

2. kertaluvun momentin huomioiminen masto- jäykisteisen hallin perustusten suunnittelussa

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

2022

Jan-Kristian Heiskanen

Tiivistelmä

Tekijä(t) Heiskanen, Jan-Kristian	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 34	Valmistumisaika 2022
Työn nimi 2. kertaluvun momentin huomioiminen mastojäkisteisen hallin perustusten suunnittelussa		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio (jos opinnäytetyöllä on toimeksiantaja) Elias Klasila Di, Osastopäällikkö, Sweco Rakennetekniikka Oy		
Tiivistelmä <p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin toisen kertaluvun vaikutuksia mastojäkisteisen pilarin perustuksen suunnittelussa ja luotiin Sweco Rakennetekniikka Oy:n toimeksiannosta vuokaavio toisen kertaluvun momentin huomiointia varten. Tavoitteena oli tutkia toisen kertaluvun momentin vaikutuksia eri perustustypeille, jotka saattavat aiheuttaa merkittäviä kuormalisäyksiä ja mahdollisia perustuksien mitoitusvaikutuksia käyttäjäasteiden muutoksia.</p> <p>Opinnäytetyössä tehtiin laskelmia, joissa huomioitiin toisen kertaluvun momentin vaikutus. Laskelmien apuna käytettiin yhteistyöyrityksen perustuksien mitoituslaskentapohjia, joiden avulla toisen kertaluvun vaikutukset pystyttiin huomioida perustusten käyttäjäasteissa. Opinnäytetyössä käytettiin tutkimuksellisia menetelmiä.</p> <p>Laskelmien ja tutkimuksen perusteella toisen kertaluvun momentin huomiointi perustuu kriittisen epätarkkuustekijän tiettyihin raja-arvoihin. Raja-arvojen sisällä olevissa taivutusmomenttikuurmissa tulee huomioida toisen kertaluvun vaikutus. Vaikutukset saattavat lisätä kuormaa siten, että perustusten käyttäjäaste nousee yli 100 %:n. Toisen kertaluvun momentin vaikutuksia voidaan tutkia tämän opinnäytetyön pohjalta myös enemmän.</p>		
Asiasanat Toinen kertaluku, mastopilari, perustus		

Abstract

Author(s) Heiskanen, Jan-Kristian	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2022
	Number of Pages 34	
Title of Publication Consideration of 2. order effect in bending moment in planning of mast stiffened hall		
Degree and field of study Technology, Civil and Construction Engineering		
Name, title and organisation of the client (if the thesis work is commissioned by another party) Elias Klasila Di, Structural Engineer, Sweco Rakennetekniikka Oy		
Abstract <p>The purpose of this thesis was to research the phenomenon of second order effect bending moment in mast stiffened column's planning and by Sweco Rakennetekniikka Oy assignment was to create a flow chart about noticing the second order effect in moment. The objective of the thesis was to research second order effects in moment on different foundation types and calculate the increases of loads and investigate cause some changes in utilization rate of foundation.</p> <p>Part of the thesis is calculations that includes second order effects in bending moment. To help creating calculations for second order effects in moment there was used calculation sheets by cooperation company to calculate strength of foundation.</p> <p>Based on the findings and calculations the observation of second order effect is based to the limit values of critical inaccuracy factor. To the loads that are inside the limit values must observe the effects of second order and the effects might increase loads enough to cause the utilization rate grow over 100 %. The result of this thesis shows that this subject is worth to study more.</p>		
Keywords second order in bending moment, mast stiffened column, foundation		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Pilarit	3
2.1	Yleistä teräspilareista.....	3
2.2	Mastopilari	4
2.3	Pilareihin kohdistuvat kuormitukset.....	7
2.4	Jäykistys.....	9
2.5	Kuormituksista aiheutuvat ilmiöt.....	10
3	Perustukset.....	11
3.1	Yleistä perustuksista	11
3.2	Perustuksille aiheutuvat kuormitukset.....	11
3.3	Perustussuunnittelu	11
3.4	Kalliovarainen perustaminen.....	12
3.5	Maanvarainen perustaminen	13
3.6	Paaluperustaminen.....	14
4	Toisen kertaluvun vaikutukset.....	16
4.1	Toinen kertaluku	16
4.2	Toisen kertaluvun vaikutus kehälle ja pilarille.....	17
4.3	Toisen kertaluvun vaikutus perustuksille.....	18
5	Laskelmat	19
5.1	Laskennan eteneminen	19
5.2	Lähtötiedot.....	19
5.3	Toisen kertaluvun laskeminen	20
5.4	Kallionvaraisen perustamisen laskelmat	22
5.5	Maanvaraisten perustuksien laskelmat	24
5.6	Paaluperustamisen laskelmat.....	27
6	Yhteenveto ja pohdinta	30
	Lähteet	33

Liitteet

Liite 1. Laskelmat

Liite 2. Vuokaavio

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan mastojäykisteiselle pilariperustukselle aiheutuvaa toisen kertaluvun aiheuttamaa momenttivaikutusta. Työn aihe on tärkeä, koska perustuksien mitoittamiseen ohjeistavissa standardeissa ei ole tarkkaan määritelty toisen kertaluvun momentin huomioimista. Myös pilarien suunnitteluohjeissa perustuksiin vaikuttavan toisen kertaluvun momentin huomioimisen ohjeistus on epäselvä. Kun standardien mukaisessa pilarin mitoittamisessa otetaan huomioon toisen kertaluvun momentin vaikutukset ja perustusmitoituksessa ei huomioida, on riskinä, että perustus on rakennejärjestelmän heikoin osa. Tämä saattaa johtaa tilanteeseen, jossa rakenne ei kestä pilarin mitoituskuormaa.

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää toisen kertaluvun momentin vaikutuksen laske- mista tutkimuksessa tehdyillä laskelmilla ja vuokaaviolla. Tutkimuksessa pyritään vertaile- maan perustusten käyttöasteiden eroja, kun toisen kertaluvun vaikutus huomioidaan ja jä- tetään huomioimatta mitoituksessa. Tarkastellaan erilaisia rajatiloja, jotka saattavat aiheut- taa suurempia kuormituksia ja momenttia perustukselle. Rajatiloista pyritään selvittämään esimerkiksi perustusten käyttöasteiden muutoksia ja pilarin hoikkuuden sekä sivusiirtymien vaikutusta anturalle. Laskelmien perusteella tehdään vuokaavio, joka toimii suunnittelijalle ohjeistuksena toisen kertaluvun huomioimisessa.

Perustukselle aiheuttavan toisen kertaluvun momenttikuorman tutkimisessa käytetty mas- tojäykisteinen pilari on RHS teräsprofiili, jolle on annettu teräsprofiilitaulukoiden mukaiset lähtötiedot. Perustamistapoina tässä opinnäytetyössä tutkitaan maanvaraista perustamista, paaluperustamista ja kallionvaraista perustamista. Opinnäytetyössä ei käsitellä muun tyyppisiä pilareita, koska työn painoarvo keskittyy perustukselle tulevan toisen kertaluvun vai- kutusten tutkimiseen. Tutkittaviksi perustuksiksi valikoituivat kolme tyypillisintä perustusta- paa suurille teollisuushalleille. Opinnäytetyössä ei tarkasteltu mastopilarin ja perustusten välistä liitosta, mutta toisen kertaluvun momentin aiheuttamat lisärasitukset kohdistuvat myös liitoksiin.

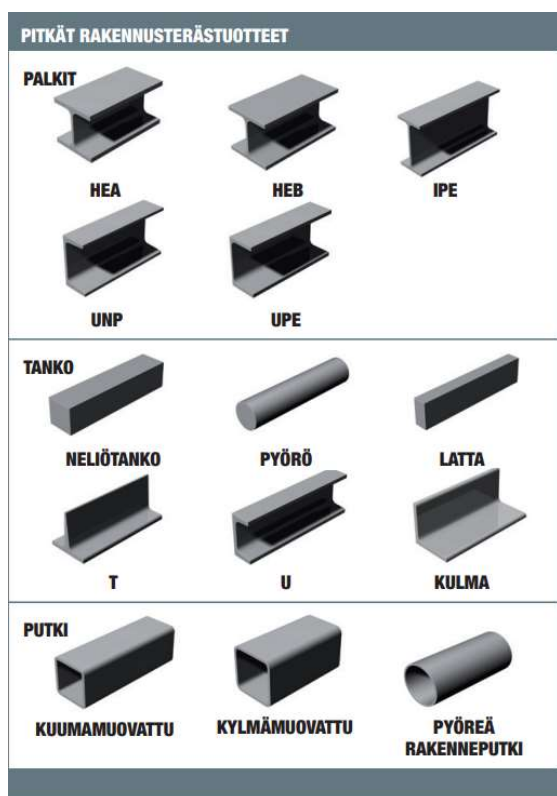
Työn toimeksiantajana oli Sweco Rakennetekniikka Oy. Emoyhtiö Sweco Group on maail- manlaajuinen yritys, joka tarjoaa asiakkaalle laadukasta suunnittelua ja konsultointia. Sweco Group:n liikevaihto on noin 2,1 miljardia euroa ja siellä työskentelee yhteensä noin 18 000 asiantuntijaa. Sweco Group on jaettu yhtiöihin niiden toimialan mukaisesti. Sweco Rakennetekniikka Oy suunnittelee rakennuksia ja konsultoi erilaisia rakennusprojekteja. Sweco Rakennetekniikka Oy:ssä työskentelee noin 800 henkilöä ja vuonna 2021 liikevaihto oli noin 81 miljoonaa euroa. (Sweco Rakennetekniikka Oy 2022.)

Tutkimuksen aihe muodostui oman mielenkiinnon ja tilaajan tarpeiden mukaan. Tutkimuksen aiheen valinnassa auttoi mielenkiinto ajatuksesta, että tätä aihetta ei ole aiemmin tutkittu syvällisemmin. Opinnäytetyö on käytetty tutkimuksellisia menetelmiä.

2 Pilarit

2.1 Yleistä teräspilareista

Pilari on sauvamainen rakenneosiosa, joka välittää pystykuormia muista rakenneosista perustuksille. Yleisiä poikkileikkauksia teräspilareille ovat kuumavalssatut, kylmämuovattut ja hitsatut profiilit. Kuumavalssattuihin poikkileikkauksiin kuuluvat H- ja I-profiilit, putkiprofiilit, avoprofiilit ja umpiprofiilit. Kylmämuovattuja poikkileikkauksia ovat putkiprofiilit ja avoprofiilit. Hitsaamalla voidaan valmistaa edellä mainittuja profiileja sekä suljettuja koteloprofiileja ja ristikkopilareita. I- ja H-profiilien käyttö on yleistä, kun pilarilta halutaan profiilin vahvemman suunnan taivutuskestävyyttä. Tällöin pilarin heikomman akselin suunnassa se on tuettava sivusiirtymiä vastaan. Putkiprofiilien käytössä hyötynä on, että se on jäykempi myös heikomman akselin suunnassa. Putkiprofiilien kestävyttä saadaan kasvatettua seinämän paksuntamisella. Samalla seinämän paksuntaminen ei muuta pilarin ulkomittoja. Hitsattuja pilareita käytetään yleensä, jos pilareihin tullaan asentamaan läpivientejä. Alla olevassa kuvassa 1 on esitetty teräsprofiilien kuvia. (Vaajasaari, 30)



Kuva 1 Teräsprofiilit (begroup 2022)

Teräspilarien kestävyteen vaikuttavat poikkileikkauksen muoto ja koko, poikkileikkaluokka, nurjahdus, poikkileikkauksen koon ja sauvan pituuden suhde eli hoikkuus. (Vaajasaari, 30.)

