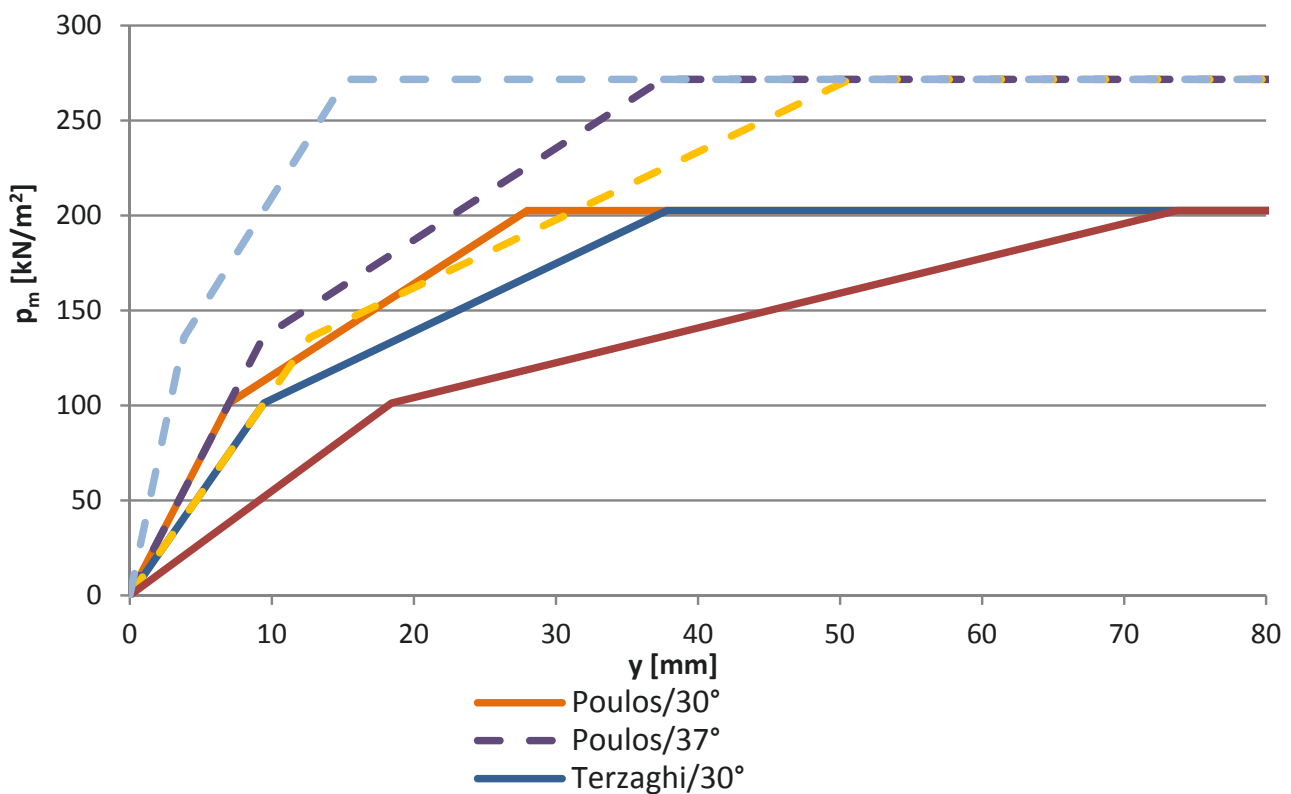


HANNA RASI-KOSKINEN

## Vaakasuuntaiset alustaluvut paaluperusteisissa silloissa



*Laskennalliset sivupaine-siirtymä-kuvaajat hienossa hiekassa syvyydessä -2,5 m maanpinnasta.*



Hanna Rasi-Koskinen

# Vaakasuuntaiset alustaluvut paaluperusteisissa silloissa

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 34/2015

Liikennevirasto  
Helsinki 2015

*Kannen kuva: Hanna Rasi-Koskinen*

Verkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-109-1

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

**Hanna Rasi-Koskinen: Vaakasuuntaiset alustaluvut paaluperusteisissa silloissa.** Liikennevirasto, Infra ja ympäristö -osasto. Helsinki 2015. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 34/2015. 96 sivua ja 13 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-109-1.

**Avainsanat:** Vaakakuormitettu paalu, alustaluku, sivuvastus, vaakakuormitus, FEM-jousimalli, Terzaghi, Poulos, Vesic

## Tiivistelmä

Vaakakuormitettua paalua tarkastellaan usein mallilla, jossa maaperä on kuvattu vaakasuuntaisina jousina. Suunnittelussa maaperän jousien jäykkyyksien määrittäminen alustalukujen avulla nykyisten suunnitteluohjeiden perusteella on osoittautunut ongelmalliseksi. Suomalaisissa suunnitteluohjeissa on annettu vaakasuuntaisten alustalukujen laskentaa varten yhtälöitä ja kuvia, mutta laskennan taustalla olevaa teoriaa ei ole avattu ja usein myös lähdeviittaukset puuttuvat. Suunnitteluohjeet sisältävät osin myös ristiriitaisia tietoja alustalukujen laskennan osalta. Diplomityön tavoitteena oli selvittää suomalaisten suunnitteluohjeiden mukaisen vaakasuuntaisten alustalukujen laskennan teoriaa. Diplomityössä selvitettiin mitä alustalukujen laskentamenetelmiä erityisesti suomalaisissa suunnitteluohjeissa on esitetty, ja miten maan ja paalun on oletettu käyttäytyvän vaakakuormituksen alaisena. Myös eurokoodeja käsiteltiin alustalukujen ja vaakasiirtymien näkökulmasta. Työssä tutkittiin alustalukujen herkkyyttä maaparametrien muutoksille suunnitteluvaiheessa olevan Syväyksen kevytliikennesilta-kohteen avulla ja etsittiin parhaiten mitattuja siirtymiä vastaavia alustalukujen laskentamenetelmiä kitka-, koheesio- ja kerroksellisessa maassa koekuormitettujen kohteiden avulla. Lisäksi suunnittelua helpottamaan kehiteltiin alustalukujen laskennan excel-taulukko.

Alustalukujen herkkyyksianalyyseissa todettiin kitkamaassa Terzaghin ja Poulosin menetelmien olevan mitoituksen kannalta riittävän vakaita maaparametrien muutoksille, kun maaparametrit on tulkittu maalajin mukaisesti kairausvastukseen perustuen. Suunnitteluohjeissa esitetyllä leikkauskestävyyskulman perusteella määräytyvät alustaluvut olivat puolestaan hyvin herkkiä jo pienille leikkauskestävyyskulman muutoksille. Koheesiomaassa suljettuun leikkauslujuuteen perustuva menetelmä todettiin herkkyyksianalyysin perusteella suunnitteluun hyvin soveltuva menetelmäksi sekä lyhyt- että pitkäaikaisissa kuormitustilanteissa, kun suljettu leikkauslujuus on arvioitu esimerkiksi siipikairausten perusteella. Poulosin menetelmä soveltuu myös koheesiomaan pitkäaikaisten vaakakuormitusten tarkasteluun.

Mitattuja siirtymiä hienossa hiekassa vastasivat parhaiten Terzaghin ja Poulosin mukaisilla alustaluvuilla lasketut siirtymät. Siltissä kaikki laskentamenetelmät antoivat mitattua siirtymää huomattavasti suurempia siirtymän arvoja. Siltissä laskennoissa mukana ollut Vesicin menetelmä, jota ei ole esitetty suomalaisissa suunnitteluohjeissa, antoi samaa suuruusluokkaa olevia siirtymän tuloksia kuin muutkin laskentamenetelmät. Selvää eroa siirtymien arvoissa ei tullut siitä, oliko siltti todettu kitka- vai koheesiomaaksi. Koheesiomaan osalta todettiin lisää lyhyt- ja pitkäaikaisia koekuormituksia tarvittavan.

Tarkasteluissa oli mukana myös koekuormitettu paaluryhmä kerroksellisessa maassa. Redusoidulla alustalukuja saatiin laskennalliset siirtymät paaluryhmässä vastaamaan parhaiten mitattuja siirtymiä, kun alustaluvut laskettiin kitkamaaosuudella Terzaghin tai Poulosin menetelmillä ja koheesiomaosuudella lyhytaikaisen kuormituksen leikkauslujuuden menetelmällä. Suunnitteluohjeiden mukainen redusointimenetelmä ei huomioi kuormituksen jakautumista epätasaisesti eri paalurivien kesken. Jotta kuormituksen epätasainen jakautuminen voidaan huomioida, tulee selvittää esimerkiksi ulkomailta yleisesti käytössä olevan paaluun kohdistuvan maan sivuvastuksen pienennyskertoimiin ("*reduction factor*") perustuvan menetelmän soveltamista suomalaisiin suunnitteluohjeisiin ja FEM-jousi -malliin.

Työn yhteydessä löydettiin useita jatkotutkimustarpeita. Tutkimuksessa selvisi, että myös Ruotsissa ja Norjassa vaakakuormitettuja paaluja on tutkittu varsin vähän. Työn perusteella suomalaisia suunnitteluohjeita tulee täydentää ja selkeyttää alustalukulaskennan osalta.

**Hanna Rasi-Koskinen: Horisontella grundvärden i broar med pålad grund.** Trafikverket, infrastruktur och miljö avdelningen. Helsingfors 2015. Trafikverkets undersökningar och utredningar 34/2015. 96 sidor och 13 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-109-1.

## Sammanfattning

Horisontellt belastade pålar undersöks ofta med en mall där marken avbildas som horisontella fjädrar. Det har visat sig problematiskt att fastställa grundvärdena för stelheten i markens fjädring baserat på nuvarande planeringsanvisningar. Finländska planeringsanvisningar innehåller ekvationer och bilder för beräkning av horisontella grundvärden, men teorin bakom beräkningarna har inte preciserats och ofta saknas till och med källhänvisningar. Planeringsanvisningarna innehåller delvis även motstridiga uppgifter vad gäller beräkning av grundvärden. Diplomarbetets målsättning är att utreda teorin bakom de finländska planeringsanvisningarna gällande beräkning av horisontella grundvärden. Under diplomarbetet undersöktes vilka metoder för beräkning av grundvärden man använder i de finländska planeringsanvisningarna, och hur marken och pålen har ansetts bete sig vid horisontell belastning. Även eurokoder behandlades med inriktning på grundvärdena och de horisontella rörelserna. I arbetet undersöktes grundvärdenas känslighet för förändringar i jordparametrarna, med hjälp av ett testbelastat djupgående broprojekt för lättare trafik, som var under planering, och vi sökte efter de beräkningsmetoder för grundberäkning i friktions-, kohesions- och skiktjord som bäst motsvarade de uppmätta förskjutningarna. För att underlätta planeringen skapades även en excel-tabell för beräkning av grundvärden.

I känslighetsanalysen av grundvärdena konstaterades att Terzaghis och Poulos metoder för friktionsjord inte var tillräckliga för mätning vid förändrade jordparametrar, då jordparametrarna tolkats efter jordtyper som faststälts genom borrhning. Grundvärdena som i planeringsanvisningarna faststälts efter skjuvhållfasthetens vinkel var mycket känsliga redan för små förändringar i skjuvhållfasthetsvinkeln. Metoden som baserats på slutna skjuvhållfasthet i kohesionsjord konstaterades enligt känslighetsanalysen vara en lämplig metod i planeringen, både vid långvariga och kortvariga belastningssituationer, då den slutna skjuvhållfastheten bedömts till exempel genom provtagningar. Poulos metod lämpar sig även för undersökning av långvarig horisontell belastning i kohesionsjord.

Uppmätta förskjutningar i finsand motsvarade bäst de förskjutningar som beräknats enligt Terzaghis och Poulos grundvärden. I silt gav samtliga beräkningsmetoder betydligt högre förskjutningsmätvärden. I silt-beräkningarna med Vesicis metod, som inte har presenterats i finländska planeringsanvisningar, var förskjutningsresultaten i samma storleksklass som med de övriga beräkningsmetoderna. Tydliga skillnader i förskjutningsvärdena berodde inte på om silten konstaterats vara friktions- eller kohesionsjord. Vad gäller kohesionsjord så konstaterades att det krävs mer av både kortvariga och långvariga belastningstester.

Vid undersökningarna testbelastades även en grupp av pålar i jord med olika skikt. Genom att reducera grundvärdena fick vi de uppskattade förskjutningarna i pålgruppen att bäst motsvara de uppmätta förskjutningarna, då grundvärdena i friktionsjord beräknades med Terzaghis och Poulos metoder och metoden för skjuvhållfasthet vid kortvarig belastning av kohesionsjorddelen. Reduceringsmetoden i planeringsanvisningarna tar inte hänsyn till ojämn fördelning av belastningen mellan olika pålrader. För att kunna ta hänsyn till ojämn fördelning av belastningen bör man utreda om till exempel den i utlandet allmänt använda metoden med reduktionskoefficient ("*reduction factor*") för sidomotstånd på pålar kan tillämpas i finländska planeringsanvisningar och i FEM-fjädringsmallen.

Under arbetet upptäcktes ett stort behov av fortsatta undersökningar. Vid undersökningen framkom att horisontella pålar har undersökts ytterst lite även i Sverige och Norge. Baserat på arbetet, bör de finländska planeringsanvisningarna kompletteras och förtydligas vad gäller grundberäkningarna.

**Hanna Rasi-Koskinen: Horizontal modulus of subgrade reaction in pile-founded bridges.** Finnish Transport Agency, Infrastructure and Environment Department. Helsinki 2015. Research reports of the Finnish Transport Agency 34/2015. 96 pages and 13 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-109-1.

## Summary

Laterally loaded pile is often examined by the model where soil is replaced with lateral springs. Determining the rigidity of the springs with subgrade modulus by current design recommendations is proved to be problematic. In Finnish design recommendations equations and figures are given to calculating the modulus of subgrade reaction, but the theory behind equations is not explained properly and source references are often missed. Design recommendations also comprise some conflicted information about calculating the modulus of horizontal subgrade reaction. The aim of this master's thesis was to clarify the calculation theories behind the equations of the modulus of horizontal subgrade reaction in Finnish design recommendations. In master's thesis it was explored which calculation methods are presented especially in Finnish design recommendations, and how soil and pile are assumed to behave under lateral load. Also eurocodes were handled by the perspective of the modulus of subgrade reaction and lateral displacement. Sensitivity of the modulus of subgrade reaction to changes in the soil parameters was examined by the case of Syväys bridge which is in a design stage, and the calculating methods of the modulus of subgrade reaction that fitted best the measured displacements of earlier loading test cases were searched in cohesive, non-cohesive and layered soil. Also excel sheet for calculating the modulus of subgrade reaction was developed to facilitate design.

In the sensitivity analysis it was found that in non-cohesive soil the methods of Terzaghi and Poulos were quite stable to the changes in the soil parameters, when the parameters were estimated by the sounding resistance of the soil type. The modulus of subgrade reaction that was defined by the friction angle rested on design recommendations was whereas very sensitive to even small changes in the friction angle. In cohesive soil the method that is based on undrained shear strength was found to be suitable for design in both short- and long-term loading situations, when undrained shear strength is estimated for example by vane auger. The method of Poulos is also valid for examination of long-term horizontal loading in cohesive soil.

In fine sand the displacements that were calculated with the modulus of subgrade reaction by the methods of Terzaghi and Poulos fitted the most precise with measured displacements. In silt all calculation methods gave considerably higher displacements than were measured. The method of Vesic that was included in calculations in silt, but which is not presented in Finnish design recommendations, gave displacements of the same magnitude as other methods. Clear difference in displacements did not cause that if the silt was assumed to be cohesive or non-cohesive. In cohesive soil it was verified that more loading tests are needed in both short- and long-term loadings.

Also laterally loaded pile group in layered soil was analysed. Calculated displacements by reducing the modulus of subgrade reaction corresponded the best the measured displacements, when the modulus of subgrade reaction was calculated in non-cohesive soil parts by the methods of Terzaghi or Poulos and in cohesive soil parts by shear strength in short-term loading. The reducing method that is presented in design recommendations does not take into account that loading is distributed unevenly between different pile rows. In order to take into consideration the unevenly distributed load, it has to be studied for example how to apply the method that is generally used internationally which uses reduction factors for the resistance of the soil to the Finnish design recommendations and FEM-spring -model.

Many further research topics were found during study. In the research it was founded that also in Sweden and Norway laterally loaded piles are not investigated widely. Based on this study Finnish design recommendations need to be supplemented and clarified.

## Esipuhe

Vaakakuormitetun paalun ja maan yhteistoiminnan ymmärtäminen on tärkeää paalu-perusteisten siltojen suunnittelussa. Sillat suunnitellaan pääsääntöisesti rakennemalleja käyttäen, missä maan paaluille antamaa vaakasuuntaista tukea ja sivuvastusta usein kuvataan epälineaarisilla jousilla, joiden jäykkyydet määritetään alustalukujen avulla. Tämän työn tarkoituksena oli selvittää vaakakuormitetun paalun käyttäytyminen, suomalaisissa ja muissa pohjoismaisissa suunnitteluohjeissa esitetyt alustalukulaskentamenetelmät ja niiden soveltuvuus ja tuoda esiin suunnitteluohjeiden kehitystarpeet aiheeseen liittyen.

Tutkimus oli Oulun Yliopiston Teknillisen tiedekunnan opiskelijan Hanna Rasi-Koskisen diplomityö, ja sen rahoittajina toimivat Liikennevirasto, Pohjanmaan ELY-keskus ja Ramboll Finland Oy. Diplomityön ohjausryhmässä toimivat seuraavat henkilöt:

- Kauko Kujala, Oulun Yliopisto (työn valvoja)
- Anne Tuomela, Oulun Yliopisto (työn ohjaaja)
- Veli-Matti Uotinen, Liikennevirasto
- Panu Tolla, Liikennevirasto
- Ari Kuotesaho, Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus
- Virpi Kaarakainen, Ramboll Finland Oy (työn ohjaaja)
- Jouni Tiainen, Ramboll Finland Oy
- Markku Salo, Ramboll Finland Oy

Helsingissä toukokuussa 2015

Liikennevirasto  
Infra ja ympäristö -osasto



# Sisällysluettelo

1	JOHDANTO .....	9
2.1	Siltarakenteet.....	10
2.2	Paaluperustukset.....	12
2.2.1	Paalujen ryhmittely.....	12
2.2.2	Paalujen rasitukset .....	15
3	MAAN JA PAALUN KÄYTTÄYTYMINEN SIVUKUORMITUKSESSA .....	17
3.1	Maan muodonmuutoskäyttäytyminen.....	17
3.2	Passiivinen maanpaine.....	19
3.2.1	Passiivinen maanpaine Pohjarakennusohjeiden 2004 mukaisesti.....	20
3.2.2	Passiivinen maanpaine eurokoodien mukaisesti .....	21
3.3	Paalun sivukuormitus ja -vastus.....	22
3.3.1	Yksittäisen paalun sivukuormitus ja -vastus .....	23
3.3.2	Paaluryhmän sivukuormitus ja -vastus .....	26
3.4	Paalun sivukapasiteetti .....	26
3.5	Paalun kiertyminen ja murtomekanismit.....	27
3.6	Paalun vaakasiirtymät .....	30
4	VAAKASUUNTAISET ALUSTALUVUT .....	31
4.1	Alustaluku staattisessa kuormitustilanteessa .....	32
4.1.1	Alustaluku karkearakeisessa maassa ja moreenissa.....	32
4.1.2	Alustaluku hienorakeisessa maassa.....	37
4.1.3	Sekä kitka- että koheesiomaahan soveltuvat alustaluvun määrittämisen menetelmät.....	39
4.1.4	Alustaluku kerroksellisessa maassa .....	40
4.1.5	Alustaluku luiskassa .....	41
4.2	Alustaluku syklisessä kuormituksessa .....	42
4.3	Alustaluku paaluryhmissä .....	43
4.4	Sivupaineen ja siirtymän yhteys.....	44
4.4.1	Sivupaineen ja siirtymän yhteys kitkamaassa.....	44
4.4.2	Sivupaineen ja siirtymän yhteys koheesiomaassa .....	45
4.4.3	Sivupaineen ja siirtymän yhteys paaluryhmissä.....	46
5	FEM-JOUSIMALLI.....	47
5.1	Elementtimenetelmä.....	47
5.2	Maan ja paalun elementti-jousimalli .....	47
6	EUROKOODIT .....	50
6.1	Siltoja koskevat suunnittelustandardit .....	50
6.2	Geotekniset luokat .....	50
6.3	Seuraamusluokat.....	50
6.4	Kuormat ja kuormien vaikutukset .....	51
6.5	Käyttö- ja murtorajatila.....	52
6.6	Mitoitustavat DA2 ja DA2* .....	52
7	LASKENTAKOHTEIDEN KUVAUS .....	54
7.1	Syväyksen kevytliikennesilta .....	54
7.2	Koekuormitettu paalu hienossa hiekassa (Koskinen 1990) .....	54
7.3	Koekuormitettu paalupari siltissä (Nirhamo 1995) .....	56
7.4	Koekuormitettu paaluryhmä kerroksellisessa maassa.....	57

8	LASKENTATULOSTEN ANALYSOINTI .....	61
8.1	Alustalukujen herkkyys maaparametrien muutoksille .....	61
8.2	Siirtymät hienossa hiekassa.....	66
	8.2.1 Laskennalliset alustaluvut .....	66
	8.2.2 Laskennalliset rajasiirtymät ja jousivakiot.....	67
	8.2.3 Siirtymien vertailu.....	70
8.3	Siirtymät siltissä.....	73
	8.3.1 Laskennalliset alustaluvut .....	73
	8.3.2 Laskennalliset rajasiirtymät ja jousivakiot.....	75
	8.3.3 Siirtymien vertailu.....	78
8.4	Siirtymät paaluryhmässä kerroksellisessa maassa .....	82
	8.4.1 Laskennalliset alustaluvut .....	82
	8.4.2 Laskennalliset rajasiirtymät ja jousivakiot.....	83
	8.4.3 Siirtymien vertailu.....	84
	8.4.4 Kuormitusten vertailu.....	87
9	LASKENTATULOSTEN YHTEENVETO .....	88
9.1	Alustalukujen herkkyystarkastelut.....	88
9.2	Laskennalliset ja mitatut siirtymät.....	88
10	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	90
11	LÄHDELUETTELO .....	92

#### LIITTEET

Liite 1	Yleisimpiä paaluperusteisia siltarakennetyyppejä.
Liite 2	Eurokoodien mukaiset nomogrammit passiivisen maanpainekertoimen määrittämiseksi.
Liite 3	Taulukot maakerrosten lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin kairausvastuksen perusteella.
Liite 4	Sivupaineen pienennyskertoimet paaluryhmissä.
Liite 5	STR/GEO -mitoitusprosessi menetelmillä DA2 ja DA2*.
Liite 6	Muhos vt22: Syväyksen kevytliikennesilta.
Liite 7	Koekuormitettu paalu hienossa hiekassa: lähtötietoja.
Liite 8	Koekuormitettu paalu siltissä: lähtötietoja.
Liite 9	Koekuormitettu paaluryhmä kerroksellisessa maassa: lähtötietoja.
Liite 10	Alustalukujen herkkyystarkastelut Syväyksen kevytliikennesillalla (Muhos)
Liite 11	Koekuormitettu paalu hienossa hiekassa: laskennat.
Liite 12	Koekuormitettu paalupari siltissä: laskennat.
Liite 13	Koekuormitettu paaluryhmä kerroksellisessa maassa: laskennat.

# 1 Johdanto

Paalua vasten voi syntyä vaakasuuntaisia kuormituksia esimerkiksi maanpaineen, lämpölaajenemisen ja -kutistumisen, jarrukuorman, jääkuorman sekä tuulikuorman vaikutuksesta. Vaakasuuntaisista kuormituksista sillan paaluille aiheutuvat siirtymät ja momentit tulee selvittää paaluperusteisen sillan suunnittelussa. Laskenta tapahtuu usein FEM-jousi -mallilla, missä maa kuvataan vaakasuuntaisten epälineaaristen jousien avulla. Suunnittelussa maaperän jousien jäykkyysien määrittäminen alustalukujen avulla nykyisten suunnitteluohjeiden perusteella on osoittautunut ongelmalliseksi.

Suunnitteluohjeissa on annettu alustalukujen laskentaa varten yhtälöitä ja kuvia, mutta laskennan taustalla olevaa teoriaa ei ole avattu ja usein myös lähdeviittaukset puuttuvat. Lisäksi suunnitteluohjeet sisältävät osin ristiriitaisia tietoja alustalukujen laskennan osalta. Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää paaluperusteisten siltojen suunnitteluohjeiden mukaisen alustalukulaskennan taustalla olevaa teoriaa maan ja paalun käyttäytymisestä vaakasuuntaisen kuormituksen alaisena. Työssä etsittiin parhaiten mitattuja siirtymiä vastaavia alustalukujen laskentamenetelmiä kitka-, koheesio- ja kerroksellisessa maassa aikaisempien koekuormitettujen kohteiden avulla, ja lisäksi tutkittiin eri alustalukumenetelmien herkkyyksiä maaparametrien muutoksille suunnitteluvaiheessa olevan Syväyksen kevytliikennesiltakohteen avulla. Työn tavoitteena oli myös kehittää kerrokselliselle maalle soveltuva alustalukujen laskennan excel-taulukko, jota voidaan jatkossa hyödyntää suunnittelussa.

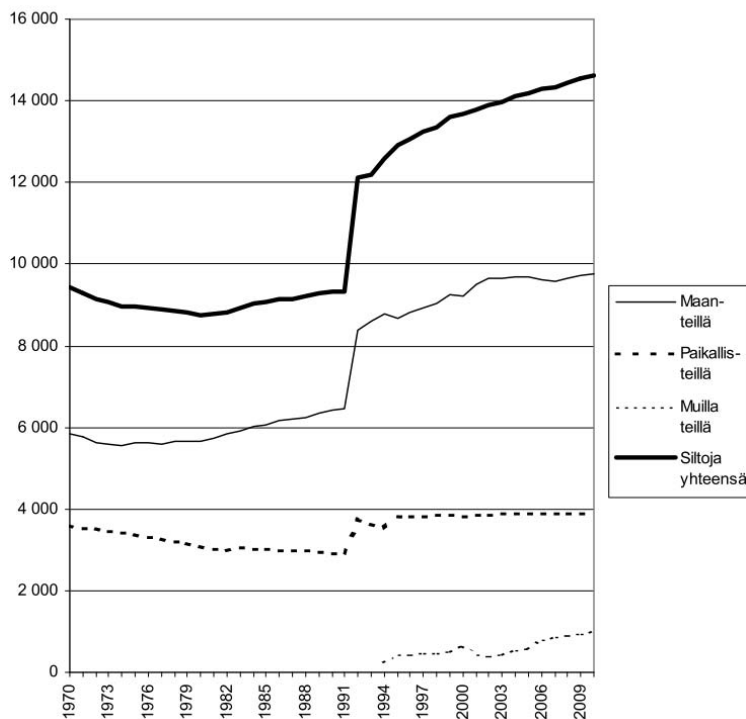
Diplomityön alkuosassa selvitettiin maan ja paalun käyttäytymistä kuormituksen alaisena aikaisempiin tutkimuksiin, julkaisuihin ja kirjallisuuteen perustuen. Varsinaisessa alustalukuihin keskittyvässä osiossa selvitettiin, mitä eri laskentamenetelmiä on käytössä vaakasuuntaisten alustalukujen määrittämiseksi, ja mitä laskentamenetelmiä voidaan käyttää erilaisissa maaperissä. Diplomityössä keskityttiin suomalaisissa suunnitteluohjeissa esitettyihin suhteellisen yksinkertaisiin menetelmiin, joiden on kuitenkin todettu olevan riittävän luotettavia menetelmiä vaakasuuntaisten alustalukujen määrittämiseksi. Lisäksi on esitetty muutamia yleisesti kirjallisuudessa ja ulkomaisissa tutkimuksissa esiintyviä menetelmiä. Alustalukujen tarkasteluissa keskityttiin staattisen kuormituksen tilanteeseen ja dynaamisen kuormituksen tarkastelu on rajattu pois työstä. Työssä selvitettiin myös eurokoodien vaikutusta alustalukulaskentaan.

Diplomityön loppuosassa keskityttiin laskentakohteiden tarkasteluun. Suunnitteluvaiheessa olevalle Syväyksen kevytliikennesillalle laskettiin alustalukuja eri menetelmillä ja selvitettiin menetelmien herkkyyksiä maaparametrien muutoksille. Maaperä Syväyksen kevytliikennesillalla on kerroksellista. Varsinaisia koekuormitettuja kohteita oli työssä mukana kolme kappaletta. Koekuormitukset on tehty aikaisempiin tutkimuksiin liittyen yksittäisille paaluille hiekassa ja siltissä sekä lisäksi paaluryhmälle kerroksellisessa maassa. Kuormitettujen kohteiden valinnan kriteerinä oli riittävän lähtötiedon määrä. Koekuormituskohteissa eri menetelmillä saatujen alustalukujen avulla laskettuja siirtymän arvoja vertailtiin mitattuihin siirtymiin, ja tämän perusteella pääteltiin alustalukujen laskentaan parhaiten soveltuvat menetelmät. Siirtymät laskettiin elementtimenetelmään perustuvilla Lusas Bridge ja Sofistik -ohjelmistoilla. Työn pohjalta löydettiin useita jatkotutkimustarpeita.

## 2 Paaluperusteiset siltarakenteet

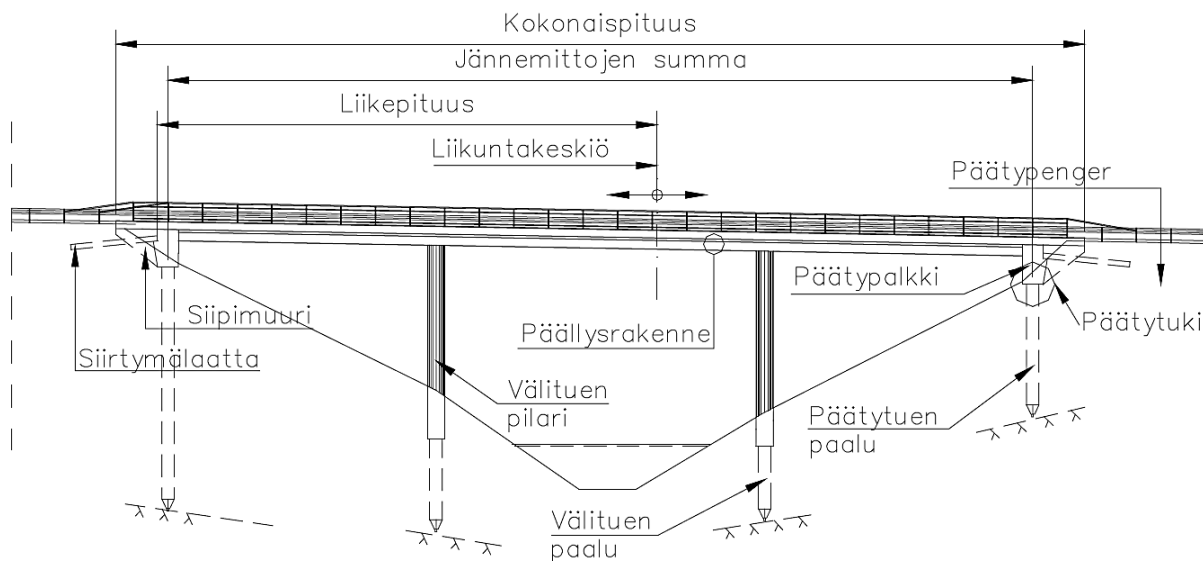
### 2.1 Siltarakenteet

Suomessa on yli 20 000 siltaa, joista vuoden 2014 tilastojen mukaan maantiesiltoja oli 14 900 (Tiehallinto 2014) ja vuoden 2009 tilastojen mukaan rataverkossa olevia siltoja 3 149 (Ratahallintokeskus 2009). Vuonna 2005 tehdyn selvityksen perusteella uusia siltoja rakennetaan vuosittain noin 250 kpl, joista ajoneuvoliikenteen siltoja on noin 200, ratasiltoja 35 ja kevyenliikenteensiltoja 15 (Laaksonen 2005: 12). Kuva 1 esittää Liikenneviraston hallinnoimien siltojen määrän kehittymistä vuodesta 1970 vuoteen 2010.



Kuva 1. Liikenneviraston hallinnoimien siltojen lukumäärän kehitys 1.1.1970–1.1.2010 (Liikennevirasto 2010: 14).

Silta koostuu alus- ja päällysrakenteesta. Kuvassa 2 on esitetty sillan rakenneosien ja termien nimiä. Alusrakennetta ovat välituet, päätytukien paalut ja mahdollinen erillinen päätytuki. Päätytuki yhdistää siltarakenteen muuhun liikenneväylään. Päällysrakenteeseen kuuluvat kansirakenne, pintarakenteet, varusteet ja laitteet, päätytuki sekä siipimuurit. Päätypenkereellä tarkoitetaan päätytuen takana olevaa maapenger-tä ja pengerialueita. Sillan kokonaispituudella tarkoitetaan siipimuurien päiden välis-tä suurinta etäisyyttä mitattuna sillan reunalinjoja pitkin. Jännemittojen summa on sillan päätytukien tukilinjojen etäisyys mitattuna sillan keskilinjaa pitkin. Liikunta-keskiöllä tarkoitetaan paikkaa, jonka oletetaan pysyvän paikoillaan sillan pituuden muuttuessa lämpötilan vaihteluiden seurauksena. Liikuntakeskiö määritetään silta-rakenteen eri osien jäykkyyksien suhteessa. Liikepituudella tarkoitetaan liikunta-keskiön etäisyyttä päätypenkereen- ja tuen rajapintaan. (Laaksonen 2005: 15–16)



Kuva 2. Sillan termejä (Laaksonen 2005: 15).

Liitteessä 1 on esitetty yleisesti käytettyjä paaluperusteisia siltarakennetyyppejä. Liitteen 1 kuvissa 1–2 on esitetty neljälle teräsputkipaalulle perustettu yksiaukkoinen paalupilariperusteinen vesistösilta. Liitteen 1 kuvien 1–2 sillalla maatuet on perustettu paalulaatan varaan lyöntipaaluilla. Yleensä massiiviset maatuet perustetaan lyöntipaalujen varaan. Paalupilariperusteisessa sillassa maan päällä oleva pilari jatkuu maan alla suoraan paaluna eikä erillistä laattaa pilarin ja paalun väliin tarvita. Paalun lähtötaso voidaan asettaa lähelle maanpintaa. Tämä helpottaa erityisesti vesistösilloissa rakennusvaiheen työtä, sillä paalun ja pilarin liitos voidaan tehdä kuivatyönä. Paalut ovat yleensä teräsputki-, pora- tai kaivinpaaluja. Paalupilariperustuksissa ei tarvita laakereita pilarin ja siltarakenteen liitoksessa, mikä helpottaa sillan huolto- ja kunnossapitotyötä. Paalupilariperusteinen silta on edullinen siltaratkaisu, sillä rakenne on yksinkertainen ja vaatii vähemmän paaluja kuin teräsbetonisilla lyöntipaaluilla perustettu silta. Teräsbetonisten lyöntipaalujen kantavuus ei ole yhtä suuri kuin suuriläpimittaisten pora- tai putkipaalujen, joten niiden määrä on suurempi kuin vastaavasti pora- tai putkipaalujen määrä olisi. Teräsbetoniset lyöntipaalut vaativat peruslaatan pilarin ja paalujen väliin. Myös suurpaalut voidaan sijoittaa toisiinsa peruslaatan alapuolella. Liitteen 1 kuvissa 3–4 on esitetty moniaukkoinen silta, jossa on käytetty teräsbetonisia lyöntipaaluja tukilinjoilla T4 ja T5. (Tiainen 2014)

Liitteen 1 kuvissa 5–6 on esitetty pitkän sillan tyypillinen perustaminen paaluilla. Silta on viisiaukkoinen tiesilta, jossa välituet on perustettu paalupilareilla. Päätytuet on perustettu maanvaraisesti, sillä kallio sijaitsee lähellä päätytukien perustamistasoa. Päälysrakenne on tuettu liikkuvilla laakereilla päätytuella. Lähimpänä päätytukia olevilla välituilla päälysrakenne on tuettu laakereilla ja muilla välituilla kiinteästi. Välitukien paalut ovat tässä kohteessa kaivinpaaluja. Yleisesti vastaavissa silloissa käytetään myös suuriläpimittaisia pora- ja teräsputkipaaluja. (Tiainen 2014)

Liitteen 1 kuvissa 7–8 on esitetty kolmiaukkoinen teräsputkipaaluilla perustettu silta, joka on vinossa alittavaan väylään nähden. Reunimaiset paalut sijaitsevat luiskassa päätypalkin edessä. Paalut jatkuvat suoraan kiinteästi kiinni päälysrakenteeseen. Liikenneviraston siltakohteissa kyseessä oleva ratkaisu ei ole enää ohjeiden mukaan

sallittu. Vinosti aukkoon nähden sijoitettuun siltaan kohdistuva maanpaine pyrkii aiheuttamaan päällysrakenteen kiertymistä vaakatasossa. (Tiainen 2014)

Liitteen 1 kuvassa 9 on esitetty paalupukkirakenteinen siltarakenne, mikä on tyypillinen vesistösilta-rakenne. Silta on seitsemänaukkoinen, ja välituet on perustettu paalupukkirakenteella. Välitukien paalut ovat tässä kohteessa kaivinpaaluja. Yleisesti vastaavissa kohteissa käytetään myös suuriläpimittaisia pora- ja teräspukkipaaluja. Silan päätytuet on tässä kohteessa perustettu maanvaraisesti. (Tiainen 2014)

## 2.2 Paaluperustukset

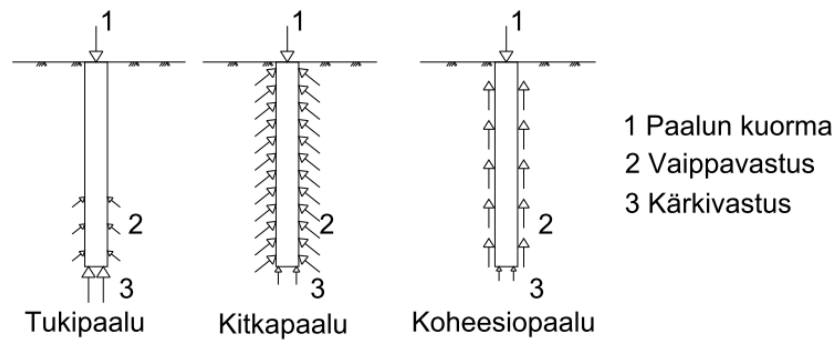
Paaluperustusta käytetään silloin, kun kantava maapohja on niin syvällä, että perustaminen perusmuurein, anturoin tai pilarein tiiviin pohjamaan varaan olisi kalliimpaa ja hankalampaa, tai pintakerrosten pehmeiden vuoksi ei maanvaraista antura- tai laattaperustusta voida käyttää. Siirrettävien siltojen yhteydessä paaluperustuksia käytetään myös kantavan maan tapauksessa.

### 2.2.1 Paalujen ryhmittely

Paalujen pääjako voidaan tehdä maata syrjäyttäviin ja maata syrjäyttämättömiin paaluihin. Lisäksi paaluja voidaan ryhmitellä toimintatavan, asennustavan ja materiaalin mukaan. Toimintatavaltaan paalut voivat olla tukipaaluja, kitkapaaluja tai koheesiopaaluja (ks. kuva 3). Paaluperusteisissa rakenteissa tulee ensisijaisesti selvittää tukipaalujen käyttömahdollisuus. Tukipaalu siirtää kuorman kärjen välityksellä kallioon tai tiiviiseen pohjakerrokseen. Osa kuormasta voi siirtyä myös vaippakitkan välityksellä ympäröivään maakerrokseen, mutta tämän osan suuruus on yleensä merkitykseltön (Helenelund 1974: 83).

Kitkapaalu siirtää pääosan kuormasta ulkopuolisen ja avoimen paalun tapauksessa myös sisäpuolisen vaippakitkan avulla ympäröivään maakerrokseen, ja osa kuormasta siirtyy myös putken kärjen välityksellä. Vaihtoehtoisesti kitkapaalu siirtää osan kuormasta ulkopuolisella vaippakitkalla, ja osa kuormasta siirtyy paalun alapäähän muodostuneen maatulpan välityksellä. Maatulppa syntyy paalun sisään tunkeutuneen maan ja sisäpuolisen vaippapinnan kitkan vaikutuksesta. (Tielaitos 1999b: 14) Kitkapaaluja käytettäessä perustettavien rakenteiden kuormitusjakauman tulee olla paalulle soveltuva, ja painumien sekä painumaerojen tulee pysyä rakenteen sallimissa rajoissa (LPO-87: 23).

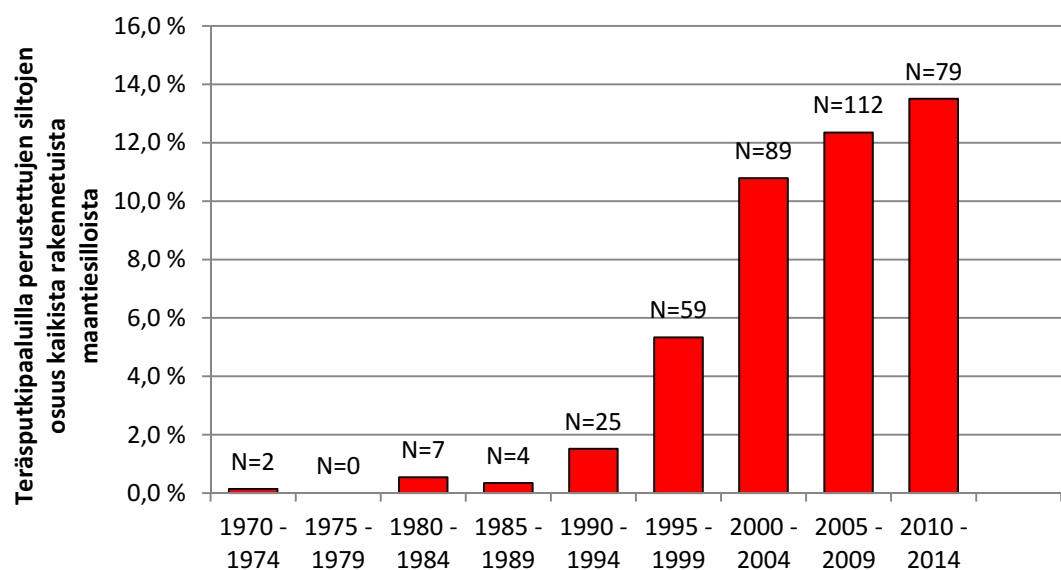
Koheesiopaalussa kuorma siirretään vaippapinnalla syntyvän adheesio välityksellä paalun kärkivastuksen ollessa hyvin pieni (Tielaitos 1999b: 15). Koheesiopaaluja voidaan käyttää pysyvissä rakenteissa ainoastaan silloin, kun koheesiomaakerros on erityisen paksu. Sallitut painumat ja painumien tasaisuus määrittävät koheesiopaalujen käyttökelpoisuuden. (SPO-78: 24)



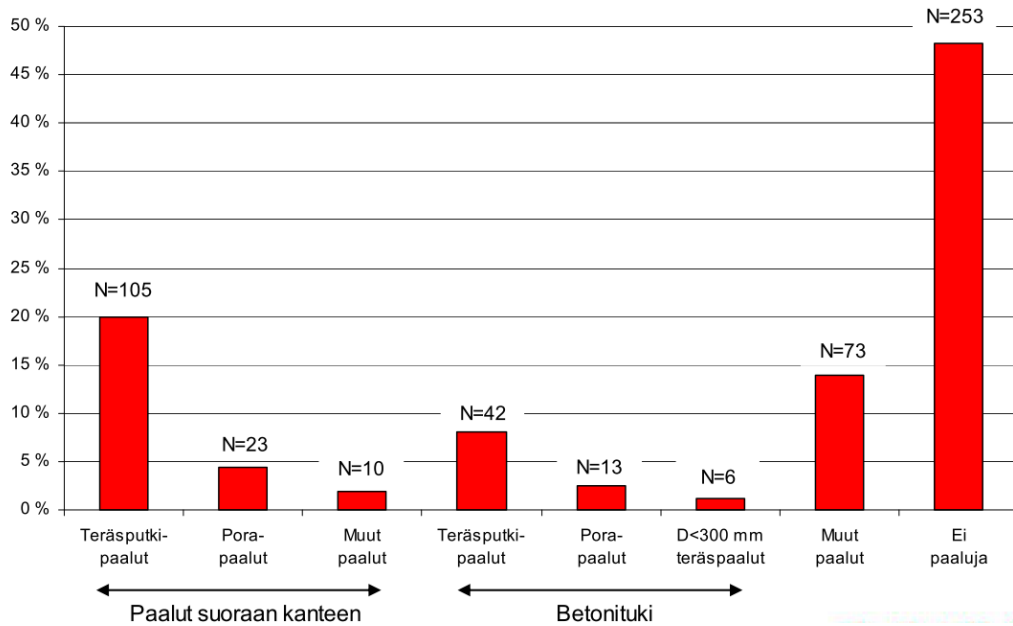
Kuva 3. Paalujen ryhmittely toimintatavan mukaan.

Paalut voidaan ryhmitellä materiaalin mukaan puupaaluihin, teräsbetonipaaluihin tai teräspaaluihin. Pysyvissä siltarakenteissa ei nykyisin käytetä puupaaluja. Poikkeuksen muodostaa kuitenkin vanhojen siltatukien hyväksikäyttö (Tielaitos 1999a: 40). Teräsbetoni- ja teräspaaluja käytetään yleensä tukipaaluina, mutta niitä voidaan käyttää myös kitkapaaluina. Lyömällä asennettavien teräsbetonipaalujen tavallisin poikkileikkaus on neliö, jonka sivun pituus on 250 mm, 300 mm (Slunga et al. 1974: 225; Rantamäki & Tammirinne 2002: 45) tai 350 mm (Uotinen 2014). Teräsbetonipaaluja käytetään yleisesti sillanrakentamisessa (Tielaitos 1999a: 40).

Teräspaaluina käytetään muototeräksestä koottuja reikäprofiileja, putkia, valssattuja profiileja sekä nelikulmisiä tai pyöreitä massiivisia teräksiä (Slunga et al. 1974: 230; Tielaitos 1999b: 8). Yleensä teräsputki- ja teräspalkkipaalut betonoidaan ja raudoitetaan sisältä. Teräspalkkipaalujen käyttö sillanrakentamisessa on lisääntynyt 1980-luvun lopulta lähtien. (Laaksonen 2005: 18; Tielaitos 1999b: 4) Kuvassa 4 on esitetty eri ajanjaksoina rakennettujen teräspalkkipaaluilla perustettujen maantiesiltojen lukumäärä. Kaikkiaan siltarekisterissä vuonna 2014 oli 507 kpl teräspalkkipaaluilla perustettua siltaa, joista Liikenneviraston hallinnassa 379 kpl maantiesiltoja (Uotinen 2014). Kuvassa 5 on esitetty Ratahallintokeskuksen siltojen perustamistavat vuosina 1987–2009.



Kuva 4. Eri ajanjaksoina rakennettujen teräspalkkipaaluilla perustettujen maantiesiltojen lukumäärä (Uotinen 2014).



Kuva 5. Ratahallintokeskuksen siltojen perustamistavat vuosina 1987–2009 (Jokinieniemi & Uotinen 2011).

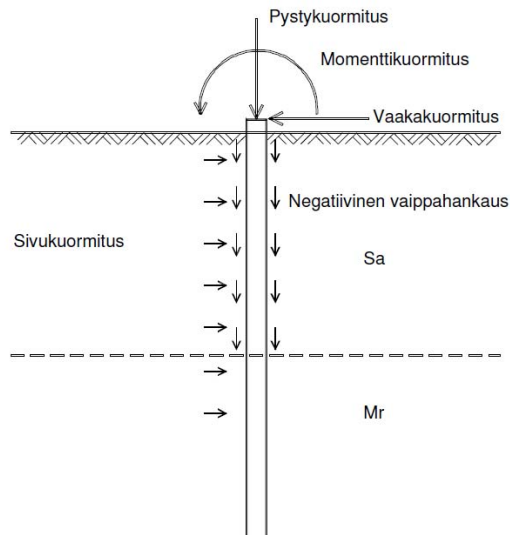
Maata syrjäyttävät paalut asennetaan maahan lyömällä, täryttämällä, puristamalla, ruuvaamalla tai näiden yhdistelmillä (RIL 254-2011: 15). Sillan rakentamisessa käytetään yleisesti lyöntikalustoa paalujen asentamiseksi. Myös täryttämällä voidaan asennaa erityisesti teräspaaluja ja mahdollisesti myös puupaaluja. (Uotinen 2014) Paaluja asennetaan täryttämällä, kun melu- ja värinähaittoja pyritään vähentämään tai kun vinopaaluja asennettaessa halutaan saada paaluun kohdistettua enemmän energiaa. Sillanrakentamisessa täryttämistä on käytetty myös väliaikaisten rakenteiden, kuten työtelineiden paaluperustuksissa. (Kopra 2013: 8-11) Puristuspaalut asennetaan maahan hydraulisilla tunkeilla, jolloin kuormituksen vastapainona toimii yleensä olemassa olevat rakenteet (RIL 254-2011: 201). Teräksiset ruuvipaalut ovat maahan kiertämällä asennettavia paaluja. Koneella asennettavia ruuvipaaluja käytetään esimerkiksi rata- ja sähköpylväisiin (Paalupiste Oy 2014).

Maata syrjäyttämättömät paalut tehdään maahan joko kaivamalla tai poraamalla. Kaivinpaalun ensimmäisessä työvaiheessa painetaan tai lyödään maahan alapäästään avointa työputkea samalla kun putkea hierretään edestakaisin pysty akselinsa ympäri. Putken sisälle tunkeutuva maa-aines poistetaan putken upotuksen edistytessä. Kun haluttu kaivussyvyys on saavutettu, asennetaan putkeen raudoitus ja paalu betonoidaan yleensä vedenalaista betonointimenetelmää käyttäen samalla työputkea ylös nostamalla kunnes paalu on valmis. (Rantamäki & Tammirinne 2002: 90) Paalujen porauksessa paalu tunkeutuu maahan pyörimisen, alaspäin suuntautuvan voiman sekä mahdollisen huuhtelun ja lyönnin yhdistelmällä. Porapaalut tehdään yleensä kallioon tukeutuvina tukipaaluina, jolloin paalun lujuus voidaan hyödyntää tehokkaasti. (Tiehallinto 2001b: 11) Porapaalut ovat kehittyneet ja syrjäyttäneet osakseen lyötävien teräsputkipaalujen asemaa sillanrakennuksessa (Laaksonen 2005: 18).



## 2.2.2 Paalujen rasitukset

Paaluun vaikuttavat ulkoiset kuormitukset voivat olla pysty-, vaaka-, momentti- ja sivukuormituksia sekä negatiivista vaippahankausta (ks. kuva 6). Paalut mitoitetaan siten, että ne kestävät paalun suuntaisten kuormien kanssa yhtäaikaaisesti kaikki taiputusrasituksia aiheuttavat tekijät (RIL 223-2005: 48).



Kuva 6. Paaluun kohdistuvat ulkoiset kuormitukset (RIL 223-2005: 46).

Pysyvää pystykuormitusta siirretään paaluilla karkearakeisiin maakerroksiin, moreenikerroksiin tai kalliolle. Hetkellisiä pystykuormituksia voidaan siirtää myös muihin maakerroksiin. Vaaka- ja momenttikuormitukset aiheuttavat paaluille taiputusrasituksia jakautuessaan maakerroksiin ja niitä voidaan siirtää paaluilla vain kohtalaisen vähän. (RIL 223-2005: 47)

Negatiivista vaippahankausta syntyy silloin, kun paalua ympäröivien maakerrosten painuma on suurempi kuin paalun painuma. Painumaa saattaa aiheuttaa täytemaa, pohjaveden aleneminen tai itse paalutustyö. Negatiivinen vaippahankaus aiheuttaa paalulle kuormituksen lisäyksen, joka huomioidaan paalun kantavuutta määritettäessä. Negatiivista vaippahankausta esiintyy pääasiassa savimaissa. Hiekkamaissa, joissa ei ole painuvia välikerroksia, ei negatiivista vaippahankausta tarvitse ottaa huomioon. (RIL 166-1986: 184-185)

Paaluille syntyy sivukuormitusta, kun paalun tai paaluryhmän sivukapasiteettia tai momenttikapasiteettia käytetään hyväksi tai kun maa liikkuu paaluja kohti. Maan liikkuminen paaluja kohti voi aiheutua esimerkiksi heikosta maaperän vakavuudesta tai paalutuksen aiheuttamasta maan siirtymästä. Sivukuormitus aiheuttaa paalulle taiputusrasituksen, joka on huomioitava paalun rakenteellisessa mitoituksessa. Sivukuormitusta ja taiputusrasituksia voivat aiheuttaa muun muassa kaivu paalutusalueella tai sen lähellä, paalutusalueella liikkuvat työkonet, paalun suuntaisen kuorman epäkeskisyys, maan painuminen vinopaalujen ympärillä ja paalun käyryys. (RIL 223-2005: 47-48)

Siltojen paalujen tärkeimmät rasitustiloja aiheuttavat laskennassa huomioitavat kuormitukset ovat rakenteiden omapaino, paaluihin kohdistuva maanpaine, lämpölaajeneminen ja -kutistuminen, tuulikuorma, jääkuorma, jarrukuorma sekä liikennekuorma. Näistä vaaka- ja sivukuormituksia aiheuttavat maanpaine, lämpölaajeneminen ja -kutistuminen, jarrukuorma, jääkuorma sekä tuulikuorma.

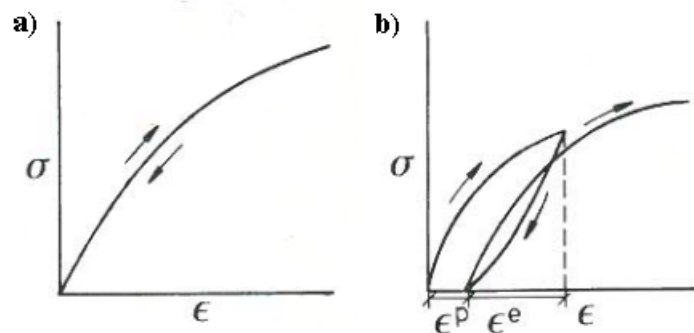
Kun paaluperusteisen rakenteen siirtymätila kasvaa merkittävästi, muuttuu rakenteen kyky ottaa vastaan kuormituksia. Rakenteen siirtymätila kasvaa vähitellen muun muassa kuormituksen ja materiaalien lujuusarvojen muuttumisesta sekä rakenneosien alkuepätkäarkkuuksista johtuen. Alkuepätkäarkkuuksilla tarkoitetaan paalun toteutuneen geometrian ja suunnitelman mukaisen geometrian välisiä poikkeamia. Siirtymätilan kasvaessa rakenteeseen syntyy sen stabiiliuden heikentyessä lisärasituksia, joita kutsutaan toisen kertaluvun rasituksiksi. Pelkille pystysuuntaisille paaluille perustetun sillan stabiilius voi olla heikompi kuin sellaisen sillan, jonka perustamisessa on käytetty myös vinoja paaluja vinojen paalujen tukiessa siltaa tehokkaammin sivusuunnassa. (Kahila 2010)

## 3 Maan ja paalun käyttäytyminen sivukuormituksessa

### 3.1 Maan muodonmuutoskäyttäytyminen

Maapohja on yleensä epähomogeenista, anisotrooppista ja epäjatkuvaa. Tämän vuoksi kiinteän aineen mekaniikasta johdetut materiaalin jännitys-muodonmuutos käyttäytymistä kuvaavat yhtälöt eivät suoraan päde maamateriaalille. Maan käyttäytymiseen jännityksen alaisena vaikuttavat monet maan ominaisuudet, kuten raemuoto, raekokojakauma ja tiiviys. (RIL 157-2: 13-15)

Maamateriaalille on tyypillistä epälineaarinen kimmainen käyttäytyminen, hystereesi, Bauschingerin ilmiö sekä varsinaisen vetolujuuden puuttuminen. Kimmoisella materiaalilla venymät riippuvat vallitsevasta jännitystilasta ja kappale palaa alkuperäiseen muotoonsa jännityksen poistuttua. Kuvassa 7a on esitetty epälineaarinen kimmainen käyttäytyminen. Epälineaarisen kuormitus-siirtymä -käyttäytymisen aiheuttaa pääasiassa paalun taakse syntyvän raon muodostuminen sekä maan paikallinen murtuminen. Hystereesi-ilmiö kuvaa sitä, ettei muodonmuutos-jännitys -polku yhdy kuormituksessa ja kuormituksen poistuttua (ks. kuva 7b). Bauschingerin ilmiöllä puolestaan tarkoitetaan sitä, että materiaali myötörajan ylittämisen jälkeen käyttäytyy eri tavalla vedossa ja puristuksessa. (RIL 157-2: 15-16; Koskinen 1990: 49)



Kuva 7. Muodonmuutos-jännitys -kuvaaja: a) epälineaarinen kimmainen käyttäytyminen b) saven käyttäytyminen suljetussa kolmiakσιαalikokeessa (muokattu: RIL 157-2: 15).

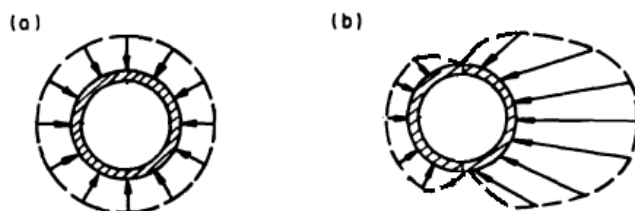
Kuormituksen vaikutuksesta tapahtuva muodonmuutos koostuu yleensä kimmoisesta ja plastisesta osasta. Kuormituksen alkuvaiheessa muodonmuutokset ovat lähes kimmoisia eli palautuvia. Kuormitusta lisättäessä materiaalin jännityksen ylittäessä myötörajan käyttäytyminen muuttuu nopeasti plastiseksi eli materiaali alkaa myötää ja kimmoiset muodonmuutokset poistuvat lähes kokonaan. Jännityksen edelleen kasvaessa myötöjännitystä suuremmaksi palautumattomat muodonmuutokset lisääntyvät, kunnes saavutetaan materiaalille ominainen murtotila. Murtotilan oletetaan valitsevan tarkasteltavan rakenteen pisteissä tai murtuvaan rakenteeseen muodostuneilla murtopinnoilla eli liukupinnoilla. (Davis & Selvadurai 2002: 1-2; RIL 157-2: 14-17)

Maa murtuu leikkausmurtumana siten, että murtuvaan maahan muodostuu liukupinta. Maan murtotilassa leikkausjännitykset ovat maan leikkauslujuuden suuruisia. Murtuminen voi tapahtua myös progressiivisesti eli leikkausjännitys kasvaa maan leikkauslujuutta vastaavaan arvoon eri aikana eri kohdissa murtopintaa. (Davis & Selvadurai 2002: 110–112; RIL 157-2: 14-18) Karkearakeisissa maalajeissa leikkauslujuus syntyy rakeiden välisestä kitkasta ja hienorakeisissa maalajeissa puolestaan rakeiden välisestä koheesiosta. Moreenimaalajien ja siltin leikkauslujuuteen vaikuttaa sekä kitka että koheesio. Coulombin ja Rankinen murtoteoriat ovat keskeisiä plastisen tilan maanpaineteorioita (ks. luku 3.2).

