

**Tielaitos**

Jukka Hietavirta

**Tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurirakenteen vertailevat mitoituslaskelmat eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan**

**Tielaitoksen  
selvityksiä**

**5/1997**

Helsinki 1997

**Tuotanto  
Konsultointi**

Tielaitoksen selvityksiä  
5/1997

Jukka Hietavirta

**Tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurirakenteen vertailevat mitoituslaskelmat eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan**

**Tuotanto**  
Konsultointi

Helsinki 1997

ISSN 0788-3722  
ISBN 951-726-316-3  
TIEL 3200453  
Oy Edita Ab  
Helsinki 1998

Julkaisua myy  
Tielaitos, painotuotemyynti  
Telefax 0204 44 2652



**Tielaitos**  
TUOTANTO  
Opastinsilta 12 B  
PL 157  
00521 HELSINKI

HIETAVIRTA, Jukka: Tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurirakenteen vertailevat mitoituslaskelmat eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. Helsinki 1997. Tielaitos, Konsultointi. Tielaitoksen selvityksiä 5/1997. 77 sivua + 49 liitesivua. ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-316-3, TIEL 3200453

Asiasanat Eurocode 1, Eurocode 7, geotekninen mitoitus

## TIIVISTELMÄ

Tässä työssä on tutkittu Eurocodien mukaista tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurirakenteen geoteknistä mitoitusta ja verrattu sitä suomalaiseseen mitoituskäytäntöön. Ominaiskuormat puuttuvat esistandardivaiheessa olevista Eurocodeista (EC7, EC1), joten vertailevien mitoituslaskelmien tekemisessä on käytetty Tielaitoksen julkaisujen "Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet" ja "Siltojen kuormat" mukaisia kuormien ominaisarvoja.

Eurocode 7:n mitoituslaskelmien mukainen kuormakäsittely on tehty julkaisussa Eurocode 1 "Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat" esitetyn rajatilamenettelyn mukaisesti.

Tiepenkereen ja luonnonluiskan mitoituslaskelmissa tutkittiin lyhyenajan vakavuus  $\phi = 0$  - menetelmällä ja pitkänajan vakavuus  $c\phi$  - menetelmällä. Sekä rakennus- että käyttötilan mitoitusvarmuusluvut olivat Eurocodien ja Tielaitoksen ohjeen mukaan lähes yhtä suuret. Merkittävin ero Tielaitoksen mitoituskäytäntöön verrattuna on Eurocodien lyhyenajan vakavuuden laskenta kokonaisvarmuuslukumenetelmän asemesta rajatilamenetelmällä.

Jäykän tukimuurirakenteen mitoituslaskelmat on tehty maan- ja kallionvaraiselle rakenteelle. Aktiivipaineelle mitoitetun siirtyvän maanvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmat on tehty kahdella eri maanpainekuviolla.

Kallion varaan perustetun tukimuurin vertailevat mitoituslaskelmat on tehty lepopaineelle.

Tukimuurin mitoituslaskelmissa tarkastettiin varmuus kaatumista, liukumista ja maaperän murtumista vastaan sekä laskettiin taivutusmomentti pystysuoran seinän juuressa.

Eurocodien mukainen mitoitus johti Tielaitoksen ohjeita pienempiin mitoitusvarmuuslukuihin eli suurempiin rakenteen dimensioihin.

HIETAVIRTA, Jukka: Comparative geotechnical design calculations according to the Eurocodes and Finnish design practise for embankments, slopes and gravity retaining walls. Helsinki 1997, Finnish National Road Administration. Report 5/1997. 77 p., 49 app. ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-316-3, TIEL 3200453

**Key words** Eurocode 1, Eurocode 7, geotechnical design

## ABSTRACT

In order to gain more information on the affects of Eurocode design, the Finnish National Road Administration carried out a study to compare the Finnish geotechnical design practise to that one of the Eurocodes.

A road embankment, a natural slope and a retaining wall have been studied. Characteristic live load values have not been defined in the Eurocode's. Therefore the Finnish characteristic values have been used in all calculations.

Eurocode 7 "Geotechnical design" is going to be used together with Eurocode 1 "The basis of design and actions on structures". All Eurocode calculations are made according to the partial safety factor method which is described in the Eurocode 1's chapter 9.2.

The short term undrained stability of a road embankment and a natural slope has been studied with  $\phi = 0$  - method and the drained stability by using  $c:\phi'$  - method. The most significant difference between the methods of Eurocodes and the Finnish practise concerns the  $\phi = 0$  - method. The Eurocode-calculations are made according to the partial safety factor method instead of the total safety factor method used in the design practice of the Finnish Road Administration.

The comparative calculations of retaining walls were made for walls founded on sand and bedrock.

The safety factors against the loss of bearing capacity, sliding and overturning were calculated. The bending moment at the toe of the vertical wall was also studied.

The Design calculations according to the Eurocodes led to lower design safety factors and consequently to larger structural dimensions than the design according to the instructions of the Finnish Road Administration.

## ALKUSANAT

Tämä tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurin geoteknisen mitoituksen vertailua Eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan käsittelevä julkaisu on osa Tielaitoksen selvitystä, jossa tutkitaan Eurocode-ohjejärjestelmän ja kansallisen mitoituskäytännön eroja. Tutkimus on tehty professori Eero Slungan johdolla.

Julkaisun on laatinut Jukka Hietavirta. Julkaisu on samalla hänen diplomityönsä.

Tilaaajan puolelta tätä tutkimusta ovat valvoneet Pentti Salo, Panu Tolla ja Matti Kuusivaara. Tutkimuksen ohjaukseen ovat osallistuneet myös professori Jorma Hartikainen ja Anu Kiiskilä Tampereen teknillisestä korkeakoulusta.

Helsingissä joulukuussa 1997

Geopalvelut ja Siltatekniikka

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	11
2	MITOITUSMENETELMÄT	13
2.1	Yleistä	13
2.2	Kokonaisvarmuus	13
2.3	Osavarmuus	14
2.4	Mitoitusta koskevat ohjeet ja standardit	14
2.4.1	Eurocode 7 ja Eurocode 1	14
2.4.2	Muut mitoitusohjeet	17
2.5	Murtorajatilatarkastelussa käytetyt osavarmuusluvut	17
2.6	Mitoituslaskelmissa käytetyt liikennekuormien ominaisarvot	21
2.7	Käyttörajatila	22
3	PENKEREEN JA LUONNONLUISKAN VAKAVUUSLASKELMAT	23
3.1	Yleistä	23
3.1.1	Vakavuuden laskentamenetelmät	23
3.1.2	Muut mitoitustarkastelut	26
3.2	Penkereen vakavuus	27
3.2.1	Vakavuus Tielaitoksen ohjeen mukaan	29
3.2.2	Vakavuus ohjeiden EC7/EC7 mukaan	31
3.2.3	Vakavuus ohjeiden NAD(FIN)7 / EC7 mukaan	32
3.3	Luonnonluiskan vakavuus	33
3.3.1	Vakavuus Tielaitoksen ohjeen mukaan	34
3.3.2	Vakavuus ohjeiden EC7/EC7 ja NAD (FIN)7/EC7 mukaan	35
3.4	Maaparametrien ominaisarvojen tilastollinen arviointi	36
3.5	Yhteenveto penkereen ja luiskan laskelmista	37
4	JÄYKÄN TUKIMUURIRAKENTEEN VERTAILEVAT MITOITUSLASKELMAT	40
4.1	Jäykkään tukirakenteeseen kohdistuva maanpaine	40
4.1.1	Maanpaine siirtymätöntä rakennetta vastaan	40
4.1.2	Maanpaine siirtyvää jäykkää rakennetta vastaan	41
4.2	Tutkitut rakenteet	47
4.3	Maanvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmat	48
4.3.1	Yleistä	48
4.3.2	Mitoituslaskelmat maanpainekeuviolle 1	54
4.3.2.1	Yleistä	54
4.3.2.2	Vertailuun valitut mitoitusohjeet	54
4.3.2.3	Mitoituslaskelmat	54
4.3.3	Mitoituslaskelmat maanpainekeuviolle 2	55
4.3.3.1	Yleistä	55
4.3.3.2	Vertailuun valitut mitoitusohjeet	57
4.3.3.3	Mitoituslaskelmat	57
4.3.4	Yhteenveto maanvaraisen tukimuurin laskelmista.	58
4.4	Kallionvarainen perustus	64
4.4.1	Yleistä	64
4.4.2	Yhteenveto kallionvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmista	65
5	PÄÄTELMÄT	68
5.1	Penkereen ja luonnonluiskan vakavuus	68
5.2	Maanvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmat	70
5.3	Kallionvarainen perustus	73

6	LÄHTEET	76
---	---------	----

---

7	LIITELUETTELO	77
---	---------------	----

---



## Merkinnät :

$a'$	seinän tehokas adheesio, kPa
$c$	koheesio, kPa
$c'$	tehokas koheesio, kPa
$\phi$	kitkakulma
$\phi'$	tehokas kitkakulma
$q$	maan painosta aiheutuva jännitys tai pintakuorma, kPa
$q'$	yläpuolisen maan aiheuttama tehokas mitoituspaino
	perustuksen pohjan tasolla, kPa
$q_d$	pohjapaineen mitoitusarvo, kPa
$s$	perustuksen muodosta riippuva kerroin
$u$	huokosveden paine, kPa
$\delta$	rakenteen ja maan välinen kitkakulma
$\sigma$	kokonaisnormaalijännitys, kPa
$\sigma'$	tehokas normaalijännitys, kPa
$\sigma'_{vo}$	tehokas vallitseva jännitys, kPa
$\gamma$	tilavuuspaino, kN/m <sup>3</sup>
$\gamma'$	tehokas tilavuuspaino, kN/m <sup>3</sup>
$\gamma$	osavarmuusluku ( murto- tai käyttörajatila)
$\gamma_G$	pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_m$	materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
$\gamma_Q$	muuttuvien kuormien osavarmuusluku
$\gamma_{Qi}$	muuttuvan kuorman i osavarmuusluku
$\mu$	reduointikerroin
$\tau$	leikkausjännitys, kPa
$A'$	perustuksen pohjan tehokas ala, m <sup>2</sup>
$B$	perustuksen leveys, m
$B'$	perustuksen toimiva leveys, m
$C_d$	materiaalin nimellisarvo
$F$	kuorma, kN/m
$F_d$	mitoitusvarmuusluku
$F, F_c, F_{c\phi}$	kokonaisvarmuusluku
$F_Q$	mitoitusvoima muuttuvasta kuormasta, kN/m
$F_\gamma$	mitoitusvoima maanpaineesta, kN/m
$F_{rep}$	kuorman ominaisarvo, kN
$G$	pysyvä kuorma, kN/m
$G_d$	pysyvän kuorman mitoitusarvo, kN/m
$G_{d,inf}$	pysyvän kuorman alin mitoitusarvo, kN
$G_{kj}$	pysyvän kuorman j ominaisarvo, kN
$G_{d,sup}$	pysyvän kuorman ylin mitoitusarvo, kN
$G_{ind}$	välillinen pysyvä kuorma, kN
$G_k$	pysyvän kuorman ominaisarvo, kN
$G_{k,inf}$	pysyvän kuorman alin ominaisarvo, kN
$G_{k,sup}$	pysyvän kuorman ylin ominaisarvo, kN
$K_0$	lepopaine kerroin
$K_a$	aktiivinen maanpaine kerroin
$H$	vaakuorma, kN/m
$H_d$	vaakuorman mitoitusarvo, kN/m
$N_c, N_\gamma, N_q$	kantavuuskertoimia
$P_a$	aktiivipaineen resultantti, kN/m
$P$	esijännityskuorma, kN

$P_d$	esijännityskuorman mitoitusarvo, kN
$P_k$	esijännityskuorman ominaisarvo, kN
$Q$	muuttuva kuorma, kN/m <sup>2</sup>
$Q_d$	muuttuvan kuorman mitoitusarvo, kN/m <sup>2</sup>
$Q_{ind}$	välitön muuttuva kuorma, kN/m <sup>2</sup>
$Q_{k1}$	määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo, kN/m <sup>2</sup>
$R$	perustuksen osan pystysuuntainen kuormituskestävyys, kN/m <sup>2</sup>
$R_d$	kestävyyden mitoitusarvo, kN/m <sup>2</sup>
$R_{oc}$	ylikonsolidaatioaste
$S_d$	mitoitusleikkausvastus perustuksen pohjan ja maan välillä, kN/m
$V$	pystykuorma, kN/m
$V_d$	pystykuorman mitoitusarvo, kN/m
$V'_d$	tehokkaan kuorman mitoitusarvo kohtisuoraan perustuksen pohjaa vastaan, kN/m
$W$	taivutusvastus, mm <sup>3</sup>
$X$	materiaaliominaisuus
$X_d$	materiaaliominaisuuden mitoitusarvo
$X_k$	materiaaliominaisuuden ominaisarvo

#### Käytetyt lyhenteet:

EC1	Eurocode 1. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat ( ENV 1991-1 1994)
EC7	Eurocode 7. Geotekninen suunnittelu- Osa 1: yleiset säännöt ( ENV 1997-1 1994)
NAD (FIN)7	Eurocode 7:n Kansallinen soveltamisasiakirja
NAD (FIN)1	Eurocode 1:n Kansallinen soveltamisasiakirja
EC7/EC1	kapasiteetti Eurocode 7:n mukaan; kuormat Eurocode 1:n mukaan
$F_d$	Mitoitusvarmuusluku. Rakenteen mitoituskapasiteetin ja mitoituskuormituksen suhde. Kokonaisvarmuuslukumenetelmässä $F_d$ saadaan jakamalla ominaisarvoilla laskettu kokonaisvarmuus $F$ vaaditulla minimivarmuudella

## 1 JOHDANTO

Euroopan yhteisön komissio (CEC) on käynnistänyt yhdenmukaistetun teknillisen rakennuksia sekä maa- ja vesirakennuskohteita koskevan suunnittelu-standardiston laatimistyön, joka aluksi toimii vaihtoehtona eri jäsenmaissa voimassaoleville erilaisille säännöille ja lopulta korvaa ne. Nämä tekniset säännöt tunnetaan nimellä "Rakenteita koskevat Eurocodet".

Euroopan yhteisön komissio (CEC) luovutti vuonna 1990 rakenteita koskevien Eurocodien jatkokehittämisen sekä julkaisu- ja päivitystyön Eurooppalaiselle standardisoimisjärjestölle CEN:lle. Standardit laaditaan Teknisen valiokunnan (BT) perustamissa Teknisissä komiteoissa (TC). Geoteknisestä suunnittelusta ja rakenteiden toteutuksesta vastaavat CEN:n alakomitea TC 250/SC7 Geotechnical Design ja TC 288 Execution of geotechnical works. Tekninen alakomitea TC 250/SC7 valmistelee geotekniikan alan suunnittelustandardeja ja komitea TC 288 pohjarakentamisen menetelmien standardeja. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry on siirtänyt näiden komiteoiden työskentelyalueella tapahtuvan kansalliseen standardisointiin liittyvän työn vuoden 1996 alussa Tielaitoksen vastuulle. Geoteknistä suunnittelua koskevan Eurocode 7:n määrä astua voimaan vuonna 2001. CEN:n tekninen työryhmä on esittänyt, että Eurocodet olisivat rinnan käytössä kansallisten rakentamismääräyskokoelmien kanssa vuosina 2001-2005. Tätä työtä tehtäessä työhön liittyvät Eurocodet ovat olleet käytettävissä ns. esistandardeina (ENV).

Jotta Eurocodien vaikutuksesta mitoitukseen saataisiin tietoa, on Tielaitoksen geokeskus siltakeskuksen kanssa käynnistänyt vertailututkimuksen, jossa selvitetään penkereiden ja siltojen geoteknisen mitoituksen nykykäytännön ja eurooppalaisessa standardissa esitetyn mitoituskäytännön eroja. Tämä diplomityö käsittelee tiepenkereen murto- ja käyttörajatilamitointusta sekä luonnonluiskien ja tukimuurien geoteknisiä laskelmia. Laskelmien pohjaksi on valittu kolme toteutettua esimerkkikohtetta. Diplomityön tavoitteena on selvittää Eurocode 7 - esistandardin vaikutusta geotekniseen mitoitukseen ja tarkastella varmuustason vaihteluita erityyppisissä mitoitustilanteissa. Vertailussa tarkasteltavia ohjeita ovat Eurocode 7 ja Eurocode 1 sekä niihin liittyvät kansalliset soveltamisasiakirjat NAD(FIN) sekä Tielaitoksen ohjeet ja Pohjarakennusohjeet (RIL 121).

Tiepenkereen murtorajatilamitoituksessa on tarkasteltu Eurocode 7-ohjeen vaikutusta Järvenpään alueella Mikonkorvella rakennetun tiepenkereen mitoitukseen.

Luonnonluiskien geoteknisten vertailulaskelmien esimerkkikohteena on käytetty Hertsbyn kylässä sijaitsevan paikallistien 11737 ja maantien 149 ylittävää siltaa. Laskelmissa on tarkasteltu sekä lyhyen että pitkänajan stabiiliteettiä Eurocode 7:n ja siihen liittyvän Kansallisen soveltamisasiakirjan NAD(FIN)7 mitoitustapauksen C mukaisin parametrein ja kuormayhdistelmin.

Tukimuurien murtorajatilamitoituksessa on vertailtu Pohjarakennusohjeiden ja Tielaitoksen ohjeen mukaisen mitoituksen eroja Eurocodeihin verrattuna. Esimerkkikohteena on ollut Ylöjärvellä sijaitseva rakennetulla pohjalla oleva kulmatukimuuuri. Tarkasteluissa on käsitelty ja vertailtu eri menetelmillä las-

kettua perustuksen alapuolisen maan kantokykyä sekä varmuutta kaatumista ja liukumista vastaan. Tarkastelut on tehty maanvaraan perustetulle ja kallionvaraiselle tukimuurille.

## 2 MITOITUSMENETELMÄT

### 2.1 Yleistä

Rakenteet pyritään suunnittelemaan siten, että niillä on riittävä varmuus murtumista vastaan ja että muodonmuutokset pysyvät sallituissa rajoissa. Lisäksi pyrkimyksenä on tämän tavoitteen saavuttaminen mahdollisimman vähillä kustannuksilla.

Riippuen niistä periaatteista, miten varmuusluvut sisällytetään mitoitusyhtälöihin, ryhmitellään mitoitustavat deterministisiin, semi-probabilistisiin ja probabilistisiin.

Deterministisille mitoitusavoille on ominaista, että varmuusluvut sisällytetään joihinkin mitoitusyhtälöiden suureista tavallisimmin kertomalla kuormasuureiden arvot varmuusluvuilla ja / tai pienentämällä kapasiteettisuureiden arvoja, jolloin päädytään esimerkiksi sallittuihin jännityksiin.

Ajanmukaisimpana deterministisistä mitoitusmenetelmistä voidaan pitää osavarmuuslukumenetelmää (rajatilamenetelmää), jonka mukaan kuormasuureet kerrotaan ja kapasiteettisuureet jaetaan osavarmuusluvuilla.

Mitoituksessa käytettävät suuret, kuormat tai niistä muodostetut voimasuureet, dimensiot, materiaaliominaisuudet ja kaavoihin sisältyvät parametrit on perinteisesti annettu normeissa deterministisinä arvoina. Ne sisältävät tällöin arvioituja tai laskennallisesti määritettyjä varmuuslukuja ja mitoitus perustuu näin ollen joko todellista suurempiin kuormiin ja / tai todellisia lujuuksia alhaisempiin sallittuihin jännityksiin.

Deterministisissä menetelmissä ei oteta huomioon eri vaikutussuureiden tilastollisia parametrejä.

Semi-probabilistiset menetelmät sitä vastoin sisältävät mitoitusparametreinä vaikutussuureiden tilastollisia parametrejä kuten esimerkiksi keskihajontoja.

Probabilistisiä menetelmiä ei voida soveltaa käytäntöön niiden matemaattisen mutkikkuuden takia. Niiden merkitys on lähinnä yksinkertaistettujen menetelmien tarkkuuden testaamisessa. Niillä pyritään tarkkoja integrointikaavoja noudattaen määrittämään rakenteen vaurioitumistodennäköisyys [Paloheimo 1974].

### 2.2 Kokonaisvarmuus

Rakenteen riittävällä varmuudella murtumista ja sallitut rajat ylittäviä muodonmuutoksia vastaan tarkoitetaan sitä, että rakenteen suunnitteluperusteena oleva tasapainotila on niin kaukana murtotilasta, etteivät rakenne ja siihen liittyvä maamassa pääse murtumaan tai siirtymään niin, että rakenteen kestävyys ja käyttöarvo kärsivät. Varmuuden määrittämiseksi on siten ver-

rattava suunnittelutilannetta vastaavaa tasapainotilaa murtotilaan tai muuhun kriittiseen tilaan.

Ympyränmuotoisia liukupintoja käytettäessä voidaan kokonaisvarmuusluku  $F$  laskea vaarallisimman liukuympyrän keskipisteen suhteen otetun momenttiyhtälön perusteella kaavalla (1) :

$$F_c = \frac{M_p}{M_a} \quad (1)$$

missä  $M_p$  on maan liukuvastuksesta aiheutuva passiivimomentti murtotilassa  
 $M_a$  ulkoisten kuormien aiheuttama aktiivimomentti.

Kaavan (1) mukaan varmuusluku on luku, jolla murtotilaa, toisin sanoen maan leikkauslujuutta vastaava passiivimomentti on jaettava, jotta käyttötilaa ( suunnittelutilaa) vastaava tasapainotila olisi saavutettu [Paloheimo 1974].

## 2.3 Osavarmuus

Kantavuus- ja vakavuuslaskelmiin sisältyvistä suureista tunnetaan toiset (esim. tilavuuspainot) suhteellisen hyvin, kun taas toiset (esim. lujuusarvot, huokospaineet ja niiden vaihtelut) ovat epävarmempia. Tämä voidaan ottaa huomioon käyttämällä osavarmuuslukuja, joiden arvot riippuvat laskelmissa käytetyn kunkin suureen epävarmuudesta. Esimerkiksi lieriöliukupintoja käytettäessä voidaan passiivimomenttia lisäävät leikkauslujuusparametrit jakaa lujuusarvojen määrittäytävasta ja hajonnasta riippuvalla varmuusluvulla, kun taas aktiivimomenttia lisäävät kuormat voidaan kertoa toisella osavarmuusluvulla. [Paloheimo 1974].

## 2.4 Mitoitusta koskevat ohjeet ja standardit

### 2.4.1 Eurocode 7 ja Eurocode 1

#### Yleistä

Rakenteita koskevat Eurocodet sisältävät ryhmän standardeja talo- ja silta-rakenteiden sekä maa- ja vesirakenteiden rakenteellista ja geoteknistä suunnittelua varten. Eurocodet on tarkoitettu palvelemaan viiteasiakirjoina luotaessa harmonisoituja teknisiä eritelmiä rakennustuotteille sekä keinoksi osoittamaan, että talonrakennus- ja maa- ja vesirakennustyöt täyttävät Rakennustuotedirektiivin (Construction Products Directive CPD) olennaiset vaatimukset. Eurocode 7 esistandardi käsittelee rakenteiden lujuudelle, stabiiliteetille, käyttökelpoisuudelle ja säilyvyydelle asetettuja vaatimuksia. Muita vaatimuksia, kuten esimerkiksi lämpö- tai ääneneristystä koskevia

vaatimuksia, ei ole käsitelty. Eurocode 7 -standardia tulee käyttää yhdessä Eurocode 1:n "Basis of Design and Actions on Structures" sekä Eurocodeihin liittyvien Kansallisten Sovellusasiakirjojen NAD(FIN):ien kanssa. Eurocode 1:ssä osoitetaan turvallisuuden ja käyttökelpoisuuden periaatteet ja vaatimukset, esitetään suunnittelun ja todentamisen periaatteet sekä annetaan suuntaviivoja rakenteiden luotettavuuteen liittyvistä seikoista. Eurocode 7-standardi antaa ohjeet maasta aiheutuvien kuormien, kuten maanpaineen laskemiseksi.

Eräät niistä standardeista, joihin Eurocode 7 viittaa sekä Eurocodien kuormituksia koskevat osat eivät vielä ole kokonaisuudessaan käytettävissä. Tämän vuoksi CEN edellyttää, että kukin jäsenmaa tai sen standardisoimisorganisaatio antaa lopulliset arvot varmuustekijöille kansallisissa soveltamisasiakirjoissa. Rakennusten sekä maa- ja vesirakenteiden suunnittelussa huomioon otettavat erityyppisille rakenteille soveltuvat kuormien osavarmuusluvut on annettu ENV 1991 Eurocode 1:ssä "Basis of Design and Actions on Structures".

Eurocode 7:n esistandardissa on yksittäisten kohtien luonteesta riippuen tehty jako periaate- ja soveltamissääntöjen välille. Periaatesäännöt koostuvat yleisistä väittämistä, joille ei ole vaihtoehtoa sekä vaatimuksista ja analyttisistä malleista, joille ei ole sallittu vaihtoehtoa paitsi, jos erityisesti on mainittu. Soveltamissäännöt ovat esimerkkejä yleisesti hyväksytyistä säännöistä, jotka noudattavat periaatesääntöjä ja täyttävät niiden vaatimukset. Eurocodessa annetuista soveltamissäännöistä poikkeavien vaihtoehtoisten sääntöjen käyttäminen on sallittua edellyttäen, että niiden on osoitettu olevan sopusoinnussa kyseeseen tulevien periaatesääntöjen kanssa.

EC 7:n periaatesäännön mukaan rakenne tulee suunnitella Eurocode 1:n yleisiä suunnitteluperiaatteita noudattaen yhdessä NAD:n suunnitteluvaatimuksia koskevan lisäyksen kanssa, jonka mukaan materiaalien valinnassa ja suunnittelussa on otettava huomioon Suomen geologiset ja ilmasto-olosuhteet. Uusien rakennustapojen, -materiaalien sekä suunnittelu- ja mitoitusmenetelmien soveltuvuus tulee varmistaa ennen käyttöönottoa.

#### Geotekniset luokat

Määritettäessä vähimmäisvaatimuksia pohjatutkimuksien, laskelmien ja rakenteiden valvontatarkastuksien laajuudelle ja laadulle on Eurocode 7:n mukaan tunnistettava kunkin geoteknisen suunnittelukohteen vaativuus sekä omaisuudelle ja ihmishengille aiheutuvat riskit. Erityisesti on erotettava :

- kevyet ja yksinkertaiset rakenteet sekä pienehköt maarakennustyöt, joissa perusvaatimusten täytyminen voidaan varmistaa kokemuksen ja kattavan pohjatutkimuksen avulla siten, että omaisuudelle ja ihmishengille ei aiheudu riskiä sekä
- muut geotekniset rakenteet

Geoteknisiä suunnitteluvaatimuksia määritettäessä voidaan Eurocode 7:n soveltamissäännön mukaan käyttää kolmea geoteknistä luokkaa 1, 2 ja 3. Tavallisesti alustava rakenteen geoteknisen luokan valinta tehdään ennen pohjatutkimuksia. Luokkaa voidaan myöhemmin vaihtaa. Geotekninen luokka tarkistetaan jokaisessa rakenteen suunnittelu- ja toteutusvaiheessa ja vaihdetaan tarvittaessa. Projektin eri mitoitusnäkökohdat voivat vaatia suunnit-

nittelua eri geoteknisissä luokissa. Koko projektia ei kuitenkaan tarvitse suunnitella korkeimmassa vaaditussa luokassa [ENV 1997-1].

Geotekniseen luokkaan 1 kuuluvat vain pienet ja yksinkertaiset rakenteet, joissa perusvaatimusten täytyminen voidaan varmistaa kokemuksen ja kvalitatiivisen pohjatutkimusten avulla ja joista ei aiheudu riskiä omaisuudelle tai ihmisille. Luokan 1 mitoitusmenetelmät ovat riittäviä vain pohjaolosuhteissa, jotka ovat vastaavista kohteista saadun vertailukelpoisen kokemuksen perusteella riittävän yksinkertaisia, jotta rutiinimenetelmiä voidaan käyttää perustusten suunnitteluun ja rakentamiseen. Geoteknisen luokan 1 menetelmät ovat riittäviä ainoastaan silloin, kun kaivu ei ulotu vedenpinnan alapuolelle tai jos paikalliset vertailukelpoiset tutkimukset osoittavat, että vedenpinnan alapuolelle ulottuva kaivanto on yksinkertainen toteuttaa. Geotekniseen luokkaan 1 kuuluvat pienet kuivatus- ja johtokaivannot, tukiseinät ja tuetut kaivannot, joissa maanpintojen välinen korkeusero on alle kaksi metriä sekä yksinkertaiset yksi- ja kaksikerroksiset talot ja maatalousrakennukset, joissa maksimimitoituskuorma on pilareille 250 kN ja seinille 100 kN/m ja joissa käytetään tavanomaisia antura- ja laattaperustuksia [ENV 1997-1].

Geotekniseen luokkaan 2 kuuluvat tavanomaiset rakennetyypit, joihin ei liity tavanomaisesta poikkeavia riskejä tai epätavallisia tai erikoisen vaikeita pohja- tai kuormitusolosuhteita. Geoteknisessä luokassa 2 vaaditaan riittävä määrä geoteknisiä lähtötietoja ja laskelmia, jotta voidaan varmistua siitä, että suunnittelun perusvaatimukset täyttyvät. Kenttä- ja laboratoriokokeet sekä suunnittelu ja toteutus voidaan tehdä rutiinimenetelmillä. Geotekniseen luokkaan 2 kuuluvat mm. tavanomaiset anturalaatta-, laatta- ja paaluperustukset sekä penkereet ja maarakennustyöt [ENV 1997-1].

Geotekniseen luokkaan 3 kuuluvat rakenteet tai rakenteen osat, jotka eivät kuulu geotekniisiin luokkiin 1 ja 2 eli erittäin suuret tai epätavalliset rakenteet joihin liittyy normaalista poikkeavia riskejä tai joissa on epätavalliset tai poikkeuksellisen vaikeat pohja- tai kuormitusolosuhteet sekä rakenteet seismisesti aktiivisella alueella [ENV 1997-1].

#### Mitoitustapaukset

Eurocode 7-esistandardissa on stabiliteetin sekä rakenteen ja materiaalin riittävän lujuuden varmistamiseksi otettu käyttöön kolme mitoitustapausta A, B ja C. Mitoitus tulee soveltuvin osin tarkistaa erikseen kullekin kolmelle tapaukselle. Euronormin esistandardissa tapaus A tulee kyseeseen vain nosteongelmissa, joissa hydrostaattiset voimat sisältävät epäedullisen pääkuormituksen. Nosteogelmissa on usein tarkoituksenmukaisempaa käyttää rakenteellista ratkaisua (esimerkiksi ylivuotojärjestelyä) yhdistettynä lähellä ykköstä oleviin osavarmuuslukuihin mieluummin kuin luottaa suurempiin osavarmuuslukuihin, jotka ovat tilanteeseen huonommin sopivia. Tapaus B on usein kriittinen perustuksissa tai tukirakenteissa olevien rakenteellisten osien mitoituksessa. Jos rakennemateriaalin lujuutta ei käytetä tarkastelussa, tapaus B ei tule kyseeseen. Tapaus C on usein kriittinen tilanteissa, joissa ei käsitellä rakenteellisten osien lujuutta, esimerkiksi luiskan vakavuuden, perustusten tai tukirakenteiden geoteknisessä mitoituksessa ja joskus rakenteellisten osien lujuuden mitoituksessa. Jos maan lujuutta ei käytetä tarkistuksessa, tapaus C ei tule kyseeseen. [ENV 1997-1].



Penkereiden ja luiskien kokonaisstabiiliteetin laskemisessa voidaan mitoitus tapaukset A ja B jättää tarkastelematta.

Eurocode 7:ssä on toteutusta käsitelty siinä laajuudessa, kuin on välttämättöntä kuvamaan käytettävien rakennusmateriaalien ja tuotteiden laatua sekä ammattitaidon tasoa, mikä tarvitaan täyttämään suunnittelusääntöjen oletukset.

Tässä raportissa Eurocodien eri osista käytetään lyhennettä EC ja niihin liittyvistä Kansallisista soveltamisasiakirjoista lyhennettä NAD(FIN). Käytetyt mitoitusohjeet ovat Eurocode 7: Geotekninen suunnittelu- Osa 1: yleiset säännöt (ENV 1997-1) sekä Eurocode 7 - Osa 3: Geotechnical design assisted by field tests ja Eurocode 1: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat (ENV 1991-1). Esimerkkilaskelmissa merkintä EC7 / EC1 tarkoittaa mitoitus tapaus, jossa geotekninen suunnittelu tapahtuu ohjeen Eurocode 7 mukaan ja kuormitukset määritetään Eurocode 1:n mukaan.

#### 2.4.2 Muut mitoitusohjeet

Eurocodeja vastaavat julkaisut, joihin Tielaitoksen geotekninen suunnittelu perustuu on esitetty julkaisussa Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet [Manelius et al 1993], jossa esitetään muun muassa laskentamenetelmän valinta, tiepenkereiden geoteknisessä suunnittelussa käytävät kuormat ja maaparametrien redusointi. Tielaitoksen ohjeiden taustalla ovat lähinnä talonrakennuskohteita varten laaditut Pohjarakennusohjeet (RIL 121), joita em. Tielaitoksen ohjeet täydentävät tarpeellisiksi katsotuilta osilta.

### 2.5 Murtorajatilatarkastelussa käytetyt osavarmuusluvut

Eurocodeissa rajatilaratkaisun mukainen luotettavuus saavutetaan soveltamalla Eurocode 1:ssä "Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat" esitettyä mitoitusmenettelyä osavarmuuslukumenetelmällä. Osavarmuuslukumenetelmässä osoitetaan, että kaikissa kyseeseen tulevilla mitoitus tilanteissa rajatila jää saavuttamatta, kun kuormien, materiaaliominaisuuksien ja geometristen mittojen mitoitusarvoja käytetään mitoitusmalleissa [ENV 1991-1]. Mitoitus tehdään murtorajatilassa ja käyttörajatilassa.

Murtorajatilassa kuormien ja kuormitusyhdistelmien mitoitusarvot saadaan, kun ominaisarvot kerrotaan osavarmuusluvulla  $\gamma_F$ . Kuorman mitoitusarvo  $F_d$  ilmaistaan yleisin termein kaavalla (2) :

$$F_d = \gamma_F F_k \quad (2)$$

$\gamma_F$  on kuorman osavarmuusluku  
 $F_k$  kuorman ominaisarvo

Kuormayhdistelmissä jokaista kriittistä kuormitustapaus varten tulee määrittää kuormien vaikutusten mitoitusarvot yhdistämällä samanaikaisesti esiintyvien kuormien arvot seuraavasti:

a) Pysyvät ja tilapäiset tilanteet: Määräviin muuttuvien kuormien mitoitusarvot ja muiden kuormien mitoitusarvot. Pysyvät ja tilapäiset mitoitus-tilanteet murtorajatilan tarkastelua varten esitetään kaavalla (3).

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} \text{ "+" } \gamma_p P_k \text{ "+" } \gamma_{Q1} Q_1 \text{ "+" } \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} \Psi_{oi} Q_{ki} \quad (3)$$

kaavassa (3) käytetyt symbolit:

- "+" merkitsee " tulee yhdistää.... kanssa"
- $\Sigma$  merkitsee " ... samanaikainen vaikutus"
- $G_{kj}$  on pysyvien kuormien ominaisarvo
- $P_k$  esijännityskuorman ominaisarvo
- $Q_{k1}$  määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
- $Q_{kj}$  muiden muuttuvien kuormien ominaisarvo
- $\gamma_{Gj}$  pysyvän kuorman j osavarmuusluku
- $\gamma_{Gaj}$  sama kuin  $\gamma_{Gj}$ , mutta onnettomuustilanteissa
- $\gamma_p$  esijännityskuormien osavarmuusluku
- $\gamma_{Q1}$  muuttuvan kuorman osavarmuusluku
- $\Psi$  yhdistelykerroin

Eurocode 1:n kuormayhdistelmiä käsittelevän soveltamissäännön mukaan lauseke (3) kaipa joissakin tapauksissa muuntelua ja yksityiskohtaiset säännöt esitetään asianomaisissa ENV 1991-1999:n osissa. Geoteknisessä mitoituksessa esijännityskuormaa  $P_k$  kuvaava termi jää pois ja kaava (3) supistuu muotoon (3.1):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} \text{ "+" } \gamma_{Q1} Q_1 \text{ "+" } \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} \Psi_{oi} Q_{ki} \quad (3.1)$$

Pysyvien ja muuttuvien kuormien osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 1. Taulukossa 1 esitettyjä pysyvien ja muuttuvien kuormien osavarmuuslukujen arvoja tulee yleensä käyttää tavanomaisten rakenteiden perustusten murtorajatilojen tarkistamiseen jatkuvissa ja lyhytaikaisissa tilanteissa. Ankarampia arvoja tulee harkita epätavallisen suuren riskin tapauksessa tai erittäin vaikeissa maaperä- tai kuormitusolosuhteissa. Tapauksissa, joissa se on mahdollisten seurausten perusteella perusteltua, voidaan käyttää lievempiä arvoja väliaikaisille rakenteille ja lyhytaikaisille tilanteille. Onnettomuustilanteissa kaikki osavarmuuslukujen arvot ovat ykkösen [1,0] suuruisia.

Taulukko 1. Kuormitusten osavarmuusluvut jatkuvissa ja muuttuvissa tilanteissa [ENV 1997-1 ].

	Pysyvä	Pysyvä	Muuttuva
Tapaus	Epäedullinen	Edullinen	Epäedullinen
A	[1.00]	[0.95]	[1.50]
B	[1.35]	[1.00]	[1.50]
C	[1.00]	[1.00]	[1.30]

Vastaavasti maaperän ominaisuuksien varmuusluvut Tielaitoksen ohjeen, Eurocode 7:n ja Kansallisen soveltamisasiakirjan NAD(FIN)7 mukaan on esitetty taulukoissa 2, 3, 4 ja 5.

Taulukko 2. Eurocode 7:n mukaiset maaperäominaisuuksien osavarmuusluvut jatkuvissa ja muuttuvissa tilanteissa [ENV 1997-1].