2.2 Mastopilari

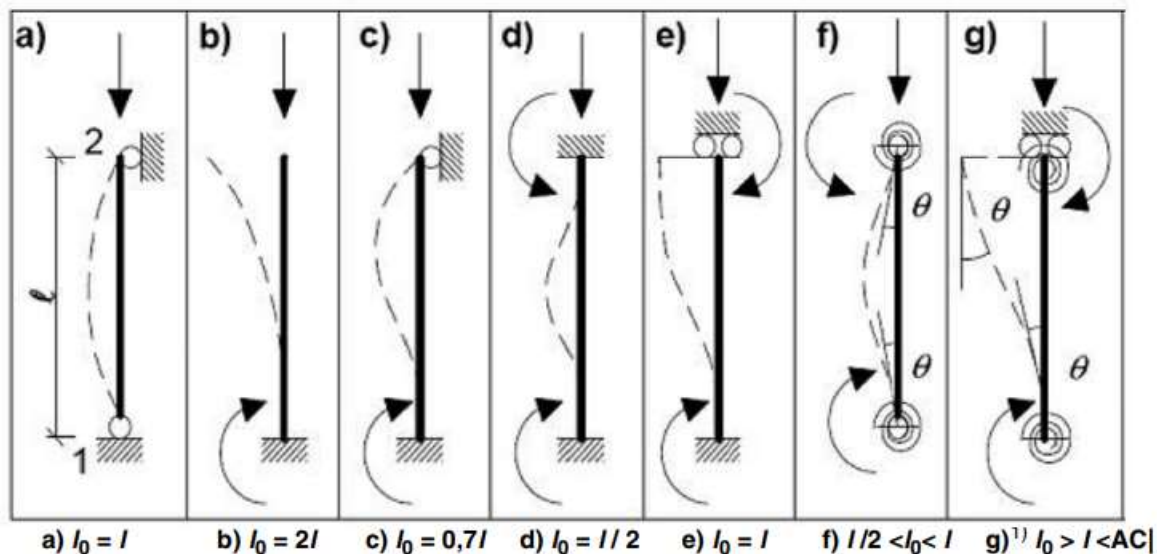
Mastopilari on pilari, joka on kiinnitetty jäykästi vain sen alapäästä eikä yläpäästä ole tuettu lainkaan. Mastopilareita käytetään yleensä matalissa rakennuksissa, sillä korkeiden pilarien yläpäähän sivusiirtymät kasvavat liian suuriksi. Myös teollisuushalleissa käytetään jäykistävinä rakenneosina mastopilareita. Tällöin pilareihin vaikuttaa myös vaakakuormia kuten tuulikuorma. Teollisuushalleissa mastopilarien tehtävänä on jäykistää rakennus vaakakuormia vastaan. Mastopilarin korkeus vaikuttaa kuormituksen epäkeskisyyteen huomattavasti. Hoikan mastopilarin yläpäähän syntyy paljon sivusiirtymää. Mastopilarit on luokiteltu jäykistämättömiksi rakenteiksi. (Puuinfo 2022.) Alla olevassa kuvassa 2 on esitetty mastopilari ja kuvattu sen yläpäähän siirtymiä.



Kuva 2 Mastopilari (Kerokoski, 229)

Mastopilarin mitoituksessa hoikkuus (λ) vaikuttaa paljon koko rakennuksen jäykistämiseen. Hoikkuus määritellään jakamalla nurjahduspituus (L_0 tai L_{cr}) pilarin hitaussäteellä (i). Hoikkuus saa aikaan pilarille enemmän sivusiirtymää, joka luo normaalivoiman vaikutuksesta lisää taivutusmomenttia pilarin alapäähän. (RIL 202-2011 sivu 32.) Pilarin nurjahduspituudella tarkoitetaan kahden peräkkäisen käännepisteen välistä pituutta. Käännepisteet voivat sijaita pilarilla tai sen kuvitteellisella jatkeella. Nurjahduspituuteen vaikuttaa pilarin tuentatapa sekä sauvan vapaa jännemitta. Nurjahduspituutta määriteltäessä käytetään kerrointa (k_0), joka on riippuvainen rakenneosan tuentatavasta. Mikäli pilarin tuentatapa on jäykkä molemmista päistä, on kerroin (k_0) ja nurjahduspituus pienempi kuin esimerkiksi pelkästään alapäästä jäykästi tuettu pilari. Eurokoodissa on esitetty tuentatapojen vaikutukset

nurjahduspituuteen. Alla olevassa kuvassa 3 on esitetty nurjahdusmuotojen vaikutus nurjahduspituuden laskentakaavaan. (BY 202 osa 2 sivu 362, EN 1992-1-1 sivu 65.)



Kuva 3. Pilarin nurjahdusmuodot (EN 1992-1-1 sivu 65)

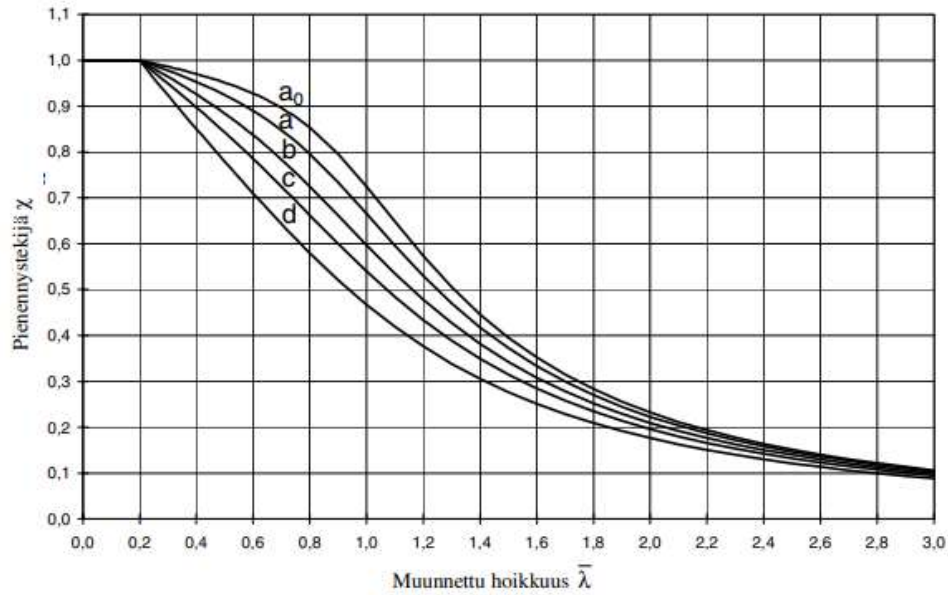
Kuvassa 3 on esitetty erilaisten pilareiden nurjahdusmuotoja. Kuvasta nähdään, miten pilari käyttäytyy erilaisilla tuennoilla ja kuormituksilla.

Mitoituksessa teräspilareiden tyypillistä epäkeskisyyttä ei yleensä tarvitse huomioida, sillä se on sisällytetty mitoituksessa käytettäviin nurjahduskäyriin. Nurjahduskäyriä on SFS-EN 1993-1-1 standardin mukaan viisi kappaletta ja jokainen niistä on toisistaan poikkeava. Käyrät a_0 , a , b , c ja d sekä niiden epätarkkuustekijä α on esitetty alla olevassa kuvassa 4. (Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus – Eurocode 3 sivu 96 ja 130.)

Nurjahduskäyrä	a_0	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

Kuva 4 Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät (Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus – Eurocode 3 sivu 96)

Alla olevassa kuvassa 5 on esitetty nurjahduskäyrät diagrammimuodossa.



Kuva 5 Nurjahduskäyrät (EN 1993-1-1, 64)

Mitoitusta tehdessä nurjahduskäyrät valitaan poikkileikkauksen nurjahdussuunnan ja muodon perusteella, jotka on esitetty alla olevassa kuvassa 6. Teräksen lujuusluokka vaikuttaa myös omalta osaltaan käyrän valintaan.

Poikkileikkaus		Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä		
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
Valssatut profiilit		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a b	a ₀ a ₀
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d	c c
Hitsatut I-profiilit		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	b c	
		$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	e d	e d	
Rakennemuovut		Kuumamuovattu	Kaikki	a	a ₀	
		Kylmämuovattu	Kaikki	c	c	
Hitsatut koreloprofiilit		Yleensä (poikkeus, ks. alla)	Kaikki	b	b	
		Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Kaikki	c	c	
U-, T- ja umpiprofiilit			Kaikki	c	c	
L-teräkset			Kaikki	b	b	

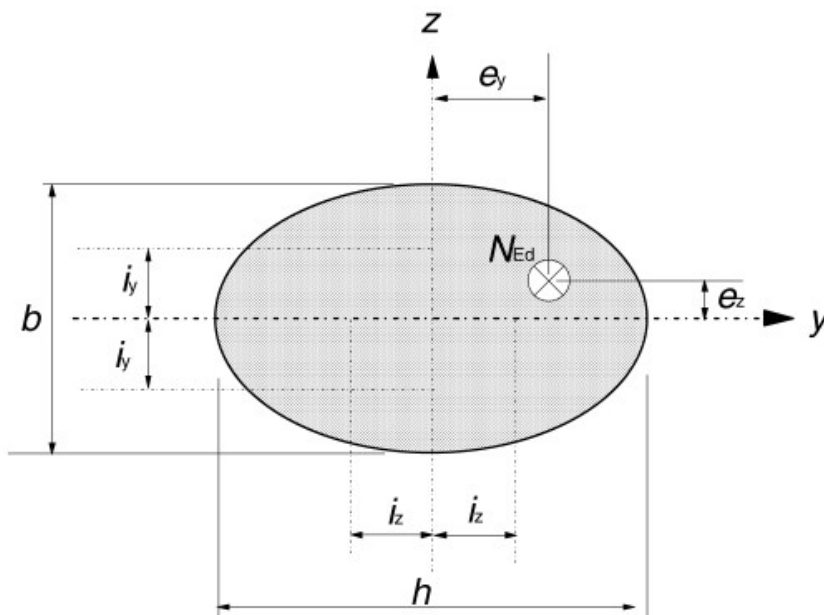
Kuva 6 Nurjahduskäyrien valinta (EN 1993-1-1, 63)

Kuvan 6 taulukosta valitaan mitoituksessa käytettävä profiili ja sitä vastaavat rajat, nurjahdusakseli ja lujuusluokka.

2.3 Pilareihin kohdistuvat kuormitukset

Puristetut rakenteet ovat aina hieman vinoja, ja niihin vaikuttavat kuormat eivät koskaan vaikuta täysin kohtisuoraan rakenteen yläpäähän. Rakenteisiin vaikuttavat kuormitukset voidaan kuitenkin jakaa pystysuuntaisiin ja vaakasuuntaisiin kuormituksiin. Pystysuuntaiset kuormitukset pilareille tulevat pilarin yläpuolisten rakenteiden painosta, käytön aikaisista hyötykuormista tai muista muuttuvista kuormista kuten lumen painosta. Vaakasuuntaiset kuormitukset rakenteille tulevat yleensä tuulikuormista, rakenteiden ja kuormitusten epäkeskisyydestä sekä muista mahdollisista sivusiirtymistä rakenteissa. Vaakasuuntaiset kuormat aiheuttavat pilarissa sivusiirtymiä, jotka aiheuttavat pystysuuntaisiin kuormiin epäkeskisyyttä ja tämä kasvattaa sivusiirtymää edelleen. Jokaisella pilarilla on oma kantokykynsä, ja kovimman kuormituksen hetkellä pienikin kuorman lisäys saattaa aiheuttaa huomattavan taipuman lisäyksen. Tätä kutsutaan sauvan nurjahtamiseksi. Pilarin mitoituksessa tulee ottaa huomioon kuormien ja pilarin epäkeskisyydet sekä epäkeskisyyksistä aiheutuva taivutusmomentti. (EN 1991, EN 1993)

Kuormituksen epäkeskisyys johtuu yleensä mittaepätarkkuuksista, rakenteen pystysuoruu-den poikkeavuudesta, liitosten epäkeskisyydestä tai vaakasuuntaisista voimista. Epäkeskisyyttä tarkasteltaessa erilaisissa olosuhteissa pilareihin kohdistetaan erilaisia poikkeama-arvoja kuvaamaan esimerkiksi epäkeskisyydestä aiheutuvaa taivutusta. Epäkeskinen voima voidaan esittää mitoitusta tehdessä epäkeskisenä normaalivoimana tai epäkeskisyyssmomenttina. Mikäli normaalivoima aiheuttaa kuormitusta poikkileikkaukseen epäkeskeisesti z- ja y-akselin suhteen, tulee voimia tarkastella molempien akselien taivutusmomenttien avulla. Alla olevassa kuvassa 7 on esitetty määritelmä epäkeskisyydestä pyöreässä teräsbetonipilarissa. Epäkeskisyyden määritelmä on myös pätevä muun muotoisilla poikkileikkauksilla ja esimerkiksi teräs- tai puupilareilla. (EN 1992-1-1, 74.)



Kuva 7. Epäkeskisyyden määrittelmä (EN 1992-1-1, 74)

Kuvaan 7 on merkitty e_y ja e_z esittämään epäkeskisyyttä normaalivoimalle pilarin yläpäässä. Normaalivoima on epäkeskeinen molempien akselien suuntaan.

Pilarin ollessa keskeisesti kuormitettu, mitoituksessa on tärkeä huomioida nurjahduskestävyys. Epäkeskeisesti kuormitetulla pilarilla nurjahduskestävyyden lisäksi tulee huomioida taivutus. Epäkeskisistä kuormituksista syntyy rakenteille vaakakuormia. (EN 1992-1-1, 74.)