Kun paaluun kohdistuu sivukuormitusta, tapahtuu maan murtuminen joko liukupintamurtumana tai vaakasuuntaisena liikkeenä. Maan murtuminen lähellä maanpintaa tapahtuu liukupintamurtumana ja syvemmällä maan vaakasuuntaisena liikkeenä. Maa murtuu liukupinnan saavuttaessa maanpinnan. Liukupintamurtumassa paalun eteen kehittyvä kartiomainen liukupinta. Liukupinnan sisään jäävän kartion halkaisija on noin liukupinnan alapään ja maanpinnan välisen etäisyyden suuruinen. Syvemmällä ei muodostu liukupintaa, vaan murtuminen tapahtuu maan plastisoituessa paalun edessä ja sivuilla, jolloin paalu leikkautuu maamassan läpi. (Koskinen 1990: 51) Kitkamaassa syvyyden  $z \geq 15d$  (Koskinen 1990: 51) ja koheesiomaassa syvyyden  $z \geq 3d$  (Nylund 1971) jälkeen paalun päästä lukien murtuma tapahtuu vaakasuuntaisena liikkeenä.

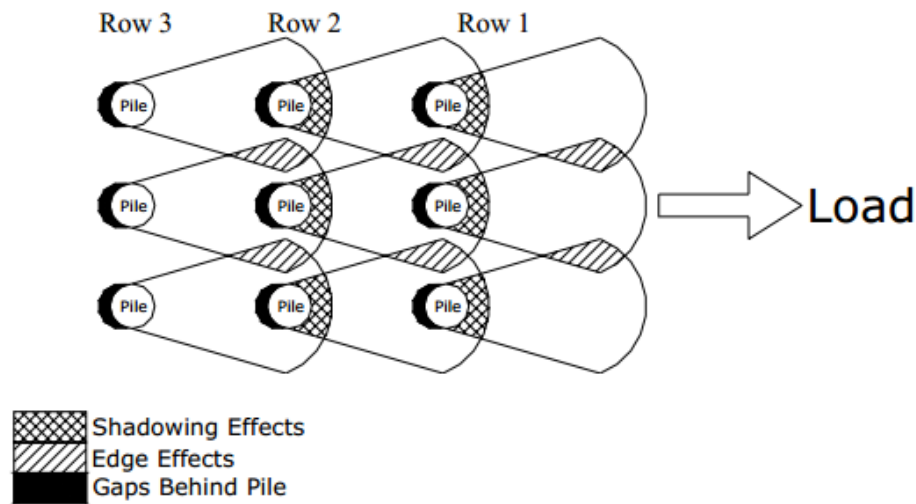
Paalun pään siirtyessä vaakasuunnassa syntyy paalun taakse rako. Rako täyttyy kiviä ja pohjavedenpinnan alapuolisissa kitkamaissa löyhällä maalla. Koheesiomaassa sekä kosteissa kitkamaissa rako jää pysyväksi. (Heikkilä 1988: 19) Maan valuminen rakoon on merkittävä ilmiö syklisellä kuormituksella, ja se vaikuttaa osaltaan vaakasuuntaisten siirtymien kumuloitumiseen. Syklinen kuormitus tiivistää rakoon valutta maata, jonka seurauksena paalun ympärillä oleva maa painuu ja paalun ympärille muodostuu kuoppa. (Koskinen & Rantala 2003: 61)

Paalun säteen suunnassa välittömästi paalun vaipan tuntumassa ympäröivässä maassa ns. lähivyöhykkeessä jännitykset ovat suuria ja maan käyttäytyminen kimmo-plastista. Hieman kauempana paalun vaipasta ns. etäisvyöhykkeessä jännitykset ovat pieniä ja maan käyttäytyminen on kimmoista. (Padmavathi et al. 2008: 29; Koskinen 1990: 63) Paaluun kohdistuva vaakasuuntainen maanpaine lähivyöhykkeessä lepotilanteessa ja vaakakuormituksen alaisena on esitetty kuvassa 8. Vaakasuuntainen maanpaine on suurimmillaan kuormitusta vastakkaisessa suunnassa ja kuormitukseen nähden paalun sivuilla paine on lähes nolla (Padmavathi et al. 2008: 29).



Kuva 8. Vaakasuuntainen maanpaine lähivyöhykkeessä a) lepotilanteessa ennen kuormitusta ja b) sivukuormituksen alaisena (muokattu: Koskinen 1990; Meyer & Reese 1979).

Paalujen ollessa peräkkäisissä riveissä paaluryhmänä kuormitus jakautuu eri paaluille ja paalut painautuvat maata vasten aiheuttaen maahan leikkausvyöhykkeen (engl. "shear zone"). Kun paalujen etäisyys toisistaan on riittävän pieni, menevät leikkausvyöhykkeet päällekkäin kuvan 9 mukaisesti. (Walsh 2005: 1-2) Ryhmävaikutusten on todettu olevan merkittäviä, kun paalujen keskiöetäisyys  $a$  on toisistaan pienempi kuin kolme kertaa paalun halkaisija  $d$  (Larkela 2008: 14).



Kuva 9. Paalurivien leikkausvyöhykkeiden reuna- ja varjovaikutukset sekä raon muodostuminen paalujen taakse (Snyder 2004: 2).

## 3.2 Passiivinen maanpaine

Maanpaineella tarkoitetaan rakenteen ja maan rajapinnalla vaikuttavaa jännitystä, joka kohdistuu tarkasteltavaan rakenteeseen. Maanpainetta tarkastellaan usein maahan lyödyn pystysuoran, ohuen ja täysin jäykän seinän avulla. Passiivinen maanpaine saavutetaan, kun maa kaivetaan seinän toiselta puolelta pois ja seinää työnnetään seinän takana olevaa maamassaa vasten, kunnes seinä alkaa liikkua. Murtotilassa valitsevaa maanpaineen maksimiarvoa kutsutaan passiiviseksi maanpaineeksi ( $P_p$ ). Mikäli seinä pysyy paikoillaan kaivun jälkeen, käytetään maanpaineesta nimitystä lepompaine ( $P_o$ ). Jos maa puolestaan liikkuu kaivantoon päin, vaikuttaa maassa maanpaineen minimiarvo eli aktiivinen maanpaine ( $P_a$ ). Passiivisen maanpaineen syntyminen tarvittava siirtymä on huomattavasti suurempi kuin aktiivisen maanpaineen tapauksessa. (Rantamäki et al. 2001: 233)

Kun maa on suunniteltu ottamaan vastaan sillalta tulevia vaakakuormia, maanpaineena käytetään passiivipainetta (Liikennevirasto 2013: 30). Eurokoodien mukainen passiivipaineen laskentamenetelmä poikkeaa hieman Pohjarakennusohjeiden 2004 mukaisesta menetelmästä. Pohjarakennusohjeiden mukainen menetelmä antaa suuremman maanpaineen arvon kuin eurokoodien mukainen menetelmä. Ero menetelmien välillä kasvaa leikkauskestävyyskulman kasvaessa. Suurilla leikkauskestävyyskulman arvoilla ero menetelmien välillä on merkittävä. (Ruotsala 2011: 37–38)

### 3.2.1 Passiivinen maanpaine Pohjarakennusohjeiden 2004 mukaisesti

Passiivinen maanpaine lasketaan yleensä Rankinen tai Coulombin maanpaineteoriaan perustuen. Osassa suunnitteluohjeissa, kuten esimerkiksi julkaisussa ”RIL 121-2004 Pohjarakennusohjeet”, viitataan passiivipaineen laskennan osalta yhtälöön (1) (RIL 181-1989; RIL 263-2014)

$$\sigma_p = K_p \cdot (\gamma \cdot z + q) + 2c \cdot \sqrt{K_p}, \quad (1)$$

missä  $\sigma_p$  on passiivinen vaakasuuntainen kokonaisjännitys kohtisuoraan rakennetta vastaan [kN/m<sup>2</sup>],  
 $K_p$  passiivipaine kerroin Rankinen tai Coulombin mukaisesti,  
 $\gamma$  maan tilavuuspaino [kN/m<sup>3</sup>],  
 $z$  syvyys maanpinnasta [m],  
 $q$  maanpinnalla oleva tasainen kuorma [kN/m<sup>2</sup>] ja  
 $c$  suljetun tilan koheesio [kN/m<sup>2</sup>].

Rankinen maanpaineteoria (1857) perustuu plastisuusteoriaan. Teoriassa tarkastellaan maamassan täysin plastisoituneessa vyöhykkeessä vallitsevia jännityksiä. Murtuma tapahtuu tasoliukumana, jossa murtotila vallitsee jokaisessa pisteessä määrättyllä alueella tai määrättyssä liukuvyöhykkeessä. Menetelmässä ei tarkastella suoraan maanpainetta tukirakennetta vastaan, vaan tarkastelu kohdistuu maan omasta painosta aiheutuviin jännityksiin maamassan sisässä. Teoriassa on oletettu, että tukiseinä on pystysuora ja maanpinnassa mahdollisesti oleva kuormitus on tasaisesti jakautunut. Rankinen teoria ei huomioi murtovyöhykkeen ulkopuolella vallitsevia jännityksiä eikä maan ja tukirakenteen välillä olevaa kitkaa, joten plastisuusteoriaan perustuvat maanpainekaavat ovat voimassa tukirakenteen ollessa sileä. (RIL 157-2: 164-167) Rankinen teorian passiivipaine kerroin voidaan laskea yhtälöllä (2) (RIL 157-2: 167)

$$K_p = \cos\beta \cdot \frac{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi}}{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi}}, \quad (2)$$

missä  $K_p$  on Rankinen passiivipaine kerroin,  
 $\beta$  maanpinnan kaltevuus ja  
 $\phi$  maan leikkauskestävyyskulma.

Coulombin teoria eli klassinen maanpaineteoria (1773) perustuu tasoliukupintojen tarkasteluun. Maanpaineen määrittämisessä liukupintamenetelmällä lähtökohtana on, että murtotila vallitsee vain yhdessä eli vaarallisimmassa liukupinnassa ja muut maamassan osat ovat kimmoisessa tilassa. Coulombin teoria perustuu rakenteen ja liukupinnan välisen maamassan voimien tasapainotilan tarkasteluun. Momenttitasapaino jätetään tarkastelujen ulkopuolelle. Menetelmässä täytyy tarkastella useita liukupintoja kriittisen liukupinnan löytämiseksi. Menetelmä huomioi maan ja rakenteen välillä vallitsevan kitkan toisin kuin Rankinen menetelmä. (Das 2010; RIL 157-2: 162-163) Coulombin teorian mukaisesti passiivipaine kerroin voidaan määrittää yhtälöllä (3) (Das 2010; RIL 157-2: 169)

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\delta - \alpha) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + \beta)}{\cos(\delta - \alpha) \cdot \cos(\beta - \alpha)}}\right)^2}, \quad (3)$$

missä  $K_p$  on Coulombin passiivipainekerroin,  
 $\alpha$  rakenteen pystysuuntainen kaltevuus,  
 $\beta$  maanpinnan kaltevuus,  
 $\delta$  seinäkitkakulma ja  
 $\phi$  maan leikkauskestävyyskulma.

Coulombin ja Rankinen teoriat antavat saman maanpaineen arvon, kun maan ja tukirakenteen välinen leikkauskestävyyskulma on nolla, tukirakenne on pystysuora ja maanpinta vaakasuora. Tällöin passiivipainekerroin voidaan laskea yhtälöllä (4) (RIL 157-2: 166)

$$K_p = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)}, \quad (4)$$

missä  $K_p$  on passiivipainekerroin ja  
 $\phi$  maan leikkauskestävyyskulma.

Passiivisen maanpaineen kehittymiseen vaikuttavat maalaji, maan tiiviys ja seinämän siirtymät. Passiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä Pohjarakennusohjeiden 2004 mukaan on esitetty taulukossa 1.

*Taulukko 1. Passiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä Pohjarakennusohjeiden 2004 mukaisesti.  $H_p$  on sen seinäosan korkeus, johon passiivinen maanpaine kohdistuu. (RIL 121-2004)*

Maalaji	Passiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä
Tiivis hiekka	$0,002 \cdot H_p$
Löyhä hiekka	$0,006 \cdot H_p$
Kiinteä savi	$0,02 \cdot H_p$
Pehmeä savi	$0,04 \cdot H_p$

### 3.2.2 Passiivinen maanpaine eurokoodien mukaisesti

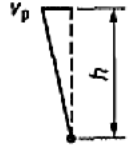
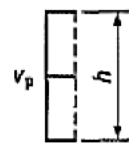

Eurokoodien nomogrammimenetelmässä suositellaan maanpaine kertoimen  $K_p$  määrittämistä liitteen 2 mukaan, sillä Coulombin maanpaineteoria johtaa etenkin suurilla leikkauskestävyyskulman ja seinäkitkan arvoilla liian suuriin passiivipaineisiin. Eurokoodien mukaisesti passiivinen maanpaine voidaan laskea yhtälöllä (5) (RIL 207-2009: 225; Liikennevirasto 2013: 62)

$$\sigma_p = K_p \cdot \left(\int_0^z \gamma dz + q - u\right) + 2c \cdot \sqrt{K_p \cdot \left(1 + \frac{a}{c}\right)} + u, \quad (5)$$

missä  $\sigma_p$  on passiivinen vaakasuuntainen kokonaisjännitys kohtisuoraan rakennetta vastaan [ $\text{kN/m}^2$ ],  
 $K_p$  passiivipainekerroin,  
 $z$  syvyys maanpinnasta [ $\text{m}$ ],  
 $\gamma$  maan tilavuuspaino [ $\text{kN/m}^3$ ],  
 $q$  maanpinnalla oleva tasainen kuorma [ $\text{kN/m}^2$ ],  
 $a$  adheesio [ $\text{kN/m}^2$ ],  
 $c$  suljetun tilan koheesio [ $\text{kN/m}^2$ ] ja  
 $u$  huokosvedenpaine [ $\text{kN/m}^2$ ].

Taulukossa 2 on esitetty passiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä eurokoodien mukaisesti. Eurokoodin mukaisessa siirtymän määrittämisessä huomioidaan seinämän siirtymistapa.

Taulukko 2. Passiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä eurokoodien mukaisesti. Sulkeissa olevat arvot ovat  $v_p/h$  suhteen arvoja, joita vastava maanpaine on puolet tehokkaan passiivisen maanpaineen raja-arvosta. (RIL 207-2009; 237)

Seinän liikkeen tyyppi	$v_p/h$ löyhä maa %	$v_p/h$ tiivis maa %
a) 	7 (1,5)...25 (4,0)	5 (1,1)...10 (2,0)
b) 	5 (0,9)...10 (1,5)	3 (0,5)...6 (1,0)
c) 	6 (1,0)...15 (1,5)	5 (0,5)...6 (1,3)
missä: $v_p$ on passiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän liike $h$ on seinän korkeus		

### 3.3 Paalun sivukuormitus ja -vastus

Maan ja paalun liikkeet toistensa suhteen aiheuttavat paaluun kohdistuvaa painetta eli sivukuormitusta ja -vastusta. Sivukuormituksella tarkoitetaan tilannetta, kun maa siirtyy paalua vasten. Sivuvastuksella puolestaan tarkoitetaan tilannetta, kun maa vastustaa paalun sivuttaista siirtymistä. (RIL 223-2005: 58) Sivuvastusta käytetään hyväksi laskettaessa paalun sivukapasiteettia (ks. kappale 3.4).

Paalun sivukuormitus ja samalla taivutusrasitus syntyy ulkoisesta kuormasta, tunnetun siirtymän aiheuttamasta pakkovoimasta tai maanpaineesta paalua vasten. Pakkovoimia aiheuttavat lähinnä ylärakenteen lämpötilanmuutokset. Maanpaine sivukuormituksena aiheutuu maanpinnan korkeuserojen, kaivannon tai kaltevan luiskan heikon vakavuuden aiheuttamasta maamassan siirtymisestä paalua vasten. Sivukuormitusta paaluille voi aiheuttaa myös maan painuminen vinojen paalujen ympärillä ja rutimispaine, jonka syntyminen on yleensä estettävä. Sivukuorman suuruuteen vaikuttaa maan leikkauslujuus, paalun muoto ja kuormitusnopeus. (Koskinen 1990: 40)



Sivuvastuksen ja -kuormituksen ääriarvot riippuvat maan lujuusominaisuuksista ja kitkamaalla myös tehokkaasta tilavuuspainosta. Sivukuorma- ja sivuvastus ovat suurimmillaan silloin, kun paalu leikkautuu maamassan läpi. Ääriarvot voidaan määrittää maan murtotilan mukaan maanpaineteoriaan perustuen. (Liikennevirasto 2012: 29)

### 3.3.1 Yksittäisen paalun sivukuormitus ja -vastus

Karkearakeisessa maassa ja moreenissa sivuvastuksen ja -kuormituksen ääriarvot kasvavat lineaarisesti syvyyden kasvaessa. Bromsin (1964) murtomekanismissa lyhyelle ja jäykälle paalulle kiertokeskuksen alapuolinen passiivipaineisuus on korvattu pistevoimalla paalun kärjessä, ja paalu kiertyy alapään ympäri. Bromsin teoria perustuu koekuormitusten perusteella saatuihin sivupaineen arvoihin. (Koskinen 1990: 63) Bromsin mukaan sivuvastuksen ja -kuormituksen ääriarvoiksi kitkamaassa voidaan olettaa yhtälön (6) kertoimen 3,0 mukainen Rankinen passiivipaineen arvo (Ruigrok 2010: 103).

Heikkilä (1988) tutki diplomityössään Rankinen passiivipaineen ja todellisen murtomekanismin, jossa paalun kiertokeskus sijaitsee syvyydessä 0,25...0,3 kertaa upotussyvyys paalun kärjestä lukien, yhteyttä kitkamaassa. Heikkilä totesi teoriaan perustuen, että käyttämällä Rankinen passiivipaineen kerrointa 4,4 painejakautuman arvot vastaavat melko hyvin toisiaan. Liikenneviraston ohjeiden (2012: 30) mukaan kitkamaan sivuvastuksen murtoarvon määrittämisessä käytetään yhtälöä (6)

$$p_m = 3,0 \dots 4,4 \cdot z \cdot \gamma' \cdot K_p, \quad (6)$$

missä  $p_m$  on sivuvastuksen/-kuormituksen ääriarvo [kN/m<sup>2</sup>],  
 $z$  syvyys maanpinnasta [m],  
 $\gamma'$  maan tehokas tilavuuspaino [kN/m<sup>3</sup>] ja  
 $K_p$  Rankinen passiivipainekerroin.

Yhtälön (6) kertoimet 3...4,4 edustavat normaalia sivukuormituksen- ja vastuksen vaihtelualuetta (Liikennevirasto 2012: 30). Osassa lähteistä on esitetty myös suurempia kitkamaan yhtälön kertoimen arvoja johtuen maanpaineen keskittymisestä voimakkaasti kiilamaiselle maakaistalle paalun edessä. Koskisen (1990: 126–128) löyhässä hienossa hiekassa tekemissä koepaalutuskokeissa maanpaineen ääriarvot asetuiivat Bromsin ja Heikkilän esittämien yhtälöiden väliin ollen kuitenkin lähempänä Heikkilän yhtälön arvoa. Ruotsalaisissa suunnitteluohjeissa (Trafikverket 2011: 151) käytetään kitkamaassa yhtälöä (6) kertoimen arvolla 3.

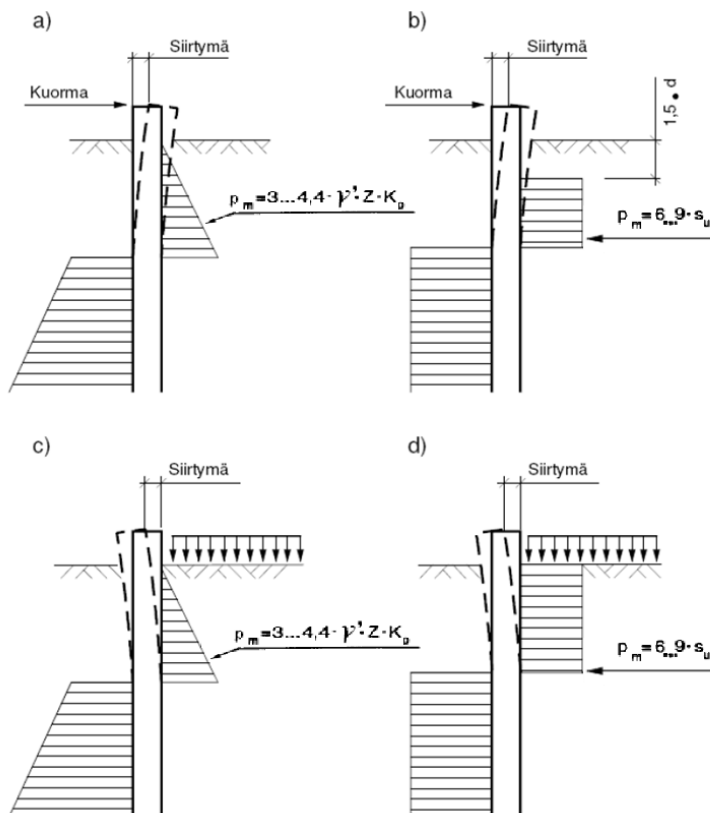
Bromsin (1964) mukaan koheesiomaissa syvyyteen  $1,5d$  maanpinnasta lukien sivuvastus oletetaan nolaksi eli jätetään huomioimatta. Tämän alapuolella sivuvastus on vakio  $9s_u$ . Koskinen (1997: 108) käytti väitöskirjassaan sivuvastukselle koheesiomaassa arvoa  $7,5s_u$ , mikä vastasi hänen käyttämien lähteiden keskiarvoa. Myös esimerkiksi Kerokoski (2006) käytti sillan ja maan yhteistoiminnan tarkasteluissa arvoa  $7,5s_u$ . Poulos (1971) on kehittänyt hieman tarkemman koheesiomaan paineja-kauman. Poulosin mukaan sivuvastus maanpinnalla on  $2s_u$  suuruinen, josta se kasvaa tasaisesti suuruuteen  $9s_u$  syvyydessä  $3d$ . Tämän alapuolella sivuvastus pysyy vakiona. (Padmavathi et al. 2008: 29)

Suomalaisissa suunnitteluohjeissa, kuten esimerkiksi Liikenneviraston ja Suomen Rakennusinsinöörien Liiton RIL ry:n julkaisuissa, koheesiomaan sivuvastuksen- ja kuormituksen ääriarvoina käytetään syvyydestä riippumatonta yhtälön (7) antamaa arvoa

$$p_m = 6 \dots 9 \cdot s_u, \quad (7)$$

missä  $p_m$  on sivuvastuksen/-kuormituksen ääriarvo [kN/m<sup>2</sup>] ja  $s_u$  suljettu leikkauslujuus [kN/m<sup>2</sup>].

Suunnitteluohjeiden mukaan koheesiomaan sivuvastusta laskettaessa pintakerros jätetään huomioimatta syvyydelle  $1,5d$  asti, mikäli se on tarkasteltavan ilmiön (siirtymät, rakenteiden kestävyys) kannalta mitoittavampi kuin ko. kerroksen huomioon ottaminen. Osassa ohjeissa (esim. RIL 223-2005: 59) on esitetty yhtälön (7) kerrointa 6 käytettäväksi pysyville kuormille ja kerrointa 9 lyhytaikaisille kuormille, kun taas osassa ohjeissa (esim. RIL 223-2005: 67, Liikennevirasto 2012: 30 ja Tielaitos 1999b: 39) on annettu kerrointen vaihteluväliksi 6...9 ottamatta kantaa kuorman pysyvyyteen todeten välin edustavan normaalia vaihtelualuetta. Ruotsin sillan suunnitteluohjeiden (Trafikverket 2011: 150) mukaisessa mitoituksessa käytetään koheesiomaassa yhtälössä (7) pitkäaikaisille kuormille kerrointa 6 ja lyhytaikaisille kuormille kerrointa 9. Kuvassa 10 on esitetty sivuvastuksen ja -kuormituksen murtoarvojen määrittäminen eurokoodien mukaisesti sekä kitka- että koheesiomaassa.



Kuva 10. Sivuvastuksen ominaisarvon ääriarvo  $p_m$  jäykälle paalulle; a) karkearakeisessa maassa, b) hienorakeisessa maassa, ja sivukuormituksen ominaisarvon ääriarvo jäykälle paalulle; c) karkearakeisessa maassa, d) hienorakeisessa maassa (muokattu: RIL 223-2005: 59 ja Liikennevirasto 2012: 30).

Norjalaisen suunnitteluohjeen mukaan kitkamaassa sivuvastus lasketaan puolestaan yhtälöllä (8)

$$q_{tr;k} = N_r \cdot (a + \gamma' \cdot z) \cdot d, \quad (8)$$

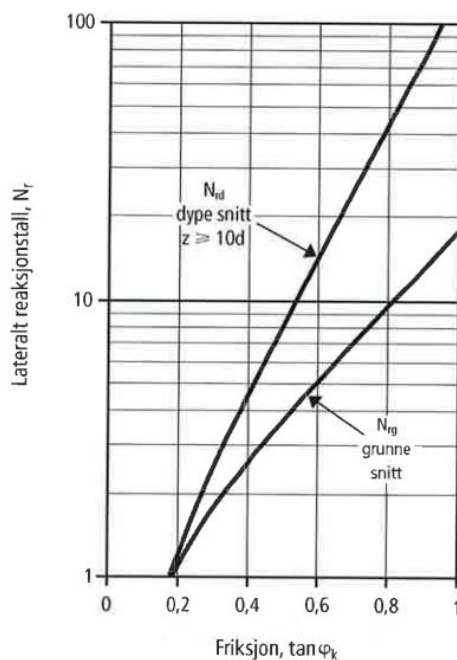
missä  $q_{tr;k}$  on sivuvastus paalun pituusyksikköä kohden [kN/m],  
 $N_r$  kerroin, joka riippuu leikkauskestävyysskulman tangentista  $\tan\phi$  ja syvyydestä  $z$ ,  
 $a$  pystysuora kuormitus maan pinnalla [kN/m<sup>2</sup>],  
 $\gamma'$  maan tehokas tilavuuspaino [kN/m<sup>3</sup>],  
 $z$  syvyys [m] ja  
 $d$  paalun halkaisija [m]

ja koheesiomaassa yhtälöllä (9) (Den Norske Pelekomité 2005: 73-75)

$$q_{tr;k} = N_{ru} \cdot s_u \cdot d, \quad (9)$$

missä  $q_{tr;k}$  on sivuvastus paalun pituusyksikköä kohden [kN/m],  
 $N_{ru}$  kerroin, joka riippuu syvyyden  $z$  ja paalun halkaisijan  $d$  suhteesta,  
 $s_u$  suljettu leikkauslujuus [kN/m<sup>2</sup>] ja  
 $d$  paalun halkaisija [m].

Norjalaisen suunnitteluohjeen mukaisessa kitkamaan yhtälössä (8) esitetty kerroin  $N_r$  määritetään kuvan 11 perusteella. Syvyydessä  $z \geq 10d$  käytetään kuvan ylemmää käyrää ja syvyydessä  $z < 10d$  alemmää käyrää. Koheesiomaan yhtälössä (9) esitetty kerroin  $N_{ru}$  määritetään taulukon 3 perusteella. Koheesiomaan kertoimen arvoon vaikuttaa syvyyden  $z$  ja paalun halkaisijan  $d$  suhde. Norjassa käytetyt yhtälöt muistuttavat osittain suomalaisten suunnitteluohjeiden mukaisia yhtälöitä (6) ja (7). Norjalaisen ohjeen mukaan sivuvastus on maan pintaosassa pienempi ja syvemmillä suurempi kuin suomalaisissa ohjeissa sekä kitka- että koheesiomaassa.



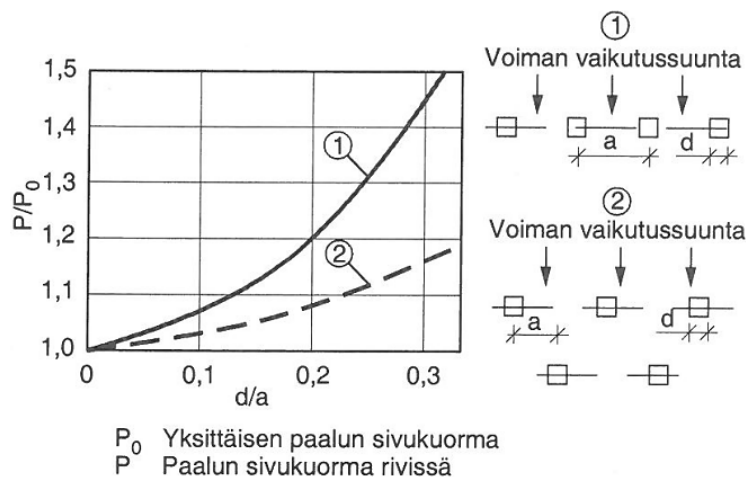
Kuva 11. Norjalaisen suunnitteluohjeen mukaisen kertoimen  $N_r$  määrittäminen leikkauskestävyysskulman tangentin perusteella (Den Norske Pelekomité 2005: 73).

Taulukko 3. Norjalaisen suunnitteluohjeen mukaisen kertoimen  $N_{ru}$  määrittäminen (Den Norske Pelekomité 2005: 75).

$z/d$	$N_{ru}$
<4	5
4...8	$1,25 \cdot z/d$
>8	10

### 3.3.2 Paaluryhmän sivukuormitus ja -vastus

RIL 212-2001 ja Larkelan (2008: 14) mukaan paalujen keskikohtien välisen etäisyyden ollessa suurempi kuin  $6...8d$ , on sivuvastus yleensä yksittäisten paalujen sivuvastusten summa. Muutoin sivuvastus on pienempi kuin yksittäisten paalujen sivuvastusten summa. Ilmiö on havaittu useissa kokeissa, kuten esimerkiksi Walshin (2005) ja Snyderin (2004) Salt Lake Cityssä tekemissä paaluryhmän koekuormituskokeissa. RIL 223-2005 ja RIL 254-2011 mukaan puolestaan ristiriitaisesti koheesiomaassa liikettä vastaan ensimmäisessä rivissä olevan yksittäisen paalun sivukuormituksen ja -vastuksen ääriarvot kasvavat kuvan 12 mukaisesti paaluvälin  $a$  ollessa  $3...10d$  johtuen maan puristumisesta paalujen välissä.



Kuva 12. Paalun sivukuorman ja paaluvälin vuorosuhde koheesiomaassa (RIL 223-2005: 69; LPO-87: 42).

## 3.4 Paalun sivukapasiteetti

Paalun sivukapasiteetilla tarkoitetaan paalun sietämää suurinta vaakakuormitusta. Paalun täytyy riittävällä varmuudella eri kuormitustilanteissa maan sivutuenta huomioon ottaen kestää sille tulevat sivukuormitukset. (RIL 223-2005: 58) Paalun sivukapasiteetti vastaa paalun sivuvastusta, paalun myötömomenttia tai suurinta sallittua vaakasiirtymää (RIL 212-2001: 63). Useimmiten sallitun sivukapasiteetin määrää suurin sallittu siirtymä tai taipuma, sillä muodonmuutokset voivat kasvaa huomattavan suuriksi jo paljon ennen maan tai paalun murtokuormaa vastaavan sivukapasiteetin ylittymistä (Nirhamo 1995: 43).

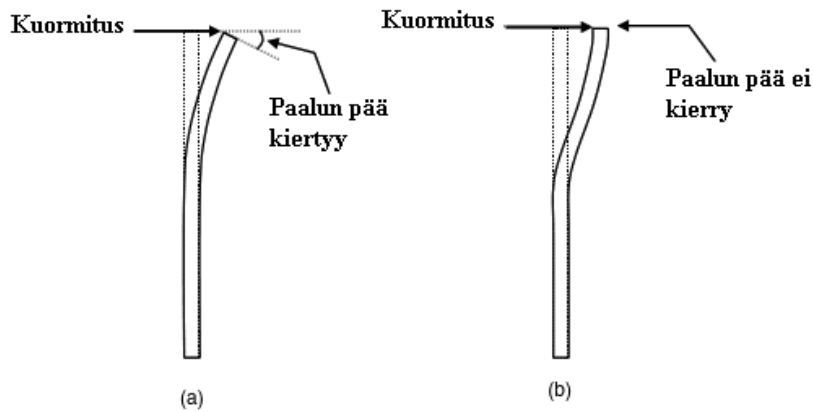
Paalun sivukapasiteettiin vaikuttaa paalua ympäröivän maan vastus eli paalua ympäröivien maakerrosten lujuus ja jäykkyys, paalun yläpäähän kiinnitysaste ja paalun oma taipuvuusjäykkyys (RIL 212-2001: 63). Mikäli sivukuormitetun paaluryhmän paalujen leikkausvyöhykkeet menevät päällekkäin (ks. kuva 9), on paaluryhmän paaluilla pienempi sivukapasiteetti kuin yksittäisellä paalulla (Walsh 2005: 1). Paalun sivukapasiteettia voidaan kasvattaa esimerkiksi hitsaamalla paaluun siivekkeet, käyttämällä paalun yläpäässä teräskehikkoratkaisua, asentamalla paaluun betonikaulus, parantamalla maan lujuusominaisuuksia injektoimalla tai tiivistämällä maaperää tai käyttämällä sora- tai hiekkatäyttöä paalun ympärillä. Sivukuormia voidaan pienentää kevennyskaivuilla tai kevyillä täytöillä. (Koskinen 1990: 69; Nirhamo 1995: 51)

Paalun sivukapasiteetti voidaan määrittää kuormituskokeiden tai laskennallisesti pohjatutkimustulosten ja paalun lujuuden perusteella. Sivukapasiteetin määrittämisessä voidaan käyttää joko analyyttisiä, numeerisia tai empiirisiä menetelmiä. Analyyttisissä menetelmissä maan käyttäytymistä mallinnetaan yksinkertaisilla menetelmillä, kuten alustalukumenetelmään perustuvilla menetelmillä. Analyyttiset menetelmät soveltuvat käytettäväksi alustavassa paalun sivukapasiteetin arvioinnissa käsinlaskentamenetelmänä, kun sivukuormitus on staattinen ja kuormitusyhdistelmä riittävän yksinkertainen. (RIL 212-2001: 63-64)

Numeerisia menetelmiä käytetään, kun vaakakuormien jakautumista paaluille ei voida yksiselitteisesti määrittää tai vaakakuormituksen suunta ja suuruus voi vaihdella. Numeerisiin menetelmiin kuuluvat differenssi- ja elementtimenetelmien (FEM) tai reunaelementtimenetelmien sovellutukset. Geoteknisessä luokassa 3 (ks. luku 6.2) on käytettävä numeerisia menetelmiä, joiden paikkansa pitävyys tarkistetaan paalun todellista kuormitusta simuloivalla kuormituskokeella tai vastaavissa olosuhteissa saaduilla käytännön kokemuksilla. Empiirisissä menetelmissä paalun tulevaa sivukuormitusta simuloidaan todellisessa mittakaavassa tai mallikokeilla. (RIL 212-2001: 63-64)

### 3.5 Paalun kiertyminen ja murtomekanismit

Sivukuormitetun paalun käyttäytymiseen vaikuttaa maan ja paalun suhteellinen jäykkyys sekä paalun kiinnittyminen rakenteeseen. Paalun suhteelliseen jäykkyyteen vaikuttaa paalurakenteen jäykkyys, ympäröivän maan jäykkyys ja paalun pituus. Paalun yläpäähän kiinnittyminen rakenteeseen vaikuttaa sivukuormitettujen paalujen päiden kiertymiseen. Paalun päässä ei tapahdu kiertymistä, mikäli paalun pää on jäykästi kiinnitetty rakenteeseen. Jos paalun pää on vapaa, pääsee se kiertymään (ks. kuva 13). Paalun pään ollessa vapaa paalu kestää noin 50 % vähemmän sivukuormitusta kuin jäykästi kiinnitetty paalu. Paalujen jakaminen kiinnitettyihin ja vapaisiin paaluihin on kuitenkin hieman ongelmallista, sillä joissain tapauksissa paalun pään ollessa kiinnitetty voi se silti kyetä kiertymään jossain määrin. (Das 2010)



Kuva 13. Paalun pään kiertyminen; a) vapaa pää b) kiinnitetty pää (muokattu: Das 2010).

Sivukuormitetun paalun käyttäytymistä voidaan alustavasti arvioida hienorakeisessa maassa parametrilla  $R$  yhtälöllä (10) ja karkearakeisessa maassa parametrilla  $T$  yhtälöllä (11) (Prakash & Sharma 1990: 326-329; Phanikanth et al. 2010)

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{E_s}} \quad \text{ja} \quad (10)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}}, \quad (11)$$

missä  $R$  on sivukuormitetun paalun käyttäytymistä kuvaava parametri koheesiomaassa,  
 $T$  sivukuormitetun paalun käyttäytymistä kuvaava parametri kitkamaassa,  
 $E_p I_p$  paalun jäykkyys [ $\text{kNm}^2$ ],  
 $E_s$  koheesiomaan vaakasuuntainen moduuli [ $\text{kN/m}^2$ ] ja  
 $n_h$  vaakasuuntainen alustalukukerroin karkearakeisessa maassa [ $\text{kN/m}^3$ ].

Paalua käsitellään maassa kiertyvänä jäykkänä kappaleena, kun paalun upotussyvyyden ja parametrin suhde  $L/R$  tai  $L/T$  on pienempi kuin kaksi. Tällöin paalun muodonmuutoksia ei tarvitse huomioida, koska maan murtuminen tapahtuu ennen paalun murtumista. (Prakash & Sharma 1990: 326; RIL 212-2001: 65) Vaakasuuntaisen kapasiteetin riippuessa vain maan kapasiteetista perustusta voidaan kutsua lyhyeksi ja jäykäksi perustukseksi (Tiehallinto 2001a: 17).

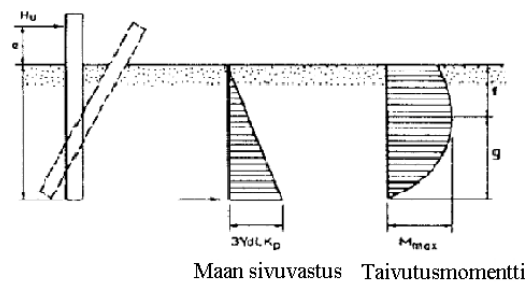
Lyhyt ja jäykkä paalu kiertyy maassa kiertokeskuksensa ympäri, ja murtuminen tapahtuu maan leikkausjännitysten ylittäessä maan leikkauslujuuden (Heikkilä 1988: 16). Tällöin kiertokeskuksen paikka määräytyy momenttitasapainoehdon perusteella. Homogeenisessä maassa kiertokeskus sijaitsee syvyydessä, joka on noin 70 % paalun upotussyvyydestä maanpinnasta lähtien. Tällöin voidaan käsinlaskennalla arvioida sivukapasiteettia määrittämällä sivuvastuksen ääriarvo, jakauma ja kiertokeskuksen paikka siten, että sivuvastuksien momentit kuormituspisteen suhteen ovat tasapai-

nossa. Sivukapasiteetti saadaan sivuvastuksien resultanttien erotuksena. (Koskinen 1990: 54; Nirhamo 1995: 41)

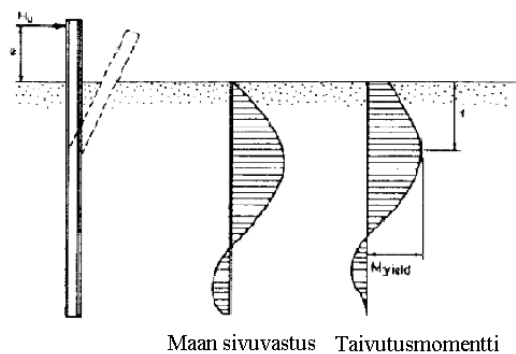
Kun parametrisuhde  $L/R$  tai  $L/T$  on vähintään neljä, huomioidaan laskelmissa myös paalun muodonmuutokset (Prakash & Sharma 1990: 329). Tällä jäykkyysasteella paalun murtuminen tapahtuu ennen maan murtumista. Murtuminen tapahtuu siten, että paalun varteen muodostuu plastinen nivel eli taivutusmomentti ylittää paalun taivutuslujuuden (Heikkilä 1988: 16). Paalupituutta, joka vastaa parametrisuhdetta neljä, voidaan pitää sivuvastuksen suhteen paalun toiminnallisen pituuden ääriarvona. Suuremmilla arvoilla paalun pituuden lisääminen ei vaikuta paalun toimintaan. Perustusta, jonka vaakasuuntainen kapasiteetti riippuu maan kapasiteetin lisäksi myös perustuksen taivutusmomentista, voidaan kutsua pitkäksi ja taipuisaksi perustukseksi. Parametrisuhteilla 2...4 väliarvot voidaan interpoloida riittävällä tarkkuudella. (Tiehallinto 2001a: 17; RIL 212-2001: 65)

Kuvissa 14 ja 15 on esitetty jäykkyysuhteen vaikutus paalun murtomekanismiin, kun paalun pää on vapaa. Kuvien a-kohdissa on kuvattu maan murtumisen tai yläpään sallittujen siirtymien näkökulmaa eli lyhyttä ja jäykkää paalua ja b-kohdissa perustusten murtumisen näkökulmaa eli pitkää ja taipuisaa paalua.

a) Vapaa pää, jäykkyysuhde  $L/T \leq 2$

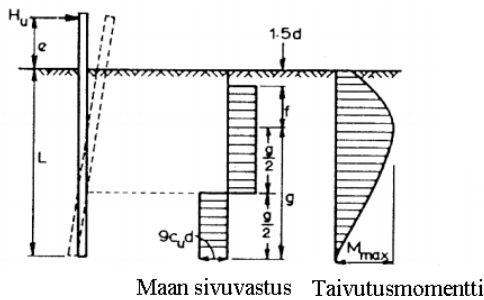


b) Vapaa pää, jäykkyysuhde  $L/T \geq 4$

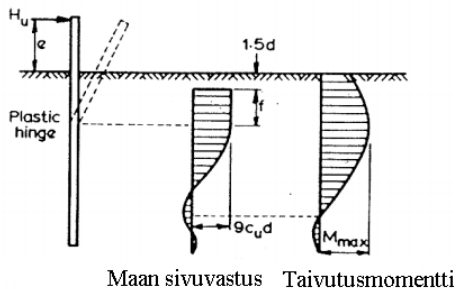


Kuva 14. Paaluperustuksen toiminta kitkamaassa: a) maan murtuminen tai yläpään sallittu siirtymä rajoittaa b) perustuksen murtuminen rajoittaa (muokattu: Tiehallinto 2001a: 9).

a) Vapaa pää, jäykkyysuhde  $L/R \leq 2$



b) Vapaa pää, jäykkyysuhde  $L/R \geq 4$



Kuva 15. Paaluperustuksen toiminta koheesiomaassa: a) maan murtuminen tai yläpäähän sallittu siirtymä rajoittaa b) perustuksen murtuminen rajoittaa (muokattu: Tiehallinto 2001a: 17).

Luvussa 3.3.1 tarkastellut sivuvastuksen- ja kuormituksen ääriarvot vastaavat kuvien a-tapausta eli lyhyttä ja jäykkää perustusta. Maan kapasiteetti tulee kokonaan hyödynnetyksi, kun rakenne mitoitetaan lyhyinä paaluina eli maa murtuu ennen paalun myötäämistä (Heikkilä 1988: 16). Jäykkyysuhteella tehty tarkastelu huomioi vain paalun ja maan jäykkyysien suhteen toisiinsa, ja näin ollen paalun lujuuden tarkastelu on tehtävä erikseen (RIL 223-2005: 61).

## 3.6 Paalun vaakasiirtymät

Kitkamaassa vaakakuormitetun paalun siirtymä määräytyy maan kimmoplastisen käyttäytymisen mukaan ja kuormitusajalla on merkityksettömän pieni vaikutus vaakasiirtymiin. Koheesiomaassa puolestaan vaakasiirtymä riippuu kimmoplastisuuden lisäksi myös konsolidaatiomuodonmuutoksesta. Pitkäaikaisessa kuormituksessa konsolidaatiomuodonmuutos muodostuu hyvin suureksi verrattuna kimmoisiin muodonmuutoksiin, ja siirtyminen saattaa jatkua useita vuosia rakentamisen jälkeen. (Heikkilä 1988: 17) Paaluperustuksen vaakasiirtymien arvioinnissa on huomioitava seuraavat tekijät (RIL 207-2009: 141; RIL 223-2005: 69):

- maapohjan jäykkyys ja sen vaihtelu jännitystason mukaan,
- yksittäisten paalujen taivutusjäykkyys,
- paalujen ja rakenteen välisen liitoksen momenttijäykkyys,
- ryhmävaikutus ja
- kuorman poistojen tai jaksollisen kuormituksen vaikutukset.

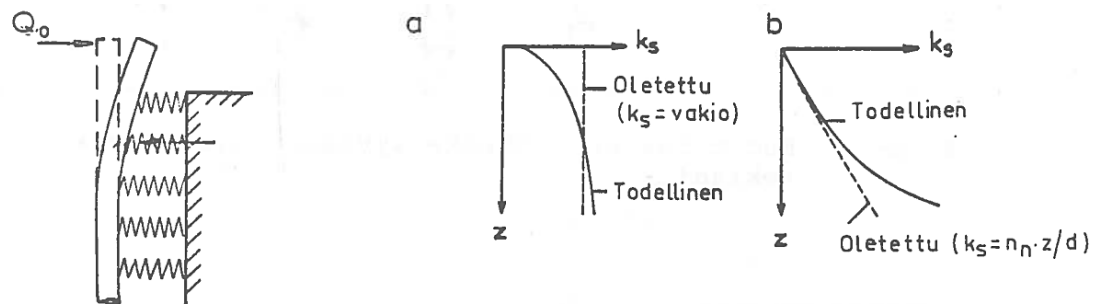


## 4 Vaakasuuntaiset alustaluvut

Winklerin menetelmä eli alustalukumalli on ollut suosittu malli sivukuormitettujen paalujen analysoinnissa sen yksinkertaisuuden ja kohtalaisen tarkkuuden vuoksi. Sivuvastuksen tai -kuormituksen sekä rakenteen siirtymän riippuvuutta toisistaan voidaan useimmiten kuvata alustaluvuilla. Alustalukumenetelmässä paalua ympäröivä maaperä korvataan yksittäisten kimmoisten jousien muodostamalla jousisarjalla, missä jousien jäykkyyksiä kuvataan alustaluvuilla. Alustalukumalli ei huomioi maamassan jatkuvuutta. (Suutarinen & Slunga 1981: 22) Kuvassa 16 vasemmalla puolella on esitetty maaperän korvaaminen jousilla ja oikealla puolella todellinen alustaluku ja Winklerin menetelmän alustaluku  $k_s$  syvyyden funktiona a-kohdassa koheesiomaassa ja b-kohdassa kitkamaassa. Yhtälössä (12) on esitetty maaperän vaakasuuntaisten jousien alustaluvun  $k_s$  yhtälö yleisessä muodossa (Nylund 1971: 22)

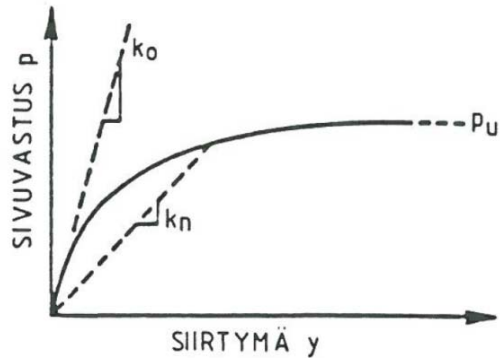
$$k_s = \frac{p}{y}, \quad (12)$$

missä  $k_s$  on maan alustaluku [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ],  
 $p$  jouseen kohdistuva maanpaine [ $\text{kN}/\text{m}^2$ ] ja  
 $y$  siirtymä [ $\text{m}$ ].



Kuva 16. Kuvassa vasemmalla Winklerin alustalukumalli ja oikealla alustaluku a) koheesiomaassa ja b) kitkamaassa (Suutarinen & Slunga 1981: 22).

Alustaluku ei ole maaparametri, vaan siihen vaikuttavat myös rakenteen mitat, kuormituksen luonne ja siirtymän suuruus (Suutarinen & Slunga 1981: 22). Alustaluvun  $k_s$  arvo on vakio ainoastaan pienillä siirtymän arvoilla ja siirtymän kasvaessa alustaluvun arvo muuttuu oleellisesti. Alustaluvun pieneneminen siirtymän kasvaessa on esitetty kuvassa 17. (Koskinen 1990: 35–36)



Kuva 17. Alustaluvun pieneneminen siirtymän kasvaessa (Koskinen 1990: 36).

## 4.1 Alustaluku staattisessa kuormitus-tilanteessa

Staatissa kuormituksessa kuorma on ajan suhteen vakio tai sen vaihtelunopeus on niin alhainen, etteivät hitausvoimat vaikuta rakenteen rasitukseen. Maa käyttäytyy staattisen kuormituksen alaisena kuten avoimessa tilassa, jolloin myös koheesio- ja huokosvesi pääsee kohtuullisen helposti poistumaan eikä huokosvedenpaineen nousu aiheuta haittaa. (RIL 212-2001: 71; Koskinen & Rantala 2003: 21)

### 4.1.1 Alustaluku karkearakeisessa maassa ja moreenissa

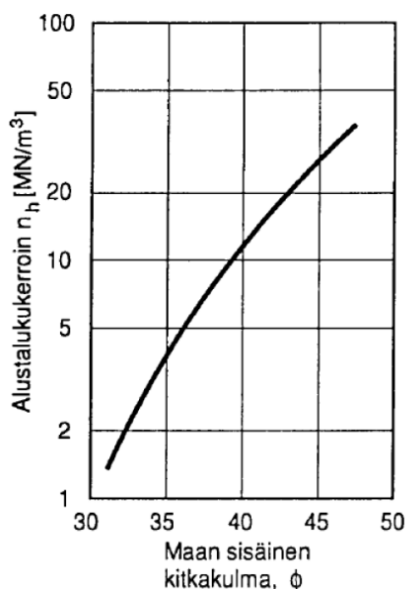
Kitkamaalajeissa vaakasuuntainen alustaluku on riippumaton ajasta, sillä siirtymät tapahtuvat äkillisesti heti kuormituksen alkaessa (Terzaghi 1955). Kitkamaalajeissa vaakasuoran alustaluvun oletetaan kasvavan lineaarisesti syvyyteen  $10d$  asti, jonka jälkeen sen oletetaan pysyvän vakiona. Staatissa kuormitustilanteessa kitkamaan alustaluku voidaan määrittää yhtälöllä (13) (RIL 212-2001: 68; Chin et al. 2009)

$$k_s = n_h \cdot \frac{z}{d}, \quad (13)$$

missä  $k_s$  on alustaluku [ $\text{kN/m}^3$ ],  
 $n_h$  alustalukukeroin [ $\text{kN/m}^3$ ],  
 $z$  syvyys maanpinnasta [ $\text{m}$ ] ja  
 $d$  paalun ulkohalkaisija [ $\text{m}$ ].

Alustalukukerroin  $n_h$  on tiivistyneillä kitkamailla likimain maalajivakio, joka ilmaisee alustaluvun  $k_s$  muuttumisnopeuden syvyyden kasvaessa. Löyhemmillä mailla alustalukukertoimen arvo saattaa kasvaa syvyyden kasvaessa (Koskinen 1990: 31). Alustalukukerroin  $n_h$  voidaan määrittää leikkauskestävyyskulman perusteella kuvasta 18.

Pohjavedenpinnan alapuolella alustalukukerroin on 60 % kuvan arvosta. (Liikennevirasto 2012: 31) Kuva 18 perustuu todennäköisesti Terzaghin (1955) julkaisemiin alustalukukertoimen arvoihin hiekassa, joissa leikkauskestävyyskulman sijaan tiiveys on kuvattu sanallisesti. Sanallisista kuvauksista alustalukukertoimet on todennäköisesti muutettu vastaamaan leikkauskestävyyskulmaa kuvan 18 käyrän muotoon. Kuva löytyi ainoastaan suomalaisista teoksista. Vanhin teos, mistä kuva löytyi, oli vuodelta 1987 (LPO-87: 45).



Kuva 18. Kitkamaan alustalukukerroin leikkauskestävyyskulman perusteella pohjavedenpinnan yläpuolella (Liikennevirasto 2012: 31).

Vaativissa (GL2) ja erittäin vaativissa (GL3) pohjarakennuskohteissa (ks. luku 6.2) alustalukukerroin suositellaan määritettäväksi karkearakeisessa maassa joko kokoonpuristuvuusmoduulin  $M$  avulla yhtälöllä (14)

$$n_h = \alpha \cdot \beta \cdot \frac{M}{z} \quad (14)$$

tai avoimen tilan kimmomoduulin  $E_d$  avulla yhtälöllä (15) (Liikennevirasto 2012: 32; RIL 254-2011: 96):

$$n_h = \alpha \cdot \frac{E_d}{z}, \quad (15)$$

missä  $n_h$  on alustalukukerroin [kN/m<sup>3</sup>],  
 $\alpha$  0,74 Terzaghin mukaan ja 1,0 Poulosin mukaan,  
 $\beta$  hiekalle 0,83...0,95 Poissonin vakion vaihdella vastaavasti 0,25...0,15,  
 $M$  kokoonpuristuvuusmoduuli [kN/m<sup>2</sup>],  
 $E_d$  avoimen tilan kimmomoduuli [kN/m<sup>2</sup>] ja  
 $z$  syvyys maanpinnasta [m].

Yhtälöt (14) ja (15) eivät huomioi Koskisen (1990) esittämää mahdollista löyhän kitkamaan alustalukukertoimen kasvamista syvyyden kasvaessa. Yhtälöiden (14) ja (15) kertoimen  $\alpha$  arvo vaihtelee eri suunnitteluohjeissa. Liikenneviraston vuoden 2012 julkaisussa "Sillan geotekninen suunnittelu" kertoimena käytetään Terzaghin mukaista

kerrointa  $\alpha = 0,74$  sekä yhtälössä (14) että (15). Suomen Rakennusinsinööriliitto ry:n julkaisuissa ”Paalutusohje RIL 254-2011” sekä ”Lyöntipaalutusohje RIL 223-2005” kerroin  $\alpha$  on jätetty pois molemmista yhtälöistä, mikä vastaa Poulosin mukaista kerrointa  $\alpha = 1,0$ . Suomen Rakennusinsinööriliitto ry:n julkaisussa ”Suurpaalutusohje 2001” yhtälössä (14) kerroin  $\alpha$  voi olla joko Terzaghin mukainen  $\alpha = 0,74$  tai Poulosin mukainen  $\alpha = 1,0$ , mutta yhtälössä (15) ei ole kerrointa  $\alpha$  ollenkaan. Yhtälöiden (14) ja (15) vakiolle  $\alpha$  on ehdotettu kirjallisuudessa myös muita arvoja. Esimerkiksi Bowles on laboratoriotutkimuksiin perustuen ehdottanut arvoksi  $0,8 \dots 1,3$  ja Broms arvoja  $0,48 \dots 0,9$  (Bezgin 2010: 45–46). Koskinen puolestaan (1997: 106) käytti väitöskirjassaan kertoimelle arvoa  $0,83$ , jonka hän oli laskenut väitöskirjansa lähteissä esitettyjen arvojen keskiarvoksi. Yhtälön (14) kerroin  $\beta$  voidaan määrittää yhtälöllä (16) (Liikennevirasto 2012: 32)

$$\beta = \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{1-\nu}, \quad (16)$$

missä  $\beta$  on yhtälön (14) kerroin ja  $\nu$  Poissonin vakio.

Avoimen tilan kimmomoduuli  $E_d$  ja kokoonpuristuvuusmoduuli  $M$  riippuvat sekä muodonmuutos- että jännitystasosta, jolloin ne on määritettävä oikealla jännitysmuodonmuutosalueella. Kimmomoduulin arvo voidaan selvittää ödometri- tai kolmiakiaalikokeilla. Kokoonpuristuvuusmoduuli  $M$  voidaan määrittää ödometrikokeella tai arvioida kairausvastuksen perusteella liitteestä 3 saatavien moduuliluvun  $m$  ja jännityseksponentin  $\beta$  avulla yhtälöllä (17) (RIL 254-2011: 96-97)

$$M = 100 \cdot m \cdot \left( \frac{\sigma'_v}{100} \right)^{1-\beta}, \quad (17)$$

missä  $M$  on kokoonpuristuvuusmoduuli,  $m$  moduuliluku liitteen 3 mukaisesti,  $\beta$  jännityseksponentti liitteen 3 mukaisesti ja  $\sigma'_v$  tehokas pystyjännitys [kN/m<sup>2</sup>].

Suunnitteluohjeissa on ristiriitaista ohjeistusta eri yhtälöiden käytöstä eri geoteknisissä luokissa. Paalutusohje RIL 254-2011 ei ota kantaa kuvan 18 osalta geoteknisiin luokkiin, mutta yhtälöitä (14) ja (15) suositellaan käytettäväksi erittäin vaativissa olosuhteissa (GL3) ja vaativissa olosuhteissa (GL2). Lyöntipaalutusohjeessa RIL 223-2005 ei ole esitetty kuvaa 18 ollenkaan, ja yhtälöitä (14) ja (15) suositellaan käytettäväksi erittäin vaativissa ja vaativissa olosuhteissa. Suurpaalutusohjeessa RIL 212-2001 ei myöskään ole esitetty kuvaa 18, vaan ainoastaan yhtälöt (14) ja (15) ottamatta kantaa olosuhteiden vaativuuteen yhtälöiden käytössä. Sillan geoteknisessä suunnitteluohjeessa on esitetty sekä kuva 18 että yhtälöt (14) ja (15), mutta ei oteta kantaa menetelmien käyttöön eri geoteknisissä luokissa.

Kitkamaan alustalukukerroin on useissa lähteissä esitetty taulukkoarvona. Taulukoon 4 on koottu alustalukukertoimen  $n_h$  arvoja kitkamaassa eri lähteiden mukaan. Taulukon moduuliluvut  $m$  ja jännityseksponentit on arvioitu liitteen 3 perusteella helpottamaan taulukon tulkintaa. Tiiveyden perusteella arvioidut moduuliluvut ja jännityseksponentit vastaavat hienon hiekan ja hiekan arvoja. Taulukosta voidaan havaita, että eri lähteiden välillä on huomattavia eroja alustalukukertoimien arvoissa. Poulosin mukaiset alustalukukertoimen arvot ovat selkeästi muista lähteistä löydettyjä

arvoja suurempia. Terzaghin mukaiset arvot ovat toiseksi suurimpia arvoja. Lähteestä Langer et al. (1984: 24) otetut arvot osuvat lähteen Das (1990: 488) arvojen välille.

Taulukko 4. Alustalukukertoimen  $n_h$  [ $MN/m^3$ ] arvoja kitkamaassa eri lähteiden mukaan.

Maa-perän tiiviyys		m	$\beta$	Poulos (Koskinen 1990: 32)	Terzaghi 1955 (SPO-78: 27)	Das 1990: 488	Langer et al. 1984: 24
Löyhä	kuiva	50... 300	0,5	3,4	2,5	1,8–2,2	2,2
	veden kyllästämä			1,9	1,4	1,0–1,4	1,3
Keski-tiivis	kuiva	100... 400	0,5	10,0	7,5	5,5–7,0	6,6
	veden kyllästämä			6,8	5,0	3,5–4,5	4,4
Tiivis	kuiva	150... 600	0,5	27,0	20,0	15,0–18,0	17,6
	veden kyllästämä			16,0	12,0	9,0–12,0	10,7

Yhtälö (13) on esitetty myös ruotsalaisessa sillan suunnitteluohjeessa. Ruotsalaisen ohjeen mukaan alustalukukertoimen arvoina käytetään taulukon 5 mukaisia arvoja eikä erillisiä yhtälöitä alustalukukertoimille ole annettu. Kuitenkin alustalukukertoimen  $k_s$  ja paalun halkaisijan  $d$  tuloa on rajoitettu taulukon 6 mukaisesti pohjaveden pinnan yläpuolella. Pohjaveden pinnan alapuolella kerrotaan taulukon 6 arvot kertoimella 0,6. Taulukon 6 arvot vastaavat keskitiivistä luonnontilaista maaperää. Mikäli maaperä on tiivydeltään keskitiiviistä poikkeavaa, muutetaan arvo taulukon 5 perusteella vastaamaan kyseistä tiivyyttä. (Trafikverket 2011: 151) Esimerkiksi maaperän ollessa tiivistä pohjaveden pinnan yläpuolella taulukon 6 arvot kerrotaan luvulla 12/7.