Tapaus	$\tan\phi$	c'	$c_u$	$q_u$
A	[1,1]	[1,3]	[1,2]	[1,2]
B	[1,0]	[1,0]	[1,0]	[1,0]
C	[1,25]	[1,6]	[1,4]	[1,4]

Suomen kansallinen soveltamisasiakirja NAD (FIN)7 määrittelee vastaavat osavarmuusluvut mitoitustapaukselle C, jolloin suljetun leikkauslujuuden osavarmuuskerroin  $\gamma_{cu}$  kasvaa arvosta 1,4 arvoon 1,55 ja maan tai kallion puristuslujuuden osavarmuusluku  $\gamma_{qu}$  arvosta 1,4 arvoon 1,6, jolloin maaperän ominaisuuksien osavarmuusluvut murtorajatilojen tarkasteluissa ovat taulukon 3 mukaiset.

Taulukko 3. Osavarmuusluvut NAD (FIN)7:n mukaan.

Tapaus	$\tan\phi$	c'	$c_u$	$q_u$
A	[1,1]	[1,3]	[1,2]	[1,2]
B	[1,0]	[1,0]	[1,0]	[1,0]
C	[1,25]	[1,6]	[1,55]	[1,6]

Tielaitoksen ohjeen mukaan pehmeikölle rakennettavan tiepenkereen stabiiliteettilaskelmissa sovellettavan varmuusluvun on oltava julkaisun Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet mukainen. Tiepenkereiden ja leikkausten vakavuuslaskelmissa käytettävät varmuusluvut on esitetty taulukoissa 4 ja 5.

Taulukko 4. Tielaitoksen ohjeelliset kokonaisvarmuusluvut ( $\phi=0$  - menetelmä). Tiepenkereet ja leikkaukset [Manelius et al 1993].

Lähtötilanne	Tiepenger		Tieleikkaus	
	Työnaikainen varmuusluku	Käytönaikainen varmuusluku	Työnaikainen varmuusluku	Käytönaikainen varmuusluku
Ei pysyviä rakenteita	1,3	1,5	1,5	1,8
Pysyviä rakenteita	1,5	1,8	1,8	2,0

Taulukko 5. Tielaitoksen ohjeelliset maakerrosten lujuusparametrien osavarmuusluvut murtorajatilassa ( $c\phi$ -menetelmä). Tiepenkereet ja leikkaukset. [Manelius et al 1993].

Lähtötilanne	Tiepenger		Tieleikkaus	
	Työnaikainen varmuusluku	Käytönaikainen varmuusluku	Työnaikainen varmuusluku	Käytönaikainen varmuusluku
	$\gamma_c$		$\gamma_\phi$	
Ei pysyviä rakenteita	1,3	1,5	1,1	1,2
Pysyviä rakenteita	1,5	1,8	1,2	1,25

Eurocodien mukaisessa mitoituksessa sekä kuormien että materiaaliominaisuuksien osavarmuusluvut valitaan kansallisten soveltamisasiakirjojen mukaan. Materiaaliominaisuuksien osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 3.

Julkaisun Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet mukaan mahdollisesta sortumasta aiheutuvien vahinkojen suuruus on huomioitava varmuustasoa valittaessa. Pysyvien rakenteiden yhteydessä käytettäviä suurempia varmuuslukuja tulee harkita käytettäväksi myös, mikäli henkilövahingot ovat mahdollisia, korjauskustannukset ovat suuret tai liikenteelle aiheutuvat haitat ovat suuret. [Manelius et al 1993].

Kansallisen soveltamisasiakirjan NAD(FIN)7mukaan, kun kuormitus on tilapäinen ja materiaalivahinkojen riski on vähäinen, voidaan kitkan ja koheesion osavarmuuslukuja  $\gamma_\phi$  ja  $\gamma_c$  pienentää enintään 10 %:lla ja suljetun leikkauslujuuden osavarmuuslukua enintään 15 %:lla. Vastaavasti varmuuslukuja  $\gamma_\phi$  ja  $\gamma_c$  tulee suurentaa 10 %:lla ja varmuuslukuja  $\gamma_{cu}$  ja  $\gamma_{qu}$  20 %:lla, kun henkilö- ja materiaalivahinkojen riski on suuri.

Pohjarakennusohjeiden (PRO 1988) mukaan kuormien osavarmuuslukuina käytetään Suomen rakentamismääräyskokoelman määräyksissä esitettyjä osavarmuuslukuja. Maan ja tukirakenteiden painon osavarmuuslukuna geoteknisessä mitoituksessa esimerkiksi maanpainetta, vakavuutta, kantokykyä, tukimuurin tai perustuksen kaatumista yms. laskettaessa käytetään  $\gamma_g = 1,0$ . Maan painon osavarmuuslukuna kantavan rakenteen rakenteellisessa mitoituksessa käytetään  $\gamma_g = 1,2$  tai  $\gamma_g = 0,9$ . Maakerrosten lujuusparametrien osavarmuusluvut murtorajatilassa on esitetty taulukossa 6 [PRO 1988].

Taulukko 6. PRO:n mukaiset maaparametrien osavarmuusluvut.

Kertoimen kohde	Osavarmuusluku	Varmuusluvun käyttö
Maan sisäinen kitka $\phi$ (vakavuus ja maanpaine; pysyvät rakenteet)	1,2	$\tan\phi_d = \tan\phi / \gamma_\phi$
Kitka (vakavuus ja maanpaine; työnaikaiset rakenteet)	1,1	$\tan\phi_d = \tan\phi / \gamma_\phi$
Koheesio (vakavuus ja maanpaine; pysyvät rakenteet)	1,5	$c_d = c' / \gamma_c$
Koheesio (vakavuus ja maanpaine; työnaikaiset rakenteet)	1,3	$c_d = c' / \gamma_c$

Käyttörajan tarkistamiseen käytetään ykkösen suuruisia osavarmuuslukuja kaikille pysyville ja muuttuville kuormituksille, jollei muuta ole määrätty. Maaperän ominaisuuksien mitoitusarvot,  $X_d$ , tulee joko arvioida suoraan tai johtaa ominaisarvoista,  $X_k$ , käyttämällä yhtälöä (4). [ENV 1997-1].

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (4)$$

missä  $X_d$  on maaperäominaisuuden mitoitusarvo  
 $X_k$  maaperäominaisuuden ominaisarvo  
 $\gamma_m$  maan ominaisuuteen liittyvä varmuusluku

Varmuusluvun käyttö :

$$\phi'_d = \arctan\left(\frac{\tan \phi'}{\gamma_\phi}\right) \quad (5)$$

$$c_d = \frac{c'}{\gamma_c} \quad (6)$$

## 2.6 Mitoituslaskelmissa käytetyt liikennekuormien ominaisarvot

Liikenneväylien kuormien ominaisarvojen puuttuessa Eurocodeista, on tiepenkereen mitoituslaskelmissa käytetty Tielaitoksen julkaisun "Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet" mukaista liikennekuorman ominaisarvoa  $Q_k = 10 \text{ kN/m}^2$ .

Tielaitoksen ohjeessa "Siltojen kuormat" on määritelty kaksi kuormaluokkaa ajoneuvoliikenteelle tarkoitettujen siltojen ja niihin liittyvien maarakenteiden liikennekuormille. Kuormaluokkaa I käytetään yleisten teiden silloissa ja kuormaluokkaa II yksitysteiden silloissa.

Eurocode 1:n osan 3 "Traffic loads on bridges" mukaan siltoihin liittyvien penkereiden liikennekuormien ominaisarvoina käytetään liikenneväylien kuormien ominaisarvoja. Ohjeessa "Traffic loads on bridges" on annettu vain kevyen liikenteen sillan tulopenkereellä vaikuttava liikennekuorman ominaisarvo  $Q_k = 5 \text{ kN/m}^2$ , joka vastaa Tielaitoksen ohjeen "Siltojen kuormat" mukaista arvoa kuormaluokassa II.

Eurocode 1:n osan 3 siltoihin liittyvien maarakenteiden kuormia koskevan huomautuksen mukaan asiaankuuluvan viranomaisen on mahdollista tehdä kuormakäsittelyyn liittyviä täsmennyksiä, mikä on tulkittu siten, että tukimuurirakenteen Eurocode-mitoituslaskelmissa liikennekuorman ominaisarvona on käytetty Tielaitoksen ohjeen kuormaluokan I mukaista arvoa  $Q_k = 20 \text{ kN/m}^2$ .

## 2.7 Käyttörajatila

Eurocode 7:n penkereitä ja luiskia koskevan periaatesäännön mukaan mitoituksen tulee osoittaa, että muodonmuutos ei aiheuta penkereen tai luiskan lähellä olevien rakenteiden käyttökelpoisuuden menetystä.

Penkereen painuma kokoonpuristuvalla maapohjalla voidaan laskea käyttämällä Eurocode 7:n antura- ja laattaperustuksia käsittelevän kappaleen (6.6.1) periaatteita. Erityistä huomiota on kiinnitettävä aika-painumayhteyteen, joka sisältää sekä konsolidaation että sekundäärisen painuman.

Eurocode 7:n informatiivisessa liitteessä D on esitetty esimerkkimenetelmiä painuman arvioimiseksi. Esitetyt menetelmät eivät poikkea suomalaisten ohjeiden laskentamenetelmistä, joten niitä ei käsitellä näissä vertailulaskelmissa.

Käyttörajatilan tarkistamisessa kaikki pysyvien ja muuttuvien kuormien osavarmuusluvut ovat ykkösen suuruisia sekä Eurocodeissa että suomalaisissa ohjeissa.

### 3 PENKEREEN JA LUONNONLUISKAN VAKAVUUSLASKELMAT

#### 3.1 Yleistä

##### 3.1.1 Vakavuuden laskentamenetelmät

Pehmeikölle rakennettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat aloitetaan yleensä stabiiliteettilaskelmilla. Kun penkereen poikkileikkauksen muoto, mahdollisesti tarvittavat vastapenkeret yms. on mitoitettu niin, että niillä on sekä rakennusaikana että käyttötilassa haluttu kokonaisvarmuus, tehdään muut geotekniset laskelmat [ Korhonen 1993].

Tunnetuimmat vakavuuden laskentamenetelmät ympyränmuotoisille liukupinnoille ovat Felleniuksen [1927] ja Bishopin [1955] kehittämiä. Bishopin liukupintamenetelmää käytetään lähinnä pitkänajan vakavuuden laskemiseen. Bishopin yksinkertaistetussa menetelmässä jätetään lamellien väliset vaakavoimat huomioimatta, jolloin menetelmän lähtöolettamukset ovat seuraavat:

1. Sortuma tapahtuu tasojännitystilassa ympyrän muotoisia liukupintoja pitkin.
2. Murtohetkellä leikkauslujuus on liukupinnan kaikissa pisteissä täysin mobilisoitunut.
3. Maamassa sortuu jäykkänä kappaleena.
4. Momenttien tasapainoehto  $\Sigma M=0$  sekä pystyvoimien tasapainoehto  $\Sigma V=0$  otetaan huomioon.
5. Leikkauslujuus lasketaan Mohr-Coulombin materiaaliyhtälöllä (7):

$$s = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (7)$$

s on maakerroksen leikkauslujuus

c' tehokas koheesio

$\sigma'$  liukupinnalla vaikuttava tehokas normaalijännitys

$\phi'$  tehokas kitkakulma.

Vaarallisinta liukupintaa vastaava kokonaisvarmuusluku  $F_c$  voidaan laskea liukuympyrän keskipisteen suhteen muodostetun momenttitasapainon avulla. Yhtälö (8) tunnetaan Felleniuksen sääntönä eli  $\phi = 0$  -menetelmänä.

$$F_c = \frac{R \Sigma c_u \Delta l}{\Sigma \Delta W_x} \quad (8)$$

$F_c$  on varmuusluku

R liukuympyrän säde

$c_u$  leikkauslujuus lamellin pituudella

$\Delta l$  lamellin pohjan leveys

$\Delta W$  lamellin paino pituussyksikköä kohti

x tarkasteltavan lamellin momenttivarsi

Mikäli sortuman yhteydessä liikkuvaan maamassaan kohdistuu vaakasuuntaisia voimia kuten kuivakuoren halkeamassa vaikuttava vedenpaine, lasjetaan varmuusluku yhtälöllä (9) [Fellenius 1927].

$$F_c = \frac{R \sum c_u \Delta l}{Q_w a + \sum \Delta W x} \quad (9)$$

$Q_w$  on kuivakuoren halkeamassa vaikuttava vedenpaine pituusyksikköä kohti

a vedenpaineresultantin  $Q_w$  momenttivarsi

Kun momenttitasapainoyhtälöön lisäksi otetaan huomioon pystyvoimien tasapainoehto  $\sum V = 0$ , voidaan kokonaisvarmuusluku  $F_{c\phi}$  esittää yhtälöllä (10).

$$F_{c\phi} = \frac{R \sum \left\{ \left[ c' \Delta x + (\Delta W - u \Delta x) \tan \phi' \right] \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{F}} \right\}}{\sum \Delta W \sin \alpha} \quad (10)$$

$\Delta x$  on lamellin leveys

$\alpha$  liukupinnan kaltevuus vaakatasoon nähden

Ympyränmuodosta poikkeavia liukupintoja voidaan Eurocoden mukaan joutua käyttämään kerroksellisissa maissa, joissa on merkittäviä leikkauslujuuden vaihteluita. Tällöin voidaan käyttää Janbun kehittämää menetelmää, joka perustuu lamelleihin vaikuttavien voimien tasapainoyhtälöön vaakasuoran suunnan suhteen. Liukuva maamassa jaetaan pohjasuhteiden perusteella sopivasti lamelleihin. Mielivaltaista liukupintaa vastaava varmuusluku  $\phi = 0$ -menetelmällä voidaan tällöin laskea yhtälöstä (11):

$$F_c = f_0 \frac{\sum \frac{c_u \Delta l}{\cos \alpha}}{\sum \Delta W \tan \alpha + Q} \quad (11)$$

missä  $f_0$  on lamellien välisten vertikaalivoimien vaikutuksen huomioonottava kerroin.

Lamellien painon laskemisen ja leikkauslujuuden sijoittamisen suhteen pätevät samat ohjeet kuin ympyränmuotoisille liukupinnoille. Vetohalkeamassa esiintyvä vaakavoima  $Q$  jätetään usein huomioon ottamatta [Helenelund 1956]. Siinä tapauksessa, että  $Q = 0$  ja  $\Delta x = \text{vakio}$ , yhtälö (11) yksinkertaistuu muotoon (11.1):

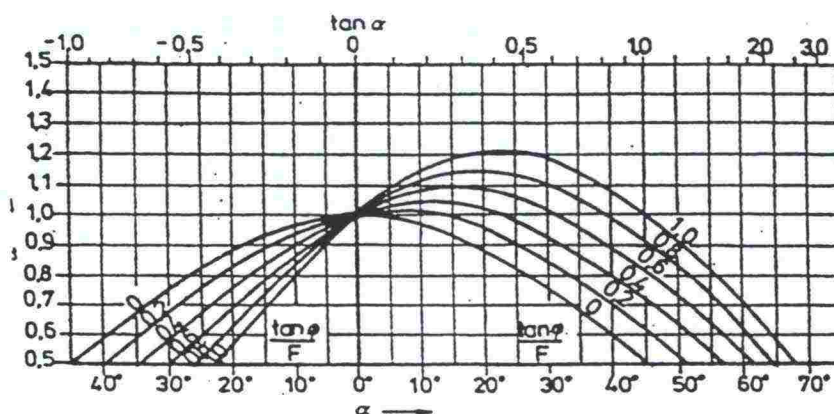
$$F_c = f_0 \frac{\sum \frac{c_u}{\cos \alpha}}{\sum p \tan \alpha} \quad (11.1)$$



Varmuusluku  $F_{c\phi}$  saadaan tällöin yhtälöstä (11.2)

$$F_{c\phi} = f_0 \frac{\Sigma [c' + (p - u) \tan \phi'] \Delta x}{\Sigma \Delta W \tan \alpha + Q} n_\alpha \quad (11.2)$$

missä kerroin  $n_\alpha = \cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \tan \phi' / F)$  määritetään kuvasta (1).



Kuva 1. Kertoimen  $n_\alpha$  määrittäminen.

Eurocode 7- esistandardissa murtopinnan rajaamaa maata käsitellään tavallisesti jäykkänä kappaleena tai useina samanaikaisesti liikkuvina jäykkinä kappaleina. Vaihtoehtoisesti stabiliteetti voidaan tarkistaa selvittämällä staattisesti mahdollinen jännityskenttä tai käyttämällä finiittielementtimenetelmää. Murtopinnat tai rajapinnat jäykkien kappaleiden välillä voivat olla muodoltaan vaihtelevia kuten tasoja, ympyröitä ja monimutkaisempia muotoja. Jos maa- tai pengermateriaali on suhteellisen homogeenistä ja lujuudeltaan isotrooppista, on oletus ympyränmuotoisista liukupinnoista yleensä riittävä. Kerroksellisissa maissa, joissa on merkittäviä leikkauslujuuden vaihteluita, luiskissa kiinnitetään erityistä huomiota alhaisen leikkauslujuuden kerroksiin. Tämä voi vaatia analyysiä muilla kuin ympyränmuotoisilla liukupinnoilla. [ENV 1997-1].

Eurocode 7:n mukaan penkereen stabiliteetti on geoteknisen mitoituksen yhteydessä selvitettävä siten, että otetaan huomioon kaikki ko. olosuhteissa mahdolliset penkereen murtumis- ja sortumistavat.

Tielaitoksen ohjeen mukaan vakavuuslaskelmia tehtäessä suositellaan kokonaisvarmuuslukumenetelmää käytettäväksi  $\phi = 0$  - menetelmän yhteydessä (rakennusajan vakavuus) ja osavarmuuslukumenetelmää  $c\phi$ - menetelmän (käyttötilan vakavuus) yhteydessä [Manelius et al 1993].

Rakennusajan vakavuuslaskelmia tehtäessä joudutaan ns. nopeilla kokeilla määritetty saven suljettu leikkauslujuus pienentämään redusointikertoimella, koska esim. siipikairalla mitattu suljettu lujuus on yleensä todellista toimivaa arvoa suurempi [Bjerrum 1973]. Redusointi voidaan suorittaa Bjerrumin menetelmällä, jossa redusointikerroin  $\mu$  on esitetty saven plastisuusluvun funk-

tiona  $f = f(w_p)$  [Bjerrum 1973] tai Helenelundin esittämällä menetelmällä, jossa redusointi tapahtuu kartiojuoksurajan  $w_L$  perusteella määritettyä redusointikerrointa käyttäen, kun  $w_L > 80 \%$ , kaavan (12) mukaisesti.

$$\mu = \frac{1,5}{1 + w_L / 100} \quad (12)$$

missä  $\mu$  on redusointikerroin  
 $w_L$  kartiojuoksuraja

Penkereen ja luiskan lyhyen ajan stabiliteettiä laskettaessa on eurocodien mukaisessa osavarmuuslukumenetelmässä suljetun leikkauslujuuden  $c_u$  ominaisarvoina käytetty kaavalla (12) redusoituja leikkauslujuuden arvoja.

Eurocodien kolmesta tapauksesta A, B ja C on penkereiden ja luonnonluiskien stabiliteettitarkasteluissa käsitelty vain case C eli mitoitustapaus, jossa maan lujuutta käytetään hyväksi.

### 3.1.2 Muut mitoitustarkastelut

Eurocode 7:n periaatesäännön mukaan penkereiden ja luiskien mitoituksella tulee varmistaa luiskan vakavuuden lisäksi, että pintaerosio, sisäinen eroosio tai hydraulinen nousu ei aiheuta murtoa tilanteissa, joissa lyhyt- tai pitkäaikainen suotovirtaus on mahdollinen.

Eurocode 7:n periaatesääntöjen mukaan hydrostaattisen voiman rasittaman geoteknisen rakenteen varmuuden arviointiin tulee kiinnittää erityistä huomiota, sillä muodonmuutokset halkeilu ja vedenläpäisevyyden vaihtelut suurentuneen eroosioriskin kanssa voivat lisätä vedenpinnan vaihteluita, mikä voi olla erittäin merkittävää varmuuden kannalta. Tutkittavat seikat, jotka voivat vaikuttaa vedenpaineeseen ovat vapaan veden ja pohjaveden pinta, kuivatuksen suotuisat ja epäsuotuisat vaikutukset, sekä luonnolliset että keinotekoiset, ottaen huomioon kuivatuksen ylläpito tulevaisuudessa, sadanta, tulvat ja vesijohtojen vuodot tai muut vesivarat sekä kasvillisuudesta aiheutuvat vedenpaineen vaihtelut. Rajatiloissa, joista on vakavia seurauksia (yleensä murtorajatilat), vedenpaineen ja suotovirtauksen aiheuttamien voimien mitoitusarvojen tulee edustaa epäedullisinta arvoa, joka voi esiintyä äärimmäisissä olosuhteissa. Rajatiloissa, joista on vähemmän vakavia seurauksia (yleensä käyttörajatilat), mitoitusarvoiksi tulee valita normaaleissa olosuhteissa esiintyvistä arvoista epäedullisimmat. Soveltamissäännön mukaan veden imeytymismäärissä esiintyvien vaihteluiden aiheuttama epäedullisten vedenpinnan korkeustasojen riski ja vähentyneet kuivatusmahdollisuudet on otettava huomioon. Jollei kuivatusjärjestelmän riittävyyttä pystytä osoittamaan ja sen ylläpitoa varmistamaan, on usein tarpeen olettaa, että pohjavedenpinta voi nousta maanpinnan tasolle äärimmäisissä tapauksissa. Joissakin tapauksissa tätä voidaan käsitellä onnettomuuskuormana.

Eurocode 7 - esistandardin luettelemia pintaerosion, sisäisen eroosion ja hydraulisen nousun estämiseksi käytettäviä toimenpiteitä ovat mm. suojaavien ja käänteisten suodattimien käyttäminen, luiskan päällystäminen ja

hydraulisen gradientin alentaminen. Muina toimenpiteinä on Eurocode 7:ssä lueteltu apukaivojen käyttö, suotovirtauksen tarkkailu ja dispergoivien savien käytön välttäminen ilman riittävää suojausta. Eroosiosuojauksen yksityiskohtaiseen mitoitukseen Eurocode ei ota kantaa.

Eurocoden periaatesäännön mukaaan maan, kallion ja kalliomassojen ominaisuudet määritellään geoteknisillä parametreillä, jotka tulee johtaa kenttä- ja laboratoriokokeiden tuloksista ja muista asianmukaisista tiedoista. Tulokset tulee tulkita tarkasteltavaan rajatilaan sopivalla tavalla. Parametrien arvojen määrittämisessä on huomioitava, että monet maaparametrit eivät ole vakioita, vaan riippuvaisia eri tekijöistä kuten jännitystasosta ja muodonmuutoksen laadusta ja nopeudesta. Lisäksi koetulosten tulkinnassa tulee ottaa huomioon julkaistu informaatio, joka liittyy kunkin koetyypin käyttämiin soveltuviin pohjaolosuhteisiin. Jokaisen parametrin arvoa tulee verrata asiaan liittyvään julkaistuun tietoon sekä paikalliseen ja yleiseen kokeemukseen. Julkaistut tiedot eri parametrien välisestä korrelaatiosta tulee tarvittaessa ottaa huomioon ja korrelaatiot useammalla kuin yhdellä koetyypillä saatujen tulosten välillä tulee tarkistaa, mikäli niitä on käytettävissä. Koeohjelman tulee sisältää riittävä määrä kokeita, jotta saadaan tietoa suunnittelussa tarvittavien eri parametrien johtamiseksi ja muuntelemiseksi [ENV 1997-1].

### 3.2 Penkereen vakavuus

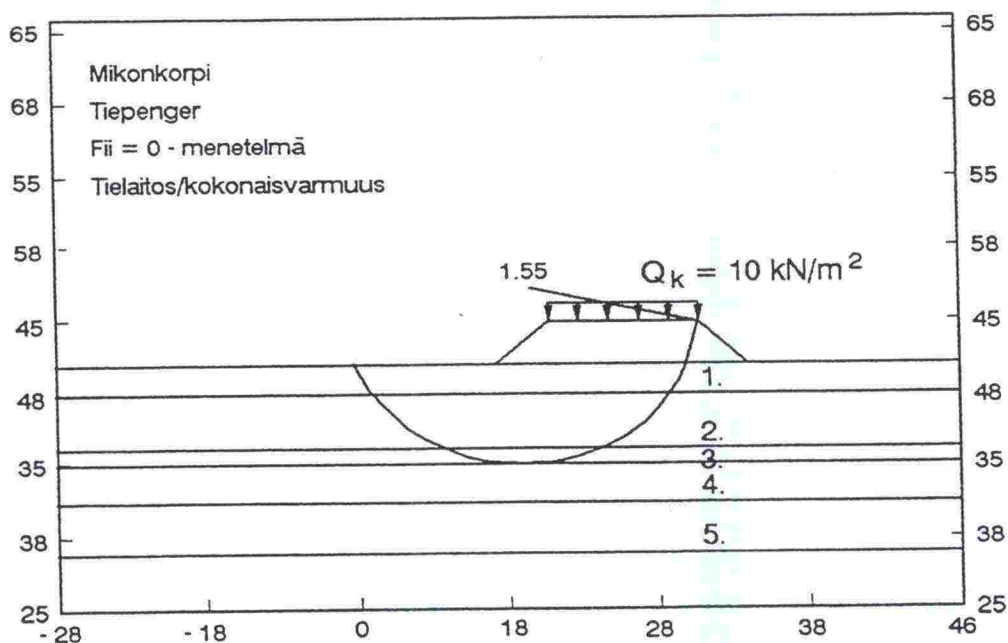
Esimerkkikohte Mt 140 ( Vanha Lahdentie ) Mikonkorpi sijaitsee Järvenpään kaupungin alueella Järvenpään keskustasta noin 3 kilometrin päässä kaakkoon. Esimerkkikohteena on todellisella rakennuspohjalla oleva kuvitteellinen pengeri. Pengerkorkeus määritettiin siten, että rakennusajan vakavuudeksi kokonaisvarmuuslukumenetelmällä tuli noin  $F_c \approx 1,5$ . Kohteessa on tehty pohjatutkimuksia tiesuunnitteluvaiheessa ja niitä on myöhemmin täydennetty rakennussuunnitelmavaiheessa. Paaluvälillä 315-325 on tehty luokituskokeiden lisäksi kolmiaksaali- ja ödömetrikokeita lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien selvittämiseksi. Suljettuja kolmiaksaalikokeita tehtiin 12 kappaletta, avoimia kolmiaksaalikokeita 10 kappaletta ja ödömetrikokeita 35 kappaletta.

Ylimpänä maakerroksena on kuivakuorikerros, jonka paksuus on noin 2 metriä. Siipikairalla mitattu leikkauslujuus on ollut vaihdellen 55-172 kN / m<sup>2</sup>. Kuivakuoren alla on noin 14 metriä lihavaa savea, osittain liejuista savea (humuspitoisuus vaihdellen 0.6% - 2.5% ), ja tätä syvemmillä on siltti-, hieka- ja moreenikerroksia. Savikerroksen yläosassa, noin tasolla + 34-40 metriä vesipitoisuus  $w$  on noin 95-110 % ja siipikairalla mitattu leikkauslujuus  $c_u$  on noin 20-28 kN/ m<sup>2</sup>. Laskelmissa käytetyn rakennuspohjan, vanhan tiepenkereen alta mitatun leikkauslujuuden samoin kuin vesipitoisuuden  $w$  arvot eivät poikkea tiepenkereen ulkopuolelta tehtyjen kokeiden arvoista, joten maakerrokset eivät ole lujittuneet vanhan tiepenkereen painosta.

Tiepenkereiden vakavuustarkasteluissa on käytetty liikennekuorman ominaisarvona  $Q_k = 10 \text{ kN/m}^2$ . Taulukossa 8 on esitetty penkereelle tehdyt tar-

kastelut kuorman ja maaperän ominaisuuksien osavarmuuslukuineen. Sarakkeessa "Mitoitusohje" ensimmäinen lyhenne (EC) tarkoittaa materiaaliparametrien valintaohjetta ja jälkimmäinen ohjetta, jonka mukaan kuormitusten osavarmuusluvut määräytyvät. Kuormayhdistelmät lasketaan kaavalla (3).

Penkereen vakavuuslaskelmat on tehty ympyränmuotoisilla liukupinnoilla. Tielaitoksen käytössä olevien laskentaohjelmien vertailemiseksi laskennat suoritettiin FULGEO, GEO-ATK ja MS-LIUKU nimisillä ohjelmilla. Eri ohjelmilla lasketut mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  olivat käytännössä yhtä suuret. Tässä raportissa esitetyt mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  on laskettu MS-LIUKU-ohjelmalla, jossa pystykuorma syötetään penkereen päällä olevan keinotekoisen maakerroksen tilavuuspainona.



Kuva 2. Stabiiliteettitarkasteluissa käytetty pengeri.

Taulukko 7. Mitoitusohje, kuormien ja maaperän ominaisuuksien osavarmuusluvut ja suoritettut tarkastelut.

Osavarmuuslukujen määritys-ohje	Mitoitus-tapaus	Kuormat Maanpain- no $\gamma_G$	Kuor- mat Liike- ne- kuorma $\gamma_Q$	Maape- rän ominais- suudet Koheesio $\gamma_c$	Maaperän ominais- suudet Kitka $\gamma_\phi$	Maaperän ominaisuu- det Suljettu leikkauslujuus $\gamma_{cu}$	Tarkastelut
EC7 (Maa) EC1 / EC7 (Kuormat)	Case C	1,0	1,30	1,6	1,25	1,4	$\phi = 0$ Rajatila- menetelmä c' $\phi$ Rajatila- menetelmä
EC 7 <sup>1)</sup> NAD(FIN) 1 (Kuorma)	Case C	1,0	1,30	1,6	1,25	1,4	$\phi = 0$ Rajatila- menetelmä c' $\phi$ Rajatilame- netelmä
NAD(FIN) 7 (Maa) EC1/EC7 (Kuorma)	Case C	1,0	1,3	1,6	1,25	1,55	$\phi = 0$ Rajatila- menetelmä c' $\phi$ Rajatila- menetelmä
TIEL	Lyhytai- kainen Pitkäai- kainen	1,0	1,0 <sup>2)</sup>	1,8	1,25	$F_c \geq 1,50$	$\phi = 0$ Kokonais- varmuusluku- menetelmä c' $\phi$ Rajatilame- netelmä

1) Sama mitoitus-tapaus kuin EC7/ EC7

2) Liikennekuorman ominaisarvo  $Q_k = Q_d = 10 \text{ kN/m}^2$

### 3.2.1 Vakavuus Tielaitoksen ohjeen mukaan

Tielaitoksen ohjeiden mukaan savikolle rakennettavan tiepenkereen stabiili-teettilaskelmat tehdään sekä pengerrysvaiheen lopussa että käyttötilassa. Vaiheittain pengerrettäessä pyritään ottamaan huomioon konsolidaatiopro-  
 sessin aikana tapahtuva suljetun leikkauslujuuden  $c_u$  kasvu. [Vepsäläinen et al 1994].

#### A. Lyhyenajan vakavuus Tielaitoksen ohjeen mukaan

Pohjamaa on siipikairausten perusteella jaettu viiteen eri kerrokseen. Sulje-  
 tut leikkauslujuudet on redusoitu julkaisussa Tiegeotekniikan yleiset mitoi-  
 tusperusteet esitetyllä kartiojuoksurajaan  $w_L$  (kaava 12) perustuvalla me-  
 netelmällä, kun  $w_L > 80 \%$  (taulukko 8)

Taulukko 8. Suljetun leikkauslujuuden  $c_u$  redusointikertoimet  $\mu$ .

Syvyys	taso	$w_L$	$\mu$
noin 2-4 metriä	noin + 40...+42	89 ... 104 %	0.76
noin 4-8 metriä	noin +36...+40	86 ... 90 %	0.8
noin 8-11 metriä	noin +32...+36	40 ... 66 %	1

Kuivakuorikerroksen leikkauslujuuden arvona käytettiin  $c_u = 30 \text{ kN/m}^2$ .

Pengerkorkeus valittiin siten, että lyhyen ajan vakavuudeksi kokonaisvarmuuslukumenentelmällä tuli  $F_c \approx 1,5$ .

Laskettaessa lyhyen ajan kokonaisstabiileettiä  $\phi = 0$ -menetelmällä kuiva-kuoren suljetun leikkauslujuuden arvoina käytettiin taulukon (9) mukaista maakerrosjakoa ja maaparametrien arvoja.

Taulukko 9. Pohjamaan kerrosjako stabiileettitarkastelussa Tielaitoksen mukaan.

Maakerros	Redusoimaton leikkauslujuus [kN/m <sup>2</sup> ]	Redusoitu leikkauslujuus[kN/m <sup>2</sup> ]	Tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]
1	110	30.0	17.6
2	22	17.5	14.4
3	20	16.0	14.4
4	23	23.0	14.4
5	17.5	17.5	15.5

Pengermateriaalin kitkakulmana  $\phi$  käytettiin  $35^\circ$  ja tilavuuspainona  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , jolloin kokonaisvarmuusluvuksi saatiin ympyräliukupinnalla  $F_c = 1,55$ .

#### B. Pitkänajan vakavuus Tielaitoksen ohjeen mukaan

Tehokkaiden jännitysten periaatteella laskettavan käyttötilan vakavuuden laskennassa eli  $c\phi$ - menetelmässä pohjamaa jaettiin kolmiakσιαalikokeiden perusteella kahteen kerrokseen. Ensimmäisessä tarkastelussa huokospaineen 0-tason oletettiin sijaitsevan kuivakuorikerroksen alapinnassa eli tasolla + 40.0 metriä. Toisena tarkasteluna laskettiin tilanne, missä huokosvedenpaineen 0-taso kohoaa metrillä esimerkiksi rankkasateen tai pohjavedenpinnan nousun seurauksena.

Taulukko 10. Pohjamaan kerrosjako  $c\phi$ - menetelmässä

Maakerros	Taso	$c'$	$c'_d$	$\phi'$	$\phi'_d$
Kuivakuori	+40.0...+42.0	3 kPa	1.7 kPa	$33^\circ$	$27,5^\circ$
2	+32...+40.0	3 kPa	1.7 kPa	$25^\circ$	$20.5^\circ$

Pitkän ajan mitoitusvarmuusluvuksi saatiin  $F_d = 2,0$  ympyrän muotoisella liukupinnalla. Huokospaineen 0-tason ollessa tasolla +41,0 metriä mitoitusvarmuusluvuksi ympyräliukupinnalla saatiin  $F_d = 1,99$ .

### 3.2.2 Vakavuus ohjeiden EC7/EC7 mukaan

#### A. Lyhyenajan vakavuus

Taulukko 11. Pohjamaan kerrosjako stabiiliteettitarkastelussa Eurocodien mukaan.

Maakerros	Ominaisarvo [kN/m <sup>2</sup> ]	Mitoitusarvo [kN/m <sup>2</sup> ]	Tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]
1	30,0	21,4	17,6
2	17,5	12,5	14,4
3	16,0	11,4	14,4
4	23	16,4	14,4
5	17,5	12,5	15,5

Suljetun leikkauslujuuden redusointiin ei Eurocodessa ole erillistä ohjetta. Maaperäominaisuuksia käsittelevän periaatesäännön mukaan maaparametrien arvot tulee valita rajatilaan johtavan arvon varovaisena arvona. Lisäksi jokaisessa laskennassa tulee käyttää riippumattomien parametrien ala- ja yläarvojen vaarallisinta yhdistelmää. Edelliset periaatesäännöt on  $\phi = 0$ -menetelmässä tulkittu siten, että kuivakuorikerroksen leikkauslujuutena on käytetty alhaisinta eri redusoinneilla saatua arvoa eli  $c_{ud} = 30 \text{ kN/m}^2$ .

Redusointi tehtiin Tielaitoksen ohjeen mukaan kartiojuoksurajaan perustuvalla menetelmällä. Mitoitusvarmuudeksi  $\phi = 0$ -menetelmässä saatiin tällöin ympyräliukupinnalla  $F_d = 1,19$ .

Laskettaessa lyhyenajan vakavuus myös kuivakuoren osalta mitoitusarvolla  $c_{ud} = 30 / 1,4 = 21,4 \text{ kN/m}^2$  mitoitusvarmuudeksi ympyräliukupinnalla tuli  $F_d = 1,07$ .

Eurocode 7:n periaatesäännön mukaisesti pohjavedenpinnan taso on valittu saatavilla olevista hydrologisista tiedoista siten, että saadaan mahdollisimman epäedulliset olosuhteet. Kokonaisstabiiliteetti laskettiin olettaen, että huokosvedenpaineen 0-taso nousee tasolta + 40,0 esimerkiksi rankkasateen tai pohjavedenpinnan nousun seurauksena tasoon + 41,0 metriä.

#### B. Pitkänajan vakavuus

Pitkänajan vakavuus laskettiin tehokkaiden jännitysten avulla  $c\phi'$ -menetelmällä, missä pohjamaa on jaettu kolmiakσιαalikokeiden perusteella kahteen kerrokseen. Laskennat suoritettiin Eurocode 7:n mukaisella osavarmuuslukumenetelmällä mitoitusvarmuudelle C, jolloin lujuusparametrit määritettiin kaavojen (5) ja (6) avulla osavarmuusluvut  $\gamma_\phi = 1,25$  ja  $\gamma_c = 1,6$  käyttäen. Mitoitusvarmuusluvuksi tuli  $F_d = 1,98$ .

Ohjejärjestelmällä EC7 / EC1 saadaan samat mitoitus tulokset kuin yhdistelmällä EC7 / EC7.

### 3.2.3 Vakavuus ohjeiden NAD(FIN)7 / EC7 mukaan

Taulukko 12. Pohjamaan kerrosjako stabiileettitarkastelussa NAD(FIN)7/ EC7:n mukaan.

