

PILARIANTURAN MITOITUS EUROKOODIN MUKAAN
SEKÄ VERTAILULASKELMAT AUTODESK ROBOT
STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL -
LASKENTAOHJELMALLA

Tuomas Virtanen

Opinnäytetyö

Kevät 2011

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Oulun seudun ammattikorkeakoulu

OULUN SEUDUN AMMATTIKORKEAKOULU TIIVISTELMÄ

Koulutusohjelma	Opinnäytetyö	Sivuja	+	Liitteitä
<u>Rakennustekniikka</u> Suuntautumisvaihtoehto	<u>Insinööriyö</u> Aika	51	+	4
<u>Rakennetekniikka</u> Työn tilaaja	<u>4.5.2011</u> Työn tekijä			
<u>Pöyry Civil Oy</u> Työn nimi	<u>Tuomas Virtanen</u>			
Pilarianturan mitoitus Eurokoodin mukaan sekä vertailulaskelmat Autodesk Robot structural Analysis Professional -laskentaohjelmalla				
Asiasanat pilariantura, eurokoodi, kantokestävyys, autodesk robot structural analysis professional				

Maanvaraisten perustusten laskenta Eurokoodin myötä on muuttunut hieman. Tässä insinööriyössä perehdyttiin pilarianturan mitoittamiseen tarvittavaan teoriaan sekä tehtiin vertailulaskelmat esimerkkikohteesta. Vertailu tehtiin käsin laskemalla sekä laskentaohjelmalla. Tavoitteena oli saada laskentaohjelmaan käyttövarmuutta, jotta sen tuloksia voitaisiin hyödyntää suunnittelussa. Laskentaohjelmana käytettiin Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelmaa.

Aluksi työssä esiteltiin mitoituksen rajatiloja sekä kuormituksia. Tämän jälkeen tutkittiin pilarianturan teoriaa geoteknisesti sekä rakenneteknisesti. Lopuksi käytiin läpi esimerkkikohdetta ja sen vertailulaskelmia. Esimerkkilaskussa keskityttiin tutkimaan geoteknistä kantokestävyyttä, loppupainumaa ja raudoituspinta-alaa

Laskentatuloksissa havaittiin, että Robot Structure Analysis -ohjelmalla päästään lähes samoihin lukuarvoihin kuin Excel-pohjien vertailulaskuilla. Vaaditun raudoituspinta-alan lukuarvoissa eroa syntyi jonkin verran enemmän. Tulosten yhteneväisyyden perusteella Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelman käyttö mitoituksessa todettiin hyödylliseksi. Verrattuna aiempiin laskentatapoihin, joissa mitoitus pilkottiin pienempiin osakokonaisuuksiin, tämä laskentaohjelma mitoittaa kaikki osa-alueet ja siten nopeuttaa käytännön suunnittelua.

Degree programme

Civil Engineering

Thesis

B.Eng

Number of pages + appendices

51

4

Line

Structural engineering

Date

11 May 2011

Commissioned by

Pöyry Plc

Author

Virtanen Tuomas

Thesis title

Pile Footing Sizing According Eurocode 7

Keywords

Pile Footing, Autodesk Robot Structural Analysis Professional, Eurocode 7

Calculating pile footings with Eurocode 7 has slightly changed the sizing in Finland. This bachelor's thesis includes the necessary theory needed in sizing of pile foundation and also comparison calculations of example. The comparison was done by spreadsheet software with a new calculation program. The aim was to test the reliability of the calculation program so that the results can be used in designing. Autodesk Robot Structural Analysis Professional was the program used in the calculations.

First, in this thesis the limit state design of sizing as well as the loadings were presented. After that, the geotechnical and structural theory of pile footing were investigated. Finally, the example of pile footing and the comparison calculations were reviewed. The emphasis in calculations was in bearing resistance, settling and reinforcement area.

In the calculation results was noticed that Robot Structure Analysis Professional reaches nearly the same values as the spreadsheet comparison calculations. The results in required reinforcement area deviate slightly more than expected. However, the principle in integrity of results gives credit to use Robot Structural Analysis Professional in designing. Compared with previous methods of calculation where design was split into smaller sub-assemblies, this software works in all areas making everything in sizing.

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
ALKULAUSE	4
LYHENTEET	5
1 JOHDANTO	8
2 PERUSTUS	9
3 ANTURAN MITOITUSPERUSTEET	11
3.1 Rajatilat	11
3.2 Kuormat ja niiden yhdistely	12
4 ANTURAN GEOTEKNINEN MITOITUS.....	17
4.1 Maaparametrit	17
4.2 Perustamissyvyys	18
4.3 Maankantokestävyys.....	19
4.4 Pohjapaine	20
4.5 Murtorajatila	21
4.5.1 Geotekninen kantokestävyys.....	21
4.5.2 Liukumiskestävyys.....	24
4.5.3 Voimakkaasti epäkeskiset kuormat	25
4.6 Käyttörajatilamitoitus.....	26
4.6.1 Painuma.....	26
4.6.2 Painumalajit	26
4.6.3 Painumanlaskenta	27
5 ANTURAN RAKENNETEKNINEN MITOITUS	30
5.1 Murtorajatila	32
5.1.1 Taivutusmitoitus.....	32
5.1.2 Raudoitus.....	33
5.1.3 Raudoituksen ankkurointi	36
5.1.4 Leikkaus-lävistysmitoitus	37
5.2 Käyttörajatilamitoitus.....	38
6 TALVIVAARAN HIENOMURSKAAMO.....	39
7 LASKENTA	41
7.1 Laskelmien sisältö.....	42

7.2 Laskelmien kulku.....	43
7.3 Tulokset.....	44
8 POHDINTA	47
LÄHTEET	49
LIITTEET.....	51

ALKULAUSE

Tämä insinööriyö tehtiin Pöyry Finland Oy:n Oulun toimistolle.

Haluan esittää kiitokset Pöyry Finland Oy:n puolesta toimineille erinomaisille asiantuntijoille Jukka Jartille ja Sakari Lotvoselle. Lisäksi osaavasta opastuksesta kiitos kuuluu myös oppilaitoksen puolesta valvoneelle Pekka Nykyrille.

Oulussa 25.5.2010

Tuomas Virtanen

LYHENTEET

Latinalaiset kirjaimet

A_s	vaadittu raudoitusala
$A_{s,min}$	anturan minimiraudoitus ala
A'	anturanpohjan tehollinen pinta-ala
a	pilarin sivumitta
b	pilarin sivumitta
B	pilarianturan leveys
B_t	pilarianturan tehollinen leveys
B_e	epäkeskisyyden etäisyys ellipsin lyhyemmän sivun suunnassa
c	koheesio
c'	tehokas koheesio
D	perustamissyvyys
d	raudoituksen tehollinen korkeus
e	resultantin epäkeskisyys
f_{cd}	betonin mitoituspuristuslujuus
f_{yk}	betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo
f_{yd}	betoniteräksen myötölujuuden mitoituslujuus
f_{ck}	betonin lujuusluokka
f_{ctm}	betonin keskimääräinen vetolujuus suorassa vedossa
G_{dst}	kaatava pysyvä kuorma
G_{inf}	edullinen pysyvä kuorma
G_{stb}	vakauttava pysyvä kuorma
G_{sup}	epäedullinen pysyvä kuorma
h	anturan korkeus
q	jatkuvakuorma
K_{FI}	kuormakerroin
kx	tankoväli
L	pilarianturan pituus

L_{bd}	ankkurointipituus
$L_{b,rqd}$	Ankkurointipituus täydelle myötövoimalle
L_t	pilarianturan tehollinen pituus
L_e	epäkeskisyyden etäisyys ellipsin pidemmän sivun suunnassa
M_{ED}	mitoitustaivutusmomentti
N_{ED}	pystykuorman mitoitusarvo
Q_{dst}	kaatava muuttuva kuorma
Q_{inf}	edullinen muuttuva kuorma
Q_{stb}	vakauttava muuttuva kuorma
Q_{sup}	epäedullinen muuttuva kuorma
R_k	kantokestävyyden ominaisarvo
R_d	kantokestävyyden mitoitusarvo
V_d	mitoituspystykuorma

Kreikkalaiset kirjaimet

α_{cc}	betonin puristuslujuuden alennuskerroin
α	kulma asteina
α_2	betonipeitteestä riippuva kerroin
β_1	tehollisen puristuspinnan korkeus
γ_ϕ	leikkauskestävyysskulman osavarmuusluku
γ_c	betonin osavarmuusluku
γ_s	teräksen osavarmuusluku
γ_P	esijännitysvoimien osavarmuusluku
φ_0	muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
$\gamma_{G,stb}$	vakauttavan pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{Q,stb}$	vakauttavan muuttuvan kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{Gkj,inf}$	edullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{Gkj,sup}$	epäedullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{G,dst}$	kaatavan pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{Q,dst}$	kaatavan muuttuvan kuorman osavarmuusluku

γ	tilavuuspaino
γ'	tehokas tilavuuspaino
γ_R	kestävyyden osavarmuusluku
η	tartuntaolosuhteidenkerroin
ϕ'_k	leikkauskestävyysskulman mitoitusarvo
ϕ	leikkauskestävyysskulma
ϕ'	tehokas leikkauskestävyysskulma
μ	suhteellinen momentti
ψ_0	kuorman yhdistelykerroin
ξ	epäedullisten pysyvien kuormien G pienennyskerroin
ε	maakerroksen suhteellinen kokoonpuristuma
m	moduuliluku
β	jännityseksponentti
σ	vertailujännitys, 100 kPa
σ'	maan tehokas pystyjännitys (kPa)
σ'_c	maan tehokas konsolidaatiojännitys (kPa)

1 JOHDANTO

Maanvaraisten perustusten laskenta on muuttunut hieman eurokoodin myötä. Tämän työn tarkoituksena on esitellä pilarianturan mitoitukseen liittyvää teoriaa ja laskentaa rakenneteknisessä sekä geoteknisessä mitoituksessa.

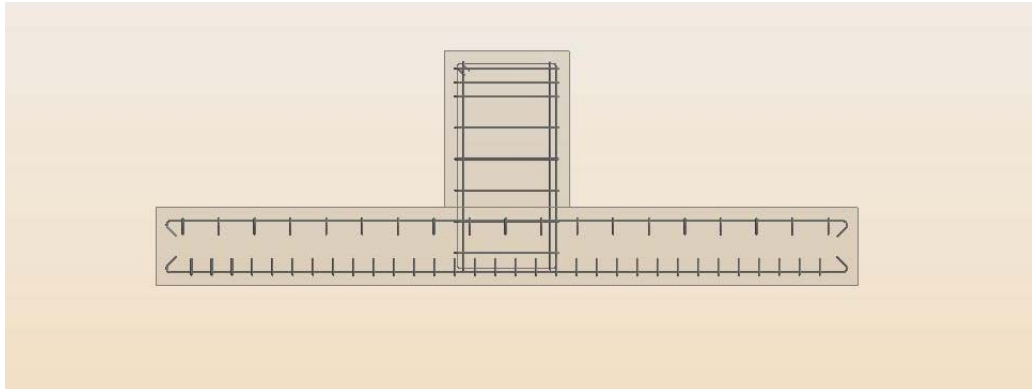
Työn tavoitteena on mitoittaa maanvarainen pilarinantura ja sen kantokestävyys murtorajatilassa sekä tarkastella painumat käyttörajatilassa. Lisäksi lasketaan vaadittu raudoituspinta-ala anturalle. Kaikki edellä mainitut osat alueet lasketaan vertailun vuoksi myös käsin. Myös nykyisin käytössä olevan Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelman käyttöä anturan mitoituksessa tutkitaan. Tämän laskentaohjelman käyttö on perustusten mitoituksen osalta vielä alkuvaiheessa, joten tavoitteena on saada selville, miten ohjelmaa käytetään ja saadaan lisää käyttövarmuutta käytännön suunnittelua varten.