Taulukko 5. Alustalukukertoimen  $n_h$  [ $MN/m^3$ ] arvoja ruotsalaisen siltasuunnitteluohjeen mukaan (Trafikverket 2011: 151).

Pohjaveden pinnan sijainti	Erittäin löyhä	Löyhä	Keskitiivis	Tiivis	Erittäin tiivis
Pohjaveden pinnan yläpuolella	2,5	4,5	7,0	12,0	18,0
Pohjaveden pinnan alapuolella	1,5	3,0	4,5	7,5	11,0

Taulukko 6. Tulon  $k_s \cdot d$  [ $\text{MN}/\text{m}^2$ ] maksimiarvo ruotsalaisen siltasuunnitteluohjeen mukaan pohjaveden pinnan yläpuolella kitkamaassa (Trafikverket 2011: 151).

Maaperä	$k_s \cdot d$
Moreeni	30
Sora	25
Hiekka	12
Siltti	6
Tiivistetty louhetäyttö	50
Tiivistetty moreeni	30
Tiivistetty kitkamaa	30
Tiivistetty koheesioma	10

Norjalaisissa suunnitteluohjeissa lasketaan paalun siirtymä suomalaisista ohjeista poikkeavalla tavalla. Kuitenkin myös norjalaisessa menetelmässä tarvitaan alustaluvun  $k_s$  arvoa. Lisätietoja menetelmästä löytyy norjalaisesta paalutusohjeesta ”Peleviledningen 2005” (Den Norske Pelekomité 2005). Ruotsalaisissa ja norjalaisissa julkaisuissa on esitetty alustaluvun arvot hiekassa suoraan taulukkoarvoina (ks. taulukko 7). Taulukon 7 yhteydessä ei ole esitetty mitään syvyyttä alustalukujen arvot edustavat. Mikäli oletetaan taulukon 7 arvojen edustavan suurinta mahdollista alustaluvun arvoa eli suomalaisten suunnitteluohjeiden mukaista syvyyttä  $10d$ , niin yhtälön (13) mukaisesti vastaava alustalukukertoimen arvo on  $0,1k_s$ . Tällöin taulukot 5 ja 7 antavat ristiriitaisia tuloksia. Esimerkiksi keskitiiviin hiekan alustalukukerroin on taulukon 5 mukaan pohjavesipinnan yläpuolella  $n_h = 7,0 \text{ MN}/\text{m}^3$  ja alapuolella  $n_h = 4,5 \text{ MN}/\text{m}^3$ , ja yhtälön (13) perusteella vastaava alustaluku syvyydessä  $10d$  on pohjavesipinnan yläpuolella  $k_s = 70,0 \text{ MN}/\text{m}^3$  ja alapuolella  $k_s = 45,0 \text{ MN}/\text{m}^3$ . Kuitenkin taulukon 7 mukaan alustaluvun pitäisi olla pohjaveden pinnan yläpuolella  $k_s = 24,0 \text{ MN}/\text{m}^3$  ja alapuolella  $k_s = 16,0 \text{ MN}/\text{m}^3$ .

Taulukko 7. Alustaluvun  $k_s$  [ $\text{MN}/\text{m}^3$ ] arvoja hiekassa ruotsalaisen (Pålkommissionen 2006: 14) ja norjalaisen (Den Norske Pelekomité 2005: 75) julkaisun mukaan.

Maaperän tiiviys	Pohjaveden pinnan sijainti	Ruotsi	Norja
Löyhä	Pohjaveden pinnan yläpuolella	7,0	5,0
	Pohjaveden pinnan alapuolella	5,0	4,5
Keski-tiivis	Pohjaveden pinnan yläpuolella	24,0	22,0
	Pohjaveden pinnan alapuolella	16,0	15,0
Tiivis	Pohjaveden pinnan yläpuolella	61,0	60,0
	Pohjaveden pinnan alapuolella	34,0	34,0

#### 4.1.2 Alustaluku hienorakeisessa maassa

Koheesiomaassa lyhytaikaista kuormitusta vastaava alustaluku on suoraan verrannollinen maan suljetun tilan kimmokertoimeen, joka on yleensä verrannollinen maan suljetun tilan leikkauslujuuteen. Normaalikonsolidoituneessa koheesiomaassa leikkauslujuus kasvaa syvyyden funktiona. Voimakkaasti ylikonsolidoituneessa koheesiomaassa leikkauslujuus on puolestaan syvyydestä riippumatta lähes vakio. Kuivakuoressa leikkauslujuus pienenee syvyyden kasvaessa. Koheesiomaassa alustaluku voi siis olla vakio, kasvaa tai pienentyä syvyyden funktiona. (Suutarinen & Slunga 1981: 23) Usein koheesiomaassa käytetään laskelmissa alustaluvulle vakioarvoa.

Terzaghin (1955) tutkiessa vaakakuormitettuja paaluja hän huomasi vaakasuuntaisen alustalukukertoimen pienenevän ja paalun vaakasiirtymän kasvavan konsolidaation edetessä ajan kuluessa. Tämä johtuu konsolidaatiosta sekä leikkausvoimien johdosta hitaasti tapahtuvista muodonmuutoksista (Suutarinen & Slunga 1981: 27). Koheesiomaassa vaakasuoran alustaluvun arvoon vaikuttaa paalun halkaisijan lisäksi myös kuormitusaika. Normaalikonsolidoituneessa maassa alustaluku voidaan määrittää suljetun leikkauslujuuden perusteella. Vaativissa olosuhteissa (GL2, ks. luku 6.2) alustaluvun vaihteluväli pitkäaikaisessa kuormituksessa voidaan määrittää yhtälöllä (18)

$$k_s = 20 \dots 50 \cdot \frac{s_u}{d}, \quad (18)$$

ja lyhytaikaisessa kuormituksessa yhtälöllä (19) (RIL 254-2011: 97)

$$k_s = 50 \dots 150 \cdot \frac{s_u}{d}, \quad (19)$$

missä  $k_s$  on alustaluku [ $\text{kN/m}^3$ ],  
 $s_u$  suljettu leikkauslujuus [ $\text{kN/m}^2$ ] ja  
 $d$  paalun halkaisija tai sivumitta [ $\text{m}$ ].

Erittäin vaativissa olosuhteissa (GL3, ks. luku 6.2) pitkäaikaisessa kuormituksessa hienorakeisen maan alustaluku suositellaan määritettäväksi ödometrikokeella määritetyn kokoonpuristuvuusmoduulin  $M$  avulla yhtälöllä (20)

$$k_s = \beta \cdot \frac{M}{d}, \quad (20)$$

missä  $k_s$  on alustaluku [ $\text{kN/m}^3$ ],  
 $M$  kokoonpuristuvuusmoduuli [ $\text{kN/m}^2$ ],  
 $\beta$  savelle 0,46...0,74 Poissonin vakion vaihdellessa vastaavasti 0,4...0,3,  
 $\beta$  siltile 0,62...0,83 Poissonin vakion vaihdellessa vastaavasti 0,35...0,25 ja  
 $d$  paalun halkaisija tai sivumitta [ $\text{m}$ ],

ja lyhytaikaisessa kuormituksessa kolmiakσιαalikokeella määritetyn suljetun tilan kimmomoduulin  $E_u$  avulla yhtälöllä (21) (RIL 254-2011: 97)

$$k_s = \frac{E_u}{d}, \quad (21)$$

missä  $k_s$  on alustaluku [ $\text{kN/m}^3$ ],  
 $E_u$  suljetun tilan kimmomoduuli [ $\text{kN/m}^2$ ] ja  
 $d$  paalun halkaisija tai sivumitta [ $\text{m}$ ].

Yhtälön (20)  $\beta$  voidaan määrittää yhtälöllä (16) ja kokoonpuristuvuusmoduuli  $M$  yhtälöllä (17). Kokoonpuristuvuusmoduulin laskennassa tarvitaan koheesiomaan jännitysekspONENTIN  $\beta$  ja moduuliluvun  $m$  arvoa. JännitysekspONENTIN ja moduuliluvun arvot tulee määrittää ödometrikokeisiin perustuen riittävän tarkkuuden saavuttamiseksi (Länsivaara 2000: 41). Taulukossa 8 on esitetty tyypillisiä jännitysekspONENTIN ja moduuliluvun arvoja koheesiomaassa. Taulukko 8 soveltuu alustavaan parametrien arviointiin. Alustaluvun arvot pienenevät koheesiomaassa siirtymän kasvaessa. Suutarisen ja Slungan (1981: 25) mukaan pienillä siirtymän arvoilla alustaluku on jopa  $300 \dots 500 \cdot s_u/d$  laskien siirtymän kasvaessa nopeasti välille  $100 \dots 200 \cdot s_u/d$ .

Taulukko 8. JännitysekspONENTIN  $\beta$  ja moduuliluvun  $m$  arvoja koheesiomaassa (Tammirinne 1975: 53).

Maalaji	JännitysekspONENTTI $\beta$	Moduuliluku $m$	Konsolidoitumistila
Lieju, liejusavi	-0,1...-0,5	5...10	NK
Lieju, liejusavi	0	50...60	YK
Savi	-0,1...-0,4	5...20	NK
Savi ( $S_t \approx 10$ )	-0,5		NK
Savi	0	40...140	YK
Kuivakuorisavi	0,5...1	50...130	YK
Siltti	0...0,5	20...140	NK
Siltti	0	100...250	YK
Kuivakuorisiltti	0,5...1	100...200	YK

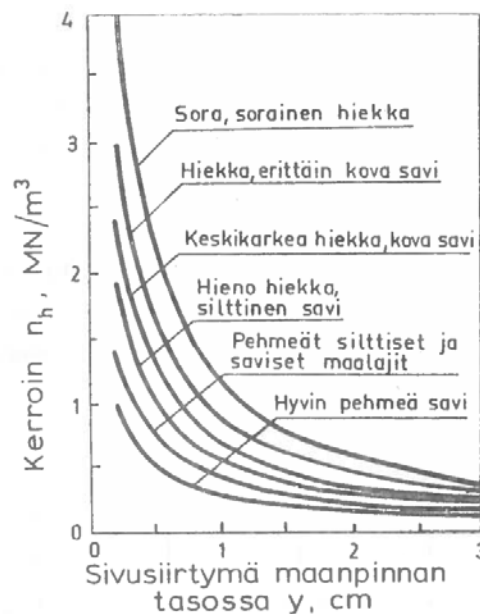
Suunnitteluohjeissa on ristiriitaista ohjeistusta myös koheesiomaan osalta eri yhtälöiden käytöstä eri geoteknisissä luokissa. Paalutusohjeen RIL 254-2011 mukaan erittäin vaativissa olosuhteissa (GL3) alustaluku suositellaan määritettäväksi pitkäaikaisessa kuormituksessa yhtälöllä (20) ja lyhytaikaisessa kuormituksessa yhtälöllä (21), ja vaativissa olosuhteissa (GL2) pitkäaikaisessa kuormituksessa yhtälöllä (18) ja lyhytaikaisessa kuormituksessa yhtälöllä (19). Lyöntipaalutusohjeessa RIL 223-2005 määritetään alustaluku erittäin vaativissa olosuhteissa kuten paalutusohjeessa RIL 254-2011, mutta yhtälöiden (18) ja (19) yhteydessä ei ole mainintaa olosuhteiden vaativuudesta. Suurpaalutusohjeessa RIL 212-2001 ja Sillan geoteknisessä suunnitteluohjeessa (Liikennevirasto 2012) on esitetty yhtälöt (18)...(21), mutta niiden yhteydessä ei ole mainintaa yhtälöiden käytöstä eri geoteknisissä luokissa.



Ruotsalaisissa sillan suunnitteluohjeissa (Trafikverket 2011: 150) käytetään pitkäaikaisessa kuormituksessa yhtälön (18) kertoimena lukua 50 ja lyhytaikaisessa kuormituksessa yhtälön (19) kertoimena lukua 200. Norjalaisissa suunnitteluohjeissa lasketaan paalun siirtymä suomalaisista ohjeista poikkeavalla tavalla koheesiomaassa (ks. luku 4.5). Toisaalta norjalaisessa ohjeistuksessa paalujen nurjahduskapasiteetin laskennassa pitkäaikaisessa kuormituksessa käytetään yhtälön (18) kertoimena lukua 50 ja lyhytaikaisessa kuormituksessa yhtälön (19) kertoimena lukua 200 (Uotinen 2014).

#### 4.1.3 Sekä kitka- että koheesiomaahan soveltuvat alustaluvun määrittämisen menetelmät

Manoliu (1976) on ehdottanut alustalukukertoimen määrittämiseksi erilaisissa maaperissä kuvan 19 mukaisia käyriä, koska todellisuudessa alustaluvun arvot pienenevät siirtymän kasvaessa. Käyrät perustuvat sivumitaltaan tai halkaisijaltaan 0,3...0,45 m paaluilla tehtyihin koekuormituksiin, ja alustaluvun oletetaan kasvavan lineaarisesti syvyyden funktiona eri maalajeissa. Manoliun tekemissä kuormituskokeissa sivuvaikutuksen ääriarvo saavutettiin noin joka toisessa kokeessa vaakasiirtymän ollessa maanpinnassa alle 25 mm.



Kuva 19. Alustalukukerroin maan pinnassa mitatun vaakasiirtymän funktiona eri maalajeissa Manoliun (1976) mukaan (Suutarinen & Slunga 1981: 26).

Kirjallisuudessa esiintyy usein myös Palmerin ja Thompsonin (1948) kehittämä alustaluvun yhtälö (22) (Chin et al. 2009; Prakash & Sharma 1990: 331; Phanikanth et al. 2010)

$$k_s = k_L \left( \frac{z}{L} \right)^n, \quad (22)$$

missä  $k_L$  on alustaluvun  $k_s$  arvo paalun kärjen kohdalla ( $z = L$ ) [ $\text{kN/m}^3$ ],  
 $z$  syvyys maanpinnasta [ $\text{m}$ ],  
 $L$  paalun pituus [ $\text{m}$ ] ja  
 $n$  kerroin ( $\geq 0$ ),

sekä Vesicin (1961) yhtälö (23) (Juirnarongrit & Ashford 2005: 16; Bowles 1968: 505; Bezgin 2010: 46)

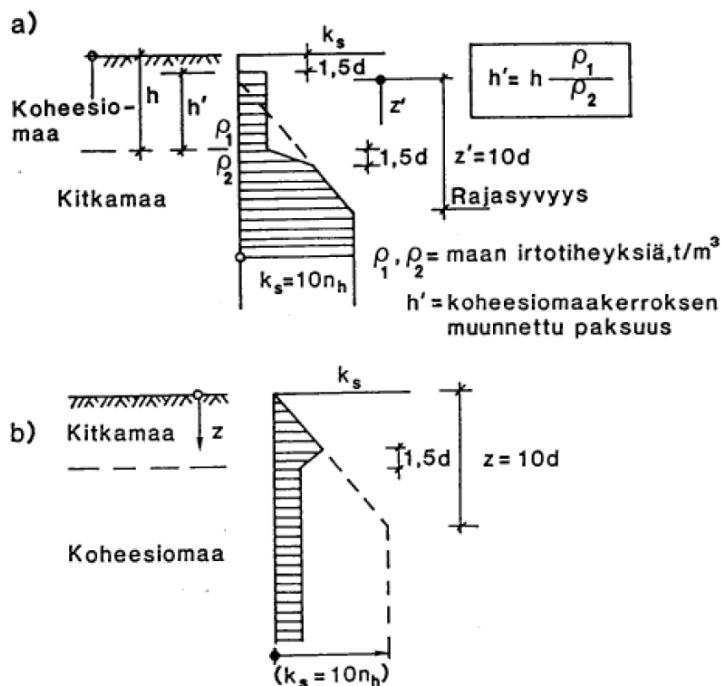
$$k_s = \frac{0.65E_d}{(1-\nu^2)d} \left[ \frac{E_d d^4}{E_p I_p} \right]^{\frac{1}{12}}, \quad (23)$$

missä  $E_d$  on maaperän kimmomoduuli [kN/m<sup>2</sup>],  
 $\nu$  Poissonin vakio,  
 $d$  paalun halkaisija [m] ja  
 $E_p I_p$  paalun taivutusjäykkyys [kNm<sup>2</sup>].

Yhtälön (22) kerroin  $n$  on kitkamaalle ja normaalikonsolidoituneelle koheesiomaalle ja yksi. Ylikonsolidoituneelle savelle  $n$  on nolla. Usein Palmerin ja Thompsonin yhtälö (22) voidaan kitkamaalajeissa esittää aikaisemmin esitetyn yhtälön (13) muodossa. (Chin et al. 2009) Palmerin ja Thompsonin yhtälöä ja Vesicin yhtälöä voidaan käyttää sekä kitka- että koheesiomaalle.

#### 4.1.4 Alustaluku kerroksellisessa maassa

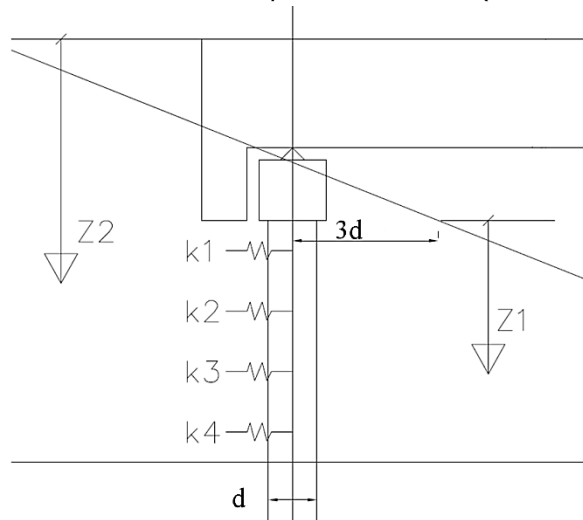
Suomalaisissa suunnitteluohjeissa ohjeistetaan vaakasuuntaisen alustaluvun määrittämistä kerroksellisessa maassa kuvan 20 mukaisesti. Koheesiomaan ollessa ylimmäisenä kerroksena syvyyteen  $1,5d$  maanpinnasta asti sivuvastus ja näin ollen alustaluku oletetaan nolllaksi, kuten koheesiomaan tarkasteluissa yleensä. Koheesio- ja kitkamaan rajapinnasta lähtien syvyyden  $1,5d$  aikana alustaluvut muuttuvat koheesiomaata vastaavista alustaluvuista kitkamaata vastaaviin alustalukuihin (ks. kuva 20a). Kitkamaan puolella alustaluvut noudattavat yhtälöä (13) kuitenkin siten, että yhtälön syvyys  $z$  alkaa vasta ( $z = 0$ ) syvyydessä  $1,5d$  maanpinnasta. Näin ollen kitkamaan alustaluku on vakio syvyydestä  $11,5d$  maanpinnasta alaspäin. Kitkamaan ollessa ylimpänä maakerroksena kitkamaan osalta alustaluvut noudattavat yhtälöä (13), kuten tavallisesti kitkamaan tapauksessa. Kitkamaan vaihtuessa koheesiomaaksi muutos kitkamaan alustaluvuista koheesiomaan alustaluvuiksi tapahtuu kitka- ja koheesiomaan rajapinnasta  $1,5d$  maanpintaa kohti kitkamaan puolella (ks. kuva 20b).



Kuva 20. Alustaluku kerroksellisessa maassa; a) karkearakeinen maakerros hienorakeisen alapuolella, b) karkearakeinen maakerros hienorakeisen yläpuolella (RIL 212-2001: 71; Liikennevirasto 2012: 35).

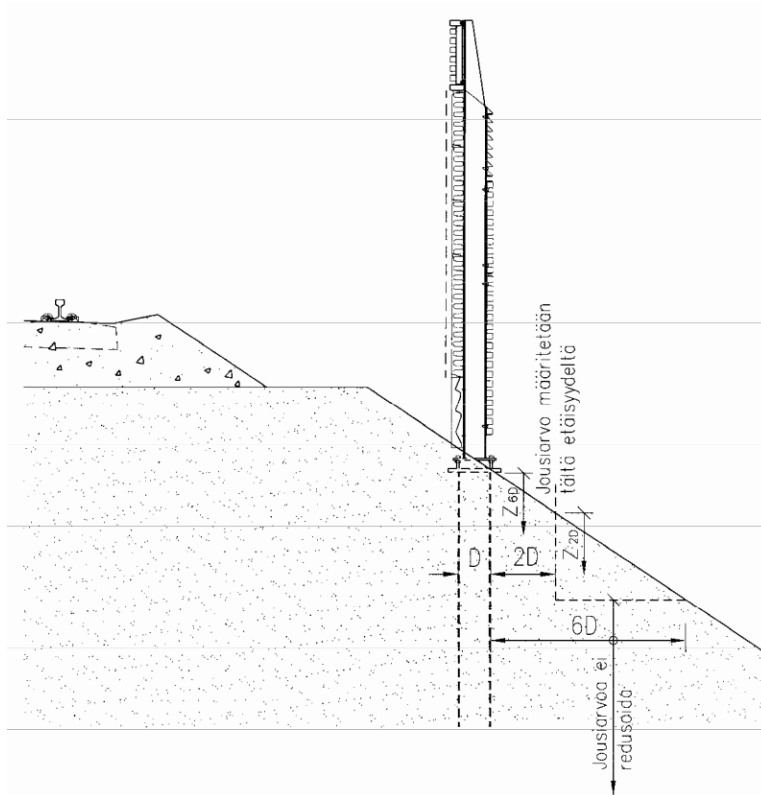
#### 4.1.5 Alustaluku luiskassa

Sillan geoteknisen suunnitteluohjeen mukaan paalun sijaitessa kitkamaan luiskassa, voidaan luiskaan päin suuntautuvaa liikettä kuvaavien alustalukujen määrittämisessä käyttää syvyyskoordinaatin  $z$  alkamiskohtana tasoa, jossa paalun keskilinjan ja luiskankäytävän välinen vaakasuora etäisyys on kolminkertainen paalun halkaisijaan nähden (ks. kuva 21). Koheesiomaassa luiskankäytävän vaikutus alustalukuun voidaan tutkia esimerkiksi elementtimenetelmällä. Laskettaessa paaluun kohdistuvan paineen ääriarvoa luiskankäytävän kaltevuus täytyy huomioida kitkamaassa passiivipainekertoimen arvolla ja koheesiomaassa liukupintalaskelmalla. (Liikennevirasto 2012: 34)



Kuva 21. Luiskankäytävän kaltevuuden huomioiminen alustalukujen laskemisessa sillan geoteknisen suunnitteluohjeen mukaisesti: syvyyskoordinaatti  $z_1$  aukkoon päin ja  $z_2$  penkereeseen päin (muokattu: Liikennevirasto 2012).

Ratahallintokeskuksen melusteiden suunnitteluohjeessa (Ratahallintokeskus 2004: 42–43) maajousia redusoidaan edellä esitetystä poikkeavalla tavalla. Luiskankäytävän vaikutus huomioidaan käyttämällä syvyyskoordinaatin  $z$  alkamiskohtana tasoa, jossa paalun ulkopinnan ja luiskankäytävän välinen vaakasuora etäisyys on kaksinkertainen paalun halkaisijaan nähden. Redusointia jatketaan, kunnes paalun ulkopinnan ja luiskankäytävän välinen vaakasuora etäisyys on kuusinkertainen paalun halkaisijaan nähden. Kuvassa 22 on esitetty melusteiden suunnitteluohjeiden mukainen redusointimenetelmä.



Kuva 22. Luiskan kaltevuuden huomioiminen alustalukujen laskemisessa meluesteiden suunnitteluohjeen mukaisesti (Ratahallintokeskus 2004: 43).

Ensimmäisenä kuvattu sillan geoteknisessä suunnitteluohjeessa esitetty luiskan redusointimenetelmä redusoi hieman voimakkaammin maajousia kuin meluesteiden suunnitteluohjeiden mukainen menetelmä. Luiskan ollessa jyrkkä menetelmien aiheuttamat erot maajousissa kasvavat. Tämä johtuu siitä, että ensimmäisenä esitetyssä menetelmässä syvyyskoordinaatti  $z = 0$ , kun paalun keskilinjan ja luiskan etupinnan välinen vaakasuora etäisyys on  $3d$ , ja jälkimmäisessä menetelmässä  $z = 0$ , kun paalun keskilinjan ja luiskan etupinnan välinen vaakasuora etäisyys on  $2,5d$ , ja lisäksi jälkimmäisessä menetelmässä jousia ei redusoida syvyyden  $6d$  jälkeen.

## 4.2 Alustaluku syklisessä kuormituksessa

Syklinen eli toistuva kuormitus on ajan suhteen muuttuvaa kuormitusta, mutta hitausvoimilla ei ole pääsääntöisesti vaikutusta rakenteen rasituksiin. Syklisen kuormituksen taajuuden ylärajana pidetään yleensä taajuutta 1 Hz. Yli 1 Hz taajuiset kuormat ovat dynaamisia kuormia. (Koskinen & Rantala 2003: 22; Heikkilä 1988: 21) Syklinen kuormitus voi olla suunnaltaan yksisuuntaista tai vaihtuvaa. Syklisiä kuormituksia voivat olla esimerkiksi aaltokuormat, joiden merkitys on kuitenkin suoraan paalua tai siltapilaria kuormittavana pienekkö. (RIL 212-2001: 73)

Syklinen kuormitus aiheuttaa maahan yleensä palautumattomia muodonmuutoksia, heikentää maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia sekä tiivistää maata paalun ympärillä. Näin ollen vaakasiirtymien suuruus kasvaa verrattuna staattiseen kuormitukseen. (Koskinen & Rantala 2003: 22; RIL 212-2001: 73) Kun hiekan tiiviyys on syklisessä kuormituksessa alle kriittisen arvon, otetaan maan nesteytymisvaara huomi-

oon. Hiekan tiiviuden kriittinen arvo vastaa lyöntipaalausohjeen RIL 223-2005 mukaan heijarikairausvastusta 15 lyöntiä/0,2 m.

Syklisesti sivukuormitetun paalun tai paaluryhmän analysoinnissa voidaan käyttää staattista alustalukumenetelmää soveltaen. Alustaluku pienenee toistuvalla kuormituksella, mikä kasvattaa siirtymää. Alustaluvun pienentyminen kitkamaassa riippuu kitkamaan suhteellisesta tiiveydestä. Tiiviillä maalla alustaluku voi pienentyä 50 % ja löyhällä maalla jopa 75 %. Alustaluvun pienentyminen 50 %:iin on todettu aiheuttavan 50 % lisäyksen siirtymiin pitkillä paaluilla ja jopa 100 % lisäyksen siirtymiin lyhyillä paaluilla. Syklisen kuormituksen johdosta on suositeltavaa käyttää taulukon 9 arvoja alustalukujen laskennassa karkearakeisessa maassa. (Koskinen 1990: 37) Syklinen kuormitus vaikuttaa siirtymiä kasvattavasti noin syvyyteen  $3...4d$  asti, jonka alapuolella käytetään staattisia alustaluvun arvoja (RIL 223-2005: 65-66).

*Taulukko 9. Syklisessä kuormituksessa karkearakeisessa maassa käytettävät alustaluvun  $k_{ss}$  arvot. Taulukossa  $k_s$  on staattinen alustaluku. (RIL 223-2005: 66)*

Alustaluku sykli- sessä kuormituk- sessa	Suhteellinen tiiviyys $D_r$		
	<0,35 (löyhä)	0,35-0,65 (keskitiivis)	>0,65 (tiivis)
$k_{ss}$	0,25 $k_s$	0,33 $k_s$	0,50 $k_s$

### 4.3 Alustaluku paaluryhmissä

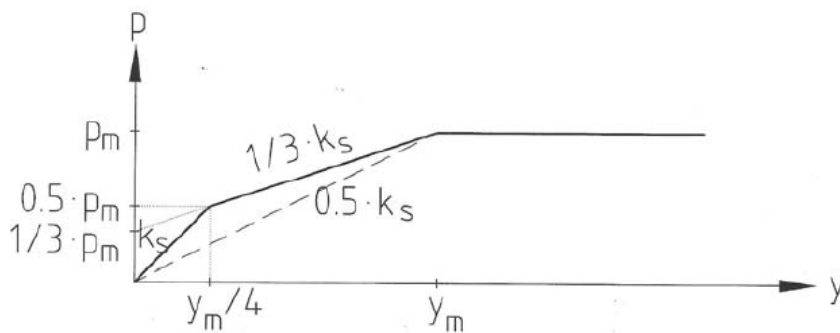
Paalujen siirtymien ollessa millimetrin suuruusluokkaa alustalukuja ei tarvitse yleensä redusoida paaluryhmissä, joissa paaluväli  $a$  on suurempi tai yhtä suuri kuin  $3d$ . Paaluryhmän vaakasiirtymän ollessa suurempi täytyy sivuvastusta laskettaessa alustalukuja redusoida. Kun paalujen keskiöetäisyys  $a$  liikettä vastaan kohtisuorassa suunnassa on suurempi tai yhtä suuri kuin  $8d$ , niin alustalukujen laskennassa ei paalun halkaisijan arvoa tarvitse muuttaa. Paalujen keskiöetäisyyden  $a$  ollessa pienempi tai yhtä suuri kuin  $2,5d$ , käytetään alustalukujen laskennassa paalujen halkaisijan  $d$  tilalla keskiöetäisyyttä  $a$ . Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti. Maasta paaluryhmän yksittäisiin paaluihin kohdistuvan sivukuorman laskemiseen soveltuvat alustaluvut on selvittävä kussakin tapauksessa erikseen, esimerkiksi toispuoleisen täytön tai luis-kassa olevien paalujen osalta. (RIL 223-2005: 69-70)

Todellisuudessa paaluryhmän ensimmäisen rivin osalla ei alustalukuja tarvitse redusoida yhtä voimakkaasti kuin jälkimmäisiä rivejä, sillä kuormitusta vastaan ensimmäisen paalurivin sivukapasiteetti on suurempi kuin muiden rivien. Tämä johtuu siitä, että ensimmäisen rivin paaluihin vaikuttaa vain kuvan 9 mukaiset maan leikkausvyöhykkeen reunavaikutukset. Jälkimmäisiin riveihin vaikuttaa sekä reuna- että varjo-vaikutukset. (Walsh 2005: 1-2) Tätä ei ole huomioitu suunnitteluohjeissa.

## 4.4 Sivupaineen ja siirtymän yhteys

### 4.4.1 Sivupaineen ja siirtymän yhteys kitkamaassa

Karkearakeisessa maassa siirtymätarkasteluissa voidaan käyttää kuvan 23 mukaista kitkamaan likimääräistä sivupaineen ja siirtymän yhteyttä. Kuvassa  $p_m$  on paaluun kohdistuvan paineen ääriarvo,  $y_m$  sitä vastaava siirtymä ja  $k_s$  alustaluku. Katkoviiva kuvassa määrittää pisteen  $(p_m, y_m)$ , eikä se kuvaa maan todellista käyttäytymistä. (Liikennevirasto 2012: 31)



Kuva 23. Paaluun sivupaineen ja siirtymän yhteys kitkamaassa (Liikennevirasto 2012: 31; RIL 254-2011: 95).

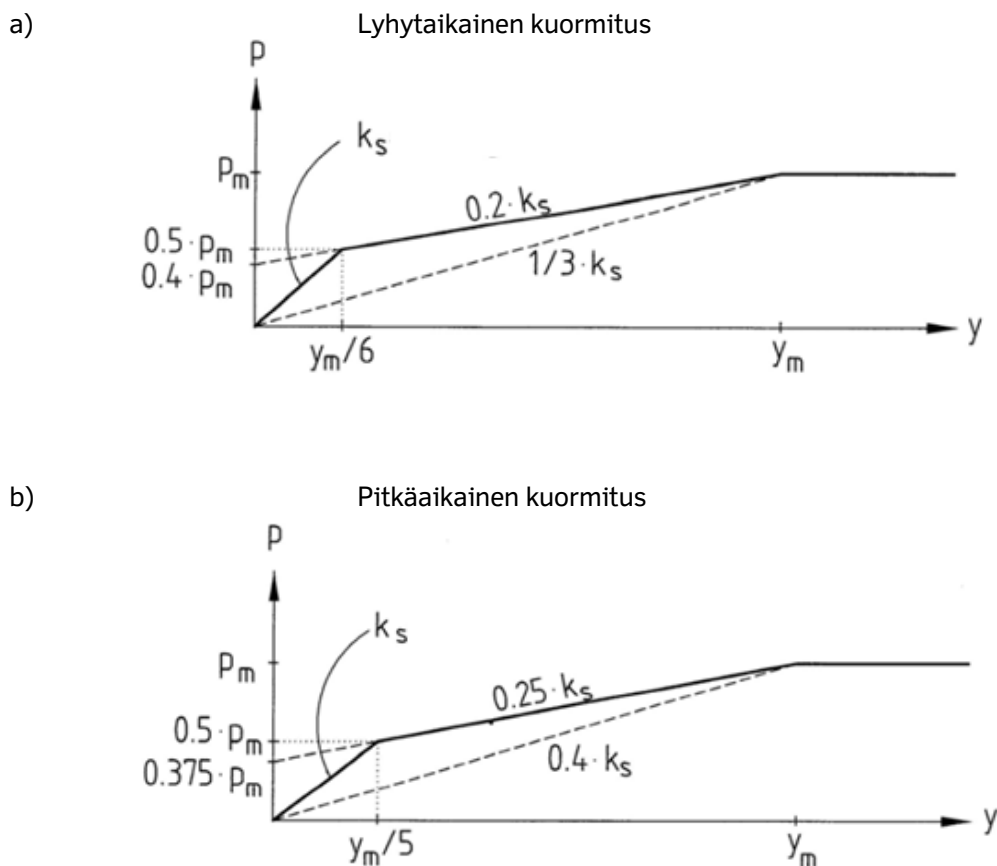
Laskentaohjelman käyttäessä vain lineaari-kimmoista joustua, laskenta aloitetaan alustalukua  $k_s$  vastaavalla jousella. Mikäli jousen siirtymä on suurempi kuin  $y_m/4$ , pitää alustaluvun arvoa pienentää ja tehdä uusi laskenta. Laskentaa jatketaan, kunnes kaikkien jousien voimat ovat kuvan 23 yhtenäisellä viivalla. (Liikennevirasto 2012: 31)

Samaan tulokseen päästään myös toisella menettelyllä. Jos  $p > p_m/2$  tai  $y > y_m/4$  ensimmäisen laskentakierroksen jälkeen, asetetaan jousen kohdalle paaluun kohdistuva sivupainetta  $p_m/3$  vastaava vaakavoima ja määritetään jousi uudelleen alustalukua  $k_s/3$  käyttäen, ja suoritetaan uusi laskenta näillä arvoilla. Mikäli laskennan jälkeen  $y > y_m$ , poistetaan jousi kokonaan ja sen kohdalle asetetaan vaikuttamaan sivupainetta  $p_m$  vastaava voima. Laskentaa jatketaan, kunnes jokaisen jousen voimaa vastaava paaluun kohdistuva paine ja siirtymä ovat kuvan 23 yhtenäisellä viivalla. Ohjelman salliessa kimmoisen alueen epälineaarisen mallinnuksen tarvitaan vain yksi laskenta. (Liikennevirasto 2012: 31-32)

Ruotsalaisessa julkaisussa (Pålkommisionen 2006) on kerrottu sivupaine-siirtymäkäyrien määrittämisestä enemmän yleisellä tasolla, ja todettu, että on olemassa useita menetelmiä käyrien määrittämiseksi. Lineaarisen käyrän määrittämisestä kerrotaan tarkemmin kuin epälineaarisen. Norjalaisessa julkaisussa (Den Norske Pelekomité 2005: 74) on annettu epälineaarisen sivupaine-siirtymä-käyrän yhtälö hiekalle. Työssä tarkastelluissa ruotsalaisissa ja norjalaisissa julkaisuissa ei ole esitetty kitkamaalle kuvan 23 mukaista epälineaarista sivupaine-siirtymä-käyrää.

#### 4.4.2 Sivupaineen ja siirtymän yhteys koheesiomaassa

Koheesiomaan sivupaineen ja siirtymän yhteys voidaan esittää kuvan 24 mukaisesti lyhyt- ja pitkäaikaisissa kuormituksissa. Katkoviiva kuvissa määrittää pisteen  $(p_m, y_m)$ , eikä se kuvaa maan todellista käyttäytymistä. (Liikennevirasto 2012: 32)



Kuva 24. Paalun sivupaine-siirtymäyhteys a) lyhytaikaisessa kuormituksessa ja b) pitkäaikaisessa kuormituksessa koheesiomaassa (Liikennevirasto 2012: 32-33; RIL 254-2011: 95).

Laskentaohjelman käyttäessä vain lineaari-kimmoista jousia, laskenta aloitetaan alustalukua  $k_s$  vastaavalla jousella. Mikäli jousen siirtymä on suurempi kuin  $y_m/6$  lyhytaikaisessa kuormituksessa tai suurempi kuin  $y_m/5$  pitkäaikaisessa kuormituksessa, pitää alustaluvun arvoa pienentää ja tehdä uusi laskenta. Laskentaa jatketaan, kunnes kaikkien jousien voimat ovat lyhytaikaisen kuormituksen tapauksessa kuvan 24a ja pitkäaikaisen kuormituksen tapauksessa kuvan 24b yhtenäisellä viivalla. (Liikennevirasto 2012: 33)

Samaan tulokseen päästään myös toisella menettelyllä. Jos  $p > p_m/2$  tai lyhytaikaisessa kuormituksessa  $y > y_m/6$  ja pitkäaikaisessa kuormituksessa  $y > y_m/5$  ensimmäisen laskentakierroksen jälkeen, asetetaan jousen kohdalle lyhytaikaisessa kuormituksessa paaluun kohdistuva sivupainetta  $0,4p_m$  ja pitkäaikaisessa kuormitustilanteessa paaluun kohdistuva sivupainetta  $0,375p_m$  vastaava vaakavoima. Jousivakio määritetään uudelleen lyhytaikaisessa kuormituksessa alustalukua  $30s_u/d$  ja pitkäaikaisessa kuormituksessa alustalukua  $12,5s_u/d$  käyttäen ja suorittamalla uusi laskenta. Mikäli laskennan jälkeen  $y > y_m$  poistetaan jousi kokonaan, ja sen kohdalle asetetaan vaikut-

tamaan sivupainetta  $p_m$  vastaava voima. Laskentaa jatketaan, kunnes jokaisen jousen voimaa vastaava paaluun kohdistuva paine ja siirtymä ovat lyhytaikaisessa kuormitustilanteessa kuvan 24a ja pitkäaikaisessa kuormitustilanteessa kuvan 24b yhtenäisellä viivalla. Ohjelman salliessa kimmoisen alueen epälineaarisen mallinnuksen tarvitaan vain yksi laskenta. (Liikennevirasto 2012: 33)

Ruotsalaisessa julkaisussa (Pålkommissionen 2006) on todettu, että on olemassa useita menetelmiä sivupaine-siirtymä-käyrien määrittämiseksi. Lineaarisen käyrän määrittämisestä kerrotaan tarkemmin kuin epälineaarisen. Koheesiomaan tapauksessa on esitetty myös voimakkaasti epälineaarisen käyrän yhtälö. Lisätietoja ruotsalaisista menetelmistä löytyy julkaisusta ”Transversalbelastade pålar -statiskt verkningssätt och dimensioneringsanvisningar” (Pålkommissionen 2006). Norjassa koheesiomaan epälineaarinen käyttäytyminen otetaan huomioon ns. normalisoidulla, voimakkaasti epälineaarilla kuormitus-vaakasiirtymä-käyrällä, minkä laatiminen edellyttää koheesiomaasta tehtäviä suljetun tilan kolmiaksoalikoiteita. Norjalaisen ohjeen mukainen mitoitus edellyttää ohjelmistoa, missä maajouset voidaan kuvata voimakkaasti epälineaarina. Lisätietoja menetelmästä löytyy norjalaisesta paalutusohjeesta ”Peleviledningen 2005” (Den Norske Pelekomité 2005). Norjalaisissa ja ruotsalaisissa julkaisuissa esitetyt epälineaariset menettelyt vaikuttavat suunnittelijan kannalta työläiltä. Työssä tarkastelluissa ruotsalaisissa ja norjalaisissa julkaisuissa ei ole esitetty koheesiomaalle kuvan 24 mukaista epälineaarista sivupaine-siirtymä -käyrää.

#### 4.4.3 Sivupaineen ja siirtymän yhteys paaluryhmissä

Suomalaisissa suunnitteluohjeissa, esimerkiksi lähteissä Liikennevirasto 2012, RIL 254-2011, RIL 223-2005, ei oteta kantaa paaluryhmien sivupaine-siirtymä-käyrien redusointiin muutoin kuin luvussa 4.3 on alustalukujen redusoinnin osalta kerrottu. Bogardin ja Matlocin (1983) mukaan yksittäisen paalun sivupaine-siirtymä-käyriä tulee redusoida pienentämällä käyrän sivupaineen arvoja paaluryhmän tapauksessa. Reese, Isenhowe ja Wang (2006) laativat sivupaine-siirtymä-käyrien redusointiin liitteen 4 mukaiset kuvat, missä sivupaineen pienentäminen riippuu paaluvälistä.



## 5 FEM-jousimalli

### 5.1 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmä (FEM) on numeerinen ratkaisumenetelmä, jossa jatkuva rakenne korvataan diskreeteillä äärellisillä elementeillä. Elementit yhdistyvät toisiinsa solmujen avulla. Elementtimenetelmässä koko rakenteen käyttäytyminen voidaan ratkaista lähtien yksittäisten elementtien tunnetuista kuormitus-muodonmuutos-käyttäytymisistä. Elementtien muodostamaa rakennetta analysoidaan standardijäykkyyshetimitelmällä, jossa yksittäisten elementtien jäykkyydet yhdistetään koko rakenteen jäykkyyshetimitriisiin ja ratkaisu suoritetaan matriisilaskennan avulla. (Nirhamo 1995: 65; Lehtonen 2013: 2-3)

Elementtien koko valitaan aina tapauskohtaisesti ja kokoa voidaan muokata. Tiheämällä verkolla laskenta on tarkempi, mutta laskenta vie enemmän aikaa. Liian tiheä verkko hidastaa tarpeettomasti laskentaan kuluva aikaa, ja toisaalta liian harvalla verkolla saadaan epätarkkoja tuloksia. (Lehtonen 2013: 2-3)

### 5.2 Maan ja paalun elementti-jousimalli

Kaksiulotteisessa elementti-jousimallissa paalu kuvataan palkkielementtien avulla ja maa vaakasuuntaisina epälineaarina tai lineaarisina jousina. Kimmoisen paalun käyttäytymistä mallissa voidaan kuvata neljännen asteen differentiaaliyhtälöllä (24) (Das 2010; Meyer & Reese 1979: 9)

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} + Q \frac{d^2 y}{dz^2} + E_d y = 0 \quad (24)$$

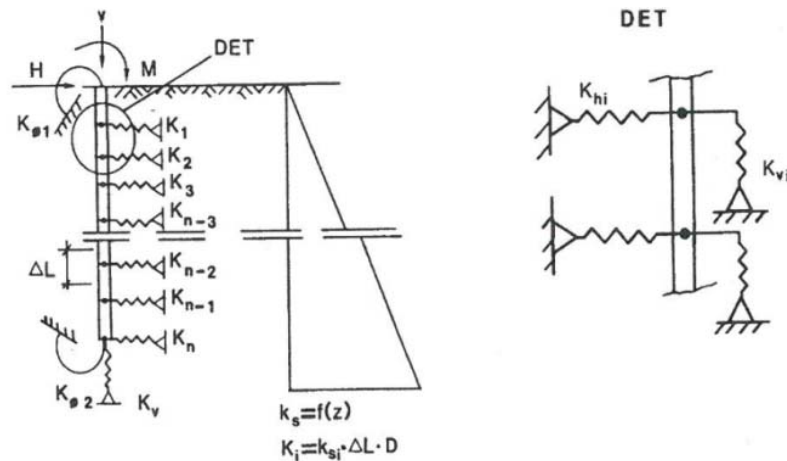
missä  $E_p I_p$  on paalun taiputusjäykkyys [kNm<sup>2</sup>],  
 $y$  paalun vaakasuuntainen siirtymä maan pinnalla [m],  
 $z$  syvyys maanpinnasta [m],  
 $Q$  vaakasuuntainen kuorma maan pinnalla [kN] ja  
 $E_d$  maan kimmomoduuli [kN/m<sup>2</sup>].

Paalun liikkeistä aiheutuvat reaktivoimat keskitetään paaluelementin solmupisteisiin jousilla, joiden jousivakiot vastaavat maan alustalukuja tarkasteltavassa raja-tilassa. Myös paalun reunaehdot mallinnetaan jousien avulla. (Li & Gong 2008; Tielaitos 1999b: 43) Jousivakiot voidaan laskea yhtälöllä (25)

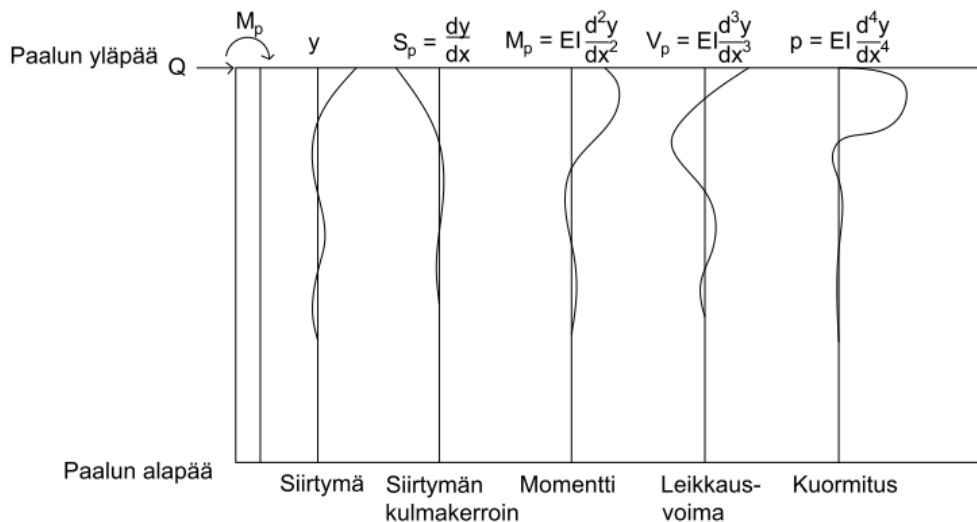
$$k_{1,2} = k_s \cdot \Delta L \cdot d \quad (25)$$

missä  $k_{1,2}$  on jousivakio [kN/m],  
 $k_s$  maan alustaluku [kN/m<sup>3</sup>],  
 $\Delta L$  jousien väli [m] ja  
 $d$  paalun halkaisija [m].

Paalun ja maan välistä vuorovaikutusta kuvaava elementti-jousimalli on esitetty kuvassa 25. Differentiaaliyhtälön (24) ratkaisuna saadaan FEM-laskentaohjelmilla eri parametrien ja paalun pituuden suhteen kuvan 26 mukaisia käyriä.



Kuva 25. Paalun ja maan vuorovaikutusta kuvaava elementti-jousimalli (RIL 212-2001).



Kuva 26. Siirtymän, siirtymän kulmakertoimen, momentin, leikkausvoiman ja kuormituksen riippuvuus syvyydestä yhtälön (24) mukaisesti (muokattu: Das 2010).

Jousimalli otaksuu maan käyttäytymisen kimmoplastisesti ja maanpaine oletetaan jakautuvan paalun levyiselle suoralle maakaistalle. Numeerisessa elementtimenetyksessä on huomioitava myös ylärakenteen jäykkyyden vaikutus paalujen siirtymiin. Paalun pään ja kärjen reunaehdot määritetään mahdollisimman tarkasti todellisen rakenteen toimintaa vastaaviksi. Reunaehtojen määrittämisessä voidaan käyttää hyväksi aikaisempia kokemuksia vastaavista kuormitustapauksista. (Koskinen 1990: 87-88; RIL 212-2001: 72) Jousimallin avulla on mahdollista huomioida myös maan kerroksellinen rakenne.

Laskentatarkkuuden kannalta tärkeimmät jousit sijaitsevat maanpintaa lähellä. FEM-jousimallin etuja ovat yksinkertaisuus ja monipuolisuus. Menetelmän tarkkuus on melko hyvä ja menetelmä soveltuu hyvin mitoitukseen. Mallin todellinen tarkkuus riippuu mallintamisen ja lähtötietojen tarkkuudesta. (Li & Gong 2008; Koskinen 1990: 87; Nirhamo 1995: 65)

Työssä käytettävät ohjelmistot Lusas Bridge ja Sofistik ovat FEM-menetelmään perustuvia suunnitteluohjelmistoja, joita voidaan käyttää siltojen suunnittelussa. Ohjelmistoilla voidaan tehdä mallinnuksia 2D- ja 3D-tilassa. Ohjelmistoja voidaan käyttää erityyppisten siltojen suunnitteluun, analysointiin ja laskentoihin. Ohjelmistot soveltuvat mm. seismisten ja dynaamisten kuormitusten, suurten muodonmuutosten ja väsymisen tarkasteluihin. Ohjelmistot muodostavat tarkkoja ratkaisuja FEM-menetelmään perustuen erilaisille lineaarisille ja epälineaarisille jännityksille sekä dynaamisille ja termisille kuormille. Ohjelmat sallivat sekä lineaaristen että epälineaaristen jousien mallintamisen. (Lusas 2014; Sofistik 2014)

## 6 Eurokoodit

### 6.1 Siltoja koskevat suunnittelustandardit

Eurokoodit ovat eurooppalaisen standardisointijärjestö CEN:in Euroopan komission toimeksiannosta laatimia kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja. Yleisimmät paaluperusteisia siltoja koskevat eurokoodien suunnittelustandardit ovat:

- SFS-EN 1990 Eurokoodi 0: Suunnittelun perusteet,
- SFS-EN 1991 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormitukset,
- SFS-EN 1992 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu,
- SFS-EN 1993 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu ja
- SFS-EN 1997 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu.

### 6.2 Geotekniset luokat

Eurokoodien mukaan rakenteen geotekninen suunnittelu voidaan jakaa kolmeen geotekniseen luokkaan. Rakenne kuuluu geotekniseen luokkaan 1, mikäli rakenne on yksinkertainen ja maapohja on kitkamaata tai kalliota eikä vakavuuden, painumien tai siirtymien suhteen ole riskiä. Rakenne kuuluu geotekniseen luokkaan 2, mikäli se on tavanomainen eikä pohjamaahan liity tavallisuudesta poikkeavia riskejä. Tyypillisesti paaluperustukset kuuluvat geotekniseen luokkaan 2. Geotekniseen luokkaan 3 kuuluvat rakenteet, jotka eivät kuulu luokkaan 1 tai 2. Myös rakenteet, joihin liittyy tavallisesta poikkeavia riskejä tai jotka suunnitellaan alueelle, jonka maamassat ovat jo lähitilanteessa liikkeessä, kuuluvat geotekniseen luokkaan 3. Osassa kohteissa, kuten esimerkiksi Liikenneviraston kohteissa, geotekniseen luokkaan vaikuttaa myös rakenteen ympäristövaikutus. Mikäli ympäristövaikutukset ovat merkittävät, kuuluu rakenne luokkaan 3. Merkittävä ympäristövaikutus on esimerkiksi pohjaveden pysyvä aleneminen. (Liikennevirasto 2013: 16; RIL 207-2009: 30-32)

### 6.3 Seuraamusluokat

Eurokoodien mukaan rakenteet jaetaan kolmeen seuraamusluokkaan taulukon 10 mukaisesti riippuen ihmishenkien menetysten, taloudellisten, sosiaalisten ja ympäristövahinkojen suuruudesta. Seuraamusluokassa CC2 seuraamusluokan mukainen kuormakerroin ( $K_{FI}$ ) on 1,0. Muissa seuraamusluokissa kuormakerroin määritetään hankekohtaisesti. (Liikennevirasto 2013: 16)

Taulukko 10. Seuraamusluokat (Liikennevirasto 2013: 16; RIL 207-2009: 42).

Seuraamusluokka	Kuvaus
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia

## 6.4 Kuormat ja kuormien vaikutukset

Kuormat (F) ovat tarkasteltavaan kohteeseen vaikuttavia ulkoisia tai sisäisiä voimia tai jännityksiä. Kuormat jaetaan pysyviin (G) ja muuttuviin (Q) kuormiin. Kuormat voidaan jakaa myös kaataviin ja vakauttaviin kuormiin. Vakauttavasta kuormasta käytetään myös nimitystä edullinen kuorma ja kaatavasta kuormasta nimitystä epäedullinen kuorma. (Liikennevirasto 2013: 17; RIL 207-2009: 36-37) Luvussa 2.2.2 on kerrottu tärkeimmät siltojen paaluihin kohdistuvat kuormitukset.

Kuorman edustava arvo saadaan kertomalla kuorman ominaisarvo yhdistelykertoimella  $\psi$ . Eurokoodien mukaisissa kuormitusyhdistelmissä yhdistelykertoimella, joka on aina pienempi kuin yksi, kerrotaan muut kuormat kuin pysyvät kuormat tai määräävät muuttuvat kuormat. Määräävä muuttuva kuorma ja pysyvät kuormat otetaan laskennoissa huomioon ominaisarvoina ( $\psi = 1$ ). Kuormien yhdistelyssä ei huomioida vakauttavia muuttuvia voimia. Kuorman mitoitusarvo saadaan kertomalla kuorman edustava arvo kuorman osavarmuusluvulla  $\psi_F$ . (Liikennevirasto 2013: 17-18)

Kuormien vaikutukset (E) ovat kuormista aiheutuvia laskennallisia voimia, momentteja, jännityksiä ja muodonmuutoksia. Geoteknisessä mitoituksessa kuormien vaikutukset riippuvat kuormien ja rakenteen mittojen lisäksi usein myös maan lujuusominaisuuksista. Eurokoodeissa maan ominaisuuksilla (X) tarkoitetaan maan mekaanisia ominaisuuksia, kuten lujuutta, tilavuuspainoa ja muodonmuutosominaisuuksia. Maan ominaisarvosta saadaan mitoitusarvo jakamalla se maaparametrin osavarmuusluvulla  $\gamma_M$ . Kestävyydellä (R) tarkoitetaan maan lujuusominaisuuksien perusteella laskettua kykyä kestää kuormia. Kestävyydellä voidaan tarkoittaa esimerkiksi maapohjan kantokestävyyttä tai paalun kantokestävyyttä. Osavarmuusluvut voidaan kohdistaa joko suoraan lujuusparametreihin tai niistä laskettuihin kestävyksiin. (Liikennevirasto 2013: 18-19)

Paalujen alkuepäätarkkuudet huomioidaan suunnittelussa lisäkuormituksina tai poikkeuttamalla paaluja. Eurokoodien mukaisessa mitoituksessa toisen kertaluvun rasitukset huomioidaan nurjahduksen tarkasteluina suhteellisen yksinkertaisella lineaarisella menetelmällä huomioimalla alkuepäätarkkuudet lisäkuormina. (Kahila 2010)

## 6.5 Käyttö- ja murtorajatila

Paalujen murtorajatilan vaakasiirtymien laskennassa on kyse rajatilan STR/GEO tarkastelusta. Rajatilassa STR/GEO tarkastetaan rakenteen ja maapohjan kestävyys murtumisen tai liiallisen muodonmuutoksen suhteen. Murtorajatilan tarkasteluissa osoitetaan, että kuormien vaikutusten mitoitusarvo ( $E_d$ ) on pienempi tai yhtä suuri kuin kestävyuden mitoitusarvo ( $R_d$ ). (Liikennevirasto 2013: 20) Toisin sanoen laskennan lähtökohtana on, että sivukuorma tai sivuvastus ei voi missään tilanteessa ylittää murtotilatarkastelulla saatua arvoa (RIL 223-2005: 62; RIL 212-2001: 68).

Murtorajatilassa jousien määrittämisessä käytetään alustalukujen ominaisarvoja. Paaluihin kohdistuvan paineen ominaisarvon ääriarvoina käytetään kuvan 10 mukaisia ääriarvoja. (Liikennevirasto 2012: 36) Vaakasuoraa alustalukua laskettuna vaihteluvälin alarajan mukaan käytetään silloin, kun kyseessä on paalun mitoittaminen sivukuormaa vastaavalle taivutukselle ja siirtymälle. Kun kyseessä on paalun rakenteellisen kestävyuden mitoittaminen esimerkiksi kutistuman tai lämpötilan aiheuttamille pakkovoimille, käytetään vaakasuoraa alustalukua laskettuna vaihteluvälin ylärajan mukaan. (RIL 223-2005: 62; RIL 212-2001: 68)

Käyttörajatilassa osoitetaan, että ominaiskuormien aiheuttamat vaakasiirtymät eivät ylitä sallittuja arvoja. Käyttörajatilan tarkastelut voidaan tehdä samalla mallilla kuin murtorajatilan tarkastelut. Käyttörajatilassa käytetään kuormien ja ominaisuuksien ominaisarvoja (Liikennevirasto 2013: 25). Paaluihin kohdistuvan paineen ominaisarvon ääriarvona voidaan käyttää kuvan 10 mukaisten paineiden ominaisarvojen ääriarvojen keskiarvoa eli karkearakeisessa maassa kertoimelle (3...4,4) arvoa 3,7 ja hienorakeisessa maassa kertoimelle (6...9) arvoa 7,5, mikä johtaa yhteen laskentaan. (Liikennevirasto 2012: 36)

## 6.6 Mitoitustavat DA2 ja DA2\*

Eurokoodien mukaan jousivoimien, siirtymien ja paalun voimasuureiden laskenta tehdään joko menetelmällä DA2 tai DA2\* (Liikennevirasto 2012: 35; Liikennevirasto 2013: 20). Liitteessä 5 on esitetty rajatilan STR/GEO mitoitusprosessit menetelmien DA2 ja DA2\* osalta.

