

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka, Lappeenranta
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Mikko Pieksamä

Paikalla valettavien betonisten savu- ja poistoilmapiippujen mitoittaminen

Opinnäytetyö 2014

Tiivistelmä

Mikko Pieksemä

Paikalla valettavien betonisten savu- ja poistoilmapiippujen mitoittaminen, 29 sivua, 1 liite (13 sivua)

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka, Lappeenranta

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2014

Ohjaajat: lehtori Petri Himmi, Saimaan ammattikorkeakoulu

rakennesuunnittelija Matti Paavola, FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy

Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa Excel-pohjainen laskentaohjelma betonisten savu- ja poistoilmapiippujen rakenteellista mitoittamista varten. Ohjelman tarkoituksena oli nopeuttaa ja helpottaa rakenteelle tehtävää mitoittamista sekä tutkia tarkasti uusien eurokoodin mukaisten tuulikuormitusten muodostumista sekä niiden mitoittamista. Työn edetessä työhön lisättiin myös piipun perustusten rakenteellinen sekä geotekninen mitoittamistarkastelu. Kaikki kuormitukset ja mitoittamiset oli tarkoitettu laskettaviksi eurokoodin ja sen kansallisen liitteen ohjeistuksen mukaisesti.

Työn tilaajana toimi FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy, joka on erikoistunut talo- ja laitossuunnitteluun, infra- ja yhdyskuntasuunnitteluun sekä ympäristö- ja energiakonsultointiin. FCG-konsernin emoyhtiö on FCG Finnish Consulting Group Oy, joka on yksi Suomen suurimmista monialaisista konsulttiyrityksistä.

Opinnäytetyön tekeminen jakautui kahteen osaan. Ensimmäiseksi luotiin laskentaohjelma piippujen mitoittamista varten ja toisessa osassa tämä raportti. Tämän raporttiosuuden päätavoitteena on selostaa laskentaohjelmassa tehdyt laskelmat sekä analysoida ohjelmasta saatavia tuloksia.

Aiheen suurimpana haasteena oli luoda eurokoodin mukaisen tuulikuormituksen tarkka määrittäminen korkeille ympyräputken muotoisille rakennuksille, mikä toi myös haastetta piipun rakenteelliseen mitoittamiseen.

Asiasanat: betonirakenteet, savu- ja poistoilmapiiput, eurokoodi

Abstract

Mikko Pieksemä

Structural design of cast in place exhaust pipes and chimneys, 29 Pages, 1 Appendix (13 Pages)

Saimaa University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Degree Programme in Civil and Construction Engineering

Specialisation in Structural Engineering

Bachelor's Thesis 2014

Instructors: Mr Petri Himmi, lecturer, Saimaa University of Applied Sciences

Mr Matti Paavola, structural engineer, FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy

The main objective of this Bachelor's Thesis was to produce Excel-based structural design calculation program of cast in place exhaust pipes and chimneys. The goal of the program was to speed up and simplify structural design and explore in close look at the newest eurocode based wind actions. The structural and geotechnical designs of the foundation were added to the scope of work as the work progressed. All of the designing was intended to be calculated according to the eurocodes.

The work was commissioned by FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy, which is specialized in house and facility design, infrastructure and community planning, as well as environmental and energy consulting. The parent company of FCG-group is FCG Finnish Consulting Group Oy, which is one of the largest multi-industry consulting companies in Finland.

The thesis was divided into two parts. The first part was to create the calculation program for the structural design of the chimney and its foundation and the second part was this report. The main goal of this report is to review calculations and analyze results.

The biggest challenge of this thesis was the circular cylinder form of the chimneys. Wind actions and structural design of the pipe were more complicated to calculate when the form was not the basic rectangular.

Keywords: concrete structures, smoke and exhaust chimneys, eurocode

Sisältö

1	Johdanto.....	5
2	Savu- ja poistoilmapiiput	6
2.1	Yleistä	6
2.2	Liukuvalu.....	6
3	Mitoitusohjelma	8
3.1	Käytön rajoitukset	8
3.2	Lähtötiedot	9
3.3	Laskentaosuus.....	9
3.4	Tulokset	10
3.5	Lisänä ohjelmaan.....	10
4	Eurokoodin EN 1991-1-4 ero ohjeeseen RIL 201-1-2008	11
5	Kansallisen liitteen muutokset eurokoodiin EN 1991-1-4	11
5.1	Tuulikuormitukset.....	11
5.2	Pyörreratailmiö ja aeroelastiset epästabiliisuusilmiöt.....	12
6	Tuulikuormitukset	12
6.1	Yleistä	12
6.2	Puuskanopeuspaine	12
6.3	Rakennekerroin $c_s c_d$	15
6.4	Pintoihin vaikuttava tuulenpaine ja kokonaistuulikuormitukset.....	16
7	Muut kuormitukset	18
8	Käyttörajatilamitoitukset	19
9	Murtorajatilamitoitukset	19
9.1	Piipun betonin mitoitus.....	19
9.2	Piipun raudoituksen mitoitus	20
9.3	Perustuksen rakenteellinen mitoitus	20
9.4	Perustuksen geotekninen mitoitus	21
9.5	Menekit ja hinnat.....	21
10	Tulosten analysointia.....	22
10.1	Suomen tuuliolosuhteiden vertailua eurokoodilaskentaan.....	22
10.2	Hoikkuden määrittäminen	23
11	Yhteenveto	27
	Kuvat	28
	Lähteet	29

Liitteet

Liite 1 Mitoitusohjelman laskentaosuus (13 sivua)

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selostaa opinnäytetyön toisena osana luodun Excel-pohjaisen laskentaohjelman mitoitusohjelman kulku sekä analysoida laskentaohjelmasta saatavia tuloksia. Työssä tutustutaan yleisellä tasolla myös betonirakenteisiin piippuihin ja niiden rakentamiseen liukuvalutekniikalla.

Työssä käydään tarkasti läpi eurokoodin mukaisen tuulikuormituslaskennan eri vaiheet sekä tutustutaan myös piipun ja sen perustuksen rakenteelliseen sekä geotekniseen mitoittamiseen. Lopuksi käydään läpi laskennallisten tuulikuormitusten vertailua Suomessa mitattuun tilastotietoon sekä analysoidaan ohjelmasta saatuja tuloksia piipun hoikkuuden taloudelliseen määrittämiseen.

Tuulikuormitusten eurokoodin mukainen laskenta varsinkin pyöreälle muodolle on erittäin monimutkaista ja aikaa vievää, joten valmiin mitoitusohjelman käyttäminen tulevaisuuden hankkeissa on paljon tehokkaampaa. Tällä hetkellä ei ole paljoakaan laskentaesimerkkejä saatavilla piippujen mitoittamisesta, joten tietojen kokoaminen monista eri lähteistä ja mitoitusohjelman läpikäyminen tuli tarpeeseen.

2 Savu- ja poistoilmapiiput

2.1 Yleistä

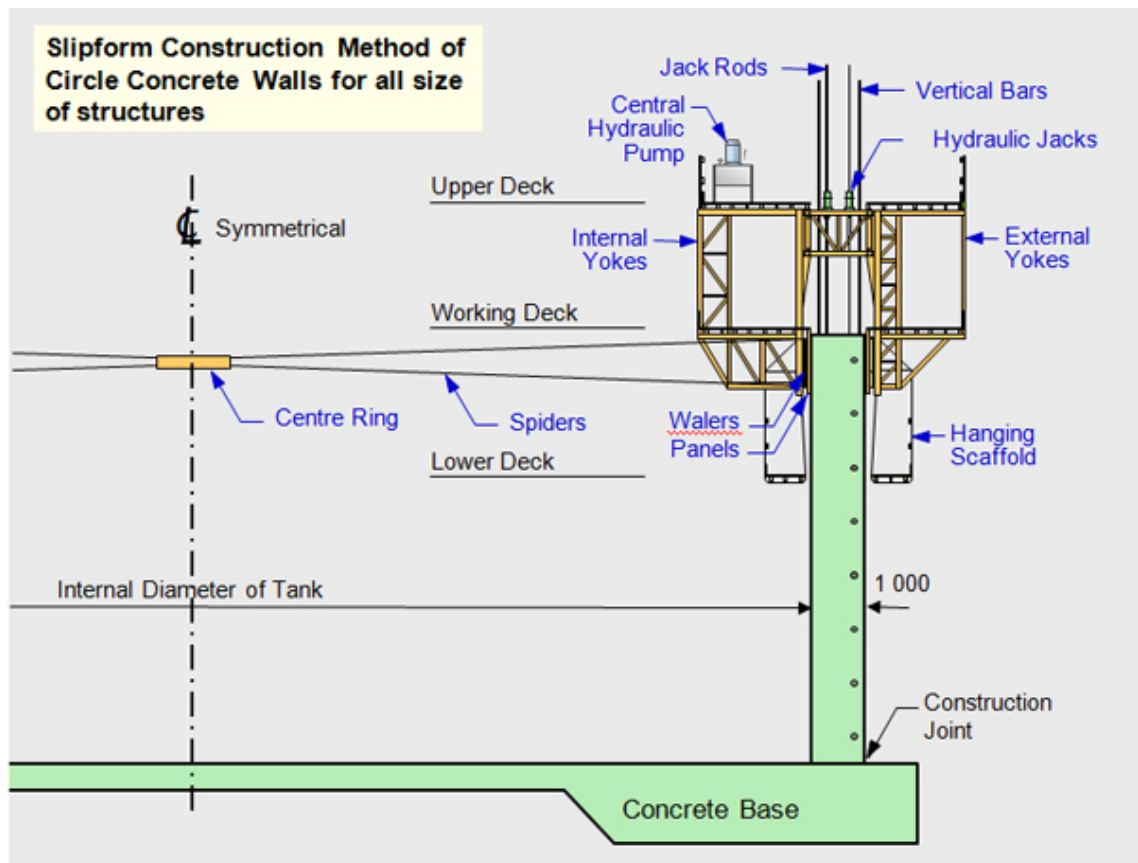
Savu- ja poistoilmapiippujen tarkoituksena on johtaa palokaasut ja muut haitalliset kaasut ulkoilmaan. Ne voidaan rakentaa betonista, teräksestä tai muuramalla tiilistä. Betonirakenteiset piiput voidaan tehdä myös valmiista elementeistä, mutta tässä opinnäytetyössä keskitytään ainoastaan paikalla valettaviin piippuihin. Tämä opinnäytetyö ei myöskään käsittele pientalojen savupiippujen mitoitusta, vaan kyseessä ovat suuret teollisuuden käyttämät piiput. Piiput voidaan tehdä lähes minkä muotoisina vain, mutta pyöreä muoto on lähes poikkeuksetta taloudellisin ja helpoin toteuttaa.

