



Reza Nabizada

# Teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoitus eurokoodin mukaan

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

7.5.2024

# Tiivistelmä

Tekijä:	Reza Nabizada
Otsikko:	Teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoitus eurokoodin mukaan
Sivumäärä:	64 sivua + 1 liite
Aika:	7.5.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine:	Rakennetekniikka
Ohjaajat:	Rakennesuunnittelija, DI Tarja Anttila Lehtori Joni Pirhonen

---

Tukimuurit suunnitellaan toimimaan tukirakenteina, jotka mahdollistavat maamassojen tai täyttömateriaalien pysymisen jyrkemmissä kulmissa kuin mihin ne luonnollisesti asettuisivat. Tukimuri tulee suunnitella ja mitoittaa niin, että rakenne kestää kaikki sille tulevat kuormat murtumatta. Nykyisin kulmatukimuri on yleisin tukimuurin muoto erityisesti tiheään asutuilla alueilla, joilla maapinnan korkeus vaihtelee.

Tässä insinööriyössä tarkasteltiin kulmatukimuurin mitoitukseen sovellettavia eurooppalaisia standardeja ja tutkittiin niihin perustuvia laskentamenetelmiä. Työn tavoitteena oli tutkia teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoitusta erityisesti rakennesuunnittelijan näkökulmasta ottaen huomioon rakenneteknisen suunnittelun vaatimukset ja mitoituksessa tarvittavat tekijät.

Kulmatukimuurin mitoitus edellyttää rakennesuunnittelijalta asiantuntemusta sekä pohjarakenteiden että teräsbetonirakenteiden suunnittelusta. Mitoituksessa on tärkeää kiinnittää huomiota erilaisiin kuormitustekijöihin, kuten rakenteen oma paino, täyttömaan paino sekä muuttuvat pintakuormat. Edellä mainittujen kuormien lisäksi on olennaista vaakasuoraan vaikuttava maanpainekuorma.

Rakenteen stabiiliteetin mitoituksessa varmistettiin, että rakenne kestää kaikki sille kohdistuvat kuormat ilman, että rakenne pääse liukumaan, kaatumaan tai sortumaan mitoittavimmilla kuormitusyhdistelmillä. Rakenneteknisessä mitoituksessa varmistettiin, että rakenne kestää sille kohdistuvat taivutus- ja leikkausvoimat.

Opinnäytetyö tehtiin helpottamaan kulmatukimuurin suunnitteluprosessia. Kirjallisessa osiossa tarkasteltiin suunnitteluvaiheet ja niihin liittyvät kaavat. Tuloksena laadittiin Excel-pohjainen laskentatyökalu. Työkalun käyttö mahdollistaa rakennesuunnittelijoille kulmatukimuurin suunnittelun ja mitoituksen eurokoodin mukaisesti. Laskentatyökalun avulla voidaan vähentää laskuvirheitä ja iteroida vaivattomasti erilaisen parametrien vaikutusta rakenteen kestävyys.

Avainsanat: teräsbetoni, kulmatukimuri, mitoitus, eurokoodi

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Reza Nabizada  
Title: Design of Concrete Cantilever Retaining Wall According to Eurocode Requirements  
Number of Pages: 64 pages + 1 appendix  
Date: 7 May 2024

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Civil Engineering  
Professional Major: Structural Engineering  
Supervisors: Tarja Anttila, Structural Engineer  
Joni Pirhonen, Senior Lecturer

---

Retaining walls are designed to act as structural supports, enabling soil masses or fill materials to maintain at steeper angles than they would naturally settle. A retaining wall must be designed to withstand all loads applied to it without failing. Nowadays, cantilever retaining walls are the most common type of retaining wall, especially in areas with high population density where the ground levels vary.

This engineering thesis examined the European standards applicable to the dimensioning of cantilever concrete walls and investigated the calculation methods based on them. The aim of the study was to review the dimensioning of steel-reinforced concrete cantilever wall from the perspective of a structural engineer, considering the requirements of structural design and the factors needed in sizing.

Dimensioning a cantilever concrete retaining wall requires expertise from the structural designer in both foundation structures and steel-reinforced concrete designs. It is important in dimensioning to pay attention to various loading factors, including the structural weight, the weight of the fill soil, and varying surface loads. In addition to these loads, the horizontal earth pressure loads exerted by the soil is essential.

In the dimensioning of the structure's stability, it was ensured that the structure could withstand all loads imposed on it without sliding, toppling, or collapsing under the most demanding load combinations. In the structural dimensioning, it was ensured that the structure could withstand the bending and shear forces applied to it.

The thesis was conducted to facilitate the design process of cantilever concrete retaining walls. The theoretical segment of the thesis scrutinized the design steps and the associated formulas. Based on that, an Excel-based application was developed. The use of the application allows structural engineers to design and dimension cantilever concrete retaining walls according to the Eurocodes. The calculation tool reduces calculation errors and effortlessly iterates the impact of different parameters on the structure's durability.

Keywords: reinforced concrete, retaining wall, dimensioning, Eurocode

# Sisällys

## Käsitteet ja lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tavoitteet	1
1.2	Opinnäytetyön toimeksiantaja	2
1.3	Tutkimusmenetelmät	2
1.4	Aiheen rajaukset	2
2	Tukimuurit	3
2.1	Yleistä	3
2.1.1	Massiivinen tukimuri	4
2.1.2	Laippa- ja siipimuurit	5
2.1.3	Kivikorit	6
2.2	Teräsbetoninen kulmatukimuri	7
3	Kulmatukimuurin suunnitteluperiaatteet	9
3.1	Eurokoodijärjestelmä	9
3.1.1	Eurokoodien kattavuus ja soveltuvuus	9
3.2	Eurokoodin mukainen rajatilamitoitus	10
3.2.1	Murtorajatila (ULS)	10
3.2.2	Käyttörajatila (SLS)	11
3.3	Mitoitustavat	12
3.4	Osavarmuusluvut	13
3.4.1	Staattisen tasapainorajatilan (EQU) osavarmuusluvut	15
3.4.2	Rakenteellinen kestävyys (STR) ja maapohjan kantavuus (GEO)	16
4	Kuormitukset	18
4.1	Pysyvät kuormat	19
4.2	Muuttuvat kuormat	19
4.3	Onnettomuuskuormat	19
4.4	Maanpaine	20
4.4.1	Lepopaine	21
4.4.2	Aktiivipaine	23
4.4.3	Passiivipaine	24

4.4.4	Tiivistyskuorma	25
4.5	Lisäkuormat	26
4.5.1	Viivakuormat	27
4.5.2	Pistekuormat	27
5	Kuormien yhdistely	28
5.1	Kuormayhdistelmät murtorajatilassa	28
5.2	Kuormayhdistelmät käyttörajatilassa	29
6	Kulmatukimuurin rakennetekninen mitoitus	32
6.1	Taivutuskestävyys	32
6.2	Leikkauskestävyys	35
6.2.1	Leikkausraudoittamaton rakenne	36
6.2.2	Leikkausraudoitettu rakenne	37
7	Tukimuurirakenteiden stabiliteetti	38
7.1	Kantokestävyys	38
7.2	Liukumiskestävyys	43
7.3	Kaatumiskestävyys	45
8	Tukimuurien halkeilu	46
8.1	Rasitusluokat	47
8.2	Halkeilutyypit ja halkeamaleveyden raja-arvot	50
8.3	Vähimmäisraudoitusala	51
8.4	Halkeilun rajoittaminen ilman suoraa laskentaa	52
9	Laskentapohja	55
10	Johtopäätökset	57
10.1	Jatkotoimenpiteet	58
	Lähteet	60
	Liitteet	
	Liite 1: Mitoitus esimerkki laskentapohjalla	

## Käsitteet

**Kitkamaa:** Kitkamaat, kuten hiekka, sora, kivet ja moreeni ovat maalajeja, joissa hiukkasten välinen kitka on pääasiallinen koossa pitävä voima. Näiden maiden kitkakulma määräytyy hiukkasten muodon ja karheuden perusteella.

**Koheesiomaa:**

Kitkamaiden vastakohtia ovat koheesiomaat, kuten savi, joiden koossa pysyminen kitkan lisäksi perustuu myös maahiukkasten väliin koheesiovoimiin.

**Käyttörajatila:**

Tarkoitetaan rajatilaa, jossa rakenne tai rakenteet eivät enää täytä niiden käyttökelpoisuuden ehdoksi asetettuja vaatimuksia.

**Maan leikkauskestävyyskulma:**

Maan leikkauskestävyyskulma kuvaa maan taipumusta murtua, kun jännitys ylittää leikkauslujuuden. Jyrkät luiskat tasoittuvat ajan myötä kitkan ansiosta lähes samalle kulmalle.

**Maanvarainen perustaminen:**

Maanvaraisella perustamisella tarkoitetaan perustamista suoraan maan varaan tai kalliolle rakennetun murskearinan varaan.

**Murtorajatila:**

Kuvataan tilanteita, joissa rakenteen tasapainon menettäminen tai murtuminen aiheuttaa vaaran ihmisten turvallisuudelle tai omaisuudelle.

OCR: Ylikonsolidoitumissuhde on geotekninen parametri, joka kuvaa maaperän jännitystilän vaihtelua. Matemaattisesti suhde määritellään  $\sigma_{v,max} / \sigma_v$ .

Plastinen kutistuma:

Plastinen kutistuminen viittaa betonimassan vaakatasossa tapahtuvaan kutistumiseen, joka johtuu veden haihtumisesta betonipinnasta muutaman tunnin sisällä valusta.

Plastinen painuma:

Ennen betonin kovettumista pystysuuntaista kutistumista kutsutaan plastiseksi painumaksi. Tämä ilmiö tapahtuu, kun betonista erottuu vettä, mikä aiheuttaa massaansa tilavuuden pienenemistä.

Routa: Roudalla tarkoitetaan maassa (maan huokosissa) olevan huokosveden jäätyneen takia jäätyneitä maakerrosta.

Routimaton maa:

Routimattomalla maalla tarkoitetaan maalajeja, jotka eivät roudi ollenkaan tai routivat niin vähän, ettei sillä ole rakenteen kannalta merkitystä. Tällaisia maalajeja ovat muun muassa hiekka ja sora.

Routiva maa:

Routivalla maalla tarkoitetaan maa-ainesta, joka jäätyessään paisuu ja routii. Roudan vaikutuksesta maan tilavuus kasvaa. Routivia maalajeja ovat muun muassa savi, lieju ja siltti.

# 1 Johdanto

Viime vuosina erilaisten rakenteiden analysointiohjelmistojen käyttö on yleistynyt merkittävästi. Siitä huolimatta manuaalisen laskentatavan, kuten Excel-laskentapohjien käyttö, säilyttää tärkeän roolinsa insinööritoimistoissa. Manuaalisen laskentamenetelmän ylläpitäminen ei ainoastaan varmista peruseräpäätösten ja laskentamenetelmien syvällistä ymmärrystä, vaan se myös edistää kriittisen ajattelun ja ongelmanratkaisutaitojen kehittämistä.

Tukimuurin suunnittelu ja mitoitus kuuluvat rakennesuunnittelijan työtehtäviin. Nämä tehtävät edellyttävät rakennesuunnittelijalta paitsi rakennesuunnittelun osaamista, myös geotekniikan periaatteiden hyvää hallintaa. Suomessa, kuten muissakin EU-maissa, kantavien rakenteiden suunnittelu perustuu eurooppalaiseen suunnittelustandardeihin, joita kutsutaan eurokoodeiksi. Opinnäytetyössäni tarkastelen kulmatukimuurin mitoitusta rakennesuunnittelijan näkökulmasta, pyrkien noudattamaan kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja.

## 1.1 Työn tavoitteet

Tämän insinööriyön tavoitteena on kehittää toimeksiantajalle laskentapohja teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoittamiseksi. Kyseessä oleva laskentapohja laaditaan eurokoodien ja Suomen kansallisten liitteiden mukaan käyttäen taulukkolaskentaohjelmistoa.

Laskentapohja tarjoaa mahdollisuuden suunnittelijoille mitoittaa teräsbetonisia kulmatukimuurirakenteita vaivattomasti ja aikaa säästäen. Sen avulla pyritään tehostamaan rakenteiden mitoittamista ja vähentämään suunnitteluvirheiden määrää kulmatukimuurien suunnittelussa ja mitoituksessa.

Kirjallisen osuuden tavoitteena on tarkastella eurokoodin asettamia vaatimuksia, mitoitusilanteita ja kuormitusyhdistelmiä, jotka vaikuttavat kulmatukimuurin rakenne- ja geotekniseen suunnitteluun.



Rakenneteknisessä tarkastelussa käsiteltävä kulmatukimuuuri muodostuu rintamuurista ja pohjalaatasta. Kulmatukimuuuri voi olla joko L:n tai käännetyn T:n muotoinen. Työstä on rajattu pois muut tukimuurityypit.

Tässä tutkielmassa geoteknisen mitoituksen perusoletuksena on, että pohjaveden pinta sijaitsee perustamistason alapuolella, eikä siihen liittyvää vedenpainetta oteta huomioon mitoituksessa. Taustatäyttömateriaalin oletetaan olevan routimatonta, joten routapaine jätetään myös huomioitta laskennassa.

## 2 Tukimuurit

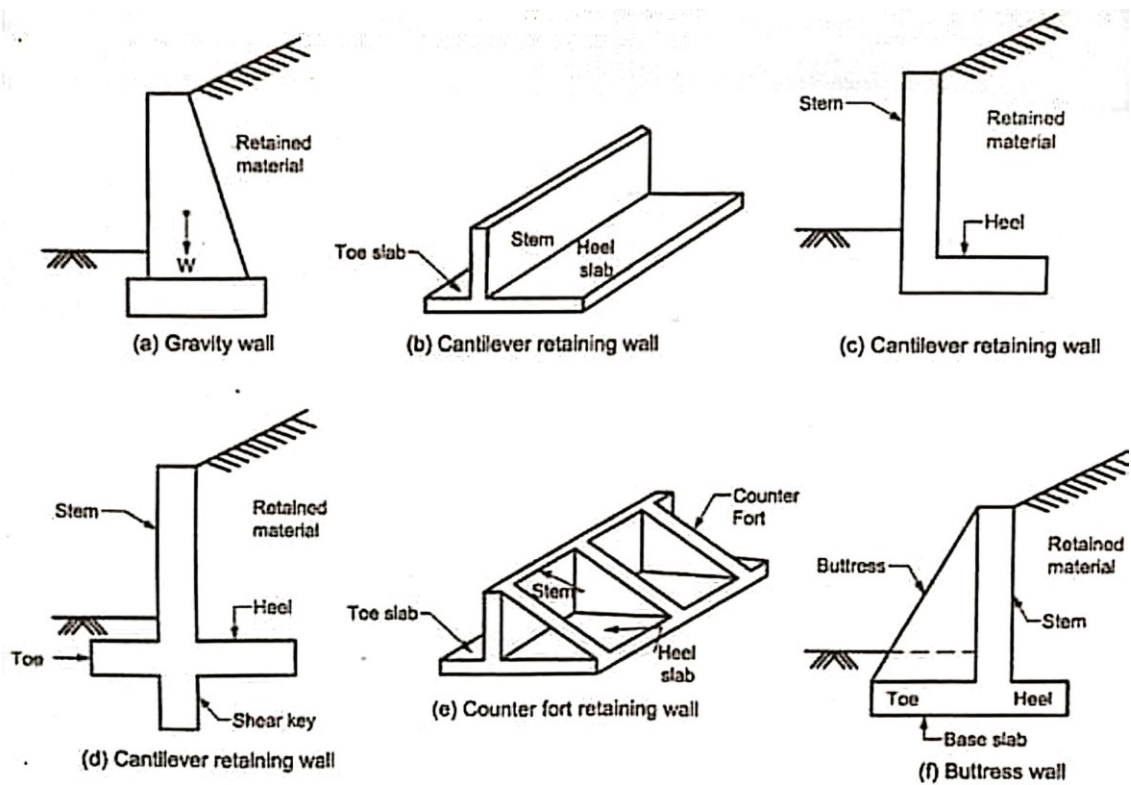
### 2.1 Yleistä

Tukimuurit ovat kantavia rakenteita, joita käytetään yleisemmin tasoittamaan maanpinnan korkeuseroja tilanteissa, joissa perinteisten maaluiskien käyttö ei ole mahdollista tila- tai muiden rajoitteiden vuoksi. Tukimuurit mahdollistavat maamassojen säilyttämisen jyrkemmissä kulmissa kuin, missä ne luonnontilassaan pysyisivät. (1, s. 1.) Tukimuurit suunnitellaan kestäväksi ulkoisia kuormituksia, kuten maan ja veden painetta (2, s. 200).

Tukimuurit voivat toimia joko itsenäisinä rakenteina tai osana laajempia rakennelmia, kuten talojen perustuksia tai siltojen tukirakenteita. Erityistapauksessa, esimerkiksi padoissa, tukimuurin rakentamisen ensisijainen tarkoitus on kestää vedestä aiheutuvaa kuormitusta, mikä poikkeaa tavallisesta tukirakenteen suunnittelusta. Joissakin tapauksissa, etenkin haastavilla maaperillä, kun maapohjan kantokestävyys ei riitä, tukimuurit voidaan perustaa paalujen varaan, kallionvaraisesti tai varmistaa niiden stabiliteetti ankkuroimalla. (3, s. 183–185.)

Tukimuureiksi luokitellaan erilaiset tukirakenteet, jotka ovat olennaisia esimerkiksi laiturirakentamisessa sekä muissa erityisrakenteissa, joissa tarvitaan veden ja maan aiheuttaman paineen hallintaa. Tähän ryhmään kuuluvat pihamuurit, melunsuojavallit, erilaiset massiiviset tukimuurit, ponttiseinät sekä erityyppiset kulmatukimuurit. (4.)

Kuvassa 1 on esitetty erilaisia tukimuuriratkaisuja, joita käytetään niin infra- kuin talon rakentamisessakin.

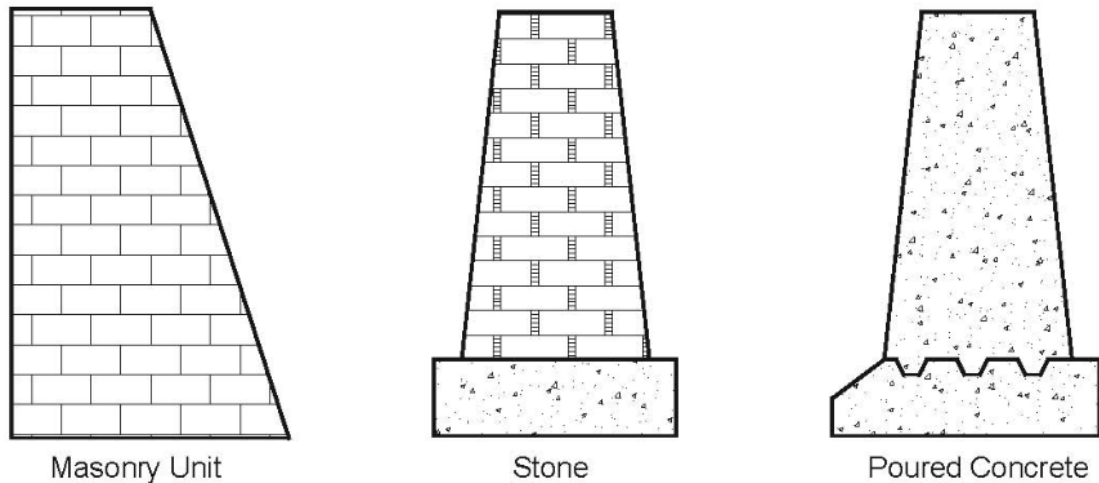


Kuva 1. Erityyppisiä tukimuurirakenteita. (5)

### 2.1.1 Massiivinen tukimuri

Aiemmin tukimuureja on toteutettu joko muurattuina kiviladoksina tai massiivisina betonirakenteina. Massiivisen tukimuurin stabiilitetti perustuu sen omaan painoon. Muurin suuri omamassa ja takana oleva täyttömaan sivuttaispaine estävät rakenteen kaatumisen ja liukumisen. (6.)

Massiivisia tukimuureja valmistetaan muurauskivestä, tiilestä, harkoista tai paikalla valetusta betonista, kuten kuvassa 2 on havainnollistettu. Tukimuurityypeistä massiivinen tukimuri on yksinkertaisin ja vanhin tunnettu muurityyppi. Massiivinen tukimuri saavuttaa tarvittavan vakauden ilman peruslaatan rakentamista täyttöpuolelle. (6.)



Kuva 2. Erilaiset massiivitukimuurirakenteet. (4)

Massiivisen tukimuurin muoto vaihtelee. Etusivu voi olla pystysuora ja takasivu vino tai päinvastoin. Tämän muurityypin etuja ovat sen helppo rakennettavuus ja soveltuvuus korkeintaan kolmen metrin korkeuteen. Massiiviset tukimuurit eivät sovellu yli kolmen metrin korkeudelle, sillä ne vievät huomattavasti tilaa ja voivat olla liian raskaita maaperän kantavuudelle. Niiden halkeilukestävyys on kuitenkin merkittävä etu, mikä tekee niiden ylläpidosta kustannustehokasta. (4.)

