

Lauri Juhani Lindberg

MAALUISKAN JA PENKEREEN STABI- TEETIN LASKEMINEN LRFD-MENETEL- MÄLLÄ

Vertailu mitoitusohjeiden Eurokoodi 7:n ja CSA S6-
19 välillä

Kandidaatin tutkinto
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Mika Knuuti
04 2022

TIIVISTELMÄ

Lauri Lindberg: Maaluiskan ja penkereen stabiliteetin laskeminen LFRD-menetelmällä.
Vertailu mitoitusohjeiden Eurokoodi 7:n ja CSA S6-19 välillä.
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Huhtikuu 2022

Maanrakentamisessa tulee usein tilanteita, joissa luiskan tai penkereen sortumavaaraa tulee tarkastella. Tätä tarkastelua kutsutaan geotekniikassa stabiliteettilaskennaksi. Stabiliteettilaskenta voidaan jakaa suljetun ja avoimen tilan laskentaan, joista kummatkin tapaukset yleensä tutkitaan. Laskenta voidaan suorittaa kokonaisjännityksillä ($\varphi=0$) tai tehokkailla jännityksillä (φ' - c'). Stabiliteettilaskennassa on useita teorioita, joista tässä työssä on esitetty Bishobin yksinkertaistettu menetelmä. Laskentateoriat ja maaparametrien määrittäminen eivät ole täydellisiä ja sisältävät epävarmuutta. Tämä epävarmuus otetaan yleensä huomioon lisäämällä mitoitusvarmuutta. Tässä työssä on esitelty Eurokoodi 7:n (EN 1997-1) ja Canadian Highway Bridge Design Code:n (CSA S6-19) mukaiset varmuusmenetelmät.

Työn tarkoituksena oli vertailla CSA S6-19:n ja Eurokoodi 7:n mukaista mitoitusmenetelmää stabiliteettilaskennassa. Työssä vertailtiin mitoitusmenetelmien laskentatuloksia, jotta saataisiin tietoa, miten mitoitusmenetelmien tulokset eroavat toisistaan ja miten suunnitteluohjeet voisivat hyötyä toistensa ominaisuuksista.

Tutkimus tehtiin vertailemalla CSA S6-19:n ja Eurokoodi 7:n mukaisia mitoitusmenetelmiä esimerkkilaskelmien avulla. Työssä laskettiin lyhytaikainen stabiliteetti suljetun leikkauslujuuden avulla ja pitkäaikainen stabiliteetti tehokkaiden jännitysten avulla. Stabiliteetti laskettiin käyttämällä Bishobin yksinkertaistettua menetelmää kuvitteelliselle penkereelle. Kuvitteellinen pengeri kuvasi kohdetta, jossa penkereen päällä on tieväylä.

Mitoitusmenetelmiä vertailemalla todettiin, että CSA S6-19:n mukainen LFRD-mitoitusmenetelmä (Load and resistance factor design) antoi suuremman vapauden suunnittelijalle määrittää varmuusluvut eri kuormille ohjeessa annettujen minimi- ja maksimiarvojen väliltä. CSA S6-19 tarjosi myös enemmän kuormitusyhdistelmävaihtoehtoja kuin Eurokoodi 7:n mukainen ohje. Eurokoodi 7:n mukaisen osavarmuusmenetelmän etuna oli maaparametrien vaikutuksen painottaminen osavarmuuskertoimilla. CSA S6-19:n mukaisessa mitoitusmenetelmässä maan kestävyydelle annettiin yksi muuttuva kerroin, mikä ei mahdollistanut eri maaparametrien painottamista.

Laskentatuloksia ja mitoitusmenetelmiä vertailemalla todettiin, että CSA S6-19:n mukainen mitoitusmenetelmä on pääsääntöisesti konservatiivisempi menetelmä kuin Eurokoodi 7:n mukainen mitoitusmenetelmä. Suurimpana syynä CSA S6-19:n mukaisen mitoitusmenetelmän konservatiivisuuteen on muuttuvien kuormien varmuuskertoimien suuruudet, jotka ovat huomattavasti suurempia kuin Eurokoodi 7:n mukaisessa mitoitusmenetelmässä. Laskennassa suuren eron tuo myös maan lujuuteen kohdentuva varmuus. Tehokkailla jännityksillä laskettaessa Eurokoodi 7:n mukaisessa mitoitusmenetelmässä maan lujuuteen kohdentuva varmuus on huomattavasti pienempi kuin CSA S6-19:n mukaisessa mitoitusmenetelmässä, minkä takia CSA S6-19:n mukainen mitoitusmenetelmä on konservatiivisempi maan lujuuden suhteen kuin Eurokoodi 7:n mukainen mitoitusmenetelmä. Suljetulla leikkauslujuudella laskettaessa laskentatulokset vastaavat enemmän toisiaan, mutta Eurokoodi 7:n mukainen laskenta antoi silti pienemmän stabiliteetin kuin yksikään CSA S6-19:n mukainen laskenta. Tuloksista pystyttiin päättelemään, että Eurokoodi 7:n mukainen laskenta antaa lähes aina suuremman stabiliteetin, paitsi tilanteissa, jossa lasketaan lyhytaikaista stabiliteettia suljetun leikkauslujuuden avulla, kuormitukset ovat hyvin pieniä ja pohjaolosuhteiden tuntemuksen taso on tavallinen tai korkea.

Avainsanat: CSA S6-19, stabiliteettilaskenta, Eurokoodi 7, varmuusmenetelmä

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. STABILITEETIN LASKENTATEORIA	3
2.1 Suljetun tilan stabiliteettilaskenta.....	4
2.2 Avoimen tilan stabiliteettilaskenta.....	4
2.3 Stabiliteettilaskenta kokonaisjännityksillä ($\varphi=0$).....	5
2.4 Stabiliteettilaskenta tehokkailla jännityksillä (φ' - c')	5
2.5 Bishopin yksinkertaistettu menetelmä	6
3. RAJATILAMITOITUS	8
3.1 Murtorajatila (Ultimate limit state, ULS)	8
3.2 Käyttörajatila (Service ability limit state, SLS).....	8
4. STABILITEETTI LASKENTA CSA S6-19:N OHJEEN MUKAISESTI	10
4.1 Yleistä	10
4.2 Load and resistance factor design (LRFD)	10
4.2.1 Kuormien varmuuskertoimet ja kuormitusyhdistelmät	11
4.2.2 Seuraamusluokka	12
4.2.3 Murtorajatilan ja käyttörajatilan maankestävyyden varmuusluku .	13
5. STABILITEETTI LASKENTA EUROKOODI 7:N OHJEEN MUKAISESTI	15
5.1 Murtorajatila Eurokoodin mukaisesti.....	15
5.2 Käyttörajatila Eurokoodin mukaisesti.....	15
5.3 Osavarmuuskertoimet ja niiden valinta.....	16
5.4 Eurokoodin mukaiset kuormitusyhdistelmät	17
6. VERTAILULASKELMAT	19
6.1 Lähtötilanne ja laskentaparametrit.....	19
6.2 CSA S6-19:n mukainen stabiliteettilaskenta	20
6.2.1 Lyhytaikainen stabiliteetti suljetun leikkauslujuuden avulla	21
6.2.2 Pitkäaikainen stabiliteetti tehokkailla jännityksillä	22
6.3 Eurokoodi 7:n mukainen stabiliteettilaskenta.....	23
6.3.1 Lyhytaikainen stabiliteetti suljetun leikkauslujuuden avulla	23
6.3.2 Pitkäaikainen stabiliteetti tehokkailla jännityksillä	24
6.4 Laskentatulosten vertailu	25
7. YHTEENVETO.....	28
LÄHTEET	31

MERKINNÄT

b	Lamellin leveys
c'	Tehokas koheesio
d	Momenttipisteen etäisyys liukupinnan keskikohdasta
E_d	Kuormien tai kuormien vaikutusten mitoitusarvo eurokoodi 7:n mukaisessa mitoittamisessa
F	Varmuusluku. Ominaiskestävyyden ja ominaiskuorman suhde
F_{ui}	Murtorajatilalaskennassa käytettävä kuorma (CSA S6-19)
F_{si}	Käyttöraajatilalaskennassa käytettävä kuorma (CSA S6-19)
$G_{kj,sup}$	Epäedullinen pysyvä kuorma (Eurokoodi 7)
$G_{kj,inf}$	Edullinen pysyvä kuorma (Eurokoodi 7)
K_{Fi}	Luotettavuusluokan perusteella valittava kerroin (Eurokoodi 7)
l	Lamellin kaaren pituus
L_a	Liukupinnan pituus
N	Normaalivoima
N'	Normaalijännitys
Q_k	Muuttuva kuorma eurokoodi 7:n mukaisissa kuormitusyhdistelmissä
r	Momenttivarsi
R_d	Mitoituskestävyys eurokoodi 7:n mukaisessa mitoittamisessa
R_s	Laskettu tai mitattu maankestävyys, jonka maaperä kestää sen käyttöraajatilassa. Usein määritetään ennalta arvioidusta maaperän tai rakenteen deformaatiosta. (CSA S6-19)
R_u	Laskettu tai mitattu maankestävyys murtorajatilassa. (CSA S6-19)
S	Leikkausvoima
c_u	Suljettu leikkauslujuus
u	Huokosvedenpaine
W	Maan paino
x	Lamellin leveys
α	Pysty akselin ja momenttikeskkipisteen välinen kulma
α_{si}	Käyttöraajatilalaskennassa käytettävää kuormaa vastaava kuorman varmuuskerroin (CSA S6-19)
α_{ui}	Murtorajatilalaskennassa käytettävää kuormaa vastaava kuorman varmuuskerroin (CSA S6-19)
ϕ'	Tehokas kitkakulma
ϕ_{gs}	Maankestävyyden varmuuskerroin käyttöraajatilassa (CSA S6-19)
ϕ_{gu}	Maankestävyyden varmuuskerroin murtorajatilassa (CSA S6-19)
σ'	Tehokas pystyjännitys
σ_n	Pystyjännitys
Ψ	Seuraamusluokasta tuleva seuraamuskerroin (consequence factor) (CSA S6-19)
Ψ	Eurokoodi 7:n mukainen kuormien yhdistelykerroin

1. JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan Canadian highway bridge design code:n (CHBDC) eli CSA S6-19 mukaista stabiliteetilaskentaa ja verrataan sitä Suomessa käytettävään menetelmään, joka pohjautuu Eurokoodi 7:ään eli EN 1997-1:een. (EN 1997-1 (2004)) CSA S6-19 on kanadalainen ohjeistus siltojen ja siltaympäristöjen rakentamiseen. (CSA S6-19 (2019)) Työssä keskitytään eri mitoitusohjeiden mukaisiin varmuusmenettelyihin ja niiden aiheuttamiin eroihin laskennassa.

Maarakentamisessa stabiliteetilaskentaa käytetään tilanteissa, joissa maa voi sortua joko omasta painosta tai ulkoisen kuorman vaikutuksesta. Stabiliteetti kuvaa tällaisessa tilanteessa maaluiskan tai penkereen maan vakauttavien ja kaatavien voimien suhdetta. Kuvan 1 tilanteessa stabiliteetin menettämiseen on johtanut äkillisen sateen aiheuttama maantilavuuspainon nousu, josta on aiheutunut vakauttavien voimien ylittymien eli stabiliteetin menettäminen. Täysin teoreettisessa tilanteessa maan vakauttavien ja kaatavien voimien suhteen ollessa 1, sortumaa ei tapahdu. Todellisuudessa laskentateoriat kuvaavat yksinkertaistettuja tilanteita stabiliteetilaskennassa ja eivät tämän takia kuvaa täysin todellista tilannetta. Epävarmuutta laskentaan tuo myös laskentaparametrien sisältämä epävarmuus, joka johtuu maamateriaalin luonnollisesta vaihtelusta, mittauksissa tapahtuvista virheistä ja mittauskaluston rajoitteista.



