

Pilarianturan mitoittaminen eurokoodin mukaan

Jussi Hämäläinen

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Jussi Hämäläinen	
Työn nimi Pilarianturan mitoittaminen eurokoodin mukaan	
Päiväys 20.4.2012	Sivumäärä/Liitteet 35+16
Ohjaaja(t) Lehtori Harry Dunkel ja lehtori Raimo Lehtiniemi	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Insinööritoimisto ConnAri Oy	
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia sekä anturan mitoitus eurokoodin mukaan että Robot Structural Analysis -ohjelman käytettävyyttä insinööritoimistossa anturoiden mitoituksessa. Tavoitteena oli laatia käytettävyytustutkimus perehtymällä eurokoodin mukaiseen anturanmitoitusteoriaan. Tämän pohjalta oli tarkoitus laatia laskelma ja verrata tätä laskelmaa vastaavaan laskelmaan, joka oli tehty Robot Structural Analysis -ohjelmalla. Vertailun perusteella haluttiin selvittää, onko ohjelma anturanmitoitussosio hyödyllinen käytettäväksi insinööritoimistossa.</p> <p>Aluksi opinnäytetyössä perehdyttiin eurokoodeihin, jotka määrittävät anturan mitoituksen. Tämän perusteella luotiin vertailulaskelma Excel -taulukkolaskentamuotoon, jotta muutokset olisivat helppo tehdä ja pystyttäisiin laskemaan useita kuormitustapauksia nopeammin. Seuraavaksi perehdyttiin Robot Structural Analysis -ohjelman käyttöön. Tämän jälkeen tehtiin laskelma Robot Structural Analysis -ohjelmalla, jonka tuloksia verrattiin vertailulaskelmaan tuloksien saamiseksi.</p> <p>Työn lopputulokseksi saatiin tutkimusraportti Robot Structural Analysis -ohjelman käytettävyydestä insinööritoimistossa. Käytettävyytustutkimuksen mukaan Robot Structural Analysis -ohjelman anturan mitoitusosio ei ole soveltuva käytettäväksi anturan mitoitukseen Suomessa. Tulosten perusteella anturan mitoitus tulisi tehdä käsinlaskien, muilla laskentaohjelmilla tai taulukkolaskentana. Sivutuotteena insinööritoimistosta tuli Excel -laskentataulukko anturoiden mitoitukseen, joka luovutettiin insinööritoimisto ConnAri Oy:n käyttöön.</p>	
Avainsanat pilariantura, eurokoodi, robot structural analysis professional	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Jussi Hämäläinen			
Title of Thesis Designing Pad Foundation According to Eurocode			
Date	20 April 2012	Pages/Appendices	35+16
Supervisor(s) Mr Harry Dunkel, Lecturer and Mr Raimo Lehtiniemi, Lecturer			
Client Organisation /Partners Insinööritoimisto ConnAri Ltd			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this bachelor's thesis was to study designing a pad foundation according to the eurocode and to study the usability of FEM- program Robot Structural Analysis. A usability study was meant to be made by studying the eurocode defining the design protocol of pad foundations. Information from eurocode was used to make calculations of a single case of pad foundation design. These calculations were to be compared to calculations produced by Robot Structural Analysis. According to this comparison conclusions were made if Robot Structural Analysis was usable in engineering office.</p> <p>The thesis started with studying the eurocode and making the comparison calculations. The calculations were made using the Excel table calculation program so that modifications would be easy to make and it would be easier to calculate multiple cases faster. Then the thesis progressed with studying the Robot Structural Analysis program. After that calculations were made with the Robot Structural Analysis program and comparison was made to get the results wanted.</p> <p>As a result, report was made about the design of the pad foundations according to the eurocode and also to give general idea about the usability of Robot Structural Analysis for the engineering office. According to the usability study the Robot Structural Analysis program did not prove to be usable in designing of pad foundations in Finland. Designing of pad foundations should be made by hand, with other similar programs or with calculation tables. As a by product of this thesis an Excel- calculation table was made and given to Insinööritoimisto ConnAri Ltd.</p>			
<p>Keywords pad foundation, eurocode, Robot structural analysis professional</p>			

ALKUSANAT

Tämä insinöörityö tehtiin Insinööritoimisto ConnAri Oy:lle toimitusjohtaja Ari Tanskasen ja rakennesuunnittelija Juhani Lyytisen ohjauksessa. Opinnäytetyön aihe saatiin Insinööritoimisto ConnAri Oy:n projekteista kesän 2011 aikana.

Haluan kiittää lehtoreita Harry Dunkel ja Raimo Lehtiniemi opinnäytetyön ohjauksesta. Haluan kiittää myös Insinööritoimisto ConnAri Oy:tä mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö heille.

Kuopiossa

JUSSI HÄMÄLÄINEN

SYMBOLIT

A	pilarianturan pohjan pinta-ala
A'	pilarianturan pohjan tehollinen pinta-ala
a	peruspilarin sivumitta
b	peruspilarin sivumitta
B	pilarianturan leveys
B'	pilarianturan tehollinen leveys
D	perustamissyvyys
d	raudoituksen tehollinen korkeus
e	kuormitusresultantin epäkeskisyys
f_{cd}	betonin mitoituspuristuslujuus
f_{ck}	betonin ominaispuristuslujuus
f_{ctk}	betonin vetolujuuden ominaisarvo
f_{ctd}	betonin vetolujuuden mitoitusarvo
h	anturan korkeus
H_k	perustamistason suuntainen vaakakuorma
H_d	perustamistason suuntainen mitoitusvaakakuorma
K_{FI}	kuormakerroin
L	pilarianturan pituus
L'	pilarianturan tehollinen pituus
M_{Ed}	momentin mitoitusarvo
R_k	kantokestävyyden ominaisarvo
R_d	kantokestävyyden mitoitusarvo
V_k	ominaispystykuorma
V_d	mitoituspystykuorma

Kreikkalaiset kirjaimet

α	kulma asteina
γ	tilavuuspaino
γ'	tehokas tilavuuspaino
γ_c	betonin osavarmuusluku
γ_R	kantokestävyyden osavarmuusluku
γ_M	maaparametrin osavarmuusluku
φ'	tehollinen kitkakulma
ρ	suhteellinen teräs pinta-ala

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	PERUSTUS	10
2.1	Yleinen osa	10
2.2	Perustamistapa	10
3	MITOITUSPERUSTEET EUROKOODIN MUKAAN	12
3.1	Laskelmiin perustuva suunnittelu	12
3.2	Rajatilat	12
3.3	Maaperän mitoitustavat	13
3.4	Kuormien yhdistely ja osavarmuusluvut	13
4	ANTURAN KOON MÄÄRITYS	17
4.1	Geotekninen kantokestävyys	17
4.1.1	Maaperätiedot	17
4.1.2	Kuormien epäkeskisyys	17
4.1.3	Kantokestävyuden laskeminen	18
4.2	Liukumiskestävyys	21
4.3	Kaatumisvakavuus	21
4.4	Läpileikkautuminen	22
5	TIETOKONELASKENTA JA MITOITUS	23
5.1	Lähtötiedot	24
5.2	Laskenta-arvot	24
5.3	Laskentamalli	26
5.4	Tulokset	27
6	TULOSTEN VERTAILU	28
7	POHDINTA	31

LÄHTEET

LIITTEET

- Liite 1 Käsin laskenta. Vertailulaskelma
- Liite 2 Robot Structural Analysis. Anturanmitoitus

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutustua eurokoodin mukaiseen pilarianturan mitoittamiseen. Erityisesti opinnäytetyö käsittelee anturan koon määrittämiseen vaikuttavia tekijöitä, kun anturalle tuleva kuormitus on epäkeskeinen. Työn alussa perehdyn maaperän kantavuuden laskentateoriaan. Tämän jälkeen tutustun anturan laskenta teoriaan, joiden pohjalta luon Excel -laskentataulukon anturan koon määrittämiseksi. Edellämainitut osa-alueet lasketaan käsin, että saadaan Suomen kansallisen liitteen mukainen vertailukohta Autodesk Robot Structural Analysis –laskentaohjelmalle, joka mitoittaa pilarianturat yleisen eurokoodin mukaan. Vertailu tehdään, jotta saadaan varmuutta Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelman käyttöön, jonka perusteella ratkaistaan pystyykö ohjelmaa käyttämään perustusten mitoittamiseen luotettavasti.

Opinnäytetyössä keskitytään maanvaraiseen pilarianturan mitoittamiseen, joka rakennetaan kitkamaan varaan. Antura on kuormitettu vaakavoimilla, jolloin kuormitus on epäkeskeinen. Tämä opinnäytetyö tarkastelee vain tiettyjä osa-alueita pilarianturan mitoituksesta. Laskennassa vertaillaan kantokestävyyttä, reunajännityksiä, kaatumista, liukumista ja läpileikkaantumista. Opinnäytetyössä ei käsitellä kantokestävyyteen liittyvää painumatarkastelua.

Työssä on käytetty itsepiirrettyjä kuvia sekä kuvia SFS EN -standardeista. Kuvien käyttämiseen on kysytty lupa SFS:ltä

2 PERUSTUS

2.1 Yleinen osa

Perustuksella tarkoitetaan rakennuksen maata vasten tulevaa osaa, jonka tarkoitus on ottaa vastaan rakennuksesta tulevat kuormat ja siirtää ne maaperään, jonka takia ne ovat erittäin tärkeä osa rakennusta. Nykyään perustukset käsitetään yleisesti teräsbetonisina rakenteina. Perustukset tulee suunnitella siten, ettei maaperän kantavuus murtorajatilassa ylitä. Niiden mitoituksessa tulee ottaa huomioon myös liukumis- ja kaatumisvarmuus. Myös perustuksen kestävyys on tärkeää, ettei rakennuksen vaurioitumisia tapahdu perustuksen pettämisen takia. Perustuksen kestävyteen vaikuttavat perustuksen koko, perustuksen muoto, käytettävän materiaalin ominaisuudet sekä kuormituksen suunta ja suuruus.

Perustukset tulee suunnitella ja rakentaa asianmukaisella tavalla, sillä perustusten korjaus- ja muutostyöt ovat erittäin kalliita ja vaikeita toteuttaa. Asianmukaisesti suunnitellut perustukset kestävät usein erittäin hyvin, jolloin täytyy ottaa huomioon ympärillä olevien rakenteiden ja rakennusten kunnossa pysyminen.

2.2 Perustamistapa

Perustamistapaan vaikuttaa rakennuskohteen maaperän geotekniset ominaisuudet. Erilaisille maalajeille on suunniteltu erilaisia perustamismenetelmiä, joiden mukaan perustamistavat luokitellaan. Perustamistapa valitaan geosuunnittelijan antamien maaperätietojen perusteella, jotka on saatu maaperätutkimuksista.

Perustamistavat jaetaan viiteen osaan. (Rantamäki&Tammirinne 1979, 26,32,43,98):

- kalliolle perustaminen
- maanvaraiset perustukset
- paalu perustukset
- erikoisperustukset
- eri perustustapojen yhdistelmät.

Perustamistapa määräytyy usein rakennuspaikan maalajin mukaan. Tarpeeksi suurilla massan vaihdoilla pystytään vaihtamaan perustustapaa, joka on usein melko kallis ratkaisu.

