

Janita Nousiainen

TUKISEINÄN MITOITTAMINEN KANADAN MITOITUSOHJEEN CSA S6-19 MUKAISESTI

Vertailu eurokoodin SFS-EN 1997-1 mukaiseen mitoitukseen

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Mika Knuuti
05 2020

TIIVISTELMÄ

Janita Nousiainen: Tukiseinän mitoittaminen Kanadan mitoitusohjeen CSA S6-19 mukaisesti. Vertailu eurokoodin SFS-EN 1997-1 mukaiseen mitoitukseen.

Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
05 2020

Tukiseiniä käytetään useimmiten kaivantojen tukemiseen ja niiden avulla kaivanto vie vähemmän tilaa. Työn tavoitteena on selvittää tukiseinien mitoituksen eroja kanadalaisten ja suomalaisten mitoitusohjeiden välillä. Suomessa tukiseinien mitoitus perustuu eurokoodeihin ja Kanadassa Canadian highway bridge design codeen (CSA S6-19). Eurokoodeissa käytetään osavarmuuslukumenetelmää, kun taas Kanadassa käytetään mitoitusmenetelmänä load and resistance factor design method -menetelmää. Suomessa tukiseinät mitoitetaan eurokoodin 7 (SFS-EN 1997-1) mukaisella mitoitustavalla DA2* (design approach 2*). Tukiseinätyyppejä on useita, mutta Suomessa käytetään eniten teräsponttiseiniä, joten tässä työssä vertaillaan niiden mitoitusta.

Tämä työ jakaantui kahteen osaan. Teoriaosassa käsiteltiin mitoituksessa tarvittava teoria mukaan lukien maanpaineteoriat. Lisäksi esiteltiin erilaisia tukiseinän tuentatapoja ja molempien valtioiden mitoitusohjeet. Laskentaosassa tukiseinän lyöntisyvyys laskettiin käsin ja varsinaiset mitoituslaskelmat tehtiin Civilpointin Geocalc-ohjelmalla. Mitoituksessa käytettiin Coulombin maanpaineteoriaa ja keskityttiin murtorajatilamitoitukseen. Laskentaosassa mitoitettiin tyypiesimerkiseinä Suomen ja Kanadan mitoitusohjeilla.

Tutkimuksen perusteella kanadalaisessa mitoitusohjeessa on lisätty luotettavuuteen perustuvaa mitoitusta, jonka avulla pohjaolosuhteiden vaihtelevuus voidaan huomioida mitoituksessa eurokoodeja tehokkaammin. CSA S6-19 mukainen mitoitus oli hieman suoraviivaisempaa suomalaisen verrattuna, koska laskenta voitiin tehdä yhden kerran ja tulosten luotettavuus oli arvioitavissa lähtötietojen luotettavuuden luokan avulla. Suomessa eurokoodin 7 mukaisessa mitoituksessa jouduttiin tarkistamaan kaksi erilaista kuormitusyhdistelmää. Osavarmuuslukumenetelmällä saavutetaan riittävä varmuus tukiseinien mitoituksessa, mutta se ei huomioi lähtötietojen hajontaa, koska osavarmuusluvut ovat vakioita. Mitoitusehto on kuitenkin hyvin samankaltainen sekä eurokoodeissa että kanadalaisessa ohjeessa ja molemmat ottavat huomioon seurausten tason. CSA S6-19 mukaisessa laskennassa on etuna lähtötietojen luotettavuuden luokittelu. Korkeammassa luotettavuusluokassa voidaan käyttää pienempiä kestävyden pienennyskertoimia, jolloin on mahdollista säästää kokonaiskustannuksissa. Lähtötietojen luotettavuuden avulla kompensoidaan pohjaolosuhteiden vaihtelusta aiheutuvaa epävarmuutta paremmin kuin eurokoodeissa, jolloin mitoituksessa saavutetaan tasaisempi luotettavuus. CSA S6-19 mukaisessa mitoituksessa tukiseinän kokonaisvarmuus oli suurempi eurokoodien mukaiseen mitoitukseen verrattuna ja laskennassa päästiin lähemmäs seuraamusluokan mukaista tavoiteluotettavuutta.

Avainsanat: Canadian highway bridge design code, CSA S6-19, eurokoodi 7, tukiseinämitoitus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Janita Nousiainen: Retaining wall design according to Canadian regulation CSA S6-19.
Comparison to design according to eurocode SFS-EN 1997-1.

Bachelor's thesis
Tampere University
Civil engineering
05 2020

Retaining walls are mostly used for supporting construction excavations and therefore reducing the amount of space needed for construction sites. The aim of this thesis is to compare retaining wall design in Finland and in Canada. In Finland retaining wall design is based on design approach DA2* from Eurocode 7 whereas in Canada Canadian highway bridge design code (CSA S6-19) is used for design. CSA S6-19 utilizes load and resistance factor design method while eurocodes use partial factor design method. The most common type of retaining wall used in Finland is a sheet pile wall and therefore this thesis focused on designing sheet pile walls.

The thesis was divided into two parts. The first part presented the required theory including earth pressure theories. Additionally, the theory covered both Finnish and Canadian design codes. The second consists of comparative design calculation made in Geocalc.

Based on the results, CSA S6-19 has implemented reliability-based design which considers the variability of the site conditions more efficiently than the eurocodes. Design calculations done according to CSA S6-19 were more straightforward due to the use of single load combination, compared to the two required by Finnish standards. In addition, the reliability of CSA S6-19 design could be evaluated by the degree of site and prediction model understanding. The partial factor method used in eurocodes ensures satisfactory safety in design, but it does not consider the deviation of ground parameters, because the partial factors are constants. Nevertheless, both eurocodes and CSA S6-19 have similar design condition and take into account the level of consequences. The advantage of design according to CSA S6-19 is addressing different degrees of site and prediction model understanding. Smaller resistance factors can be used in higher degree of understanding and therefore the total project costs might be lower. The uncertainty caused by the variability of the site conditions can be compensated better than in the eurocodes by quantifying the level of understanding, thus making the reliability more precise. Higher level of confidence was achieved in the design compared to the eurocodes and the result was closer to the target level of reliability.

Keywords: Canadian highway bridge design code, CSA S6-19, Eurocode 7, retaining wall design

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEORIA	3
2.1 Tukiseinien mitoittaminen	3
2.2 Maanpaine	6
2.3 Coulombin maanpaineteoria	7
2.4 Rankinen maanpaineteoria	10
3. MITOITUSOHJEET	11
3.1 Eurokoodien mukainen mitoitus	11
3.1.1 Suunnitteluperusteet	11
3.1.2 Rajatilamitoitus	12
3.1.3 Kuormat	14
3.1.4 Mitoitusmenetelmät ja osavarmuusluvut	16
3.2 Kanadalaisen ohjeistuksen mukainen mitoitus	21
3.2.1 Luotettavuuteen perustuva mitoitus	21
3.2.2 Rajatilamitoitus	24
3.2.3 Kuormat	26
4. VERTAILULASKELMAT	27
YHTEENVETO	33
LÄHTEET	35

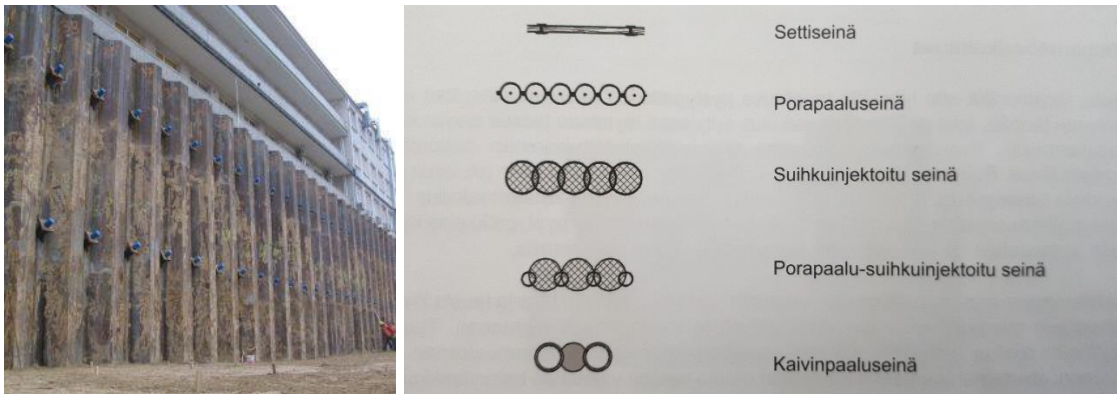
LYHENTEET JA MERKINNÄT

CHBDC DA2*	Canadian highway bridge design code, kanadalainen suunnitteluohjeistus Design approach 2*, eurokoodin 7 mukainen mitoitusmenetelmä, jossa laskelmat tehdään ominaisarvoilla ja lopuksi osavarmuudet kohdenne- taan kuormien vaikutuksiin sekä maan kestävyys- tila, jonka ylittämisen jälkeen rakenne ei enää täytä asianomaista mitoi- tuskriteeriä
rajatila	tila, jonka ylittämisen jälkeen rakenteelle asetetut käyttökelpoisuusvaati- mukset eivät enää täyty
murtorajatila käyttörajatila	sortumiseen tai vastaavaan rakenteen murtumiseen liittyvä tila tila, jonka ylittämisen jälkeen rakenteelle asetetut käyttökelpoisuusvaati- mukset eivät enää täyty
mitoitustilanne	todellisia olosuhteita tietyllä aikavälillä edustavat olosuhteet, joiden va- ralta suunnitelmassa on osoitettava, että kyseeseen tulevia rajatiloja ei yli- tetä
aktiivipaine	vaakasuuntainen tukiseinään kohdistuva maanpaine, kun seinän siirtymä poispäin tuettavasta maasta riittää mobilisoimaan maan lujuuden
passiivipaine lepopaine	vaakasuuntainen maanpaine, kun seinä siirtyy kohti tuettavaa maamassaa vaakasuuntainen maanpaine, joka kohdistuu liikumattomaan tukiraken- teeseen
LRFD-menetelmä	load and resistance factor design method, Kanadassa käytetty suunnitte- lumenetelmä, joka perustuu kuormien suurentamiseen ja kestävyyksien pienentämiseen
c'	tehokas koheesio
C	leikkausvoima
E_d	kuormien vaikutusten mitoitusarvo
F_d	kuorman mitoitusarvo
F_k	kuorman ominaisarvo
F_{rep}	kuorman edustava arvo
$G_{k,inf}$	pysyvän kuorman ominaisarvon alaraja
$G_{k,sup}$	pysyvän kuorman ominaisarvon yläaraja
K_a	aktiivimaanpainekerroin
K_{FI}	kuormakerroin, joka määräytyy seuraamusluokkien perusteella
K_p	passiivimaanpainekerroin
m	massa
ODF	ylimitoituskertoimen
P	maakiilan ja tukiseinän välisten voimien resultantti
p_a	aktiivimaanpaine
p_p	passiivimaanpaine
Q_k	kuorman ominaisarvo
R_d	kestävyyden mitoitusarvo
R_s	liukupinnalla vaikuttavien voimien resultantti
R_u	murtorajatilan kestävyys
T_a	tukiseinän ja maan välinen adheesiovoima
W	oma paino
Kreikkalaiset kirjaimet	
α_u	murtorajatilan kuormakerroin
α_s	käyttörajatilan kuormakerroin
β	taustatäytön pinnan ja vaakatason välinen kulma

γ_F	osavarmuusluku
γ_G	pysyvän kuorman osavarmuusluku
γ_P	esijännitysvoimien osavarmuusluku
γ_Q	muuttuvan kuorman osavarmuusluku
δ'	resultantin P kulma tukiseinän normaaliin nähden
θ	leikkausmurtumisen kulma suurimpaan pääjännitykseen nähden
ξ	tukiseinän ja vaakatason välinen kulma
σ_h'	alkutilan tehokas vaakajännitys
σ_v'	alkutilan tehokas pystyjännitys
τ_w	leikkausvoima
ϕ'	resultantin R_s kulma liukupinnan normaaliin nähden
ϕ'	tehokas kitkakulma
ϕ_{gu}	murtorajatilan kestävyyskerroin
ψ	muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
ψ	Kanadan ohjeessa seuraamuskerroin

1. JOHDANTO

Tukiseiniä käytetään pitämään maata jyrkemmässä luiskassa, kuin mihin se asettuisi ilman tukiseiniä. Niitä rakennetaan useimmiten kaivantojen seinämien tukemiseen, jos luiskatun kaivannon käyttäminen ei ole mahdollista. Tukiseinien avulla kaivannot vievät vähemmän tilaa ja työskentely helpottuu erityisesti kaupunkialueilla. Niitä voidaan rakentaa myös rinteessä kulkevan tien yhteyteen tai rakennusten pihuille. Kuva 1 havainnollistaa erilaisia tukiseinätyyppejä.



Kuva 1: Teräsponttiseinä (Aarsleff Group, 2019) ja eri tukiseinätyyppejä (RIL 263-2014)

Suomessa yleisimmin käytetty tukiseinätyyppi on teräsponttiseinä, joka on kuvassa 1 vasemmalla. Kuvassa 1 on esitetty erilaisia tukiseinätyyppejä oikealla. Kuvasta 1 voidaan havaita myös teräsponttiseinän ankkurointi. Tukiseinän tuentatapoja on useita. Se voi olla vapaasti seisova, tai se voi olla myös vähintään yhdeltä tasolta tuettu. Kuvan 1 ponttiseinä on tuettu kahdelta tasolta. Kaivantojen tukiseinien mitoittaminen tulee tehdä huolellisesti, jotta seinien siirtymät eivät aiheuta haittaa läheiselle infrastruktuurille ja kaivannossa on turvallista työskennellä. Tukiseinät voidaan jakaa myös käyttötarkoituksen perusteella väliaikaisiin ja pysyviin. Esimerkiksi kaivannoissa olevat ponttiseinät ovat väliaikaisia tukiseiniä, kun taas kellarikerroksen seinärakenteena toimiva tukiseinä on pysyvä tukiseinä.