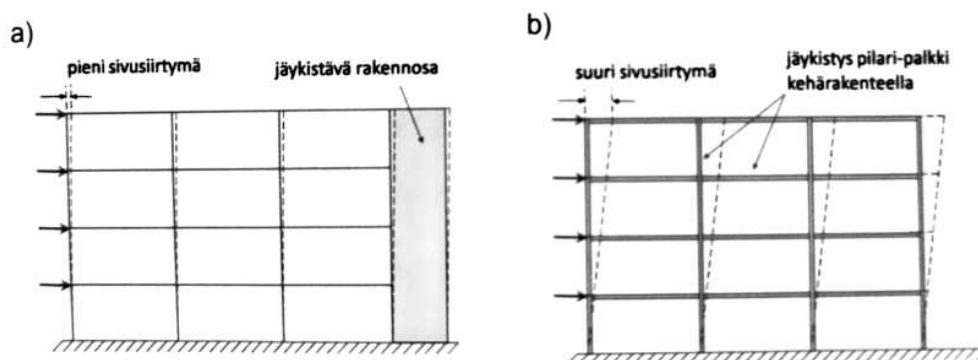
Suomessa yleisin vaakakuormat muodostuvat pääasiallisesti tuulikuormista. Muualla maailmassa vaakakuormia ovat myös esimerkiksi maanjäristyksen aiheuttama kuorma. Tuulikuorma aiheuttaa painetta rakenteen tai rakenteiden ulkopintoihin. Tuulen paine aiheuttaa rakenteen pintaan vaakasuuntaisia kohtisuoria voimia puristuksena ja vetona. Korkealle mastopilarille tai rakennukselle, joka on myös hoikka, voi aiheutua tuulen paineesta erittäin suuria sivusiirtymiä yläpäähän ja se on haastava jäykistää. (Puuinfo 2022)

Tuulikuorman suuruuteen vaikuttaa rakennuspaikan ympäristö ja sijainti. Avoimet alueet, joissa ei ole puita tai rakennuksia suojaamassa suunniteltavaa kohdetta, tuulikuorma on yleensä suuri. Suojainen alue, missä ympärillä suuria puita tai korkeita rakennuksia tuulikuorma on pienempi. Rakennusten suunnittelussa näitä huomioidaan tuulensuojaisuuskerroksille, jotka määrittelee suunniteltavan kohteen maastoluokka. (EN 1991-1-4, 36.)

2.4 Jäykistys

Rakennuksen jäykistys tehdään vaakakuormia vastaan. Jäykistetyissä rakenteissa vaakakuormat otetaan vastaan erittäin jäykillä rakenneosilla kuten seinillä ja ristikoilla. Näitä rakenteita kutsutaan sivusiirtymättömiksi rakenteiksi. Jäykistetyissä rakenteissa pilarit on kiinnitetty jäykkiin rakenneosiin sekä ylä- että alapäästä, jolloin pilareiden päihin ei voi syntyä lisärasituksia vaakakuormista. (BY 211 osa 2, 98.)

Jäykistämättömissä rakenteissa vaakakuormat otetaan vastaan vähemmän jäykillä rakenneosilla, jolloin rakenteisiin syntyy sivusiirtymiä ja taivutusmomenttia. Tällaisia rakenteita sanotaan sivusiirtyviksi rakenteiksi. Jäykistämättömissä rakenteissa pilarit toimivat jäykistävänä rakenneosina ja erilaiset kuormat voivat aiheuttaa lisärasituksia kuten jäykistyskuormia pilarien päihin. Jotta rakenne olisi toimiva, pilarien toinen pää täytyy olla jäykkä. Alla olevassa kuvassa 8 on esitetty esimerkki rakenteen sivusiirtymistä ja jäykistämisestä. (BY 211 osa 2 sivu 98.)



Kuva 8. Rakenteen jäykistys (BY 211 osa 2 sivu 99)

Rakenteessa a. on esitetty rakenne, joka on jäykistetty ulkoisella rakenneosalla. Sivusiirtymiä syntyy hyvin vähän ja rakennus on vakaa. Rakennus b. on pilari-palkkijäykisteinen. Sivusiirtymiä syntyy huomattavasti enemmän ja ne ovat suurempia kuin rakennuksessa a. Suurempien sivusiirtymien takia toisen kertaluvun momentin huomiointi on erityisen tärkeää mastojäykisteisessä eli b-rakennuksessa.

Rakennuksissa mastojäykistykseen tehtävänä on siirtää vaakakuormat tasorakenteiden ja seinien avulla pilareille. Pilarien avulla siirretään kuormitukset jäykille perustuksille ja perustusten kautta kantavalle maapohjalle esimerkiksi kalliolle. Mastojäykistykseen etuna on rakennuksen yksinkertaisuus ja tilojen muunnettavuuden helppous. Kuitenkin pilarien ja perustusten koot ovat mastojäykisteisissä rakennuksissa suuria. Mastojäykistys sopii parhaiten matalille rakennuksille, jolloin pilarien nurjahduspituus pysyy maltillisena. (Vaajasaari, 28)

2.5 Kuormituksista aiheutuvat ilmiöt

Mikäli terässauvan stabiiliuden menetys ei rajoita kestävyyttä, voi mitoitettava sauva plastisoitua kokonaan tai vain osa siitä. Puristettuun sauvaan vaikuttavat voimasuureet, kuten normaalivoima, taivutusmomentti, leikkausvoima ja vääntömomentti. Sauva tulee mitoitaa kuitenkin näiden voimien yhteisvaikutukselle. Puristetuille sauvoille ominaista on, että niiden poikkileikkauksen kestävyys ei aina ole täysin sama kuin koko sauvan kestävyys. Esimerkiksi tasonurjahduksessa, puristettu sauva voi nurjahtaa, jolloin poikkileikkauksen mitoitettava puristusjäännitys jää pienemmäksi kuin sauvan myötöraja. (Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus – Eurocode 3 sivu 96.) Tuulen paineesta johtuvat pilarin yläpäähän sivusiirtymät aiheuttavat pilarille toisen kertaluvun vaikutuksia, joka luo lisäepäkeskisyyttä normaalivoiman kuormille, joka aiheuttaa taivutusmomenttia pilarin alapäähän ja perustukselle (EN 1991-1-4 2005, kohta 3).

3 Perustukset

3.1 Yleistä perustuksista

Perustuksen tarkoituksena on siirtää rakennukselta tulevat ja sen käytöstä aiheutuvat kuormitukset kantavalle maaperälle, estää kosteutta ja haitallisten aineita pääsemästä rakennuksen sisätiloihin sekä rakenteena toimia lämpöä eristävänä. Perustamistavan valintaan vaikuttavat rakennuksen maantieteellinen sijainti, maaperän kantavuus, maaston korkeuserot ja muoto, perustusten kuormitus ja arkkitehtoniset asiat. Perustuksen suunnittelussa on tärkeää mitoittaa perustukset niin, että ne kestävät rakennuksen käyttöiän loppuun ilman ongelmia. Teräsbetoniperustukset kestävät hyvin maaperän toistuvaa sulamista ja jäätymistä sekä kosteutta ja maapohjan mikro-organismeja. (Betoni 2022)

3.2 Perustuksille aiheutuvat kuormitukset

Perustuksille aiheutuvat kuormitukset ovat yleensä pystysuuntaisia. Pilariperustuksilla kuormitus tulee pilarilta anturalle. Anturan yläpuolinen kuormitus aiheuttaa anturan alle pohjapainetta, joka on itseisarvoisesti yhtä suuri kuin anturan yläpuolinen kuormitus. Anturan kuormitusten epäkeskisyydestä pohjapaine saattaa jakautua pienemmälle alueelle anturan alla ja näin aiheuttaa suuremman paineen. (BY 210, 448)

Pilarilta aiheutuvat epäkeskiset kuormitukset ja vaakakuormitukset pilarin yläpäässä ovat perustukselle kaatavia kuormituksia. Kuitenkin pilarin yläpäähän vaikuttavat pystysuuntaiset kuormitukset jäykistävät pilaria ja pienentävät vaakasuuntaisten kaatavien voimien vaikutusta perustukselle. Maanpaineesta aiheutuvat vaakakuormat voivat olla joko edullisia tai epäedullisia kuormituksia pilarianturoille pilarilta tulevien vaakakuormien lisäksi. (BY 210, 451)

3.3 Perustussuunnittelu

Kaikille perustustyypeille tehdään suunnittelussa pohjatutkimus, geotekninen mitoitus ja rakennetekninen mitoitus. Pohjatutkimuksessa voidaan tutkia alueen karttoja ja aiemmin tehtyjä pohjatutkimuksia alueelta. Yleensä parhaat ja luotettavimmat pohjatutkimukset saadaan kohdekäynneillä, kenttätutkimuksella ja laboratorioissa tehdyillä kokeilla. (BY 30–2, 2. Perustukset.)

Geoteknisessä mitoituksessa käytetään pohjatutkimuksista saatuja lähtötietoja, arkkitehdiltä ja rakennesuunnittelijalta saatuja tietoja rakennettavasta hankkeesta, valitusta rungosta, vaikuttavista kuormista ja laatuvaatimuksista. Geoteknisessä mitoituksessa määritetään lähtötietojen perusteella rakennukselle tai rakenteelle perustamistapa, perustamistaso

ja perustusten mitat. Geoteknisessä mitoituksessa määritetään perustukselle muun muassa rakenteelle maaperän kantokestävyys, painumat, kaatumisvarmuus ja liukumisvarmuus. (BY 30–2, 2. Perustukset.)

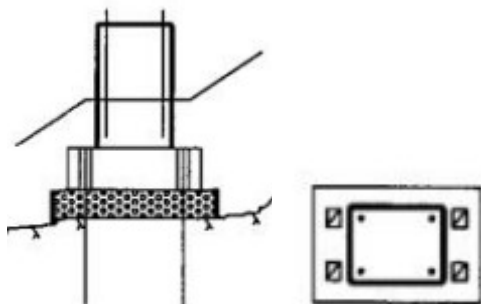
Pilariperustuksen rakenneteknisessä suunnittelussa lähtötiedot saadaan geoteknisestä suunnittelusta. Rakenneteknisessä mitoituksessa varmistetaan pilarianturan kestävyys rakenteena siihen vaikuttaville kuormille. Pilarianturan tulee kestää kaikkien siihen vaikuttavien kuormien yhteisvaikutus ja viedä voimat luotettavasti kantavalle maapohjalle. Rakenneteknisessä mitoituksessa lasketaan pilariperustukselle rauditus, betonin lujuusluokka ja perustuksen mitat. Tarkasteltavia rakenneteknisiä kestävyksiä ovat ankkurointi, rauditus, pohjapaine, lävistyskestävyys, halkeilu ja taivutuskestävyys. (BY 30–2, 2. Perustukset.)

Nykyisin perustusrakenteiden mitoitus ja suunnittelu perustuu kokonaisuudessaan eurokoodeihin. Perustuksia tutkitaan ja mitoitetaan käyttörajatilassa ja murtorajatilassa. Murtorajatilamitoituksella tarkastellaan rakennusosan, rakenteen tai maaperän kestävyyttä murtumista vastaan rakentamisen sekä käytön aikana. Käyttörajatilamitoituksessa huomioidaan erilaiset muodonmuutokset, painumat, siirtymät ja kiertymät. Näissä tarkasteluissa katsotaan, ettei vaadittuja raja-arvoja ylitetä ominaisarvoja käyttäen. (RIL-207 2009, 99–114.)

3.4 Kallionvarainen perustaminen

Kallionvaraisia perustuksia rakennetaan paikalla valettuina ja elementtirakenteisina. Kallionvaraiset perustukset yleensä ankkuroidaan injektoimalla kallioon, jonka jälkeen perustuksen ja kallion välinen tila valetaan täyteen betonia. Perustus kiinnitetään ankkuripultteihin jälkibetonoinnilla. Kallionvarainen perustus voidaan myös tehdä paikalla valuna, jolloin perustus valetaan injektoitaviin ankkuripultteihin kiinni. Kolmas tapa rakentaa kallionvarainen perustus on asentaa perustuselementti leikattuun kallioon. Tällöin perustuselementti tuetaan erilaisilla teräsosilla leikatun kallion reunamiin. (Kulman, 28)

Perustus pohjana kallio on erittäin edullinen ja luja. Hyvässä kunnossa olevalla kalliolle voidaan yleensä perustaa rakennus, jopa ilman anturarakenteita. Kalliovaraisen perustamisen hyviä puolia ovat, ettei se roudi eikä painumia synny ollenkaan. Pohjarakennesuunnittelu talonrakentamisessa kalliolle on kaikkein edullisin ja helpoin. (Jääskeläinen 2009, 24.) Alla olevassa kuvassa 9 on esitetty kallionvarainen pilariperustus.



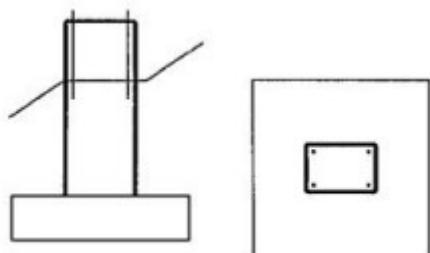
Kuva 9 Kalliovarainen perustus kuvattu päältä ja sivusta (Kulman 2001a, 27)

Tapauskohtaisesti kallioperustamisessa voi syntyä huomattaviakin lisäkustannuksia, kun kalliota joudutaan louhimaan. Kallioperä harvemmin on täysin tasainen esimerkiksi pihojen ja liikennealueiden rakentamiseen. (Jääskeläinen 2009, 24.)

