitetään tällöin painuvien kerrosten alaosaan.

Erityisesti määrämittäisiä pilareita varten tehdään mieluiten portaittaisia ödometrikokeita, jotta esikonsolidaatiojännitys □c saadaan mahdollisimman luotettavasti määritetyksi sekä myös sekundääripainumaparametrit voidaan määrittää.

Ödometrikokeiden tueksi ja niiden tarvittavaa määrää pienentämään suositellaan varsinkin määrämittäisiä pilarointeja varten tehtäviksi sähkövastusluotauksia, joilla voidaan määrittää savikerrostuman jatkuva vesipitoisuusprofiili.

Pohjavedenpinta ja sen vaihtelut on selvitettävä.

Stabilointityötä mahdollisesti vaikeuttavat täytemaakerrokset on tutkittava kairauksin ja tarvittaessa koekuopin.

3.2 Stabiloidun maan mitoituspärametriä määrittäminen

Stabiloidun maan mitoituspärametriä voidaan määrittää:

- maastossa tehtävällä koestabiloinnilla
- laboratoriokokeilla
- samassa geologisessa muodostumassa tehtyjen aikaisempien stabilointien toteutumätiedoista.

Sekä maastossa tehtävien koestabilointien että laboratoriokokeiden ohjelmointi aloitetaan määrittämällä selvitettävien asioiden tärkeysjärjestys ja kunkin selvittämiseen tarvittava vaihtoehtojen määrä esimerkiksi seuraavaan tapaan:

- sideaineen valinta
- sideaineen määrä
- työtekniset detaljit, kuten esimerkiksi sekoitinkärjen nostonopeus
- lujittumisaika.

Koepilarin halkaisija ja muut tutkittavan asian kannalta vähäiset tekijät pidetään kokeessa vakioina. Oleellista on myös jo alkuvaiheessa valita koestusmenetelmät ja havaintojen tarvittava määrä, jotta hajonan vaikutus ei pilaa tulosten tulkintaa. Yleensä samanlaisiksi tarkoitetuista pilareista tulisi koestaa samalla tavalla vähintään neljä kappaletta. Laboratoriossa voi kolme rinnakkaisnäytettä olla riittävä määrä. Varsinkin maastossa tehtävässä koestabiloinnissa suurin osa kustannuksista syntyy vasta koestusvaiheessa eikä koepilarien määrää pidä mitoittaa liian niukaksi.

Stabiloinnin lujuustavoite arvioidaan ainakin suuntaa-antavasti jo stabilointikokeiden ohjelmointivaiheessa. Yleensä stabiloidun maan leikkauslujuudeksi pitää saada vähintään noin 70 kPa, jotta stabilointiratkaisu olisi taloudellisesti kilpailukykyinen. Matalien (alle 2,5-3 m) penkereiden perustamisessa leikkauslujuustavoite on useimmiten noin 80-120 kPa ja korkeammilla penkereillä 120-200 kPa. Kokeiltavat sideaineet ja sideainemäärät valitaan kokemukseräisesti alustavan lujuustavoitteen ja maakerrosten indeksiominaisuuksien (rakeisuus, vesipitoisuus, humuspitoisuus, rikkipitoisuus) mukaan. Maastossa tehtävien koestabilointien ohjelmoinnissa käytetään hyväksi stabiloitujen maanäytteiden laboratoriokokeiden tuloksia, mikä helpottaa ohjelmointia.

Maastossa tehtävät koepilarit koestetaan yleensä useammalla eri menetelmällä. Jos käytetään vain yhtä menetelmää, on sen oltava pilarikairaus. Pila-reista otettavat näytteet antavat usein harhaanjohtavan kuvan pilarin lujuudesta: joko liian huonon tai liian hyvän. Näytteenottoa voidaan näin ollen käyttää vain muita menetelmiä täydentävänä tietona.

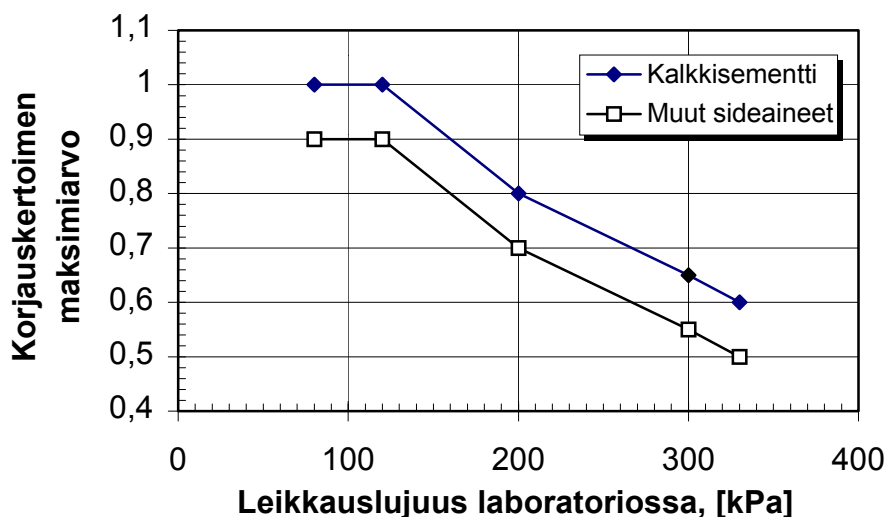
Laboratoriossa tehtävistä koekappaleista määritetään aina vähintään puristuslujuus sekä muodonmuutosmoduuli E. Merkittävässä kohteissa on suositeltavaa määrittää stabiloidun maan lujuusparametrit ja muodonmuutosominaisuudet kolmiakσιαalikokeilla, jotka jäljittelevät maassa vallitsevaa kuormitusilannetta sekä pilarissa tapahtuvia muodonmuutoksia paremmin kuin yksiakσιαalinen puristuskoe.

Luotettavimmat lähtötiedot pilarien lujuuden osalta saadaan hankekohtaisella maastossa tehtävällä koestabiloinnilla. Tämä on usein taloudellisesti edullista pienehköissäkin stabilointikohteissa.

Laboratoriokokeilla saatu leikkauslujuuden arvo tulee kertoa korjauskertoimella, jonka maksimi-arvot on esitetty kuvassa 1.

Laboratoriolujuutta voidaan sellaisenaan ilman korjauskerrointa käyttää mitoituslujuutena vain silloin, kun:

- pilarien leikkauslujuustavoite on alle 120 kPa
- ja sideaineena käytetään kalkkisementtiä
- ja sideainemäärää korotetaan 10 % laboratorioissa käytetystä.



Kuva 1. Laboratoriolujuuden korjauskertoimen maksimi-arvo.

Tärkeää on varmistaa koestabiloinnin edustavuus sikäli, ettei tuloksia käytetä stabiloinnin mitoitukseen kohdilla, joissa maakerrosten humuspitoisuus on suurempi kuin koekohdalla.

3.3 Kuormitusotaksumat

Maakerrosten tilavuuspainot määritetään ohjeen Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet TIEH 2100002-01 mukaisesti.

Liikennekuormana käytetään vakavuustarkasteluissa 10 kPa. Kimmoisten pilarien myötörajatilataarkastelussa käytetään 10 kPa liikennekuormaa, jonka oletetaan siirtyvän kokonaisuudessaan pilareille. Painumamitoituksessa liikennekuormaa ei oteta huomioon minkään pilarityypin osalta.

Penkereen massa vaikuttaa kuormana stabiloituun pohjamaahan aina täysimääräisesti. Penkereestä pohjamaahan kohdistuvaa kuormaa ei saa vähentää, vaikka luonnollista maanpintaa leikattaisiinkin tai olemassa oleva painumaton penger poistettaisiin ennen stabilointia. Määritettäessä pengerkuormituksen jakautumista pilareille ja maalle käytetään maalle ylikonsolidoituneen alueen muodonmuutosmoduuleja, jos maalle tuleva kuormituksenosa on pienempi kuin poistettavan maakerroksen paino ja poistettava maakerros on ehtinyt konsolidoida maapohjan.

Pohjavedenpinnan mahdollinen aleneminen on otettava huomioon kuormituksenä. Maapohjalle siirtyvän kuormaosan kautta myös pilariin kohdistuva sivutuki lisääntyy ja tämä voidaan ottaa huomioon pilarin kapasiteettia laskehtaessa, ks. kaava 11.

3.4 Rakentamisen reunaehdot

Stabilointi mitoitetaan useimmiten 1-3 kuukauden lujittumisajalle. Jos lujittumisaika valitaan 1 kuukauden suuruusluokkaan ja pilarit mitoitetaan kimmoisina, ratkaisu ei ole rakentamisajan tarpeen kannalta paljonkaan pengerpaalutusta hitaampi. Hieman pidempi lujittumisaika antaa jonkin verran paremmat mitoituslujuudet ja on useimmiten taloudellisesti edullista.

Jos stabilointi mitoitetaan vakavuutta parantamaan, on tarkistettava, että pilarien välisen saven lujuus on ehtinyt palautua työnaikaisen häiriintymisen jälkeen. Tämä saattaa ainakin joissain tapauksissa viedä enemmän aikaa kuin pilarien lujittuminen.

Jos stabilointi mitoitetaan myötääväksi, penkereelle tulee varata vähintään 3-6 kuukautta painuma-aikaa täydessä korkeudessaan ennen päällystämistä.

Laajoissa ja ajallisesti eri jaksoihin jakautuvissa stabilointitöissä voi olla mahdollista tarkistaa mitoitus ensiksi tehtyjen stabilointien toteutumatietojen pohjalta.