Suomessa massiivisia tukimuurirakenteita käytetään sekä infra- että asuinrakennuskohteissa. Pientaloissa tukimuurit rakennetaan usein kevytsora- tai muottiharkoista. Alle 75 cm korkeat tukimuurit eivät yleensä vaadi perustuksia toisin kuin korkeammat tai rinteessä sijaitsevat tukimuurit. (7.)

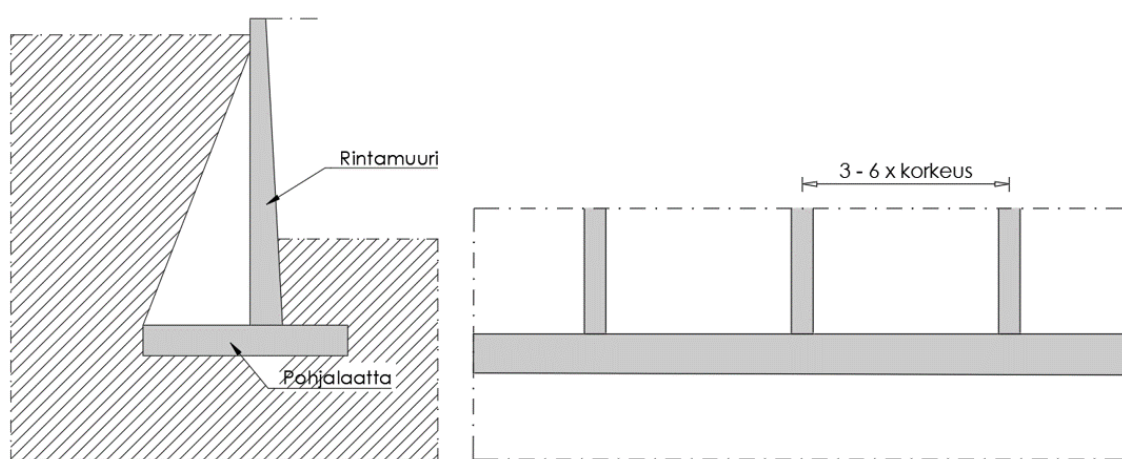
### 2.1.2 Laippa- ja siipimuurit

Laipoilla ja siivillä vahvistettuja muureja kutsutaan laippa- ja siipitukimuureiksi. Tämän tyyppisen vahvistuksen käyttö tukimuurin rakenteessa vähentää taivutusmomenttia, mikä tekee niistä tehokkaamman ratkaisun verrattuna jäykistämättömiin kulmatukimuureihin. (3, s. 187–89.)

Edellä mainittujen tukimuurien rakentaminen on erittäin hyödyllistä tilanteissa, joissa käytettävissä oleva tila on rajallinen ja pohjalaatan jatkuminen tuetulle

puolelle on rajoitettu. Laippa- ja siipimuurien käyttö tulee entistä tehokkaammaksi ja taloudellisesti kannattavaksi ratkaisuksi, kun muurin korkeus on yli 5 metriä. (3, s. 187–89.)

Siipimuurin kolmiomainen rakenne yhdistää rintamuurin ja anturan, mikä puolestaan vähentää pohjalaatan ja rintamuurin paksuutta. Pystymuuri ja pohjalaatta suunnitellaan ja mitoitetetaan siten, että ne toimivat teräsbetonilaattoina, jotka ovat tuettuina laipoilla tai siipimuureilla. Yleensä siipien ja laippojen välinen etäisyys on 3–6 kertaa muurin korkeus, kuten kuvassa 3 on havainnollistettu. Niitä voidaan toteuttaa paikallavaluina tai elementteinä. (8.)



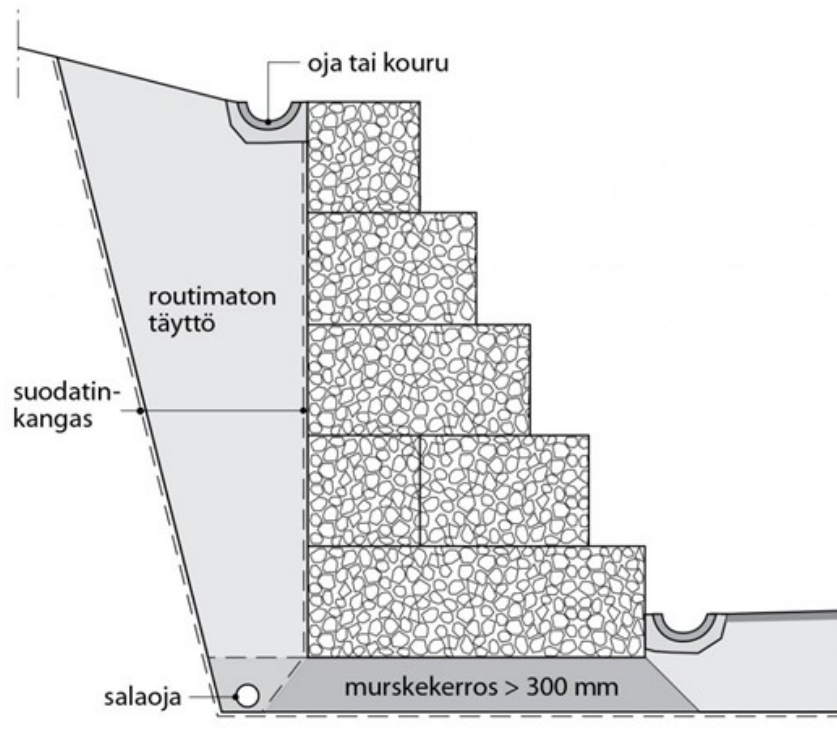
Kuva 3. Periaatekuva siipimuurin rakenteesta. (9)

### 2.1.3 Kivikorit

Kivikorit ovat monikäyttöisiä ratkaisuja niin maan- kuin vesirakennuskohteisiin. (10.) Kivikori tunnetaan myös nimellä gabioni. Sana gabion tulee Italian kielestä, joka tarkoittaa suurta häkkiä. (11, s. 24.)

Suomessa kivikoreja käytetään monipuolisesti toimitila- ja infrarakentamisessa erityisesti tukimuurina, meluesteinä ja aitarakenteina. Kivikorit ovat onttoja koreja, joita valmistetaan teräsverkosta. Näiden teräsverkosta valmistettujen korien etuna on rakenteellinen joustavuus. Ainoastaan tyhjät korit kuljetetaan rakennuskohteeseen ja niitä voidaan täyttää kivillä paikan päällä. (12.)

Kivikorien täyttöön valitaan lujaa kiviainesta, joka kestää hyvin sekä mekaanista rasitusta että sääolosuhteita. Muurin ulkonäköä voidaan muokata hyödyntämällä erilaisia kiven värejä ja muotoja. Kuvassa 4 esitellään esimerkki kivikorien käytöstä tukimuurirakenteissa. (12.)



Kuva 4. Kivikorien rakennekuva tukimuurissa. (12)

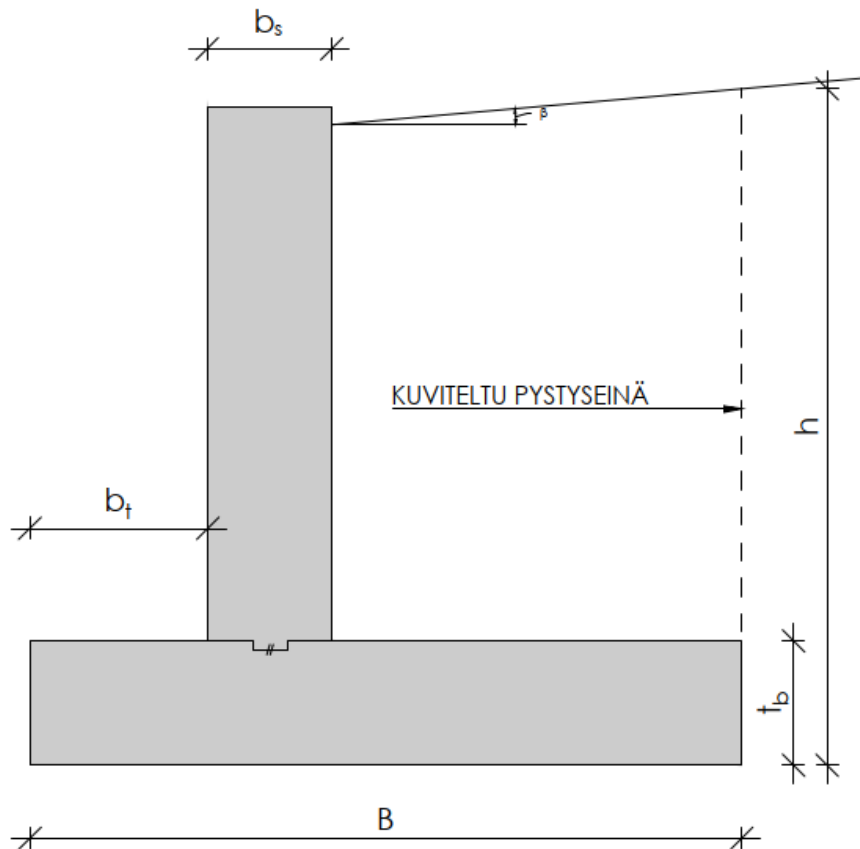
Kivikorien suunnittelussa on huomioitava taustatäytöstä aiheutuva maapaine ja aitarakenteissa tuulikuorma. Lisäksi on tärkeää varmistaa rakenteen kokonaisvakavuus. Mataliin kivikorimuureihin näitä edellä mainittuja laskelmia ei yleensä kuitenkaan tarvita. (10, s. 1.)

## 2.2 Teräsbetoninen kulmatukimuuuri

Rakenteeltaan teräsbetoninen kulmatukimuuuri on usein käänteisen T:n tai L:n muotoinen rakenne, joka koostuu pystysuorasta tukiseinästä ja pohjalaatasta (13, s. 355). Pystysuoran rintamuurin takana maamassa tukeutuu pohjalaatan päälle, mikä lisää rakenteen vakautta. Pohjalaatan leveyden olleessa suuri

voidaan kulmatukimuri suunnitella huomattavasti kevyemmäksi, kuin massiivinen tukimuri. (14, s. 155.)

Maapohjan ollessa riittävän kestävä, pohjalaatta voidaan toteuttaa toispuoliseksi. Usein pohjalaatta kuitenkin laajennetaan myös rintamuurin etupuolelle, mikä vähentää pohjarasituksia kuvan 5 esitetyllä tavalla. (14, s. 155.)



Kuva 5. Kulmatukimuurin periaatekuva ja geometria. (15, s. 70)

Kulmatukimuurin mitat määräytyvät sen käyttötarkoituksen ja kuormitustapausten mukaan. Mittasuhteita säätämällä voidaan vaikuttaa rakenteen kantokykyyn. Tyypillisesti pohjalaatan leveys  $B$  on noin 50–70 % virtuaalisen seinän korkeudesta, joka on esitetty kuvassa 5 merkinnällä  $h$ . Sekä pystymuurin leveys  $b_s$  että pohjalaatan korkeus  $t_b$  ovat molemmat noin  $h/10$ ... $h/15$ . Pohjalaatan kärjen  $b_t$  pituus on tavallisesti välillä  $B/3$ ... $B/4$ . (15, s. 70.) Muurin korkeus määritellään usein maapohjan ominaisuuksien ja kuormituksen perusteella (16, s. 247–260).

### 3 Kulmatukimuurin suunnitteluperiaatteet

Eurokoodi-standardien mukaisesti tukirakenteiden suunnittelu on jaettu kahteen pääosaan: geotekniseen suunnitteluun ja rakennetekniseen suunnitteluun. Kulmatukimuurin mitoitusperiaatteena käytetään Eurokoodissa EN 1997 Geotekninen suunnittelu esitettyjä soveltamisohjeita, jotka toimivat laskentatyökalun perusteena. Rakennesuunnittelu tehdään noudattaen eurokoodia EN 1992 Betonirakenteiden suunnittelu sekä Betoniyhdistyksen antamia ohjeita.

#### 3.1 Eurokoodijärjestelmä

Eurokoodit virallisesti tunnettuina EN-standardeina muodostavat eurooppalaiset standardit kantavien rakenteiden suunnittelulle. Tällä hetkellä eurokoodisarja koostuu 58:stä osasta, jotka kattavat laajasti suunnittelun eri osa-alueet. Eurokoodien soveltaminen eri maissa edellyttää kansallisten liitteiden (NA) laatimista. Suomessa Ympäristöministeriö vastaa kansallisten liitteiden laadinnasta talorakentamisen osalta, kun taas Väylävirasto vastaa laadinnasta liikenneinfrastruktuurin, erityisesti siltojen osalta. (17.)

##### 3.1.1 Eurokoodien kattavuus ja soveltuvuus

Eurokoodit määrittelevät varmuuden määrittämisperiaatteet sekä kattavat erilaiset kuormitukset, kuten hyötykuormat, lumikuormat, tuulikuormat, lämpökuormat, onnettomuuskuormat ja nosturikuormat. Lisäksi standardit tarjoavat yksityiskohtaiset ohjeet eri rakennusmateriaalien käyttöön. (17.)

Standardeja sovelletaan yhdessä kansallisten liitteiden kanssa, jotka tarjoavat mahdollisuuden määritellä arvoja esimerkiksi varmuuslukujen tai luonnonkuormien laskemiseksi. Kansallisessa liitteessä määritellään myös informatiivisten liitteiden käyttö (sallittu, ei sallittu tai pakollinen). Lisäksi kansallinen liite voi viitata eurokoodin kanssa yhteensopivaan, täydentävään aineistoon (17).

Tämän opinnäytetyön näkökulmasta tärkeimmät standardit ovat EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet, EN 1991 Rakenteiden kuormat, EN 1992 Betonirakenteiden suunnittelu ja EN 1997 Geotekninen suunnittelu (15, s. 67).

### 3.2 Eurokoodin mukainen rajatilamitoitus

Eurokoodin mukainen suunnittelu perustuu rajatilamitoitukseen. Rajatilamitoituksessa rakenteen käyttäytymistä tarkastellaan rakenteiden toimintamallien avulla erilaisissa rajatiloissa. Tarkasteltavia rajatiloja ovat murtorajatilat ja käyttörajatilat. (18, s. 53.)

Eurokoodin vaatimusten mukaisesti tukimuurin mitoituksessa tulee tarkastella seuraavat rajatilat:

- Maapohjan tasapainotilan menetys kokonaisvaltaisesti
- Muurin sortuminen liukumisen seurauksena
- Muurin kaatuminen (koskee yleensä muuria, jotka perustettu kalliin)
- Muurin alla olevan maapohjan kantokyvyn menettäminen (joka voi johtaa muurin painumiseen ja kiertoon)
- Muurin rakenteellinen pettäminen (15, s. 68).

Eurokoodin ohjeistuksen mukaan murto- ja käyttörajatila tarkastellaan erillisenä kokonaisuutena (18, s. 52).

#### 3.2.1 Murtorajatila (ULS)

Murtorajatiloina luokitellaan tilanteita, joissa rakenteen epävakaas tai murtuminen aiheuttaa vaaran ihmisten turvallisuudelle tai varallisuudelle. Tällaisia tilanteita voivat olla esimerkiksi rakenteen tasapainon menetys, sortuminen tai muut vastaavat rakenteelliset vaurioitumistilanteet. (18, s. 52.)

Pysyvien ja väliaikaisten tukirakenteiden, kuten kulmatukimuurien ja -seinien mitoituksessa on otettava huomioon rakenteen kokonaisstabiiliteetti, mukaan

lukien vaaka- ja pystystabiliteetti, maapohjan mahdollinen murtuminen, siirtymät sekä rakennetekninen kestävyys. (19, s. 76.)

Tässä työssä keskitytään erityisesti luvussa 3.2 mainittuihin rajatiloihin, jotka ovat kulmatukimuurin kannalta olennaisia.

### 3.2.2 Käyttörajatila (SLS)

Normaalikäytössä käyttörajatilat viittaavat tilanteisiin, joissa rakenteen tai rakennosien normaali toiminta häiriintyy. Nämä tilanteet voivat aiheuttaa haittaa ihmisten mukavuudelle tai vaikuttavat haitallisesti rakenteen ulkonäköön ja säilyvyyteen, mutta niistä ei ole välitöntä vaaraa ihmisten tai rakenteen turvallisuudelle. (18, s. 54.)

Käyttörajatilan minimivaatimukset on määritelty standardissa SFS-EN 1990 2006. Vaatimukset voidaan tarvittaessa mukauttaa kohdekohtaisesti, mikäli tavoitellaan tiukempia rajoja kuin minimivaatimukset, tai jos minimivaatimuksia ei ole selkeästi määritelty (18, s. 54).

Palautuva ja palautumaton käyttörajatila tulee erotella:

- Palautuva käyttörajatila tarkoittaa tilannetta, jossa kuormien vaikutukset palautuvat, kun kuormat poistetaan.
- Palautumaton käyttörajatila puolestaan tarkoittaa tilannetta, jossa kuormien vaikutukset eivät palaudu, kun kuormat poistetaan. (18, s. 54.)

Tavanomaisissa betonirakenteissa käyttörajatiloiissa tarkastellaan siirtymiä, värähtelyjä ja mahdollisia vaurioita, jotka voivat vaikuttaa rakenteen ulkonäköön, käyttäjien mukavuuteen, rakenteen toimivuuteen sekä teknisten järjestelmien suorituskykyyn ja säilyvyyteen (20, s. 30–31).

### 3.3 Mitoitustavat

Eurokoodi tarjoaa kolme osavarmuuslukumenetelmän mukaista mitoitus tapaa DA1, DA2 ja DA3 (DA = Design Approach) STR- ja GEO-rajatiloille normaalisti vallitsevissa ja väliaikaisissa mitoitus tilanteissa. Näissä mitoitus tavoissa varmuuskertoimia sovelletaan eri tavoin. (2, s. 346.)

Mitoitus tapaa DA1 ei käytetä Suomessa, sillä kansallisen liitteen mukaan sen ei ole katsottu sopivaksi Suomen olosuhteisiin erityisesti suurimpien varmuuskertoimien osalta. Tämän vuoksi mitoitus tavan 1 tarkastelu on jätetty pois tästä työstä. (2, s. 346.)

Mitoitus tapa DA2 käytetään Suomessa useiden perustustyyppien, kuten anturaja laattaperustusten, paaluperustusten sekä ankkuroiden ja tukirakenteiden suunnittelussa. Tässä lähestymistavassa maaperän ominaisuuksia käsitellään ominaisarvoina, mutta kuormia kerrotaan osavarmuuskertoimilla. Esimerkiksi anturaperustuksen suunnittelussa käytetään kantokestävyyskaavaa kantavuuden laskemiseen ja tämän jälkeen kantavuuden arvo jaetaan vielä ”kantokestävyiden” osavarmuuskertoimella. (2, s. 346.)

Mitoitus tavassa DA2 on kaksi erilaista lähestymistapaa. Ensimmäisessä tavassa DA2 osavarmuuskertoimet otetaan huomioon heti laskennan alusta, kun taas toisessa vaihtoehdossa DA2\* ne lisätään vasta lopussa kestävyyttä laskettaessa. Eron huomaa esimerkiksi tukimuurin anturan mitoituksessa. DA2- menetelmässä osavarmuusluvut huomioidaan jo maanpaineen laskentaan, jolloin maanpaine arvo kasvaa. Tämä voisi siirtää kokonaisresultantin enemmän sivulle ja pienentää laskennallisesti kantavan laatan kokoa. Näin ollen DA2 voi jossain tapauksissa johtaa järeämpään rakenteeseen. (2, s. 346.) Vaihtoehdossa DA2\* mitoituksessa kaikki pysyvät kuormat, kuten rakennusten omapaino, maanpaine ja muut jatkuvasti vaikuttavat kuormat oletetaan epäedulliseksi (14, s. 54–55).

Mitoitus tavassa DA2 tulee varmistaa, että osavarmuuskertoimien yhdistelmä kaava 1 ei ylitä murtorajatilan jännityksiä, eikä aiheuta käyttörajatilassa liiallisia muodonmuutoksia (14, s. 55).

A1+M1+R2 (1)

Missä

A1 on osavarmuusluvut kuormille tai kuorman vaikutuksille

M1 on osavarmuusluvut maaparametreille

R2 on osavarmuusluvut tukirakenteiden kestävyydelle

Mitoitustapaa DA3 sovelletaan luiskien ja kokonaisvakavuuden laskemisessa, jossa osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin ja maaparametreihin. Kestävyysden osalta käytetään varmuuskertoimena 1,0. (14, s. 56.) Tässä opinnäytetyössä ei suoriteta kokonaisstabiilitarkastelua, joten mitoitustavan 3 käsittely ei ole tarpeellista.