Huonosti kantavilla savi-, siltti- tai liejumailla käytetään paaluperustuksia tai suoritetaan maaperän vahvistus tai massojen vaihto, jolloin myös maanvaraiset perustukset tulevat huomioon. Kun kallion pinta on lähellä maanpintaa, tai perustamistavan valintaa kannattavassa syvyydessä, käytetään kallioperustuksia. (Rantamäki&Tammirinne 1979, 26, 43)

Erikoisperustuksilla tarkoitetaan tavanomaisista paalu-, kallio- tai maanvaraisperustuksista merkittävästi poikkeavia perustustapoja. Erikoisperustuksia käytetään, kun perustamisolosuhteet poikkeavat merkittävästi normaaliolosuhteista, kuten suureen vesisyvyyteen perustettaessa. (Rantamäki&Tammirinne 1979, 98)

Maanvaraista perustusta käytetään kun maa on tarpeeksi kantavaa ja karkearakeista. Kantavuusehto syntyy perustustavan luonteesta, sillä maanvaraisen perustustavan on tarkoitus siirtää. Kantava maakerros voi olla täyte-, vaidettua-, vahvistettua- tai luonnollistamaata. Tämän opinnäytetyön pilariantura on perustettu luonnolliseen moreenimaahan. (Rantamäki&Tammirinne 1979, 32)

3 MITOITUSPERUSTEET EUROKOODIN MUKAAN

3.1 Laskelmiin perustuva suunnittelu

Laskelmiin perustuva suunnittelu pohjautuu EN 1990:2002 ja EN 1997-1 standardien mukaiseen menettelyyn. Näiden standardien mukaan laskentamallina voidaan käyttää kolmea eri tapaa. (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 35-36):

- analyyttinen malli
- puolikokeellinen malli
- numeerinen malli.

Näiden laskentamallien sisältämällä varmuuskertoimilla varmistetaan, että laskelma on tarkka tai varmalla puolella. Tässä opinnäytetyössä käsitellään maapohjan kantavuuslaskelma analyyttisen mallin mukaan.

3.2 Rajatilat

Eurokoodissa on määritelty rajatilat rakenteen erilaisten käyttötilanteiden kestävyden varmistamiseksi. Murtorajatilassa tulee tarkistaa, ettei ylitetä tasapainotilan, rakenteen sisäisten osien murtumisen tai rakennuspohjan murtumisen rajatiloja. Murtorajatilat käsittelevät myös liiallisia muodonmuutoksia osalta, jossa ne aiheuttavat rakenteen murtumisen. Murtorajatilassa tehdyssä laskennassa etsitään rakenteelle vaarallisimpia kuormitusyhdistelmiä, joissa kuormia on suurennettu tai pienennetty osavarmuusluvuilla kuorman luonteen mukaan. Varmuutta haetaan myös heikentämällä materiaaliominaisuuksia osavarmuusluvuilla. (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 45)

Käyttörajatilassa otetaan huomioon käytön aikasten muodonmuutosten tarkastelu. Käyttörajatilat tarkoitusena on pyrkiä tutkimaan mahdollisimman tarkasti käytön aikaisten kuormitusten vaikutusta. Näitä muodonmuutoksia ovat siirtymät, taipumat ja halkeamat. Eurokoodissa on annettu rajat näille muodonmuutoksille, joihin vaikuttaa rakenteen koko. Annetuilla rajoilla on tarkoitus varmistaa, ettei rakenteeseen synny epätoivottuja muutoksia käytön aikana.

3.3 Maaperän mitoitustavat

Eurokoodi EN1997-1 esittelee kolme erilaista mitoitustapaa. (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 53):

- mitoitustapa 1, jota ei käytetä Suomessa Suomen kansallisen liitteen mukaan
- mitoitustapa 2, jossa voidaan menetellä kahdella eri tavalla, joista käytetään merkintöjä DA2 ja DA2*
- mitoitustapa 3.

Mitoitustapaa 2 käytetään antura- ja laattaperustusten, paaluperustusten, ankkureiden ja tukirakenteiden mitoituksessa. Mitoitustapaa 3 käytetään luiskien ja kokonaisvakavuuden mitoitukseen. Tässä opinnäytetyössä käytetään mitoitustapaa DA2*, jonka mukaan kaikki maaperälle tulevat kuormat otaksutaan epäedullisiksi ja osavarmuuskertoimet valitaan sen mukaan.

3.4 Kuormien yhdistely ja osavarmuusluvut

Euronormin mukaan etsitään rakenteelle vaarallisin kuormitusyhdistelmä, jolla tarkastellaan rakenteen kestävyyttä ja vakavuutta. Murtorajatilan kuormituksia yhdisteltäessä käytetään kaavoja 1 (6.10a) ja 2 (6.10b). (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 50)

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

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + \quad (2)$$

$$1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \Psi_{0,1} * Q_{k,i}$$

Staattisen tasapainorajatilan kuormitusyhdistelmien laskemiseen käytetään kaavaa 3.

$$1,1 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + \quad (3)$$

$$1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \Psi_{0,1} * Q_{k,i}$$

Kuormitusyhdistelykertoimen Ψ_0 arvot saadaan taulukosta 1. Kertoimen K_{FI} arvot saadaan taulukosta 4.

Taulukko 1. Kuormitusyhdistelykertoimet. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat 2009, 36)

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Asuintilat	0,7	0,5	0,3
Toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Myyvälätilat	0,7	0,7	0,6
Varastotilat	1	0,9	0,8
Lumi $< 2,75\text{kN/m}^2 \leq$	0,7	0,4	0,2
Lumi $t \leq t 2,75\text{kN/m}^2$	0,7	0,5	0,2
Jää	0,7	0,3	0
Tuulikuorma	0,6	0,2	0

Taulukosta saatavaa Ψ kerrointa käytetään, kun rakenteeseen kohdistuu useampi kuin yksi hyötykuorma, kuten lumi ja tuuli.

Mitoitustavan 2 mukaan tutkittavia kuormitusyhdistelmiä murtorajatilassa on kahdeksan.

- V_{\max}, H_{\max} (6.10a)
- V_{\max}, H_{\min} (6.10a)
- V_{\min}, H_{\max} (6.10a)
- V_{\min}, H_{\min} (6.10a)
- V_{\max}, H_{\max} (6.10b)
- V_{\max}, H_{\min} (6.10b)
- V_{\min}, H_{\max} (6.10b)
- V_{\min}, H_{\min} (6.10b)

V pystykuorma

H vaakakuorma

Käytettessä mitoitustapaa 2, DA2* otetaan käyttöön osavarmuuskerroin yhdistelmä kaava 4. (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 53)

$$A1 \text{ "+" } M1 \text{ "+" } R2 \quad (4)$$

A1 osavarmuusluvut kuormille sarja 1

M1 osavarmuusluvut maaparametreille sarja 1

R2 osavarmuusluvut kestävyyksille sarja 2

"+" osavarmuuskerroinsarjan yhdistämine

Maaparametrien osavarmuuslukujen sarja M1 valitaan taulukosta 2.

Taulukko 2. Maaparametrien osavarmuusluvut (STR/GEO) (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 51)

Maaparametri	Symboli	Sarja	
		M1	M2
Leikkauskestävyysskulma ^a ("Kitkakulma")	γ_{ϕ}	1,0	1,25
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}	1,0	1,5
Yksiakiaalinen puristuslujuus	γ_{qu}	1,0	1,5
Tilavuuspaino	γ_{γ}	1,0	1,0

Taulukosta 3 saadaan osavarmuuslukujen sarja A1 kuormitusyhdistelmiin, kun maaperän tai rakennusmateriaalin lujuus määrää maaperän kestävyysden.

Taulukko 3. Kuormien tai kuormavaikutusten osavarmuusluvut (STR/GEO) (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 49)

Kuorma		Symboli	Sarja	
			A1	A2
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)		0,9	
Muuttuva	(yht. 6.10b)	$\gamma_{Gkj,inf}$	0,9	
	(yht. 6.10)			1,0
	Epäedullinen			
	(yht. 6.10b)	γ_Q	1,5 K_{FI}	
	(yht. 6.10)			1,3 K_{FI}
	Edullinen		0	0

Taulukosta 4 saadaan taulukossa 2 käytetty kuormakerroin K_{FI} , joka vaikuttaa osavarmuuslukujen suuruuteen. Kerroin K_{FI} määrittää rakenteen luotettavuusluokasta RC, joka riippuu mahdollisten vaurioiden seuraamusluokasta CC.

Taulukko 4. Kuormakerroin. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat 2009, 37)

Kuormakerroin K_{FI}	Seuraamusluokka
1,1	CC3
1	CC2
0,9	CC1

Seuraamusluokka määräytyy mahdollisten taloudellisten- tai henkilövahinkojen määrän perusteella. Käytettäessä kerrointa 0,9 vahinkojen oletetaan olevan vähäiset, kun taas käytettäessä kerrointa 1,1 vahinkojen oletetaan olevan erittäin suuret. Tavallisesti käytetään kerrointa 1,0, jolloin kuorman suuruus ei muutu.

Taulukosta 5 saadaan sarjan R2 osavarmuuskertoimet, kun mitoitetaan maaperän kantokestävyyttä antura- tai laattaperustuksille.

Taulukko 5. Kestävyyden osavarmuusluvut (STR/GEO). (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 52)

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

Taulukosta 6 saadaan kertoimet kaavaan 3, jolla lasketaan staattisen tasapainorajatilän kuormitusyhdistelmiä.

Taulukko 6. Kuormien osavarmuuskertoimet, staattinen tasapainorajatila. (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 47)

Kuorma	Merkintä	Arvo
Pysyvä:		
Epäedullinen ^a	$\gamma_{G,dst}$	1,1 K_{FI}
Edullinen ^b	$\gamma_{G,stab}$	0,9
Muuttuva:		
Epäedullinen ^a	$\gamma_{Q,dst}$	1,5 K_{FI}

4 ANTURAN KOON MÄÄRITYS

4.1 Geotekninen kantokestävyys

Geoteknisellä kantokestävyydellä tarkoitetaan sitä kuormitusta, jolla on riittävä varmuus maapohjan murtumista vastaan ja jolla painumat pysyvät euronormin antamissa rajoissa.

GEOTEKNINEN KANTOKESTÄVYYS	
MAAPOHJAN MURTUMINEN	PAINUMAT JA PAINUMAEROT
Varmuus murtumista vastaan on oltava riittävä	Painumien ja painumaerojen on oltava sallituissa rajoissa
MURTORAJATILA	KÄYTTÖRAJATILA
Osavarmuuskertoimet $\gamma_{R,v} \neq 1,0$	Osavarmuuskertoimet $\gamma_{R,v} = 1,0$

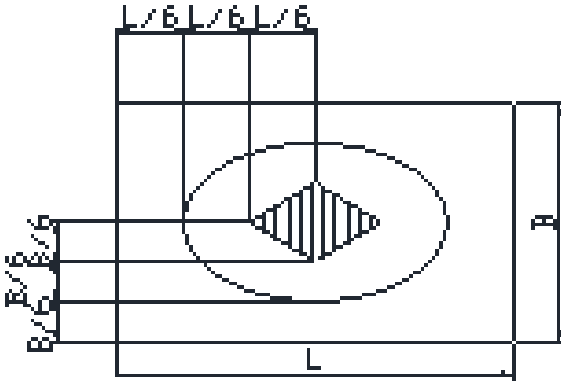
Kuvio 1. Geoteknisen kantokestävyuden mitoitusperiaate.

4.1.1 Maaperätiedot

Rakennuksen perustuksia suunniteltaessa, tulisi perustussuunnittelijan osata käyttää maaperästä saatavia tietoja asianmukaisella tavalla. Näitä maaperästä saatavia tietoja kutsutaan maaparametreiksi. Geoteknikko selvittää kokein maaperästä tilavuuspainon, kitkakulman, pohjaveden pinnan, maaperän rakeisuuden, koheesion ja määrittää maaperän käyttökelpoisuuden. Näitä tietoja hyödynnetään maapohjan geoteknisen kantokestävyuden mitoittamisessa, jonka avulla pystytään mitoittamaan asianmukainen perustus. (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 69-71)

4.1.2 Kuormien epäkeskisyys

Kuormien epäkeskisyys aiheutuu perustukseen kohdistuvasta vaakavoimasta ja momentista. Epäkeskisyyden takia perustuksen pohja sekä maapohja kuormittuu epätasaisesti, minkä takia perustusta mitoittaessa täytyy tarkastaa mahdollisesti liukumis- ja kaatumiskestävyys.