Maakerros	Ominaisarvo [kN/m <sup>2</sup> ]	Mitoitusarvo [kN/m <sup>2</sup> ]	Tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]
1	30.0	19,3	17.6
2	17.5	11.3	14.4
3	16,0	10.3	14.4
4	23	14.8	14.4
5	17.5	11.3	15.5

Suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo  $c_u$  mitoitus tapauksessa C lasketaan osavarmuusluvulla  $\gamma_{cu} = 1,55$ . Veden- ja pohjavedenpaine määritetään ensisijaisesti paikalla tehtyjen havaintojen perusteella. Ominaisarvoksi valitaan käyttöaikana esiintyvä epäedullisin arvo tai kerran 50 vuodessa toistuva arvo. Jos havaintoja ei ole tietyn kohteen osalta, voidaan mitoituksen perustana käyttää lähellä sijaitsevia havaintopisteitä ja varovaista arviointia [NAD (FIN)7]. Mitoitusvarmuusluvuksi saatiin  $F_d = 1,10$ .

NAD(FIN) 7:n mukaan voidaan osavarmuuslukua  $\gamma_{cu}$  pienentää enintään 15 %:lla kun kuormitus on tilapäinen ja materiaalivahinkojen riski on vähäinen. Täysimääräisen osavarmuusluvun pienennyksen jälkeen mitoitusvarmuusluvuksi tulee  $F_d = 1,36$  ympyräliukupinnalla.

Laskettaessa lyhyenajan vakavuus myös kuivakuoren osalta mitoitusarvolla  $c_{ud} = 30 / 1,55 = 19,3 \text{ kN/m}^2$  mitoitusvarmuudeksi ympyräliukupinnalla tuli  $F_d = 0,99$ .

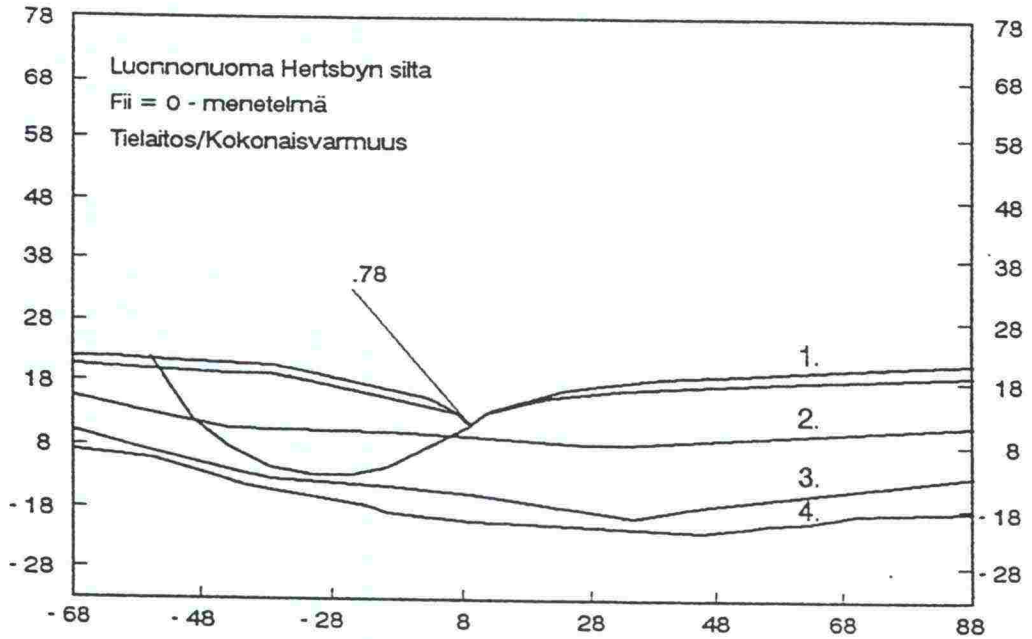
#### B. Pitkänajan vakavuus

Koska kitkan ja koheesion sekä kuormien osavarmuusluvut sekä kuormayhdistelmät ovat samat kuin Eurocode 1:ssä ja Eurocode 7:ssä esitetyt, saadaan  $c\phi$ - menetelmällä pitkänajan vakavuuden mitoitusvarmuusluvuiksi kuten edellä  $F_d = 1,98$  ympyräliukupinnalla.



### 3.3 Luonnonluiskan vakavuus

Luonnonluiskan maastomalli on esitetty kuvassa 3 ja suoritettut tarkastetut osavarmuusluvut ja mitoitusohjeet taulukossa 13. Liikennekuorman  $Q$  puuttuessa luonnonluiskan stabiliteettitarkasteluissa kuormana on vain omapaino, joten kaikissa tapauksissa kuormat ovat yhtä suuret. Stabiilitteettitarkastelut tehtiin sekä ympyrän- että vapaamuotoisilla liukupinnoilla.



Kuva 3. Stabiilitteettitarkasteluissa käytetty luonnonnuoma.

Taulukko 13. Tarkastellut mitoitus tapaukset sekä kuormien ja maaperän ominaisuuksien osavarmuusluvut.

Mitoitusohje	Kuormat Oma paino $\gamma_G$	Maaperän ominaisuudet Koheesio $\gamma_c$	Maaperän ominaisuudet Kitka $\gamma_\phi$	Maaperän ominaisuudet Suljettu leikkaus- ujuus $\gamma_{cu}$	Tarkastelut
EC 7 / EC7 <sup>1)</sup> Case C	1,0	1,6	1,25	1,4	$\phi = 0$ -menetelmä Rajatilamenetelmä $c$ $\phi$ - menetelmä Rajatilamenetelmä
NAD(FIN)7/ EC7 Case C	1,0	1,6	1,25	1,55	$\phi = 0$ -menetelmä $c$ $\phi$ - menetelmä Rajatilamenetelmä
TIEL	1,0	1,8	1,25	$F_c \geq 1,5$	$\phi = 0$ -menetelmä Kokonaisvarmuus- lukumenetelmä $c$ $\phi$ - menetelmä Rajatilamenetelmä

1) Sama mitoitus tapaus kuin EC7/EC1 ja EC7 / NAD(FIN)1

### 3.3.1 Vakavuus Tielaitoksen ohjeen mukaan

#### A. Lyhyenajan vakavuus

Siipikairausten perusteella pohjamaa on jaettu neljään geotekniseen kerrokseen, joiden suljetun leikkauslujuuden  $c_u$  ominaisarvot esitetään taulukossa 14.

Taulukko 14. Pohjamaan kerrosjako  $\phi = 0$  - menetelmässä Tielaitoksen ohjeen mukaan.

Maakerros	Tilavuuspaino $\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	Suljetun leikkauslujuuden $c_u$ ominaisarvo kPa
1.	16	25
2.	16	14
3.	16	12
4.	16	14

Luonnonluiskan vaarallisimmat liukupinnat on laskettu uoman molemmin puolin. Kuvaan 3 piirrettyssä maastomallissa on vasemman puolen varmuusluvaksi taulukon 14 mukaisin maaparametrien arvoin ympyränmuotoisella liukupinnalla kokonaisvarmuuslukumenetelmällä saatu  $F_c = 0,78$ . Uoman oikean puolen varmuusluvaksi saatiin vastaavasti ympyräliukupinnalla  $F_c = 1,03$  ja Janbun yhdistetyllä liukupinnalla  $\phi = 0$  - menetelmällä  $F_c = 1,05$ .

#### B. Pitkänajan vakavuus

Tehokkaiden jännitysten periaatteella laskettavan käyttötilan vakavuuden laskennassa käytetty pohjamaan kerrosjako on esitetty taulukossa 15. Huokospaineen 0-tason oletettiin sijaitsevan noin 0,5 metriä maanpinnasta.

Taulukko 15. Maapohjan kerrosjako  $c\phi$  - menetelmässä Tielaitoksen ohjeen mukaan.

Maakerros	Ominaisarvo $c'$	Ominaisarvo $\phi'$	Mitoitusarvo $c'$	Mitoitusarvo $\phi'$
Kuivakuori	20 kPa	15°	11.1	12.1
2.	8 kPa	13°	4.4	10.5
3.	8 kPa	13°	4.4	10.5
4.	0	32°	0	26.6

Osavarmuuslukumenetelmällä vasemman puolen pitkän ajan vakavuuden mitoitusvarmuusluvaksi tuli  $F_d = 1,06$  ja oikean  $F_d = 1,29$ .

Janbun yhdistetyllä liukupinnalla oikean puolen mitoitusvarmuudeksi saatiin  $F_d = 1,29$ .

### 3.3.2 Vakavuus ohjeiden EC7/EC7 ja NAD (FIN)7/EC7 mukaan

#### A. Lyhyenajan vakavuus

Taulukko 16. Pohjamaan kerrosjako  $\phi = 0$  -menetelmässä Eurocodien ja NAD(FIN)7:n mukaan.

Maakerros	Suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo kPa	Suljetun leikkauslujuuden mitoitusarvo kPa
1. Kuivakuori	25	17.9
2.	14	10.0
3.	12	8.6
4.	14	10.0

Vasemman puolen mitoitusvarmuusluvuksi ympyränmuotoisella liukupinnalla osavarmuuslukumenetelmällä tulee  $F_d = 0,56$ . Uoman oikean puolen varmuusluvuiksi saatiin vastaavasti ympyräliukupinnalla  $F_d = 0.74$  ja Janbun yhdistetyllä liukupinnalla  $\phi=0$  -menetelmässä  $F_d = 0,75$ .

NAD(FIN)7:n mukaisen suljetun leikkauslujuuden osavarmuusluvulla  $\gamma_{cu} = 1,55$  mitoitusvarmuusluku ympyräliukupinnoilla on uoman vasemmalla puolella  $F_d = 0,50$  ja oikealla  $F_d = 0,66$ . Yhdistetyllä liukupinnalla mitoitusvarmuudeksi tulee  $F_d = 0,67$ .

#### B. Pitkänajan vakavuus

Pitkänajan vakavuutta laskettaessa Eurocodien osavarmuusluku koheesiolle on  $\gamma_c = 1,6$  ja kitkakulman  $\gamma_\phi = 1,25$ . Parametrien ominais- ja mitoitusarvot on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Maapohjan kerrosjako  $c\phi$ -menetelmässä Eurocodien ja NAD(FIN)7 mukaan

Maakerros	Ominaisarvo $c'$	Ominaisarvo $\phi'$	Mitoitusarvo EC7/EC7 $c'$	Mitoitusarvo EC7/EC7 $\phi'$
Kuivakuori	20 kPa	15°	12.5	12.1
2.	8 kPa	13°	5.0	10.5
3.	8 kPa	13°	5.0	26.6
4.	0	32°	0	26.6

Taulukon 17 mukaisilla osavarmuusluvuilla uoman vasemman puolen mitoitusvarmuus on  $F_d = 1,07$  ja oikean puolen  $F_d = 1,31$ . Vapaamuotoisella liukupinnalla mitoitusvarmuus  $F_d = 1,29$ .

Koska siltaan liittyvät maarakenteet ja niiden alla oleva maa tulkitaan rakenteeksi, jonka murtumisesta aiheutuva henkilö- ja materiaalihinkojen riski on suuri, yksi  $\phi = 0$  -tarkastelu tehtiin mitoitusvarmuuden NAD(FIN)7/EC7 mukaisella 20 % :a suuremmalla suljetun leikkauslujuuden osavar-

muusluvun arvolla jolloin osavarmuusluvuksi tulee  $\gamma_{cu} = 1,2 \cdot 1,55 = 1,86$  (taulukko 18).

Lisäksi tehtiin yksi  $c\phi$ - tarkastelu 10 %:a suuremmilla osavarmuusluvuilla. Koheesio osavarmuuslukuna käytetään  $\gamma_c = 1,1 \cdot 1,60 = 1,76$  ja kitkakulman  $\gamma_\phi = 1,37$ , jolloin maaparametrit ovat taulukon 19 mukaiset.

*Taulukko 18. Maaparametrit  $\phi = 0$ - menetelmässä korotetuilla osavarmuusluvuilla Eurocodien ja NAD(FIN)7:n mukaan.*

Maakerros	Suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo kPa	Suljetun leikkauslujuuden mitoitusarvo kPa
1. Kuivakuori	25	13,4
2.	14	7,5
3.	12	6,5
4.	14	7,5

Osavarmuusluvun  $\gamma_{cu}$  kasvaessa vasemman puolen mitoitusvarmuusluku  $\phi = 0$ - menetelmällä ympyränmuotoisella liukupinnalla alenee arvoon  $F_d = 0,47$ .

*Taulukko 19. Maaparametrit  $c\phi$ - menetelmässä korotetuilla osavarmuusluvuilla.*

Maakerros	Ominaisarvo $c'$	Ominaisarvo $\phi'$	Mitoitusarvo NAD7/EC7 $c'$	Mitoitusarvo NAD7/EC7 $\phi'$
Kuivakuori	20 kPa	15°	11,3	11,1
2.	8 kPa	13°	4,5	9,6
3.	8 kPa	13°	4,5	9,6
4.	0	32°	0	24,5

Taulukon 19 mukaisilla koheesio- ja kitkakulman mitoitusarvoilla mitoitusvarmuusluvuksi  $c\phi$ - menetelmällä tulee  $F_d = 1,01$ .

### 3.4 Maaparametrien ominaisarvojen tilastollinen arviointi

Maaperän ominaisuuden ominaisarvo on kyseiseen rajatilaan sopiva varovainen arvio. Ominaisarvoja valittaessa voidaan käyttää tilastollisia menetelmiä. Tässä tapauksessa maaparametrit määritetään havaintojen keskiarvona siten, että valittua arvoa pienemmän arvon todennäköisyys on alle 5%. Olettaen materiaaliominaisuus  $X$  normaalijakautuneeksi odotusarvon ollessa  $E(X)$  ja variaatikerroimen  $V(X)$ , viides sadannepiste vastaa arvoa  $\psi(1,64)$ , jolloin ominaisarvo lasketaan kaavalla [Hansbo 1994] (13) :

$$X_k = [1 - 1,64V(X)]E(X) \quad (13)$$

missä  $V(X) = D(X) / E(X)$  on variaatiokerroin

$D(X) = \sigma$  keskihajonta  
 $E(X) = \mu$  keskiarvo

Keskihajonta lasketaan kaavalla (14) :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - x)^2}{N - 1}} \quad (14)$$

missä N on havaintojen lukumäärä

$x_i$  yksittäisen havainnon arvo  
 $x$  keskiarvo

Taulukko 20 . Esimerkki maaparametrien  $\phi$  ja  $c$  ominaisarvojen määrittämisestä siten ,että todennäköisyys näitä pienemmille arvoille on pienempi kuin 0,05.

Maa-kerros	$\phi'$	$\phi'$	$c'$	$E(c')$	$E(\phi')$	$D(\phi)$	$D(c')$	$V(\phi)$	$V(c)$	$\phi_k$	$c_k$
1.	33	40	3	3	36,5	4,95	0	0,136	0	28,4	3

Maa-kerros	$\phi'$	$\phi'$	$\phi'$	$\phi'$	$\phi'$	$\phi'$	$E(\phi')$	$D(\phi)$	$V(\phi)$	$\phi_k$
2	21	38	25	22	34	28	28	6,59	0,235	17,2

Maakerroksissa 1 ja 2 määritetty koheesion arvo on kaikkialla  $c' = 3$  kPa eli  $c_k = 3$  kPa.

Maakerroksen 1 kitkakulman ominaisarvo on  $\phi_k = 28,4^\circ$  ja maakerroksen 2  $\phi_k = 17,2^\circ$ .

### 3.5 Yhteenveto penkereen ja luiskan laskelmista

Merkittävimpänä erona verrattaessa Tielaitoksen mitoituskäytäntöä Eurocodeihin on lyhyen ajan stabiliteetin eli  $\phi = 0$ - menetelmän laskeminen kokonaisvarmuuslukumenetelmällä. Vastaavasti käyttötilan stabiliteetin laskennassa  $c\phi$ - menetelmällä käytetään sekä Eurocodeissa että suomalaisessa mitoituskäytännössä rajatilamenetelmää. Rajatilamenetelmän osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 7.

Kuormitusten osavarmuusluvut case C:n osalta ovat yhtä suuria Eurocode 7:ssä ja Eurocode 1:ssä ja NAD(FIN)1:ssä , joten penkereiden ja luiskien osalta mitoitustapaukset EC7 / EC7 , EC7 / EC1 ja EC7 / NAD(FIN)1 ovat samat.

Käytettäessä liikennekuorman ominaisarvona  $Q_k = 10$  kN/ m<sup>2</sup> ja tulkittaessa Tielaitoksen ohjeen kuorman osavarmuusluvuksi  $\gamma_Q = 1,0$ , on Eurocodien

liikennekuorman  $Q_d$  mitoitusarvo suurempi eli case C:ssä  $Q_d = \gamma_Q * Q_k = 1,30 * 10 = 13 \text{ kN/m}^2$ .

Taulukko 21. Tiepenkereen  $\phi = 0$ - menetelmän varmuusluvut  $F_d$ .

Mitoitusohje.	Kokonaisvarmuus ympyräliukupinta $F_c$	Osavarmuus ympyräliukupinta $F_d$
TIEL:	1,55	1,03 ( 1,55/1,5)
EC7/EC7 <sup>1)</sup>		1,07 (1,19) [ $\gamma_{cu}=1,40$ ]
NAD(FIN)7/ EC7		0,99 (1,10) [ $\gamma_{cu}=1,55$ ]
NAD(FIN)7/ EC7 $\gamma_{cu}$ 15 % pienempi		1,22 (1,36)

1) Sama tapaus kuin EC7/EC1

Käytettäessä kuivakuorelle osavarmuusluvulla korjattua mitoitusarvoa  $c_{ud}$  mitoitusvarmuusluku ohjeen EC7/EC7 mukaan alenee arvoon  $F_d = 1,07$  (kuivakuoren ominaisarvolla  $F_d = 1,19$ ).

Esimerkkikohteessa pengerkorkeus valittiin siten, että kokonaisvarmuus Tielaitoksen ohjeen mukaan täytti vaadittavan minimivarmuustason  $F_c = 1,5$ . Merkittävää on, että varmuustaso Eurocodien rajatilamitoituksessa on kyseisessä kohteessa suuremmasta liikennekuormasta huolimatta riittävä ( $F_d > 1,0$ ).

Maaparametrien ollessa valittuja NAD(FIN)7 mukaan varmuusluku oli alhaisin johtuen suuremmasta suljetun leikkauslujuuden  $c_u$  osavarmuusluvun arvosta  $\gamma_{cu} = 1,55$ .

Lukuun ottamatta Tielaitoksen ohjeen mukaista koheesion osavarmuuslukua  $\gamma_c = 1,8$  olivat käyttötilan tarkasteluissa käytetyt kitkan ja koheesion osavarmuusluvut yhtä suuret. Varmuustaso on esitetty taulukossa 22 .

Taulukko 22. Tiepenger.  $c \phi$ - menetelmän mitoitusvarmuusluvut  $F_d$ .

Mitoitusohje	Ympyräliukupinta $F_d$
Tiel	2,0
EC7 / EC7	1,98
NAD(FIN)7/EC7	1,98

Esimerkkilaskelmassa on mitoitus tapauksissa EC7 / EC7 ja NAD(FIN)7/ EC7 suurempi liikennekuorma, mutta pienempi koheesion osavarmuusluku, jolloin varmuustaso on käytännössä sama.

Luonnonluiskan stabiileittitarkasteluissa kuormana oli vain maakerrosten omapaino osavarmuuslukujen  $\gamma_G$  ollessa ykkösen suuruisia, eli varmuustason vaihtelu johtui maaperän ominaisuuksien erisuurista osavarmuusluvuista

ja lyhyenajan tarkastelussa erilaisesta mitoitusmenetelmästä. Yksi liukupintatarkastelu tehtiin NAD(FIN)7 mukaisin 20 % suuremmin materiaaliominaisuuksien osavarmuusluvuihin. Käyttötilan mitoitusvarmuusluvut on esitetty taulukoissa 23 ja 24.

Taulukko 23. Luonnonluiskan  $\phi = 0$ -menetelmän varmuusluvut  $F_c$  ja  $F_d$ .

Mitoitusohje.	Kok.varmuus ympyräliukupinta $F_c$ vasen/ oikea	Kok.varmuus yhdistetty liukupinta $F_c$ vasen	Osavar- muus ympyrä- liukupinta $F_d$ vasen/ oi- kea	Osavar- muus yhdistetty liukupinta $F_d$ vasen
Tiel.	0,78 / 1,03	1,05	(0,52/ 0,68)	0,70
EC7/EC7 <sup>1)</sup>			0,56/0,76	0,75
NAD(FIN)7/ EC7			0,50 / 0,66	0,67
NAD(FIN)7/ EC7 $\gamma_{cu}$ 20 % suu- rempi			0,47	

Luonnonluiskan osalta vapaamuotoisilla liukupinnoilla laskettu mitoitusvarmuus oli kaikissa tarkasteluissa yhtä suuri tai hieman suurempi kuin ympyräliukupinnoilla laskettu varmuusluku.

Taulukko 24. Luonnonluiska.  $c\phi$ -menetelmän mitoitusvarmuusluvut  $F_d$

Mitoitusohje	Ympyräliukupinta $F_d$ vasen/ oikea	Yhdistetty liukupinta $F_d$ oikea
Tiel	1,06 / 1,29	1,29
EC7 / EC7 (kuorma)	1,07/1,31	1,31
NAD(FIN)7/ EC7 $\gamma_{c,\phi}$ 10% suurempi	1,01	

## 4 JÄYKÄN TUKIMUURIRAKENTEEN VERTAILEVAT MITOITUSLASKELMAT

### 4.1 Jäykkään tukirakenteeseen kohdistuva maanpaine

Pohjarakennusohjeiden [PRO1988] mukaan maanpaine jäykkää tukirakennetta vastaan lasketaan ottaen huomioon muun muassa maan laatu, pohjaveden taso ja veden virtaustila sekä rakenteen muoto, jäykkyys ja liikkumismahdollisuus. Laskentaan tarvittavat maasta riippuvat mitoitusparametrit määritetään maakerroksittain pohjatutkimuksilla tai muulla tavoin maakerroksista hankittujen luotettavien tietojen perusteella. Maanpaine lasketaan yleensä klassisen maanpaineteorian mukaan. Muitakin luotettavia ja kulloinkin kysymyksessä olevaan tapaukseen soveltuvia laskutapoja voidaan käyttää [ PRO 1988].

#### 4.1.1 Maanpaine siirtymätöntä rakennetta vastaan

Siirtymätön rakenne, esimerkiksi kalliolle perustettu tukimuuri, mitoitetaan lepopaineelle. Lepopaineen oletetaan vaikuttavan vaakasuoraan.

Lujuusopillisesti lepopaine määritetään kosketuspaineeksi, jolla maanaineksen hiukkasten asema pysyy siirtymättömänä. Teoreettisesti tämänkaltainen tilanne kehittyy siirtymättömiin käytännön rakenteisiin ajan myötä. Koska lepopaineen määritelmän mukaan maamassan hiukkaset ovat siirtymättömiä ja lisäksi olettamalla maamassa isotrooppiseksi, voidaan maamassaan soveltaa yleistettyä Hooken lakia suorakulmaisessa xyz- koordinaatistossa yhtälön (15) mukaisesti:

$$P_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma'_{v0} = K_0 \sigma'_{v0} \quad (15)$$

missä  $P_0$  on lepopaine

$\nu$  Poissonin luku

$K_0$  lepopaine kerroin

$\sigma'_{v0}$  tehokas vallitseva jännitys

Lepopaine vinoa rakennetta vastaan voidaan määrittää soveltaen lujuusoppia kaavalla (16):

$$p_\alpha = p_0 \cos^2 \alpha \quad (16)$$

missä  $p_0$  on lepopaine

$p_\alpha$  lepopaine vinoa pintaa vasten

$\alpha$  ko. pinnan ja pystysuoran tason välinen kulma



Koska lepopaine kerroin on  $K_0 = f(\nu)$  ja siten maassa vallitsevasta jännityksestä riippuva materiaalivakio, voidaan se kokeellisesti määrittää kolmiaksaalikoikeella jäljittelemällä luonnossa vallitsevia olosuhteita. Lepopaine kerroin likiarvoja eräille maalajeille on esitetty muun muassa lähteessä RIL 166 Pohjarakenteet. Maanpinnan ollessa vaakasuora ja tukirakenteen pystysuora voidaan lepopaine kerroin määrittää yhtälöllä (17):

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (17)$$

PRO:n ja Eurocodien mukaan lepopaineluku lasketaan yhtälöllä (17). Jos maanpinnan kaltevuuskulma on  $\beta$ , tulee maanpaineluvuksi  $K_{0\beta} = K_0 (1 + \sin \beta)$ .

Eurocode 7:n periaatesäännön mukaan mitoitusmaanpaineen määrittämisessä on huomioitava tukirakenteessa tarkasteltavassa rajatilassa mahdollisesti esiintyvän ja hyväksyttävän siirtymän ja muodonmuutoksen suuruus. Maanpaine tulee laskea lepojännitystilassa, mikäli seinä ei liiku suhteessa maahan. Lepotilan määrittämisessä tulee ottaa huomioon maan jännitystilat. Edelliseen liittyvän sovellusohjeen mukaan lepo-olosuhteet esiintyvät tavallisesti tukiseinän takana olevassa maassa, kun rakenteen siirtymä on vähemmän kuin  $5 \cdot 10^{-4} H$  normaalisti konsolidoituneessa maassa (H on seinän korkeus).

Eurocode 7:n mukainen lepopaine kerroin vaakasuuntaiselle maanpinnalle voidaan määrittää yhtälöllä (18):

$$K_0 = (1 - \sin \phi) \sqrt{R_{oc}} \quad (18)$$

missä  $R_{oc}$  on ylikonsolidaatioaste

$\phi$  kitkakulma  
 $K_0$  lepopaine kerroin

Kaavaa (18) ei käytetä suurilla ylikonsolidaatioasteen  $R_{oc}$  arvoilla.

#### 4.1.2 Maanpaine siirtyvää jäykkää rakennetta vastaan

Maanpaine siirtyvää jäykkää rakennetta esimerkiksi maanvaraista tukimuuria vastaan voidaan PRO:n [1988] mukaan määrittää klassisen maanpaineteorian mukaisena aktiivisena maanpaineena. Klassisella maanpaineella tarkoitetaan maanpaineen laskumenetelmää, joka perustuu Coulombin maanpaineteoriaan. Teorian lähtöoletuksena on, että tukirakenne siirtyy suuntaansa säilyttäen tai kiertyy alareunansa ympäri. Siirtyväksi jäykäksi rakenteeksi katsotaan jäykkä rakenne, joka voi siirtyä niin paljon ja siten, että aktiivinen maanpaine kehittyy [PRO 1988].

Aktiivisen maanpaineen resultantti syvyydessä  $z$  on tapauksessa  $c = 0$  eli kitkamaassa:

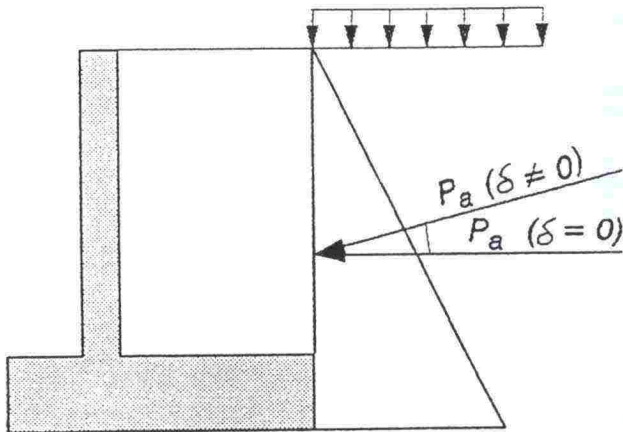
$$P_a = \int_0^h p_a dz = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a \quad (19)$$

missä  $P_a$  on aktiivipaineen resultantti  
 $\gamma$  maan tilavuuspaino  
 $q$  tasainen pintakuorma  
 $K_a$  maanpainekerroin

Ensimmäisen laskentaesimerkin tapauksessa maanpinta on vaakasuora ja tukiseinä pystysuora. Tällöin aktiivinen maanpainekerroin (Rankinen maanpainekerroin) voidaan tapauksessa, jossa seinän ja maan välinen kitka  $\delta = 0$ , laskea kaavalla (18):

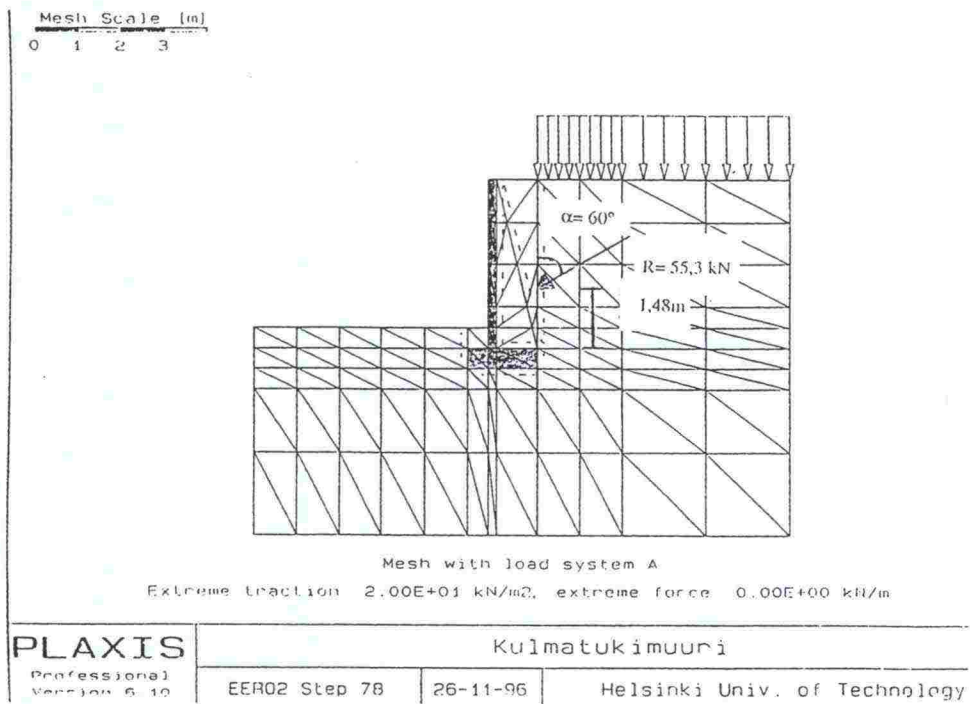
$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (20)$$

Rankinen maanpaine on edellä mainitussa tapauksessa vaakasuora. Otaksoma vaakasuorasta maanpaineesta maan sisällä kuvan 4 mukaisessa mitoitustapauksessa on teoreettisesti oikein, mikäli tukimuurin etuseinä ei estä plastisoituvan maakiilan muodostumista tukimuurin taakse. Mikäli muurin pohja on liian kapea, maanpaineen resultantti  $P$  muodostaa kulman  $\delta$  seinäpinnaksi otaksutun tason normaalin kanssa.

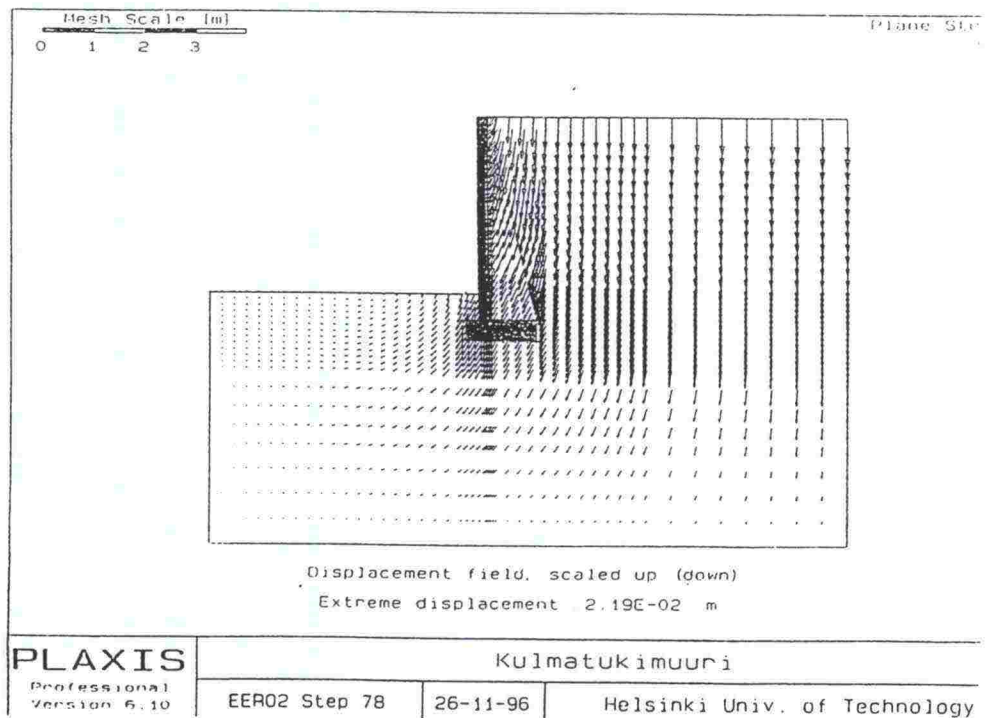


Kuva 4. Aktiivisen maanpaineen resultantti  $P_a$ , maanpinnan ollessa vaakasuora ja pystysuoran seinämän seinäkitkan ollessa  $\delta = 0$  tai  $\delta \neq 0$ .

Kuormitusresultantin suuntaa tutkittiin laskentaesimerkin tapauksessa elementtimenetelmään (FEM) perustuvalla PLAXIS-ohjelmalla. Tulokset osoittivat, että esimerkkitapauksena käytetyn tukimuurin dimensioilla maanpaineen resultantti muodostaa noin  $30^\circ$  asteen kulman seinäpinnaksi otaksutun tason normaalin kanssa (kuvat 5 ja 6).



Kuva 5. Elementtilaskelman maanpaineresultantin vinous PLAXIS -ohjelmalla.



Kuva 6. Elementtilaskelman siirtymävektorit PLAXIS-ohjelmalla.

Yleisessä tapauksessa aktiivisen maanpaineen suuruuteen vaikuttavat seinäkitka  $\delta$ , maanpinnan kaltevuus vaakatasoon suhteen ja tukimuurin kaltevuus pystytason suhteen. Aktiivisen maanpaineen resultantti voidaan yleisessä tapauksessakin laskea yhtälön ( 19 ) mukaan

$$P_a = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a \quad ( 19 \text{ bis} )$$

mutta maanpainekertoimeksi (Coulombin maanpainekerroin) tulee (yhtälö 21):

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}} \right]} \quad ( 21 )$$

Kaavassa (21)  $\alpha$  on tukimuurin kaltevuus pystytasoon nähden (kuva 9)  
 $\beta$  maanpinnan kaltevuus vaakatasoon nähden  
 $\delta$  seinäkitkakulma  
 $\phi$  maan kitkakulma

Tapauksessa, jossa seinäkitka  $\delta \neq 0$ , maanpaineen kuormitusresultantti muodostaa kulman  $\delta$  seinän normaalin suhteen.

Eurocode 7:n sovellusohjeen mukaan mobilisoituneen seinäkitkan  $\delta$  suuruus on sora- tai hiekkamateriaaleja tukeville betoni- tai teräsponteille  $\delta = k\phi$ , missä esivaletulle betonille tai teräspontille  $k < 2/3$ , kun taas maata vasten valetulle betonille voidaan olettaa, että  $k = 1,0$ . [ENV 1997-1.]

Kitkamaassa seinän ja maan välinen kitka pienentää yleensä aktiivipainetta ja suurentaa passiivipainetta. Tämä voidaan ottaa huomioon maanpainelukuja määritettäessä. Ilman tarkempaa selvitystä voidaan tukirakenteen ja seinän väliseksi kitkaksi olettaa aktiivipuolella  $\delta = 2/3 \phi$  ja maan sisällä olevalle pinnalle  $\delta = \phi$  [PRO 1988].

Maanpaineen raja-arvot ovat passiivi- ja aktiivipaineet, jotka esiintyvät, kun maan leikkauslujuus on täysin mobilisoitunut eikä ole estettä maan tai seinän tarvittavan liikkeen tyypille ja määrälle.

Maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä PRO:n mukaan saadaan taulukosta 25.  $H_a$  on sen seinän osan korkeus, johon aktiivipaine kohdistuu.  $H_p$  on sen seinän osan korkeus, johon passiivipaine kohdistuu.

Taulukko 25. Maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä PRO:n (1988) mukaan.

Maalaji	Aktiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä	Passiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä
Tiivis hiekka	$0,0005 * H_a$	$0,002 * H_p$
Löyhä hiekka	$0,002 * H_a$	$0,006 * H_p$
Kiinteä savi	$0,01 * H_a$	$0,02 * H_p$
Pehmeä savi	$0,02 * H_a$	$0,04 * H_p$

Eurocoden sovellussäännön mukaan aktiivisen rajatilan kehittymiseen tarvittava liike kitkamaassa, joka on tiiviydeltään vähintään keskitiivis, on suuruusluokaltaan seuraava:

1. Yläpään kiertyminen 0,002 \*H
2. Kärjen kiertyminen 0,005 \*H
3. Yhdensuuntaissiirtymä 0,0001\*H

missä H on seinän korkeus.

Eurocode 7:n informatiivisessä liitteessä G käsitellään esimerkkimenetelmiä maanpaineen raja-arvojen määrittämiseksi. Laskentatilasta riippuen määritetään kolme maanpaineekerrointa:  $K_\gamma$  maan painolle määritettynä tilavuuspainolla  $\gamma$ ,  $K_q$  pystysuuntaiselle pintakuormalle  $q$  ja  $K_c$  maan koheesiolle  $c$ . Kaikki maanpaine kertoimet riippuvat maan kitkakulmasta.