### 3.4 Osavarmuusluvut

Eurokoodi asettaa rajatilamitoituksessa tarvittavat osavarmuuskertoimet kuormille, maaparametreille ja kestävyyksille. Osavarmuuslukumenetelmässä on oleellista varmistaa, ettei missään mitoitustilanteessa ylitetä rakenteen tai sen osan rajatiloja, kuten murto- tai käyttörajatiloja. Tämä saavutetaan käyttämällä kuormien ja kestävyksien mitoitusarvoja. (18, s. 70.) Mitoitusarvot määritetään hyödyntämällä joko ominaisarvoja tai edustavia arvoja yhdessä osavarmuuslukujen kanssa. Osavarmuusluvut esitetään kansallisessa liitteessä. (20, s. 34.)

Tässä osiossa keskitytään käsittelemään niitä osavarmuuslukuja, jotka ovat tärkeitä tämän työn kannalta, erityisesti murtorajatilassa. Käyttörajatilassa osavarmuuskertoimille käytetään vakioarvoa 1,0. (18, s. 84.)

Seuraamusluokan määrittäminen perustuu rakennuskohteen mahdollisen vaurion tai vian aiheuttamien seurauksien vakavuuteen. Rakennuksen eri osien kohdalla voidaan ottaa huomioon niiden käyttötapa ja rakenneratkaisut, jonka perusteella kullekin osalle voidaan määritellä omat seuraamusluokkansa. (18, s.

136.) Taulukossa 2 esitetty kuormakerroin  $K_{FI}$  on riippuvainen kolmesta luotettavuusluokasta, jotka liittyvät seuraamusluokkiin CC1, CC2 ja CC3 ks. taulukko 1 (14, s. 44–45).

Taulukko 1. Seuraamusluokkien määrittely. (18, s. 136)

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä maa- ja vesirakennuskohteita koskevia esimerkkejä
CC3	<b>Suuret</b> seuraamukset hengenmenetysten tai <b>hyvin suurten</b> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Pääkatsomot; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat suuret (esim. konserttitalo)
CC2	<b>Keskisuuret</b> seuraamukset hengenmenetysten tai <b>merkittävien</b> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Asuin- ja liikerakennukset; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat keskisuuret (esim. toimistorakennus)
CC1	<b>Vähäiset</b> seuraamukset hengenmenetysten tai pienten tai <b>merkitykyttömiä</b> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Maa- ja metsätalousrakennukset, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä (esim. varastorakennukset, kasvihuoneet)

Rakenteiden luotettavuusluokka vaikuttaa oleellisesti suunnittelun valvontatasoon ja rakentamisaikaisiin tarkastuksiin (20, s. 23).

Taulukko 2. Kuormakertoimen  $K_{FI}$  riippuvuus luotettavuusluokasta. (18, s. 138)

Kuormakerroin $K_{FI}$	Luotettavuusluokka		
	RC1	RC2	RC3
$K_{FI}$	0,9	1,0	1,1

### 3.4.1 Staattisen tasapainorajatilan (EQU) osavarmuusluvut

Staattisessa tasapainorajatilassa eli EQU-rajatilassa (equilibrium) käsitellään jäykän kappaleen tai sen osan tasapainon menettämistä käyttäen taulukossa 3 esitettyjä kuormien osavarmuuskertoimia. Tarkastelussa pyritään varmistamaan, että epäedulliset kuormat eivät ylitä edullisten kuormien mitoitusarvoja. Yleensä tässä tilanteessa maapohjan ja materiaalien lujuusarvot eivät ole ratkaisevia tekijöitä. Sen sijaan pysyvien kuormien arvot ja pienetkin vaihtelut kuormien jakautumisessa voivat aiheuttaa merkittäviä vaikutuksia. (18, s. 76–78) ja (14, s. 46–47)

Taulukko 3. Kuormien osavarmuusluvut ( $\gamma_F$ ) (staattisen tasapainorajatila EQU) (14, s. 49)

Kuorma	Merkintä	Arvo
Pysyvä:		
Epäedullinen <sup>a</sup>	$\gamma_{G,dst}$	1,1 $K_{FI}$
Edullinen <sup>b</sup>	$\gamma_{G,stb}$	0,9
Muuttuva:		
Epäedullinen <sup>a</sup>	$\gamma_{Q,dst}$	1,5 $K_{FI}$
Edullinen <sup>b</sup>	$\gamma_{Q,stb}$	0

<sup>a</sup> kaatava kuorma

<sup>b</sup> vakauttava kuorma

Staattisen tasapainorajatilan (EQU) maanparametreille käytettävät osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Osavarmuusluvut maanparametreille ( $\gamma_M$ ). (21, s. 119)

Maanparametri	Merkintä	Sarja	
		M1	M2
Leikkauskestävyyskulma <sup>a</sup> ("kitkakulma")	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25

Maaparametri	Merkintä	Sarja	
		M1	M2
Suljettu leikkauslujuus	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Puristuslujuus	$\gamma_{qu}$	1,0	1,4
Tilavuuspaino	$\gamma_{\gamma}$	1,0	1,0
<sup>a</sup> Tätä kerrointa käytetään $\tan \varphi'$ :in			

### 3.4.2 Rakenteellinen kestävyys (STR) ja maapohjan kantavuus (GEO)

Rakenteen ja maapohjan kestävyys tarkastellaan rakenteellisessa (STR) ja geoteknisessä (GEO) rajatilassa varmistaen, ettei rakenteessa esiinny liiallisia muodonmuutoksia eikä murtoja. Mitoituksessa varmistetaan, että kuormien vaikutusten mitoitusarvo ei ylitä kestävyuden mitoitusarvoa (14, s. 50.)

Rakenteellisten ja geoteknisten rajatilojen osoittamiseksi kuormille tai niiden vaikutuksille tulee käyttää taulukossa 5 ilmaistuja osavarmuuskertoimia (14, s. 51).

Taulukko 5. Kuormien ( $\gamma_F$ ) tai kuorman vaikutusten ( $\gamma_E$ ) osavarmuusluvut (STR/GEO) (14, s. 51)

Kuorma	Merkintä	Sarja	
Pysyvä:			
Epäedullinen			
(Yht.6.10a)		1,35 $K_{FI}$	
(Yht.6.10b)	$\gamma_{Gkj,sup}$	1,15 $K_{FI}$	
(Yht.6.10)			1,0 $K_{FI}$
Edullinen			
(Yht.6.10a)	$\gamma_{Gkj,inf}$	0,9	
(Yht.6.10b)		0,9	
(Yht.6.10)			1,0
Muuttuva:			
Epäedullinen			

Kuorma	Merkintä	Sarja	
(Yht.6.10b)	$\gamma_Q$	1,5 $K_{FI}$	
(Yht.6.10)			1,3 $K_{FI}$
Edullinen		0	0

Rakenteellisissa ja geoteknisissä rajatiloissa antura- ja laattaperustuksien osalta käytetään taulukon 6 osavarmuuslukuja (14, s. 54).

Taulukko 6. Antura- ja laattaperustuksien kestävyden osavarmuuskertoimet ( $\gamma_R$ ). (STR/GEO) (14, s. 54)

Kestävyys	Merkintä	Sarja 2
Kantokestävyys	$\gamma_{R,v}$	1,55
Liukuminen	$\gamma_{R,h}$	1,1

Osavarmuusluvut tukirakenteiden kestävyydelle on esitetty taulukossa 7 (14, s. 54).

Taulukko 7. Tukirakenteiden kestävyden osavarmuusluvut ( $\gamma_R$ ). (STR/GEO) (14, s. 54)

Kestävyys	Merkintä	Sarja 2
Kantokestävyys	$\gamma_{R,v}$	1,55
Liukuminen	$\gamma_{R,h}$	1,1
Maan kestävyys (passiivipaine)	$\gamma_{R,e}$	1,5

Rakenteellisissa ja geoteknisissä rajatiloissa osavarmuusluvut maaparametreille on esitetty taulukossa 8. Sarjan M1 tai M2 valinta riippuu käytettävästä mitoitustavasta, joka on tarkemmin selostettu luvussa 3.3. (STR/GEO) (14, s. 53.)

Taulukko 8. Osavarmuusluvut maaparametreille ( $\gamma_M$ ). (STR/GEO). (14, s. 53.)

Maaparametri	Merkintä	Sarja	
		M1	M2
Leikkauskestävyyskulma <sup>a</sup> ("kitkakulma")	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Suljettu leikkauslujuus	$\gamma_{cu}$	1,0	1,5
Puristuslujuus	$\gamma_{qu}$	1,0	1,5
Tilavuuspaino	$\gamma_Y$	1,0	1,0
<sup>a</sup> Tätä kerrointa käytetään $\tan \varphi'$ :in			

Murtorajatilassa betonille ja betoniraudoitukselle materiaaliosavarmuusluvut määritellään taulukossa 9 esitettyjen arvojen mukaisesti. (22, s. 24).

Taulukko 9. Murtorajatilojen materiaaliosavarmuuskertoimet teräsbetonirakenteille. (22, s. 24)

Mitoitustilanteet	Betoni ( $\gamma_c$ )	Betoniteräs ( $\gamma_s$ )
Normaalisti vallitseva ja tilapäinen	1,5	1,15
Onnettomuus	1,0	1,0

## 4 Kuormitukset

Eurokoodi-standardin mukaan kuormalla ( $F$ ) viitataan rakenteeseen välittömästi vaikuttaviin voimiin tai niiden yhdistelmiin. Kuormat jaetaan pysyviin ( $G$ ), muuttuviin ( $Q$ ) ja onnettomuuskuormiin ( $A$ ) niiden ajallisen vaihtelun perusteella.

Riippuen tarkasteltavasta tilanteesta tai rajatilasta, kuorma voi toimia rakenteelle edullisesti tai epäedullisesti. (18, s. 32.) Lisäksi kuorma voi vaikuttaa rakenteen vakautta lisäävästi tai heikentävästi. Kuormat voivat kohdistua rakenteeseen vaak- tai pystysuuntaisesti sekä momentin kautta. (18, s. 58.)

#### 4.1 Pysyvät kuormat

Eurokoodi-standardissa pysyväksi kuormaksi katsotaan rakenteiden ja rakennusosien omapaino ja muu rakenteeseen vaikuttava muuttumaton kuorma. Pysyvien kuormien vaikutus on jatkuva ja tasainen koko tarkasteluajan eikä se muutu ajan myötä. Pysyvät kuormat voivat vaikuttaa rakenteeseen myös välillisesti, jotka aiheutuvat esimerkiksi epätasaisesta painumasta tai kutistumisesta. (23, s. 18.)

#### 4.2 Muuttuvat kuormat

Muuttuviksi kuormiksi kutsutaan kaikkia sellaisia rakennuksen tai rakenteen kuormia, jotka voivat muuttua ajan kuluessa sekä suuruudeltaan että sijainniltaan. Kaikki hyötykuormat ovat muuttuvia kuormia. (23, s. 18) Hyötykuormien lisäksi muuttuviin kuormiin kuuluu myös lumen, tuulen, liikenteen ja varastoinnin aiheuttamat kuormat. Nämä kuormat voivat esiintyä yksittäin tai yhdistettynä ja niiden vaikutukset on huomioitava rakenteiden suunnittelussa. (23, s. 20.)

Suomen kansallisessa liitteessä on asetettu eri rakennusosille, kuten välipohjille, parvekkeille, portaille, varastoille ja liikennöintialueille hyötökuormien minimiarvot (23, s. 30).

Eurokoodi-standardeissa muuttuvien kuormien tunnuksena käytetään Q-kirjainta. Kulmatukimuurin kannalta muuttuvia kuormia voivat olla liikenteestä, nosturien käytöstä, työkoneiden tai tilapäisestä materiaalien varastoinnista aiheutuvat hyötykuormat. (23, s. 18.)

#### 4.3 Onnettomuuskuormat

Eurokoodi-standardi mukaan onnettomuuskuormat ovat rakenteisiin kohdistuvia poikkeuksellisia kuormia, jotka syntyvät odottamattomien tapahtumien kuten maanjäristysten, liikenneonnettomuuksien, törmäysten tai räjähdysten seurauksena. Ne ovat muuttuvia kuormia, joiden suuruus ja vaikutus riippuvat

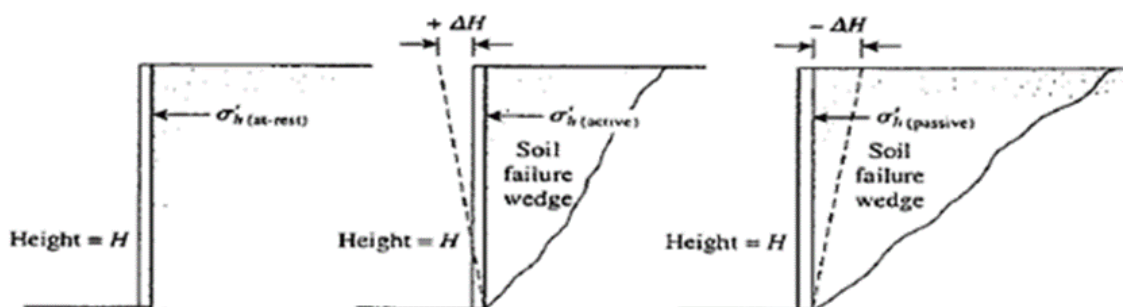
onnettomuuksien luonteesta. Standardissa onnettomuuskuorman tunnuksena käytetään A-kirjainta. (24, s. 24–27.)

Kulmatukimuurin suunnittelussa mahdollinen vedestä tai roudasta johtuva paine taustatäytön puolella voidaan käsitellä onnettomuuskuormana (21, s. 28). Tässä opinnäytetyössä ei oteta huomioon onnettomuuskuormia laskentapohjan laatimisessa.

#### 4.4 Maanpaine

Maanpaine on maamassan tai ulkoisen kuormituksen aiheuttamaa painetta, joka kohdistuu pystysuoraan tai kaltevaan rakenteeseen. Maanpaineen suuruus, suunta ja jakautuminen määräytyvät maan ja rakenteen välisistä liikkeistä sekä maan ominaisuuksista. (2, s. 172.)

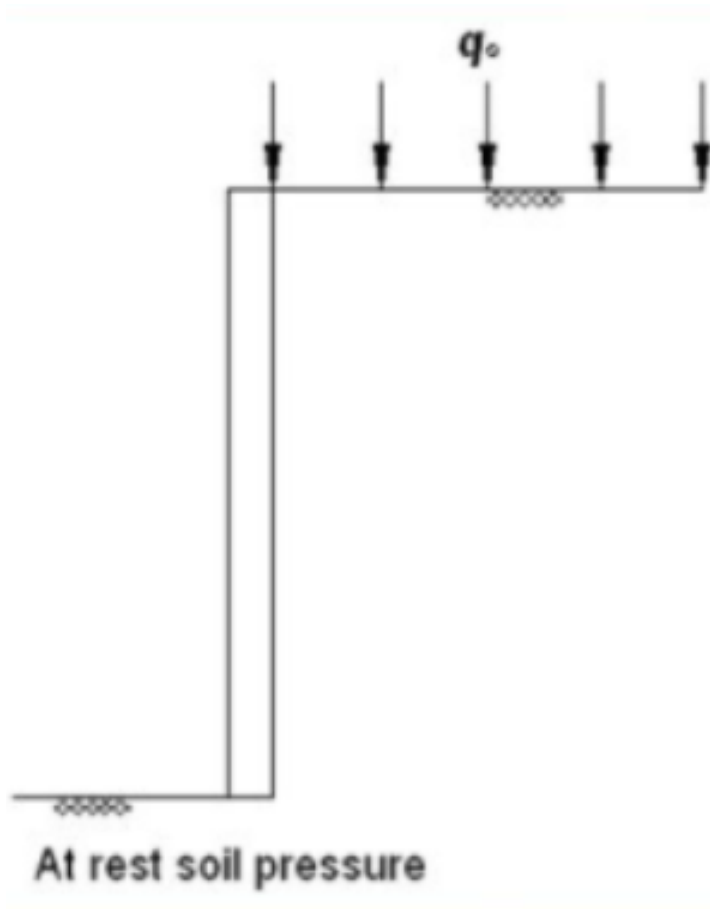
Maapaineelle altistuvien rakenteiden suunnittelussa on oleellista huomioida rakenteiden suhteellinen liike. Maanpaine luokitellaan liikkeiden perusteella kuvan 6 mukaisesti lepo-, aktiivi- ja passiivipaineeseen. Aktiivi- ja passiivipaine ovat tukirakenteesta riippuvia arvoja, jotka aiheutuvat rakenteen liikkeestä, kun taas lepopaine vaikuttaa siirtymättömään tukirakenteeseen suhteessa ympäröivän maaperään. (25, s. 80.)



Kuva 6. Liikkeestä johtuvat maanpainetapaukset kuvitteellisessa seinässä sisältävät lepopaineen, aktiivi- ja passiivipaineen. (26, s. 324)

#### 4.4.1 Lepopaine

Lepopaineeksi kutsutaan tilannetta, jossa muuri on liikkumaton suhteessa ympäröivään maa-ainekseen nähden, kuten kuvassa 7 on havainnollistettu. Edellä mainittu tilanne muodostuu esimerkiksi silloin, kun tukimuuri on jäykästi kiinnitetty yläpäästään, eikä se salli kierto- tai sivuttaisliikettä. Lepopaine on aina suurempi, kuin maan aiheuttama aktiivipaine. Laskennassa oletetaan lepopaineen vaikuttavan rakenteeseen vaakasuoraan. (25, s. 80.)



Kuva 7. Periaatekuva maan lepopaineesta. (27)

Kulmatukimuurin kohdalla normaalikonsolidoituneessa maapohjassa oletetaan yleensä valitsevan lepotila tukimuurin takana olevassa täytössä, kun rakenteen siirtymä on pienempi kuin  $5 \times 10^{-4} \times h$  (21, s. 99).

Lepopaineen suuruus määritetään käyttämällä kaavaa 2.

$$P_0 = K_0 \gamma h \quad (2)$$

missä

$P_0$  on lepopaine

$K_0$  on maanpaineen lepopainekerroin

$\gamma$  on maan tilavuuspaino [ $\text{kN/m}^3$ ]

$h$  maanpaineen vaikutuskorkeus

Jos maanpinnalla on tasainen pintakuorma, jonka suuruus on  $q$  ja/tai maanpinnan kaltevuuskulma tukiseinän takana on  $\beta$ , silloin lepopaineen suuruus määritellään kaavan 3 mukaisesti (25, s. 80).

$$P_0 = K_0(1 + \sin \beta) (\gamma h + q) \quad (3)$$

missä

$\beta$  on maan kaltevuuskulma tukiseinän takana (ylöspäin positiivinen)

$q$  on tasaisen pintakuorman suuruus maanpinnalla

Likimääräisesti lepopainekerroin  $K_0$  vaakasuoralle maapinnalle saadaan maan leikkauskestävyyskulman avulla kaavaa 4 käyttäen (25, s. 80).

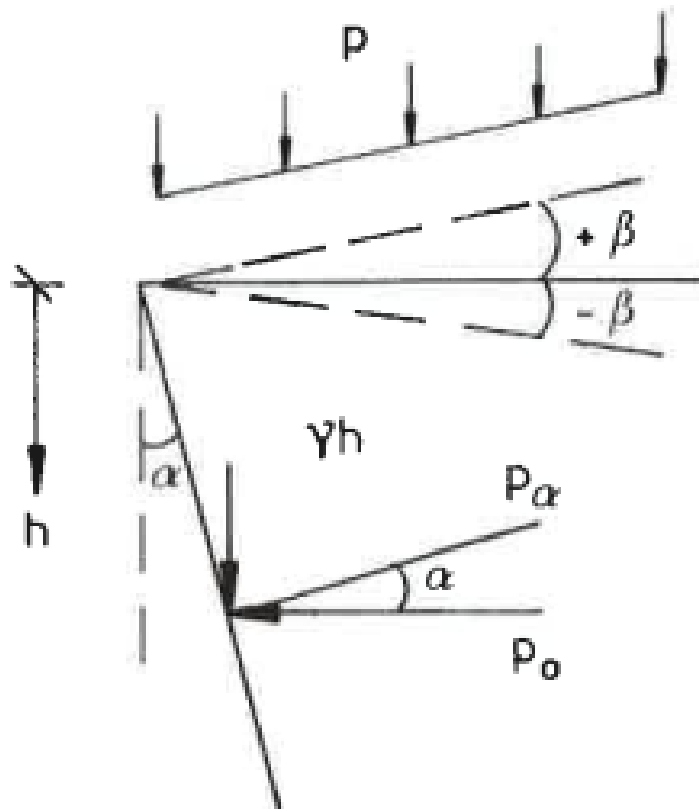
$$K_0 = (1 - \sin \varphi') \sqrt{\text{OCR}} \quad (4)$$

missä

OCR on ylikonsolidoitumissuhde (kaavaa ei käytetä erittäin korkeilla OCR-arvoilla)

$\varphi'$  on leikkauskestävyyskulma ("kitkakulma") tehokkaiden jännitysten perusteella

Kaltevaan tukimuriin kohdistuva paine syntyy sekä lepopaineesta, että maataytön omasta painosta kuvassa 8 esitetyllä tavalla (25, s. 80).