Kuva 1. Epäkeskisyyden merkinnät.

Epäkeskisyyden raja-arvona pidetään $1/3$ anturan mitoista mitoitustavassa $DA2^*$, joka rajautuu ellipsin muotoiseen alueeseen. Tämä arvo ylitettäessä painejakauma anturan alla keskittyy alle puolen anturan matkalle, jolloin perustuksen todellinen käyttäytyminen ei enää noudata laskennan mallia. Epäkeskisyyden ollessa alle $1/6$ anturan mitoista koko anturan pohja on puristettuna maata vasten. Tämä alue rajoittuu vinoneliön muotoiselle alueelle.

4.1.3 Kantokestävyyden laskeminen

Kantokestävyys on laskettu eurokoodin SFS-EN 1997-1 opastavan liitteen D mukaan, jossa on käytetty Suomen kansallista liitettä. Kantokestävyyden laskumenetelmänä on käytetty mitoitustapaa 2, $DA2^*$. Kantokestävyyden mitoitusehtona on kaava 5, jonka tulee toteutua kaikissa murtorajatilissa.

$$V_d \leq R_d \quad (5)$$

V murtava kuorma

R kestävyys

Kaavasta 6 saadaan kantokestävyyden ominaisarvo perustuksen tehokasta pinta-alayksikköä kohden avoimissa olosuhteissa eli kitkamaassa.

$$\frac{R}{A'} = c' * N_c * b_c * s_c * i_c + \gamma'_1 * D * N_q * b_q * s_q * i_q + 0,5 * \gamma'_2 * B' * N_\gamma * b_\gamma * s_\gamma * i_\gamma \quad (6)$$

Kaavasta 7 saadaan laskettua kantokestävyyden mitoitusarvo pinta-alayksikköä kohden.

$$\frac{R_d}{A'} = \frac{R}{\gamma_{R,v} A'} \quad (7)$$

Kaavaa 5 muokkaamalla saadaan kaava 8, joka soveltuu epäkeskeisen kuorman aiheuttaman reunajännityksen mitoitusehdoksi.

$$\frac{R_d}{A'} \geq \frac{V_d}{A} + \frac{M_d}{W} \quad (8)$$

V pystykuorma, anturan pohjan tasolla
M momentti, anturan pohjan tasolla
W anturan taivutusvastus

Anturan yläpuolisten maakerrosten aiheuttama kuorma perustukselle saadaan kaavasta 9.

$$q' = \gamma * (D - h) \quad (9)$$

Koheesion mitoitusarvo saadaan kaavasta 9. Osavarmuuskertoimet kaavoihin 10 ja 11 saadaan taulukosta 1.

$$c' = \frac{c'_k}{\gamma_c} \quad (10)$$

Kitkakulman mitoitusarvo saadaan kaavasta 11.

$$\tan\varphi' = \frac{\tan\varphi'_k}{\gamma_\varphi} \quad (11)$$

Käytettäessä mitoitusapaa DA2*, osavarmuuskertoimet ovat suuruudelta 1, joten koheesion ja kitkakulman mitoitusarvot eivät muutu.

Kantokestävyyden kertoimet saadaan laskettua kaavoista 12-14.

$$N_q = e^{\pi * \tan\varphi'} * \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) \quad (12)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot\varphi' \quad (13)$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan\varphi' \quad (14)$$

Perustuspohjan kaltevuuden kertoimet saadaan kaavoista 15 ja 16.

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha * \tan\varphi')^2 \quad (15)$$

$$b_c = b_q - \frac{1-b_q}{N_c * \tan\varphi'} \quad (16)$$

Perustusten pohjan ollessa vaakatasossa, kaltevuus kertoimet saavat arvon 1, jolloin ne eivät pienennä kantokestävyyttä.

Perustuksen muotokertoimet saadaan kaavoista 17-19.

$$s_q = 1 + \left(\frac{B'}{L'}\right) * \sin\varphi' \quad (17)$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 * \left(\frac{B'}{L'}\right) \quad (18)$$

$$s_c = \frac{s_q * N_q - 1}{N_q - 1} \quad (19)$$

Vaakakuorman H aiheuttamasta kuorman kaltevuudesta johtuvat kertoimet saadaan kaavoista 20-22.

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + A' c' \cot\varphi'}\right)^m \quad (20)$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{V + A' c' \cot\varphi'}\right)^{m+1} \quad (21)$$

$$i_c = i_q - \frac{1-i_q}{N_c * \tan\varphi'} \quad (22)$$

missä eksponentti m suuntaan L ja B saadaan kaavoista 23 ja 24.

$$m_L = \frac{2 + \frac{L'}{B'}}{1 + \frac{L'}{B'}} \quad (23)$$

$$m_B = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}} \quad (24)$$

Jos vaakakuormat eivät vaikuta kohtisuoraan kumpaakaan sivua vastaan käytetään kaavaa 25, jossa kulma θ vaakakuormitusresultantin ja tehokkaan pituuden L' välinen kulma.

$$m_\theta = m_L \cos^2\theta + m_b \sin^2\theta \quad (25)$$

4.2 Liukumiskestävyys

Liukumiskestävyys tulee tarkistaa, jos perustuksille tulevat kuormitukset eivät ole kohtisuorassa perustuksen pohjaa vastaan. Liukumiskestävyys tarkastelu tehdään murtorajatila sääntöjen mukaan. Liukumiskestävyuden mitoitusehto esitellään kaavassa 26. (Eurokoodi 7: geotekninen suunnittelu 2009, 64)

$$H_d \leq R_d + R_{p,d} \quad (26)$$

H_d kaikkien aktiivisten voimien summa, jotka kohdistuvat maasta perustukseen

$R_{p,d}$ perustuksen sivuun kohdistuvasta maanpaineesta aiheutuvan vastustavan voiman mitoitusarvo, joka jätetään usein huomioimatta, koska edullinen kuorma voi ajan mittaan hävitä.

Avoimissa olosuhteissa eli kitkamaassa voidaan liukumiskestävyuden mitoitusarvo laskea kaavasta 27.

$$R_d = \frac{V_{1d} \cdot \tan \delta_k}{\gamma_{R,h}} \quad (27)$$

4.3 Kaatumisvakavuus

Vaakakuormien ja kaatavien momenttien ollessa suuria, kasvaa riski perustuksen kaatumiseen. Kaatuminen täytyy tarkistaa anturaperustuksilla erittäin harvoin. Kaatuminen voi koitua ongelmaksi useammin tukimuurien tapauksissa. Kaatumistarkastelu tehdään staattisen tasapainorajatilan tarkasteluna.

Rakenteiden kaatavan momentin mitoitusarvo lasketaan murtorajatilassa kaavojen 1 ja 2 avulla. Hyötykuormien ja maamassojen mitoitusarvo lasketaan kaavalla 3 käyttäen taulukon 5 osavarmuuskertoimia. Kaatumisvarmuus lasketaan verraten tasapainottavia ja kaatavia momentteja perustuksen uloimman pisteen suhteen, jota käytetään kaatumisakselina. Kaatumiskestävyuden mitoitusehto esitetään kaavassa 28. (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2009, 47)

$$M_{stb;d} \geq M_{dst;d} \quad (28)$$

4.4 Lämpileikkautuminen

Erityisesti anturan paksuuteen vaikuttava tekijä on lämpileikkauskestävyys. Lämpileikkautumisella tarkoitetaan anturalaatan leikkauskestävyyden ylittymistä peruspilarin ympärillä, kartion muotoisella alueella A_u , jonka piiri on u . Lämpileikkautumiskestävyyttä voidaan lisätä joko lisäämällä lämpileikkausraudoitus anturaan tai paksuntamalla anturaa. Anturan paksuntaminen on yleisemmin käytetty vaihtoehto. Lämpileikkauskestävyys tarkastetaan murtorajatilassa vaikuttavien kuormitusyhdistelmien mukaan, joissa vaikuttaa suurin mahdollinen leikkaava pystykuorma. Suomessa on tällä hetkellä vielä käytössä B4- normin mukainen lämpileikkauskestävyyden tarkastelutapa. B4- normin mukainen lämpileikkauskestävyyden arvo saadaan kaavasta 29. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2005, 45)

$$V_{c,Rd} = k * \beta * (1 + 50\rho) * u * d * f_{ctd} \quad (29)$$

missä kertoimet k ja β saadaan kaavoista 30 ja 31.

$$k = 1,6 - \frac{d}{1000} \geq 1 \quad (30)$$

$$\beta = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5 * e}{\sqrt{A_u}}} \quad (31)$$

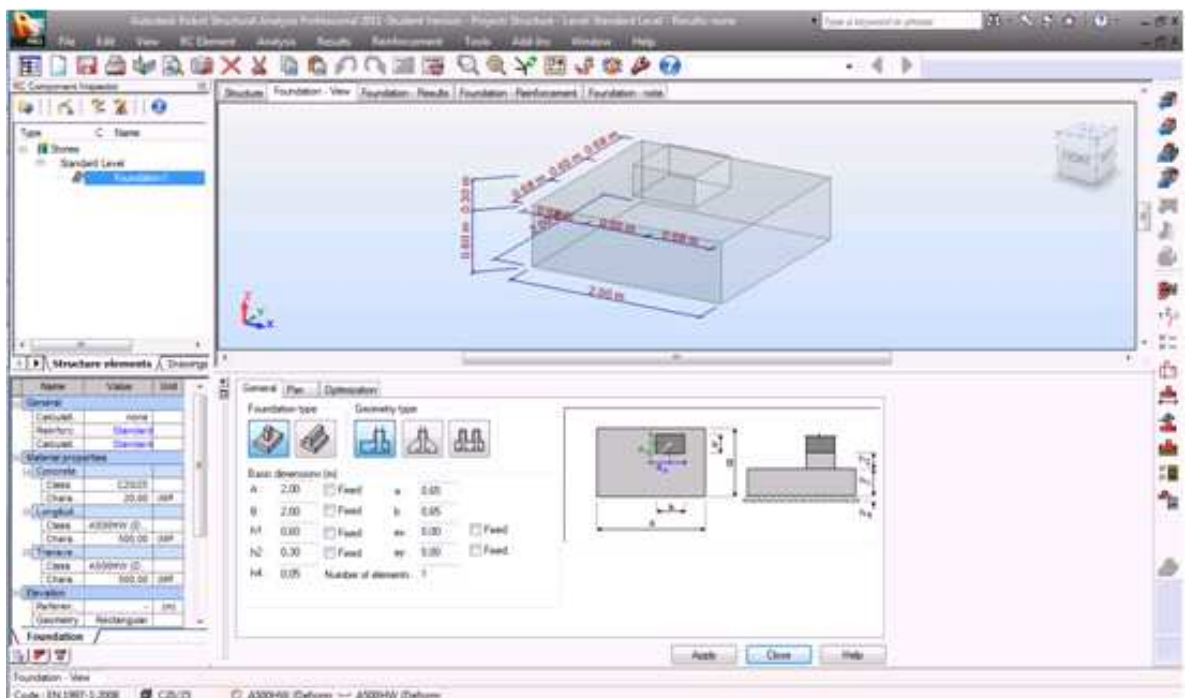
Lävistyskestävyyden mitoitusarvoa verrataan lävistysvoiman mitoitusarvoon kaavan 32 mukaisesti. Lävistysvoiman mitoitusarvo V_d saadaan laskemalla nostava voima tarkistusalueen A_u ulkopuolella.

$$V_d \leq V_{c,Rd} \quad (32)$$

5 TIETOKONELASKENTA JA MITOITUS

Robot Structural Analysis Professional on Autodeskin kehittämä laskenta ja mitoitus ohjelma. Ohjelman edeltäjä oli Robot Millenium, joka sai uuden nimen Robot Structural Analysis siirtyessään Autodeskin omistukseen. Ohjelmalla on mahdollista laskea erittäin monimutkaisten rakenteiden kuormituksia ja mitoittaa niiden perusteella hyvin kattavasti puu-, teräs- ja betonirakenteita. (Autodesk Robot Structural Analysis 2012)

Rakenteiden laskennassa Robot Structural Analysis käyttää elementtimenetelmää eli FEM- laskentaa (finite element method), joka jakaa laskettavat kappaleet osiin ja tutkii niiden sisäisiä voimia kuormitusten vallitessa. Ohjelma käyttää myös muita epälineaarisia algoritmeja laskennassa. Rakenteiden mitoitusosiossa ohjelmassa on käytössä useiden maiden maakohtaiset standardit, joita käyttäjä voi valita suunnittelukohteen mukaan. Laskenta Robot Structural Analysis -ohjelmalla perustuu analyysimallin luomiseen, johon lisätään kuormat ja halutut reunaehdot laskennalle, jonka mukaan ohjelma laskee ja mitoittaa rakeen. (Autodesk Robot Structural Analysis 2012)



Kuva 2. Robot Structural Analysis, anturanlaskentaosio

5.1 Lähtötiedot

Tässä opinnäytetyössä on käytetty kuvitteellista pilarianturaa, joka perustetaan puhtaalle kitkamaalle. Laskennassa on käytetty epäkeskeistä kuormitusta liukumisen, kaatumisen ja reunajännitysten tutkimiseksi. Laskennat on suoritettu sekä käsin, että Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelmalla.