Työssä keskitytään tavalliseen maanvaraiseen pilarianturaan, joka on rakennettu kitkamaan varaan ja kuormittuu epäkeskeisesti vaakavoiman johdosta. Kokonaisuudessaan pilarianturan mitoitus on laaja, joten tarkastelussa syvennytään vain tiettyihin mitoituksen osa-alueisiin. Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelmasta valitaan tutkittavaksi sekä vertailtavaksi vain kantokestävyys, painumat ja raudoituspinta-ala.

Laskennan esimerkkikohteena toimii Talvivaarassa sijaitseva hienomurskaamo, josta on valittu sopiva pilariantura mitoitusta varten. Aluksi lasketaan pilarianturalle tulevat kuormat ja niiden kuormitusyhdistelmät murto- ja käyttörajatilassa. Näin ollen murtorajatilan kuormitusyhdistelmillä saadaan lasketua sopivimmat mitat kantokestävyuden varmistamiseksi. Tämän jälkeen tarkastellaan käyttörajatilan painumat ja viimeisenä murtorajatilan vaadittu raudoituspinta-ala. Lopuksi kaikki laskentaohjelmalla lasketut tiedot kerätään yhteen ja vertaillaan käsin laskennan tuloksiin. Laskentatulosten yhteneväisyys tuo laskentaohjelmaan halutun käyttövarmuuden.

2 PERUSTUS

Perustus (kuva 1) on rakennuksen tärkein osa. Sen tehtävänä on ottaa vastaan rakennukseen kohdistuvat kuormat ja saattaa ne maahan. Maapohjan kantokyky murtorajatilassa ei saa kuitenkaan ylittyä sekä liukumien ja kaatumisen estäminen on varmistettava. Lisäksi perustusten painumat sekä painumaerot eivät saa kasvaa liian suuriksi. Perustuksen tulee olla myös kunnolla ja asiantuntevasti tehty, sillä sen muutos- ja korjaustyöt ovat erittäin haastavia sekä kalliita. Perustuksen rakentamisen ja käyttöään aikana on huomioitava muiden ympäristössä olevien rakenteiden kunnossa pysyminen. (7, s.28.)



KUVA 1. Talvivaaran hienomurskaamon perustus

Perustamistapa on riippuvainen kyseisen rakennuskohteen maaperästä. Erilaisia perustuksia ovat esimerkiksi laatta-, palkki- ja anturaperustukset. Geoteknikko antaa maaperätiedot, joiden perusteella perustamistapa valitaan. (7, s.29.)

Perustamismenetelmät voidaan karkeasti jakaa neljään osaan (7, s.17, 28; 38):

- kalliolle perustaminen
- paaluille perustaminen
- maanvarainen perustaminen
- eri tapojen yhdistelmät.

Kantaville ja tarpeeksi karkeille maalajeille, kuten moreeneille, voidaan käyttää maanvaraista perustamistapaa. Maanvarainen perustaminen tarkoittaa maahan perustettavaa rakennetta, joka ottaa vastaan rakennuksen yläpuoliset kuormat ja siirtää ne maapohjaan. Laskentaesimerkin pilariantura on perustettu maanvaraisesti kitkamaahan. Perustaminen tehdään suoraan luonnollisen-, vaihdetun-, vahvistetun- tai täytemaan varaan. (7, s.29.)

Kun kallionpinta sijaitsee lähellä maanpintaa, käytetään kallionvaraista perustamista. Saven kaltaisilla heikoilla maalajeilla tulee käyttää maapohjan paalutuksen tai maaperän vahvistamisen avulla perustamista. (7, s.29.)

Anturan **rakenteelliseen toimintatapaan** vaikuttaa raudoitus. Raudoitettussa anturassa raudoitus tuo betonirakenteelle lisää vetolujuutta paikkoihin, joissa betoni ei kestä vetojännityksiä. Puristusjännitys on jakaantunut rakenteeseen pilarin ja anturan pohjan välillä kartion muotoisena alueena. (10, s.424.)

Rakenteellisen toiminnan mallintamiseen on kaksi mitoitustapaa. Ensimmäinen on malli, jossa antura toimii lyhyen ulokkeen tavoin. Tässä mitoitustapassa lasketaan murtorajatilan taivutus- ja lävistysraudoitus sekä ankkurointimitoitus. Halkeamaleveys lasketaan käyttörajatilassa. (4, s.395.)

Antura voidaan mallintaa myös ristikkomenetelmällä, joka on yleinen teräs-betonirakenteiden mallintamisessa. Tämä menetelmä ei noudata teknistä taivutusteoriaa (6, s.105.)

3 ANTURAN MITOITUSPERUSTEET

3.1 Rajatilat

Rajatiloilla tarkoitetaan sallittuja rajoja, jotka on asetettu rakenteen kestävyys- ja käytön varmistamiseksi. Murtorajatilassa tarkistetaan laskemalla rakenteen turvallisuus murtumisen tai muun vaurioitumisen varalle. Laskennalla täytyy osoittaa, että rakenne kestää suurimman kuormituksen aiheuttaman rasituksen riittävällä varmuudella. Varmistus rakenteen kestävyydelle saadaan kasvattamalla kuormia osavarmuusluvuilla sekä heikentämällä materiaaliominaisuuksia. (9, s.33.)

Käyttörajatilan tarkastelu tarkoittaa rakenteen käytönaikaisten haitallisten muutosten tarkastelua. Tässä tilassa rakenne ei vielä rikkoonnu, mutta siihen voi tulla pysyviä tai palautuvia muodonmuutoksia, kuten taipumia, painumia tai halkeamia. Oikeanlaisella suunnittelulla täytyy varmistaa, ettei rakenteeseen synny epätoivottuja muutoksia. (9, s.33.)

Eurokoodissa on esitetty kolme erilaista **rajatilaa** rakennuspohjan murtumista vastaan sekä rakenteen sisäisten osien kestävyyttä määritteleviin rajatiloihin (1, s.53). Tässä työssä keskitytään rakenteen ja maapohjan kestävyysrajatiloihin mutta ei kokonaisvarmuusmenettelyyn. Lisäksi eurokoodi 7 esittää kolme erilaista mitoitus tapaa perustusten geotekniselle mitoittamiselle murtorajatilassa. Erot toisista mitoitus tavoista ovat osavarmuuslukujen, kuormien, maaparametrien ja kestävyyksien välillä. Mitoitustavat valitaan kansallisesti ja Suomessa on päädytty mitoitus tapaan 2. (1, s.53.)

Mitoitustavat jaetaan kolmeen luokkaan (1, s.53). Luokat ovat:

- mitoitustapa 1, ei käytetä Suomessa
- mitoitustapa 2:ssa voidaan menetellä kahdella eri tavalla, joita merkitään DA2 ja DA2*.
- mitoitustapa 3, ei esitellä tässä insinöörityössä. (1, s.53.)

Käyttörajatilalaskentaa varten on kolme kuormitusyhdistelmä kaavaa, joita ovat: ominaisyhdistelmä, tavallinen yhdistelmä ja pitkäaikaisyhdistelmä. Näillä kuormitusyhdistelmillä osoitetaan, että rakenteen painumat, painumaerot, siirtymät, kiertymät ja muodonmuutokset eivät ylitä sallittuja arvoja. (9, s.33.)

3.2 Kuormat ja niiden yhdistely

Pilariantura tehtävänä on ottaa vastaan kaikki ylärakenteelta tulevat kuormat ja saattaa ne edelleen maahan. Kuormia aiheutuu pääasiassa omasta painosta, lumesta ja tuulesta. Eurokoodi 7 SFS-EN 1997-1:n rajatilamitoituksessa käytetään kuormien mitoitusarvoja, jotka yhdistellään kaavojen 1 (6.10), 2 (6.10a) ja 3 (6.10b) mukaan:

$$\sum_{i>1} \gamma_{G,i} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,1} \varphi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 1}$$

$$\sum_{i>1} \gamma_{G,i} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \varphi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,1} \varphi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 2}$$

$$\sum_{i>1} \xi_j \gamma_{G,i} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,1} \varphi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 3}$$

γ_G	pysyvän kuorman osavarmuusluku
G_k	pysyvän kuorman ominaisarvo
γ_Q	muuttuvan kuorman osavarmuusluku
Q_k	muuttuvan kuorman ominaisarvo
" + "	tarkoittaa yhdistämistä toisen kuormavaikutuksen kanssa
Σ	tarkoittaa suureiden yhdistettyä vaikutusta
ξ	epäedullisten pysyvien kuormien G pienennyskerroin
γ_P	esijännitysvoimien osavarmuusluku
P	esijännitysvoimaa edustava arvo
φ_0	muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

Kertoimet rakenteiden kuormille, kuten omapaino, lumikuorma ja tuulikuorma, ovat standardissa RIL 201-1-2008 suunnittelu perusteet ja rakenteiden kuormat.

Anturaperustuksen mitoitustapa 2 menetelmässä käytetään kuormitusyhdistely kaavoja 2 ja 3. Osavarmuuslukujen kanssa kaavat saadaan seuraavaan muotoon: (1, s.50.)

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

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

Murtorajatiljan kuormitusyhdistelmät menetelmillä DA2 ja DA2* ovat eurokoodi 7 SFS-EN 1997-1 kansallisen liitteen mukaan.

- V_{max}, H_{max} (6.10b)

- V_{max}, H_{max} (6.10a)

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

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

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

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

- V_{min}, H_{min} (6.10b)

- V_{min}, H_{min} (6.10a).

V = pystykuorma

H = vaakakuorma

Kuormiin on huomioitu:

- pysyvä pystykuorma V_G
- pilarin ja anturan omapaino
- muut pystykuormat
- muuttuva pystykuorma V_Q
- lumikuorma ja laitekuormat
- pysyvä vaakakuorma H_G
- maanpaine
- muuttuva vaakakuorma H_Q
- tuulikuorma ja muut vaakakuormat.

Lisäksi erityistapauksissa huomioidaan jäykistyskuormat ja hyötykuormat.