Kalliovaraisen pilariperustuksen mitoittamisessa tutkitaan anturan kestävyksiä kaatumiselle, liukumiselle, läpileikkautumiselle, kallioankkureille ja maan kantokestävyydelle. Anturan suunnittelussa selvitetään anturalle ja sen ympäristölle materiaali- ja olosuhdetiedot sekä anturalle tulevat kuormat ja mittatiedot. Lähtötietojen avulla voidaan määrittää pilarin epäkeskisyyden anturan yläpinnassa ja pohjapaineen jakautuminen. Näiden tietojen perusteella anturalle mitoitetetaan pääraudoitus ja tarkistetaan, että antura kestää läpileikkautumiselle eikä siihen synny liian leveitä halkeamia.

3.5 Maanvarainen perustaminen

Maanvaraisia perustuksia on rakennettu anturallisina ja ilman anturaa. Anturalliset perustukset ovat paikalla valettuja tai elementtejä. Perustusten koko vaihtelee paljon kuormituksen ja käyttötarkoituksen mukaan. Pienempiä maanvaraisia perustuksia käytetään esimerkiksi pylväiden tai liikennemerkkien pystyttämiseen. Suurempia maanvaraisia perustuksia käytetään raskaammille mastoille, kuten teollisuushalleissa käytettäville mastopilareille. Suuremmat perustukset rakennetaan yleensä paikalla valettuna. Alla olevassa kuvassa 10 on esitetty yksinkertainen piirustus maanvaraisesta pilarianturasta. (Kulman, 24)



Kuva 10 Maanvarainen pilariperustus kuvattu päältä ja sivusta (Kulman 2001a, 26)

Maanvaraisen perustamisen suunnittelussa lasketaan perustukselle varmuus maapohjan murtumista vastaan ja maaperän painumat on laskettava alhaisiksi. Perustaminen tehdään yleensä pilarianturoilla ja perusmuurianturoilla. Perustaminen voidaan tehdä myös yhtenäisillä jäykistetyillä laatoilla, mutta niitä käytetään harvemmin. (Jääskeläinen 2009, 39.)

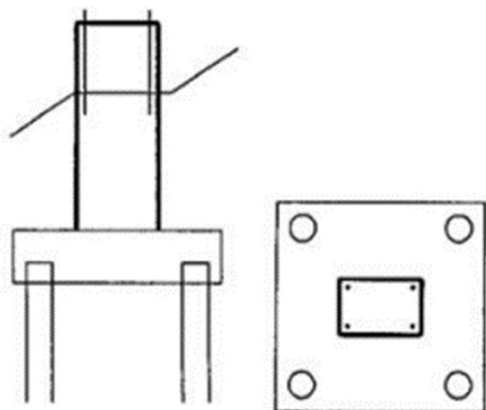
Painumien muodostuminen ja suuruus tulee aina tarkistaa, vaikka maaperä olisikin tiivistä sora- ja moreenimailla. Eloperäiselle maapohjalle on kiellettyä perustaa maanvaraisesti suuren konsolidaatiopainuman sekä jatkuvan jälkipainuman takia. (Jääskeläinen 2009, 40.)

Maanvaraisen pilarianturan mitoituksessa tarkastellaan anturalle syntyvää pohjapainetta, kaatumisvarmuutta, lävistyskapasiteettia, raudoituksen ja ankkuroinnin kestävyyttä sekä liukumisvarmuutta. Mitoituksessa määritellään anturalle materiaalien lähtötiedot ja kuormitustiedot, anturan mittatiedot ja laskelmien perusteella saadaan raudoituksen tiedot.

3.6 Paaluperustaminen

Paaluperustuksissa on yleensä yksi tai useampi paalu. Paaluperustaminen tehdään nykyisin lähes poikkeuksetta elementtirakenteisena. Vain erikoisissa tapauksissa paaluantura tehdään paikalla valettuna. Yleensä paalujen päälle valetaan teräsbetoninen laatta, jonka päälle asennetaan elementtirakenteinen perustus. Paaluihin voidaan tarvittaessa kiinnittää perustuselementti, joka on tarkoitettu kallioperustamiseen. (Kulman, 27.)

Perustamistapana paalutusta tehdään, mikäli maanvaraisesti perustaminen ei ole mahdollista. Yleensä paalutus tehdään maapohjille, jotka ovat liian pehmeitä ja perustusten painumat kasvavat liian suuriksi rakentamista varten. Paaluperustuksien kantavuus mitoitetaan rakennuksesta tuleville kuormille ja maaperän ominaisuuksille. Paalujen ominaislujuudet ja jäykkyydet tulee ottaa myös huomioon mitoituksessa. Paalutuksella estetään rakennuksien painumat lähes kokonaan, sillä kuormat viedään perustuksilta kallioon tai kantavalle maapohjalle. (RIL-121 2005, 83–84.) Alla olevassa kuvassa 11 on esitetty yksinkertainen piirustus paaluperustuksesta.



Kuva 11 Paaluantura kuvattu sivusta ja päältä (Kulman 2001a, 27)

Paaluanturan mitoituksessa tarkastellaan anturan kestävyyttä puristusjännitykselle, ankkuroinnin ja raudoituksen rasituksille. Mitoituksessa määritellään lähtötiedot anturalle ja paaluille. Laskelmien perusteella määritellään paaluille ankkurointi ja paalupituus. Anturan raudoitus saadaan myös laskelmien perusteella. Paaluanturan raudoitus lasketaan pystykuorman ominais- ja suunnitteluarvon perusteella. Ankkurointi tarkistetaan paalun sisäreunassa sijaitsevan leikkauksen suhteen. Raudoitus sijoitetaan keskeisesti paaluun nähden.

4 Toisen kertaluvun vaikutukset

4.1 Toinen kertaluku

Jäykkien pilareiden rasituskapasiteetti muodostuu pelkästään materiaalien ominaisuuksista ja poikkileikkausmitoista. Hoikkia pilareita tarkasteltaessa on näiden lisäksi otettava huomioon erilaiset sivusiirtymistä johtuvat toisen kertaluvun vaikutukset. Toisen kertaluvun vaikutuksia kutsutaan myös geometriseksi epälineaarisuudeksi, mutta rakennesuunnittelun opikirjoissa ja suunnitteluohjeissa käytetään toista kertalukua. Epälineaarinen käyttäytyminen voi olla myös materiaalista johtuvaa, jolloin ”toisen kertaluvun vaikutus” nimitys ilmiölle on hieman harhaanjohtava. (BY 210 sivu 226.)

Toisen kertaluvun vaikutus syntyy pilariin vaikuttavien vaakasuuntaisten kuormien, kuten tuulikuorman aiheuttamista pilarin yläpäähän sivusiirtymistä. Vaakasuuntaisten kuormien lisäksi pilaria kuormitetaan pystykuormilla. Vaakakuorman ja pystykuormien epäkeskisyyden vaikutuksesta rakenteen alapäähän syntyy taivutusmomenttia, jossa huomioidaan toisen kertaluvun vaikutus. Teräspilarin toisen kertaluvun momentin huomioimisessa otetaan laskennassa huomioon kuormasta ja kriittisestä normaalivoimakestävyyydestä saatava kriittinen epätarkkuustekijä. Kriittisen epätarkkuustekijän arvon suuruus vaikuttaa merkittävästi toisen kertaluvun momentin syntymiseen. Kriittiselle epätarkkuustekijälle on Eurocode 3 mukaan annettu raja-arvot. Mikäli kriittisen epätarkkuustekijän arvot ylittävät arvon 10, toisen kertaluvun momenttivaikutuksia ei tarvitse huomioida. Mikäli kriittisen epätarkkuustekijän arvot ovat pienempiä kuin 3, jatketaan tarkastelua käyttämällä tarkempaa toisen kertaluvun teoriaa EN 1993-1-1 kansallisen liitteen mukaisesti. Ensimmäisen kertaluvun teorian mukaan laskettuja vaakakuormia suurennetaan kertoimella, joka on esitetty laskelmat osiossa kaavana 4, jolloin saadaan sauvalle tai kehälle kuorma, johon sisältyy toisen kertaluvun momenttivaikutus. (EN 1993-1-1 sivu 31.)

4.2 Toisen kertaluvun vaikutus kehälle ja pilarille

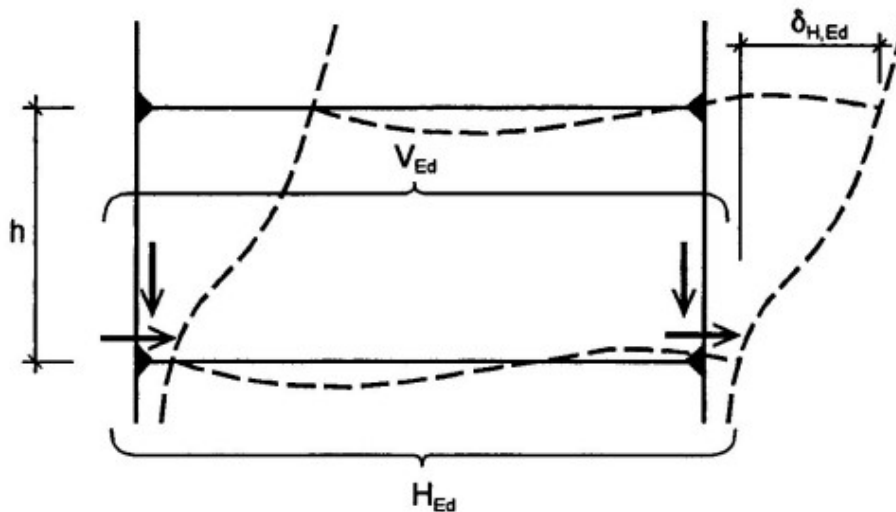
Mikäli rakenne on teräsrakenteinen portaalikehä, jonka kattokaltevuus on pieni ja sivusiirtävät pilari-palkki-tyyppisten rakennusten tasokehät voidaan suunnitella ensimmäisen kertaluvun teoriaa käyttäen, voidaan käyttää kriittisen epätarkkuustekijän laskemiseen alla olevaa kaavaa 1. (EN 1993-1-1 sivu 31.)

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \frac{h}{\delta_{H,Ed}} \geq 10 \quad \text{KAAVA 1}$$

Kaavassa 1 esiintyvät arvot:

- H_{Ed} = Vaakasuuntaisen kuorman mitoitusarvo pilarin yläpäähän tai vaakasuuntainen tukireaktio
- V_{Ed} = Pilarin alapäähän aiheutuva pystysuuntaisen kuorman mitoitusarvo
- $\delta_{H,Ed}$ = Kerroksen vaakasiirtymien erotus ala- ja yläpään nurkkien välillä
- h = Kerroskorkeus

Alla olevassa kuvassa 12 on esitetty kaavalla 3 laskettavan rakennuksen arvot ja kuvaus rakenteista.



Kuva 12 Kaavan 1 merkinnät (EN 1993-1-1 sivu 31)

4.3 Toisen kertaluvun vaikutus perustuksille

Kuten aiemmin kappaleessa ”toisen kertaluvun vaikutukset” on mainittu, perustusmitoitukseen ohjeistavissa standardeissa ei suoranaisesti ohjeisteta toisen kertaluvun vaikutuksia perustuksiin kohdistuvissa kuormituksissa. Anturoiden mitoituksessa tarkastellaan niiden kestävyyttä esimerkiksi taivutukselle ja leikkaukselle tai pilarianturoissa lävistykselle. Pilarianturoissa kuormat, jotka kohdistuvat perustukselle ovat normaalivoimaa, taivutusmomenttia tai vaakasuuntaista leikkausrasitusta pilarin yläpäästä. Kuitenkin anturoihin kohdistuvaa kuormaa voidaan suurentaa toisen kertaluvun teorian mukaisesti ja saada sillä tavoin vaikutukset perustusmitoituksessa. (BY 211, 192.)

Pilarien ja kehien mitoituksessa perustukselle aiheutuvan toisen kertaluvun vaikutuksia lasketaan esimerkiksi eurocode 3 kohdan 5.2 mukaan suurentamalla ensimmäisen kertaluvun teorian mukaisia vaakakuormia, jotka aiheutuvat esimerkiksi tuulikuormasta tai epätarkkuuksista aiheutuvista vaakakuormista. Perustuksia mitoittaessa tulee ottaa huomioon, että vaakakuormista laskentaan otetaan vain todelliset kuormat ja toisen kertaluvun vaikutuksista huomioidaan vain itse lisämomentti tai epäkeskeisyys. (EN 1993-1-1 sivu 32)

5 Laskelmat

5.1 Laskennan eteneminen

Laskennassa määritettiin yksinkertaiset lähtötiedot kalliovaraisen, maanvaraisen ja paalu-perustuksen toisen kertaluvun momentti-ilmiön laskemiseksi. Anturoista haluttiin tehdä laskennallisesti yksinkertaiset, koska laskennassa keskityttiin toisen kertaluvun momentin vaikutuksiin. Aiemmin mainituissa perustustyyppien mitoittamiseen tuotiin teräspilarin mitoittuksesta mukaan kuorma, johon vaikutti toisen kertaluvun momentti. Anturoiden ensimmäisen kertaluvun momenttikuormaa vertailtiin taulukoiden avulla toisen kertaluvun momenttikuormaan. Perustusten käyttöasteet haluttiin saada myös näkyville laskennasta. Jotta laskennasta saatiin toisen kertaluvun momentin vaikutus paremmin esille, pilarin nurjahduspituutta lisättiin vertailulaskelmissa. Perustuslaskennat on tehty toimeksiantajalta saatujen perustuslaskenta-alustojen avulla, joihin on lisätty toisen kertaluvun momentin vaikutus. Kaikkien perustustyyppien toisen kertaluvun laskennassa on käytetty pilarin yläpään epäkeskisyyden arvoa 25 mm.