Suomessa suurimmat savu- ja poistoilmapiiput rajoittuvat korkeudeltaan alle 160 metriin, kun taas maailman korkein piippu on jopa 420 metriä korkea. Eurokoodin mukaista tuulikuormituslaskentaa voidaan soveltaa ainoastaan rakennuksiin, joiden korkeus on alle 200 m, mikä riittää Suomen mittakaavalla hyvin.

2.2 Liukuvalu

Paikalla valettavat betonirakenteiset piiput tehdään pääasiassa liukuvaluna. Liukuvalun ideana on siirtää muottia jatkuvana liikkeenä hiljalleen ylöspäin valun edetessä. Liukuvalun nopeus vaihtelee, mutta se on yleensä noin 150 - 350 mm tunnissa. Muotin korkeus määräytyy betonin kovettumisajan ja liukuvalun etenemisnopeuden mukaan. Mikäli liukuvaluun tarvitaan suurta nopeutta, niin voidaan käyttää rapid-sementistä tehtyä betonia, mikä nopeuttaa betonimassan kovettumista. Muotin korkeus on tavallisesti 1 – 1,2 metriä. (The Concrete Society, 2014)

Muottikalusto on kiinnitetty tunkkien varaan, jotka sijaitsevat valun keskelle upotettujen sileiden terästankojen päässä. Tunkkien avulla koko muottikalustokoneistoa siirretään ylöspäin valun edetessä. Myös raudoitusta lisätään sitä mukaa kun työ etenee. Kuvassa 1 on esitetty liukuvalukalusto ja siihen kuuluvat osat.

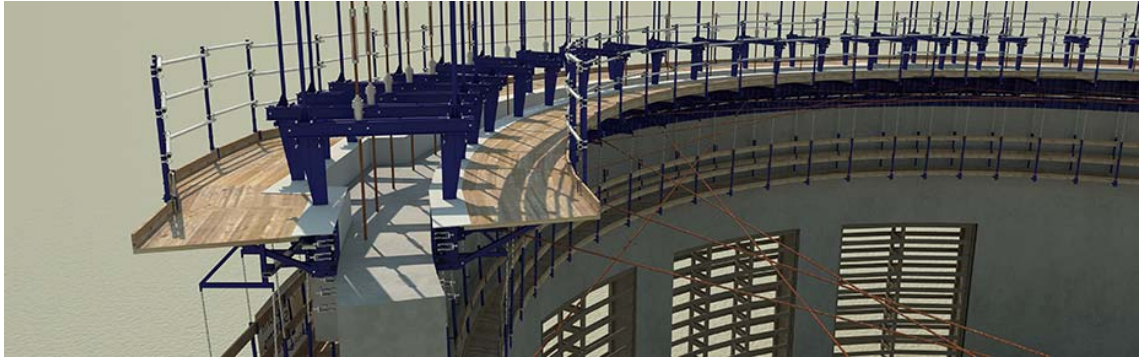


Kuva 1. Liukuvalun muottikaluston osat (Energy World Corporate, 2014)

Kuvan 1 liukuvalukoneistolla valetaan ympyränmuotoista piippurakennetta. Kuvassa näkyy hydraulitunkit (hydraulic jacks), työskentelytasot (upper deck, working deck, lower deck) ja itse muotti (walers, panels).

Liukuvalutekniikka tulee hyödylliseksi silloin, kun suunniteltava rakennus on korkea tai pitkä, poikkileikkaukseltaan yhdenmuotoinen sekä lähes aukoton. Rakenne voidaan kuitenkin tehdä liukuvaluna vaikka sen poikkileikkaus kapeni si ylöspäin mentäessä tai siinä olisi paljon aukkoja ja ulokkeita. Nämä seikat vain lisäävät kustannuksia ja hidastavat etenemistä. Aukot tehdään liukuvalussa upottamalla erikokoisia muotteja valuun. Kun liukuvalukoneisto on asennettu, on työn eteneminen sen jälkeen melko nopeaa. Valmiista pinnasta tulee täysin saumaton, koska betoni ei ehdi missään välissä kovettua kunnolla ennen kuin uutta betonia tulee jo päälle. Ainoastaan valun aloitus- ja lopetuskohtaan syntyy työsauma. Liukuvalutekniikka on myös ekologinen vaihtoehto, koska työssä ei synny muottijätettä, vaan kaikkia osia käytetään seuraavalla kerralla uudelleen. (STEELFORMER CO.,LTD., 2014)

Liukuvalun huono puoli on sen koneiston suuri hinta. Pieniä kohteita ei näin ol-
len liukuvaluna kannata tehdä. Mikäli rakennuskohde on suuri, alkuinvestointi
koneistoon säästetään työn edetessä, kun uutta muottia ei tarvitse koko ajan
rakentaa lisää. Työtelineetkin liikkuvat muottikaluston mukana, joten niitäkään ei
tarvitse erikseen pystyttää.



Kuva 2. Liukuvalun toteuttaminen ulokkeella (Slipform Systems Austria, 2014)

Kuvassa 2 on esitetty yksi vaihtoehtoinen tapa, miten liukuvaluun voi luoda
ulokkeen. Uloke voi olla vain osan matkaa, jonka jälkeen muotissa oleva laa-
jennus tukitaan.

3 Mitoitusohjelma

3.1 Käytön rajoitukset

Ohjelmaa käytettäessä on hyvä olla perus tietämys yleisesti rakennetekniikasta
sekä eurokoodien mukaisista kuormituksista.

Mitoitettavan rakenteen poikkileikkauksen on oltava koko korkeudeltaan vakio
sekä ympyräsylinterin muotoinen. Ohjelma huomioi ainoastaan yhden aukon
poikkileikkauksessa, ja sen on sijaittava piipun juuressa. Piipun perustuksen on
oltava pohjaltaan neliön muotoinen, ja se mitoitetään ilman leikkausraudoitusta.

Ohjelma ei huomioi viereisten tai peräkkäisten rakennusten vaikutusta, mutta
ottaa ne huomioon antamalla minimietäisyydet, minkä jälkeen tuulikuormitus
muuttuu. Ohjelma ei myöskään huomioi savupiippujen palokaasujen lämpötilas-
ta aiheutuvia vaikutuksia.

3.2 Lähtötiedot

Ohjelmaan syötetään lähtötietoina:

- Alueen tiedot (maastoluokka, tuulennopeuden modifioimaton perusarvo, maaston kaltevuus- ja sijaintikertoimet sekä niiden vaikutuskorkeus ja ilman tiheys)
- Maaolosuhteet (kitkakulma, tilavuuspainot anturan ala- ja yläpuolella sekä perustussyvyys)
- Piipun tiedot (korkeus, ulkohalkaisija, seinämäpaksuus, mahdollisen aukon mitat, betonin lujuusluokka, betonipeitepaksuus sekä alimpien pääterästen koko, jako ja laatu)
- Perustuksen tiedot (korkeus, leveys, piipun alapään mahdollinen levennys, betonin lujuusluokka, betonipeitepaksuus sekä alapinnan raudoituksen koko, jako ja laatu)
- Materiaalien hintatiedot (betonin hinta muodossa e/m³ ja teräksen hinta muodossa e/kg)

Lähtötietojen syöttämisen apuna on laskentaohjelmaan luotu välilehti "LÄHTÖTIETOJEN OHJE", josta saadaan kaikki tarvittava tieto lähtöarvojen oikeaoppiseen syöttämiseen.

3.3 Laskentaosuus

Laskentaosuus koostuu kahdesta osasta. Ensimmäisessä osassa lasketaan piippuun vaikuttavat kuormitukset ja toisessa osassa mitoitetaan rakenne. Mitoitukset on jaettu käyttörajatilan mitoituksiin ja murtorajatilan mitoituksiin.

Laskennan eri vaiheet on esitetty kuvassa 3.