Millä tahansa etäisyydellä  $z$  alaspäin seinän yläpäästä ( tai pystysuuntaisella syvyydellä  $z \cos \theta$  ) maanpinnasta lukien kokonaisjännityskomponentit ovat normaalijännitys  $\sigma$  ja tangentialijännitys  $\tau$ . Tangentialijännitys  $\tau$  on positiivinen, kun maasta seinään kohdistuva paine on suunnattu kohti yläpäästä. Avoimessa tilassa kyllästymättömissä maissa maanpaine syvyydellä  $z$  lasketaan kaavalla (22):

$$\sigma = \sigma' = K_\gamma \int_0^z \gamma dz + K_q q' + K_c c' \quad (22)$$

ja tangentialijännitys :

$$\tau = \sigma' \tan \delta + a' \quad (22.1)$$

kaavoissa (22)  $\sigma'$  on seinää vastaan kohtisuoraan vaikuttava tehokas paine syvyydellä  $z$

- $\delta$  maan ja seinän välinen kitkakulma
- $a'$  seinän tehokas adheesio

Avoimessa tilassa kyllästyneissä maissa likiarvokaava on seuraava:

$$\sigma = \sigma' + u_z \quad (23)$$

$$\sigma' = K_\gamma \left( \int_0^z \gamma dz - \frac{u_z - u_0}{\cos \theta} \right) + K_q q' + K_c c' \quad (23.1)$$

$$\tau = \sigma' \tan \delta + a' \quad (23.2)$$

missä  $q'$  on tehokas pintapaine

$u_z$  huokosvedenpaine murtopinnalla etäisyydellä  $z$  seinän yläpäästä

$u_0$  huokosvedenpaine syvyydellä  $z = 0$

$\sigma'$  seinää vastaan kohtisuoraan vaikuttava tehokas paine syvyydellä  $z$   
 $\delta$  maan ja seinän välinen kitkakulma  
 $a$  seinän tehokas adheesio

Suljetuissa olosuhteissa maanpaine lasketaan kaavalla (24):

$$\sigma = K_{\gamma u} \int_0^z \gamma dz + K_{q u} q' + K_{c u} c_u \quad (24)$$

ja tangentiaaliännitys :

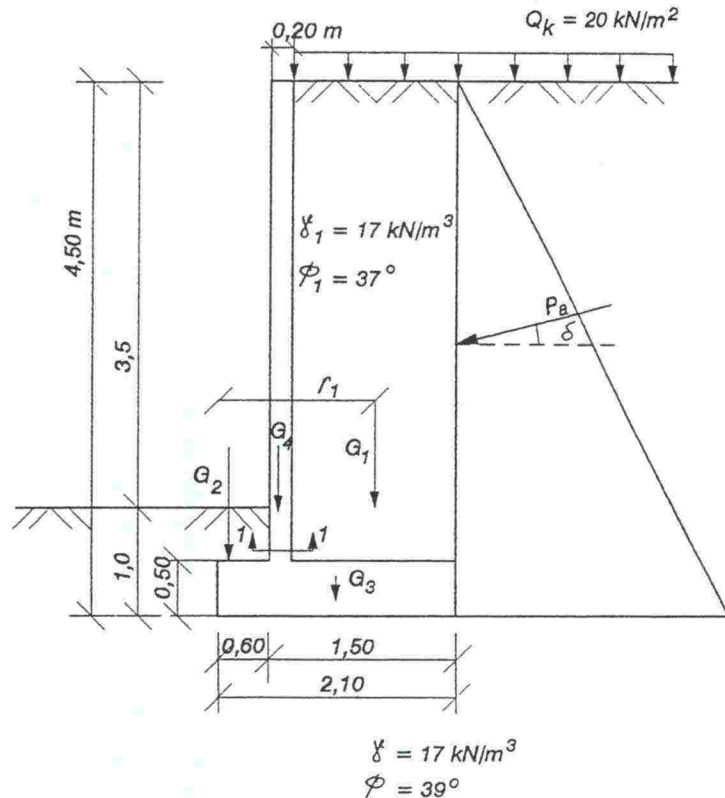
$$\tau = a_u \quad (25)$$

missä  $K_{\gamma u} = K_{q u} = 1$ , kun seinä on pystysuora ja maanpinta vaakasuora  
 $q$  on kokonaispintapaine ( vedenpaine mukaanluettuna)  
 $a_u$  seinän suljettu adheesio

Eurocode 7:n mukaan eksplisiittisiä kaavoja maanpainekertoimen yleiselle tapaukselle ei ole käytettävissä [ENV 1997-1], mutta EC 7:n liitteessä G on esitetty likimääräisiä menettelytapoja maanpainekertoimen määrittämiseksi. Seuraavissa mitoituslaskelmissa on käytetty yleisiä Rankinen ja Coulombin maanpainekertoimia kitkamaalle.

## 4.2 Tutkitut rakenteet

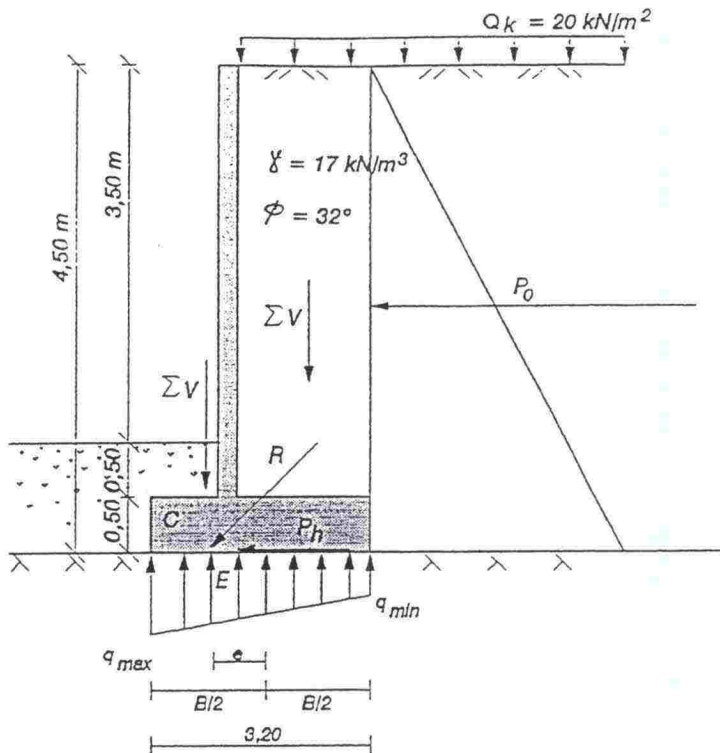
Jäykän tukimuurirakenteen vertailulaskelmat on suoritettu Ylöjärvellä sijaitsevan aikukutunnelin maaperätietojen avulla kuvitteelliselle tukimuurille, jonka geometria ja kuormitustiedot selviävät kuvasta 7.



Kuva 7. Vertailulaskelmissa käytetty maanvarainen perustus. Maanpaine 1.

Maanvaraisen tukimuurin täytön kitkakulma  $\phi = 37^\circ$  ja tilavuuspaino  $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ . Perustamistason alapuolisen maaperän kitkakulma  $\phi = 39^\circ$  ja tilavuuspaino  $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ . Tukimuurin korkeus  $h = 4,5 \text{ m}$ . Perustamissyvyys  $1,0 \text{ m}$ . Liikennekuorman ominaisarvo  $Q_k = 20 \text{ kN/m}^2$ . Betonin tilavuuspaino  $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ .

Geotekniset vertailulaskelmat on tehty sekä jäykälle siirtymättömälle että jäykälle siirtyvälle tukirakenteelle. Tukimuurirakenteiden rakenteellista mitoitusta ei ole käsitelty. Mitoitustarkasteluissa on käytetty kahta erilaista maanpainekuviota (kuvat 7 ja 9). Käytännön mitoituksessa valitaan epäedullisempi em. maanpainekuvioiden perusteella saaduista rakenteista.



Kuva 8. Vertailulaskelmissa käytetty kallionvarainen perustus.

Kalliolle perustettu tukimuri on esitetty kuvassa 8. Pohjalaatan etulaipan pituus on 1,0 m, takalaipan 2,0 m, täytön tilavuuspaino  $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$  ja kitkukulma  $\phi = 32^\circ$ . Perustuksen dimensiot määritettiin siten, että kokonaisvarmuusluvaksi Tielaitoksen ohjeen "Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa" mukaan mitoitettaessa varmuudeksi kaatumista vastaan tuli  $F \approx 1,5$ .

### 4.3 Maanvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmat

#### 4.3.1 Yleistä

Jotta tukimuurirakenteiden geotekninen mitoitus täyttäisi Pohjarakennusohjeiden ja niihin liittyvien Tielaitoksen ohjeiden sekä Eurocode 7:n vaatimukset riittävästä varmuudesta kyseeseen tulevia rajatiloja vastaan, on murto-rajatila- tarkasteluissa tarkastettava tukimuurin kokonaisstabiileettia, rakennuspohjan kantokykyä sekä varmuutta kaatumista ja liukumista vastaan. Käyttörajatilaa silmällä pitäen tulee tarkistaa myös tukirakenteen siirtymät.

Kokonaisstabiileettitarkastelut sekä suomalaisten ohjeiden että Eurocode 7:n mukaan tehdään kappaleissa 2 ja 3 esitettyjen periaatteiden mukaan. Tässä yhteydessä ei tehdä kokonaisstabiileettitarkasteluja. Käyttörajatila-



tarkastelut em. ohjeiden mukaan eivät poikkea toisistaan, joten niitäkään ei käsitellä näissä vertailulaskelmissa.

Esimerkkilaskelmissa käytetään pohjarakennusohjeiden [PRO 1988], DIN-normeihin perustuvan Tielaitoksen ohjeen [PROSILTA 1991] ja Eurocode 7:n informatiivisen liitteen G mukaisia analyttisiä menetelmiä. Maanvaraisen tukimuurin tarkastelut tehdään kahdelle yleisimmälle maanpainekuviolle, jotka selviävät kuvista 7 ja 9. Laskelmat on tehty eri menetelmien vertailemiseksi, joten niiden esitysjärjestys ei ole kaikilta osiltaan tarkoituksenmukainen käytännön mitoituslaskelmien kannalta.

Eurocode 7:n periaatesäännön mukaan tukimuurien kantokyky määritetään antura- ja laattaperustuksia käsittelevän luvun periaatteita tarkoituksenmukaisilta osiltaan soveltaen. Osoitettaessa, että perustus kantaa suunnittelu-kuorman riittävällä varmuudella kantokyvyn ylittymisen suhteen, seuraavan epäyhtälön tulee olla voimassa kaikilla murtorajatilan kuormitustapauksilla ja kuormitusyhdistelmillä :

$$V_d \leq R_d \quad (26)$$

missä  $V_d$  on perustuksen pohjaa vastaan kohtisuorassa oleva murtorajatilan mitoituskuorma, joka sisältää perustuksen ja täyttömateriaalin painon. Avoimessa tilassa veden paineita tulee yleensä käsitellä kuormina laskettaessa  $V_d$  :n arvoa.

$R_d$  perustuksen pystysuoran kuormituksen mitoituskantokyky, joka ottaa huomioon vinojen tai epäkeskisten kuormien vaikutuksen.  $R_d$  tulee laskea EC7:n lukujen Maaperäominaisuudet ja Geoteknisten parametrien arviointi mukaan.

Kantokyky eri mitoitusilanteissa lasketaan Eurocode 7:n informatiivisen liitteen B mukaan.

Mitoituskantokyky avoimessa tilassa kitkamaalle lasketaan kaavalla (27) :

$$\frac{R}{A} = q \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \quad (27)$$

missä  $q$  on yläpuolisen maan aiheuttama tehokas mitoituspaino perustuksen pohjan tasolla

$\gamma$  perustamistason alapuolisen maan tehokas tilavuuspaino

$B$  perustuksen tehokkaan leveyden mitoitusarvo

$s, i$ , perustuksen muodosta ja kuormituksen kaltevuudesta riippuvat kertoimet

$N$  kantavuuskertoimet

Mitoituslaskelmissa käytetyt Eurocode 7:n informatiivisen liitteen B mukaiset yksiköttömien kertoimien mitoitusarvot avoimessa tilassa lasketaan kaavoilla (28) :

Kantokyvylle:

$$N_q = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi_d}{2}) e^{\pi \tan \phi_d} \quad (28.1)$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi_d \quad (28.2)$$

Perustuksen muodolle:

$$s_q = 1 + \left( \frac{B'}{L'} \right) \sin \phi_d \quad (28.3)$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \left( \frac{B'}{L'} \right) \quad (28.4)$$

Vaakakuorman H aiheuttamalle kuorman kaltevuudelle:

$$i_q = \left( 1 - 0,7 \frac{H}{V} \right)^3 \quad (28.5)$$

$$i_\gamma = \left( 1 - \frac{H}{V} \right)^3 \quad (28.6)$$

Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan lasketaan perustusta pystyssä pitävien voimien ja kaatavien voimien avulla laskettujen momenttien suhteena. Kaatumista vastustaviin voimiin lasketaan mukaan pystykuorma, anturan paino sekä anturan päällä olevan maan paino. Perustuksen kiertoakselina on laskelmissa käytetty redusoidun pohjapaineen painopisteakselia ja perustuksen etureunaa.

Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan lasketaan kaavalla (29) :

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} \quad (29)$$

missä  $V_d$  on tehokkaan kuorman resultantin mitoitusarvo kohtisuoraan perustuksen pohjaa vastaan

$H_d$  mitoituskuorman resultantin vaakakomponentti

$x_e$   $V_d$  :n momenttivarsi kiertoakselin suhteen

$y_e$   $H_d$  :n momenttivarsi perustamistason suhteen.

Kokonaisvarmuuden rakenteen liukumista vastaan tulee PRO:n ja Tielaitoksen ohjeiden mukaan olla vähintään 1,5. Kokonaisvarmuus määritetään perustusta paikallaan pitävien ja siirtävien voimien suhteena. Perustuksen ja maan välinen kitkakerroin  $\tan \delta = \tan \phi$  maan varaan valetulle perustukselle ja  $\tan \delta = 0,75 \tan \phi$  sileälle elementtiperustukselle [ PROSILTA 1990].

Perustusta siirtäviä voimia ovat perustukseen kohdistuva horisontaalikuormitus sekä perustuksen sivuun kohdistuva aktiivimaanpaine. Paikallaan pitäviä voimia ovat maan passiivipaine, perustuksen alapinnassa vaikuttava kitkavoima sekä perustuksen sivulla vaikuttava sivukitka .

Eurocode 7:n periaatesäännön mukaan liukuvarmuus on tarkistettava aina, kun kuormitus ei ole kohtisuorassa perustuksen pohjaa vastaan. Jotta varmuus vaakasuuntaisella pohjalla tapahtuvaa liukumurtumaa vastaan on riittävä, tulee seuraavan epäyhtälön (30) olla voimassa [ ENV 1997-1] :

$$H_d \leq S_d + E_{pd} \quad (30)$$

eli mitoitusvarmuus  $F_d$  liukumista vastaan kasketaan kaavalla (31):

$$F_d = \frac{S_d + E_{pd}}{H_d} \quad (31)$$

missä  $H_d$  on mitoituskuorman vaakakomponentti

$S_d$  mitoitusleikkausvastus perustuksen pohjan ja maan välillä  
 $E_{pd}$  perustuksen sivulla vaikuttava vastustava mitoitusmaanpaine, joka voi mobilisoida tarkasteltavalle rajatilalle ominaisen siirtymän vaikutuksesta ja joka on käytettävissä koko rakenteen eliniän

Avoimissa olosuhteissa mitoitusleikkausvastus  $S_d$  lasketaan yhtälöllä (32) :

$$S_d = V'_d \tan \delta_d \quad (32)$$

missä  $V'_d$  on tehokkaan kuorman mitoitusarvo kohtisuoraan perustuksen poh-

jaa vastaan  
 $\delta_d$  tehokkaan kitkakulman mitoitusarvo perustuksen alapinnalla.

Eurocode 7:n sovellosohjeen mukaan mitoituskitkakulma  $\delta_d$  paikalla valetuilla betoniperustuksilla voidaan otaksua yhtäsuureksi kuin maan kitkakulman mitoitusarvo  $\phi'_d$ . Sileillä esivaletuilla perustuksilla mitoituskitkakulma  $\delta_d = 2/3 \phi'_d$ . Tehokkaan koheesion arvoa  $c'$  ei oteta huomioon.

Suljetuissa olosuhteissa mitoitusleikkausvastus  $S_d$  lasketaan yhtälöllä (33):

$$S_d = A^* c_{ud} \quad (33)$$

missä  $A^*$  on pohjan tehokas pinta-ala  
 $c_{ud}$  maan suljetun leikkauslujuuden mitoitusarvo

Eurocodien, PRO:n ja Tielaitoksen ohjeiden mukainen kantavuuden, kaatumisen ja liukumisen mitoitusvarmuusluvun  $F_d$  laskentamenettely esitetään esimerkkilaskelmissa. Tarkastelut tehdään pääosin laboratoriotulosten perusteella määritettyjen maaparametrien avulla. Yksi tarkastelu suoritetaan Eurocode 7 osan 3 "Geotechnical design assisted by field tests" mukaisen puristinkairaukseen perustuvan parametriarvioinnin pohjalta. Maanvaraisen tukimuurin kaikki mitoituslaskelmat on tehty rajatilamenetelmällä.

Tarkasteluissa käytetyt osavarmuusluvut kuormille ja maaparametreille selviävät taulukosta 26 ja kuormayhdistelmät kaavoista (34)- (37).

Taulukko 26. Kuormien ja maaperän ominaisuuksien osavarmuusluvut eri mitoitus tapauksissa, mitoitusohje ja suoritettut tarkastelut.

Mitoitusohje	Mitoitustapaus	Oma paino Osavarmuusluku $\gamma_s$	Liikennekuorma Osavarmuusluku $\gamma_q$	Maaperän ominaisuudet Osavarmuusluku $\gamma_\phi$	Tarkastelut 1. Aktiivipaine (Kahdella eri maanpainekuviolla, siirtyvä tukimuri)
EC 7 ( kapasiteetti) EC7 ( Kuormat)	Case A	1,0 / 0,95	1,50	1,1	Kaatuminen
EC 7 ( kapasiteetti) EC1 ( Kuormat)	Case A	1,1/ 0,90	1,50	1,1	
EC 7 ( kapasiteetti) EC7 ( Kuormat)	Case B	1,35/1,0	1,50	1,0	Liukuminen Kantokyky Mitoitusmomentit
EC 7 ( kapasiteetti) EC7 ( Kuormat)	Case C	1,0	1,30	1,25	Liukuminen Kaatuminen Kantokyky Mitoitusmomentit
EC 7 ( kapasiteetti) NAD(FIN)1 ( Kuormat)	Case C Case A Case B	1,0 1,1 / 0,90 1,35 / 0,90	1,30 1,50 1,50	1,25 1,1 1,0	Kantokyky Liukuminen Kaatuminen Mitoitusmomentit
TIELAITOS PROSILTA SILTOJEN KUORMAT	Rajatilamenetelmä	1,0	1,0	1,25	Kaatuminen Liukuminen Kantokyky Mitoitusmomentit
PRO + SRMK	Rajatilamenetelmä	1,0	1,6	1,2 1,2 1,25	Kaatuminen Liukuminen Kantokyky

Eurocode 7:n ja 1:n kuormayhdistelmät lasketaan kaavalla (34):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_p P_k + \gamma_{Q1} Q_1 + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} \Psi_{oi} Q_{ki} \quad (34)$$

$G_{kj}$	on pysyvien kuormien ominaisarvo
$P_k$	esijännityskuorman ominaisarvo
$Q_{k1}$	määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
$Q_{ki}$	muiden muuttuvien kuormien ominaisarvo
$\gamma_{Gj}$	pysyvän kuorman j osavarmuusluku
$\gamma_{Q1}$	muuttuvan kuorman osavarmuusluku
$\Psi$	yhdistelykerroin

Vastaavat kuormayhdistelmät kansallisen soveltamisasiakirjan NAD(FIN)1 mukaan :

Case A. Rakenteen kaatuminen ja liukuminen :

$$\sum_{j \geq 1} 1,1 G_{kj} + \gamma_p P_k + 1,5 Q_{k1} + \sum_{i \geq 1} 1,3 \Psi_{oi} Q_{ki} \quad (35)$$

Mikäli jokin pysyvä kuorma vastustaa rakenteen kaatumista tai liukumista käytetään tälle kuormalle luvun 1,1 sijasta lukua 0,9.

Case B. Rakenteellinen kestävyys :

$$\sum_{j \geq 1} 1,2 G_{kj} + \gamma_p P_k + 1,5 Q_{k1} + \sum_{i \geq 1} 1,5 \Psi_{oi} Q_{ki} \quad (36)$$

Kuitenkin vähintään  $1,35 \sum_{j \geq 1} G_{kj}$

Mikäli pysyvien kuormien yhteisvaikutus lisää rakenteen kestävyyttä, käytetään luvun 1,2 sijasta lukua 1,0.

Case C. Maapohjan murtuminen :

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + \gamma_p P_k + 1,3 Q_{k1} + \sum_{i \geq 1} 1,3 \Psi_{oi} Q_{ki} \quad (37)$$

Symbolit ovat samat kuin kaavassa (34).

### 4.3.2 Mitoituslaskelmat maanpainekuviolle 1

#### 4.3.2.1 Yleistä

Kuvassa 7 esitetyn laskentamallin mukaiset mitoituslaskelmat on tehty murtorajatilassa kappaleessa 4.3.1 esitettyjen periaatteiden mukaan. Perustusrakenteiden geoteknistä mitoitusta tehtäessä yleensä katsotaan, että maanvaraisen perustuksen kaatumis- ja liukumistarkasteluja ei tarvitse erikseen tehdä, jos perustukseen kantokyky (kaava 27) täyttää tavanomaisten suunnitteluohjeiden vaatimukset ja perustus valetaan paikalla perusmaata vasten. Tässä yhteydessä tehdyissä vertailulaskelmissa varmuus tukimuurin kaatumista ja liukumista vastaan on kuitenkin tarkistettu pohjamaan kantavuuslaskelman lisäksi.

Kaatumisvarmuuden laskelmat on tehty käyttäen kiertoakselina perustuksen etureunaa ja redusoidun pohjapaineen painopisteakselia. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan etureunan suhteen on laskettu tapauksella A, jossa staattisen tasapainon menetyksen oletetaan olevan riippumaton pohjamaan lujuudesta. Lisäksi kaatumistarkastelut on laskettu tapauksella C käyttäen kiertoakselina pohjapaineen painopistettä.

Laskelmat on tehty otaksumalla seinäkitkakulmalle arvot  $\delta = 0$ ,  $\delta_d = 2/3\phi_d$  ja  $\delta_d = \phi_d$ .

Geoteknisten murtorajatilatarkastelujen lisäksi on laskettu myös tukimuurin taivutusmomentti pystymuurin juuren suhteen ( leikkaus 1-1, kuva 7).

#### 4.3.2.2 Vertailuun valitut mitoitusohjeet

Mitoituslaskelmat on tehty taulukossa 26 esitettyjen ohjeiden ja ohjeyhdistelmien mukaan. Eurocodien mukaiset laskelmat on tehty kaikkien kyseen tulevien EC 7:n mitoituslaskelmaohjeiden mukaan ( Case A, B ja C ), kuten EC 7 periaatteessa edellyttääkin.

#### 4.3.2.3 Mitoituslaskelmat

Kaikki kuvan 7 laskentamalliin perustuvat mitoituslaskelmat on tehty käsityönä sopivan laskentaohjelman puuttuessa. Laskentatulokset on esitetty yhteenvetotaulukoissa 27 - 38.



missä  $A = 2h \left( \frac{1}{2} \gamma h - q \right) \sin \phi_t \cos(90^\circ + \alpha + \phi_e + \phi_t)$

$B = - \left( \frac{1}{2} \gamma h + q \right) \sin \phi_t \sin(90^\circ + \alpha + \phi_t + \phi_e)$

$C = - \left( \frac{1}{2} \gamma h + q \right) \sin \phi_t \cos(90^\circ + \alpha + \phi_e + \phi_t) h^2 \cos \phi_t +$

$\left( \frac{1}{2} \gamma b(h-t) + qb \right) \sin \phi_t \cos(90^\circ + \alpha + \phi_e + \phi_t) h -$

$\left( \frac{1}{2} \gamma b(h-t) + qb \right) \cos \phi_t \sin(90^\circ + \alpha + \phi_e + \phi_t) h$

Kaavoissa (38) ja (39)  $\phi_e$  on kitkakulma maakiilan etupinnassa  
 $\phi_t$  kitkakulma maakiilan takapinnassa  
 $\theta$  kaltevuuskulma  
 $\alpha$  etupinnan kaltevuuskulman vastakulma  
 $G_o$  maakiilan paino, jossa mukana pintakuorma alueelta  $b+x$  sekä ulkoinen maakiilaan vaikuttava pystykuorma.

Kantokyvyn laskemiseksi tarvittavat kuormitusresultantin suuruus  $R$ , vinous  $\mu$ , epäkeskisyyden  $e$  ja tehokas leveys lasketaan kaavoilla (40), (41), (42) ja (43):

$$R = \sqrt{V^2 + H^2} \quad (40)$$

$$\mu = \arctan\left(\frac{H}{V}\right) \quad (41)$$

$$e = \frac{1}{2} B - x_e + y_e \left( \frac{H}{V} \right); \quad x_e = \frac{\sum G_i x_i}{\sum G_i}; \quad y_e = \frac{\sum G_j y_j}{\sum G_j} \quad (42)$$

$$B_{ef} = B_{kok} - 2e \quad (43)$$

Kaavoissa (40)-(43)  $V$  on kuormitusresultantin pystykomponentti  
 $H$  kuormitusresultantin vaakakomponentti  
 $B_{kok}$  pohjalaatan koko leveys  
 $G_i$  pystyvoiman osakomponenttien suuruus  
 $G_j$  vaakavoiman osakomponenttien suuruus  
 $x_i$  pystyvoimien sijainti pohjalaatan etukulman suhteen  
 $y_i$  vaakavoimien sijainti pohjalaatan etukulman suhteen



#### 4.3.3.2 Vertailuun valitut mitoitusohjeet

Maanpaineelle 2 tehdyt mitoituslaskelmat on tehty samoilla ohjeilla kuin maanpaineelle 1. Lisäksi maaparametrit on määritetty puristin- ja painokairaukseen perustuvan parametriarvioinnin pohjalta julkaisujen Eurocode 7: osa 3 "Geotechnical design assisted by field tests" ja "Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa" mukaan.

#### 4.3.3.3 Mitoituslaskelmat

Mitoitustarkastelut on tehty Fulgeo OY:n ohjelmalla, joka laskee varmuuden kaatumista, liukumista ja pohjamaan murtumista vastaan. Laskentatuloksia tarkastellaan osavarmuuslukumenetelmällä, mutta myös kokonaisvarmuuslukumenetelmää voidaan käyttää asettamalla osavarmuusluvuksi 1,0.

Varmuusluvun pohjamaan murtumista vastaan ohjelma laskee vertaamalla muurin pohjalaattaan syntyvän vinon ja epäkeskisen kuormituksen aiheuttamaa pohjapainetta maapohjan kantavuuteen. Ohjelma käyttää seinäkitkulman mitoitusarvona osavarmuusluvulla korjattua arvoa  $\delta_d = \phi_d$ .

Varmuus kaatumista vastaan lasketaan vertaamalla muuriin kohdistuvia vaaka- ja pystyvoimia muurin etukulman suhteen. Tällainen murtotilanne voi syntyä vain kovan moreenin tai kallion päällä.

Liukumista aiheuttava voima Fulgeo-ohjelmassa lasketaan klassisen maanpaineteorian mukaan pystysuoraa pintaa vasten kohdistuvana paineena. Vastustava voima on muurin peruslaatan alla vaikuttava kitka- tai koheesiovoima. Varmuusluku on näiden suhde.

Laskentatulokset Fulgeo-ohjelmalla maanpaineelle 2 on esitetty yhteenveotaulukoissa 29, 33 ja 37.

#### 4.3.4 Yhteenveto maanvaraisen tukimuurin laskelmista

Maanvaraisen tukimuurin vertailulaskelmat on tehty Eurocodien kolmelle tapaukselle A, B ja C sekä DIN-normeihin perustuvan Tielaitoksen että PRO:n mukaisin ohjein.

Maanpainelaskelmat tehtiin olettaen seinäkitkulman arvoiksi  $\delta = 0$ ,  $\delta_d = 2/3\phi_d$  ja  $\delta_d = \phi_d$ . Liikennekuorman ominaisarvona käytettiin Tielaitoksen ohjeen "Siltojen kuormat" mukaista arvoa  $Q_k = 20 \text{ kN/m}^2$ . Tielaitoksen ohjeen osavarmuuslukuna on käytetty  $\gamma_Q = 1,0$ . Tämä on pienempi kuin Eurocodien muuttuvan kuorman osavarmuusluku kaikissa tapauksissa A, B ja C.

Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  laskettiin kahdella eri maanpaineekuviolla ( kuvat 7 ja 9) kaatumista, liukumista ja pohjamaan murtumista vastaan, joista pienimmän varmuustason antava tapaus on mitoittava.

Kaatumistarkastelu tehtiin kaavalla (29) käyttäen kiertoakselina tukimuurin etureunaa ja redusoidun pohjapaineen painopisteakselia. Kaatumisvarmuudet eri mitoitus tapauksissa on esitetty taulukoissa 27 - 30. Kaatumisvarmuus on laskettu etureunan suhteen tapauksella A, jossa oletetaan, että staattisen tasapainon menetys on riippumaton maaperän lujuudesta ja pohjapaineen painopisteakselin suhteen tapauksella C, jossa tasapainon menetyksen oletetaan johtuvan muurin etureunan alapuolisen maan murtumisesta. Koska Fulgeo-ohjelma ( maanpaine kuvio 2) laskee kaatumisvarmuuden vain muurin etureunan suhteen, on mitoitusvarmuusluku  $F_d$  pohjapaineen painopisteakselin suhteen laskettu vain maanpaine kuvio 1:lle.

Maanvaraisen perustuksen kaatumisvarmuuden laskemiseksi Eurocode 7 ei anna yksikäsitteistä ohjetta, vaan se voidaan laskea kalliolle (ja erittäin tiiviille maalle) tapauksen A mukaan ja kantavalle maalle perustettaessa tapauksen C mukaan.

Mitoitusvarmuus liukumista vastaan on laskettu ottamatta huomioon perustuksen sivulla vaikuttavaa vastustavaa passiivimaanpainetta. Eurocode-ohjeen mukainen varmuus liukumista vastaan on laskettu tapauksille B ja C. Mitoittavan kuormayhdistelmän määrittämiseksi B-tapauksen mukaan maanpainetta laskettaessa käytetään maalle epäedullisen pysyvän kuorman osavarmuuslukua  $\gamma_G = 1,35$  ja kohtisuoraan perustuksen pohjaa vastaan vaikuttavalle kuormalle edullisen kuorman osavarmuuslukua  $\gamma_G = 1,0$ . Liukumistarkasteluiden tulokset ovat taulukoissa 31-33.

Eurocodien mukaan varmuus pohjan murtumista vastaan lasketaan ensisijaisesti tapaukselle C. Vertailun vuoksi kantokyky on laskettu myös tapaukselle B, jossa ykkösen suuruisesta kitkakulman osavarmuusluvusta johtuen kantavuuskaavan (27) kertoimet  $N_\gamma$  ja  $N_q$  ovat selvästi suurempia kuin C tapauksessa, eli tapaus B johtaa merkittävästi suurempiin mitoitusvarmuuslukuihin. Eurocodeissa, Tielaitoksen ohjeessa ja Pohjarakennusohjeessa (PRO 1988) esitetyt kantavuuskaavat ovat lähes identtiset. Tästä johtuen varmuustason vaihtelu eri menetelmillä johtuu erilaisista kuorman ja kapasiteetin osavarmuusluvuista.

Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  pohjan murtumista vastaan on esitetty taulukoissa 34- 37.

Eurocodien mukaan tapaus B on usein mitoittava perustuksissa tai tukirakenteissa olevien rakenteellisten osien mitoituksessa. Esimerkkilaskelmassa seinän alareunan taivutusmomentti tapauksessa B oli hieman pienempi kuin tapauksessa C. Seinän alareunan taivutusmomentit on esitetty taulukossa 38.

Maanvaraisen perustuksen kantokykylaskelmissa PRO:n mukaiset mitoitusvarmuusluvut olivat pienimpiä johtuen suurimmasta liikennekuorman osavarmuusluvusta  $\gamma_Q$ . Tielaitoksen ohjeisiin perustuvat laskelmat johtivat EC7 / EC7 Case B tapauksia lukuun ottamatta kaikissa kantokykytarkasteluissa Eurocodeja suurempaan mitoitusvarmuuteen eli kevyempään rakenteeseen.

### Maanvaraisen tukimuurin varmuus kaatumista vastaan

Taulukko 27. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan etureunan suhteen kuvan 7 mukaiselle maanpainekeuviolle 1, kun seinäkitka  $\delta = 0$ .

Mitoitustapaus	$\Sigma V_d x_e$	$\Sigma H_d y_e$	Mitoitusvarmuusluku $F_d$
EC7 /EC7 Case A , $\gamma_G = 0,95$ Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella	162,7	156,2	1,04
EC7 /EC7 Case A , $\gamma_G = 0,95$ Liikennekuorma takalaipan päällä	219,3	156,2	1,40
EC7 /EC1 Case A $\gamma_G = 0,90$ Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella	154,2	156,2	0,99
PRO +SRMK Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella	170,4	178,1	0,96
TIEL Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella	172,0	115,3	1,49

Taulukko 28. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan etureunan suhteen kuvan 7 mukaiselle maanpainekeuviolle 1, kun seinäkitka  $\delta \neq 0$ .

Mitoitustapaus	$\Sigma V_d x_e$	$\Sigma H_d y_e$	Mitoitusvarmuusluku $F_d$
EC7 /EC7 Case A, $\gamma_G = 0,95$ , $\delta_d = 2/3\phi_d$ Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella	219,0	129,4	1,69
EC7 /EC7 Case A , $\gamma_G = 0,95$ , $\delta_d = \phi_d$ Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella	255,7	143,5	1,78
TIEL $\delta_d = 2/3\phi_d$ Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella	226,3	123,0	1,84
TIEL $\delta_d = \phi_d$ Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella	254,2	113,0	2,25

Taulukko 29. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan etureunan suhteen kuvan 9 mukaiselle maanpaineelle 2 ("Maakilla").

Mitoitustapaus	$\Sigma V_d x_e$	$\Sigma H_d y_e$	Mitoitusvarmuusluku $F_d$
EC7 /EC7 Case A , $\gamma_G = 1,0$	262,2	140,9	1,86
EC7 /EC7 Case A , $\gamma_G = 0,95$	252,5	137,3	1,85
EC7 /EC1 Case A , $\gamma_G = 0,90$	244,6	133,6	1,83
EC7 /EC1 Case A , $\gamma_G = 1,1$	280,9	148,2	1,89
PRO +SRMK	271,1	159,2	1,69
TIEL	240,7	137,3	1,75

Taulukko 30. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan redusoidun pohjapaineen painopisteakselin suhteen maanpaineelle 1. Liikennekuorma takalaidan ulkopuolella.

Mitoitustapaus	$\Sigma V_d x_e$	$\Sigma H_d y_e$	Mitoitusvarmuusluku $F_d$
EC7 /EC7 <sup>1)</sup> Case C , $\delta = 0$ $\gamma_G = 1,0, \gamma_Q = 1,30, \gamma_\phi = 1,25$	164,8	166,0	0,99
EC7 /EC7 <sup>1)</sup> Case C , $\delta_d = 2/3\phi_d$ $\gamma_G = 1,0, \gamma_Q = 1,30, \gamma_\phi = 1,25$	138,8	145,3	1,05
EC7 /EC7 <sup>1)</sup> Case C , $\delta_d = \phi_d$ $\gamma_G = 1,0, \gamma_Q = 1,30, \gamma_\phi = 1,25$	164,1	119,5	1,37
PRO +SRMK $\delta_d = 2/3\phi_d$ $\gamma_G = 1,0, \gamma_Q = 1,60, \gamma_\phi = 1,20$	149,1	148,3	1,00
PRO +SRMK $\delta_d = \phi_d$ $\gamma_G = 1,0, \gamma_Q = 1,60, \gamma_\phi = 1,20$	135,8	137,9	1,02
TIEL $\delta = 0$ $\gamma_G = 1,0, \gamma_Q = 1,0, \gamma_\phi = 1,25$	114,6	114,9	1,00
TIEL $\delta_d = 2/3\phi_d$ $\gamma_G = 1,0, \gamma_Q = 1,0, \gamma_\phi = 1,25$	123,0	122,9	1,05
TIEL $\delta_d = \phi_d$ $\gamma_G = 1,0, \gamma_Q = 1,0, \gamma_\phi = 1,25$	141,0	113,0	1,24

1) Sama tapaus kuin EC7/EC1

**Maanvaraisen tukimuurin varmuus liukumista vastaan**

Taulukko 31. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan paikalla valetuilla ( $\delta=\phi$ ) perustuksilla maanpaineelle 1. Maanpaine laskettu seinäkittakulman arvolla  $\delta = 0$ .

Mitoitustapaus	$\phi$	$\phi_d$	$V_d$	$S_d=V_d \cdot \tan\phi_d$	$H_d$	Mitoitusvarmuusluku $F_d$
EC7 /EC7 Case B	39	39	146,8	118,9	91,6	1,30
EC7 /EC7 Case C	39	32,94	139,8	90,6	92,2	0,98
Tielaitos	39	39	139,8	113,2	65,3	1,73
PRO + SRMK	39	34,0	139,8	113,2	96,8	0,97

Taulukko 32. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan paikalla valetuilla ( $\delta_d=\phi_d$ ) perustuksilla maanpaineelle 1. Maanpaine laskettu seinäkittakulman arvoilla  $\delta_d = 2/3\phi_d$  ja  $\delta_d = \phi_d$ .