Käyttörajan kuormitusyhdistelmien laskemiseen on kolme lauseketta. Ominaisyhdistelmille on kaava 1 ja sitä käytetään palautumattomille rajatiloille. Kaava 2 on tavallinen yhdistelmä, jota käytetään palautuville rajatiloille. Kaava 3 on pitkäaikaisyhdistelmille ja sitä käytetään pitkäaikaisille vaikutuksille sekä ulkonäkötapauksille. (15, s.35.)

$$\sum_{j>1} G_{k,j} + P + Q_{k,i} + \sum_{i>1} \varphi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 4}$$

$$\sum_{j>1} G_{k,j} + P + \varphi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \varphi_{2,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 5}$$

$$\sum_{j>1} G_{k,j} + P + \sum_{i>1} \varphi_{2,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 6}$$

Osavarmuuslukuihin vaikuttava **kuormakerroin** K_{FI} määritetään kohteen luotettavuusluokituksesta (RC), jossa luotettavuus riippuu rakenteeseen odotettavien vaurioiden tai vikojen seuraamusluokasta (CC). Kuormakerrointa käytetään vain epäedullisten kuormien kanssa murtorajatilassa. Kuormakertoimen arvo on taulukossa 1. (1, s.43.)

TAULUKKO 1. Kuormakerroin (15, s.37)

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

Yleisin kerroin, jota kuormakertoimenä käytetään, on 1,0. Tällaisessa tapauksessa kuorman suuruus ei muutu alkuperäisestä. (15, s.37.)

Taulukkoa 2 käytetään kuormitusyhdistelmiin, kun rakenteen osan ja rakennuspohjan kestävyys määräytyy rakennemateriaalin tai maaperän lujuudesta. (1 s.49.)

TAULUKKO 2. Kuormien osavarmuusluvut (STR/GEO) (1 s.49)

Kuorma	Merkintä	Osavarmuusluvut
		Mitoitustapa 1
Pysyvä:		
Epäedullinen	$\gamma_{Gkj,sup}$	1,35 K_{FI}
Edullinen		1,15 K_{FI}
	$\gamma_{Gkj,inf}$	0,9
Muuttuva:		
Epäedullinen	γ_Q	1,5 K_{FI}
Edullinen		0

Taulukosta 3 valitaan sopivat osavarmuusluvut kuormitusyhdistelmiin, kun rakenne tai maapohja tarkastellaan jäykkänä kappaleena ja sen mahdollisia tasapainotilan menetyksiä kaatumisen tai liukumisen seurauksena. (1 s.47.)

TAULUKKO 3. Kuormien osavarmuusluvut (EQU) (1, s.47)

Kuorma		Merkintä	Osavarmuusluku
Pysyvä			
a	Epäedullinen	$\gamma_{G,dst}$	$1,1 K_{FI}$
b	Edullinen	$\gamma_{G,spb}$	0,9
Muuttuva			
a	Epäedullinen	$\gamma_{Q,dst}$	$1,5 K_{FI}$
b	Edullinen	$\gamma_{Q,spb}$	0
a	<i>kaatava kuorma</i>		
b	<i>vakauttava kuorma</i>		

Kohteissa, joissa kuormitusyhdistelmiin sisältyy enemmän kuin yksi muuttuva kuorma, tulee jokin muu kuin määräävä kuorma kertoa kuorman yhdistelykertoimella ψ_0 . Kuormayhdistely kertoimet esitetään taulukossa 4. (15, s.36.)

TAULUKKO 4. Kuormienyhdistely kertoimet (15, s.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

4 ANTURAN GEOTEKNINEN MITOITUS

Maanvaraisen anturan geotekninen kantokestävyys lasketaan eurokoodin mukaan osavarmuusmenetelmällä murtorajatilassa. Murtorajatilamenettelyn DA2:n ja DA2*:n mukaisten rakenteellisten (STR) tai geoteknisten (GEO) rajatilatarkasteluiden osavarmuusluvut on esitetty kansallisen liitteen SFS EN 1997- 1 taulukossa A.3 (FIN) (15, s.36). Vanha kokonaisvarmuusmenetelmä on poistumassa käytöstä. Painuma määritetään käyttörajatilassa sille määritetyillä kuormitusyhdistelmillä (1, s.113.)

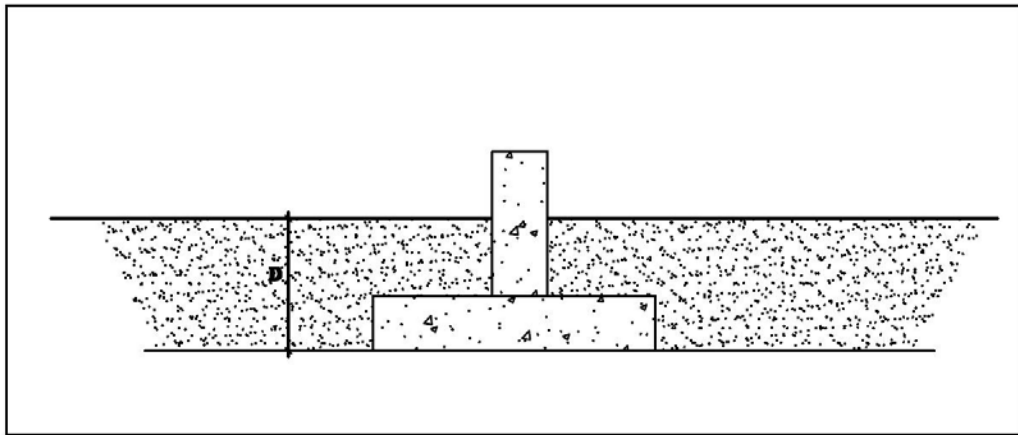
4.1 Maaparametrit

Geotekniseen suunnitteluun kuuluu maapohja tietojen hyödyntäminen. Ennen rakentamista geoteknikko tekee tarvittavat kokeet sekä mittaukset, joiden perusteella selvitetään tiedot maapohjasta. Maapohjatietoihin kuuluvat esimerkiksi koheesio, kitkakulma eli nykyään leikkauskestävyyskulma, maan tilavuuspaino perustamistason ylä- ja alapuolella, pohjaveden korkeus, routaraja ja maa-aineksen rakeisuus. (5, s.33.)

4.2 Perustamissyvyys

Perustamissyvyys (kuva 2) määritetään olevan tarkasteltavan perustuksen alapinnan taso, mutta se voidaan määrittää myös maanpinnan ja poistetun maa-aineksen pohjan välisenä mittana. Perustusten suunnittelussa perustamissyvyuden valinnalla on olennainen osa, sillä anturan mitoissa voidaan säästää sen mukaan miten syvälle perustus tehdään. (3, s.1.)

Perustamissyvyys voidaan jakaa kahteen kategoriaan, joita ovat matalaperustukset sekä syväperustukset. Matalaperustukset ovat nimensä mukaisesti lähellä maanpintaa erityisesti routarajan yläpuolelle, routivaan maahan perustettuja rakenteita, kuten laatta- ja anturaperustukset. Syväperustukset perustetaan routarajan alapuolelle, esimerkkeinä ovat kasuunit ja paaluperustukset. (3, s.1.)



KUVA 2. Perustamissyvyys (D)

4.3 Maankantokestävyys

Maan kantokestävyys tarkoittaa maankantokykyä käyttö- ja murtorajatilassa. Murtorajatilassa lasketaan kantokestävyuden arvo ja käyttörajatilassa painumat sekä käyttöä haittaavat vauriot. (10, s.407.)

Rakennesuunnittelijan tehtävänä on mitoittaa anturan kantokestävyys murtorajatilassa tiettyjen geoteknisten parametrien sekä alustavan anturan koon perusteella. Suunnittelijana voi toimia myös geotekninen asiantuntija. Yleensä kuitenkin geotekninen asiantuntija toimii vaativien kohteiden suunnittelijana sekä tarkastajana. (10, s.407.)

Eurokoodissa on esitetty kolme erilaista maan kantokestävyuden määrittämiseen tarkoitettua menetelmää, joista kaksi on Suomessa kansallisen liitteen määrittämiä käytettäväksi. Mitoitustapa 1 ei ole käytössä Suomessa. Paalu- ja laattaperustusten, ankkureiden, tukirakenteiden ja tässä tapauksessa anturaperustusten mitoituksessa käytetään mitoitustapaa 2. Mitoitustapa 3 eli DA3 on tarkoitettu luiskien ja kokonaisvakavuuden laskentaan. Tässä insinööriyössä DA3 -menetelmä sivuutetaan ja keskitytään DA2 -menetelmään. (1, s.53.)

Suomen kansallinen liite mahdollistaa DA2 -menetelmälle kaksi erilaista käyttötapaa, joita merkitään DA2 sekä DA2*. Käytettäessä DA2*-mitoitustapaa, laskelmat tehdään kokonaisuudessaan ominaisarvoilla ja osavarmuuslukuja käytetään vasta laskelmien lopussa tarkistettaessa murtorajilaehto. Silloin on huomioitava erityinen tarkkuus perustuksen vakavuuden tarkistamiseen. DA2 -menetelmässä osavarmuusluvut lasketaan heti alusta mukaan. Laskennallisesti DA2 -menetelmä on varmemmalla puolella kuormien ollessa epäkeskisiä, mutta Suomen kansallinen liite ohjeistaa suositeltavaksi DA2*-menetelmän, sillä siinä pysyvät kuormat oletetaan epäedullisiksi. Keskeisesti kuormitettuja anturoita laskettaessa menetelmien välillä ei ole eroja. (1, s.53.)

4.4 Pohjapaine

Murtorajatilan mitoittavassa pohjapaineen kaavassa 4 huomioidaan epäedullisin mitoituskuorma sekä mahdollinen epäkeskisyys. Yksinkertaistuksena suunnittelussa pohjapaine anturan alla katsotaan olevan tasaisesti jakaantunut. (4, s.395.)

$$\sigma_k = \frac{V_{Ed}}{A'}$$

KAAVA 7

V_{Ed} = pystysuuntainen mitoituskuorma

A' = anturan tehollinen pinta-ala

Pystykuormiin huomioidaan myös pilarianturan omapaino ja yläpuoliset maa-kerrokset, jotka vähentävät hieman kokonaiskuormituksen epäkeskisyyttä. Tämän seurauksena kuitenkin anturan tehollinen pinta-ala suurentuisi, joten vaikutus jätetään huomioimatta. (4, s.394.)

Painuman ollessa määräävä tekijä maan kantavuudessa käytetään käyttörajatilan mitoituspohjapainetta perustuksen minimikoon aiheuttamien painumien laskemiseksi. Kuormituksena käytetään käyttörajatilan pitkäaikaisia kuormia. (1, s.113.)