Kuva 8. Kaltevaa seinää kuormittava maanpaine. (25, s. 80)

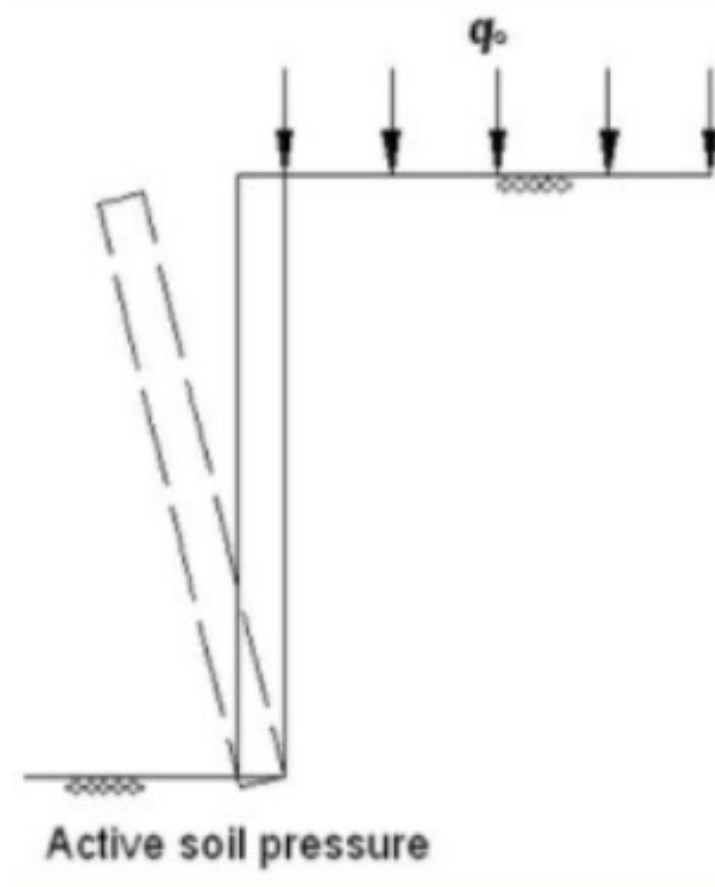
Kaltevaan tukimuriin kohdistuvaa painekuormaa voidaan laskea kaavan 5 mukaisesti (25, s. 80).

$$P_{\alpha} = P_0 \cos^2 \alpha + \gamma h \sin^2 \alpha \quad (5)$$

#### 4.4.2 Aktiivipaine

Maan aktiivipaineeksi kutsutaan tilanteita, joissa tukirakenne pääsee liikkumaan pois päin ympäröivästä maaperästä kuvan 9 mukaisesti. Tämä johtaa aktiivisen

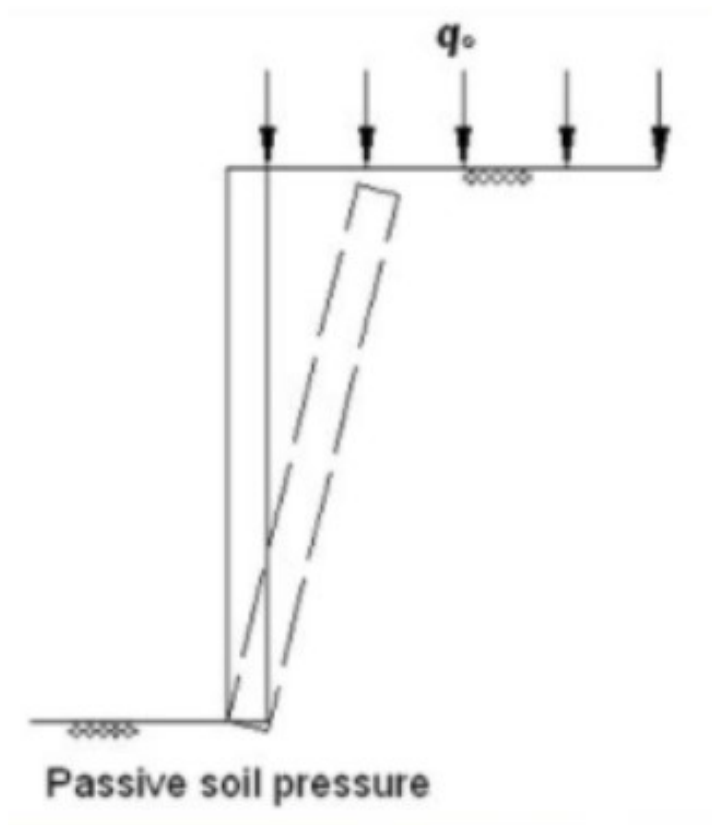
maanpaineen muodostumiseen tukimuriin, jonka suuruuteen vaikuttavat muurin taakse syntyvän liukuvan maakiilan paino sekä liukumisvastus. Aktiivinen maanpaine on pienempi, kuin maan lepopaine. (28, s. 1–7.)



Kuva 9. Aktiivipaineen muodostuminen tukimuurilla. (27.)

#### 4.4.3 Passiivipaine

Tukimuri työntää maamassaa liikkumissuunnassaan. Tämä liike synnyttää tukimuriin passiivisen maapaineen, joka johtuu maan työntövoimasta ja liukumisen vastuksesta kuvan 10 osoitetulla tavalla. Passiivinen maanpaine on merkittävästi aktiivista maanpainetta ja lepopainetta suurempi. (28, s. 1–7.)

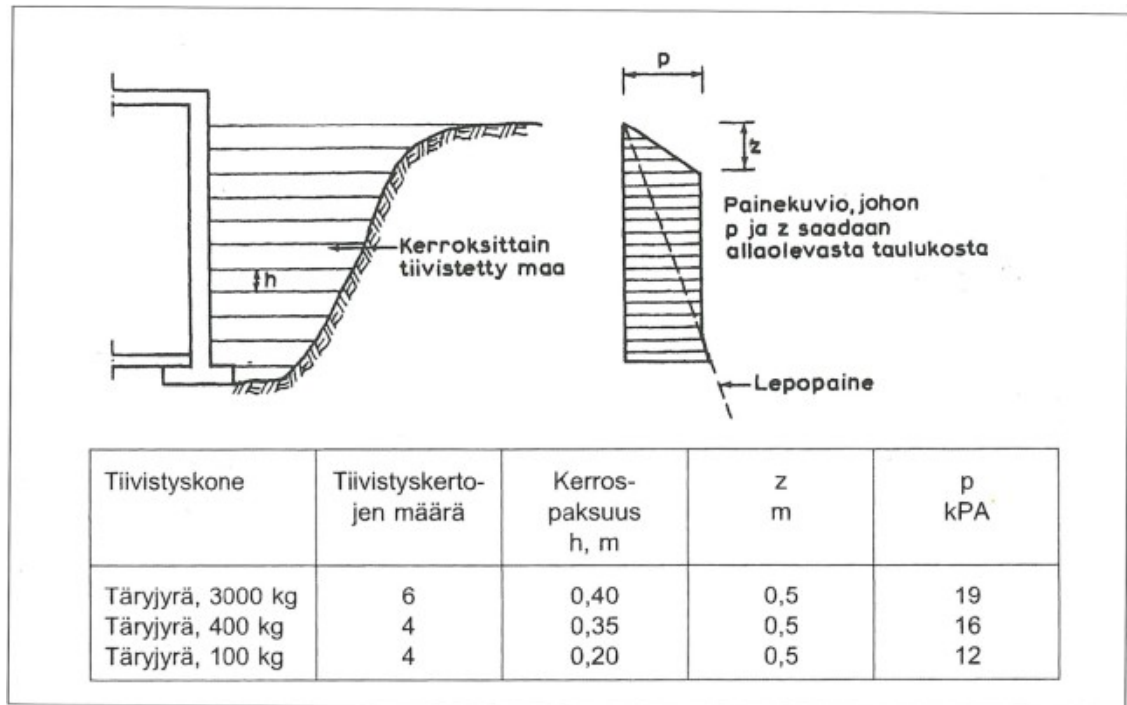


Kuva 10. Passiivisen maanpaineen muodostuminen tukimuurilla. (27)

#### 4.4.4 Tiivistyskuorma

Tiivistämisen tavoitteena on saavuttaa taustatäytön tila, missä se vastaa täyttäjien rakenteellisia vaatimuksia, joko suurta kuivatilavuuspainoa, tai pientä vedelläpäisevyyttä. Käytännössä tämä merkitsee täytön puolella esiintyvien painumien ja muodonmuutosten rajoittamista. (2, s. 191.)

Tukimuurin takana taustatäyttömateriaalin tiivistäminen kasvattaa maanpainetta, joka huomioidaan laskennassa pysyvänä kuormana. Tiivistämisessä käytettävät koneet, materiaalit ja kerrosten paksuus vaikuttavat maanpaineen suuruuteen. Paksumpien kerrosten tiivistämisessä dynaamisten kuormien vaikutukset ovat vähäisiä. Kuvassa 11 on esitetty esimerkki, kuinka maanpainekuvio muuttuu siirtymättömässä tukirakenteessa, mutta sama periaate pätee myös myötäväille tukirakenteille. (14, s. 165–166.)



Kuva 11. Siirtymättömän tukirakenteen takana täytön synnyttämä pysyvä maanpaine. (14, s. 165)

#### 4.5 Lisäkuormat

Kulmatukimuurin kohdalla lisäkuormilla tarkoitetaan maanpinnalla tai tuetun maan pinnan läheisyydessä vaikuttavia kuormia, jotka aiheutuvat esimerkiksi alueella sijaitsevista rakennuksista, pysäköidyistä tai liikkuvista ajoneuvoista, nostureista sekä varastoiduista rakennusmateriaaleista. (14, s. 157.)

Maanpinnalla vaikuttavat pintakuormat ovat erityyppisiä ja luonteeltaan vaihtelevia ulkoisia kuormia, joita voidaan yleisesti jaotella kahteen pääluokkaan:

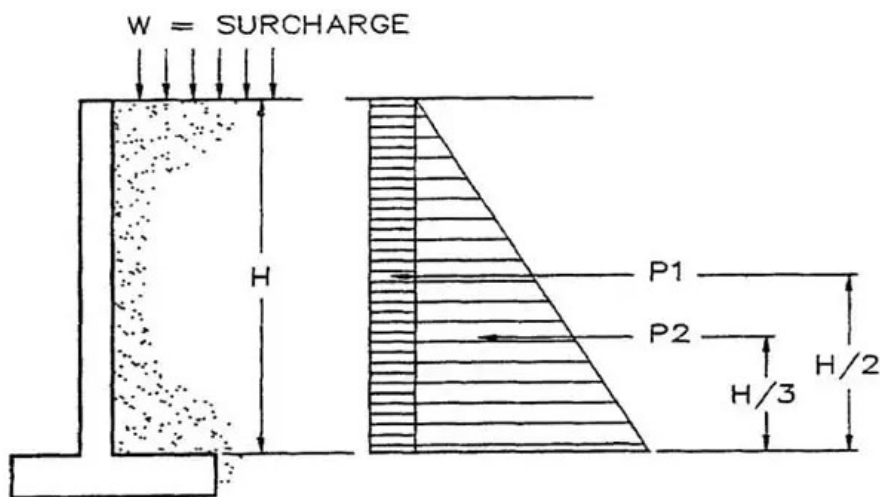
- viivakuorma
- pintakuorma

Laskentapohjassa edellä mainitut maanpinnalla vaikuttavat kuormat otetaan huomioon viiva- ja pintakuormina, jotka sisältävät liikenne- ja työkonoiden aiheuttamat kuormat sekä rakenteiden pysyvät ja hyötykuormat. Viivakuormituksen ja keskitetyn kuormituksen vaikutus voidaan laskea käyttäen

liukupintamenetelmää tai kimmoteorian pohjalta kehitettyä likimääräismenetelmää. Lisäksi vaikutusten laskenta on mahdollista toteuttaa analyttisellä menetelmällä. (2, s. 189–190.)

#### 4.5.1 Viivakuormat

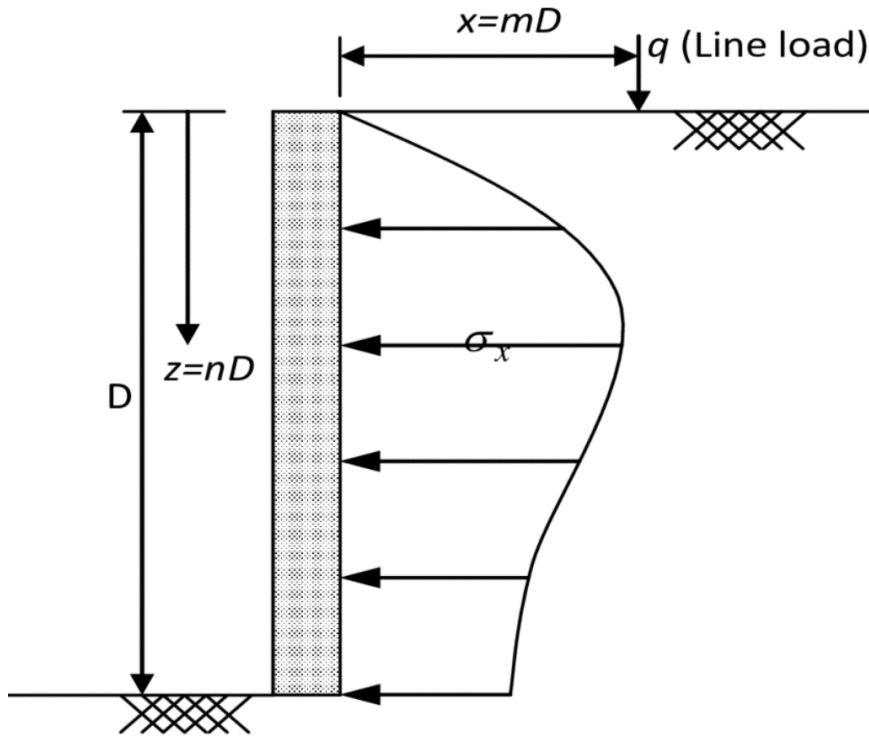
Viivakuormilla tarkoitetaan tasaisesti jakautunutta pysyvää tai muuttuvaa kuormaa. Tukimuurille kohdistuva viivakuorma voidaan olettaa tasaisesti jakautunut kuormitus. Pystysuorassa seinässä viivakuorman aiheuttama paine jakautuu tasaisesti, täten resultantin sijainti on seinän kokonaiskorkeuden keskellä. Kaltevan täyttömaan tapauksessa paineen jakautuminen kallistuu kulmaan, joka vastaa täyttömaan kaltevuutta. Kuvassa 12 on havainnollistettu viivakuorman vaikutus tukimuruun sekä resultantin  $P1$  paikka. (29.)



Kuva 12. Viivakuorman vaikutus kulmatukimuruun. (30)

#### 4.5.2 Pistekuormat

Pistekuorma on tyypillisesti pienelle alueelle keskittyvä, pistemäinen kuorma tai voima. Näitä kuormia aiheuttavat esimerkiksi ajoneuvojen pyöräkuormat, nostureiden ja trukkien tukijalkojen kuormat sekä pilarikuormat ja muut yläpuolisten rakenteiden paikalliset kuormat. Kuvassa 13 on esitetty, kuinka pistekuorma vaikuttaa tukimuruun. (2, s. 189–190.)



Kuva 13. Pintakuorman vaikutus tukimuurirakenteeseen. (29)

## 5 Kuormien yhdistely

Kuormien yhdistelyssä yhdistetään sellaiset kuormat, jotka vaikuttavat rakenteeseen samanaikaisesti. (18, s. 86) Rakenteen mukaan erilaisille seuraamusluokille sovelletaan eri kuormakerrointa  $K_{FI}$ . Kertoimen määrittely on selostettu tarkemmin luvussa 3.4.

### 5.1 Kuormayhdistelmät murtorajatilassa

Murtorajatilassa betonirakenteiden mitoituksessa otetaan huomioon kaksi rajatilaa:

- Staattisen tasapainon rajatila (EQU)
- Kestävyyden rajatila (STR)

Edellä mainituissa rajatiloissa kuormitusyhdistelmänä käytetään näistä kahdesta seuraavasta lausekkeesta epäedullisempaa (14, s. 51).

$$1,15 K_{FI} G_{kj,sup} + 0,9 G_{kj,inf} + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6)$$

$$1,35 K_{FI} G_{kj,sup} + 0,9 G_{kj,inf} \quad (7)$$

missä

$G_{kj,sup}$  ovat epäedulliset pysyvät kuormat

$G_{kj,inf}$  ovat edulliset pysyvät kuormat

$Q_{k,1}$  on määräävän muuttuvan kuorman 1 ominaisarvo

$Q_{k,i}$  on muun samanaikaisen muuttuvan kuorman i ominaisarvo

$\Psi$  on yhdistelykerroin taulukon 10 mukaisesti

$K_{FI}$  on kuormakerroin taulukon 2 mukaisesti

Staattisen tasapainon rajatilassa (EQU) lauseke 8 muodostetaan käyttäen taulukossa 3 esitettyjä osavarmuuslukuja (14, s. 51).

$$1,0 K_{FI} G_{kj,sup} + 0,9 G_{kj,inf} + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (8)$$

## 5.2 Kuormayhdistelmät käyttörajatilassa

Käyttörajatilan kuormitusyhdistelyssä hyödynnetään kolmea erilaista kuormitusyhdistelmää, jotka valitaan tarkasteltavan rajatilan perusteella. Nämä yhdistelmät ovat ominaisyhdistelmä, tavallinen yhdistelmä ja pitkäaikainen yhdistelmä. (18, s. 84.)

Ominaisyhdistelmä:

$$G_{kj,sup} + Q_{k,1} + \sum_{\psi_{0,i}} Q_{k,i} \quad (9)$$

Ominaisyhdistelmä on tarkoitettu käytettäväksi palautumattomille rajatiloille, joissa rakenteen käyttökelpoisuusvaatimukset ylittyvät siten, että kuormien vaikutukset eivät palaudu kokonaan, kun kuormat poistetaan. Tällaisia rajatiloja ovat esimerkiksi jännitysraajatilat ja halkeaman muodostumisraajatilat. (18, s. 84.)

Tavallinen yhdistelmä:

$$G_{kj,sup} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{\Psi_{2,i}} Q_{k,i} \quad (10)$$

Tavallista yhdistelmää käytetään palautuville rajatiloille, jossa rakenteen kohdistuvat kuormat eivät aiheuta pysyviä muutoksia. Tämä tarkoittaa, että rakenne pystyy palautumaan alkuperäiseen muotoonsa kuormien poistuttua. Esimerkki palautuvista rajatiloista ovat tartunta- ja ankkurijännerakenteiden halkeilu- ja halkeamaleveysraajatilat. (18, s. 84.)

Pitkäaikainen yhdistelmä:

$$G_{kj,sup} + \sum_{\Psi_{2,i}} Q_{k,i} \quad (11)$$

Pitkäaikaisyhdistelmää käytetään rakenteiden ulkonäön ja pitkäaikaisvaikutuksen tarkasteluun. Esimerkiksi teräsbetonirakenteiden halkeamaleveysraajilojen ja taipumarajilojen tarkasteluun. (18, s. 84.)

Kulmatukimuurin tapauksessa halkeamaleveyden rajoittamisessa käytetään pitkäaikaisyhdistelmää, kun taas taipumien ja siirtymien laskenta tehdään ominaisyhdistelmää käyttäen (31).

Kun rakenteeseen vaikuttaa samanaikaisesti useita eri kuormia, joiden esiintymistodennäköisyys on hyvin pieni, on vielä epätodennäköisempää, että nämä kuormat esiintyvät yhtäaikaisesti. Eri rajatiloissa muuttuvia kuormia pienennetään yhdistelykertoimilla  $(\psi_0, \psi_1, \psi_2)$ , jotka on esitetty taulukossa 10. (31.)

Taulukko 10. Kertoimien  $\psi$  suositusarvot rakennuksille. (18, s. 86)

<b>Kuorma</b>	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (ks. EN1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,6
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30 \text{ kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Rakennusten lumikuormat Suomi, Islanti, Norja ja Ruotsi	0,7	0,5	0,20

Kaikissa tapauksessa pysyvien kuormien osavarmuusluku on vakiona 1,0 ja muuttuvien kuormien osalta käytetään yhdistelykertoimia. Käyttörajan kuormien yhdistely on esitetty taulukossa 11. (31.)