1 TUULIKUORMITUKSET

- 1.1 Puuskanopeuspaine
- 1.2 Ulkopuolisen paineen kertoimet
- 1.3 Rakennekerroin cscd
- 1.4 Ulkopintoihin vaikuttava tuulenpaine ja kokonaistuulikuormitukset
- 1.5 Viereiset ja peräkkäiset rakennukset

2 MITOITUKSET

- 2.1 Käyttörajan mitoitus
 - 2.1.1 *Staattiset ominaisuudet*
 - 2.1.2 *Taipuma*
 - 2.1.3 *Pyörreratailmiö ja aerolastiset epästabiiliusilmiöt*
- 2.2 Murtorajan mitoitus
 - 2.2.1 *Piipun betonin mitoitus*
 - 2.2.2 *Piipun raudoituksen mitoitus*
 - 2.2.3 *Perustusten rakenteellinen mitoitus*
 - 2.2.4 *Perustusten geotekninen mitoitus*
- 2.3 Menekit ja hinnat

Kuva 3. Mitoitusohjelman laskennan kulku

Tarkempi esitys laskennasta on tämän opinnäytetyön liitteessä 1, joka on kuva-kaappaus mitoitusohjelman laskentaosuudesta.

3.4 Tulokset

Tulokset esitetään Excelissä lähtötietojen kanssa samalla välilehdellä lähtötietojen viereisellä sivulla, jotta lähtötietojen muuttamisen vaikutukset näkyvät heti samassa ikkunassa. Näin pystytään helposti optimoimaan rakenteelle järkevät mitat ja teräsmäärät eri mitoitusohjelmien tulosten käyttöasteita seuraamalla.

3.5 Lisänä ohjelmaan

Mitoitusohjelmalle on laskentaosuuden lisäksi luotu myös ohje sen käyttämistä varten sekä tulostesivu, josta kaikki oleelliset tiedot piipun mitoituksesta voidaan kätevästi tulostaa A4 muodossa.

Eurokoodin mukaisia kuormituksia on myös vertailtu vanhojen RIL 144-1997 sekä RIL 144-2002 ohjeiden mukaisiin laskelmiin laskentaohjelman välilehdellä ”RIL-144 LASKELMAT”.

4 Eurokoodin EN 1991-1-4 ero ohjeeseen RIL 201-1-2008

Vaikka Suunnitteluohje RIL 201-1-2008 onkin tiivistetty versio eurokoodista, niin on niissä silti eroavaisuuksia. RIL:n mukaan ohjetta ei saa käyttää yli 100 m korkeiden rakennusten mitoittamiseen, eikä se huomioi erikoisrakenteiden, kuten savupiippujen suunnittelua. Eurokoodin mukaiset laskelmat pätevät, jos rakennus on alle 200 m korkea. Mitoitettavan rakenteen ollessa ympyräsylinterin muotoinen, ei RIL anna minkäänlaisia ohjeita muodon vaikutuksen laskemiseen, vaan kehottaa katsomaan ohjeita eurokoodin puolelta. Tästä johtuen korkeita piippurakenteita mitoittaessa tuulikuormitukset on täytynyt laskea kokonaan eurokoodin ja sen kansallisen liitteen ohjeiden mukaisesti. RIL-ohjeeseen on kuitenkin jo suoraan lisätty kansallisen liitteen muutokset, joita Suomessa tulisi käyttää.

5 Kansallisen liitteen muutokset eurokoodiin EN 1991-1-4

5.1 Tuulikuormitukset

Kansallisen liitteen mukaan Suomessa voidaan käyttää tuulennopeuden modifioimattomalle perusarvolle aina arvoa 21 m/s maastosta tai sijainnista riippumatta. Ohje on annettu eurokoodin muutoksen SFS-EN 1991/A1:2010 kansallisessa liitteessä. Alkuperäisessä eurokoodin kansallisessa liitteessä arvot olivat 21 m/s manneralueille, 22 m/s merialueille, 25 m/s tunturien lakialueille ja 21 m/s tunturien juurille.

Maastoluokassa 0 maastokertoimelle k_r käytetään aina arvoa 0,18, mikä suurentaa kuormitusta melkoisesti siirryttäessä maastoluokasta I maastoluokkaan 0. Tämä muutos on tehty merialueilla mitattujen tilastotietojen pohjalta.

Pinnanmuotokertoimen c_0 laskennan kaava poikkeaa hieman kansallisessa liitteessä eurokoodista. Eurokoodin mukainen menetelmä on epäselvä tilanteissa, joissa loivan rinteiden kaltevuus vaihtelee arvon 0,05 molemmin puolin. Myöskin ehtojen raja-arvoissa on muutoksia.

Ilman tiheydelle annetaan myös laskentakaava kansallisessa liitteessä, mutta suositusarvo 1,25 pätee useimmissa rakenteissa, joten ohjelma käyttää sitä

oletusarvona. Kuitenkin laskettaessa ilman tiheys kansallisen liitteen kaavalla merenpinnassa -30 asteen pakkasessa, mikä on Suomessa aivan mahdollinen tilanne, saadaan tiheyden arvoksi 1,45. Tämä suurentaa kuormitusta lähes 15 %, joten varmalla puolella oleva ratkaisu olisi suurentaa ilman tiheyden suositusarvoa rakennuspaikan korkeusaseman mukaan. Ohjelman lähtötiedoissa voidaan ilman tiheyden suositusarvo muuttaa, jos halutaan lisää varmuutta laskentaan.

5.2 Pyörreratailmiö ja aeroelastiset epästabiiiliusilmiöt

Kansallinen liite suosittelee laskemaan ilmiöt eurokoodin liitteen E kappaleen 1.5.3 mukaan, koska kappale 1.5.2 ei ota huomioon vahvistusvaikutusta. Opin- näytetyössä näitä ilmiöitä ei kuitenkaan tarkastella vaan ne on rajattu sen ulko- puolelle.

6 Tuulikuormitukset

6.1 Yleistä

Mitoitusohjelman tuulikuormitukset on laskettu eurokoodin EN 1991-1-4 ja sen muutoksen SFS-EN 1991/A1:2010 sekä siihen liittyvän kansallisen liitteen mukaisesti. Mikäli tässä luvussa viitataan eurokoodiin, niin sillä tarkoitetaan aina eurokoodin standardoitua osaa EN 1991-1-4 tai sen muutosta liitteineen.

6.2 Puuskanopeuspaine

Eurokoodin mukaisia tuulikuormituksia tutkittaessa on aluksi laskettava puuska- nopeuspaine, jota käytetään lopullisen kuormituksen perusarvona kokonais- ja osatuulikuormien laskennassa.

Puuskanopeuspaineen laskenta alkaa tuulennopeuden modifioimattoman pe- rusarvon valinnasta, mikä vastaa 10 minuutin keskimääräistä tuulennopeutta 10 m korkeudella mitattuna, ja jonka vuotuinen ylittymistodennäköisyys on 2 % tuu- len suunnasta riippumatta. Kansallisen liitteen mukaan on hyväksyttävää käyt- tää Suomessa paikasta riippumatta aina arvoa 21 m/s. Lähtötiedoissa voi kui-

tenkin valita myös suurempia arvoja tuulennopeudelle, jos halutaan saada lisää varmuutta laskentaan tai jos rakennuspaikan olosuhteet sitä vaativat.

Tuulennopeuden perusarvon v_b (1) laskemiseksi tuulennopeuden modifioimaton perusarvo $v_{b,0}$ kerrotaan suuntakertoimella c_{dir} sekä vuodenaikakertoimella c_{season} . Näille kertoimille suositusarvo on eurokoodissa 1, eikä kansallinen liite-kään anna niille arvoja, joten tuulennopeuden modifioimaton perusarvo on käytännössä sama kuin tuulennopeuden perusarvo.

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (1)$$

Pinnanmuotokerroin c_o (2a, 2b ja 2c) lasketaan maaston kaltevuuden huomioivalla kertoimella Φ , sekä sijaintikertoimella s . Kertoimien arvot määritellään tarkasti eurokoodin liitteessä A. Kuormitus kasvaa huomattavasti, jos maasto on kaltevaa ja rakennus sijaitsee mäen huipulla tai mäessä.

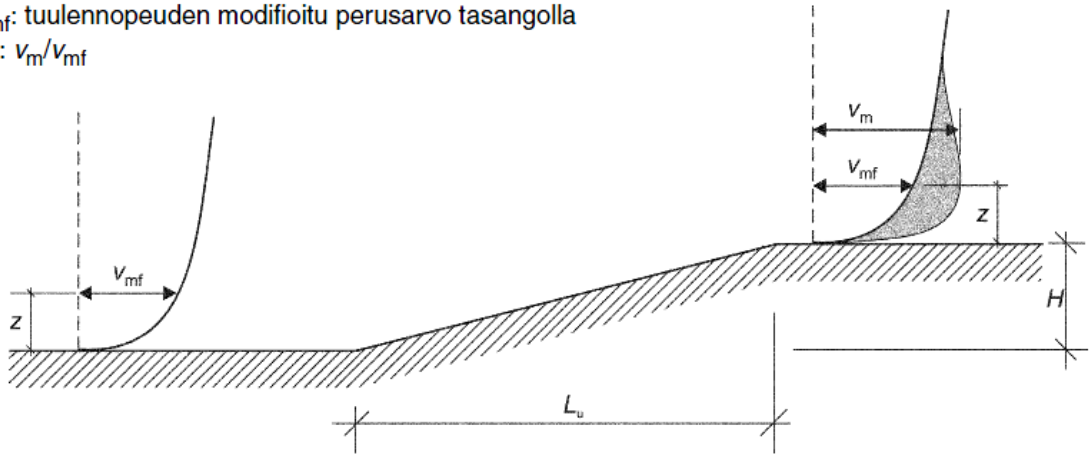
$$c_o = 1 \quad , \text{ kun } \Phi \leq 0,05 \quad (2a)$$

$$c_o = 1 + 2 \cdot s \cdot (\Phi - 0,05) \quad , \text{ kun } 0,05 < \Phi \leq 0,35 \quad (2b)$$

$$c_o = 1 + 0,6 \cdot s \quad , \text{ kun } \Phi > 0,35 \quad (2c)$$

Maaston pinnanmuoto ei kuitenkaan vaikuta hyvin korkeiden rakennusten yläosien tuulenpaineeseen, joten ohjelmassa voidaan määrittää myös korkeus, jolle alueelle pinnanmuodosta johtuva paineen lisäys ulottuu. Kuvassa 4 on esitetty maaston kaltevuudesta johtuva tuulennopeuden kasvu eurokoodin mukaan. Tuulennopeudeus kasvaa mäkiä ylös noustessa ja on suurimillaan huipulla.