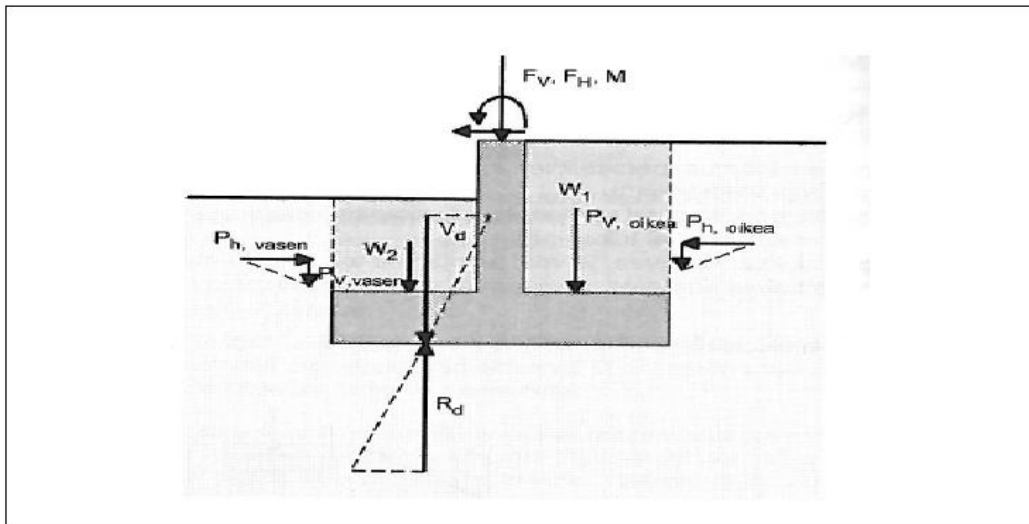
4.5 Murtorajatila

4.5.1 Geotekninen kantokestävyys

Murtorajatilassa lasketaan perustukselle tulevat kuormat (kuva 3) kerrottuna osavarmuusluvulla. Maapohjan kestävyys ei saa ylittää anturan epäedullisinta kuormitusta.

$$V_d \leq R_d$$

KAAVA 8



KUVA 3. Kantokestävyys (1, s.104)

RIL 207- 2009 mukaan seuraavan epäyhtälön (kaava 8) tulee toteutua kaikissa murtorajatilissa.

R_d = maan kestävyuden mitoitusarvo, joka on jaettu osavarmuusluvulla $\gamma_{R,v}$

V_d = anturan epäedullisin kuorma

Kantokestävyuden ominaisarvoon vaikuttavat osavarmuusluvut antura- ja laattaperustuksille esitetään taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Kestävyyden osavarmuusluvut (STR/GEO) (1, s.52)

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

Kantokestävyuden mitoitusarvo saadaan laskettua kaavasta 6.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R} \quad \text{KAAVA 9}$$

R_k = kantokestävyuden ominaisarvo

γ_R = kantokestävyuden osavarmuusluku

Kantokestävyys avoimissa olosuhteissa eli kitkamaissa määritetään kaavalla 7.

$$\frac{R}{A} = c' * N_c * b_c * s_c * i_c + q' * N_q * b_q * s_q * i_q + 0,5 * \gamma' * B * N_\gamma * b_\gamma * s_\gamma * i_\gamma \quad \text{KAAVA 10}$$

Koheesion ja kitkakulman mitoitusarvot lasketaan kaavoista 11 sekä 12.

$$c' = \frac{c'_k}{\gamma_c} \quad \text{KAAVA 11}$$

$$\phi' = \frac{\phi'_k}{\gamma_\phi} \quad \text{KAAVA 12}$$

Kantavuuskertoimet esitetään kaavoissa 12 - 14.

$$N_q = e^{\pi \tan(\phi)} * \left(\tan\left(45 \deg \frac{\phi'}{2}\right) \right)^2 \quad \text{KAAVA 13}$$

$$N_c = (N_q - 1) * \cot(\Phi') \quad \text{KAAVA 14}$$

$$N_\gamma = 2 * (N_q - 1) * \tan(\Phi') \quad \text{KAAVA 15}$$

Anturan muodosta riippuvat kertoimet esitetään kaavoissa 16 - 18.

$$s_q = 1 + \frac{B_t}{L_t} * \sin(\Phi') \quad \text{KAAVA 16}$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 * \frac{B_t}{L_t} \quad \text{KAAVA 17}$$

$$s_c = \frac{(s_q * N_q - 1)}{N_q - 1} \quad \text{KAAVA 18}$$

Vaakakuorman kertoimet suuntaan B sekä L, esitetään kaavoissa 19 ja 20.

suunnassa B_t .

$$m_B = \frac{2 + \frac{B_t}{L_t}}{1 + \frac{B_t}{L_t}} \quad \text{KAAVA 19}$$

suunnassa L_t .

$$m_L = \frac{2 + \frac{L_t}{B_t}}{1 + \frac{L_t}{B_t}} \quad \text{KAAVA 20}$$

Kaavoissa 21 - 23 esitetään kertoimet vaakakuorman H aiheuttamalle kaltevuudelle.

$$i_q = \left(1 - \frac{H_d}{V_d + A * c' * \cot(\Phi)}\right) m_B \quad \text{KAAVA 21}$$

$$i_{\gamma} = \left(1 - \frac{H_d}{V_d + A * c' * \cot(\phi)}\right)^{mB+1} \quad \text{KAAVA 22}$$

$$i_c = \frac{i_q - (1 - i_q)}{N_c * \tan \phi'} \quad \text{KAAVA 23}$$

Pohjan kaltevuuskertoimet anturalle esitetään kaavoissa 24 ja 25.

$$b_q = b_{\gamma} = (1 - \alpha * \tan \phi')^2 \quad \text{KAAVA 24}$$

$$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c * \tan \phi'} \quad \text{KAAVA 25}$$

Yläpuolisten maakerrosten aiheuttama jännitys perustuksen pohjalle lasetaan kaavasta 26.

$$q' = \gamma * D \quad \text{KAAVA 26}$$

4.5.2 Liukumiskestävyys

Anturan pohjaa pitkin tapahtuvan liukumurtuman todennäköisyys kasvaa, jos anturan kuormitus ei ole kohtisuorassa anturan pohjaa vasten (1, s.108). Liukumiskestävyys tarkistetaan kaavan 27 avulla.

$$H_d \leq R_d + R_{p;d} \quad \text{KAAVA 27}$$

H_d = kaikkien aktiivisten voimien mitoitusarvot, jotka kohdistuvat maasta perustukseen

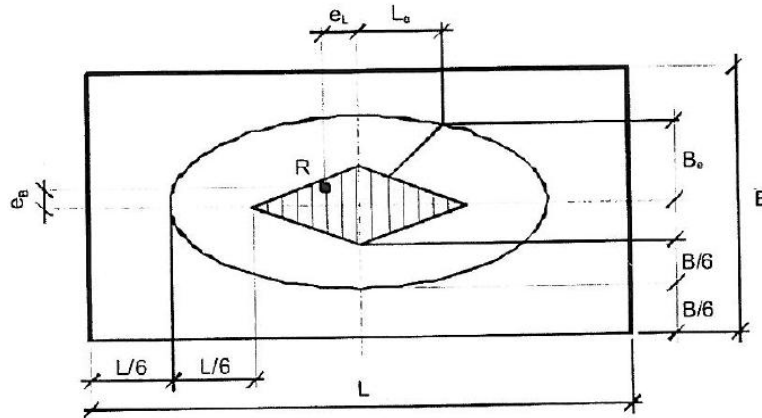
R_d = kestävyuden mitoitusarvo

$R_{p;d}$ = perustuksen sivuun kohdistuva liukumista vastustava maanpaine. Kuitenkin tämä jätetään monesti huomiotta, sillä edullisen kuorman vaikutus voi ajan mittaa hävitä.

4.5.3 Voimakkaasti epäkeskiset kuormat

Kun kuormituksen epäkeskisyys on suurempi kuin $1/3$ anturan leveys, täytyy mitoittaminen tehdä varoen (kuva 4). Toimenpiteisiin kuuluvat mitoitusarvojen uudelleen tarkastaminen ja 100 mm:n työn aikaisten toleranssien huomiointi, ellei työsuoritukseen panosteta erityistä huomiota. (1, s.110.)

Mitoitusmenetelmä DA2* ei salli murtorajatilan kantokestävyyden laskennassa $1/3$ anturan leveyden ylittäviä epäkeskisyyskuormia lainkaan, sillä menetelmässä osavarmuusluvut sovelletaan vasta laskujen lopussa. (1, s.109.)



KUVA 4. Epäkeskisyys (1, s.110)

Kun kuormitusresultantti (kuva 4.) sijaitsee ellipsin alueella, epäkeskisyys on alle $1/3$ anturan leveydestä (1, s.110). Kuormitusresultantti voi sijaita myös vinoneliön sisällä, silloin anturan koko pohjan ala on puristettu (1, s.110).

Vinoneliön kulmapisteet ovat $1/3$ leveyden päässä anturan reunoista. Ellipsin reunan määrää kaava 25 (1, s.109).

$$\left(\frac{L_e}{L}\right)^2 + \left(\frac{B_e}{B}\right)^2 = \frac{1}{9}$$

KAAVA 28

4.6 Käyttörajatilamitoitus

4.6.1 Painuma

Painuman laskeminen on tärkeää, koska maanvaraiset perustukset painuvat maakerroksissa. Painumassa maapohja puristuu perustuksen alla ja sen seurauksena perustus painuu. Maaperästä ja kuormituksesta riippuen painumaa voi tapahtua usealla tavalla, joten ne on jaettu käyttäytymisen perusteella osiin. Painumalajeja ovat alkupainuma, konsolidaatiopainuma, jälkipainuma sekä plastisten ja kimmoisten sivusiirtymien aiheuttamat painumat. Rakenteen kokonaispainuma on edellä mainittujen summa. (14, s.207.)

Saville ja silteille lasketaan Suomessa aina geotekninen kantavuus painuma- ja kantokykylaskelmien perusteella. (1, s.111.)

4.6.2 Painumalajit

Alkupainuma tarkoittaa maaperässä tapahtuvia kimmoisia muodonmuutoksia. Kimmoinen muodonmuutos voi vielä palata entiseen muotoonsa, jos kuormitus maaperästä poistetaan. Tässä työssä maapohja on kitkamaa, joten alkupainumassa tapahtuu rakeiden siirtymistä sekä ilman ja veden poistumista huokosista. Tämän seurauksena kitkamaissa muodon muutokset lasketaan yleensä alkupainumana tai konsolidaatiopainumana. (14, s.207.)

Konsolidaatiopainumaksi kutsutaan maapohjan tiivistymisestä aiheutuvaa painumaa. Kyseisessä ilmiössä maapohja tiivistyessään menettää osan vesi- sekä ilmapitoisuudestaan. Savilla ja muilla hienoainesta sisältävillä maaperillä konsolidaatiopainuma on hyvin hidasta ja kestää jopa vuosia. Karkeara-keisilla maaperillä kyseinen ilmiö tapahtuu nopeasti ja se onkin joskus vaikeaa erottaa alkupainumasta. (14, s.209.)

Jälkipainuman alkamisen fysikaalinen selitys on lisäjännityksen aiheuttaman huokosveden ylipaineen purkautuminen kokoonpuristuvista maakerrokista. Kuitenkin jälkipainuman merkitys tässä työssä on minimaalinen ja sen laskentamenettely yleisesti on vaikeaa, sillä sen erottaminen konsolidaatiopainumasta on hankalaa. Vaikean laskennan vuoksi jälkipainuma otetaan huomioon riittävällä varmuudella murtoon nähden. (17, s.43.)

Plastisista ja kimmoisista sivusiirtymistä aiheutuvat painumat ovat olennaisia, kun varmuus maapohjan murtumiseen on pieni. Maanvaraiset asuin- ja teollisuusrakennukset tulisi mitoittaa sellaisella varmuudella, että kyseisen ilmiön merkitys häviää. (17, s.43.)