Kuormien puolella varmuus sijoitetaan joko kuormaan tai kuorman vaikutuksiin. Osavarmuus kohdistetaan mitoitustavassa DA2 suoraan kuormien edustaviin arvoihin ja mitoitustavassa DA2\* kuormien vaikutuksiin. Kestävyuden puolella varmuus kohdistetaan molemmissa mitoitustavoissa suoraan kestävyuteen eli laskelmissa mitoitusarvona käytetään ominaisuuksien ominaisarvoa. Laskentamalli on usein epälineaarinen, minkä vuoksi menetelmät DA2 ja DA2\* johtavat usein eri tulokseen. Laskentamallin ollessa täysin lineaarinen, johtavat molemmat menetelmät samaan tulokseen. (Liikennevirasto 2013: 18-22)

Tarkastelu on varman puolella, kun kuormien osavarmuusluvut kohdistetaan jo kuormiin eli käytetään menetelmää DA2 (Liikennevirasto 2013: 56). Pysyvän siltarakenteen osana olevat yksittäiset pystypaalut (kaivinpaalut, teräspalkkipaalut ja poraapaalut) ovat yleensä nivelellisesti tai jäykästi kiinni sillan päällysrakenteessa, jolloin paalu ja maata mallintavat jouset ovat osana rakennemallia. Kun silta lasketaan koko siltarakenteen käsittävää rakennemallia käyttäen, käytetään menetelmää DA2. Mene-

telmässä DA2 koko rakennemallia kuormitetaan murtorajatilan kuormitusyhdistelmällä STR/GEO ja epälineaaristen jousien vaikutus otetaan huomioon murtorajatilan kuormitusyhdistelmissä. (Liikennevirasto 2012: 35)

Mikäli osavarmuusluvut kohdistetaan menetelmän DA2\* mukaisesti vasta jousivoimiin, tarkastelu on jonkin verran epävarman puolella, koska paalun kimmoiset ominaisuudet ovat mukana vain kuormien ominaisarvojen osuudella (Liikennevirasto 2013: 56). Maata kuvattaessa 2D- ja 3D-elementeillä jousien sijasta laskenta suoritetaan menetelmällä DA2\*. Menetelmää DA2\* voidaan käyttää myös yksittäisen paalun tarkasteluissa. Menetelmässä DA2\* paalua kuormitetaan murtorajatilan yhdistelmällä, jossa kuormat kerrotaan yhdistelykertoimilla, mutta ei osavarmuusluvuilla. Kuorman osavarmuus otetaan huomioon vasta lasketussa kuorman vaikutuksessa (siirtymät, paineet, jännitykset, momentit). (Liikennevirasto 2012: 35-36)

Menetelmässä DA2\* laskenta suoritetaan ensin pysyvillä kuormituksilla, jossa lasketaan pysyvien kuormitusten vaikutukset. Tämän jälkeen rakennetta kuormitetaan pysyvillä kuormilla ja määrävällä muuttuvalla kuormalla, jolloin saadaan vaikutusten muutoksina määrävän muuttuvan kuorman vaikutukset. Laskenta suoritetaan myös kuormittamalla rakennetta pysyvillä ja kaikilla muuttuvilla kuormilla, jolloin saadaan muutoksina muiden muuttuvien kuormien vaikutukset. Lopuksi kaikki vaikutukset kerrotaan niiden osavarmuusluvuilla ja summataan yhteen, jolloin saadaan vaikutusten mitoitusarvot. Kummassakaan menetelmässä DA2 tai DA2\* rakennetta ei voi kuormittaa yksittäisillä kuormilla ja yhdistellä näiden vaikutuksia (jousivoimia, voimasuureita), koska superpositioperiaate ei ole epälineaarisuuden vuoksi voimassa. (Liikennevirasto 2012: 35-36)

Sillan geoteknisen suunnitteluohjeen (Liikennevirasto 2012: 36) mukaan tutkittaessa maan kestävyyttä rakennetta tukevana vaikutuksena esimerkiksi paalun nurjahduksen yhteydessä, jaetaan rakennemallin jousivoimien suurin mahdollinen arvo maan kantokestävyuden osavarmuusluvulla. Maan kestävyuden osavarmuusluku on 1,5. Jousen jäykkyys määritetään aina maaparametrien ominaisarvojen perusteella, eikä osavarmuusluvuilla ole vaikutusta sen arvoon. Maan murtotilaan perustuvaa sivuvastusta laskettaessa yhtälöillä (6) ja (7) ei siis suunnitteluohjeiden mukaan huomioida maan kestävyuden varmuutta ollenkaan. Osavarmuuslukuja ei suunnitteluohjeen mukaan kohdisteta yhtälöiden (6) ja (7) maan lujuusparametreihin eikä suoraan vastauksena saatavaan maan kestävyuteen. Suunnitteluohje kaipaa tarkennusta maan kantokestävyuden huomioimisesta sivukuormitettujen paalujen analysoinnissa.

Menetelmissä DA2 ja DA2\* on myös huomioitava maan vaakasuuntaisen kantokestävyuden raja, jonka jälkeen jousen voima ei voi enää kasvaa (ks. kuvat 23 ja 24). Teräsbetonipaaluryhmän, joiden paalujen sivumitta tai halkaisija on enintään 350 mm, laskennassa ei sivuvastusta saa käyttää rakenteen tukemiseen ilman yksityiskohtaista selvitystä. (Liikennevirasto 2012: 36; Liikennevirasto 2013: 56-57)

## 7 Laskentakohteiden kuvaus

Alustalukujen herkkyytarkastelujen kohteeksi valittiin Syväyksen kevytliikennesilta, joka on diplomityön aikana suunnitteluvaiheessa. Varsinaisia koekuormitettuja kohteita työssä on mukana kolme kappaletta. Yksi koekuormituksista on tehty hienossa hiekassa Tampereella geotekniikan laitoksen koekuopassa vuonna 1990, toinen silltissä maaperässä Hämeenlinnassa osana meluseinäkohteen tutkimuksia vuosina 1994–1995 ja kolmas kerroksellisessa maaperässä Salt Lake Cityssä osana Brighamian yliopiston paaluryhmien analysointiin liittyvää tutkimusta vuonna 2004. Tampereella ja Hämeenlinnassa koekuormitukset on tehty yksittäisille paaluille ja Salt Lake Cityssä paaluryhmälle.

### 7.1 Syväyksen kevytliikennesilta

Siltapaikka sijaitsee Muhoksen kunnassa valtatie vt22 varrella, jossa Syväyksen kevytliikennesilta ylittää Muhosjoen. Käytetty koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK26 ja korkeusjärjestelmä N60. Siltapaikalla maanpinta on noin tasolla +15,2...+15,4 nousemista jokiuomasta kauemmas mentäessä tasoon +18,5...+21,0. Viereisen valtatie vt22 taso on joen kohdalla noin +20,0. Pohjaveden pintaa ei ole mitattu. Pohjaveden pinnan oletetaan noudattelevan Muhosjoen vesipinnan tasoa. Muhosjoessa keskiveden pinta MW on +13,42, aliveden pinta NW +12,8 ja yliveden pinta HW +15,97.

Siltapaikalla on tehty syksyllä 2013 paino-, heijari- ja siipikairauksia sekä otettu häiriintyneitä maanäytteitä. Kairaukset on päätetty määräsyyvyyteen noin 30 m syvyydessä maanpinnasta. Maanpinnassa on noin 2,0...4,0 m kerros hiekkaa ja silltistä hiekkaa. Hiekkaisen kerroksen alapuolella on silttiä ja savista silttiä noin 13...19 m, jonka siipikairalla mitattu leikkauslujuus on noin 55...80 kPa. Mitatut leikkauslujuudet ovat poikkeuksellisen suuria. Näytteiden vesipitoisuudet vaihtelivat 30...40 %.

Sillan molemmat tuet perustetaan kitkapaaluina toimivien teräsputkipaalujen varaisesti ( $\emptyset = 711$  mm). Paalujen alapään taso on -16,0. Sillan tulopenkereet perustetaan kevennettyinä maanvaraisina penkereitä. Siltapaikan pohjatutkimuskartta ja geotekniset leikkaukset ovat liitteenä 6.

### 7.2 Koekuormitettu paalu hienossa hiekassa (Koskinen 1990)

Paalun vaakasuuntaiset koekuormitukset on tehty Tampereella geotekniikan laitoksen koekuopassa osana Koskisen (1990) teräsputkipaalujen sivukapasiteetin määrittämiseen liittyvää lisensiaattityötä. Koekuoppa oli neliön mallinen, jonka sivun mitta oli 2,5 m ja syvyys 5 m. Paaluna käytettiin teräsputkipaalua, jonka ominaisuudet on esitetty taulukossa 11. Koepaalu asennettiin suihkupaalutusperiaatteella. Suihkupaaluna toimi varsinaista koepaalua vastaava apupaalu, jonka kärjen läpi ohjattu vesipaine avasi reiän apupaalulle. Apupaalulla tehdystä kuopasta tyhjennettiin vesi ja poistettiin apupaalu, ja tehtyyn reikään asetettiin varsinainen koepaalu ilman apuvälineitä. Paalun vaakakuormitus suoritettiin vaakatasoon sijoitetulla hydraulisella 200 kN tunkilla. Siirtymät mitattiin kuormitustasosta (+0,8 m maanpinnasta).

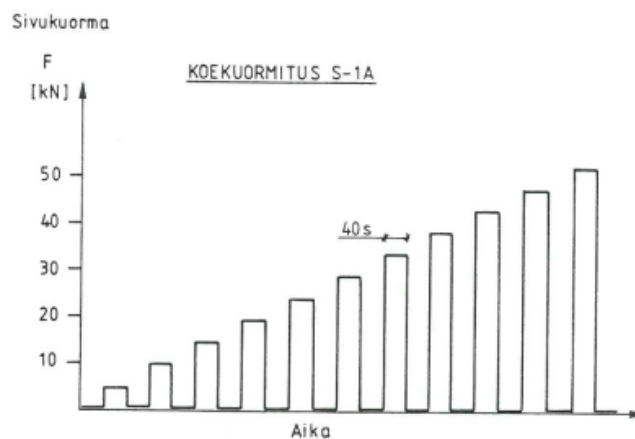


Taulukko 11. Koekuormitetun paalun ominaisuuksia (hHk).

Mittaussuhteet ja materiaaliarvot	
Pituus [m]	5
Upotussyvyys [m]	4
Ulkohalkaisija [mm]	273
Hoikkuussuhde (upotussyvyys/halkaisija)	14,65
Kuormituspisteen korkeus maanpinnasta [m]	0,8
Seinämävahvuus $t$ [mm]	6,3
Hitausmomentti $I$ [mm <sup>4</sup> ]	46,9*10 <sup>6</sup>
Taivutusjäykkyys $EI$ [kNm <sup>2</sup> ]	9849

Koekuopan maamateriaali oli hienoa hiekkaa. Hiekka oli kokeen aikana löyhässä tilassa, paikoin jopa hyvin löyhässä. Koekuormituksen aikana hiekka tiivistyi jonkin verran. Hiekan rakeisuuskäyrä ja puristinkairaustuloksia on esitetty liitteessä 7. Kolmiakσιαalikokeen perusteella hiekan leikkauskestävyyskulmaksi määritettiin 36°-41° tiiviydestä riippuen. Koehiekka oli vedellä kyllästynyttä ja sen tehokas tilavuuspaino vaihteli välillä 8,5...11,5 kN/m<sup>3</sup>.

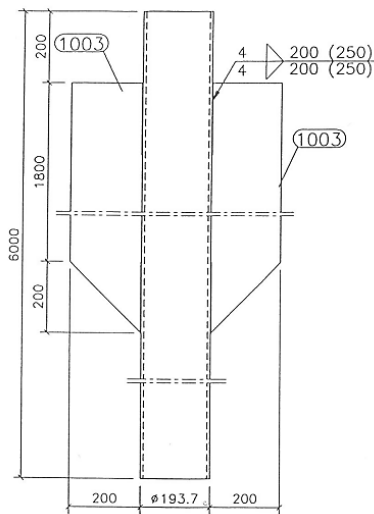
Tarkasteltavassa staattisessa koesarjassa kuormitusta lisättiin 5 kN portain lähelle murtokuormaa. Kuormitus palautettiin inkrementtien välissä nollaan. Kuvassa 27 on esitetty koekuormitusohjelma. Tässä diplomityössä tarkasteltaviksi kuormitustapauksiksi valittiin 10 kN, 30 kN ja 50 kN.



Kuva 27. Kuormitusohjelma hienossa hiekassa.

## 7.3 Koekuormitettu paalupari siltissä (Nirhamo 1995)

Koekuormitukset tehtiin Hämeenlinnassa Hattelmalan ja Ojoisten tieosuuksilla valtiatiellä vt3 vuosina 1994 ja 1995 osana Nirhamon (1995) teräsputkipaaluilla perustettujen meluseinärakenteiden mitoittamiseen liittyvää diplomityötä. Tarkasteltavat koekuormitukset tehtiin paaluparille, jossa toisena paaluna oli varsinainen laipallinen perustuspaalu (111) ja vastapaaluna samankokoinen laipaton paalu (111B). Laipallinen paalu on esitetty kuvassa 28 ja paaluparin 111 ja 111B ominaisuuksia taulukossa 12. Paaluja kuormitettiin vaakasuunnassa kahdella hydraulisella tunkilla. Siirtymät mitattiin maanpinnan tasosta ja kuormitustasosta (+1,4 m maanpinnasta).



Kuva 28. Laipallinen paalu 111.

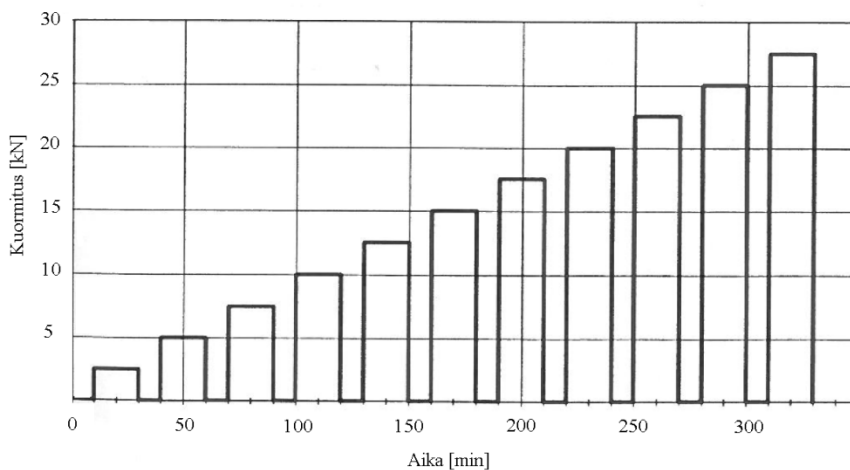
Taulukko 12. Koekuormitettujen paalujen ominaisuuksia (Si).

Mittaussuhteet ja materiaaliarvot	
Pituus [m]	7,5
Upotussyvyys [m]	6
Ulkohalkaisija [mm]	193,7
Hoikkuussuhde (upotussyvyys/halkaisija)	30,98
Kuormituspisteen korkeus maanpinnasta [m]	1,4
Seinämvahvuus $t$ [mm]	6,3
Taivutuskestävyys [kNm] Fe 52D	107
Taivutusjäykkyys $EI$ [kNm <sup>2</sup> ]	6163

Paaluparilla 111 ja 111B tehtiin paino-, puristin- ja siipikairauksia jo rakennetun penkereen päältä. Penkereen alapuolinen pohjamaa oli silttiä, jonka kolmiakσιαalikokeella saatu leikkauskestävyysskulma oli 32,9° ja koheesio 5,5 kPa. Siltin tilavuuspaino vaihteli välillä 17,7...17,9 kN/m<sup>3</sup>. Siipikairauksella määritetty suljettu leikkauslujuus oli keskimäärin 30 kPa ja kartiokokeella määritetty leikkauslujuus 44,1 kPa. Laboratorikokein määritetty jännitysekspONENTTI  $\beta$  oli 0,336 ja moduuliluku  $m$  oli 44,4. Liit-

teessä 8 on esitetty alueelta tehdyt paino- ja puristinkairaustulokset. Pohjaveden pintaa ei havaittu tutkimusten yhteydessä.

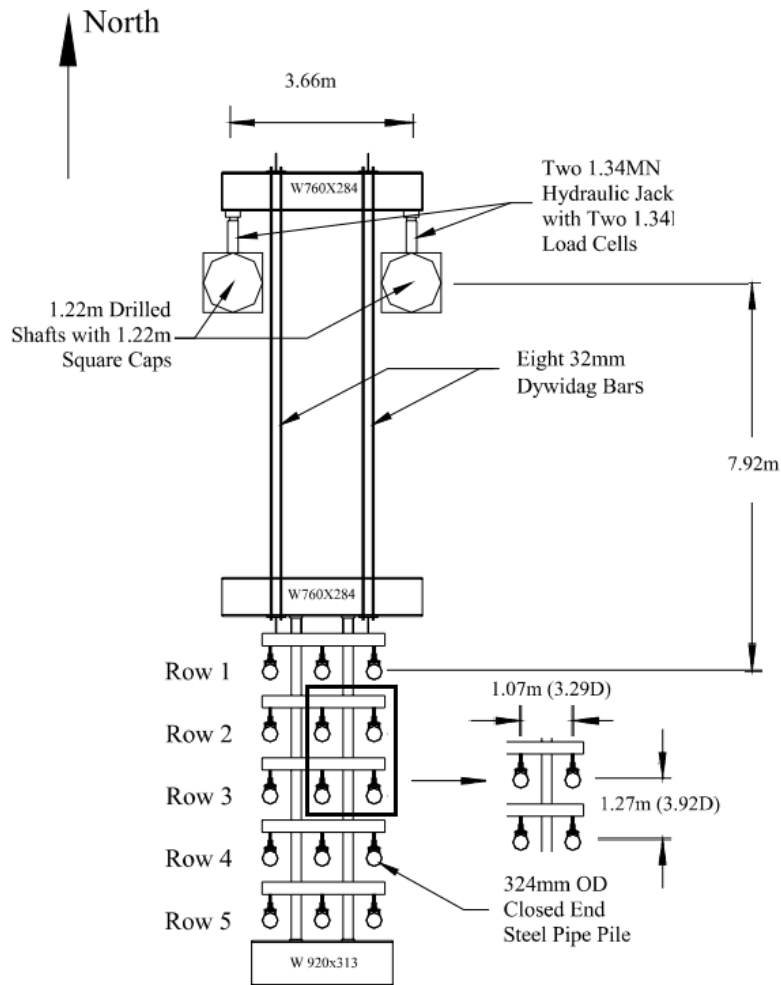
Kuormitustapana oli 2,5 kN portaittain kasvava kuormitus. Kuormitus palautettiin inkrementtien välissä nolnaan. Kuvassa 29 on esitetty tarkasteltava kuormitusohjelma. Tässä diplomityössä tarkasteltaviksi kuormitustapauksiksi valittiin 5 kN, 15 kN ja 25 kN.



Kuva 29. Kuormitusohjelma siltissä.

## 7.4 Koekuormitettu paaluryhmä kerroksellisessa maassa

Koekuormitukset on tehty Salt Lake Cityn lentokentän lähellä osana Walshin (2005) maisterityötä liittyen vaakakuormitetun paaluryhmän analysointiin. Koe tehtiin viidestä kolmen paalun rivistä muodostuvalle teräspalkkipaaluryhmälle, jossa paalujen väli oli kuormituksen suunnassa  $3,92d$  ( $=1,27$  m) ja kuormitusta vastaan kohtisuorassa suunnassa  $3,29d$  ( $=1,07$  m). Kuormitus tapahtui kahdella 1,34 MN hydraulisella tunkilla. Kaksi raudoitettua betonista vastapainoa sijaitsi 7,92 m etäisyydellä paaluryhmästä. Siirtymät mitattiin kuormitustasosta (+0,48 m maanpinnasta). (Walsh 2005 44, 71-74; Larkela 2008: 71-75) Kuvissa 30 ja 31 on esitetty kuormitusjärjestelyt ja paalujen asettelu kuormituspaikalla ja taulukossa 13 paalujen ominaisuudet.



Kuva 30. Paalujen sijainnit paaluryhmässä koekuormituskohteessa (muokattu Snyder 2004: 98–100 ja Walsh 2005: 76-77).

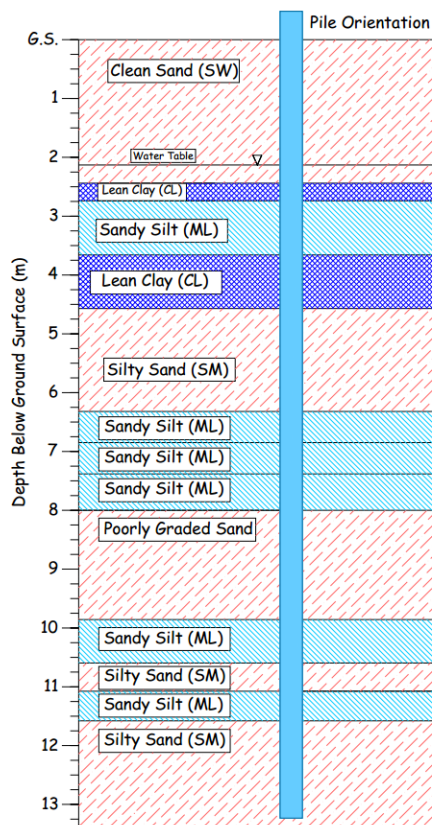


Kuva 31. Paaluryhmän ja yksittäisen paalun asettelu länsisuunnasta kuvattuna koekuormituskohteessa (Larkela 2008: 72).

Taulukko 13. Koekuormitettujen paalujen ominaisuudet (Walsh 2005; Larkela 2008).

Mittaussuhteet ja materiaaliarvot	
Pituus [m]	13,7
Upotussyvyys [m]	13,1
Ulkohalkaisija $D$ [mm]	324
Hoikkuussuhde (upotussyvyys/halkaisija)	40,43
Kuormituspisteen korkeus maanpinnasta [m]	0,48
Seinämvahvuus $t$ [mm]	9,5
Myötölujuus [MPa]	keskimäärin: 405
Vetolujuus [MPa]	keskimäärin: 584
Hitausmomentti $I$	Keskellä paaluriviä olevat paalat (5 kpl) ja erillinen yksittäinen paalu: $1,43 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$ Paaluryhmän reunoissa olevat paalat: $1,16 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$
Kimmomoduuli $E$ [GPa]	207 GPa

Walshin kokeessa maan pinnassa ollut noin 2,4 m paksu savikerros poistettiin, ja tilalle laitettiin hiekkaa. Täyttöhiekan tehokas tilavuuspaino oli noin  $17,5 \text{ kN/m}^3$ . Vesipinta sijaitsi syvyydessä 2,13 m maanpinnasta. (Walsh 2005: 20-28) Liitteessä 9 on esitetty täyttöhiekan rakeisuuskäyrä, puristinkairaustuloksia ja koheesiomaakerroksissa tehtyjä leikkauslujuuden kokeita. Kuvassa 32 on maaprofiili tehtyjen kokeiden perusteella.



Kuva 32. Kerroksellisen maan profiili koekuormituskohteessa (Walsh 2005: 39).

Kokeessa tavoitteena oli saada aikaan 6, 13, 19, 25, 38, 51, 64 ja 89 mm siirtymät. Systemiä kuormitettiin, kunnes tavoiteltu siirtymä saavutettiin. Kun siirtymä oli saavutettu, kuormitusta pidettiin noin 5 min, jonka jälkeen kuormitus palautettiin noltaan ja koe toistettiin uudelleen. Yhteensä tehtiin kymmenen kuormituskertaa yhtä tavoitesiertymää kohden. Siirtymään 38 mm asti kuormitus sujui ongelmitta, mutta tämän jälkeen yritettäessä siirtymää 51 mm hydraulinen tunkki pyörähti yllättäen ympäri, jolloin tukipalkki luiskahti pois paikoiltaan ja liikkui betonisten tukipilareiden päälle. Tämä aiheutti virhettä kuormituksen suuntaan, mikä johti siirtymien kasvuun luiskahduksen jälkeisissä testeissä. (Walsh 2005: 83–88) Tässä diplomityössä tarkasteltavaksi kuormitustapaukseksi valittiin paalujen siirtymää 25 mm tavoiteltaessa mitattu paaluryhmän kokonaiskuormitus ensimmäisellä syklillä, joka oli noin 1 100 kN.

## 8 Laskentatulosten analysointi

### 8.1 Alustalukujen herkkyys maaparametrien muutoksille

Maaparametrien arvioinnin epävarmuuden vaikutusta alustalukuihin tarkastellaan suunnitteluvaiheessa olevan Syväyksen kevytliikennesillan kohteen avulla. Alustaluvut lasketaan yleensä maaparametrien perusteella. Maaparametrit arvioidaan usein kairausvastuksen ja rakeisuuden avulla, sillä tarkkoja laboratorioissa määritettyjä maaparametrien arvoja on harvoin käytössä sillan suunnittelussa. Alustalukujen herkkyyttä tarkastellaan laskemalla alustalukujen arvot kairausvastusten ja rakeisuuksien perusteella arvioituilla maaparametrien raja-arvoilla, jotka edustavat maaperän tulkinnan minimi- ja maksimiarvoja kunkin maaparametrin osalta. Vertailu suoritetaan siten, että yhtä maaparametrin arvoa muutetaan kerrallaan muiden pysyessä muuttumattomina. Todellisuudessa yhden maaparametrin arvon muuttuessa muuttuu usein myös muiden maaparametrien arvot. Alustaluvut lasketaan tukilinjan T1 paa-luille penkereeseen päin (ks. liite 6).

Taulukossa 14 on esitetty alustalukujen laskennassa käytetyt lähtötiedot. Taulukon kitkamaiden tehokkaiden tilavuuspainojen, leikkauskestävyyskulmien, jännityseksponenttien ja moduulilukujen minimi- ja maksimiarvot vastaavat liitteen 3 mukaisesti kairausvastuksen perusteella määritettyjä tulkinnan raja-arvoja. Penkereen ja täytön osalta minimiarvot vastaavat löyhää tilaa ja maksimiarvot tiivistä tilaa. Savisen siltin suljetun leikkauslujuuden minimiarvo on arvioitu paino- ja heijarikairausvastusten perusteella ja maksimiarvo siipikairausten perusteella. Savisen siltin jännityseksponentin ja moduuliluvun raja-arvot on arvioitu taulukon 8 perusteella ja tehokkaan tilavuuspainon raja-arvot kairausvastuksen perusteella. Poissonin vakiot on arvioitu yhtälöiden (14) ja (20) yhteydessä annettujen vaihteluväliden perusteella. Laskennoissa muuttumattomina pidettävät arvot (taulukkoon 14 merkitty *lask.*) on valittu samoiksi kuin sillan stabiliteetti- ja painumalaskennoissa on käytetty. Taulukossa 15 on esitetty muut alustalukujen laskennassa käytetyt lähtötiedot.

Taulukko 14. Laskennassa käytetyt maaparametrit Syväyksen kevytliikennesillalla.

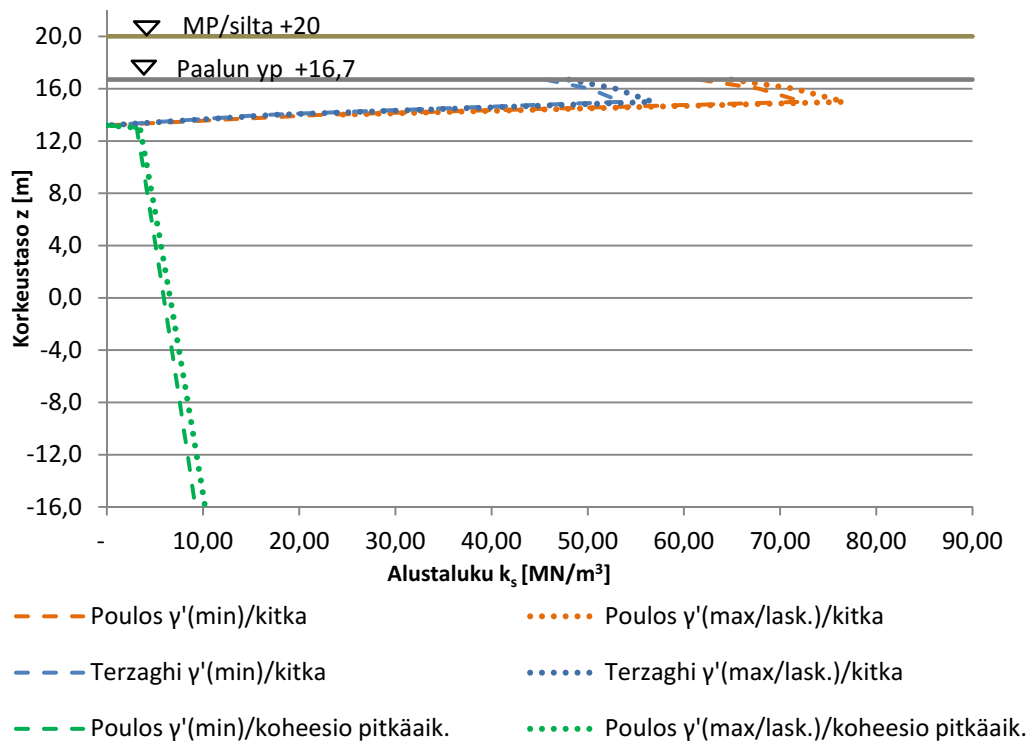
Maalaji	Syvyys $z$ [m] (N60)	Tehokas tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]	Leikkaus-kestävyys- kulma $\phi$ tai suljettu leikkauslujuus $s_u$	Moduuliluku $m$	Jännitys-eksponentti $\beta$	Poissonin vakio $\nu$
Penger	20... 16	min 18 lask. 20 max 20	min 34° lask. 38° max 38°	min 400 lask. 600 max 800	min 0,5 lask. 0,5 max 0,5	min 0,15 lask. 0,15 max 0,25
Penger/ PVP:n alap.	16... 15,6	min 10 lask. 12 max 12	min 34° lask. 38° max 38°	min 400 lask. 600 max 800	min 0,5 lask. 0,5 max 0,5	min 0,15 lask. 0,15 max 0,25
Täyttö/ PVP:n alap.	15,6... 14,4	min 10 lask. 12 max 12	min 34° lask. 38° max 38°	min 400 lask. 600 max 800	min 0,5 lask. 0,5 max 0,5	min 0,15 lask. 0,15 max 0,25
hHk/ PVP:n alap.	14,4... 13,2	min 9 lask. 10 max 10	min 30° lask. 32° max 33°	min 50 lask. 200 max 200	min 0,5 lask. 0,5 max 0,5	min 0,15 lask. 0,25 max 0,25
saSi/ PVP:n alap.	13,2... - 18,0	min 8 lask. 9 max 9	min 30 kPa lask. 50 kPa max 65 kPa	min 30 lask. 30 max 100	min 0,1 lask. 0,1 max 0,3	min 0,25 lask. 0,30 max 0,35

Taulukko 15. Alustalukulaskennan muita lähtötietoja Syväyksen kevytliikennesillalla.

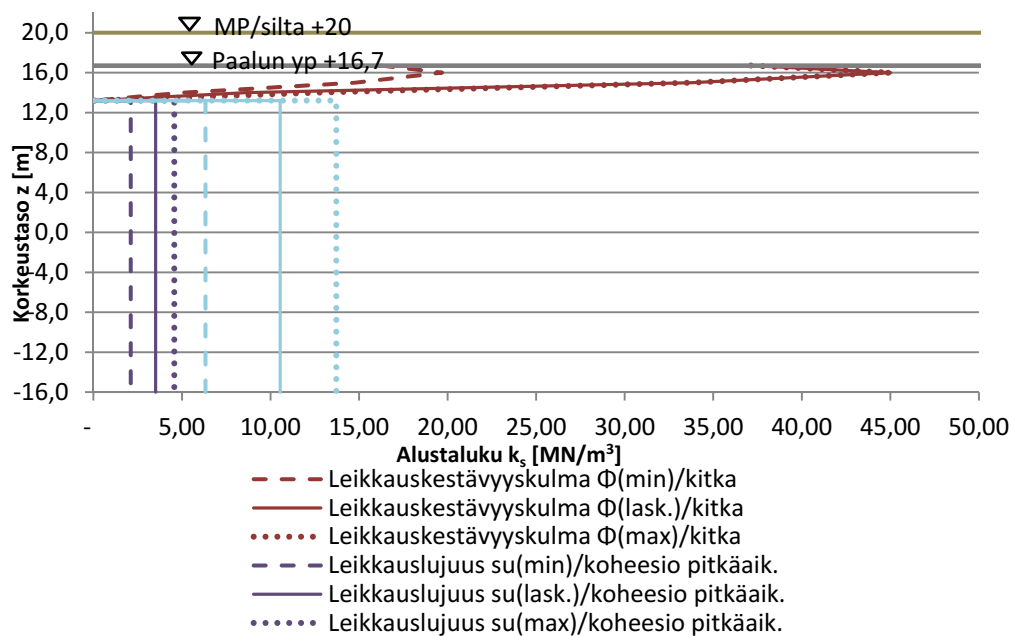
Maanpinnan taso [m]	+20
Pohjavesipinnan taso [m]	+15,97
Paalun yläpään taso [m]	+16,7
Paalun alapään taso [m]	-16,0
Kerrosaksuus (elementin pituus) [m]	1,0
Paalun halkaisija $d$ [m]	0,711

Kitkamaakerroksissa (penger, täyttö ja hieno hiekka) alustaluvut paalun pituuden funktiona on määritetty Terzaghin ja Poulosin menetelmillä yhtälöllä (14), missä kerroin  $\beta$  on laskettu yhtälöllä (16) ja kokoonpuristuvuusmoduuli  $M$  yhtälöllä (17). Alustalukukertoimet kitkamaakerroksissa on määritetty myös leikkauskestävyysskulman perusteella kuvasta 18. Eri menetelmillä saatujen alustalukukertoimien avulla on laskettu alustaluvut yhtälöllä (13). Koheesiomaakerroksessa (savinen siltti) alustaluvut paalun pituuden funktiona on määritetty suljetun leikkauslujuuden menetelmällä yhtälöillä (18) ja (19) sekä lisäksi Poulosin menetelmällä yhtälöllä (20). Liitteessä 10 on esitetty laskennan välituloksia ja lasketut alustaluvut taulukkomuodossa. Kuvassa 33 on alustaluvut  $k_s$  korkeustason  $z$  funktiona, kun tilavuuspainoa muutettu. Kuvassa 34 on muutettu leikkauskestävyysskulmaa ja suljettua leikkauslujuutta, kuvassa 35 moduulilukua, kuvassa 36 Poissonin vakiota ja kuvassa 37 jännityseksponenttia. Kuvissa 33–37 lyhenne *min* tarkoittaa parametrin minimiarvoa, *max* maksimiarvoa ja *lask.* muissa laskuissa muuttumattomana pidettyä arvoa.

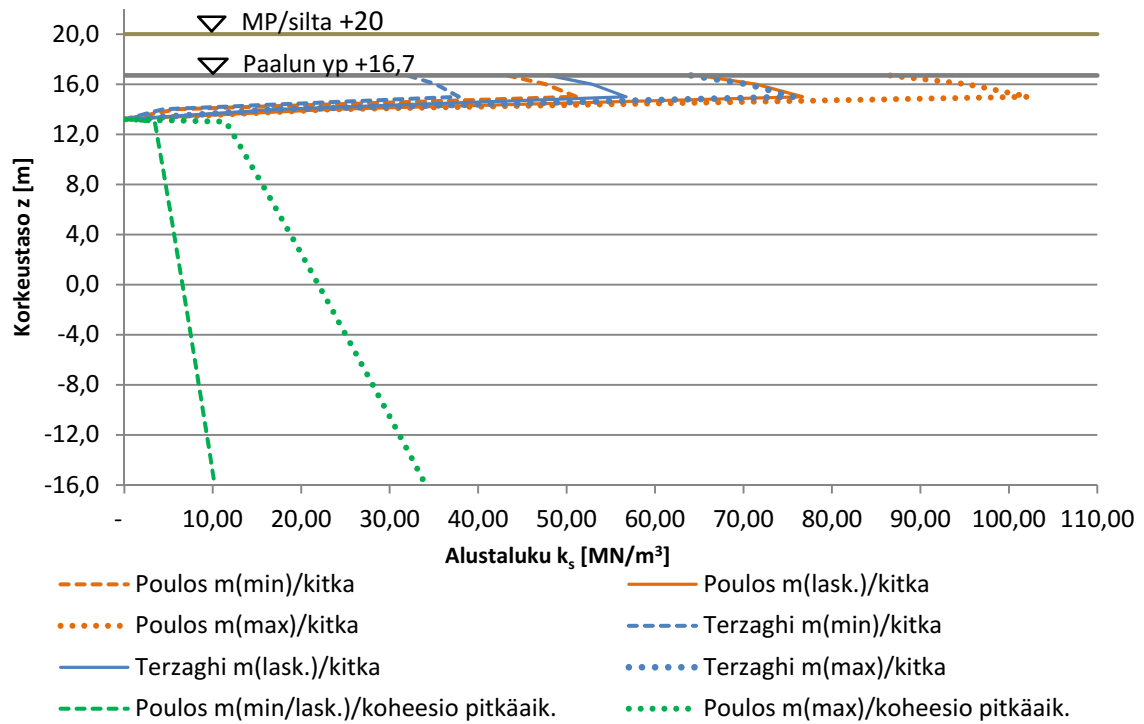




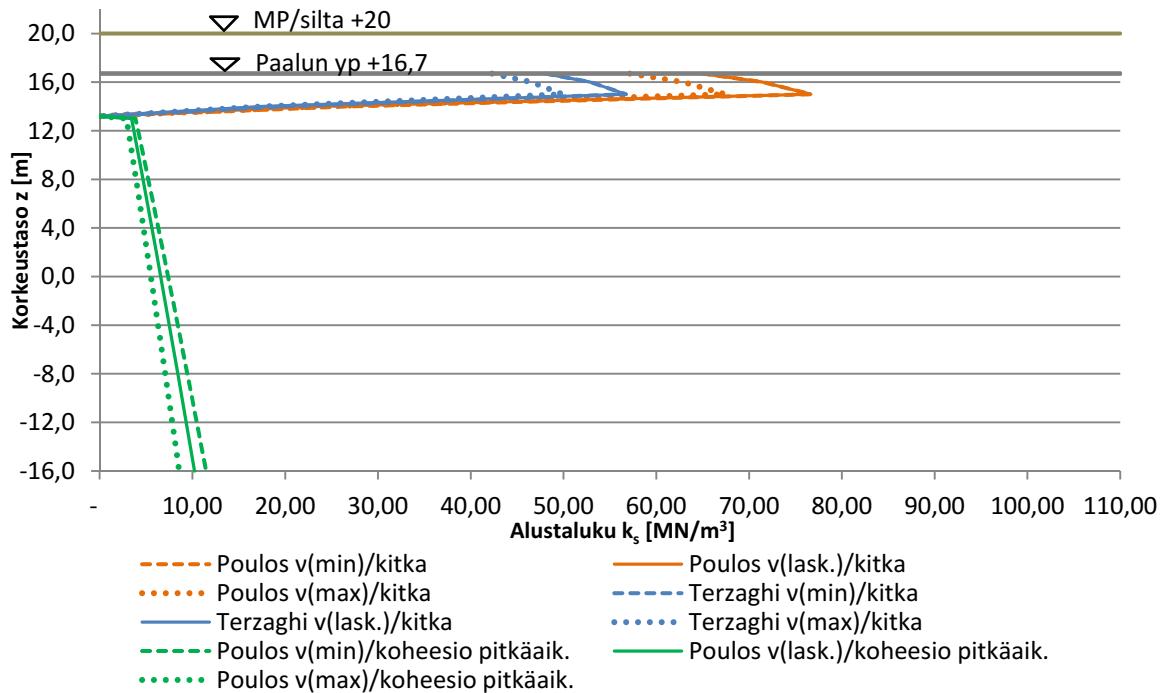
Kuva 33. Alustalukujen vaihteluvälit, kun tehokasta tilavuuspainoa  $\gamma'$  muutettu.



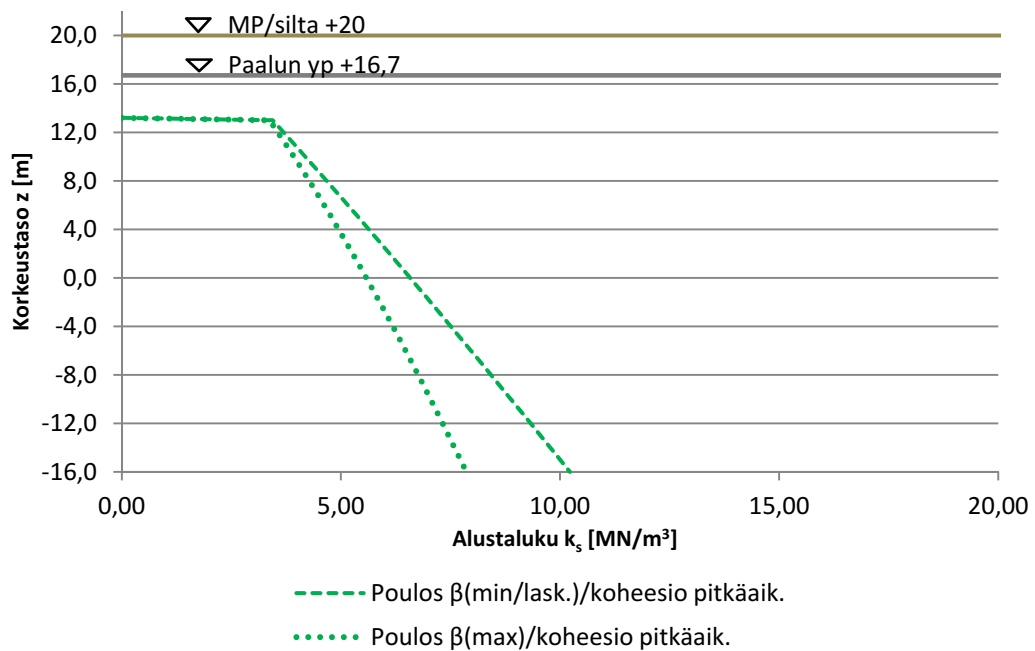
Kuva 34. Alustalukujen vaihteluvälit, kun leikkauskestävyysskulmaa  $\phi$  ja suljettua leikkauslujuutta  $s_u$  muutettu.



Kuva 35. Alustalukujen vaihteluvälit, kun moduulilukua  $m$  muutettu.



Kuva 36. Alustalukujen vaihteluvälit, kun Poissonin vakiota  $v$  muutettu.



Kuva 37. Alustalukujen vaihteluvälit, kun jännityseksponenttia  $\beta$  muutettu.

Tehokkaan tilavuuspainon muutos vaikuttaa Terzaghin ja Poulosin menetelmien alustalukujen arvoon kokoonpuristuvuusmoduulin  $M$  kautta. Tehokkaan tilavuuspainon suurentaminen vaikuttaa alustaluvun arvoa kasvattavasti. Kuvasta 33 nähdään, että tehokkaan tilavuuspainon epätarkkuuden vaikutus ei kuitenkaan ole merkittävä alustalukujen laskennan kannalta. Tämä johtuu siitä, että saman maalajin vaihtelurajat tehokkaan tilavuuspainon osalta ovat suhteellisen pieniä. Näin ollen voidaan todeta, että tehokkaan tilavuuspainon epätarkkuuden aiheuttama virhe alustalukujen laskentaan ei ole merkittävä.

Kitkamaaosuuksilla leikkauskestävyyskulman muutos vaikuttaa leikkauskestävyyskulman (kuva 18) mukaisen menetelmän alustalukujen arvoihin. Kuvasta 34 nähdään, että leikkauskestävyyskulman epätarkkuuden vaikutus on merkittävä alustalukujen laskennan kannalta. Kun leikkauskestävyyskulman arvoa kasvatettiin arvosta  $34^\circ$  arvoon  $38^\circ$ , saatiin alustaluvun arvoksi yli kaksinkertainen pienemmällä leikkauskestävyyskulmalla saatuun arvoon nähden. Leikkauskestävyyskulman mukainen menetelmä on herkkä leikkauskestävyyskulman muutoksille.

Koheesiomaosuuksilla suljetun leikkauslujuuden muutos vaikuttaa suoraan yhtälöillä (18) ja (19) laskettaviin alustalukuihin. Leikkauslujuuden kasvattaminen kasvattaa suhteessa saman verran alustaluvun arvoa. Kuvan 34 perusteella leikkauslujuuden epävarmuus vaikuttaa merkittävästi tarkasteltavan kohteen alustalukujen arvoon. Laskentakohteessa suljetun leikkauslujuuden tarkasteluväli oli kuitenkin suuri johtuen poikkeuksellisen suurista siipikairauksilla saaduista leikkauslujuuden arvoista ja kairauksien perusteella arvioidusta huomattavan paljon pienemmistä arvoista. Usein leikkauslujuus voidaan arvioida esimerkiksi siipikairausten tuloksiin perustuen riittävän tarkasti, eikä tällöin merkittävää virhettä ja epätarkkuutta aiheudu alustalukulaskentaan. Siipikairausten perusteella arvioitu maan suljettu leikkauslujuus on usein pienempi kuin maan todellinen suljettu leikkauslujuus, mikä vie laskentaa varmemman puolelle.

Kuvan 35 perusteella moduuliluvun  $m$  epävarmuus vaikuttaa merkittävästi Poulosin ja Terzaghin menetelmien alustalukujen arvoihin. Saman maalajin vaihteluväli moduuliluvun osalta on suuri (ks. liite 3 ja taulukko 8). Moduuliluvun kasvattaminen kasvattaa suhteessa saman verran Poulosin ja Terzaghin mukaisia alustaluvun arvoja. Moduuliluvun epätarkkuuden aiheuttama virhe saattaa näin ollen olla merkittävä laskennan kannalta.

Poissonin vakio vaikuttaa Poulosin ja Terzaghin menetelmien kertoimen  $\beta$  arvoon yhtälön (16) mukaisesti. Kuvan 36 perusteella Poissonin vakion arvioinnin epätarkkuus ei aiheuta merkittäviä poikkeamia alustalukujen arvoihin eivätkä menetelmät ole erityisen herkkiä maalajin Poissonin vakion vaihteluvälillä tapahtuville muutoksille.

Kitkamaaosuuksille jännitysekspONENTTI on vakio liitteen 3 mukaisesti ja näin ollen kitkamaaosuuksille ei ole tehty jännitysekspONENTIN muutoksen tarkastelua. Koheesiomaassa jännitysekspONENTIN arvot vaihtelevat taulukon 8 mukaisesti. Kuvasta 37 nähdään, että jännitysekspONENTIN epävarmuuden vaikutus alustalukuun koheesiomaan Poulosin mukaisessa menetelmässä ei ole erityisen suuri.

## 8.2 Siirtymät hienossa hiekassa

### 8.2.1 Laskennalliset alustaluvut

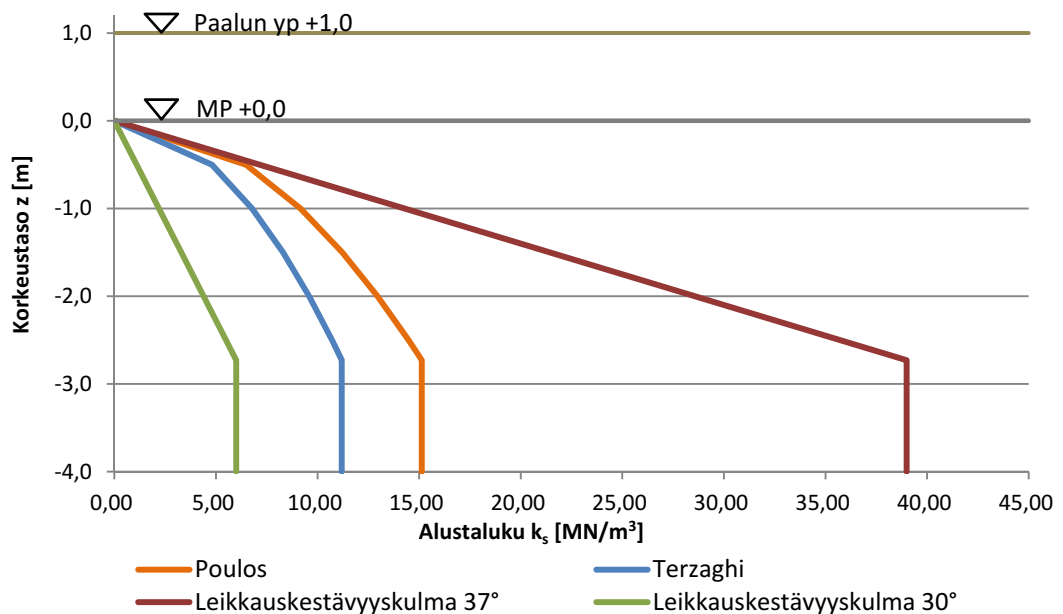
Taulukossa 16 on esitetty alustalukujen laskennassa käytetyt lähtötiedot hienossa hiekassa. Tehokas tilavuuspaino ja leikkauskestävyysskulma on valittu samoiksi kuin Koskinen (1990: 110) käytti laboratoriokeksiin perustuen laskelmissaan. Vertailulaskelmissa on käytetty liitteen 3 mukaista löyhän hienon hiekan perusteella määritettyä leikkauskestävyysskulmaa. Moduuliluku ja jännitysekspONENTTI on arvioitu liitteen 3 mukaan löyhän hienon hiekan perusteella. Poissonin vakio on arvioitu yhtälön (14) yhteydessä annetun vaihteluvälin perusteella.

Taulukko 16. Alustalukulaskennan lähtötiedot hienossa hiekassa.

Maalaji	hHk
Tehokas tilavuuspaino $\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	9
Leikkauskestävyysskulma $\phi$	37° tai 30°
Moduuliluku $m$	100
JännitysekspONENTTI $\beta$	0,5
Poissonin vakio $\nu$	0,25
Maanpinnan taso [m]	0
Pohjavesipinnan taso [m]	0
Paalun yläpään taso [m]	+1,0
Paalun alapään taso [m]	-4
Kerrospaksuus (elementin pituus) [m]	0,5
Paalun halkaisija $d$ [m]	0,273

Alustalukukertoimet paalun pituuden funktiona on laskettu kokoonpuristuvuuden perusteella Terzaghin ja Poulosin menetelmillä yhtälöllä (14), missä kerroin  $\beta$  on laskettu yhtälöllä (16) ja kokoonpuristuvuusmoduuli  $M$  yhtälöllä (17). Alustalukukertoimet on määritetty myös leikkauskestävyysskulman perusteella kuvasta 18. Eri menetelmillä saatujen alustalukukertoimien avulla on laskettu alustaluvut yhtälöllä (13). Liitteessä

11 on esitetty laskennan välituloksia ja lasketut alustaluvut taulukkomuodossa. Alustaluvut  $k_s$  korkeustason  $z$  funktiona on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. Alustaluvut hienossa hiekassa eri menetelmillä määritettyinä.

Kuvasta 38 nähdään, että Terzaghin ja Poulosin mukaiset alustaluvut poikkeavat yhtälön (14) kertoimen  $\alpha$  mukaisesti toisistaan (Terzaghin mukainen kerroin on 1,0 ja Poulosin mukainen 0,74). Leikkauskestävyysskulman muutos ei vaikuta Terzaghin ja Poulosin mukaisten menetelmien alustalukujen  $k_s$  arvoon. Leikkauskestävyysskulman mukaan kuvan 18 perusteella määritetyt alustaluvut poikkeavat merkittävästi toisistaan leikkauskestävyysskulman muuttuessa. Leikkauskestävyysskulmalla 37° saadut alustaluvun arvot ovat seitsemänkertaisia leikkauskestävyysskulmalla 30° saatuihin arvoihin nähden.

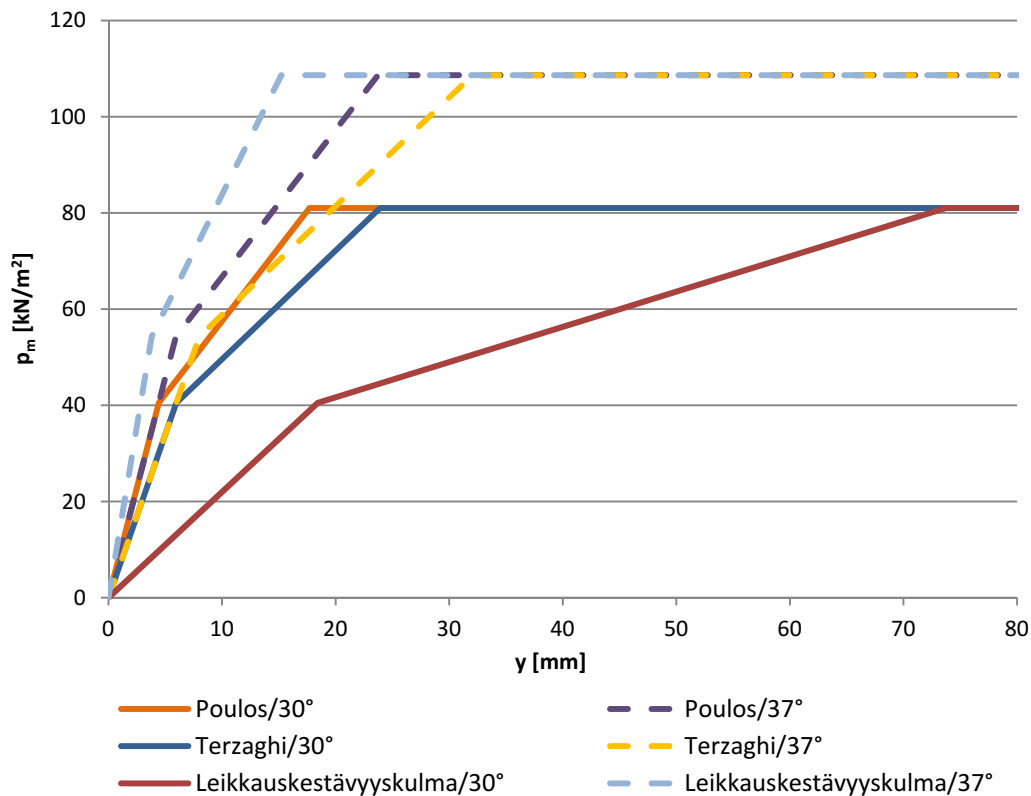
### 8.2.2 Laskennalliset rajasiirtymät ja jousivakiot

Paaluun kohdistuvan maanpaineen ääriarvot on laskettu yhtälön (6) kertoimilla 3 ja 4,4 leikkauskestävyysskulman arvoilla 37° ja 30°. Yhtälön (6) passiivipaine kerroin on määritetty yhtälöllä (4) perustuen Liikenneviraston ohjeessa (2012) esitettyyn esimerkkilaskuun. Kuvan 23 mukaiset rajasiirtymät  $y_m$  ja  $y_m/4$  on määritetty laskettujen maanpaineen ääriarvojen  $p_m$  ja eri laskentamenetelmillä saatujen alustalukujen  $k_s$  avulla. Jousivakiot määritettiin yhtälöllä (25). Liitteessä 11 on esitetty lasketut maanpaineen ääriarvot, rajasiirtymät ja jousivakiot.

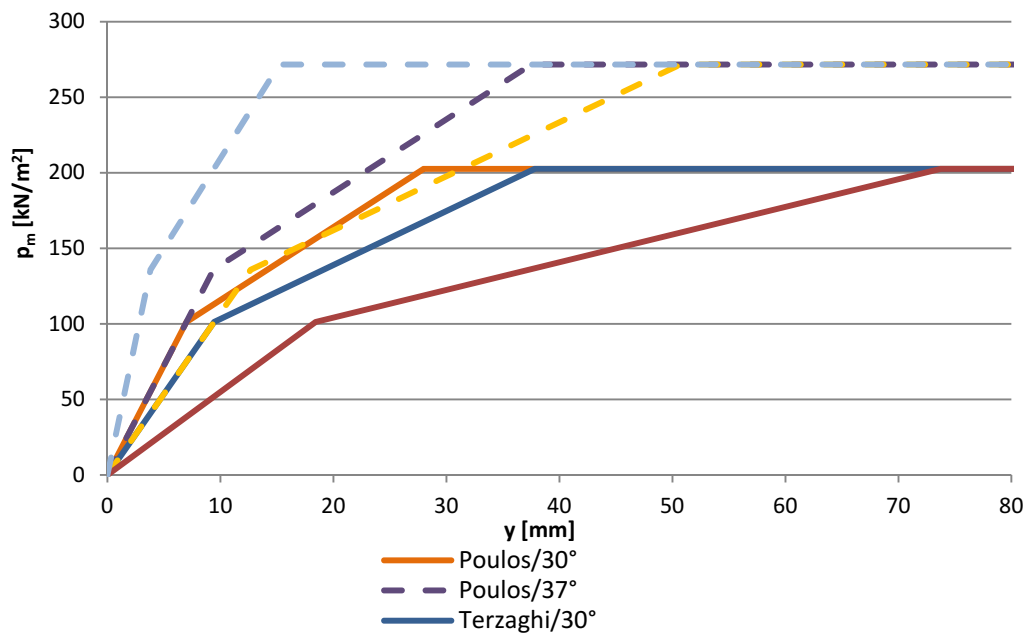
Kuvissa 39–41 on esitetty laskentojen avulla määritettyjä sivupaine-siirtymä-kuvaajia eri syvyyksissä, kun maanpaineen yhtälön (6) kerroin on 3. Kuvista nähdään, että eri menetelmillä saadaan hyvin erilaisia sivupaine-siirtymä-kuvaajia. Leikkauskestävyysskulma vaikuttaa sivupaineen ominaisarvon ääriarvoon siten, että suuremmalla leikkauskestävyysskulmalla saadaan suurempi sivuvastus. Leikkauskestävyysskulmalla 37° sivupaineen ääriarvot olivat 1,34-kertaisia leikkauskestävyysskulmalla 30° saatuihin arvoihin nähden. Leikkauskestävyysskulman kasvaessa myös rajasiirtymien arvot kasvavat Poulosin ja Terzaghin tapauksessa maanpaineen ääriarvon  $p_m$  kautta, sillä maanpaineen ääriarvoon vaikuttaa leikkauskestävyysskulman mukaan määräytyvä

passiivipaine kerroin. Poulosin ja Terzaghin tapauksissa rajasiirtymien arvot leikkauskestävyysskulmalla  $37^\circ$  olivat noin 1,3-kertaisia leikkauskestävyysskulmalla  $30^\circ$  saatuihin arvoihin nähden. Leikkauskestävyysskulman mukaisessa menetelmässä leikkauskestävyysskulmalla  $37^\circ$  määritetyt rajasiirtymät olivat puolestaan noin 0,2-kertaisia leikkauskestävyysskulmalla  $30^\circ$  saatuihin arvoihin nähden.

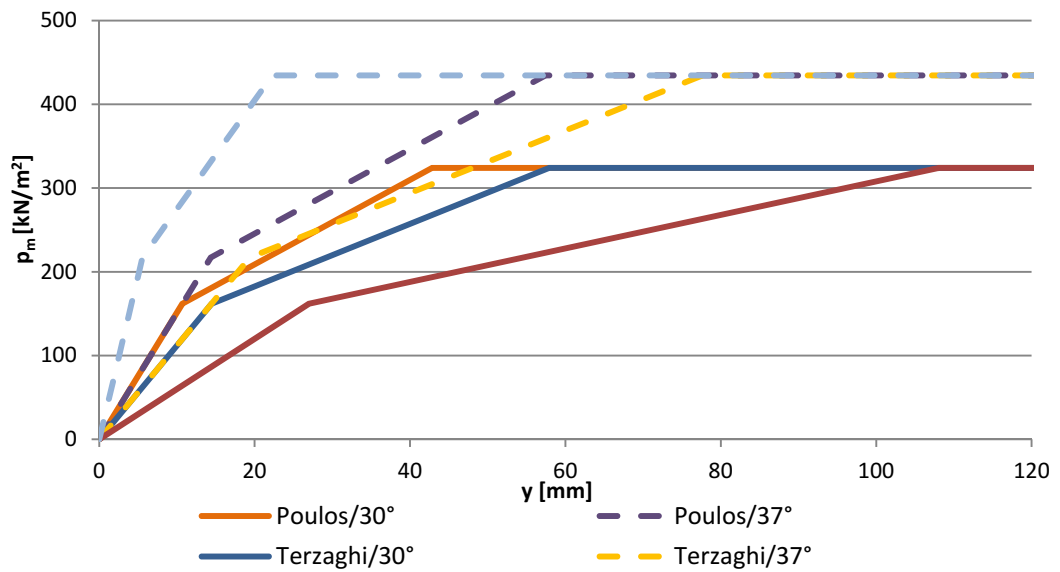
Kuvista 39–41 nähdään, että Poulosin ja Terzaghin mukaiset menetelmät antavat keskenään samaa suuruusluokkaa olevia kulmakertoimen eli alustaluvun arvoja eri syvyyksissä molemmilla leikkauskestävyysskulmilla. Sen sijaan leikkauskestävyysskulman mukainen menetelmä antaa leikkauskestävyysskulmalla  $30^\circ$  merkittävästi muita menetelmiä pienempiä alustaluvun arvoja suuresta rajasiirtymän arvosta johtuen, ja leikkauskestävyysskulmalla  $37^\circ$  muita menetelmiä suurempia alustaluvun arvoja. Erot leikkauskestävyysskulman mukaisen menetelmän ja kokoonpuristuvuuteen perustuvien menetelmien välillä kasvavat syvemmälle mentäessä. Kuvien perusteella voidaan todeta, että maan vaakajäykkyys ja lujuus mallinnetaan eri menetelmillä selvästi toisistaan poikkeavalla tavalla.