4 STABILOIDUN POHJARAKENTEEN VAKAVUUS

4.1 Erilaiset kohteet ja vaatimukset

Kaikissa stabilointikohteissa on tarkistettava maarakenteen vakavuus sekä ilman stabilointia että stabilointi huomioonottaen. Ensin mainittu laskelma vaikuttaa siihen, missä määrin stabiliteetti on merkitsevä tekijä stabiloinnin mitoituksessa. Vakavuus ilman stabilointia lasketaan yleensä ympyräliukupintamenetelmällä ja laskelmassa otetaan huomioon penkereen tai leikkauksen muoto mahdollisine vastapenkereineen ja kevennysleikkauksineen sekä mahdolliset pengerkevennykset tai massanvaihdot. Esimerkiksi geovahvisteet jätetään tässä tarkastelussa huomiotta.

Liikennekuormana käytetään vakavuustarkasteluissa yleensä 10 kPa. Erikseen harkittaessa käytetään suurempia kuormituksia esimerkiksi raskaiden kuljetusten väylillä taikka työnaikaisissa tilanteissa, kun käytetään raskaita työkoneita.

Vakavuus ilman stabilointia vaikuttaa siihen, kuinka pilarien ja maan voidaan olettaa toimivan yhdessä.

Pilarit on asetettava yhtenäisiksi luiskaa vastaan kohtisuoriksi rakenteiksi:

- kun varmuusluku on alle 1,0 ja kysymyksessä on penger tasaisessa maastossa
- kun varmuusluku on alle 1,2 ja kysymyksessä on penkereen ja kaivantoluiskan (esimerkiksi yli 1 m syvän ojan) yhdistelmä taikka penger kaltevassa (yli 1:20) maastossa
- kun kysymyksessä on kaivanto- tai leikkausluiska

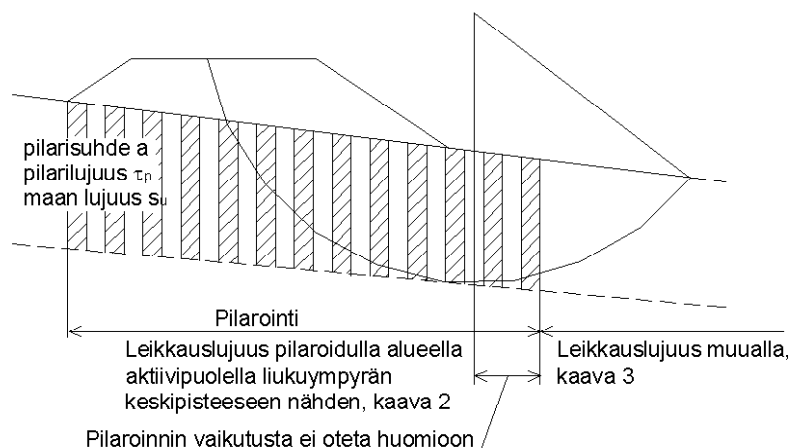
4.2 Vakavuustarkastelut

Varmuusluvun stabiloidun rakenteen sortumaa vastaan on oltava vähintään 1,5. Varmuusluvun on oltava vähintään 1,8 siellä, missä stabiloitu rakenne rajautuu siltaan, tukimuriin tms. rakenteeseen, johon ei saa aiheutua kuormituksia maamassojen liikkeestä. Vaatimukset ovat Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteiden TIEH 2100002-01 mukaiset. Jos maakerrosten humuspitoisuus ylittää 6 %, em. varmuusluvut eivät aina varmista riittävää siirtymättömyyttä, vaan varmuusvaatimus on tarkasteltava erikseen.

Stabiloidun rakenteen vakavuustarkasteluissa otetaan huomioon pilarien sijainti liukuympyrän keskipisteeseen nähden, sillä liukupinnan passiivipuolella oleville pilareille tulee lähinnä sivusuuntaisia kuormia, joita pilarin kaltainen hauras materiaali varsin heikosti kestää.

Yksinkertaisin vyöhykejakotapa on keskimääräiseen leikkauslujuuteen perustuva menetelmä sillä korjauksella, että kaikkien liukuympyrän keskipisteeseen nähden passiivipuolella olevien pilareiden vaikutus jätetään huomiotta, ks. kuva 2.

Laskelmassa huomioonotettavan pilaroidun vyöhykkeen leveys vaihtelee liukupintaakohtaisesti mutta suuntaa-antava mitoitus kannattaa tehdä aluksi ottaen huomioon koko pilarointi.



Kuva 2. Vakavuuslaskenta leikkauslujuuden painotetun keskiarvon mukaisella menetelmällä sillä korjauksella, että passiivipuolen pilarien vaikutusta ei oteta huomioon.

Maan keskimääräinen leikkauslujuus pilaroidulla alueella aktiivipuolella liukuympyrän keskipisteeseen nähden:

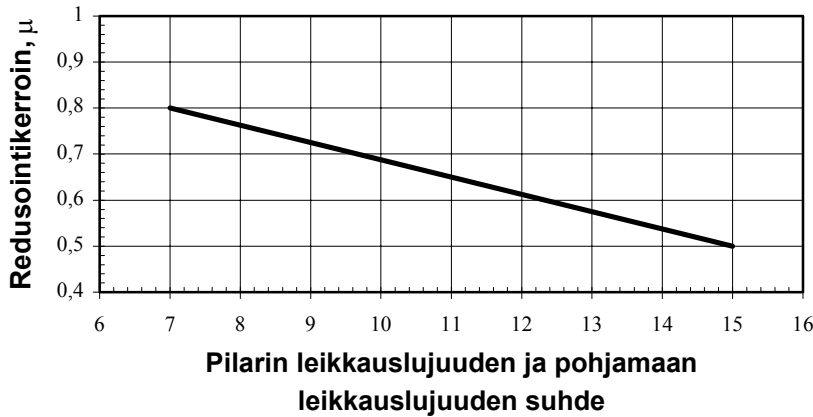
$$s_{ua} = a \cdot \tau_{pil} + (1 - a) \cdot \mu \cdot s_u \quad (2)$$

- s_{ua} pilaroidun maan keskimääräinen leikkauslujuus aktiivipuolella
- a pilarisuhde, ks. kaava 5
- τ_{pil} pilarin leikkauslujuus
- s_u pohjamaan leikkauslujuus
- μ redusointikerroin, ks. kuva 3 (lisäksi siipikairauslujuuden mahdollinen redusointi W_L :n perusteella)

Maan leikkauslujuus pilaroimattomalla alueella sekä pilaroidun vyöhykkeen passiiviosalla:

$$s_{up} = \mu \cdot s_u \quad (3)$$

- s_{up} maan leikkauslujuus pilaroimattomalla alueella ja passiivipuolella
- s_u pohjamaan leikkauslujuus
- μ redusointikerroin, ks. kuva 3



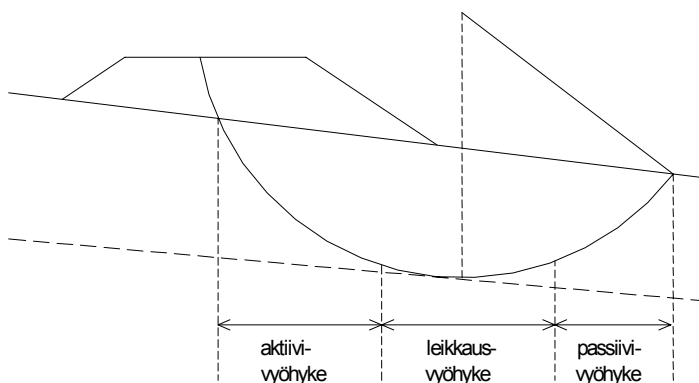
Kuva 3. Kuvassa 2 ja kaavoissa 2-3 esitetyn redusointikertoimen μ riippuvuus pilarin ja pohjamaan leikkauslujuuksien suhteesta. Tämän lisäksi tehdään siipikairalajuuden mahdollinen redusointi juoksurajan wL (tai hienousluvun F) perusteella.

Tarkempi vyöhykejako on seuraavassa, varsinkin Ruotsissa käytetyssä menetelmässä, ks. kuva 4:

- Pilarin leikkauslujuus lasketaan $c'\phi'$ -menetelmällä.
- Pilarin koheesion suurin mahdollinen ominaisarvo on 100 kPa ja se kerrotaan aktiivivyöhykkeessä kertoimella 0,3, leikkausvyöhykkeessä kertoimella 0,1 ja passiivivyöhykkeessä kertoimella 0.

Pilarin koheesion ominaisarvoksi voidaan valita esimerkiksi laboratoriokokein tai kairauksin määritetty suljetun leikkauslujuuden arvo.

- Pilarin kitkakulmana voidaan käyttää kalkkipilareilla 30° ja kalkkisementtipilareilla 35° .
- Stabiiloimattomalle maalle käytetään normaaleja $c'\phi'$ -arvoja.
- Laskelmissa käytettävät huokosvedenpaineet määritetään kulloisenkin kuormitustilanteen mukaisesti.