Taulukko 11. Kuormien yhdistely käyttörajan tilassa. (31)

<b>Kuormitusyhdistelmät</b>	<b>Kuormien kertoimet</b>		
	Pysyvä	1. muuttuva	Muut muuttuvat
Ominaisyhdistelmä	1,0	1,0	$\psi_0$
Tavallinen yhdistelmä	1,0	$\psi_1$	$\psi_2$
Pitkäaikainen yhdistelmä	1,0	$\psi_2$	$\psi_2$

## 6 Kulmatukimuurin rakennetekninen mitoitus

Kulmatukimuurin rakenneteknisessä mitoituksessa sekä rintamuuri että pohjalaatta mitoitetaan teräsbetonilaattojen mitoitussääntöjen mukaisesti. Tässä tapauksessa tukimuurin rakennetta tarkastellaan ikään kuin kahtena erillisenä laattana. Käytännössä rintamuuri toimii maanpaineen vastaanottavana seinänä. Maanpaineiseinänä sen vaakasuuntaiset voimat ovat hallitsemisempia, kuin pystysuuntaiset, joten muuria ei voi mitoittaa seinärakenteena. Eurokoodin ohjeistuksen mukaan seinärakenteessa, joihin kohdistuu tasoaan kohtisuoraan taivutusrasitusta, mitoitetaan käyttäen teräsbetonilaattojen mitoitussääntöjä. (32, s. 161.)

Rakenneteknisessä mitoituksessa oletetaan, että rakennetta kuormittavat voimat kohdistuvat suoraan itse rakenteeseen, toisin kuin geoteknisessä suunnittelussa, jossa voimat ajatellaan kohdistuvan pohjalaatan takana olevaan virtuaaliseen pystyseiniin. Kulmatukimuurin rakenteellinen mitoitus suoritetaan aina lepopaineelle. (19, s. 37.)

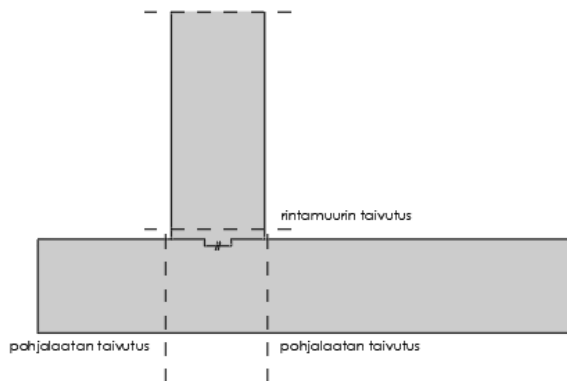
Rakenneteknisessä osuudessa käsitellään kulmatukimuurin taivutus- ja leikkauskestävyyttä murtorajatilassa. Laatoille ominaisesti rakenne tarkastellaan sekä leikkausraudoittamattomana että leikkausraudoitettuna rakenteena.

### 6.1 Taivutuskestävyys

Tukimuurin pystysuoran seinän ja pohjalaatan osalta sovelletaan teräsbetonilaatan teoriaa. Laatan taivutuskestävyyden mitoituksessa oletetaan, että laatan poikkileikkaustasot pysyvät tasoina, betoni ja harjateräkset toimivat yhtenäisenä rakenteena ja betonin vetolujuus jätetään huomioimatta sen ollessa merkittävän pieni verrattuna betonin puristuslujuuteen. Näin ollen harjateräkset ottavat vastaan vedon ja betoni puristuksen. (33, s. 37–39.)

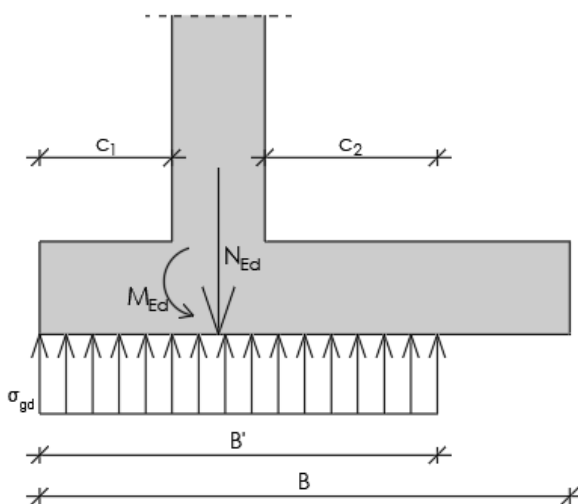
Taivutuskestävyyden tarkastus suoritetaan erikseen rintamuurin ja pohjalaatan kannalta kriittisissä poikkileikkauksissa. Mitoittava taivutusmomentti

pohjalaatassa sijaitsee pystysuoran seinän reunan kohdalla olevissa poikkileikkauksissa. Ulokkeena toimivan pystysuoran seinän taivutuskestävyyttä tarkastellaan pohjalaatan liitoskohdassa sijaitsevassa poikkileikkauksessa. (33, s. 37–39.) Tarkasteltavien poikkileikkausten sijainnit ovat havainnollistettu kuvassa 14.



Kuva 14. Kulmatukimuurin taivutuskestävyyden tarkastelukohteet. (33, s. 37)

Pystysuoran seinän juureen vaikuttava taivutusmomentti syntyy taustatäyttömaateriaalien ja pintakuormien aiheuttamista vaakasuuntaisista lepopaineiden resultanteista. Pohjalaatan kannalta kriittisten taivutusmomenttien määräytymiseen vaikuttavat pystyseinän ja pohjalaatan omapaino sekä laatalle tulevat pystysuuntaiset kuormat kuvan 15 osoittamalla tavalla. (34, s. 41–44.)



Kuva 15. Tukiseinän juureen vaikuttama momentti. (34, s. 42)

Teräsbetonirakenteille taivutuskestävyyden laskenta suoritetaan seuraavasti:

Mitoitusehto

$$M_{Rd} \geq M_{Ed} \quad (12)$$

missä

$M_{Rd}$  on taivutuskestävyys

$M_{Ed}$  on ulkoisten kuormien aiheuttama taivutusmomentin mitoitusarvo

Mitoitusmomentin mukainen suhteellinen momentti

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{\eta f_{cd} d^2} \quad (13)$$

missä

$\eta$  on tehollisen lujuuden kerroin

$f_{cd}$  on betonin lujuuden mitoitusarvo

$d$  on poikkileikkauksen tehollisen korkeus

Tehollisen puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} \quad (14)$$

Mekaaninen raudoitussuhde

$$\omega = \beta \quad (15)$$

Vetoraudoituksen pinta-ala

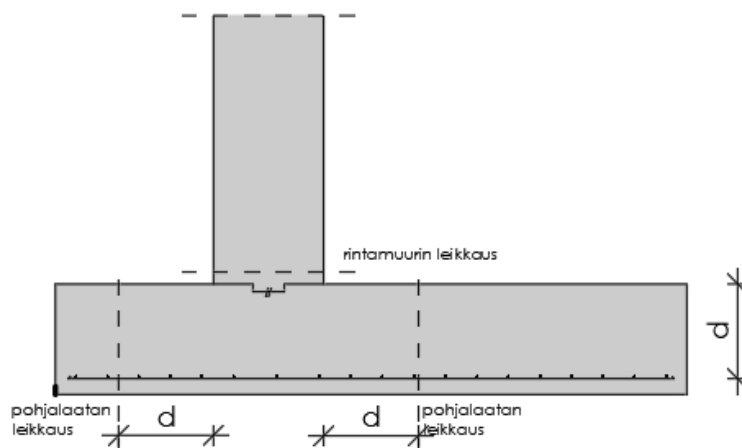
$$A_s = \omega d \eta \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad (16)$$

missä

$f_{yd}$  on betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo (35)

## 6.2 Leikkauskestävyys

Suurimmat leikkausrasituksen arvot muodostuvat tukien läheisyyteen. Tukimuurin tapauksessa ulokkeena toimivan pystysuoran seinän kriittinen leikkausvoima sijaitsee seinän juuressa. Pohjalaatan osalta mitoittavimmat leikkausvoimat ovat tehollisen korkeuden  $d$  päässä pystysuoran seinän ja pohjalaatan liitoksesta kuvan 16 mukaisesti. (33, s. 39–42.)



Kuva 16. Leikkauskestävyyden keskeiset tarkastelukohdat pohjalaatassa ja pystymuurissa. (33, s. 41)

Pohjalaatan tehollinen korkeus valitaan siten, ettei pohjalaatassa vaadita leikkausraudoitusta, vaan pohjalaatan betonin leikkauskestävyys on riittävä leikkausvoimille (33, s. 40–41).

Yleensä pohjalaatta suunnitellaan ilman leikkausraudoitusta ja tarvittaessa laatan tehollista korkeutta kasvattamalla voidaan parantaa leikkauskestävyyden

arvoa. Leikkauskestävyyttä on mahdollista kasvattaa lisäämällä pääraudoitusta vedetyssä pinnassa ja parantamalla sen ankkurointia. (36, s. 54.)

### 6.2.1 Leikkausraudoittamaton rakenne

Mitoituksessa kulmatukimuuria käsitellään kahtena erillisenä laattana, joita molempia tarkastellaan leikkausraudoittamattomina rakenteina. Tässä yhteydessä on olennaista varmistaa, että leikkausraudoittamattoman rakenteen leikkauskestävyyden mitoitusarvo on suurempi kuin rakenteeseen kohdistuva leikkausrasitus lasketaan kaavan 17 mukaisesti. (32, s. 84.)

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavan 17 mukaisesti.

$$V_{Rd,c} = \max \left\{ \left[ C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d; (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \right\} \quad (17)$$

missä

$C_{Rd,c}$  on kansallisesti määritetty suure

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$$

$k$  on suure, joka huomio poikkileikkauksen tehollisen korkeuden

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} \leq 0,02$$

$\rho_l$  ottaa huomioon poikkileikkauksen vetoraidoituksen

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$$

$k_1$  on kansallisesti määritetty suure

$$k_1 = 0,15$$

$\sigma_{cp}$  ottaa huomioon poikkileikkauksen normaalivoiman

$$\rho_l = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0,2 f_{cd}$$

$b_w$  on poikkileikkauksen minimileveys vedetyn korkeuden kohdalla

$V_{min}$  on kansallisesti määritetty suure

$$V_{min} = 0,035 k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}}$$

### 6.2.2 Leikkausraudoitettu rakenne

Leikkausvoima ylittäessä leikkausraudoittamattoman rakenteen mitoitusarvon, voidaan joko kasvattaa poikkileikkauksen mittoja tai lisätä leikkausraudoitus. (32, s. 84).

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavan 18 mukaisesti.

$$V_{Rd,s} = \min \left\{ \frac{A_{sv}}{s} z f_{ywd} \cot(\theta); \frac{\alpha_{cw} b_w z f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} \right\} \quad (18)$$

missä

$A_{sv}$  on leikkausraudoituksen poikkileikkausala

$s$  on leikkausraudoituksen jakoväli

$z$  on sisäinen momenttivarsi

$f_{ywd}$  on leikkausraudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo =  $0,8 f_{yk}$

$v_1$  on halkeilleen betonin lujuuden pienennyskerroin =  $0,6$

$\theta$  on valitun betonin puristussauvan kaltevuuskulma

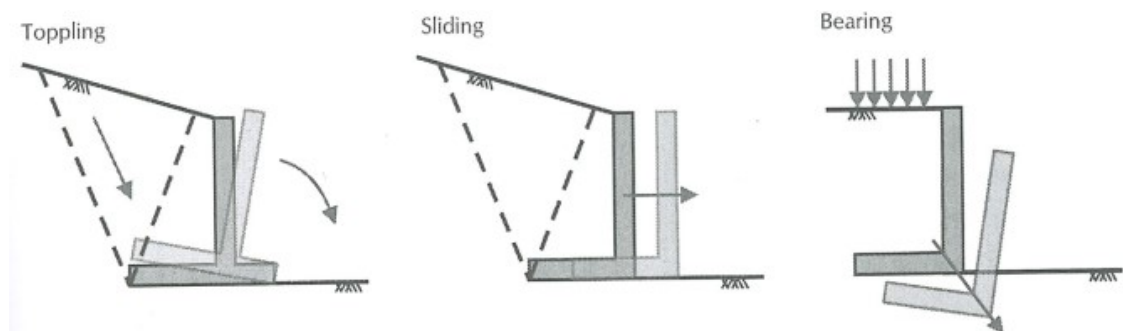
$\alpha_{cw}$  on kansallisesti määritetty suure

$b_w$  on poikkileikkauksen leveys (32, s. 84).

## 7 Tukimuurirakenteiden stabiliteetti

Stabiliteettia käsitellään maanvaraisesti perustetun kulmatukimuurin näkökulmasta. Perustusta pidetään maanvaraisena, mikäli se tukeutuu suoraan maapohjaan tai kallion päälle rakennetun murskearinan varaan. (19, s. 45.) Kulmatukimuurin stabiliteettitarkastus tehdään murtorajatilassa kantavuus-, liukumis- ja mahdollisesti kaatumiskestävyyden osalta (2, s. 364).

Kuvassa 17 on havainnollistettu erilaisia vaihtoehtoja L- ja T- muotoisille kulmatukimuureille stabiliteetin menetykseen murtorajatilassa.



Kuva 17. Esimerkkejä kulmatukimuurin stabiliteetin menetyksestä. (13, s. 355)

### 7.1 Kantokestävyys

Maanvaraisen perustuksen kantokestävyyden laskemiseen voidaan käyttää kantokestävyyden laskentakaavaa, joka on sovellettavissa seuraavissa olosuhteissa:

- Anturan alla oleva maa on homogeenista, vähintään  $(2 \cdot B)$  syvyyteen (poikkeuksena on kallion päällä oleva murskearina).

- Maanpinta on vaakatasossa
- Pohjaveden taso sijaitsee joko anturan alapinnassa, sen yläpuolella tai syvemmällä kuin kolme kertaa anturan leveys ( $3 \cdot B$ ) anturan alapinnasta (vesipinnan ollessa anturan alapinnan ja syvyyden ( $3 \cdot B$ ) välillä, oletetaan vesipinta anturan alapinnan tasolle) (19, s. 45).

Mikäli perustuksen kantokestävyyttä ei voida määrittellä edellä mainittujen ohjeiden mukaisesti, kantokestävyyden määrittämiseen sovelletaan liukupintamennettelmää tai numeerista laskentaa (19, s. 45).

Kaikissa murtorajatiloina kantokestävyyttä määriteltäessä on seuraavan mitoitusohjeen oltava voimassa (14, s. 104).

$$V_d \leq R_d \quad (19)$$

missä

$V_d$  on pysty- ja vaakakuormia vastaavalle teholliselle pohjapinnalle laskettu kantokestävyyden mitoitusarvo [kN]

$R_d$  on pystykuormien mitoitusarvo [kN]

Lasketun kantokestävyyden mitoitusarvon  $V_d$  tulee sisältää rakenteen oma-paino, täyttömateriaalin paino sekä edulliset että epäedulliset maanpaineet ja mahdollisesti vedenpaineet (14, s. 104).

Kantokestävyyden mitoitusarvon määrittämistapa vaihtelee riippuen siitä, ovatko maapohjaolosuhteet suljetut vai avoimet. Maanvaraisen perustamisen yhteydessä kitkamaalle voidaan soveltaa avoimien olosuhteiden kantokestävyyden laskentakaavaa. Tällöin kantokestävyyden ominaisarvo voidaan laskea kaavalla 20, kun laskennassa käytetään maaparametrien ominaisarvoja. (19, s. 45.)

$$R/A' = C' N_c b_c S_{c_i c} + q' N_q b_q S_{q_i q} + 0,5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma S_{\gamma_i \gamma} \quad (20)$$

missä

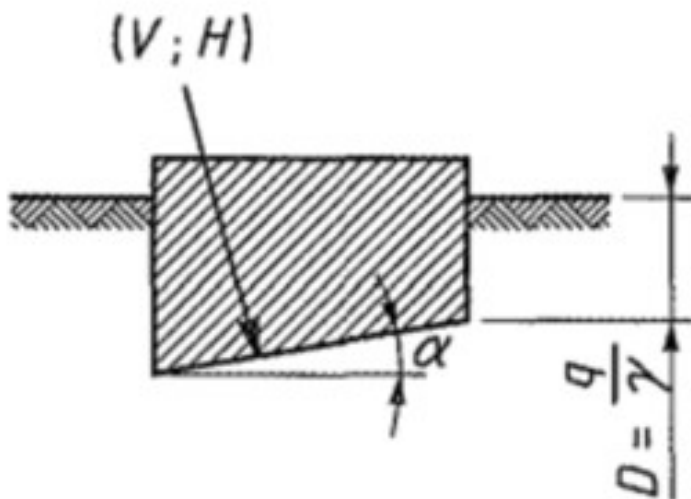
Kantokestävyydelle:

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi'$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi', \text{ missä } \delta \geq \frac{\varphi'}{2} \text{ (karhea pohja)}$$

Eurokoodissa on määritelty kertoimet perustuksen pohjan kaltevuuksille. Tyypillisesti perustusten pohjat ovat vaakasuorassa ( $\alpha = 0$ ), joten kaltevuuskertoimet ovat arvoltaan 1,0. Tässä tilanteessa kertoimet eivät vaikuta kantokestävyyden laskenta-arvoihin katso kuva 18. (21, s. 152.)



Kuva 18. Perustuksen pohjan kaltevuus. (21, s. 152)

Perustuksen pohjan kaltevuudelle vaikutus:

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \tan \varphi')$$

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha * \tan \varphi')^2$$

Perustuksen muodolle:

$$S_q = 1 + (B'/L')\sin\varphi', \text{ suorakaiteelle}$$

$$S_q = 1 + \sin\varphi', \text{ neliöille tai ympyrälle}$$

$$S_\gamma = 1 - 0,3 \left(\frac{B'}{L'}\right) \text{ suorakaiteelle}$$

$$S_\gamma = 0,7 \text{ neliölle tai ympyrälle}$$

$$S_c = (S_q * N_q - 1)/(N_q - 1) \text{ suorakaiteelle, neliölletaiympyrälle}$$

Vaakakuorman  $H$  aiheuttamalle kuorman kaltevuudelle:

$$i_c = i_q - (1 - i_q)/(N_c \tan\varphi')$$

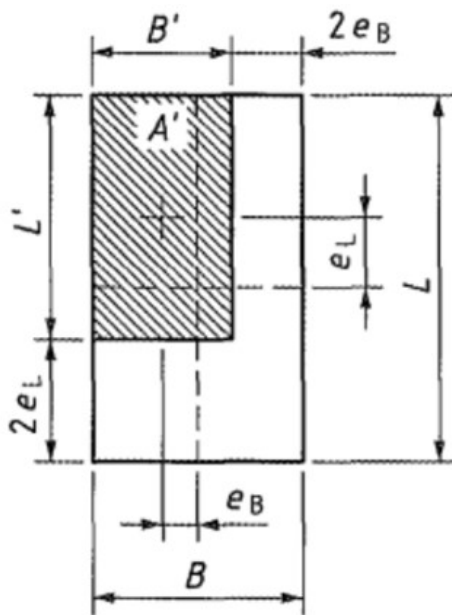
$$i_q = [1 - H/(V + A'C' \cot\varphi')]^m$$

$$i_\gamma = [1 - H/(V + A'C' \cot\varphi')]^{m+1}$$

$$m = m_B = \frac{[2+(B'/L')]}{[1+(B'/L')]} \text{ kun } H \text{ vaikuttaa } B': \text{ n suunnassa}$$

$$m = m_L = \frac{[2+(L'/B')]}{[1+(L'/B')]} \text{ kun } H \text{ vaikuttaa } L': \text{ n suunnassa}$$

Avoimien olosuhteiden kantokestävyyden laskentakaavan merkintöjen selitykset ja vaakakuorman aiheuttaman kuorman epäkeskisyys on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Vaakakuorman aiheuttaman kuorman epäkeskisyys ja merkintöjen selitykset. (21, s. 152.)

- $A'$  on perustuksen tehokas mitoituspinta-ala [ $m^2$ ]
- $c'$  on koheesion tehokas mitoitusarvo perustuksen pohjan tasolla [Pa]
- $b$  on pohjan kaltevuuskertoimien mitoitusarvot, alaindeksit  $c$ ,  $q$  ja  $\gamma$
- $B'$  on tehokas perustuksen leveys [m]
- $H$  on vaakakuorma [N]
- $i$  on kuorman kaltevuuskerroin, alaindeksit  $c$ ,  $q$  ja  $\gamma$
- $L'$  on perustuksen tehokas pituus [m]
- $m$  on eksponentti kaltevuuskertoimien  $i$  kaavassa
- $N$  on kantavuuskertoimet, alaindeksit koheesio  $c$ , pintakuorma  $q$  ja tiilavuuspaino  $\gamma$

$q'$	on yläpuolisten maakerrosten tai lisäkuormien tehokas mitoitus-paine perustuksen pohja tasolla [Pa]
$s$	on perustuksen pohjan muotokertoimet, alaindeksit $c$ , $q$ ja $\gamma$
$V$	on pystykuorma [N]
$\alpha$	on perustuksen pohjan kaltevuus vaakatason suhteen
$\gamma'$	perustason alapuolella olevan maan tehokkaan tilavuuspainon mi-toitusarvo [ $\text{N}/\text{m}^3$ ]

Vaakakuorma vaikuttaa merkittävästi kantokestävyyteen. Perustuksen päällä epäkeskeisesti sijoitetun kuormaresultantin yhteydessä määritetään tehokas pinta-ala, joka on symmetrinen kuormaresultantin nähden. Kuorman epäkeski-syyden kasvaessa perustuksen tehokas pinta-ala pienenee. Kuvassa 19 on esi-tetty, kuinka suorakulmaisen anturan tehokas pinta-ala määritetään. (14, s. 106.)