5.2 Lähtötiedot

Lähtötiedot on mietitty yksinkertaisiksi, jotta samoja lähtötietoja voisi käyttää sekä kalliovaraisen, maanvaraisen ja paaluperustuksen mitoittamisessa. Lisäksi perustuksille on haluttu mahdollisimman vähän ulkoisia rasituksia ja keskittyä vain toisen kertaluvun momentti-ilmiön tutkimiseen. Alla olevassa kuvassa 13 on esitetty materiaalitiedot perustukselle.

Olosuhde ja materiaalitiedot:

toteutusluokka=	2
betonilujuus=	C30/37 (K37)
maks raekoko=	16 mm
rasitusluokka =	XC2
käyttöikä=	50 vuotta
suojabetoni reunaan c_r =	30 mm
sallittu mittapoikkeama ΔC_{dev} =	10 mm
suojabetoni alapintaan c =	50 mm
sallittu mittapoikkeama ΔC_{dev} =	10 mm

Kuva 13. Perustusmitoituksen lähtötiedot anturalle

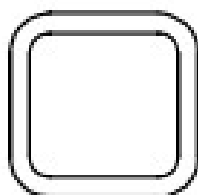
Kuten kuvassa 13 esitetään, betonin lujuusluokkana käytetään C30/37. Maksimi raekoko on 16 mm. Rasitusluokaksi valittiin XC2, koska se on perustuksille yleinen rasitusluokka. Rakennuksen käyttöikä on 50 vuotta. Valitut betonipeitepaksuudet ovat 30 mm anturan reunapinnoissa ja yläpinnassa sekä 50 mm alapinnassa. Rakenteella on toteutusluokka 2, joka

on yleinen toteutusluokka eikä vaikuta kuormituksiin merkittävästi. Maan kantokestävyyttä ei otettu toisen kertaluvun laskennassa huomioon.

Perustuksille annettiin lähtötiedoissa yksinkertaiset mitat, jotta toisen kertaluvun vaikutuksen ilmiöt saatiin hyvin esille.

- Kallionvarainen perustus: 1000 mm x 1000 mm x 500 mm
- Maanvarainen perustus: 1000 mm x 1000 mm x 500 mm
- Paaluperustus: 2000 mm x 2000 mm x 500 mm

Laskennassa käytetään RHS teräspilareita, jotka on esitetty alempana ja teräksen lujuusluokka on S355. Teräsprofiilin kimmokerroin (E) 210000 N/mm² on yleinen kimmomoduuli rakenneteräkselle ja jäyhyysmomentti (I) jokaiselle profiilille on otettu teräsprofiilitaulukosta ja ne näkyvät alempana. (Ongelin 2012, 539–540.) Alla olevassa kuvassa 14 on esitetty piirustus RHS neliöprofiilista.



Kuva 14 RHS neliöprofiili (EN 1993-1-1, 63)

Laskelmissa käytettiin seuraavia profiileita pilareissa:

- RHS 250 mm x 250 mm x 8 mm, jäyhyysmomentti $I = 72290000 \text{ mm}^4$
- RHS 300 mm x 300 mm x 10 mm, jäyhyysmomentti $I = 155190000 \text{ mm}^4$

Laskelmissa käytettiin seuraavia nurjahduspituuksia:

- 6000 mm
- 9000 mm
- 12 000 mm

5.3 Toisen kertaluvun laskeminen

Tutkittavana aiheena oli toisen kertaluvun momentin vaikutus mastojäykisteisen pilarin perustukseen. Ennen perustukseen vaikuttavan momentin tutkimista tulee selvittää pilarin lähtötiedot ja siihen vaikuttavat voimat. Pilarin lähtötiedoista saadaan laskemalla eurokoodi 3 mukaan alla olevalla kaavalla 2, toisen kertaluvun momenttia varten kriittinen normaalivoimakestävyys.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \quad \text{KAAVA 2}$$

Kaavassa 2 esiintyvät arvot:

- E = Kimmomoduuli
- I = Teräspilarin jäyhyysmomentti
- L_{cr} = Teräspilarin nurjahduspituus

Koska tässä projektissa on tarkoitus vertailla eri suuruisten kuormien aiheuttamaa toisen kertaluvun momentin vaikutusta, normaalivoima tulee olemaan 100kN-1000kN. Nämä kuormat ovat sellaisia arvoja, joilla tutkimustulokset näillä lähtötiedoilla ovat relevantteja.

Kimmoteorian mukaisessa analyysissä toisen kertaluvun momenttia laskettaessa otetaan huomioon tekijä, jolla saadaan kuvattua rakenteen kokonaisstabiiliuden menetystä α_{cr} . Tekijä lasketaan alla olevan kaavan 3 mukaisesti. (EN 1993-1-1 sivu 30.)

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \quad \text{KAAVA 3}$$

Kaavassa 3 esiintyvät arvot:

- F_{cr} = Kimmoteorian kriittinen kuorma, joka perustuu rakenteenkimmoiseen alkujäykkyteen
- F_{Ed} = Mitoituskuorma rakenteelle
- α_{cr} = Kriittinen epätarkkuustekijä

Yksikerroksisen kehän tai tässä tapauksessa mastopilarin vertikaalikuormista, kuten tuulikuormista aiheutuvat toisen kertaluvun momentin vaikutukset lasketaan suurentamalla ensimmäisen kertaluvun kimmoteorian mukaisia vaakakuormia ja esimerkiksi ekvivalentteja vaakakuormia, jotka johtuvat epätarkkuuksista. Myös muut mahdolliset sivusiirtymistä syntyvät vaikutukset suurennetaan alla olevan kaavan 4 mukaisella kertoimella. (EN 1993-1-1 sivu 32.)

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad \text{KAAVA 4}$$

Toisen kertaluvun vaikutuksia tutkittaessa huomataan, että mastojäykisteisen pilarin perustukselle ei ole standardisoitua mitoitus tapaa tai kaavoja toisen kertaluvun vaikutuksille. Siispä mitoitus tehdään normaalin perustusmitoituksen tavoin, mutta perustukselle tulevaa pystykuormasta ja sivusiirtymästä aiheutuvaa taivutusmomenttia tai vaakakuormia

suurennetaan yllä olevan kriittisen epätarkkuustekijän suurennuskertoimella, joka on esitetty kaavassa 4.

Toisen kertaluvun vaikutukset pilarille lasketaan kaavalla 5, jossa pilarille aiheutuvaa momenttikeruuta suurennetaan kaavan 4 mukaisella suurennuskertoimella.

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \times (N_{Ed} \times e)$$

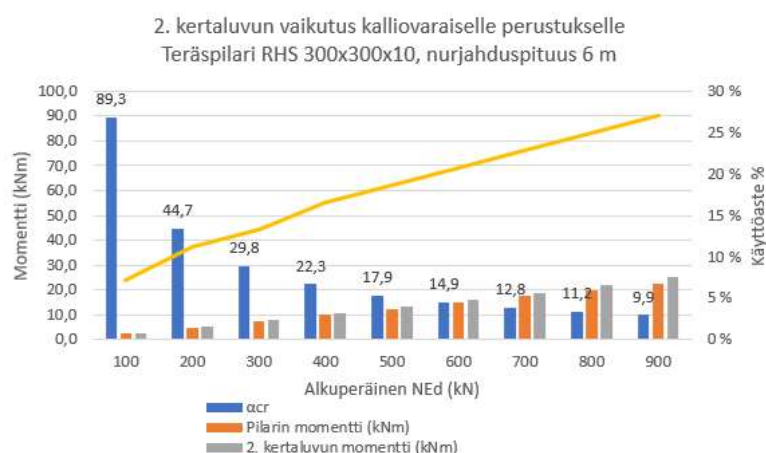
KAAVA 5

Kaavassa 5 esiintyvät arvot:

- α_{cr} = Kriittinen epätarkkuustekijä
- N_{Ed} = Normaalivoiman mitoitusarvo
- e = Sivusiirtymästä johtuva kuorman epäkeskisyys

5.4 Kallionvaraisen perustamisen laskelmat

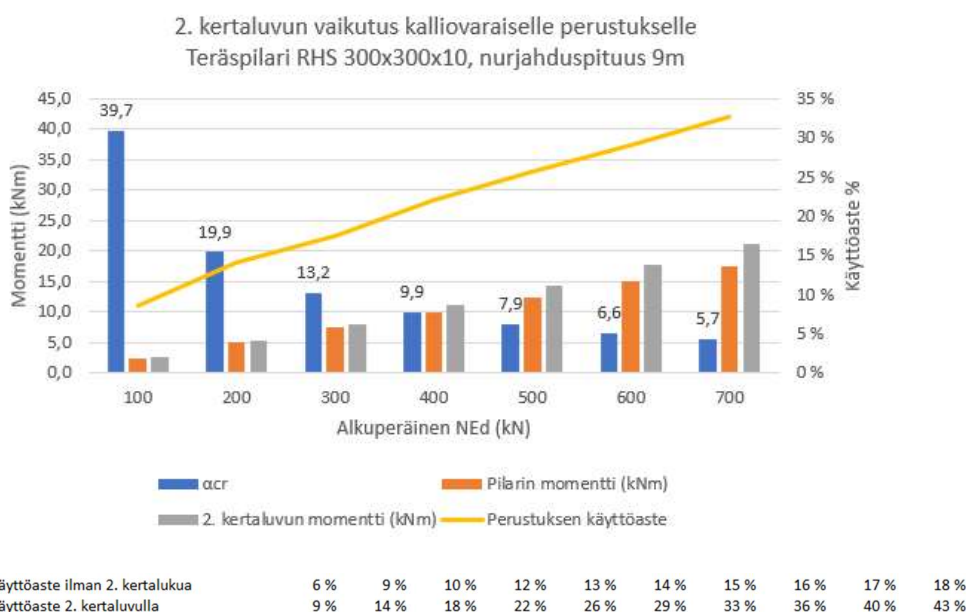
Kallionvaraisen perustamisen laskelmissa tarkasteltiin toisen kertaluvun momentin vaikutuksia normaalivoimakuormituksen sivusiirtymän aiheuttamaa kaatumisvarmuutta anturassa. Toisen kertaluvun momentin vaikutus kuormitukseen pilarin alapäässä aiheutti perustukselle lisäkuormaa. Laskelmissa tutkittiin lisäkuormituksen aiheuttamia käyttöasteiden muutoksia ja rajatiloja. Huomioitavia tuloksia olivat käyttöasteet, toisen kertaluvun momentin kuormitus ja kriittisen epätarkkuustekijän arvot. Alla olevassa kuvassa 15 on esitetty toisen kertaluvun vaikutus kalliovaraiselle perustukselle, teräspilarin profiilin ollessa RHS 300 mm x 300 mm x 10 mm ja nurjahduspituuden ollessa 6 metriä.



Käyttöaste ilman 2. kertalukua	6 %	9 %	10 %	12 %	13 %	14 %	15 %	16 %	17 %	18 %
Käyttöaste 2. kertaluvulla	7 %	11 %	13 %	16 %	19 %	21 %	23 %	25 %	27 %	29 %

Kuva 15 Laskelmien tulokset, RHS 300x300x10 mm, nurjahduspituus 6 m

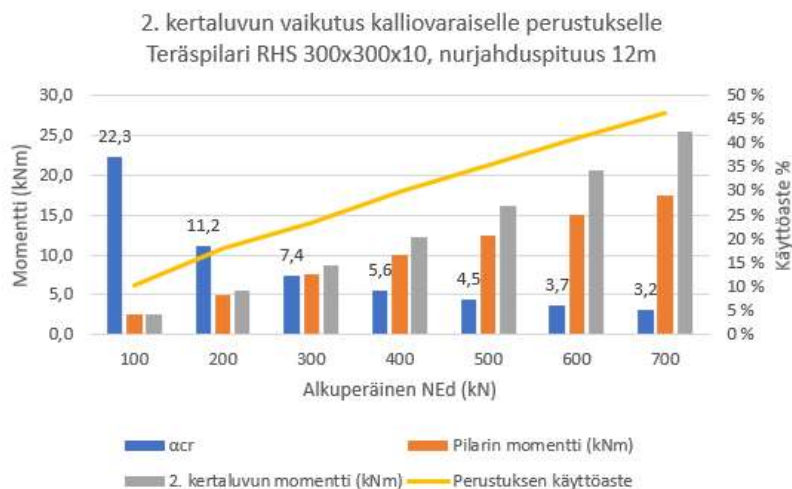
Kuvassa 15 näkyvät oranssit palkit esittävät taulukon yläreunassa ilmoitetun profiilin mukaiseen, RHS 300 mm x 300 mm x 10 mm, nurjahduspituus 6 m, teräspilariin kohdistuvat momenttirasitukset. Palkkien alapuolella näkyy alkuperäinen normaalivoiman kuorma, jolla pilarin yläpäätä on kuormitettu. Vasemmassa reunassa olevasta kuormitusasteikosta voidaan nähdä kuormituksen kasvu verrattuna alkuperäiseen kuormitukseen, jossa ei ole huomioitu 2. kertaluvun vaikutusta. Keltaisella viivalla on esitetty toisen kertaluvun momentin vaikutuksen alaisen kuormituksen aiheuttama käyttöaste kalliovaraiselle perustukselle, jonka suuruus on 1000 mm x 1000 mm x 500 mm. Kuvan oikeassa reunassa nähdään prosenttiasteikko, joka kertoo kallionvaraisen perustuksen käyttöasteen, kun toisen kertaluvun momentin kuorma vaikuttaa siihen. Voidaan huomata käyttöasteen nousevan jopa yli 20 prosenttiyksikköä kun alkuperäinen kuormitus on hieman yli 20kNm. Voidaan myös nähdä kriittisen epätarkkuustekijän (α_{cr}) arvojen pieneneminen samalla kun toisen kertaluvun momentin vaikutukset kasvavat. Kuvassa esitettyjen kriittisen epätarkkuustekijän arvojen joukosta otetaan huomioon toisen kertaluvun teorian mukaan ne, jotka ovat raja-arvojen $3 < \alpha_{cr} < 10$ välillä. Alla olevassa kuvassa 16 on esitetty vertailulaskelma samalle pilariprofiilille, mutta nurjahduspituus on suurennettu 9 metriin.