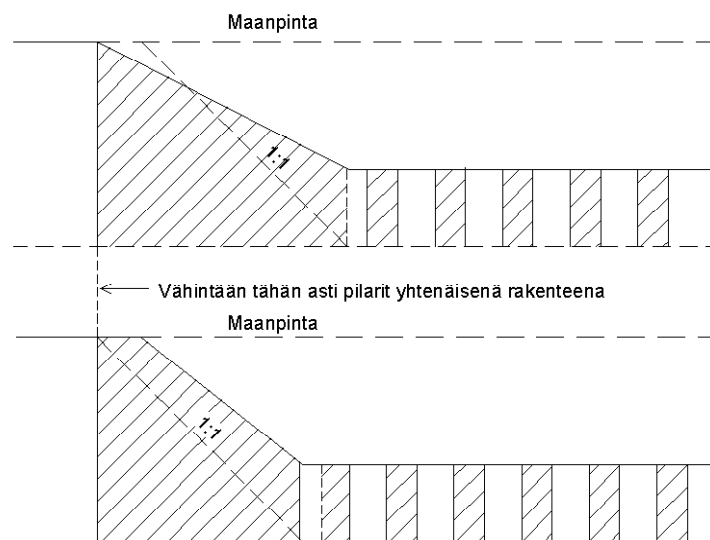


Kuva 4. Ruotsissa käytetty /Björkman, Ryding/ vyöhykejako vakavuuslaskelmissa. Aktiivivyöhykkeessä pilareihin kohdistuu lähinnä puristusta, leikkausvyöhykkeessä leikkausta ja passiivivyöhykkeessä vetoa. Vyöhykkeiden rajat riippuvat jonkin verran penkereen geometriasta ja maakerrosrakenteesta.

4.3 Seinämärakenteiden mitoitus

Kun pilareista muodostetaan yhtenäisiä luiskaa vastaan kohtisuoria seinämärakenteita, niiden vakavuusmitoituksessa voidaan toisissaan kiinni oleville pilareille käyttää täyttä lujutta myös passiivipuolella: Tällöin ei kuitenkaan maan leikkauslujuutta oteta huomioon.

Seinämärakenteiden tarvittava minimilaajuus määritetään kuvan 5 mukaan.



Kuva 5. Pilareista muodostettavien yhtenäisten rakenteiden vähimmäislaajuusvaatimuksia kaivanto- tai leikkausluiskatapauksissa.

5 PILARIVÄLIN MITOITUS

5.1 Pilarityypit ja niiden mitoitus

Pilarien mitoituksessa erotetaan kaksi perustapausta:

- kimmoisa pilari
- myötäävä pilari

Sekä kimmoisalla että myötäävällä pilarilla kuormitus jakautuu pilarin ja maan välillä niiden muodonmuutosominaisuuksien suhteessa ja maan antama sivutuki lisää pilarin kestävyyttä puristusmurtoa vastaan.

Erona kimmoisan ja myötäävän pilarin mitoituksessa on:

- *Kimmoisalle pilarille tuleva kuormitus pidetään myötörajan alapuolella. Tällöin pilari kantaa suurimman osan kuormasta ja rakenne on käytännöllisesti katsoen painumaton. Jos kimmoisen pilarin myötöraja ylitettäisiin, pilarin kuorma kasvaisi ja pilari käyttäytyisi plastisesti. Kimmoisen pilarin tapauksessa tätä ei voida sallia.*
- *Myötäävän pilarin kuormituksen sallitaan nousevan myötörajan ja kun kuormaa lisätään, oletetaan ylimenevän kuormituksen oletetaan menevän maan kannettavaksi ja pilarikuorman pysyvän myötökuorman suuruisena. Tällöin rakenne painuu ja pilarien pystyjojamainen vaikutus nopeuttaa painumaa.*

Pilarin myötörajaksi oletetaan enintään 70 % murtokuormasta. Myötörajolettamus perustuu toisaalta kuormitus-muodonmuutos-käyrän muotoon, joka on materiaalikohtainen, ja toisaalta sisältää tietyn varmuuden sitä vastaan, että yksittäinenkään pilari ei murtuisi.

Kimmoiselle pilarille asetettavat vaatimukset ovat:

- Pilarin lujuus ei ylitä 15-kertaista pohjamaan lujuutta. Tällöin tarkastellaan pystysuunnassa 2 m matkalla laskettua lujuuden keskiarvoa.
- Penkereen vakavuus ilman pilarointia tarkistetaan ja pilarien mahdollinen asettaminen yhtenäisiksi rakenteiksi tarkistetaan kohdan 4.1 mukaan.
- Sideaine on kalkkisementtiä tai muuta ominaisuuksiltaan tunnettua, ks. kohta 1.1.

Teoreettisesti oikeampaa olisi tarkastella pilarin ja maan lujuussuhteen sijasta muodonmuutosmoduulien suhdetta, mutta molempien moduulien määrittämisessä on epätarkkuuksia ja tulkintavaikeuksia, joten käytännön suunnittelussa lujuus ovat käyttökelpoisempi.

Myötävälle pilarille asetettavat vaatimukset ovat:

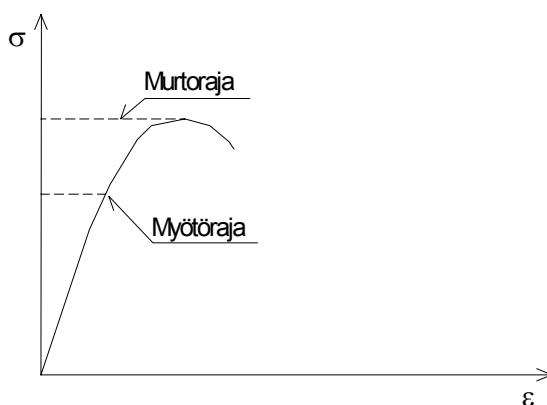
- Sideaineena käytetään kalkkia tai kalkkisementtiä, jossa kalkin osuus on vähintään 50 %, tai sideaineella osoitetaan olevan vastaavat ominaisuudet, mitä tulee jäännöslujuuteen ja pilarin vedenjohtavuuteen.
- Pilarin lujuus ei ylitä 10-kertaista pohjamaan lujuutta. Tällöin tarkastellaan pystysuunnassa 2 m matkalla laskettua lujuuden keskiarvoa.
- Penkereen varmuus sortumaa vastaan ilman pilarien vaikutusta on riittävä (yli 1,0-1,2 kohdan 4.1 mukaan), jotta pilareita ei tarvitse asettaa yhtenäisiksi rakenteiksi.
- Laskettu painuma ei yhdessäkään geoteknisessä kerroksessa ylitä 3 % pilaripituudesta.
- Penkereelle varataan painumanopeuslaskelmien mukainen, yleensä vähintään 3-6 kuukauden pituinen, seisonta-aika täydessä korkeudessaan ennen tien päällystämistä.

Pilareille perustetun rakenteen painumaa tarkasteltaessa pitää selkeästi erottaa kolme luonteeltaan ja nopeudeltaan täysin erilaista painumalajia:

- *Pilarien painuma kuormitettaessa niitä alle myötörajan. Painuma tapahtuu välittömästi eikä sillä ole merkitystä esimerkiksi tiepenkereen käytönaikaista painumattomuutta arvioitaessa.*
- *Pilarien välisen maan konsolidaatiopainumat silloin, kun pilarien myötökuorma ylitetään.*
- *Määrämittaisten pilarien alapuolisen maan konsolidaatiopainumat.*

5.2 Kimmoisan pilaroinnin painumamitoitus

Kimmoisan pilaroinnin mitoituksessa määritetään kuorman jakautuminen pilarin ja maan kesken sekä verrataan pilarille tulevaa kuormaa myötörajan suuruiseen sallittuun kuormaan (kuva 6). Murtokuorman ja sen perusteella laskettavan myötökuorman määrittämisessä otetaan huomioon ympäröivän maan antama sivutuki.



Kuva 6. Kimmoisan pilarin kuormitus-muodonmuutos -käyrä. Kimmoisan pilarin mitoitus perustuu siihen, että pilarin kuormitus ei ylitä myötörajaa (70 % murtolujuudesta).

Kuormitusten jakautuminen pilarien ja maan välillä riippuu pilarien ja maan muodonmuutosmoduulien suhteesta. Maan ja pilarin oletetaan painuvan yhtä paljon. Menetelmä perustuu Bromsin ja Bomanin (1977) esittämään tasisaisen painuman periaatteeseen. Tarkastelu on iteratiivinen.

Painuman laskeminen aloitetaan tekemällä aluksi laskentatekninen oletus pilarivälin ja kuormajakautuman suuruusluokasta (pilarien ja maan osuus kuormasta):

- *Pilariväli mitoitetaan karkeiden lähtöoletusten mukaan olettaen, että 1) pilarit kantavat koko pengerkuorman ja liikennekuorman, 2) pilarit kantavat ko. kuorman omasta leikkauslujuudestaan koostuvalla puristuslujuudella (2-kertainen leikkauslujuus) ja 3) pilareille sallitaan kuormaa 95 % murtokuormasta.*
- *Käyttökelpoinen alkuoletus kuormituksen jakautumisesta pilareille ja maalle on yleensä se, että pilarit kantavat 90 % kokonaiskuormasta, jolloin maalle jää 10 % kuormasta.*

Pilarien painuma lasketaan kaavalla 4 kaavaa 5 apuna käyttäen.