Perustukseen kohdistuu rakennuksesta tuleva rakenteiden kuormat, rakennuksen vaaka- sekä pystyhyötykuormat sekä täyttöjen paino. SFS-EN 1990 Suomen kansallisen liitteen mukaan lasketuista kuormitusyhdistelmistä valitaan rakenteelle vaarallisimmat tapaukset, joita vertaillaan maaparametreista laskettuihin kantokestävyyden, liukumiskestävyyden ja kaatumisvarmuuden arvoihin, jotka on laskettu SFS-EN 1997-1 liitteen D mukaan, Suomen kansallista liitettä käyttäen. Robot Structural Analysis käyttää kuormien laskennassa EN 1990 Saksan kansallista liitettä. Geoteknisten ominaisuuksien laskennassa ohjelma käyttää normia EN 1997-1 .

Läpileikkaustarkastelu tehdään sekä käsinlaskennassa, että tietokonelaskennassa SFS-EN 1992-1-1 mukaan, jolloin murtorajatila kuormituksia verrataan betonin murtorajatilan lujuusominaisuuksiin.

5.2 Laskenta-arvot

Tässä opinnäytetyössä laskettava antura on neliönmallinen. Anturaa kuormitetaan pystykuormilla, vaakakuormilla sekä momentilla. Antura on perustettu puhtaalle kitkamaalle. Laskenta-arvot on esitetty taulukossa 7. Mitoitustilanteeksi on valittu vaarallisimmaksi todettiin tilanne, jossa pystykuorma, vaakakuorma ja momentti ovat maksimissaan. .

Taulukko 7. Laskenta-arvot

Laskenta-arvot					
Anturan mitat		Maaperätiedot		Betonitiedot	
D	1 m	Puhdas kitkamaa		C30/37 - 2	
B	1,2 m	φ'	38 °	fctk	2 kN/m ²
L	1,2 m	γ_1'	19 kN/m ³	fctd	1,333 kN/m ²
h	0,35 m				
Peruspilari					
b	0,4 m				
l	0,4 m				
h	0,65 m				

Taulukossa 8 esitetään anturalle kohdistuvat kuormitustapaukset, jotka on valittu kaikista laskettavista kuormitustapauksista. Valitut kuormitustapaukset ovat anturan mitoituksen kannalta kriittisimmät.

Taulukko 8. Kuormitustapaukset

Kuormitustapaukset					
Murtorajatila KY5a			Murtorajatila KY7		
V _d (kN)	H _d (kN)	M _d (kNm)	V _d (kN)	H _d (kN)	M _d (kNm)
680	90	90	450	90	90
Murtorajatila KY5b			Staattinen tasapainorajatila KY9		
V _d (kN)	H _d (kN)	M _d (kNm)	V _d (kN)	H _d (kN)	M _d (kNm)
725	54	54	450	90	90

Toinen tarkastelu epäkeskisyyden vaikutuksesta tehtiin taulukossa 9 ja 10 esitetyillä arvoilla.

Taulukko 9. Toisen tarkastelun laskenta-arvot

Anturan mitat		Peruspilari		Maaperätiedot	
D	1 m	B	0,4 m	γ_1'	19 kN/m ³
B	1,5 m	L	0,4 m	γ_2'	19 kN/m ³
L	1,5 m	h	0,5 m	φ'	38 °
h	0,5 m				

Taulukko 10. Toisen laskennan kuormitustapaukset

Kuormitustapaus 1		Kuormitustapaus 2		Kuormitustapaus 3	
V _k	350 kN	V _k	350 kN	V _k	350 kN
H _k	0 kN	H _k	40 kN	H _k	87 kN
M _k	0 kNm	M _k	40 kNm	M _k	87 kNm
V _d	450 kN	V _d	450 kN	V _d	450 kN
H _d	0 kN	H _d	60 kN	H _d	130 kN
M _d	0 kNm	M _d	60 kNm	M _d	130 kNm

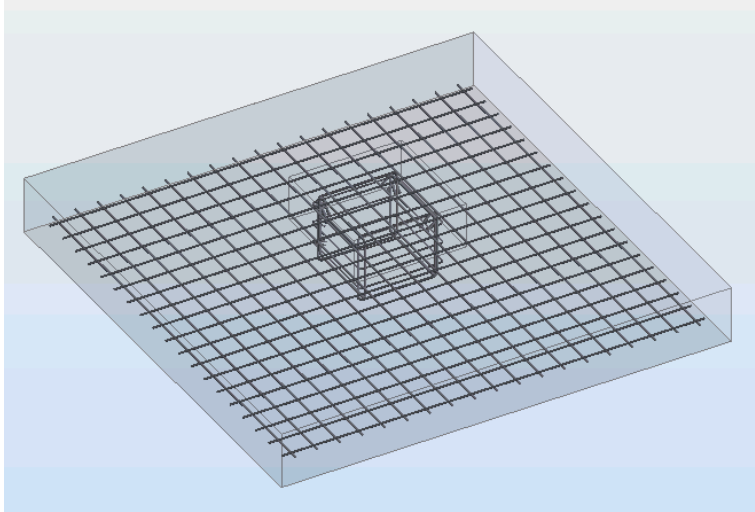
5.3 Laskentamalli

Robot Structural Analysis projekti aloitetaan valitsemalla rakennetyyppi, opinnäytetyössä esitettyssä tapauksessa teräsbetonirakenteet ja anturan mitoitus. Tässä osiossa ohjelmaan syötetään reunaehdoja laskennalle. Ohjelmaan on syötettävä mitat, perustuksen liitostyyppi muuhun rakenteeseen ja optimointiasetukset. Jos ohjelman ei haluta optimoivan rakennetta, voidaan annetut mitat lukita.

Seuraavissa osiossa syötetään ehdot raudoitukselle, ympäristöolosuhteille, rakenteen eliniälle ja laskennalle. Näillä ehdoilla on erittäin suuri merkitys laskennan ja mitoitusprosessin lopputuloksen kannalta, sillä näissä valikoissa asetetaan raja-arvot muunmuassa epäkeskisyydelle, raudoituksen koolle ja rasitusluokille. Myös osavarmuuslukusarjat valitaan näistä valikoista.

Tämän jälkeen määritellään maakerrokset, perustussyvyys, pohjavedenpinta ja laskentamalli. Tässä osiossa maakerrokset pitäisi pyrkiä asettamaan mahdollisimman todenmukaisesti tarkkojen tulosten aikaansaamiseksi. Samalla tulee myös määrätä tuleeko maatyttö koko anturalle, puolikkaalle anturalle vai neljäsosalle anturasta, tämän valinnan jälkeen Robot Structural Analysis osaa laskea täytön vaikutuksen oikein.

Kuormitusosiossa asetetaan perustukselle tulevat kuormat. Kuormat luokitellaan ovatko ne rakennekuormia, hyötykuormia vai täyttöjä. Kuormat voidaan myös suoraan ottaa rakennuksen laskentamallista, jos sellainen on tehty. Tämän jälkeen suoritetaan laskenta ja mitoitus, jolloin ohjelma laskee luodun mallin annettujen sääntöjen mukaan.



Kuva 3. Raudoitettu anturan 3d-malli

5.4 Tulokset

Robot Structural Analysis -laskentaohjelmasta saadaan lähes täydellinen mitoitus-tieto, anturanmitoituksen joka osa-alueesta. Laskentatiedot näkyvät kolmessa eri osiossa. Ensimmäisessä osiossa voidaan tarkastella määrääviä kuormitusyhdistelmiä, niiden vaikutuksia ja eri osioiden käyttöasteita. Ohjelma ilmoittaa käyttöasteet verraten kestävyyttä lukuun yksi, jossa alle yhden menevä kestävyys tarkoittaa rakenteen alimitoitusta. Seuraavassa osiossa on nähtävillä raudoitusluettelot, raudoitusten muodot ja paikat. Nämä listat ovat suoraan hyödynnettävissä esimerkiksi raudoituksia tilatessa työmaalle.

Viimeinen tulososio on laskentamuistio, joka on näistä osioista kattavin. Tässä osiossa kaikki käytetyt lähtötiedot, laskentaehdot ja tulokset on esitetty muistion tapaan. Laskentamuistiosta löytyvät muunmuassa käytetyt normit ja niiden mukaan käytetyt osavarmuuskertoimet. Myös kaikki osat laskelmista välituloksineen on nähtävillä. Näistä tulososioista on helppo tarkastaa ovatko kaikki ehdot täytyneet ja täyttääkö se kaikki vaatimukset. Jos jotain osiota täytyy muuttaa, voidaan muutos tehdä ja laskea malli uudelleen nopeasti.

Robot Structural Analysis -ohjelman erityispiirteensä on sen automaattinen toiminto luoda lasketuista perustuksista valmiit piirustukset. Piirustukset ovat pieniä lisäyksiä vaille valmiita tuotantopiirustuksia.

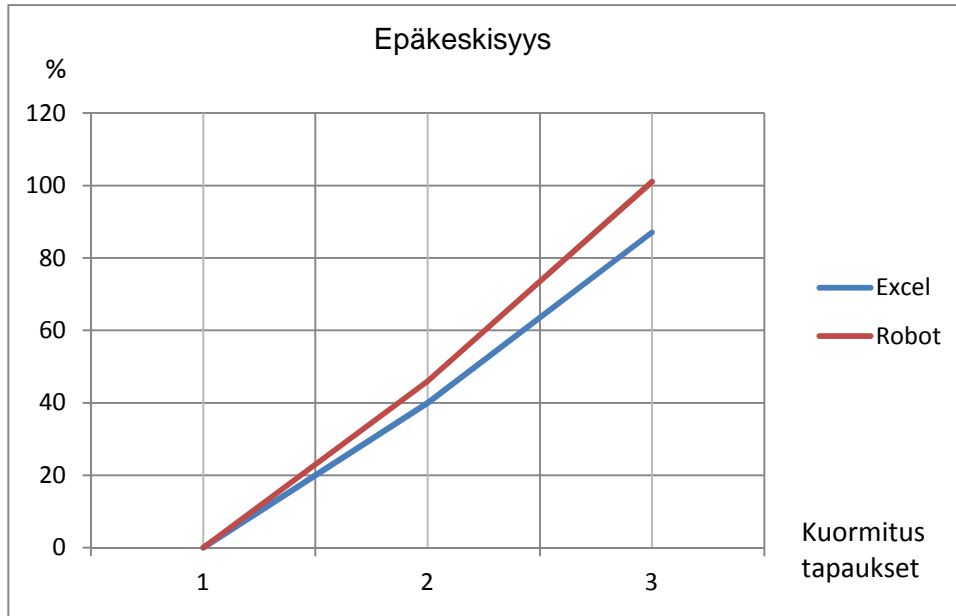
6 TULOSTEN VERTAILU

Tulosten vertailu tehdään taulukossa 11 vertaillen maankantokestävyyttä, liukumiskestävyyttä, kaatumisvarmuutta ja läpileikkautumiskestävyyttä. Taulukossa annetaan osa-alueen kestävyys, murtava voima ja käyttöaste. Tämän jälkeen annetaan prosentuaalinen ero käsinlaskennan ja Robot Structural Analysis -laskelman välillä. Rakennuksesta perustuksille tullut kuormitus on sekä käsinlaskennassa, että tietokone laskelmassa sama, joka on esitetty taulukossa 8. Anturanpainon ja maanpainon kertoimina on käytetty käsinlaskennassa Suomen kansallisen liitteen kertoimia, kun taas tietokone laskennassa Robot Structural Analysis käyttää Saksan kansallisen liitteen mukaisia kertoimia.