v_m : tuulennopeuden modifioitu perusarvo korkeudella z maanpinnasta
 v_{mf} : tuulennopeuden modifioitu perusarvo tasangolla
 c_o : v_m/v_{mf}



Kuva 4. Pinnanmuodostuksesta johtuva tuulennopeuden kasvu (Eurokoodi 1, osa 1-4, kuva A1)

Rosoisuuskerroin $c_r(z)$, joka huomioi maaston tasaisuudesta aiheutuvan tuulenpaineen kasvun, lasketaan kaavojen 3a ja 3b mukaan. Maastokerroin k_r sekä rosoisuusmitta z_0 riippuvat maastoluokasta. Merkintä (z) tarkoittaa tarkastelu-korkeutta maanpinnasta, missä tuulikuormitus määritetään.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad , \text{ kun } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (3a)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad , \text{ kun } z < z_{\min} \quad (3b)$$

Tuulennopeuden perusarvo kerrotaan maaston rosoisuuskertoimella $c_r(z)$ ja pinnanmuotokertoimella $c_o(z)$, jolloin saadaan tuulen modifioitu perusarvo $v_m(z)$ (4).

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (4)$$

Seuraavaksi määritetään tuulenpuuskien intensiteetti $l_v(z)$ (5a ja 5b). Pyörteisyyskertoimen k_l suositusarvo on 1.

$$l_v(z) = \frac{k_l}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad , \text{ kun } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (5a)$$

$$l_v(z) = l_v(z_{\min}) \quad , \text{ kun } z < z_{\min} \quad (5b)$$

Lopuksi lasketaan puuskanopeuspaine $q_p(z)$ (6), johon vaikuttaa aikaisemmin esille tulleiden arvojen lisäksi myös ilman tiheys ρ , jonka suositusarvo on eurokoodin mukaan $1,25 \text{ kg/m}^3$.

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (6)$$

Ohjelma laskee puuskanopeuspaineen kolmella eri korkeudella (h , $h/2$ ja z_{\min}). RIL 201-1-2008 -ohjeessa on taulukoitu valmiiksi laskettuja puuskanopeuspaineen ominaisarvoja. Ne pätevät kuitenkin vain, jos maasto on tasaista ja tarkastelukorkeus alle 50 m.

6.3 Rakennekerroin $c_s c_d$

Rakennekertoimen $c_s c_d$ tarkoituksena on ottaa huomioon tuulikuormiin syntyvä vaikutus, joka johtuu tuulenpaineen huippuarvojen eriaikaisuudesta pinnalla sekä turbulenssista aiheutuvasta rakenteen värähtelystä. Poikkileikkaukseltaan pyöreiden savupiippujen rakennekertoimena voidaan käyttää arvoa 1, jos sen korkeus on alle 60 m ja 6,5 kertaa halkaisija. Tämä ehto ei kuitenkaan aina toteudu, joten ohjelma laskee rakennekertoimen eurokoodin liitteen B mukaisesti. Nopeuspainekorkeutena kertoimen laskennassa on käytetty 0,6 h. Rakennekertoimen laskennan eteneminen on esitetty tarkemmin liitteessä 1.

Rakennekertoimen $c_s c_d$ arvo on suoraan kuormitusta lisäävä tai vähentävä kerroin kokonaistuulikuormitukselle, joten varmemman puolen ratkaisuna on, että ohjelma ei käytä koskaan alle 1,0 arvoa rakennekertoimelle. Eurokoodin mukaan pienin sallittava arvo rakennekertoimelle on 0,85. Korkeilla ja hoikilla piippurakenteilla arvo vaihtelee keskimäärin 1,0:n – 1,2:n välillä.

Rakennekerroin voidaan määrittää myös eurokoodin liitteen D kuvaajasta, mutta se on luotu tuulennopeuden perusarvolla 28 m/s, eikä siinä ole muuta kuin käyrät maastoluokille II ja III. Näin ollen rakennekertoimeksi tulisi valittua turhan varmallalla puolella oleva arvo Suomen olosuhteissa.

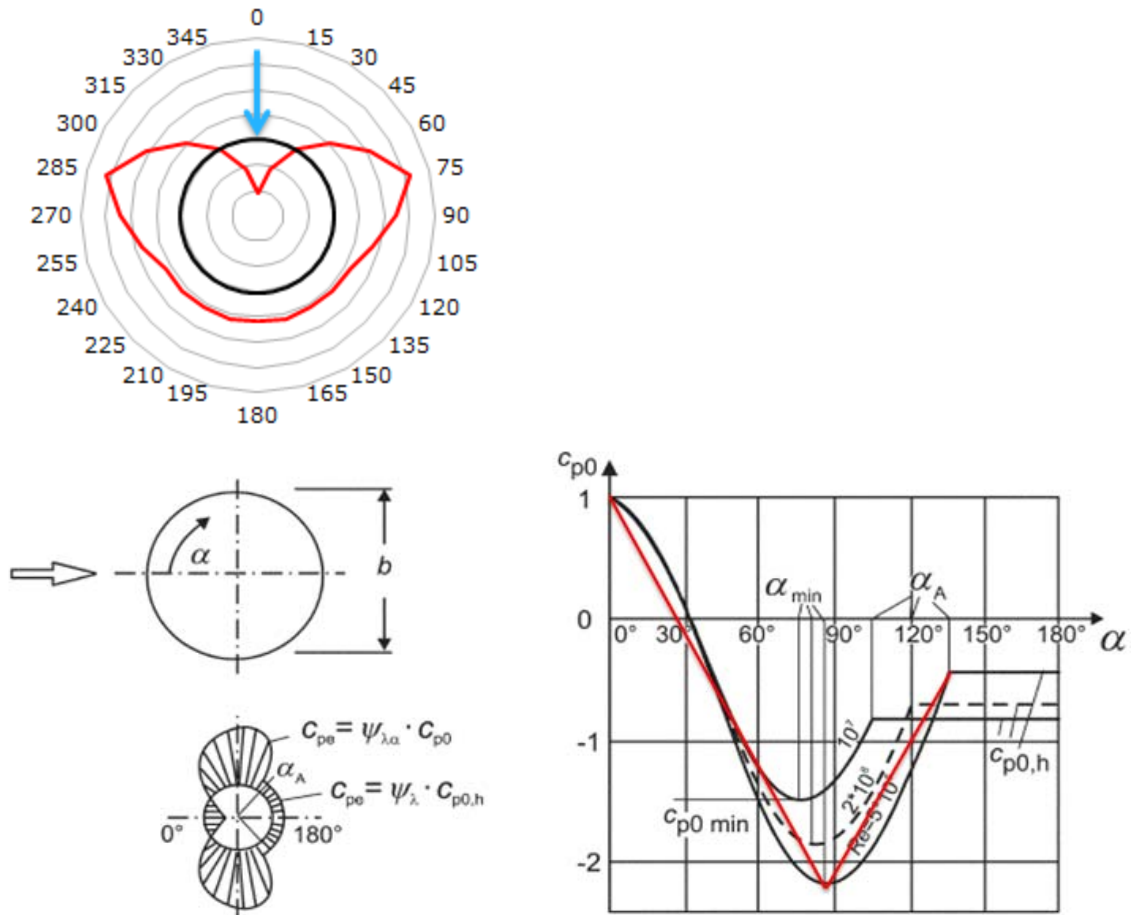
6.4 Pintoihin vaikuttava tuulenpaine ja kokonaistuulikuormitukset

Ohjelma käyttää mitoituksessa pintapaineiden avulla laskettuja tuulikuormituksia mutta vertailun vuoksi laskee myös kuormitukset voimakertoimia käyttäen. Voimakertoimien mukaan laskettaessa saadaan varmemmalla puolella olevia suurempia kuormituksia verrattuna pintapaineiden mukaiseen laskentaan, koska siinä ei määritellä yhtä tarkasti pinnan eri osiin vaikuttavia paineita. Ohjelmassa on kuitenkin tehty laskennan edetessä pieniä varmemman puolen ratkaisuja, joten voimakertoimien mukaisesta laskennasta saadaan hieman pienempiä kuormia kuin laskennassa käytettävästä pintapaineiden mukaisesta laskennasta.

Sisäpuolisen paineen kuormituksella $F_{w,i}$ ei ole merkitystä kokonaistuulikuormituksia laskettaessa, koska eurokoodin mukaan ympyräsylinterin muotoisen piipun sisälle oletetaan alipaine, jolloin piipun vastakkaisilla reunoilla olevat voimakomponentit kumoavat toisensa ja resultantiksi sisäpuolisista paineista tulee nolla. Koska ohjelma ei huomioi sisäpuolisista paineista syntyviä voimia, niin ohjelman tuulikuormituksia ei voi hyödyntää yksittäisten osien mitoittamiseen.