Tässä työssä vertaillaan tukiseinien mitoittamista Suomessa ja Kanadassa. Teoriaosuus keskittyy kirjallisuustutkimukseen ja vertailulaskelmissa mallinnetaan tukiseiniä lasken-

taohjelman avulla. Tukiseinien mitoitus perustuu Suomessa eurokoodeihin ja osavar-
muuslukumenetelmään, kun taas Kanadassa voidaan käyttää Canadian highway bridge
design coden (CSA S6-19) mukaisia ohjearvoja ja load and resistance factor design -
menetelmää. Työn tavoitteena on vertailla Kanadan ohjeistuksen mukaista tukiseinien
mitoitusta suomalaisen ohjeistuksen mukaiseen mitoitukseen ja tutkia niiden välisiä
eroja. Vertailu kanadalaiseen ohjeistukseen on mielekästä, koska Kanadan ohjeistuk-
sessa on pyritty lisäämään luotettavuuteen perustuvaa mitoitusta, jota ei ole huomioitu
eurokoodeissa. Pohjatutkimuksien laatu ja määrä vaikuttavat Kanadassa ohjearvoihin
eri tavalla.

Työn laajuuden takia tukiseinien mitoituksessa käytetään vain Coulombin maanpaine-
teoriaa, mutta teoriaosuudessa esitellään lyhyesti myös Rankinen maanpaineteoria. Ver-
tailussa keskitytään tukiseinien mitoittamiseen, joten tukimuurit rajataan työn ulkopuo-
lelle. Laskentaosiossa keskitytään murtorajatilamitoittamiseen (STR ja GEO), mutta
käyttörajatila otetaan kuitenkin huomioon. Alueellista seismisyyttä ei huomioida. Vertai-
lulaskelmissa käsitellään väliaikaisia tukiseiniä ja tukiseinätyypeistä on valittu mitoitus-
seen teräsponttiseinä.

Tukiseinien mitoituslaskelmat toteutetaan Civilpointin GeoCalc-ohjelmalla. Laskenta-
esimerkeissä huomioidaan erilaiset pohjaolosuhteet mitoittamalla erilaisessa maape-
rässä olevia tukiseiniä. Ohjelmalla käsitellään tyyppiesimerkkiseinä suomalaisen ja ka-
nadalaisen ohjeistuksen mukaisesti.

Aluksi käsitellään tukiseinien mitoittamiseen liittyvää teoriaa, josta tärkeimmät osat ovat
tukirakenteen tyyppi ja siihen kohdistuvat kuormat sekä maanpaineteoria. Teoriaosuus-
dessa käydään läpi myös suomalaiset ja kanadalaiset mitoitusohjeet. Sekä eurokoo-
deissa että Canadian highway bridge design codessa on määritetty yleiset suunnittelu-
perusteet, kuormat ja tukiseinien mitoitusohjeet. Laskentaosiossa tehdään vertailulas-
kelmat kummankin ohjeistuksen mukaisesti ja tutkitaan saatujen tulosten eroja. Lopuksi
vertailun pohjalta tehdään johtopäätökset tukiseinien mitoituksesta.

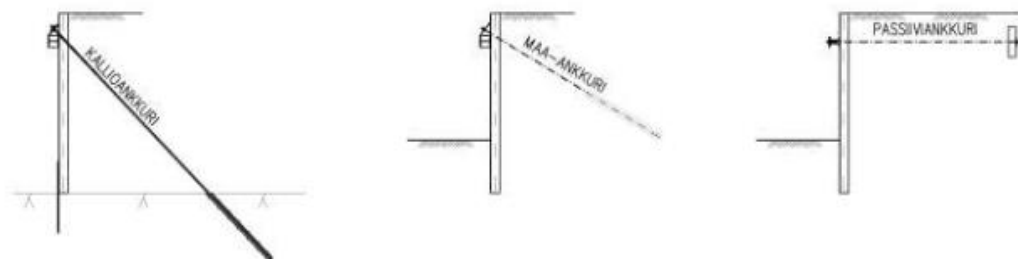
2. TEORIA

Tukirakenteiden mitoittamisessa on huomioitava rakenteen tyyppi ja rakenteeseen kohdistuvat kuormat. Tukiseinien mitoittamiseen vaikuttavat eniten maanpaine sekä joissakin tapauksissa vedenpaine. Mitoittamisessa on tarkasteltava valtiossa voimassa olevien mitoitusohjeiden perusteella erilaiset rajatilat ja rakenteiden mittatiedot.

2.1 Tukiseinien mitoittaminen

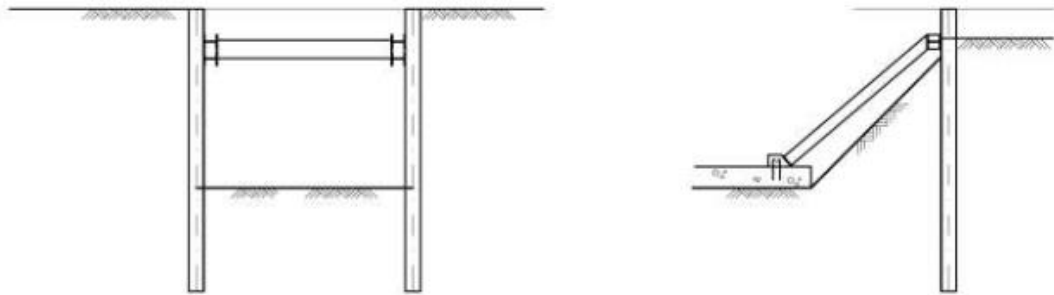
Tukirakenteiden mitoittaminen on erilaista erityyppisille rakenteille. RIL 207-2009 mukaan ne voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin, jotka ovat tukimuurit, upotetut seinät ja yhdistelmätukirakenteet. Tukimuurit ovat yleensä valmistettu kivistä tai betonista. Tukimuurien toiminta perustuu seinän omapainoon, ja niiden takana voi olla vakauttava taustatäyttö. Toinen päätyyppi on upotetut seinät, jotka ovat ohuempia kuin tukimuurit. Ne tuetaan yleensä passiivisella maanpaineella tai erilaisilla tuilla. Yleisin tukiseinätyyppi on teräsponttiseinä. Näiden kahden tyyppin seinien osista voidaan koota erilaisia yhdistelmätukirakenteita. (RIL 207-2009, s. 153) Vertailulaskelmissa tarkastellaan tukiseiniä.

Tukiseinät voivat olla vapaasti tuettuja, yhdeltä tasolta tuettuja tai useammalta tasolta tuettuja. Liikenneviraston (2011) mukaan vapaasti tuetut tukiseinät pysyvät paikoillaan vain maahan upotettuun osaan vaikuttavan passiivipaineen avulla. Vapaita tukiseiniä on mahdollista käyttää matalissa kaivannoissa, mutta ne eivät sovellu pysyviksi tukiseiniksi koheesiomaassa. (Liikennevirasto 2011, s.17) Tukiseinä voidaan tukea joko sisäisellä tuennalla tai ulkopuolisella tuennalla. Kaivanto-ohjeen (2014) mukaan ulkopuolisessa tuennassa käytetään yleensä vetoankkureita ja sisäpuolisessa tuennassa erilaisia puristusrakenteita. Kuvassa 2 on erilaisia ulkoisia tuentatapoja.



Kuva 2: Tukiseinän ulkoisia tuentatapoja (RIL 263-2014)

Kuvasta 2 voidaan havaita, että ulkopuolisessa tuennassa kaivannon puolelle ei tule suuria tukirakenteita, jolloin rakentamiselle on edelleen paljon tilaa. Lisäksi ulkopuolinen tuenta on teknisesti melko yksinkertainen verrattuna sisäiseen tuentaan, joten se soveltuu hyvin suurien kaivantojen tukiseiniin. Ulkopuolista tuentaa käytettäessä tukiseinä on helppo tukea monesta eri tasosta, joten sitä voidaan käyttää myös syvissä kaivannoissa. Ankkurointi tulee sijoittaa riittävän loivaan kulmaan, jotta tukiseinän alareunan pystykantavuus on riittävä. Tarvittaessa pystykantavuus on varmistettava paalutuksella tai kantavaan pohjaan ylettyvillä ponteilla. Ulkoista tuentaa käytettäessä on myös varmistettava, että tukiseinän jatkuva sortuma ei ole mahdollista. Jos yksi ankkuri murtuu, viereisten ankkureiden täytyy kestää niille siirtyvä kuormitus. Kuvassa 3 on esitetty erilaisia sisäisiä tuentatapoja.

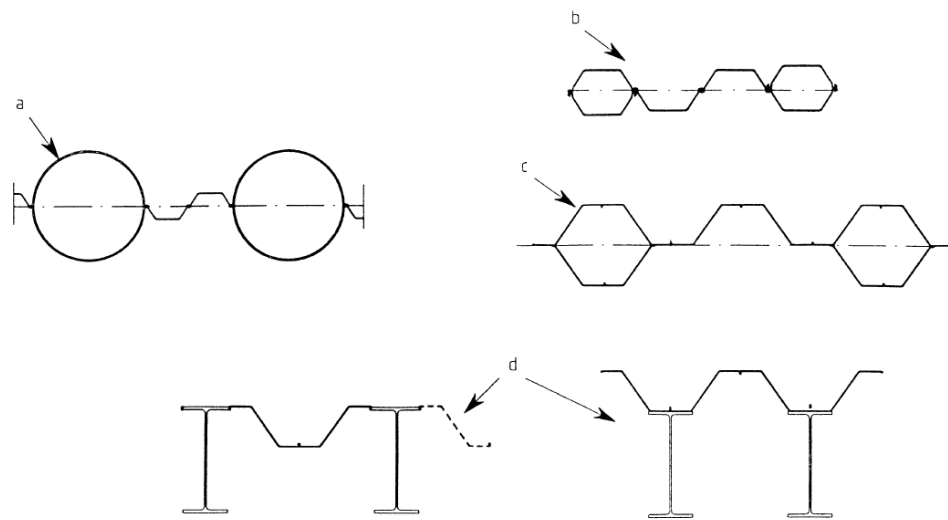


Kuva 3: Tukiseinän sisäisiä tuentatapoja (RIL 263-2014)

Kuvasta 3 nähdään vaakatuken sijoittuvan kaivannon sisäpuolelle, jolloin ne vaativat enemmän tilaa. Sisäinen tuenta on kuitenkin rakennuskustannuksiltaan edullisempi ulkoiseen tuentaan verrattuna. Se ei myöskään aiheuta tukiseinään pystysuuntaista rasitusta. Sisäpuolista tuentaa käytetään tyypillisesti putkikaivannoissa ja kaivannoissa, joissa ympäristöolosuhteet estävät ulkopuolisen tuennan rakentamisen. Sitä voidaan käyttää laajemminkin kaivannoissa, jos työvaiheistuksen suunnittelun avulla on varmistettu, että tukirakenteiden aiheuttama haitta pysyy kohtuullisena.

Tukiseinätyyppejä on useita, joista yleisin on teräsponttiseinä. Se koostuu maahan upotettavista teräsponteista, jotka kiinnittyvät toisiinsa lukkourien avulla. Teräsponttien poikkileikkausprofiileja on useita, mutta yleisimmät ovat U-profiili ja Z-profiili. U-profiilit saattavat luistaa toistensa suhteen, jos tukiseinä taipuu maanpaineen vaikutuksesta pehmeässä savessa tai löyhässä hiekassa. Taipumisen seurauksena tukiseinän jäykkyys pie-

nenee, mikä on huomioitava mitoituksessa. Teräsponttiseinä soveltuu monenlaisiin pohjaolosuhteisiin lukuun ottamatta lohkareista maaperää tai tiivistä kitkamaakerrosta. Lisäksi se on edullinen ja sen rakentaminen on nopeaa. Porapaaluseinä on toinen yleinen tukiseinätyyppi. Se muodostuu teräspaaluputkista, jotka liitetään yhteen putkien sivuille hitsatuilla lukkoprofiileilla. Paaluputket asennetaan poraamalla avarrinkruunulla. Porapaaluseinälle on helppo suunnitella halutut ominaisuudet vaihtelemalla paaluputken halkaisijaa, seinämäpaksuutta ja teräslaattaa. Paaluputki voidaan raudoittaa ja betonoida, joten sen jäykkyys ja pystykantavuus ovat suuria ja sitä voidaan käyttää myös kantavana pystyrakenteena. Porapaaluseinä soveltuu kaikenlaisiin pohjaolosuhteisiin. Sitä käytetään usein vaativissa kaivannoissa, joihin edullisemmat tukiseinätyypit eivät sovellu sekä kivisessä maaperässä. Kolmas tukiseinätyyppi on combi-seinä. Se koostuu teräsputki-paaluista, jotka on liitetty ponttiprofiileihin. Kuvassa 4 on erilaisia combi-seiniä.