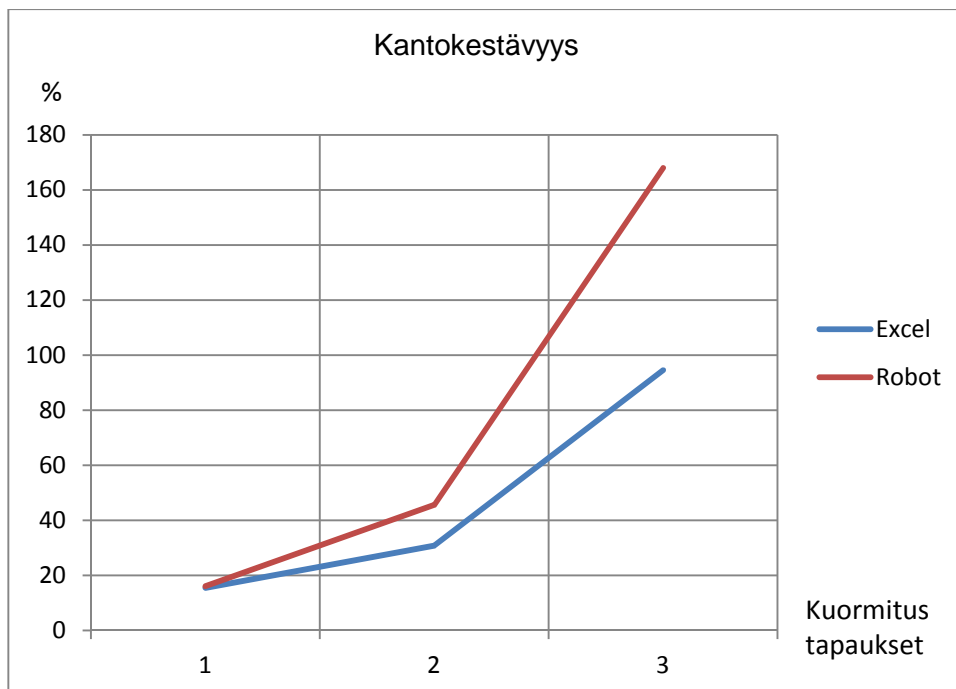
Taulukko 11. Tulosten vertailu

Kantokestävyys			
	R _d (kN)	V _d (kN)	Käyttöaste (%)
KY5a			
Käsinlaskenta	883,3	714,9	80,9
Robot-laskenta	530,5	721,1	135,9
Ero (%)	-39,9	0,9	67,9
KY7			
Käsinlaskenta	676,7	477,4	70,5
Robot-laskenta	273,2	491,1	179,8
Ero (%)	-59,6	2,9	154,8
Liukuminen			
	R _d (kN)	H _d (kN)	Käyttöaste (%)
KY7			
Käsinlaskenta	339	90	26,5
Robot-laskenta	341,2	90	26,4
Ero (%)	0,6	0,0	-0,6
Läpileikkautuminen			
	V _c (kN)	V _d (kN)	Käyttöaste (%)
KY5a			
Käsinlaskenta	377	221,8	58,8
Robot-laskenta	163,9	501,8	306,2
Ero (%)	-56,5	126,2	420,4
Kaatuminen			
	M _{stb;d} (kNm)	M _{dst;d} (kNm)	Käyttöaste (%)
KY9			
Käsinlaskenta	278,7	180	64,6
Robot-laskenta	288,3	180	62,4
Ero (%)	3,4	0,0	-3,3

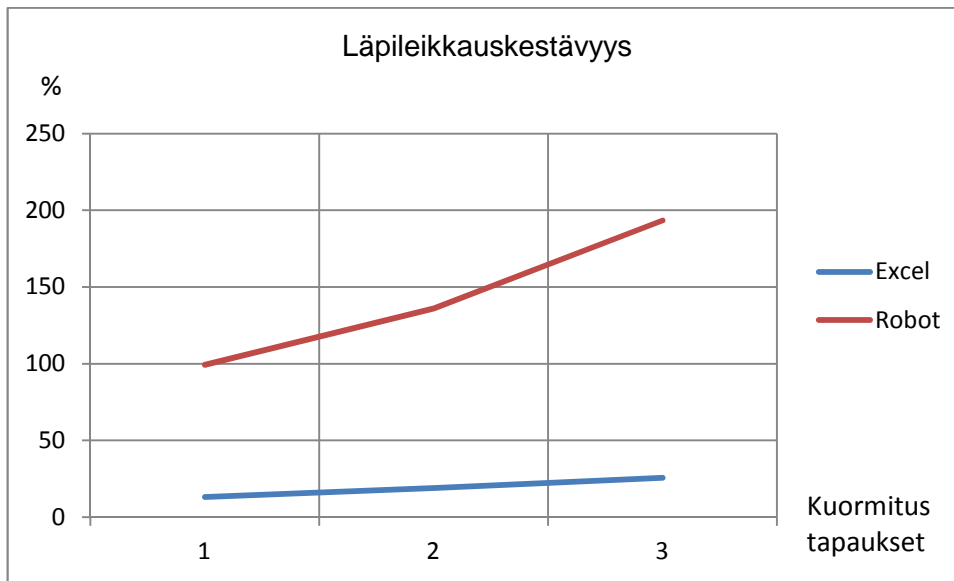
Toinen tarkastelu tehtiin toiselle kuormitustapaus sarjalle, jossa tarkasteltiin tarkemmin epäkeskisyyden vaikutusta kantokestävyyteen sekä läpileikkauskestävyyteen. Jokaisessa kuormitustapauksessa anturan koko, perustamissyvyys ja maaparametrit ovat samat, jotka on esitetty taulukoissa 9 ja 10. Tulokset on esitetty kuvioissa 2,3 ja 4.



Kuvio 2. Epäkeskisyyden erot



Kuvio 3. Kantokestävyys erojen erot



Kuvio 4. Läpileikkautumiskestävyiden erot

7 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kuinka Robot Structural Analysis -ohjelman pilarianturanmitoitus osiota pystyttäisiin käyttämään mahdollisimman luotettavasti rakennesuunnittelutoimistossa. Käyttövarmuutta ja tulosten luotettavuutta ryhdyttiin tutkimaan mitoittamalla esimerkkiantura euronormin teorian mukaan ja tekemällä vertailulaskelma Robot Structural Analysis- ohjelmalla.

Rakennesuunnittelutoimiston työntekijöillä täytyy olla riittävä ammattitaito geoteknisten laskelmien ja anturan mitoituksen tekemiseen, ennenkuin suunnittelua pystytään luotettavasti tekemään. Myös viranomaismääräykset ovat tukemassa tätä väittämää, luokittelemalla suunnitteluperusteet kohteen vaativuuden mukaan. Talonrakennustekniikkaan suuntautuneen insinöörin tieto ja taito riittävät yksinkertaisten anturoiden mitoittamiseen ammattitaitoisen geoteknikon lähtötietojen perusteella. Vaativammissa kohteissa on äärimmäisen tärkeää, että geosuunnittelija tekee perustusten mitoituksen, jossa rakennesuunnittelija voi olla mitoittamassa perustuksen rakenneteknisiä osuuksia.

Robot Structural Analysis -ohjelmaan tarkemman tutustumisen jälkeen esille tuli muutamia ilmeisiä ongelmia, jotka vaikuttivat lopputuloksiin merkittävästi. Suurimmat ongelmat olivat epäkeskisyyden laskennassa, maankantokestävyyden käyttöasteen laskennassa sekä läpileikkaustarkastelussa. Myös kuormituskertoimista löytyi virheitä, joiden vaikutus lopputulokseen ei kuitenkaan ollut niin merkittävä.

Robotin laskiessa kuorman epäkeskisyyden virheellisesti murtorajatilakuormituksilla saadaan jopa 15 %:n ero verrattuna SFS-EN 1997-1 ohjeen mukaan laskettuun epäkeskisyyden arvoon, joka lasketaan ominaiskuormista. Virheen takia Robot antaa liian suuria epäkeskisyyden arvoja. Tämä virhe vaikuttaa merkittävästi anturan tehokkaisuuteen mittoihin ja lopulta maankantokestävyyden arvoon, joka lopulta määrittää anturan koon.

Menetelmä, jolla maankantokestävyys lasketaan ottaa huomioon kuorman epäkeskisyyden, jolloin saatua kantokestävyyden arvoa tulisi verrata pystykuormista aiheutuvaan tasaiseen pohjapaineeseen. Robot kuitenkin vertaa tällä samalla menetelmällä laskettua maankantavuuden arvoa reunajännitykseen, joka aiheutuu pystykuormasta, vaakakuormasta ja momentista. Tämän virheen takia ohjelma ylimitoittaa pahimmassa tapauksessa yli 75 %.

Läpileikkaustarkastelu Robotissa ei ole vielä tällä hetkellä soveltuva käytettäväksi Suomessa, koska ohjelma suorittaa läpileikkaustarkastelun eurokoodin 2 mukaan, jota ei käytetä Suomessa. Läpileikkaustarkastelu tulisi tehdä B4 -normin mukaan. Näiden kahden menetelmän eroavaisuuden takia Robot ylittää anturan. Käyttöaste Robotin mukaan on yli seitsemän kertainen. Robotilla laskettaessa anturan tulisi olla noin kaksi kertaa paksumpi kuin B4 -normilla laskettaessa.

Robot kuitenkin laskee liukumistarkastelun ja kaatumistarkastelun muutaman prosentin erolla, joka selittyy kuormakertoimien poikkeavuuksilla. Kuitenkin staattisen tasapainorajatilän määrittely ohjelmaan on mahdotonta. Kaatumista tarkastellessa kuormitusyhdistelyn joutuu määrittämään käyttörajatilakuormaksi, jolloin syntyy pieni virhe kuormakertoimiin. Pystysuorassa kuormituksessa Robot laskee maankanto-kestävyyden oikein, jolloin anturan kooksi tulee sama kuin mitoitusohjeen mukainen, mutta silti laskettavaksi jää läpileikkauskestävyys. Tällä hetkellä Robot Structural Analysis- ohjelmaa ei ole järkevää käyttää pilarianturoiden mitoituksessa, koska ohjelma tuottaa virheellisiä tuloksia ja valtavia ylimitoituksia.

Perustusten mitoitusalueella riittää vielä paljon tutkittavaa, kuten dynaamisille kuormituksille anturan mitoittaminen. Tutkittavaa löytyy vielä paljon myös muiden FEM-laskentaohjelmien puolella, kuten Jigin soveltuvuuden tutkiminen anturan mitoituspuolella.

LÄHTEET

Autodesk Robot Structural Analysis Professional. 2012. [Viitattu 20.1.2012] Saatavissa: <http://www.cad-q.fi/index.php/tuotteet/rakennesuunnittelu/autodesk-robot-structural-analysis/20810>. Dokumentti ei ole enää saatavissa.