Ohjelma ei myöskään huomioi kitkakuormia F_{fr} , koska eurokoodin mukaan tuulesta syntyvän kitkan vaikutukset voidaan jättää huomioimatta, kun kaikkien tuulen suuntaisten pintojen kokonaisala on enintään 4 kertaa kaikkien tuulta vastaan kohtisuorien ulkopintojen kokonaisala. Ympyräsylinterin muotoisella piipulla tämä suhdeluku on 1.

Ulkopuolisen paineen kertoimet ympyräsylinterin muotoiselle rakennukselle lasketaan käyttämällä Reynoldsin lukua Re , joka on virtausmekaniikan dimensioton suhdeluku. Ohjelma laskee jokaiselle 15° ympyrän sektorille oman ulkoisen paineen kertoimen, mikä on kerroin kokonaistuulikuormitukselle. Paine kertoimilla lasketaan tuulesta syntyvät puristus ja vetopinnat ja ohjelma piirtää niistä kuvaajan hahmottamaan tuulesta syntyvien pintapaineiden suuntaa (Kuva 5). Viiva ympyrän sisällä kuvaa puristusta ja ulkopuolella vetoa.



Kuva 5. Tuulenpainneiden jakautuminen pyöreässä poikkileikkauksessa (Eurokoodi 1, osa 1-4, kuva 7.27)

Ohjelma laskee kertoimen c_{p0} suoraviivaisesti interpoloiden kuvan 5 osoittamalla tavalla. Kerroin c_{p0} on ulkopuolisen paineen kerroin, kun ilma ei pääse virtaamaan vapaan pään ohi. c_{p0} kerrotaan ympyräsyylinterin päätevaikutuskertoimella $\Psi_{\lambda\alpha}$, jolloin saadaan ulkopuolisen paineen kerroin c_{pe} .

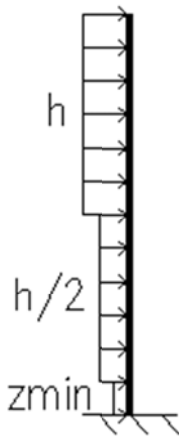
Ulkopuolisen paineen kerroin kerrotaan puuskanopeuspaineella $q_p(z)$, ja näin saadaan yksittäiseen pintaan vaikuttava ulkoinen paine w_e (7).

$$w_e = q_p(z) \cdot c_{pe} \quad (7)$$

Ulkoinen paine kerrotaan vielä rakennekertoimella $c_s c_d$ sekä kuormituspinta-alalla A_{ref} , joka tässä tapauksessa on 15° sektorin kaaren pituus. Tästä saadaan voima $F_{w,e}$ (8), joka on kohtisuorassa pintaa vastaan vaikuttava lopullinen kuormitusvoima.

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot \Sigma w_e \cdot A_{ref} \quad (8)$$

Lopullisia kokonaistuulikuormia määritettäessä laskennassa ei huomioida veto-
paineiden aiheuttamia tukevia voimia, jotta pysyttäisiin mitoituksessa varmalla
puolella. Vetopaineiden huomioimatta jättäminen tuottaa piipun juuren momen-
tille rakenteen mitoista riippuen noin 30 %:n lisävarmuuden, joten sillä on melko
suuri vaikutus. Ohjelmalla on kuitenkin tarkoitus mitoittaa korkeita ja hoikkia eri-
koisrakenteita, joten lisävarmuus on hyväksyttävää. Ohjelma laskee jokaisen
15° suuruisen pinnan tuulensuuntaisen voimakomponentin, ja niiden summasta
saadaan kokonaiskuormitus. Kuvassa 6 nähdään, miten ohjelma jakaa tuulesta
syntyvän kuorman viivakuormaksi kolmeen eri korkeusvyöhykkeeseen.



Kuva 6. Tuulikuormitusten mallintaminen korkeuden mukaan

Lopuksi ohjelma laskee tuulikuormituksen murtorajatilassa käyttämällä tuuli-
kuormitukselle kuormituskerrointa 1,5. Kerroin on laskelmassa aina vakio, kos-
ka ohjelma ei huomioi muita muuttuvia kuormia.

7 Muut kuormitukset

Korkeita ja hoikkia rakennuksia mitoittaessa suurin ja lähes ainoa rakennetta
kuormittava ulkoinen voima on tuuli. Ohjelma ei huomioi laisinkaan lumi- eikä
jääkuormitusta, koska niillä on häviävän pieni merkitys kokonaiskuormituksia
laskettaessa. Tämä johtuu piippujen yleisesti hoikasta muodosta ja näin ollen
vähäisestä pinta-alasta, mihin lunta tai jäätä voisi asettua.

Tuulikuormituksen lisäksi ohjelma huomioi ainoastaan rakennuksen oman painon vaikutukset. Rakennuksen mittaepätarkkuus aiheuttaa omapainolle epäkeskisyyden. Tämä epäkeskisyys on ohjelmassa laskettu kaavalla $h/150$. Omapainosta aiheutuva epäkeskisyys synnyttää rakenteelle lisämomenttia. Koska tuulikuormitus huomioidaan aina, omapainolle käytetään vakiona kuormituskerrointa 1,15 murtorajatilassa. Kuitenkin omapainon esiintyessä tukevana kuormana sen kuormituskerroin on 0,9.

8 Käyttörajatilamitoitukset

Ohjelma laskee piipulle ominaistajuuden sekä taipuman suurimmalla tuulikuormituksella. Betoniset piiput ovat yleisesti melko jäykkiä ja painavia verrattuna esimerkiksi keveisiin teräsrakenteisiin piippuihin, joten taipuman mitoituksella ei ole suurtakaan merkitystä rakennuksen toimivuuden kannalta.

Ohjelma ei huomioi pyörrerata- eikä aerolastisia epästabiiiliusilmiöitä, koska myös niillä on erittäin pieni vaikutus painavilla ja jäykillä betonirakenteisilla piipuilla. Erittäin keveitä ja hoikkia piippuja mitoittaessa olisi ilmiöiden vaikutukset kuitenkin hyvä tarkastaa erikseen. Ilmiöt tulee laskea eurokoodin liitteen E kappaleen 1.5.3 mukaan.

9 Murtorajatilamitoitukset

9.1 Piipun betonin mitoitus

Puristuskestävyyttä laskettaessa ohjelma huomioi piipun omapainosta aiheutuvan jännityksen sekä tuulesta aiheutuvan momentin lisäjännityksen. Puristusmitoituksessa ei ole huomioitu ollenkaan raudoituksesta aiheutuvaa kapasiteetin kasvua, jotta pysyttäisiin laskennassa varmallalla puolella. Betonin puristuskapasiteetti tulee harvoin määrääväksi tekijäksi piippuja mitoittaessa, koska piippujen seinämä on paksu. Piipun seinämää ei voida tehdä kovin kapeana, koska liukuvalukoneisto ja nostotunkki vaativat tilaa. Hyväksyttävä seinämäpaksuuden minimiarvo on raudoituksesta ja betonipeitteen paksuudesta riippuen 150 – 250 mm. Koska poikkileikkaus on rajoitettu vakioksi koko korkeudeltaan, niin mitoitte-

taan betonin puristuskestävyys aina piipun juuressa, missä on mitoittavin tilanne.

Puristuspuolen sekä vetopuolen suurimmat jännitykset lasketaan piipun poikkileikkauksen muodon huomioivasta taivutusvastuksesta. Jos piipun seinämässä on aukko, niin ohjelma laskee aukolliselle poikkileikkaukselle uuden pienemmän taivutusvastuksen, mikä lisää jännitystä. Ohjelma huomioi vain yhden aukon ja sen on sijaittava piipun juuressa, enintään 11 m:n korkeudella.

9.2 Piipun raudoituksen mitoitus

Aluksi vetopuolen pääteräksille ohjelma laskee riittävän jatkospituuden. Jatkospituus lasketaan 200 mm:n kerrannaisina, jotta terästen mitoitus pysyisi järkevänä. Piiput ovat korkeita ja tehdään yleensä liukuvaluna, joten teräkset on hyvä mitoittaa kokonaisina 12 m pitkinä tankoina.

Vaadittu teräsmäärä vähenee rakennusta ylöspäin noustessa, koska momentti pienenee ylöspäin mentäessä. Ohjelma laskee uuden vaadittavan teräsmäärän aina 12 m:n välein huomioiden terästen jatkospituuden. Näin ollen piippua valettaessa voidaan käyttää aina täysiä 12 m pitkiä tankoja.

Minimiraudoitukselle käytetään kansallisen liitteen mukaista pystyraudoituksen vähimmäisteräsmäärää, joka on 0,2 % betonin pinta-alasta. Betonin vetolujuutta ei huomioida laisinkaan vetopuolen tarkasteluissa.

9.3 Perustuksen rakenteellinen mitoitus

Perustus mitoitetaan pohjaltaan neliön muotoisena pilarianturana.

Suomen kansallisen liitteen mukaan lävistysmitoitusta ei toistaiseksi saa tehdä eurokoodin mukaan, koska laskennassa on huomattu epävarmalla puolella olevia ristiriitaisuuksia koekuormitukseen verrattuna. Perustuksen lävistysmitoitus on laskettu kansallisen liitteen suosittelman tavan mukaisesti eli Suomen rakentamismääräyskokoelman osan B4 kohdan 2.2.2.7 mukaan. Lävistyskapasiteetin parantamiseksi on tehokasta suurentaa anturan korkeutta tai joissakin tapauksissa myös betonin lujuusluokkaa, joten ohjelma mitoittaa anturan ilman leikkausraudoitusta.