Kokonaispainuma lasketaan alkupainuman, konsolidaatiopainuman, jälkipainuman sekä plastisten ja kimmoisten sivusiirtymien summana. Sallittu painuma on arvo, joka valitaan kohteen vaatimien kriteerien mukaan. Eurokoodi 7:n antaa sallitulle painumalle arvon 50 mm, joka on usein miten hyväksyttävä mitta normaaleille rakenteille, joissa perustukset sijaitsevat erillään. Tätä suositeltavaa arvoa suurempia painumia voidaan hyväksyä, jos kulmakiertymät pysyvät sallituissa rajoissa ja kokonaispainumat eivät aiheuta ongelmia rakenteeseen.

4.6.3 Painumanlaskenta

Painuma lasketaan pitkäaikaisen kuormitusyhdistelmän pohjapaineen arvolla käyttörajatilassa, joka huomioi kuormien pitkäaikaisuuden sekä mahdolliset muodonmuutokset. Laskelmilla osoitetaan perustuksen kestävyys teknisesti ja arkkitehtuurisesti eli rajoittamalla painumia ja painumaeroja (12, s.365.)

Painumien laskenta on vaikeaa ja niissä tarvittavien menetelmien määrittäminen on standardeissa jätetty suunnittelijan harkinnan varaan. Tämän takia jokaiselle kohteelle suunnittelijan on itse valittava sopivaan teoriaan perustuva laskentamenetelmä, joka ottaa huomioon mahdollisimman tarkkaan eri maa-

kerrosten välissä tapahtuvia fysikaalisia ilmiöitä painumien yhteydessä. Kuitenkin maaperän painumien mallintaminen täysin tarkasti on mahdotonta, koska maaperän ja perustetun rakenteen välille syntyy niin paljon erilaisia ilmiöitä. (12, s.365.)

Painumalaskenta menetelmä Robot Structure Analysis Professional -laskentaohjelmassa perustuu lineaariseen kimmoteoriaan. Laskenta esitetään jännityksille Boussinesqin kaavalla sekä superposition periaatteella. Kaavassa maakerrokset jaetaan eri kerroksiin maalajin perusteella sekä lasketaan tiettyyn kerroksen pisteeseen ulkoisten kuormien aiheuttama jännitys. Tässä tapauksessa kuormitukset ovat perustuksen omapaino, ylärakenteelta tuleva normaalivoima ja päällä olevan maanpaino. Pohjaveden sijaitessa lähellä perustusta ohjelma huomioi siihen Arkhimedeen paineen ja veden tuoman painon mukaan.

Painuman laskentaan on käytössä monia eri kaavoja. Tässä työssä käytetään käsin laskettavaa menetelmää monikerroksisen maapohjan muodonmuutoksien määrittämiseen. Käytettävä menetelmä on Janbun tangenttimoduulimenetelmä. Janbun tangenttimoduulimenetelmässä painuma lasketaan erikseen maan konsolidoituneelle ja ylikonsolidoituneelle kohdalle sekä muille eri maalajikerroksille. Loppupainuma on kaikkien edellä laskettujen painumien summa. Janbun tangenttimoduulimenetelmässä ovat käytössä kaavat 26 ja 27. (14, s.218 - 219.)

$$\varepsilon = \frac{1}{m\beta} \left[\left(\frac{\sigma'}{\sigma_v} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma_c'}{\sigma_v} \right)^\beta \right] \quad \text{KAAVA 29}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'}{\sigma_c'} \quad \text{KAAVA 30}$$

Tilanne, jossa β on eri suuri kuin 0, käytetään kaavaa 26. Kun β on yhtä suuri kuin 0, käytetään kaavaa 27.

ε = maakerroksen suhteellinen kokoonpuristuma

m = moduuliluku

β = jännityseksponentti

σ = vertailujännitys, 100 kPa

σ' = maan tehokas pystyjännitys (kPa)

σ'_c = maan tehokas konsolidaatiojännitys (kPa)

5 ANTURAN RAKENNETEKNINEN MITOITUS

Geoteknikko tai rakennesuunnittelija antaa alustavat minimimitat anturalle murto- ja käyttörajatilan mukaan. Sopivien mittojen perusteella rakennesuunnittelija aloittaa rakenneteknisen mitoituksen. Murtorajatilassa rakennesuunnittelija mitoittaa anturan taivutukselle, leikkaukselle- ja lävistykselle eli laskee tarvittavan raudoituksen. Käyttörajatilan tarkasteluun kuuluu halkeamaleveyden mitoittaminen sallittuun arvoon.

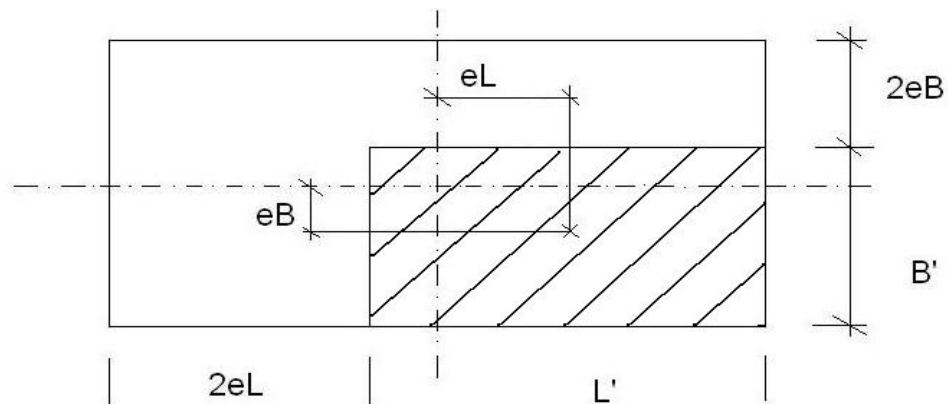
Anturaperustukselle on RIL 207 - 2009 mukaan tiettyjä vähimmäisvaatimuksia seuraavasti:

- Pienin mahdollinen perustamissyvyys anturalle on 0,5 m mitattuna läheisen luonnonmaan tai viereisen lattiantasosta.
- Vierekkäisten perustusten välisen tason enimmäiskaltevuus on 1:3.
- Minimileveys on 0,3 m.
- Minimikoko on $0,4 * 0,4 \text{ m}^2$.

Anturan laskennassa kappale oletetaan jäykäksi, joten taipumia ei huomioida (13, s.33).

Epäkeskeisesti kuormitetuksi anturaa kutsutaan silloin, kun on syntynyt tilanne, jossa antura joutuu ottamaan vastaan vaakavoimia, kuten esimerkiksi mastopilarit tai sivusiirtyvät kehät. Tällaisissa tapauksissa on hyvä vaihtoehto muuttaa anturan muoto neliöstä suorakulmaiseksi, koska suorakulmainen antura ottaa vastaan vaakavoimat paremmin. Vaakavoiman suunnasta riippuen hyödynnetään anturan suorakulmaisuutta. Kohtuuttomien anturarakenteiden välttämiseksi voidaan myös lisätä perustamissyvyyttä antamaan vakavuutta. (4, s.396.)

Keskeisesti kuormitetuissa anturoissa sen **teholliseksi pinta-alaksi** lasketaan anturan todellinen pinta-ala. Epäkeskeisesti kuormitetuilla anturoilla tehollinen leveys lasketaan kahden suunnan epäkeskisyys vähennettynä anturan todellisesta leveydestä kuten kuvassa 5. Pinta-ala pohjassa on tehollisten mittojen tulo. (1, s.106.)



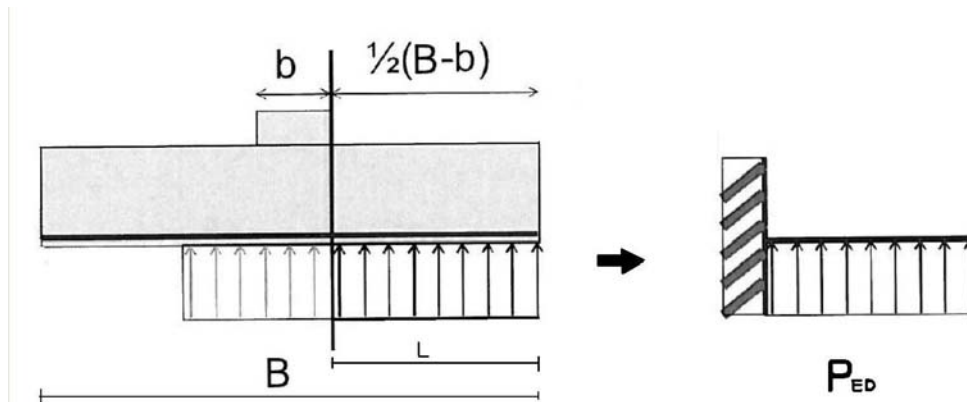
KUVA 5. Tehollinen pinta-ala (1, s.106)

5.1 Murtorajatila

5.1.1 Taivutusmitoitus

Anturan pääraudoitus tulee mitoittaa taivuttavan suunnan mukaan, jos pilarianturaan kohdistuu kahden eri akselin suhteen epäkeskinen normaalivoima. Tällaisissa tapauksissa käytetään yhdistettyjä rasiuksia. Taivutus tarkastellaan molempiin suuntiin myös silloin, kun pilarianturan muoto ei ole neliö. (4, s.395.)

Taivutusraudoitukselle momentti voidaan laskea ulokkeen periaatteella, jossa ulokkeen pituus saadaan anturan laskettavan sivun mitan puolikkaan ja pilarin sivu mitan puolikkaan vähennyslaskusta, kuten kuvassa 6 esitetään. Näin saadaan taipuvan ulokkeen pituus.



KUVA 6. Murtorajatilan pohjapaine ulokkeella

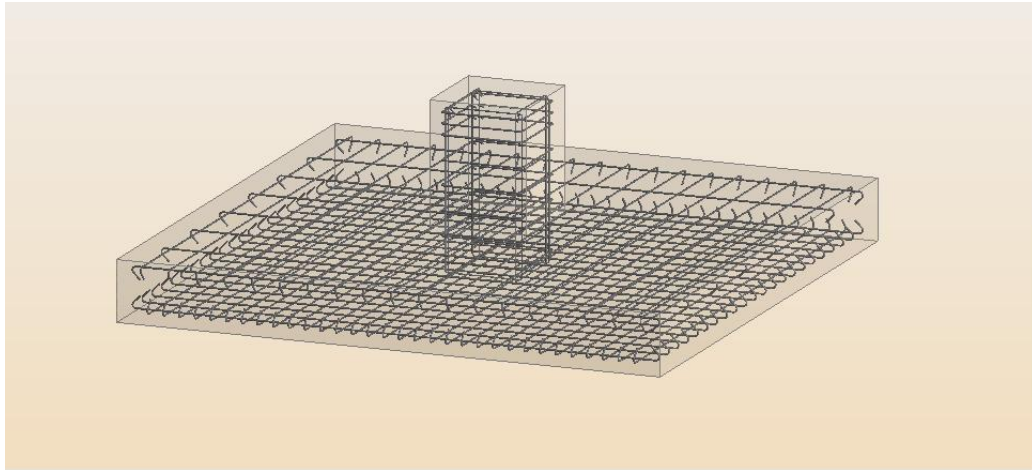
Momentti kaavassa 31 esitetään ulokkeen raudoituksen laskentaa varten.

$$m_{ED} = p_{ED} * \frac{L^2}{2}$$

KAAVA 31

5.1.2 Raudoitus

Pilarianturalle pääraudoitus määrittyy murtorajatilan taivutusrasituksilla ja käyttörajatilan ulkonäköön liittyvällä halkeilun rajoittamisella sekä vaadittavalla minimiraudoituksella. Raudoitus laitetaan aina kahteen suuntaan. Kuvassa 7 on esimerkki raudoitetusta anturasta.