Betoninormit 2012 by 50. Helsinki: Suomen betonirakenneyhdistys.

Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan osa 6: Perustukset. [Verkkodokumentti.] Betoniteollisuus. [Viitattu 24.1.2012] Saatavissa <http://www.betoni.com/default.aspx?intObjectID=7074&intStart=21>

Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. 2007. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. 2009. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje. RIL 207-2009. 2009. Helsinki: Suomen Rakennusinsinööriliitto

Gustavsson H. 2008. Vertailulaskelmat SFS-EN 1997-1:n kansallisen liitteen laatimista varten. 17.3.2008. [Verkkodokumentti.] Teknillinen korkeakoulu. Pohjarakennus ja maamekaniikka. [Viitattu 17.1.2012]. Saatavissa <http://www.eurocodes.fi/1997/paasivu1997/sahkoinen1997/EC%207-1%20VERTAILULASKELMAT-1.pdf>

Leskelä M. 2005. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus by 210. Helsinki: Betoniteollisuus

Maanvaraiset perustukset 2.2.2011. [Viitattu 14.1.2012] Saatavissa https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-50.2124/luennot/Rak-50_2124_luento3.pdf
Dokumentti ei ole enää saatavissa

Rantamäki M., Tamminne M.&Jääskeläinen R. 2006. Geotekniikka 464. Helsinki: Otatieto

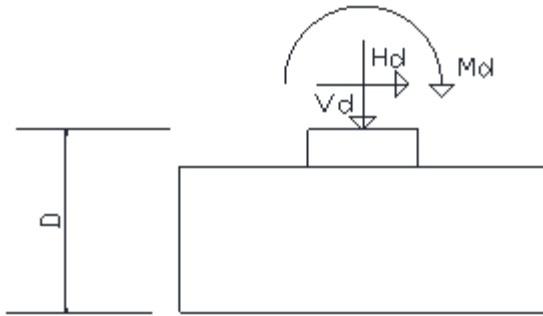
Rantamäki M.& Tammirinne M. 1979. Pohjarakennus 465. Helsinki: Otatieto

Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. 2011. RIL 201-1-2011. Helsinki: Suomen Rakennusinsinööriliitto



LIITE 1

Rakennemalli ja kuormitukset



Rakennuksesta tuleva kuormitus

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$N_{k,hyötykuorma} = 100kN$$

$$H_{k,tuuli} = 60kN$$

$$M_{k,tuuli} = 60kNm$$

Anturan mitat

$$L=1,2m$$

$$B=1,2m$$

$$h=0,35m$$

$$D=1,0m$$

Peruspilarin mitat

$$L=0,4m$$

$$B=0,4m$$

$$h=0,65m$$

Maaperätiedot

$$\gamma'_1 = 19 \frac{kN}{m^3}$$

$$\gamma'_2 = 19 \frac{kN}{m^3}$$

$$\varphi = 38^\circ$$

Materiaalitiedot

Betoni: C30/37-2

Teräs: A500HW

Murtorajatila kuormitusyhdistelmät

Kuormitusyhdistelmä 1, KY1: V_{\max}, H_{\max} (6.10a)

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf}$$

$$N_d = 1,35 * 1 * 500kN = 675kN$$

$$H_d = 0kN$$

$$M_d = 0kNm$$

Kuormitusyhdistelmä 2, KY2: V_{\max}, H_{\min} (6.10a)

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf}$$

$$N_d = 1,35 * 1 * 500kN = 675kN$$

$$H_d = 0kN$$

$$M_d = 0kNm$$

Kuormitusyhdistelmä 3, KY3: V_{\min}, H_{\max} (6.10a)

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf}$$

$$N_d = 0,9 * 1 * 500kN = 450kN$$

$$H_d = 0kN$$

$$M_d = 0kNm$$

Kuormitusyhdistelmä 4, KY4: V_{\min}, H_{\min} (6.10a)

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf}$$

$$N_d = 0,9 * 1 * 500kN = 450kN$$

$$H_d = 0kN$$

$$M_d = 0kNm$$

Kuormitusyhdistelmä 5a, KY5a: V_{\max}, H_{\max} (6.10b)

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$N_{k,hyötykuorma} = 100kN$$

$$H_{k,tuuli} = 60kN$$

$$M_{k,tuuli} = 60kNm$$

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \Psi_{0,1} * Q_{k,i}$$

$$N_d = 1,15 * 1 * 500kN + 1,5 * 0,7 * 1 * 100kN = 680kN$$

$$H_d = 1,15 * 1 * 0kN + 1,5 * 1 * 60kN = 90kN$$

$$M_d = 1,15 * 1 * 0kNm + 1,5 * 1 * 60kNm = 90kNm$$

Kuormitusyhdistelmä 5b, KY5b: V_{\max}, H_{\max} (6.10b)

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$N_{k,hyötykuorma} = 100kN$$

$$H_{k,tuuli} = 60kN$$

$$M_{k,tuuli} = 60kNm$$

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \Psi_{0,1} * Q_{k,i}$$

$$N_d = 1,15 * 1 * 500kN + 1,5 * 1 * 100kN = 725kN$$

$$H_d = 1,15 * 1 * 0kN + 1,5 * 0,6 * 1 * 60kN = 54kN$$

$$M_d = 1,15 * 1 * 0kNm + 1,5 * 1 * 60kNm = 54kNm$$

Kuormitusyhdistelmä 6, KY6: V_{\max}, H_{\min} (6.10b)

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$N_{k,hyötykuorma} = 100kN$$

$$H_{k,tuuli} = 60kN$$

$$M_{k,tuuli} = 60kNm$$

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \Psi_{0,1} * Q_{k,i}$$

$$N_d = 1,15 * 1 * 500kN + 1,5 * 1 * 100kN = 725kN$$

$$H_d = 0 * 1 * 0kN + 0 * 1 * 60kN = 0kN$$

$$M_d = 0 * 1 * 0kNm + 0 * 1 * 60kNm = 0kNm$$

Kuormitusyhdistelmä 7, KY7: V_{\min}, H_{\max} (6.10b)

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$N_{k,hyötykuorma} = 100kN$$

$$H_{k,tuuli} = 60kN$$

$$M_{k,tuuli} = 60kNm$$

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \Psi_{0,1} * Q_{k,i}$$

$$N_d = 0,9 * 500kN = 450kN$$

$$H_d = 1,15 * 1 * 0kN + 1,5 * 1 * 60kN = 90kN$$

$$M_d = 1,15 * 1 * 0kNm + 1,5 * 1 * 60kNm = 90kNm$$

Kuormitusyhdistelmä 8, KY8: V_{\min}, H_{\min} (6.10b)

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$N_{k,hyötykuorma} = 100kN$$

$$H_{k,tuuli} = 60kN$$

$$M_{k,tuuli} = 60kNm$$

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \Psi_{0,1} * Q_{k,i}$$

$$N_d = 0,9 * 500kN = 450kN$$

$$H_d = 0 * 1 * 0kN + 0 * 1 * 60kN = 0kN$$

$$M_d = 0 * 1 * 0kNm + 0 * 1 * 60kNm = 0kNm$$

Staattinen tasapainorajatila

Kuormitusyhdistelmä 9, KY9: (6.10)

$$N_{k,rakenteet} = 500kN$$

$$N_{k,hyötykuorma} = 100kN$$

$$H_{k,tuuli} = 60kN$$

$$M_{k,tuuli} = 60kNm$$

$$N_{d,rakenteet} = N_{k,rakenteet} * \gamma_F = 500kN * 0,9 = 450kN$$

$$N_{d,hyötykuorma} = N_{k,hyötykuorma} * \gamma_F = 100kN * 0 = 0kN$$

$$H_{d,tuuli} = H_{k,tuuli} * \gamma_F * K_{FI} = 60kN * 1,5 * 1 = 90kN$$

$$M_{d,tuuli} = M_{k,tuuli} * \gamma_F * K_{FI} = 60kNm * 1,5 * 1 = 90kNm$$

Kantavuuslaskelma

Kuormitus: KY5a V_{\max}, H_{\max} (6.10b) + 1,15* $G_{k,antura}$ + 1,15* $G_{k,maa}$

$$N_{k,pohja} = 600kN + 1,2m * 1,2m * (0,35m * 25 \frac{kN}{m^3} + 19 \frac{kN}{m^3} * (1,0m - 0,35m)) = 630,4kN$$

$$M_{k,pohja} = M_k + H_k * D = 60kNm + 60kN * 1,0m = 120kNm$$

$$N_{d,pohja} = 680kN + 1,15 * \left[1,2m * 1,2m * (0,35m * 25 \frac{kN}{m^3} + 19 \frac{kN}{m^3} * (1,0m - 0,35m)) \right] = 714,9kN$$

$$H_d = 90kN$$

$$M_d = 90kNm$$

$$M_{d,pohja} = M_d + H_d * D = 90kNm + 90kN * 1,0m = 180kNm$$

$$e_b = \frac{M_{k,pohja}}{N_{k,pohja}} = \frac{120kNm}{630,4kN} = 0,1904m$$

$$L' = L - 2 * e_l = 1,2m - (2 * 0m) = 1,2m$$

$$B' = B - 2 * e_b = 1,2m - (2 * 0,1904m) = 0,8192m$$

$$q' = \gamma * (D - h) = 19 \frac{kN}{m^3} * (1,0m - 0,35m) = 12,35 \frac{kN}{m^2}$$

$$N_q = e^{\pi * \tan \varphi'} * \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) = e^{\pi * \tan 38^\circ} * \tan^2 \left(45^\circ + \frac{38^\circ}{2} \right) = 48,93$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi' = 2 * (48,93 - 1) * \tan 38^\circ = 74,89$$

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

$$s_q = 1 + \left(\frac{B'}{L'} \right) * \sin \varphi' = 1 + \left(\frac{0,8192m}{1,2m} \right) * \sin 38^\circ = 1,420$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 * \left(\frac{B'}{L'} \right) = 1 - 0,3 * \left(\frac{0,8192m}{1,2m} \right) = 0,795$$

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + A'c' \cot \varphi'} \right)^m = \left(1 - \frac{90kN}{714,9kN + 0,983m^2 * 0 * \cot 38^\circ} \right)^{1,594} = 0,807$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{V + A'c' \cot \varphi'} \right)^{m+1} = \left(1 - \frac{90kN}{714,9kN + 0,983m^2 * 0 * \cot 38^\circ} \right)^{1,594+1} = 0,705$$

$$m_B = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}} = \frac{2 + \left(\frac{0,8192m}{1,2m} \right)}{1 + \left(\frac{0,8192m}{1,2m} \right)} = 1,594$$

$$\frac{R}{A'} = \gamma'_1 * D * N_q * b_q * s_q * i_q + 0,5 * \gamma'_2 * B' * N_\gamma * b_\gamma * s_\gamma * i_\gamma$$

$$= 19 \frac{kN}{m^3} * 1,0m * 48,93 * 1 * 1,420 * 0,807 + 0,5 * 19 \frac{kN}{m^3} * 0,8192m * 74,89 * 1 * 0,795 * 0,705$$

$$= 1392,6 \frac{kN}{m^2}$$

$$\frac{R_d}{A'} = \frac{R}{\gamma_{R,v}} = \frac{1392,6 \frac{kN}{m^2}}{1,55} = 898,4 \frac{kN}{m^2}$$

$$R_d = \frac{R_d}{A'} * A' = 898,4 \frac{kN}{m^2} * 0,983m^2 = 883,3kN$$

$$883,3 \frac{kN}{m^2} = R_d \geq V_d = 714,9 \frac{kN}{m^2}$$

Käyttöaste: 80,9

Liukumiskestävyys

$$R_d = \frac{V'_d * \tan \delta_k}{\gamma_{R,h}} = \frac{714,9kN * \tan 38^\circ}{1,1} = 507,8kN$$