Rakentamismääräyskokoelman B4 mukaan poikkileikkaukseltaan pyöreät tuet, jonka halkaisija on suurempi kuin 3,5 d, mitoitetaan lävistysmitoituksen sijasta leikkaukselle. Mitoitettava rakenne voi halkaisijaltaan täyttää edellisen ehdon, joten ohjelma laskee myös leikkauskapasiteetin lävistyskapasiteetin lisäksi. Leikkausmitoitus lasketaan eurokoodin mukaisesti.

Perustuksen taivutusmitoitus lasketaan myös eurokoodin mukaisesti. Kun perustusta mitoitettaessa anturan korkeus on valittu sopivaksi leikkaukselle ja lävistykselle, niin on yleensä tehokasta parantaa taivutuskapasiteettia lisäämällä anturan raudoitusta.

9.4 Perustuksen geotekninen mitoitus

Ohjelma laskee maapohjan kantavuudelle R_d / A' arvon eurokoodin mukaisesti käyttämällä perustuksen tehollista pinta-alaa, maan tehokasta kitkakulmaa ja maakerroksien tilavuuspainoja. Eurokoodin mukaan perustukselle ei tehdä enää erillistä kaatumistarkastelua, vaan se on sisällytetty maapohjan kantavuuslaskentaan. Epäkeskisyys ei kuitenkaan saa ylittää arvoa $b / 3$, missä b on anturan leveys. Mikäli näin tapahtuu, on yleensä tehokasta kasvattaa anturan leveyttä.

Kun epäkeskeinen kuormitus on pohjaltaan neliön muotoisen anturan kulmaa kohti, niin anturan pohjan tehollinen pinta-ala on pienimmillään. Tästä johtuen ohjelma mitoittaa kuormituksen heikompaan suuntaan eli anturan kulmaa kohti.

Ohjelma laskee perustukselle myös eurokoodin mukaisen liukukestävyyskapasiteetin. Suurilla ja painavilla betonirakenteilla liukumiskestävyys tulee todella harvoin määrääväksi tekijäksi ja käyttöasteet vaihtelevatkin 10 – 30 % paikkeilla piipun koosta riippuen.

9.5 Menekit ja hinnat

Lopuksi ohjelma laskee piippuun sekä perustukseen kuluvat materiaalimenekit teräksille ja betonille. Materiaalimenekkien avulla on helppo mitoittaa rakenne optimin kokoiseksi hinnallisesti sekä seurata materiaalien massoja ja tilavuuksia. Ohjelmaan voi syöttää lähtötietoihin hintatiedot teräkselle e/kg sekä betonille e/m³.

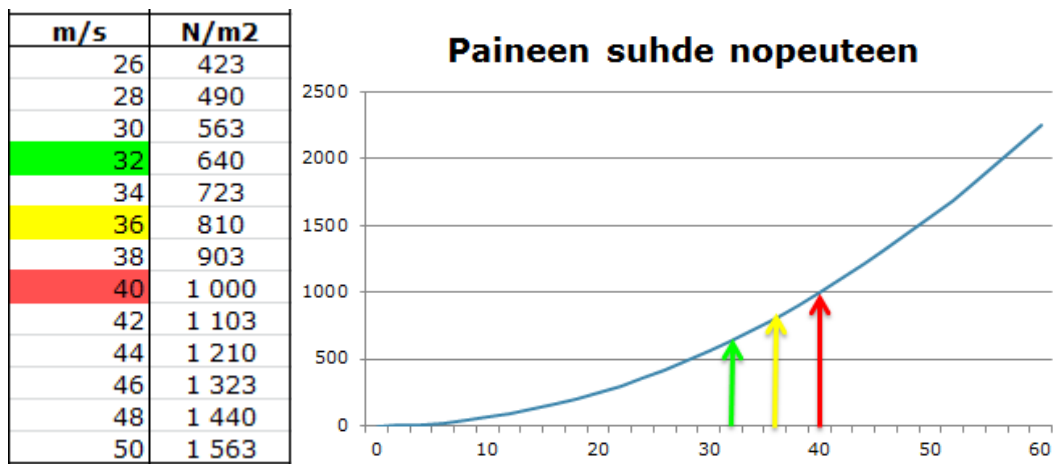
10 Tulosten analysointia

10.1 Suomen tuuliolosuhteiden vertailua eurokoodilaskentaan

Tuulennopeuden suhde tuulenpaineeseen voidaan laskea kaavalla (9), jossa p on paine [N/m²], ρ on ilman tiheys [kg/m³] ja v on tuulen nopeus [m/s].

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (9)$$

Ilman tiheyden suositusarvolla 1,25 laskettuna saadaan kuvaajalle kuvan 7 mukaiset tulokset.



Kuva 7. Tuulennopeuden suhde paineeseen

Ilmatieteenlaitoksen mukaan suurin Suomessa mitattu 10 minuutin keskituulen nopeus on 31 m/s, joka on paineena mitattuna noin 0,6 kN/m². Suurin mitattu lyhytaikainen puuska tunturien lakien mastojen mittalaitteissa on hieman yli 40 m/s, joka paineena vastaa noin 1,0 kN/m². Jos 40 m/s etenevä tuuli muutettaisiin paineeksi käyttäen ilman tiheydelle arvoa 1,45, niin saataisiin kuormitus 1,16 kN/m². Tästä voidaan päätellä, että 1,16 kN/m² suuruinen tuulenpaine on ehdoton maksimi, mitä Suomessa voidaan korkealla ilmassa havaita, ja se on myös erittäin epätodennäköinen.

Laskettaessa ohjelmalla tuulioloiltaan pahimmissa olosuhteissa maastoluokassa 0 ilman maaston kaltevuudesta johtuvia paineen lisäyksiä saadaan 80 m korkealle piipulle huipun tuulikuormaksi noin 1,7 kN/m². Näin ollen voidaankin

todeta, että laskentaohjelman tuulikuormitukset kuvastavat hyvin oikeita kuormituksia, mutta pysyttelevät silti sopivissa määrin varmalla puolella. Vaikka mitoitushjelmassa eurokoodin mukaiseen laskentaan on sovellettu muutamia varmalla puolella olevia ratkaisuja, niin saadaan sillä silti hieman pienempiä tuulenpaineita kuin vanhan jo käytöstä pois otetun RIL-144 ohjeen mukaan laskettaessa. RIL-144 tuulikuormituslaskelmia tehtiin opinnäytetyön ohella vain vertailun vuoksi sen enempää niihin syventymättä.

10.2 Hoikkuuden määrittäminen

Hoikkuus tarkoittaa piipun korkeuden suhdetta halkaisijaan. Tavoitteena oli luoda käyrästä, josta voi suoraan katsoa halutun korkuiselle piipulle taloudellisesti parhaan halkaisijan. Mitoitukset suoritettiin seinämäpaksuuksilla 200 mm ja 300 mm. Tässä mitoituksessa ei ole otettu lainkaan huomioon perustuksia vaan keskityttiin ainoastaan löytämään betoni- ja teräsmäärältään taloudellisin vaihtoehto piipun ulkohalkaisijalle korkeuden suhteen.

Piippujen korkeudet taulukoinnissa olivat 60, 80, 100, 120, 140, ja 160 m sekä halkaisijat kahden metrin välein välillä 2 – 18 m. Piiput mitoitettiin maastoluokassa 1, tuulennopeuden perusarvolla 21 m/s sekä ilman tiheyden suositusarvolla 1,25 kg/m³. Betonipeitepaksuudelle käytettiin arvoa 35 mm, joka soveltuu lähes kaikille rasitusluokille vaatimusluokassa S3. Betonin hinnaksi oletettiin 200 e/m³ ja teräksen 2 e/kg.

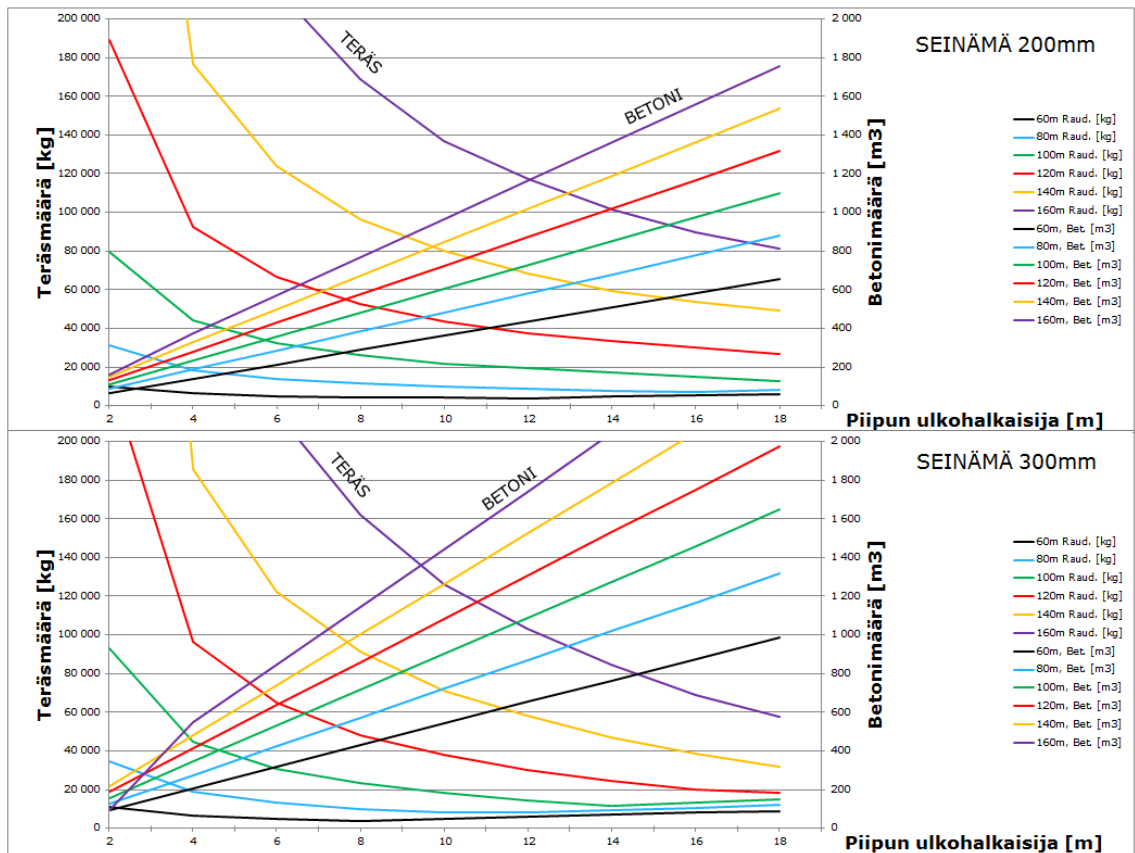
Jokaiselle korkeudelle kaikilla eri halkaisijoilla määritettiin vaadittavat teräs- ja betonimäärät molemmilla seinämäpaksuuksilla. Erilaisia mitoitustilanteita saatiin näin ollen yhteensä 108 kpl. Tiedot taulukoitiin kuvan 8 mukaisiin taulukoihin.