Mitoitustapaus	$\phi$	$\phi_d$	$V_d$	$S_d=V_d \cdot \tan\phi_d$	$H_d$	Mitoitusvarmuusluku $F_d$
EC7 /EC7 Case B $\delta_d = 2/3\phi_d$	39	39	183,4	148,5	75,4	1,97
EC7 /EC7 Case B $\delta_d = \phi_d$	39	39	198,3	160,6	68,3	2,35
EC7 /EC7 Case C $\delta_d = 2/3\phi_d$	39	32,94	169,0	109,5	77,07	1,42
EC7 /EC7 Case C $\delta_d = \phi_d$	39	32,94	182,5	147,8	70,8	1,67
Tielaitos $\delta_d = 2/3\phi_d$	39	39	166,2	86,1	65,3	1,93
Tielaitos $\delta_d = \phi_d$	39	39	178,5	144,5	64,2	2,26
PRO + SRMK $\delta_d = 2/3\phi_d$	39	34	167,7	99,2	66,8	1,69
PRO + SRMK $\delta_d = \phi_d$	39	34	186,5	125,8	77,4	1,61

Taulukko 33. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan maanpaineelle 2.  
 ("maakiila")

Mitoitustapaus	$\phi$	$\phi_d$	$V_d$	$S_d=V_d \cdot \tan\phi_d$	$H_d$	Mitoitusvarmuusluku $F_d$
EC7 / EC7 Case B	39	39	182	147,4	91	1,61
EC7 / EC7 Case C	39	32,94	148,0	119,8	81	1,49
EC7/ NAD (FIN)1 Case C	39	32,94	148,0	119,8	81	1,49
Tielaitos	39	32,94	135	87,5	84,0	1,04
PRO + SRMK	39	34,0	135,0	91,1	97,0	0,94

### Maanvaraisen tukimuurin varmuus pohjan murtumista vastaan

Taulukko 34. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  pohjan murtumista vastaan maanpaineelle 1. Seinäkitka  $\delta = 0$ . Liikennekuorma takalaipan takana. (Vaarallisin tapaus)

Mitoitustapaus	Epäkeski- syys $B/2 - a$	Toimiva leveys $B_e$	Pohja- paine $q$	Geotekni- nen kanto- kyky $R/A$	Mitoitus- varmuus- luku $F_d$
EC7 / EC7 Case B	0,99	0,12	12223,3	176,2	0,144
EC7 / EC7Case C	1,0	0,10	1390,0	70,15	0,05
PRO +SRMK	1,14	-----	-----	-----	-----
TIEL	0,64	0,82	170,5	173,4	1,02

Taulukko 35. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  pohjan murtumista vastaan maanpaineelle 1. Seinäkitka  $\delta_d = 2/3\phi_d$ . Liikennekuorma takalaipan takana.

Mitoitustapaus	Epäkeski- syys $B/2 - a$	Toimiva leveys $B_e$	Pohja- paine $q$	Geotekni- nen kanto- kyky $R/A$	Mitoitus- varmuus- luku $F_d$
EC7 / EC7 Case B	0,44	1,22	152,8	551,2	3,67
EC7 / EC7Case C	0,49	1,12	150,9	195,0	1,29
PRO +SRMK	0,57	0,96	177,5	127,3	0,72
TIEL	0,43	1,24	134,0	207,2	1,55

Taulukko 36. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  pohjan murtumista vastaan maanpaineelle 1. Seinäkitka  $\delta_d = \phi_d$ . Liikennekuorma takalaipan takana.

Mitoitustapaus	Epäkeski- syys $B/2 - a$	Toimiva leveys $B_e$	Pohja- paine $q$	Geotekni- nen kanto- kyky $R/A$	Mitoitus- varmuus- luku $F_d$
EC7 / EC7Case B	0,25	1,60	123,9	782,7	5,12
EC7 / EC7Case C	0,33	1,44	126,7	270,3	2,13
PRO +SRMK	0,33	1,44	128,6	155,7	1,21
TIEL	0,26	1,58	113,0	310,0	2,74

Taulukko 37. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  pohjan murtumista vastaan maanpaineelle 2. ( "Maakiila" ).

Mitoitustapaus	Epäkeski- syys $e$	Toimiva leveys $B_e$	Pohja- paine $q$	Geotekni- nen kanto- kyky $R/A$	Mitoitus- varmuus- luku $F_d$
EC7 / EC7Case C "maakiila"	0,49	1,11	167,1	180,0	1,08
EC7 /NAD(FIN) 1 Case C "maakiila"	0,49	1,11	167,1	180,0	1,08
PRO +SRMK "maakiila"	0,52	1,07	182,6	163,2	0,89
TIEL	0,47	1,16	152,2	200,6	1,32

Arvioitaessa parametrit Eurocode 7:n osan 3 "Geotechnical design assisted by field tests" mukaan, saadaan puristinkairarauksen kärkivastuksen  $q_c = 4,5$  MPa perusteella täytön kitkakulmaksi  $\phi = 34^\circ$ . Vastaavasti perustustason alapuolisen täytön kitkakulmaksi tulee kärkivastuksen  $q_c = 6,0$  Mpa perusteella  $\phi = 34^\circ$ . Pienempi kitkakulman arvo johtaa vastaavasti pienempiin mitoitusvarmuuslukuihin maaperän murtumista, kaatumista ja liukumista vastaan.

Määritettäessä parametrit painokairauksen perusteella julkaisun "Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa" mukaan saadaan täytölle (hieno hiekka  $d_{10} \leq 0,06$ ) kairausvastuksen ollessa 16 puolikierrasta / 0,2 m kitkakulman arvoksi  $\phi = 30^\circ$ . Perustamistason alapuoliselle maalle (hiekka  $d_{10} > 0,06$ ) kairausvastus on 16 pk/ 0,2 m ja kitkakulma  $\phi = 33^\circ$ .

**Maanvaraisen perustuksen seinän alareunan taivutusmomentti.**

*Taulukko 38. Mitoitusmomentit seinän alareunan suhteen leikkauksessa 1-1.*

Mitoitusohje	Momentti leikkauksessa 1-1 $M_{1-1}$ kNm/m
Tiel	84,9 (ominaisarvoilla)
PRO SRMK(Kuorma)	133,7
EC7 Case B EC7 (Kuorma)	120,6
EC7 Case C EC7 (Kuorma)	124,1

**4.4 Kallionvarainen perustus**

**4.4.1 Yleistä**

Kallionvaraisen tukimuurin perustuksen osalta on osoitettava, että rakenteella on riittävä varmuus pohjan murtumista, kaatumista ja liukumista vastaan [PRO 1988]. Mitoitettaessa sallittujen jännitysten menetelmällä, varmuus murtumista vastaan on riittävä, jos ominaiskuormista laskettu pohjapaine peruslaatan reunalla ei ylitä kallion tai betonin sallittua arvoa. Mitoituksessa ehjän kallion sallittuna jännityksenä PRO 1988:n mukaan voidaan pitää  $10 \text{ MN/m}^2$  ja hiekka- ja kalkkikivikallioilla  $5 \text{ MN/m}^2$ . Tielaitoksen ohjeen mukaan käytännön suunnittelutyössä suositellaan käytettäväksi puolta edellä mainituista arvoista tarkempien lujuusarvojen puuttuessa pohjapaineen jakauman ollessa kolmiomainen [PROSILTA1991].

Eurocode 7:n mukaan kalliolle perustetut laattaperustukset voidaan tavallisesti suunnitella käyttäen edellisessä kappaleessa esitettyjä mitoituslaskelmuja. Eurocode 7:n informatiivisessa liitteessä E esitetään esimerkkimenetelmä kallionvaraisen laattaperustuksen oletetun kantokyvyn johtamiseksi. Informatiivisessa liitteessä oletettu kantokyky määritetään eri kalliotyypeille olettaen, että rakenne voi sietää painuman, joka on 0,5 % perustuksen leveydestä. Varmuus kaatumista vastaan tarkistetaan valitsemalla stabiloivan momentin kiertopiste perustuksen uloimman reunan suhteen.

Ominaiskuormista laskettu kaatumisvarmuus on PRO 1988:n mukaan oltava vähintään 1,5.

Tielaitoksen ohjeen mukaan liukuvarmuus kallionvaraisilla perustuksilla määritetään käyttäen louhitun kalliopohjan ja sitä vasten valetun betonin välisenä kitkakertoimena  $\mu = 0,75$ . [PROSILTA1991].



Taulukko 39. Kuormien ja maaperän ominaisuuksien osavarmuusluvut eri mitoitus tapauksissa, mitoitusohje ja suoritettut tarkastelut.

Mitoitusohje	Mitoitus- tapaus	Oma paino Osavarmuus- luku $\gamma_G$	Liikene- kuorma Osavarmuus- luku $\gamma_Q$	Maaperän ominaisuudet Osavarmuus- luku $\gamma_\phi$	Tarkastelut Lepopaine
EC 7 (Kapasiteetti) EC7 (Kuorma)	Case A	1,0/ 0,95	1,50	1,1	Kaatuminen
EC 7 (Kapasiteetti) EC1 (Kuorma)	Case A	1,1/ 0,90	1,50	1,1	
EC 7 (Kapasiteetti) EC7 (Kuorma)	Case B	1,35 / 1,0	1,50	1,0	Liukuminen Kantokyky Mitoitusmomentit
EC 7 (Kapasiteetti) EC7 (Kuorma)	Case C	1,0	1,30	1,25	Liukuminen Kantokyky Mitoitusmomentit
TIELAITOS PROSILTA SILTOJEN KUOR- MAT	Rajatila- menetelmä	1,0	1,0	1,25	Kaatuminen Liukuminen Kantokyky Mitoitusmomentit
PRO + SRMK	Rajatila- menetelmä	1,0	1,6	1,2 1,2 1,25	Kaatuminen Liukuminen Kantokyky

#### 4.4.2 Yhteenvedo kallionvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmista

Kalliolle perustetun tukimuurin mitoituslaskelmat on tehty vaakasuoraan vaikuttavalle lepopaineelle. Poiketen maanvaraisesta perustuksesta on varmuus kaatumista vastaan laskettu vain muurin etureunan suhteen. Kallionvaraisen perustuksen kaatumistarkastelussa on Eurocodien mukaan selkeästi kyseessä Case A, eli tapaus, jossa tarkastellaan staattisen tasapainon menetystä. Tukimuurin dimensiot määritettiin siten, että kaatumisvarmuudeksi ominaiskuormilla tulee noin  $F = 1,5$ . Laskentaesimerkin tapauksessa vaadittu varmuus kaatumista vastaan täyttyi kaikilla mitoitus tapauksilla huolimatta Eurocodien ja pohjarakennusohjeen mukaisesta suuremmasta liikennekuorman mitoitusarvosta  $Q_d$ . Mitoitusvarmuusluvut kaatumista vastaan on esitetty taulukossa 41.

Liukuvarmuuden laskemisessa on käytetty perustuksen pohjan ja kallion välisenä kitkakertoimenä kaikissa tapauksissa Tielaitoksen ohjeen "Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa" mukaista kitkakertoimen arvoa  $\mu = 0,75$ . Yksikään mitoitus tapaus ei täyttänyt vaadittavaa minimivarmuustasoa. Eurocodien rajatilamenetelmällä Case C johti hieman Case B:tä pienempään mitoitusvarmuuteen. Tielaitoksen kokonaisvarmuuslukumenetelmällä laskettu mitoitusvarmuus liukumista vastaan oli  $F = 1,12$  eli noin 35 % alle vaaditun minimin  $F = 1,5$ . ( $F_d \approx 0,74$ ).

Varmuus pohjan murtumista vastaan on tarkistettu vertaamalla laskettua pohjapainetta kalliolle sallittuun jännitykseen. Poiketen Pohjarakennusohjeesta (PRO 1988) ei Eurocode 7:ssä ole raja-arvoja eri tyyppisille kalliolle sallittavista jännityksistä. Kaikissa tapauksissa jännitykset olivat niin pieniä, että Tielaituksen ohjeen [PROSILTA 1990] mukaan esimerkin mukainen tukimuri voidaan perustaa hiekka- ja kalkkikivikalliolle. Pohjapaine Eurocode 7:n mukaan laskettiin tapauksilla B ja C, joista jälkimmäinen johti noin 50 % suurempaan pohjapaineen mitoitusarvoon  $q_d = 0,336$  Mpa. Pohjarakennusohjeen mukaan lasketun pohjapaineen suuruus ( $q_d = 0,724$  Mpa) johtuu SRMK:n mukaisesta liikennekuorman mitoitusarvosta  $Q_d = 1,6 \cdot 20 = 32$  kN/m<sup>2</sup>.

Tielaituksen ohjeen mukaiset mitoituslaskelmat on tehty ominaiskuormilla, joten ne eivät ole suoraan vertailukelpoisia rajatilamenetelmällä tehtyjen tarkastelujen kanssa. Kallionvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmien laskentatulokset on esitetty taulukoissa 40- 43.

## KALLIONVARAISEN TUKIMUURIN MITOITUSLASKELMIEN TAULUKOIDUT TULOKSET

Taulukko 40. Varmuus kaatumista vastaan.

Mitoitusohje	Mitoitusvarmuusluku $F_d$
TIEL (Kokonaisvarmuus) <sup>1)</sup>	1,05 (1,57)
EC7/EC7 Case A	1,12
EC7/EC1 Case A	1,06
PRO +SRMK	1,08

1) Mitoitusvarmuusluku  $F_d = 1,57/1,5 = 1,05$

Taulukko 41. Varmuus liukumista vastaan

Mitoitusohje	Mitoitusvarmuusluku $F_d$
TIEL (Kokonaisvarmuus) <sup>1)</sup>	0,76 (1,14)
EC7 /EC7 <sup>2)</sup> Case C	0,89
EC7 /EC7 <sup>2)</sup> Case B	0,82
PRO+SRMK	0,83

1) Mitoitusvarmuusluku  $F_d = 1,14/1,5 = 0,76$

2) Sama tapaus kuin EC7/EC1.

Taulukko 42. Seinän alareunan mitoitusmomentit

Mitoitusohje	Mitoitusmomentit kNm/m
TIEL (Ominaisarvo)	90,2
EC7/EC7 Case C	213,9
EC7 /EC7 Case B	197,8
PRO+SRMK	160,2

*Taulukko 43. Pohjapaine*

Mitoitusohje	Pohjapaine kN/m <sup>2</sup>
TIEL (Ominaisarvot)	190,3
EC7/EC7 Case C	336,4
EC7 /EC7 Case B	219,0
PRO+SRMK	724,6

## 5 PÄÄTELMÄT

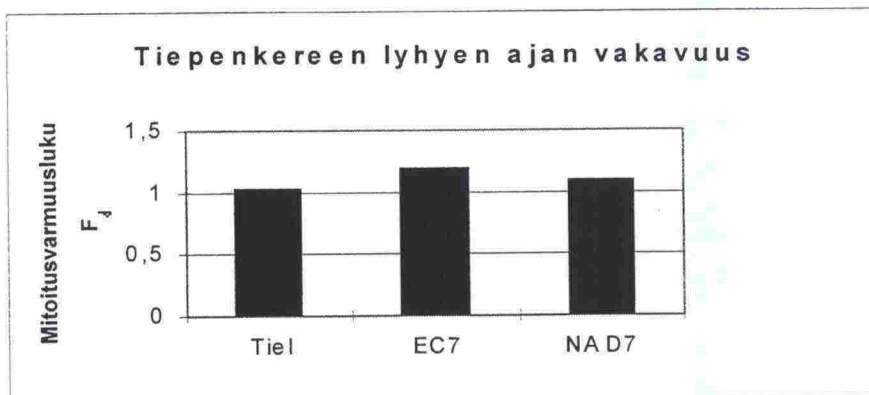
### 5.1 Penkereen ja luonnonluiskan vakavuus

Tiepenkereen ja luonnonluiskan vakavuuden laskemiseen ei Eurocode 7 tuo suomalaiseseen käytäntöön verrattuna periaatteessa mitään uutta.

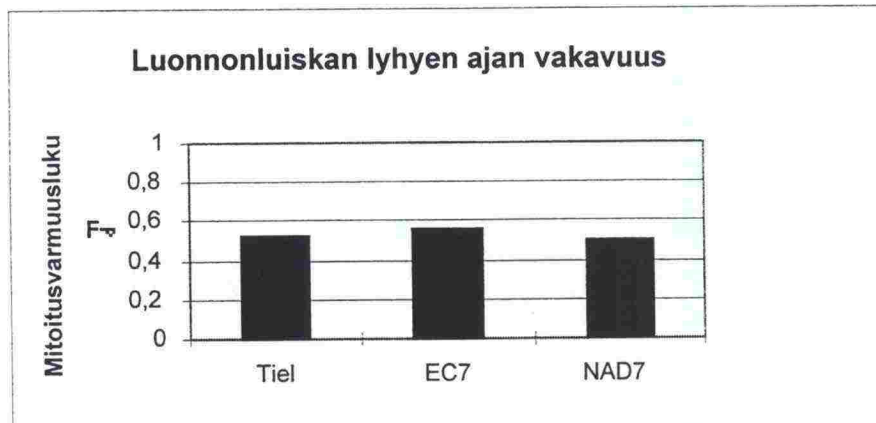
Merkittävämpänä erona Tielaitoksen ohjeeseen verrattuna Eurocode 7:ssä on lyhyen ajan stabiiliteetin laskenta rajatilamenetelmällä. Käyttötilan vakavuuden laskenta tehdään sekä Tielaitoksen mitoitusmenettelyssä että Eurocodien mukaan rajatilamenetelmällä.

Vertailulaskelmissa on käytetty Tielaitoksen ohjeen mukaista liikennekuorman ominaisarvoa, jonka osavarmuusluvaksi on tulkittu  $\gamma_Q = 1,0$  ( $Q_d = 1,0 \cdot 10 \text{ kN/m}^2 = 10 \text{ kN/m}^2$ ). Tämä johtaa muita mitoitusmenetelmiä käytettäessä suurempaan liikennekuorman mitoitusarvoon.

Kuvissa 10 ja 11 on esitetty tiepenkereen ja luonnonluiskan rakennusajan mitoitusvarmuusluvut. Kuvissa esitetty Tielaitoksen mitoitusvarmuusluku on kokonaisvarmuusluku jaettuna vaadittavalla minimikokonaisvarmuudella (Kuvassa 10:  $F_d = 1,55 / 1,5 = 1,03$ ).

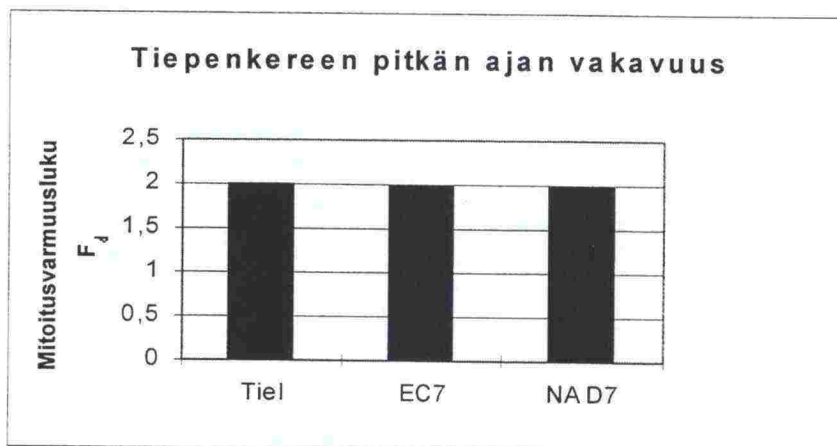


Kuva 10. Tiepenkereen lyhyen ajan vakavuus ympyräliukupinnalla eri ohjeiden mukaan  $\phi = 0$ -menetelmällä.

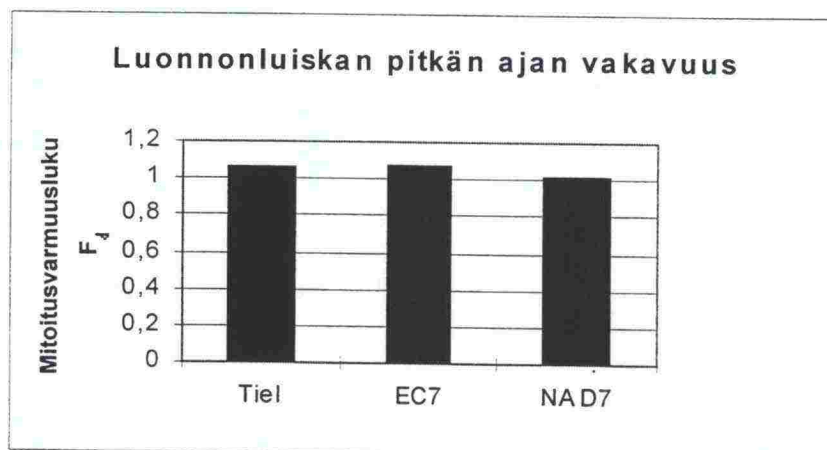


Kuva 11. Luonnonluiskan lyhyen ajan vakavuus eri ohjeiden mukaan  $\phi = 0$ -menetelmällä.

Pitkän ajan stabiileetin mitoitusvarmuusluvut eri menetelmillä olivat käytännössä yhtä suuret. Esimerkkilaskelmissa tämä johtui siitä, että Eurocoden ja NAD(FIN)7:n mukaan laskelmissa käytetään suurempaa liikennekuorman mitoitusarvoa  $Q_d$ , mutta pienempää koheesion osavarmuuslukua  $\gamma_c$ . Kuvissa 12 ja 13 on esitetty pylväsdiagrammeina tiepenkereen ja luonnonluiskan pitkän ajan vakavuuden mitoitusvarmuusluvut eri ohjeitten mukaan.



Kuva 12. Tiepenkereen pitkän ajan vakavuus ympyräliukupinnalla eri mitoitusohjeilla  $c\phi$ -menetelmällä.

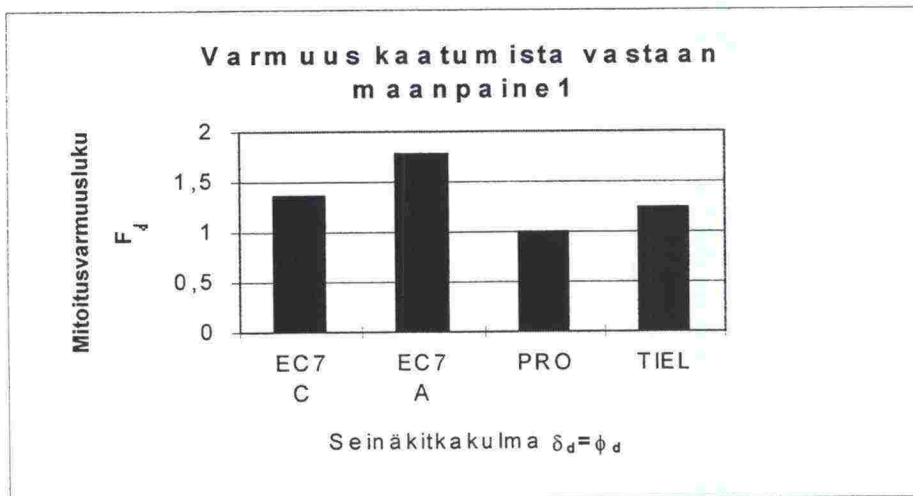


Kuva 13. Luonnonluiskan pitkän ajan vakavuus eri mitoitusohjeilla  $c\phi$ -menetelmällä.

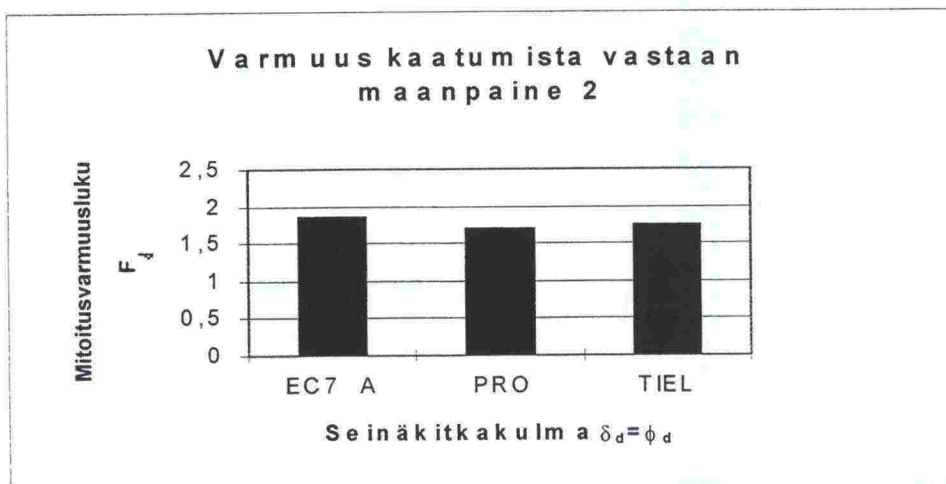
Edellä tehtyjen mitoituslaskelujen perusteella voidaan todeta, että Eurocodet eivät oleellisesti muuta Tielaitoksen vakavuuden laskentamenettelyä. Käytettäessä kappaleessa 3 esitettyjä oletuksia johtaa Eurocode 7 vain hieman suurempiin mitoitusvarmuuslukuihin Tielaitoksen ohjeeseen verrattuna. Tämän välttämiseksi sekä laskelmien yksinkertaistamiseksi olisi tiepenkereen kuten muidenkin geoteknisten mitoituslaskelujen ominaiskuormien numeeriset arvot syytä tapauskohtaisesti liittää Kansallisiin soveltamisasiakirjoihin tai suoraan Eurocode-ohjeisiin.

## 5.2 Maanvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmat

Jäykän tukimuurin vertailulaskelmat Eurocode 7-ohjeen mukaan ovat suomalaiseseen käytäntöön verrattuna huomattavasti työläämpiä, koska periaatteessa on tarkistettava kaikki kolme tapausta A, B ja C. Ominaiskuormien osalta pätevät samat ongelmat kuin tiepenkereelläkin. Kuormien ja maaperän ominaisuuksien osavarmuusluvut on tarkasti määritelty, mutta mitoitusmenetelmän valinta on suunnittelijan vastuulla. Eri ohjeiden mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  kaatumista, liukumista ja pohjan murtumista vastaan maanpaineelle 1 ja 2 on esitetty kuvissa 14-19.

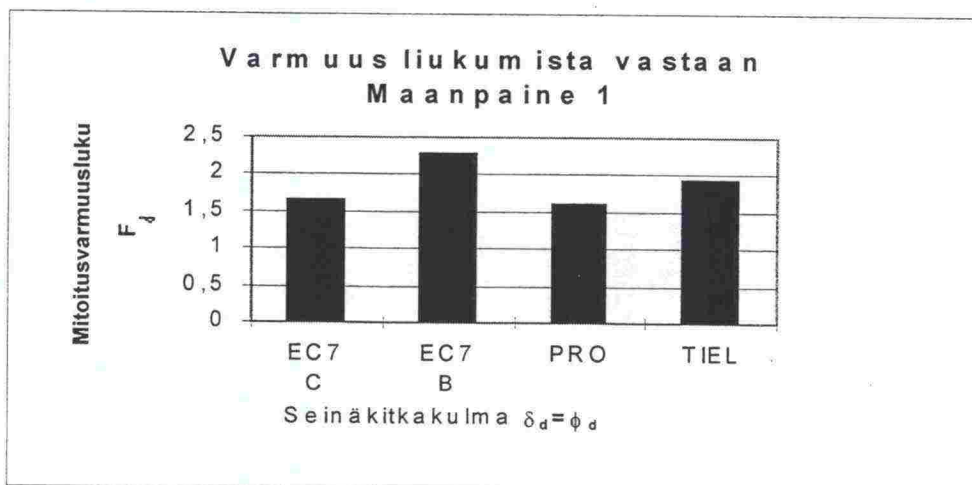


Kuva 14. Mitoitusvarmuusluku kaatumista vastaan eri mitoitusohjeilla maanpaineelle 1 seinäkitkakulman arvolla  $\delta_d = \phi_d$ . Liikennekuorma takalaidan ulkopuolella. Kiertokeskuksena tapauksessa A laatan etureuna, tapauksissa C, PRO ja TIEL pohjapaineen painopiste.

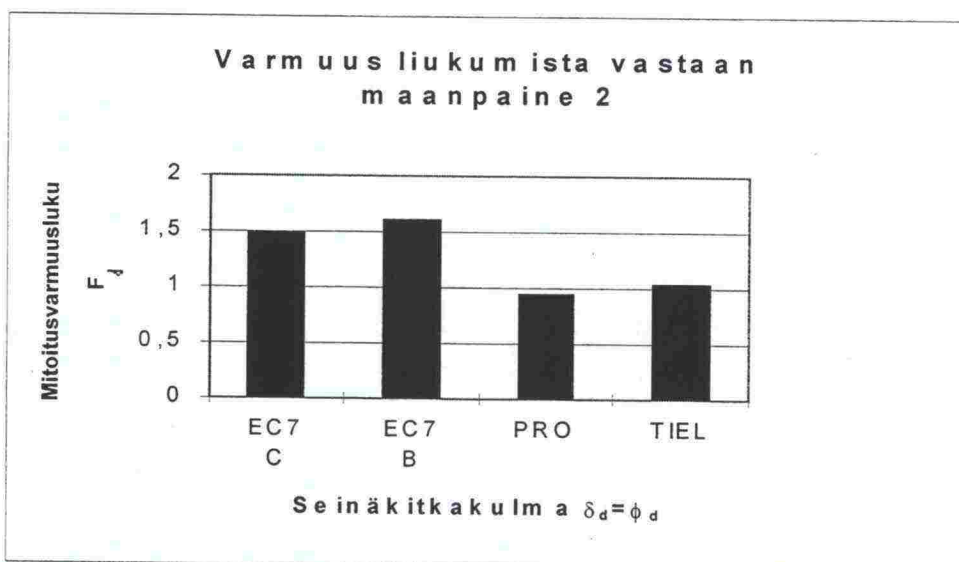


Kuva 15. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan eri mitoitusohjeilla maanpaineelle 2. Liikennekuorma takalaidan ulkopuolella. Seinäkitkakulma  $\delta_d = \phi_d$ . Kiertokeskuksena laatan etureuna.

Maanpaineelle 2 kaatumisvarmuudet olivat likimäärin yhtäsuuret Tielaitoksen ohjeen, EC 7:n ja PRO:n mukaan. Maanpaineella 1 tulokset poikkeavat toisistaan erilaisista laskentatavoista johtuen.

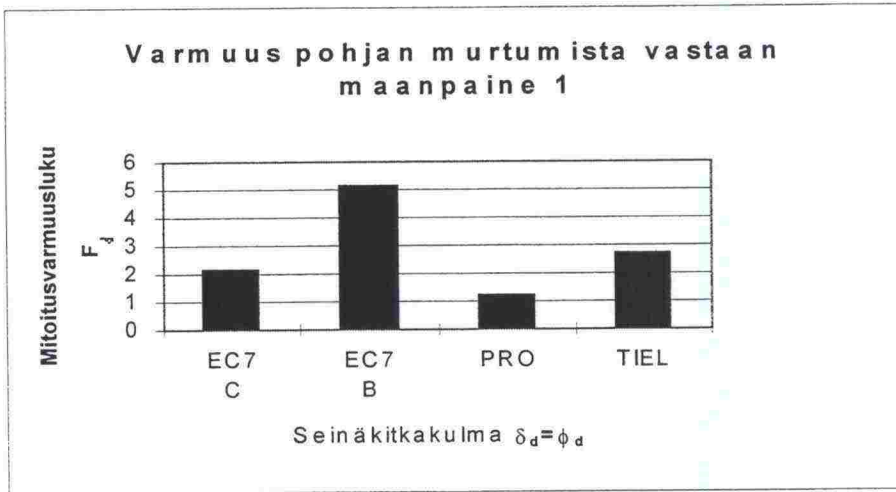


Kuva 16. Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  liukumista vastaan eri mitoitusohjeilla seinäkitkakulman arvoilla  $\delta_d = \phi_d$ . Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella.



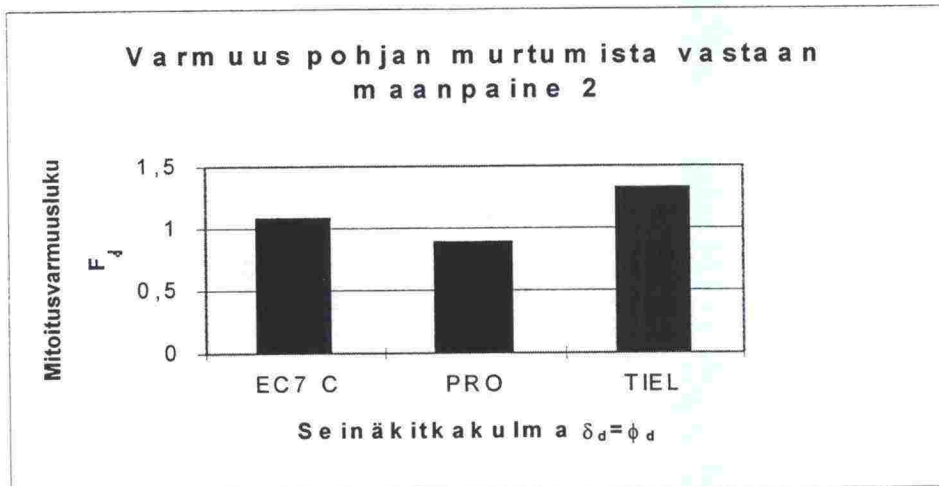
Kuva 17. Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  liukumista vastaan eri mitoitusohjeilla seinäkitkakulman arvoilla  $\delta_d = \phi_d$ . Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella

Maanpaineella 2 varmuudeksi liukumista vastaan Eurocodien tapauksilla B ja C tuli lähes yhtä suuret mitoitusvarmuusluvut, jotka molemmat olivat suurempia kuin PRO:n ja Tielaitoksen mukaan lasketut varmuusluvut. Maanpaineella 1 tulokset poikkeavat toisistaan epäsäännöllisemmin erilaisista osavarmuusluvuista johtuen.



Kuva 18. Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  pohjan murtumista vastaan maanpaineelle 1 eri mitoitusohjeilla seinäkitkakulman arvoilla  $\delta_d = \phi_d$ . Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella.

Mitoitustapauksen EC 7 Case B:n mukaan laskettu mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan on selvästi suurempi kuin muut lasketut tapaukset johtuen ykkösen suuruisesta kitkakulman osavarmuusluvusta  $\gamma_\phi$ . Vastaavasti Tielaitoksen ohjeen mukainen mitoitus johti suurempaan mitoitusvarmuuslukuun kuin EC 7 case C. Pienin mitoitusvarmuus tuli pohjarakennusohjeen ( PRO 1988) mukaan johtuen suurimmasta liikennekuorman mitoitusarvosta.



Kuva 19. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  pohjan murtumista vastaan maanpaineelle 2 eri mitoitusohjeilla seinäkitkakulman arvolla  $\delta_d = \phi_d$ .



Taulukko 44. Eri tavoin laskettujen tukimuurin pohjan kantokyvyn mitoitusvarmuuslukujen ja tukiseinän momenttien vertailu.

Mitoitusohje	Maanpaine 1 $F_d$ $\delta_d = 2/3 \phi_d$	Maanpaine 1 $F_d$ $\delta_d = \phi_d$	Maanpaine 2 $F_d$ $\delta_d = \phi_d$	Taivutusmomentti kNm /m
EC7 / EC7 Case B	3,67	5,12	-----	120,6
EC7 / EC7 Case C	1,29	2,13	1,08	124,1
PRO	0,72	1,21	0,89	133,7
Tiel	1,55	2,74	1,32	84,9 (ominaisarvoilla)

Kuvien 14 -19 ja taulukon 44 perusteella voidaan todeta, että maanpaineku- vio 2 on mitoittava kaikilla mitoitus tapauksilla. Edelleen voidaan todeta, että Tielaitoksen mitoitusohjeet tuottavat suurimman mitoitusvarmuusluvun ja kevyimmän rakenteen ( EC7 / EC7 Case B:tä lukuun ottamatta). Raskaim- paan rakenteeseen johtavat Pohjarakennusohjeet ( PRO 1988) laskelmissa käytetyn muita suuremman muuttuvan kuorman osavarmuusluvun vuoksi.

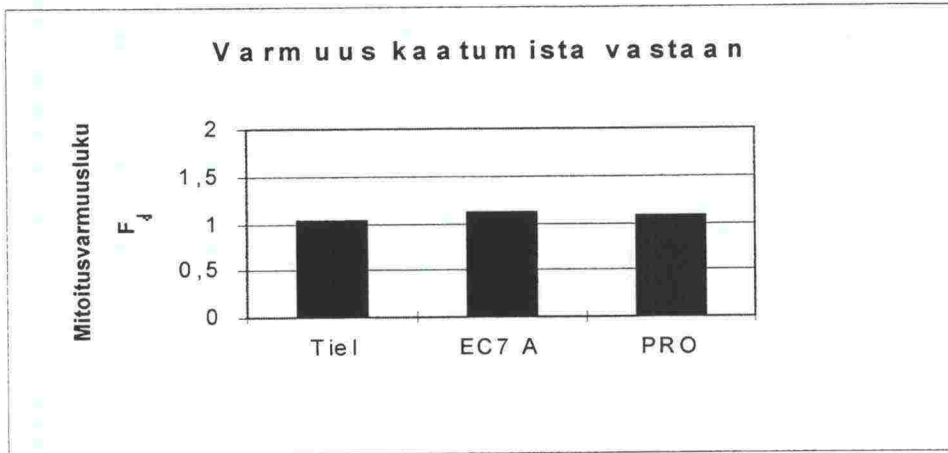
Lisäksi laskelmat viittaavat siihen, että riittävä varmuus pohjan murtumista vastaan ei välttämättä takaa sitä, että myös varmuus liukumista ja kaatu- mista vastaan olisi aina riittävä. Tämä on havaittavissa esimerkiksi mitoitus- tapauksessa EC7 /EC7 Case C, jossa mitoitusvarmuusluvuksi pohjan mur- tumista vastaan olettamalla seinäkitkakulmalle arvo  $\delta_d = 2/3\phi_d$  tuli  $F_d = 1,29$  ja mitoitusvarmuusluvuksi kaatumista vastaan pohjapaineen painopisteakse- lin suhteen tuli  $F_d = 1,05$  ( Vertaa taulukot 30 ja 35). Tulos riippuu kuitenkin kaatumisvarmuusluvun laskentatavasta ( Case A / Case C). Asia tulisi tar- kistaa laskemalla kaatumisvarmuusluku myös mitoittavalle maanpainelle 2 käyttäen kiertokeskuksena pohjapaineen painopistettä.