Kuva 1. Maaluiskan sortuma Tampereella sijaitsevien asuinrakennusten vieressä. Sortuman syyksi on määritetty, että asuinrakennus on rakennettu löyhän siltin päälle ja runsaalla sateella rakennuksen alla olevan silttikerroksen paino on kasvanut, mikä on johtanut maaluiskan sortumaan. (Mannila, M. 2020) (Kuva: Hietanen, R. (2020))

Stabiliteettilaskennassa voidaan käyttää monia erilaisia laskentateorioita. Tässä työssä teorioista on esitetty Bishopin yksinkertaistettu menetelmä, joka on käytetty menetelmä stabiliteettilaskennassa. Stabiliteettilaskennassa oleellisena osana on ymmärrettävä laskennassa käytettävä liukupinta, joka voi olla luiskan, ympyräliukupinnan tai vapaan liukupinnan muotoinen. Kuvasta 1 on nähtävillä, että sortuma ei ole tasaisen luiskan muotoinen vaan sortuma on enemmän tai vähemmän ympyrän kaaren muotoinen. Esimerkiksi Bishopin yksinkertaistettu menetelmä perustuu tähän oletukseen, että liukupinta on ympyrän kaaren muotoinen.

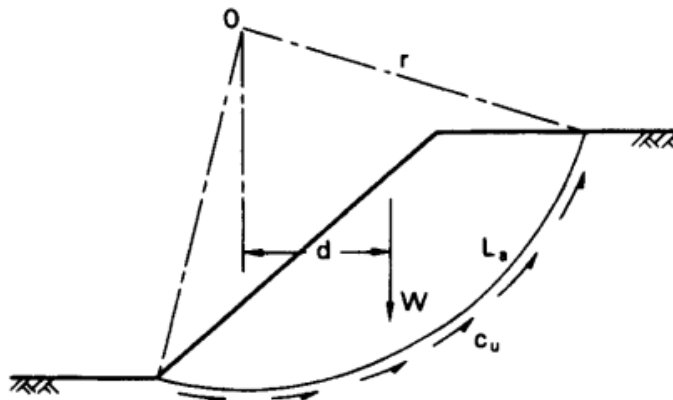
Varmuusmenetelmät ovat oleellinen osa rakentamisessa ja niin myös stabiliteettilaskennassa. Tämä johtuu siitä, että laskennassa käytettyihin kuormien ja materiaaliparametrien suuruuteen liittyy epävarmuutta. Työssä tärkeimpänä näkökohtana on tutkia CSA S6-19:n mukaista Load and Resistance Factor Design (LRFD)-menetelmää ja verrata sitä Eurokoodi 7:n mukaiseen osavarmuusmenetelmään. Työssä havainnollistetaan laskennan eroja näillä varmuusmenetelmillä laskemalla esimerkit yksinkertaisesta stabiliteettilaskennan tilanteesta.

2. STABILITEETIN LASKENTATEORIA

Stabiliteetilaskennassa käytettäviä laskentamenetelmiä ovat lamellimenetelmät ja elementtimenetelmät. Lamellimenetelmät soveltuvat paremmin yksinkertaisiin tapauksiin kuin elementtimenetelmät, mutta elementtimenetelmät saavuttavat parhaat hyötynsä hyvin monimutkaisissa stabiliteetilaskennan tilanteissa. (Liikennevirasto 2018, s. 22)

Yksinkertainen stabiliteetilaskenta perustuu kuvassa 2 esitettyyn tilanteeseen, jossa luiskan stabiliteettia kuvataan momentin avulla. Kuvan 2 tilanteessa ympyrän kaarenmuotoinen liukupinta kuvaa sitä rajapintaa, jossa kaaren sisäpuolella oleva maamassa mobilisoituu sortuessaan. Kuvassa 2 c_u kuvaa suljettua leikkauslujuutta, joka pyrkii vastustamaan sortumaa aiheuttaen momentin vastakkaiseen suuntaan kuin sortuman suunta pisteen O suhteen. Maarakenteen murtumaa aiheuttava voima kuvan 2 tilanteessa on ainoastaan maan painosta aiheutuva kuorma, joka pyrkii aiheuttamaan kaatavan momentin.

Laskennassa käytettävä liukupinta voi olla erimuotoinen, mikä vaikuttaa laskentamenetelmään. Liukupinnan muodon muuttamisella voidaan myös kuvata realistisemmin liukupinnan muotoa eri tapauksissa, sillä kaikki liukupinnat eivät käytännön tilanteissa ole täysin ympyräpinnan muotoisia. Vaarallisimman liukupinnan määrittämiseen voidaan käyttää tehtävään soveltuvaa algoritmia. Piste O määräytyy liukupinnan sijainnin mukaan.

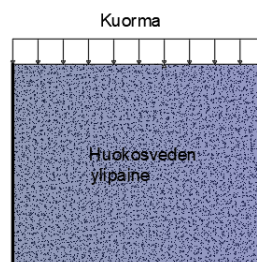


Kuva 2. Yksinkertainen tilanne stabiliteetilaskennassa ympyräliukupintaa käytetään. Kuvan liukupinta ja maanpaino W muodostavat momentin pisteen O suhteen ja näiden momenttien suhde kuvaa rakenteen stabiliteettia. (Craig R.F 2004, s.349)

Stabiliteettilaskenta suoritetaan kokonaisjännityksillä ($\varphi=0$) tai tehokkailla jännityksillä (φ' - c'). Kokonaisjännityksillä laskettaessa käytetään maakerrosten leikkauslujuutena suljettua leikkauslujuutta. Tehokkailla jännityksillä laskettaessa maakerrosten lujuus määritetään Mohr-Coloumb:n kaavalla tehokkaita lujuusparametrejä φ' (tehokas kitkakulma) ja c' (tehokas koheesio) käyttäen. Huokosvedenpaineena u käytetään murtotilassa vallitsevaa arvoa u_f . Stabiliteettilaskentaan kuuluu myös tuloksen realistisuuden arviointi. (Liikennevirasto 2018, s.20-22) Stabiliteettilaskenta jaetaan myös suljetun ja avoimen tilan laskentaan. Stabiliteettilaskennassa mietitään tilannekohtaisesti, kumpi tilanteista on mitoittava tilanne vai tarvitseeko kummatkin tilanteet ottaa huomioon.

2.1 Suljetun tilan stabiliteettilaskenta

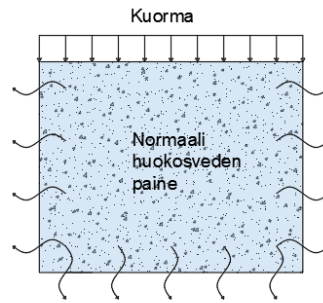
Suljetun tilan tutkiminen kuvaa stabiliteettilaskennassa tilannetta, jossa huokosvedenpaine ei pääse tasaantumaan. Tämä on esitetty kuvassa 3. Suljetun tilan laskenta voidaan toteuttaa kokonaisjännityksillä tai tehokkailla jännityksillä. Tehokkailla jännityksillä laskettaessa käytettävän huokosvedenpaineen parametrin u sijasta käytetään murtorajatilassa vallitsevaa huokospainetta u_f . Erityisesti koheesiomaissa suljetun tilan laskenta pyritään tekemään käyttäen pohjatutkimuksilla määritettyä suljettua leikkauslujuutta, mikäli voidaan todeta sen arvon olevan realistinen, mutta suljetun leikkauslujuuden määrittäminen voidaan myös tehdä mallintamalla. Tehokkaita parametrejä voidaan käyttää laskennassa, jos laskentaohjelman avulla voidaan mallintaa kuormista ja maan leikkautumisesta aiheutuvat huokosveden ylipaineen parametrit. (Liikennevirasto 2018, s.20)



Kuva 3. Suljetun tilan tilanne, jossa maata kuormittaessa rakenteessa oleva huokosvesi ei pääse tasaantumaan ympäristöön ja muodostaa painetta kuormituksen vaikutuksesta. Tilanne on tyypillinen hienorakeisilla maa-aineksilla.

2.2 Avoimen tilan stabiliteettilaskenta

Avoimen tilan stabiliteettilaskenta kuvaa pitkäaikaista tilannetta stabiliteettilaskennassa, jonka periaate on esitetty kuvassa 4. Avoimessa tilassa huokosvedenpaine pääsee tasaantumaan eikä ylipainetta oteta huomioon. Avoimen tilan laskenta suoritetaan aina tehokkaita maaparametreja käyttäen, ja huokospaineena u käytetään sen vallitsevaa arvoa. (Liikennevirasto 2018, s.20)



Kuva 4. Avoimen tilan tilanne, jossa huokosvesi pääsee tasaantumaan ympäristöön, eikä huokosvedenpainetta pääse syntymään. Tilanne on tyypillinen karkearakeisilla maa-aineksilla.

2.3 Stabiliateetilaskenta kokonaisjännityksillä ($\varphi=0$)

Kun stabiliateetilaskenta suoritetaan kokonaisjännityksillä, käytetään suljettua leikkauslujuutta. Suljetun leikkauslujuuden käyttö tekee laskennasta hieman yksinkertaisempaa kuin tehokkaiden maaparametrien käyttö.

Yksinkertaistettuna stabiliateetti kuvan 2 tapaukseen saadaan laskettua:

$$F = \frac{S_u L_a r}{W d}, \quad (1)$$

jossa S_u kuvaa määritettyä suljettua leikkauslujuutta. W kuvaa maan painosta aiheutuvaa kuormaa, L_a on laskennassa käytettävän ympyräkaaren pituus eli liukupinta ja r on pisteen O etäisyys liukupinnasta eli momenttivarsi. Muuttuja d kuvaa kaatavan kuorman keskipisteen etäisyyttä pisteestä O eli se on kuorman momenttivarsi, ja kuormana kuvassa 2 on ainoastaan maan paino. F kuvaa varmuutta sortumaa vastaan. Varmuusmenetelmästä riippuen, varmuuden F tavoitearvo voi olla 1.0 tai enemmän. Mikäli tavoitearvo alittuu, voidaan todeta, että rakenteen stabiliateetti ei ole riittävä. (Craig R.F 2004, s.348-349). Kuvan 2 tilanne on hyvin yksinkertainen ja hyvin usein tilanteessa tarvitsee ottaa huomioon myös eri maakerroksia, ulkoisia kuormia ja huokosvedenpaine, joka on otettuna huomioon suljetussa leikkauslujuudessa. Monimutkaisempiin tapauksiin käytetään lamelli- ja elementtimenetelmiin perustuvia malleja.