Merkinnät

- a Putkia ja ja pontteja
- b U-kotelopaaluja ja U-pontteja
- c Z-kotelopaaluja ja Z-pontteja
- d H-palkkeja ja Z-pontteja

Kuva 4: Esimerkkejä combi-seinistä (SFS-EN 12063 1999)

Kuvasta 4 voidaan havaita, että combi-seinissä käytetään paljon U-profiileja ja Z-profiileja kuten teräsponttiseinissä. Teräspaalut toimivat kantavina rakenteina, joten combi-seinien jäykkyys on melko hyvä. Koska teräspontit ovat yleensä vedenpitäviä, combi-seiniä voidaan käyttää esimerkiksi satamarakenteissa. Tukiseinätyypin valintaan vaikuttavat kaivannon pohja- sekä ympäristöolosuhteet. Lisäksi valinnassa tulee huomioida tukiseinän käyttötarkoitus ja erilaisten tukiseinien erityispiirteet. Valinta voi perustua myös eri tukiseinätyyppien rakennuskustannuksiin ja tarvittavaan rakennusaikaan varsinkin tavanomaisissa pohjaolosuhteissa. Sen sijaan hankalissa pohja- ja ympäristöolosuhteissa

on kiinnitettävä enemmän huomiota tukiseinältä vaadittaviin erityisominaisuuksiin. (RIL 263-2014, s. 45–60)

Tukiseiniin kohdistuvista kuormista merkittävimmät ovat maanpaine ja tukiseinän taustatäyttömateriaalin paino. Muut tukiseinään kohdistuvat kuormat riippuvat rakentamispaikan olosuhteista. Eurokoodin 7 mukaan muita kuormia voivat olla erilaiset lisäkuormitukset, vedenpaine, aalto- ja jäävoimat, suotovirtausvoimat, törmäyskuormat tai lämpötilavaikutukset. Koska työssä tarkastellaan lähinnä väliaikaisia tukiseiniä, lisäkuormituk-
sia voisivat aiheuttaa esimerkiksi läheiset rakennukset tai erilaiset kulkuneuvot. (SFS-EN 1997-1 2014, s. 94) Väliaikaisia tukiseiniä ei kovin usein rakenneta vesistöjen läheisyyteen, joten aalto- ja jäävoimia ei tarvitse aina huomioida.

2.2 Maanpaine

Tukiseinien mitoittamisessa tulee ottaa maanpaineen lajeista huomioon aktiivipaine ja passiivipaine. Lepopainetta tarkastellaan yleensä vain massiivisten ja liikkumattomien tukimuurien mitoittamisessa. Maanpaine voi saada arvoja myös näiden kahden väliltä, joten aktiivi- ja passiivipaineen arvoja voidaan käsitellä raja-arvoina. Knappettin ja Craigin (2012) mukaan tukiseinän siirtyessä poispäin tuettavasta maasta vaakasuuntainen jännitys seinän takana pienenee ja seinän taakse mobilisoituu leikkausjännityksiä. Jos seinä liikkuu tarpeeksi, vaakajännitys saavuttaa minimiarvon, joka on aktiivipaineen arvo. Vastaavasti seinän siirtyessä tuettavaa maamassaa kohti vaakajännitys kasvaa suhteessa pystyjännitykseen ja lopulta se saavuttaa maksimiarvon. (Knappett & Craig 2012) Jos vaakajännitys laskee aktiivipainetta pienemmäksi, maa murtuu. Samalla tavalla passiivipaine on siis suurin vaakajännityksen arvo, jonka maa kestää murtumatta. Tukiseinän siirtymän täytyy olla passiivipaineen kehittymiseksi suurempi kuin aktiivipaineen kehittymiseksi, koska murtotilassa leikkausjännitysten suunta vaihtuu. Coulombin ja Rankinen maanpaineteorioiden avulla voidaan määrittää aktiivi- ja passiivipaineen suuruus.

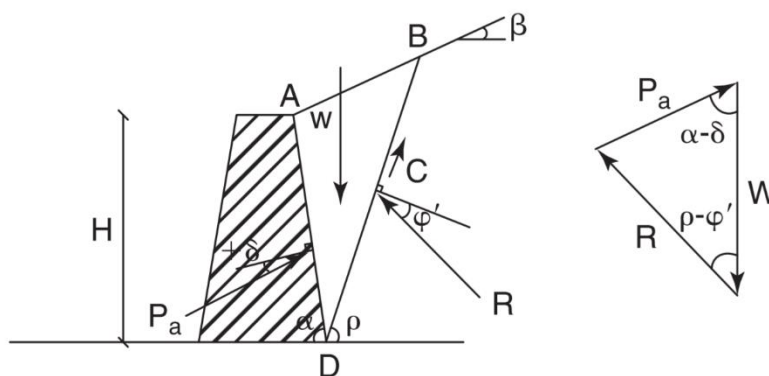
Maanpaineen laskennassa tulee ottaa huomioon veden vaikutus. Pohjaveden taso ja veden virtaustila aiheuttavat erilaiset vedenpaineet. Jos kaivannon pohjalla on heikosti vettä läpäiseviä maalajeja, mitoittamisessa tulee tarkastella nosteen vaikutus. Virtaava

vesi muuttaa maan tehokasta tilavuuspainoa, mikä tulee käsitellä maanpaineen määrittämisessä. Hydraulisen murtuman mahdollisuus tulee tarkastaa tukiseinän mitoittamisessa, jos vesi pääsee virtaamaan tukiseinän ali (RIL 263-2014, s. 89). Pakkaskaudella tuettava maamassa saattaa routia, mikä voi lisätä tukiseinän kuormituksia ja siirtymiä (RIL 263-2014, s. 79). Talvella rakennettavien tukiseinien ja pysyvien tukirakenteiden mitoituksessa on huomioitava erilaiset mitoitusarvot kuin pakkaskauden ulkopuolella. Tukiseinien taustatäytön suojaaminen jäätymiseltä on luotettavin tapa varmistaa tukiseinien toimiminen (RIL 263-2014, s. 79).

2.3 Coulombin maanpaineteoria

Coulombin maanpaineteoriassa tarkastellaan tukiseinän ja maan stabiliteettia. Knappett ja Craig (2012) esittävät, että laskennassa voidaan tarkastella tukiseinän takana olevaa kiilamaista maakappaletta. Kiilan ja tukiseinän välissä oleva voima määritetään kiilan voimatasapainon avulla, kun kiila on liukumaisillaan murtopintaa pitkin, jolloin kitka on rajoittava voima. Maakiilan ja seinän välinen kitka huomioidaan Coulombin teoriassa seinäkitkakulman δ avulla. Kun tukiseinä siirtyy, maa murtuu tarkasteltavan liukupinnan yläpuolella. Coulombin teoriaa käytettäessä on huomioitava, että se voi yliarvioida passiivipaineen suuruuden. Teoriassa ei ole huomioitu seinäkitkan aiheuttamaa murtopinnan kaareutumista. Jos seinäkitka on suuri, Coulombin teorian mukaisen passiivipaineen virhe on merkittävä.

Maakiilan vapaakappalekuva aktiivitapauksessa on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: Maakiila aktiivitapauksessa (Briaud 2013)

Kuvasta 5 nähdään, että aktiivitapauksessa maakiilaan vaikuttavat voimat ovat sen oma paino W , kiilan ja seinän välisten voimien resultantti P sekä liukupinnalla vaikuttavien

voimien resultantti R_s . Alkutilanteessa koheesio c' oletetaan nolaksi. Murtotilassa maakiila on siirtymässä tarkasteltavaa liukupintaa alaspäin, joten voima P vaikuttaa kulmassa δ' seinän normaalin alapuolella. Vastaavalla tavalla voima R_s vaikuttaa kulmassa ϕ' liukupinnan normaaliin nähden. Koska kaikkien kolmen voiman vaikutussuunnat ja maakiilan paino W tunnetaan, voidaan piirtää voimakolmio, josta saadaan ratkaistua voiman P suuruus tarkasteltavan liukupinnan tapauksessa. Laskenta tulisi toistaa useille eri liukupinnoille. Tarkastelemalla erimuotoisia maakiiloja saadaan selville resultantin P maksimiarvo, joka on siis aktiivimaanpaineen suurin arvo. Resultantille P voidaan kuitenkin kirjoittaa sinilauseen avulla yhtälö voimakolmiosta, jonka maksimiarvon voi etsiä matemaattisesti. Tällöin kuivassa maassa Coulombin aktiivimaanpainekertoimeksi K_a saadaan

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

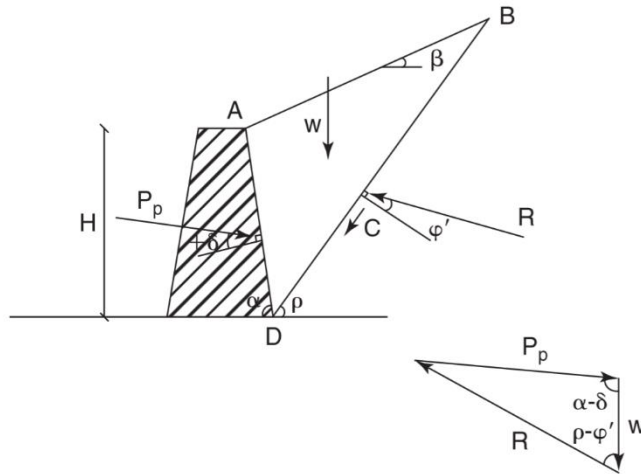
jossa ξ on tukiseinän ja vaakatason välinen kulma, ϕ' voiman R_s vaikutussuunta, δ' resultantin P vaikutussuunta sekä β taustatäytön pinnan ja vaakatason välinen kulma. Coulombin teoriassa ei ole määritelty resultanttivoiman P vaikutuskohtaa, mutta sen oletetaan sijaitsevan seinän korkeuden kolmasosan etäisyydellä tukiseinän pohjasta. Teoria ei myöskään määrittele maanpaineen jakaumaa tukiseinää vasten.

Coulombin teoriassa on huomioitu myös maalajit, joilla on koheesiot. Tällöin oletetaan, että maassa voi olla vetohalkeamia, jotka voivat ulottua syvyydelle z_0 . Liukupinta, jota pitkin maa voi murtua alkaa vasta tältä syvyydeltä ja päättyy tukiseinän pohjaan. Nyt maakiilaan vaikuttavia voimia on viisi. Maakappaleen paino W , aktiivipaineen resultantti P sekä liukupinnalla vaikuttava reaktivoima R_s vaikuttavat kiilaan edelleen. Lisäksi siihen vaikuttavat tukiseinän ja maan välinen adheesiovoima T_a sekä koheesioista aiheutuva leikkausvoima C liukupinnalla. Jokaisen voiman vaikutussuunta tiedetään. Koska maakiilan paino W sekä adheesiovoiman T_a ja leikkausvoiman C suuruudet ovat myös tunnettuja, voidaan piirtää voimamonikulmio. Siitä saadaan ratkaistua voiman P suuruus samalla tavalla kuin aktiivitapauksessa. Vastaavasti laskenta tulisi taas tehdä usealle eri liukupinnalle, mutta sinilauseen avulla saadaan yhtälö, jonka maksimiarvo voidaan ratkaista. Kaavan 1 aktiivimaanpainekertoimen avulla voidaan kirjoittaa uusi maanpainekerroin tilanteessa, jossa maalla on koheesiot. Tämä kerroin saadaan yhtälöstä

$$K_{ac} = 2 \sqrt{K_a \left(1 + \frac{\tau_w}{c'} \right)}, \quad (2)$$

jossa τ_w on leikkausvoima ja c' koheesio. Huokosvesi voi aiheuttaa lisävoiman liukupinnalle, jos maa on täysin vedellä kyllästynyt.

Passiivitapauksessa maakiilaan vaikuttavat samat voimat, kuin aktiivitapauksessa. Maakiilaan vaikuttavat voimat on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: Maakiila passiivitapauksessa (Briaud 2013)

Kuvasta 6 voidaan havaita, että resultantin P ja voiman R_s suunnat vaihtuvat, koska tukiseinä siirtyy eri suuntaan. Resultantti P on nyt kulmassa δ' seinän normaalin yläpuolella ja voima R_s kulmassa ϕ' liukupinnan normaalin yläpuolella. Voimakolmiosta saadaan jälleen sinilauseella yhtälö, jonka minimiarvo voidaan etsiä passiivipaineen arvon selvittämiseksi. Coulombin passiivimaanpainekerroin K_p lasketaan yhtälöstä

$$K_p = \left[\frac{\frac{\sin(\xi + \phi')}{\sin \xi}}{\sqrt{\sin(\xi - \delta') - \frac{\sin(\phi' + \delta') \sin(\phi' + \beta)}{\sin(\xi - \beta)}}} \right]^2, \quad (3)$$

jossa merkinnät vastaavat aktiivimaanpainekertoimen kaavan 1 merkintöjä. Myös passiivitapauksessa maanpainekerroin voidaan laskea maalle, jolla on koheesiota. Tällöin kerroin saadaan kaavalla

$$K_{pc} = 2 \sqrt{K_p \left(1 + \frac{\tau_w}{c'} \right)}, \quad (4)$$

jossa K_p on kaavan 3 passiivimaanpainekerroin. (Knappett & Craig 2012, s. 429–431)

2.4 Rankinen maanpaineteoria

Rankinen maanpaineteoria perustuu plastisuusteoriaan. Oletetaan, että tukiseinä on täysin sileää ja pystysuora. Knappettin ja Craigin (2012) mukaan koko maamassa on murto-tilassa, jos pääjännitykset ovat samansuuntaisia. Tuetun maamassan pinta oletetaan vaakasuoraksi. Leikkausmurtuminen tapahtuu tasossa, jonka kulma θ suurimpaan pääjännitykseen nähden saadaan kaavalla

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi'}{2}, \quad (5)$$

jossa ϕ' on tehokas kitkakulma. Alkutilanteessa pystyjännitys on $\sigma_1' = \sigma_v'$ ja vaakajännitys on $\sigma_3' = \sigma_h'$. Kun vaakajännitys pienenee, maa päätyy aktiivitapauksen murtotilaan. Tällöin vaakajännitys σ_h' vastaa aktiivimaanpainetta p_a , joka voidaan laskea yhtälöstä

$$p_a(z) = \sigma_h(z) = K_a \sigma_v'(z) - 2c' \sqrt{K_a} + u(z), \quad (6)$$

jossa K_a on aktiivimaanpainekerroin, σ_v' tehokas pystyjännitys ja c' koheesio. Passiivitapauksessa alkutilanteen jännitykset ovat samat. Kun vaakajännitys kasvaa, maa on lopulta passiivitapauksen murtotilassa. Nyt vaakajännitys vastaa passiivimaanpainetta p_p , joka saadaan yhtälöstä

$$p_p(z) = \sigma_h(z) = K_p \sigma_v'(z) + 2c' \sqrt{K_p} + u(z), \quad (7)$$

jossa K_p on passiivimaanpainekerroin. (Knappett & Craig 2012, s. 406–408)

3. MITOITUSOHJEET

Tukiseinien mitoittaminen perustuu Suomessa eurokoodeihin ja niiden pohjalta tehtyihin kansallisiin liitteisiin. Kanadassa voidaan käyttää Load and Resistance Factor Method mitoitusmenetelmää ja kansallista mitoitusohjetta Canadian highway bridge design codea.