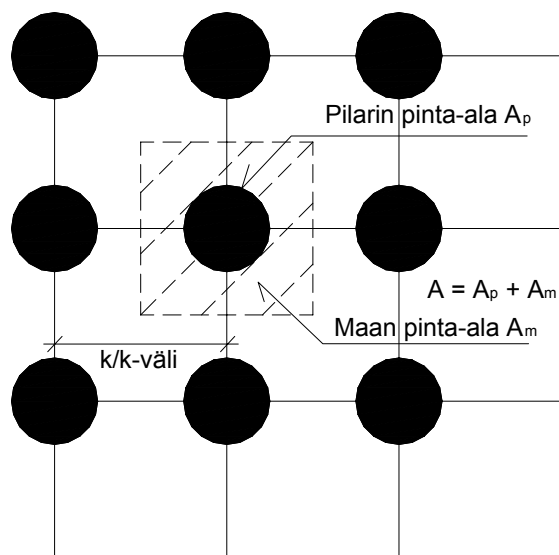
$$s_{pil} = \frac{\Delta h \cdot q_{pil}}{a \cdot E_{pil}} \quad (4)$$

Δh on pilarin pituus
 s_{pil} pilarille siirtyvän kuormaosuuden aiheuttama painuma
 q_{pil} pilareille tuleva osa kokonaiskuormasta q_0 (ei liikennekuormaa)
 a pilarien suhteellinen pinta-ala, ks. kaava 5
 E_{pil} pilarien muodonmuutosmoduuli

Pilarin muodonmuutosmoduulin voidaan olettaa olevan kalkkisementtipilarilla 100-200-kertainen ja kalkkipilarilla 50-150-kertainen pilarin leikkauslujuuteen nähden.

$$a = \frac{A_p}{A_p + A_m} \quad (5)$$

a on pilarien suhteellinen pinta-ala
 A_p pilarin pinta-ala
 A_m maan pinta-ala, ks. kuva 7



Kuva 7. Pinta-alojen A_p , A_m ja A määrittäminen.

Maan painuma yksinkertaisimmassa laskentatapauksessa (homogeeninen normaalikonsolidoitunut pohjamaa) voidaan laskea kaavalla 6 käyttäen hyväksi kaavoja 7 ja 8. Koska maa ja pilari painuvat yhtä paljon, voidaan maalle siirtyvä kuormitus laskea kaavalla 8.

$$s_{\text{maa}} = \frac{\Delta h \cdot q_{\text{maa}}}{(1 - a) \cdot M} \quad (6)$$

Δh on pilaroidun maakerroksen paksuus
 s_{maa} maalle siirtyvän kuormaosuuden aiheuttama painuma
 q_{maa} maalle tuleva osa kokonaiskuormasta q_0
 M kokoonpuristuvuusmoduuli

$$M = m \cdot 100 \cdot \left(\frac{\sigma}{100} \right)^\beta \quad (7)$$

m on moduuliluku
 β jännitysekspONENTTI
 σ maassa vallitseva pystyjännitys

$$q_{\text{maa}} = \left(\frac{(1 - a) \cdot M}{a \cdot E_{\text{pil}} + (1 - a) \cdot M} \right) \cdot q_0 \quad (8)$$

Painuman laskemisen jälkeen tarkistetaan pilarijännityksen suhde pilarin myötörajaan. Ensiksi lasketaan pilarille tuleva kuormitus kaavalla 9. Liikennekuorma otetaan tässä tarkastelussa huomioon.

$$\sigma_{pil} = \frac{q_0 - q_{maa}}{a} + \frac{q_{liik}}{a} \quad (9)$$

σ_{pil} on pilarille tuleva puristusjännitys (tarkastelutaso penkereen ja maanpinnan rajapinta)
 q_{liik} tasainen liikennekuorma (10 kPa)

Kaavalla 9 määritetty puristusjännitys σ_{pil} edustaa pilarin puristusjännityksen maksimiarvoa. Kun penkereen alla on kuivakuori, kuormitus siirtyy maanpinnassa pääosin maapohjalle, ja pilarijännityksen voidaan olettaa olevan maksimissaan ($= \sigma_{pil}$) kuivakuoren alapinnassa, jota käytetään tarkastelusyvytenä.

Tarkemman laskennallisen tarkastelun perusteella (esimerkiksi elementtimenetelmää käyttäen) voidaan valita muukin taso. Asiaa on käsitellyt mm Nikkinen julkaisussa Syvästabiloitujen pilarien ja maan yhteistoiminta.

Jos pilareiden ja penkereen välissä käytetään lujitteita, tarkastelusyvyys on kussakin tapauksessa valittava erillisen tarkastelun perusteella, koska lujitteet tehostavat kuormien keskittymistä pilareille.

Pilarin puristuskapasiteetti koostuu pilarin omasta leikkauslujuudesta ja ympäröivän saven antamasta sivutuesta kaavan 10 mukaisesti. Pilarin sivutuki lasketaan kaavalla 11 ja sen suuruus riippuu valittavasta tarkastelusyvydestä. Tarkastelusyvyden valinta on selostettu edellä.

$$\sigma_{murto} = 2 \cdot \tau_{pil} + k_h \cdot \sigma'_h \quad (10)$$

σ_{murto} on pilarin puristuskapasiteetti
 τ_{pil} pilarin leikkauslujuus
 k_h horisontaalijännityksen kerroin (=1)
 σ'_h pilareihin vaikuttava maan tehokas horisontaalijännitys

$$\sigma'_h = \sigma'_v + \frac{\Delta\sigma'}{2} \quad (11)$$

σ'_v on maan pystysuora tehokas jännitys alkutilanteessa tarkastelusyvydellä
 $\Delta\sigma'$ kuormituslisäys (ilman liikennekuormaa)

Pilarille tulevaa puristusjännitystä (kaava 9) verrataan pilarin myötörajan (kaava 12). Pilarijännitys saa olla korkeintaan myötöjännityksen suuruinen.

$$\sigma_{pil} \leq \sigma_{myötö} \leq 0,7 \cdot \sigma_{murto} \quad (12)$$

Kimmoisaa pilaria ei työnaikaisissakaan tilanteissa saa kuormittaa yli myötörajan. Sen sijaan pilarien kuormittaminen työn aikana senhetkistä myötörajaa kevyemmin on edullista pilarien lujittumiselle.

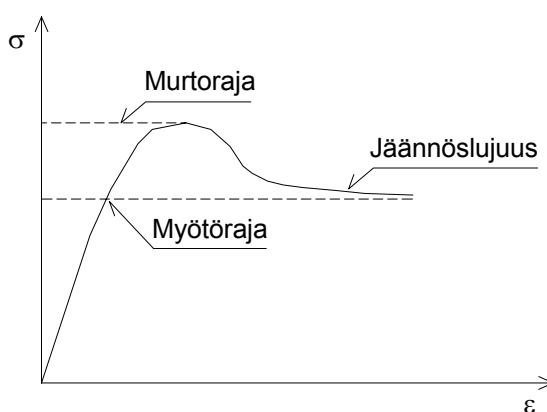
Stabiloidun rakenteen vakavuus on tarkistettava luvussa 4 esitetyillä menetelmillä.

Yleensä vakavuus on kimmoisan pilaroinnin mitoituksessa määräävä vain, kun maanpinta on kalteva, penkereen vierellä on kaivantaja tai pengeri on korkea. Kun kysymyksessä on matalahko pengeri tasaisessa maastossa, kimmoisaksi mitoitettu pilarointi nostaa varmuuden sortumaa vastaan tavallisesti suuruusluokkaan 2.

Kimmoisan pilaroinnin mitoitus ei ole erityisen herkkä pohjamaan painumaparametrien epätarkkuuksille silloin, kun maa on normaalikonsolidoitunutta. Sen sijaan mahdollinen ylikonsolidaatio vaikuttaa mitoitukseen merkittävämmän. Ylikonsolidoitunut pohjamaa pystyy pienellä painumalla ottamaan vastaan selvästi enemmän kuormaa kuin normaalikonsolidoitunut maa, mikä pienentää pilareille tulevaa kuormitusta.

5.3 Myötävän pilaroinnin painumamitoitus

Myötävän pilaroinnin mitoitus voidaan aloittaa suoraan ottamalla alustavaksi pilaritiheydeksi esimerkiksi vakavuuden perusteella määritetty minimitiheys tai jokin muu sopiva arvio.



Kuva 8. Myötävän pilarin kuormitus-muodonmuutos -käyrä. Myötävän pilarin mitoitus perustuu siihen, että kuormitus ylittää myötörajan (70 % murtolujuudesta) ja painumat lasketaan olettaen käyrän loppuosa myötörajan jälkeen korvatuksi kuvaan piirretyllä alemmalla katkoviivalla

Myötävän pilaroinnin painumamitoituksen lähtökohtana on tasaisen painuman periaate kuten kimmoisellakin pilarilla. Myötökuorman oletetaan olevan 70% murtokuormasta kuten kimmoisellakin pilarilla (kuva 8). Maalle tuleva kuorma lasketaan myötävän pilarin tapauksessa kaavalla 13. Pilarikuorma lasketaan kaavalla 9, mutta liikennekuorman vaikutusta ei oteta huomioon.

$$q_{\text{maa}} = q_0 - 0,7 \cdot a \cdot \sigma_{\text{murto}} \quad (13)$$

q_{maa} on maalle tuleva osa kuormituksesta
 q_0 kokonaiskuorma (liikennekuorma jätetään tässä pois)
 a pilarien suhteellinen pinta-ala
 σ_{murto} pilarin puristuslujuus, kaava 10

Yksinkertaisimmassa tapauksessa (homogeeninen, normaalikonsolidoitunut pohjamaa) painuma voidaan laskea aikaisemmin esitetyllä kaavalla 6.

Myötävän pilaroinnin painumamitoituksen osalta oleellista on laskelmin varmistaa:

- etteivät painumat ole niin suuria, että pilarit eivät säilytä muotoaan (rajarvo on 3 % pilaripituudesta geotekniset kerrokset erikseen tarkasteltuna)
- että painumat ehtivät riittävän varmasti tapahtua rakentamisaikana.