$$90kN = H_d \leq R_d + R_{p,d} = 507,8kN + 0kN$$

Käyttöaste: 17,7%

Läpileikkautumiskestävyys

$$V_d = \frac{N_{d,kuorma+antura}}{A} * A_{määrävä} = \frac{714,9kN}{1,2m * 1,2m} * (1,2m * 1,2m - (0,4 + 2 * 0,295)^2) = 221,8kN$$

$$A_u = (d + b_{peruspilari})^2 = (0,295m + 0,4m)^2 = 0,483m^2$$

$$e_d = \frac{M_{d,pohja}}{N_{d,kuorma+antura}} = \frac{180kNm}{694,5kN} = 0,259m$$

$$\beta = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5 * e}{\sqrt{A_u}}} = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5 * 0,259m}{\sqrt{0,483m^2}}} = 0,257$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,295 = 1,305$$

$$u = (0,295m + 0,4m) * 4 = 2,87m$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} = \frac{2}{1,5} = 1,33 \frac{MN}{m^2}$$

$$V_c = k * \beta * (1 + 50 * \rho) * u * d * f_{ctd}$$

$$= 1,305 * 0,257 * (1 + 50 * 0,0006) * 2,87m * 0,295m * 1,33 \frac{MN}{m^2}$$

$$V_c = 377,0kN$$

$$377,0kN = V_c \geq V_d = 221,8kN$$

Käyttöaste: 58,8%

Kuormitus: $KY5b V_{\max}, H_{\max} (6.10b) + 1,15 * G_{k,antura} + 1,15 * G_{k,maa}$

$$N_{k,pohja} = 600kN + 1,2m * 1,2m * (0,35m * 25 \frac{kN}{m^3} + 19 \frac{kN}{m^3} * (1,0m - 0,35m)) = 630,4kN$$

$$M_{k,pohja} = M_k + H_k * D = 60kNm + 60kN * 1,0m = 120kNm$$

$$N_{d,pohja} = 725kN + 1,15 * \left[1,2m * 1,2m * (0,35m * 25 \frac{kN}{m^3} + 19 \frac{kN}{m^3} * (1,0m - 0,35m)) \right] = 759,9kN$$

$$H_d = 54kN$$

$$M_d = 54kNm$$

$$M_{d,pohja} = M_d + H_d * D = 54kNm + 54kN * 1,0m = 108kNm$$

$$e_b = \frac{M_{k,pohja}}{N_{k,pohja}} = \frac{120kNm}{630,4kN} = 0,1904m$$

$$L' = L - 2 * e_l = 1,2m - (2 * 0m) = 1,2m$$

$$B' = B - 2 * e_b = 1,2m - (2 * 0,1904m) = 0,8192m$$

$$q' = \gamma * (D - h) = 19 \frac{kN}{m^3} * (1,0m - 0,35m) = 12,35 \frac{kN}{m^2}$$

$$N_q = e^{\pi * \tan \varphi'} * \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) = e^{\pi * \tan 38^\circ} * \tan^2 \left(45^\circ + \frac{38^\circ}{2} \right) = 48,93$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi' = 2 * (48,93 - 1) * \tan 38^\circ = 74,89$$

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

$$s_q = 1 + \left(\frac{B'}{L'} \right) * \sin \varphi' = 1 + \left(\frac{0,8192m}{1,2m} \right) * \sin 38^\circ = 1,420$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 * \left(\frac{B'}{L'} \right) = 1 - 0,3 * \left(\frac{0,8192m}{1,2m} \right) = 0,795$$

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + A' c' \cot \varphi'} \right)^m = \left(1 - \frac{54kN}{759,9kN + 0,983m^2 * 0 * \cot 38^\circ} \right)^{1,594} = 0,889$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{V + A' c' \cot \varphi'} \right)^{m+1} = \left(1 - \frac{54kN}{759,9kN + 0,983m^2 * 0 * \cot 38^\circ} \right)^{1,594+1} = 0,826$$

$$m_B = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}} = \frac{2 + \left(\frac{0,8192m}{1,2m} \right)}{1 + \left(\frac{0,8192m}{1,2m} \right)} = 1,594$$

$$\frac{R}{A'} = \gamma'_1 * D * N_q * b_q * s_q * i_q + 0,5 * \gamma'_2 * B' * N_\gamma * b_\gamma * s_\gamma * i_\gamma$$

$$= 19 \frac{kN}{m^3} * 1m * 48,93 * 1 * 1,420 * 0,889 + 0,5 * 19 \frac{kN}{m^3} * 0,8192m * 74,89 * 1 * 0,795 * 0,826$$

$$= 1557,4 \frac{kN}{m^2}$$

$$\frac{R_d}{A'} = \frac{R}{\gamma_{R,v} A'} = \frac{1557,4 \frac{kN}{m^2}}{1,55} = 1004,7 \frac{kN}{m^2}$$

$$R_d = \frac{R_d}{A'} * A' = 1004,7 \frac{kN}{m^2} * 0,983m^2 = 987,8kN$$

$$987,8 \frac{kN}{m^2} = R_d \geq V_d = 759,9 \frac{kN}{m^2}$$

Käyttöaste: 76,9%

Liukumiskestävyys

$$R_d = \frac{V'_d * \tan \delta_k}{\gamma_{R,h}} = \frac{759,9 \text{ kN} * \tan 38^\circ}{1,1} = 539,8 \text{ kN}$$

$$54 \text{ kN} = H_d \leq R_d + R_{p,d} = 580,5 \text{ kN} + 0 \text{ kN}$$

Käyttöaste: 10,0%

Läpileikkautumiskestävyys

$$V_d = \frac{N_{d,kuorma+antura}}{A} * A_{määräva} = \frac{739,5 \text{ kN}}{1,2 \text{ m} * 1,2 \text{ m}} * (1,2 \text{ m} * 1,2 \text{ m} - (0,4 + 2 * 0,295)^2) = 236,2 \text{ kN}$$

$$A_u = (d + b_{peruspilari})^2 = (0,295 \text{ m} + 0,4 \text{ m})^2 = 0,483 \text{ m}^2$$

$$e_d = \frac{M_{d,pohja}}{N_{d,pohja}} = \frac{108 \text{ kNm}}{759,9 \text{ kN}} = 0,146 \text{ m}$$

$$\beta = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5 * e}{\sqrt{A_u}}} = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5 * 0,146 \text{ m}}{\sqrt{0,483 \text{ m}^2}}} = 0,304$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,295 = 1,305$$

$$u = (0,295 \text{ m} + 0,4 \text{ m}) * 4 = 2,87 \text{ m}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} = \frac{2}{1,5} = 1,33 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

$$V_c = k * \beta * (1 + 50 * \rho) * u * d * f_{ctd}$$

$$= 1,305 * 0,304 * (1 + 50 * 0,0006) * 2,87 \text{ m} * 0,295 \text{ m} * 1,33 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

$$V_c = 447,0 \text{ kN}$$

$$447,0 \text{ kN} = V_c \geq V_d = 236,2 \text{ kN}$$

Käyttöaste: 52,8 %

Kuormitus: KY7: $V_{\min}, H_{\max} (6.10b) + 0,9 \cdot G_{k,antura} + 0,9 \cdot G_{k,maa}$

$$N_{k,pohja} = 500kN + 1,2m * 1,2m * (0,35m * 25 \frac{kN}{m^3} + 19 \frac{kN}{m^3} * (1,0m - 0,35m)) = 530,4kN$$

$$M_{k,pohja} = M_k + H_k * D = 60kNm + 60kN * 1,0m = 120kNm$$

$$N_{d,pohja} = 450kN + 0,9 * \left[1,2m * 1,2m * (0,35m * 25 \frac{kN}{m^3} + 19 \frac{kN}{m^3} * (1,0m - 0,35m)) \right] = 477,4kN$$

$$H_d = 90kN$$

$$M_d = 90kNm$$

$$M_{d,pohja} = M_d + H_d * D = 90kNm + 90kN * 1,0m = 180kNm$$

$$e_b = \frac{M_{k,pohja}}{N_{k,pohja}} = \frac{120kNm}{530,4kN} = 0,226m$$

$$L' = L - 2 * e_l = 1,2m - (1,2 * 0m) = 1,2m$$

$$B' = B - 2 * e_b = 1,2m - (1,2 * 0,226m) = 0,748m$$

$$q' = \gamma * (D - h) = 19 \frac{kN}{m^3} * (1,0m - 0,35m) = 12,35 \frac{kN}{m^2}$$

$$N_q = e^{\pi * \tan \varphi'} * \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) = e^{\pi * \tan 38^\circ} * \tan^2 \left(45^\circ + \frac{38^\circ}{2} \right) = 48,93$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi' = 2 * (48,93 - 1) * \tan 38^\circ = 74,89$$

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

$$s_q = 1 + \left(\frac{B'}{L'} \right) * \sin \varphi' = 1 + \left(\frac{0,748m}{1,2m} \right) * \sin 38^\circ = 1,384$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 * \left(\frac{B'}{L'} \right) = 1 - 0,3 * \left(\frac{0,748m}{1,2m} \right) = 0,813$$

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + A' c' \cot \varphi'} \right)^m = \left(1 - \frac{90kN}{477,4kN + 0,897m^2 * 0 * \cot 38^\circ} \right)^{1,616} = 0,714$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{V + A' c' \cot \varphi'} \right)^{m+1} = \left(1 - \frac{90kN}{477,4kN + 0,897m^2 * 0 * \cot 38^\circ} \right)^{1,616+1} = 0,580$$

$$m_B = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}} = \frac{2 + \left(\frac{0,748m}{1,2m} \right)}{1 + \left(\frac{0,748m}{1,2m} \right)} = 1,616$$

$$\frac{R}{A'} = \gamma'_1 * D * N_q * b_q * s_q * i_q + 0,5 * \gamma'_2 * B' * N_\gamma * b_\gamma * s_\gamma * i_\gamma$$

$$= 19 \frac{kN}{m^3} * 1,0m * 48,93 * 1 * 1,389 * 0,714 + 0,5 * 19 \frac{kN}{m^3} * 0,748m * 74,89 * 1 * 0,813 * 0,580$$

$$= 1169,3 \frac{kN}{m^2}$$

$$\frac{R_d}{A'} = \frac{R}{\gamma_{R,v} A'} = \frac{1169,3 \frac{kN}{m^2}}{1,55} = 754,4 \frac{kN}{m^2}$$

$$R_d = \frac{R_d}{A'} * A' = 754,4 \frac{kN}{m^2} * 0,897m^2 = 676,7kN$$

$$676,7 \frac{kN}{m^2} = R_d \geq V_d = 477,4 \frac{kN}{m^2}$$

Käyttöaste: 70,5%

Liukumiskestävyys

$$R_d = \frac{V'_d * \tan \delta_k}{\gamma_{R,h}} = \frac{477,4 \text{ kN} * \tan 38^\circ}{1,1} = 339,0 \text{ kN}$$

$$90 \text{ kN} = H_d \leq R_d + R_{p,d} = 339,0 \text{ kN} + 0 \text{ kN}$$

Käyttöaste: 26,5%

Läpileikkautumiskestävyys

$$V_d = \frac{N_{d,kuorma+antura}}{A} * A_{määräva} = \frac{464,5 \text{ kN}}{1,2 \text{ m} * 1,2 \text{ m}} * (1,2 \text{ m} * 1,2 \text{ m} - (0,4 + 2 * 0,295)^2) = 148,3 \text{ kN}$$

$$A_u = (d + b_{peruspilari})^2 = (0,295 \text{ m} + 0,4 \text{ m})^2 = 0,483 \text{ m}^2$$

$$e_d = \frac{M_{d,pohja}}{N_{d,pohja}} = \frac{180 \text{ kNm}}{477,4 \text{ kN}} = 0,388 \text{ m}$$

$$\beta = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5 * e}{\sqrt{A_u}}} = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5 * 0,388 \text{ m}}{\sqrt{0,483 \text{ m}^2}}} = 0,218$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,295 = 1,305$$