Kuva 16 Laskelmien tuloksia, RHS 300x300x10 mm, nurjahduspituus 9 m

Nurjahduspituutta suurentamalla, α_{cr} :n arvot pienenivät merkittävästi ja toisen kertaluvun vaikutus suureni momenttikuormissa. Tässä kuvassa näkyy kaikki raja-arvot kriittiselle epätarkkuustekijät, jotka ovat $3 < \alpha_{cr} < 10$. Kuvasta nähdään esimerkiksi alkuperäisen normaalivoiman arvolla 600 kN, toisen kertaluvun momentti kasvaa noin 15 kNm arvosta reilusti yli 20 kNm. Tämä aiheutuu kriittisen epätarkkuustekijän arvon (3,1) lähestymisestä raja-arvoa

3. Alla olevassa kuvassa 17 on esitetty vertailulaskelman tuloksia RHS 300 mm x 300 mm x 10 mm teräspilarille, nurjahduspituudelle 12 m.



Käyttöaste ilman 2. kertalukua	6 %	9 %	10 %	12 %	13 %	14 %	15 %
Käyttöaste 2. kertaluvulla	10 %	18 %	23 %	30 %	35 %	41 %	46 %

Kuva 17 Laskelmien tulokset, RHS 300x300x10 mm, nurjahduspituus 12 m

12 metrin nurjahduspituus aiheutti pilarille yhä suuremman toisen kertaluvun momentin vaikutuksen ja käyttöaste perustukselle suureni melko jyrkästi. Kuvaa 18 tarkastellessa täytyy muistaa kriittisen epätarkkuustekijän raja-arvot $3 < \alpha_{cr} < 10$. Jos kriittisen epätarkkuustekijän arvo laskee alle kolmen, käytetään tarkempaa toisen kertaluvun teoriaa. Pilarin nurjahduspituus vaikuttaa merkittävästi hoikkuuteen ja sivusiirtymiin. Näistä kahdesta syntyy toisen kertaluvun momentin vaikutukset pilarin alapäähän ja perustukselle.

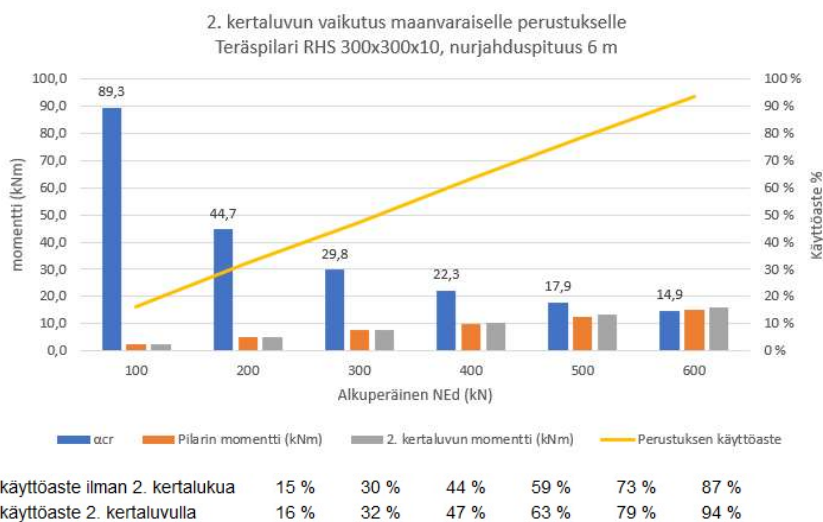
Kalliovaraisella perustamisella toisen kertaluvun momentin vaikutukset kasvavat erittäin suuriksi nurjahduspituutta kasvattamalla. Kuitenkin taulukkoja katsoessa täytyy muistaa kriittisen epätarkkuustekijän raja-arvot $3 < \alpha_{cr} < 10$, joiden mukaan valitaan, otetaanko toisen kertaluvun momentti huomioon vai jätetäänkö huomioimatta.

5.5 Maanvaraisten perustuksien laskelmat

Kallionvaraisessa perustustavassa käytetyillä normaalivoiman ja taivutusmomentin kuormituksen arvoilla maanvaraisen anturan pohjapaineen ja kaatumisvarmuuden käyttöasteet pysyvät hyvinkin maltillisina. Laskentapohjan mukaan normaalivoiman kuormitus jakaantuu maanvaraisella anturalla x- ja y-suuntaisille akseleille, jolloin voiman suuruus anturalle puollittuu keskeisellä normaalivoimakuormituksella. Pilarin yläpäähän tulevat normaalivoiman kuormat kasvatettiin laskelmissa mahdollisimman suuriksi kriittisen epätarkkuustekijän

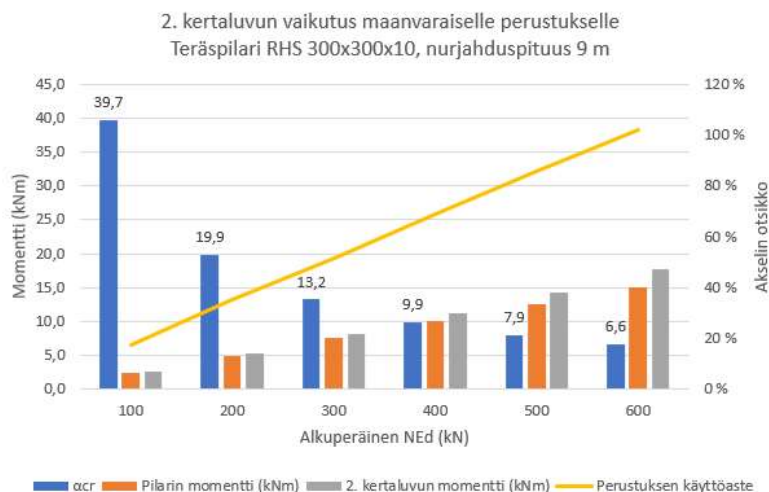
rajoittamien arvojen välillä. Perustuksen kestävyys oli kuitenkin erittäin suuri ja pilarilta johduvat kuormat eivät nostaneet maanvaraisen perustuksen käyttöasteita yli raja-arvojen. Jotta anturalle vaikuttavan toisen kertaluvun momentin vaikutus saatiin tuotua esille riittäväällä tavalla, suurennettiin pilarin profiilia ja nurjahduspituutta huomattavasti, verrattuna aiempiin laskelmiin. Näin varmistettiin pilarin riittävä kestävyys verrattuna perustuksen kestävyysasteeseen. Perustuksen mitat maanvaraisessa pilarianturassa olivat 1000 mm x 1000 x 500 mm.

Laskelmassa käytettiin teräspilaria profiililtaan RHS 300 mm x 300 mm x 10 mm, jonka toisen kertaluvun momentin vaikutuksia tutkittiin nurjahduspituuksilla 6000 mm, 9000 mm ja 12000 mm. Alla olevassa kuvassa 18 on esitetty toisen kertaluvun momentin vaikutusten laskelmien tulokset.



Kuva 18 Laskelman tulokset, RHS 300x300x10 mm, nurjahduspituus 6 m

Kuvassa 18 nähdään samankaltainen taulukko kuin källionvaraiselle perustamiselle. Alkuperäisten normaalivoimien kuormitusten mitoitusarvot on esitetty kuvan alareunassa palkkien alapuolella. Pilarin profiili ja nurjahduspituus on ilmoitettu kuvan yläreunassa. Käyttöaste on kuvattu keltaisella viivalla taulukossa palkkien yläpuolella ja sitä voi lukea kuvan oikeassa reunassa olevista käyttöasteen arvoista. Alla olevassa kuvassa 19 on esitetty vertailulaskelma RHS 300 mm x 300 mm x 10 mm teräspilarille.

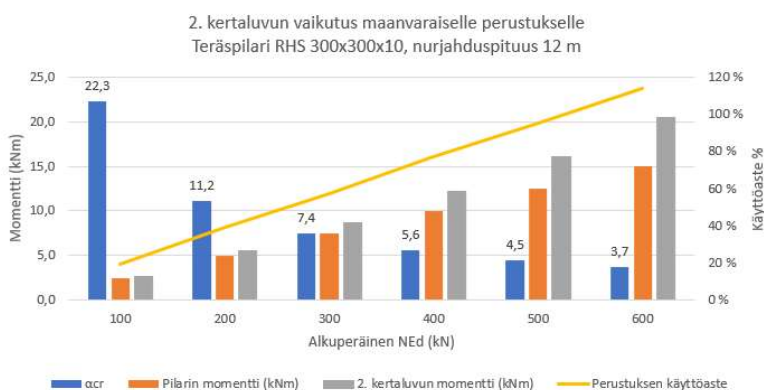


käyttöaste ilman 2. kertalukua	15 %	30 %	44 %	59 %	73 %	87 %
käyttöaste 2. kertaluvulla	18 %	35 %	52 %	69 %	86 %	102 %

Kuva 19 Vertailulaskelmien tulokset, RHS 300x300x10 mm, nurjahduspituus 9 m

Kuvassa 19 esitettyjen vertailulaskelmaan muutettiin nurjahduspituus 9 metriksi. Nurjahduspituuden lisääminen aiheutti pilarille suuremman hoikkuuden ja toisen kertaluvun momentin vaikutuksen kasvamisen. Taulukon suurimmilla kuormilla kriittinen epätarkkuustekijä lähestyy raja-arvojen arvoa 3, jolloin toisen kertaluvun momentin vaikutus on suurimmillaan perustukselle. Mikäli kriittisen epätarkkuustekijän arvo laskee alle 3, käytetään tarkempaa toisen kertaluvun teoriaa. Käyttöaste kasvoi perustukselle toisen kertaluvun suurenemisen mukana.

Alla olevassa kuvassa 20 on esitetty vertailulaskelman tuloksia nurjahduspituudella 12 metriä RHS 300 mm x 300 mm x 10 mm teräspilarille.



käyttöaste ilman 2. kertalukua	15 %	30 %	44 %	59 %	73 %	87 %
käyttöaste 2. kertaluvulla	19 %	39 %	57 %	77 %	95 %	114 %

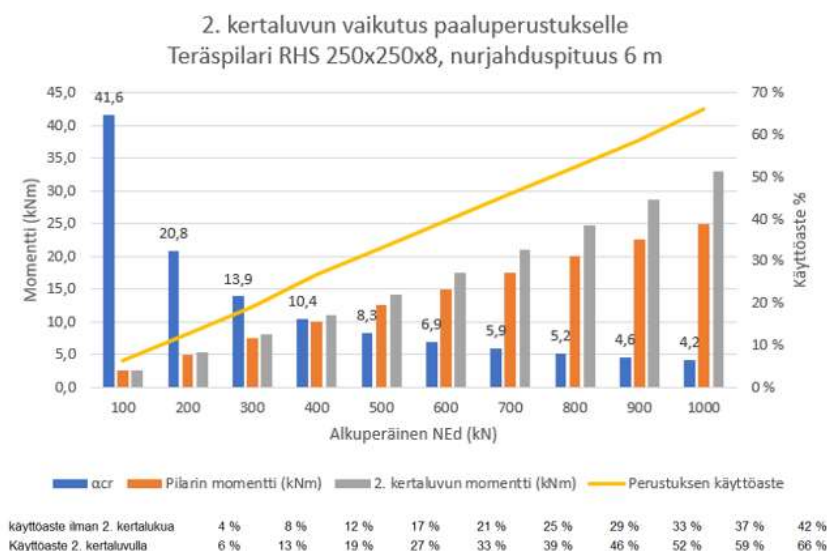
Kuva 18 Vertailulaskelmien tulokset, RHS 300x300x10 mm, nurjahduspituus 12 m

12 metrin nurjahduspituus aiheutti erittäin suuria toisen kertaluvun momentin vaikutuksia, koska pilari oli erittäin hoikka ja yläpään syntyi paljon sivusiirtymää. Verraten kuuden metrin nurjahduspituuteen, 12 metrin nurjahduspituudella toisen kertaluvun momentin vaikutukset olivat huomattavasti suuremmat. Esimerkiksi alkuperäisen normaalivoiman mitoitussarvolla 700 kN, saatiin toisen kertaluvun momentiksi yli 25 kNm. Lyhyemmällä nurjahduspituudella kuorma kasvoi vain hieman alle 20 kNm.