## 7.2 Liukumiskestävyys

Eurokoodi-standardin mukaan tukirakenteen mitoituksessa on oleellista tarkis-taa liukumiskestävyys pohjaa pitkin tapahtuvaa liukumismurtumaa vastaan, mi-käli kuormitus ei ole kohtisuorassa perustuksen pohjaa vasten (21, s. 61).

Kulmatukimuurin osalta on olennaista, että tuettavan maa-aineksen suunnalta tuleva maanpaine ei ylitä täyttömaan omasta painosta aiheutuvaa kitkaa, joka estää muurin liukumista (15, s. 72).

Liukumiskestävyystarkastelussa tulee noudattaa kaavan 21 mukaista mitoitus-ehtoa. Vaakasuorien kuormien resultantin mitoitusarvon pitää olla pienempi tai yhtä suuri, kuin liukumista estävien kuormien mitoitusarvon ja liukumiskestävyy-den summa. (14, s. 108.)

$$H_d \leq R_d + R_{p;d} \quad (21)$$

missä

$H_d$  on kaikkien vaakasuorien kuormien resultantin mitoitusarvo [N]

$R_d$  on liukumiskestävyuden mitoitusarvo [N]

$R_{p;d}$  on perustuksen sivuun kohdistuvasta maanpaineesta aiheutuvan vastustavan voiman mitoitusarvo [N]

Liukumistarkastus suoritetaan aina vaakakuorman suurimman resultantin suuntaan. (19, s. 48)  $H_d$  sisältä kaikki aktiiviset perustuksiin kohdistuvat mitoituskuormat. Liukumiskestävyuden arvo määritetään avoimissa olosuhteissa kohdistamalla osavarmuusluvut maapohjan kestävyteen kaavan 22 mukaisesti. (14, s. 109.)

$$R_d = \frac{V'_d \tan \delta_k}{\gamma_{R,h}} \quad (22)$$

missä

$V'_d$  on kohtisuoraan perustuksen pohjaa vastaan vaikuttavan kuorman mitoitusarvo

$\delta_k$  on maan ja perustuksen välisen kitkakulma

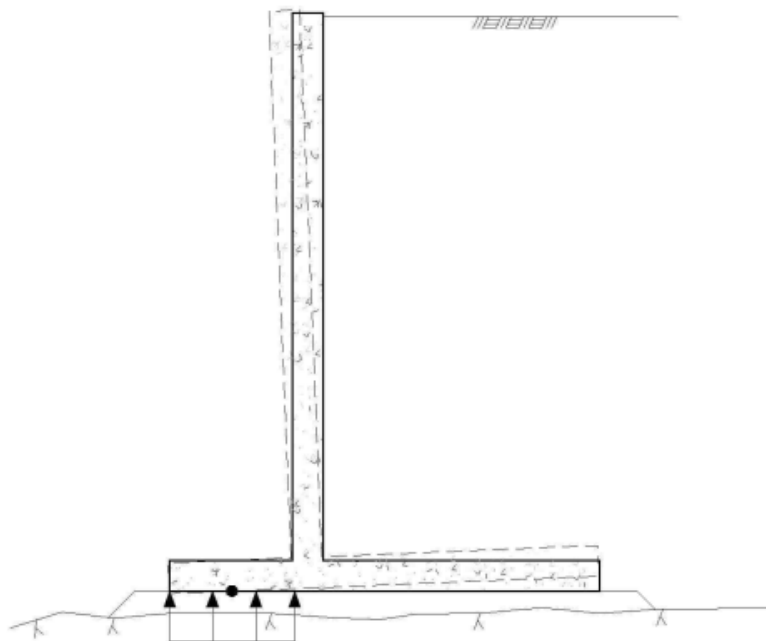
$\gamma_{R,h}$  on liukumiskestävyuden osavarmuusluku

Määritettäessä kuorman mitoitusarvoa  $V'_d$  on tärkeää ottaa huomioon  $H'_d$ :n  $V'_d$ :n välinen mahdollinen riippuvuus. Ominaiskitkakulman suuruus määräytyy sen perusteella, onko pohjalaatta paikallavalettu vai elementtirakenteinen. Paikallavaletuissa perustuksissa kitkakulma voidaan yleensä olettaa saamansuuriseksi, kuin tehokkaan leikkauskestävyyden kulman kriittisen tilan mitoitusarvo  $\varphi'_{cv;d}$ . Sileillä elementtiperustuksilla kitkakulma on  $2/3 \varphi'_{cv;d}$ . (14, s. 108.)

### 7.3 Kaatumiskestävyys

Kaatumiskestävyuden tarkastelu tulee kriittiseksi, kun tukimuuri perustetaan kalliin varaan tai erittäin tiiviiseen maatyttöön. Tällöin kaatumistarkastelu suoritetaan suorakaiteen muotoisella anturalla molemmissa pääsuunnissa. (19, s. 43.) Maanvaraisesti perustuttaessa voidaan myös vaatia, että muuri ei saa kaatua etukulmansa ympäri. Vaatimus ei yleensä ole välttämätön, sillä maapohja tyypillisesti murtuu laatan etuosan alla ennen kuin muuri ehtii kaatua. (2, s. 364.)

Arinan varaan perustetun kulmatukimuurin kaatumiskiertopiste määritellään valitsemalla piste, joka on yhtä kaukana kuin maatyttökerroksen paksuus muurin uloimmasta reunasta kuvan 20 mukaisesti. Tämä pätee, kun maatyttökerroksen paksuus on enintään 0,5 metriä. Kallioon perustettaessa kaatumistarkastelu tehdään kulmatukimuurin uloimman reunan ympäri tapahtuvan kiertymisen suhteen (19, s. 81–82.)



Kuva 20. Havainnekuva maanvaraisen kulmatukimuurin kaatumispisteestä. (37, s. 71)

Kaatumista vastaan kulmatukimuurin mitoitus tehdään Eurokoodi 7:n mukaisilla staattisen tasapainorajatilan (EQU) osavarmuusluvuilla. Rakenteen

kaatumiskestävyyden laskenta tulee noudattaa kaavan 23 mukaista mitoitusehto. (13, s. 371.)

$$M_{Ed,dst} \leq M_{Ed,stb} \quad (23)$$

missä

$M_{Ed,dst}$  on kaatavien momenttien mitoitusarvo [Nm]

$M_{Ed,stb}$  on vakauttavien momenttien mitoitusarvo [Nm]

Rakenteen kaatavat momentit syntyvät pääasiassa tukimuurin takana vaikuttavasta vaakasuuntaisesta maanpaineesta sekä hyötykuormien tuomasta lisävaa-kavoimasta. Samoin vedenpaine ja noste synnyttävät kaatumiseen vaikuttavia momenteja. (13, s. 371.) Tässä työssä vedenpaineen ja nosteen aiheuttamia vaikutuksia ei oteta huomioon.

## 8 Tukimuurien halkeilu

Betonirakenteet ovat alttiita halkeilulle erityyppisten kuormitusten vaikutuksesta. Halkeilua voi aiheuttaa suoraan kohdistuva kuormitus, pakkosiirtymä tai pakotettu muodonmuutos sekä edellä mainittujen ilmiöiden estyminen. Rakenteen staattisen toiminnan, kestävyden, säilyvyyden ja ulkonäön vuoksi on kuitenkin tärkeää pitää halkeamaleveydet minimissä. (38.)

Betonin halkeilua voidaan ehkäistä paitsi huolellisella suunnittelulla myös oikean betonin valinnalla, asianmukaisella työsuorituksella ja jälkihoidolla. Halkeilu lisää merkittävästi betonin läpäisevyyttä ja vähentää sen kykyä suojata raudoitusta, mikä mahdollista haitallisten aineiden pääsyä betoniin ja nopeuttaa korroosiota. Olosuhteiden mukaan erityisen vahingollisia ovat yli 0,2–0,4 mm leveät halkeamat, jotka ulottuvat aina raudoitukseen asti. Betonirakenteen suunnitteluvaiheessa pyritään rajoittamaan halkeamaleveydet välille 0,1–0,3 mm Halkeamien rajoittaminen välille 0,1–0,3 mm on keskeinen tavoite, jotta voidaan

varmistaa rakenteiden asianmukainen toimivuus, pitkäikäisyys sekä visuaalinen hyväksyttävyyys. Tämä on erityisen tärkeää, koska halkeamien laajeneminen yli sallitun toleranssin voi vaikuttaa haitallisesti rakenteen mekaanisiin ominaisuuksiin sekä altistaa sen korroosiolle ja muille ympäristötekijöiden aiheuttamille vaurioille. (38.)

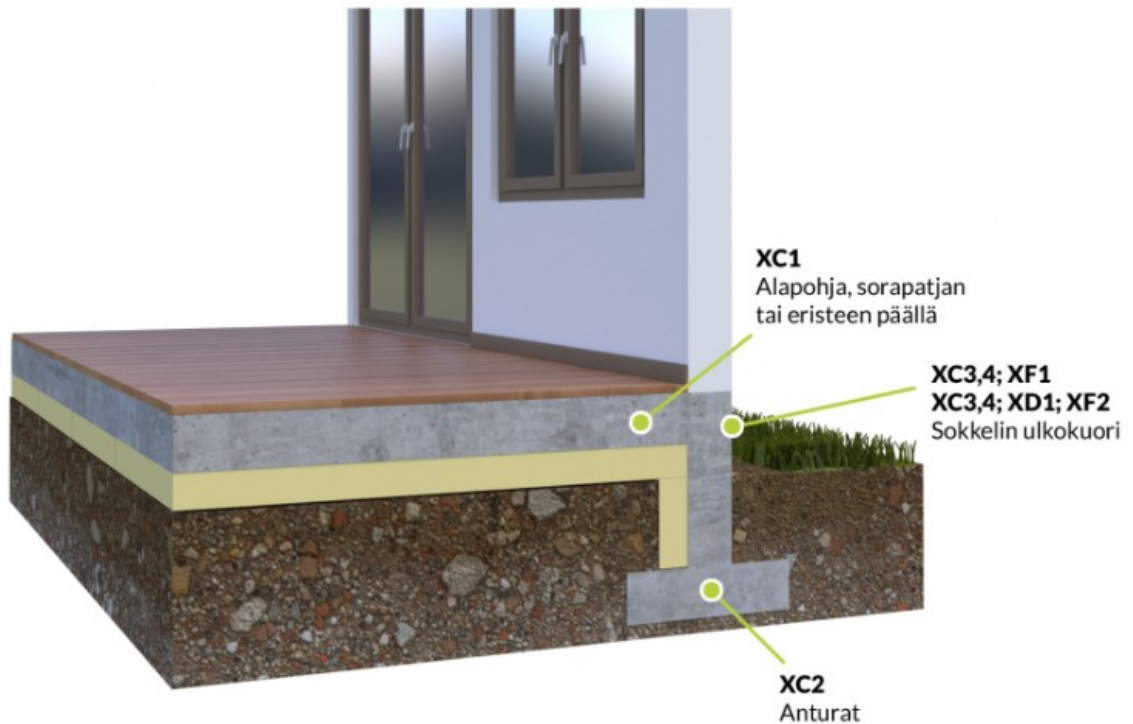
Halkeamia voi ilmetä sekä tuoreessa betonissa että vasta useiden vuosien jälkeen valusta. Halkeilu voi alkaa jo ennen betonin kovettumista massan plastisen kutistumisen ja painumisen myötä. Kovettunut betoni puolestaan on altis halkeiluun erilaisten tekijöiden, kuten lämpötilaerojen, kuivumiskutistumisen, veden jäätymisen ja sulamisen, tiettyjen kemiallisten reaktioiden, tulipalon tai raudoituksen ruostumisen seurauksena. Lisäksi halkeilun syynä voivat olla huonosti suoritettavat työvaiheet (muottityö, pinnan käsittely, jälkihoito) sekä rakenteen kantokyvyn ylittävä kuormitus. (39, s. 26–27.)

## 8.1 Rasitusluokat

Betonirakentamisessa rakennesuunnittelija määrittää rakenteen rasitusluokan ottaen huomioon seuraavat rasitustekijät:

- Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio
- Kloridien aiheuttama korroosio
- Merivedessä olevien kloridien aiheuttama korroosio
- Jäätymis- /sulamisrasitus
- Kemiallinen rasitus (40).

On tärkeää huomioida, että rakenne voi kuulua yhtäaikaaisesti moneen eri rasitusluokkaan. Betonin on täytettävä kaikki kyseisten rasitusluokkien asettamat vaatimukset. Esimerkiksi sokkelin ja perusmuurin ulkokuoreen voi kohdistua suolarasituksia erityisesti, kun rakenne sijaitsee suolattavan ajotien välittömässä läheisyydessä (etäisyys tiehen < 2 m). Kuitenkin, jos kyseessä on jalkakäytävä, jota suolataan, voidaan soveltaa rasitusluokkaa XC3,4; XF1 kuvan 21 osoitetulla tavalla. (40.)



Kuva 21. Perustusrakenteet. (41)

Käytännössä on vain rajoitettu määrä erilaisia rasitusluokkayhdistelmiä. Taulukossa 12 on esitetty tavallisimmat rasitusluokkayhdistelmät.

Taulukko 12. Betonirakenteiden rasitusluokkayhdistelmä. (41)

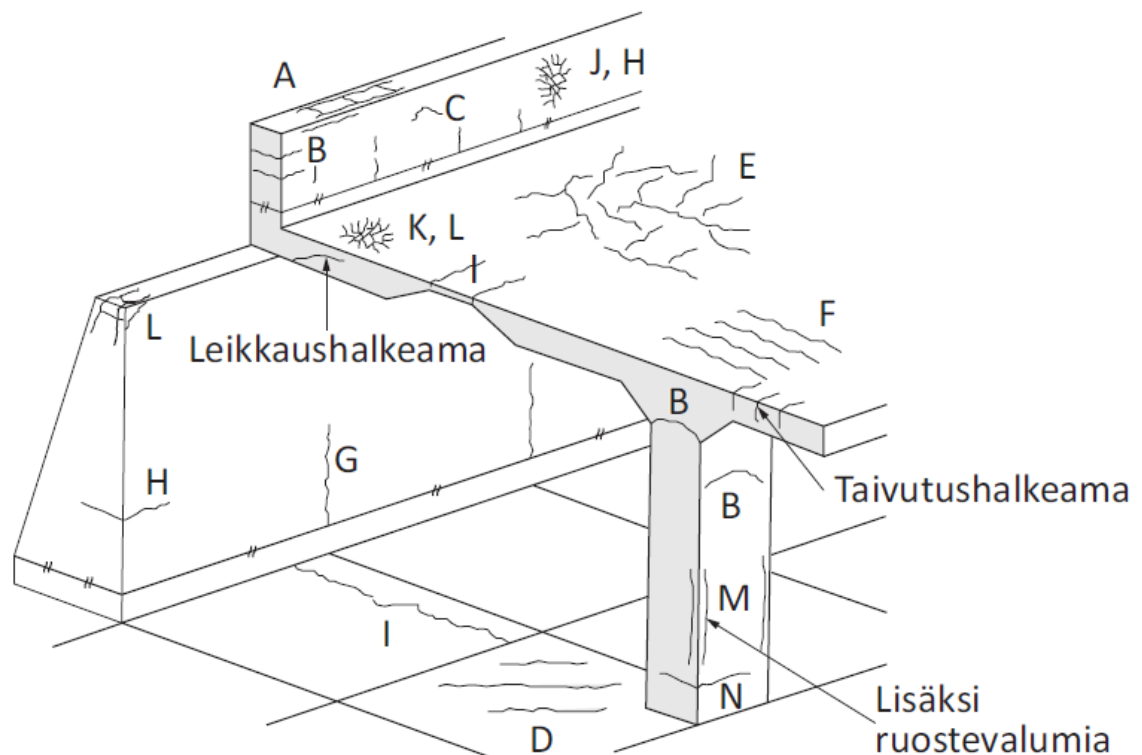
Rasitusluokkayhdistelmä	Selite
X0	Raudoittamattomat rakenteet kuivissa sisätiloissa
XC1	Raudoitetut rakenteet kuivissa sisätiloissa
XC2	Maanalaiset rakenteet, rakenne pysyy erittäin kosteana
XC3	Sateelta suojattu pystyrakenne, ei pakkasrasitusta (kosteuspitoisuus alhainen)
XC3; XF1	Sateelta suojattu pystyrakenne, pakkasrasitus
XC3,4 XF1	Osittain sateelta suojattu pystyrakenne, pakkasrasitus

<b>Rasitusluokkayhdistelmä</b>	<b>Selite</b>
XC3,4 XF4	Sateelta osittain tai kokonaan suojamaton vaakarakenne, pakkasrasitus
XC4, XF3	Sateelle altis suojamaton vaakarakenne, pakkasrasitus
XC3; XD1	Kloridirasitetut rakenteet sisätiloissa
XC3; XF2 ja XD1 XC3; XF2 ja XD1 XC3,4; XF2 ja XD1	Sateelta suojattu, sateelta suojamaton tai osittain sateelta suojattu rakenne, kloridirasitus ja lievä pakkas-suolarasitus. XD-luokka on vaativampi kuin XC-luokka ja siten XC-luokalla ei ole käytännössä merkitystä
XC3; XF4 ja XD2 XC4; XF4 ja XD2 XC3,4; XF4 ja XD2	Sateelta suojattu, sateelta suojamaton tai osittain sateelta suojattu rakenne, kloridirasitus ja ankara pakkas-suolarasitus. XD-luokka on vaativampi kuin XC-luokka ja siten XC-luokalla ei ole käytännössä merkitystä
XC2; XS2	Merivedenalainen rakenne
XC3,4 XF4 ja XS3	Merenselällä, roiskevyöhykkeessä oleva rakenne
<b>Erikoistapauksia</b>	
XC1; XF3	Vesialtaan rakenteet vedenpinnan alapuolella
XC2; XD2	Uima-altaiden rakenteet
XC3; XF1; XD1	Kloridirasitus, mutta vain hyvin lievä pakkasrasitus (esim. tunneleissa ja laitureissa)
XC2; XF3; XD2	Ulkona olevan uima-altaan rakenteet

Betonirakenteiden rasitusluokan valinnassa on olennaista, että valittu rasitusluokka vastaa ympäristön todellisia rasitusolosuhteista mahdollisimman tarkasti. On tärkeää välttää rasitusluokkien ylimitoitusta, sillä se voi johtaa rakentamisen kustannusten nousuun. Lisäksi rasitusluokkien ylimitoitus voi heikentää rakenteellisia ominaisuuksia, mikä puolestaan voi huonontaa rakentamisen kokonaislaatua. (40.)

## 8.2 Halkeilutyypit ja halkeamaleveyden raja-arvot

Halkeamaleveyden raja-arvot tarkoittavat tässä suurimpia sallittuja halkeamaleveyksiä, jotka on määritelty betoninormeissa. Näiden raja-arvojen tarkoituksena on varmistaa rakenteen asianmukainen toiminta ja säilyvyys sekä huomioida rakenteen ulkonäölliset seikat. (42, s. 51–52.) Kuvassa 22 ja taulukossa 13 on esitetty betonirakenteille tyypilliset halkeamat ja niiden sijainnit.



Kuva 22. Betonirakenteille tyypillisiä halkeamia ja niiden sijainti rakenteessa. (43)

Taulukko 13. Selitykset esiintyvillä halkeamilla ja niiden sijainti rakenteessa. (43)

Halkeilutyyppi	Sijainti rakenteessa
Plastinen painuma	A, B, C
Plastinen kutistuma	D, E, F
Lämpöliike	G, H

Halkeilutyyppi	Sijainti rakenteessa
Kuivumiskutistuma	I
Pakkasrapautuminen	L
Raudoitteiden korroosio	M
Alkali-kiviainesreaktio	N

Suomen kansallisessa liitteessä on määritelty halkeilun rajoittamiseen tarkoitettut suurimmat sallitut halkeamaleveyden raja-arvot  $W_{\max}$  (32, s. 117–118). Ympäristön rasitusluokkien mukaiset suositeltavat raja-arvot on kuvattu taulukossa 14. Rasitusluokkien yksityiskohtaisempi esittely on tehty taulukossa 12.

Taulukko 14. Halkeamaleveyden  $W_{\max}$  enimmäisarvot rakenteille, joiden suunniteltu käyttöikä on korkeintaan 100 vuotta. (44)

Rasitusluokka	Ominaiskuormayhdistelmä	Tavallinen kuormayhdistelmä	Pitkäaikainen kuormayhdistelmä
X0, XC1	0,40	0,40	ei vaatimuksia
XC2, XC3, XC4, XD1 ja XS1	0,30	0,30	Vetojännityksetön tila
XD2, XD3, XS2 ja XS3	0,20	Vetojännityksetön tila	ei vaatimuksia

### 8.3 Vähimmäisraudoitusala

Vähimmäisraudoituksen tarkoitus on yhtäältä estää liian vähäinen raudoituksen plastisoituminen heti halkeaman avauduttua, ja toisaalta varmistaa riittävä sitkeys plastisten nivelien kohdalla. Minimiraudoituksen määrä  $A_{s,\min}$  suurimpien momenttien kohdalla riippuu rakenneosan tyypistä ja betonipoikkileikkauksen kokonaisalasta  $A_c$  tai vedetyn betonipoikkileikkauksen alasta  $A_{ct}$ . (32, s. 118–119.)