Kuva 39. Laskennalliset sivupaine-siirtymä-kuvaajat hienossa hiekassa syvyydessä -1,0 m maanpinnasta.



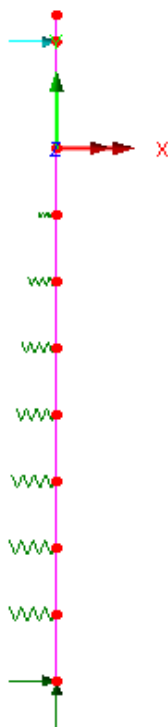
Kuva 40. Laskennalliset sivupaine-siirtymä-kuvaajat hienossa hiekassa syvyydessä -2,5 m maanpinnasta.



Kuva 41. Laskennalliset sivupaine-siirtymä-kuvaajat hienossa hiekassa syvyydessä -4,0 m maanpinnasta.

### 8.2.3 Siirtymien vertailu

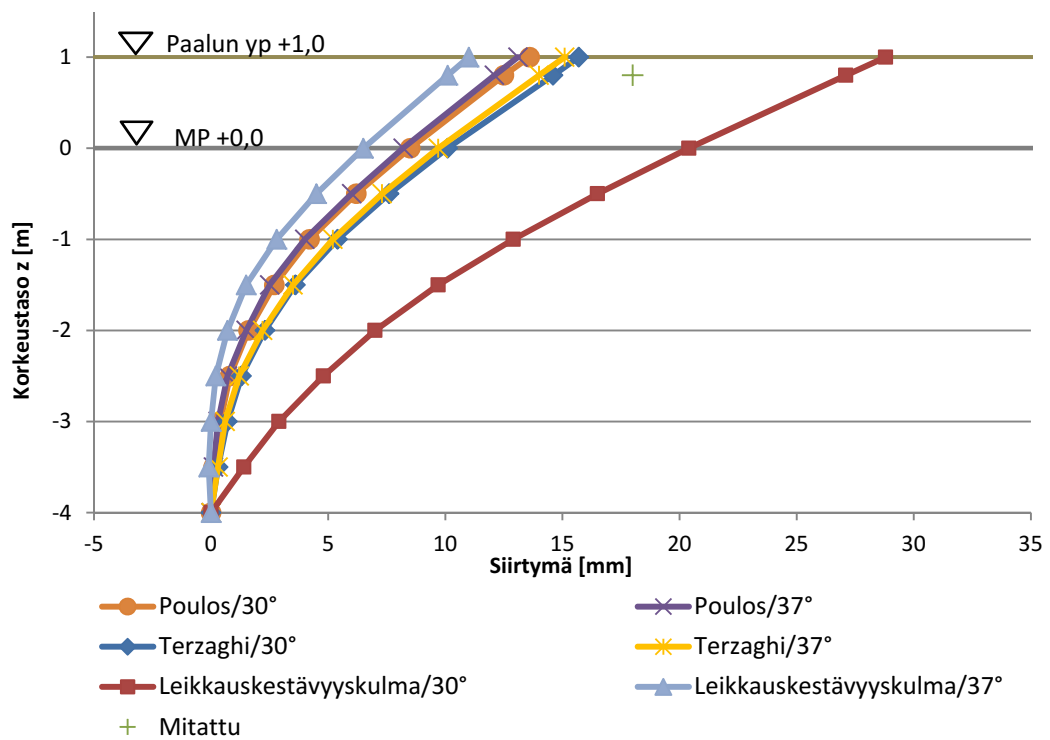
Siirtymät on laskettu Lusas Bridge -ohjelmistolla 2D-mallinnuksena. Paalun dimensiot (ulkohalkaisija, seinämän paksuus ja pituus) ja ominaisuudet (hitausmomentti ja taivutusjäykkyys) syötettiin ohjelmaan vastaamaan todellisia arvoja taulukon 11 mukaisesti. Paalun alapään kiinnittyminen maahan mallinnettiin nivelenä ja yläpää vapaaksi. Paalun pituuden 4 m perusteella elementtiväliksi valittiin 0,5 m. Kuvassa 42 on esitetty ohjelmistoon rakennettu malli. Kaksi tarkastuslaskentaa suoritettiin Sofistik-ohjelmistolla. Tarkastuslaskennat tehtiin hienon hiekan leikkauskestävyyskulmalla  $30^\circ$  Poulosin menetelmän mukaisilla jousivakion arvoilla kuormitukselle 10 kN ja 50 kN. Siirtymät vastasivat täysin Lusas Bridge -ohjelmistolla saatuja siirtymän arvoja.



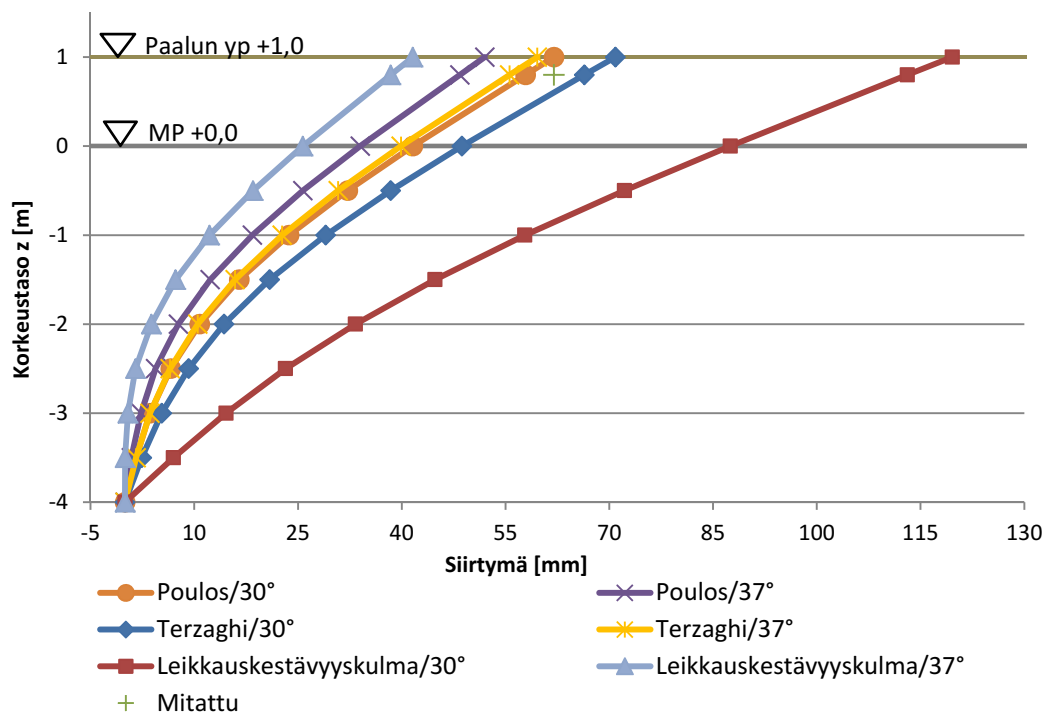
Kuva 42. Lusas Bridge -ohjelmaan rakennettu paalun ja maaperän FEM-jousimalli hienossa hiekassa.

Laskenta aloitettiin alustalukua  $k_s$  vastaavalla jousella. Jos jousen siirtymä oli suurempi kuin  $y_m/4$ , asetettiin jousen kohdalle sivupainetta  $p_m/3$  vastaava vaakavoima ja jousivakioksi alustalukua  $k_s/3$  vastaava jousi. Jos tämän jälkeen paalun siirtymä jousen kohdalla oli suurempi kuin  $y_m$ , jousi poistettiin kokonaan ja sen kohdalle asetettiin vaikuttamaan sivupainetta  $p_m$  vastaava vaakavoima. Laskennalliset ja mitatut siirtymät eri menetelmillä määritettyinä leikkauskestävyyskulmilla  $30^\circ$  ja  $37^\circ$  ja kuormituksella 10 kN on esitetty kuvassa 43 ja kuormituksella 30 kN kuvassa 44. Kuormituksella 50 kN ja leikkauskestävyyskulmalla  $30^\circ$  laskennalliset siirtymät olivat niin suuria, että kaikki jouset jouduttiin korvaamaan sivupainetta  $p_m$  vastaavalla voimalla jokaisen laskentamenetelmän kohdalla. Kun alimmainen jousi korvattiin voimalla, tulokset eivät olleet realistisia paalun myötörajan ylittyessä ja paalun alkaessa myötäämään. Laskennalliset siirtymät olivat paalun alapäässä kertaluokkaa  $10^8$  m ja yläpäässä  $10^9$  m. Näin ollen kuormitusta 50 kN vastaavassa kuvassa 45 on esitetty vain leikkauskestävyyskulmalla  $37^\circ$  lasketut siirtymät ja mitattu siirtymä.

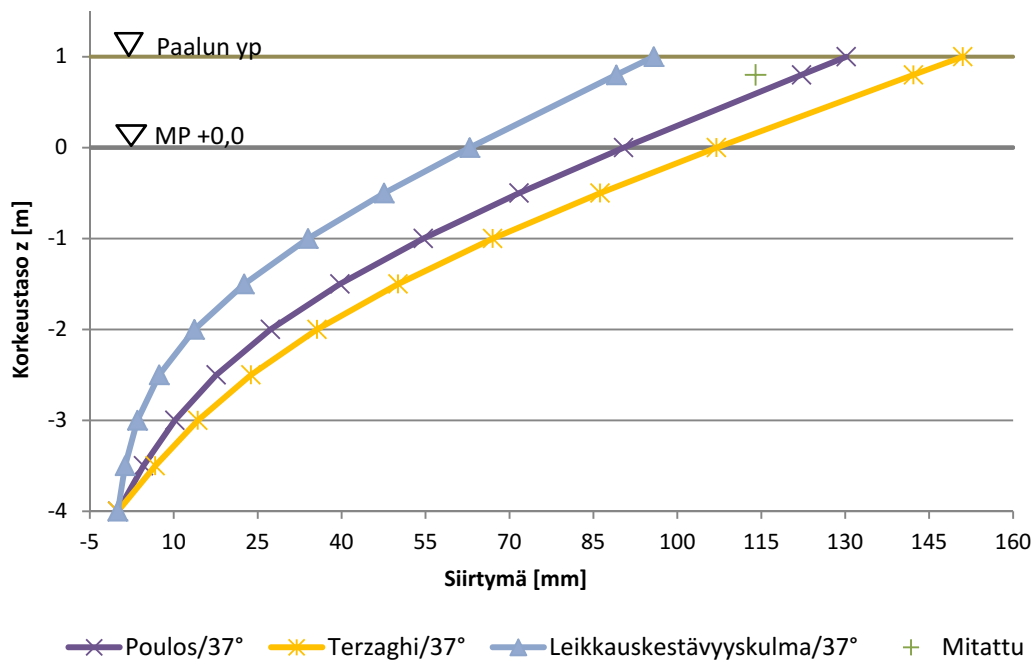




Kuva 43. Laskennalliset ja mitatut siirtymät hienossa hiekassa kuormituksella 10 kN.



Kuva 44. Laskennalliset ja mitatut siirtymät hienossa hiekassa kuormituksella 30 kN.



Kuva 45. Laskennalliset ja mitatut siirtymät hienossa hiekassa kuormituksella 50 kN.

Kuvan 43 perusteella kuormituksella 10 kN Terzaghin mukaan määritetyillä jousivakioidella saatiin laskennallinen siirtymä lähimmäksi mitattua siirtymää. Mitattu siirtymä kuormituksella 10 kN kuormitustasossa +0,8 m maanpinnasta oli noin 18 mm. Terzaghin menetelmällä laskettujen siirtymien erot olivat noin -3 mm ( $\phi=30^\circ$ ) ja -4 mm ( $\phi=37^\circ$ ) mitattuihin siirtymiin nähden. Poulosin menetelmällä laskettujen siirtymien erot mitattuihin siirtymiin olivat noin -5 mm ( $\phi=30^\circ$ ) ja -6 mm ( $\phi=37^\circ$ ). Terzaghin ja Poulosin mukaiset siirtymät vastasivat melko hyvin mitattuja siirtymiä. Leikkauskestävyyskulman mukaisella menetelmällä saatiin sekä suurimmat ( $\phi=30^\circ$ ) että pienimmät ( $\phi=37^\circ$ ) siirtymät. Erot mitattuun siirtymään leikkauskestävyyskulman mukaisessa menetelmässä olivat noin +9 mm ( $\phi=30^\circ$ ) ja -8 mm ( $\phi=37^\circ$ ).

Kuvasta 44 nähdään, että kuormituksella 30 kN Terzaghin ja Poulosin menetelmissä rajasiirtymät ovat ylittyneet useamman jousen kohdalla, sillä eri leikkauskestävyyskulmilla on saatu jo selkeästi toisistaan poikkeavia siirtymien arvoja. Leikkauskestävyyskulma vaikuttaa Terzaghin ja Poulosin menetelmissä rajasiirtymien arvoihin passiivipainekertoimen kautta. Mitattu siirtymä kuormituksella 30 kN kuormitustasossa +0,8 m maanpinnasta oli noin 62 mm. Erot mitattuun siirtymään Terzaghin menetelmän siirtymillä olivat noin +4 mm ( $\phi=30^\circ$ ) ja -6 mm ( $\phi=37^\circ$ ) ja Poulosin menetelmän siirtymillä noin -4 mm ( $\phi=30^\circ$ ) ja -14 mm ( $\phi=37^\circ$ ). Terzaghin ja Poulosin mukaiset siirtymät vastasivat melko hyvin mitattuja siirtymiä, poikkeuksena kuitenkin Poulosin menetelmällä leikkauskestävyyskulmalla  $37^\circ$  saatu siirtymä. Leikkauskestävyyskulman mukaisella menetelmällä erot mitattuun siirtymään olivat noin +51 mm ( $\phi=30^\circ$ ) ja -24 mm ( $\phi=37^\circ$ ). Leikkauskestävyyskulmalla laskennallisten siirtymien erot mitattuun siirtymään olivat merkittävät.

Kuvasta 45 nähdään, että kuormituksella 50 kN ja leikkauskestävyyskulmalla  $37^\circ$  Poulosin mukaan määritetyillä jousivakioilla saatiin laskennallinen siirtymä lähimmäksi mitattua siirtymää. Mitattu siirtymä kuormituksella 50 kN kuormitustasossa +0,8 m maanpinnasta oli noin 114 mm. Erot mitattuun siirtymään nähden Terzaghin menetelmän siirtymällä oli noin +28 mm ( $\phi=37^\circ$ ), Poulosin menetelmän siirtymällä noin +8 mm ( $\phi=37^\circ$ ) ja leikkauskestävyyskulman menetelmän siirtymällä noin -25 mm ( $\phi=37^\circ$ ). Poulosin menetelmä antoi parhaiten mitattua siirtymää vastaavan tuloksen. Terzaghin ja leikkauskestävyyskulman menetelmillä saadut siirtymät poikkesivat selvästi mitatusta siirtymästä.

Tuloksista voidaan havaita kuormituksen kasvaessa mitatun siirtymän kasvavan suhteessa vähemmän kuin laskennalliset siirtymät kaikilla laskentamenetelmillä. Pienellä kuormituksella Poulosin ja Terzaghin menetelmät antavat mitattua siirtymää pienempiä arvoja. Kuormituksen kasvaessa lähelle murtokuormaa menetelmät antavat suurempia arvoja kuin mitattu arvo. Leikkauskestävyyskulman menetelmässä leikkauskestävyyskulmalla  $30^\circ$  saatiin kaikissa kuormitustapauksissa huomattavasti suurempia siirtymiä kuin mitatut siirtymät olivat, ja ero kasvoi kuormitusta lisättäessä. Pienimpiä siirtymän arvoja antoi leikkauskestävyyskulman menetelmä leikkauskestävyyskulmalla  $37^\circ$ , jolloin laskennalliset siirtymät olivat merkittävästi mitattuja siirtymiä pienempiä.

Poulosin ja Terzaghin mukaisilla alustaluvun laskentamenetelmillä saatiin siirtymät mallinnettua mitoituksen kannalta riittävän tarkasti useimmissa tarkastelutapauksissa. Terzaghin menetelmä antaa kuitenkin Poulosin menetelmään verrattuna varmemman puolella olevia siirtymiä alustalukukertoimen yhtälön pienemmästä kertoimesta johtuen. Vertailtaessa kolmiakσιαalikokeella ja kairausvastuksen perusteella määritetyillä leikkauskestävyyskulmilla saatuja siirtymien arvoja voidaan todeta kairausvastuksen perusteella arvioitun pienemmän leikkauskestävyyskulman olevan mitoituksen kannalta varmemman puolella. Alustaluvun määrittäminen leikkauskestävyyskulmaan perustuen antoi hiekassa selkeästi mitatuista arvoista poikkeavia arvoja, ja menetelmä oli herkkä leikkauskestävyyskulman muutoksille.

## 8.3 Siirtymät siltissä

### 8.3.1 Laskennalliset alustaluvut

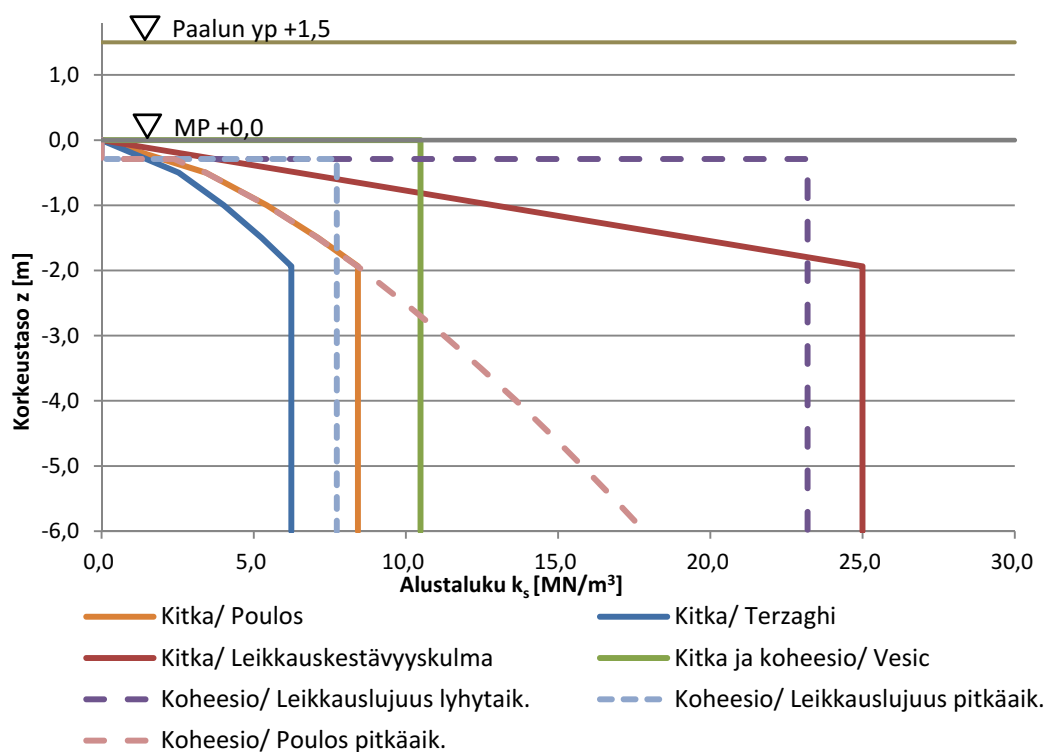
Taulukossa 17 on esitetty alustalukujen laskennassa käytetyt lähtötiedot. Tehokas tilavuuspaino on valittu laboratorionkokeisiin perustuen. Leikkauskestävyyskulma on määritetty kolmiakσιαalikokeella. Suljetuksi leikkauslujuudeksi on valittu siipikairauksilla saatu keskimääräinen leikkauslujuus. JännitysekspONENTTI ja moduuliluku on määritetty laboratoriossa. Poissonin vakio on arvioitu yhtälön (20) yhteydessä annetun vaihteluvälin perusteella. Maaperän kimmomoduuli on valittu samaksi kuin Nirhamon (1995) laskuissa ja oletettu vakioksi. Todellisuudessa kimmomoduulin arvo kasvaa syvyyden kasvaessa, ja käytetty kimmomoduulin arvo edustaa upotussyvyyden loppupään arvoja. Lähempänä maan pintaa kimmomoduuli on todellisuudessa pienempi.

Taulukko 17. Alustalukulaskennan lähtötiedot siltissä.

Maalaji	Si
Tehokas tilavuuspaino $\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	17,9
Leikkauskestävyysskulma $\phi$	33°
Suljettu leikkauslujuus $s_u$ [kPa]	30
Moduuliluku $m$	44,4
Jännityseksponentti $\beta$	0,336
Poissonin vakio $\nu$	0,3
Maaperän kimmomoduuli $E_d$ [kPa]	5 000
Maanpinnan taso [m]	0
Pohjavesipinnan taso [m]	ei pohjavettä
Paalun yläpään taso [m]	+1,5
Paalun alapään taso [m]	-6
Kerrospaksuus (elementin pituus) [m]	0,5
Paalun halkaisija $d$ [m]	0,194

Olettaen maa kitkamaaksi alustaluvut paalun pituuden funktiona on määritetty Terzaghin, Poulosin, Vesicin ja leikkauskestävyysskulman (kuva 18) menetelmillä. Terzaghin ja Poulosin menetelmillä alustaluvut on laskettu yhtälöllä (14), missä kerroin  $\beta$  on laskettu yhtälöllä (16) ja kokoonpuristuvuusmoduuli  $M$  yhtälöllä (17). Vesicin menetelmässä alustaluku on laskettu suoraan yhtälöllä (23).

Olettaen maa koheesiomaaksi alustaluvut paalun pituuden funktiona on määritetty Poulosin, suljetun leikkauslujuuden ja Vesicin menetelmillä. Poulosin mukaisesti alustaluvut on laskettu yhtälöllä (20) pitkäaikaisen kuormituksen tapauksessa. Suljetun leikkauslujuuden mukaan alustaluvut on pitkäaikaisessa kuormituksessa laskettu yhtälöllä (18) ja lyhytaikaisessa kuormituksessa yhtälöllä (19) käyttäen vaihteluvälien ylärajoja Liikenneviraston (2012: 32–33) ohjeeseen perustuen. Vesicin yhtälön (23) mukaiset tarkastelut tehtiin koheesiomaassa sekä lyhyt- että pitkäaikaiselle kuormitukselle. Liitteessä 12 on esitetty laskennan välituloksia ja lasketut alustaluvut taulukkomuodossa. Alustaluvut  $k_s$  paalun pituuden funktiona on esitetty kuvassa 46.



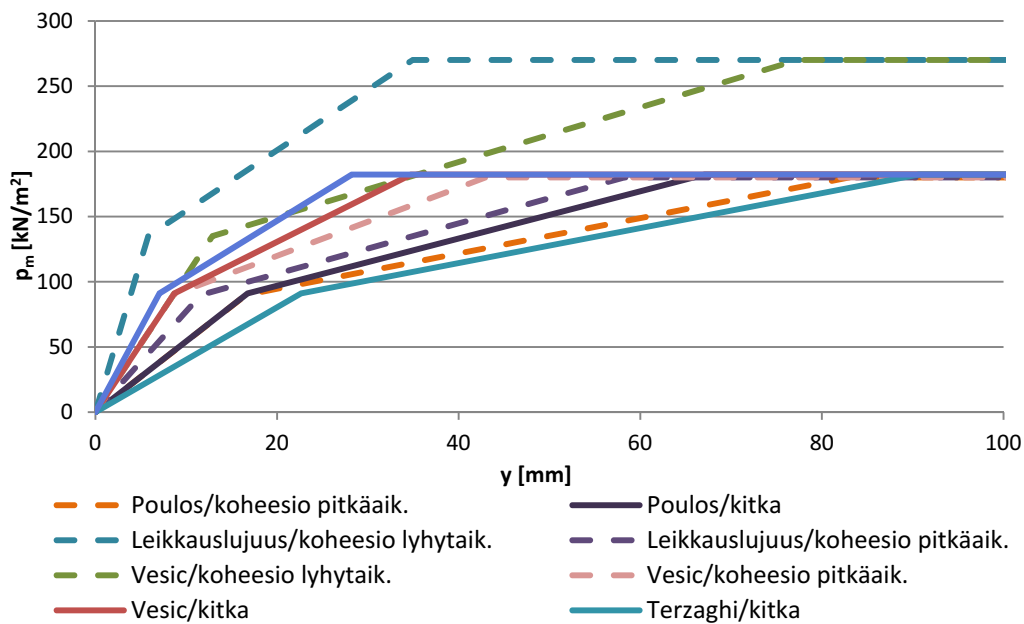
Kuva 46. Alustaluvut siltissä eri menetelmillä määritettyinä.

Kuvasta 46 nähdään, että leikkauskestävyyskulman mukaan kuvan 18 perusteella määritetyt alustaluvut ja lyhytaikaisessa kuormituksessa suljetun leikkauslujuuden perusteella määritetyt alustaluvut ovat suurimpia, ja syvyydestä  $10d$  alaspäin niiden arvot ovat lähellä toisiaan. Kitkamaan tapauksessa Terzaghin ja Poulosin mukaiset alustaluvut poikkeavat yhtälön (14) kertoimen  $\alpha$  mukaisesti toisistaan (Terzaghin mukainen kerroin on 1,0 ja Poulosin mukainen 0,74). Poulosin koheesiomaan tapauksessa alustaluvun on oletettu kasvavan syvyyden funktiona koko paalun pituudelta. Vesicin mukaiset alustaluvun arvot sijoittuvat keskelle muiden menetelmien mukaisia arvoja, ja alustaluku on vakio kitkamaassa maanpinnasta ja koheesiomaassa syvyydestä  $1,5d$  lähtien. Pitkäaikaisessa kuormituksessa suljetun leikkauslujuuden mukaan määritettynä alustaluku on korkeustason suhteen vakio syvyydestä  $1,5d$  alaspäin, ja noin korkeustasosta  $-1,8$  m alaspäin menetelmä antaa toiseksi pienimmät alustaluvun arvot.

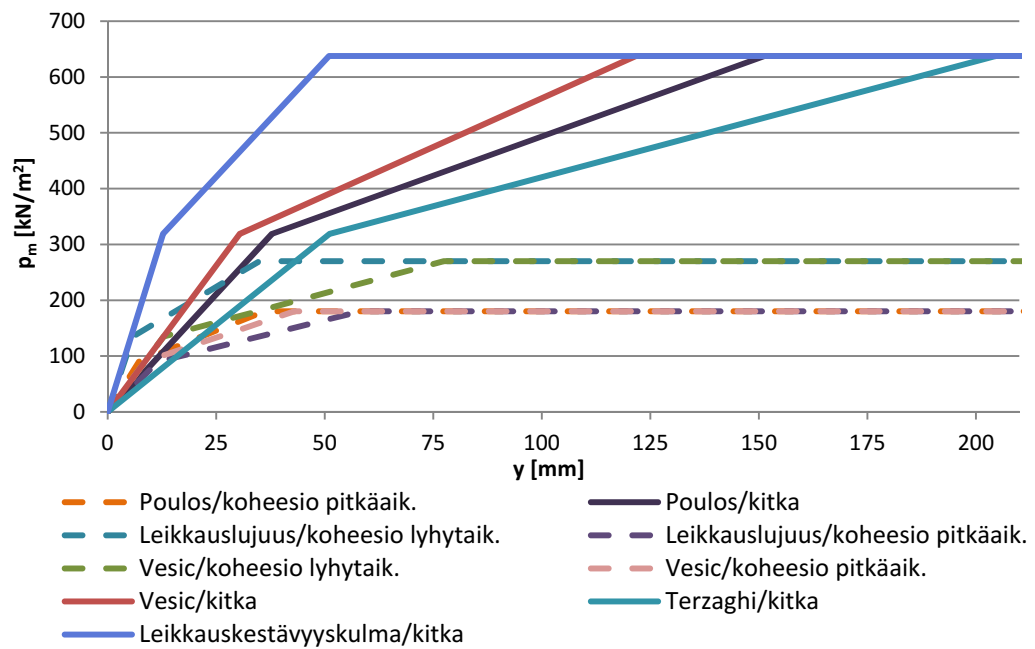
### 8.3.2 Laskennalliset rajasiirtymät ja jousivakiot

Olettaen maa kitkamaaksi paaluun kohdistuvan maanpaineen ääriarvot on laskettu yhtälön (6) kertoimilla 3 ja 4,4 leikkauskestävyyskulman arvolla  $33^\circ$ . Yhtälön (6) passiivipainekerroin on määritetty yhtälöllä (4) perustuen Liikenneviraston ohjeessa (2012) esitettyyn esimerkkilaskuun. Olettaen maa koheesiomaaksi paaluun kohdistuvan maanpaineen ääriarvot on laskettu yhtälön (7) kertoimella 6 pitkäaikaisessa ja kertoimella 9 lyhytaikaisessa kuormituksessa. Kuvien 23 ja 24 mukaiset rajasiirtymät  $y_m$ ,  $y_m/4$ ,  $y_m/5$  ja  $y_m/6$  on määritetty laskettujen maanpaineen ääriarvojen  $p_m$  ja eri laskentamenetelmillä saatujen alustalukujen  $k_s$  avulla. Jousivakiot määritettiin yhtälöllä (25). Liitteessä 12 on esitetty kaikki lasketut maanpaineen ääriarvot, rajasiirtymät ja jousivakiot.

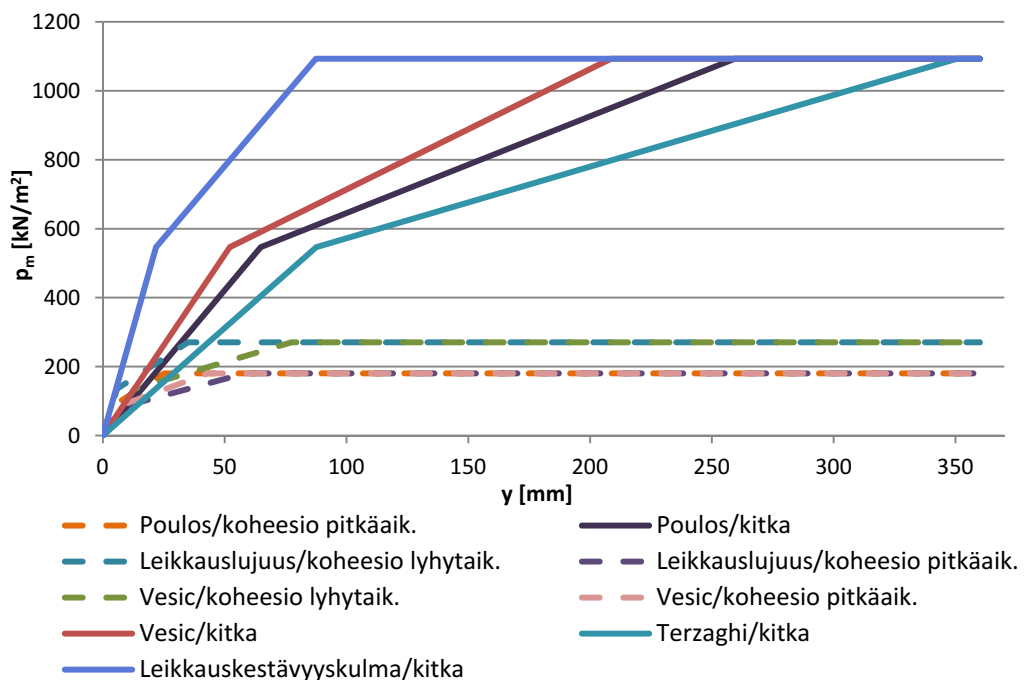
Kuvissa 47–49 on esitetty laskentojen avulla määritettyjä sivupaine-siirtymä-kuvaajia eri syvyyksissä. Kitkamaan tapauksessa kuvat vastaavat yhtälön (6) kerrointa on 3. Koheesiomaan oletuksessa leikkauslujuuden ja Vesicin lyhyt- ja pitkäaikaisissa tarkasteluissa sivupaine-siirtymä-käyriin ei vaikuta syvyys, vaan käyrät ovat samat syvyydestä riippumatta johtuen oletetusta paaluperustuksen toiminnasta koheesiomaassa (ks. kuva 15). Sen sijaan Poulosin menetelmässä koheesiomaan oletuksessa siirtymien raja-arvot kasvavat syvyyden kasvaessa johtuen alustaluvun arvon kasvamisesta syvyyden funktiona (ks. kuva 46). Olettaen maa kitkamaaksi rajasiirtymät kasvavat, kuten paaluun kohdistuvan maanpaineen ääriarvo ja alustaluku, syvyyden kasvaessa. Kuvista 47–49 nähdään, että lähellä maanpintaa sivupaine-siirtymä-käyrät muistuttavat koheesiomaan pitkäaikaisessa ja kitkamaan oletuksissa toisiaan, vaikka eri menetelmien välillä on huomattavia eroja rajasiirtymien ja alustalukujen suuruudessa. Koheesiomaan lyhytaikaisissa tarkasteluissa sivupaineen ääriarvo on 1,5-kertainen koheesiomaan pitkäaikaisiin tarkasteluihin nähden, mikä näkyy koheesiomaan käyristä. Syvemmälle mentäessä kitka- ja koheesiomaan oletusten erot tulevat selvemmin esille johtuen maanpaineen ääriarvon ja alustaluvun kasvamisesta syvyyden kasvaessa kitkamaan oletuksessa. Kuvien perusteella voidaan todeta, että eri menetelmissä maan oletetaan käyttäytyvän toisistaan selvästi poikkeavalla tavalla.



Kuva 47. Laskennalliset sivupaine-siirtymä -kuvaajat siltissä syvyydessä -1,0 m maanpinnasta.



Kuva 48. Laskennalliset sivupaine-siirtymä-kuvaajat siltissä syvyydessä -3,5 m maanpinnasta.



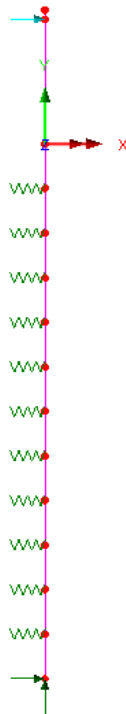
Kuva 49. Laskennalliset sivupaine-siirtymä-kuvaajat siltissä syvyydessä -6,0 m maanpinnasta.

Koheesiomaan tapauksessa leikkauslujuuden mukaan määritetyssä lyhytaikaisessa kuormituksessa rajasiirtymät olivat pienimpiä ( $y_m=34,9$  mm) ja Vesicin mukaan määritetyssä lyhytaikaisessa kuormituksessa suurimpia ( $y_m=77,3$  mm). Kuitenkin koheesiomaan oletuksessa Poulosin menetelmä pitkäaikaisessa kuormituksessa antoi syvyydessä 0...-1,0 m maanpinnasta Vesicin menetelmää suurempia arvoja, ja syvyydessä -4,0...-6,0 m maanpinnasta leikkauslujuuden menetelmää pienempiä arvoja. Kitkamaan tapauksessa pienimpiä rajasiirtymän arvoja saatiin leikkauskestävyyskulman mukaisella menetelmällä (maanpinnassa  $y_m=28,2$  mm ja paalun alapäässä

$y_m=87,4$  mm, kun  $\rho_m$  yhtälön kerroin 3) ja suurimpia Terzaghin mukaisella menetelmällä (maanpinnassa  $y_m=71,8$  mm ja paalun alapäässä  $y_m=350,5$  mm, kun  $\rho_m$  yhtälön kerroin 4,4).

### 8.3.3 Siirtymien vertailu

Siirtymät on laskettu Lusas Bridge -ohjelmistolla 2D-mallinnuksena. Paalun dimensiot (ulkohalkaisija, seinämän paksuus ja pituus) ja ominaisuudet (hitausmomentti ja taivutusjäykkyys) syötettiin ohjelmaan vastaamaan todellisia arvoja taulukon 12 mukaisesti. Paalun alapään kiinnittyminen maahan mallinnettiin nivelenä ja yläpää vapaaksi. Paalun pituuden 6 m perusteella elementtiväliksi valittiin 0,5 m. Kuvassa 50 on esitetty ohjelmaan rakennettu malli.



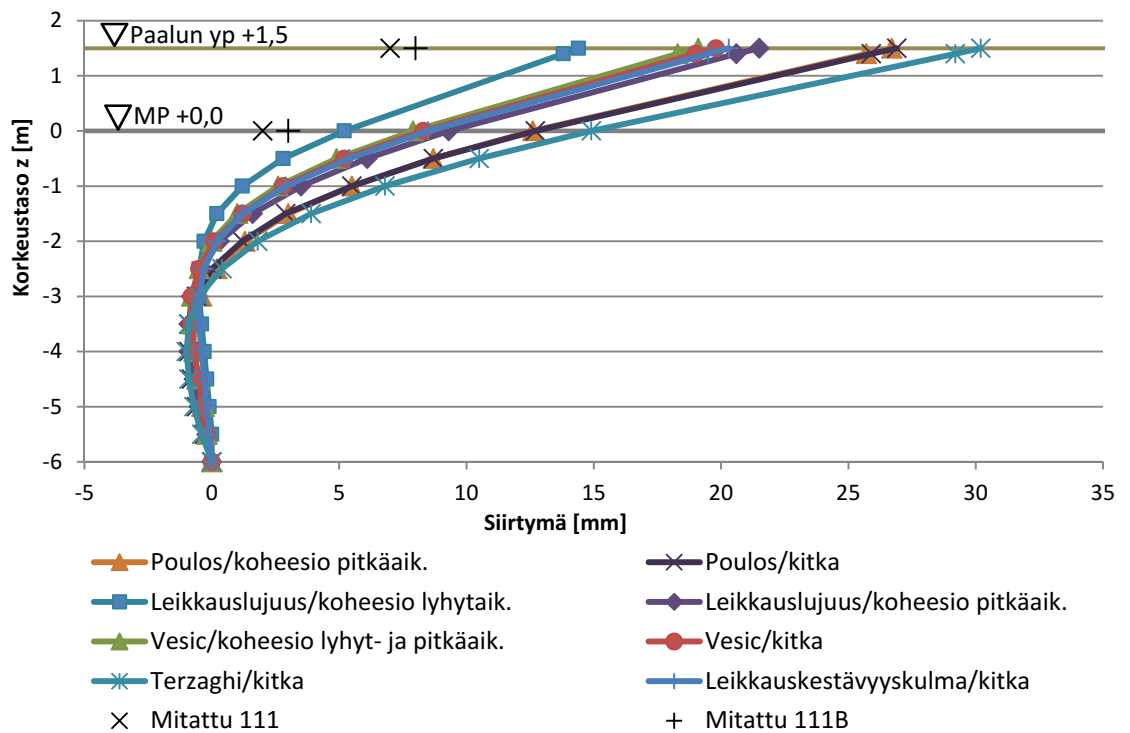
Kuva 50. Lusas Bridge -ohjelmaan rakennettu paalun ja maaperän FEM-jousimalli siltissä.

Laskenta suoritettiin samalla tavalla kuin hienossa hiekassa (ks. luku 8.2.3), mutta koheesiomaan tapauksessa lyhyt- ja pitkäaikaisia kuormituksia vastaavilla rajasiirtymillä ( $y_m$ ,  $y_m/6$  ja  $y_m/5$ ) ja sivupainetta vastaavilla vaakavoimilla ( $\rho_m$ ,  $0,4\rho_m$  ja  $0,375\rho_m$ ). Laskennalliset ja mitatut siirtymät paalun pituuden funktiona eri menetelmällä määritettyinä kuormituksella 5 kN on esitetty kuvassa 51, kuormituksella 15 kN kuvassa 52 ja kuormituksella 25 kN kuvassa 53. Taulukossa 18 on esitetty paaluilta mitatut siirtymät. Laipallisen paalun 111 siirtymät olivat hieman pienempiä kuin laipattoman paalun 111B.

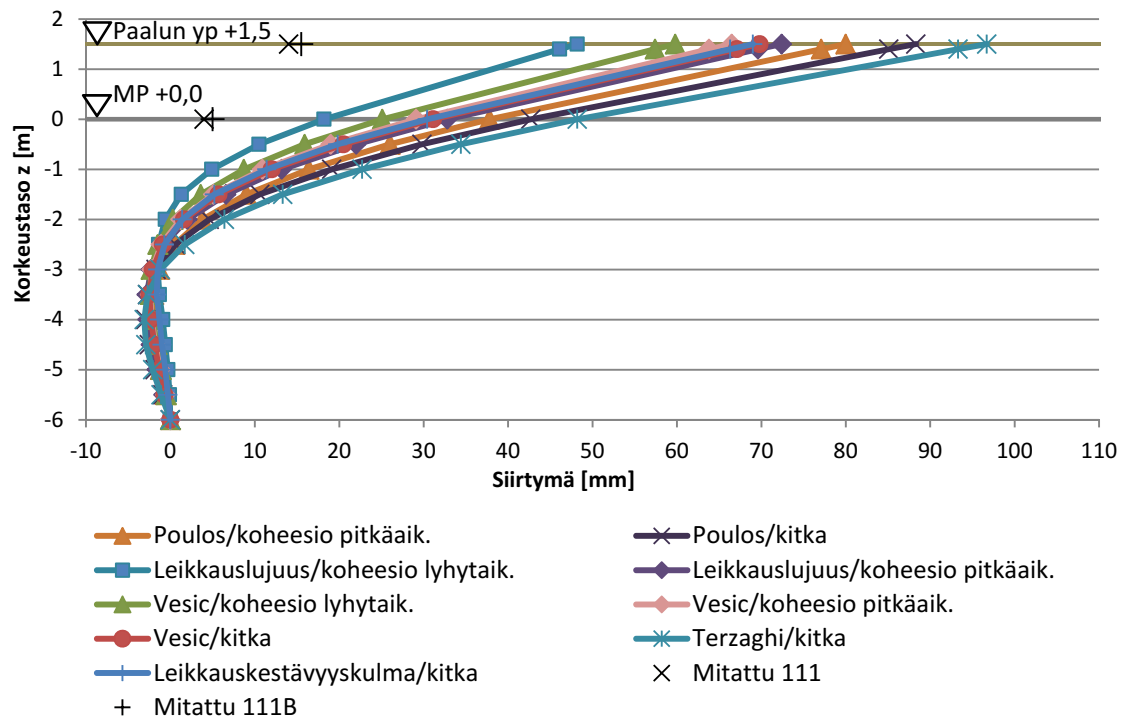


Taulukko 18. Mitatut siirtymät paaluilta 111 ja 111B.

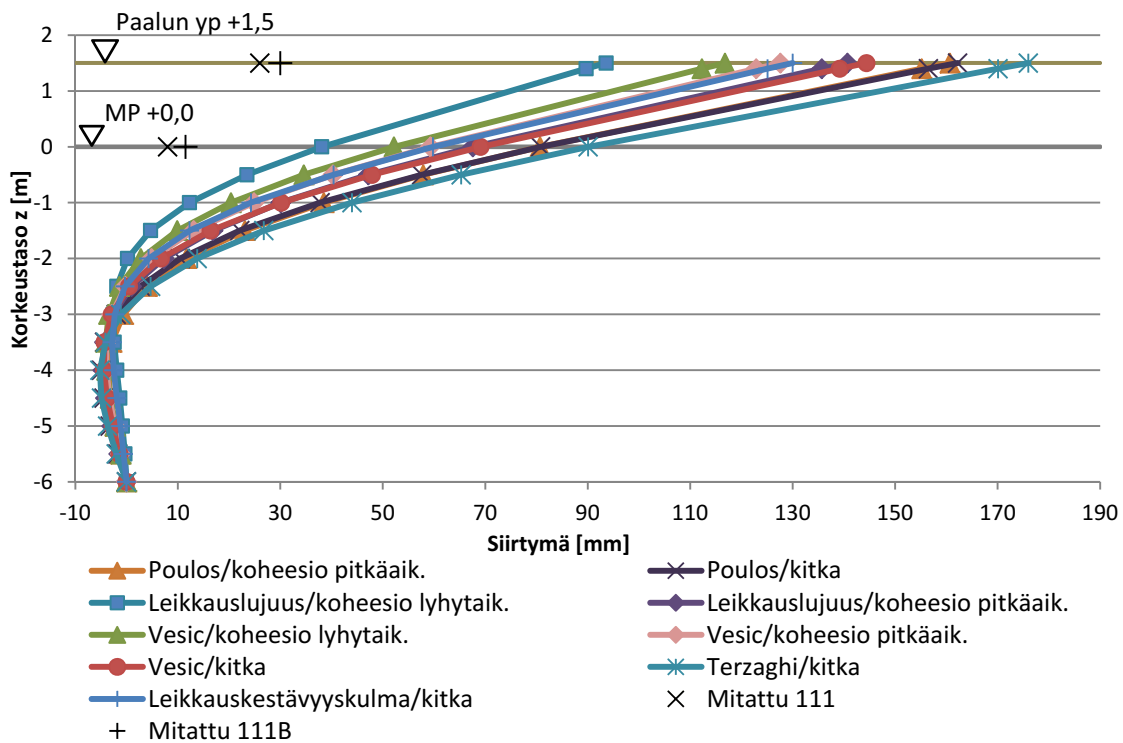
Paalu	Kuormitus: 5 kN Taso: +0,0	Kuormitus: 5 kN Taso: +0,8	Kuormitus: 15 kN Taso: +0,0	Kuormitus: 15 kN Taso: +0,8	Kuormitus: 25 kN Taso: +0,0	Kuormitus: 25 kN Taso: +0,8
111	2 mm	7 mm	4 mm	14 mm	8 mm	26 mm
111B	3 mm	8 mm	5 mm	16 mm	12 mm	30 mm



Kuva 51. Laskennalliset ja mitatut siirtymät siltissä kuormituksella 5 kN.



Kuva 52. Laskennalliset ja mitatut siirtymät siltissä kuormituksella 15 kN.



Kuva 53. Laskennalliset ja mitatut siirtymät siltissä kuormituksella 25 kN.

Kuormitustapauksessa 5 kN laskennallisten siirtymien erot laipattomasta paalusta 111B mitattuihin siirtymiin nähden olivat pienimmillään leikkauslujuuden lyhytaikaisella menetelmällä maanpinnan tasolla noin +2 mm ja tasolla +1,5 m maanpinnasta noin +6 mm. Suurimmillaan erot mitatun ja laskennallisen siirtymän välillä olivat Terzaghin menetelmällä maan pinnan tasolla noin +12 mm ja tasolla +1,5 m maanpinnasta noin +22 mm. Kuormitustapauksessa 15 kN laskennallisten siirtymien erot laipattomasta paalusta 111B mitattuihin siirtymiin olivat pienimmillään leikkauslujuuden lyhytaikaisella menetelmällä maanpinnan tasolla noin +13 mm ja tasolla +1,5 m maanpinnasta noin +33 mm, ja suurimmillaan Terzaghin menetelmällä maan pinnan tasolla noin +43 mm ja tasolla +1,5 m maanpinnasta noin +81 mm. Kuormitustapauksessa 25 kN laskennallisten siirtymien erot laipattomasta paalusta 111B mitattuihin siirtymiin olivat, kuten muissakin kuormitustapauksissa, pienimmillään leikkauslujuuden lyhytaikaisella menetelmällä maanpinnan tasolla noin +27 mm ja tasolla +1,5 m maanpinnasta noin +64 mm, ja suurimmillaan Terzaghin menetelmällä maan pinnan tasolla noin +79 mm ja tasolla +1,5 m maanpinnasta noin +146 mm.

Kaikissa kuormitustapauksissa ja laskentamenetelmissä mitatut siirtymät olivat merkittävästi pienempiä kuin laskennalliset siirtymät. Kuormituksen kasvaessa kasvoivat erot mitattujen ja laskettujen siirtymien välillä. Leikkauslujuuden perusteella lasketuilla jousivakion arvoilla lyhytaikaisella kuormituksella saatiin pienimmät siirtymän arvot jokaisessa kuormitustapauksessa, silti lähimmilläänkin laskennallinen siirtymä oli 1,7-kertainen mitattuun siirtymään nähden. Toiseksi pienimpiä siirtymän arvoja saatiin Vesicin mukaisilla jousivakioilla. Leikkauslujuuden pitkäaikaisen kuormitustapauksen ja leikkauskestävyyskulman perusteella määritetyt jousien antamat siirtymät olivat lähellä toisiaan ja asettuivat muiden menetelmien keskelle. Suurimpia siirtymän arvoja antoi Terzaghin mukaiset jousivakiot ja hieman tätä pienempiä arvoja Poulosin mukaiset jousivakiot. Terzaghin mukaan laskettuna saatiin jopa lähes kahdeksankertainen laskennallinen siirtymä mitattuun siirtymään nähden maanpinnassa.

Merkittäviä eroja siirtymien arvoissa Vesicin ja Poulosin menetelmissä ei tullut siitä, oliko maa oletettu kitka- vai koheesiomaaksi ja oliko Vesicin menetelmässä koheesiomaassa kuormitus oletettu pitkä- vai lyhytaikaiseksi. Eroja samalla menetelmällä laskettuihin siirtymiin aiheuttivat erot rajasiirtymien arvoissa sekä Poulosin tapauksessa tehdyt oletukset kitka- ja koheesiomaan alustalukujen syvyysuuntaisesta muuttumisesta (ks. kuva 46). Olettaen maa kitkamaaksi menetelmät antoivat hieman suurempia arvoja kuin koheesiomaan tapauksessa.

Myös Nirhamo (1995) sai yhtälön (14) Terzaghin mukaisiksi laskennallisiksi siirtymiksi huomattavasti mitattuja suurempia arvoja. Selittävää tekijää suurille eroille ei löytynyt. Eroa voi aiheutua esimerkiksi virheellisestä sivupaine-siirtymä-käyrästä, sillä siltissä on sekä kitka- että koheesiomaan ominaisuuksia, mitä ei laskennassa voida huomioida. Laskentamenetelmien sisältämät muut yksinkertaistukset sekä mahdolliset virheelliset otaksumat ovat myös virhelähteitä. Laskentamallit eivät esimerkiksi huomioi maaparametrien muuttumista jännityksen tai muodonmuutoksen funktiona. Myös maan anisotrooppisuus saattaa aiheuttaa virhettä, sillä maan vaaka- ja pystysuuntaiset ominaisuudet poikkeavat toisistaan. Mahdollisesti mittauksissa tapahtuneista virheistä ja mittauslaitteiden tarkkuudesta ei ole tietoa. Tulosten perusteella siltissä laskennalliset siirtymät voivat poiketa merkittävästi mitatuista, vaikka laskenta suoritettaisiin laboratorionkokeissa määritettyjen maaparametrien perusteella.

## 8.4 Siirtymät paaluryhmässä kerroksellisessa maassa

### 8.4.1 Laskennalliset alustaluvut

Taulukoissa 19 ja 20 on esitetty alustalukujen laskennassa käytetyt lähtötiedot. Maakerrosten rajat, tehokkaat tilavuuspainot, leikkauskestävyyskulmat ja leikkausluvut on valittu samoiksi kuin Walsh (2005) ja Larkela (2008) käyttivät laskelmissaan laboratorikokeisiin perustuen. Moduuliluvut ja jännityseksponentit kitkamaassa on arvioitu liitteen 3 perusteella ja koheesiomaassa taulukon 8 perusteella. Poissonin vakiot on arvioitu yhtälöiden (14) ja (20) yhteydessä annettujen vaihteluvälien perusteella.

Taulukko 19. Laskennassa käytetyt maaparametrit kerroksellisessa maassa.

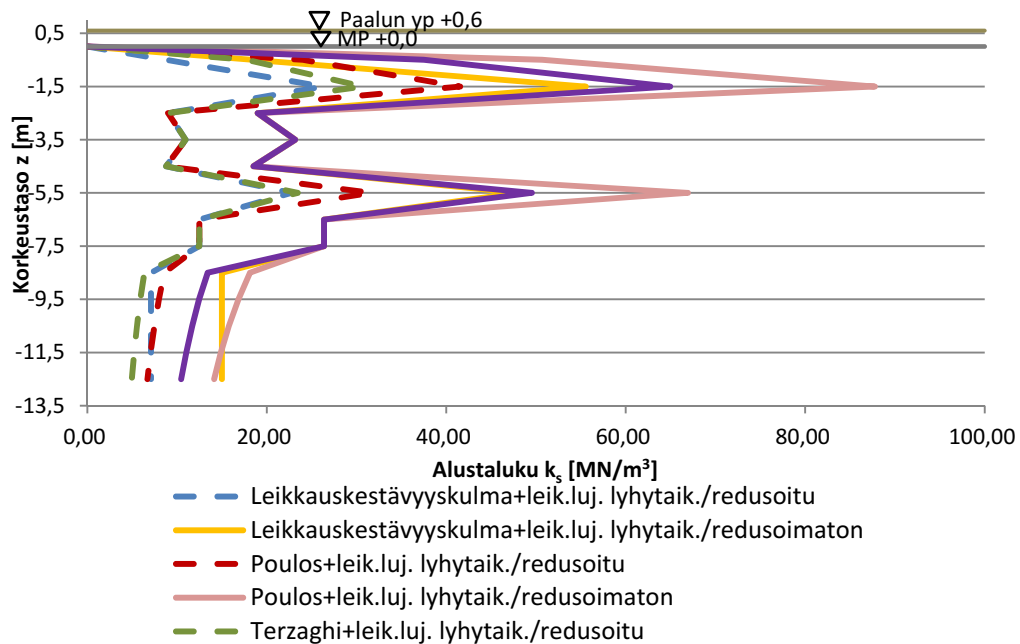
Maalaji	Syvyys $z$ [m]	Tehokas tilavuuspaino $\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Leikkaus-kestävyyskulma $\phi$	Suljettu leikkauslujuus $s_u$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Moduuliluku $m$	Jännitys-eksponentti $\beta$	Poissonin vakio
Hk1	0...-2,1	16,7	40°	0	600	0,5	0,15
Hk1/PVP:n alla	-2,1...-2,4	6,8	40°	0	600	0,5	0,15
Sa1/PVP:n alla	-2,4...-2,7	9,1	0	41	20	-0,1	0,3
Si1/PVP:n alla	-2,7...-3,7	9,1	0	50	60	0,3	0,3
Sa2/PVP:n alla	-3,7...-4,6	9,1	0	40	20	-0,1	0,3
Hk2/PVP:n alla	-4,6...-6,3	8,1	38°	0	500	0,5	0,15
Si2/PVP:n alla	-6,3...-8	9,1	0	57	60	0,3	0,3
Hk3/PVP:n alla	-8..	6,7	33°	0	200	0,5	0,25

Taulukko 20. Alustalukulaskennan muita lähtötietoja kerroksellisessa maassa.

Maanpinnan taso [m]	0
Pohjavesipinnan taso [m]	-2,13
Paalun yläpään taso [m]	+0,6
Paalun alapään taso [m]	-13,1
Kerros-paksuus (elementin pituus) [m]	1,0
Paalun halkaisija $d$ [m]	0,324
Paalun redusoitu halkaisija $d_r$ [m]	0,685

Kitkamaakerroksissa (hiekkä) alustaluvut paalun pituuden funktiona on määritetty Terzaghin ja Poulosin menetelmillä yhtälöllä (14) sekä leikkauskestävyyskulman perusteella kuvasta 18. Eri menetelmillä saatujen alustalukukertoimien avulla on laskettu alustaluvut yhtälöllä (13). Koheesiomaakerroksissa (savi ja siltti) alustaluvut paalun pituuden funktiona lyhytaikaisessa kuormituksessa on määritetty suljetun leikkauslujuuden menetelmällä yhtälöllä (19). Alustaluvut on laskettu sekä luvun 4.3 mu-

kaan redusoimalla alustalukujen laskennassa paalun halkaisija sekä vertailun vuoksi myös redusoimattomilla arvoilla. Alustalukujen redusointia ei kuitenkaan ole tehty paaluriville 1 (kuva 30), sillä kyseisellä paalurivillä mitattu kuormitus oli huomattavasti suurempi kuin muilla paaluriveillä (ks. taulukko 21) johtuen kuvan 9 mukaisista leikkausvyöhykkeiden päällekkäisyyksistä. Alustaluvut  $k_s$  korkeustason  $z$  funktiona on esitetty kuvassa 54. Liitteessä 13 on esitetty laskennan välituloksia ja lasketut alustaluvut taulukkomuodossa.



Kuva 54. Alustaluvut kerroksellisessa maassa eri menetelmillä määritettyinä.

Kuvasta 54 nähdään, että redusoinnilla on merkittävä vaikutus alustalukujen arvoihin. Vaikutus on kääntäen verrannollinen redusoidun paalun halkaisijan ja redusoimattoman halkaisijan suhteeseen. Tässä kohteessa redusoidun paalun halkaisijan suhde todelliseen paalun halkaisijaan oli noin 2,11, eli redusoimattomat alustaluvut olivat 2,11-kertaisia redusoituihin alustalukuihin nähden.

#### 8.4.2 Laskennalliset rajasiirtymät ja jousivakiot

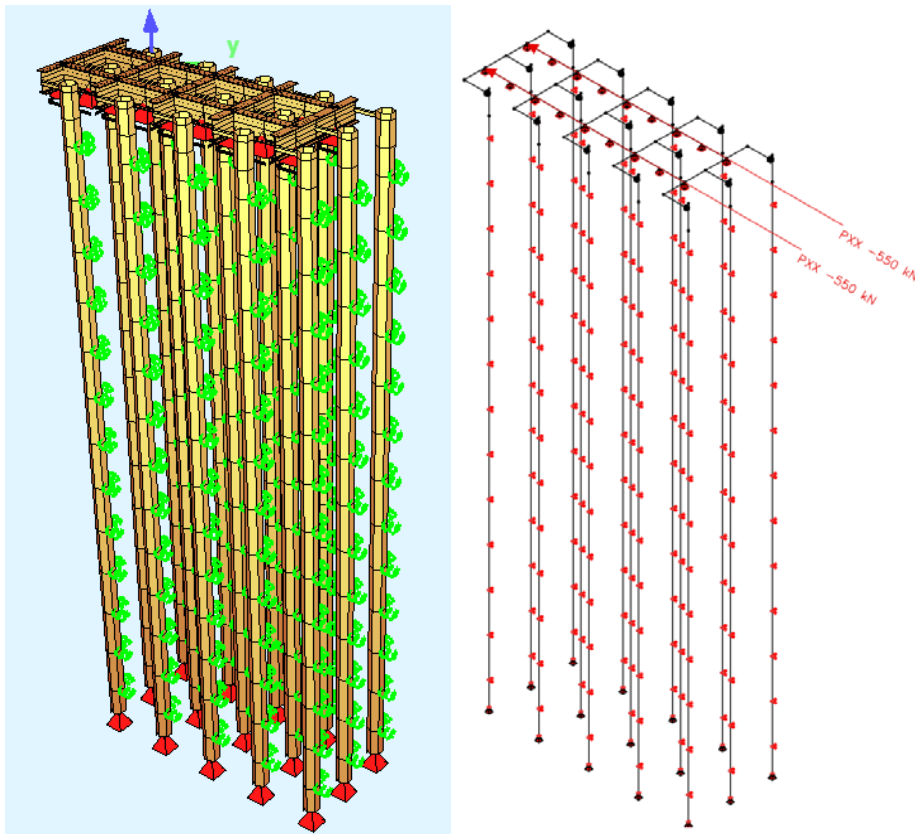
Paaluun kohdistuvan maanpaineen ääriarvot on laskettu kitkamaaosuudella yhtälön (6) kertoimilla 3 ja 4,4. Yhtälön (6) passiivipaine kerroin on määritetty yhtälöllä (4) perustuen Liikenneviraston ohjeessa (2012) esitettyyn esimerkkilaskuun. Koheesiomaosuudella maanpaineen ääriarvo on laskettu yhtälön (7) kertoimella 9. Kuvien 23 ja 24a mukaiset rajasiirtymät  $y_m$ ,  $y_m/4$  ja  $y_m/6$  on määritetty laskettujen maanpaineen ääriarvojen  $p_m$  ja eri laskentamenetelmillä saatujen alustalukujen  $k_s$  avulla. Jousivakiot on määritetty yhtälöllä (25). Liitteessä 13 on esitetty kaikki lasketut maanpaineen ääriarvot, rajasiirtymät ja jousivakiot.