Maanvaraisen tukimuurin esimerkkilaskelmissa case B johti lähes saman suuruiseen seinän alareunan taivutusmomenttiin kuin case C ollen hieman pienempi. Lisäksi Case C johti kaikissa tapauksissa alhaisempaan varmuu- teen liukumista ja pohjan murtumista vastaan kuin Case B. Tulosten perus- teella esimerkkilaskelmissa käytetyn maanvaraisen perustuksen geotekni- seen mitoitukseen Eurocoden mukaan olisi riittänyt ainoastaan tapaus C.

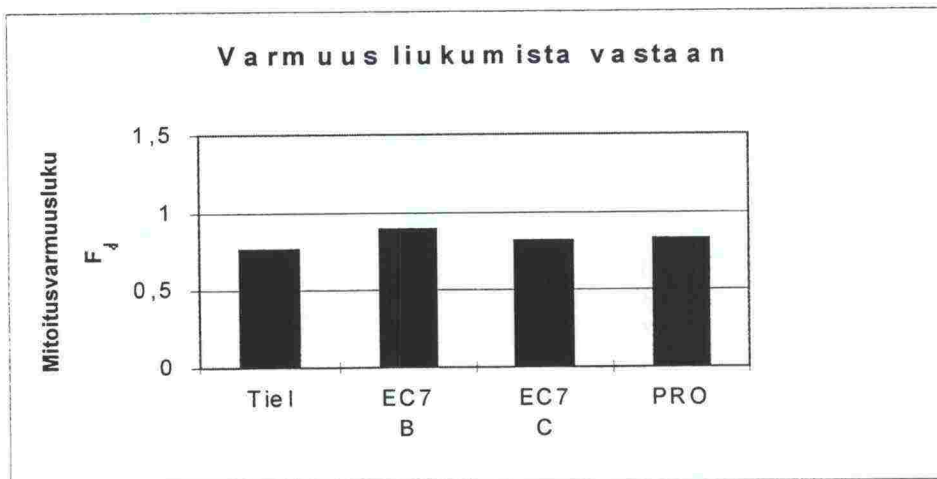
### 5.3 Kallionvarainen perustus

Kallionvaraisen perustuksen varmuus kaatumista vastaan lasketaan pohja- laatan etureunan suhteen tapaus A:lle. Kuvissa 20 ja 21 Tielaitoksen koko- naisvarmuusluku on jaettu vaadittavalla minimivarmuudella  $F = 1,5$ .

Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  kaatumista vastaan kaikissa tapauksissa olivat riittäviä. Sen sijaan liukuvarmuus ei ollut riittävä minkään ohjeen mukaan. Eurocode-laskelmissa tapaus B:n mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan oli pienempi kuin tapaus C:n varmuusluku.

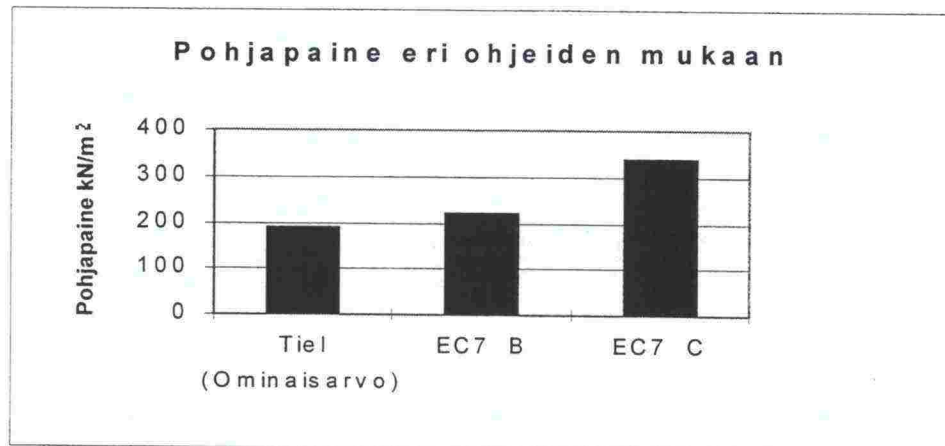


Kuva 20. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan eri ohjeitten mukaan kallionvaraiselle perustukselle. Liikennekuorma takalaipan takana.



Kuva 21. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan eri ohjeitten mukaan kallionvaraiselle perustukselle. Liikennekuorma takalaipan takana.

Eurocode 7 ei tunne sallittujen jännitysten menettelyä joten raja-arvoja eri kalliotyypeille sallituista jännityksistä ei siinä ole annettu. Tielaitoksen julkaisun "Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa" [PROSILTA 1991] mukaan käytännön suunnittelutyössä voidaan hiekka- ja kalkkikivikallion geoteknisenä kantavuutena käyttää 2,5 Mpa. Kaikissa esimerkkikohteen tapauksissa pohjapaine jäi selvästi alle tämän arvon. Eurocode-mitoituksessa pohjapaine laskettiin tapauksille B ja C, joista case C johti suurempaan arvoon.



*Kuva 22. Pohjapaine eri ohjeitten mukaan kallionvaraiselle perustukselle. Liikennekuorma takalaipan takana.*

Kallionvaraisen perustuksen mitoituslaskelmat osoittivat, että tarkastelut on tehtävä kaikille kolmelle tapaukselle A, B ja C.

Sekä kallion- että maanvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmien perusteella voidaan todeta, että tässä tarkastelluissa tapauksissa Eurocodien mukaiset mitoitusmenetelmät johtavat alhaisempaan varmuustasoon ja samanlaiseen tai raskaampaan mitoitukseen kuin Tielaitoksen ohjeet Mitoitusohjeiden selventämiseksi kansallisiin soveltamisasiakirjoihin olisi syytä lisätä kuormien ominaisarvoja. Lisäksi joko Eurocode - ohjeessa tai sen Kansallisessa soveltamisasiakirjassa olisi syytä selventää, mitkä kolmesta tapauksesta A, B ja C on tarkistettava ko. suunnittelutilanteessa.

## 6 LÄHTEET

Bishop, A.W. 1955, The use of slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, ss. 7-17.

Bishop, A.W. , Bjerrum, M., 1961. Bedeutung und Anwendbarkeit des dreiachsigversuches für die Lösung von Standsicherheitsaufgaben. Norges Geotekniske Institut, Pub. n:o 43. Oslo.

ENV 1991-1. Eurocode 1. 1994, Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurooppalainen esistandardi. 59s.

ENV 1997-1. Eurocode 7. 1994. Geotekninen suunnittelu - Osa 1: yleiset säännöt. Eurooppalainen esistandardi. 144 s.

ENV 1997-1. Eurocode 7. 1994. Geotechnical design assisted by field tests-part3.

Fellenius, W. 1927. Erdstatische Berechnung mit Reibung und Kohäsion und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen. Berlin. 40s.

Hansbo, S. 1994. Foundation Engineering. Developments in Geotechnical Engineering, 75. Elsevier Science B.V. Amsterdam. ss 496.

Helenelund, K.V. 1956. Pohjarakennus- ja maamekaniikka I. Teknillinen korkeakoulu. Moniste n:o 137. Helsinki

Kolhinen, M., Valkeisenmäki, A., 1991. Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa. Helsinki. 1991. 69 s.

Kuusivaara, M., Hevonoja, R. , Nousiainen, M. , Utti, H. Siltojen kuormat. Tiehallituksen julkaisu. Sillansuunnittelu. Helsinki 1990. 28s.

Manelius, M, Immonen, J., Kolhinen, M., Smura, M. 1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. Tielaitoksen selvityksiä 24/1993. Geokeskus. Helsinki 1993. 24s.

Vepsäläinen, P. Maanvarainen tiepenger savikolla, Suunnitteluohje. Tielaitoksen selvityksiä 67/1994. Geokeskus. Helsinki. 52 s.

Paloheimo, E. 1974. Varmuuden arviointi pohjarakennussuunnittelussa. Pohjarakennus. RIL 95. Suomen rakennusinsinöörien liitto r.y. ss 142-145.

Slunga, E. Maa- ja kallioluiskien vakavuus. Geomekaniikka II. RIL 157-II. Suomen rakennusinsinöörien liitto r.y. ss. 118-133.

PRO 1988. Pohjarakennusohjeet , RIL 121. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y. HELSIITE 1. Mitoituslaskelmat EC7 / EC7 mukaan maanpaineelle 1

## 7 LIITELUETTELO

- LIITE 1. Mitoituslaskelmat EC7 / EC7 mukaan maanpaineelle 1
  - Liite 1/1. Varmuus kaatumista vastaan
  - Liite 1/2. Varmuus liukumista vastaan
  - Liite 1/3. Varmuus pohjan murtumista vastaan
  - Liite 1/4. Seinän alareunan taivutusmomentti
- LIITE 2. Mitoituslaskelmat EC7 / EC1 mukaan maanpaineelle 1
- LIITE 3. Mitoituslaskelmat EC7/ NAD(FIN)1 mukaan maanpaineelle 1
- LIITE 4. Mitoituslaskelmat pohjarakennusohjeen ( PRO 1988) mukaan maanpaineelle 1.
  - Liite 4/1. Varmuus kaatumista vastaan
  - Liite 4/2. Varmuus liukumista vastaan
  - Liite 4/3. Varmuus pohjan murtumista vastaan
  - Liite 4/4. Seinän alareunan taivutusmomentti
- LIITE 5. Mitoitus Tielaitoksen ohjeen mukaan maanpaineelle 1
  - Liite 5/1. Varmuus kaatumista vastaan
  - Liite 5/2. Varmuus liukumista vastaan
  - Liite 5/3. Varmuus pohjan murtumista vastaan
  - Liite 5/4. Seinän alareunan taivutusmomentti seinäkitkakulman arvolla  $\delta$
- LIITE 6. Kallionvaraisen tukimuurin mitoitusselkemat Tielaitoksen ohjeen mukaan maanpaineelle 1
  - Liite 6/1. Varmuus kaatumista vastaan ominaiskuormilla
  - Liite 6/2. Varmuus liukumista vastaan ominaiskuormilla
  - Liite 6/3. Pohjapaine ja varmuus pohjan murtumista vastaan ominaiskuormilla
  - Liite 6/4. Seinän alareunan taivutusmomentti
- LIITE 7. Kallionvaraisen tukimuurin mitoitusselkemat EC7/ EC7 mukaan maanpaineelle 1
  - Liite 7/1. Varmuus kaatumista vastaan
  - Liite 7/2. Varmuus liukumista vastaan
  - Liite 7/3. Varmuus pohjan murtumista vastaan
  - Liite 7/4. Seinän alareunan taivutusmomentti
- LIITE 8. Kallionvaraisen tukimuurin mitoitusselkemat EC7/ EC1 mukaan maanpaineelle 1
  - Liite 8/1. Varmuus kaatumista vastaan
- LIITE 9. Kallionvaraisen tukimuurin mitoitusselkemat pohjarakennusohjeen mukaan maanpaineelle 1
  - Liite 9/1. Varmuus kaatumista vastaan
  - Liite 9/2. Varmuus liukumista vastaan
  - Liite 9/3. Varmuus pohjan murtumista vastaan
  - Liite 9/4. Seinän alareunan taivutusmomentti

## LIITE 1. Mitoituslaskelmat EC7/EC/ mukaan maapaineelle 1

### Liite 1/1. Varmuus kaatumista vastaan

Kaatumisvarmuuden laskelmat on tehty käyttäen kiertoakselina perustuksen etureunaa ja redusoidun pohjapaineen painopisteakselia. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan etureunan suhteen on laskettu tapauksella A, jossa staattisen tasapainon menetyksen oletetaan olevan riippumaton pohjamaan lujuudesta. Lisäksi katumistarkastelut on laskettu tapauksella C käyttäen kiertoakselina pohjapaineen painopistettä. (Kuva 23).

Laskelmat on tehty otaksumalla seinäkitkakulmalle arvot  $\delta = 0$ ,  $\delta_d = 2/3\phi_d$  ja  $\delta_d = \phi_d$ .

#### a) Case A

1. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan etureunan suhteen, kun seinäkitka  $\delta = 0$ . Liikennekuorma Q takalaipan takana ja  $\gamma_G = 0,95$ ,  $\gamma_Q = 1,5$  ja  $\gamma_\phi = 1,1$ .

Vaakakuormat:

$$\phi_d = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = 34,4^\circ$$

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi_d / 2) = 0,278$$

Vaakakuormat ja momenttivarret etukulman suhteen :

(1) Maanpaine:

$$F_\gamma = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2 = 47,9 \text{ kN/m} ; r_\gamma = 4,5/3 = 1,5 \text{ m}$$

(2) Liikennekuorma:

$$F_Q = K_a \gamma_Q Q_k h = 37,5 \text{ kN/m} ; r_Q = 4,5/2 = 2,25 \text{ m}$$

Mitoituskuorman vaakakomponentti :

$$H_d = F_\gamma + F_Q = 85,4 \text{ kN/m}$$

Pystykuormat :

Omapaino G :n vaikutus edullinen eli  $\gamma_G = 0,95$ .

$$(3) G_1 = 0,95 * 1,3 * 4,0 * 17 = 84,0 \text{ kN/m}$$

$$r_1 = 1,45 \text{ m}$$

$$(4) G_2 = 0,95 * 0,6 * 0,5 * 17 = 4,8 \text{ kN/m}$$

$$r_2 = 0,3 \text{ m}$$

(5)  $G_3 = 0,95 \cdot 2,1 \cdot 0,5 \cdot 25 = 24,9 \text{ kN/m}$

$r_3 = 1,05 \text{ m}$

(6)  $G_4 = 0,95 \cdot 0,2 \cdot 4,0 \cdot 25 = 19,0 \text{ kN/m}$

$r_4 = 0,7 \text{ m}$

(1) ja (2)  $\Rightarrow \Sigma H_d y_e = 156,2 \text{ kNm/m}$

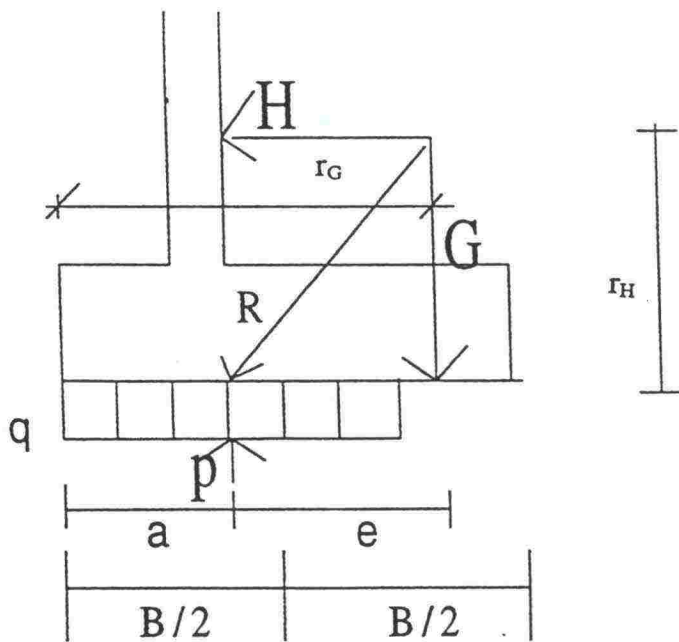
(3), (4), (5) ja (6)  $\Rightarrow \Sigma V_d x_e = 162,7 \text{ kN/m} \Rightarrow$  Mitoitusvarmuusluku  $F_d$

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = \frac{162,7}{156,2} = 1,04 \quad , \text{ kun liikennekuorma on takalaipan ulkopuolella.}$$

Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kun liikennekuorma on takalaipan päällä:

(7)  $G_5 = 1,50 \cdot 20 \cdot 1,3 = 39 \text{ kN/m} \Rightarrow r_5 = 1,45$

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = \frac{162,7 + 39 \cdot 1,45}{156,2} = \frac{219,3}{156,2} = 1,40$$



Kuva 23. Kuormitusresultantin vaakavoima  $H$  ja sen etäisyys  $r_H$  perustuksen alareunasta sekä pystykuorman  $G$  vaikutuspisteen etäisyys  $r_G$  muurin etureunasta.

2. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan etureunan suhteen, kun seinäkitka  $\delta_d = 2/3\phi_d$ . Liikennekuorma  $Q$  takalaipan takana. Oman painon  $G$  vaikutus edullinen eli osavarmuusluku  $\gamma_G = 0,95$

$$\delta_d = 2/3 * 34,41^\circ = 22,94^\circ$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}} \right]} = 0,250$$

$$P_a = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 * 1,0 * 17 * 4,5^2 + 1,5 * 20 * 4,5) * 0,250 = 76,78 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 22,94^\circ = 29,9 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen).}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 132,7 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 162,6 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_a \cos 22,94^\circ = P_{av} \cos 22,94^\circ + P_{aQ} \cos 22,94^\circ = 39,6 + 31,1 = 70,7 \text{ kN/m}$$

$$r_\gamma = 1,5 \text{ m}, \quad r_Q = 2,25$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow \Sigma H_d y_e = 39,6 * 1,5 + 31,1 * 2,25 = 129,4 \text{ kNm/m}$$

$$(3), (4), (5), (6) \text{ ja } (7) \Rightarrow \Sigma V_d x_e = 162,7 + 29,9 * 2,1 = 219,0 \text{ kN/m} \Rightarrow$$

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,69, \text{ kun liikennekuorma on takalaipan ulkopuolella.}$$

3. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan kun seinäkitka  $\delta_d = \phi_d$ . Liikennekuorma  $Q$  takalaipan takana. Oman painon  $G$  vaikutus edullinen eli osavarmuusluku  $\gamma_G = 0,95$ ,  $\gamma_\phi = 1,1$  ja  $\gamma_Q = 1,5$ .

$$\delta_d = \phi_d = 34,1^\circ$$

$$K_a = 0,255$$

$$P_a = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 * 1,0 * 17 * 4,5^2 + 1,5 * 20 * 4,5) * 0,255 = 78,31 \text{ kN/m}$$

$$(7) P_{av} = P_a \sin 34,41^\circ = 44,3 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen).}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 132,7 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 177,0 \text{ kN/m}$$



$$P_{ah} = P_a \cos 34,41^\circ = P_{ay} \cos 34,41 + P_{aq} \cos 34,41 = 64,6 \text{ kN/m}$$

$$r_\gamma = 1,5 \text{ m}, r_Q = 2,25$$

$$\Rightarrow \Sigma H_d y_e = 43,9 \cdot 1,5 + 34,5 \cdot 2,25 = 143,5 \text{ kNm/m}$$

$$(3), (4), (5), (6) \text{ ja } (7) \Rightarrow \Sigma V_d x_e = 162,7 + 44,3 \cdot 2,1 = 255,7 \text{ kN/m} \Rightarrow$$

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,78, \text{ kun liikennekuorma on takalaipan ulkopuolella.}$$

b) Case C.

1. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan pohjapaineen painopisteen suhteen, kun seinäkitka  $\delta = 0$ . Liikennekuorma  $Q$  takalaipan takana. Oma-paino  $G$  :n vaikutus edullinen eli  $\gamma_G = 1,0$ ,  $\gamma_\phi = 1,25$  ja  $\gamma_Q = 1,3$ .

$$\phi_d = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = 31,1^\circ$$

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi_d / 2) = 0,319$$

Vaakakuormat ja momenttivarret etukulman suhteen :

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2 = 0,5 \cdot 0,319 \cdot 1,0 \cdot 17^2 \cdot 4,5^2 = 54,9 \text{ kN/m} \quad r_\gamma = 1,5 \text{ m}$$

$$(2) F_Q = K_a \gamma_Q Q_k h = 37,3 \text{ kN/m} \quad r_Q = 2,25 \text{ m}$$

$$(3) G_1 = 1,0 \cdot 1,3 \cdot 4,0 \cdot 17 = 88,4 \text{ kN/m} \quad r_1 = 1,45 \text{ m}$$

$$(4) G_2 = 1,0 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 17 = 5,1 \text{ kN/m} \quad r_2 = 0,3 \text{ m}$$

$$(5) G_3 = 1,0 \cdot 2,1 \cdot 0,5 \cdot 25 = 26,2 \text{ kN/m} \quad r_3 = 1,05 \text{ m}$$

$$(6) G_4 = 1,0 \cdot 0,2 \cdot 4,0 \cdot 25 = 20 \text{ kN/m} \quad r_4 = 0,7 \text{ m}$$

$$r_\gamma = 1,5 \text{ m}, r_Q = 2,25 \text{ m}$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow M_0 = F_Q r_Q + F_\gamma r_\gamma = 166,3 \text{ kNm /m} \quad (7)$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow H = F_\gamma + F_Q = 92,2 \text{ kN/m} \quad (8)$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 = 139,7 \text{ kN/m} \quad (9)$$

$$r_H = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = \frac{166,3}{92,2} = 1,80 \text{ m} \quad ; \quad r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G} = 1,23 \text{ m}$$

Kiertoakselina redusoidun pohjapaineen painopiste akseli. Momentti painopisteen (p) suhteen

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = \frac{92,2 * 1,80}{139,8} = 1,18 \text{ m}$$

$$e = r_G - a \Rightarrow a = r_G - e = 1,23 - 1,18 = 0,05 \text{ m. (Pohjalaatan toimiva leveys B' = 0,10 m)}$$

Pystykomponentin sijainti redusoidun pohjapaineen painopiste akselin suhteen:

$$x_e = r_G - a = 1,23 - 0,05 = 1,18 \text{ m}$$

Vaakakomponentin sijainti laatan alapinnan suhteen:

$$y_e = r_H = 1,80 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \Sigma H_d y_e = 92,2 * 1,8 = 166,0 \text{ kNm/m}$$

$$\Rightarrow \Sigma V_d x_e = 139,7 * 1,18 \text{ m} = 164,8 \text{ kNm/m} \Rightarrow \text{Mitoitusvarmuusluku } F_d$$

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 0,99$$

2. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan pohjapaineen painopisteen suhteen, kun seinäkitka  $\delta_d = 2/3 \phi_d$ . Liikennekuorma Q takalaipan takana. Omapaino G :n vaikutus edullinen eli  $\gamma_G = 1,0$ ,  $\gamma_\phi = 1,25$  ja  $\gamma_Q = 1,3$ .

$$\delta_d = \phi_d = 20,73^\circ$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}} \right]} = 0,285$$

$$P_a = \int_0^h p_a dz = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_{ah} = (0,5 * 17 * 4,5^2 + 1,3 * 20 * 4,5) * 0,285 = 82,4 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 20,73^\circ = 29,2 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m} \quad (\text{Etulaipan suhteen}).$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 139,7 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 139,7 + 29,2 = 168,9 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_{ay} + P_{aQ} = P_a \cos 20,77^\circ = 77,1 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_{ay} \cos 20,73 + P_{aq} \cos 20,73 = 45,9 + 31,2 \quad r_y = 1,5\text{m}, r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = 1,80\text{m} \quad ; \quad r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = 1,38\text{m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = \frac{77,1 * 1,8}{168,9} = 0,86\text{m}$$

$$e = 0,86\text{m} \Rightarrow a = r_G - e = 0,52\text{m}$$

Pysty- ja vaakakomponentin sijainti redusoidun pohjapaineen painopisteakselin suhteen:

$$x_e = r_G - a = 1,38 - 0,52 = 0,86\text{m}$$

$$y_e = r_H = 1,80\text{m}$$

$$\Rightarrow \sum H_d y_e = 77,1 * 1,8 = 138,8 \text{ kNm/m}$$

$$\Rightarrow \sum V_d x_e = 168,9 * 0,86\text{m} = 145,3 \text{ kN/m} \Rightarrow \text{Mitoitusvarmuusluku } F_d$$

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,05$$

3. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan. Kiertoakselina redusoidun pohjapaineen painopisteakseli. Seinäkitta  $\delta_d = \phi_d$ . Liikennekuorma  $Q$  takalaipan takana. Omapaino  $G$  :n vaikutus edullinen eli  $\gamma_G = 1,0$ ,  $\gamma_\phi = 1,25$  ja  $\gamma_Q = 1,3$ .

$$\delta_d = \phi_d = 31,1^\circ$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}} \right]} = 0,268$$

$$P_a = \int_0^h P_a dz = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_{ah} = (0,5 * 17 * 4,5^2 + 1,3 * 20 * 4,5) * 0,268 = 77,5 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 31,1^\circ = 40,0 \text{ kN/m} \quad r = 2,1\text{m} \quad (\text{Etulaipan suhteen}).$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \sum G_i = 139,7 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \sum G_i + P_{av} = 139,7 + 40,0 = 179,7 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_{ay} + P_{aq} = P_a \cos 31,1^\circ = 66,4 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_{ay} \cos 31,1 + P_{aq} \cos 31,1 = 39,5 + 26,9 \quad r_y = 1,5\text{m}, r_Q = 2,25$$

$$r_y = 1,5\text{m}, r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = 1,80\text{m}$$

$$r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = 1,42\text{m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H^* r_H}{G} = 0,95\text{m}$$

$$e = 0,95\text{m} \Rightarrow a = r_G - e = 0,47\text{m}$$

Pystykomponentin sijainti redusoidun pohjapaineen painopiste akselin suhteen:

$$x_e = r_G - a = 1,42 - 0,47 = 0,95\text{m}$$

$$y_e = r_H = 1,80\text{m}$$

$$\Rightarrow \sum H_d y_e = 66,4 * 1,8 = 119,5 \text{ kNm/m}$$

$$\Rightarrow \sum V_d x_e = 172,7 * 0,95\text{m} = 164,1 \text{ kN/m} \Rightarrow \text{Mitoitusvarmuusluku :}$$

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,37 \quad (\text{redusoidun pohjapaineen painopiste akselin suhteen})$$

Mitoitusvarmuusluvut kaatumista vastaan eri mitoitustilanteissa etureunan ja pohjapaineen painopiste akselin suhteen on esitetty taulukoissa 27-30.

## Liite 1/2. Varmuus liukumista vastaan

Lasketaan mitoitusvarmuusluvut tapauksille B ja C, oletuksilla seinäkitka  $\delta = 0$ ,  $\delta_d = 2/3\phi_d$  ja  $\delta_d = \phi_d$ . Liikennekuorma Q takalaipan takana.

a) Case B.

1. Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  liukumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta = 0$

Perustustason alapuolisen maan kitkakulma  $\phi_2 = 39^\circ$ ; käytetään perusmaan ja tukimuurin pohjan välisen kitkakertoimen laskemisessa.

$$\gamma_G = 1,35, \gamma_Q = 1,50, \gamma_\phi = 1,0.$$

$$\phi_{d2} = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = 39^\circ \quad (\text{Perusmaa})$$

Täytön kitkakulma; käytetään kuormien laskemisessa:

$$\phi_{d1} = \arctan\left(\frac{\tan\phi}{\gamma_\phi}\right) = 37^\circ \text{ (Täyttö)}$$

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2) = \frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} = 0,249$$

Vaakakuormat:

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2 = 0,5 * 0,249 * 1,35 * 17 * 4,5^2 = 58,0 \text{ kN/m}$$

$$(2) F_Q = K_a \gamma_Q Q_k \bar{h} = 0,249 * 1,50 * 20 * 4,5 = 33,6 \text{ kN/m}$$

$$P_a = F_\gamma + F_Q = 91,6 \text{ kN/m}$$

Pystykuormat:

$$(3) G_1 = 1,0 * 1,30 * 4,0 * 17 = 88,4 \text{ kN/m}$$

$$(4) G_2 = 1,0 * 0,60 * 0,5 * 17 = 5,1 \text{ kN/m}$$

$$(5) G_3 = 1,0 * 2,1 * 0,5 * 25 = 26,3 \text{ kN/m}$$

$$(6) G_4 = 1,0 * 0,2 * 4,0 * 25 = 20 \text{ kN/m}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow H = F_\gamma + F_Q = 91,6 \text{ kN/m}$$

Liukuvarmuus paikalla valetuilla perustuksilla. Kitkakerroin  $\tan\delta_d = \tan\phi_d$

$$F_d = \frac{V_d' * \tan\phi_d}{H_d} = \frac{139,8 * \tan 39}{91,6} = 1,30$$

Liukuvarmuus elementtiperustuksilla.  $\tan\delta_d = \tan 2/3\phi_d$

$$F_d = \frac{V_d' * \tan\phi_d}{H_d} = \frac{139,8 * \tan 26}{91,6} = 0,78$$

2. Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  liukumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta_d = 2/3 \phi_d$ .

$$\text{Seinäkitkakulma } \delta_d = 2/3\phi = 2/3 * 37 = 24,67^\circ$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}} \right]} = 0,226$$

$$P_a = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_{ah} = (0,5 * 1,35 * 17 * 4,5^2 + 1,5 * 20 * 4,5) * 0,226 = 83,0 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 24,67^\circ = 34,6 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen).}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 139,8 + 34,6 = 174,4 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_a \cos 24,67^\circ = P_{ay} \cos 24,67 + P_{aQ} \cos 24,67 = 47,7 + 27,3 = 75,4 \text{ kN/m}$$

$r_y = 1,5 \text{ m}, r_Q = 2,25$

Liukuvarmuus paikalla valetuilla perustuksilla . Kitkakerroin  $\tan \delta_d = \tan \phi_d$

$$F_d = \frac{V_d \cdot \tan \phi_d}{H_d} = \frac{174,4 \cdot \tan 39}{75,4} = 1,87$$

Liukuvarmuus elementtiperustuksilla. Kitkakerroin  $\tan \delta_d = \tan 2/3 \phi_d$

$$F_d = \frac{V_d \cdot \tan \phi_d}{H_d} = \frac{174,4 \cdot \tan 26}{75,4} = 1,13$$

3. Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  liukumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta_d = \phi_d$

Seinäkitkakulma  $\delta_d = \phi_d = 37^\circ$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}} \right]} = 0,233$$

$$P_a = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 * 1,35 * 17 * 4,5^2 + 1,5 * 20 * 4,5) * 0,233 = 85,6 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 37^\circ = 51,5 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen).}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 146,8 + 51,5 = 191,3 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_a \cos 37^\circ = P_{ay} \cos 37^\circ + P_{aQ} \cos 37^\circ = 43,2 + 25,1 = 68,3 \text{ kN/m}$$

$r_\gamma = 1,5 \text{ m}$  ,  $r_Q = 2,25$

Liukuvarmuus paikalla valetuilla perustuksilla . Kitkakerroin  $\tan \delta_d = \tan \phi_d$

$$F_d = \frac{V_d \cdot \tan \phi_d}{H_d} = \frac{191,3 \cdot \tan 39^\circ}{68,3} = 2,27$$

Liukuvarmuus elementtiperustuksilla. Kitkakerroin  $\tan \delta_d = \tan 2/3 \phi_d$

$$F_d = \frac{V_d \cdot \tan \phi_d}{H_d} = \frac{191,3 \cdot \tan 26^\circ}{68,3} = 1,35$$

b) Case C

1. Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  liukumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta = 0$ .  
Liikennekuorma Q takalaipan takana.

$$\phi_1 = 37^\circ, \quad \phi_2 = 39^\circ, \quad \gamma = 17 \text{ kN/m}^2, \quad Q_k = 20 \text{ kN/m}^2.$$

$\gamma_\phi = 1,25$  ,  $\gamma_G = 1,00$  ,  $\gamma_Q = 1,30$

$$\phi_{d2} = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = 32,94^\circ$$

$$\phi_{d1} = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = 31,1^\circ$$

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi_d / 2) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = 0,319$$

(1)  $F_\gamma = 0,5 \cdot 0,319 \cdot 1,0 \cdot 17 \cdot 4,5^2 = 54,9 \text{ kN/m}$

(2)  $F_Q = 0,319 \cdot 1,30 \cdot 20 \cdot 4,5 = 37,3 \text{ kN/m}$

(3)  $G_1 = 1,0 \cdot 1,3 \cdot 4,0 \cdot 17 = 88,4 \text{ kN/m}$

(4)  $G_2 = 1,0 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 17 = 5,1 \text{ kN/m}$

(5)  $G_3 = 1,0 \cdot 2,1 \cdot 0,5 \cdot 25 = 26,3 \text{ kN/m}$

(6)  $G_4 = 1,0 \cdot 0,2 \cdot 4,0 \cdot 25 = 20 \text{ kN/m}$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow H = F_\gamma + F_Q = 92,2 \text{ kN/m} \quad (7)$$

$$(3),(4),(5) \text{ ja } (6) \Rightarrow G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 = 139,8 \text{ kN/m} \quad (8)$$

Liukuvarmuus paikalla valetuilla perustuksilla . Kitkakerroin  $\tan\delta_d = \tan\phi_d$

$$F = \frac{S_d + E_{pd}}{H_d} = \frac{V_d' * \tan\phi_d}{H_d} = \frac{139,8 * \tan 32,94}{92,2} = 0,98$$

Liukuvarmuus elementtiperustuksilla. Kitkakerroin  $\tan\delta_d = \tan 2/3\phi_d$

$$F = \frac{S_d + E_{pd}}{H_d} = \frac{V_d' * \tan\phi_d}{H_d} = \frac{139,8 * \tan 21,74}{92,2} = 0,60$$

2. Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  liukumista vastaan kun seinäkitka  $\delta_d = 2/3\phi_d$  .  
Liikennekuorma Q takalaipan takana.

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}} \right]} = 0,285$$

$$P_a = \int_0^h p_a dz = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 * 17 * 4,5^2 + 1,3 * 20 * 4,5) * 0,285 = 82,4 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 20,73^\circ = 29,17 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen).}$$

$$(3),(4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 139,8 + 29,17 = 168,97 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_a \cos 20,73^\circ = 77,07 \text{ kN/m}$$

Liukuvarmuus paikalla valetuilla perustuksilla . Kitkakerroin  $\tan\delta_d = \tan\phi_d$   
Liikennekuorma Q takalaipan takana.

$$F_d = \frac{V_d' * \tan\phi_d}{H_d} = \frac{168,97 * \tan 32,94}{77,07} = 1,42$$



Liukuvarmuus elementtiperustuksilla. Kitkakerroin  $\tan\delta_d = \tan\frac{2}{3}\phi_d$

$$F_d = \frac{V_d' * \tan\phi_d}{H_d} = \frac{168,97 * \tan 21,74}{77,07} = 0,87$$

3. Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  liukumista vastaan kun seinäkitka  $\delta_d = \phi_d$ .

$$\delta_d = \phi_d = 31,1^\circ$$

$$K_a = 0,286$$

$$P_a = \left(\frac{\gamma h^2}{2} + qh\right) K_a = (0,5 * 1,0 * 17 * 4,5^2 + 1,3 * 20 * 4,5) * 0,286 = 82,7 \text{ kN/m}$$

(7)  $P_{av} = P_a \sin 31,1^\circ = 42,7 \text{ kN/m}$   $r = 2,1 \text{ m}$  (Etulaipan suhteen).