3.1 Eurokoodien mukainen mitoitus

3.1.1 Suunnitteluperusteet

Tukiseinien mitoittaminen perustuu eurokoodiin 7 (SFS-EN 1997-1), joka käsittelee geoteknistä suunnittelua. Tärkeintä on tarkistaa, että eurokoodin 0 (SFS-EN 1990) mukaiset rajatilat eivät ylitä. Eurokoodi 0 käsittelee rakenteiden suunnitteluperusteita, joihin sisältyy rajatilamitoituksen perusteet ja varmuuden osoittaminen osavarmuuslukumenetelmällä. Eurokoodin 7 mukaan aluksi valitaan mitoittettavan rakenteen geotekninen luokka, jonka perusteella suunnitteluvaatimukset määräytyvät. Taulukossa 1 on kuvattu eri geotekniset luokat.

Taulukko 1: Geotekniset luokat (muokattu: RIL 207-2009)

Luokka	Vastaava vaatimusluokka	Kohteet
GL3	AA (erittäin vaativa)	erittäin suuret tai epätavalliset rakenteet, joihin liittyy poikkeavia riskejä tai vaikeita pohjaolosuhteita
GL2	A (vaativa)	tavanomaiset rakenteet, joiden yhteydessä voidaan käyttää rutiinimenetelmiä
GL1	B (helppo)	pienet ja yksinkertaiset rakenteet, joista ei aiheudu merkittävää riskiä

Kuten taulukosta 1 voidaan havaita, geoteknisiä luokkia on kolme, joista ensimmäiseen kuuluvat pienet ja yksinkertaiset rakenteet, kun taas kolmanteen luokkaan sisältyvät esimerkiksi poikkeuksellisen vaativissa pohjaolosuhteissa tehtävät rakenteet. Helppoissa ja

alhaisen riskin kohteissa voidaan käyttää yksinkertaistettuja mitoitusmenetelmiä. Geotekniset luokat vastaavat rakennusmääräyskokoelman osan A2 vaativuusluokkia helppo, vaativa ja erittäin vaativa. Tavallisesti luokka valitaan ennen geoteknisiä tutkimuksia ja se tarkistetaan rakennusprojektin edetessä. Taloudellisempien suunnitelmien perustelemiseksi voidaan käyttää korkeampien luokkien menetelmiä. Koko projektia ei tarvitse suunnitella korkeimmassa vaaditussa luokassa, vaan joissakin osissa voidaan käyttää erilaisia geoteknisiä luokkia. Mitoittamisessa tulee huomioida sekä lyhytaikaiset että pitkäaikaiset mitoitusilanteet. (RIL 207-2009, s. 29–33) Väliaikaisten tukiseinien rakentamisessa lyhytaikaiset mitoitusilanteet saattavat olla tärkeämpiä, koska tukiseinät eivät ole käytössä pitkään.

Eurokoodin 7 mukaan laskelmiin perustuvaan mitoittamiseen sisältyvät kuormat sekä maalajien ja muiden materiaalien ominaisuudet. Lisäksi mitoittamisessa tarvitaan tukiseinän mittatietoja sekä raja-arvot esimerkiksi muodonmuutoksille. Laskentamallit ovat myös olennainen osa mitoittamista. Pohjaolosuhteiden lähtötiedot riippuvat pohjatutkimusten laajuudesta ja laadusta. Geotekninen tietämys ja ammattitaito ovat laskentamallin tarkkuutta tärkeämpiä suunnittelun perusvaatimusten täyttymisen kannalta. Laskentamallin tulee kuvata maapohjan oletettua käyttäytymistä tarkasteltavassa rajatilassa ja sen täytyy olla joko tarkka tai varmallalla puolella. Mitoittamisessa huomioidaan muodonmuutosten yhteensopivuus rajatilassa. Jos joustavan tukiseinän rakenneosien ja maapohjan yhdistetty murtuma on mahdollinen, tukiseinän ja maapohjan suhteellinen jäykkyys analysoidaan tarkasti. Ankkureilla tuetuissa joustavissa tukiseinissä maanpaineiden suuruus ja jakauma, rakenteen sisäiset voimat ja taivutusmomentit riippuvat huomattavasti rakenteen jäykkyydestä, maan jäykkyydestä ja lujuudesta sekä maassa vallitsevasta jännitystilasta. (RIL 207-2009, s. 34–36)

3.1.2 Rajatilamitoitus

Tukiseinien mitoittamisessa käytetään rajatilamitoitusta, jonka perusteet on määritelty eurokoodissa 0. Sen perusteella murtorajatila ja käyttörajatila on tarkasteltava erikseen laskennassa. Rajatilat liitetään mitoitusilanteisiin, jotka voivat yleensä olla vallitsevia, tilapäisiä tai onnettomuusmitoitustilanteita. Ajasta riippuvia ilmiöitä, kuten rakenteiden väsymistä, koskevien rajatilojen tarkastelu liitetään osaksi rakenteen suunniteltua käyttöikä. Mitoitusilanteen valinnassa tulee huomioida olosuhteet, joissa tukiseinän edellytetään täyttävän tehtävänsä. Valittujen mitoitusilanteiden pitää olla riittävän vaihtelevia,

jotta ne kattavat kaikki tilanteet, joiden voidaan ennakoida esiintyvän tukiseinän rakentamisen ja käytön aikana. Eurokoodi 0 määrittelee, että kaikki ihmisten turvallisuuteen, tai rakenteiden varmuuteen liittyvät rajatilat luokitellaan murtorajatiloiksi. Yksinkertaisuuden vuoksi sortuman sijaan tarkastellaan rakenteen sortumista edeltäviä tiloja, jotka voidaan luokitella murtorajatiloiksi. Käyttörajatilaksi luokitellaan normaalioloissa olevan rakenteen toimintaan, ihmisten mukavuuteen ja rakennuskohteen ulkonäköön liittyvät rajatilat. (SFS-EN 1990 2006, s. 52–54)

Tukiseinien mitoitustarkasteluissa tulee yleensä tarkastella sekä murto- että käyttörajatilat, mutta tässä työssä laskelmissa keskitytään murtorajatilamitoitukseen. Mitoittamisessa on osoitettava, että pystysuuntainen tasapaino saavutetaan oletetuilla maanpainejakaumilla ja seinän kuormilla. Tämä on oleellista tukiseinän lyöntisyvyyden laskemisessa ja tasapaino voidaan tarkastaa pienentämällä tukiseinän kitkaparametrejä. Suunnittelun periaatteena on saada murtorajatilän lähestymisestä näkyvät merkit. Hauraan murtumisen, kuten äkillisen sortuman ei tulisi olla mahdollista ilman selvästi havaittavaa edeltävää muodonmuutosta. Usein kriittiseksi rajatilaksi luokitellaan seinän siirtyminen siten, että läheisille rakenteille tai toiminnoille aiheutuu vaurioita. Vaikka tukiseinä ei ole sortumassa, siirtymät voivat merkittävästi ylittää tuettavan rakenteen käyttörajatilän. Eurokoodin 7 mukainen mitoittaminen riittää tavallisesti estämään murtorajatilän esiintymisen, jos maalajit ovat vähintään keskitiiviitä tai lujia sopivia rakennusmenetelmiä käytettäessä. (RIL 207-2009, s. 45–46)

Eurokoodin 7 mukaan oleellisimpia murtorajatiloja on viisi. Niistä ensimmäinen on tukiseinän tai maapohjan tasapainotilan menettäminen, kun sitä tarkastellaan jäykkänä kapaleena, jossa rakennemateriaalien ja maapohjan lujuudet ovat merkityksettömiä kestävyden aikaansaamisessa. Tästä käytetään kansainvälisesti lyhennettä EQU. Toinen rajatila on tukiseinän tai sen osien sisäinen murtuminen tai liiallinen muodonmuutos. Tämän lyhenne on STR. Seuraava rajatila on rakennuspohjan murtuminen tai liiallinen muodonmuutos, joissa maan tai kallion lujuus on merkittävä kestävyden aikaansaamisessa. Lyhenteenä on GEO. Tämä rajatila on usein kriittinen tukiseinien rakenteellisten osien mittojen määrittämisessä. Yhden rajatilän muodostaa vedenpaineen aiheuttamasta nosteesta tai muista pystykuormista johtuva tukiseinän tai maapohjan tasapainotilan menettäminen. Tämän lyhenteeksi merkitään UPL. Viides rajatila on hydraulisten gradienttien aiheuttama maapohjan nousu, sisäinen eroosio ja sisäinen putkieroosio

maassa. Tämä on lyhennettynä HYD. (RIL 207-2009, s. 45–46) Tässä työssä näistä rajatiloista mitoittamislaskelmien kannalta tärkeimmät ovat GEO ja STR.

3.1.3 Kuormat

Eurokoodin 7 mukaan mitoittamisessa on huomioitava useita kuormiin sisällytettäviä tekijöitä ja mahdollisesti niiden yhdistelmiä. Peruskuormiin kuuluvat esimerkiksi maan, kalliion ja veden paino sekä jännitykset maapohjassa. Maanpaine, vapaan veden paine ja pohjaveden paine tulee myös ottaa huomioon. Suotovirtauksesta aiheutuvat voimat on käsiteltävä mitoittamisessa. Lisäksi rakenteiden aiheuttamat pysyvät ja hyötykuormat tulee huomioida. Pintakuormat ja maan kaivu tulisi tarkastella tarvittaessa. Kaikki kuormat sisältyvät eurokoodin 1 osaan 1. Epäedulliset kuormat ovat kaatavia kuormia ja edulliset kuormat tukirakennetta vakauttavia. Peruskuormien lisäksi mitoittamisessa voi olla oleellista tarkastella muitakin kuormia. (SFS-EN 1997-1 2014, s. 25–26)

Kuormat voidaan laskea standardin SFS-EN 1990 kansallisen liitteen mukaisilla kuormitusyhdistelmillä 6.10a ja 6.10b. Kuormitusyhdistelmien avulla pyritään huomioimaan pysyviin ja muuttuviin kuormiin liittyviä epävarmuuksia. Liikenneviraston (2016) ohjeen mukaisesti normaalisti vallitsevien ja tilapäisten mitoitustilanteiden laskennassa käytettävä kuormitusyhdistely on eurokoodin kaavan 6.10 perusteella

$$\Sigma \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P_p + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \quad (8)$$

jossa $\gamma_{G,j}$ on pysyvän kuorman osavarmuusluku, $G_{k,j}$ pysyvän kuorman ominaisarvo, γ_p esijännitysvoimien osavarmuusluku, P_p ankkuroinnin koe(veto)kuorma soveltuvuuskokeessa, γ_Q muuttuvan kuorman osavarmuusluku, Q_k muuttuvan kuorman ominaisarvo ja ψ_0 yhdistelykerroin (Liikennevirasto 2016, s. 25). Vaihtoehtoisesti STR tai GEO murtorajatiloissa kuormitusyhdistelyksi valitaan eurokoodin 7 kaavoista 6.10a ja 6.10b epäedullisempi

$$6.10a \quad 1,35 K_{FI} G_{k,sup} + 0,90 G_{k,inf}, \quad (9)$$

$$6.10b \quad 1,15 K_{FI} G_{k,sup} + 0,90 G_{k,inf} + 1,15 K_{FI} Q_{k,1} + 1,15 K_{FI} \Sigma \psi_{0,i} Q_{k,i}, \quad (10)$$

joissa K_{FI} on kuormakerroin, $G_{k,sup}$ pysyvän kuorman ominaisarvon yläraja ja $G_{k,inf}$ pysyvän kuorman ominaisarvon alaraja. (Liikennevirasto 2016, s. 46). Kaavoihin on sijoitettu valmiiksi mitoitusmenetelmän DA2* (design approach 2*) osavarmuusluvut. Kaavoissa 6.10a ja 6.10b yhdisteltävät kuormat ovat erilaisia. Kaavassa 8 eli eurokoodin kaavassa

6.10 pysyvästä sekä määräävästä muuttuvasta kuormasta käytetään niiden ominaisarvoja. Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat pienennetään yhdistelykertoimen $\psi_{0,1}$ avulla pitkäaikaisarvoiksi. Kaavassa 9 eli eurokoodin kaavassa 6.10a pysyvä kuorma huomioidaan ns. täytenä kuormana ja muuttuvia kuormia ei oteta huomioon. Kaavassa 10 eli eurokoodin kaavassa 6.10b pysyvän kuorman osavarmuutta on pienennetty kertoimella ξ . Määräävästä muuttuvasta kuormasta käytetään sen ominaisarvoa ja muut samanaikaiset muuttuvat kuormat on redusoitu yhdistelykertoimen $\psi_{0,1}$ avulla, kuten kaavassa 6.10. (Liikennevirasto 2016, s. 25–33)

Kuormien mitoitusarvot saadaan eurokoodin 7 mukaan arvioimalla suoraan tai laske-
malla ne edustavista arvoista käyttämällä kaavaa:

$$F_d = \gamma_F F_{rep} = \gamma_F \psi F_k, \quad (11)$$

jossa F_d on kuorman mitoitusarvo, γ_F osavarmuusluku, F_{rep} kuorman edustava arvo, ψ yhdistelykerroin ja F_k kuorman ominaisarvo. Kertoimen ψ arvot otetaan eurokoodin 0 kansallisesta liitteestä. Poikkeuksellisen suuren riskin tapauksissa tai epätavallisissa tai poikkeuksellisen vaikeissa pohja- tai kuormitusolosuhteissa käytetään kyseeseen tulevia kuorman osavarmuuslukuja $\gamma_G K_{FI}$ ja $\gamma_Q K_{FI}$. Taulukko 2 havainnollistaa seuraamusluokkia, joiden perusteella kuormakerroin K_{FI} sekä luotettavuusindeksi määräytyvät.