SEINÄMÄPAKSUUS 200 mm												
Halkaisija	60 m		80 m		100 m		120 m		140 m		160 m	
	Bet. [m ³]	Raud. [kg]	Bet. [m ³]	Raud. [kg]	Bet. [m ³]	Raud. [kg]	Bet. [m ³]	Raud. [kg]	Bet. [m ³]	Raud. [kg]	Bet. [m ³]	Raud. [kg]
2	66	9 886	89	31 214	110	79 458	132	189 285	152	490 900	164	1 901 262
4	140	6 316	187	18 486	234	44 081	281	92 234	327	176 639	373	331 484
6	214	5 120	286	13 977	357	32 235	429	66 388	500	123 701	571	215 643
8	288	4 544	384	11 457	481	25 955	577	52 489	673	96 459	769	168 649
10	362	4 054	483	10 094	604	21 847	725	43 745	846	80 174	967	136 710
12	436	4 014	582	8 890	727	19 337	873	37 471	1019	68 545	1164	117 162
14	510	4 694	680	7 850	851	17 395	1021	33 639	1191	59 574	1362	101 685
16	584	5 375	779	7 166	974	15 216	1169	30 341	1364	53 839	1559	89 459
18	658	6 055	877	8 073	1097	12 927	1317	26 846	1537	49 040	1757	81 305

SEINÄMÄPAKSUUS 300 mm												
Halkaisija	60 m		80 m		100 m		120 m		140 m		160 m	
	Bet. [m ³]	Raud. [kg]	Bet. [m ³]	Raud. [kg]	Bet. [m ³]	Raud. [kg]	Bet. [m ³]	Raud. [kg]	Bet. [m ³]	Raud. [kg]	Bet. [m ³]	Raud. [kg]
2	95	10 982	126	34 803	158	93 296	188	233 860	216	682 249	93	20 954 316
4	206	6 347	275	18 672	344	44 899	413	96 449	481	185 965	548	351 478
6	318	4 814	424	13 215	530	30 470	636	64 902	742	122 320	847	214 983
8	429	3 991	573	10 024	716	23 422	860	47 828	1003	91 310	1146	162 208
10	541	4 949	722	8 088	902	18 196	1083	38 124	1264	70 947	1444	126 132
12	653	5 970	870	7 960	1088	14 665	1306	30 159	1524	58 166	1742	103 098
14	764	6 990	1019	9 320	1274	11 749	1530	24 740	1785	46 810	2 040	84 526
16	876	8 011	1168	10 681	1461	13 351	1753	19 909	2 045	38 797	2 338	69 103
18	987	9 031	1317	12 042	1647	15 052	1976	18 062	2 306	31 789	2 636	57 857

Kuva 8. Betoni- ja rauditusmäärät taulukko

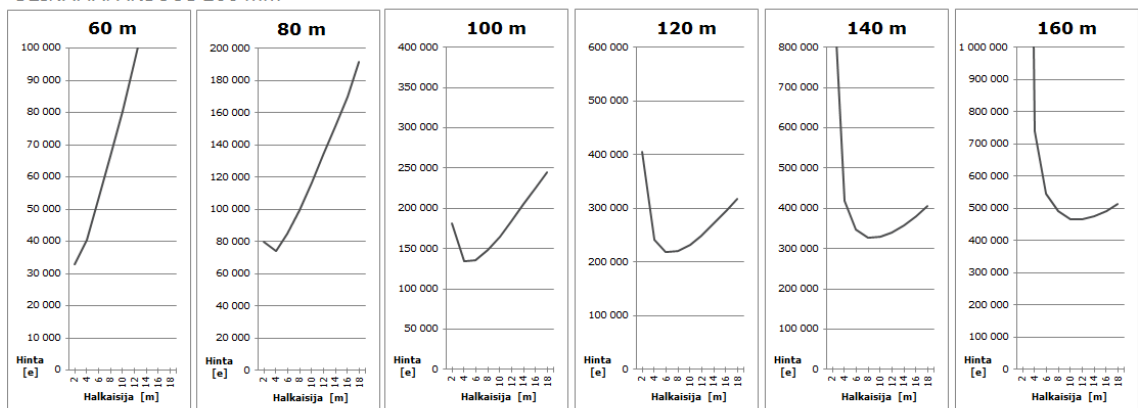
Kuvan 8 taulukosta tehtiin kuvien 9 ja 10 mukaiset kuvaajat hahmottamaan betoni- ja teräsmäärien kulujen seuranta.



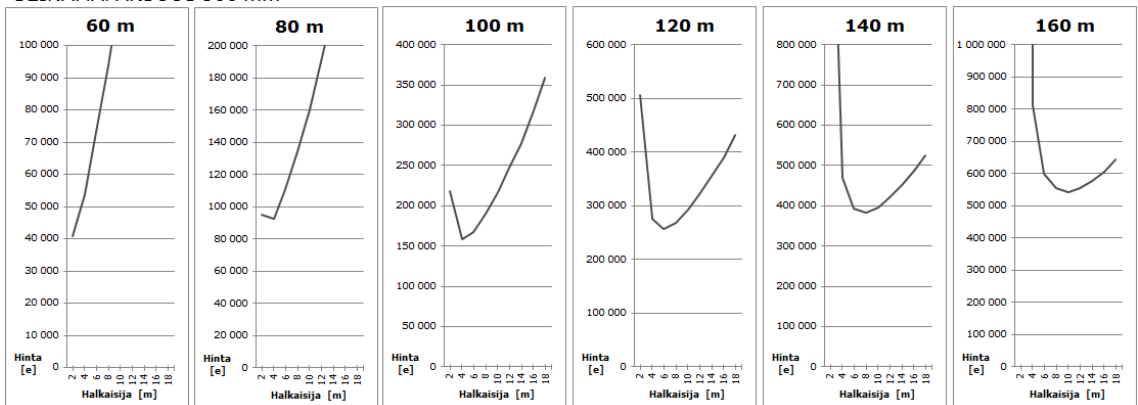
Kuva 9. Betonin suhde rauditusmäärään

Kuvan 9 kuvaajien y-akselit on määritelty hinnan mukaan samansuuruisiksi, jotta betoni- ja teräsmäärät olisivat keskenään vertailukelpoisia. Lähtötietojen hintojen mukaan laskettaessa 200 000 kg terästä maksaa saman verran kuin 2 000 m³ betonia. Käyrien risteyskohdassa betoni- sekä teräsmäärät ovat yhtä suuria hinnallisesti. Halkaisijaa pienennettäessä teräsmäärä kasvaa ja betonimäärä vähenee. Oleellinen tieto on kuitenkin taloudellisesti parasta tilannetta haettaessa käyrän tangentin kulmakerroin. Mikäli käyrä kasvaa jyrkästi, niin kasvavat myös kustannukset samassa suhteessa. Tavoitteena oli löytää pienin betonin- ja teräsmäärän yhteenlaskettu summa, kun ne ovat hinnallisesti samassa suhteessa.