KUVA 7. Pilarianturan raudoitus

Seuraavaksi esitetään anturan raudoituksen mitoitus EN 1992-1-1 mukaan. Raudoituksen minimivaatimus on kaavoista 32 ja 33 määräävämpi.

$$A_{s,min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * d \quad \text{KAAVA 32}$$

$$A_{s,min} = 0,0013 * bd \quad \text{KAAVA 33}$$

d = raudoituksen tehollinen korkeus tulee kaavasta 34

f_{ctm} = betonin keskimääräinen vetolujuus suorassa vedossa. Esitetään kaavassa 36.

f_{yk} = betoniteräksen myötölujuus

$$d = h - \frac{\phi}{2} - c_{nom} \quad \text{KAAVA 34}$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad \text{KAAVA 35}$$

$$f_{ctm} = 0,3 * \left(\frac{f_{ck}}{MPa} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{KAAVA 36}$$

suhteellinen momentti lasketaan kaavalla 34.

$$\mu = \frac{m_{ED}}{d^2 * f_{cd}} \quad \text{KAAVA 37}$$

m_{ED} = leveydellä L vaikuttava mitoitusmomentti, tulee kaavasta 34

f_{cd} = betonin mitoituspuristuslujuus, tulee kaavasta 38

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} * f_{ck}}{\gamma_c} \quad \text{KAAVA 38}$$

Taulukosta 6 saadaan kerroin α_{cc} , jolla huomioidaan puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät alentavasti ja muut epäedulliset tekijät. Suomessa käytetään kerrointa 0,85. (6, s.35.)

TAULUKKO 6. Tavalliset murtorajatilojen osavarmuusluvut (6, s.26)

Materiaali	Betoni γ_c	Teräs γ_s
Osavarmuuskerroin	1,5	1,15

Betonin lujuudelle on esitetty taulukossa 7:n sen lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet.

TAULUKKO 7. Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet (6, s.30)

Lujuusluokka	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck} (N/mm ²)	25	30	35	40	45	50

γ_c = betonin osavarmuusluku, taulukossa 6

γ_s = teräksen osavarmuusluku, taulukossa 6

tehollisen puristuspinnan korkeus saadaan kaavasta 39.

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2 * \mu} \quad \text{KAAVA 39}$$

vaadittu raudoitusalatulee kaavasta 40.

$$A_s = \beta * d * \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad \text{KAAVA 40}$$

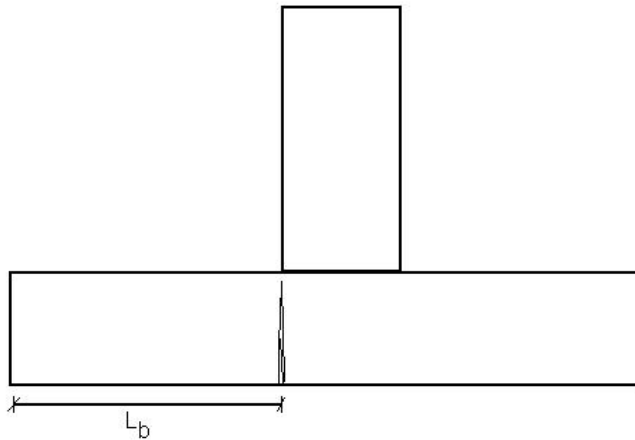
Lopullinen raudoitus valitaan vaaditun- tai minimiraudoituksen suuremman arvon väliltä kaavasta 41.

$$A_{s,x} = \max \left(\begin{matrix} A_s \\ A_{s,min} \end{matrix} \right) \quad \text{KAAVA 41}$$

Pääraudoituksen toinen suunta lasketaan edellä mainitun Eurokoodin 1992-1-1 mukaan. Tällä kertaa tehollinen korkeus on pienempi, sillä kahden suunnan raudoitukset menevät päällekkäin ja laskettavan suunnan d-mitta pienee. Uusi d-mitta lasketaan tankopaksuus vähennettynä alkuperäisestä d-mitasta.

5.1.3 Raudoituksen ankkurointi

Pääraudoituksen ankkuroinnin tehtävä on siirtää tartuntavoimat betonille. Raudoituksen toteutuva ankkurointipituus on (L_b), jota Eurokoodissa kutsutaan ankkurointipituuden perusarvoksi. Tämän arvon pitää olla suurempi kuin ankkurointipituuden mitoitusarvon (L_{bd}). Ankkurointipituuden perusarvo on se mitta, johon rauditus ulottuu määräävästä halkeamasta betonin sisälle. Kuvassa X määräävä pystysuora taivutus halkeama. (6, s.131.)



KUVA 8. Ankkurointipituus L_b

Raudoituksen ankkurointi esitetään EN 1992-1-1, Eurokoodi 2:ssa, jossa mitoitusehto ankkuroinnin laskemiseen tulee kaavasta 42.

$$L_b \geq L_{bd}$$

KAAVA 42

Tartuntajännitys murtorajatilassa lasketaan kaavalla 43.

$$f_{bd} = 2,25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{ctd}$$

KAAVA 43

Ankkurointipituus täydelle myötövoimalle tulee kaavasta 44.

$$L_{b,rqd} = \frac{\varphi}{4} * \frac{f_{yd}}{f_{bd}}$$

KAAVA 44

Betonipeitteeseen liittyvät arvot saadaan kaavoista 45 ja 46.

$$\alpha_2 = 1 - 0,15 * \frac{c_d - \varphi}{\varphi} \quad \text{KAAVA 45}$$

$$c_d = c_{nom} + \frac{\varphi}{2} \quad \text{KAAVA 46}$$

Ankkurointipituuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla 44.

$$L_{bd} = \alpha_2 * L_{b,rqd} \quad \text{KAAVA 47}$$

5.1.4 Leikkaus-lävistysmitoitus

Perustus voi leikkautua tai lävistyä. Lävistymisessä anturaan syntyy kartiomainen murtovyöhyke pilarin ympärille. Leikkausmurtumassa vastaavaa kartiomaista murtovyöhykettä ei synny, vaan murtohalkeama on suoraviivainen kuten seinäanturalla.

Mitoitusmenettely jaetaan leikkausraudoitettaviin ja leikkausraudoittamattomiin rakenteisiin. Normaaleissa anturaperustusten mitoitus tapauksissa tavoitteena on tehdä leikkausraudoittamaton rakenne. Monessa tapauksessa riittääkin, että anturan paksuutta kasvatetaan, jotta pilari ei läpi leikkaudu ja siten tarvitse leikkausraudoitusta. Tapaukset, joissa anturan paksuus on rajoitettu, tehdään leikkausraudoitus laskenta EC standardin EN 1992-1-1 kohdan 6.2.3 mukaan.

5.2 Käyttörajatilamitoitus

Rakenneteknisessä käyttörajatilamitoituksessa lasketaan halkeilu ja halkeamaleveys. Kuormitusyhdistelminä toimivat ominaisyhdistelmä, tavallinen yhdistelmä ja pitkäaikaisyhdistelmä. Kaavat on esitelty luvussa 4.2. Niiden mukaan lasketaan käyttörajatilan kuormitusyhdistelmät.

Halkeilu on yksi käyttörajatilassa esiintyvä ilmiö, ja se tekee betonirakentamisen suunnittelemisesta vaativaa. Betoni ja siitä tehdyt rakenteet halkeilevat aina jonkin verran, joten onkin tarpeen rajoittaa halkeilua ja halkeamaleveyttä tiettyihin rajoihin. Halkeamaväli ja halkeamaleveys voidaan rajoittaa tarpeeksi pieniin arvoihin oikeanlaisella suunnittelulla, betonin koostumuksella, toteutuksella ja jälkihoidolla. (6, s.117.)

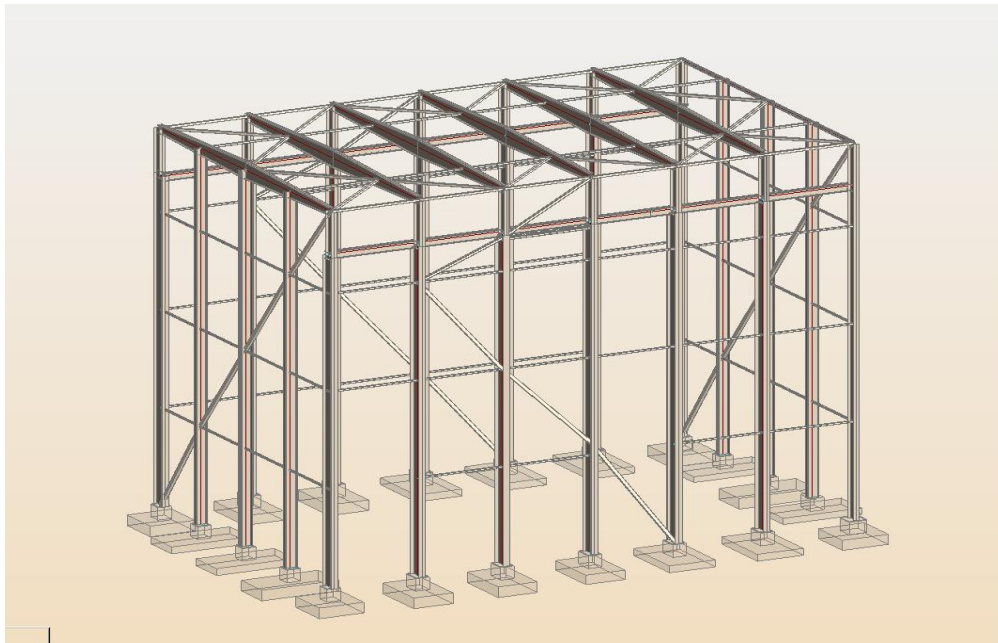
Halkeamat vaikuttavat alentavasti betonin laatuun ja sen seurauksena säilyvyyteen. Säilyvyyden kannalta on olennaista, että betonin pinta on mahdollisimman tiivis, kuitenkin tilanteena täysin tiivis betonipinta on mahdoton. Halkeamat lisäävät aina vedenläpäisevyyttä, joten betonin fysikaalinen sekä kemiallinen suoja raudoitukselle heikkenee. Toinen syy halkeilun rajoittamiseen on ulkonäkö. Anturoissa ulkonäkö on kuitenkin toissijainen, vaikka maan päälle jäävien anturan osien ulkonäköön täytyykin kiinnittää huomiota. Rasitusluokasta ja kuormitusyhdistelmistä riippuen halkeamaleveys rajoitetaan rakenteen suunnittelussa sopivaan arvoon. (6, s.118.)