2.4 Stabiliateetilaskenta tehokkailla jännityksillä (φ' - c')

Kun stabiliateetilaskenta suoritetaan tehokkailla jännityksillä, käytetään tehokasta koheesiota c' sekä tehokasta kitkakulmaa φ' . Tehokkaat parametrit korvaavat suljetun leik-

kauslujuuden. (Liikennevirasto 2018, s.20) Yksinkertaisesti esitettynä kuvan 2 tilanteeseen soveltaen, tehokkailla jännityksillä maaluiskan ja penkereen stabiiliteetti saadaan laskettua kaavalla (2):

$$F = \frac{(c' + \sigma' \tan \varphi') L_a r}{Wd} \quad (2)$$

(Kaava johdettu: Craig R.F (2004), s.349)

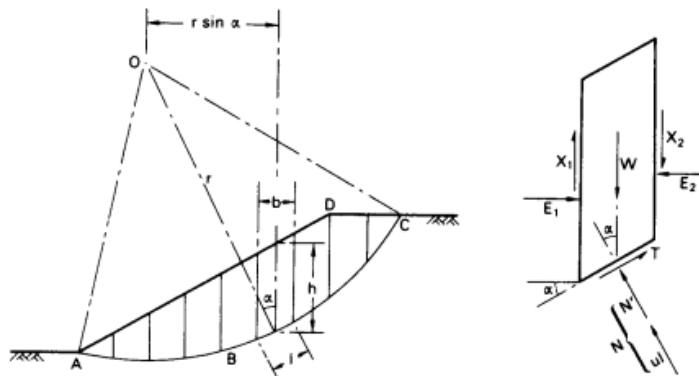
Kaavassa 2 esitetyssä tehokkaassa pystyjännityksessä σ' otetaan huomioon pystyjännitys ja huokosvedenpaine. Huokosvedenpaine u otetaan huomioon laskelmissa pystysuuntaisena kuormana, jolla on maan kestävyyttä heikentävä vaikutus. Pystyjännitys σ' saadaan laskettua kaavalla (3):

$$\sigma' = \sigma_n - u, \quad (3)$$

jossa σ_n on kokonaisnormaalijännitys liukupinnalla. (Kaava johdettu: Liikennevirasto 2018, s.29)

2.5 Bishobin yksinkertaistettu menetelmä

Bishobin yksinkertaistettu menetelmä on käytetty lamellimenetelmä stabiiliteetilaskennassa. Kuvassa 5 on esitetty perusperiaate lamellimenetelmissä, joissa laskentatilanne jaetaan lamelleihin ja leikkausjännitykset lasketaan erikseen jokaisen lamellin pohjalla. Lamellijako mahdollistaa erilaisten maakerrosten huomioon ottamisen laskennassa.



Kuva 5. Kuvassa esitetty lamellimenetelmän periaate. Toisin kuin kuvan 2 yksinkertaisessa tilanteessa, liukupinnan sisäpuolella oleva alue on jaettu lamelleihin, joka mahdollistaa erilaisten maaperäolosuhteiden huomioon ottamisen laskennassa ja mahdollistaa tarkemman laskemisen. (Craig R.F (2004), s.352)

Bishopin yksinkertaistetussa menetelmässä oletetaan, että lamellien välinen leikkausvoima on 0. Muiden pystysuuntaisten voimien oletetaan olevan tasapainossa yhtälön 4 mukaan.

$$N \cos \alpha + T \sin \alpha - W = 0 \quad (4)$$

Kaavassa 4 olevat positiiviset voimat kuvaavat vakauttavia voimia, joiden vaikutussuunta on ylöspäin, ja negatiiviset voimat kaatavia voimia, joiden vaikutussuunta on alaspäin. T kuvaa lamellin pohjassa olevaa leikkausvoimaa. Leikkausvoima T saadaan Mohr-Coulombin tehokkaita lujuusparametreja käyttäen:

$$T = \frac{1}{F} (c'l + N'tan \varphi') \quad (5)$$

Muuttuja N' kuvaa lamellin pohjalla olevaa normaalijännitystä ja l lamellin pohjan pituutta. Sijoittamalla kaava 5 kaavaan 4 ja ratkaisemalla normaalivoima N saadaan yhtälö muutettua muotoon:

$$N = \frac{W - (1/F)(c'l - ul \tan \varphi') \sin \alpha}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \varphi')/F} \quad (6)$$

Tehokas normaalijännitys σ' koostuu normaalivoimasta N aiheutuvan pystyjännityksen ja huokosvedenpaineen seurauksena, ja se saadaan määritettyä jakamalla normaalivoima N lamellin pohjan pituudella l ja vähentämällä siitä huokosvedenpaine u :

$$\sigma' = \frac{N}{l} - u \quad (7)$$

Kun kaavat 6 ja 7 yhdistetään ja lasketaan momenttitasapaino ympyräliukupinnan keskipisteen suhteen, saadaan yhtälö muutettua muotoon:

$$F = \frac{\sum \left[\frac{c'l + (W - ub) \tan \varphi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \varphi')/F} \right]}{\sum W \sin \alpha} \quad (8)$$

Koska varmuusluku F esiintyy kummallakin puolella kaavaa, yhtälö tulee ratkaista iteratiivisesti, kunnes molempien puolien varmuuskertoimien arvo saadaan samaksi vaaditun toleranssin sisällä. (Jussila 2019, s.14-15)

3. RAJATILAMITOITUS

Luiskan tai penkereen mitoituksessa on kaksi tarkasteltavaa tapausta, murto- ja käyttö-rajatilatarkastelu. Rajatilamitoituksen tarkoituksena on varmistaa, että rakenteesta tai ulkoisista kuormista aiheutuvat rasitukset eivät aiheuta merkittävää vahinkoa rakenteelle. Murto- ja käyttörajatilatarkastelut ovat samankaltaiset Eurokoodi 7:ssä ja CSA S6-19:ssä. Ohjeiden väliset erot näkyvät erilaisissa varmuusmenettelyissä. CSA S6-19 perustuu LRFD-menetelmään ja Eurokoodi 7 osavarmuuslukumenetelmään. Jotta rakenne voidaan hyväksyä, tulee murtorajatila- ja käyttörajatilaehdon täyttyä.

3.1 Murtorajatila (Ultimate limit state, ULS)

Murtorajatilalla tarkoitetaan tilaa, jossa rakenne murtuu kuormituksen takia. Stabiiliteettilaskennassa murtorajatilamitoitus suoritetaan laskemalla rakenteen kokonaisstabiiliteetti ja varmistamalla, että se on riittävän suuri. (CSA S6-19 2019, liite 3, s.129) (Bond et al. 2013, s.63) Kokonaisstabiiliteetin laskeminen voidaan tehdä käsin tai tietokonetta käyttäen. Laskentamenetelmää valittaessa huomioon tulee ottaa (EN 1997-1 2004, S.119):

- stabiiliteetin laskentatilanne (pitkä- ja lyhytaikainen)
- maakerrokset
- liukupinnan muoto
- veden tunkeutuminen ja huokosvedenpaineen jakautuminen
- rakenteen deformaatio, jonka takia rakenne saavuttaa murtorajatilan.

3.2 Käyttörajatila (Service ability limit state, SLS)

Käyttörajatilalla tarkoitetaan tilaa, jossa rakenne ylittää sille asetetut muodonmuutokseen tai siirtymiseen asetetut ehdot. Stabiiliteettilaskennassa käyttörajatilaa voidaan tutkia laskemalla siirtymiä rakenteessa tai läheisissä rakenteissa, tai voidaan tarkastaa, että riittävän pieni osuus maan lujuudesta on mobilisoitunut. Ehdoiksi voidaan asettaa esimerkiksi sellaisia siirtymiä, joissa voidaan olettaa rakenteen tilan heikkenemistä tai rakenteen rikkoutumista. (Bond, Schuppener, Scarpelli, Orr 2013, s.63 ja Liikennevirasto 2013, s.41)

Käyttökelpoisuuden rajatilaa "SLS" laskettaessa otetaan huomioon (EN 1997-1 2004, S.121):

- deformaatio, joka aiheuttaa rakenteen liiallista painumista, siirtymistä, vääntymistä tai kallistumista
- painumat maakerroksissa
- pohjaveden olosuhteiden muutos ja huokosveden ylipaine
- pitkäaikainen viruminen avoimessa tilassa
- tilavuushäviö maakerrosten liukenemisen takia.

4. STABILITEETILASKENTA CSA S6-19:N OHJEEN MUKAISESTI

4.1 Yleistä

Canadian highway bridge design code:n (CHBDC) ohje eli CSA S6-19 on kanadalainen suunnitteluohje, joka on tarkoitettu siltojen ja siltojen ympäristön suunnitteluun. Suunnitteluohje käsittelee geoteknisten rakenteiden mitoitussehtoja ja antaa ohjeita niiden suunnitteluun. Tässä työssä oleellisimpana asiana CSA S6-19-ohjeessa on siinä esitetty load and resistance factor design -menetelmä (LFRD), joka esitetään seuraavassa kappaleessa.

4.2 Load and resistance factor design (LFRD)

Load and resistance factor design on menetelmä, jossa varmuutta kohdennetaan sekä kuormiin että maan kestävyysasteeseen. LFRD-menetelmä määrittää varmuuskertoimet yleisesti maan kestävyysasteelle, mutta tarjoaa suunnittelijalle vapauden päättää useiden varmuuskertoimien arvot kuormitusyhdistelmiin. LFRD menetelmässä lasketaan kaksi mitoitussehtoa ja varmistetaan niiden riittävyys. (CSA S6-19 2019, s.349)

Murtorajatilan "ULS" mitoitussehto,

$$\Psi \phi_{gu} R_u \geq \sum_i \alpha_{ui} F_{ui} \quad (9)$$

Ψ = Seuraamuskerroin

ϕ_{gu} = Maan kestävyysasteen varmuuskerroin murtorajatilassa

R_u = Maankestävyys murtorajatilassa

α_{ui} = Kuorman varmuuskerroin Murtorajatilassa

F_{ui} = Murtorajatilassa käytettävä kuorma

Käyttörajatilan "SLS" mitoitussehto:

$$\Psi \phi_{gs} R_s \geq \sum_i \alpha_{si} F_{si} \quad (10)$$

ϕ_{gs} = Maankestävyysasteen varmuuskerroin käyttörajatilassa

R_s = Maankestävyys käyttörajatilassa

α_{si} = Kuorman varmuuskerroin käyttörajatilassa

F_{si} = Käyttörajatilassa käytettävä kuorma

4.2.1 Kuormien varmuuskertoimet ja kuormitusyhdistelmät

CSA S6-19:n mukaisessa varmuusmenettelyssä käytetään erilaisia kuormitusyhdistelmiä, joilla erilaiset kuormat otetaan huomioon antaen niille eri painoarvoja. Suunnittelu-tilanteen mukaisesti valitaan kuormitusyhdistelmä taulukon 1 mukaisesti, joka kuvastaa parhaiten suunniteltavaa tilannetta. Taulukon 1 ylärivillä olevat kirjaimet kuvaavat eri kuormatyyppisiä.

Stabiiliteettilaskentaan voidaan soveltaa esimerkiksi SLS kuormitusyhdistelmää 1 ja ULS kuormitusyhdistelmää 1. Kuormitusyhdistelmä ottaa huomioon SLS tilanteessa maan painon (D), maan paineen ja hydrostaattisen paineen (E), rakenteen esijännityksestä aiheutuvat kuormat (P), muuttuvat kuormat (L), painuman (S) (varmuusluvulla rajoitetaan sen suuruutta) sekä maan deformaatiosta johtuvat kuormat (K). ULS 1 kuormitusyhdistelmä ottaa muut kuormat huomioon paitsi epätasaisen painuman ja maan deformaation. ULS 1 kuormitusyhdistelmässä on myös erona muuttuvien kuormien määrittäminen, joka tehdään taulukon 3 mukaisesti. On kuitenkin otettava huomioon, että näitä kaikkia kuormia ei välttämättä ole laskentatilanteessa, jolloin ne kuormat ja niiden kertoimet tulee jättää huomioimatta. CSA S6-19:n oheinen liite, jossa kuormitusyhdistelmät on määritetty, sisältää myös yleistä tietoa siltojen suunnittelusta, kuten kulkuneuvojen kuormituksia ja rakennusmateriaalien laskentaominaisuuksia.