(3),(4), (5) ja (6)  $\Rightarrow \Sigma G_i = 139,8$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 182,5 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_a \cos 31,1^\circ = 70,8 \text{ kN/m}$$

Liukuvarmuus paikalla valetuilla perustuksilla. Kitkakerroin  $\tan\delta_d = \tan\phi_d$   
Liikennekuorma takalaipan ulkopuolella.

$$F_d = \frac{182,5 * \tan 32,94}{70,8} = 1,67$$

Liukuvarmuus elementtiperustuksilla. Kitkakerroin  $\tan\delta_d = \tan\frac{2}{3}\phi_d$

$$F_d = \frac{182,5 * \tan 21,74}{70,8} = 1,02$$

### Liite 1/3. Varmuus pohjan murtumista vastaan

Pohjamaan kantavuus lasketaan tapauksissa B ja C, seinäkitkakulman arvoilla  $\delta=0$ ,  $\delta_d = \frac{2}{3}\phi_d$  ja  $\delta_d = \phi_d$ .

a) Case B

1. Mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan, kun seinäkitkakulma  $\delta=0$ . Pysty- ja vaakakuormitukset on laskettu liukumistarkastelun yhteydessä liitteessä 1/2.

$$\phi_1 = 37^\circ, \phi_2 = 39^\circ, \gamma = 17 \text{ kN/m}^3, Q_k = 20 \text{ kN / m}^2$$

$$\gamma_G = 1,35 (\text{maanpaineelle}), \gamma_G = 1,0 (\text{omalle painolle}), \gamma_Q = 1,50, \gamma_\phi = 1,0.$$

$$H = F_\gamma + F_Q = 91,6 \text{ kN/m}; r_\gamma = 1,5 \text{ m}, r_Q = 2,25 \text{ m}$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$M = F_Q r_Q + F_Y r_Y = 162,6 \text{ kNm/m}$$

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = \frac{33,6 * 2,25 + 58 * 1,5}{91,6} = 1,78 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = \frac{88,4 * 1,45 + 5,1 + 0,3 + 26,3 * 1,05 + 20 + 0,7}{139,8} = 1,23 \text{ m}$$

Kiertoakselina redusoidun pohjapaineen painopisteakseli:

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = \frac{91,6 * 1,78}{139,8} = 1,17 \text{ m}$$

$$\Rightarrow a = r_G - e = 1,23 - 1,17 = 0,06 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \text{Pohjapaine : } q_d = \frac{G}{2a} = \frac{146,8}{2 * 0,06} = 1223,3 \text{ kN/m}^2.$$

Kantokykytarkastelu :

$$L = 10 \text{ m}$$

$$H = 91,6 \text{ kN/m}$$

$$V = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$B = 2 * 0,06 = 0,12 \text{ m (} a = b_t / 2 \text{)}$$

$$\phi = 39^\circ$$

$$\phi_d = 39^\circ$$

$$q = 1,0 * 17 = 17 \text{ kN/m}^2$$

$$N_q = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi_d}{2}) e^{\pi \tan \phi_d} = 55,96$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi = 89,0$$

$$s_q = 1 + \left( \frac{B}{L} \right) \sin \phi = 1,008$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \left( \frac{B}{L} \right) = 0,9964$$

$$i_q = \left( 1 - 0,7 \frac{H}{V} \right)^3 = 0,1787$$

$$i_\gamma = \left( 1 - \frac{H}{V} \right)^3 = 0,0532$$

$$\frac{R}{A} = q * N_q * s_q * i_q + 0,5 \gamma * B * N_\gamma * s_\gamma * i_\gamma = 176,2$$

Pohjapaine  $q_d = 1223,3 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow$  Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  maapohjan murtumista vastaan :

$$F_d = \frac{176,2}{1223,3} = 0,144$$

2. Mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan, kun seinäitkikulma  $\delta_d = 2/3\phi_d$ . Pysty- ja vaakakuormitukset on laskettu liukumistarkastelun yhteydessä liitteessä 1/2.

$$P_a = \int_0^h p_a dz = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 * 1,35 * 17 * 4,5^2 + 1,5 * 20 * 4,5) * 0,226 = 83,0 \text{ kN/m}$$

$$P_{av} = P_a \sin 24,67^\circ = 34,6 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 139,8 + 29,17 = 174,4 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_a \cos 24,67^\circ = 75,4 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_{ay} \cos 24,67^\circ + P_{aQ} \cos 24,67^\circ = 47,7 + 27,3 \quad r_y = 1,5 \text{ m}, r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = 1,76 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G} = 1,37 \text{ m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = \frac{75,4 * 1,76}{174,4} = 0,76 \text{ m}$$

$$e = 0,76 \text{ m} \Rightarrow a = r_G - e = 0,61 \text{ m} \Rightarrow \text{Pohjapaine : } q_d = \frac{G}{2a} = 150,3 \text{ kN/m}^2$$

Kantokyky:

$L = 10 \text{ m}$	$N_q = 55,96$
$H = 75,4 \text{ kN/m}$	$N_\gamma = 89,0$
$V = 174,4 \text{ kN/m}$	$s_q = 1,077$
$B = 2 * 0,61 = 1,12 \text{ m}$	$s_\gamma = 0,963$
$\phi = \phi_d = 39^\circ$	$i_q = 0,361$
$q = 1,0 * 17 = 17 \text{ kN/m}^2$	$i_\gamma = 0,204$

$$\frac{R}{A} = q * N_q s_q i_q + 0,5 \gamma * B * N_\gamma s_\gamma i_\gamma = 551,2 \text{ kN/m}^2$$

Pohjapaine  $q_d = 150,3 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow$  Varmuus maapohjan murtumista vastaan:

$$F_d = \frac{551,2}{150,3} = 3,67$$

3. Mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan, kun seinäkitkakulma  $\delta_d = \phi_d$ . Pysty- ja vaakakuormitukset on laskettu liukumistarkastelun yhteydessä kappaleessa liitteessä 1/2.

$$P_a = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 \cdot 1,35 \cdot 17^2 \cdot 4,5^2 + 1,5 \cdot 20 \cdot 4,5) \cdot 0,233 = 85,6 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat :

$$(7) P_{av} = P_a \sin 37^\circ = 51,5 \text{ kN/m} ; r = 2,1 \text{ m (etulaipan suhteen)}.$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Sigma G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 139,8 + 51,5 = 191,3 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti:

$$P_{ah} = P_{ay} \cos 37^\circ + P_{aq} \cos 37^\circ = 43,2 + 25,1 = 68,3 \text{ kN/m}$$

$$r_y = 1,5 \text{ m}, r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = 1,78 \text{ m}; r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G_i} = 1,41 \text{ m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H \cdot r_H}{G} = \frac{68,3 \cdot 1,78}{191,3} = 0,61 \text{ m}$$

$$e = 0,61 \text{ m} \Rightarrow a = r_G - e = 0,80 \text{ m} \Rightarrow \text{Pohjapaine: } q_d = \frac{G}{2a} = 123,9 \text{ kN/m}^2$$

Kantokyky:

$$L = 10 \text{ m} \quad N_q = 55,96$$

$$H = 68,3 \text{ kN/m} \quad N_\gamma = 89,0$$

$$V = 191,3 \text{ kN/m} \quad s_q = 1,101$$

$$B = 2 \cdot 0,80 = 1,60 \text{ m} \quad s_\gamma = 0,952$$

$$\phi = \phi_d = 39^\circ \quad i_q = 0,437$$

$$q = 1,0 \cdot 17 = 17 \text{ kN/m}^2 \quad i_\gamma = 0,282$$

$$\frac{R}{A} = q \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma = 782,7 \text{ kN/m}^2.$$

Pohjapaine  $q_d = 123,9 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow$  Varmuus maapohjan murtumista vastaan:

$$F_d = \frac{782,7}{123,9} = 5,12$$

b) Case C

3. Mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan, kun seinäitkukulma  $\delta=0$ .

Liikennekuorma sijaitsee takalaipan ulkopuolella.

$$\phi_1 = 37^\circ, \phi_2 = 39^\circ, \gamma = 17 \text{ kN/m}^2, Q_k = 20 \text{ kN/m}^2.$$

$$\gamma_\phi = 1,25, \gamma_G = 1,00, \gamma_Q = 1,30$$

$$\phi_d = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = 31,1^\circ$$

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi_d / 2) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = 0,319$$

$$(1) F_\gamma = 0,5 * 0,319 * 1,0 * 17 * 4,5^2 = 54,9 \text{ kN/m}$$

$$(2) F_Q = 0,319 * 1,30 * 20 * 4,5 = 37,3 \text{ kN/m}$$

$$(3) G_1 = 1,0 * 1,3 * 4,0 * 17 = 88,4 \text{ kN/m}$$

$$(4) G_2 = 1,0 * 0,6 * 0,5 * 17 = 5,1 \text{ kN/m}$$

$$(5) G_3 = 1,0 * 2,1 * 0,5 * 25 = 26,3 \text{ kN/m}$$

$$(6) G_4 = 1,0 * 0,2 * 4,0 * 25 = 20 \text{ kN/m}$$

Momentti etureunan suhteen ja kuormitusresultantin vaaka- ja pystykomponentit

$$r_\gamma = 1,5, r_Q = 2,25$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow M_0 = F_Q r_Q + F_\gamma r_\gamma = 166,3 \text{ kNm / m} \quad (7)$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow R = F_\gamma + F_Q = 92,2 \text{ kN/m} \quad (8)$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 = 139,8 \text{ kN/m} \quad (9)$$

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = \frac{166,3}{92,2} = 1,80 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = 1,23$$

Kiertoakselina redusoidun pohjapaineen painopisteakseli.

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = \frac{92,2 * 1,80}{139,8} = 1,18 \text{ m}$$

$$e = 1,18 \Rightarrow a = r_G - e = 1,23 - 1,18 = 0,05 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \text{Pohjapaine : } q_d = \frac{G}{2a} = \frac{139,8}{2 * 0,05} = 1390 \text{ kN / m}^2 \text{ ( ilman liikennekuormaa)}$$

Kantavuustarkastelu ( Eurocode Case C ) :

$$\begin{aligned}
 L &= 10\text{m} \\
 H &= 92,2 \text{ kN/m} \\
 V &= 139,8 \text{ kN/m} \\
 B &= 2 \cdot 0,05 = 0,1 \\
 \phi &= 39^\circ \\
 \phi_d &= 32,94^\circ \\
 q &= 1,0 \cdot 17 = 17 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$N_q = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi_d}{2}\right) e^{\pi \tan \phi_d} = 25,91$$

$$N\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi' = 32,27$$

$$s_q = 1 + \left(\frac{B'}{L'}\right) \sin \phi' = 1,005$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \left(\frac{B'}{L'}\right) = 0,997$$

$$i_q = \left(1 - 0,7 \frac{H}{V}\right)^3 = 0,156$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{V}\right)^3 = 0,04$$

$$\frac{R}{A'} = q \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5\gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma = 70,15 \quad (\text{Liikennekuorma takalaipan takana})$$

Pohjapaine  $q_1 = 1390,8 \Rightarrow$  Varmuus maapohjan murtumista vastaan :

$$F_1 = \frac{70,15}{1390,8} = 0,05$$

2. Mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta_d = 2/3\phi_d$ . Liikennekuorma takalaipan takana.

$$\phi_d = 31,1^\circ$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}} \right]} = 0,285$$

$$P_a = \int_0^h p_a dz = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 \cdot 17 \cdot 4,5^2 + 1,3 \cdot 20 \cdot 4,5) \cdot 0,285 = 82,4 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 20,73^\circ = 29,17 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen)}.$$

$$(3),(4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 139,8 \text{ kN/m} \\ V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 139,8 + 29,17 = 168,97 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_a \cos 20,73^\circ = 77,07 \text{ kN/m} \\ P_{ah} = P_{ay} \cos 20,73 + P_{aQ} \cos 20,73 = 45,88 + 31,19 \quad r_\gamma = 1,5 \text{ m}, r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = 1,80 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G} = 1,38 \text{ m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H \cdot r_H}{G} = \frac{77,07 \cdot 1,8}{168,97} = 0,82 \text{ m}$$

$$e = 0,82 \text{ m} \Rightarrow a = r_G - e = 0,56 \text{ m} \Rightarrow \text{Pohjapaine: } q_d = \frac{G}{2a} = 150,87 \text{ kN/m}^2$$

Kantokyky:

$L = 10 \text{ m}$	$N_q = 25,91$
$H = 77,07 \text{ kN/m}$	$N_\gamma = 32,27$
$V = 168,97 \text{ kN/m}$	$s_q = 1,061$
$B = 2 \cdot 0,56 = 1,12 \text{ m}$	$s_\gamma = 0,966$

$\phi = 39^\circ, \phi_d = 32,94^\circ$	$i_q = 0,315$
$q = 1,0 \cdot 17 = 17 \text{ kN/m}^2$	$i_\gamma = 0,161$

$$\frac{R}{A} = q \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma = 194,99 \Rightarrow \text{Varmuus pohjan murtumista vastaan :}$$

$$F_d = \frac{195,0}{150,87} = 1,29$$

3. Mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta_d = \phi_d$ .  
Liikennekuorma takalaipan takana.

$$\delta_d = \phi_d = 31,1^\circ$$

$$K_a = 0,286$$

$$P_a = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 \cdot 1,0 \cdot 17 \cdot 4,5^2 + 1,3 \cdot 20 \cdot 4,5) \cdot 0,286 = 82,7 \text{ kN/m}$$

$$(7) P_{av} = P_a \sin 31,1^\circ = 42,7 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen)}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 182,5 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_a \cos 31,1^\circ = 70,8 \text{ kN/m}$$

$$r_\gamma = 1,5 \text{ m}; \quad r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = 1,80 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G} = 1,42 \text{ m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H \cdot r_H}{G} = 0,70 \text{ m}$$

$$e = 0,70 \text{ m} \Rightarrow a = r_G - e = 0,72 \text{ m} \Rightarrow \text{Pohjapaine: } q_d = \frac{G}{2a} = 126,7 \text{ kN/m}^2$$

Kantokyky:

$$L = 10 \text{ m} \quad N_q = 25,91$$

$$H = 70,8 \text{ kN/m} \quad N_\gamma = 32,27$$

$$V = 182,5 \text{ kN/m} \quad s_q = 1,078$$

$$B = 2 \cdot 0,72 = 1,44 \text{ m} \quad s_\gamma = 0,957$$

$$\phi = 39^\circ, \phi_d = 32,94^\circ \quad i_q = 0,387$$

$$q = 1,0 \cdot 17 = 17 \text{ kN/m}^2 \quad i_\gamma = 0,229$$

$$\frac{R}{A'} = q \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma = 270,3 \Rightarrow$$

Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  murtumista vastaan :

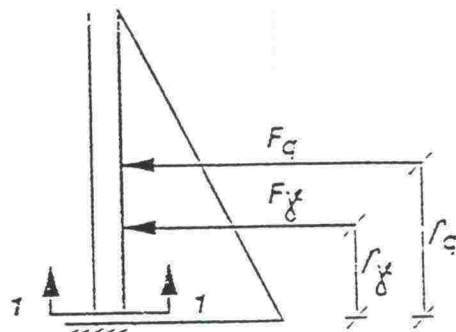
$$F_d = \frac{270,3}{126,7} = 2,13$$



### Liite 1/4. Seinän alareunan taivutusmomentti

Momentit kuvan 4 mukaiselle kuormitukselle leikkauksessa 1-1:

#### LEIKKAUS 1 - 1



Kuva 24. Seinän alareunan taivutusmomentti

## Liite 2. Mitoituslaskelmat EC7/EC1 mukaan maanpaineelle 1

Kyseinen tapaus poikkeaa EC7/EC7 mukaisesta mitoituksesta vain kaatumisvarmuuden osalta Case A:ssa, missä vaarallisinta kuormayhdistelmää laskettaessa oman painon osavarmuusluku on  $\gamma_G = 0,90$ . Tapauksia B ja C vastaavat mitoituslaskelmat on esitetty kappaleessa liitteessä 1.

a.) Case A

1. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan, kun seinäkitkakulma  $\delta = 0$ . Kiertokeskuksena pohjalaatan etureuna. Liikennekuorma takalaidan takana.

$$\gamma_G = 0,90, \gamma_Q = 1,50, \gamma_\phi = 1,1, Q_k = 20 \text{ kN/m}^2$$

$$K_a = 0,287$$

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2 = 47,9 \text{ kN/m} \quad r_\gamma = 1,50 \text{ m}$$

$$(2) F_Q = K_a \gamma_Q Q_k h = 37,5 \text{ kN/m} \quad r_Q = 2,25 \text{ m}$$

$$(3) G_1 = 0,90 * 1,3 * 4,0 * 17 = 79,6 \text{ kN/m} \quad r_1 = 1,45 \text{ m}$$

$$(4) G_2 = 0,90 * 0,6 * 0,5 * 17 = 4,6 \text{ kN/m} \quad r_2 = 0,30 \text{ m}$$

$$(5) G_3 = 0,90 * 2,1 * 0,5 * 25 = 23,6 \text{ kN/m} \quad r_3 = 1,05 \text{ m}$$

$$(6) G_4 = 0,90 * 0,2 * 4,0 * 25 = 18,0 \text{ kN/m} \quad r_4 = 0,70 \text{ m}$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow \Sigma H_d y_e = 156,2 \text{ kNm/m}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma V_d x_e = 154,2 \text{ kNm/m}$$

$\Rightarrow$  Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan etureunan suhteen :

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 0,99$$

2. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan, kun seinäkitkakulma  $\delta_d = 2/3 \phi_d$ . Kiertokeskuksena pohjalaatan etureuna. Liikennekuorma takalaidan takana.

$$\phi = 37^\circ, \phi_d = 34,41^\circ$$

$$\delta_d = 2/3 = 22,94^\circ$$

$$K_a = 0,250$$

$$P_a = \left(\frac{\gamma h^2}{2} + qh\right)K_{ah} = (0,5 \cdot 1,0 \cdot 17 \cdot 4,5^2 + 1,5 \cdot 20 \cdot 4,5) \cdot 0,250 = 76,5 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 22,94^\circ = 29,8 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen).}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 125,8 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 155,6 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_a \cos 22,94^\circ = P_{ay} \cos 22,94 + P_{aQ} \cos 22,94 = 39,6 + 31,1 = 70,7 \text{ kN/m}$$

$$r_y = 1,5 \text{ m}, \quad r_Q = 2,25$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow \Sigma H_d y_e = 39,6 \cdot 1,5 + 31,1 \cdot 2,25 = 129,4 \text{ kNm/m}$$

$$(3), (4), (5), (6) \text{ ja } (7) \Rightarrow \Sigma V_d x_e = 154,2 + 29,8 \cdot 2,1 = 216,8 \text{ kNm/m}$$

$\Rightarrow$  Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan etureunan suhteen :

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,68$$

3. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan, kun seinäkitkakulma  $\delta_d = \phi_d$ . Kiertokeskuksena pohjalaatan etureuna. Liikennekuorma takalaipan takana.

$$\delta_d = \phi_d = 34,41^\circ, \quad K_a = 0,255$$

$$P_a = \left(\frac{\gamma h^2}{2} + qh\right)K_a = (0,5 \cdot 1,0 \cdot 17 \cdot 4,5^2 + 1,5 \cdot 20 \cdot 4,5) \cdot 0,255 = 78,3 \text{ kN/m}$$

$$(7) P_{av} = P_a \sin 34,41^\circ = 44,3 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen).}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 125,8 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 170,1 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_a \cos 34,41^\circ = P_{ay} \cos 34,41 + P_{aQ} \cos 34,41 = 36,2 + 28,4 = 64,6 \text{ kN/m}$$

$$r_y = 1,5 \text{ m}, \quad r_Q = 2,25$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow \Sigma H_d y_e = 36,2 \cdot 1,5 + 28,4 \cdot 2,25 = 118,2 \text{ kNm/m}$$

$$(3), (4), (5), (6) \text{ ja } (7) \Rightarrow \Sigma V_d x_e = 154,2 + 44,3 \cdot 2,1 = 247,2 \text{ kNm/m} \Rightarrow$$

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 2,09$$

b) Case C

Koska Eurocode 1:n ja Eurocode 7:n Case C:n kuormien osavarmuusluvut ovat yhtä suuret, lasketaan kaatumisvarmuus pohjapaineen painopisteakselin suhteen kuten laskelmissa EC7/EC7. Mitoitusvarmuusluvut  $F_d$  kaatumista vastaan on laskettu kappaleessa liitteessä 1/1.

1. Mitoitusvarmuusluku kaatumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta = 0$  :  $F_d = 0,99$

2. Mitoitusvarmuusluku kaatumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta_d = 2/3\phi_d$  :  $F_d = 1,05$

3. Mitoitusvarmuusluku kaatumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta_d = \phi_d$  :  $F_d = 1,37$

### **LIITE 3. Mitoituslaskelmat EC7/ NAD(FIN)1 mukaan maanpaineelle 1**

Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  maaperän murtumista vastaan lasketaan kuten Case C mitoitus tapauksessa EC7 / EC7 .

Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan vastaa tapausta EC7 / EC1 Case A tai Case C .

Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan vastaa tapausta EC7 / EC1 ja seinän alareunan taivutusmomentti vastaa tapausta EC7 / EC7 Case B .

## LIITE 4. Mitoituslaskelmat pohjarakennusohjeen (PRO 1988) mukaan maanpaineelle 1.

Täyttö :  $\phi = 37^\circ$ ,  $\gamma = 17 \text{ kN/m}^2$ ,  $Q_k = 20 \text{ kN/m}^2$ .

Perustustason alapuolinen maa :  $\phi_2 = 39^\circ$ ,  $\gamma = 17 \text{ kN/m}^2$ ,

Osavarmuusluvut:

Kantokyky :  $\gamma_\phi = 1,25$

Liukuminen  $\gamma_\phi = 1,20$

Kaatuminen  $\gamma_\phi = 1,20$

Omapaino:  $\gamma_G = 1,0$

Liikennekuorma (SRMK)  $\gamma_Q = 1,6$

### Liite 4/1. Varmuus kaatumista vastaan

1. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan seinäkitkakulman arvolla  $\delta = 0$ .

Liikennekuorma takalaipan takana. Kiertokeskuksena muurin etureuna.

$$\phi_d = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = \arctan\left(\frac{\tan 37^\circ}{1,2}\right) = 32,13^\circ$$

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi_d / 2) = 0,306$$

$$(3) G_1 = 1,0 * 1,3 * 4,0 * 17 = 88,4 \text{ kN/m} \quad r_1 = 1,45 \text{ m}$$

$$(4) G_2 = 1,0 * 0,6 * 0,5 * 17 = 5,1 \text{ kN/m} \quad r_2 = 0,3 \text{ m}$$

$$(5) G_3 = 1,0 * 2,1 * 0,5 * 25 = 26,3 \text{ kN/m} \quad r_3 = 1,05 \text{ m}$$

$$(6) G_4 = 1,0 * 0,2 * 4,0 * 25 = 20,0 \text{ kN/m} \quad r_4 = 0,7 \text{ m}$$

$$\Sigma G = 139,8 \text{ kN/m} \quad (\text{Liikennekuorma takalaipan takana})$$

$$\Sigma G_i r_i = 171,3 \text{ kNm/m}$$

$$F_\gamma = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2 = 0,5 * 0,306 * 17 * 4,5^2 = 52,7 \text{ kN/m} \quad r_\gamma = 1,5 \text{ m}$$

$$F_Q = K_a \gamma_Q Q_k h = 0,306 * 1,6 * 20 * 4,5 = 44,1 \text{ kN/m} \quad r_Q = 2,25 \text{ m}$$

$$H = F_\gamma + F_Q = 96,8 \text{ kN/m}$$

$$r_H = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = 1,84 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G} = 1,23 \text{ m}$$

Kaatumisvarmuus muurin etukulman suhteen:

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = \frac{G r_G}{H r_H} = \frac{139,8 * 1,23}{96,8 * 1,84} = 0,96 \quad (\text{Liikennekuorma takalaipan takana})$$

Liikennekuorma (7) takalaipan päällä :

$$(7) G_6 = \gamma_G Q_k b = 1,60 \cdot 20 \cdot 1,30 = 41,6 \text{ kN/m} \quad r_6 = 1,45 \text{ m}$$

$$\Sigma G = 180,1 \text{ kN/m}$$

$$r_R = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = 1,84 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G} = 1,28 \text{ m}$$

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,29 \text{ (Liikennekuorma takalaipan päällä)}$$

2. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan seinäkitkakulman arvolla  $\delta_d = 2/3\phi_d$ .

$$\phi_d = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = \arctan\left(\frac{\tan 37^\circ}{1,2}\right) = 32,13^\circ$$

$$\delta_d = 2/3\phi_d = 21,42^\circ$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}} \right]} = 0,274$$

$$P_a = \int_0^h p_a dz = \left(\frac{\gamma h^2}{2} + qh\right) K_a = (0,5 \cdot 17 \cdot 4,5^2 + 1,6 \cdot 20 \cdot 4,5) \cdot 0,274 = 86,6 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 21,42^\circ = 31,6 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen).}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 171,4 \text{ kN/m}$$

$$(3), (4), (5), (6) \text{ ja } (7) \Rightarrow \Sigma V_d x_e = \Sigma G_i r_i + P_{av} r_{av} = 171,3 + 31,6 \cdot 2,1 = 237,7 \text{ kNm/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_a \cos 21,42^\circ = 80,6 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_{ay} + P_{aQ} = 47,16 \cdot \cos 21,42 + 39,5 \cdot \cos 21,42 = 43,9 + 36,7$$

$$r_y = 1,5 \text{ m}, \quad r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = 1,84 \quad ; \quad r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = 1,39\text{m}$$

Kiertoakselina redusoidun pohjapaineen painopiste akseli. Momentti painopisteen (p) suhteen:

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = 0,87\text{m}$$

$$e = r_G - a \Rightarrow a = r_G - e = 1,39 - 0,87 = 0,52\text{m}$$

Pystykomponentin sijainti redusoidun pohjapaineen painopiste akselin suhteen:

$$x_e = r_G - a = 1,39 - 0,52 = 0,87\text{m}$$

Vaakakomponentin sijainti laatan alapinnan suhteen:

$$y_e = r_H = 1,84\text{m}$$

$$\Rightarrow \sum H_d y_e = 80,6 * 1,84 = 148,3 \text{ kNm/m}$$

$$\Rightarrow \sum V_d x_e = 171,4 * 0,87 = 149,1 \text{ kN/m} \Rightarrow \text{Mitoitusvarmuusluku } F_d$$

$$F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,0$$

3. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  kaatumista vastaan seinäkitkakulman arvolla  $\delta_d = \phi_d$ .

$$\delta_d = 32,13^\circ$$

$$K_a = 0,276$$

$$P_a = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 * 17 * 4,5^2 + 1,6 * 20 * 4,5) * 0,276 = 87,2 \text{ kN/m}$$

$$P_{av} = P_a \sin 32,13^\circ = 46,4 \text{ kN/m} ; r = 2,1\text{m} \text{ (Etulaipan suhteen).}$$

$$\sum G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \sum G_i + P_{av} = 186,2 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_a \cos 32,13^\circ = 73,8 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_{ay} + P_{aQ} = 47,5 * \cos 32,13 + 39,7 * \cos 32,13 = 40,2 + 33,6$$

$$r_\gamma = 1,5\text{m} , r_Q = 2,25$$



$$r_H = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = 1,84 \quad ; \quad r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G} = 1,44 \text{m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = 0,74 \text{m}$$

$$e = r_G - a \Rightarrow a = r_G - e = 1,44 - 0,74 = 0,70 \text{m.}$$

$$y_e = r_H = 1,84 \text{m}$$

$$x_e = r_G - a = 1,44 - 0,70 = 0,74 \text{m}$$

$$\Rightarrow \Sigma H_d y_e = 73,8 * 1,84 = 135,8 \text{ kNm/m}$$

$$\Rightarrow \Sigma V_d x_e = 186,2 * 0,74 = 137,9 \text{ kN} \Rightarrow \text{Mitoitusvarmuusluku } F_d$$

$$\Rightarrow F_d = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,02$$

#### Liite 4/2. Varmuus liukumista vastaan

1. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan, kun maanpaine on laskettu seinäkittakulman arvolla  $\delta = 0$ . Liikennekuorma Q takalaipan takana.

$$\gamma_\phi = 1,2, \phi_2 = 39^\circ \Rightarrow \phi_{2d} = 34,0^\circ$$

Paikalla valettu perustus (kittakerroin  $\tan \delta_d = \tan \phi_d$ )

$$F_d = \frac{V_d' * \tan \phi}{H_d} = \frac{139,8 * \tan 34}{96,8} = 0,97$$

Liukuvarmuus elementtiperustuksilla ( $\tan \delta_d = \tan 2/3 \phi_d$ )

$$F_d = \frac{V_d' * \tan \phi}{H_d} = \frac{139,8 * \tan 22,67}{96,8} = 0,60$$

2. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan, kun maanpaine on laskettu seinäkittakulman arvolla  $\delta_d = 2/3 \phi_d$ . Liikennekuorma Q takalaipan takana.

Paikalla valettu perustus (kittakerroin  $\tan \delta_d = \tan \phi_d$ )

$$F_d = \frac{V_d' * \tan \phi}{H_d} = \frac{171,4 * \tan 34}{80,6} = 1,42$$

Liukuvarmuus elementtiperustuksilla ( $\tan \delta_d = \tan 2/3 \phi_d$ )

$$F_d = \frac{V_d' * \tan \phi}{H_d} = \frac{171,4 * \tan 22,67}{80,6} = 0,89$$

3 .Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan kun seinäkitka  $\delta_d = \phi_d$

$$F_d = \frac{V_d' * \tan \phi}{H_d} = \frac{186,5 * \tan 34}{77,41} = 1,61$$

Liukuvarmuus elementtiperusteilla ( $\delta_d = 2/3\phi_d$  )

$$F_d = \frac{V_d' * \tan \phi}{H_d} = \frac{186,5 * \tan 22,67}{77,41} = 1,0$$

### Liite 4/3. Varmuus pohjan murtumista vastaan

1. Mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan, kun seinäkitkakulma  $\delta = 0$ ,  $\phi_1 = 37^\circ$ ,  $\phi_2 = 39^\circ$ . Liikennekuorma Q takalaidan takana.

$$\phi_{d1} = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = 31,1^\circ$$

$$\text{Aktiivipainekerroin: } K_a = \tan^2(45^\circ - \phi_d / 2) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = 0,319$$

Kuormat :

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2 = 54,9 \text{ kN/m}$$

$$(2) F_Q = K_a \gamma_Q Q_k h = 0,319 * 1,6 * 20 * 4,5 = 45,9 \text{ kN/m}$$

$$(3) G_1 = \gamma_G b h \gamma_1 = 1,0 * 1,3 * 4,0 * 17 = 88,4 \text{ kN/m}$$

$$(4) G_2 = \gamma_G b h \gamma_1 = 1,0 * 0,6 * 0,5 * 17 = 5,1 \text{ kN/m}$$

$$(5) G_3 = 1,0 * 2,1 * 0,5 * 25 = 26,3 \text{ kN/m}$$

$$(6) G_4 = \gamma_G b h \gamma_1 = 1,0 * 0,2 * 4,0 * 25 = 20 \text{ kN/m}$$

Momentti etureunan suhteen ja kuormitusresultantin vaaka- ja pystykomponentit

$$r_\gamma = 1,5$$

$$r_Q = 2,25$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow M = F_Q r_Q + F_\gamma r_\gamma = 186,9 \text{ kNm /m} \quad (5)$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow H = F_\gamma + F_Q = 100,8 \text{ kN/m} \quad (6)$$

$$(3) \text{ ja } (4) \Rightarrow G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = 138,5 \text{ kN/m} \quad (7)$$

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = \frac{186,9}{100,8} = 1,85 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = 1,23 \text{ m}$$

Kiertoakselina redusoidun pohjapaineen painopisteakseli:

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = \frac{100,8 * 1,85}{138,5} = 1,34 \text{ m}$$

$$\Rightarrow a = r_G - e = 1,23 - 1,34 = -0,09$$

Tarkastelu, jossa liikennekuorman oletetaan vaikuttavan vaarallisimman liukupinnan (takalaipan) ulkopuolella, seinäkitkan ollessa  $\delta = 0$ , antaa redusoidulle pohjapaineelle negatiivisen arvon, joten kyseessä on mahdoton tapaus.

2 .Mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta_d = 2/3\phi_d$ ,  $\phi_d = 31,1^\circ$ . Liikennekuorma takalaipan takana.

$$K_a = 0,285$$

$$P_a = \int_0^h p_a dz = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 * 17 * 4,5^2 + 1,6 * 20 * 4,5) * 0,285 = 90,1 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 20,73^\circ = 31,9 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen)}$$

$$(3),(4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$V_d = \Sigma G_i + P_{av} = 171,7 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_a \cos 20,73^\circ = 84,27 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_{ay} + P_{aQ} = 49,06 * \cos 20,73 + 41,04 * \cos 20,73 = 45,88 + 38,39$$

$$r_y = 1,5 \text{ m}, \quad r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = 1,84 \text{ m} \quad ; \quad r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = 1,39 \text{ m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = 0,91 \text{ m}$$

$$e = 0,91 \text{ m} \Rightarrow a = r_G - e = 0,48 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \text{Pohjapaine : } q_d = \frac{G}{2a} = 177,5 \text{ kN/m}^2$$

Kantokyky:

$L = 10\text{m}$	$N_D = 25,91$
$H = 84,27 \text{ kN/m}$	$N_B = 24,21$
$V = 171,7 \text{ kN/m}$	$s_B = 0,962$
$B = 2 \cdot 0,48 = 0,96\text{m}$	$s_D = 1,019$
$\phi = 39^\circ, \phi_d = 32,94^\circ$	$i_D = 0,255$
$\gamma_{1,2} = 17 \text{ kN/m}^3$	$i_B = 0,065$
$D = 1,0\text{m}$	

$$q_{md} = \gamma_{1,2} D N_D s_D i_D + \frac{1}{2} \gamma_{1,2} B N_B s_B i_B = 127,3 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Mitoitusvarmuusluku } F_D = \frac{127,3}{177,5} = 0,72$$

3. Mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan, kun seinäkitka  $\delta_d = \phi_d$ ,  $\phi_d = 31,1^\circ$ . Liikennekuorma takalaipan takana.

$$\delta_d = 31,1^\circ$$

$$K_a = 0,286$$

$$P_a = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 \cdot 17 \cdot 4,5^2 + 1,6 \cdot 20 \cdot 4,5) \cdot 0,286 = 90,4 \text{ kN/m}$$

$$P_{av} = P_a \sin 31,1^\circ = 46,7 \text{ kN/m} ; r = 2,1\text{m (Etulaipan suhteen)}$$

$$\Sigma G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma G_i + P_{av} = 186,5 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_a \cos 31,1^\circ = 77,41 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_{ay} + P_{aQ} = 49,23 \cdot \cos 31,1 + 41,18 \cdot \cos 31,1 = 42,15 + 32,26$$

$$r_\gamma = 1,5\text{m} , r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = 1,75 \text{ m} ; r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G} = 1,45 \text{ m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H \cdot r_H}{G} = 0,73\text{m}$$

$$e = 0,73 \text{ m} \Rightarrow a = r_G - e = 0,72 \Rightarrow \text{Pohjapaine : } q_d = \frac{G}{2a} = 128,6 \text{ kN/m}^2$$

Kantokyky:

$$\begin{array}{ll}
 L = 10\text{m} & N_D = 25,91 \\
 H = 77,41 \text{ kN/m} & N_B = 24,21 \\
 V = 185,2 \text{ kN/m} & s_B = 0,942 \\
 B = 2 \cdot 0,72 = 1,44\text{m} & s_D = 1,0289 \\
 \phi = 39^\circ, \phi_d = 32,94^\circ & i_D = 0,339 \\
 \gamma_{1,2} = 17 \text{ kN/m}^3 & i_B = 0,115 \\
 D = 1,0\text{m} &
 \end{array}$$

$$q_{md} = \gamma_{1,2} D N_D s_D i_D + \frac{1}{2} \gamma_{1,2} B N_B s_B i_B = 155,7 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Mitoitusvarmuusluku } F_D = \frac{155,7}{128,6} = 1,21$$

**Liite 4/4. Seinän alareunan taivutusmomentti**

$$\gamma_\phi = 1,2; \phi_{d1} = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = 32,12^\circ$$

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi_d / 2) = 0,306$$

$$(1) F_Q = K_a \gamma_Q Q_k h = 0,306 \cdot 1,60 \cdot 20 \cdot 4,0 = 39,2 \text{ kN/m}$$

$$r_Q = 4,0/2 = 2,0\text{m}$$

$$(2) F_\gamma = \frac{1}{2} K_a \gamma_\gamma \gamma h^2 = 0,5 \cdot 0,306 \cdot 17 \cdot 4,0^2 = 41,6 \text{ kN/m}$$

$$r_\gamma = 4/3 = 1,33\text{m}$$

$$M_{1-1} = F_Q r_Q + F_\gamma r_\gamma = 133,7 \text{ kNm/m}$$

## LIITE 5. Mitoitus tielaitoksen ohjeen mukaan maan- paineelle 1

Mitoituslaskelmat Tielaitoksen ohjeen mukaan on tehty julkaisun "Siltojen kuormat" mukaisella liikennekuorman mitoitusarvolla  $Q_d = 1,0 \cdot Q_k = 1,0 \cdot 20 \text{ kN/m}^2$ . Tielaitoksen julkaisun "Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa" tarkoitus on täydentää Pohjarakennusohjeiden (PRO 1988) suosituksia sillansuunnittelua varten. Ohjeessa on esitetty suositus sillan maa- tai välitukseen kohdistuvan vaakasuoraan vaikuttavan lepopaineen laskemiseksi. Tukimuureihin kohdistuvan aktiivipaineen laskemiseksi ei Tielaitoksen julkaisuissa ole erillistä ohjetta. Koska lepopaine Tielaitoksen ohjeen mukaan lasketaan ominaisarvoilla, on Rankinen maanpaineteorian (vaakasuora kuormitusresultantti) mukainen tapaus seinäkitkakulman arvolla  $\delta = 0$  laskettu käyttäen maanpainekertoimen ominaisarvoa.

### Liite 5/1. Varmuus kaatumista vastaan

a) Kiertokeskuksena pohjalaatan etureuna ja seinäkitkakulma  $\delta = 0$ .

$$\phi_1 = 37^\circ, \gamma = 17 \text{ kN/m}^3, \gamma_Q = 1,0, Q_k = Q_d = 20 \text{ kN/m}^2 \\ \gamma_\phi = 1,25^\circ, h = 4,5 \text{ m}$$

Maanpaine lasketaan käyttäen maanpainekertoimen ominaisarvoa [PRO-SILTA 1991].

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi / 2) = 0,249$$

Vaakakuormat

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2 = 42,9 \text{ kN/m}$$

$$(2) F_Q = K_a \gamma_Q Q_k h = 0,249 \cdot 20 \cdot 4,5 = 22,4 \text{ kN/m}$$

Pystykuormat:

$$(3) G_1 = 1,0 \cdot 1,3 \cdot 4,0 \cdot 17 = 88,4 \text{ kN/m}$$

$$(4) G_2 = 1,0 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 17 = 5,1 \text{ kN/m}$$

$$(5) G_3 = 1,0 \cdot 2,1 \cdot 0,5 \cdot 25 = 26,3 \text{ kN/m}$$

$$(6) G_4 = \gamma_G b h \gamma_1 = 1,0 \cdot 0,2 \cdot 4,0 \cdot 25 = 20 \text{ kN/m}$$

Momentti etureunan suhteen ja kuormitusresultantin vaaka- ja pystykomponentit :

$$r_\gamma = 1,5, r_Q = 2,25$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow M_0 = F_Q r_Q + F_\gamma r_\gamma = 114,8 \text{ kNm /m} \quad (7)$$

$$(1) \text{ ja } (2) \Rightarrow H = F_\gamma + F_Q = 65,3 \text{ kN/m} \quad (8)$$

$$(3) \text{ ja } (4) \Rightarrow G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = 139,8 \text{ kN/m} \quad (9)$$

Kokonaisvarmuusluku F kaatumista vastaan muurin etukulman suhteen:

$$F = \frac{V x_e}{H y_e} = \frac{G r_G}{H r_H} = \frac{139,8 * 1,23}{65,5 * 1,76} = 1,49$$

Eri tavoin laskettujen varmuuslukujen vertailua varten kokonaisvarmuusluku

$$F \text{ muunnetaan mitoitusvarmuusluvuksi } F_d = \frac{F}{1,5} = \frac{1,49}{1,5} = 0,99.$$

b) Kokonaisvarmuusluku F kaatumista vastaan redusoidun pohjapaineen painopisteakselin suhteen seinäkitkakulman arvolla  $\delta = 0$ .