6 TALVIVAARAN HIENOMURSKAAMO

Tässä insinööriyössä käsitellään Sotkamon kunnassa sijaitsevaa Talvivaa-
ran kaivoksen hienomurskaamon erästä pilarianturaa. Kuvassa 8 esitetään
rakennemalli hienomurskaamosta. Lähtötietoina tiedetään betonin suunnitte-
luikä, 50 vuotta, sekä perustamistapa, joka on maanvarainen. Anturalle mää-
ritetään sopivat sivumitat B ja L, jotta voidaan todeta riittävä varmuus murto-
rajatilassa sekä rajata rakenteen painumat sallittuun arvoon.

Maapohjalle on tehty pohjatutkimukset paino-, heijari-, ja porakonekairauksil-
la. Tutkimusten mukaan maakerrokset maan päältä luettuna ovat turve, löyhä
pintamoreeni, tiivistynyt pohjamoreeni ja alimmaisena peruskallio. Maaker-
rosten maalaji on silttinen hiekkamoreeni, joka on routivaa tai voimakkaasti
routivaa.

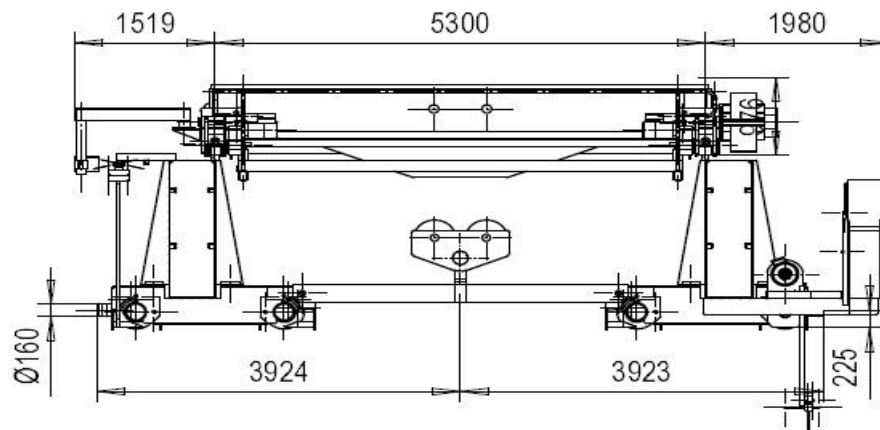
Hienomurskaamon rungon ja koneiden alle on tehty massanvaihto pien-
louheella, jonka raekoko on maksimissaan 300 mm. Täyttö on suoritettu ker-
roksittain tiivistäen, kerrospaksuuden ollessa enimmillään 600 mm. Salaoji-
tusta ei ole käytetty.



KUVA 9. Hienomurskaamon rakennemalli (Pöyry Finland Oy)

Talvivaaran hienomurskaamo on muodoltaan kuutiomainen, joten siihen vaikuttaa suuri määrä erilaisia kuormia. Kuvassa 9 nähdään esimerkiksi hienomurskaamon sisällä oleva nosturirata, joka aiheuttaa perustuksille vaakasuuntaisia voimia. Nosturin kulkiessa hallissa edestakaisin ja aika ajoin pysähtyen, vaakavoimat muuttuvat. Tässä esimerkkitapauksessa valittiin tietty pilariantura, johon kohdistuu normaalivoimaa, vaakavoimia nosturista, voimia sisäisestä sekä ulkoisesta paineesta ja tuulesta aiheutuen. Lisäksi nosturin jarrukuorma on huomioitu mukaan.

Kantokestävyyden mitoituksessa vaakavoimien suuruus ja perustamissyvyys ovat tärkeässä roolissa. Vaakavoimat pyrkivät kaatamaan anturaa, mutta pystyvoimat tukevat sitä. Tämän seurauksena vaarallisin mitoitus tulee, kun kuormitusyhdistelmien vaakavoimat lasketaan maksimina ja pystykuormat miniminä. Halliin on laskettu lukuisia eri kuormitusyhdistelmiä, joista vaarallimmat, kuten edellä mainittiin, valitaan mitoitukseen.



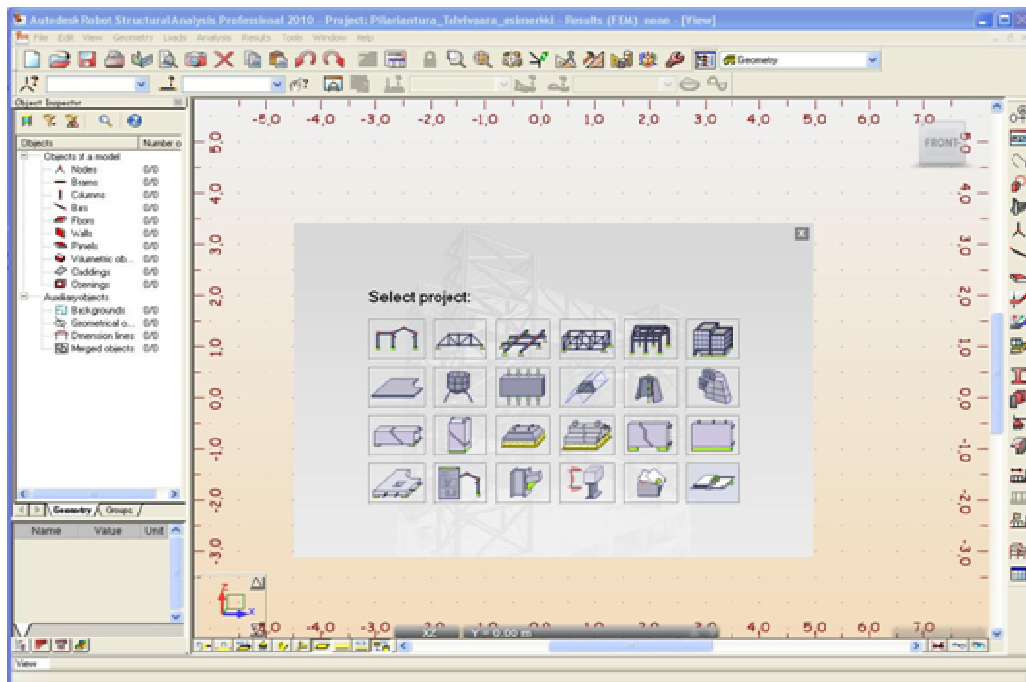
KUVA 10. Nosturirata edestäpäin katsottuna (Pöyry Finland Oy)

7 LASKENTA

Autodesk Robot Structural Analysis Professional on insinööritoimistoissa käytössä oleva rakenteiden mitoitusohjelma (kuva 10). Ohjelmalla on mahdollista tutkia monimutkaisten rakenteiden lineaarista ja epälineaarista käyttäytymistä, jotka käsin laskemalla olisi hyvin hidasta analysoida. Hyvinä esimerkkeinä suurista kohteista ovat terästehtaat ja kattilarakennukset. (18, s.1.)

Laskentaprosessissa Autodesk Robot Structural Analysis Professional käyttää automaattista elementointia rakenteen osiin jakamisessa, epälineaarisia algoritmeja sekä maakohtaisia suunnittelustandardeja. (18, s.1.)

Suunnittelussa rakenteiden mallintaminen ja laskeminen ovat sidoksissa toisiinsa. Rakenne voidaan mallintaa erilaisilla ohjelmilla, kuten Tekla Structures, ja viedä tämän avulla luotu malli Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelmaan laskettavaksi. (18, s.1.)



KUVA 11. Autodesk Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelma

7.1 Laskelmien sisältö

Tässä työssä laskennan kohteena on tavallinen pilariantura. Lähtötiedot on esitetty aiemmin. Geotekninen kantokestävyys on laskettu käsin sekä Autodesk Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelmalla avointen olosuhteiden kantokestävyyskaavalla näin ollen kaavaa on sovellettu esimerkkikohteen kitkamaahan.

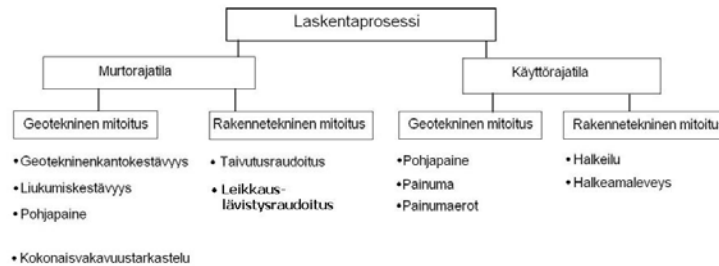
Laskenta-analyysi perustuu murtorajatilassa mitoittavan pystyvoiman aiheuttamaan maksimikuormaan ja maaparametrien mukaan lasketun kantokestävyysarvon vertailuun. Monikerroksisissa maaperissä ohjelma huomio maakerrosten eri ominaisuudet ja laskee kantavuuden löyhimmän maakerroksen parametrien mukaan. Toinen vaihtoehto on vertailla jännitysresultanttia ulkoisten voimien sallittuihin arvoihin, jossa sallitut arvot voidaan analyysistä varten määrittää käsin sopivan suuruisiksi. Tässä työssä käytettiin pystyvoiman aiheuttaman maksimikuorman vertailua maan kantokestävyysarvoon.

Käyttörajan painuman laskennassa Autodesk Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelma käyttää lineaarista kimmoteoriaa, joka esittää jännityksille Boussinesqin kaavalla sekä superposition periaatteella. Menetelmä sopii monikerroksisille maalajeille, kuten myös Janbun tangenttimoduulimenetelmä, johon käsin laskennassa päädyttiin.

Murtorajatiljan taivutusraudoituksen momentti laskettiin käsin pohjapaineen kuormittaman ulokkeen periaatteella. Ulokkeen maksimimomentin avulla laskettiin vaadittu raudoituspinta-ala SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2 mukaan. Myös Autodesk Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelma laskee taivutusraudoituksen vertailulaskelman saman Eurokoodin 1992-1-1 mukaan.

Kokonaisuudessaan laskentaprosessi jaetaan kuvan 11 osoittamalla tavalla. Näin ollen murtorajatilassa määräytyvät anturan mitat ja vaadittu raudoitus-

pinta-ala. Käyttörajan tarkasteluun kuuluvat painumien- sekä halkeilun rajoittaminen. Lisäksi halkeamaleveyden suurin sallittu arvo määritetään.



KUVA 12. Laskentaprosessin jaottelu

7.2 Laskelmien kulku

Mitointi aloitetaan rakennemallin luomisella. Siinä ohjelmaan syötetään pilarianturan mitat. Mitat voidaan lukita jolloin laskentaohjelma ei analyysin jälkeen automaattisesti korjaa niitä omien ehdotusten mukaan. Seuraavaksi määritetään geoteknisiä parametrejä. Ohjelma kysyy, millaisia maakerroksia anturan alle tulee. Tähän taulukkoon valitaan maalajien mukaiset parametrit. Samassa taulukossa asetetaan myös perustamissyvyys sekä pohjaveden korkeus.