Painuman suuruuden laskentaan liittyy merkittävä epätarkkuus pilarien todellisen myötökäyttäytymisen arvioinnin osalta, joten painumalaskelman menetelmällä ei ole ratkaisevan tärkeää merkitystä. Pilareita ympäröivän maan osalta pitää kuitenkin tutkia, voidaanko käyttää ylikonsolidoituneen alueen parametreja, jolloin painumat jäävät pieniksi. Laskelmien lähtötiedoiksi tarvitaan jo alustavissa tarkasteluissa ödometrikokeita, jotta myötävän pilaroinnin käyttömahdollisuudet voidaan selvittää.

Pilaristabiloidun pohjamaan konsolidaatioaste voidaan laskea yhtälöllä 14:

$$U = 1 - e^{\frac{-2 \cdot c_h \cdot t}{R^2 \cdot f(n)}} \quad (14)$$

$$f(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \left[\ln(n) - 0,75 + \frac{1}{n^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right) \right] + \left[\frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{k_{maa}}{k_{pil}} \cdot L_D^2 \right]$$

$$n = \frac{R}{r}$$

U on	konsolidaatioaste
c_h	vaakasuuntainen konsolidaatiokerroin
t	aika
R	pilarin vaikutussäde (sen ympyrän säde, jonka pinta-ala on yhtä suuri kuin yhdellä pilarilla lujitetun alueen pinta-ala)
r	pilarin säde
k_{maa}	maan vedenläpäisevyyskerroin
k_{pil}	pilarin vedenläpäisevyyskerroin
L_D	puolet pilaripituudesta (2-suuntainen konsolidaatio) tai pilaripituus (1-suuntainen konsolidaatio)

Myötävää pilarointia on ehdottomasti suositeltavaa kuormittaa mahdollisimman pian pilarointityön jälkeen ja niin suurella kuormalla, kuin vakavuus sallii. Varmuusluvun sortumaa vastaan on myös työn aikana oltava vähintään 1,5.

Myötävän pilaroinnin todellinen painuma saattaa usein alittaa lasketun painuman, mihin syynä on lähinnä myötörajolettamuksen yksinkertaistus.

5.4 Pilaritiheyden tarkistaminen

Yleensä pilarien k/k-väli on vähintään pilarin halkaisija + 0,2 m. Tiheämmille pilaroinneille ei ole teknisiä esteitä, mutta usein jokin muu ratkaisu on taloudellisempi.

Jos pilariväli on suuri, ei tasaisen painuman oletus (pilari ja maa painuvat yhtä paljon) päde vaan maa voi painua enemmän ja tämä voi heijastua myös tien pintaan. Erityisesti kimmoisilla pilareilla kuormien riittävä siirtyminen pilareille on syytä varmistaa.

Tarkasteluita pilaritiheyden riittävydestä tarvitaan, jos laskettu pilariväli ylittää joko arvon pilarin halkaisija + 0,7 m taikka pengerkorkeuden. Kuivakuorikerros siirtää tehokkaasti kuormia pilareille, joten em laskutavalla saatua enimmäispilariväliä voidaan kasvattaa jokaista täyttä kuivakuoren 0,5 metrin paksuutta kohti 0,1 metriä, ei kuitenkaan enempää kuin 0,3 m. Kuivakuoren leikkauslujuuden tulee olla vähintään 30 kPa.

5.5 Pilarien keskinäinen sijoitus

Pilarit voidaan useimmissa tapauksissa sijoittaa yksinkertaiseen neliöverkkoon. Kolmioverkon yleistynyt käyttö pohjautunee analogiaan pystyojaverkoston kanssa ja siitä on hyötyä:

- erityisen harvoilla pilaroinneilla ja matalilla penkereillä (ks. edellä), kun halutaan varmistaa kuormien mahdollisimman tehokas siirtyminen pilareille
- myötävillä pilareilla painumien nopeuttamiseksi.

Kolmioverkkoa käytettäessä tulee k/k-välin mitoituksessa ottaa huomioon verkon tyyppi. Pilarivälin laskeminen neliön sivuna ja saman mitan käyttäminen tasasivuisen kolmion sivuna johtaisi 15 % ylimitoitukseen.

6 MÄÄRÄMITTAISEN STABILOINNIN MITOITUS

6.1 Määrämittaisten pilarien käytön edellytykset

Tämän luvun ohjeita käytetään määrämittaisen stabiloinnin mitoituksessa silloin, kun pilareilla lisätään vakavuutta tai vähennetään painumia.

Määrämittainen pilarointi soveltuu parhaiten painumien rajoittamiseen sellaisissa kohteissa, joissa välittömästi kuivakuoren alapuolella sijaitsevat savi-kerrokset ovat painuman kannalta kriittisiä ja joissa savikerrosten kokonaispaksuus on suuri. Määrämittainen pilarointi ei sovellu kohteisiin, joissa pilaroinnin upotustason alle jää paksuudeltaan tai painumaominaisuuksiltaan pienipiirteisesti vaihtelevia savikerroksia. Siirtymärakenteiden suunnitteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota.

Määrämittaisten pilarien alapuolelle ei saa jättää maakerroksia, joiden suljettu leikkauslujuus alittaa 15 kPa tai vesipitoisuus ylittää 100 % taikka humuspitoisuus ylittää 2 %.

Määrämittaisten pilareiden mitoittavana leikkauslujuutena saa käyttää enintään arvoa 120 kPa. Jos lujitettavan kerroksen pienin leikkauslujuus on alle 12 kPa, saa pilarin leikkauslujuutena käyttää enintään kymmenkertaista maan leikkauslujuutta.

6.2 Stabiliateetti ja mitoitus pilariryhmänä

Perustettaessa tiepenger määrämittaista stabilointia käyttäen on varmuusluvun penkereen sortumista vastaan oltava vähintään 1,2 ilman stabilointia ja vähintään 1,5 stabiloinnin vaikutus huomioon ottaen. Pohjamaan mahdollinen häiriintyminen pilarien alapään alla tulee ottaa huomioon vakavuutta laskettaessa. Saven leikkauslujuutta tulee tarpeen mukaan redusoida. Tämä on merkittävää erityisesti silloin, kun maanpinta on kalteva tai stabiloinnin sivulle tulee kaivanto.

Määrämittaiset pilarit mitoitetaan yleensä kimmoisina.

Määrämittaisen stabiloinnin mitoituslaskelmissa otaksutaan pilarien ja niitä ympäröivän maan toimivan yhtenäisenä vyöhykkeenä. Määrämittaisen stabiloinnin toimiminen vyöhykkeenä on aina arvioitava. Vyöhykkeenä toimimiseen vaikuttavia tekijöitä ovat:

- riittävä pilaritiheys
- pilarin ja maan muodonmuutosominaisuuksien riittävän hyvä yhteensopivuus
- maan lujuus ja myös häiriintymisominaisuudet silloin, kun rakennetta kuormitetaan pian stabiloinnin jälkeen
- riittävä pilaripituus

Määrämittaisen pilarin minimipituus on 5 metriä. Tästä voidaan poiketa kun määrämittaisia pilareita käytetään siirtymärakenteena.

Kun määrämittaista pilarointia käytetään pehmeiköllä siirtymärakenteena (ks. kohta 8.5) ja käytetään lyhenevää pilaripituutta, on tärkeää tarkistaa stabiliteetin riittävyys. Tarvittaessa stabiliteettia voidaan parantaa esimerkiksi pengervevennyksellä.

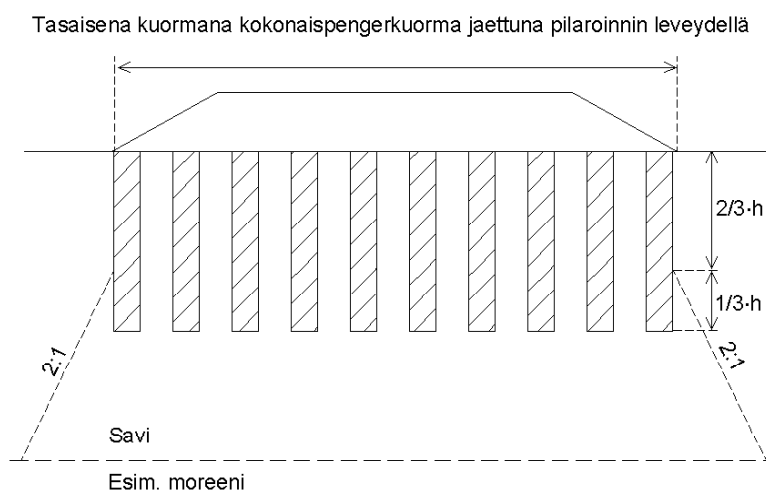
6.3 Painuman laskenta

Määrämittaisen syvästabiloinnin painuman laskennassa on otettava huomioon sekä stabiloitujen maakerrosten että sen alla olevien stabiloimattomien kerrosten painuma.

Stabiloitujen maakerrosten painuma lasketaan luvun 5 mukaan.

Määrämittaisten pilarien alapuolisen maan konsolidaatiopainuma lasketaan normaaliin tapaan esimerkiksi tangenttimoduulimenetelmällä.

Jännitysten oletetaan jakautuvan määrämittaisen pilaroinnin alapuolella olevassa maakerroksessa kuvan 9 mukaisesti. Tätä olettamusta noudatetaan, kun pilarointileveys ylittää pilaripituuden. Kun pilarointi on kapea pilaripituuteen verrattuna, jännitysten jakautuminen voidaan tarkastella ottaen tarkemmin huomioon kuormitusten jakautuminen stabiloidun alueen rajapintojen välityksellä pohjamaahan.