Taulukko 1. CSA S6-19 liitteessä 3 olevat kuormitusyhdistelmät ja selitykset kuormitusyhdistelmille (Muokattu: CSA S6-19 2019, liite 3, s.131)

CSA S6-19 Kuormitusyhdistelmät						
Kuormat	Pysyvät kuormat			Muuttuvat kuormat		
	D	E	P	L	K	S
Käyttöraja						
SLS yhdistelmä 1	1,00	1,00	1,00	0,90	0,80	1,00
SLS yhdistelmä 2	0	0	0	0,90	0	0
Murto-rajatila						
UULS yhdistelmä 1	α_D	α_E	α_P	Taulukko 4	0	0
UULS yhdistelmä 2	α_D	α_E	α_P	Taulukko 4	1,15	0
UULS yhdistelmä 3	α_D	α_E	α_P	Taulukko 4	1,00	0

D	Pysyvä kuorma
E	Maanpaine ja hydrostaattinen paine
P	Rakenteen esijännityksestä aiheutuvat kuormat
L	Muuttuva kuorma
K	Rasitukset, muodonmuutokset ja siirtymät
S	Rakenteen epätasaisesta painumasta ja liikkeestä aiheutuva kuorma

Taulukossa 2 on annettu arvoja varmuuskertoimille α_D . Varmuusluvuille on annettu minimi- ja maksimiarvot. Nämä arvot kuvastavat sitä väliä, jolta suunnittelija voi valita varmuusluvun kuormalle. CSA S6-19 ei anna tarkempia ohjeita näiden arvojen määrittämiseen.

Taulukko 2. Varmuusmenettelyyn tarvittavia kuormien varmuuskertoimia stabiiliteettilaskennassa (CSA S6-19 2019, liite 3, s.132)

Pysyvät kuormat	Maksimi α_D	Minimi α_D
Tehdasvalmisteiset komponentit pois lukien puu	1.10	0.95
Paikalla valetut betoni rakenteet, puurakenteet ja rakenteeseen kuulumattomat komponentit	1.20	0.90
Maatäytöt ja negatiivinen vaippahankaus paaluissa	1.25	0.80
Vesi	1.10	0.90

Taulukossa 3 on määritetty eri ULS-kuormitusyhdistelmiin soveltuvia muuttuvan kuorman varmuuskertoimia. Kuormien varmuuskertoimet valitaan siten, että ne kuvaavat parhaiten liikkuvan kuorman luonnetta. Varmuuskerroimia on annettu normaalin liikennöinnin kuormituksen vaikutuksille, erityiskuormituksille ja eri jänneväleille.

Taulukko 3. Muuttuvan kuorman varmuuskertoimia (Muokattu: CSA S6-19 2019, liite 3, s.132)

Kuormitusyhdistelmä	Siltaympäristöjen muuttuvan kuorman varmuuskerroin
	tavallinen liikenne
ULS yhdistelmä 1	1,70
ULS yhdistelmä 2	1,60
ULS yhdistelmä 3	1,40

4.2.2 Seuraamusluokka

Seuraamuskerroin(Ψ) on seuraamusluokan perusteella määräytyvä kerroin. Suunniteluun vaikuttavat seuraamukset määritetään ihmishenkien menetysten, taloudellisten ja sosiaalisten vahinkojen sekä ympäristövahinkojen näkökohtien perusteella. Mikäli rakenteen omistaja ei ota kantaa seuraamusluokkaan, voidaan sen olettaa vastaavan seuraamusluokkaa tavallinen. (CSA S6-19 2019, s351) Eri seuraamusluokat on esitetty taulukossa 4. Seuraamusluokkia vastaavat seuraamuskerroimet on määritetty samassa taulukossa.

Taulukko 4. Seuraamusluokat ja seuraamuskertoimet CSA S6-19 mukaisesti (muokattu: CSA S6-19 2019, s.351)

Seuraamusmuokka	Kuvaus	Seuraamuserroin (ψ)
Korkea taso (High)	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	0,9
Tavallinen (Typical)	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	1
Matala taso (Low)	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	1,15

4.2.3 Murtorajatilan ja käyttörajatilan maankestävyyden varmuusluku

Tässä kappaleessa on esitetty maan kestävyydelle varmuuskertoimet (geotechnical resistance factor), jotka ottavat huomioon epävarmuuden maaperän ominaisuuksissa mitoituslaskennassa. Maankestävyyden varmuuskertoimien arvot on määritelty luotettavuusteorian avulla. Taulukossa 5 on esitetty CSA S6-19:n mukaisia rajatilojen varmuuskertoimien arvoja eri suunnittelutilanteissa. Stabiiliteetilaskennassa käytettävät kertoimet ovat murtorajatilalaskennassa pitkäaikaisen stabiiliteetin (Global stability - permanent conditions) ja lyhytaikaisen stabiiliteetin (Global stability – temporary condition) kertoimet ϕ_{gu} . Käyttörajatilalaskennassa painumalaskentaan valitaan varmuuserroin ϕ_{gs} . Kertoimia valittaessa arvioidaan, kuinka hyvin maaperän ominaisuudet tunnetaan ja valitaan arvo sen mukaan. Kertoimien suuruuden valintaan vaikuttaa myös käytettävä laskentamenetelmä. Tasoja on kolme: matala, tavallinen ja korkea. Korkea taso tarkoittaa, että kohteen maaperäominaisuudet ymmärretään hyvin, ja matala taso, että kohteen maaperäominaisuudet tunnetaan huonosti. Maaperäolosuhteiden hyvä tuntemus vähentää epävarmuutta laskennassa ja auttaa rakenteiden mitoittamisessa oikean suuruisiksi. (CSA S6-19 2019, s351-352)

Taulukko 5. Taulukossa varmuuskertoimia maan kestävyydelle penkereiden eri mitoitus tilanteissa. (Muokattu: CSA S6-19 2019, s.356)

Varmuuskertoimet pengertäytölle

Rajatila	Maaperän tutkimustapa	Maaperä olosuhteiden tuntemus		
		Vähäinen	normaali	korkea
Stabiliteetti - Lyhytaikainen tilanne, ϕ_{gu} (ULS)	Maaperätutkimus	0,70	0,75	0,80
Stabiliteetti - Pitkäaikainen tilanne, ϕ_{gu} (ULS)	maaperätutkimus	0,60	0,65	0,70
Painuma, ϕ_{gs} (SLS)	Maaperätutkimus	0,70	0,80	0,90
	Kenttäkoe	0,80	0,90	1,00

5. STABILITEETILASKENTA EUROKOODI 7:N OHJEEN MUKAISESTI

Suomalainen mitoitus perustuu Eurokoodin mukaiseen menettelyyn. Eurokoodi on Euroopassa käytetty standardi, jolla pyritään varmistamaan, että rakenteet suunnitellaan niin, että rakenteiden stabiliteetti ja kestävyys ovat riittävät. Eurokoodin mukaisessa stabiliteetilaskennassa käytetään Eurokoodi 7:ää (EN 1997-1), joka on tarkoitettu geoteknisen suunnittelun ohjeeksi (EN 1990:2002+A1 2020, s.6-7). Suomalaisessa stabiliteetilaskennassa käytettävät varmuuskertoimet löytyvät Eurokoodi 7:n soveltamisohjeesta (Liikennevirasto (2017), liite 1/2). Eurokoodin mukainen menettely on osavarmuuslukumenetelmä.

5.1 Murtorajatila Eurokoodin mukaisesti

Murtorajatilatarkastelut tehdään Eurokoodin mukaisesti tarkastelemalla kokonaisstabiiliiteettia samalla tavalla kuin CSA S6-19 -ohjeessa. Murtorajatilassa tavoitteena on, että kaatavien voimien suuruus ei ylitä vakauttavia voimia eli $ODF \geq 1$. (Liikennevirasto 2013, s.41)

Eurokoodi 7:n mukaisesti murtorajatilan mitoitusehto on:

$$E_d \leq R_d, \quad (11)$$

, jossa E_d kuvaa kaatavia voimia ja R_d vakauttavia voimia. (Bond et al. 2013, s.10)

Varmuuden laskennassa hyödynnetään taulukossa 7 olevia varmuuskertoimia maaparametrien epävarmuuksien huomioon ottamiseksi. Taulukon 6 mukaiset varmuuskertoimet perustuvat Eurokoodin mukaisiin GEO/STR arvoihin. (EN 1997-1 2004, s.119) Murtorajatilassa käytetään myös hyödyksi kappaleessa 5.4 esitettyjä kuormayhdistelmiä, joiden tarkoituksena on kasvattaa varmuutta rakennuksiin vaikuttavien kuormien suhteen, jotka stabiliteetilaskennassa voivat olla maan painosta aiheutuvia kuormia sekä muita ulkoisia kuormia.

5.2 Käyttörajatila Eurokoodin mukaisesti

Käyttörajatilan tarkastelu on hyvin samankaltainen prosessi kuin CSA S6-19:n mukaisessa ohjeessa. Eurokoodin mukaisessa käyttörajatilatarkastelussa on tarkoituksena tutkia haitallisten siirtymien ja painumien vaikutusta rakenteeseen. Käyttörajatilan riittä-

vyys voidaan osoittaa esimerkiksi painumalaskennalla. Väyläviraston penkereiden stabiiliteetilaskentaohjeen mukaan käyttörajatilaa tarkasteltaessa ominaisarvot eivät saa varmuuskerrointa tai varmuuskerroin on 1.0. (Liikennevirasto 2018, s.8)

Eurokoodi 7:n mukainen käyttörajatilan mitoitusehto:

$$E_d \leq C_d, \quad (12)$$

jossa E_d kuvaa kaatavia voimia ja C_d kuvaa vakauttavia voimia. Selkeämmin sanottuna laskennassa tarkastetaan, että kuormituksesta aiheutuva muodonmuutos ei ylitä sallittuja muodonmuutoksia. (Bond et al. 2013, s.12)

5.3 Osavarmuuskertoimet ja niiden valinta

Eurokoodissa on määritetty kolme mitoitusastetta (design approach), joista jäsenmaat ovat saaneet valita sopivan mitoitusastan. Luiskien ja penkereiden suunnitteluun Suomessa on valittu mitoitusastetta DA3, joka koostuu listojen mukaisista arvoista A2 + M2 + R3. Eurokoodi 7:ssä on määritetty, että luiskan päällä olevat kuormat oletetaan geoteknisiksi toiminnoiksi. Tämän takia ei tarvitse käyttää A1-sarjaa, joka kuvastaa rakenteellisia toimintoja. (Bond et al. 2013, s.60 ja Liikennevirasto 2013, s.39)

Taulukko 6. Taulukko Eurokoodin mukaisten kuormitusyhdistelmien määrittelyyn geoteknisille rakenteille. (Ympäristöministeriö 2007, liite 18, s.6)

Kuorma	Merkintä	Sarja	
		A1	A2
Pysyvä:			
Epäedullinen			
(Yht.6.10a)	$\gamma_{Gkj,sup}$	1,35Kfi	
(Yht.6.10b)		1,15Kfi	
(Yht.6.10)			1,0Kfi
Edullinen			
(Yht.6.10a)	$\gamma_{Gkj,inf}$	0,9	
(Yht.6.10b)		0,9	
(Yht.6.10)			1,0
Muuttuva:			
Epäedullinen			
(Yht.6.10b)	γ_Q	1,5Kfi	
(Yht.6.10)			1,3Kfi
Edullinen			
		0	0

Taulukossa 6 on esitetty valinnaiset A1- ja A2-sarjan kertoimet kuormitusyhdistelmille. DA3 mukaisessa menetelmässä osavarmuus kohdennetaan muuttuvaan kuormaan ja maan lujuteen. Eurokoodin mukaiset M2-sarjan kertoimet stabiliteettilaskentaan on esitetty taulukossa 7. M2-sarjan arvot kuvaavat maaparametrien osavarmuuskertoimia. R3-kertoimilla voidaan kuvata maan kestävyden kerrointa stabiliteettilaskennassa, ja sen arvo on 1,0. (Liikennevirasto (2017), liite 1/9)

Taulukko 7. Osavarmuuskertoimet maaparametreille Eurokoodin mukaiseen laskentaan. Stabiliteetin laskemiseen käytetään sarjaa M2. Kitkakulman varmuuskerroin γ_ϕ kohdennetaan kitkakulman tangentiin $\tan(\phi)$. (Liikennevirasto 2017, liite 1, s.5)