Tukimuurin anturan vähimmäisraudoituksen suunnittelussa voidaan soveltaa laattojen vähimmäisraudoitusalan kaavaa 24 (32, s. 150).

$$A_{s,\min} = \max \begin{cases} 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} d \\ 0,0013d \end{cases} \quad (24)$$

missä

$A_{s,\min}$  on raudoituksen vähimmäisala vetoalueella [m<sup>2</sup>]

$f_{ctm}$  on betonin keskimääräinen vetolujuus [MPa]

$f_{yk}$  on betoniteräksen ominaismyötölujuus [MPa]

$d$  on poikkileikkauksen tehollinen korkeus [m]

Eurokoodin mukaan on mahdollista käyttää minimiraudoituksena 1–2-kertaista murtorajatilan raudoitusta, mikäli haurastumisriski on pieni. Tämä toimenpide on suunniteltu estämään tilanne, jossa vähimmäisraudoituksen määrä kasvaa kohtuuttoman suureksi. Erityisesti tällainen tilanne on mahdollinen, kun laatan paksuus määräytyy muun, kuin kuormituksen perusteella ja laatan kuormitus on minimaalinen. (32, s. 150.)

Yhteen suuntaan kantaviin laattoihin järjestetään poikittainen raudoitus, joka on vähintään 20 % pääraudoituksesta. Lähellä tukia olevalla alueella yläpinnan pääraudoitukseen nähden poikittainen raudoitus ei ole välttämätöntä, jos poikittaista taivutusmomenttia ei ole. (32, s. 156.)

#### 8.4 Halkeilun rajoittaminen ilman suoraa laskentaa

Halkeilun rajoittaminen betonirakenteissa suoritetaan laskennallisesti tai yksinkertaistellulla laskennalla, jossa pyritään rajoittamaan tankokokoa tai tankojen jakoväliä raudoituksen jännityksen perusteella. Yksinkertaistetussa

laskentamenetelmässä on otettava huomioon rakenteessa vedettyjen alueiden halkeilun vähimmäisraudoitusala. (32, s. 118–119.)

Laskennallinen halkeilun rajoittaminen tuottaa tarkemman lopputuloksen. Tulos katsotaan hyväksyttäväksi, jos laskettu halkeamaleveys jää alle sallitun raja-arvon. Tartunnallinen jänneteräs voi toimia halkeilua rajoittavana raudoitteena lähinnä esijännitettyissä elementtirakenteissa. (32, s. 123–124.)

Eurokoodin mukaan rakennusten raudoitetussa laatussa, jossa esiintyy taivutusta ilman merkittävää vetävää normaalivoimaa, ei ole tarvetta halkeamaleveyden rajoitustoimille, kun laatan kokonaispaksuus ei ylitä 200 mm ja SFS-EN 1992-1-1 kohdan 9.3 ehdot täyttyvät. (32, s. 121–122.) Halkeilun rajoittaminen on myös mahdollista käyttämällä valmiita laskentataulukkoita. Sallitut rajat eivät ylitä, jos raudoitustangon paksuus ei ylitä taulukon 15 arvoja tai tankoväli pysyy taulukon 16 rajoissa. Riittää, että jompikumpi taulukon ehto täyttyy halkeamaleveyden raja-arvon saavuttamiseksi. (32, s. 122.)

Taulukko 15. Halkeamaleveyden rajoittamisen vaadittavat tangon enimmäishalkaisijat  $\phi'_s$ . (32, s. 122)

Teräs <span>jännitys</span> [MPa]	Suurin tankokoko [mm]		
	$w_k = 0,4 \text{ mm}$	$w_k = 0,3 \text{ mm}$	$w_k = 0,2 \text{ mm}$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Taulukon arvot pohjautuvat seuraaviin oletuksiin asianmukaisen kuormayhdistelmän vallitessa:

$$c = 25\text{mm}; f_{ct,eff} = 2,9\text{MPa}; h_{cr} = 0,5h; (h - d) = 0,1h; k_1 = 0,8; k_2 = 0,5;$$

$$k_c = 0,4; k = 1,0 \text{ ja } k_4 = 1,0$$

Taulukko 16. Halkeamaleveyden rajoittamisen vaadittava tankojaon enimmäisarvo. (32, s. 122)

Teräs <span>jännitys</span> [MPa]	Tanko <span>jaon enimmäisarvo</span> [mm]		
	$w_k = 0,4 \text{ mm}$	$w_k = 0,3 \text{ mm}$	$w_k = 0,2 \text{ mm}$
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Muunnetaan tankojen enimmäishalkaisija seuraavasti:

Taivutus, jossa vähintään osa poikkileikkauksesta on puristettuna, lasketaan seuraavasti:

$$\phi_s = \phi * _s (f_{ct,eff}/2,9) \frac{k_c h_{cr}}{2(h-d)} \quad (25)$$

Veto (tasainen veto)

$$\phi_s = \phi * _s (f_{ct,eff}/2,9) \frac{h_{cr}}{(8(h-d))} \quad (26)$$

missä

$\phi_s$	on muunnettu tangon enimmäishalkaisija
$\phi^*_s$	on taulukossa 15 esitetty tangon enimmäiskoko
$h$	on poikkileikkauksen kokonaiskorkeus
$h_{cr}$	on vetoalueen korkeus välittömästi ennen halkeilua, kun otetaan huomioon kuormien pitkäaikaisen kuormayhdistelmän sisältämät normaalivoimat
$d$	on tehollinen korkeus raudituksen ulomman kerroksen keskipisteeseen. (32, s. 122.)

Kun kokonaispoikkileikkaus on vedettynä,  $h - d$  on pienin etäisyys raudituskerroksen painopisteestä betonipinnalle (Tätä tarkastellaan, kun tangot eivät ole sijoitettu symmetrisesti) (32, s. 122).

## 9 Laskentapohja

Tämän insinööriyön tuloksena syntyneellä laskentapohjalla voidaan mitoittaa maanvaraisesti perustettujen L- ja käännteisten T-muotoisten teräsbetonisten kulmatukimuurien kestävyys sekä geotekniseltä että rakenteelliselta kannalta tarkasteltuna. Laskentapohjalla pyrittiin tarjoamaan käyttäjäystävällinen ja helposti tulkittavissa oleva mitoitusväline, jolla pystytään vähentämään mitoitusvirheitä sekä parantamaan työn tehokkuutta. Laskentapohjan käyttö edellyttää betonirakenteiden ja perusrakenteiden laskennan asiantuntemusta.

Laskentapohjan ulkoasu noudattaa yrityksen aiemmin käyttämien Excel-pohjien tyyliä ja on jaoteltu selkeyden vuoksi yhdeksään välilehteen. Sovelluksen ensimmäinen välilehti on Aloitus-sivu, joka tarjoaa käyttö- ja tulkintaohjeita suunnittelijalle. Aloitus-sivulla on ilmoitettu, mitä tapauskohtaisia tietoja käyttäjän tulee syöttää kullekin välilehdelle. Käyttäjän itse täytettävät solut on maalattu sovelluksessa harmaalla värillä. Solujen värikoodaus auttaa myös tulosten tulkitsemisessä: kestävyden olleessa riittävä, solu värityy vihreäksi ja

riittämättömän kestävyuden tapauksessa punaiseksi. Sovelluksen käytön helpottamiseksi joissakin soluissa on lisäksi ohjeellisia kommentteja. Mahdolliset tulevat päivitykset ja niiden yksityiskohdat lisätään myös Aloitus-sivulle.

Sovelluksen toisena välilehtenä on Lähtötiedot-sivu, jonne syötetään rakenteen mitat, pohja- ja täyttömaan ominaisuudet, betonin ja raudoituksen ominaisuudet sekä kuormat.

Tulokset- sivulla esitetään tukimuurin geometriset mitat sekä kaatumisen, liukumisen ja kantokestävyuden käyttöasteet. Lisäksi sivulla esitetään tukimuurin halkeilun rajoittamiseen liittyvät toimenpiteet ja toteutuneet raudoitukset. Tulostettava sivu on suunniteltu selkeäksi ja yksinkertaiseksi, jotta käyttäjän olisi helppo seurata tukimuurin mitoitusta. Sivun tarkoituksena on tarjota ymmärrettävä ja tiivistetty yhteenveto muurin keskeisistä teknisistä ominaisuuksista ja on tulostettavissa kolmelle A4-kokoiselle paperille.

Laskenta-sivulla määritetään rakenteeseen kohdistuvat erityyppiset kuormat, jotka johtuvat rakenteen omasta painosta, täyttömateriaalista sekä maanpaineesta. Sivulla on mahdollista tarkastella yksityiskohtaisemmin maanpainekuormaa, epäkeskisyyttä ja tehollista pinta-alaa. Tässä yhteydessä maanpainekuormana käytetään lepopainetta; aktiivi- ja passiivipaineen käyttö mitoituksessa on jätetty tämän työn ulkopuolelle. Sovellus ottaa huomioon tiivistämisen aiheuttaman maanpaineen, mikäli käyttäjä syöttää sovellukseen tiivistimen aiheuttaman viivakuorman suuruuden.

Kantokestävyuden laskukaavat on syötetty laskentapohjaan. Mikäli geotekninen kantavuus on määritetty pohjatutkimuksessa, käyttäjä voi syöttää tämän tiedon Lähtötiedot-sivulla  $R_d/A$  (kPa) kenttään, jolloin sovellus käyttää pohjatutkimuksesta saatua arvoa kantokestävyuden mitoittavana tekijänä.

Laskenta-sivulla on myös esillä toteutuneet raudoitukset sekä halkeilun ja leikkauskestävyyden käyttöasteet. Maanpainekuorma STR-rajatilassa, lepopaineena, taivutuskestävyyden vaatimukset, tarvittava raudoitus sekä

leikkauskestävyyden määrittäminen leikkausraudoittamattomalle rakenteelle ovat yksityiskohtaisesti laskettu.

Laskentapohjan neljällä viimeisillä välilehdellä esitetään tietoja ja kertoimia maapohjan arvoista, materiaaliominaisuuksista, osavarmuuskertoimista sekä kuormituskertoimista, jotka eivät ole välttämättömiä laskennan näkyvässä vaiheessa, mutta joihin on viitattu laskentaprosessin aikana. Vaikka nämä tiedot on piilotettu laskentaprosessista, ne ovat tarvittaessa käyttäjän saatavilla omalla välilehdellään.

## 10 Johtopäätökset

Tukimuureja mitoittaessa, tarkasteltavien kuormitustapausten ja tilanteiden lukumäärä voi kasvaa nopeasti, mikäli riittäviä yksinkertaistuksia ei tehdä. Tukimuurin geometria ja tästä aiheutuvat maanpaineen muutokset ja mitoitusosat kukin aikaansaavat omia kuormitustilanteita, jotka on tarkasteltava huolellisesti.

Kulmatukimuurin geo- ja rakenneteknisen mitoituksen toteuttaminen edellyttää rakennesuunnittelijalta useiden eri rajatilojen tarkastelua käyttäen kullekin rajatilalle ominaisia suunnitteluperiaatteita. Mitoitusprosessin kannalta on tärkeää suunnitteluperusteiden lisäksi kuormitusyhdistelmien ja kuormien vaikutusten analysointia sekä geo- ja rakenneteknisen hyvää hallintaa.

Eurokoodi tarjoaa kaksi vaihtoehtoista mitoitusastetta kulmatukimuurin geometrian määrittämiseen liittyen kanto-, katu- ja liukumiskestävyyteen. Kulmatukimuurin stabiliteetin mitoituksen yhteydessä voidaan saavuttaa pienemmät dimensiot käyttämällä mitoitusastetta DA2\* verrattuna mitoitusastetta DA2. DA2-mitoitustavan laskennassa osavarmuuskertoimet ovat jo mukana maanpaineiden määrittämisessä, jolloin vaakakuormien resultantit kasvavat näin ollen joutaa järeämpään rakenteeseen.

Kulmatukimuurin mitoituksessa haasteet geo- ja rakenneteknisessä mitoituksessa johtuvat osittain rajatilojen yhteensovittamisesta. Geoteknisessä

mitoituksessa määritellyt mitat eivät usein riittäviä rakenteellisen mitoituksen vaatimiin taivutus- ja leikkauskestävyystarkasteluihin tai halkeilun ehkäisemiseen. Tämän seurauksena rakenteen mittoja joudutaan tarpeen vaatiessa muuttamaan, mikä yleensä rajoittuu poikkileikkausten korkeuden kasvattamiseen.

Kulmatukimuurin suunnittelussa kriittisimmät rasitukset syntyvät pystymuurin juurella olevassa liitoksessa, jossa raudoituksen kapasiteettivaatimukset ovat suurimmillaan. Tämä johtuu kulmatukimuurin rakenteellisista ominaisuuksista sekä pysty- ja vaakakuormien suhteesta, jotka aiheuttavat kuormien epäkeskeisen jakautumisen maapohjalle.

Excel-laskentapohjainen laskentatyökalu soveltuu hyvin tukimuurien mitoitukseen. Sen käyttö mahdollistaa nopean ja vaivattoman pääsyn yksinkertaisiin mitoitustaulukoihin. Kun taulukkoa sovelletaan eurokoodien vaatimuksiin ja laskelmat muuttuvat yhä automaattisemmaksi, vaikeuksia voi aiheutua muun muassa erilaisten mitoitustapojen yhdistämisestä samaan taulukkoon. Kaavojen monimutkaistuessa ne pidentyvät ja virheiden mahdollisuus lisääntyy.

Kulmatukimuurin mitoitus edellyttää rakennesuunnittelijalta useiden tekijöiden huolellista arviointia ja yhteensovittamista. On tärkeää varmistaa, että suunnitelma on sekä geoteknisesti että rakenneteknisesti kattava ja täyttää kaikki sille asetetut standardit ja vaatimukset. Eurokoodit tarjoavat laajasti ohjeita mitoituksen huomioon otettavista asioista, mutta jättävät paljon tulkinnanvaraa suunnittelijoille siinä, miten normit ja ohjeet sovelletaan käytännössä.

## 10.1 Jatkotoimenpiteet

Laskentapohjaa voisi tulevaisuudessa laajentaa siten, että se kattaa kallioon ja paalutukseen perustuvat tukimuurirakenteet. Tämän laajennuksen toteuttaminen voisi tarjota merkittävää lisäapua rakennesuunnittelijoille antamalla heille paremmat työkalut kulmatukimuurien suunnitteluun erityisesti haasteellisissa maaperäolosuhteissa. Lisäksi pohjaveden pinnan vaihtelun huomioon ottaminen laskentapohjassa on toinen keskeinen kehitystarve. Pohjaveden

dynaamiset muutokset voivat vaikuttaa tukimuurin rakenteelliseen kestävyYTEEN ja niiden asianmukainen huomioon ottaminen suunnitteluvaiheessa voi merkittävästi vähentää riskiä rakenteellisille vaurioille sekä rakenteen käyttöiälle.

Laskentapohjaan voidaan integroida uusi ominaisuus, joka mahdollistaa routavaikutusten huomioon ottamisen jo mitoitusvaiheessa. Roudan aiheuttamat jäätyminen ja sulaminen voivat johtaa maaperän tilavuuden muutoksiin, kuten laajenemiseen ja kutistamiseen. Tarkka analyysi täyttö- ja pohjamaan routimisriskistä sekä sen seurauksista tukimuriin on olennainen, sillä se auttaa rakennesuunnittelijaa materiaalin valinnassa.

Lisätoimeenpiteenä betonin ja raudoituksen määrän optimointi tarjoaa mahdollisuuden materiaalitehokkuuden parantamiseen. Suunnitteleamalla muurin yläosan kapeammaksi verrattuna sen alaosaan tai muurin porrastuksella voidaan tuottaa sekä kustannus- että materiaalisäästöjä.

Jatkotoimenpiteenä FEM-laskennan (Finite Element Method) integrointi Excel-laskentapohjaan lisää laskentatyökalun arvoa ja helpottaisi tukimuurin mitoitusprosessia. Tämä mahdollistaisi rakenteen sisäisten voimien sekä siirtymien tarkastelun eri kuormitusyhdistelmillä, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi raudoituksen suunnittelussa, halkeamaleveyksien laskennassa sekä muissa rakennelaskelmissa. Mallin avulla on mahdollista kuvata maan ja rakenteen yhteisvaikutusta käyttäen hyväksi jousimallia. (45, s. 49.)

## Lähteet

- 1 Hug Brooks, John P. Nielsen. 2013. Basics of Retaining Wall Design. Newport Beach, California: HBAPUBLICATION.
- 2 Jääskeläinen, Raimo. 2011. Geotekniikan perusteet. Jyväskylä: Tammer-tekniikka / Amk-Kustannus Oy.
- 3 Halenelund, K.V. 1962. Pohjarakennus ja maarakennustekniikka 2. Helsinki: Teknillinen korkeakoulu.
- 4 Tensar International Limited. Retaining Walls: Types, Design and Functions. Verkkoaineisto. <https://www.tensar.co.uk/resources/articles/types-of-retaining-wall>. (luettu 10.1.2024)
- 5 G.C. Behera 9.1. 2024. Retaining Wall Structure. Verkkoaineisto. [https://gcekbpatna.ac.in/assets/documents/lecturenotes/1671874900\\_4b7c4a492b6b254c7625.pdf](https://gcekbpatna.ac.in/assets/documents/lecturenotes/1671874900_4b7c4a492b6b254c7625.pdf) (luettu 12.1.2024)
- 6 Commercial Installation Manual for Allan Block Retaining Walls. Verkkoaineisto. <https://www.allanblock.com/literature/pdf/abcommmanual.pdf> (luettu 17.1.2024)
- 7 Maisemabetoni. Muurit ja tukimuurit. Muurin suunnittelu. Verkkoaineisto. <https://maisemabetoni.fi/fin/muuritmuurit-ja-tukimuurit/muurin-suunnittelu/> (luettu 20.1.2024)
- 8 Structural Guide. Civil & Structural Engineering Knowledge Base. Butressed Retaining Walls. <https://www.structuralguide.com/butressed-retaining-walls/> (luettu 22.1.2024)
- 9 Dimensions.com. Retaining Wall Buttress. Dimensions & Sizes. <https://www.dimensions.com/element/retaining-wall-buttress>. (luettu 26.1.2024)
- 10 RT 38568 2014: Hesco – hitsatut kivikorit. Kaitos Oy. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/806170/Pesonen\\_Antti.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/806170/Pesonen_Antti.pdf?sequence=2&isAllowed=y) ( luettu 26.1.2024)
- 11 Emery Gilles. Nkemegni Wandaji. 2019/2020. Slope Stabilization Through a Gabion Wall: Case study of a Landslide in Southern Poland. Diplomityö. Italy. University of Padova. [https://thesis.unipd.it/retrieve/e05cb57d-687c-480a-b2af-92da79cbfc39/1212076\\_Nkemegni%20Wandaji\\_FileTesi\\_A.pdf](https://thesis.unipd.it/retrieve/e05cb57d-687c-480a-b2af-92da79cbfc39/1212076_Nkemegni%20Wandaji_FileTesi_A.pdf) (luettu 27.1.2024)

- 12 Helsingin kaupunki. Kaupunkiympäristön toimiala. Ohjeita suunnittelijoille – sivusto. Kivikorit. Verkkoaineisto. <https://kaupunkitilaohje.hel.fi/kortti/kivikori/> (luettu 28.1.2024)
- 13 Bond, Andrew – Harris, Andrew 2008. Decoding Eurocode 7. Oxon: Taylor & Francis.
- 14 RIL 207 - 2017 Geotekninen suunnittelu. Eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 15 Bond, Andrew - Brooker, Owen - Harris, Andrew - Harrison, T. - Moss, Richard - Narayanan, R. S. - Webster, Rod 2006. How to Design Concrete Structures using Eurocode 2? E-kirja. <https://www.slideshare.net/nikmik/how-to-design-concrete-structures-using-eurocode-2> (luettu. 1.2.2024)
- 16 M.F Durka, W. Morgan & D.T. Williams. 1996. Structural Mechanics. Essex: Addison Wesley Longman Limited.
- 17 Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Eurokoodi Help Desk Artikkelit. Eurokoodit – tarkoitus. 2021 <https://www.eurocodes.fi/eurokoodit-tarkoitus/> (luettu 2.2.2024)
- 18 SFS-EN 1990. 2006. Eurokoodi 0. Rakenteiden suunnittelun perusteet. 2006. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- 19 Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCC 7. 2023. Liikennevirasto. [https://ava.vaylapiivi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2023-14\\_NCCI\\_7\\_web.pdf](https://ava.vaylapiivi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2023-14_NCCI_7_web.pdf) (luettu 4.2.2024)
- 20 RIL 201-1-2011 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3 ja EN 1991-1-4. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 21 SFS-EN 1997-1. 2014. Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- 22 Suomen Betoniyhdistys 2013. BY 211 – Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.
- 23 SFS-EN 1991-1-1. 2002. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1: Yleiset kuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- 24 SFS-EN 1991-1-7. 2014. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1–7: Yleiset kuormat. Onnettomuuskuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

- 25 RIL 263–2014. Kaivanto-ohje. Rakennuskaivantojen ja putkikaivantojen suunnittelu- ja rakennusohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 26 Braja M. Das. 2011. Principles of Foundation Engineering, SI. 7. Edition. <https://civil-team.weebly.com/uploads/2/5/8/2/25829430/principles-of-foundation-engineering-braja-m.das-7th-ed-si-units.pdf> (luettu 5.2.2024)
- 27 Skill - lync. Engineering Courses. Mechanical. Civil Engineering. Student Project. 2023. <https://skill-lync.com/student-projects/week-4-challenge-684> (luettu 7.2.2024)
- 28 The University of Melbourne. Earth Pressure on Retaining Structures. [https://people.eng.unimelb.edu.au/stsy/geomechanics\\_text/Ch12\\_EarthPr.pdf](https://people.eng.unimelb.edu.au/stsy/geomechanics_text/Ch12_EarthPr.pdf) (luettu 8.2.2024)
- 29 SkyCiv Engineering. 2015-2024. Lateral Earth Pressure due to Surcharge Loads on Retaining Wall. Verkkoaineisto. <https://skyciv.com/docs/skyciv-retaining-wall/articles/lateral-earth-pressure-due-to-surcharge-loads/> (luettu 11.2.2024)
- 30 The Constructor. Building Ideas. 2009. Loads and Forces Action on Retaining wall. Verkkoaineisto [https://theconstructor.org/structural-engg/loads-forces-acting-on-retaining-wall/14106/#goog\\_rewarded](https://theconstructor.org/structural-engg/loads-forces-acting-on-retaining-wall/14106/#goog_rewarded) (luettu. 12. 2.2024)
- 31 Betonitieto. oppiminen, opetuksen tukimateriaali, rakennesuunnittelu, rakennesuunnittelun perusteet. Kuormat ja kuormitusyhdistelmät. Verkkoaineisto. Vaatii lisenssiä <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/rakennesuunnittelu/rakennesuunnittelun-perusteet/kuormat-ja-kuormitusyhdistelmat.html> (luettu 15.2.2024)
- 32 SFS-EN 1992-1-1. 2015. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisointiliitto SFS.
- 33 Savolainen, Janne 2015. Kulmatukimuurin geo- ja rakennetekninen suunnittelu. Diplomityö. Tampere: Tampereen Teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto.
- 34 Isokääntä, Joni. 2017. Eurokoodin mukaisen laskentamenetelmän kehittäminen tukimuurien mitoitukseen. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto, kone- ja rakennustekniikan osasto.