Taulukko 2: Eurokoodin 7 mukaiset seuraamusluokat ja luotettavuusindeksi (muokattu: RIL 207-2009)

Seuraamusluokka	Kuvaus	Kuormakerroin K_{FI}	Luotettavuusluokka	Luotettavuusindeksi β (50 v.)
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1,1	RC3	4,3
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1,0	RC2	3,8
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	0,9	RC1	3,3

Taulukosta 2 nähdään, että seuraamusluokkia on kolme. Ne selventävät kolmea luotettavuusluokkaa RC1, RC2 ja RC3. Niiden perusteella voidaan määrittellä luotettavuusindeksin β suositeltavat vähimmäisarvot 50 vuoden tarkastelujaksolla. Seuraamusluokkaan CC3 kuuluvat suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia. Tässä luokassa kuormakerroin K_{FI} saa arvon 1,1 ja luotettavuusindeksin suositeltava vähimmäisarvo on 4,3. Toinen luokka on CC2, johon sisältyvät keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetyksen tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia. Tässä luokassa kuormakertoimen arvo on 1,0 ja luotettavuusindeksin vähimmäisarvo 3,8. Kolmanteen luokkaan CC3 kuuluvat vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia. Kuormakertoimeksi määritetään 0,9 ja luotettavuusindeksin vähimmäisarvoksi 3,3. (RIL 207-2009, s. 41–42)

3.1.4 Mitoitusmenetelmät ja osavarmuusluvut

SFS-EN 1997-1 (2014) ja Liikenneviraston (2016) ohjeiden mukaisesti eurokoodissa on kolme erilaista mitoittamistapaa. Niissä käytetään erilaisia parametreille kohdennettavia

osavarmuuslukuja. Taulukossa 3 on esitetty, kuinka osavarmuusluvut kohdennetaan eri mitoitusmenetelmissä DA1, DA2 ja DA3.

Taulukko 3: Osavarmuuslukujen kohdentaminen eri mitoittamismenetelmissä (muokattu: Liikennevirasto 2016)

rakenne	DA1-1	DA1-2	DA2	DA3
tukiseinät	kuormat	materiaaliominaisuudet	kuormat (tai niiden vaikutukset) ja maan kestävyys	rakenteelliset kuormat ja materiaaliominaisuudet

Taulukosta 3 nähdään, että mitoitustavalle DA1 on kaksi eri osavarmuuslukujen yhdistelmää. Mitoitusmenetelmässä DA2 laskennalle on kaksi eri vaihtoehtoa. Valitusta mitoitustavasta riippumatta on tarkistettava, että mitoituskkestävyys on aina vähintään mitoitusrasitusten suuruinen. Mitoitusehto on eurokoodin 7 sovellusohjeen mukaan

$$ODF = \frac{R_d}{E_d} > 1,0, \quad (12)$$

jossa ODF on ylimitoituserroin, R_d mitoituskkestävyys ja E_d kuormien vaikutusten mitoitussarvo (Liikennevirasto 2017, s. 84).

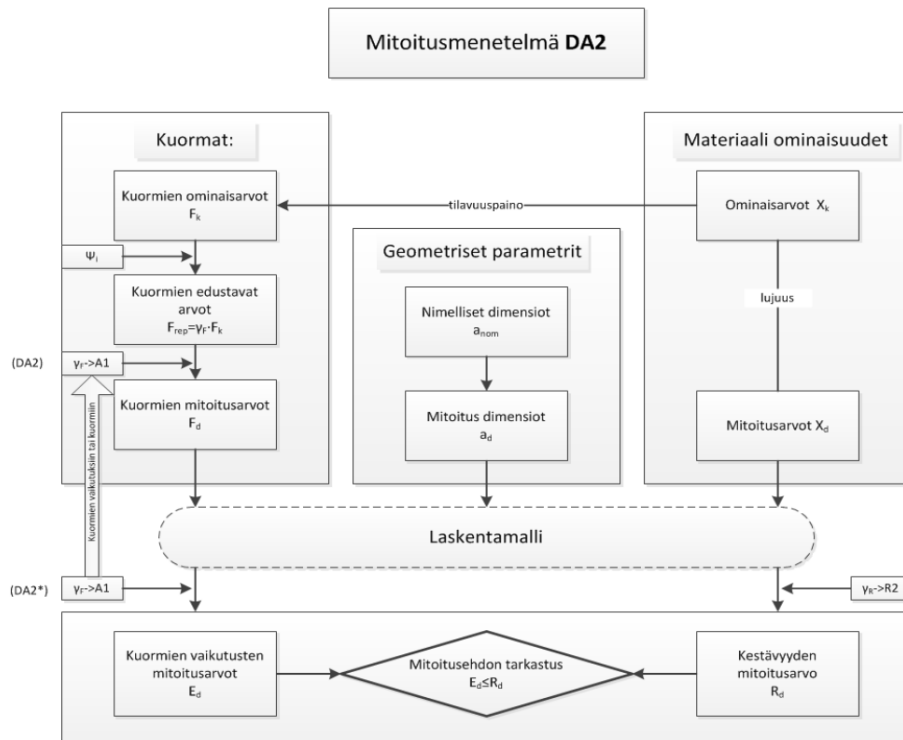
Mitoitustavassa DA1 käsitellään erikseen murtorajatila maassa (GEO) ja murtorajatila rakenteessa (STR). Tarvitaan kaksi eri osavarmuuslukujen yhdistelmää. Osavarmuudet kohdistetaan kuormien edustaviin arvoihin ja maan lujuusparametrien ominisarvoihin. Mitoitusmenetelmässä DA1-1 tarkastetaan murtorajatila rakenteessa ja osavarmuudet kohdennetaan kuormiin, tai niiden vaikutuksiin. Maan materiaali- ja lujuusparametreistä käytetään niiden ominisarvoja. Käytettävä osavarmuuslukujen yhdistelmä on A1'+M1'+R1. Kuormien osavarmuusluvut ovat ykköstä suurempia. Mitoitusmenetelmässä DA1-2 tarkastetaan murtorajatila maassa ja osavarmuusluvut kohdennetaan maan materiaali- ja lujuusparametrien ominisarvoihin sekä kuormien edustaviin arvoihin. Pysyvistä kuormista käytetään niiden ominisarvoja eli varovaista arviota kuormista. Muuttuville kuormille sallitaan pientä epävarmuutta käyttämällä pienempää osavarmuuslukua, kuin menetelmässä DA1-1. Tässä käytetään osavarmuuslukujen yhdistelmää A2'+M2'+R1. Mitoitustapauksen perusteella saadaan yleensä selville, kumpi kombinaatioista DA1-1 ja DA1-2 on määräävämpi. Tällöin ei välttämättä ole tarpeen tehdä täyttä laskentaa molemmille kombinaatioille. (Liikennevirasto 2016, s. 24–28)

Mitoittamistavassa DA2 käytetään yhtä osavarmuuslukujen yhdistelmää murtorajatilan tarkastamiseen maassa ja rakenteessa. Mitoitustavalle on kaksi erilaista vaihtoehtoa, jotka ovat DA2 ja DA2*. Mitoitustavassa DA2 osavarmuusluvut kohdennetaan kuormiin sekä maapohjan kestävyteen. Tällöin laskenta suoritetaan kuormien mitoitusarvoilla. Mitoitustavassa DA2* laskelmat tehdään ominaisarvoilla ja vasta lopuksi osavarmuudet kohdennetaan kuormien vaikutuksiin. Tällöin perustuksen vakavuuden varmistaminen tulee tehdä erityisen huolellisesti (RIL 207-2009, s. 53). Koska osavarmuusluvut kohdennetaan laskennan eri vaiheissa, menetelmällä saadaan erilaiset tulokset mitoituslaitteesta riippuen. Geotekniset ja rakenteelliset kuormat käsitellään samoilla osavarmuusluvuilla yhden osavarmuuslukukombinaation käyttämisen takia. Tässä menetelmässä käytetään osavarmuuslukukombinaatiota A1'+M1'+R2', jossa A1 on kuormien tai niiden vaikutusten osavarmuusluvut, M1 maaparametrien osavarmuusluvut ja R2 tukirakenteiden kestävyden osavarmuusluvut. (Liikennevirasto 2016, s. 30–31) Tässä työssä laskelmat tehdään mitoitusavalla DA2*. Taulukossa 4 on esitetty osavarmuusluvut menetelmää DA2* varten.

Taulukko 4: Osavarmuusluvut mitoitusmenetelmässä DA2* (muokattu: Liikennevirasto 2016)

				A1	M1	R2
Kuormat	pysyvät kuormat	epäedullinen	γ_G			
		6.10a		1,35 K_{FI}		
	6.10b		1,15 K_{FI}			
	edullinen	$\gamma_{G, fav}$	0,9 K_{FI}			
muuttuvat kuormat	epäedullinen	γ_Q	1,5 K_{FI}			
	edullinen	$\gamma_{Q, fav}$	0,0			
Maa	leikkauskestävyysskulma	γ_ϕ		1,0		
	tehokas koheesio	$\gamma_{c'}$		1,0		
	suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}		1,0		
	yksiakiaalinen puristusko	γ_{qu}		1,0		
	tilavuuspaino	γ_γ		1,0		
Tukiseinät	kantokestävyys	γ_{Rv}			1,4	
	liukumiskestävyys	γ_{Rh}			1,1	
	maan kestävyys	γ_{Re}			1,4	

Taulukosta 4 voidaan havaita, että kaikkien maaparametrien osavarmuusluvut ovat 1,0. Muuttuvien kuormien osavarmuusluvut suurentavat epäedullisten kuormien vaikutusta enemmän kuin pysyvien kuormien osavarmuusluvut. Kuvassa 7 on esitetty laskennan eteneminen menetelmässä DA2.



Kuva 7: Laskenta mitoitusmenetelmällä DA2 (Bond ja Harris 2008, Liikennevirasto 2017 mukaan)

Kuvasta 7 nähdään, että menetelmässä DA2* kuormien vaikutusten mitoitussarvot lasketaan osavarmuuslukujen avulla vasta ennen mitoitusehdon tarkastamista. Mitoitusehdossa vaaditaan, että kestävyysmitoitussarvo on suurempi kuin kuormien vaikutusten mitoitussarvot. Koska maaparametrien osavarmuusluvut eivät vaikuta parametrien suuruuteen, niitä ei ole huomioitu kuvassa 7.

Mitoitusmenetelmässä DA3 rakenteesta ja maasta tulevat kuormat käsitellään erikseen. Rakenteen aiheuttamille kuormille käytetään tavan DA2 mukaisia kuormien osavarmuuslukuja, jotka kohdennetaan kuormien edustaviin arvoihin. Maasta tulevien kuormien osavarmuusluvut kohdennetaan maan lujuusparametrien ominaisarvoihin. Laskennassa käytetään kuormien ja maan lujuuden mitoitussarvoja. Tässä mitoitustavassa käytetään osavarmuuslukuyhdistelmää $(A1 \text{ tai } A2) + M2 + R3$. Kuormien osavarmuusluku sarjaa A1 käytetään rakenteellisille kuormille ja sarjaa A2 geoteknisille kuormille. (Liikennevirasto 2016, s. 32–33) Taulukossa 5 on suositeltavat osavarmuusluvut eri mitoitusmenetelmille.

Taulukko 5: Osavarmuuslukuyhdistelmät eri mitoitusmenetelmille (muokattu: Liikennevirasto 2016)

				DA1-1			DA1-2			DA2			DA3			
				A1	M1	R1	A2	M2	R1	A1	M1	R2	A1	A2	M1	R3
Kuormat	pysyvät kuormat	epäedullinen	Y_G	1,35			1,0			1,35			1,35	1,00		
		edullinen	$Y_{G, fav}$	1,0			1,0			1,0			1,0	1,0		
	muuttuvat kuormat	epäedullinen	Y_Q	1,5			1,3			1,5			1,5	1,3		
		edullinen	$Y_{Q, fav}$	0,0			0,0			0,0			0,0	0,0		
Maa	leikkauskestävyysskulma	Y_ϕ		1,0			1,25			1,0				1,25		
	tehokas koheesio	Y_c		1,0			1,25			1,0				1,25		
	suljettu leikkauslujuus	Y_{cu}		1,0			1,4			1,0				1,4		
	yksiakiaalinen puristuskoe	Y_{qu}		1,0			1,4			1,0				1,4		
	tilavuuspaino	Y_γ		1,0			1,0			1,0				1,0		
Tukiseinät	kantokestävyys	Y_{Rv}			1,0			1,0			1,4				1,0	
	liukumiskestävyys	Y_{Rb}			1,0			1,0			1,1				1,0	
	maan kestävyys	Y_{Re}			1,0			1,0			1,4				1,0	

Taulukko 5 havainnollistaa menetelmän DA1 eri vaihtoehtoja ja osavarmuuslukujen kohdentamista eri mitoitusmenetelmissä.