Kuten aikaisemmin mainittu, nurjahduspituuden kasvattaminen aiheutti sivusiirtymien takia enemmän toisen kertaluvun momentin vaikutuksia. Kuormat kasvoivat 12 metrin nurjahduspituudella erittäin suuriksi ja käyttöasteet nousivat paljon.

5.6 Paaluperustamisen laskelmat

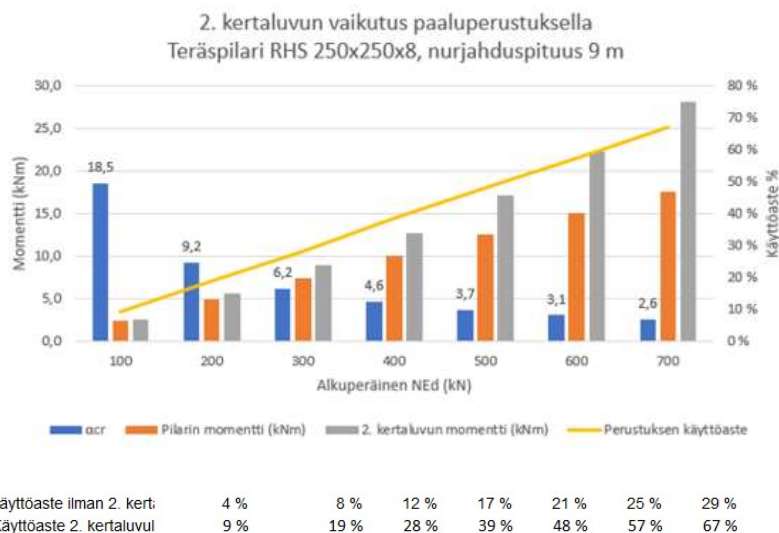
Paaluperustamisen toisen kertaluvun momentin laskelmissa käytettiin hieman eri lähtötietoja kuin maanvaraisen ja kallionvaraisen perustamisen laskelmissa. Perustuksen koko oli 2000 mm x 2000 mm x 500 mm ja toisen kertaluvun momentin vertailussa käytettiin pienempää profiilia 250 mm x 250 mm x 8 mm, mutta nurjahduspituudet olivat samat kuin maanvaraisen perustuksen laskelmissa. Paaluperustuksen laskelmissa tutkittiin perustuksen puristusjännityskestävyyttä ja kaatumisvarmuutta. Alla olevassa kuvassa 21 on esitetty laskelmien tulokset toisen kertaluvun momentin vaikutuksista paaluperustamiselle.



Kuva 19 Laskelmien tulokset, RHS 250x250x8 mm, nurjahduspituus 6 m

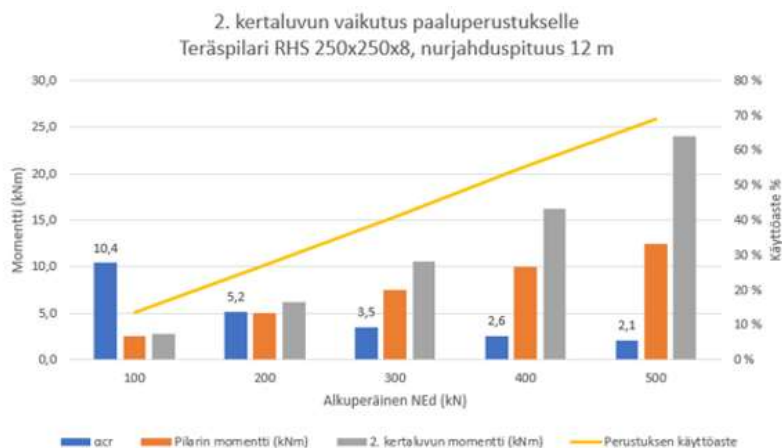
Kuvassa 21 esitetty kaavio on samankaltainen kuin maanvaraisen perustamisen laskelmissa. Laskelmissa käytettiin teräspilaria, jonka profiili oli 250 mm x 250 mm x 10 mm.

Nurjahduspituutena oli kuusi metriä. Kuvassa 16 nähdään oransseina palkkeina alkuperäisen normaalivoiman ja epäkeskisyyden vaikutuksesta syntynyt taivutusmomenttikuormitus perustukselle. Harmaat palkit kuvaavat kuormia, joissa on huomioitu toisen kertaluvun momentin lisäkuormitus alkuperäisessä taivutusmomentissa. Palkkien alapuolella on esitetty laskelmissa käytetyt normaalivoimien mitoitusarvot. Sinisillä palkeilla ja niiden yllä olevilla arvoilla on kuvattu kriittisen epätarkkuustekijän arvoja. Alla olevassa kuvassa 17 on esitetty vertailulaskelma RHS 250 mm x 250 mm x 8 mm teräspilarille nurjahduspituus muutettuna.



Kuva 20 Vertailulaskelmien tulokset, RHS 250x250x8 mm, nurjahduspituus 9 m

Nurjahduspituutta suurennettaessa perustuksen käyttöasteet kohosivat alkuperäiseen laskelmaan verrattuna huomattavasti. Esimerkiksi alkuperäisessä laskelmassa 600 kN kohdalla käyttöaste oli alle 35 % ja vertailulaskelmassa käyttöaste kohosi jo lähelle 60 %. Nurjahduspituutta lisätessä myös toisen kertaluvun momentin vaikutus alkuperäisiin kuormituksiin suureni. Kriittisen epätarkkuustekijän arvot pienenevät samassa suhteessa toisen kertaluvun momentin vaikutuksen kanssa. Alla olevassa kuvassa 18 on esitetty vertailulaskelma alkuperäiselle paaluperustuksen laskelmalle nurjahduspituudella 12 metriä.



käyttöaste ilman 2. kerti:	4 %	8 %	12 %	17 %	21 %
Käyttöaste 2. kertaluvul	14 %	27 %	41 %	55 %	69 %

Kuva 21 Vertailulaskelmien tulokset, RHS 300x300x10, nurjahduspituus 12 m

Yllä olevan kuvan vertailulaskelmien tuloksista huomataan nurjahduspituuden suurentamisen muutos toisen kertaluvun momentin vaikutuksessa olevan merkittävä. Pilari oli erittäin hoikka ja kriittisen epätarkkuustekijän arvot pienenevät isoin harppauksin. Alkuperäisiä normaalivoiman kuormia vähennettiin, koska suurempien kuormien toisen kertalukujen momentin vaikutus teki kuormituksista massiivisia eikä ne olleet mitenkään vertailukelpoisia aiempiin laskelmiin. Näiden arvojen suuruus johtui kriittisen epätarkkuustekijän erittäin pienistä arvoista.

Paaluperustamisessa normaalivoimat ja pienet epäkeskisyydet, kuten toisen kertaluvun vaikutus ei ole tässä opinnäytetyössä mitoittava tekijä. Toisen kertaluvun momentin vaikutukset kasvoivat melko suuriksi ja ne kasvattivat käyttöasteita merkittävästi. Käyttöasteiden arvot eivät kohonneet yli 100 % toisen kertaluvun vaikutuksista, mutta toisen kertaluvun vaikutus näkyi kuormitusten kasvussa merkittävästi. Valituilla lähtöarvoilla normaalivoimakestävyys paaluanturoissa on erittäin suuri ja mastojäykisteinen pilari tulee nurjahtamaan ennen kuin paaluanturan mitoitusarvot tulee ylittymään. Paaluperustusten mitoituksessa huomioidaan anturalle aiheutuva puristusjännitys.

6 Yhteenveto ja pohdinta

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli yhdessä Sweco Rakennetekniikka Oy:n kanssa tutkia laskelmien avulla toisen kertaluvun momentin vaikutusta mastojäykisteisen pilarin perustuksen suunnittelussa ja luoda toimeksiantajalle vuokaavio toisen kertaluvun momentin vaikutusten laskennan avuksi. Toisen kertaluvun momentin vaikutuksia tutkittiin, koska sitä ei ole ohjeistettu perustusmitoituksen standardeissa ja pilaristandardeissa ohjeistus on erittäin epäselvä. Teoriaosuudessa tutustuttiin aiheeseen ja kerättiin tarpeellista tietoa toisen kertaluvun vaikutusten laskennan alustamiseen.

Laskennassa selvitettiin toisen kertaluvun huomioinnin tarpeellisuutta mastopilareiden perustusten suunnittelussa ja tutkittiin raja-arvoja, joissa toisen kertaluvun momentin vaikutukset tulee ottaa huomioon. Laskennassa käytettiin samankokoisia perustuksia kaikissa perustustyypeissä. Pilariprofiilin kasvattamisella ja nurjahduspituuden suurentamisella saatiin monipuolisia tuloksia toisen kertaluvun momentin vaikutuksista perustuksiin. Toisen kertaluvun momentin mallintamisessa laskettiin pilarin momenttikuormille kriittinen epätarkkuustekijä, jolla saatiin laskettua pilarin kimmoteorian kriittinen stabiliteetin menetys. Laskennassa selvisi kriittisen epätarkkuustekijän (α_{cr}) raja-arvot $3 < \alpha_{cr} < 10$, joiden rajoissa olevat kriittisen epätarkkuustekijän sisältävät kuormat otettiin huomioon toisen kertaluvun momentin laskemisessa. Kriittistä epätarkkuustekijää suurennettiin suurennuskertoimella, jolla saatiin pilarille aiheutuva toisen kertaluvun momentti. Lopulta perustukset mitoitettiin laskentapohjien avulla käyttäen uutta kuormitusta, joka oli saatu toisen kertaluvun teorian avulla.

Laskennassa selvitettiin toisen kertaluvun momentin vaikutuksia mastojäykisteisen perustusten käyttöasteisiin. Lisämomentti kasvattaa pystykuorman epäkeskisyyttä, joka nostaa perustusten käyttöastetta. Laskelmista selvisi toisen kertaluvun momentin vaikutuksen olevan etenkin kallionvaraisella ja maanvaraisella perustamisella melko merkittävä kuormittava tekijä.

Kallionvaraisella perustamistavalla toisen kertaluvun vaikutus nosti 12 metrin nurjahduspituudella momenttivaikutusta perustukselle jopa 15 kNm. Tämä on erittäin merkittävä kuorman lisäys perustukselle. Kuormituksen merkittävä kasvu johtui kriittisen epätarkkuustekijän pienyydestä ja nurjahduspituuden suuruudesta. Epäkeskinen normaalivoiman kuormitus aiheuttaa kalliovaraiselle perustukselle taivutusmomenttia, jolloin tutkitaan perustuksen kaatumisvarmuutta. Käyttöasteen muutokset perustukselle muuttuivat suurimmillaan jopa 20 prosenttiyksikköä kallionvaraiselle perustukselle. Vaikutukset käyttöasteeseen ovat suurempia, mitä pienempi anturan sivumitta on suhteessa toisen kertaluvun aiheuttamaan lisäepäkeskisyyteen. Tästä syystä erityisesti kallioanturoilla vaikutuksesta saattavat olla hyvin merkittäviä.

Maanvaraiselle perustukselle toisen kertaluvun momentti aiheutti myös suuria käyttöasteiden muutoksia ja niitä kannattaa tutkia suunnitellessa mastojäykisteistä pilaria. Kaatavan momentin suuruus muuttui toisen kertaluvun huomioitavien vaikutuksesta suurimmillaan jopa 15 kNm. Vaikutuksen aiheutti nurjahduspituuden suurentaminen 12 metriin, joka pienensi kriittisen epätarkkuustekijän arvoa. Nurjahduspituuden suurentaminen loi enemmän sivusiirtymää rakenteelle ja näin enemmän lisämomenttia.

Paaluperustukselle toisen kertaluvun momentin vaikutukset eivät aiheuttaneet tässä opinäytetyössä käytetyillä lähtöarvoilla kriittisiä käyttöasteen ylityksiä, mutta toisen kertaluvun momentin vaikutuksia huomattiin perustukselle aiheutuvissa kuormituksissa. Käyttöasteet kasvoivat perustukselle myös jopa 12 prosenttiyksikköä. Laskennan perusteella voidaan huomata momenttikuorman ja käyttöasteiden nousun olevan hieman maltillisempia. Lisämomentin suuruus on hieman alhaisempi kuin muilla perustustyypeillä. Momenttikuorma perustukselle kasvoi myös paaluperustukselle toisen kertaluvun lisämomentin vaikutuksesta jopa noin 10 kNm. Lisämomentin vaikutus oli alhaisempi kuin muilla perustustyypeillä, koska perustuksen kaatumisvarmuus on suurempi paalujen ansiosta. Toisen kertaluvun momentin laskemisesta luotiin vuokaavio, jossa esitetään laskennan kulku.