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = \frac{114,8}{65,3} = 1,76m$$

$$r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = 1,23m$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = \frac{65,3 * 1,76}{139,8} = 0,82m$$

$$\Rightarrow a = r_G - e = 1,23 - 0,82 = 0,41m$$

$$x_e = r_G - a = 1,23 - 0,41 = 0,82m$$

$$y_e = r_H = 1,76m$$

$$\Rightarrow \sum H y_e = 65,3 * 1,76 = 114,9 \text{ kNm/m}$$

$$\Rightarrow \sum V x_e = 139,8 * 0,82m = 114,6 \text{ kN/m} \Rightarrow \text{Kokonaisvarmuusluku F:}$$

$$F = \frac{V x_e}{H y_e} = 0,998 \approx 1,0 \text{ ja } F_d = \frac{1,0}{1,5} = 0,67.$$

c) Kokonaisvarmuusluku F kaatumista vastaan muurin etukulman suhteen seinäkitkakulman arvolla  $\delta_d = 2/3\phi_d$ .

$$V_d = 166,24 \text{ kN/m} \quad H_d = 69,86 \quad x_e = r_G = 1,36m \quad y_e = 1,76m$$

$$\Rightarrow F = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,84 \text{ ja } F_d = \frac{1,84}{1,5} = 1,22$$

d) Kokonaisvarmuusluku F kaatumista vastaan redusoidun pohjapaineen painopisteakselin suhteen seinäkitkakulman arvolla  $\delta_d = 2/3\phi_d$ .

$$V_d = 166,24 \text{ kN/m} \quad H_d = 69,86 \quad x_e = r_G - a = 1,36 - 0,62 = 0,74m \quad y_e = 1,76m$$

$$\Rightarrow F = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,05 \text{ ja } F_d = \frac{1,05}{1,5} = 0,70$$

e) Kokonaisvarmuusluku F kaatumista vastaan muurin etukulman suhteen seinäkitkakulman arvolla  $\delta_d = \phi_d$ .

$$V_d = 178,52 \text{ kN/m} \quad H_d = 64,19 \text{ kN/m}, \quad x_e = r_G = 1,42 \text{ m}, \quad y_e = 1,76 \text{ m}$$

$$\Rightarrow F = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 2,24 \text{ ja } F_d = \frac{2,24}{1,5} = 1,49$$

f) Kokonaisvarmuusluvuksi F kaatumista vastaan redusoidun pohjapaineen painopiste akselin suhteen seinäkitkakulman arvolla  $\delta_d = \phi_d$ .

$$V_d = 178,52 \text{ kN/m} \quad H_d = 64,19 \text{ kN/m}, \quad x_e = r_G - a = 1,42 - 0,63 = 0,79 \text{ m}, \quad y_e = 1,76 \text{ m}$$

$$\Rightarrow F = \frac{V_d x_e}{H_d y_e} = 1,25 \text{ ja } F_d = \frac{1,25}{1,5} = 0,83$$

### Liite 5/2. Varmuus liukumista vastaan

1. Kokonaisvarmuusluku F liukumista vastaan seinäkitkakulman arvolla  $\delta = 0$ .

Liukuvarmuus paikalla valetuilla perustuksilla ( $\delta_d = \phi_d$ ):

$$F = \frac{V * \tan \phi}{H} = \frac{139,8 * \tan 39}{65,3} = 1,73$$

Liukuvarmuus elementtiperustuksilla ( $\delta_d = 0,75\phi_d$ ):

$$F = \frac{V_d * \tan \phi}{H} = \frac{139,8 * \tan 29,25}{65,3} = 1,20$$

2. Kokonaisvarmuusluku F liukumista vastaan seinäkitkakulman arvolla  $\delta_d = 2/3\phi_d$ .

Liukuvarmuus paikalla valetuilla perustuksilla ( $\delta_d = \phi_d$ ):

$$F = \frac{S_d + E_{pd}}{H_d} = \frac{V_d' * \tan \phi}{H_d} = \frac{166,24 * \tan 39}{69,86} = 1,93$$

Liukuvarmuus elementtiperustuksilla ( $\delta_d = 0,75\phi_d$ )



$$F = \frac{S_d + E_{pd}}{H_d} = \frac{V_d' * \tan \phi_d}{H_d} = \frac{166,24 * \tan 29,25}{69,86} = 1,33$$

3. Kokonaisvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan seinäkitkakulman arvolla  $\delta_d = \phi_d$ .

Liukuvarmuus paikalla valetuilla perustuksilla ( $\delta_d = \phi_d$ ):

$$F = \frac{S_d + E_{pd}}{H_d} = \frac{V_d' * \tan \phi}{H_d} = \frac{178,52 * \tan 39}{64,19} = 2,26$$

Liukuvarmuus elementtiperustuksilla ( $\delta_d = 0,75\phi_d$ ):

$$F = \frac{S_d + E_{pd}}{H_d} = \frac{V_d' * \tan \phi_d}{H_d} = \frac{178,52 * \tan 29,25}{64,19} = 1,56$$

### Liite 5/3. Varmuus pohjan murtumista vastaan

1. Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  maaperän murtumista vastaan seinäkitkakulman arvolla  $\delta = 0$ . Liikennekuorma takalaipan takana.

$$\phi_1 = 37^\circ, \gamma = 17 \text{ kN/m}^3, \gamma_\gamma = 1,0, \gamma_Q = 1,0, Q_k = Q_d = 20 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma_\phi = 1,25, h = 4,5 \text{ m}$$

$$H = F_\gamma + F_Q = 65,3 \text{ kN/m} \quad (8)$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = 139,8 \text{ kN/m} \quad (9)$$

$$r_H = 1,76 \text{ m}, r_G = 1,23 \text{ m}, e = 0,82 \text{ m}$$

$$a = r_G - e = 1,23 - 0,82 = 0,41 \text{ m}$$

$$V_d = \Sigma G = 139,8 \text{ kN/m}^2$$

$$\Rightarrow \text{Pohjapaine: } q_d = \frac{G}{2a} = \frac{139,8}{2 * 0,41} = 170,5 \text{ kN/m}^2$$

$$(a = b/2)$$

$$L = 10 \text{ m}$$

$$H = 65,3 \text{ kN/m}$$

$$V = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$B = 2 * 0,41 = 0,82 \text{ m}$$

$$\phi_2 = 39^\circ$$

$$\phi_{2d} = 32,94^\circ$$

$$\gamma_1 = 1,0 \cdot 17 = 17 \text{ kN/m}^2$$

$$N_D = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi_d}{2} \right) e^{\pi \tan \phi_d} = 25,91$$

$$N_B = (N_D - 1) \tan \phi_d = 16,14$$

$$s_D = 1 + \sin \phi_d \frac{B_t}{L_t} = 1,044$$

$$s_B = 1 - 0,3 \frac{B_t}{L_t} = 0,975$$

$$i_D = \left( 1 - 0,7 \frac{H}{V} \right)^3 = 0,305$$

$$i_B = \left( 1 - \frac{H}{V} \right)^3 = 0,151$$

Kantokyky:

$$\sigma_{of} = \gamma_1 D N_D s_D i_D + \gamma_2 B_t N_B s_B i_B = 173,4$$

Pohjapaine  $q_d = 170,5 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow$

$$F = \frac{173,4}{170,5} = 1,02$$

2. mitoitusvarmuusluku pohjan murtumista vastaan, kun seinäkitkakulma  $\delta_d = 2/3\phi_d$

$$\phi_d = 31,1^\circ$$

$$\delta_d = 20,73^\circ$$

$$K_a = 0,285$$

$$P_a = \int_0^h p_a dz = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_{ah} = (0,5 \cdot 17 \cdot 4,5^2 + 20 \cdot 4,5) \cdot 0,285 = 74,70 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen pystykomponentti ja pystykuormat:

$$(7) P_{av} = P_a \sin 20,73^\circ = 26,44 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen).}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \Sigma G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$V = \Sigma G_i + P_{av} = 166,24 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_a \cos 20,73^\circ = 69,86 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_{ay} + P_{aQ} = 49,06 \cdot \cos 20,73 + 25,65 \cos 20,73 = 45,87 + 23,99$$

$$r_\gamma = 1,5 \text{ m}, r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = 1,76 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = 1,36 \text{ m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H \cdot r_H}{G} = 0,74 \text{ m}$$

$$e = 0,74 \text{ m} \Rightarrow a = r_G - e = 0,62 \text{ m} \Rightarrow \text{Pohjapaine: } q_d = \frac{G}{2a} = 134,06 \text{ kN/m}^2$$

Kantokyky:

$L = 10 \text{ m}$	$N_D = 25,91$
$H = 69,86 \text{ kN/m}$	$N_B = 16,14$
$V = 166,24 \text{ kN/m}$	$s_B = 0,963$
$B = 2 \cdot 0,62 = 1,24 \text{ m}$	$s_D = 1,067$
$\phi = 39^\circ, \phi_d = 32,94^\circ$	$i_D = 0,352$
$\gamma_{1,2} = 17 \text{ kN/m}^3$	$i_B = 0,195$
$D = 1,0 \text{ m}$	

$$\sigma_{of} = \gamma_1 D N_D s_d i_D + \gamma_2 B_i N_B s_B i_B = 207,2 \Rightarrow$$

$$\text{Mitoitusvarmuusluku: } F_D = \frac{207,2}{134,06} = 1,55$$

3. Kantokyky seinäkittkakulman arvolla  $\delta_d = \phi_d$

$$\delta_d = 31,1^\circ$$

$$K_a = 0,286$$

$$P_a = \left( \frac{\gamma h^2}{2} + qh \right) K_a = (0,5 \cdot 17 \cdot 4,5^2 + 20 \cdot 4,5) \cdot 0,286 = 74,97 \text{ kN/m}$$

$$(7) P_{av} = P_a \sin 31,1^\circ = 38,72 \text{ kN/m} \quad r = 2,1 \text{ m (Etulaipan suhteen)}$$

$$(3), (4), (5) \text{ ja } (6) \Rightarrow \sum G_i = 139,8 \text{ kN/m}$$

$$V = \sum G_i + P_{av} = 178,52 \text{ kN/m}$$

Maanpaineen vaakakomponentti :

$$P_{ah} = P_a \cos 31,1^\circ = 64,19 \text{ kN/m}$$

$$P_{ah} = P_{ay} + P_{aQ} = 49,23 \cos 31,1 + 25,74 \cos 31,1 = 42,15 + 22,04$$

$$r_\gamma = 1,5 \text{ m}, r_Q = 2,25$$

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = 1,76 \text{ m}; \quad r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = 1,42 \text{ m}$$

$$e = \frac{H^* r_H}{G} = 0,63 \text{ m} \Rightarrow a = r_G - e = 0,79 \text{ m} \Rightarrow$$

$$\text{Pohjapaine: } q_d = \frac{G}{2a} = 112,99 \text{ kN/m}^2$$

Kantokyky:

$L = 10 \text{ m}$	$N_D = 25,91$
$H = 64,19 \text{ kN/m}$	$N_B = 16,14$
$V = 178,99 \text{ kN/m}$	$s_B = 0,953$
$B = 2 \cdot 0,79 = 1,58 \text{ m}$	$s_D = 1,086$
$\phi = 39^\circ, \phi_d = 32,94^\circ$	$i_D = 0,420$
$\gamma_{1,2} = 17 \text{ kN/m}^3$	$i_B = 0,264$
$D = 1,0 \text{ m}$	

$$\sigma_{of} = \gamma_1 D N_D s_D i_D + \gamma_2 B N_B s_B i_B = 309,98 \Rightarrow \text{Mitoitusvarmuusluku:}$$

$$F_D = \frac{309,98}{112,99} = 2,74$$

#### Liite 5/4. Seinän alareunan taivutusmomentti seinäkitkakulman arvolla $\delta = 0$

$$(1) F_Q = K_a \gamma_Q Q_k h = 0,249 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 4,0 = 19,9 \text{ kN/m}, \quad r_Q = 4,0/2 = 2,0 \text{ m}$$

$$(2) F_\gamma = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2 = 0,5 \cdot 0,249 \cdot 17 \cdot 4,0^2 = 33,9 \text{ kN/m}, \quad r_\gamma = 4,0/3 = 1,33 \text{ m}$$

$$M_{1-1} = F_Q r_Q + F_\gamma r_\gamma = 84,9 \text{ kNm/m}$$

(Laskettu ominaisarvoilla. Ei voi verrata suoraan muihin laskentatuloksiin)

## LIITE 6. Kallionvaraisen tukimuurin mitoituslaskelma Tielaitoksen ohjeen mukaan maanpaineelle 1

### Liite 6/1. Varmuus kaatumista vastaan ominaiskuormilla

Kaatumisvarmuus ominaiskuormilla lasketaan kaavalla (44):

$$F = \frac{\sum M_{stab}}{\sum M_{turn}} \quad (44)$$

$$\text{missä } \sum M_{turn} = \sum Hr_H \\ \sum M_{stab} = \sum Gr_G$$

$$\gamma_\phi = 1,0 \quad \gamma_G = 1,0 \quad \gamma_Q = 1,0, \quad \phi = 32^\circ \text{ (täyttö).}$$

$$\text{Lepopainekerroin } K_0 = 1 - \sin\phi = 0,47$$

Vaakakuormat:

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 = 0,5 * 0,47 * 17 * 4,5^2 = 80,9 \text{ kN/m} ; r_\gamma = 4,5/3 = 1,5\text{m}$$

$$(2) F_Q = K_0 \gamma_Q Q_k h = 0,47 * 20 * 4,5 = 42,3 \text{ kN/m} \quad r_Q = 4,5/2 = 2,25\text{m}$$

Pystykuormat ja momenttivarret etureunan suhteen :

$$G_i = \gamma_G b h \gamma_i$$

$$(3) G_1 = 1,0 * 1,8 * 4,0 * 17 = 122,4 \text{ kN/m} \quad r_1 = 2,1\text{m}$$

$$(4) G_2 = 1,0 * 1,0 * 0,5 * 17 = 8,5 \text{ kN/m} \quad r_2 = 0,5\text{m}$$

$$(5) G_3 = 1,0 * 3,0 * 0,5 * 25 = 37,5 \text{ kN/m} \quad r_3 = 1,5\text{m}$$

$$(6) G_4 = \gamma_G b h \gamma_1 = 1,0 * 0,2 * 4,0 * 25 = 20 \text{ kN/m} \quad r_4 = 1,1\text{m}$$

$$\sum V = \sum G_i = 188,4 \text{ kN/m}$$

$$\sum M_{stab} = \sum Gr_G = 339,5 \text{ kNm/m}$$

$$\sum M_{turn} = \sum Hr_H = 216,5 \text{ kNm/m}$$

$$\Rightarrow \text{Kaatumisvarmuus kolmiokuormalle } F = \frac{339,5}{216,5} = 1,57$$

$$\Rightarrow \text{Mitoitusvarmuusluku } F_d = \frac{1,57}{1,5} = 1,04$$

### Liite 6/2. Varmuus liukumista vastaan ominaiskuormilla

Louhitun kalliopohjan ja sitä vasten valetun betonin välinen kitkakerroin  $\mu = 0,75$  [PROSILTA1991].

$$F = \frac{\sum V * \mu}{H} = \frac{188,4 * 0,75}{123,1} = 1,14 \leq 1,5$$

$$\Rightarrow \text{Mitoitusvarmuusluku } F_d = \frac{1,14}{1,5} = 0,76$$

### Liite 6/3. Pohjapaine ja varmuus pohjan murtumista vastaan ominaiskuormilla

Kuvien 25 ja 26 mukaan :

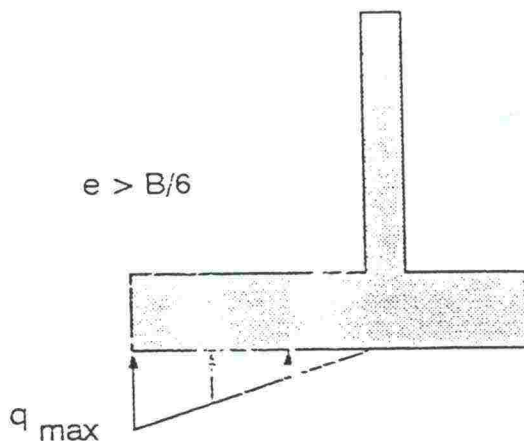
$$e = \frac{B}{2} - \frac{M_{net}}{\Sigma V} = \frac{B}{2} - \frac{\Sigma M_{stab} - \Sigma M_{turn}}{\Sigma V} = 0,84\text{m}$$

$$q = \frac{\Sigma V}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{\Sigma V}{BL} \pm \frac{(\Sigma V)e}{\left(\frac{L}{6}\right)(B^2)} = \frac{\Sigma V}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \quad (45)$$

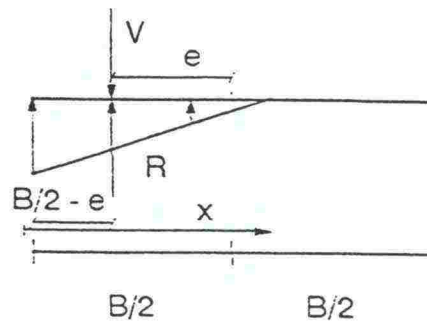
$$\Rightarrow q_{max} = \frac{\Sigma V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \quad (45.1)$$

$$\Rightarrow q_{min} = \frac{\Sigma V}{B} \left(1 - \frac{6e}{B}\right) \quad (45.2)$$

Epäkeskisyyss  $e > \frac{B}{6}$  eli reunajännityksiä ei voi laskea kaavoilla (45).



Kuva 25. Jännitysjaakauma, kun epäkeskisyyss  $e$  on  $> B/6$ .



Kuva 26. Puristuskuavion resultantin paikka.

Jännityskuvio määritetään tasapainoyhtälöillä (46) ( kuvat 25 ja 26)

$$\Sigma V = 0 \quad (46.1)$$

$$\Sigma M = 0 \quad (46.2)$$

Suorakaidepoikkileikkauksessa puristuskuavion resultantin paikka on ennalta tunnettu ( $\Sigma V=R$ ):

$$\frac{x}{3} = \frac{B}{2} - e \Rightarrow x = 3\left(\frac{B}{2} - e\right) = 1,98\text{m}$$

$$\Sigma V = \frac{1}{2} x q_1 \Rightarrow q_1 = \frac{2\Sigma V}{x} = \frac{376,8}{1,98} = 190,3 \text{ kN/m}^2$$

Kalkkikivikalliolle sallittu jännitys  $q_{\text{sall}} = 2,5 \text{ Mpa OK}$ .  
Betonin puristuslujuus ei ole rajoittava.

#### Liite 6/4. Seinän alareunan taivutusmomentti

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 = 0,5 * 0,47 * 17 * 4,0^2 = 52,64 \quad ; \quad r_\gamma = 4,0/3 = 1,33\text{m}$$

$$(2) F_Q = K_0 \gamma_Q Q_k h = 0,47 * 20 * 4,0 = 37,6 \quad ; \quad r_Q = 4,0/2 = 2,0 \text{ m}$$

$$M_{1-1} = 90,24 \text{ kNm/m (Ominaisarvo)}$$

## LIITE 7. Kallionvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmat EC7/ EC7 mukaan maanpaineelle 1

### Liite 7/1. Varmuus kaatumista vastaan

Case A.

$$\gamma_Q = 1,50, Q_k = 20 \text{ kN/m}, \gamma_Y = 0,95 \text{ (edullinen)}, \gamma_\phi = 1,1, \phi = 32^\circ \\ \phi_d = 29,6^\circ$$

$$\text{Lepopainekerroin } K_0 = 1 - \sin\phi_d = 0,51$$

Vaakakuormat :

$$(1) F_Y = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 = 0,5 * 0,51 * 17 * 4,5^2 = 88,0 \text{ kN/m}; \quad r_Y = 4,5/3 = 1,5\text{m}$$

$$(2) F_Q = K_0 \gamma_Q Q_k h = 0,51 * 1,5 * 20 * 4,5 = 69,0 \text{ kN/m} \quad r_Q = 4,5/2 = 2,25\text{m}$$

Yhtälössä (1) maanpaineesta aiheutuvana vaakakuorman osavarmuusluku-  
 na on käytetty epäedullisen mitoitus tapauksen osavarmuuslukua  $\gamma_Y = 1,0$  ja  
 yhtälöissä (3) - (6) edullisen mitoitus tapauksen osavarmuuslukua  $\gamma_Y = 0,95$ .

Pystykuormat ja momenttivarret etureunan suhteen :

$$(3) G_1 = 0,95 * 1,8 * 4,0 * 17 = 116,3 \text{ kN/m} \quad r_1 = 2,1\text{m} \\ (4) G_2 = 0,95 * 1,0 * 0,5 * 17 = 8,1 \text{ kN/m} \quad r_2 = 0,5\text{m} \\ (5) G_3 = 0,95 * 3,0 * 0,5 * 25 = 35,6 \text{ kN/m} \quad r_3 = 1,5\text{m} \\ (6) G_4 = 0,95 * 0,2 * 4,0 * 25 = 19,0 \text{ kN/m} \quad r_4 = 1,1\text{m}$$

$$\Sigma H = \Sigma F = 157,0 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma V = \Sigma G_i = 179,0 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma M_{stab} = 322,6 \text{ kNm/m}$$

$$\Sigma M_{turn} = \Sigma R r_R = 287,3 \text{ kNm/m}$$

$$F_d = \frac{\Sigma M_{stab}}{\Sigma M_{turn}} = 1,12$$

### Liite 7/2. Varmuus liukumista vastaan

Koska Eurocode 7:ssä ei ole annettu kallion ja sitä vasten valetun betonin  
 välistä kitkakerrointa, käytetään vertailun vuoksi Tielaitoksen ohjeen mu-  
 kaista arvoa  $\mu = 0,75$ .

a) Case B

$$\gamma_Q = 1,50, Q_k = 20 \text{ kN/m}, \gamma_Y = 1,0 \text{ (omapaino)} \text{ ja } \gamma_\gamma = 1,35 \text{ (manpaine)}, \gamma_\phi = \\ 1,0, \phi = 32^\circ$$



Lepopainekerroin  $K_0 = 1 - \sin\phi = 0,47$

Vaakakuormat:

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 = 0,5 * 0,47 * 1,35 * 17 * 4,5^2 = 109,2 \text{ kN/m} \quad r_\gamma = 4,5/3 = 1,5\text{m}$$

$$(2) F_Q = K_0 \gamma_Q Q_k h = 0,47 * 1,50 * 20 * 4,5 = 63,5 \text{ kN/m} \quad r_Q = 4,5/2 = 2,25\text{m}$$

Pystykuormat ja momenttivarret etureunan suhteen :

$$(3) G_1 = 1,0 * 1,8 * 4,0 * 17 = 122,4 \text{ kN/m} \quad r_1 = 2,1\text{m}$$

$$(4) G_2 = 1,0 * 1,0 * 0,5 * 17 = 8,5 \text{ kN/m} \quad r_2 = 0,5\text{m}$$

$$(5) G_3 = 1,0 * 3,0 * 0,5 * 25 = 37,5 \text{ kN/m} \quad r_3 = 1,5 \text{ m}$$

$$(6) G_4 = 1,0 * 0,2 * 4,0 * 25 = 20,0 \text{ kN/m} \quad r_4 = 1,1\text{m}$$

$$\Sigma H = \Sigma F = 172,7 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma V = \Sigma G_i = 188,4 \text{ kN/m}$$

Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan :

$$F_d = \frac{\Sigma V * \mu}{H} = 0,82$$

b ) Case C

$$\gamma_G = 1,0, \quad \gamma_Q = 1,30, \quad Q_k = 20 \text{ kN/m}, \quad \gamma_\gamma = 1,0, \quad \gamma_\phi = 1,25, \quad \phi = 32^\circ$$

$$\phi_d = 26,56^\circ$$

Lepopainekerroin  $K_0 = 1 - \sin\phi_d = 0,55$

Vaakakuormat:

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 = 0,5 * 0,55 * 1,0 * 17 * 4,5^2 = 94,7 \text{ kN/m} \quad r_\gamma = 1,5\text{m}$$

$$(2) F_Q = K_0 \gamma_Q Q_k h = 0,55 * 1,30 * 20 * 4,5 = 64,4 \text{ kN/m} \quad r_Q = 2,25\text{m}$$

Pystykuormat ja momenttivarret etureunan suhteen :

$$(3) G_1 = 1,0 * 1,8 * 4,0 * 17 = 122,4 \text{ kN/m} \quad r_1 = 2,1\text{m}$$

$$(4) G_2 = 1,0 * 1,0 * 0,5 * 17 = 8,5 \text{ kN/m} \quad r_2 = 0,5\text{m}$$

$$(5) G_3 = 1,0 * 3,0 * 0,5 * 25 = 37,5 \text{ kN/m} \quad r_3 = 1,5 \text{ m}$$

$$(6) G_4 = 1,0 * 0,2 * 4,0 * 25 = 20,0 \text{ kN/m} \quad r_4 = 1,1\text{m}$$

$$\Sigma H = \Sigma F = 159,1 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma V = \Sigma G_i = 188,4 \text{ kN/m}$$

Mitoitusvarmuusluku  $F_d$  liukumista vastaan :

$$F_d = \frac{\Sigma V * \mu}{H} = 0,89$$

**Liite 7/3. Varmuus pohjan murtumista vastaan**

a) Case B (Vertaa kuva 23).

$$\Sigma H = \Sigma F = 151,5 \text{ kN/m}$$
$$\Sigma V = \Sigma G_i = 188,4 \text{ kN/m}$$

$$r_H = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = 1,71 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G} = 1,80 \text{ m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = \frac{151,5 * 1,71}{188,4} = 1,37$$

$$\Rightarrow a = r_G - e = 1,80 - 1,37 = 0,43 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \text{Pohjapaine : } q_d = \frac{G}{2a} = \frac{188,4}{2 * 0,43} = 219,0 \text{ kN / m}^2 = 0,219 \text{ MPa} < 2,5 \text{ MPa.}$$

b) Case C

$$\Sigma H = \Sigma F = 159,1 \text{ kN/m}$$
$$\Sigma V = \Sigma G_i = 188,4 \text{ kN/m}$$

$$r_H = \frac{\Sigma F_i r_i}{\Sigma F_i} = 1,80 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\Sigma G_i r_i}{\Sigma G} = 1,80 \text{ m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = \frac{159,1 * 1,80}{188,4} = 1,52 \text{ m}$$

$$\Rightarrow a = r_G - e = 1,80 - 1,52 = 0,28 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \text{Pohjapaine : } q_d = \frac{G}{2a} = \frac{188,4}{2 * 0,28} = 336,4 \text{ kN / m}^2 = 0,336 \text{ MPa} < 2,5 \text{ MPa.}$$

### Liite 7/4. Seinän alareunan taivutusmomentti

a) Case B.

$$(1) F_{\gamma} = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 = 0,5 * 0,47 * 1,35 * 17 * 4,0^2 = 86,3 \text{ kN/m} ; r_{\gamma} = 4,0/3 = 1,33 \text{ m}$$

$$(2) F_Q = K_0 \gamma_Q Q_k h = 0,47 * 1,50 * 20 * 4,0 = 56,4 \text{ kN/m} ; r_Q = 4,0/2 = 2,0 \text{ m}$$

$$M_{1-1} = F_{\gamma} * r_{\gamma} + F_Q * r_Q = 86,3 * 1,33 + 56,4 * 2,0 = 227,6 \text{ kNm/m}$$

b) Case C

$$(1) F_{\gamma} = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 = 0,5 * 0,55 * 17 * 4,0^2 = 74,8 \text{ kN/m} ; r_{\gamma} = 4,0/3 = 1,33 \text{ m}$$

$$(2) F_Q = K_0 \gamma_Q Q_k h = 0,55 * 1,30 * 20 * 4,0 = 57,2 \text{ kN/m} ; r_Q = 4,0/2 = 2,0 \text{ m}$$

$$M_{1-1} = 213,9 \text{ kNm/m}$$

## LIITE 8. Kallionvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmat EC7/ EC1 mukaan maanpaineelle 1

Tapaus EC7 / EC1 poikkeaa tapauksesta EC7/EC7 vain case A:n osalta ,  
 jossa oman painon edullinen osavarmuusluku on  $\gamma = 0,90$ .

### Liite 8/1. Varmuus kaatumista vastaan

Case A

$$\gamma_Q = 1,50, Q_k = 20 \text{ kN/m}, \gamma_Y = 0,90 \text{ (edullinen)}, \gamma_\phi = 1,1, \phi = 32^\circ$$

$$\phi_d = 29,6^\circ$$

$$\text{Lepopainekerroin } K_0 = 1 - \sin\phi_d = 0,51$$

Vaakakuormat

$$(1) F_Y = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 = 0,5 * 0,51 * 17 * 4,5^2 = 88,0 \text{ kN/m}; r_Y = 4,5/3 = 1,5\text{m}$$

$$(2) F_Q = K_0 \gamma_Q Q_k h = 0,51 * 30 * 4,5 = 69,0 \text{ kN/m} \quad r_Q = 4,5/2 = 2,25\text{m}$$

Pystykuormat ja momenttivarret etureunan suhteen :

$$G_i = \gamma_G b h \gamma_i$$

Pystykuormat ja momenttivarret etureunan suhteen :

$$(3) G_1 = 0,90 * 1,8 * 4,0 * 17 = 110,1 \text{ kN/m} \quad r_1 = 2,1\text{m}$$

$$(4) G_2 = 0,90 * 1,0 * 0,5 * 17 = 7,7 \text{ kN/m} \quad r_2 = 0,5\text{m}$$

$$(5) G_3 = 0,90 * 3,0 * 0,5 * 25 = 33,7 \text{ kN/m} \quad r_3 = 1,5\text{m}$$

$$(6) G_4 = 0,90 * 0,2 * 4,0 * 25 = 18,0 \text{ kN/m} \quad r_4 = 1,1\text{m}$$

$$\Sigma H = \Sigma F = 157,0 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma V = \Sigma G_i = 169,5 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma M_{stab} = 305,4 \text{ kNm/m}$$

$$\Sigma M_{turn} = \Sigma H r_H = 287,3 \text{ kNm/m}$$

$$F = \frac{\Sigma M_{stab}}{\Sigma M_{turn}} = 1,06$$

Case B ja Case C vastaavat ohjeen EC7/EC7 mukaista mitoitusta.

## LIITE 9. Kallionvaraisen tukimuurin mitoituslaskelmat pohjarakennusohjeen mukaan maanpaineelle 1

$$\gamma_Q = 1,60 \text{ (SRMK)}$$

$$Q_k = 20 \text{ kN/m, } \gamma_\gamma = 1,0,$$

$$\gamma_\phi = 1,2 \text{ (kaatuminen, liukuminen), } \phi = 32^\circ, \phi_d = 27,51$$

$$\gamma_\phi = 1,25 \text{ (kantokyky), } \phi_d = 26,56$$

### Liite 9/1. Varmuus kaatumista vastaan

$$\text{Lepopaine kerroin } K_0 = 1 - \sin \phi_d = 0,54$$

Vaakakuormat:

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 = 0,54 * 0,54 * 17 * 4,5^2 = 92,9 \text{ kN/m} \quad r_\gamma = 4,5/3 = 1,5 \text{ m}$$

$$(2) F_Q = K_a \gamma_Q Q_k h = 0,54 * 1,60 * 20 * 4,5 = 77,8 \text{ kN/m} \quad r_Q = 4,5/2 = 2,25 \text{ m}$$

Pystykuormat ja momenttivarret etureunan suhteen :

$$G_i = \gamma_G b h \gamma_i$$

Pystykuormat ja momenttivarret etureunan suhteen :

$$(3) G_1 = 1,0 * 1,8 * 4,0 * 17 = 122,4 \text{ kN/m} \quad r_1 = 2,1 \text{ m}$$

$$(4) G_2 = 1,0 * 1,0 * 0,5 * 17 = 8,5 \text{ kN/m} \quad r_2 = 0,5 \text{ m}$$

$$(5) G_3 = 1,0 * 3,0 * 0,5 * 25 = 37,5 \text{ kN/m} \quad r_3 = 1,5 \text{ m}$$

$$(6) G_4 = 1,0 * 0,2 * 4,0 * 25 = 20,0 \text{ kN/m} \quad r_4 = 1,1 \text{ m}$$

$$\Sigma H = \Sigma F = 170,7 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma V = \Sigma G_i = 188,4 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma M_{\text{stab}} = 339,5 \text{ kNm/m}$$

$$\Sigma M_{\text{turn}} = 314,4 \text{ kNm/m}$$

$$\Rightarrow \text{Kaatumisvarmuus } F = \frac{339,5}{314,4} = 1,08$$

### Liite 9/2. Varmuus liukumista vastaan

Vaaka- ja pysty kuormat kuten liitteessä 9/1. Kitkakertoimena käytetään  $\mu = 0,75$

$$F = \frac{\Sigma V * \mu}{H} = \frac{188,4 * 0,75}{170,7} = 0,83$$

**Liite 9/3. Varmuus pohjan murtumista vastaan**

Vaaka- ja pysty kuormat kuten kohdassa liitteessä 9/1.

$$r_H = \frac{\sum F_i r_i}{\sum F_i} = 1,84 \text{ m}$$

$$r_G = \frac{\sum G_i r_i}{\sum G} = 1,80 \text{ m}$$

$$M_p = H r_H - G e = 0 \Rightarrow e = \frac{H * r_H}{G} = \frac{170,7 * 1,84}{188,4} = 1,67 \text{ m}$$

$$\Rightarrow a = r_G - e = 1,80 - 1,67 = 0,13 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \text{Pohjapaine : } q_d = \frac{G}{2a} = \frac{188,4}{2 * 0,13} = 724,6 \text{ kN / m}^2 = 0,724 \text{ MPa}$$

$$\leq 2,5 \text{ Mpa}$$

**Liite 9/4. Seinän alareunan taivutusmomentti**

$$(1) F_\gamma = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 = 0,5 * 0,54 * 17 * 4,0^2 = 73,4 \quad r_\gamma = 4,0/3 = 1,33 \text{ m}$$

$$(2) F_Q = K_0 \gamma_Q Q_k h = 0,54 * 1,60 * 20 * 4,0 = 43,2 \quad r_Q = 4,0/2 = 2,0$$

$$M_{1-1} = 184,0 \text{ kNm/m}$$

## TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

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

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 28/1994 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Vuoden 1993 kuormituskokeet. TIEL 3200238
- 30/1994 Kallioleikkaukset. TIEL 3200240
- 45/1994 Maan routimisen termomekaaninen malli ja sen laskelmat. TIEL 3200254
- 53/1994 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, loppuraportti. TIEL 3200262
- 3/1995 Kuormituskestävyyden tavoitekriteerit. TIEL 3200281
- 15/1995 Betonipäällysteen seuranta, vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 2. TIEL 3200293
- 20/1995 Sään ja hydrologisten tekijöiden vaikutus kevätkelirikkoon. TIEL 3200298
- 30/1995 TPPT:n laatusuunnitelma. TIEL 3200308
- 43/1995 Tukitelineperustusten kantokyky. TIEL 3200319
- 44/1995 Kaltevan maanpinnan vaikutus perustusten kantokykyyn. TIEL 3200320
- 45/1995 Maanvaraisten perustusten kantokyvyn laskenta elementtimenetelmällä. TIEL 3200321
- 54/1995 Veittostensuon koerakenteen toiminta ja laadun arviointi. TIEL 3200330
- 58/1995 Kestävän kehityksen tierakenteet - ideakilpailu. TIEL 3200333
- 94/1995 Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus. TIEL 3200369
- 6/1996 Tuotannon laatu; Kuormitus ja routakestävyyserakenteet. TIEL 3200375
- 13/1996 Masuunihiekkastabilointi. TIEL 3200382
- 16/1996 Tavoitekriteerit (TPPT). TIEL 3200385
- 17/1996 Moreenin hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin (TPPT). TIEL 3200386
- 29/1996 Tien rakennekerros materiaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla. TIEL 3200397
- 32/1996 Häiriintymättömien maanäytteiden otto. TIEL 3200400
- 33/1996 Ödometrikoe. TIEL 3200401
- 34/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Täydentävien kuormituskokeiden tulokset, osa 1. TIEL 3200402
- 35/1996 Havaintoteiden asfalttipäällysteiden moduulit. TIEL 3200403
- 36/1996 Eriste- ja kevennysmateriaalien routakestävyys; Palaturve. TIEL 3200404
- 37/1996 Koerakennekohteiden materiaalien routakestävyys; Pohjoiset kohteet. TIEL 3200405

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 38/1996 Rakenneratkaisujen alustava suunnittelu ja kehittäminen. TIEL 3200406
- 39/1996 Pilari- ja massastabiloinnin tuotantotekniikka. TIEL 3200407
- 44/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Muutosmoduulin arviointi korkearakeisilla kiviaineilla, osa 2. TIEL 3200412
- 46/1996 LD-teräskuona tienrakennusmateriaalina. TIEL 3200414
- 70/1996 Kantavan kerroksen asfalttibetoni; Referenssimateriaalin ominaisuudet. TIEL 3200437
- 77/1996 Syvästabilointi kehittyvänä pohjavahvistusmenetelmänä; International Conference IS-Tokio '96. TIEL 3200444
- 78/1996 Moreenin rakeistaminen pellettoimalla; Nykytilaselvitys. TIEL 3200445
- 4/1997 Siltojen perustusten geoteknisen mitoituksen vertailu eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200452
- 5/1997 Tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurirakenteen vertailevat mitoituslaskelmat eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200453
- 11/1997 Betonipäälysteen seuranta vt 4 Kempele-Kiviniemi. Kuntoraportti TIEL 3200458
- 23/1997 Masuunihiekan käyttö päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200470
- 30/1997 Teiden pohjavesisuojausissa käytettävien maatiivisteiden vedenläpäisevyyden määrittäminen. TIEL 3200476
- 35/1997 Palaturpeen käyttö tierakenteessa. TIEL 3200481
- 23/1998 Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 1: Sementillä sidotut materiaalit, kirjallisuus selvitys. TIEL 3200514
- 24/1998 hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 2: Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyys. TIEL 3200515
- 25/1998 Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 3: Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen. TIEL 3200516
- 29/1998 Sementtistabiloidut materiaalit, loppuraportti. TIEL 3200521
- (Geotekniikan informaatiojulkaisuja:)**
- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150
- 39/1994 Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä. TIEL 3200248
- 42/1994 Nauhapystyöjitus. TIEL 3200251
- 67/1994 Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. TIEL 3200276
- 79/1995 Tieleikkausten pohjatutkimukset. TIEL 3200354
- 79/1996 Pohjavahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200446
- 18/1997 Syvästabiloinnin mitoitusohje. TIEL 3200465
- 28/1997 Tien kevennysrakenteet. TIEL 3200475