Huom! Jos täyttö on huomattavasti laajempi kuin pilarointi, ei kuormituksen voida olettaa pienenevän syvyyden kasvaessa.

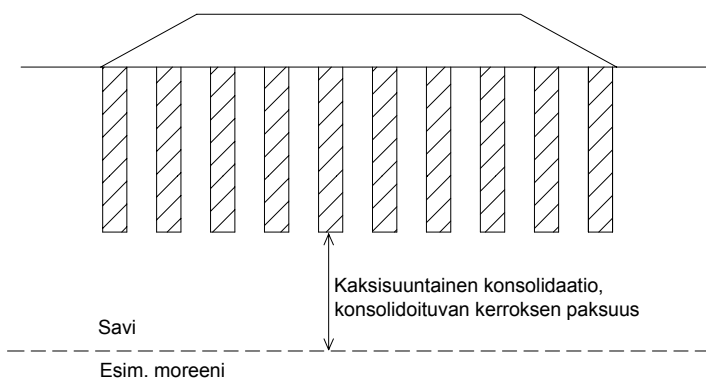
Kuva 9. Jännitysten jakautuminen määrämittaisen pilaroinnin alapuolella.

Koska lisäkuormitukset syvemmissä maakerroksissa ovat usein pieniä esikonsolidaatiojännityksen määritystarkkuuteen verrattuna, painumalaskelmia täydennetään herkkyytarkasteluilla, joissa otetaan huomioon sekä jännitysjakaumaan että esikonsolidaatiojännitykseen liittyvät epätarkkuudet.

6.4 Painuma-aika ja painumanopeuden laskenta

Stabiloitu maakerros painuu yleensä lyhyessä ajassa eikä painuma ole suuri. Stabiloimattoman maakerroksen painuma on yleensä niin suuri, että esikuormitus on tarpeen. Esikuormitukseen on varattava riittävä aika, yleensä alle 0,5 – 1,0 vuotta.

Määrämittaisten pilarien alapuolisen saven oletetaan konsolidoituvan kaksisuuntaisesti kuvan 10 mukaisesti ainakin silloin, kun sideaineesta vähintään 50 % on kalkkia.



Kuva 10. Määrämittaisen pilaroinnin painumanopeuslaskennan periaate.

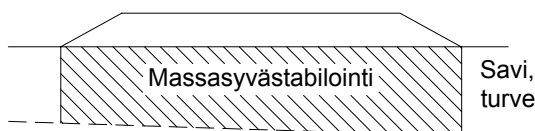
Savikerrosten alaosat ovat usein epähomogeenisia, kerroksellisia ja kerrallisia ja ödometrinäytteiden edustavuus painumanopeuden määrittämisessä on tavallista huonompi. Painumanopeuslaskelmissa on aina tarkasteltava sekä minimi- että maksimiarvot. Varsin suuretkaan epävarmuudet painumanopeudessa eivät aina ratkaisevasti vaikuta mitoituspainumaan (painuma mitoitusaikana, esimerkiksi 20 vuoden painuma vähennettynä rakennusajaisella painumalla), sillä c_v -kertoimen muuttuessa em. painumien erotuksen muutos voi joskus olla pieni.

7 MASSASYVÄSTABILOINNIN SUUNNITTELU

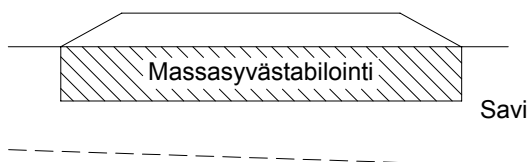
7.1 Massasyvästabiloidut rakenteet

Kuvassa 11 on esitetty erilaisia massasyvästabilointirakenteita.

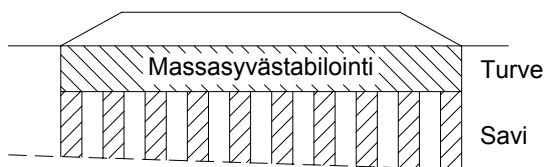
a) Massasyvästabilointi pehmeän kerroksen pohjaan asti



b) Massasyvästabilointi määräsyyvyteen



c) Massasyvästabiloinnin ja pilaroinnin yhdistelmä



Kuva 11. Massasyvästabiloituja rakenteita.

7.2 Tutkimusten erityispiirteet

Massasyvästabilointia varten tehtävät tutkimukset ovat periaatteessa varsin suuressa määrin samankaltaisia kuin pilaristabilointia varten tehtävät tutkimukset. Koska massasyvästabilointia useimmiten tehdään varsin humuspitoisissa maakerroksissa, kuten turpeessa, liejussa ja liejuisessa savessa, tästä aiheutuu tutkimuksiin seuraavia erityispiirteitä:

- Humuspitoisten kerrosten laajuus ja laatu on selvitettävä riittävällä näytteenotolla, sillä humuspitoisuus vaikuttaa huomattavasti stabiloituvuuteen ja sideainetarpeeseen.
- Varsinkin turvenäytteiden laboratorikokeissa saatavat lujuustulokset ovat herkkiä näytteen valmistus- ja säilytystekniikalle.

7.3 Massasyvästabiloinnin mitoituslaskelmat

Massasyvästabiloinnin mitoituslaskelmissa noudatetaan soveltuvin osin edellä esitettyjä pilaristabiloinnin mitoituslaskelmia.

Koska kysymyksessä on sivusuunnassa yhtenäinen rakenne, massasyvästabiloidulle maalle voidaan vakavuuslaskelmissa käyttää stabiloitua lujuutta myös liukupinnan passiivipuolella. Stabiloimattoman pohjamaan lujuus reduoidaan kuten pilaristabiloinnin tapauksessa.

Massasyvästabiloinnin alle jäävien kerrosten painuma lasketaan kuten pilaristabiloinnin alapuolisten kerrosten painuma.

Massasyvästabiloidussa kerroksessa tapahtuu sekoitustyön epätarkkuuksien vaikutuksesta painumaa, jonka tarkka etukäteen laskeminen on vaikeaa, mutta joka pitää työnaikaisilla painumamittauksilla tarkistaa. Yleensä ko. painuma on tapahtunut muutamassa kuukaudessa.

Massasyvästabiloinnin ja pilaroinnin yhdistelmä rakenteessa on pilarien puristusmurtotarkastelu tehtävä aivan pilarien yläpäässä. Pilarien läpileikkautumistarkastelua ei tarvita, jos pilaritiheys täyttää kohdassa 8.2 esitettävät vaatimukset.

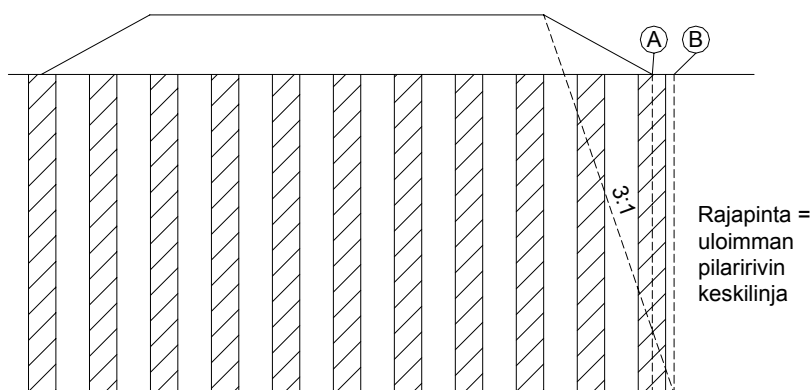
8 STABILOIDUN RAKENTEEN SUUNNITTELUN YKSITYISKOHTIA

8.1 Stabiloinnin leveyden määrittäminen

Kun stabilointileveyttä määritetään pitäen tavoitteena penkereen tasaista painumaa koko leveydellään, voidaan yleensä noudattaa kuvan 12 mukaista ohjetta, jos stabiileetti ei vaadi suurempaa leveyttä.

Valitaan seuraavista pienempi leveys:

- luiskan alakulma (A)
- 3:1 viivan ja pilarien alapään tason leikkauspiste (B)



Kuva 12. Pilaroinnin leveys, kun stabiileetti ei vaadi suurempaa leveyttä.

8.2 Pilarien kaltevuus

Pilarit suunnitellaan yleensä pystysuoriksi. Kun pilarien leikkauslujuus ylittää 120 kPa ja varmuus sortumaa vastaan ilman pilarointia on alle 1,2, mutta yhtenäinen rakenne ei kuitenkaan ole tarpeen (ks. kohta 4.1), voi joskus olla tarpeen harkita pilarien vähäistä kallistusta penkereen reuna-alueilla luiskassa, jossa pengerkuorman resultantti on vino. Tällöin pilarien kaltevuus harkitaan jokaisessa tapauksessa erikseen rakenteen toiminnan kannalta edullisimmaksi.

8.3 Lujitteiden käyttö

Lujitteilla voidaan syvästabiloinnin yhteydessä:

- tehostaa kuormien siirtymistä pilareille tavallista suuremmillakin pilariväleillä.
- parantaa penkereen reunaosan stabiileettia ”ankkuroimalla” penkereen reuna pilaroinnin päälle.
- vähentää kaltevien pilarien tarvetta, vrt. kohta 8.3.

Lujite keskittää kuormia pilareille. Tämän takia on lujitteella varustetuissa pilaroinneissa tehtävä pilarien puristus- ja murtotarkastelu välittömästi kuivakuoren alapinnassa.