Redusointi ei vaikuta maanpaineen ääriarvoihin suomalaisten suunnitteluohjeiden mukaan. Rajasiirtymissä alustalukujen redusoinnin vaikutus on suoraan verrannollinen redusoidun paalun halkaisijan ja redusoimattoman halkaisijan suhteeseen. Näin ollen redusoiduilla alustaluvuilla määritetyt rajasiirtymät ovat 2,11-kertaisia redusoimattomilla alustaluvuilla saatuihin rajasiirtymiin nähden. Jousivakioiden osalla redusoinnin vaikutus on samankaltainen kuin alustalukujen osalta eli redusoimattomil-

la alustaluvuilla lasketut jousivakiot ovat 2,11-kertaisia redusoiduilla alustaluvuilla määritettyihin jousivakioihin nähden.

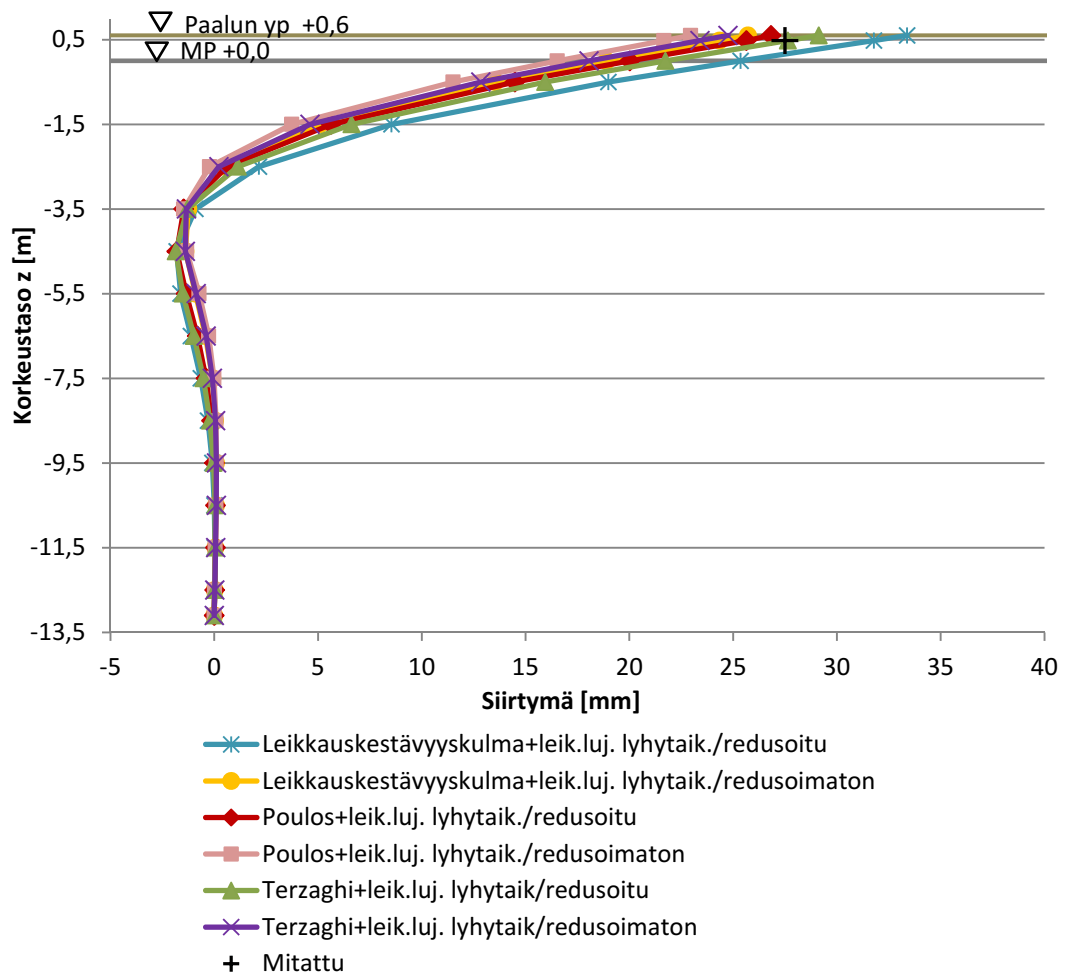
### 8.4.3 Siirtymien vertailu

Siirtymät on laskettu Sofistik-ohjelmistolla 3D-mallinnuksena. Paalujen dimensiot (ulkohalkaisija, seinämän paksuus ja pituus) ja ominaisuudet (hitausmomentti ja taiputusjäykkyys) syötettiin ohjelmaan vastaamaan todellisia taulukon 13 mukaisia arvoja. Paalujen alapäiden kiinnittyminen maahan mallinnettiin nivelinä ja yläpää nivellillä kiinni systeemiin. Elementtiväliksi valittiin 1,0 m. Kuvassa 55 on esitetty ohjelmaan rakennettu malli paaluryhmästä.

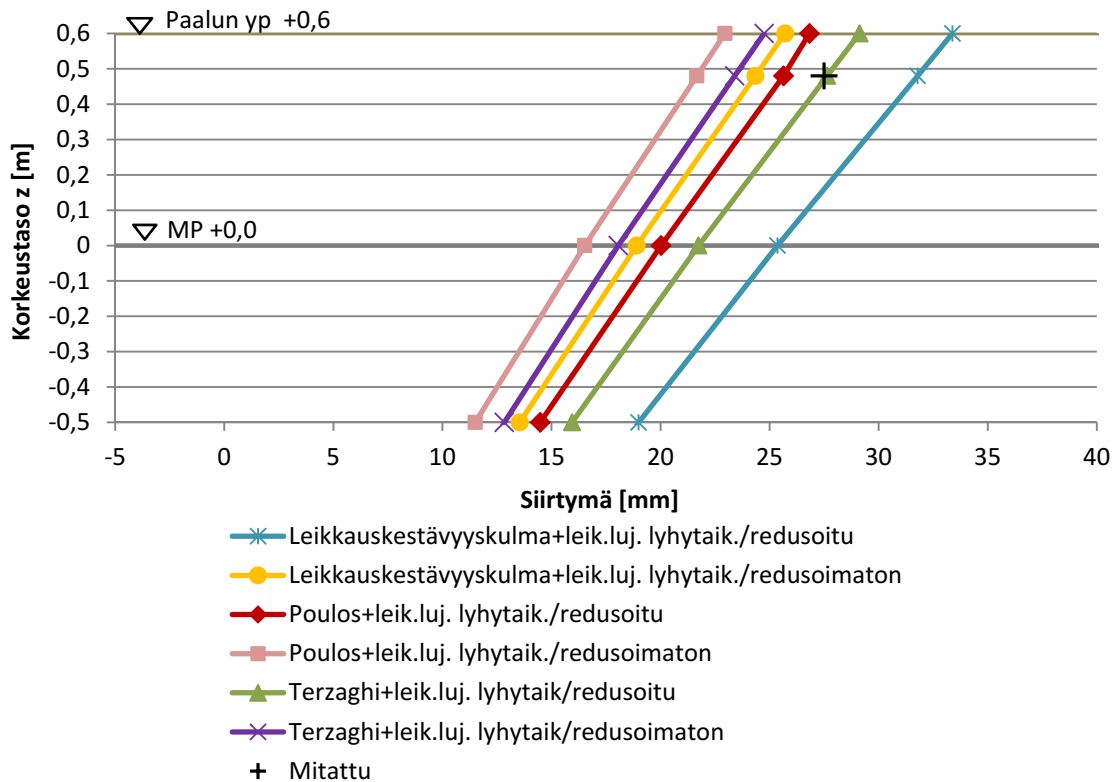


Kuva 55. Sofistik-ohjelmaan rakennettu paaluryhmän ja maaperän FEM-jousimalli.

Laskentaohjelmaan annettiin suoraan epälineaaristen jousien tiedot, joten ainoastaan yksi laskentakierros tarvittiin. Paalurivien keskimäinen paalu siirtyi laskennallisesti paalun yläpäässä paalurivistä riippuen 1,5...2,8 millimetriä enemmän kuin reunalla olevat paalut. Ero eri paalurivien samassa kohdassa olevien paalujen (reunapaalut ja keskimäinen paalu) kesken oli enimmillään 1,1 mm. Eniten siirtyi kuormitusta vastaan ensimmäisen rivin paalut ja vähiten neljännen rivin paalut. Myöskään mitatuissa siirtymissä ei havaittu merkittäviä eroja eri paalujen ja paalurivien kesken. Näin ollen voidaan todeta paalujen yläpäähän rakenteen olleen jäykkä eikä kiertymistä tapahtunut paalua kuormitettaessa. Erot sekä laskennallisissa että mitatuissa siirtymissä eri paaluilla olivat niin pieniä, että tarkastelu on tehty paaluryhmän paalujen keskimääräisille siirtymille. Kuvassa 56 on esitetty keskimääräisen paalun laskennalliset siirtymät sekä redusoiduilla että redusoimattomilla alustaluvuilla määritettyinä ja mitattu siirtymä. Kuvassa 57 on tarkennettu kuvan 56 yläpäähän siirtymiä.



Kuva 56. Siirtymät redusoiduilla ja redusoidottomilla alustaluvuilla laskettuina kokonaiskuormituksella 1100 kN.



Kuva 57. Siirtymät redusoiduilla ja redusioimattomilla alustaluvuilla laskettuina korkeustasolla +0,6...-0,5 m maanpinnasta kokonaiskuormituksella 1100 kN.

Mitatut siirtymät olivat jokaisella paalulla noin 27 mm kuormitustasossa +0,48 m maanpinnasta. Redusoiduilla alustaluvuilla saatiin kuormitustasossa noin 3,5...7,6 mm suurempia siirtymiä kuin samalla laskentamenetelmällä redusioimattomilla alustaluvuilla. Terzaghin mukaisella menetelmällä redusoiduilla alustaluvuilla laskennallinen siirtymä vastasi mitattua siirtymää. Redusoiduilla alustaluvuilla laskettuna Poulosin mukaisella menetelmällä siirtymä oli noin 1 mm pienempi ja leikkauskestävyyskulman menetelmällä noin 5 mm suurempi kuin mitattu siirtymä. Redusioimattomilla alustaluvuilla laskettuna paaluryhmän siirtymä Terzaghin menetelmällä oli noin 4 mm, Poulosin menetelmällä noin 5 mm ja leikkauskestävyyskulman menetelmällä noin 3 mm pienempi kuin mitattu siirtymä.

Redusoiduilla alustaluvuilla Terzaghin ja Poulosin mukaisilla menetelmillä saatiin laskennalliset siirtymät hyvin lähelle mitattua siirtymää. Redusoinnilla oli jonkin verran vaikutusta siirtymien arvoihin. Leikkauskestävyyskulman mukaisessa menetelmässä ero redusoiduilla ja redusioimattomilla alustaluvuilla laskettujen siirtymien välillä oli suurempi kuin Terzaghin ja Poulosin mukaisissa menetelmissä. Redusoiduilla alustaluvuilla laskettaessa siirtymien laskenta on varmemman puolella. Suunnittelun kannalta Terzaghin ja Poulosin menetelmät redusoiduilla arvoilla antoivat parhaimpia laskentatuloksia.



#### 8.4.4 Kuormitusten vertailu

Eri paalurivien kesken kuormituskokeessa havaittiin selkeitä eroja kuormituksen jakautumisessa. Taulukossa 21 on esitetty mitatut ja Sofistik -ohjelmistolla redusoiduilla ja redusoidottomilla alustaluvuilla määritetyt kuormitukset kunkin paalurivin paalulle keskimäärin.

Taulukko 21. Eri paalurivien paalujen keskimääräinen mitattu ja laskennallinen kuormitus.

Paalurivi	Mitattu [kN]	Poulos+leik.luj. lyhyt-aik./redusoitu [kN]	Poulos+leik.luj. lyhyt-aik./redusoimaton [kN]	Terzaghi+leik.luj. lyhyt-aik./redusoitu [kN]	Terzaghi+leik.luj. lyhyt-aik./redusoimaton [kN]	Leikkauskestävyyskulma+leik.luj.lyhytaik./redusoitu	Leikkauskestävyyskulma+leik.luj.lyhytaik./redusoimaton
1	105	81	74	81	74	85	74
2	75	72	74	72	74	71	74
3	65	72	73	72	73	70	73
4	57	71	73	71	73	70	73
5	63	71	73	71	73	70	73

Taulukon 21 mitatuista arvoista nähdään, että kuormitusta vastaan ensimmäinen paalurivi ottaa vastaan suurimman osan kuormituksesta. Toiseksi suurimman kuorman otti vastaan toinen paalurivi ja kolmanneksi suurimman kolmas paalurivi. Rivi 4 otti vastaan pienimmän kuorman, ja rivi 5 toiseksi pienimmän. Rivien 3–5 välillä ei ollut mitatuissa kuormissa suuria eroja. Erot johtuvat todennäköisesti ainakin osittain hiekan tiiveyseroista eri paaluilla. Myös maaperän profiili saattaa hieman vaihdella eri paaluilla, vaikka paalujen väliset etäisyydet eivät olleet suuria.

Redusoidottomilla alustaluvuilla ei saatu selkeitä eroja kuormituksen jakautumisessa eri paalurivien kesken millään alustalukujen laskentamenetelmällä. Sen sijaan redusoiduilla paalurivien 2–5 alustaluvut saatiin kuormitusta jaettua enemmän ensimmäisen rivin paaluille. Kuitenkin paalurivien 2–5 kuormitukset jäivät likimain samansuuruisiksi. Terzaghin ja Poulosin menetelmät antoivat likimain samoja kuormituksen arvoja redusoiduilla alustaluvuilla, kun taas leikkauskestävyyskulman mukaisella menetelmällä saatiin redusoiduilla alustaluvuilla muita menetelmiä hieman suurempia arvoja ensimmäisessä paalurivissä ja vastaavasti pienempiä kuormituksen arvoja paaluriveillä 2–5.

Yleinen kansainvälinen tapa huomioida ryhmävaikutus sivusiirtymien laskennassa on vähentää paalun sivuvastusta erikseen määritettävällä kertoimella (*reduction factor*), ja korjata sivupaine-siirtymä-käyrä vastaamaan pienennettyä sivuvastusta. Esimerkiksi Larkela (2008) ja Walsh (2005) saivat kyseisellä menetelmällä mitatut ja laskennalliset kuormitukset vastaamaan hyvin toisiaan. Kuitenkin suomalaisissa suunnitteluohjeissa kyseistä menetelmää ei ole esitetty eikä menetelmä ole Suomessa yleisesti käytössä.

## 9 Laskentatulosten yhteenveto

### 9.1 Alustalukujen herkkyytarkastelut

Alustalukujen herkkyytarkastelujen perusteella Terzaghin ja Poulosin laskentamenetelmät ovat suunnittelun kannalta riittävän vakaita maaparametrien epätarkkuuksille, kun maaparametrit on arvioitu kairausvastuksen ja rakeisuuden perusteella. Kuitenkin moduuliluvun arvioinnissa täytyy olla erityisen tarkkana, sillä moduuliluvun vaihteluväli samalle maalajille ja tiivydelle on melko laaja. Kitkamaan leikkauskestävyysskulmaan perustuva alustalukujen laskentamenetelmä on herkkä leikkauskestävyysskulman muutoksille. Jo muutaman asteen virhearvio leikkauskestävyysskulman arvossa muuttaa merkittävästi alustaluvun arvoa.

Koheesiomaan lyhyt- ja pitkäaikaisissa tarkasteluissa käytetään usein suunnitteluohjeiden mukaista suljettuun leikkauslujuuteen perustuvaa alustalukujen tarkastelua. Menetelmä soveltuu herkkyytarkastelujen perusteella riittävän hyvin alustalukujen määrittämiseen, kun suljettu leikkauslujuus on määritetty esimerkiksi siipikairausten perusteella.

### 9.2 Laskennalliset ja mitatut siirtymät

Hienossa hiekassa Poulosin ja Terzaghin mukaisilla alustaluvun laskentamenetelmillä saatiin siirtymät mallinnettua mitoituksen kannalta riittävän tarkasti useimmissa laskentatapauksissa. Leikkauskestävyysskulmaan perustuvassa menetelmässä saatiin kairausvastuksen perusteella arvioidulla leikkauskestävyysskulmalla lähes kaksinkertaisia siirtymiä mitattuihin siirtymiin nähden, kun taas kairausvastuksen perusteella arvioidulla leikkauskestävyysskulmalla menetelmä antoi huomattavasti mitattua siirtymää pienempiä siirtymän arvoja. Poulosin ja Terzaghin menetelmissä kolmiaksiaalikokein määritetyllä leikkauskestävyysskulmalla laskennalliset siirtymät olivat hieman kairausvastuksen perusteella arvioidulla leikkauskestävyysskulmalla laskettuja siirtymiä pienempiä.

Siltissä laskennalliset siirtymät olivat kaikilla laskentamenetelmillä merkittävästi mitattuja arvoja suurempia sekä kitka- että koheesiomaan oletuksissa. Siirtymien laskenta oli siis huomattavasti varman puolella kaikilla laskentamenetelmillä. Olettaen maa koheesiomaaksi ja kuormitus lyhytaikaiseksi saatiin leikkauslujuuden perusteella määritettyä laskennalliset siirtymät lähimmäksi mitattuja siirtymän arvoja. Suurimpia siirtymän arvoja antoi kitkamaan oletuksen Terzaghin mukainen menetelmä, jossa havaittiin maanpinnan tasolla jopa kahdeksankertainen laskennallinen siirtymä mitattuun siirtymään nähden. Tarkasteluissa mukana olleella Vesicin menetelmällä saadut siirtymän arvot asettuivat muilla menetelmillä saatujen arvojen välille. Tarkastelujen perusteella leikkauslujuuteen pohjautuvalla menetelmällä saadaan parhaiten laskennalliset siirtymät vastaamaan mitattua siirtymää siltissä ainakin lyhytaikaisessa kuormituksessa. Siltin osalta uusilla lyhytaikaisilla koekuormituksilla varmistettaisiin käyttäytykö maa samalla tavalla kuin työssä tarkastellussa koekuormituskohteessa.

Kerroksellisessa maassa paaluryhmän tarkasteluissa koheesiomaosuudella alustaluvut laskettiin leikkauslujuuden perusteella lyhytaikaisessa kuormituksessa ja kitkamaosuuksilla alustaluvun laskentamenetelmää vaihdeltiin. Redusoimalla alustalukuja saatiin Terzaghin ja Poulosin menetelmillä laskennalliset siirtymät vastaamaan erittäin hyvin mitattuja siirtymiä. Leikkauskestävyyskulman mukainen menetelmä redusoiduilla alustaluvuilla antoi muilla menetelmillä laskettuja siirtymiä ja mitattua siirtymää suurempia siirtymän arvoja. Redusoinnilla oli kohtalainen vaikutus siirtymien suuruuteen verrattaessa siirtymiä redusoimattomilla alustaluvuilla laskettuihin siirtymiin. Redusointi suoritettiin kaikille muille paaluriveille paitsi kuormitusta vastaan ensimmäiselle riville. Paaluryhmän tarkastelujen perusteella voidaan todeta sama kuin yksittäisten paalujenkin osalta, eli Poulosin ja Terzaghin menetelmällä saatiin alustaluvut laskettua luotettavimmin. Leikkauslujuuden mukaan lasketut alustaluvut koheesiomaosuuksille toimivat laskennassa hyvin. Redusoimalla alustaluvut siirtymien laskenta on varmemman puolella.

Virheitä laskennallisiin siirtymiin on voinut aiheutua esimerkiksi laskennassa käytetyistä sivupaine-siirtymä-käyristä. Työssä tarkasteltiin ainoastaan suomalaisissa suunnitteluohjeissa esitettyjä sivupaine-siirtymä-käyriä. Kirjallisuudessa ja esimerkiksi norjalaisissa ja ruotsalaisissa suunnitteluohjeissa on esitetty monimutkaisempia käyrien yhtälöitä. Laskentamenetelmien sisältämät muut yksinkertaistukset sekä mahdolliset virheelliset otaksumat ovat myös virhelähteitä. Laskentamallit eivät esimerkiksi huomioi maaparametrien muuttumista jännityksen tai muodonmuutoksen funktiona. Myös maan anisotropisuus aiheuttaa virhettä, sillä maan vaaka- ja pystysuuntaiset ominaisuudet poikkeavat toisistaan. Mitattujen siirtymien osalta mahdollisesti mittauksissa tapahtuneista virheistä ja mittauslaitteiden tarkkuudesta ei ole tietoa.

## 10 Johtopäätökset

Paalujen sivusiirtymiä määritettäessä maaparametrien arvoilla on tärkeä rooli. Laboratoriossa tehdyillä kokeilla saadaan maaparametrien tarkkuutta lisättyä. Maalajin kairausvastuksen perusteella arvioidut maaparametrien arvot arvioidaan usein vastaamaan todellista löyhempää maaperää, jolloin siirtymien laskenta on varmemman puolella. Toisaalta arvioimalla maan jäykkyys todellisuutta pienemmäksi esimerkiksi yksiaukkoisella sillalla saadaan laskennalliseksi paalun taivutusmomentiksi todellisuutta pienempi arvo, mikä vie paalun voimasuureiden laskentaa epävarman puolelle. Myös maan anisotrooppisuus tulisi huomioida maaparametrien määrittämisessä, sillä maan vaak- ja pystysuuntaiset ominaisuudet poikkeavat yleensä toisistaan.

Tämän tutkimuksen perusteella Terzaghin ja Poulosin alustalukujen laskentamenetelmät soveltuvat hyvin kitkamaille ja leikkauslujuuteen perustuva menetelmä soveltuu hyvin koheesiomaalle. Leikkauskestävyyskulman mukainen menetelmä antoi puolestaan kitkamaassa usein joko liian pieniä tai liian suuria siirtymän arvoja mitattuihin siirtymiin nähden. Koheesiomaassa suljetun leikkauslujuuden perusteella lasketut alustaluvut antoivat laskennassa mitattuja siirtymiä tukevia tuloksia lyhytaikaisessa kuormituksessa. Koekuormittuja kohteita, joissa olisi tehty pitkäaikaisia kuormituksia, ei työn yhteydessä löydetty. Myöskään Pohjoismaissa savessa tehtyjä koekuormituksia ei löydetty.

Tutkimuksen perusteella redusoimalla alustalukuja paaluryhmän tarkasteluissa Terzaghin ja Poulosin menetelmät kitkamaan osalta ja leikkauslujuuden menetelmä koheesiomaan osalta soveltuvat hyvin paaluryhmän tarkasteluihin. Työssä mukana olleen koekuormitetun paaluryhmän mittauksista havaittiin, että kuormitusta vastaan ensimmäinen paalurivi ottaa vastaan suuremman kuormituksen kuin ensimmäisen paalurivin jälkeiset paalurivit. Paaluryhmän osalta suomalaisissa suunnitteluohjeissa esitetty alustalukujen redusointimenetelmä ei huomioi kuormituksen epätasaista jakautumista eri paalurivien kesken. Laskennassa kuormituksen epätasainen jakautuminen kuitenkin huomioitiin jättämällä ensimmäisen paalurivin alustaluvut redusoimatta.

Paalun asennustapa vaikuttaa ympäröivään maaperään ja maaparametreihin. Lyömällä asennetulla paalulla sivukapasiteetti on suurempi kuin poraamalla tai vesihuuhtelulla asennetulla paalulla. Tämä aiheutuu siitä, että paalun lyönti aiheuttaa maaperän tiivistymistä ja näin ollen myös leikkauskestävyyskulman kasvua. Vesihuuhtelulla ja porauksella puolestaan on päinvastainen vaikutus. Tässä tutkimuksessa selvisi, ettei paalujen asennustavan vaikutusta vaakasiirtymien laskentaan ole tutkittu.

Suomalaisista suunnitteluohjeista löydettiin työn yhteydessä useita ristiriitaisuuksia. Eri julkaisujen välisiä ristiriitaisuuksia löydettiin liittyen alustalukujen redusointimenetelmiin luiskassa, koheesiomaan sivuvastuksen yhtälön kertoimiin lyhyt- ja pitkäaikaisissa kuormituksissa, paaluryhmän sivuvastuksen määrittämiseen koheesiomaassa, alustalukuyhtälöiden kertoimiin, alustalukuyhtälöiden käyttöön eri geoteknisissä luokissa ja maan kantokestävyyden huomioimiseen alustalukujen laskennassa.

Tutkimuksessa selvisi, että myös Ruotsissa ja Norjassa sivukuormitettuja paaluja on tutkittu varsin vähän. Ruotsissa maan sivuvastus määritetään samalla tavalla kuin Suomessa, kuitenkin käyttäen suomalaisissa ohjeissa esitettyä pienintä kerrointa kitkamaan osalta. Norjassa sivuvastuksen yhtälöt muistuttavat osittain suomalaisten suunnitteluohjeiden mukaisia yhtälöitä, mutta norjalaisen ohjeen mukaan sivuvastus on maan pintaosassa pienempi ja syvemmällä suurempi kuin suomalaisissa ohjeissa. Ruotsissa ja Norjassa kitkamaan osalta alustalukuja on annettu taulukkoarvoina, eikä Terzaghin ja Poulosin mukaisia yhtälöitä ole esitetty. Ruotsalaisessa ohjeessa esitetyt alustalukukertoimien ja alustalukujen taulukkoarvot ovat ristiriitaisia keskenään. Koheesiomaassa Ruotsissa ja Norjassa alustaluvut voidaan laskea leikkauslujuuteen perustuen kuten Suomessakin. Kuitenkin koheesiomaassa käytetään pitkäaikaisessa kuormituksessa suomalaisissa ohjeissa esitetyn vaihteluvälin suurinta kerrointa ja lyhytaikaisessa kuormituksessa suurempaa kerrointa kuin suomalaisissa ohjeissa on esitetty. Suomalaisten suunnitteluohjeiden mukaisia sivupaine-siirtymä-käyriä ei ruotsalaisissa ja norjalaisissa ohjeissa ole esitetty. Epälineaarisen käyttäytymisen huomioiminen norjalaisen suunnitteluohjeen mukaan vaikuttaa suunnittelijan kannalta työläältä, ja ruotsalaisen ohjeen mukaan puolestaan liian tulkinnanvaraiselta.

Työn yhteydessä löydettiin useita jatkotutkimustarpeita. Jatkotutkimuksena voidaan tehdä seuraavia tutkimuksia:

- lyhyt- ja pitkäaikaisia koekuormituksia savessa ja siltissä,
- muiden kuin suomalaisissa suunnitteluohjeissa esitettyjen sivupaine-siirtymä-käyrien selvittäminen ja soveltaminen nykyiseen mitoituskäyttöön,
- paalun asennustavan vaikutuksen selvittäminen alustalukujen suuruuteen,
- maan anisotrooppisuuden huomioiminen maaparametrien arvioinnissa,
- kansainvälisesti yleisesti käytössä olevan paaluun kohdistuvan sivupaineen pienennyskertoimiin ("*reduction factor*") perustuvan menetelmän soveltaminen suomalaisiin suunnitteluohjeisiin ja FEM-jousi-malliin, ja
- alustalukujen vaihtelun herkkyytstarkastelujen tarpeellisuuden selvittäminen siltarakenteiden rasitustarkasteluissa.

Lisäksi suunnitteluohjeita tulee yhdenmukaistaa ja selkeyttää seuraavien asioiden kohdalla:

- maan kantokestävyyden huomioiminen sivukuormitettujen paalujen analysoinnissa,
- alustalukujen redusointimenetelmä luiskassa,
- koheesiomaan sivuvastuksen yhtälön kertoimet lyhyt- ja pitkäaikaisissa kuormituksissa,
- alustalukuyhtälöiden kertoimet kitkamaassa,
- alustalukumenetelmien käyttö eri geoteknisissä luokissa ja
- paaluryhmän sivuvastuksen määrittäminen.

## Lähdeluettelo

Bezgin Ö (2010) An insight into the theoretical background of soil structure interaction analysis of deep foundations. Istanbul: University of Istanbul.

Bowles J (1968) Foundation analysis and design. Chapter 4 Pile Foundations. New York: McGraw-Hill. p. 503-507.

Broms B (1964) Lateral resistance of piles in cohesive soil. Journal of soil mechanics and foundations division 2: p. 27-63.

Chin T.Y, Gue S.S & Chung F.C (2009) Interpretation of Subgrade Reaction from Lateral Load Tests on Spun Piles in Soft Ground. Malaysia, G&P Geotechnics Sdn Bhd. 21 p. Saatavissa: [http://www.gnpgeo.com.my/download/publication/2009\\_11.pdf](http://www.gnpgeo.com.my/download/publication/2009_11.pdf) [4.3.2014].

Das B (1990) Principles of Foundation Engineering. USA: PWS-KENT Publishing Company.

Das B (2010) Geotechnical engineering handbook. USA: J. Ross Publishing Incorporation.

Davis R.O & Selvadurai (2002) Plasticity and Geomechanics. Englanti: Cambridge University Press.

Den Norske Pelekomité (2005) Peleveiledningen 2005. Norja: Norsk Geoteknisk Forening.

Heikkilä J (1988) Putkipaalumerkkien geotekninen mitoitus. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Helenelund K.V (1974) Pohjarakennus. Espoo: Otakustantamo.

Jokiniemi H & Uotinen V-M (2011) Ruukin diaesitys Tiehallinnon ja Ratahallintokeskuksen siltojen perustamistavoista 13.1.2011 [Sähköpostiviestin liite V-M Uotiselta] Lähetetty 30.4.2014.

Juirnarongrit T & Ashford S (2005) Effect of pile diameter on the modulus of subgrade reaction. Structural systems research projects. USA: University of California.

Kahila L (2010) Pystysuuntaisille paaluille perustetun sillan stabiiliustarkastelut. Diplomityö. Espoo: Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu.

Kerokoski O (2006) Sillan ja maan yhteistoiminta. Liikuntasaumattomien siltojen laskennallinen tarkastelu. Tutkimusraportti 70. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Kopra A (2013) Täryttämällä asennettujen teräsputkipaalujen kantavuuden määrittäminen. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Koskinen M (1990) Teräsputkipaalun sivukapasiteetti. Licensiaattityö. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Koskinen M (1997) Soil-Structure Interaction of Jointless Bridges on Piles. Väitöskirja. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Koskinen M & Rantala J (2003) PYRAMIT – Pylväsmäisten ylärakenteiden paaluperustusjärjestelmien mitoitusmenetelmät. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

Laaksonen A (2005) Liikuntasaumattoman sillan ja maan yhteistoiminta. Tutkimusraportti 62. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Langer J, Mosley E & Thompson C (1984) Laterally Loaded Deep Foundations: Analysis and Performance. Baltimore: ASTM International.

Larkela A (2008) Modeling of a Pile Group Under Static Lateral Loading. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

Lehtonen T (2013) FEM-laskentaohjelmien soveltuvuus betonirakenteiden mitoitukseen. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Li R & Gong J (2008) Analysis of Laterally Loaded Pile in Layered Soil. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering 13: 1-16. [Verkkajulkaisu] [www.ejge.com/2008/Ppro886/Ppro886.pdf](http://www.ejge.com/2008/Ppro886/Ppro886.pdf) [18.4.2014].

Liikennevirasto (2010) Sillat 1.1.2010. Liikenneviraston tiesillaston rakenne, palvelutaso ja kunto. Liikenneviraston tilastoja 03/2010. Helsinki: Liikennevirasto.

Liikennevirasto (2012) Sillan geotekninen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 11/2012. Helsinki: Liikennevirasto.

Liikennevirasto (2013) Eurokoodien soveltamisohje 35/2013. Geotekninen suunnittelu – NCCI7 (7.11.2013). Helsinki: Liikennevirasto.

LPO-87 (1987) Lyöntipaalutusohjeet. Helsinki: Rakentajain kustannus.

Lusas (2014) Lusas Bridge -ohjelmiston kotisivut. [http://www.lusas.com/products/bridge\\_spec.html](http://www.lusas.com/products/bridge_spec.html) [7.6.2014].

Länsivaara T (2000) Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi. Tielaitoksen selvityksiä 44/2000. Helsinki: Tielaitos.

Manoliu I (1976) Lateral bearing capacity of precast driven piles. Proceedings of the 6<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wien, March 22-24, 1976. Wien: Organizing Committee for the 6<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. p. 515-518

Mardfekri M, Gardoni P & Roesset J (2013) Modeling laterally loaded single piles accounting for nonlinear soil-pile interactions. Journal of engineering vol. 2013. Artikkelin tunnus 243179. 7 s.

Meyer B & Reese L (1979) Analysis of single piles under lateral loading. Research Study 3-5-78-244: Development of Procedures for the Design of Drilled Foundations for Support of Overhead Signs. Research report 244-1. Texas: State Department of Highways and Public Transportation.

Nirhamo J (1995) Teräsputkipaaluilla perustettu meluseinä. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Nylund S (1971) Vaakavoiman ja taivutusmomentin rasittaman paalun laskeminen. Rakenteiden mekaniikka 4: 21-33. Helsinki: Rakenteiden mekaniikan seura.

Paalupiste Oy (2014) Ruuvipaalutus – täyttä terästä. Ruuvipaaluesite. <http://malander.fi/assets/files/esitteet/Ruuvipaaluesite.pdf> [3.3.2014].

Padmavathi V, Saibaba Reddy E & Madhav M (2008) Behaviour of laterally loaded rigid piles in cohesive soils based on kinematic approach. Lowland Technology International 10: 27-41.

Phanikanth V.S, Choudhury D & Reddy G.R (2010) Behaviour of Fixed Head Single Pile in Cohesionless Soil under Lateral Loads. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering 15: 1243-1262. [Verkkajulkaisu] [www.ejge.com/2010/Ppr10.097/Ppr10.097.pdf](http://www.ejge.com/2010/Ppr10.097/Ppr10.097.pdf) [5.4.2014].

Prakash S & Sharma H (1990) Pile Foundations In Engineering Practice. New York: John Wiley.

Rantamäki M, Jääskeläinen R & Tammirinne M (2001) Geotekniikka. Helsinki: Haka-paino Oy.

Rantamäki M & Tammirinne M (2002) Pohjarakennus. Helsinki: Otatieto.

Ratahallintokeskus (2004) Rautateiden meluesteet. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B11. Helsinki: Ratahallintokeskus.

Ratahallintokeskus (2009) Vuosikertomus 2009. Strategioita ja selvityksiä 2/2009. [Verkkajulkaisu] [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk\\_2-2009\\_tavaraliikenteen\\_ratapihojen.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_2-2009_tavaraliikenteen_ratapihojen.pdf) [3.3.2014].



Reese L.C, Isenhower W.M & Wang S.T (2006) Shallow and deep foundations. USA: John Wiley & Sons. p. 441–536.

RIL 121-2004 (2004) Pohjarakennusohjeet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 157-2 (1990) Geomekaniikka II. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 166-1986 (1986) Pohjarakenteet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 181-1989 (1989) Rakennuskaivanto-ohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 207-2009 (2009) Geotekninen suunnittelu. Eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 212-2001 (2001) Suurpaalutusohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 223-2005 (2005) Lyöntipaalutusohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 254-2011 (2011) Paalutusohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 263-2014 (2014) Kaivanto-ohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Ruigrok J (2010) Laterally loaded piles. Models and measurements. Master's thesis. Hollanti, Delft: Delft university of technology.

Ruotsala M (2011) Ratojen tukiseinien mitoittaminen Eurokoodeilla. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 26/2011. Helsinki: Liikennevirasto.

Slunga E, Ollila M & Juhola M (1974) Perustaminen. Teoksessa: Hartikainen J (toim) Pohjarakennus RIL 95. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. s. 187-328.

Snyder J (2004) Full-Scale Lateral Load Tests of a 3x5 Pile Group in Soft Clays and Silts. Master's thesis. USA, Brigham: Brigham Young University.

Sofistik (2014) Sofistik -ohjelmiston kotisivut.  
<http://www.sofistik.com/en/solutions/structural-fea/bridgedesign/> [7.5.2014].

SPO-78 (1978) Suurpaaluohjeet. Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys ry.

Suutarinen I & Slunga E (1981) Lyhyiden lyöntipaalojen käyttö. VTT, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 43. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Svahn P.O & Alen C (2005) Transversalbelastade pålar –statiskt verkningssätt och dimensioneringsanvisningar. Pålkommisionen rapport 101. Ruotsi, Linköping: Roland Offset AB.

Tammirinne M (1975) Rakennusten perustaminen maan varaan. Painuman laskeminen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Terzaghi K (1955) Evaluation of coefficients of subgrade reaction. Geotechnique 5: 41-50.

Tiainen J (2014) Suunnittelupäällikkö, siltasuunnittelija, Ramboll Finland Oy. Oulu. Haastattelut 5.6.2014 ja 25.6.2014.

Tiehallinto (2001a) Sivukuormitetut pilariperustukset. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki: Tiehallinto.

Tiehallinto (2001b) Porapaalutusohje. Suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen ohjaus. Helsinki: Tiehallinto.

Tiehallinto (2008) Sillansuunnittelun täydentävät ohjeet 2008. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki: Tiehallinto.

Tiehallinto (2014) Siltarekisteri. Siltojen ikäjakauma päärakennusmateriaaleittain.

Tielaitos (1999a) Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa. TIEL 2172068-99. Helsinki: Tielaitos.

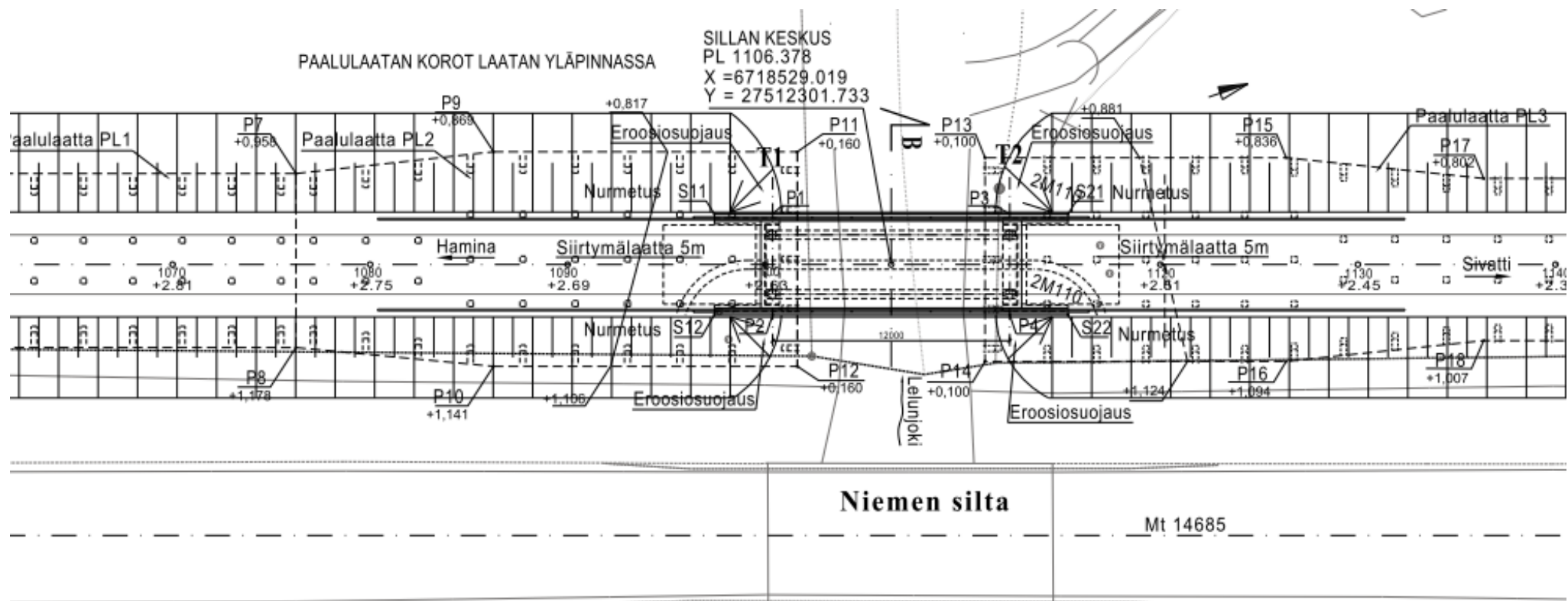
Tielaitos (1999b) Teräspalkkipaalut. TIEL 2173448. Helsinki: Tielaitos.

Trafikverket (2011) TRVR Bro 11. Trafikverkets tekniska råd Bro. TRV publ nr 2011:086. Ruotsi: Trafikverket.

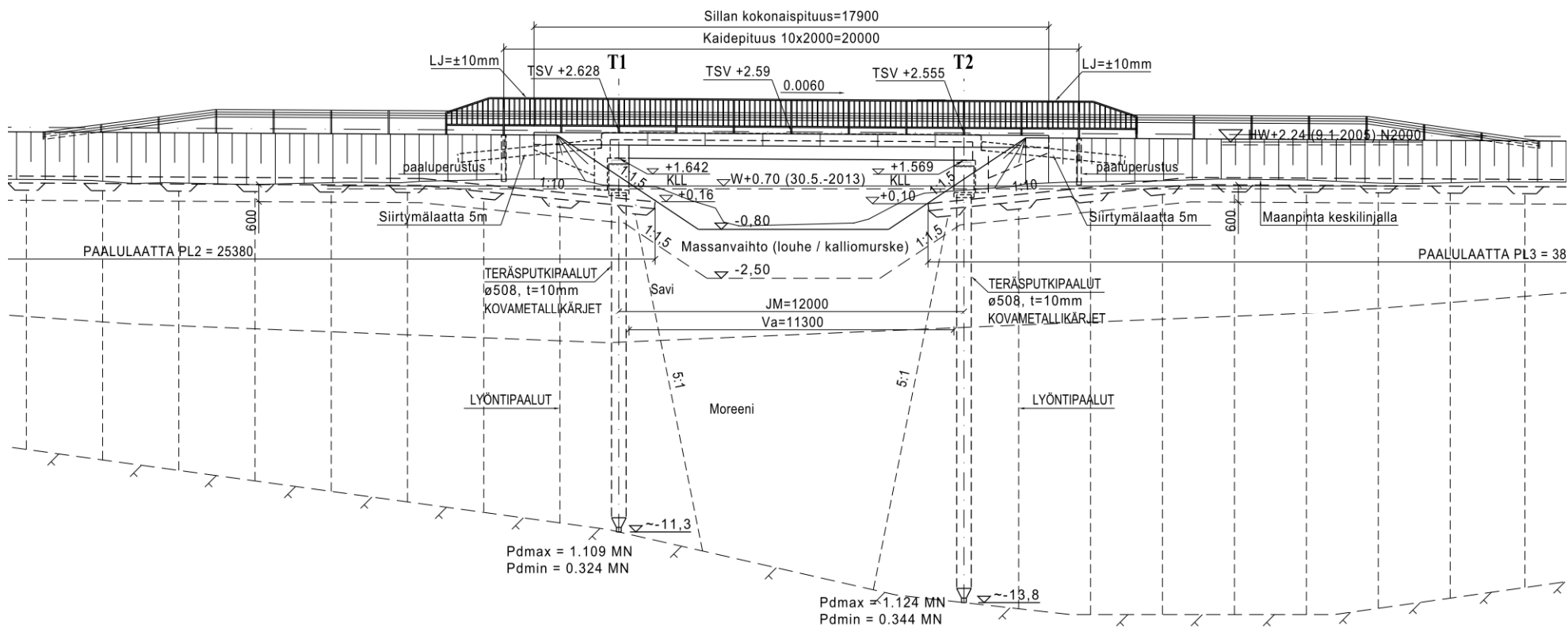
Uotinen V-M (2014) Geoasiantuntija. Liikennevirasto, Helsinki. [Sähköpostikeskustelut 30.4.2014, 3.6.2014 ja 15.6.2014]

Walsh M (2005) Full-Scale Lateral Load Test of a 3x5 Pile Group in Sand. Master's thesis. USA, Brigham: Brigham Young University.

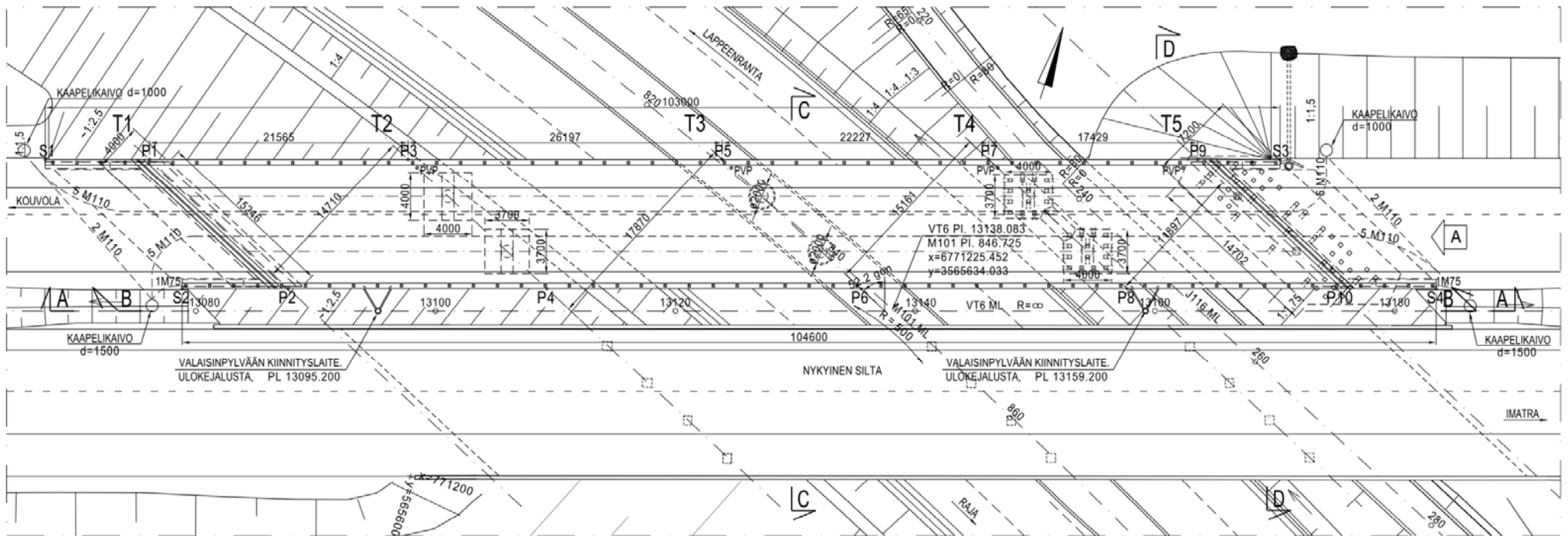
# Yleisimpiä paaluperusteisia siltarakennetyyppejä



Kuva 1. Paalupilariperusteinen yksiaukkoinen vesistösilta: tasokuva.

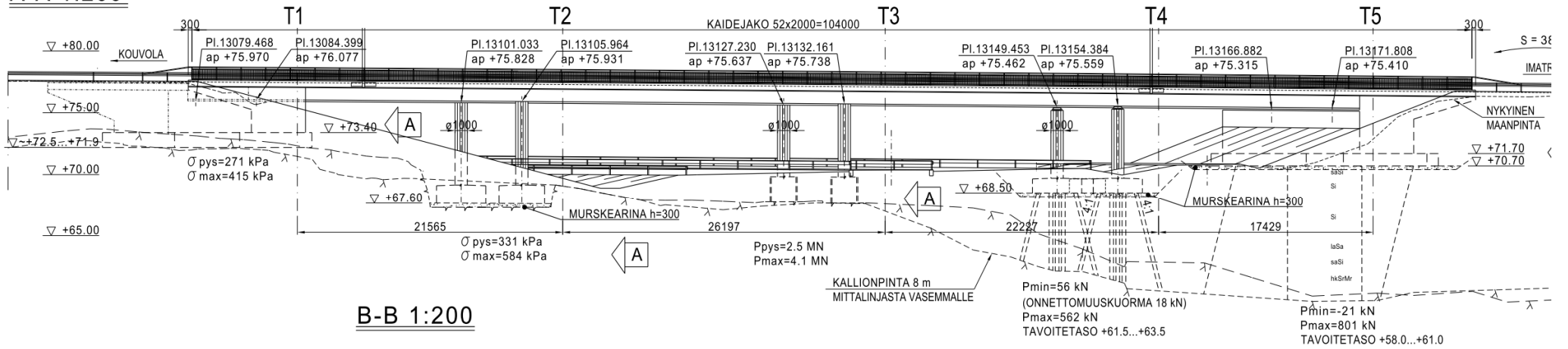
**Pituusleikkaus A - A, 1:100**

Kuva 2. Paalulariperusteinen yksiaukkoinen vesistösilta: pituusleikkaus A-A.



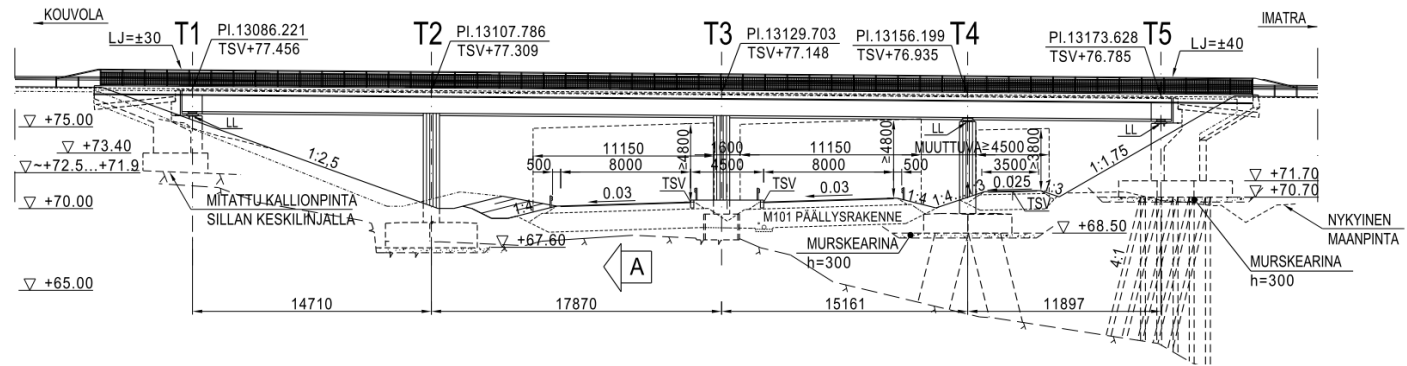
Kuva 3. Silta, jossa tukilinjoilla T4 ja T5 käytetty lyöntipaaluja: tasopiirustus.

**A-A 1:200**

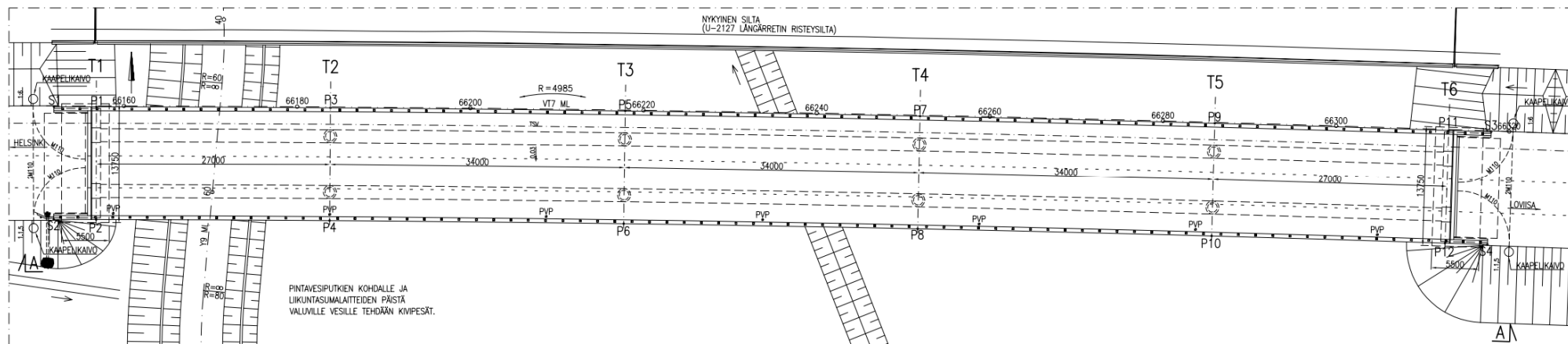


**B-B 1:200**

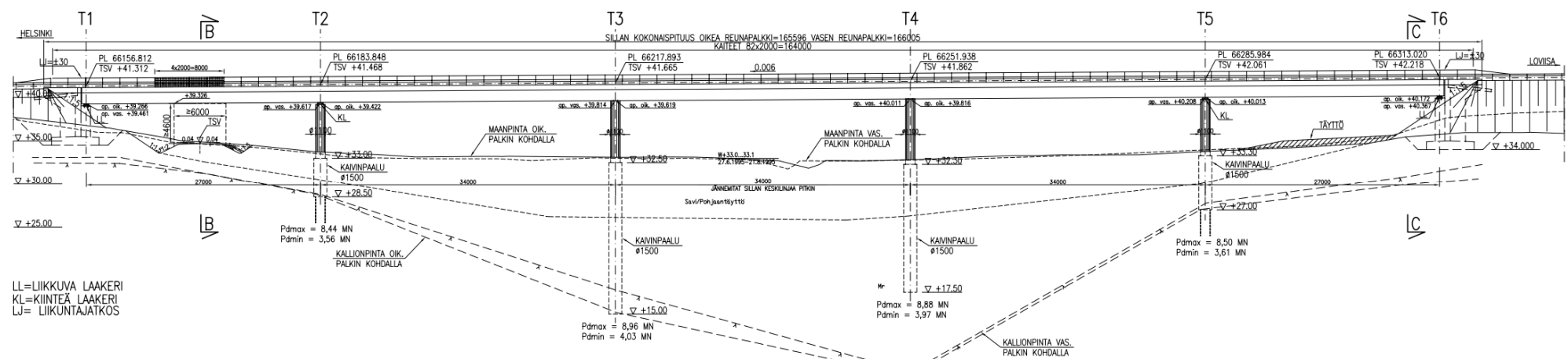
LJ=KAITEEN LIIKUNTAJATKOS  
LL=LIIKKUVA LAAKERI



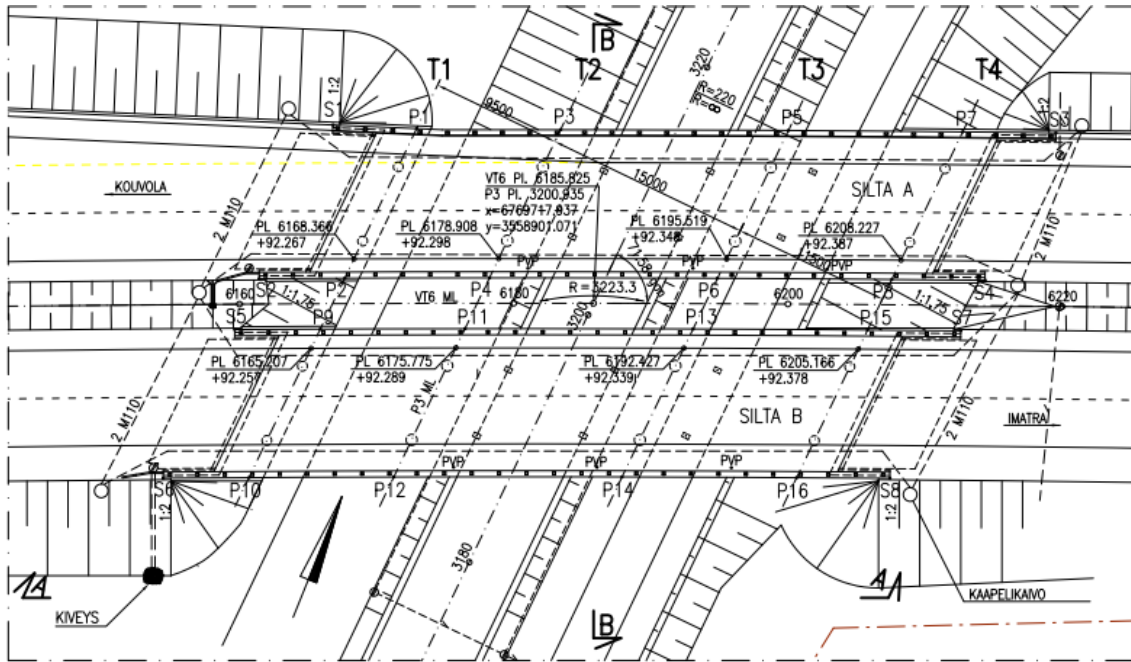
Kuva 4. Silta, jossa tukilinjoilla T4 ja T5 käytetty lyöntipaaluja: pituusleikkaus A-A ja B-B (ei mittakaavassa).



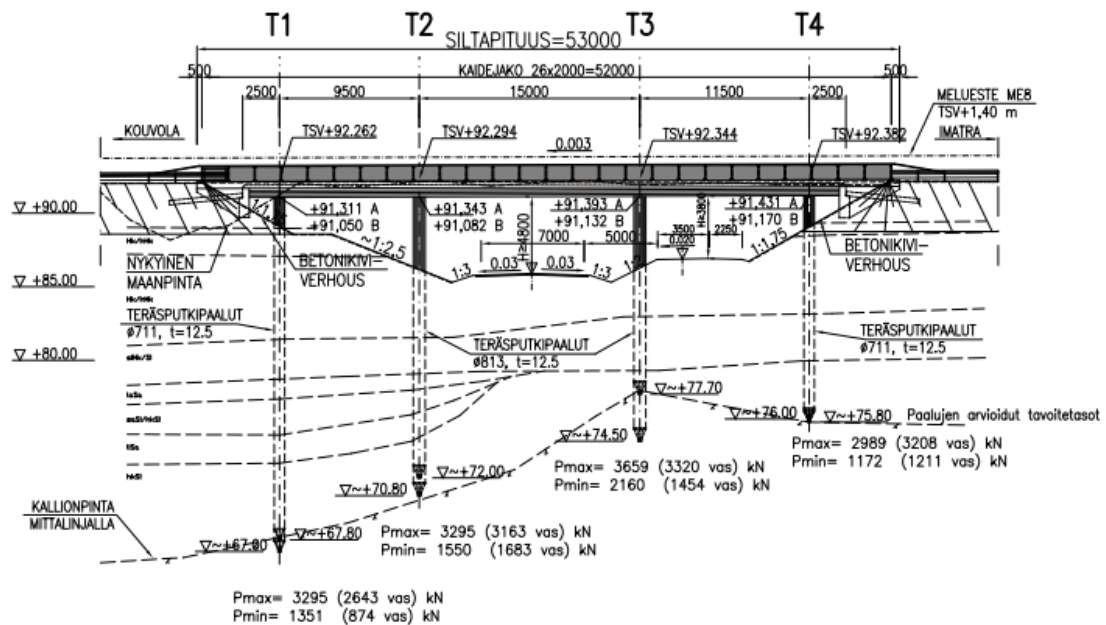
Kuva 5. Moniaukkoinen tiesilta, jossa välituet perustettu paalupilariperustuksin ja päätytuet maanvaraisesti: tasopiirustus.



Kuva 6. Moniaukkoinen tiesilta, jossa välituet perustettu paalupilariperustuksin ja päätytuet maanvaraisesti: pituusleikkaus A-A.