3.2 Kanadalaisen ohjeistuksen mukainen mitoitus

3.2.1 Luotettavuuteen perustuva mitoitus

Kanadassa käytetään mitoitusmenetelmänä load and resistance factor design method -menetelmää (LRFD-menetelmä) yhdessä rajatilamitoituksen kanssa. Kanadan mitoitusohjeistusta CSA S6-19 eli Canadian highway bridge design codea on täydennetty luotettavuuteen perustuvan mitoituksen lisäämiseksi. Perinteisesti mitoituksessa on käytetty varmuuslukua F_s vastaamaan kaikista epävarmuuksista, vaikka se ei ota huomioon kestävyuden ja kuormien jakaumien hajontaa. Varmuusluku ei voi täsmällisesti kuvata geoteknisen rakenteen murtumisen todennäköisyyttä. Lisäksi epävarmuuksien lähteet eivät ole samanlaisia. Esimerkiksi muuttuvat kuormat ovat yleensä vähemmän varmoja kuin pysyvät kuormat. Nykyään suunnitteluohjeissa varmuusluku jaetaan osavarmuuslukuihin, jotka vastaavat yksittäisistä epävarmuutta aiheuttavista tekijöistä suunnittelussa. Mitoitusmenetelmä LRFD perustuu näiden kertoimien jakamiseen kahteen ryhmään, jotka ovat kuormakertoimet (load factors) ja kestävyuden pienennyskertoimet (resistance factors). Osavarmuusluvut liittyvät pelkästään suureeseen, johon ne on kohdistettu ja niitä käytetään muuttamaan ominaisarvoja siten, että rakenteen murtumisen kokonaistodennäköisyys on hyväksyttävän pieni. Käytännössä kuormia suurennetaan ja kestävyyskertoimia pienennetään, jotta lopulliset mitoitusarvot ovat tarpeeksi varovaisia. (Fenton, Naghibi, Dundas & Bathurst 2015, s. 2–3)

Kanadalainen ohjeistus CSA S6-19 (2019) määrittelee suunnitteluperusteet tukirakenteille hieman eri tavalla, kuin eurokoodit. Murto- ja käyttörajatilojen periaatteet ovat kuitenkin samat ja molemmat tulee tarkastella erikseen. Canadian highway bridge design code jakaa perinteisen varmuusluvun F_s kolmeen osaan kuormakertoimien, kestävyuden pienennyskertoimien ja seuraamuskertoimien avulla. Kuormakertoimet on taulukoitu ja ne valitaan kuormituksen perusteella. Kestävyuden pienennyskertoimet riippuvat rakennuspaikan maaperästä saatavilla olevien tietojen laajuudesta ja laskentamallista, koska ne määritellään laskentamallin ja pohjatutkimusten luotettavuuden (degree of site and prediction model understanding) avulla. Seuraamuserroin kuvaa rakenteen tärkeyttä. Sekä lähtötietojen luotettavuus että seuraamuskertoimet jaetaan kolmeen luokkaan.

Kanadalaisen ohjeistuksen CSA S6-19 (2019) mukaan seuraamuskerroin ψ riippuu rakenteen luokasta. Taulukossa 6 on esitetty seuraamuskerroin eri luokissa.

Taulukko 6: Seuraamuskerroin murto- ja käyttörajatiloissa sekä luotettavuusindeksi (muokattu: CSA S6-19 2019)

Seurauksien taso	Seuraamuskerroin ψ	Luotettavuusindeksi β murtorajatilassa
Korkea	0,9	3,7
Tavanomainen	1,0	3,5
Matala	1,15	3,1

Taulukosta 6 voidaan havaita, että rakenteet jaetaan kolmeen luokkaan rajatilojen ylittämisen seurausten tason perusteella. Seuraamusluokka määrää myös tavoiteltavan luotettavuusindeksin β . Ensimmäinen luokka on vakavien seurausten luokka ja siihen kuuluvat rakenteet, jotka ovat korvaamattomia onnettomuudesta tai katastrofista toipumiseen. Tähän luokkaan kuuluvat myös rakenteet, joiden yhteiskunnallinen tai taloudellinen merkitys on suuri. Kerroin ψ saa arvon 0,9 ja luotettavuusindeksi β arvon 3,7. Toisessa luokassa ovat tavanomaisia seurauksia aiheuttavat rakenteet mukaanluettuna sillat. Siihen kuuluvat rakenteet, jotka välittävät keskisuuria tai suuria liikennemääriä. Lisäksi tähän luokkaan sisältyvät rakenteet, jotka vaikuttavat vaihtoehtoisten reittien käyttämiseen. Tässä luokassa kerroin ψ saa arvon 1,0 ja luotettavuusindeksi arvon 3,5. Kolmannessa luokassa ovat vähäisiä seurauksia aiheuttavat rakenteet, joiden suunnittelussa ihmisten turvallisuutta ei ole tarvinnut huomioida. Viimeiseen luokkaan kuuluvat siis vähemmän tärkeät rakenteet. Tällöin kertoimen ψ arvoksi tulee 1,15 ja luotettavuusindeksiksi 3,1. (CSA S6-19 2019, s. 351)

CSA S6-19 (2019) mukaan mitoituksessa huomioidaan laskentamallin ja pohjatutkimusten luotettavuus (degree of site and prediction model understanding), joka sijoittuu johonkin kolmesta luokasta. Luokka määrää kestävyuden pienennyskerroimen, jota mitoituksessa käytetään. Lähtötietojen luotettavuuden luokka arvioidaan sen perusteella, kuinka luotettavasti geotekniset ominaisuudet on määritetty ja kuinka tarkkoja mallinnusmenetelmiä käytetään. Taulukossa 7 on esitetty lähtötietojen luotettavuuden eri luokat.

Taulukko 7: Lähtötietojen luotettavuuden luokitus (muokattu: CSA S6-19)

Degree of site and prediction model understanding	Available information	Quality of prediction models	Anticipated level of confidence
High	Extensive project-specific investigation procedures and/or knowledge	Demonstrated quality	high
Typical	Typical project-specific investigation procedures and/or knowledge	conventional	typical
Low	Limited representative information	conventional	lower

Taulukosta 7 havaitaan, että mitoitusohjeistus ottaa huomioon maaperän vaihtelevuuden eri paikoissa, koska kahdessa paremmassa luokassa on vaatimuksena projektikohtaiset tutkimukset. Ensimmäisessä luokassa vaatimuksena on käyttää laajoja projektikohtaisia tutkimusmenetelmiä ja laskentamalleja. Toisessa luokassa käytetään tavanomaisia projektikohtaisia tutkimusmenetelmiä ja tavanomaisia laskentamalleja. Kolmannessa luokassa hyödynnetään aiemman kokemuksen perusteella saatuja tietoja, tai ekstrapoloituja tuloksia samantyyppisiltä työmailta. Kolmannessa luokassa käytetään tavanomaisia laskentamalleja. (CSA S6-19 2019, s. 351–352) Kun käytetään tarkkoja menetelmiä, mitoituksessa voidaan käyttää pienempiä osavarmuuslukuja. Kestävyyden pienennyskertoimen määräytyminen lähtötietojen luotettavuuden perusteella voi tehdä rakennusprojektista taloudellisemman. Suuremmissa lähtötietojen luotettavuuden luokassa käytetään laajoja pohjatutkimuksia ja laadukkaita laskentamalleja, jolloin mitoituksessa voidaan käyttää pienempiä kestävyyden pienennyskertoimia ja lopullinen suunnitelma saattaa tulla edullisemmaksi. Tällöin suuremmat kustannukset suunnitteluvaiheessa voivat olla perusteltuja, koska pohjaolosuhteiden mallintamista varten tarvitaan tarkempia tutkimuksia, mutta rakennusprojektin kokonaiskustannukset pysyvät silti matalampina. (Fenton 2017, s. 491)

3.2.2 Rajatilamitoitus

CSA S6-19 (2019) perusteella murtorajatilassa on tarkastettava, että suunnitelma antaa mitoituskestävyyden, joka on aina suurempi kuin kuormien vaikutusten mitoitusarvo. Jos kuormien vaikutusten mitoitusarvo voi aiheuttaa rakenteen kiertymisen, kohoamisen tai liukumisen, rakenne tulee tukea ankkureilla. (CSA S6-19 2019, s. 129) Lisäksi murtorajatilassa kiinnitetään huomiota rakenteen stabiiliteettiin, kantokestävyyteen, vaakasuuntaiseen leikkauskestävyyteen ja tukiseinän muodonmuutokseen, joka saattaisi johtaa murtorajatilaa ylittymiseen tukiseinän läheisissä rakenteissa. Murtorajatilassa käytettävä mitoitussehto on

$$\Psi\phi_{gu}R_u \geq \sum \alpha_{ui}F_{ui}, \quad (13)$$

jossa ψ on seuraamuskerroin, Φ_{gu} murtorajatilaa kestävyyden pienennyskerroin, R_u kestävyys murtorajatilassa, α_{ui} i:ttä kuorman vaikutusta vastaava kuormakerroin ja F_{ui} i:n kuorman vaikutus murtorajatilassa. Suunnitteluvaiheessa tulisi huomioida myös rakenteen aiheuttamat muutokset maaperään ja tätä kautta läheisiin rakenteisiin esimerkiksi pohjaveden pinnan alenemisen seurauksena. Käyttöraajatilassa mitoitussehto on muotoa

$$\Psi\phi_{gs}R_s \geq \sum \alpha_{si}F_{si}, \quad (14)$$

jossa merkinnät ovat muuten samat kuin kaavassa 13, mutta ne koskevat käyttöraajatilaa. Käyttöraajatilaa mitoitussehto on siis samankaltainen kuin murtorajatilassa käytettävä mitoitussehto. (CSA S6-19 2019, s. 349–350)

Mitoituksessa käytettyjen murto- ja käyttöraajatiloiden geoteknisten mitoituskestävyyksien perusteella rakenteen tulee toimia hyväksyttävästi kaikissa rajatiloissa. Kuormituksen keston ja rakentamisen järjestyksen harkitsemisen tulisi sisältyä tutkimusmenetelmiin. Lähtötietojen luotettavuuden luokkaa määritettäessä tulee ottaa huomioon geotekniseen rakenteeseen ja rakentamisen järjestykseen liittyvät epävarmuudet sekä työmaan pohjaolosuhteiden vaihtelu, joka ei sisälly pohjatutkimuksien luotettavuuteen. Taulukossa 8 on esitetty kestäväyyden pienennyskerroimet staattisessa kuormitustilanteessa.

Taulukko 8: Kestävyyden pienennyskertoimet (muokattu: CSA S6-19, s. 355)

application	limit state	test method/model	degree of understanding		
			low	typical	high
ground anchors	pullout, ϕ_{gu}	analysis	0,35	0,40	0,50
		test	0,55	0,60	0,65
retaining systems	bearing, ϕ_{gu}	analysis	0,45	0,50	0,60
	overturning, ϕ_{gu}	analysis	0,45	0,50	0,55
	base sliding, ϕ_{gu}	analysis	0,70	0,80	0,90
	facing interface sliding, ϕ_{gu}	test	0,75	0,85	0,95
	connections, ϕ_{gu}	test	0,65	0,70	0,75
	settlement, ϕ_{gs}	analysis	0,70	0,80	0,90
	deflection/tilt, ϕ_{gs}	analysis	0,70	0,80	0,90
	passive resistance, ϕ_{gu}	analysis	0,40	0,50	0,55

Taulukosta 8 voidaan havaita kuinka lähtötietojen luotettavuus vaikuttaa kestävyyden pienennyskerroimiin. Rakenteiden mitoituskestävyys murtorajatilassa lasketaan työmaakohtaisien geoteknisten tutkimuksien perusteella. Toinen tapa on arvioida varmuus riittävien lähtötietojen ja samankaltaisissa olosuhteissa olevan rakenteen käyttäytymisen perusteella, mikäli aiempia tutkimustuloksia on käytettävissä. Geoteknisten parametrien ominaisarvoja voidaan käyttää rakenteiden murtorajatilan kestävyyden laskemisessa. Rakenteiden mitoituskestävyys murtorajatilassa saadaan kertomalla murtorajatilan kestävyys taulukosta 5 valitulla seuraamuskertoimella ja taulukosta 8 valitulla geoteknisellä kestävyden pienennyskerroimella. Rakenteen kestävyden laskemiseen käytettyjen kaavojen ja laskentamallien tulee vastata työmaan pohjaolosuhteita. Geoteknisten parametrien ominaisarvot voidaan määrittää asianmukaisista kenttä- tai laboratoriokokeista. Vastaava lähtötietojen luotettavuuden luokka tulee määrittää huolellisesti. (CSA S6-19 2019, s. 354–357)

Kaikkien teräsponttirakenteen osien suunnittelussa ja muodonmuutosten määrittämisessä käytetyn tutkimusmenetelmän tulisi olettaa lineaarinen tai epälineaarinen kestävyys-siirtymä-suhde maan ja teräsponttien kestävyys- ja muodonmuutosominaisuuksia vastaavasti. Pitkäaikaiset ja lyhytaikaiset pysyvät sekä toistuvat reaktiot tulee ottaa huomioon. Geoteknisten parametrien ominaisarvojen määrittäminen eri korkeustasoilla perustuu in situ kokeisiin tai johdettuihin arvoihin. Ankkureihin kiinnitettyjen liitostankojen pituutta lisätään ennakoitua tukiseinän takana olevan aktiivipainetilanteen maakiilan leveyden verran. Ankkuroinnin kestävä mitoituskuorma ei saa ylittää 80 prosenttia lasketusta murtorajatilan mitoitusvetolujuudesta. (CSA S6-19 2019, s. 387)

3.2.3 Kuormat

CSA S6-19 (2019) perusteella kaikki kuormitusyhdistelmiin sisältyvät kuormat tulee kertoa määritellyllä kuormakertoimella, jolloin saadaan laskettua aiheutuvat kuormien vaikutukset. Laskemalla kuormien vaikutusten mitoitusarvot yhteen saadaan kuormien vaikutusten kokonaismitoitussarvo. Kuormien kokonaisvaikutusten mitoitusarvojen tulee sisältää kaikista rakenteeseen kohdistuvista pysyvistä kuormista johtuvat vaikutukset. Tukirakenteiden mitoittamiseen käytetään murtorajatilassa kuormitusyhdistelmää ULS 1. Tarvittava yhdistelmä on $\alpha_D + \alpha_E + \alpha_P$, jossa α_D on pysyvän kuorman kuormakerroin, α_E maanpaineen sekä hydrostaattisen paineen kuormakerroin ja α_P esijännitysvoimien kuormakerroin. Kuormitusyhdistelmiin tarvittavat murtorajatilan kuormakertoimet vaihtelevat. Taulukko 9 havainnollistaa kuormitusyhdistelmää ULS 1 ja sen kuormakertoimia.