8.4 Esikuormituksen käyttö

Esikuormitus voidaan liittää muun muassa:

- myötävään pilarointiin, jotta saadaan varmistetuksi painumien tapahtuminen rakentamisaikana
- määrämittaiseen pilarointiin, jotta saadaan merkittävämpi osuus painumista tapahtumaan rakentamisaikana
- lähelle myötöä kuormitettuun pilarointiin eräänlaisena koekuormituksena sen varmistamiseksi, etteivät pilarit myötää tien käyttöaikana.

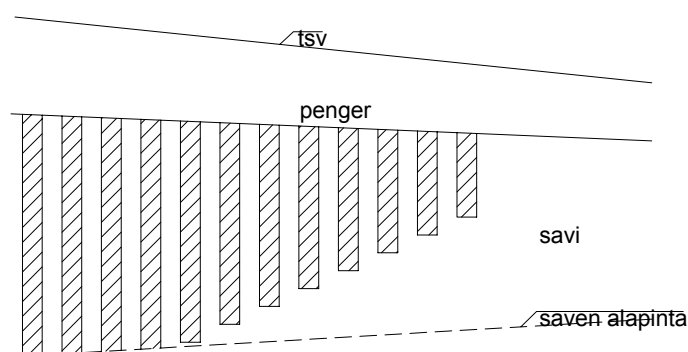
Esikuormituksena voidaan usein käyttää liikennekuormaa vastaavaa 0,5 m ylipengertä, jos ylipenkereen päällä ei ole esikuormitusaikana liikennettä. Erityisen matalilla penkereillä, joilla pilaritiheys määräytyy minimitiheysvaatimusten mukaisesti, hieman paksumpikaan ylipenger ei vaikuta ainakaan kovin paljon pilaritiheyden mitoitukseen. Yleensä pilaritiheyttä ei kuitenkaan kannata kasvattaa sen takia, että voitaisiin käyttää ylipengertä.

8.5 Siirtymärakenteet syvästabiloinnin yhteydessä

Siirtymärakenteiden suunnittelussa pidetään lähtökohtana, että syvästabilointi on käyttötilassa täysin painumaton rakenne ja siihen rajautuvan penkereen pienikin käytönaikainen painuma aiheuttaa terävän epätasaisuuden.

Syvästabiloinnin yhteydessä käytettäviä siirtymärakennetekniikoita on esitetty julkaisussa Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä TIEL 3200248. Seuraavassa on esitetty täsmennyksiä ko. julkaisun tekstiin.

Kun syvästabilointi rajautuu painuvaan rakenteeseen, esimerkiksi maanvaraiseen penkereeseen, pilarikentän reunimmaisimmat pilarit suunnitellaan määrämittäisiksi ja jonkin verran painuviksi kuvassa 13 esitetyn periaatteen mukaisesti.



Kuva 13. Syvästabiloinnin rajautuminen maanvaraiseen penkereeseen tien pituus-suunnassa. Siirtymäratkaisun periaate.

Kun syvästabilointi rajautuu pengerkevennykseen, ainakin kahden reunimmaisesta pilaririvin tekeminen edellä kuvatulla tavalla on suositeltavaa. Jos reunimmaisista pilarit tehdään täyspitkinä, pengerkevennyksessä on mitoitettava siten, että penger stabiloidun ja stabiloimattoman penkereenosan rajakohdalla on painumaton.

Pengerpaalutukseen rajautuva pilarointi ulotetaan painumattomiin maakerroksiin. Pilarointi mitoitetaan kimmoisena vähintään paalutusta lähimpänä olevalta 5 m tai puolen pehmeikkösyvyyden mittaiselta osuudelta. Paalulaatta varustetaan siirtymälaatoilla. Siirtymälaatoista aiheutuvaa kuormituksen keskittymistä ei tarvitse ottaa huomioon pilaroinnin mitoituksessa. Paalutusta ja pilarointia ei tarvitse rajoittaa.

8.6 Ympäristövaikutukset

Syvästabilointityö aiheuttaa savikerroksiin tilapäistä häiriintymistä, joka useimmiten on paikallista ja nopeasti ohimenevää. Häiriintymisen minimoimiseksi ja tarkkailuun on kiinnitettävä huomiota, kun stabilointia tehdään stabiiliteetiltaan heikkojen kaivantojen, penkereiden tai luonnontilaisten rinteiden välittömässä läheisyydessä. Häiriintymisen vaikutusta voi vähentää esimerkiksi stabiloinnin tekeminen sorasta tehdyn työalustan päältä, joka toisaalta vähentää työkoneesta pohjamaalle tulevia paikallisia kuormituksia ja toisaalta tasaisesti kuormittaa ja lujittaa juuri stabiloitua maata. Häiriintymistä voi lisätä tarpeettoman suuren syöttöpaineen ja ilmamäärän käyttö sekä huonosti onnistuva ilman poistuminen maasta pilarikoneen varren suuntaisesti.

Jos stabiloitavalla alueella esiintyy paineellista pohjavettä, voi joskus olla edullista suunnitella pilarit määrämittäisiksi niin, että ne eivät puhkaise savi-kerrosta.

Sideaineesta ei saa liueta haitallisia aineita pohjaveteen.

Sideaineen pölyäminen pilarin yläpäätä tehtäessä on usein todettu ongelmaksi. Pölyämistä voidaan vähentää tekemällä pilarointi työalustan päältä, jolloin sideaineen syöttö voidaan haitatta lopettaa jo vähän ennen maanpintaa.

9 SYVÄSTABILOINTISUUNNITELMAN SISÄLTÖ

9.1 Piirustukset

Syvästabilointisuunnitelman tärkein piirustus on kartta. Kartan mittakaavana käytetään 1:200 ainakin, kun pilarikenttien muoto on vaihteleva, pilarikenttä rajautuu epäsäännöllisen muotoiseen paalukenttään tai pilarikentän alueella on pienipiirteisesti vaihtelevia muita pohjanvahvistuksia. joskus yksinkertaisissa tapauksissa voidaan käyttää mittakaavaa 1:500.

Pilarikartalla esitetään:

- pilarikenttien rajat ja pilaritiheydet
- pilarikenttien nurkkapisteiden koordinaatit
- monissa tapauksissa yksittäiset pilarit
- tarvittaessa esimerkiksi pohjatutkimuspisteet tai saven syvyyskäyrät
- pilarien tavoitetaso kentänosittain: maakerrosraja/määrätaso
- pilarikentän rajautuminen muihin pohjarakenteisiin
- pilarien halkaisija, tavoitelujuus, sideaineen laatu ja määrä kentänosittain

Kartan lisäksi pilarointi esitetään pohjanvahvistussuunnitelman pituusleikkauksissa (mittakaava yleensä 1:200/1:200) ja paalukohtaisissa poikkileikkauksissa (mittakaava yleensä 1:200). Leikkauspiirustuksissa esitetään yksityiskohtaisesti pohjatutkimukset ja pilarien tavoitetaso sekä siirtymärakenteet.

9.2 Laatuvaatimukset ja työselitykset

Syvästabiloinnin työkohtaisissa laatuvaatimuksissa ja työselityksissä on esitettävä seuraavat asiat sikäli kuin ne eivät riittävästi käy ilmi yleisistä laatuvaatimuksista ja työselityksistä:

- pilarikenttien ja pilarien sijaintitoleranssit
- pilarien kaltevuustoleranssit
- sideaineen laatuvaatimukset
- sideaineen määrä ja sen sallitut poikkeamat
- pilaroinnin sekoitustyövaatimukset (terätasomäärä, sallittu nousunopeus)
- tarvittaessa muita työohjeita: syöttöpaineen maksimiarvo, varoitus tarpeettoman suuren ilmamäärän käytöstä jne.
- miten em. työohjeiden noudattaminen on osoitettava
- pilarien lujuusvaatimus ja sallitut poikkeamat, tarvittaessa syvyystasoitain eriteltyinä
- ennakkosuunnitelma, miten pilarien lujuusvaatimusten täyttymistä seurataan
- alustavat laadunvalvontatutkimusten tulkintaohjeet, esimerkiksi Nc-kerroin
- ohjeet, missä vaiheessa pilareita saadaan kuormittaa
- tarvittaessa ohjeet pilarien välisen saven lujuudenpalautumisen tarkkailusta.

10 KIRJALLISUUS

Baker, S. Deformation Behavior of Lime/Cement Column Stabilized Clay. Department of Geotechnical Engineering. Chalmers University of Technology. Göteborg 2000.

Björkman, J., Ryding, J. Kalkcementpelares mekaniska egenskaper. Master Thesis. Royal Institute of Technology, Department of Soil and Rock Mechanics, Stockholm.

Broms, B. B. Can Lime/Cement Columns be used in Singapore and South-east Asia, 3rd GRC Lecture, 19 November 1999. Nanyang Technological University. NTU-PWD Geotechnical Research Centre. Singapore 1999.

Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll. Rapport 2:2000. Svenska Geotekniska Föreningen.

Kalkkipilariohje KPO 2000. Ohjeluonnos koekäyttöön. Espoon kaupungin tekninen keskus, geotekniikkayksikkö. Espoo 2000.

Kivelö, M. Stabilization of embankments on soft soil with lime/cement columns. Doctoral thesis 1023. Royal Institute of Technology. Division of Soil and Rock Mechanics. Stockholm 1998.

Mäkelä, H. Kehä III – Massastabilointi koerakenteena. Uudenmaan tiepiirin sisäinen julkaisu. Tielaitos, Uudenmaan tiepiiri. Helsinki 1994.

Nikkinen, J. Syvästabiloitujen pilarien ja maan yhteistoiminta. Tielaitoksen selvityksiä 15/2000. Tielaitos. Helsinki 2000. TIEL 3200604.