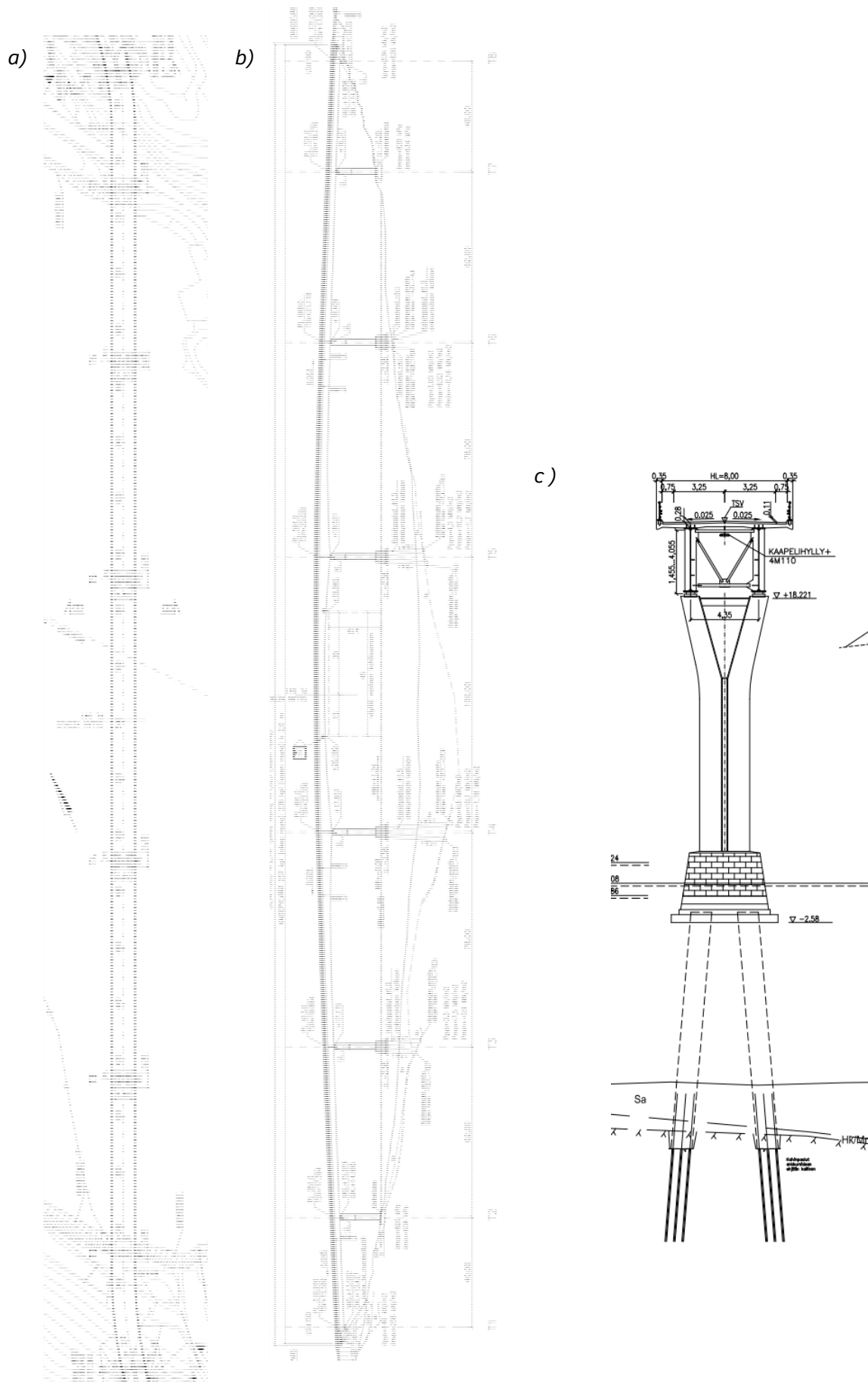


Kuva 7. Kolmiaukkoinen paaluperusteinen tiesilta: tasokuva.



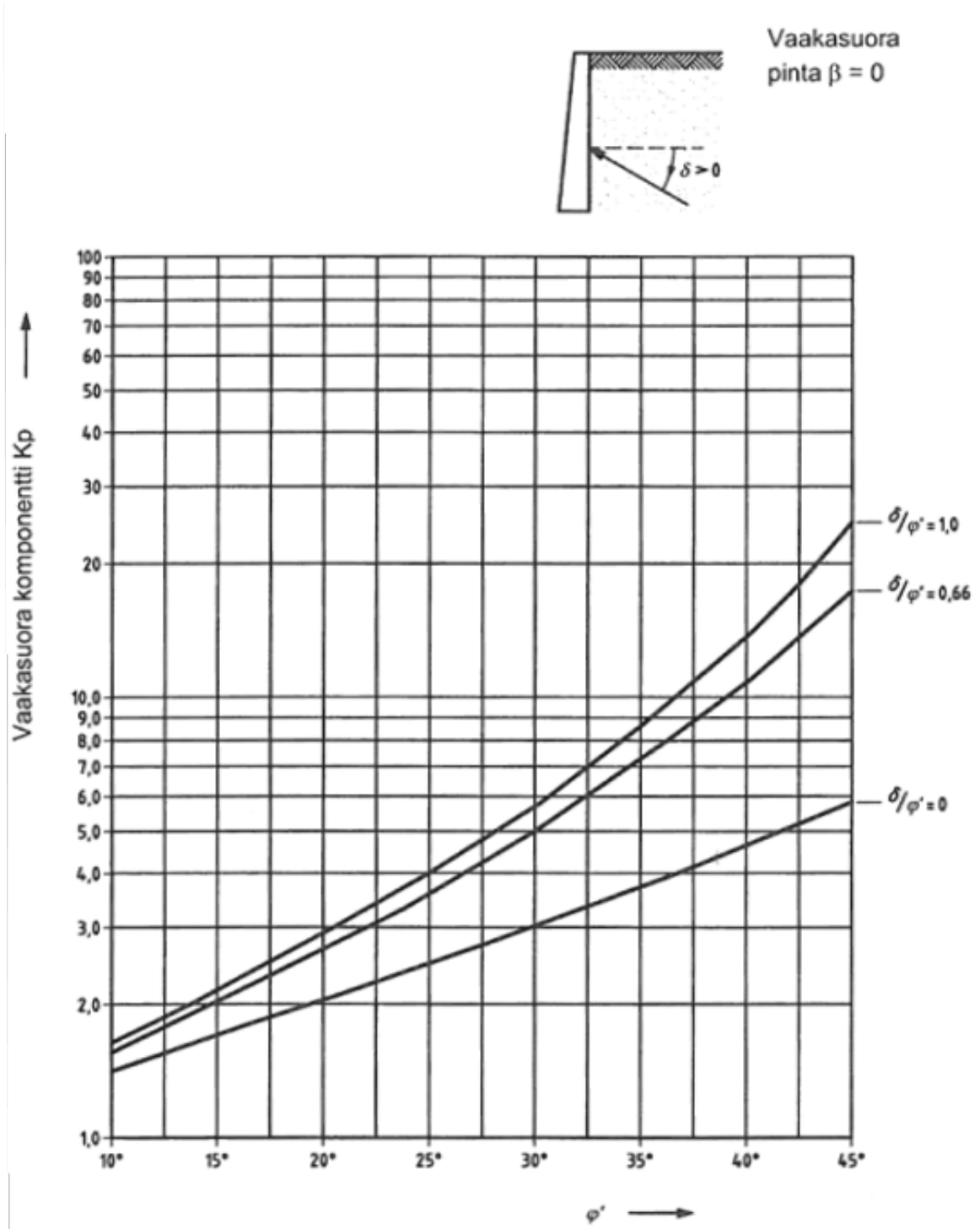
Kuva 8. Kolmiaukkoinen paaluperusteinen tiesilta: pituusleikkaus A-A.



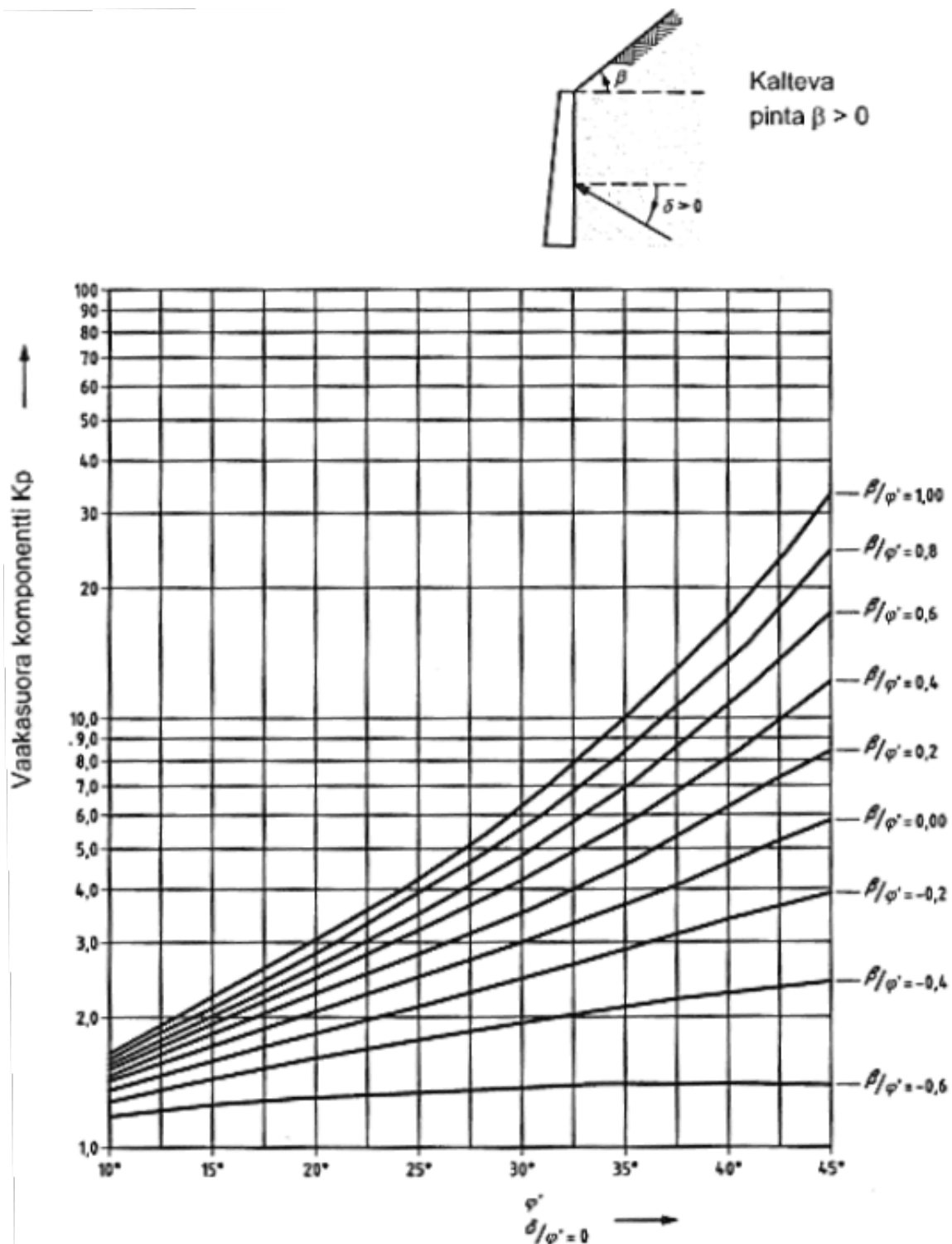


Kuva 9. Seitsemänaukkoinen paalupukkiperusteinen vesistösilta: a) tasokuva, b) pituusleikkaus A-A ja c) paalupukkirakenne.

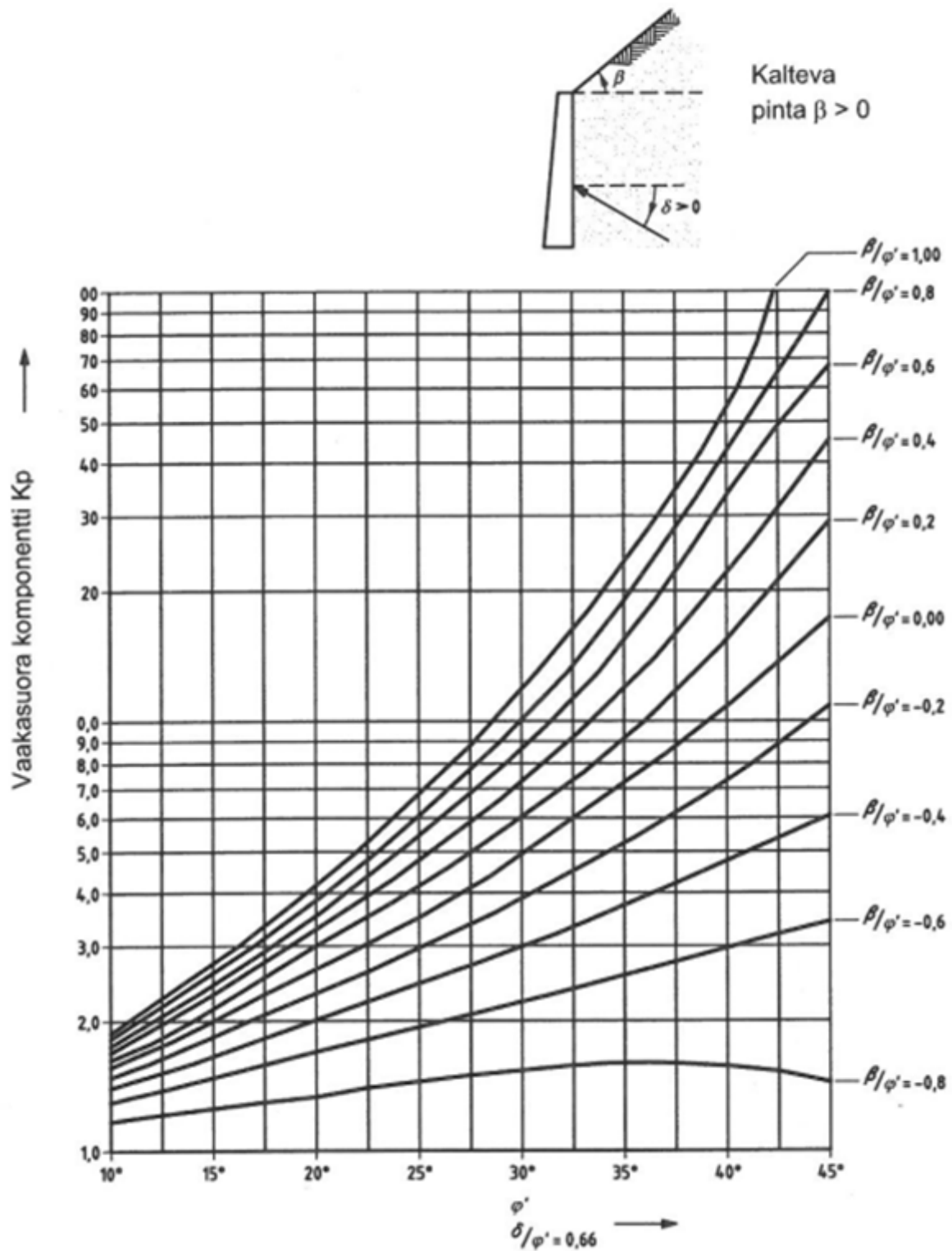
## Eurokoodien mukaiset nomogrammit passiivisen maanpaine kertoimen määrittämiseksi



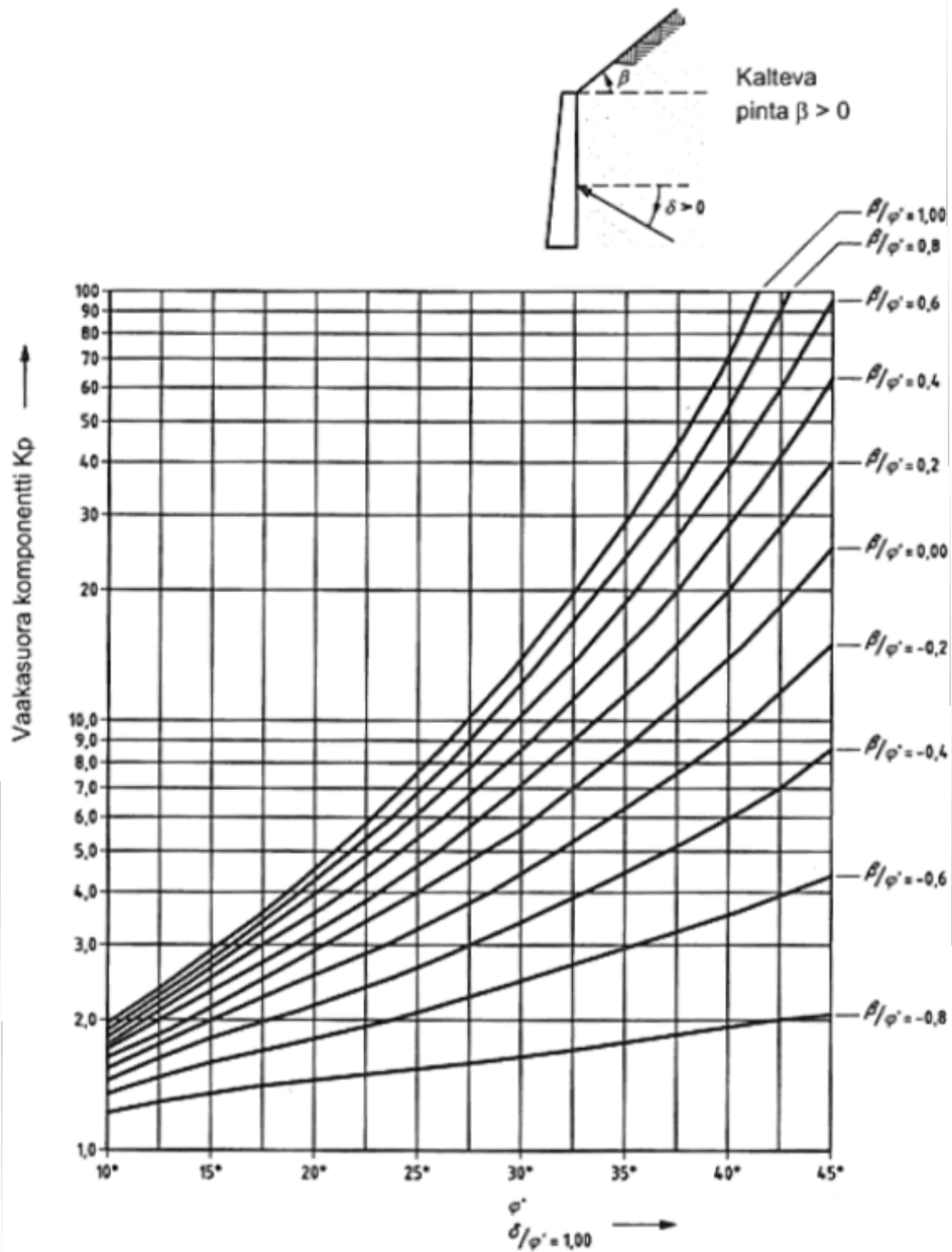
Kuva 1. Passiivinen maanpaine kerroin  $K_p$ , kun tuettu maanpinta on vaakasuora ( $\beta=0$ ) (RIL 207-2009).



Kuva 2. Passiivinen maanpainekerroin  $K_p$ , kun tuettu maanpinta on kalteva ( $\delta/\varphi'=0$  ja  $\delta=0$ ) (RIL 207-2009).



Kuva 3. Passiivinen maanpainekerroin  $K_p$ , kun tuettu maanpinta on kalteva ( $\delta/\phi' = 0,66$ ) (RIL 207-2009).



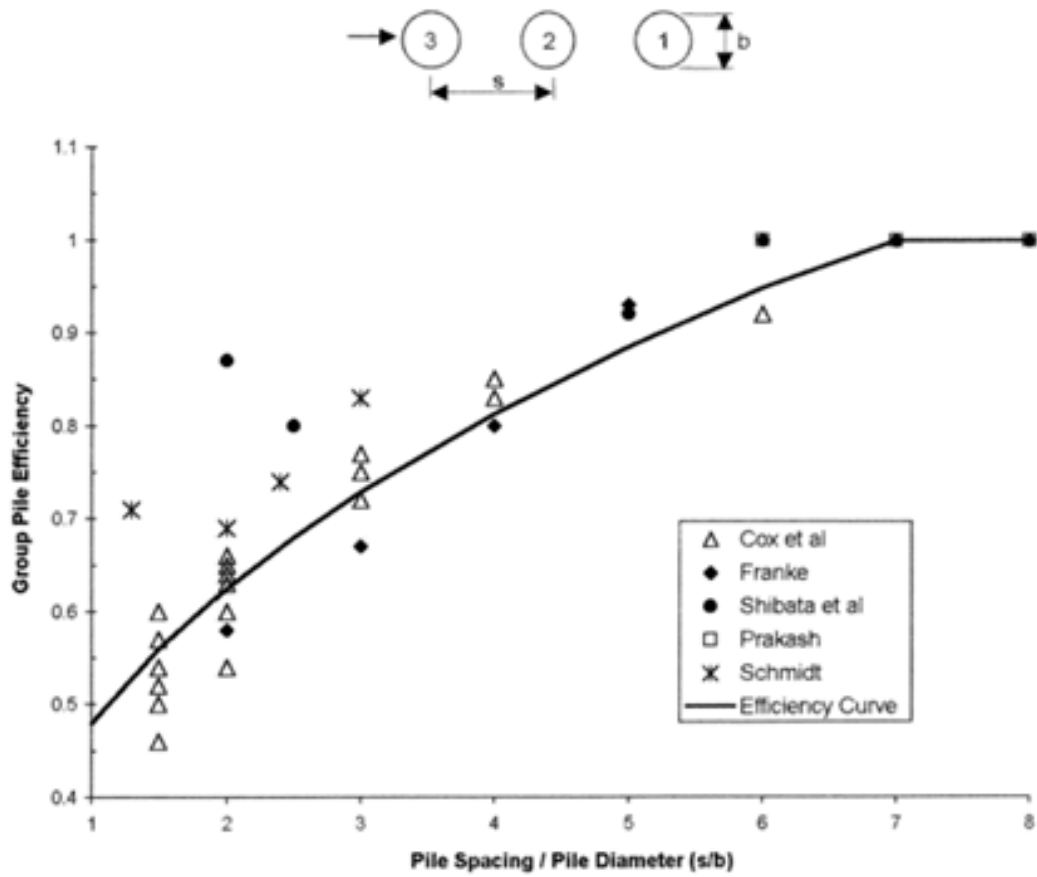
Kuva 4. Passiivinen maanpainekerroin  $K_p$ , kun tuettu maanpinta kalteva ( $\delta/\phi'=1$ ) (RIL 207-2009).

Taulukot maakerrosten lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin kairausvastuksen perusteella (Liikennevirasto 2012).

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan		Kitkakulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduuliluku m	Jännitys-eksponentti β	Puristinkairaus q <sub>c</sub> (MPa)	Painokairaus Pk/0,2 m	Heijarikairaus L/0,2 m
Karkea siltti	Löyhä	14 ... 16	9 ...	28	30 ... 100	0,3	< 7	< 40	< 8
	Keskitiivis			30	70 ... 150	0,3	7 ... 15	40 ... 100	8 ... 25
	Tiivis	16 ... 18	11	32	100 ... 300	0,3	> 15	> 100	> 25
Hieno hiekka d <sub>10</sub> <0,06	Löyhä	15 ... 17	9 ...	30	50 ... 150	0,5	< 10	20 ... 50	5 ... 15
	Keskitiivis			33	100 ... 200	0,5	10 ... 20	50 ... 100	15 ... 30
	Tiivis	16 ... 18	11	36	150 ... 300	0,5	> 20	> 100	> 30
Hiekka d <sub>10</sub> >0,06	Löyhä	16 ... 18	10 ...	32	150 ... 300	0,5	< 6	10 ... 30	5 ... 12
	Keskitiivis			35	200 ... 400	0,5	6 ... 14	30 ... 60	12 ... 25
	Tiivis	18 ... 20	12	38	300 ... 600	0,5	> 14	> 60	> 25

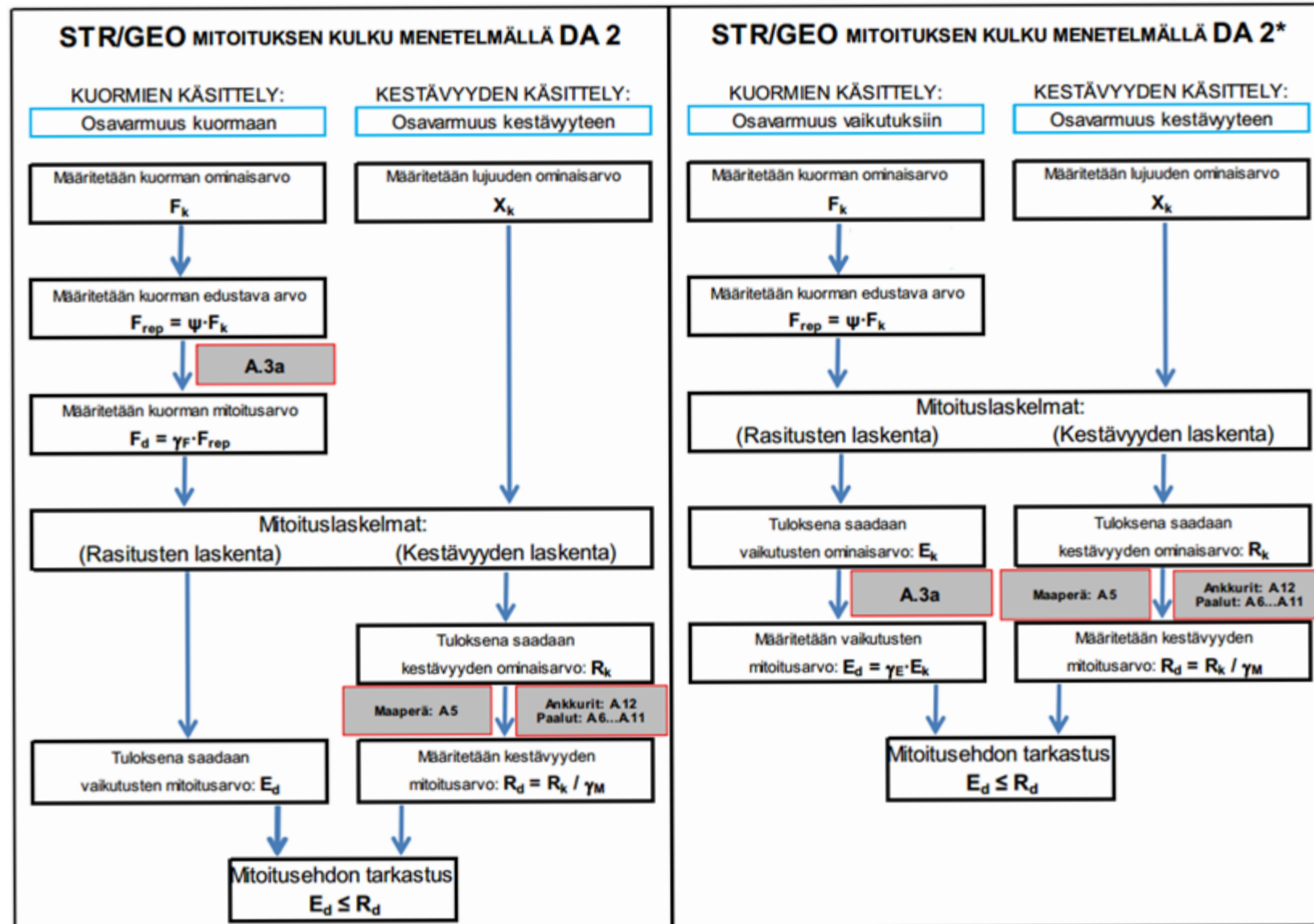
Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan		Kitkakulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduuliluku m	Jännitys-eksponentti β	Puristinkairaus q <sub>c</sub> (MPa)	Painokairaus Pk/0,2 m	Heijarikairaus L/0,2 m
Sora	Löyhä	17 ... 19	10 ...	34	300 ... 600	0,5	< 5,5	10 ... 25	5 ... 10
	Keskitiivis			37	400 ... 800	0,5	5,5 ... 12	25 ... 50	10 ... 20
	Tiivis	18 ... 20	12	40	600 ... 1200	0,5	> 12	≥ 50	> 20
Moreeni	Hyvin löyhä	16 ... 19	10 ... 12	... 34	(≤100)* 300 ... 600	0,5	< 10	< 40	< 20
	Löyhä	17 ... 20	10 ... 12	... 36	(100...250)* 600 ...	0,5	> 10	40 ... 100	20 ... 60
	Keskitiivis	18 ... 21	11 ... 13	... 38	800 ...	0,5	-	> 100	60 ... 140
	Tiivis	19 ... 23	11 ... 14	... 40	1200 ...	0,5	-	Lyömällä	> 140



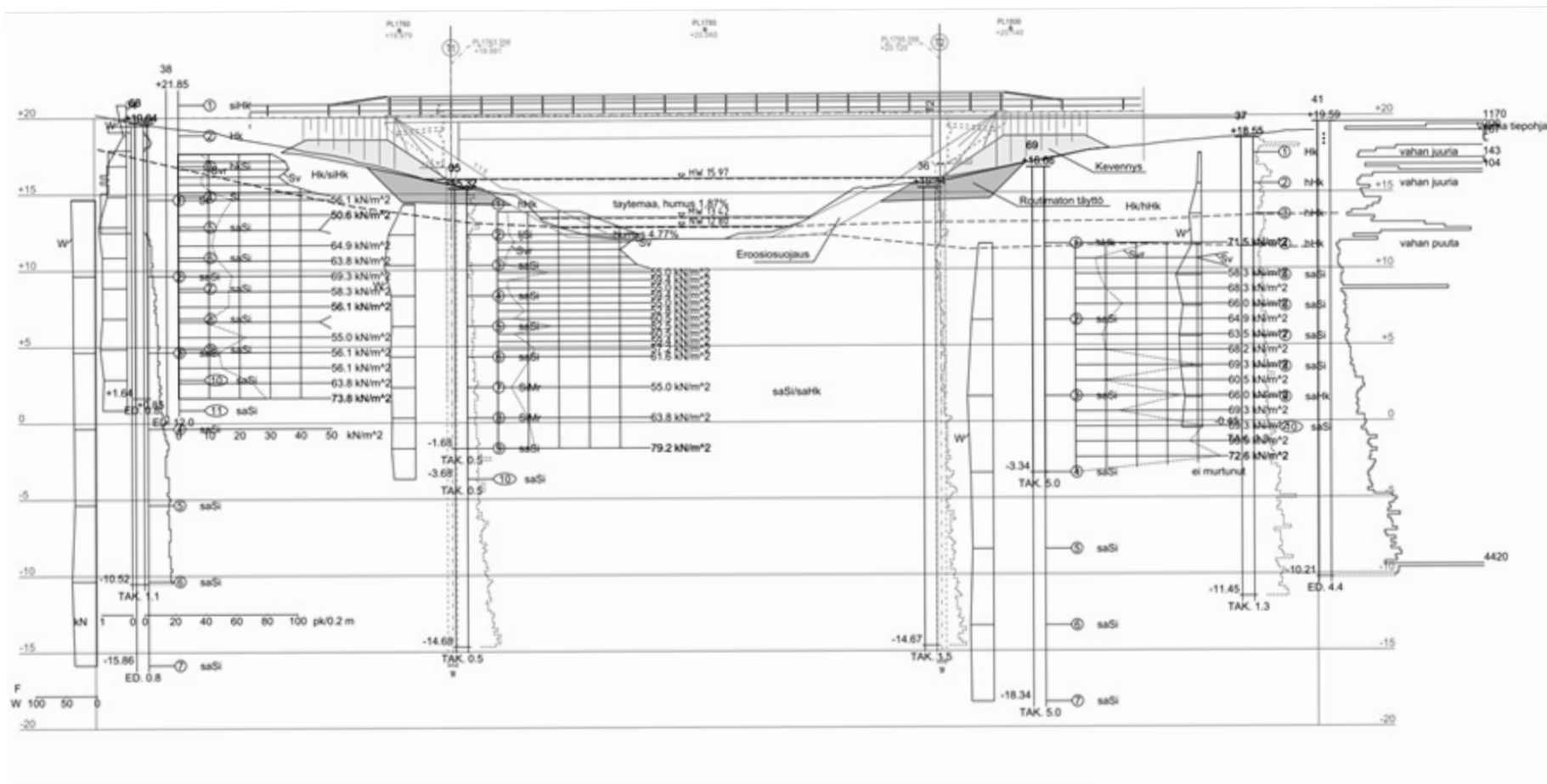




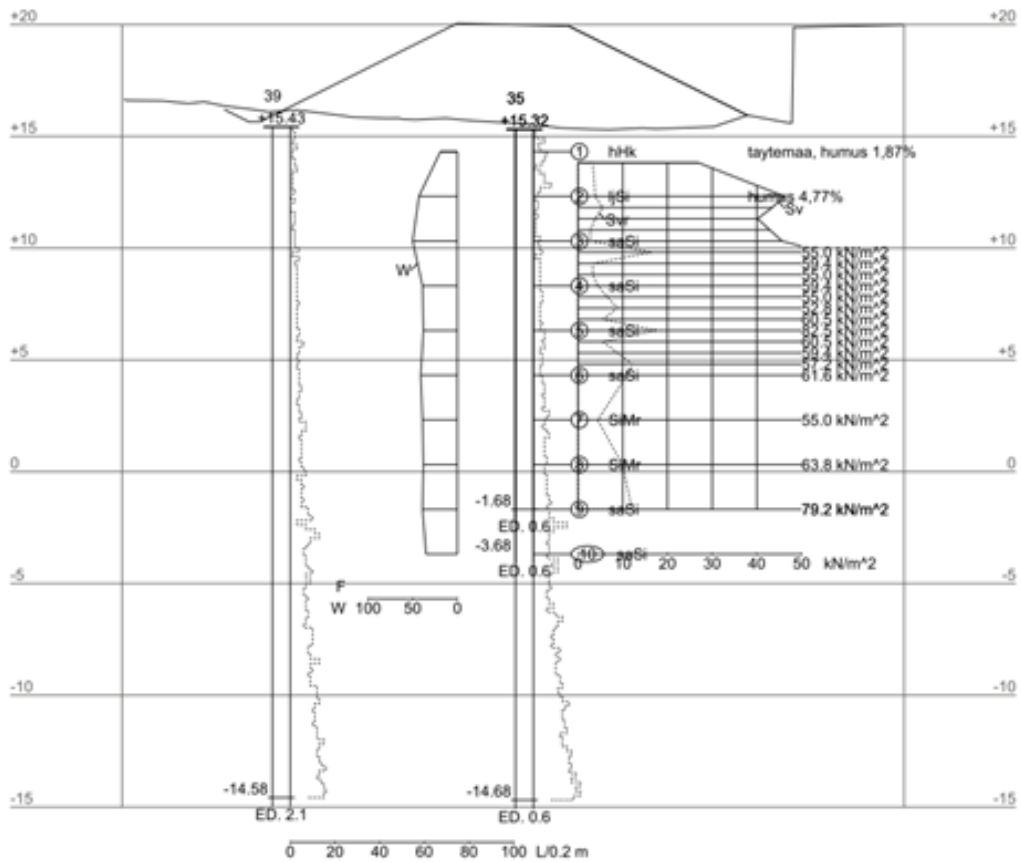
## STR/GEO-mitointiprosessi menetelmällä DA2 ja DA2\* (Liikennevirasto 2013: 20)



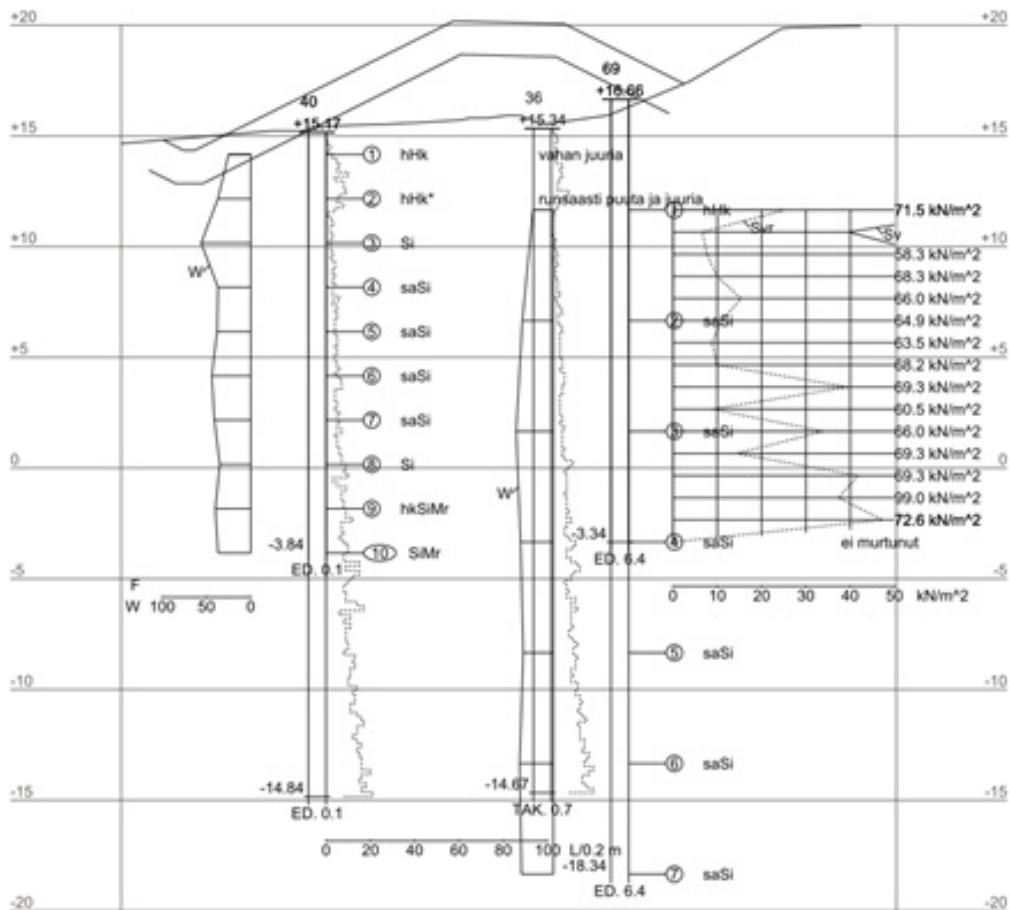




Kuva 2. Geotekninen leikkaus A-A.



Kuva 3. Geotekninen leikkaus T1-T1.

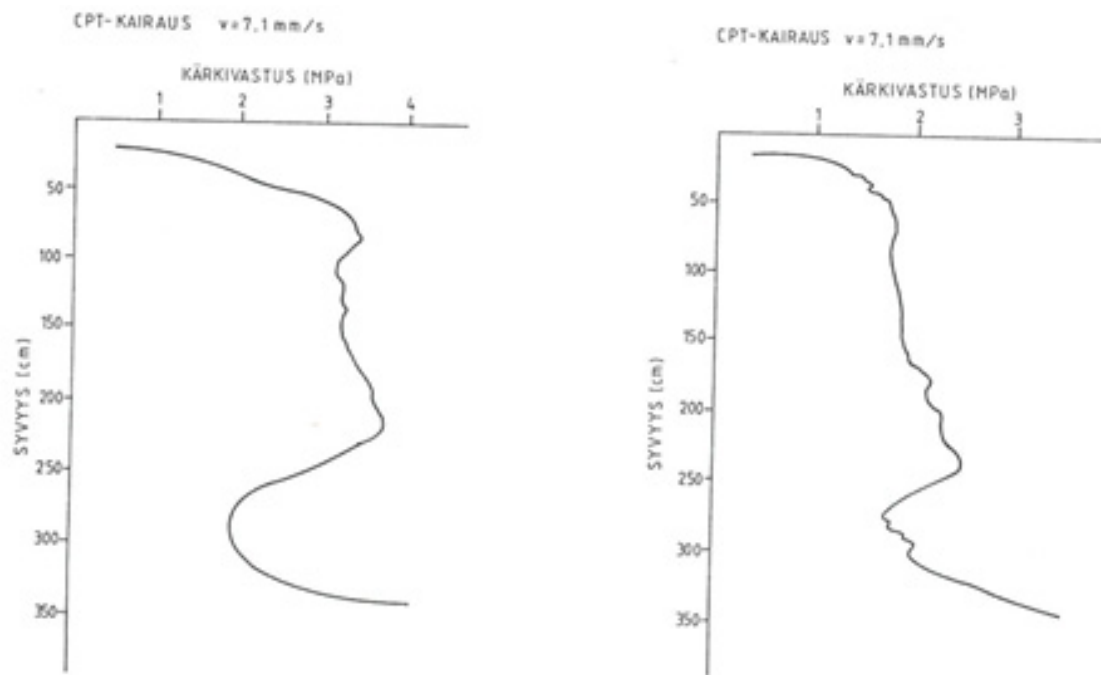


Kuva 4. Geotekninen leikkaus T2-T2.

## Koekuormitettu paalu hienossa hiekassa: lähtötietoja

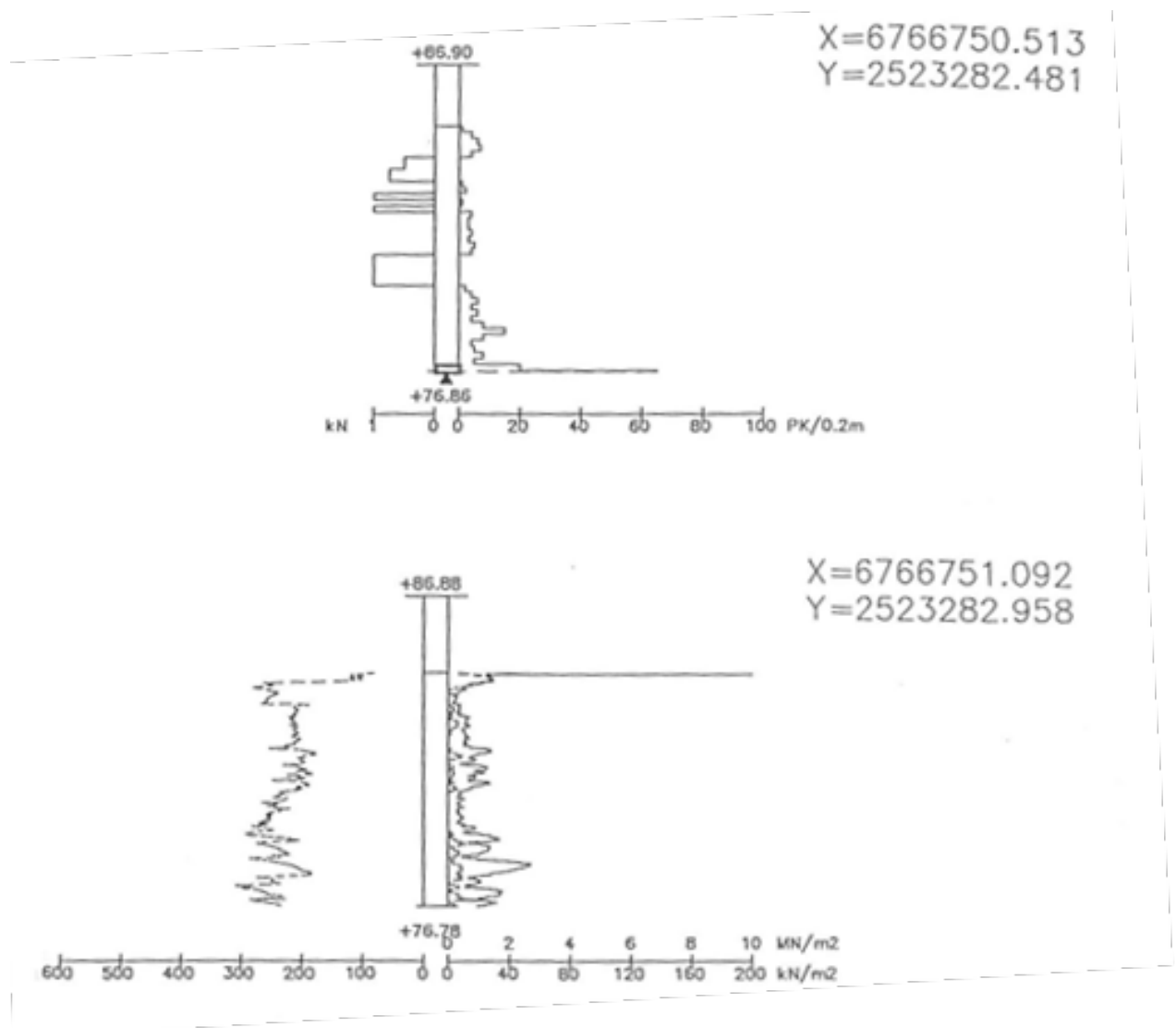


Kuva 1. Koekuopan hiekan rakeisuuskäyrä (Koskinen 1990: 109).



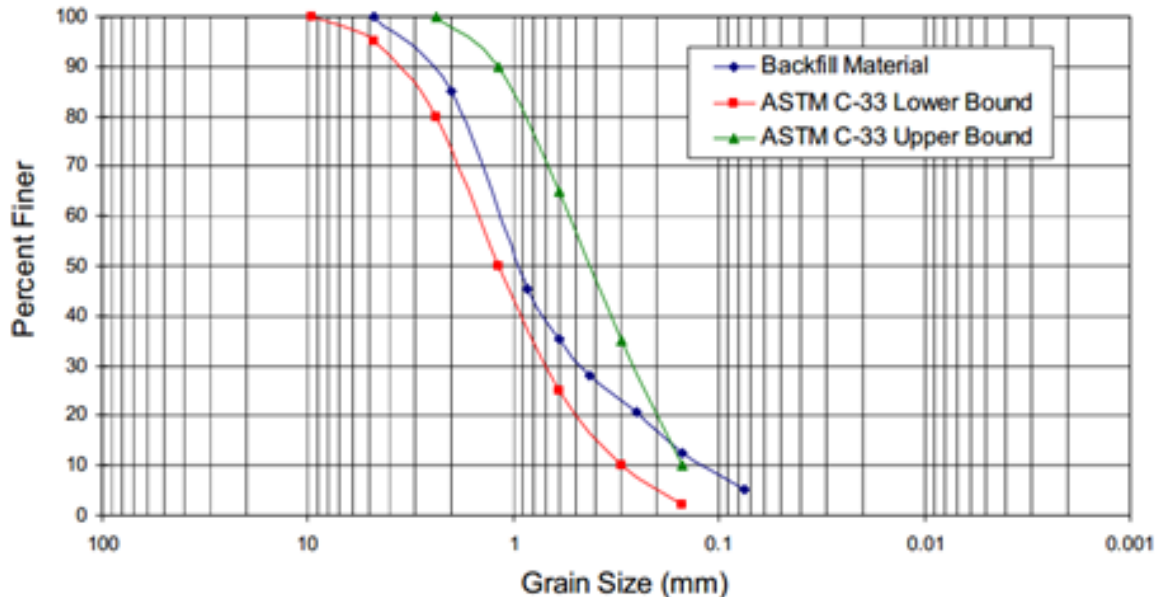
Kuva 2. Tyypilliset puristinkairaustulokset vasemmalla koesarjan alussa ja oikealla koesarjan lopussa (Koskinen 1990: 111).

## Koekuormitettu paalupari siltissä: lähtötietoja

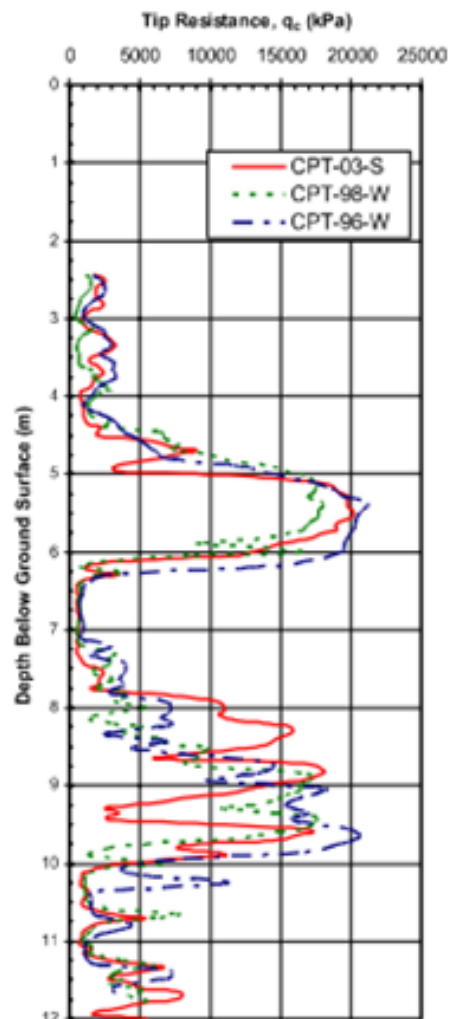


Kuva 1. Yläpuolella painokairausdiagrammi ja alapuolella puristinkairausdiagrammi (Nirhamo 1995).

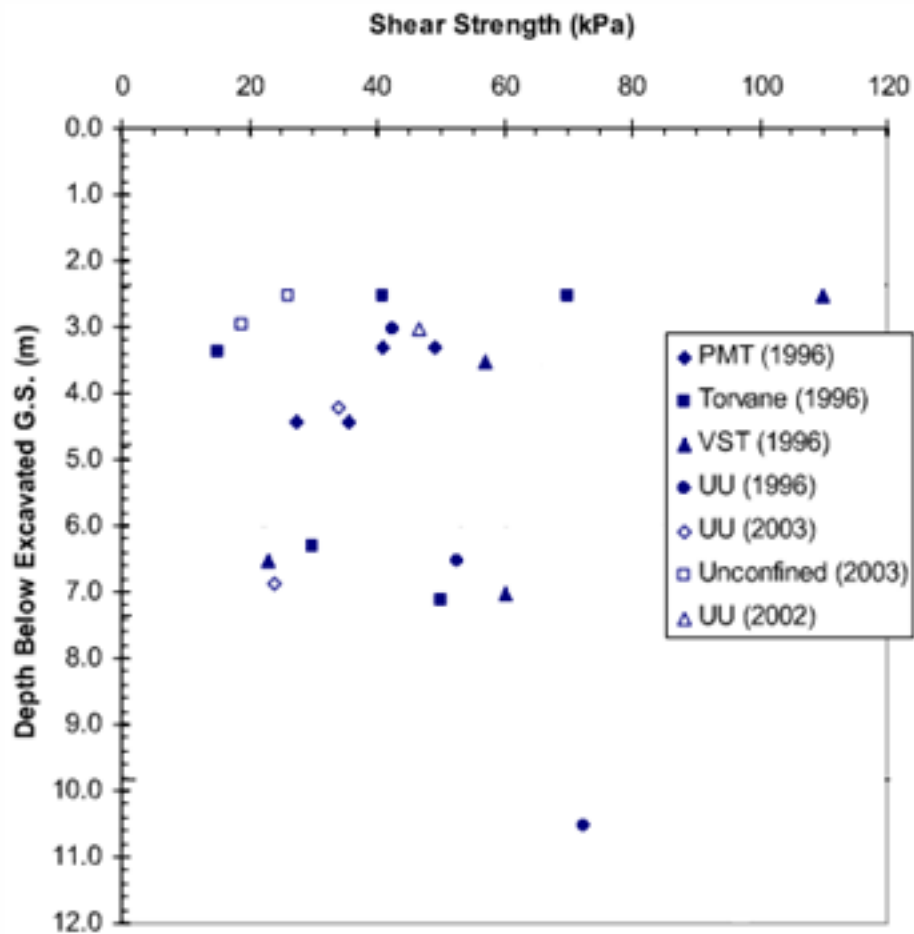
## Koekuormitettu paaluryhmä kerroksellisessa maassa: lähtötietoja



Kuva 1. Täyttöhiekkan rakeisuuskäyrä (sininen) (Walsh 2005: 25).



Kuva 2. Puristinkairaustuloksia (Walsh 2005: 34).



Kuva 3. Koheisiokerrosten leikkauslujuuskokeiden tuloksia syvyyden funktiona eri vuosina ja eri menetelmillä (Walsh 2005: 36).

Taulukko 1. Maaperän ominaisuuksia eri syvyyksillä (Walsh 2005: 26).

Depth Below Ground Surface (m)	Natural Moisture Content (percent)	Grain Size Distribution		Atterberg Limits		Classification (USCS)
		Sand (percent)	Fines (percent)	Liquid Limit (percent)	Plasticity Index (percent)	
0	--	95	5	N/A	NP	Well graded clean sand (SW)
2.74	36	38	62	24	1	Sandy Silt (ML)
3.04	30	38	62	23	3	Sandy Silt (ML)
3.35	33	61	39	N/A	NP	Fine Sand w/ Silt (SM)
3.65	30	24	76	25	3	Sandy Silt (ML)
3.96	31	22	78	N/A	NP	Sandy Silt (ML)
4.26	27	38	62	24	3	Sandy Silt (ML)
4.57	32	41	59	N/A	NP	Sandy Silt (ML)
4.87	31	62	38	N/A	NP	Silty Sand (SM)
5.18	30	67	33	N/A	NP	Silty Sand (SM)
5.33	26	71	29	N/A	NP	Silty Sand (SM)



# Alustalukujen herkkyytarkastelut Syväyksen kevytliikennesillalla (Muhos)

Taulukko 1. Alustaluvut kitkamaasuudella laskennassa muuttumattomina pidetyillä arvoilla.

Maalaji	Taso	Pystyjännitys $\sigma'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Yhtälön kerroin $\beta$ Poissonin vakioista	Koko onpuristus- moduuli $M$ [MPa]	Poulos ( $\alpha=1$ )			Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )			Leikkauskäsitteellisyyskallma			
					Alustalukukerroin nh/Poulos ( $\alpha=1$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_m/4$	Alustaluku ks <sup>3</sup> [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y > y_m/4$	Alustalukukerroin nh/Terzaghi ( $\alpha=0,74$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_m/4$	Alustaluku ks <sup>3</sup> [MPa <sup>m</sup> ], kun $y > y_m/4$	Alustalukukerroin nh [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_m/4$	Alustaluku ks <sup>3</sup> [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y > y_m/4$	
Maarpirta	20,0				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Paahtyläpää	16,7				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
Paahtyläpää	16,7	66	0,95	48,74	64,93	21,64	13,99	10,35	48,05	16,02	8,00	37,13	12,38	
Penger	16,0	80	0,95	53,67	71,48	23,83	12,71	9,40	52,90	17,63	8,00	45,01	15,00	
Täyttö/PV/P:n alla	15,0	92	0,95	57,55	76,66	25,55	10,90	8,07	56,73	18,91	4,80	33,76	11,25	
hik/PV/P:n alla	14,0	102	0,83	20,20	23,67	7,89	2,81	2,08	17,52	5,84	1,02	8,61	2,87	

Taulukko 2. Alustaluvut koheesiomaosuudella laskennassa muuttumattomina pidetyillä arvoilla.

Materiaali	Taso	Syvyys maantunnuasta z [m]	Pystyjännitys $\sigma'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Yhdistön kerroin $\beta$ Poissonin vakioista	Kokoompuristuvuus moduuli $M$ [MPa]	Poulos ( $\alpha=1$ ) pitkäaik.			Leikkauslujuus/ lyhytaik.			Leikkauslujuus/ pitkäaik.		
						Poulos ( $\alpha=1$ ) alustaluokeroin ni [MN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma < \gamma_{m,5}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Alustaluokas [MN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma < \gamma_{m,5}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Alustaluokas [MN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma < \gamma_{m,6}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Alustaluokas [MN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma < \gamma_{m,5}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Alustaluokas [MN/m <sup>2</sup> ]
Si	13,0	7,0	111	0,74	3,30	0,35	3,44	0,86	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	12,0	8,0	120	0,74	3,53	0,33	3,69	0,92	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	11,0	9,0	129	0,74	3,77	0,31	3,94	0,99	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	10,0	10,0	138	0,74	4,01	0,30	4,19	1,05	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	9,0	11,0	147	0,74	4,24	0,29	4,43	1,11	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	8,0	12,0	156	0,74	4,48	0,28	4,68	1,17	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	7,0	13,0	165	0,74	4,71	0,27	4,92	1,23	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	6,0	14,0	174	0,74	4,94	0,26	5,16	1,29	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	5,0	15,0	183	0,74	5,17	0,26	5,40	1,35	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	4,0	16,0	192	0,74	5,40	0,25	5,64	1,41	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	3,0	17,0	201	0,74	5,62	0,25	5,88	1,47	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	2,0	18,0	210	0,74	5,85	0,24	6,11	1,53	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	1,0	19,0	219	0,74	6,07	0,24	6,35	1,59	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	0,0	20,0	228	0,74	6,30	0,23	6,58	1,65	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-1,0	21,0	237	0,74	6,52	0,23	6,81	1,70	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-2,0	22,0	246	0,74	6,74	0,23	7,05	1,76	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-3,0	23,0	255	0,74	6,97	0,23	7,28	1,82	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-4,0	24,0	264	0,74	7,19	0,22	7,51	1,88	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-5,0	25,0	273	0,74	7,41	0,22	7,74	1,93	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-6,0	26,0	282	0,74	7,63	0,22	7,97	1,99	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-7,0	27,0	291	0,74	7,85	0,22	8,20	2,05	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-8,0	28,0	300	0,74	8,06	0,21	8,42	2,11	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-9,0	29,0	309	0,74	8,28	0,21	8,65	2,16	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-10,0	30,0	318	0,74	8,50	0,21	8,88	2,22	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-11,0	31,0	327	0,74	8,71	0,21	9,10	2,28	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-12,0	32,0	336	0,74	8,93	0,21	9,33	2,33	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-13,0	33,0	345	0,74	9,14	0,21	9,55	2,39	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-14,0	34,0	354	0,74	9,36	0,20	9,78	2,44	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-15,0	35,0	363	0,74	9,57	0,20	10,00	2,50	10,55	2,11	3,52	0,88		
Si	-16,0	36,0	372	0,74	9,79	0,20	10,22	2,56	10,55	2,11	3,52	0,88		

Taulukko 3. Alustaluvut tilavuuspainojen minimiarvoilla.