Taulukko 9: Kuormitusyhdistelmän ULS 1 kuormakertoimet

		α_D		α_E		α_P	
		max	min	max	min	max	min
Pysyvät kuormat	tehdasvalmisteiset osat	1,10	0,95				
	betoni, puu, ei rakenteelliset osat	1,20	0,90				
	kuluvat pinnat	1,50	0,65				
	maatäyttö, paalujen kitka	1,25	0,80				
	vesi	1,10	0,90				
Muuttuvat kuormat		1,70	1,70				
Maa	passiivipaine (kuorma)			1,25	0,50		
	lepopaine			1,25	0,80		
	aktiivipaine			1,25	0,80		
	taustatäytön aiheuttama paine			1,25	0,80		
	hydrostaattinen vedenpaine			1,10	0,90		
Esijännitys					1,05	0,95	

Taulukosta 9 nähdään, että kaikille kuormakertoimille on ylä- ja alaraja, mutta muuttuvan kuorman kuormakerroin on 1,70. Murtorajatilan kuormitusyhdistelmien laskemisessa käytetään taulukossa 9 määriteltyä kuormakertoimien maksimi- tai minimiarvoa jokaisen kuormien kokonaisvaikutusten mitoitusarvon suurentamiseen. (CSA S6-19 2019, s. 130–132)

4. VERTAILULASKELMAT

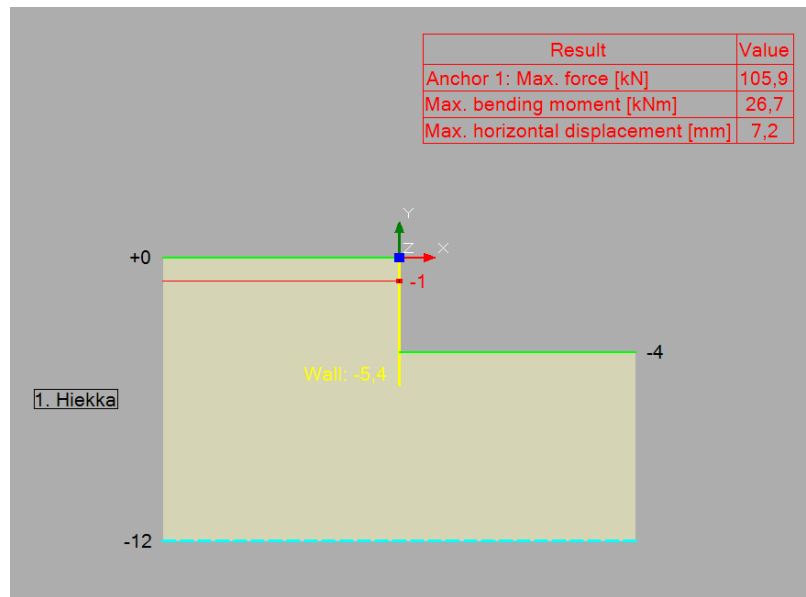
Vertailulaskelmissa käytetään Civilpointin Geocalc-ohjelmaa. Ohjelmassa valitaan aluksi pohjaolosuhteiden parametrit mitoitustilannetta varten. Materiaalimalliksi asetetaan MCM, eli maan jäykkyyteen perustuva malli. Maanpainekertoimet valitaan maan kitkakulman ja tukiseinän leikkauskestävyyskulman perusteella. Ensimmäinen esimerkki on hiekassa oleva tukiseinä, joka on yhdeltä tasolta ankkuroitu (RIL 207-2009, s. 210). Taulukossa 10 on esitetty laskennan lähtötiedot.

Taulukko 10: Mitoituksen lähtötiedot

pontti		Larssen 603	
kaivannon korkeus	H	4	m
maan kitkakulma	φ'	32	°
seinäkitkakulma	δ	32	°
seuraamuskerroin	K_{FI}	1,0	
seuraamuskerroin	ψ	1,0	
tehokas tilavuuspaino	γ'	18	kN/m ³
muuttuva kuorma	q_k	10	kN/m ²
aktiivipainekerroin	K_a	0,26	
passiivipainekerroin	K_p	5,20	

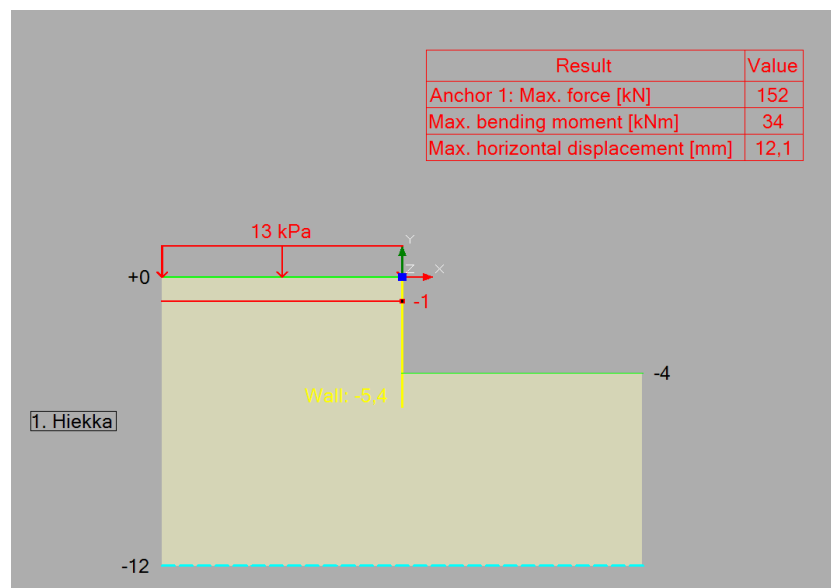
Taulukosta 10 nähdään, että kaivannon korkeus on 4 m. Maan kitkakulma ja seinäkitkakulma ovat 32°. Pohjaolosuhteet eivät ole poikkeuksellisen vaativia, joten kuormakerroin K_{FI} ja seuraamuskerroin ψ saavat arvon 1,0. Laskennassa käytetään siis keskimmäistä seuraamusluokkaa. Hiekan tehokas tilavuuspaino on 18 kN/m³ ja muuttuvan kuorman suuruus on 10 kPa. Aktiivipainekerroin on 0,26 ja passiivipainekerroin 5,20.

Aluksi mitoitetaan tukiseinä eurokoodin 7 mitoitusmenetelmän DA2* mukaisesti. Upotussyvyudeksi saadaan momenttitasapainon perusteella 1,4 m. Tukiseinämitoituksessa maanpaine on pysyvä kuorma. Pysyvän kuorman osavarmuuslukua ei voida numeerisesti kohdistaa maanpaineeseen laskentaohjelmassa, koska maanpaineen laskenta on epälineaarista ja paineeseen vaikuttaa useampia parametreja. Tämän takia mitoituksessa jaetaan aluksi pysyvän kuorman osavarmuusluku pois ja laskennan tulokset täytyy lopuksi kertoa sillä (Liikennevirasto 2016, s. 30). Tukiseinä ja kuormitusyhdistelmän 6.10a tulokset on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8: Tukiseinä eurokoodien mukaisessa mitoituksessa ja kuormitusyhdistelmän 6.10a tulokset

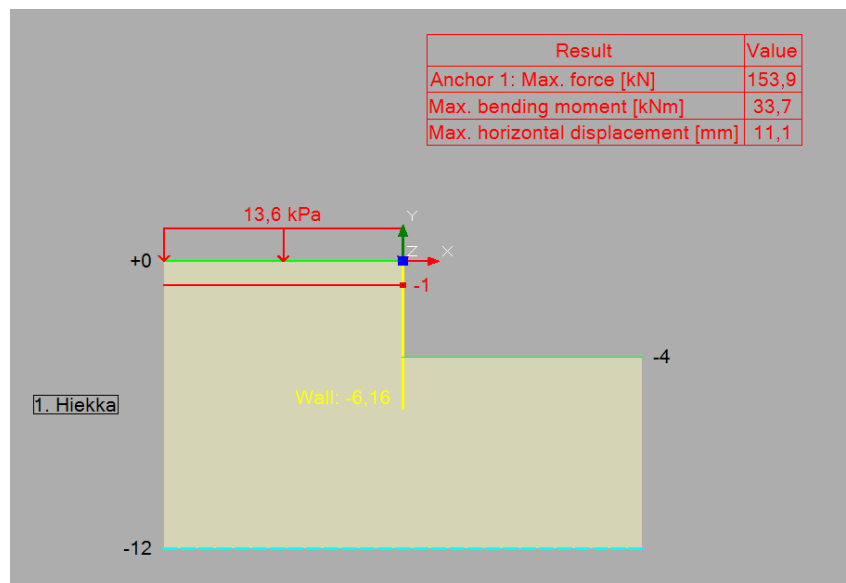
Kuvasta 8 nähdään, että laskentaohjelma antaa tuloksia, joissa ei ole huomioitu pysyvän kuorman osavarmuuslukua, joten ne täytyy vielä kertoa sillä. Kuormitusyhdistelmässä 6.10b huomioidaan muuttuva kuorma, jonka osavarmuusluku on 1,5. Koska muuttuva kuorma jaetaan myös pysyvän kuorman osavarmuusluvulla, laskennassa käytetään kuormaa 13 kPa (Liikennevirasto 2016, s. 30). Yhdistelmällä 6.10b lasketut tulokset on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9: Kuormitusyhdistelmän 6.10b tulokset

Kuvasta 9 voidaan havaita, että lyöntisyvyys on sama mutta muuttuvan kuorman huomiointi muuttaa laskettua ankkurin tukivoimaa ja taivutusmomenttia.

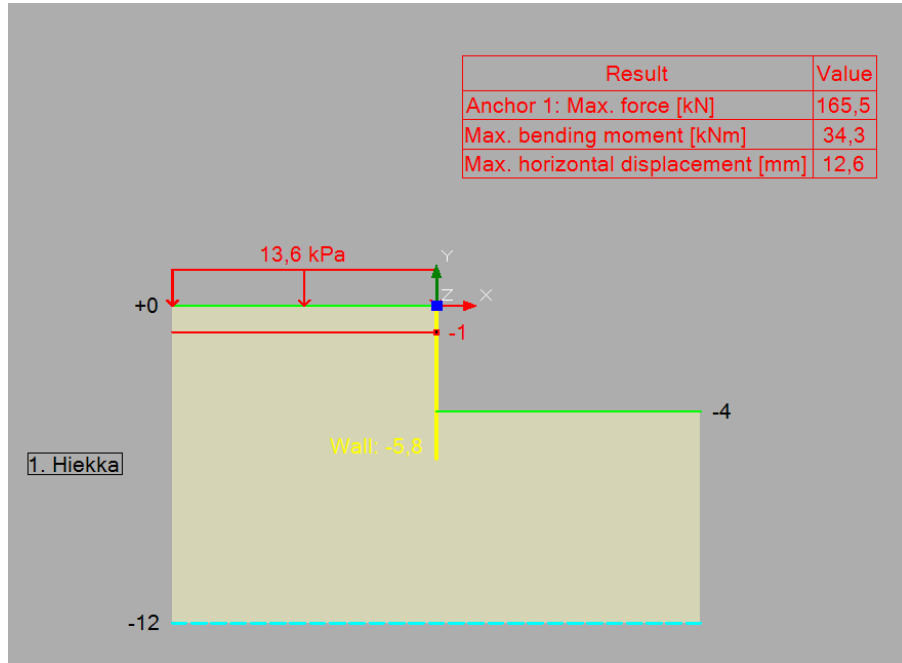
Kanadan ohjeen mukaista mitoitusta varten mitoitetaan tukiseinä erikseen kaikissa lähtötietojen luotettavuuden luokissa. Oletetaan lähtötietojen luotettavuuden olevan ensimmäisessä luokassa, eli pohjatutkimuksien tulokset on arvioitu samankaltaisten työmaiden perusteella. Jotta saadaan epäedullisin kuormitusilanne, valitaan kuvasta 10 aktiivipaineen kuormakertoimeksi 1,25. Koska passiivipaine pitää seinää pystyssä, sitä käsitellään kestävytenä, jolloin sen kertoimeksi tulee taulukon 8 mukaan 0,40. Käytetään kuormitusyhdistelmää ULS 1, jossa muuttuvan kuorman kuormakerroin on 1,70. Näiden perusteella saadaan riittäväksi lyöntisyvyudeksi 2,16 m. Kuormakertoimia käytetään samalla periaatteella kuin eurokoodien osavarmuuslukuja, eli alussa jaetaan kuormat pysyvän kuorman kuormakertoimella 1,25 ja tulokset kerrotaan lopuksi samalla kuormakertoimella. Kuormakertoimella 1,70 kerrottu muuttuva kuorma jaetaan myös kuormakertoimella 1,25, jolloin laskennassa käytettävä muuttuva kuorma on 13,6 kPa. Tukiseinä ja laskennan tulokset alimmassa lähtötietojen luotettavuuden luokassa on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10: Tukiseinä CSA S6-19 mukaisessa mitoituksessa ja laskentatulokset alimmassa lähtötietojen luotettavuuden luokassa