Pohjarakennusohjeet 1988. RIL 121-1988. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.

Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. Tielaitos. Helsinki 1996. TIEL 3200446.

Porbaha, A. State of the art in deep mixing technology. Part IV: design considerations. Ground Improvement, July 2000.

Syvästabiloinnin kehittäminen. Osaprojekti B: Harvennettu pilarointi lujitteita käyttäen. Koekohteen mittaustulosten raportti vuodelta 2000. Tielaitoksen tutkimuksia 2000. Tielaitos. Helsinki 2000.

Syvästabilointi Tielaitoksen kohteissa. Osa 1: Toteutetut kohteet. Tielaitoksen selvityksiä 2/1999. Tielaitos. Helsinki 1999. TIEL 3200540.

Syvästabilointi Tielaitoksen kohteissa. Osa 2: Laadunvalvontatutkimukset ja laadunvalvontatutkimusten vaikutus. Tielaitoksen selvityksiä 3/1999. Tielaitos. Helsinki 1999. TIEL 3200541.

Teiden pehmeikkötutkimukset. Tielaitos. Helsinki 1998. TIEL 3200520.

Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. Tiehallinto. Helsinki 2001. TIEH 2100002-01.

Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Perustus- ja vahvistamistyöt. Tiehallinto. Helsinki 2001. TIEH 2200002-01.

Tiesuunnitelman pohjatutkimukset. Tielaitos. Helsinki 1998. TIEL 2180003.

Tyynelä, P. Määrämittaisen syvästabiloinnin mitoitus. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. Tampere 2000.

Uotinen, V-M. Syvästabiloinnin ennakkokokeet. Sideaineen valinta maalajin ja vesipitoisuuden perusteella. Pohjarakennuksen ja maamekaniikan erikoistyö Rak-50.150. Teknillinen korkeakoulu. Espoo 1994.

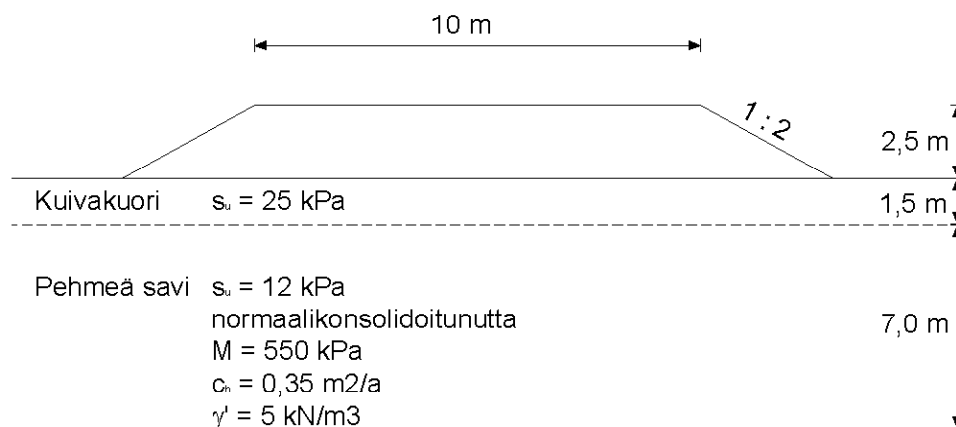
Vepsäläinen, P. Tiepenkereen holvaantuminen, teoreettinen osa. Tielaitoksen selvityksiä 3/1990. Tielaitos. Helsinki 1990.

Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi. Tutkimusraportti. Tielaitoksen selvityksiä 81/1993. Tielaitos. Geokeskus. Oulu 1993. TIEL 3200205.

11 LIITTEET

Liite 1 Esimerkkimitoitus 2,5 m penkereelle.

ESIMERKKIMITOITUS 2,5 M PENKEREELLE



Muut lähtötiedot: vastapenkereille ei tilaa
sideaine kalkkisementtiä (kalkkia 50 %)
pilarin vedenjohtavuus/maan vedenjohtavuus 100

Tarkistetaan luonnontilainen vakavuus (kohta 4.1). Varmuus 1,23. OK

1. Aloitetaan kimmoisan pilaroinnin mitoitus (kohta 5.2):

Lujuuskokeiden perusteella pilarilujuudeksi on määritetty 100 kPa. Pilarin halkaisijaksi valitaan 600 mm. Arvioidaan (kursivoitu teksti kohdassa 5.2) k/k-väliksi tällöin 0,90 m. Pilarien suhteellinen pinta-ala a (kaava 5) on tällöin 0,349.

Arvioidaan (kursivoitu teksti) pilarin muodonmuutosmoduuliksi kPa

Kaava 4: (pilarien arvioidaan ottavan 90 % kuormasta, kohdan 5.2 kursivoitu teksti)

$$s_{\text{pil}} = \frac{\Delta h \cdot q_{\text{pil}}}{a \cdot E_{\text{pil}}} = \frac{7 \cdot 0,9 \cdot (2,5 \cdot 20)}{0,394 \cdot 15000} = 60 \text{ mm}$$

Kaava 6: (maan ottaessa vastaavasti 100-90 = 10 % kuormituksesta)

$$s_{\text{maa}} = \frac{\Delta h \cdot q_{\text{maa}}}{(1-a) \cdot M} = \frac{7 \cdot 0,1 \cdot 50}{(1-0,394) \cdot 550} = 97 \text{ mm}$$

Toinen iterointikierrös:

Kaava 4: (tarkempi arvio: pilarit ottavat 93,5 % kuormasta)

$$s_{pil} = \frac{7 \cdot 0,935 \cdot (2,5 \cdot 20)}{0,349 \cdot 15000} = 62 \text{ mm}$$

Kaava 6: (maan ottaessa vastaavasti 100-93,5 = 6,5 % kuormituksesta)

$$s_{maa} = \frac{7 \cdot 0,065 \cdot 50}{(1 - 0,349) \cdot 550} = 63 \text{ mm}$$

Nyt $s_{pil} \approx s_{maa}$ riittäväällä tarkkuudella

Kaava 9: pilarille tuleva puristusjännitys

$$\sigma_{pil} = \frac{q_0 - q_{maa}}{a} + \frac{q_{iiik}}{a} = \frac{50 - 0,065 \cdot 50}{0,349} + \frac{10}{0,349} = 163 \text{ kPa}$$

Puristumurtotilan tarkastelusyvytydeksi valitaan kuivakuorikerroksen alapinta kohdan 5.2 mukaisesti.

Kaava 10:

$$\begin{aligned} \sigma_{murto} &= 2 \cdot \tau_{pil} + k_h \cdot \sigma_h = 2 \cdot 100 + 1 \cdot \left(1,5 \cdot 15 + \frac{2,5 \cdot 20}{2}\right) \\ &= 247 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Kaava 12:

$$\sigma_{myötö} = 0,7 \cdot \sigma_{murto} = 0,7 \cdot 247 \text{ kPa} = 173 \text{ kPa} > 163 \text{ kPa}$$

Verrataan kaavan 9 ja kaavan 12 tulosta toisiinsa ja todetaan, että pilarin puristusjännitys ei ylitä myötörajaa.

Määritetään pilarointileveys (kuva 12).

Tarkistetaan pilaroidun penkereen vakavuus. Varmuusluku on $1,96 > 1,5$. OK

2. Mitoitetaan sama kohde myötävänä pilarina

Tarkistetaan kriteerit (kohta 5.1):

- sideaine OK
- pilarilujuus 100 kPa ei ylitä 10-kertaista pohjamaan lujuutta
- varmuus ilman pilareita 1,23 eli riittävä
- pehmeän savikerroksen painumaksi sallitaan enintään $m = 0,21$ m
- penkereelle varattava ainakin 3-6 kk painuma-aikaa

Aloitetaan myötävänä pilaroinnin mitoitus (kohta 5.3). Tarvittava k/k-väli vakavuuden perusteella on enintään 1,28 m ($F = 1,5$). Pilarien suhteellinen pinta-ala a on tällöin 0,173.

Kaava 13:

$$q_{\text{maa}} = q_0 - 0,7 \cdot a \cdot \sigma_{\text{murto}} = 2,5 \cdot 20 - 0,7 \cdot 0,173 \cdot 247 = 18,9 \text{ kPa}$$

Kaava 6:

$$s_{\text{maa}} = \frac{\Delta h \cdot q_{\text{maa}}}{(1-a) \cdot M} = \frac{7 \cdot 18,9}{(1-0,173) \cdot 550} = 290$$

$$\varepsilon_{\text{maa}} = \frac{s_{\text{maa}}}{\Delta h} = \frac{0,290}{7} = 0,041 > 0,03 \% \text{ (sallittu)}$$

Kokeillaan k/k-väliä 1,15 m. Pilarien suhteellinen pinta-ala a on 0,214.

Kaava 13:

$$q_{\text{maa}} = q_0 - 0,7 \cdot a \cdot \sigma_{\text{murto}} = 2,5 \cdot 20 - 0,7 \cdot 0,214 \cdot 247 = 12,1 \text{ kPa}$$

Kaava 6:

$$s_{\text{maa}} = \frac{7 \cdot 13,0}{(1-0,214) \cdot 550} = 210 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{\text{maa}} = \frac{0,210}{7} = 0,030 \cong 0,03 \% \Rightarrow \text{suhteellinen kokoonpuristuma OK}$$

Kaava 14: Konsolidaatioaste $U = 87$ % 6 kuukaudessa (kaksisuuntainen konsolidaatio, pilarit yksinkertaisessa neliöverkostossa). Vastaavasti $U = 93$ % 8 kuukaudessa.