Materiaali	Taso	Pystysuunnissa $\sigma'$ [MN/m <sup>2</sup> Z]	Yhteinen kerroin $\beta$ Poissonin vaikutus	Yhteinen kerroin $\beta$ Poissonin vaikutus	Kokooppumistilavuus moduuli $M$ [MPa]	Kitkamaa/Poulos ( $\alpha=1$ )		Kohesioonia (pitkäaik.) Poulos ( $\alpha=1$ )		Kitkamaa/Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )		
						Alustalukonoin n <sup>3</sup> Poulos ( $\alpha=1$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustalukonoin n <sup>4</sup> Poulos [MN/m <sup>4</sup> ]	Alustalukonoin n <sup>3</sup> Poulos [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustalukonoin n <sup>4</sup> Poulos [MN/m <sup>4</sup> ]	Alustalukonoin n <sup>3</sup> Poulos [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustalukonoin n <sup>4</sup> Poulos [MN/m <sup>4</sup> ]	Alustalukonoin n <sup>3</sup> Poulos [MN/m <sup>3</sup> ]
Maanpinta	20,0					0,0		0,0			0,0	
Paalun yläpää	16,7					0,0		0,0			0,0	
Paalun väli	16,7	59	0,95	46,24	13,27	61,60	20,53	-	-	9,82	45,58	15,19
Perger	16,0	72	0,95	50,91	12,05	67,81	22,60	-	-	8,92	50,18	16,73
Täyttö/PVPn alla	15,0	82	0,95	54,33	10,29	72,37	24,12	-	-	7,62	53,55	17,85
hHc/PVPn alla	14,0	91	0,83	19,08	2,65	22,36	7,45	-	-	1,96	16,55	5,52
saSi/PVPn alla	13,0	99	0,74	2,97	0,32	-	-	3,11	0,78	-	-	-
saSi/PVPn alla	12,0	107	0,74	3,19	0,30	-	-	3,33	0,83	-	-	-
saSi/PVPn alla	11,0	115	0,74	3,40	0,28	-	-	3,55	0,89	-	-	-
saSi/PVPn alla	10,0	123	0,74	3,61	0,27	-	-	3,78	0,94	-	-	-
saSi/PVPn alla	9,0	131	0,74	3,83	0,26	-	-	4,00	1,00	-	-	-
saSi/PVPn alla	8,0	139	0,74	4,03	0,25	-	-	4,22	1,05	-	-	-
saSi/PVPn alla	7,0	147	0,74	4,24	0,24	-	-	4,43	1,11	-	-	-
saSi/PVPn alla	6,0	155	0,74	4,45	0,24	-	-	4,65	1,16	-	-	-
saSi/PVPn alla	5,0	163	0,74	4,66	0,23	-	-	4,87	1,22	-	-	-
saSi/PVPn alla	4,0	171	0,74	4,86	0,23	-	-	5,08	1,27	-	-	-
saSi/PVPn alla	3,0	179	0,74	5,07	0,22	-	-	5,29	1,32	-	-	-
saSi/PVPn alla	2,0	187	0,74	5,27	0,22	-	-	5,51	1,38	-	-	-
saSi/PVPn alla	1,0	195	0,74	5,47	0,21	-	-	5,72	1,43	-	-	-
saSi/PVPn alla	0,0	203	0,74	5,67	0,21	-	-	5,93	1,48	-	-	-
saSi/PVPn alla	-1,0	211	0,74	5,87	0,21	-	-	6,14	1,53	-	-	-
saSi/PVPn alla	-2,0	219	0,74	6,07	0,21	-	-	6,35	1,59	-	-	-
saSi/PVPn alla	-3,0	227	0,74	6,27	0,20	-	-	6,56	1,64	-	-	-
saSi/PVPn alla	-4,0	235	0,74	6,47	0,20	-	-	6,76	1,69	-	-	-
saSi/PVPn alla	-5,0	243	0,74	6,67	0,20	-	-	6,97	1,74	-	-	-
saSi/PVPn alla	-6,0	251	0,74	6,87	0,20	-	-	7,18	1,79	-	-	-
saSi/PVPn alla	-7,0	259	0,74	7,06	0,19	-	-	7,38	1,85	-	-	-
saSi/PVPn alla	-8,0	267	0,74	7,26	0,19	-	-	7,59	1,90	-	-	-
saSi/PVPn alla	-9,0	275	0,74	7,46	0,19	-	-	7,79	1,95	-	-	-
saSi/PVPn alla	-10,0	283	0,74	7,65	0,19	-	-	7,99	2,00	-	-	-
saSi/PVPn alla	-11,0	291	0,74	7,85	0,19	-	-	8,20	2,05	-	-	-
saSi/PVPn alla	-12,0	299	0,74	8,04	0,19	-	-	8,40	2,10	-	-	-
saSi/PVPn alla	-13,0	307	0,74	8,23	0,19	-	-	8,60	2,15	-	-	-
saSi/PVPn alla	-14,0	315	0,74	8,43	0,18	-	-	8,80	2,20	-	-	-
saSi/PVPn alla	-15,0	323	0,74	8,62	0,18	-	-	9,00	2,25	-	-	-
saSi/PVPn alla	-16,0	331	0,74	8,81	0,18	-	-	9,20	2,30	-	-	-

Taulukko 4. Alustaluvut leikkauskestävyyskulman ja suljetun leikkauslujuuden minimiarvoilla.

Materiaali	Taso	Kirkkokuha $\phi$	Leikkauskestävyyskulma				Leikkauslujuus / lyhytaik.		Leikkauslujuus / pitkäaik.	
			Leikkauslujuus su [N/m <sup>2</sup> ]	Alustakukeroim n <sub>h</sub> [N/m <sup>2</sup> ]	Alustakuker [N/m <sup>2</sup> ], kun $y < y_{m4}$	Alustakuker [N/m <sup>2</sup> ], kun $y > y_{m4}$	Alustakuker [N/m <sup>2</sup> ], kun $y < y_{m6}$	Alustakuker [N/m <sup>2</sup> ], kun $y > y_{m6}$	Alustakuker [N/m <sup>2</sup> ], kun $y < y_{m5}$	Alustakuker [N/m <sup>2</sup> ], kun $y > y_{m5}$
Maanpinta	20,0				0,0		0,0		0,0	
Paahun yläpää	16,7				0,0		0,0		0,0	
Paahun yläpää	16,7	34	-	3,50	16,24	5,41	-	-	-	-
Penger	16,0	34	-	3,50	19,69	6,56	-	-	-	-
Täyttö/PVP:n alla	15,0	34	-	2,10	14,77	4,92	-	-	-	-
hHk/PVP:n alla	14,0	30	-	0,60	5,06	1,69	-	-	-	-
saSi/PVP:n alla	13,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	12,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	11,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	10,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	9,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	8,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	7,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	6,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	5,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	4,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	3,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	2,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	1,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	0,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-1,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-2,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-3,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-4,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-5,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-6,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-7,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-8,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-9,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-10,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-11,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-12,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-13,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-14,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-15,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53
saSi/PVP:n alla	-16,0	-	30	-	-	-	6,33	1,27	2,11	0,53

Taulukko 5. Alustaluvut leikkauskestävyyskulman ja suljetun leikkauslujuuden maksimiarvoilla.

Materiaali	Taso	Kirkkokuuma $\phi$	Leikkauslujuus su [kN/m <sup>2</sup> ]	Leikkauskestävyyskulma			Leikkauslujuus/ lyhtya ik.		Leikkauslujuus/ pitkää ik.	
				Alustalukue noih [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_{m4}$	Alustaluku ks3 [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_{m4}$	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_{m6}$	Alustaluku 0,2ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_{m5}$	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_{m5}$	Alustaluku 0,25ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_{m5}$
Maanpinta	20,0				0,0		0,0		0,0	
Paalun yläpää	16,7				0,0		0,0		0,0	
Paalun yläpää	16,7	38	-	8,00	37,13	12,38	-	-	-	-
Penger	16,0	38		8,00	45,01	15,00	-	-	-	-
Täyttö/PVP:n alla	15,0	38	-	4,80	33,76	11,25	-	-	-	-
hHk/PVP:n alla	14,0	33	-	1,50	12,66	4,22	-	-	-	-
saSi/PVP:n alla	13,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	12,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	11,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	10,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	9,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	8,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	7,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	6,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	5,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	4,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	3,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	2,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	1,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	0,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-1,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-2,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-3,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-4,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-5,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-6,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-7,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-8,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-9,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-10,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-11,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-12,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-13,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-14,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-15,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14
saSi/PVP:n alla	-16,0	-	65	-	-	-	13,71	2,74	4,57	1,14

Taulukko 6. Alustaluvut moduuliluvun minimiarvoilla.

Maanlaji	Taso	Yhtälön kerroin $\beta$ Poissonin vakioista	Moduuliluvun	Kokoonpanuhuomus moduulit $M$ [MPa]	Pouloos ( $\alpha=1$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Kitkanraa Pouloos ( $\alpha=1$ )		Kohesiorraa (pitkääik.) Pouloos ( $\alpha=1$ )		Kitkanraa/Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )		
						Alustahkekerroin $n_H$ Pouloos ( $\alpha=1$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustahke ks [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustahke ks [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustahke ks [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustahke kerroin $n_H$ Terzaghi ( $\alpha=0,74$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustahke ks [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustahke ks [MN/m <sup>3</sup> ]
Maanpinta	20,0					0,0		0,0				
Paahn yläpää	16,7					0,0		0,0			0,0	
Paahn yläpää	16,7	0,95	400	32,50	9,33	43,29	14,43	-	-	6,90	32,03	10,68
Penger	16,0	0,95	400	35,78	8,47	47,66	15,89	-	-	6,27	35,27	11,76
Täyttö PVP:n alla	15,0	0,95	400	38,37	7,27	51,10	17,03	-	-	5,38	37,82	12,61
hFik PVP:n alla	14,0	0,83	50	5,05	0,70	5,92	1,97	-	-	0,52	4,38	1,46
saSi PVP:n alla	13,0	0,74	30	3,30	0,35	-	-	3,44	0,86	0,26	-	-
saSi PVP:n alla	12,0	0,74	30	3,53	0,33	-	-	3,69	0,92	0,24	-	-
saSi PVP:n alla	11,0	0,74	30	3,77	0,31	-	-	3,94	0,99	0,23	-	-
saSi PVP:n alla	10,0	0,74	30	4,01	0,30	-	-	4,19	1,05	0,22	-	-
saSi PVP:n alla	9,0	0,74	30	4,24	0,29	-	-	4,43	1,11	0,21	-	-
saSi PVP:n alla	8,0	0,74	30	4,48	0,28	-	-	4,68	1,17	0,21	-	-
saSi PVP:n alla	7,0	0,74	30	4,71	0,27	-	-	4,92	1,23	0,20	-	-
saSi PVP:n alla	6,0	0,74	30	4,94	0,26	-	-	5,16	1,29	0,19	-	-
saSi PVP:n alla	5,0	0,74	30	5,17	0,26	-	-	5,40	1,35	0,19	-	-
saSi PVP:n alla	4,0	0,74	30	5,40	0,25	-	-	5,64	1,41	0,19	-	-
saSi PVP:n alla	3,0	0,74	30	5,62	0,25	-	-	5,88	1,47	0,18	-	-
saSi PVP:n alla	2,0	0,74	30	5,85	0,24	-	-	6,11	1,53	0,18	-	-
saSi PVP:n alla	1,0	0,74	30	6,07	0,24	-	-	6,35	1,59	0,18	-	-
saSi PVP:n alla	0,0	0,74	30	6,30	0,23	-	-	6,58	1,65	0,17	-	-
saSi PVP:n alla	-1,0	0,74	30	6,52	0,23	-	-	6,81	1,70	0,17	-	-
saSi PVP:n alla	-2,0	0,74	30	6,74	0,23	-	-	7,05	1,76	0,17	-	-
saSi PVP:n alla	-3,0	0,74	30	6,97	0,23	-	-	7,28	1,82	0,17	-	-
saSi PVP:n alla	-4,0	0,74	30	7,19	0,22	-	-	7,51	1,88	0,16	-	-
saSi PVP:n alla	-5,0	0,74	30	7,41	0,22	-	-	7,74	1,93	0,16	-	-
saSi PVP:n alla	-6,0	0,74	30	7,63	0,22	-	-	7,97	1,99	0,16	-	-
saSi PVP:n alla	-7,0	0,74	30	7,85	0,22	-	-	8,20	2,05	0,16	-	-
saSi PVP:n alla	-8,0	0,74	30	8,06	0,21	-	-	8,42	2,11	0,16	-	-
saSi PVP:n alla	-9,0	0,74	30	8,28	0,21	-	-	8,65	2,16	0,16	-	-
saSi PVP:n alla	-10,0	0,74	30	8,50	0,21	-	-	8,88	2,22	0,16	-	-
saSi PVP:n alla	-11,0	0,74	30	8,71	0,21	-	-	9,10	2,28	0,15	-	-
saSi PVP:n alla	-12,0	0,74	30	8,93	0,21	-	-	9,33	2,33	0,15	-	-
saSi PVP:n alla	-13,0	0,74	30	9,14	0,21	-	-	9,55	2,39	0,15	-	-
saSi PVP:n alla	-14,0	0,74	30	9,36	0,20	-	-	9,78	2,44	0,15	-	-
saSi PVP:n alla	-15,0	0,74	30	9,57	0,20	-	-	10,00	2,50	0,15	-	-
saSi PVP:n alla	-16,0	0,74	30	9,79	0,20	-	-	10,22	2,56	0,15	-	-

Taulukko 7. Alustaluvut moduuliluvun maksimiarvoilla.

Materiaali	Taso	Yhtälön kerroin $\beta$ Poissonin vakiosta	Moduuliluku	Kokoonpuristus- moduuli $M$ [MPa]	Alustehäiriön ni- Poulos ( $\alpha=1$ ) [MN/m <sup>2</sup> /3]	Kitkamaa/Poulos ( $\alpha=1$ )		Kohesiomaa (pitkäaik.) Poulos ( $\alpha=1$ )		Kitkamaa/Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )		
						[MN/m <sup>2</sup> /3], $y < y_{nl4}$	[MN/m <sup>2</sup> /3], $y > y_{nl4}$	[MN/m <sup>2</sup> /3], $y < y_{nl5}$	[MN/m <sup>2</sup> /3], $y > y_{nl5}$	Alustehäiriön ni- Terzaghi ( $\alpha=0,74$ ) [MN/m <sup>2</sup> /3]	[MN/m <sup>2</sup> /3], $y < y_{nl4}$	[MN/m <sup>2</sup> /3], $y > y_{nl4}$
Maanpinta	20,0					0,0		0,0				
Paahon välipää	16,7					0,0		0,0				
Paahon välipää	16,7	0,95	800	64,99	18,65	86,57	28,86	-	-	13,80	64,06	21,35
Penger	16,0	0,95	800	71,55	16,94	93,31	31,77	-	-	12,54	70,53	23,51
Täyttö/PVPn alla	15,0	0,95	800	76,73	14,53	102,21	34,07	-	-	10,76	75,64	25,21
hHk/PVPn alla	14,0	0,83	200	20,20	2,81	23,67	7,89	-	-	2,08	17,52	5,84
saSi/PVPn alla	13,0	0,74	100	10,98	1,17	-	-	11,48	2,87	0,86	-	-
saSi/PVPn alla	12,0	0,74	100	11,78	1,09	-	-	12,31	3,08	0,81	-	-
saSi/PVPn alla	11,0	0,74	100	12,58	1,04	-	-	13,14	3,28	0,77	-	-
saSi/PVPn alla	10,0	0,74	100	13,36	0,99	-	-	13,96	3,49	0,73	-	-
saSi/PVPn alla	9,0	0,74	100	14,14	0,96	-	-	14,78	3,69	0,71	-	-
saSi/PVPn alla	8,0	0,74	100	14,92	0,92	-	-	15,59	3,90	0,68	-	-
saSi/PVPn alla	7,0	0,74	100	15,69	0,90	-	-	16,40	4,10	0,66	-	-
saSi/PVPn alla	6,0	0,74	100	16,46	0,87	-	-	17,20	4,30	0,65	-	-
saSi/PVPn alla	5,0	0,74	100	17,23	0,85	-	-	18,00	4,50	0,63	-	-
saSi/PVPn alla	4,0	0,74	100	17,99	0,84	-	-	18,79	4,70	0,62	-	-
saSi/PVPn alla	3,0	0,74	100	18,74	0,82	-	-	19,58	4,90	0,61	-	-
saSi/PVPn alla	2,0	0,74	100	19,50	0,80	-	-	20,37	5,09	0,60	-	-
saSi/PVPn alla	1,0	0,74	100	20,25	0,79	-	-	21,16	5,29	0,59	-	-
saSi/PVPn alla	0,0	0,74	100	21,00	0,78	-	-	21,94	5,48	0,58	-	-
saSi/PVPn alla	-1,0	0,74	100	21,74	0,77	-	-	22,71	5,68	0,57	-	-
saSi/PVPn alla	-2,0	0,74	100	22,48	0,76	-	-	23,49	5,87	0,56	-	-
saSi/PVPn alla	-3,0	0,74	100	23,22	0,75	-	-	24,26	6,07	0,56	-	-
saSi/PVPn alla	-4,0	0,74	100	23,96	0,74	-	-	25,03	6,26	0,55	-	-
saSi/PVPn alla	-5,0	0,74	100	24,69	0,73	-	-	25,80	6,45	0,54	-	-
saSi/PVPn alla	-6,0	0,74	100	25,42	0,73	-	-	26,56	6,64	0,54	-	-
saSi/PVPn alla	-7,0	0,74	100	26,15	0,72	-	-	27,32	6,83	0,53	-	-
saSi/PVPn alla	-8,0	0,74	100	26,88	0,71	-	-	28,08	7,02	0,53	-	-
saSi/PVPn alla	-9,0	0,74	100	27,60	0,71	-	-	28,84	7,21	0,52	-	-
saSi/PVPn alla	-10,0	0,74	100	28,33	0,70	-	-	29,60	7,40	0,52	-	-
saSi/PVPn alla	-11,0	0,74	100	29,05	0,70	-	-	30,35	7,59	0,52	-	-
saSi/PVPn alla	-12,0	0,74	100	29,76	0,69	-	-	31,10	7,77	0,51	-	-
saSi/PVPn alla	-13,0	0,74	100	30,48	0,69	-	-	31,85	7,96	0,51	-	-
saSi/PVPn alla	-14,0	0,74	100	31,20	0,68	-	-	32,59	8,15	0,50	-	-
saSi/PVPn alla	-15,0	0,74	100	31,91	0,68	-	-	33,34	8,33	0,50	-	-
saSi/PVPn alla	-16,0	0,74	100	32,62	0,67	-	-	34,08	8,52	0,50	-	-

Taulukko 8. Alustaluvut jännityseksponentin maksimiarvoilla (saSi).

Maalaji	Taso	Yhdistykseen Poissonin vakio $\nu$	Jännityseksponentti $\beta$	Kokoonpuristus- moduuli $M$ [MPa]	Kohesiomaa (pitkäaik.)/ Poulos ( $\sigma=1$ )		
					Alustalukukerroin nhi Poulos ( $\sigma=1$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustalukukerros	
						$y < y_{m/5}$	$y \geq y_{m/5}$
Maanpinta	20,0				0,0		
Paalun yläpää	16,7				0,0		
Paalun yläpää	16,7	0,95	0,50	48,74	13,99	-	-
Penger	16,0	0,95	0,50	53,67	12,71	-	-
Täyttö/PVP:n alla	15,0	0,95	0,50	57,55	10,90	-	-
hHk/PVP:n alla	14,0	0,83	0,50	20,20	2,81	-	-
saSiPVP:n alla	13,0	0,74	0,30	3,23	0,34	3,37	0,84
saSiPVP:n alla	12,0	0,74	0,30	3,41	0,32	3,56	0,89
saSiPVP:n alla	11,0	0,74	0,30	3,59	0,30	3,75	0,94
saSiPVP:n alla	10,0	0,74	0,30	3,76	0,28	3,93	0,98
saSiPVP:n alla	9,0	0,74	0,30	3,93	0,27	4,10	1,03
saSiPVP:n alla	8,0	0,74	0,30	4,10	0,25	4,28	1,07
saSiPVP:n alla	7,0	0,74	0,30	4,26	0,24	4,45	1,11
saSiPVP:n alla	6,0	0,74	0,30	4,42	0,23	4,62	1,15
saSiPVP:n alla	5,0	0,74	0,30	4,58	0,23	4,78	1,20
saSiPVP:n alla	4,0	0,74	0,30	4,74	0,22	4,95	1,24
saSiPVP:n alla	3,0	0,74	0,30	4,89	0,21	5,11	1,28
saSiPVP:n alla	2,0	0,74	0,30	5,04	0,21	5,27	1,32
saSiPVP:n alla	1,0	0,74	0,30	5,19	0,20	5,43	1,36
saSiPVP:n alla	0,0	0,74	0,30	5,34	0,20	5,58	1,40
saSiPVP:n alla	-1,0	0,74	0,30	5,49	0,19	5,73	1,43
saSiPVP:n alla	-2,0	0,74	0,30	5,63	0,19	5,89	1,47
saSiPVP:n alla	-3,0	0,74	0,30	5,78	0,19	6,04	1,51
saSiPVP:n alla	-4,0	0,74	0,30	5,92	0,18	6,18	1,55
saSiPVP:n alla	-5,0	0,74	0,30	6,06	0,18	6,33	1,58
saSiPVP:n alla	-6,0	0,74	0,30	6,20	0,18	6,48	1,62
saSiPVP:n alla	-7,0	0,74	0,30	6,34	0,17	6,62	1,66
saSiPVP:n alla	-8,0	0,74	0,30	6,47	0,17	6,76	1,69
saSiPVP:n alla	-9,0	0,74	0,30	6,61	0,17	6,90	1,73
saSiPVP:n alla	-10,0	0,74	0,30	6,74	0,17	7,04	1,76
saSiPVP:n alla	-11,0	0,74	0,30	6,88	0,16	7,18	1,80
saSiPVP:n alla	-12,0	0,74	0,30	7,01	0,16	7,32	1,83
saSiPVP:n alla	-13,0	0,74	0,30	7,14	0,16	7,46	1,86
saSiPVP:n alla	-14,0	0,74	0,30	7,27	0,16	7,59	1,90
saSiPVP:n alla	-15,0	0,74	0,30	7,40	0,16	7,73	1,93
saSiPVP:n alla	-16,0	0,74	0,30	7,52	0,16	7,86	1,97



Taulukko 9. Alustaluvut Poissonin vakion minimiarvoilla.

Materiaali	Taso	Poissonin vakio $\nu$	Yhdistetyn kerronin $\beta$ Poissonin vakioista	Kokoontuunisuutus moduuli $M$ [MPa]	Alustakerronin moduuli $E$ [MPa] [ $MN/m^2$ ]	Alustakerronin Terzaghi ( $\alpha=0,74$ ) [ $MN/m^2$ ]	Kiftamaa/Poulos ( $\alpha=1$ )		Koheesiomaa (pitkäaik.) Poulos ( $\alpha=1$ )		Kiftamaa/Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )	
							$\nu < \gamma_{ym}$	$\nu < \gamma_{ym}$	$\nu < \gamma_{ym5}$	$\nu < \gamma_{ym5}$	$\nu < \gamma_{ym}$	$\nu < \gamma_{ym}$
Maanpinta	20,0						0,0		0,0		0,0	
Paahtun yläpää	16,7						0,0		0,0		0,0	
Paahtun yläpää	16,7	0,15	0,95	48,74	13,99	10,35	64,93	21,64	-	-	48,05	16,02
Penger	16,0	0,15	0,95	53,67	12,71	9,40	71,48	23,83	-	-	52,90	17,63
Täyttö/PVP:n alla	15,0	0,15	0,95	57,55	10,90	8,07	76,66	25,55	-	-	56,73	18,91
hHk/PVP:n alla	14,0	0,15	0,95	20,20	3,19	2,36	26,91	8,97	-	-	19,91	6,64
saSi/PVP:n alla	13,0	0,25	0,83	3,30	0,39	0,29	-	-	3,86	0,97	-	-
saSi/PVP:n alla	12,0	0,25	0,83	3,53	0,37	0,27	-	-	4,14	1,04	-	-
saSi/PVP:n alla	11,0	0,25	0,83	3,77	0,35	0,26	-	-	4,42	1,11	-	-
saSi/PVP:n alla	10,0	0,25	0,83	4,01	0,33	0,25	-	-	4,70	1,17	-	-
saSi/PVP:n alla	9,0	0,25	0,83	4,24	0,32	0,24	-	-	4,97	1,24	-	-
saSi/PVP:n alla	8,0	0,25	0,83	4,48	0,31	0,23	-	-	5,25	1,31	-	-
saSi/PVP:n alla	7,0	0,25	0,83	4,71	0,30	0,22	-	-	5,52	1,38	-	-
saSi/PVP:n alla	6,0	0,25	0,83	4,94	0,29	0,22	-	-	5,79	1,45	-	-
saSi/PVP:n alla	5,0	0,25	0,83	5,17	0,29	0,21	-	-	6,06	1,51	-	-
saSi/PVP:n alla	4,0	0,25	0,83	5,40	0,28	0,21	-	-	6,32	1,58	-	-
saSi/PVP:n alla	3,0	0,25	0,83	5,62	0,28	0,20	-	-	6,59	1,65	-	-
saSi/PVP:n alla	2,0	0,25	0,83	5,85	0,27	0,20	-	-	6,86	1,71	-	-
saSi/PVP:n alla	1,0	0,25	0,83	6,07	0,27	0,20	-	-	7,12	1,78	-	-
saSi/PVP:n alla	0,0	0,25	0,83	6,30	0,26	0,19	-	-	7,38	1,85	-	-
saSi/PVP:n alla	-1,0	0,25	0,83	6,52	0,26	0,19	-	-	7,64	1,91	-	-
saSi/PVP:n alla	-2,0	0,25	0,83	6,74	0,26	0,19	-	-	7,91	1,98	-	-
saSi/PVP:n alla	-3,0	0,25	0,83	6,97	0,25	0,19	-	-	8,17	2,04	-	-
saSi/PVP:n alla	-4,0	0,25	0,83	7,19	0,25	0,18	-	-	8,42	2,11	-	-
saSi/PVP:n alla	-5,0	0,25	0,83	7,41	0,25	0,18	-	-	8,68	2,17	-	-
saSi/PVP:n alla	-6,0	0,25	0,83	7,63	0,24	0,18	-	-	8,94	2,23	-	-
saSi/PVP:n alla	-7,0	0,25	0,83	7,85	0,24	0,18	-	-	9,20	2,30	-	-
saSi/PVP:n alla	-8,0	0,25	0,83	8,06	0,24	0,18	-	-	9,45	2,36	-	-
saSi/PVP:n alla	-9,0	0,25	0,83	8,28	0,24	0,18	-	-	9,71	2,43	-	-
saSi/PVP:n alla	-10,0	0,25	0,83	8,50	0,24	0,17	-	-	9,96	2,49	-	-
saSi/PVP:n alla	-11,0	0,25	0,83	8,71	0,23	0,17	-	-	10,21	2,55	-	-
saSi/PVP:n alla	-12,0	0,25	0,83	8,93	0,23	0,17	-	-	10,47	2,62	-	-
saSi/PVP:n alla	-13,0	0,25	0,83	9,14	0,23	0,17	-	-	10,72	2,68	-	-
saSi/PVP:n alla	-14,0	0,25	0,83	9,36	0,23	0,17	-	-	10,97	2,74	-	-
saSi/PVP:n alla	-15,0	0,25	0,83	9,57	0,23	0,17	-	-	11,22	2,80	-	-
saSi/PVP:n alla	-16,0	0,25	0,83	9,79	0,23	0,17	-	-	11,47	2,87	-	-

Taulukko 10. Alustaluvut Poissonin vakion maksimiarvoilla.

Materiaali	Taso	Poissonin vakio $\nu$	Yhtälön kerroin $\beta$	Poissonin vakioita	Kokoontuottavuuden odotus $M$ [MPa]	Aksiaalikuormituksen Poulos ( $\sigma=1$ ) [MN/m <sup>2</sup> 3]	Kitkanmaa/Poulos ( $\alpha=1$ )		Kohesiomaa (pitkäaik.)Poulos ( $\beta=1$ )		Kitkanmaa/Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )	
							Aksiaalikuormituksen Terzaghi ( $\sigma=0,74$ ) [MN/m <sup>2</sup> 3]	Aksiaalikuormituksen y<y <sub>yn04</sub>	Aksiaalikuormituksen y>y <sub>yn04</sub>	Aksiaalikuormituksen y<y <sub>yn05</sub>	Aksiaalikuormituksen y>y <sub>yn05</sub>	Aksiaalikuormituksen y<y <sub>yn04</sub>
Maanpinta	20,0						0,0		0,0		0,0	
Paalun yläpää	16,7						0,0		0,0		0,0	
Paalun yläpää	16,7	0,25	0,83	48,74	12,31	9,11	57,13	19,04	-	-	42,28	14,09
Penger	16,0	0,25	0,83	53,67	11,18	8,27	62,90	20,97	-	-	46,55	15,52
Täyttö/PVP:n alla	15,0	0,25	0,83	57,55	9,59	7,10	67,45	22,48	-	-	49,91	16,64
hHle/PVP:n alla	14,0	0,25	0,83	20,20	2,81	2,08	23,67	7,89	-	-	17,52	5,84
saSi/PVP:n alla	13,0	0,35	0,62	3,30	0,29	0,22	-	-	2,89	0,72	-	-
saSi/PVP:n alla	12,0	0,35	0,62	3,53	0,28	0,20	-	-	3,10	0,77	-	-
saSi/PVP:n alla	11,0	0,35	0,62	3,77	0,26	0,19	-	-	3,31	0,83	-	-
saSi/PVP:n alla	10,0	0,35	0,62	4,01	0,25	0,18	-	-	3,51	0,88	-	-
saSi/PVP:n alla	9,0	0,35	0,62	4,24	0,24	0,18	-	-	3,72	0,93	-	-
saSi/PVP:n alla	8,0	0,35	0,62	4,48	0,23	0,17	-	-	3,92	0,98	-	-
saSi/PVP:n alla	7,0	0,35	0,62	4,71	0,23	0,17	-	-	4,13	1,03	-	-
saSi/PVP:n alla	6,0	0,35	0,62	4,94	0,22	0,16	-	-	4,33	1,08	-	-
saSi/PVP:n alla	5,0	0,35	0,62	5,17	0,21	0,16	-	-	4,53	1,13	-	-
saSi/PVP:n alla	4,0	0,35	0,62	5,40	0,21	0,16	-	-	4,73	1,18	-	-
saSi/PVP:n alla	3,0	0,35	0,62	5,62	0,21	0,15	-	-	4,93	1,23	-	-
saSi/PVP:n alla	2,0	0,35	0,62	5,85	0,20	0,15	-	-	5,13	1,28	-	-
saSi/PVP:n alla	1,0	0,35	0,62	6,07	0,20	0,15	-	-	5,32	1,33	-	-
saSi/PVP:n alla	0,0	0,35	0,62	6,30	0,20	0,15	-	-	5,52	1,38	-	-
saSi/PVP:n alla	-1,0	0,35	0,62	6,52	0,19	0,14	-	-	5,72	1,43	-	-
saSi/PVP:n alla	-2,0	0,35	0,62	6,74	0,19	0,14	-	-	5,91	1,48	-	-
saSi/PVP:n alla	-3,0	0,35	0,62	6,97	0,19	0,14	-	-	6,10	1,53	-	-
saSi/PVP:n alla	-4,0	0,35	0,62	7,19	0,19	0,14	-	-	6,30	1,57	-	-
saSi/PVP:n alla	-5,0	0,35	0,62	7,41	0,18	0,14	-	-	6,49	1,62	-	-
saSi/PVP:n alla	-6,0	0,35	0,62	7,63	0,18	0,14	-	-	6,68	1,67	-	-
saSi/PVP:n alla	-7,0	0,35	0,62	7,85	0,18	0,13	-	-	6,88	1,72	-	-
saSi/PVP:n alla	-8,0	0,35	0,62	8,06	0,18	0,13	-	-	7,07	1,77	-	-
saSi/PVP:n alla	-9,0	0,35	0,62	8,28	0,18	0,13	-	-	7,26	1,81	-	-
saSi/PVP:n alla	-10,0	0,35	0,62	8,50	0,18	0,13	-	-	7,45	1,86	-	-
saSi/PVP:n alla	-11,0	0,35	0,62	8,71	0,18	0,13	-	-	7,64	1,91	-	-
saSi/PVP:n alla	-12,0	0,35	0,62	8,93	0,17	0,13	-	-	7,83	1,96	-	-
saSi/PVP:n alla	-13,0	0,35	0,62	9,14	0,17	0,13	-	-	8,01	2,00	-	-
saSi/PVP:n alla	-14,0	0,35	0,62	9,36	0,17	0,13	-	-	8,20	2,05	-	-
saSi/PVP:n alla	-15,0	0,35	0,62	9,57	0,17	0,13	-	-	8,39	2,10	-	-
saSi/PVP:n alla	-16,0	0,35	0,62	9,79	0,17	0,13	-	-	8,58	2,14	-	-



Taulukko 2. Paaluun kohdistuvan maanpaineen  $p_m$  ääriarvot.

Taso (maapinta +0,00)	Leikkauskestävyyskulma 37°		Leikkauskestävyyskulma 30°	
	$p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtälön kerroin 3	$p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtälön kerroin 4,4	$p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtälön kerroin 3	$p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtälön kerroin 4,4
-0,5	0,054	0,080	0,041	0,059
-1,0	0,109	0,159	0,081	0,119
-1,5	0,163	0,239	0,122	0,178
-2,0	0,217	0,319	0,162	0,238
-2,5	0,272	0,398	0,203	0,297
-2,7	0,297	0,435	0,221	0,324
-3,0	0,326	0,478	0,243	0,356
-3,5	0,380	0,558	0,284	0,416
-4,0	0,434	0,637	0,324	0,475

Taulukko 3. Rajasiirtymät  $y_m$  ja  $y_m/4$ , kun leikkauskestävyyskulma 37°.

Taso (maapinta +0,00)	Poulos				Terzaghi				Leikkauskestävyyskulma			
	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4
-0,5	16,8	24,6	4,2	6,2	22,7	33,2	5,7	8,3	15,2	22,3	3,8	5,6
-1,0	23,7	34,8	5,9	8,7	32,1	47,0	8,0	11,8	15,2	22,3	3,8	5,6
-1,5	29,1	42,6	7,3	10,7	39,3	57,6	9,8	14,4	15,2	22,3	3,8	5,6
-2,0	33,5	49,2	8,4	12,3	45,3	66,5	11,3	16,6	15,2	22,3	3,8	5,6
-2,5	37,5	55,0	9,4	13,8	50,7	74,3	12,7	18,6	15,2	22,3	3,8	5,6
-3,0	43,1	63,2	10,8	15,8	58,2	85,4	14,6	21,3	16,7	24,5	4,2	6,1
-3,5	50,2	73,7	12,6	18,4	67,9	99,6	17,0	24,9	19,5	28,6	4,9	7,1
-4,0	57,4	84,2	14,4	21,1	77,6	113,8	19,4	28,5	22,3	32,7	5,6	8,2

Taulukko 4. Rajasiirtymät  $y_m$  ja  $y_m/4$ , kun leikkauskestävyyskulma  $30^\circ$ .

Taso (maanpinta +0,00)	Poulos				Terzaghi				Leikkauskestävyyskulma			
	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4
-0,5	12,5	18,3	3,1	4,6	16,9	24,8	4,2	6,2	73,7	108,1	18,4	27,0
-1,0	17,7	25,9	4,4	6,5	23,9	35,1	6,0	8,8	73,7	108,1	18,4	27,0
-1,5	21,7	31,8	5,4	7,9	29,3	42,9	7,3	10,7	73,7	108,1	18,4	27,0
-2,0	25,0	36,7	6,3	9,2	33,8	49,6	8,5	12,4	73,7	108,1	18,4	27,0
-2,5	28,0	41,0	7,0	10,3	37,8	55,4	9,4	13,9	73,7	108,1	18,4	27,0
-3,0	32,1	47,1	8,0	11,8	43,4	63,7	10,9	15,9	81,0	118,8	20,3	29,7
-3,5	37,5	55,0	9,4	13,7	50,6	74,3	12,7	18,6	94,5	138,6	23,6	34,7
-4,0	42,8	62,8	10,7	15,7	57,9	84,9	14,5	21,2	108,0	158,4	27,0	39,6

Taulukko 5. Jousivakiot  $k_1$  ja  $k_2$ , kun leikkauskestävyyskulma  $37^\circ$ .

Taso	Poulos		Terzaghi		Leikkauskestävyyskulma	
	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/4}$
-0,5	0,884	0,295	0,654	0,218	0,975	0,325
-1,0	1,250	0,417	0,925	0,308	1,950	0,650
-1,5	1,531	0,510	1,133	0,378	2,925	0,975
-2,0	1,768	0,589	1,308	0,436	3,900	1,300
-2,5	1,976	0,659	1,463	0,488	4,875	1,625
-3,0	2,065	0,688	1,528	0,509	5,324	1,775
-3,5	2,065	0,688	1,528	0,509	5,324	1,775
-4,0	2,065	0,688	1,528	0,509	5,324	1,775

Taulukko 6. Jousivakiot  $k_1$  ja  $k_2$ , kun leikkauskestävyyskulma  $30^\circ$ .

Taso	Poulos		Terzaghi		Leikkauskestävyyskulma	
	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/4}$
- 0,50	0,88	0,29	0,65	0,22	0,15	0,05
- 1,00	1,25	0,42	0,93	0,31	0,30	0,10
- 1,50	1,53	0,51	1,13	0,38	0,45	0,15
- 2,00	1,77	0,59	1,31	0,44	0,60	0,20
- 2,50	1,98	0,66	1,46	0,49	0,75	0,25
- 3,00	2,07	0,69	1,53	0,51	0,82	0,27
- 3,50	2,07	0,69	1,53	0,51	0,82	0,27
- 4,00	2,07	0,69	1,53	0,51	0,82	0,27

# Koekuormitettu paalupari siltissä: laskennat

Taulukko 1. Alustaluvut (oletus: kittamaa).

Taso	Pystyjännitys $\sigma'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Yhtälön kerroin $\beta$ Poissonin vakiosta	Kokoonpuristuvuus moduuli $M$ [MPa]	Poulos ( $\alpha=1$ )			Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )			Leikkaukestävyyskulma			Vesic	
				Alustalukukerroin n <sub>h</sub> Poulos ( $\alpha=1$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y < y <sub>m/4</sub>	Alustaluku ks <sup>3</sup> [MN/m <sup>3</sup> ], kun y > y <sub>m/4</sub>	Alustalukukerroin n <sub>h</sub> Terzaghi ( $\alpha=0,74$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y < y <sub>m/4</sub>	Alustaluku ks <sup>3</sup> [MN/m <sup>3</sup> ], kun y > y <sub>m/4</sub>	Alustalukukerroin n <sub>h</sub> [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y < y <sub>m/4</sub>	Alustaluku ks <sup>3</sup> [MN/m <sup>3</sup> ], kun y > y <sub>m/4</sub>		
0,0				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,5	9,0	0,74	0,89	1,33	1,14	0,85	0,98	2,34	6,45	2,15	2,50	2,50	10,48	3,49
-1,0	17,9	0,74	1,42	1,05	1,81	1,34	0,78	4,02	12,91	4,30	2,50	2,50	10,48	3,49
-1,5	26,9	0,74	1,85	0,92	2,37	1,75	0,68	5,26	19,36	6,45	2,50	2,50	10,48	3,49
-1,9	34,7	0,74	2,20	0,84	2,81	2,08	0,62	6,24	25,00	8,33	2,50	2,50	10,48	3,49
-2,0	35,8	0,74	2,24	0,83	2,81	2,08	0,62	6,24	25,00	8,33	2,50	2,50	10,48	3,49
-2,5	44,8	0,74	2,60	0,77	2,81	2,08	0,57	6,24	25,00	8,33	2,50	2,50	10,48	3,49
-3,0	53,7	0,74	2,94	0,73	2,81	2,08	0,54	6,24	25,00	8,33	2,50	2,50	10,48	3,49
-3,5	62,7	0,74	3,25	0,69	2,81	2,08	0,51	6,24	25,00	8,33	2,50	2,50	10,48	3,49
-4,0	71,6	0,74	3,56	0,66	2,81	2,08	0,49	6,24	25,00	8,33	2,50	2,50	10,48	3,49
-4,5	80,6	0,74	3,85	0,63	2,81	2,08	0,47	6,24	25,00	8,33	2,50	2,50	10,48	3,49
-5,0	89,5	0,74	4,12	0,61	2,81	2,08	0,45	6,24	25,00	8,33	2,50	2,50	10,48	3,49
-5,5	98,5	0,74	4,39	0,59	2,81	2,08	0,44	6,24	25,00	8,33	2,50	2,50	10,48	3,49
-6,0	107,4	0,74	4,66	0,58	2,81	2,08	0,43	6,24	25,00	8,33	2,50	2,50	10,48	3,49

Taulukko 2. Alustaluvut (oletus: koheesiomaa).

Taso	Pystyjännitys $\sigma'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Yhtälön kerroin $\beta$ Poissonin vakioista	Kokoonpuristuvuus moduuli $M$ [MPa]	Poulos ( $\alpha=1$ )/pitkäaik.			Leikkauksjännitys/ lyhytaik.		Leikkauksjännitys/ pitkäaik.		Vesivyörytaik.		Vesipitkäaik.	
				Alustaluku $\sigma$ , 25ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y > y_m/5$	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_m/5$	Alustalukukerroin $n_h$ / Poulos ( $\alpha=1$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku $\sigma$ , 2ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y > y_m/6$	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_m/6$	Alustaluku $\sigma$ , 2ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y > y_m/6$	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_m/6$	Alustaluku $\sigma$ , 25ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y > y_m/5$	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_m/5$	Alustaluku $\sigma$ , 2ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y > y_m/6$	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun $y < y_m/6$
0,0				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,3	5,2	0,74	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,3	5,2	0,74	0,62	1,59	2,39	0,60	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-0,5	9,0	0,74	0,89	1,33	3,42	0,86	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-1,0	17,9	0,74	1,42	1,05	5,42	1,36	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-1,5	26,9	0,74	1,85	0,92	7,10	1,78	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-2,0	35,8	0,74	2,24	0,83	8,60	2,15	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-2,5	44,8	0,74	2,60	0,77	9,97	2,49	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-3,0	53,7	0,74	2,94	0,73	11,25	2,81	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-3,5	62,7	0,74	3,25	0,69	12,46	3,12	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-4,0	71,6	0,74	3,56	0,66	13,62	3,40	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-4,5	80,6	0,74	3,85	0,63	14,73	3,68	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-5,0	89,5	0,74	4,12	0,61	15,79	3,95	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-5,5	98,5	0,74	4,39	0,59	16,83	4,21	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62
-6,0	107,4	0,74	4,66	0,58	17,83	4,46	23,20	4,64	7,73	1,93	10,48	2,10	10,48	2,62



Taulukko 3. Paaluun kohdistuvan maanpaineen  $p_m$  ääriarvot.

Taso (maanpinta +0,00)	Leikkauskestävyyskulma 33°		Leikkauslujuus 30 kPa	
	$p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtälön kerroin 3	$p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtälön kerroin 4,4	$p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtälön kerroin 6	$p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtälön kerroin 9
-0,5	0,091	0,134	0,180	0,270
-1,0	0,182	0,267	0,180	0,270
-1,5	0,273	0,401	0,180	0,270
-1,9	0,353	0,517	0,180	0,270
-2,0	0,364	0,534	0,180	0,270
-2,5	0,455	0,668	0,180	0,270
-3,0	0,546	0,801	0,180	0,270
-3,5	0,638	0,935	0,180	0,270
-4,0	0,729	1,069	0,180	0,270
-4,5	0,820	1,202	0,180	0,270
-5,0	0,911	1,336	0,180	0,270
-5,5	1,002	1,469	0,180	0,270
-6,0	1,093	1,603	0,180	0,270

Taulukko 4. Rajasiirtymät  $y_m$  ja  $y_m/4$ , kun leikkauskestävyyskulma  $33^\circ$ .

Taso (maan pinta +0,00)	Poulos				Terzaghi				Leikkauskestävyyskulma			
	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 3	$y_m/4$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 4,4
-0,5	53,1	77,9	13,3	19,5	71,8	105,3	17,9	26,3	28,2	41,4	7,1	10,3
-1,0	67,1	98,3	16,8	24,6	90,6	132,9	22,7	33,2	28,2	41,4	7,1	10,3
-1,5	76,8	112,7	19,2	28,2	103,8	152,3	26,0	38,1	28,2	41,4	7,1	10,3
-1,9	83,7	122,8	20,9	30,7	113,2	166,0	28,3	41,5	28,2	41,4	7,1	10,3
-2,0	86,5	126,8	21,6	31,7	116,8	171,4	29,2	42,8	29,1	42,7	7,3	10,7
-2,5	108,1	158,5	27,0	39,6	146,0	214,2	36,5	53,5	36,4	53,4	9,1	13,4
-3,0	129,7	190,2	32,4	47,6	175,2	257,0	43,8	64,3	43,7	64,1	10,9	16,0
-3,5	151,3	221,9	37,8	55,5	204,5	299,9	51,1	75,0	51,0	74,8	12,8	18,7
-4,0	172,9	253,6	43,2	63,4	233,7	342,7	58,4	85,7	58,3	85,5	14,6	21,4
-4,5	194,5	285,3	48,6	71,3	262,9	385,5	65,7	96,4	65,6	96,2	16,4	24,0
-5,0	216,1	317,0	54,0	79,3	292,1	428,4	73,0	107,1	72,9	106,9	18,2	26,7
-5,5	237,8	348,7	59,4	87,2	321,3	471,2	80,3	117,8	80,1	117,6	20,0	29,4
-6,0	259,4	380,4	64,8	95,1	350,5	514,1	87,6	128,5	87,4	128,2	21,9	32,1

Taulukko 5. Rajasiirtymät  $y_m$ ,  $y_m/5$  ja  $y_m/6$ , kun suljettu leikkauslujuus 30 kPa.

Taso (maan pinta +0,00)	Poulos/ Pitkääik.		Leikkauslujuus/ lyhytaik.		Leikkauslujuus/ pitkäaik.		Vesic/ lyhytaik.		Vesic/ pitkäaik.	
	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 6	$y_m/5$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 6	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 9	$y_m/6$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 9	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 6	$y_m/5$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 6	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 9	$y_m/6$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 9	$y_m$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 6	$y_m/5$ [mm], kun $p_m$ yhtälön kerroin 6
-0,5	131,4	26,3	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-1,0	83,0	16,6	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-1,5	63,4	12,7	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-2,0	52,4	10,5	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-2,5	45,1	9,0	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-3,0	40,0	8,0	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-3,5	36,1	7,2	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-4,0	33,0	6,6	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-4,5	30,6	6,1	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-5,0	28,5	5,7	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-5,5	26,7	5,3	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6
-6,0	25,2	5,0	34,9	5,8	58,2	11,6	77,3	12,9	43,0	8,6

Taulukko 6. Jousivakiot  $k_1$  ja  $k_2$ , kun leikkauskestävyyskulma  $33^\circ$ .

Taso (maan pinta +0,00)	Poulos		Terzaghi		Leikkauskestä- vyyskulma		Vesic	
	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/4}$
-0,5	0,33	0,11	0,25	0,08	0,63	0,21	1,02	0,34
-1,0	0,53	0,18	0,39	0,13	1,25	0,42	1,02	0,34
-1,5	0,69	0,23	0,51	0,17	1,88	0,63	1,02	0,34
-2,0	0,82	0,27	0,60	0,20	2,42	0,81	1,02	0,34
-2,5	0,82	0,27	0,60	0,20	2,42	0,81	1,02	0,34
-3,0	0,82	0,27	0,60	0,20	2,42	0,81	1,02	0,34
-3,5	0,82	0,27	0,60	0,20	2,42	0,81	1,02	0,34
-4,0	0,82	0,27	0,60	0,20	2,42	0,81	1,02	0,34
-4,5	0,82	0,27	0,60	0,20	2,42	0,81	1,02	0,34
-5,0	0,82	0,27	0,60	0,20	2,42	0,81	1,02	0,34
-5,5	0,82	0,27	0,60	0,20	2,42	0,81	1,02	0,34
-6,0	0,82	0,27	0,60	0,20	2,42	0,81	1,02	0,34

Taulukko 7. Jousivakiot  $k_1$  ja  $k_2$ , kun leikkauslujuus 30 kPa.

Taso (maan pinta +0,00)	Poulos/ pitkäaik.		Leikkauslujuus/ lyhytaik.		Leikkauslujuus/ pitkäaik.		Vesic/ lyhytaik.		Vesic/ pitkäaik.	
	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/5}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/5}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/6}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/6}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/5}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/5}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/6}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/6}$	Jousivakio $k_1$ [MN/m], kun $y < y_{m/5}$	Jousivakio $k_2$ [MN/m], kun $y > y_{m/5}$
-0,5	0,33	0,08	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-1,0	0,53	0,13	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-1,5	0,69	0,17	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-2,0	0,83	0,21	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-2,5	0,97	0,24	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-3,0	1,09	0,27	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-3,5	1,21	0,30	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-4,0	1,32	0,33	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-4,5	1,43	0,36	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-5,0	1,53	0,38	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-5,5	1,63	0,41	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25
-6,0	1,73	0,43	2,25	0,45	0,75	0,19	1,02	0,20	1,02	0,25

# Koekuormitettu paaluryhmä kerroksellisessa maassa: laskennat

Taulukko 1. Redusoimattomat alustaluvut

Taso	Poulos ( $\alpha=1$ )			Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )			Leikkauskestävyyskulma			Leikkausjännitys		
	Alustalukukerroin nh' Poulos ( $\alpha=1$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y<y <sub>m</sub> /4	Alustaluku ks3 [MN/m <sup>3</sup> ], kun y>y <sub>m</sub> /4	Alustalukukerroin nh' Terzaghi ( $\alpha=0,74$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y<y <sub>m</sub> /4	Alustaluku ks3 [MN/m <sup>3</sup> ], kun y>y <sub>m</sub> /4	Alustalukukerroin nh	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y<y <sub>m</sub> /4	Alustaluku ks3 [MN/m <sup>3</sup> ], kun y>y <sub>m</sub> /4	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y<y <sub>m</sub> /6	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y>y <sub>m</sub> /6	
	Moduuliluku m	Yhtälön kerroin $\beta$ Poissonin vakiosta	Pystyjännitys $\sigma'$ [kN/m <sup>2</sup> ]									
0,0				0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00		
-0,5	8	0,95	600	32,84	50,68	16,89	24,30	37,50	12,50	6,17	-	
-1,5	25	0,95	600	18,96	87,78	29,26	14,03	64,96	21,65	18,52	-	
-2,5	34	0,74	20	0,18	-	-	0,13	-	-	-	18,98	
-3,5	43	0,74	60	0,71	-	-	0,52	-	-	-	23,15	
-4,5	52	0,74	20	0,16	-	-	0,12	-	-	-	18,52	
-5,5	60	0,95	500	6,69	66,94	22,31	4,95	49,54	16,51	16,00	-	
-6,5	70	0,74	60	0,53	-	-	0,39	-	-	-	26,39	
-7,5	79	0,74	60	0,50	-	-	0,37	-	-	-	26,39	
-8,5	85	0,83	200	1,81	18,11	6,04	1,34	13,40	4,47	5,00	-	
-9,5	92	0,83	200	1,68	16,83	5,61	1,25	12,46	4,15	5,00	-	
-10,5	99	0,83	200	1,58	15,77	5,26	1,17	11,67	3,89	5,00	-	
-11,5	105	0,83	200	1,49	14,88	4,96	1,10	11,01	3,67	5,00	-	
-12,5	112	0,83	200	1,41	14,12	4,71	1,04	10,45	3,48	5,00	-	

Taulukko 2. Redusoidut alustaluvut.

Taso	Pystyjännitys $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Yhtälön kerroin $\beta$ Poissonin vakiosta	Kokoonpistuvuus moduuli $M$ [MPa]	Poulos ( $\alpha=1$ )			Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )			Leikkauskestävyyskuima			Leikkausjuuus, kivytäk.	
				Alustalukukerroin nh/Poulos ( $\alpha=1$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y<ym/4	Alustaluku ks/3 [MN/m <sup>3</sup> ], kun y>ym/4	Alustalukukerroin nh/ Terzaghi ( $\alpha=0,74$ ) [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y<ym/4	Alustaluku ks/3 [MN/m <sup>3</sup> ], kun y>ym/4	Alustalukukerroin nh [MN/m <sup>3</sup> ]	Alustaluku ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y<ym/4	Alustaluku ks/3 [MN/m <sup>3</sup> ], kun y>ym/4	Alustaluku 0,2ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y>ym/6	Alustaluku 0,2ks [MN/m <sup>3</sup> ], kun y>ym/6
0,0				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,5	8	0,95	17,34	23,99	8,00	5,92	24,30	17,75	8,77	2,92	12,00	8,77	-	-
-1,5	25	0,95	30,03	41,55	13,85	10,25	14,03	30,75	26,30	8,77	12,00	26,30	-	-
-2,5	34	0,74	0,61	-	-	-	0,13	-	-	-	-	-	8,98	1,80
-3,5	43	0,74	3,34	-	-	-	0,52	-	-	-	-	-	10,96	2,19
-4,5	52	0,74	0,98	-	-	-	0,12	-	-	-	-	-	8,77	1,75
-5,5	60	0,95	38,87	31,69	10,56	7,82	4,95	23,45	22,72	7,57	4,80	22,72	-	-
-6,5	70	0,74	4,65	-	-	-	0,39	-	-	-	-	-	12,49	2,50
-7,5	79	0,74	5,07	-	-	-	0,37	-	-	-	-	-	12,49	2,50
-8,5	85	0,83	18,48	8,57	2,86	2,12	1,34	6,35	7,10	2,37	1,50	7,10	-	-
-9,5	92	0,83	19,19	7,97	2,66	1,97	1,25	5,90	7,10	2,37	1,50	7,10	-	-
-10,5	99	0,83	19,87	7,47	2,49	1,84	1,17	5,52	7,10	2,37	1,50	7,10	-	-
-11,5	105	0,83	20,54	7,04	2,35	1,74	1,10	5,21	7,10	2,37	1,50	7,10	-	-
-12,5	112	0,83	21,18	6,68	2,23	1,65	1,04	4,95	7,10	2,37	1,50	7,10	-	-

Taulukko 3. Paaluun kohdistuvan maanpaineen  $p_m$  ääriarvot.

Taso	Kitkamaa $p_m$		Koheesiomaa $p_m$	
	Paaluun kohdistuvan paineen ääriarvo $p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtä- lön kerroin 3	Paaluun kohdistuvan paineen ääriarvo $p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtä- lön kerroin 4,4	Paaluun kohdistuvan paineen ääriarvo $p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtä- lön kerroin 6	Paaluun kohdistuvan paineen ääriarvo $p_m$ [MN/m <sup>2</sup> ], kun yhtä- lön kerroin 9
-0,5	0,12	0,17	-	-
-1,5	0,35	0,51	-	-
-2,5	-	-	0,25	0,37
-3,5	-	-	0,30	0,45
-4,5	-	-	0,24	0,36
-5,5	0,56	0,82	-	-
-6,5	-	-	0,34	0,51
-7,5	-	-	0,34	0,51
-8,5	0,58	0,85	-	-
-9,5	0,65	0,95	-	-
-10,5	0,72	1,05	-	-
-11,5	0,78	1,15	-	-
-12,5	0,85	1,25	-	-

Taulukko 4. Rajasiirtymät ym, ym/4, ym/5 ja ym/6 redusoimattomilla alustaluvuilla.

Taso	Poulos ( $\alpha=1,0$ )				Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )				Leikkauskestävyyskulma				Leikkauslujuus, $M_{\text{vraik}}$			
	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym/4 [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym/4 [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym/4 [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym/4 [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 9	ym/6 [mm], kun pm yhtälön kerroin 9
-0,5	4,5	6,7	1,1	1,7	6,1	9,0	1,5	2,3	12,4	18,2	3,1	4,6	-	-	-	-
-1,5	7,9	11,5	2,0	2,9	10,6	15,6	2,7	3,9	12,4	18,2	3,1	4,6	-	-	-	-
-2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,3	9,7	-
-3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,3	9,7	-
-4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,3	9,7	-
-5,5	16,8	24,6	4,2	6,2	22,7	33,3	5,7	8,3	23,4	34,3	5,9	8,6	-	-	-	-
-6,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,3	9,7	-
-7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,3	9,7	-
-8,5	64,0	93,8	16,0	23,5	86,5	126,8	21,6	31,7	77,3	113,3	19,3	28,3	-	-	-	-
-9,5	77,0	112,9	19,2	28,2	104,0	152,5	26,0	38,1	86,4	126,7	21,6	31,7	-	-	-	-
-10,5	90,8	133,1	22,7	33,3	122,7	179,9	30,7	45,0	95,5	140,0	23,9	35,0	-	-	-	-
-11,5	105,4	154,5	26,3	38,6	142,4	208,8	35,6	52,2	104,5	153,3	26,1	38,3	-	-	-	-
-12,5	120,7	177,1	30,2	44,3	163,1	239,3	40,8	59,8	113,6	166,7	28,4	41,7	-	-	-	-



Taulukko 5. Rajasiirtymät ym, ym/4, ym/5 ja ym/6 redusoiduilla alustaluvuilla

Taso	Poulos ( $\alpha=1,0$ )				Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )				Leikkauskestävyyssuulma				Leikkausjujuus lyhytaik.	
	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym/4 [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym/4 [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym/4 [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym/4 [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym/4 [mm], kun pm yhtälön kerroin 3	ym/4 [mm], kun pm yhtälön kerroin 4,4	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 9	ym [mm], kun pm yhtälön kerroin 9
-0,5	9,6	14,1	2,4	3,5	13,0	19,0	3,2	4,8	26,3	38,6	6,6	9,6	-	-
-1,5	16,6	24,4	4,2	6,1	22,5	33,0	5,6	8,2	26,3	38,6	6,6	9,6	-	-
-2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	123,2	20,5
-3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	123,2	20,5
-4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	123,2	20,5
-5,5	35,5	52,0	8,9	13,0	47,9	70,3	12,0	17,6	49,5	72,5	12,4	18,1	-	-
-6,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	123,2	20,5
-7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	123,2	20,5
-8,5	135,2	198,3	33,8	49,6	182,7	267,9	45,7	67,0	163,3	239,4	40,8	59,9	-	-
-9,5	162,6	238,5	40,6	59,6	219,7	322,3	54,9	80,6	182,5	267,6	45,6	66,9	-	-
-10,5	191,8	281,3	47,9	70,3	259,2	380,1	64,8	95,0	201,7	295,8	50,4	73,9	-	-
-11,5	222,6	326,5	55,7	81,6	300,8	441,2	75,2	110,3	220,9	323,9	55,2	81,0	-	-
-12,5	255,0	374,0	63,8	93,5	344,6	505,5	86,2	126,4	240,1	352,1	60,0	88,0	-	-

Taulukko 6. Jousivakiot k1 ja k2 redusoimattomilla alustaluvuilla.

Taso	Poulos ( $\alpha=1$ )		Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )		Leikkauskestävyyskulma		Leikkaushjuus, lyhytaik.	
	Jousivakio k1 [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio k2 [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio k1 [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio k2 [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio k1 [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio k2 [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio k1 [MN/m], kun $y < y_{m/6}$	Jousivakio k2 [MN/m], kun $y > y_{m/6}$
-0,5	16,42	5,47	12,15	4,05	6,00	2,00	-	-
-1,5	28,44	9,48	21,05	7,02	18,00	6,00	-	-
-2,5	-	-	-	-	-	-	6,15	1,23
-3,5	-	-	-	-	-	-	7,50	1,50
-4,5	-	-	-	-	-	-	6,00	1,20
-5,5	21,69	7,23	16,05	5,35	15,55	5,18	-	-
-6,5	-	-	-	-	-	-	8,55	1,71
-7,5	-	-	-	-	-	-	8,55	1,71
-8,5	5,87	1,96	4,34	1,45	4,86	1,62	-	-
-9,5	5,45	1,82	4,04	1,35	4,86	1,62	-	-
-10,5	5,11	1,70	3,78	1,26	4,86	1,62	-	-
-11,5	4,82	1,61	3,57	1,19	4,86	1,62	-	-
-12,5	4,57	1,52	3,39	1,13	4,86	1,62	-	-

Taulukko 7. Jousivakiot k1 ja k2 redusoiduilla alustaluvuilla.

Taso	Poulos ( $\alpha=1,0$ )		Terzaghi ( $\alpha=0,74$ )		Leikkauskestävyyskulma		Leikkaushjuus, lyhytaik.	
	Jousivakio k1 [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio k2 [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio k1 [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio k2 [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio k1 [MN/m], kun $y < y_{m/4}$	Jousivakio k2 [MN/m], kun $y > y_{m/4}$	Jousivakio k1 [MN/m], kun $y < y_{m/6}$	Jousivakio k2 [MN/m], kun $y > y_{m/6}$
-0,5	7,77	2,59	5,75	1,92	2,84	0,95	0,00	0,00
-1,5	13,46	4,49	9,96	3,32	8,52	2,84	0,00	0,00
-2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,91	0,58
-3,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,55	0,71
-4,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,84	0,57
-5,5	10,27	3,42	7,60	2,53	7,36	2,45	0,00	0,00
-6,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,05	0,81
-7,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,05	0,81
-8,5	2,78	0,93	2,06	0,69	2,30	0,77	0,00	0,00
-9,5	2,58	0,86	1,91	0,64	2,30	0,77	0,00	0,00
-10,5	2,42	0,81	1,79	0,60	2,30	0,77	0,00	0,00
-11,5	2,28	0,76	1,69	0,56	2,30	0,77	0,00	0,00
-12,5	2,17	0,72	1,60	0,53	2,30	0,77	0,00	0,00