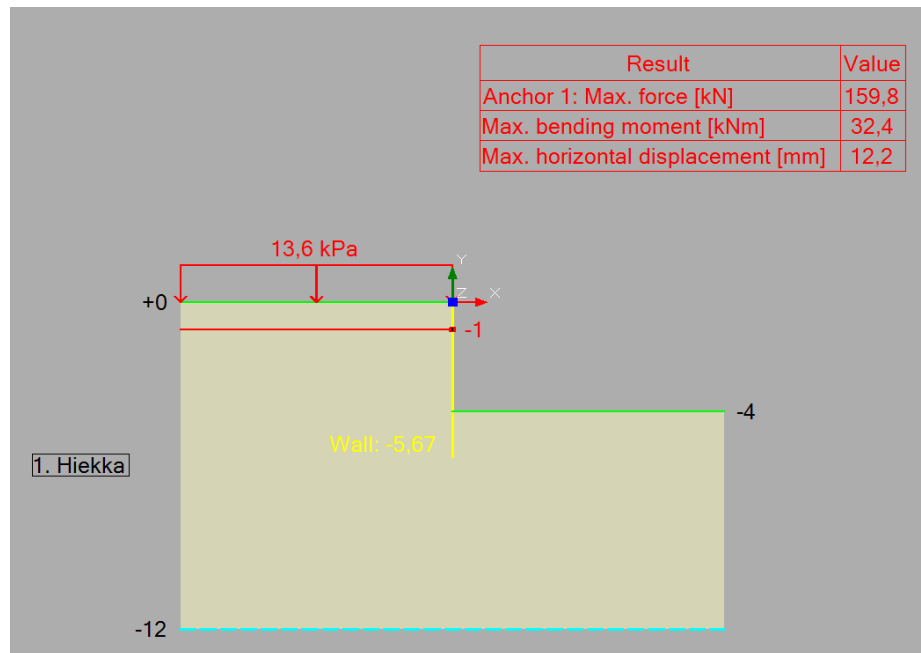
Kuvasta 10 nähdään, että alimmassa lähtötietojen luokassa tukiseinän lyöntisyvyys on huomattavasti suurempi kuin eurokoodien mukaisessa mitoituksessa. Toisessa lähtötietojen luotettavuuden luokassa pohjaolosuhteet on selvitetty tavanomaisilla tutkimuksilla,

jolloin passiivipaineen kertoimeksi saadaan taulukon 8 mukaisesti 0,50. Epäedullisimmassa kuormitustilanteessa aktiivipaineen kuormakerroin on edelleen 1,25 ja muuttuvan kuorman kerroin 1,70. Näiden perusteella saadaan riittäväksi lyöntisyvydeksi 1,80 m. Tukiseinä on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11: CSA S6-19 mukaiset tulokset toisessa lähtötietojen luotettavuuden luokassa

Kuvasta 11 nähdään, että tukiseinän lyöntisyvyys on edelleen suurempi kuin eurokoodien mukaisessa mitoituksessa. Ero ei ole kuitenkaan yhtä suuri, kuin alimmassa lähtötietojen luotettavuuden luokassa. Kuvan 13 tulokset on laskettu tukiseinän alareunassa, mutta kaivannon pohjalla syvyydellä 4 m ankkuroinnin maksimitukivoima on 159,9 kN ja taivutusmomentin maksimiarvo 31,8 kNm. Kolmannessa lähtötietojen luotettavuuden luokassa pohjaolosuhteet on selvitetty laajoilla projektikohtaisilla tutkimuksilla, jolloin taulukon 8 mukaisesti passiivipaineen kertoimeksi tulee 0,55. Muut kuormakertoimet ovat samat kuin aiemmissa CSA S6-19 mukaisissa laskelmissa. Lyöntisyvydeksi saadaan 1,67 m. Kuvassa 12 on esitetty tukiseinä ja laskennan tulokset.



Kuva 12: CSA S6-19 mukaiset tulokset korkeimmassa lähtötietojen luotettavuuden luokassa

Kuvasta 12 voidaan havaita, että korkeimmassa lähtötietojen luotettavuuden luokassa lyöntisyvyys voi olla pienempi kuin muissa luokissa. Laskennassa on varmistettu, että tukiseinän siirtymät pysyvät sallituissa rajoissa. Taulukko 11 havainnollistaa tämän esi-merkkiseinän mitoituksen tuloksia.

Taulukko 11: RIL 207-2009 mukaisen tukiseinän mitoituksen tulokset

	eurokoodi 7		CSA S6-14		
	6.10a	6.10b	low	typical	high
seinän pituus (m)	5,40	5,40	6,16	5,80	5,67
kokonaisvarmuus	2,09	1,90	3,04	2,46	2,22
lasketut arvot					
tukivoima (kN)	105,9	152,0	153,9	159,9	159,8
taivutusmomentti (kNm)	26,7	34,0	33,7	31,8	32,4
mitoitusarvot					
tukivoima (kN)	143,0	174,8	192,4	199,9	199,8
taivutusmomentti (kNm)	36,0	39,1	42,1	39,7	40,5

Taulukon 11 perusteella eurokoodien mukaisessa mitoituksessa kuormitusyhdistelmä 6.10b on määräävämpi. CSA S6-19 mukaisesti laskettu lyöntisyvyys on suurempi kuin

eurokoodeissa. Eurokoodeissa tavoiteluotettavuus on keskimmaisessä seuraamusluokassa 3,8 taulukon 2 mukaan ja CSA S6-19 mukainen tavoiteluotettavuus on 3,5 taulukon 6 mukaan. Taulukosta 11 havaitaan, että eurokoodin mukaisen mitoituksen kokonaisvarmuus on vain 1,90, kun taas CSA S6-19 mukaisen mitoituksen kokonaisvarmuus on pienimmillään 2,22. Eurokoodin mukaisella mitoituksella ei päästä yhtä lähelle tavoiteluotettavuutta, kuin kanadalaisen ohjeen mukaisella mitoituksella. Eurokoodit eivät ota kantaa maaparametrien hajontaan eli ne eivät huomioi kuinka tarkasti parametrit tiedetään. Koska eurokoodeissa käytettävät osavarmuusluvut ovat vakioita, samalla varmuudella voidaan päätyä huomattavaan yli- tai alimitoitukseen murtumistodennäköisyyden suhteen. CSA S6-19 mukaisessa mitoituksessa pyritään aina seuraamusluokkaa vastaavaan murtumistodennäköisyyteen käyttämällä eri lähtötietojen luotettavuuden luokkia. Luokittelemalla lähtötietojen luotettavuus voidaan kompensoida pohjaolosuhteiden vaihtelusta aiheutuvaa epävarmuutta paremmin. Kun tiedetään lähtötiedot tarkasti, voidaan sallia pienempien kestävyysden pienennyskertoimien käyttö.

YHTEENVETO

Suomessa mitoitus perustuu eurokoodien mukaisesti osavarmuuslukumenetelmään, kun taas Kanadassa käytetään LRFD-menetelmää. Molemmissa menetelmissä on tarkistettava, että mitoituskestävyys on suurempi kuin kuormien vaikutusten mitoitusarvot, joten mitoitus ehdot ovat hyvin samankaltaiset. Eurokoodeissa pyritään saavuttamaan riittävä varmuus käyttämällä osavarmuuslukuja, kun taas kanadalaisessa ohjeistuksessa käytetään kuormakertoimia ja kestävyys pienennyskertoimia. Kanadalaisessa ohjeistuksessa on lisätty luotettavuuden perustuvaa mitoitusta ja kestävyys pienennyskerroin riippuu lähtötietojen luotettavuuden luokasta. Molemmissa menetelmissä kuormien mitoitusarvoihin vaikuttaa myös seurauksien taso, koska suomalaisessa ohjeessa käytetään seuraamusluokkiin perustuvaa kuormakerrointa K_{FI} ja CSA S6-19 määrittelee seuraamuskertoimen ψ . Tavoiteltava luotettavuusindeksi määräytyy myös seuraamusluokkien mukaan. Luotettavuuden perustuvassa mitoituksessa pystytään kompensoimaan pohjaolosuhteiden vaihtelusta aiheutuvaa epävarmuutta paremmin ja sen avulla voidaan saavuttaa tasaisempi luotettavuus tärkeiden rakenteiden mitoituksessa. Eurokoodien osavarmuuslukumenetelmä ei ota huomioon lähtötietojen hajontaa ja käytetyt osavarmuusluvut ovat aina vakioita. Tällöin osavarmuuslukumenetelmällä saatetaan päätyä tukiseinän yli- tai alimitoitukseen murtumistodennäköisyyden suhteen.

Eurokoodien mukaisessa mitoituksessa on Suomessa hankaluutena kaksi kuormitusyhdistelmää. Menetelmässä DA2* laskenta joudutaan tekemään kahdesti, koska on tarkistettava kuormitusyhdistelmät 6.10a ja 6.10b. Kanadalaisella ohjeistuksella laskenta voidaan tehdä kerran. CSA S6-19 mukaisessa laskennassa on etuna lähtötietojen luotettavuuden luokittelu, koska sen ansiosta tukiseiniä ei yli- tai alimitoiteta. Korkeammassa lähtötietojen luotettavuuden luokassa voidaan lisäksi käyttää pienempiä kestävyys pienennyskertoimia, joten on mahdollista säästää projektin kokonaiskustannuksissa. Kestävyys pienennyskerroin määräytyy aina lähtötietojen luotettavuuden perusteella, mutta kuormakertoimen valinta on hankalaa tukiseinien mitoituksessa. CSA S6-19 soveltuu myös siltasuunnitteluun, joten muuttuvat kuormat ja suurin osa kuormitusyhdistelmistä käsittelevät enemmän liikennekuormia ja muita siltasuunnittelun kannalta oleellisia kuormia.

Suurimmat erot vertailulaskelmissa ilmenivät tukiseinän upotussyvydessä ja tukiseinän kokonaisvarmuudessa. CSA S6-19 mukaisesti laskettu seinän upotussyvyys oli suurempi kuin eurokoodien mukaisesti laskettu, jolloin myös ankkuroinnin tukivoimat olivat suurempia kaikissa lähtötietojen luotettavuuden luokissa. Luotettavuuteen perustuva mitoitus näkyi vertailulaskelmien tuloksissa selkeästi, koska suuremmassa lähtötietojen luotettavuuden luokassa tukiseinän tarvittava upotussyvyys oli lyhyempi, kuin alemmassa lähtötietojen luotettavuuden luokassa. CSA S6-19 mukaisesti mitoitettun tukiseinän kokonaisvarmuus oli huomattavasti suurempi eurokoodien mukaiseen mitoitukseen verrattuna ja sen avulla päästiin myös lähemmäksi keskimmäisen seuraamusluokan mukaista tavoiteluotettavuutta.

LÄHTEET

- Aarsleff Group (2019). Top 10 Advantages of Sheet Piling. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2020): aarsleff.co.uk/company-news/top-10-advantages-of-sheet-piling/
- CSA S6-19 (2019). Canadian highway bridge design code. Canadian standards association.
- Fenton, G. A. (2017) CHBDC section 6: foundations and geotechnical systems, reliability-based design code provisions.
- Fenton, G. A., Naghibi, F., Dundas, D. & Bathurst, R. J. (2015). Reliability-Based Geotechnical Design in the 2014 Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Geotechnical Journal. Saatavissa (viitattu 21.4.2020): <https://pdfs.semanticscholar.org/78f5/88e0e52ba6439aa5af5c86490c3adccbe511.pdf>
- Knappett, J. & Craig, R. F. (2012). Craig's soil mechanics. CRC press.
- Liikennevirasto (2017). Eurokoodin soveltamisohje - Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 13/2017. Helsinki. 165 s. Saatavissa (viitattu 15.3.2020): julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-13_ncci7_web.pdf
- Liikennevirasto (2011). Ratojen tukiseinien mitoittaminen Eurokoodilla. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 26/2011. Helsinki. 134 s. Saatavissa (viitattu 31.3.2020): https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2011-26_ratojen_tukiseinien_web.pdf
- Liikennevirasto (2016). Varmuuden kohdentaminen tukiseinien mitoituksessa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 7/2016. Helsinki. 78 s. Saatavissa (viitattu 19.3.2020): julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2016-07_varmuuden_kohdentaminen_web.pdf
- RIL 207-2009 (2009). Geotekninen suunnittelu. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- RIL 263-2014 (2014). Kaivanto-ohje. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- SFS-EN 1997-1 (1997). Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: yleiset säännöt. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 12063 (1999). Pohjarakennustyöt. Tukiseinät. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1990 (2006). Eurokoodi 1: Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen Standardisoimisliitto SFS.