Maaparametri	Merkintä	Sarja	
		M1	M2
Leikkauskestävyysskulma (kitkakulma)	γ_ϕ	1,0	1,25
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}	1,0	1,4
Yksiakiaalinen puristuskoee	γ_{qu}	1,0	1,4
Tilavuuspaino	γ_v	1,0	1,0

5.4 Eurokoodin mukaiset kuormitusyhdistelmät

Stabiliteettilaskennassa käytetään Eurokoodi 0:ssa määritettyä yhtälöä 6.10 kuormien mitoitusarvojen laskemiseen (kuormien epävarmuuksien huomioon ottamiseen). Yhtälöön 13 sijoitetut kertoimet ovat DA3 mukaisia arvoja.

$$1,0K_{FI}G_{kj,sup} + 1,0G_{kj,inf} + 1,3K_{FI}Q_{k,1} + 1,3K_{FI}\Psi_{0,i}Q_{k,i} \quad (13)$$

Yhtälössä esitetyt kertoimet kuvaavat taulukon 6 sarjan A2 arvoja edullisessa ja epäedullisessa tapauksessa. K_{FI} kuvaa luotettavuusluokkaa, jonka kertoimet on esitetty taulukossa 8. Luotettavuusluokkaan liittyy seuraamusluokka, joka kuvaa rakenteen seuraamusten suuruutta ihmishenkien menetyksen, taloudellisten vahinkojen, sosiaalisten vahinkojen ja ympäristövahinkojen takia. Eurokoodi 7:n mukainen seuraamusluokka vastaa CSA S6-19:ssä käytettäviä seuraamusluokkia, jotka on esitetty taulukossa 4. (Liikennevirasto 2013, s.40-41)

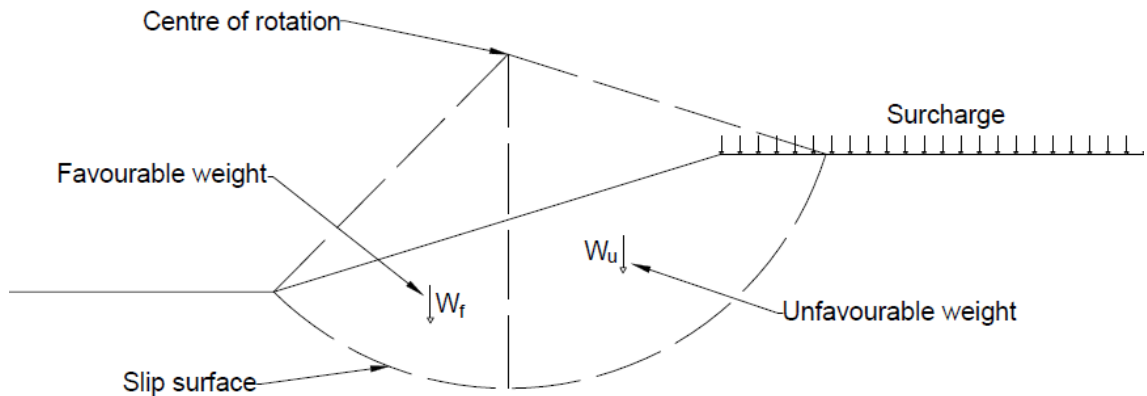
G kuvaa yhtälössä pysyvän kuorman suuruutta ja Q muuttuvaa kuormaa. Edullisuus ja epäedullisuus määritetään siten, että kaatavat kuormat ovat epäedullisia ja vakauttavat kuormat edullisia. Ψ laskuissa on yhdistelykerroin, jota käytetään ainoastaan epäedullisten muuttuvien kuormien tapauksessa. Yhdistelykertoimet on määritetty Eurokoodi 0:ssa. Yhdistelykertoimella kuvataan sitä todennäköisyyttä, jolla muuttuvat kuormat vaikuttaisivat samaan aikaan rakenteeseen. (Liikennevirasto 2013, s.40-41) (EN 1990,

s.52) Edullisuus ja epäedullisuus pitää määrittää tapauskohtaisesti. Esimerkiksi kuorman vaikutussuunta saattaa vaikuttaa siihen, onko kuorma edullinen vai epäedullinen.

Taulukko 8. Eurokoodi 7:n mukaiset STR/GEO-kuormitusyhdistelmien luotettavuusluokkien kertoimet (Ympäristöministeriö 2007, liite 1, s.5)

Seuraamusluokka	Luotettavuusluokka	K_{fi}	Seuraamukset
CC3	RC3	1.1	"Suuret"
CC2	RC2	1.0	"Keskisuuret"
CC1	RC1	0.9	"Vähäset"

Kuva 6 esittää, kuinka edullinen ja epäedullinen maan paino voivat jakaantua suunnittelutilanteessa. Kuvassa edullisena kuormana on kuorma W_f , joka liukupintaa katsottaessa liukuisi oikealle päin. Tämä maamassa tukee sortumaa vastaan, ja näin ollen vaikuttaa rakennetta ja on siksi edullinen kuorma. Luiskien ja penkereiden stabiliteettilaskennassa maan painosta aiheutuvaa kuormaa ei kuitenkaan yleensä jaeta edullisiin ja epäedullisiin kuormiin, koska se on lamellimenetelmillä laskettaessa haastavaa. (Bond et al. 2013, s.60-61)



Kuva 6. Edullisten ja epäedullisten maan painosta aiheutuvien kuormien jakautuminen. (Muokattu: Bond et al. 2013, s.60)

6. VERTAILULASKELMAT

Tässä kappaleessa vertaillaan laskennallisesti CSA S6-19:n ja Eurokoodi 7:n mukaista mitoitustapaa murtorajatilassa. Tarkoituksena on selvittää eri mitoitustapojen vaikutusta lopulliseen stabiliteettiin Bishopin yksinkertaistettua menetelmää käyttäen. Laskenta suoritetaan GeoCalc-ohjelmistolla (versio 5.1). Laskentaesimerkin parametrit ja poikkileikkaus ovat kuvitteellisia.

GeoCalc-ohjelma on Civilpoint Oy:n tekemä laskentaohjelmisto, joka on tarkoitettu geotekniseen suunnitteluun. Stabiilitilaskennan lisäksi GeoCalc-ohjelmisto soveltuu myös painuma-, tukiseinä- ja paalulaskentaan. (Civilpoint Oy 2020)

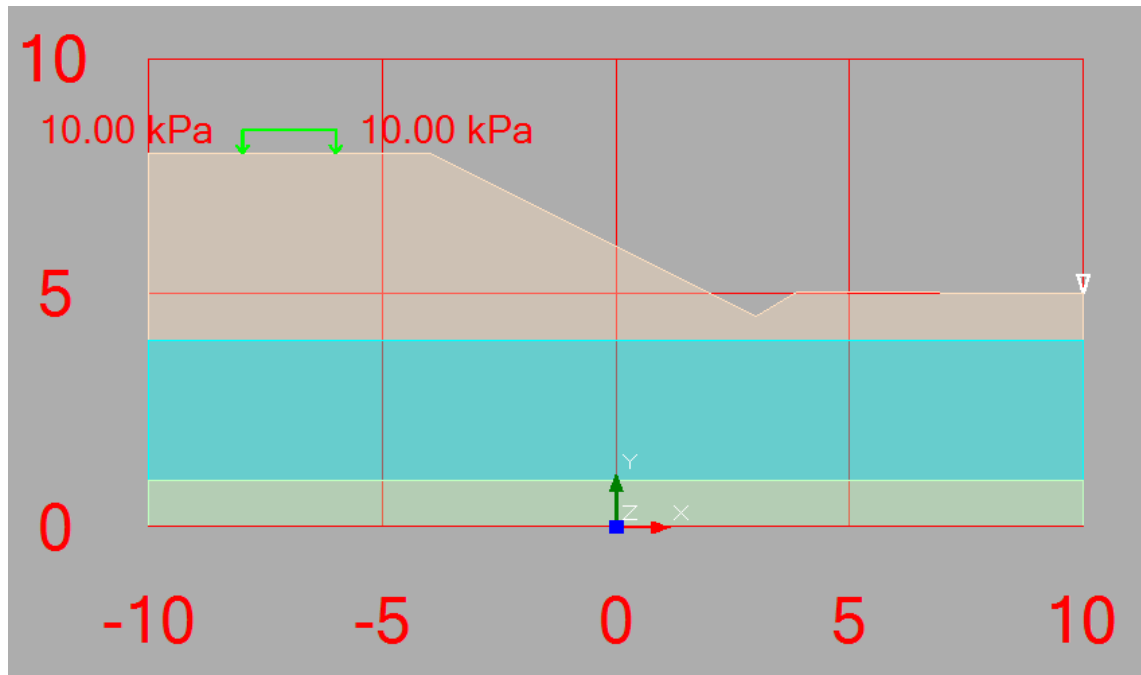
6.1 Lähtötilanne ja laskentaparametrit

Laskentaa ennen tulee hankkia tarvittavat pohjatutkimustiedot, joista maaparametrit voidaan määrittää. Tässä esimerkissä arvot ovat kuvitteellisia. Lyhytaikainen tilanne lasketaan suljetussa tilassa ja pitkäaikainen tilanne avoimessa tilassa. Laskentaesimerkin maaparametrit on ilmoitettu taulukossa 9. Soralle ja siltille ei anneta suljetun leikkauslujuuden arvoa, vaan niiden lujuus määritetään tehokkaiden lujuusparametrien avulla. Tässä esimerkissä saven suljettu leikkauslujuus kasvaa syvyyden suhteen.

Taulukko 9. Maaparametrit vertailulaskentaan

	γ	γ_{sat}	s_u	Δs_u	c'	ϕ'
Sora	20	20			0	39
Savi	15	15	15	1	0	15
Siltti	18	18			0	30

Kuvassa 7 on esitetty esimerkkilaskennassa käytettävä poikkileikkaus. Poikkileikkaus kuvaa kuvitteellista tiepengertä. Poikkileikkauksessa maalajit esiintyvät samassa järjestyksessä kuin taulukossa 9. Luiskan vasemmalle puolelle on määritetty kuorma, joka kuvastaa muuttuvaa kuormaa. Koordinaatiston mittayksikkönä on metri. Laskenta suoritetaan kolmella liukupinnalla, joiden oletetaan olevan ympyrän kaaren muotoisia.



Kuva 7. Laskentaesimerkin poikkileikkaus

6.2 CSA S6-19:n mukainen stabiliteettilaskenta

CSA S6-19:n mukaisesti maan kestävyyskohennetaan varmuuskerroin, joka on murtorajatilaa laskettaessa $\Psi\phi_{gu}$. Koska GeoCalc ohjelmaan ei ole tehty sisäistä työkalua varmuuskertoimien sijoittamiseen yhtälöihin, GeoCalc-ohjelmasta saatu laskentatulokset kerrotaan vielä erikseen kertoimella $\Psi\phi_{gu}$. Laskettua stabiliteettia voidaan tämän jälkeen verrata:

$$1 \leq \frac{\Psi\phi_{gu} R_u}{\sum_i a_{ui} F_{ui}} \quad (14)$$

Koska esimerkki on hyvin yksinkertainen eikä seuraamusluokkaa ole erikseen määritetty, tyypillinen seuraamusluokka vastaa parhaiten tilanteen luonnetta. Seuraamuskerroin valitaan taulukosta 4 seuraamusluokan CC2 mukaan, ja se saa arvon 1.0.

Murtorajatilan maankestävyyden varmuuskerroin ϕ_{gu} valitaan taulukon 5 mukaan, jossa murtoajatilan tarkastelua varten on määritetty kertoimet lyhytaikaiselle stabiliteetille (Global stability temporary) ja pitkäaikaiselle stabiliteetille (Global stability permanent). Laskenta suoritetaan kaikilla taulukossa 5 esitetyillä ϕ_{gu} -kertoimilla, jotka kuvaavat maaperäolosuhteiden tuntemusta.