Tämän jälkeen syötetään kuormat ja jaetaan ne esimerkiksi pysyviin sekä muuttuviin kuormiin, myös täytön aiheuttama kuorma huomioidaan. Kuormista Autodesk Robot Structural Analysis Professional laskee kuormitusyhdistelmät valitun asetuksen mukaan, tällä kertaa Saksassa käytetyn kansallisen liitteen mukaan. Saksan kansallinen liite on tällä hetkellä laskentaohjelman ainoa käytettävä standardi kantokestävyden laskennassa.

Maatäytön korkeus voidaan asettaa anturalle myös eri kohtiin. Toiselle puolelle- tai neljännesosaan anturasta. Viimeisin vaihe on ilmoittaa ohjelmaan materiaaliominaisuudet, raja-arvot ja ne tiedot mitä halutaan laskuissa huo-

mioida. Esimerkiksi painumien raja-arvoja saa muutettua tai lävistysmitoituksen voi jättää huomioimatta. Lopuksi tehdään analyysi ja tarkastellaan tulokset. Riippuen kohteesta ja tarpeesta voi tuloksista tutkia painumia, raudoituksia, käyttöasteita sekä saada työpiirustuksia.

7.3 Tulokset

Työssä verrattiin geoteknistä kantokestävyyttä, loppupainumaa ja raudoitus-pinta-alaa käsin laskennan sekä laskentaohjelman välillä. Geoteknistä kantokestävyyttä laskettaessa tuloksissa on pieniä eroja. Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelma laskee kuormitusyhdistelmät automaattisesti Saksan kansallisen liitteen mukaan, sillä tällä hetkellä Suomen kansallisen liitteen standardeja ei ole vielä saatavilla ohjelman kirjastoon. Kantavuuskaavaan tulevat lisäkertoimet poikkeavat Suomessa käytetystä kaavasta ja kuormitusyhdistelmien kertoimet ovat hieman erilaiset. Saksan kansallisen liitteen kuormitusyhdistelmien suurempi kerroin kasvattaa epäedullisinta kuormaa ja kantavuuskaavan lisäkertoimet pienentävät maankestävyyden mitoitusarvoa, joten eroa syntyy vain vähän verrattuna käsin laskennan tuloksiin. Anturan mitoiksi saatiin mitoitus tapa 2 kummankin menetelmän perusteella neliönmallinen 4,5 x 4,5 m.

Painumaa tarkasteltaessa erot käsin laskennan ja ohjelman välillä olivat muutamia millimetrejä. Erot painumissa vertailujen välillä syntyvät, kun laskennassa käytettiin kahteen eri teoriaan perustuvaa painumalaskenta kaavaa.

Raudoituksen teräslaatu oli A500HW. Vertailulaskelmien välillä vähimmäis-raudoituksen arvot olivat lähes samat. Eroavaisuuksia tuli vaaditun raudoitus-pinta-alan arvoihin. Oletettavasti erot syntyivät kuormitustapauksien yhteydessä, kun Autodesk Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelma laskee raudoituksen automaattisesti kahteen suuntaan ylä- ja alapinnassa. Käsin laskettuna vertailtava kuormitustapaus ei tarvitse ylä-

pintaan raudoitusta näin ollen vaaditun raudoituksen tulokset eivät ole vertailukelpoisia.

Tarkempia tuloksia on esitetty liitteenä lopussa sekä kerätty yhteenvetona taulukoihin 8 ja 9.

TAULUKKO 8. Vertailutaulukko menetelmällä DA2

Pilariantura (4,5x4,5)m, Kuormitustapaus 1. Vmax, Hmax (6.10b)										
DA2										
	Tehollinen sivumitta		Kantokestävyys DA2		Painuma 6,80 m syvyydellä	Raudoitusala (mm ² /m)				Raudoitusala (mm ² /m)
	Bt (m)	Lt (m)	Vd (kN)	Rd (kN)	s (mm)	Alapuol. Y	Alapuol. X	Yläpuol. Y	Yläpuol. X	As,min
Robot Structural	4,23	3,94	2672,11	24680,95	6,00	1401,00	966,00	806,00	314,00	806,65
Excel	4,22	3,91	2556,20	24494,54	7,55	3751,00		N/A		700,21

TAULUKKO 9. Vertailutaulukko menetelmällä DA2*

Pilariantura (4,5x4,5)m, Kuormitustapaus 1. Vmax, Hmax (6.10b)										
DA2*										
	Tehollinen sivumitta		Kantokestävyys DA2*		Painuma 6,80 m syvyydellä	Raudoitusala (mm ² /m)				Raudoitusala (mm ² /m)
	Bt (m)	Lt (m)	Vd (kN)	Rd (kN)	s (mm)	Alapuol. Y	Alapuol. X	Yläpuol. Y	Yläpuol. X	As,min
Robot Structural	N/A	N/A	2672,11	24680,95	6,00	N/A	N/A	N/A	N/A	806,65
Excel	4,25	3,98	2556,20	25592,12	7,55	N/A	N/A	N/A	N/A	700,21

8 POHDINTA

Tavoitteena oli mitoitaa maanvarainen pilariantura esimerkkikohteesta ja tehdä siihen vertailulaskelmat. Geotekninen kantokestävyys ja vaadittu rauditus laskettiin murtorajatilassa sekä painumat tarkasteltiin käyttörajatilassa. Lisäksi työssä esiteltiin anturan mitoittamiseen liittyvää teoriaa.

Laskentaohjelmalla laskettaessa vaarana on tilanne, jossa laskennan takana oleva teoria hämärtyy ja laskija luottaa tuloksiin ilman epäilyjä. Rakennesuunnittelijan ymmärrys riittää tavallisten perustusten mitoittamiseen, jossa geoteknikko on mukana antamassa maaparametrien lähtöarvot. Vaativimmissa kohteissa kuitenkin geoteknikko on se henkilö, joka toimii asiantuntijana mitoittamisessa ja tuo riittävän varmuuden laskentaan. Rakennesuunnittelijan tehtävänä on avustaa kohteen laskennassa. Tässä työssä tutkittiin mitoittamisen teoriaa laskentaohjelman takana, ja myös käsin laskennalla mitoittamista. Vertailulaskelmien osalta keskityttiin murtorajatilan kantokestävyuden ja vaaditun raudituksen laskemiseen sekä käyttörajatilan painuman määrittämiseen.

Työn aikana tarkoituksena oli saada käyttövarmuutta Autodesk Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelman pilarianturan suunnitteluun. Käyttövarmuus laskentaohjelmaan kasvoi, kun saatiin yhteneväisiä vertailuarvoja käsin laskennan kanssa.

Murtorajatilan kantokestävyuden Autodesk Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelma laskee Eurokoodi 7:n mukaan. Kantokestävyuden kaavassa laskentaohjelma tekee maakerroskohtaisen analyysin maankantaavuudelle. Löyhimmän maalajin ominaisuudet määrittävät mitoitusmaankantokestävyuden, jota verrataan suoraan perustukselle tuleviin kuormitusyhdistelmiin. Käsin laskenta tehtiin Suomen kansallisen liitteen mukaan kantokestävyuden kaavalla. Verrattuna Suomen kantokestävyys kaavaan, laskentaohjelma käyttää Saksan kansallisen liitteen standardin lisäkertoimia kantokestävyys kaavassa. Eroa laskelmien välille tuli esimerkiksi epäkeski-

syyden arvoissa kahden sentin verran, joten erot lopullisissa mitoitus ehdoissa jäivät vain muutaman prosentin tasolle.

Käyttörajatilassa painuman osalta erot tulosten välillä olivat muutamien millien luokkaa. Laskentaohjelmassa haasteena oli selvittää, miten monikerroksinen maalaji painuu ja miten tiedot syötetään ohjelmaan oikealla tavalla. Erot painumissa syntyivät, kun hyödynnetään kahta eri teoriaa ja niiden laskentakaavoja loppupainuman tarkastelussa.

Laskentaohjelman raudoitusosion hyödynnettiin tässä työssä raudoituspinnojen vertailua käsin laskennan tuloksiin. Raudoitusosio on jo itsessään laaja ja sen takia sen osuus on jätetty pienemmälle huomiolle.

Autodesk Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelmassa on lukuisia eri toimintoja, joita tulevaisuudessa voisi tutkia. Näistä vain muutamia esimerkkejä ovat raudoitusosion hyödyntäminen sekä siitä saatavien kuvien käyttäminen suunnittelussa. Myös tästä työstä jätetty lävistysmitoitus antaa tulevaisuutta varten paljon tutkittavaa kuten pilarianturan yhdistäminen kokonaiseen rakenteeseen.

LÄHTEET

1. RIL 207-2009 Geotekninen suunnittelu, eurokoodin EN 1997-1 suunniteluohje. 2009. Helsinki: Hansaprint Oy.
2. Leskelä, Matti 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, BY 210. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
3. Maanvaraiset perustukset. 2011. Saatavissa: <http://www.tkk.fi/Yksikot/Silta/opinnot/rak-11/2107/luennot/08.pdf>. Hakupäivä 7.12.2010.
4. RIL 125 Teräsbetonirakenteet. 1986. Vaasa: Vaasan kirjapaino Oy.
5. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. 2005. Osa 1: Yleiset säännöt. SFS-EN 1997-1. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto
6. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. 2005. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. SFS-EN 1992-1-1. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS
7. Jääskeläinen, Raimo 2009. Pohjarakennuksen perusteet, Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
8. Betoninormit 2004, BY 50 2009. Suomen Betoniyhdistys r.y. Helsinki: Tuokinprint Oy.
9. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja. 2001. Osa 1. BY 202. Suomen Betoniyhdistys r.y. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy
10. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja. 1992. Osa 2. BY 202. Suomen Betoniyhdistys r.y. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy

11. Betonitekniikan oppikirja. 2004. BY 201. Suomen Betoniyhdistys r.y. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy
12. RIL 157-1 Geomekaniikka 1. 1985. Espoo: Otapaino
13. Rantamäki, Martti - Tammirinne, Markku 1979. Pohjarakennus 465. Hämeenlinna: Karisto Oy
14. Rantamäki, Martti – Jääskeläinen, Raimo - Tammirinne, Markku 2001. Geotekniikka 464. Helsinki: Otatieto
15. RIL 201-1-2008, Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, Eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3 ja EN 1991-1-4 2008. 2008. Helsinki: Hansa-print Oy.
16. Jääskeläinen, Raimo 2009. Geotekniikan perusteet. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy
17. Tammirinne, Markku 1975. Rakennusten perustaminen maanvaraan. Painuman laskeminen. Otaniemi: Valtion teknillinen tutkimuskeskus
18. Autodesk Robot Structure Analysis Professional. 2011. Saatavissa: <http://www.cad-q.fi/index.php/tuotteet/rakennesuunnittelu/autodesk-robot-structural-analysis/20810>. Hakupäivä 24.3.2011.

LIITTEET

Liite 1. Laskentaesimerkki laskentaohjelmalla

Liite 2. Laskentaesimerkki käsin laskemalla. Kantokestävyys

Liite 3. Laskentaesimerkki käsin laskemalla. Painuma

Liite 4. Laskentaesimerkki käsin laskemalla. Raudoituspinta-ala