- 35 Betonitieto. oppiminen, opetuksen tukimateriaali, rakennesuunnittelu, teräsbetonipalkit. Taivutusmitoitus. Verkkoaineisto. Vaatii lisenssiä <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/rakennesuunnittelu/terasbetonipalkit/taivutusmitoitus.html> (luettu 15.2.2024)
- 36 Suomen Betoniyhdistys 2014. BY 211 – Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 2. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.
- 37 Kolkka, Jari. 2013. Kulmatukimuurin geotekninen mitoitus eurokoodin mukaan. Opinnäytetyö. Tampere: Tampereen Teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto.
- 38 Betonitieto. oppiminen, opetuksen tukimateriaali, betonin ominaisuudet ja valinta, kovettuneen betonin ominaisuudet, Betonin halkeilu. Verkkoaineisto. Vaatii lisenssiä <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/kovettuneen-betonin-ominaisuudet/betonin-halkeilu.html> (luettu 19.2.2024)
- 39 Suomen Betoniyhdistys 2016. BY 67 – Betonin kutistuminen ja halkeilun hallinta. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.
- 40 Betonitieto. oppiminen, opetuksen tukimateriaali, betonin ominaisuudet ja valinta, betonin säilyvyys, betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu. Betonirakenteiden rasitusluokat. Verkkoaineisto. Vaatii lisenssiä <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/betonin-sailyvyys/betonirakenteiden-kayttoikasuunnittelu.html#rasitusluokat> (luettu 22.2.2024)
- 41 Betonitieto. Suunnittelijat, betonirakenteiden suunnittelu, talonrakentaminen, rakenteiden toteutussuunnittelu ja mitoitus. Betonin ja rasitusluokan valinta. Verkkoaineisto. Vaatii lisenssiä <https://www.betonitieto.fi/suunnittelijat/betonirakenteiden-suunnittelu-talonrakentaminen/rakenteiden-toteutussuunnittelu-ja-mitoitus/betonin-ja-rasitusluokan-valinta.html> (luettu 24. 2. 2024)
- 42 Suomen Betoniyhdistys 2021. BY 65 – Betoninormit. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.
- 43 Betonitieto. oppiminen, opetuksen tukimateriaali, betonin ominaisuudet ja valinta, kovettuneen betonin ominaisuudet, betonin halkeilu. Halkeilun syyt, tyypit ja välttäminen. Verkkoaineisto. Vaatii lisenssiä <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/kovettuneen-betonin-ominaisuudet/betonin-halkeilu/halkeilun-syyt-tyypit-ja-valttaminen.html> (luettu 25.2.2024)

- 44 Betonitieto. Suunnittelijat, betonirakenteiden suunnittelu, talonrakentaminen, betonirakenteiden suunnitteluperusteet, säilyvyys. Halkeilun rajoittaminen. Verkkoaineisto. Vaatii lisenssiä <https://www.betonitieto.fi/suunnittelijat/betonirakenteiden-suunnittelu-talonrakentaminen/betonirakenteiden-suunnitteluperusteet/betonirakenteiden-sailyvyys/halkeilun-rajoittaminen.html> (luettu 27.2.2024)
- 45 Kujala, Antti. 2018. Tukimuurin mitoitus eurokoodin mukaisesti FEM-laskentaohjelmilla. Opinnäytetyö. Seinäjoki. Seinäjoen ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan osasto.

## Mitoitusesimerkki laskentapohjalla

### TERÄSBETONISEN KULMATUKIMUURIN LASKENTAOHJELMA EUROKOODI 7: GEOTEKNINEN SUUNNITTELU EUROKOODI 2: BETONIRAKENTEIDEN SUUNNITTELU SUOMEN KANSALLINEN LIITE

Tällä laskentaohjelmalla voidaan mitoittaa teräsbetoninen kulmatukimuri Eurokoodien mukaan. Ohjelman käyttö vaatii asiantuntemusta betonirakenteiden ja pohjarakenteiden suunnittelusta.

Laskentataulukossa lähtöarvot syötetään Lähtötiedot-välilehdellä harmaalla värillä maalattuihin soluihin. Maalaamattomat solut sisältävät vakioituja arvoja ja laskentakaavoja. Käyttöasteet ja rauditusmäärät näkyvät vihreänä, mikäli kestävyys on riittävä, ja punaisena riittämättömässä tapauksessa.

Versio	Tekijä	Päiväys	Selitys
1.0	Reza Nabizada	26/04/2024	Ensimmäinen virallinen julkaistu versio

#### Lähtötiedot:

Lähtöarvot syötetään lukuarvoina Lähtötiedot-välilehden harmaalla maalattuihin soluihin. Mikäli käyttäjä yrittää syöttää virheellisen arvon, tulee näkyviin virhesanoma, joka neuvoo oikean lähtötiedon syöttämisessä.

#### Laskenta:

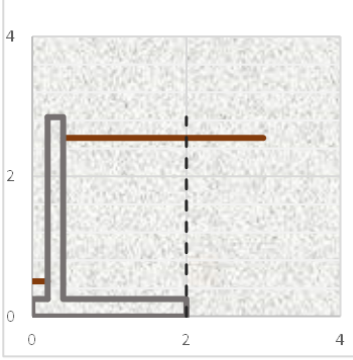
Sivulla suoritetaan rakenteen geo- ja rakennetekniset mitoitukset yllä mainittujen standardien mukaisesti selkeässä ja helposti seurattavassa järjestyksessä. Mitoitukseen liittyvät yhtälöt ja kaavat on selostettu niin, että rakenteen mitoitusprosessia on helppo seurata.

#### Tulokset:

Sivulla tulostuu yhteenveto geo- ja rakenneteknisistä mitoituslaskelmista, mukaan lukien rakenteen mitat ja eri kestävyyksien, kuten taivutuksen, leikkauksen, halkeilun, liukumisen, kaatumisen ja kantokestävyyyden käyttöasteet. Lisäksi sivulla näkyy kuva tukimuurin


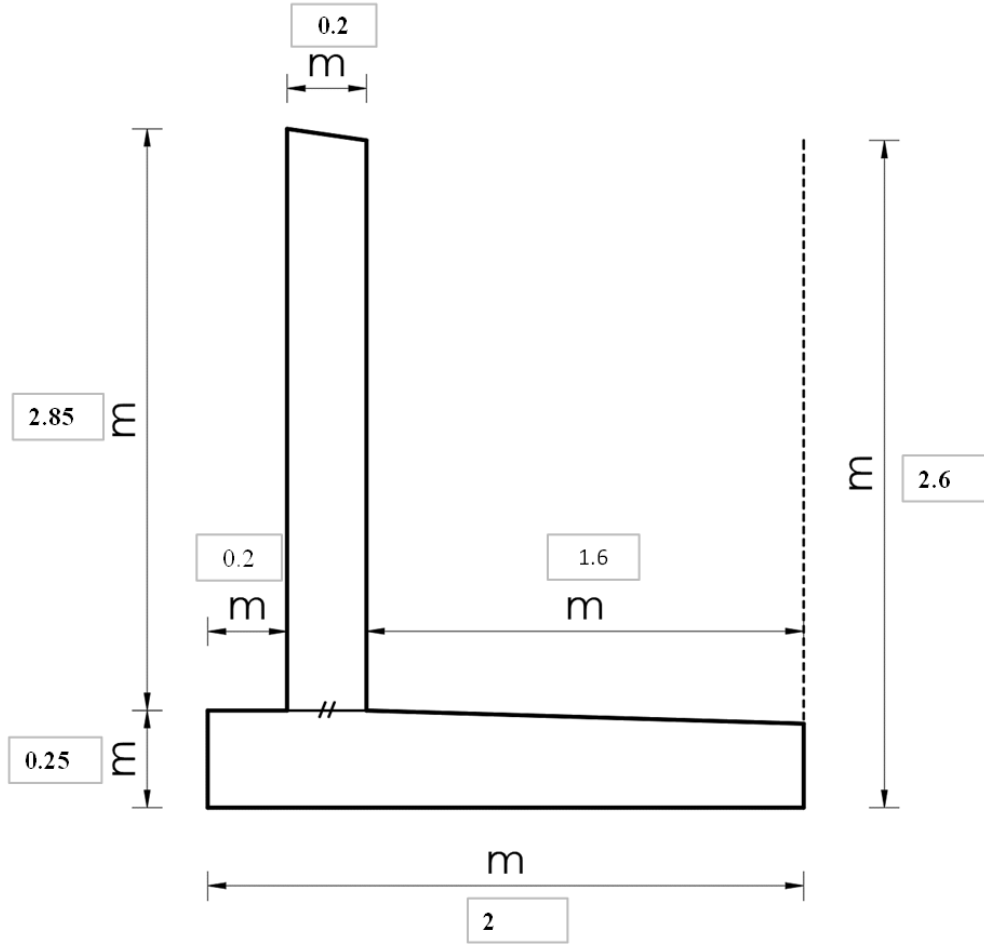
#### Ohjelman käyttäjän vastuu:

Ohjelman tekijä ei vastaa ohjelman mahdollisista virheistä ja niistä aiheutuneista vahingoista ohjelman käyttäjälle ja mahdolliselle kolmannelle osapuolelle. Ohjelman käyttäjä käyttää ohjelmaa omalla vastuulla ja on itse vastuussa tulosten oikeellisuudesta.

IdeaStructura		Rakennelaskelma, lähtötiedot	
		Tekijä:	Reza Nabizada
Päiväys:	01/05/2024		
Rakennuskohde:	Esimerkkilaskelma		
Sisältö:	Teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoittaminen		
Kohde:		Työnumero:	
Kulmatukimuri			
Laadittu IdeaStructurassa vuonna 2024 osana opinnäytetyötä			
<b>Muurin geometria</b>			
Pystymuurin korkeus	$h_m =$	<input type="text" value="2.85"/>	m
Täyttömaan korkeus	$h_{f1} =$	<input type="text" value="2.55"/>	m
Pystymuurin paksuus	$b_m =$	<input type="text" value="0.2"/>	m
Pohjalaatan paksuus	$d_h =$	<input type="text" value="0.25"/>	m
Pohjalaatan takaosan ulokkeen pituus	$b_{L1} =$	<input type="text" value="1.6"/>	m
Pohjalaatan etuosan ulokkeen pituus	$b_{L2} =$	<input type="text" value="0.2"/>	m
Pohjalaatan kokonaisleveys	$B_L =$	<input type="text" value="2"/>	m
Pintamaan kaltevuuskulma	$\beta =$	<input type="text" value="0"/>	°
Kuvitteellisen seinän korkeus	$h_{r,d} =$	<input type="text" value="2.55"/>	m
			
<b>Luokat ja varmuuskertoimet</b>			
Seuraamusluokka	CC =	<input type="text" value="CC2"/>	Suunniteltu käyttöikä <input type="text" value="50"/>
<b>Materiaaliominaisuudet</b>			
Betonin lujuusluokan valinta	<input type="text" value="C30/37"/>	Rasitusluokka	<input type="text" value="XC4"/>
Betonipeitteen minimiarvo säilyvyydelle	<input type="text" value="30"/>	mm	Betoni.p maata.v <input type="text" value="50"/>
mm			
<b>Täyttömaan parametrien arvot</b>			
Täyttömaakerros	<input type="text" value="1"/>		
Täyttömaa	<input type="text" value="Hieno hiekka, keskitiivis"/>		
Täyttökerroksen korkeus	$h_{f1} =$	<input type="text" value="2.55"/>	m
Tilavuuspaino ylä-/alapuolella	$\gamma_1 =$	<input type="text" value="18"/>	kN/m <sup>3</sup>
Leikkauskestävyyskulma	$\varphi_1 =$	<input type="text" value="33"/>	°
		$\gamma'_1 =$	<input type="text" value="11"/>
			kN/m <sup>3</sup>

Täyttömaan parametrien arvot		Sivu: 2 (3)	
Tukeva täyttömaa	Hieno hiekka, keskitiivis		
Täyttömaakerroksen korkeus	$h_{r2} =$	0.5	m
Tilavuuspaino ylä-/alapuolella	$\gamma_2 =$	18	kN/m <sup>3</sup>
Leikkauskestävyyskulma	$\varphi_3 =$	33	°
			$\gamma'_2 =$ 11 kN/m <sup>3</sup>
<b>Pintakuormat</b>			
Pintakuorma täyttöpuolella			
Pintakuorma	$Q_k =$	3	kN/m <sup>2</sup>
	Kuormakerroin	$\psi =$	0.2
<b>Maanpaine</b>			
Maanpaine	Lepopaine		
Tiivistyksen aiheuttama kuorma	$q_t =$	1	kN/m
			$p_t =$ 12 kN/m <sup>2</sup>
<b>Perustaminen</b>			
Perustustapa	Maanvarainen		
Pohjamaa	Hieno hiekka, keskitiivis		
Tilavuuspaino	$\gamma_4 =$	18	kN/m <sup>3</sup>
Anturan ja maan välillä leik.kest.k	$\varphi_4 =$	33	°
Maan ja anturan välinen kitkakerro	$\delta_k =$	40	°
			$R_d/A =$ 100 kN/m <sup>2</sup>
<b>Käyttöaste</b>			
Käyttöaste kantokestävyydelle	KA	DA2	KA
		23%	DA2*
			12%
Käyttöaste kantokestävyydelle annetulla pohjapaineella	KA	96%	
Käyttöaste liukumiskestävyydelle	KA	74%	KA
			44%
Käyttöaste kaatumiskestävyydelle (EQ)	KA	55%	

Raudoitus		Sivu: 3 (3)		
<b>Pystymuuri:</b>				
	Luokka	Tanko	Jakoväli	$A_{s,tot}$
Pääteräksset =	B500K	$\varphi_s = 12$ mm	140 mm	808 mm <sup>2</sup>
Jakoteräksset =	A400H	$\varphi_s = 8$ mm	200 mm	251 mm <sup>2</sup>
<b>Pohjalaatta:</b>				
Alapinnassa				
	Luokka	Tanko	Jakoväli	$A_{s,tot}$
Pääteräksset =	A400H	$\varphi_s = 8$ mm	200 mm	251 mm <sup>2</sup>
Jakoteräksset =	A400H	$\varphi_s = 8$ mm	300 mm	168 mm <sup>2</sup>
Yläpinnassa				
	Luokka	Tanko	Jakoväli	$A_{s,tot}$
Pääteräksset =	A400H	$\varphi_s = 12$ mm	100 mm	1131 mm <sup>2</sup>
Jakoteräksset =	A400H	$\varphi_s = 8$ mm	300 mm	377 mm <sup>2</sup>
Teräksen tartuntatyyppi =	Hyvä			
Kuormitustapa =	taivutukselle			
<b>Halkeilun rajoittaminen</b>				
<b>Halkeamaleveys:</b>				
	$W_k$	$W_{k,max}$	%	
Pystymuurissa	0.26	0.3	88	OK!
	$W_k$	$W_{k,max}$	%	
Pohjalaatan yläpinnassa	0.23	0.3	78	OK!
	$W_k$	$W_{k,max}$	%	
Pohjalaatan alapinnassa	0.21	0.3	69	OK!

		Rakennelaskelma, tulokset			
		Tekijä:	Reza Nabizada	Sivu:	1(3)
		Päiväys:			
Rakennuskohde:	Esimerkkilaskelma				
Sisältö:	Teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoittaminen				
Kohde:		Työnumero:			
Kulmatukimuuuri					
Tulokset					
Rakenteen mitat					
					
Murtorajatila					
Taivutuskestävyys					
	KA	$M_{Ed}$	Yksikkö	$M_{Rd}$	Yksikkö
pystymuuri	93%	50	kNm	54	kNm
poh.laatta	yläpinta	79	kNm	91	kNm
	alapinta	8	kNm	21	kNm

Murtorajatila						Sivu: 2(3)
<b>Leikkauskestävyys</b>						
	KA		$V_{Ed}$	Yksikkö	$V_{Rd,c}$	Yksikkö
pystymuuri	66%		64	kN	96	kN
poijalaatta	70%		87	kN	124	kN
<b>Käyttörajatila</b>						
<b>Halkeilukestävyys</b>						
	KA		$w_k$	Yksikkö	$w_{max}$	Yksikkö
pystymuuri	88%		0.26	mm	0.3	mm
antura alapinta	69%		0.21	mm	0.3	mm
antura yläpinta	78%		0.23	mm	0.3	mm
<b>Stabiileetti (GEO/EQU)</b>						
<b>Stabiileettilaskenta</b>						
<b>kaatuminen</b>	$\sum M_{d,stab}$	Yksikkö	$\sum M_{d,dsb}$	Yksikkö	KA	kesto
kaatava momentti	100	kNm/m	54	kNm/m	55%	OK!
<b>DA2*-menetelmä</b>						
<b>liukuminen</b>	$\sum H_d$	Yksikkö	$\sum R_d$	Yksikkö	KA	kesto
vaakavoima	45	kN	103	kN	44%	OK!
<b>DA2-menetelmä</b>						
<b>liukuminen</b>	$\sum H_d$	Yksikkö	$\sum R_d$	Yksikkö	KA	kesto
vaakavoima	51	kN	103	kN	49%	OK!
<b>DA2*-menetelmä</b>						
<b>kantokestävyys</b>	$\sum V_d$	Yksikkö	$\sum R_d$	Yksikkö	KA	kesto
pysty-voima KTP1	135	kN	1083	kN	12%	OK!
pysty-voima KTP2	135	kN	1204	kN	11%	OK!
<b>DA2-menetelmä</b>						
<b>kantokestävyys</b>	$\sum V_d$	Yksikkö	$\sum R_d$	Yksikkö	KA	kesto
pysty-voima KTP1	123	kN	1057	kN	12%	OK!
pysty-voima KTP2	51	kN	1076	kN	5%	OK!
pysty-voima KTP3	90	kN	516	kN	17%	OK!
pysty-voima KTP4	90	kN	398	kN	23%	OK!

**Raudoitus:****Raudoitus**

	pääraudoitus	jakoraudoitus
pystymuuri	T12-K140	T8-K200
antura	yläpinta	T8-K300
	alapinta	T8-K200

**Suojapeite**

	suojapeite	mm
pystymuuri	$c_{nom}$	30
antura	yläpinta	$c_{nom}$
	alapinta	$c_{nom,p}$