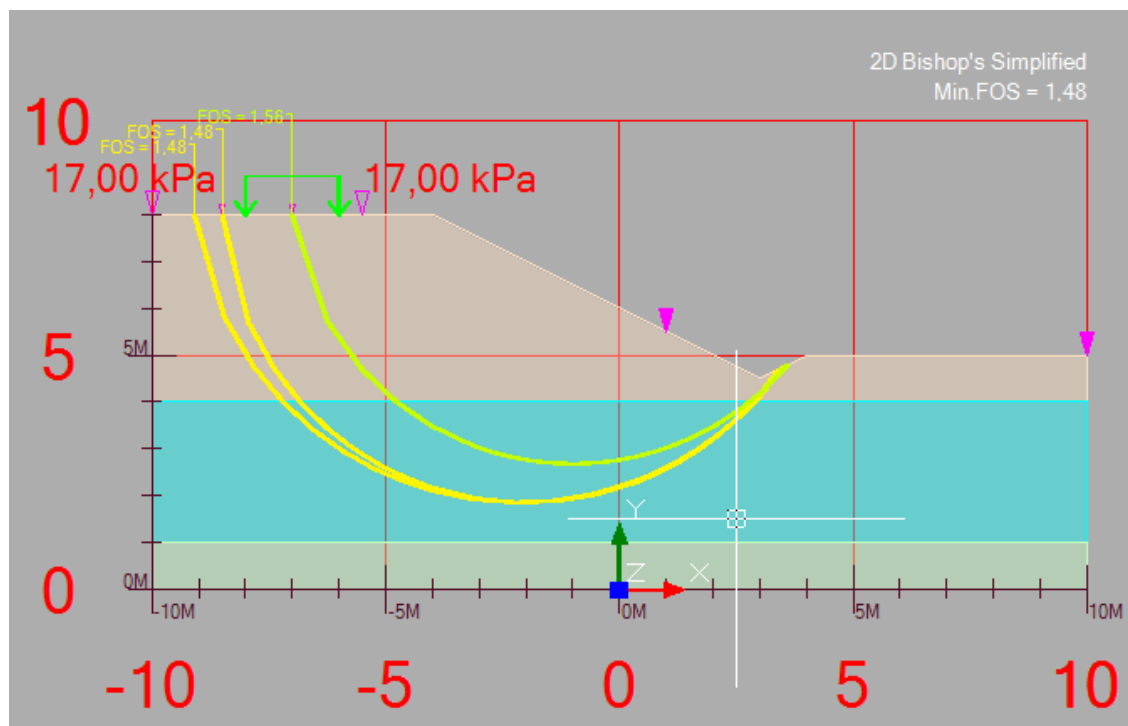
Kaatavia kuormia esimerkin tilanteessa ovat luiskan päällä vaikuttava muuttuva kuorma ja maan painosta aiheutuva kuorma. Murtoajatilan kuormitusyhdistelmäksi voidaan valita yhdistelmä 1 taulukosta 1. Tämä yhdistelmä ottaa huomioon maanpainosta aiheutuvan kuorman ja muuttuvan kuorman.

Maanpainosta aiheutuva kuorma on pysyvä kuorma, ja sen määrittämiseen käytetään taulukon 2 kohtaa "Earth fill". Koska CSA S6-19:n mukainen ohje antaa suunnittelijalle vapauden valita arvot tietyltä väliltä, arvoksi valitaan 1.0, joka vastaa Eurokoodin mukaista kuormitusyhdistelmän varmuuskerrointa maanpainosta aiheutuvalla epäedulliselle kuormalle.

Muuttuva kuorma oletetaan liikennekuormaksi, jonka arvo määritetään taulukosta 3. Oletetaan, että liikennöinti on normaalia tässä esimerkissä, ja se saa arvon 1.7.

6.2.1 Lyhytaikainen stabiliteetti suljetun leikkauslujuuden avulla

Lyhytaikaisessa laskennassa saven lujuus lasketaan suljetun leikkauslujuuden avulla. Maankestävyyden kerroin ϕ_{gu} ja seuraamuskerroin Ψ sijoitetaan GeoCalc-ohjelmistolla laskettuun tulokseen laskennan jälkeen, koska niiden sijoittaminen laskentaohjelmistoon on haastavaa. Laskentatulokset on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. CSA S6-19:n mukaisella mitoitustavalla laskettu lyhytaikainen stabiliteetti.

Esimerkin tilanteessa CSA S6-19:n mukaisilla arvoilla stabiliteetiksi saatiin 1.48 kuvan 8 mukaisesti. Laskenta suoritetaan kaikilla kolmella murtorajatilan $\Psi\phi_{gu}$ -kertoimella, ja laskentatulokset on esitetty taulukossa 10.

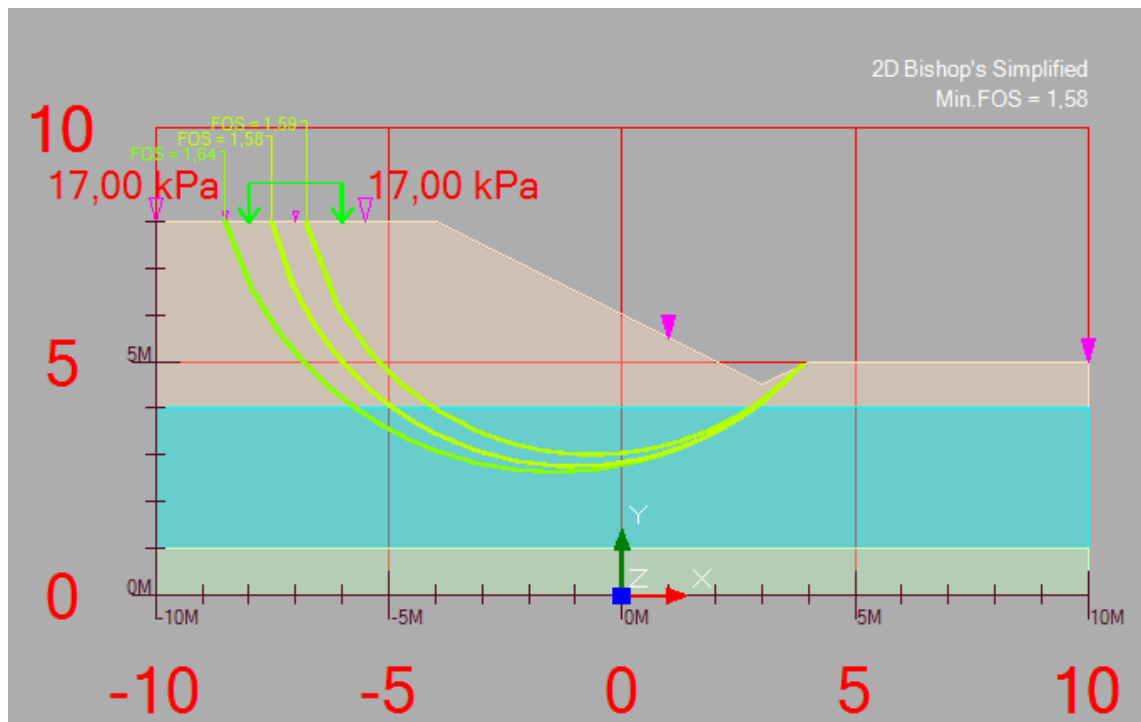
Taulukko 10. Lyhytaikainen stabiileetti eri $\Psi\phi_{gu}$ -varmuuskertoimilla.

Pohjaolosuhteiden tuntemus	Lyhytaikainen stabiileetti	
	Varmuuskerroin $\Psi\phi_{gu}$	Stabiileetti
Vähäinen	0,70	1,04
Tavallinen	0,75	1,11
Korkea	0,80	1,18

Kaikki laskentatulokset ylittävät vertailuarvon 1,0, ja voidaan todeta, että stabiileetti on riittävä kaikilla kertoimilla. Pohjaolosuhteiden tuntemuksen taso vaikuttaa tässä laskelmassa noin 0,07 varmuusyksikön verran. Koska kaikki arvot ylittävät vertailuarvon 1, ei pohjaolosuhteiden tuntemuksen tasolla ole merkitystä rakenteen hyväksymisen kannalta.

6.2.2 Pitkäaikainen stabiileetti tehokkailla jännityksillä

Pitkäaikaisen tilanteen avoimen tilan laskemiseen saven parametrit muutetaan tehokkaiksi parametreiksi taulukon 9 arvojen mukaisiksi. Myös pitkäaikaisessa tilanteessa maankestävyyden kerroin ϕ_{gu} ja seuraamuskerroin Ψ sijoitetaan GeoCalc-ohjelmistolla laskettuun tulokseen vasta laskennan jälkeen. Laskennan tulos on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. CSA S6-19:n mukaisella mitoitusavalla laskettu pitkäaikainen stabiileetti.

Kuvasta 9 pienimmäksi varmuudeksi saatiin 1.58. Myös pitkäaikainen stabiliteetti kerrotaan murtorajatilan $\Psi\phi_{gu}$ -kertoimilla, mikä on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Pitkäaikaisen stabiliteetin vertailuarvot eri ϕ_{gu} -kertoimilla.

Pohjaolosuhteiden tuntemus	Pitkäaikainen stabiliteetti	
	Varmuuskerroin $\Psi\phi$	Stabiliteetti
Vähäinen	0,60	0,95
Tavallinen	0,65	1,03
Korkea	0,70	1,11

Taulukosta 11 nähdään, että varmuusero pohjaolosuhteiden tuntemuksen tasojen välillä on noin 0,08 varmuusyksikköä. Pohjaolosuhteiden tuntemuksen tason ollessa vähäinen rakenne ei ole enää hyväksyttävä, vaan rakenne vaatii vahvistusta. Tavallisella ja korkealla tasolla rakenne on vielä hyväksyttävällä tasolla.