Käyttöasteiden nousu esimerkkilaskelmissa oli noin 5–20 prosenttiyksikköä. Tyypillisesti perustusrakenteet mitoitetaan 80–90 % käyttöasteelle, joten jos toisen kertaluvun vaikutukset jätetään huomioimatta, niin on todellinen riski, että perustusrakenteesta tulee alimitoitettu eikä vaadittavaa kestävyyttä saavuteta. Kallionvaraisella ja maanvaraisella perustamistavalla toisen kertaluvun momentti vaikutti enemmän, koska näillä perustustyypeillä momentti luo enemmän rasitusta kallionvaraisen perustuksen liitoksiin maahan ja maanvaraisella perustuksella kaatumisvarmuus on pienempi. Paaluperustuksella momenttikuorman ottaa vastaan paalut, jotka siirtävät voiman kantavaan maaperään.

Teräspilarin toisen kertaluvun teorian mukaan vaikutuksia pystytään laskemaan kaikenlaisien perustustyyppien mitoittamisessa. Toisen kertaluvun momentti aiheutuu pilarikuormalle, joka vaikuttaa pilarin kautta perustukselle. Perustukselle tuleva kuormaa suurennetaan toisen kertaluvun teorian mukaan. Perustukset mitoitetaan perustustyyppistä riippuen standardien mukaan ja kuormana käytetään toisen kertaluvun huomioivaa kuormitusta. Suunnittelutilanteessa mastopilarin ja perustusten väliseen liitokseen aiheutuvat lisärasitukset tulee huomioida, vaikka toisen kertaluvun momentin vaikutus liitoksiin rajattiin pois tästä opinäytetyöstä.

Toisen kertaluvun teorian mukaan kannattaa varmistaa, mikäli suunnittelija on suunnittelemassa mastojäykisteisten pilarien perustuksia. Kuten laskennassa todistettiin, vaikutukset

perustukselle saattaa olla merkittäviäkin ja mikäli vaikutukset jätetään huomioimatta, perustuksella on riski olla rakennejärjestelmän heikoin kohta.

Tämän opinnäytetyön pohjalta voisi tutkia toisen kertaluvun momentin vaikutuksia perustusten suunnittelussa enemmän esimerkiksi erilaisilla pilareilla ja eri kokoisilla perustuksilla. Opinnäytetyössä huomattiin toisen kertaluvun vaikutuksen olevan perustustyypistä riippuen merkittävä mitoittava tekijä perustusten suunnittelussa, joten sitä kannattaisi tutkia myös enemmän varsinkin suurten teollisuushallien suunnittelussa.

Lähteet

BE-Group. 2020. Teräsrakentajan käsikirja.

<https://www.begroup.fi/storage/50DF70DB27B273C31A577A2353FADFC29DA972AEA4D47289A795979393B51158/6d68254c1ffa48348d96d72388782379/pdf/media/c543eac1527f4652b496429bdbd666cf/BE-Group-Terasrakentajan-kasikirja-web.pdf>

Betoniteollisuus ry. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan, Osa 6: Perustukset

Betoniteollisuus ry. Perustukset. 23.4.2022 Saatavissa

<https://betoni.com/koti-betonista/rakennustapavaihtoehdot/perustukset/>

BY 30–2, 1988. Betonirakenteiden yksityiskohtien ja raudoituksen suunnitteluohjeet.

Jääskeläinen, R. 2009. Pohjarakennuksen perusteet. 1. painos. Tammertekniikka / AmkKustannus Oy.

Kerokoski, O. 2017. RAK-32110 Betonirakenteiden perusteet, Tampereen teknillinen yliopisto

Kulman, M. 2001. Rautateiden maanvaraiset pylväsperustukset. Lisensiaatintutkimus.

Leskelä M. V., By 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus, Suomen Betoniyhdistys r.y, 2008

Ongelin, S. Valkonen, I. 2012. Rakenneputket EN-1993-käsikirja. Rautaruukki Oyj.

Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2011. SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Soveltamisala.

Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2005. SFS-EN-1992-1-1 Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2005. SFS-EN-1993-1-1 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

Sweco Rakennetekniikka Oy. <https://www.sweco.fi/>

Thomas Telford. 2005. Designers' guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2. Eurocode 2: design of concrete structures: general rules and rules for buildings and structural fire design.

Tiainen, T. Papula, S. 2020. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus – Eurocode 3 -oppikirja. Teräsrakeneyhdistys ry.

Vaajasaari, H. 2016. Teräsrakenteiden suunnitteluohje, Diplomityö

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/24414/Vaajasaari.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Puuinfo. Rakennuksen jäykistys. 23.4.2022. Saatavissa

<https://puuinfo.fi/rakenteet/rankarakenteet/rakennuksen-jaykistys>

Liite 1

Kallionvarainen perustus		Nurjahduspituus	6000 mm										
Ncr	8934706 N 8934,706 kN	muutos kuormassa	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,1	1,5	2,0	2,5	3,2	
		muutos käyttöasteessa	1 %	2 %	3 %	4 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %	
		käyttöaste kaatumiselle	6 %	9 %	10 %	12 %	13 %	14 %	15 %	16 %	17 %	18 %	SKOL
		N_{Ed}	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	Lähtöarvo
		α_{cr}	89,3	44,7	29,8	22,3	17,9	14,9	12,8	11,2	9,9	8,9	
		N_{Ed}^*e	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	kNm
		Lisämomentti	2,5	5,1	7,8	10,5	13,2	16,1	19,0	22,0	25,0	28,2	kNm
		uusi käyttöaste	7 %	11 %	13 %	16 %	19 %	21 %	23 %	25 %	27 %	29 %	
		Nurjahduspituus	9000 mm										
Ncr	3970980 N 3970,98 kN	muutos kuormassa	0,1	0,3	0,6	1,1	1,8	2,7	3,7	5,0	6,6	8,4	
		muutos käyttöasteessa	3 %	5 %	8 %	10 %	13 %	15 %	18 %	20 %	23 %	25 %	
		käyttöaste kaatumiselle	0,06	0,09	0,1	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	SKOL
		N_{ed}	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	Lähtöarvo I
		α_{cr}	39,7	19,9	13,2	9,9	7,9	6,6	5,7	5,0	4,4	4,0	
		N_{ed}^*e	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	kNm
		Lisämomentti	2,6	5,3	8,1	11,1	14,3	17,7	21,2	25,0	29,1	33,4	kNm
		uusi käyttöaste	9 %	14 %	18 %	22 %	26 %	29 %	33 %	36 %	40 %	43 %	
		Nurjahduspituus	12000 mm										
Ncr	2233677 N 2233,677 kN	muutos kuormassa	0,1	0,5	1,2	2,2	3,6	5,5	8,0	11,2	15,2	20,3	
		muutos käyttöasteessa	4 %	9 %	13 %	18 %	22 %	27 %	31 %	36 %	40 %	45 %	
		käyttöaste kaatumiselle	6 %	9 %	10 %	12 %	13 %	14 %	15 %	16 %	17 %	18 %	SKOL
		N_{ed}	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	Lähtöarvo
		α_{cr}	22,3	11,2	7,4	5,6	4,5	3,7	3,2	2,8	2,5	2,2	
		N_{ed}^*e	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	kNm
		Lisämomentti	2,6	5,5	8,7	12,2	16,1	20,5	25,5	31,2	37,7	45,3	kNm
		uusi käyttöaste	10 %	18 %	23 %	30 %	35 %	41 %	46 %	52 %	57 %	63 %	

Maanvarainen perustus

	8934706 N	Nurjahduspituus	6000 mm							
Ncr	8934,706 kN	muutos kuormassa	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,1	1,5	
		muutos käyttöasteessa	1 %	2 %	3 %	5 %	6 %	7 %	9 %	
		käyttöaste kaatumiselle/pohjapair	16 %	30 %	44 %	59 %	73 %	87 %	101 %	SKOL
		Ned	100	200	300	400	500	600	700	Lähtöarvo
		α_{cr}	89,3	44,7	29,8	22,3	17,9	14,9	12,8	
		Ned*e	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	kNm
		Lisämomentti	2,5	5,1	7,8	10,5	13,2	16,1	19,0	kNm
		uusi käyttöaste	17 %	32 %	47 %	64 %	79 %	94 %	110 %	

	3970980 N	Nurjahduspituus	9000 mm							
Ncr	3970,98 kN	muutos kuormassa	0,1	0,3	0,6	1,1	1,8	2,7	3,7	
		muutos käyttöasteessa	3 %	5 %	8 %	11 %	14 %	18 %	21 %	
		käyttöaste kaatumiselle/pohjapair	16 %	30 %	44 %	59 %	73 %	87 %	101 %	SKOL
		Ned	100	200	300	400	500	600	700	Lähtöarvo
		α_{cr}	39,7	19,9	13,2	9,9	7,9	6,6	5,7	
		Ned*e	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	kNm
		Lisämomentti	2,6	5,3	8,1	11,1	14,3	17,7	21,2	kNm
		uusi käyttöaste	19 %	35 %	52 %	70 %	87 %	105 %	122 %	

	2233677 N	Nurjahduspituus	12000 mm							
Ncr	2233,677 kN	muutos kuormassa	0,1	0,5	1,2	2,2	3,6	5,5	8,0	
		muutos käyttöasteessa	5 %	10 %	16 %	22 %	29 %	37 %	46 %	
		käyttöaste kaatumiselle/pohjapair	16 %	30 %	44 %	59 %	73 %	87 %	101 %	SKOL
		Ned	100	200	300	400	500	600	700	Lähtöarvo
		α_{cr}	22,3	11,2	7,4	5,6	4,5	3,7	3,2	
		Ned*e	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	kNm
		Lisämomentti	2,6	5,5	8,7	12,2	16,1	20,5	25,5	kNm
		uusi käyttöaste	21 %	40 %	60 %	81 %	102 %	124 %	147 %	

Paaluperustus

		Nurjahduspituus	6000 mm										
Ncr	4161930 N	muutos kuormassa	0,1	0,3	0,6	1,1	1,7	2,5	3,5	4,8	6,2	7,9	
	4161,93 kN	muutos käyttöasteessa	2 %	5 %	7 %	10 %	12 %	14 %	17 %	19 %	22 %	24 %	
		käyttöaste kaatumiselle	4 %	8 %	12 %	17 %	21 %	25 %	29 %	33 %	37 %	42 %	SKOL
		Ned	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	Lähtöarvo
		α_{cr}	41,6	20,8	13,9	10,4	8,3	6,9	5,9	5,2	4,6	4,2	
		Ned*e	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	kNm
		Lisämomentti	2,6	5,3	8,1	11,1	14,2	17,5	21,0	24,8	28,7	32,9	kNm
		uusi käyttöaste	6 %	13 %	19 %	27 %	33 %	39 %	46 %	52 %	59 %	66 %	
		Nurjahduspituus	9000 mm										
Ncr	1849747 N	muutos kuormassa	0,1	0,6	1,5	2,8	4,6	7,2	10,7	15,2	21,3	29,4	
	1849,747 kN	muutos käyttöasteessa	5 %	11 %	16 %	22 %	27 %	32 %	38 %	43 %	49 %	54 %	
		käyttöaste kaatumiselle	4 %	8 %	12 %	17 %	21 %	25 %	29 %	33 %	37 %	0,42	SKOL
		Ned	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	Lähtöarvo
		α_{cr}	18,5	9,2	6,2	4,6	3,7	3,1	2,6	2,3	2,1	1,8	
		Ned*e	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	kNm
		Lisämomentti	2,6	5,6	9,0	12,8	17,1	22,2	28,2	35,2	43,8	54,4	kNm
		uusi käyttöaste	9 %	19 %	28 %	39 %	48 %	57 %	67 %	76 %	86 %	96 %	
		Nurjahduspituus	12000 mm										
Ncr	1040482 N	muutos kuormassa	0,3	1,2	3,0	6,2	11,6	20,4	36,0	66,5	144,1	617,6	
	1040,482 kN	muutos käyttöasteessa	10 %	19 %	29 %	38 %	48 %	58 %	67 %	77 %	86 %	96 %	
		käyttöaste kaatumiselle	4 %	8 %	12 %	17 %	21 %	25 %	29 %	33 %	37 %	42 %	SKOL
		Ned	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	Lähtöarvo
		α_{cr}	10,4	5,2	3,5	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0	
		Ned*e	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	kNm
		Lisämomentti	2,8	6,2	10,5	16,2	24,1	35,4	53,5	86,5	166,6	642,6	kNm
		uusi käyttöaste	14 %	27 %	41 %	55 %	69 %	83 %	96 %	110 %	123 %	138 %	

Laskentavuokaavio toiselle kertaluvulle