$$u = (0,295 \text{ m} + 0,4 \text{ m}) * 4 = 2,87 \text{ m}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} = \frac{2}{1,5} = 1,33 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

$$V_c = k * \beta * (1 + 50 * \rho) * u * d * f_{ctd}$$

$$= 1,305 * 0,218 * (1 + 50 * 0,0006) * 2,87 \text{ m} * 0,295 \text{ m} * 1,33 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

$$V_c = 320,2 \text{ kN}$$

$$320,2 \text{ kN} = V_c \geq V_d = 148,3 \text{ kN}$$

Käyttöaste: 46,3%

Kuormitus: $KY9 + 0,9 \cdot G_{k,antura} + 0,9 \cdot G_{k,maa}$

Kaatumisvarmuus

$$N_{d,rakenteet} = 450kN$$

$$N_{d,hyötykuorma} = 0kN$$

$$H_{d,tuuli} = 90kN$$

$$M_{d,tuuli} = 90kNm$$

$$N_{d,antura+maanpaino} = 0,9 \cdot \left[1,2m \cdot 1,2m \cdot \left(1,0m \cdot 25 \frac{kN}{m^3} + 19 \frac{kN}{m^3} \cdot (1m - 0,35m) \right) \right] = 34,9kN$$

$$M_{dst;d} = M_{d,tuuli} + D \cdot H_{d,tuuli} = 90kNm + 1,0m \cdot 90kN = 180kNm$$

$$M_{stb;d} = (N_{d,rakenteet} + N_{d,antura+maanpaino}) \cdot \frac{B}{2} = (450kN + 34,9kN) \cdot \frac{1,2m}{2} = 291,0kNm$$

$$180kNm = M_{dst;d} \leq M_{stb;d} + T_d = 291,0kNm + 0kNm$$

Käyttöaste: 61,8%

LIITE 2

1 Spread footing: Foundation1

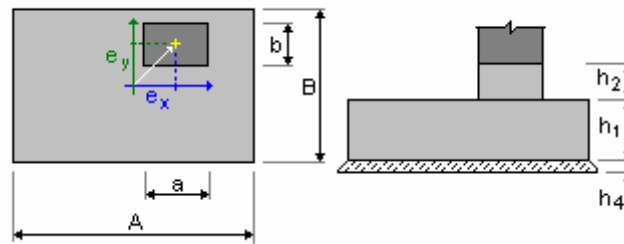
Number: 1

1.1 Basic data

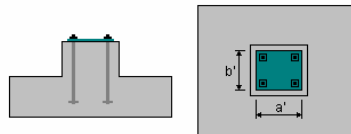
1.1.1 Assumptions

- Geotechnic calculations according to : EN 1997-1:2008
- Concrete calculations according to : SFS-EN 1992-1-1
- Shape selection : without limits

1.1.2 Geometry:



A	= 1,20 (m)	a	= 0,40 (m)
B	= 1,20 (m)	b	= 0,40 (m)
h1	= 0,35 (m)	ex	= 0,00 (m)
h2	= 0,65 (m)	ey	= 0,00 (m)
h4	= 0,05 (m)		



a'	= 40,0 (cm)
b'	= 40,0 (cm)
cnom1	= 6,0 (cm)
cnom2	= 6,0 (cm)
Cover deviations: Cdev = 1,0(cm), Cdur = 0,0(cm)	

1.1.3 Materials

- Concrete : C30/37; Characteristic strength = 30,00 MPa
Unit weight = 2501,36 (kg/m³)
Rectangular stress distribution [3.1.7(3)]
- Longitudinal reinforcement : type A500HW Characteristic
strength = 500,00 MPa
Ductility class: C
Horizontal branch of the stress-strain diagram
- Transversal reinforcement : type A500HW Characteristic
strength = 500,00 MPa

1.1.4 Loads:

Foundation loads:

Case	Nature	Group	N (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Mx (kN*m)	My (kN*m)
KY5a	design	----	680,01	-90,00	0,00	0,00	-90,00
KY5b	design	----	725,01	-54,00	0,00	0,00	-54,00
KY7	design	----	450,00	-90,00	0,00	0,00	-90,00
KY9	design	----	450,00	-90,00	0,00	0,00	-90,00

Backfill loads:

Case	Nature	Q1
------	--------	----

(kN/m²)

1.1.5 Combination list

1/	ULS : KY5a N=680,01 My=-90,00 Fx=-90,00
2/	ULS : KY5b N=725,01 My=-54,00 Fx=-54,00
3/	ULS : KY7 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00
4/	SLS : KY9 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00
5/*	ULS : KY5a N=680,01 My=-90,00 Fx=-90,00
6/*	ULS : KY5b N=725,01 My=-54,00 Fx=-54,00
7/*	ULS : KY7 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00
8/*	SLS : KY9 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00

1.2 Geotechnical design

1.2.1 Assumptions

- Cohesion reduction coefficient: 1,00
 - Sliding with soil pressure considered: none
 - Design approach: 2
A1 + M1 + R2
- | | |
|------------------|--------|
| $\gamma_{\phi'}$ | = 1,00 |
| γ_c | = 1,00 |
| γ_{cu} | = 1,00 |
| γ_{qu} | = 1,00 |
| γ_Y | = 1,00 |
| $\gamma_{R,v}$ | = 1,55 |
| $\gamma_{R,h}$ | = 1,10 |

1.2.2 Soil:

Soil level:	$N_1 = 0,00$ (m)
Column pier level:	$N_a = 0,00$ (m)
Minimum reference level:	$N_f = -0,50$ (m)

Corase gravel

- Soil level: 0.00 (m)
- Unit weight: 1900.00 (kG/m³)
- Unit weight of solid: 2702.25 (kG/m³)
- Internal friction angle: 38.0 (Deg)
- Cohesion: 0.00 (MPa)

1.2.3 Limit states

Condition not met for: Soil capacity
Condition not met for: Foundation punching

Stress calculations

Soil type under foundation: not layered
 Design combination **ULS : KY7 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00**
 Load factors: **1.35** * Foundation weight
1.35 * Soil weight
 Calculation results: On the foundation level
 Weight of foundation and soil over it: Gr = 41,06 (kN)
 Design load:
 Nr = 491,06 (kN) Mx = -0,00 (kN*m) My = -180,00 (kN*m)
 Load eccentricity:

$e_B = -0,37 \text{ (m)}$ $e_L = 0,00 \text{ (m)}$
 Equivalent foundation dimensions:
 $B' = B - 2|e_B| = 0,47 \text{ (m)}$
 $L' = L - 2|e_L| = 1,20 \text{ (m)}$
 Foundation depth: $D_{min} = 1,00 \text{ (m)}$

Allowable stress calculation method: Analytical

Coefficients of load capacity:
 $N_\gamma = 74.90$
 $N_c = 61.35$
 $N_q = 48.93$
 Inclination factors:
 $i_\gamma = 0.60$
 $i_c = 0.73$
 $i_q = 0.74$
 Shape coefficient:
 $s_\gamma = 0.88$
 $s_c = 1.24$
 $s_q = 1.24$
 Factors of foundation base inclination:
 $b_\gamma = 1.00$
 $b_c = 1.00$
 $b_q = 1.00$
 Soil profile parameters:
 $C = 0.00 \text{ (MPa)}$
 $\phi = 0,66$
 $\gamma = 1900.00 \text{ (kG/m}^3\text{)}$
 $q_u = 1,01 \text{ (MPa)}$
 Design soil pressure:
 $q_{lim} = q_u / \gamma_f = 0.65 \text{ (MPa)}$
 $\gamma_f = 1,00$

 Stress in soil: $q_{ref} = 1.17 \text{ (MPa)}$
 Safety factor: $q_{lim} / q_{ref} = 0.5563 > 1$

Uplift

Uplift in ULS
 Design combination **ULS : KY7 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00**
 Load factors: **1.00 * Foundation weight**
 1.00 * Soil weight
 Contact area: $s = 0,31$
 $s_{lim} = 0,33$

Sliding

Design combination **ULS : KY7 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00**
 Load factors: **1.00 * Foundation weight**
 1.00 * Soil weight
 Weight of foundation and soil over it: $Gr = 30,42 \text{ (kN)}$
 Design load:
 $N_r = 480,42 \text{ (kN)}$ $M_x = -0,00 \text{ (kN*m)}$ $M_y = -180,00 \text{ (kN*m)}$
 Equivalent foundation dimensions: $A_ = 1,20 \text{ (m)}$ $B_ = 1,20 \text{ (m)}$
 Sliding area: $0,81 \text{ (m}^2\text{)}$
 Foundation/soil friction coefficient: $\tan(\delta_d) = 0,78$
 Cohesion: $c_u = 0.00 \text{ (MPa)}$
 Sliding force value $H_d = 90,00 \text{ (kN)}$
 Value of force preventing foundation sliding:
 - On the foundation level: $R_d = 341,22 \text{ (kN)}$

Stability for sliding: $3.791 > 1$

Average settlement

Soil type under foundation: not layered

Design combination **SLS : KY9 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00**

Load factors: **1.00** * Foundation weight

1.00 * Soil weight

Weight of foundation and soil over it: Gr = 30,42 (kN)

Average stress caused by design load: q = 0,59 (MPa)

Thickness of the actively settling soil: z = 4,80 (m)

Stress on the level z:

- Additional: $\sigma_{zd} = 0,02$ (MPa)

- Caused by soil weight: $\sigma_{z\gamma} = 0,11$ (MPa)

Settlement:

- Original $s' = 0,4$ (cm)

- Secondary $s'' = 0,0$ (cm)

- TOTAL $S = 0,4$ (cm) < Sadm = 5,1 (cm)

Safety factor: $11.95 > 1$

Settlement difference

Design combination **SLS : KY9 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00**

Load factors: **1.00** * Foundation weight

1.00 * Soil weight

Settlement difference: S = 0,9 (cm) < Sadm = 5,1 (cm)

Safety factor: $5.721 > 1$

Rotation

About OX axis

Design combination **ULS : KY7 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00**

Load factors: **1.00** * Foundation weight

1.00 * Soil weight

Weight of foundation and soil over it: Gr = 30,42 (kN)

Design load:

Nr = 480,42 (kN)

Mx = -0,00 (kN*m)

My = -180,00 (kN*m)

Stability moment:

M_{stab} = 288,25 (kN*m)

Rotation moment:

M_{renv} = 0,00 (kN*m)

Stability for rotation:

∞

About OY axis

Design combination: **ULS : KY7 N=450,00 My=-90,00 Fx=-90,00**

Load factors: **1.00** * Foundation weight

1.00 * Soil weight

Weight of foundation and soil over it: Gr = 30,42 (kN)

Design load:

Nr = 480,42 (kN)

Mx = -0,00 (kN*m)

My = -180,00 (kN*m)

Stability moment:

M_{stab} = 288,25 (kN*m)

Rotation moment:

M_{renv} = 180,00 (kN*m)

Stability for rotation:

$1.601 > 1$

1.3 RC design

1.3.1 Assumptions

- Exposure : XC2
- Structure class : S1

1.3.2 Analysis of punching and shear

Punching

Design combination	ULS : KY5a N=680,01 My=-90,00 Fx=-90,00		
Load factors:	1.35 * Foundation weight		
	1.35 * Soil weight		
Design load:			
	Nr = 721,07 (kN)	Mx = -0,00 (kN*m)	My = -180,00 (kN*m)
Length of critical circumference:		1,63 (m)	
Punching force:		501,79 (kN)	
Section effective height		heff = 0,28 (m)	
Reinforcement ratio:		$\rho = 0.06 \%$	
Shear stress:		1,10 (MPa)	
Admissible shear stress:		0,36 (MPa)	
Safety factor:		0.3266	> 1

1.3.3 Required reinforcement

Condition not met for: Soil capacity

Condition not met for: Foundation punching