6.3 Eurokoodi 7:n mukainen stabiliteettilaskenta

Eurokoodi 7:n mukaisessa osavarmuusmenetelmässä maa- ja kuormaparametrit kerrotaan suoraan annetuilla osavarmuuskertoimilla. Eurokoodin mukaisessa stabiliteettilaskennassa stabiliteetin vertailuarvo saadaan:

$$1 \leq \frac{R_d}{E_d}. \quad (15)$$

Maaparametrien osavarmuuskertoimet ovat taulukossa 7. Kuormitusyhdistelmä luiskan stabiliteettilaskennassa on yhtälön 13 mukainen kuormitusyhdistelmä

$$1,0K_{FI}G_{kj,sup} + 1,0G_{kj,inf} + 1,3K_{FI}Q_{k,1} + 1,3K_{FI}\Psi_{0,i}Q_{k,i}. \quad (16)$$

Esimerkin tilanteessa on edullisia ja epäedullisia pysyviä kuormia sekä epäedullisia muuttuvia kuormia, mutta samanaikaisia muuttuvia kuormia ei ole, joten kuormitusyhdistelmäksi saadaan:

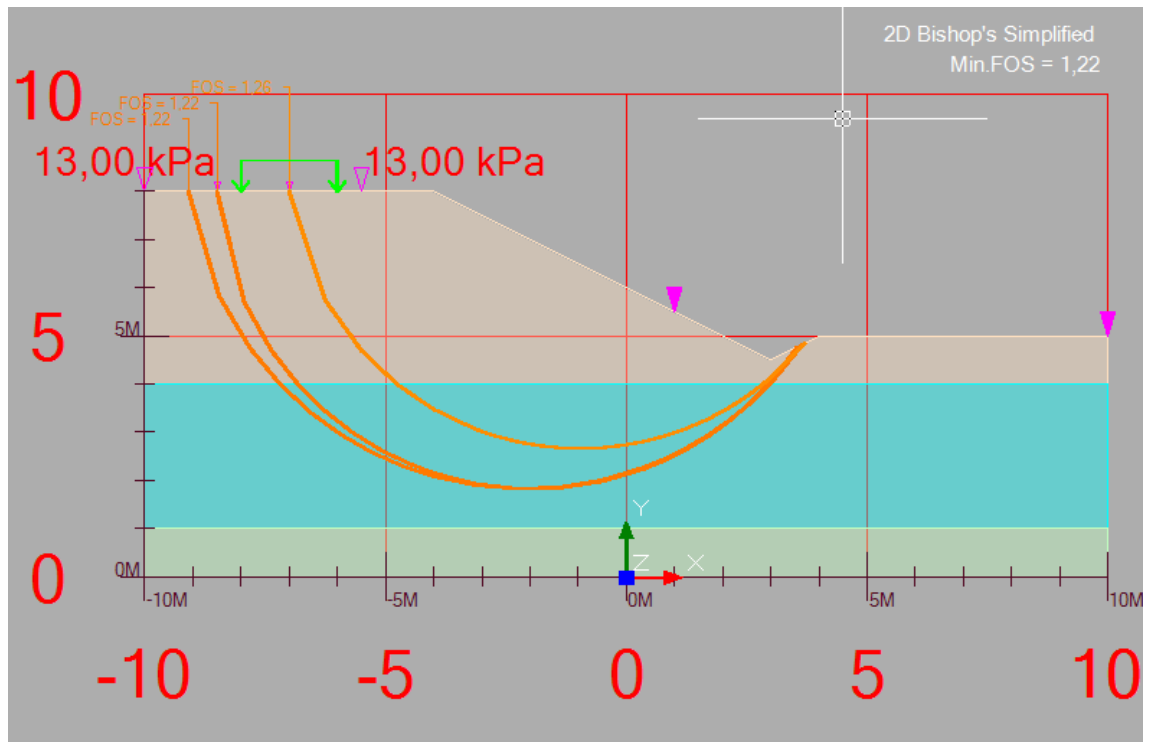
$$1,0K_{FI}G_{kj,sup} + 1,0G_{kj,inf} + 1,3K_{FI}Q_{k,1} \quad (17)$$

Luotettavuusluokaksi valitaan RC2, jossa K_{FI} saa arvon 1.0. Luotettavuusluokka RC2 vastaa samaa seuraamusluokkaa, jota CSA S6-19 laskentaesimerkissä käytettiin.

6.3.1 Lyhytaikainen stabiliteetti suljetun leikkauslujuuden avulla

Maaparametrit jaetaan taulukon 6 mukaisilla osavarmuuskertoimilla ja syötetään laskentaohjelmaan. Maanpainosta aiheutuvan kuorman varmuus voitaisiin ottaa huomioon ker-

tomalla maanpaine, mutta pysyvän kuorman varmuuskertoimien ollessa 1,0 ja luotettavuusluokan K_{FI} arvon ollessa 1,0, sillä ei ole vaikutusta laskentaan eikä sitä tarvitse ottaa laskennassa huomioon.

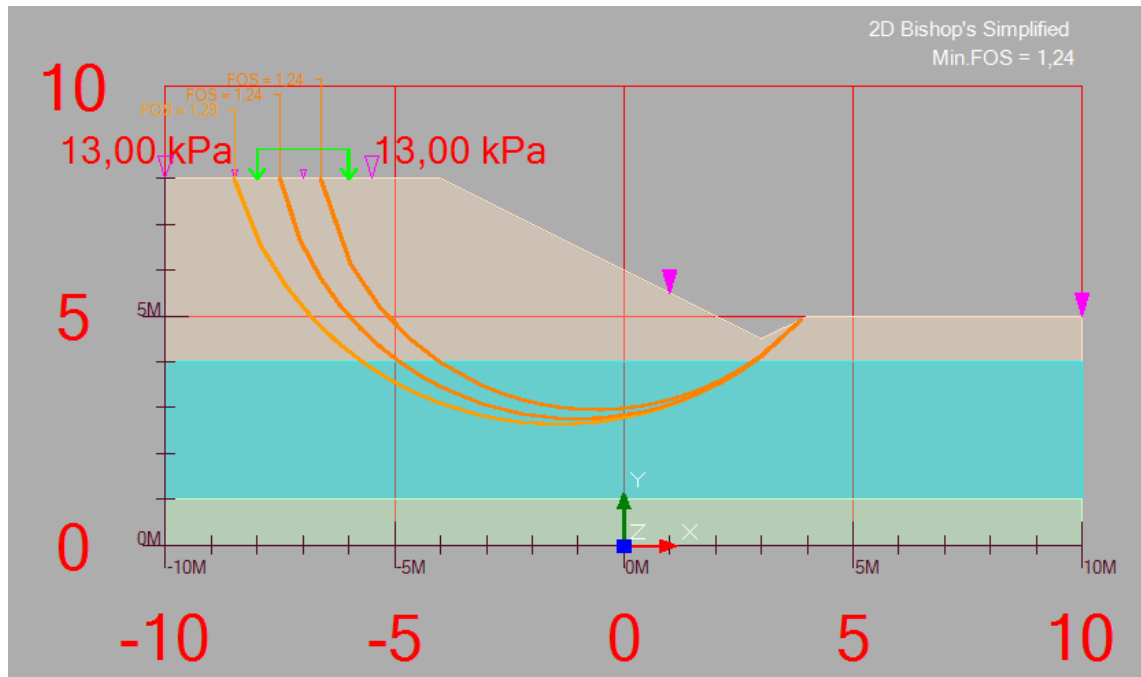


Kuva 10. Eurokoodin mukaisella mitoitustavalla laskettu lyhytaikainen stabiliteetti.

Kuvassa 10 on esitetty lyhytaikaisen stabiliteetin laskennan tulokset Eurokoodi 7:n mukaisesti. Pienimmäksi stabiliteetiksi saatiin 1,22, joka ylittää tavoitearvon 1,0. Lyhytaikaisessa tilanteessa stabiliteetti on riittävä Eurokoodi 7:n mukaisesti.

6.3.2 Pitkäaikainen stabiliteetti tehokkailla jännityksillä

Saven materiaaliparametrit muutetaan tehokkaiksi parametreiksi, ja ne jaetaan tehokkaan koheesion ja kitkakulman varmuuskertoimilla. Muut maaparametrien arvot pysyvät samana kuin lyhytaikaisessa tilanteessa. Kuvassa 11 on esitetty laskennan tulos.



Kuva 11. Eurokoodin mukaisella mitoitustavalla laskettu pitkäaikainen stabiliteetti.

Kuvassa 11 laskettu stabiliteetti 1,24 on riittävä. Voidaan siis todeta, että rakenne on hyväksyttävä lyhyt- ja pitkäaikaisessa tilanteessa.

6.4 Laskentatulosten vertailu

Taulukossa 12 on esitetty kummankin ohjeen mukaiset vertailulaskennan tulokset. Lyhytaikaisessa suljetun tilan laskennassa Eurokoodi 7:n mukainen laskentatulos 1,22 oli huomattavasti suurempi kuin yksikään CSA S6-19:n mukainen laskentatulos. Näkökulmasta riippuen Eurokoodi 7:n alimitoitti rakenteen tai CSA S6-19 ylimitoitti rakenteen.

Taulukko 12. Vertailulaskennan tulokset taulukossa.

Lyhytaikainen stabiliteetti		
Pohjaolosuhteiden tuntemus	CSA S6-19	Eurokoodi 7
Vähäinen	1,04	
Tavallinen	1,11	1,22
Korkea	1,18	
Pitkäaikainen stabiliteetti		
Pohjaolosuhteiden tuntemus	CSA S6-19	Eurokoodi 7
Vähäinen	0,95	
Tavallinen	1,03	1,24
Korkea	1,11	

Ero laskentatuloksessa syntyi varmuuskertoimien suuruusvaihtelun takia eri ohjeiden välillä. Laskennassa merkittävämpänä erona oli CSA S6-19:n mukaisessa laskennassa oleva muuttuvien kuormien varmuuskerroin 1,70, joka oli huomattavasti suurempi kuin Eurokoodi 7:n mukainen muuttuvien kuormien varmuuskerroin 1,30. Eurokoodi 7:n mukainen suljetun leikkauslujuuden varmuuskerroin 1,40, joka periaatteessa vastaa suljetun tilan laskennassa maan kestävyyskerrointa 0,71, vastasi CSA S6-19:n mukaista pohjaolosuhteiden tuntemuksen tasoa ”Vähäinen” lyhytaikaista tilannetta laskettaessa. Eurokoodi 7:n mukainen stabiliteetti oli kuitenkin suurempi jokaisessa tilanteessa, koska muuttuvan kuorman varmuuskerroin oli huomattavasti pienempi kuin CSA S6-19:n mukaisessa laskennassa.

Pitkäaikaisessa tilanteessa tehokkailla jännityksillä laskettaessa on otettava huomioon, että lasketut tulokset eivät ole täysin vertailukelpoiset, koska CSA S6-19:n mukaisessa laskennassa laskenta on tehty ominaisarvoilla ja varmuus on kohdennettu ominaisarvoilla laskettuun tulokseen. Eurokoodi 7:n mukaisessa laskennassa laskenta on tehty mitoitusarvoilla, jolloin maan lujuusparametreihin kohdennetulla varmuudella on epälineaarinen vaikutus. Tässä vertailussa vaikutuksen oletetaan olevan pieni, joten vertailu voidaan tehdä lasketuilla arvoilla. Pitkäaikaista stabiliteettia laskettaessa avoimessa tilassa Eurokoodi 7:n mukainen varmuus 1,24 oli huomattavasti suurempi kuin yksikään CSA S6-19:n mukaisessa laskennassa olevista arvoista. Suuri ero johtuu siitä, että muuttuvien kuormien varmuuskertoimet pysyivät samana lyhytaikaiseen tilanteeseen nähden, mutta CSA S6-19:n mukaisten maan kestävyyskerroimien vaikutus kasvoi, joka kasvatti CSA S6-19:n mukaista varmuutta. Eurokoodi 7:n mukaisessa osavarmuusmenetelmässä saven kitkakulma sai varmuuskertoimen 1,25, joka on huomattavasti pienempi kuin suljetun leikkauslujuuden kerroin 1,40. Tehokkailla jännityksillä laskettaessa Eurokoodi 7:n mukaisesti maan lujuuteen kohdennettiin vähemmän varmuutta kuin suljetun tilan laskennassa. Huomattavasti pienempi kitkakulman varmuuskerroin johtuu siitä, että kitkakulma pystytään määrittämään yleensä tarkemmin kuin suljettu leikkauslujuus.

Laskentatulosten perusteella Eurokoodi 7 antoi kummassakin tilanteessa huomattavasti suuremman varmuuden kuin yksikään CSA S6-19:n mukainen laskenta. Mitoitusmenetelmien suurimpana erona on kummassakin tapauksessa muuttuvien kuormien varmuuslukujen suuruus, joka vaikuttaa merkittävästi laskentaan. Toisena suurena erona on maan kestävyyskerroin kohdentuva varmuus. Lyhytaikaista tilannetta laskettaessa Eurokoodi 7:n mukainen suljetun leikkauslujuuden varmuus vastaa CSA S6-19:n mukaista maan kestävyyskerrointa pohjaolosuhteiden tuntemuksen ollessa vähäinen, ja pohjaolosuhteiden tuntemuksen ollessa tavallisella tai korkealla tasolla, CSA S6-19 antaa

pienemmän varmuuden maan kestävyydelle kuin Eurokoodi 7. Pitkäaikaisessa avoimen tilan laskennassa Eurokoodi 7 antaa pienemmän varmuuden maan kestävyydelle tehokaiden lujuusparametrien kautta kuin CSA S6-19.

7. YHTEENVETO

CSA S6-19:n mukaisen ja Eurokoodi 7:n mukaisen stabiliteetilaskennan merkittävimpänä erona ovat niissä käytetyt mitoitusstavat. Eurokoodi 7:n mukainen osavarmuusmenettely antaa maaparametreille omat varmuuskertoimet, minkä ansiosta eri maaparametrien vaikutusta painotetaan laskennassa. CSA S6-19:n mukaisessa Load and Resistance Factor Design -menetelmässä (LRFD) maan kestävyys kerrotaan seuraamusluokalla Ψ ja maankestävyyden varmuuskertoimella ϕ , jonka takia vakauttavien voimien maaparametreja ei erikseen painoteta, toisin kuin Eurokoodi 7:n mukaisessa osavarmuusmenettelyssä. Vaikka varmuuskertoimella ϕ ei voida painottaa eri maaparametreja, kerroin antaa mahdollisuuden painottaa maan kestävyteen kohdistuvaa varmuutta maaperäolosuhteiden tuntemuksen perusteella. Yksittäisen maankestävyyden varmuuskertoimen haasteena on se, että sen tarvitsee ottaa kaikkien maaparametrien epävarmuus huomioon. Tämä ei välttämättä anna täysin tarkkaa kuvaa varmuudesta, joka maahan tulee kohdentaa, kun taas osavarmuusmenetelmässä maaparametreihin voidaan kohdentaa varmuutta. Painottaminen tuo esimerkiksi etuja suljetulla leikkauslujuudella ja tehokkailla jännityksillä laskettaessa, koska kitkakulman määrittäminen on huomattavasti tarkempaa kuin suljetun leikkauslujuuden. Yksittäisen maankestävyyden varmuuskertoimen suurimpana etuna on sen helppokäyttöisyys laskennassa.

Vaikka CSA S6-19 tarjoaa epätarkemman tavan kuvata maan kestävyttä, CSA S6-19 mahdollistaa kuormien varmuuden painottamisen tarkemmin. CSA S6-19:n mukaisessa LRFD-menetelmässä on määritetty minimi- ja maksimiarvot eri kuormatyyppien varmuuskertoimille. Ohjeessa luotetaan suunnittelijan kykyyn arvioida realistiset varmuuskertoimet tietyltä välillä eri kuormille. Eurokoodi 7:ssä ja CSA S6:ssa on määritetty useampia kuormitusyhdistelmiä, mutta suurena erona menetelmissä on kuormitusyhdistelmien kertoimien määrittäminen. Eurokoodi 7:ssä on määritetty vakio arvot kuormien varmuuskertoimille, toisin kuin CSA S6-19 mukaisessa ohjeessa. CSA S6-19 -ohjeessa joillekin kuormille on annettu vakio osavarmuusluvut, mutta niissä on kuitenkin useita kuormia, joille suunnittelijan tulee itse määrittää varmuuskertoimet, mikä tekee kuormien painottamisesta monipuolisempaa kuin Eurokoodissa. Osaavan suunnittelijan käsissä CSA S6-19 on kuormien varmuuden määrittämisen suhteen tarkempi, mutta kokemattomalle suunnittelijalle CSA S6-19 mukainen mitoitus tapa voi olla haastava ja optimaaliseen tulokseen suunnittelussa ei välttämättä päästä. Eurokoodi 7:n mukainen kuormien mitoitus tapa on huomattavasti yksinkertaisempi ja helpompi kokemattomalle suunnittelijalle.

Laskennassa CSA S6-19 sai kolme varmuutta kummassakin tilanteessa. Varmuuksia oli 3, koska työn tarkoituksena oli verrata Eurokoodi 7:n mukaista laskentaa kaikkiin kolmeen CSA S6-19:n mitoitusmenetelmän mukaiseen tilanteeseen eri pohjaolosuhteiden tuntemuksen tasolla. Varmuuksien erot olivat noin 0,07-0,08 varmuusyksikköä eri pohjaolosuhteiden tuntemuksen tasojen välillä. Erot pohjaolosuhteiden tuntemusten välillä ovat merkittävät, ja etenkin tilanteissa, joissa stabiliteetti on lähellä arvoa 1,0, on tärkeää määrittää pohjaolosuhteet tarkasti.

Vertailulaskennan perusteella mitoitusmenetelmissä on eroja. Eurokoodi 7:n mukainen laskenta tarjosi kummassakin tilanteessa huomattavasti suuremman varmuuden kuin yksikään CSA S6-19:n mukainen laskenta. Vaikka mitoitusmenetelmät olivat erilaisia, mitoitusmenetelmistä pystyi havaitsemaan, että CSA S6-19 antoi enemmän painoarvoa muuttuvien kuormien epävarmuudelle kuin Eurokoodi 7:n mukainen ohje. Pitkäaikaisessa tilanteen avoimen tilan laskennassa Eurokoodi 7:n mukainen mitoitusmenetelmä antoi pienemmät osavarmuusluvut maan kestävyydelle ja kuormille, mikä johti siihen, että Eurokoodi 7:n mukainen mitoitus antoi tässä tilanteessa huomattavasti suuremman stabiliteetin vertailulaskennassa.

Vertailulaskennan tilanteessa on huomioitava, että tilanne on hyvin yksinkertainen, eikä se anna täysin luotettavaa kuvaa mitoitusapojen välisistä eroista jokaisessa tilanteessa, mutta työssä esitettyjen varmuuskertoimien perusteella etenkin muuttuviin kuormiin kohdennetaan huomattavasti suurempia varmuuksia CSA S6-19:n mukaisessa mitoituksessa kuin Eurokoodi 7:n mukaisessa mitoituksessa. Etenkin rakennuskohteissa, joissa kuormat ovat suuria, on todennäköistä, että Eurokoodi 7:n mukaisen mitoitusmenetelmän laskenta antaa suuremman stabiliteetin, kuin CSA S6-19 mukainen laskenta. Avoimen tilan laskennassa Eurokoodi 7 antaa suuremman stabiliteetin, mutta suljetun tilan laskennassa CSA S6-19 voi antaa suuremman stabiliteetin, kun kuormitukset ovat hyvin pieniä ja pohjaolosuhteiden tuntemus on tavallisella tai korkealla tasolla. Mitoitusmenetelmien edullisuutta vertaillessa on kuitenkin arvioitava, että vaikka toinen menetelmä antaisikin suuremman stabiliteetin, onko tulos välttämättä luotettava ja antaako menetelmä riittävän varmuuden todellisuudessa. Etenkin maaparametreja ja niiden varmuuksia määrittäessä on hyvä miettiä, ovatko pohjatutkimukset tarpeeksi laajat ja luotettavat, jotta voidaan käyttää Eurokoodi 7:n mukaisia varmuuslukuja luotettavasti.

Mitoitusmenetelmät ovat erilaisia, mutta myös ohjeiden väliset erot varmuuslukujen suuruudessa ovat suuria, mikä vaikuttaa laskentaan. Eurokoodi 7 voisi hyötyä mitoitusmenetelmän monipuolisuuden lisäämisestä. CSA S6-19:n mukaisessa mitoitusmenetelmässä suunnittelijalle annetaan mahdollisuus valita itse varmuuslukuja tietyiltä väliltä, Eurokoodi 7:ään voisi lisätä samanlaisen ominaisuuden. Varmuuslukujen joustavuus

voisi mahdollistaa rakenteiden tarkemman ja edullisemmän mitoituksen etenkin kokeineilla suunnittelijoilla. Pohjaolosuhteiden tuntemuksen kertoimet Eurokoodi 7:ssä toisivat myös monipuolisuutta suunnitteluun ja kannustaisivat laajempien pohjatutkimusten tekoon. Paremmat pohjatutkimukset auttaisivat suunnittelun onnistumisessa ja kevyempien rakenteiden toteuttamisessa.

Voidaan todeta, että Eurokoodi 7:n mukainen ohje antaa tarkemman kuvan maaparametrien vaikutuksesta stabiliteettiin kuin CSA S6-19, mutta CSA S6-19 antaa suunnittelijalle suuremman vapauden arvioida eri kuormatyyppien vaikutusta stabiliteettiin kuin Eurokoodi 7:n mukaiset kuormitusyhdistelmät. Riippuen suunnittelijasta ja suunnittelu-kohteesta lopputulos voi olla edullisempi tai epäedullisempi.

LÄHTEET

Bond, A.J., Scruppener, B., Scarpelli, G. & Orr, T.L.L. 2013. Eurocode 7: Geotechnical Design Worked examples, JRC Scientific and policy reports, Muokkaajat: Silcia Dimova, Borislava Nikolova & Arthur V. Pinto. Saatavissa (viitattu 14/2/2022): https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2013_06_WS_GEO/report/2013_06_WS_GEO.pdf

Civilpoint Oy (2020). GeoCalc 4.2. Yleiskuvaus. Saatavissa (viitattu 28.12.2020): <https://civilpoint.fi/tiedostot/geocalc-4-2/>

Craig R.F (2004). Craig's Soil Mechanics. Seventh edition. CRC Press

CSA S6-19 (2019). Canadian highway bridge design code. Canadian standards association.

EN 1990:2002+A1 (2002). Eurocode. Basis of structural design. The European Committee for Standardization.

EN 1997-1 (2004). Geotechnical design. Part 1: General rules. The European Committee for Standardization.

Hietanen, R. (2020) Romahdusvaarassa olevan talon pelastamiseksi löytymässä ratkaisu. Rakennuslehti. Kirjoittaja: Manninen, M. (2020). Saatavissa (viitattu 27.12.2020): <https://www.rakennuslehti.fi/2020/02/romahdusvaarassa-olevan-talon-pelastamiseksi-loytymassa-ratkaisu/>

Jussila, H. (2019). Siltojen tulopenkereiden 2D- ja 3D-stabiiliteetilaskentamenetelmien vertailu. Oulun yliopisto.

Liikennevirasto (2013). Osavarmuus- ja kokonaisvarmuusmenettelyn vaikutus vanhojen kriittisten ratapenkereiden laskennalliseen varmuustasoon. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 51/2013. Helsinki. Saatavissa (viitattu 27.12.2020): https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2013-51_osavarmuus_ja_web.pdf

Liikennevirasto (2017). Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet 21.4.2017. Liikenneviraston ohjeita 13/2017. Helsinki. Saatavissa (viitattu 14/2/2022): https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-13_ncci7_web.pdf

Liikennevirasto (2018). Penkereiden stabiiliteetin laskentaohje. Liikenneviraston ohjeita 14/2018. Helsinki. Saatavissa (viitattu 28/12/2020): https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-14_penkereiden_stabiiliteetin_web.pdf

Manninen, M. (2020). Romahdusvaarassa olevan talon pelastamiseksi löytymässä ratkaisu. Rakennuslehti. Saatavissa (viitattu 27.12.2020): <https://www.rakennuslehti.fi/2020/02/romahdusvaarassa-olevan-talon-pelastamiseksi-loytymassa-ratkaisu/>

Ympäristöministeriö (2007). Ympäristöministeriön asetus Eurocode -standardien soveltamisesta talonrakentamisessa. Helsinki. Saatavissa (viitattu 27.12.2020): <https://docplayer.fi/121229-Kansallinen-liite-standardiin-sfs-en-1990-eurokoodi-rakenteiden-suunnitteluperusteet.html>

Ympäristöministeriö (2018). SFS-EN 1997-1. Rakenteiden lujuus ja vakavuus: Pohjarakenteiden suunnittelu. Helsinki. Saatavissa (14/2/2022): <https://www.ymparisto.fi/download/numero/7B687245F6-C824-413F-BB52-7A9DF0EDC210%7D/137126>