SEINÄMÄPAKSUUS 200 mm



SEINÄMÄPAKSUUS 300 mm

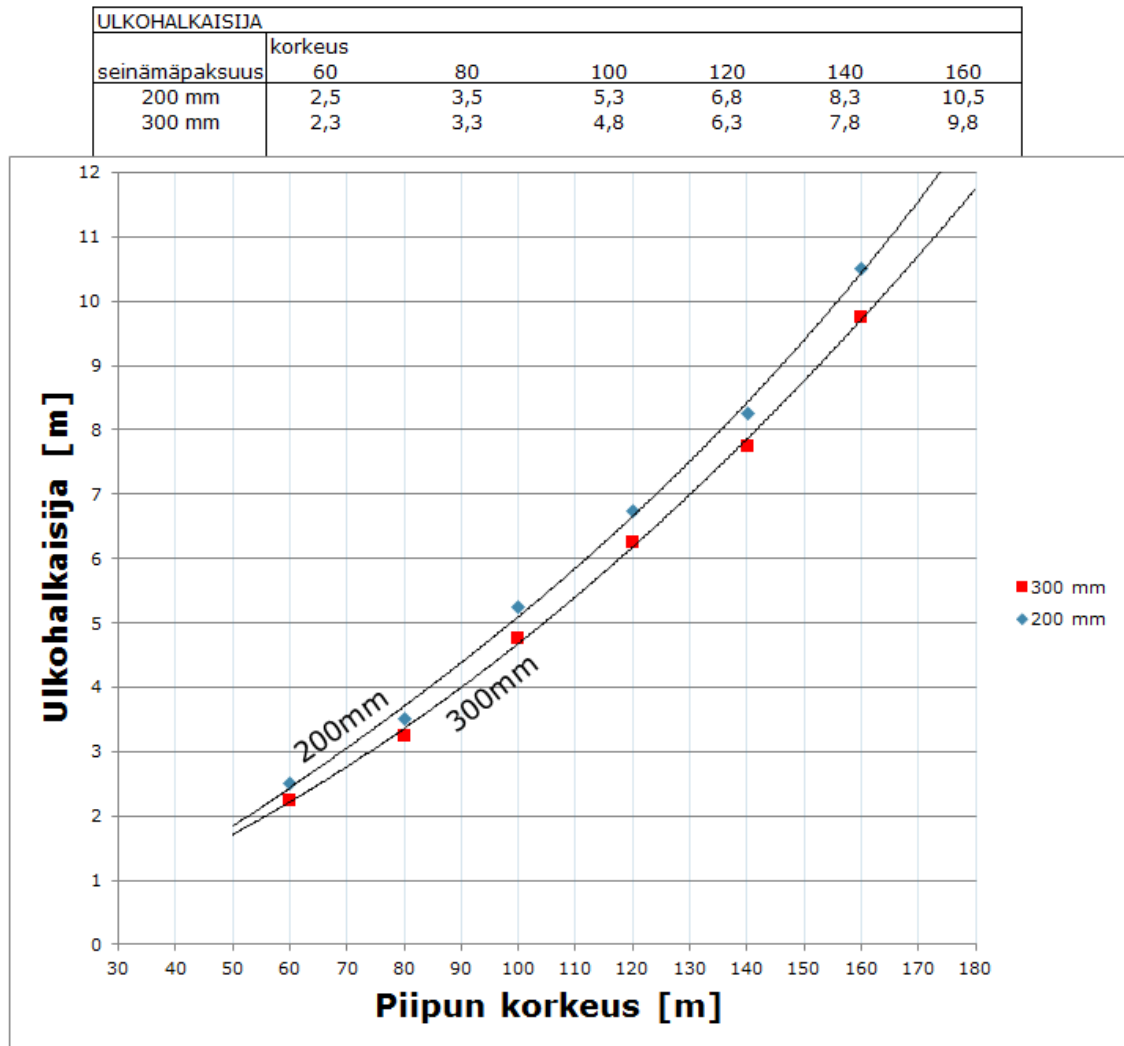


Kuva 10. Hinnan muodostuminen halkaisijan ja korkeuden suhteen

Kuvassa 10 betoni- ja teräsmäärät on muutettu hinnaksi ja laskettu yhteen. Kuvaajista voidaan lukea piipulle taloudellisesti paras halkaisija korkeuden vaihtuessa välillä 60 – 160 m. Käyrän ollessa alimmillaan halkaisijat vaihtelevat välillä 2,25 – 10,50 m. Matalilla korkeuksilla hoikkuuden ollessa erittäin suuri on paras halkaisija arvioitu kuvaajan ulkopuolelta.

Piipulle taloudellisesti kannattavimmat hoikkuusluvut vaihtelivat 200 mm seinämälle välillä 15 – 24 sekä 300 mm seinämälle välillä 16 – 27. Näin ollen betonimäärän ollessa hinnallisesti määräävämpi on edullista mitoittaa piippu mahdollisimman vähäisellä betonin tilavuudella. Näin tehtäessä raudoituksesta tulee kuitenkin melko raskas.

Taloudellisesti parhaat hoikkuudet taulukoitiin kuvan 11 mukaisesti.



Kuva 11. Korkeuden suhde ulkohalkaisijaan

Kuvan 11 taulukon kuvaajasta on helppo lukea vaaditulle piipun korkeudelle ihannehalkaisija. Tätä tietoa voidaan käyttää hyvänä suuntaa antavana lähtötietona mitoitettaessa rakennetta laskentaohjelmalla. Suurempaa seinämäpaksuutta kannattaa käyttää silloin, kun piipusta on saatava mahdollisimman hoik-

ka, ja pienempää lähes kaikissa muissa tilanteissa, mikäli rakenteellinen mitoitus sen sallii.

Yleisesti ottaen kannattaa valita ohuin mahdollinen seinämäpaksuus, joka kestää kuormitukset, jotta pysyttäisiin hinnallisesti parhaalla puolella. Myös on huomioitava, että betonipeitteelle, teräksille ja liukuvalukoneistolle jää riittävästi tilaa, joten usein mitoittavaksi tekijäksi piipun seinämäpaksuutta määritettäessä tulee juurikin vaadittava tila.

Jos tuuliolosuhteet, materiaalien hinnat tai muut lähtötiedot muuttuvat suuresti tämän analyysin lähtötiedoista, niin kuvaajat eivät ole enää luotettavia. Tietoja on siinä tapauksessa osattava muuttaa oikeaan suuntaan tai tehtävä koko laskenta uusiksi.

11 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli luoda suunnittelua helpottava mitoitusohjelma betonirakenteisille piipuille ja sellainen myös tehtiin. Laskenta tuli tehtyä siinä laajuudessa kuten aluksi sovittiin ja myös uusia tarkastelukohteitakin luotiin työn edetessä. Ohjelma huomioi lähes kaikki rakenteellisesti mitoittavat tilanteet, jotka piippua suunniteltaessa on otettava huomioon, ja siihen on myös helppo lisätä uusia mitoitusilanteita, mikäli rakenteen suunnittelu sitä vaatii.

Ohjelmaa tehdessä tuli tutustuttua tarkasti uusiin eurokoodin mukaisiin tuulikuormituksiin, joten itselläni ne ovat nyt hyvin hallussa. Eurokoodin mukaiset tuulikuormitukset ovat niin monimutkaisia ja yksityiskohtaisia, että ilman valmista laskentapohjaa on niiden laskenta erittäin raskasta.

Ohjelmasta saatiin tietoja analysoitaviksi ja niiden perusteella pystyttiin luomaan piipun muodon valintaa helpottavia kuvaajia. Myös tuulikuormituslaskennan todenmukaisuutta tuli vertailtua Suomen tuuliolosuhteiden tilastotietoon.

Työn aikataulussa pysyttiin hyvin ja työ valmistui ajallaan. Aikaa työhön meni melko paljon, mutta työstä saatava hyöty on kuitenkin sen arvoista.

Kuvat

Kuva 1. Liukuvalun muottikaluston osat, s. 7
(<http://www.energyworldcorp.com/sa-seil.html>)

Kuva 2. Liukuvalun toteuttaminen ulokkeella, s. 8
(<http://www.slipform-austria.com/en/gleitschalung/zylindrische-gleitschalung/>)

Kuva 3. Mitoitusohjelman laskennan kulku, s. 10

Kuva 4. Pinnanmuodostuksesta johtuva tuulennopeuden kasvu, s. 14
(Eurokoodi 1, Osa1-4, kuva A1)

Kuva 5. Tuulenpainneiden jakautuminen pyöreässä poikkileikkauksessa, s. 17
(Eurokoodi 1, osa 1-4, kuva 7.27)

Kuva 6. Tuulikuormitusten mallintaminen korkeuden mukaan, s. 18

Kuva 7. Tuulennopeuden suhde paineeseen, s. 22

Kuva 8. Betoni- ja raudoitusmäärät taulukko, s. 24

Kuva 9. Betonin suhde raudoitusmäärään, s. 24

Kuva 10. Hinnan muodostuminen halkaisijan ja korkeuden suhteen, s. 25

Kuva 11. Korkeuden suhde ulkohalkaisijaan, s. 26

Lähteet

Energy World Corporate
www.energyworldcorp.com/sa-seil.html
Luettu 16.4.2014

Eurokoodi help desk
www.eurocodes.fi
Luettu 28.3.2014

Ilmatieteenlaitos
www.ilmatieteenlaitos.fi/tuuliennatyksia
Luettu 8.4.2014

RIL 144-2002. Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 201-1-2008. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 207-1-2009. Geotekninen suunnittelu. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

SFS-EN 1991-1-4/A1:2010: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat

SFS-EN 1992-1-1: Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt

SFS-EN 1997-1: Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt

Slipform Systems Austria
www.slipform-austria.com/en/gleitschalung/zylindrische-gleitschalung/
Luettu 16.4.2014

STEELFORMER CO.,LTD.
www.slipform-steelformer.com/Default.aspx?pageid=3&lang=th
Luettu 16.4.2014

Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-4/A1:2010 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat

Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B4 (2005), Betonirakenteet, ohjeet

The Concrete Society
www.concrete.org.uk/fingertips_nuggets.asp?cmd=display&id=181
Luettu 16.4.2014

LÄHTÖTIEDOT

ALUEEN TIEDOT:

Maastoluokka: I
 Tuulennopeuden perusarvo: NA suositus (21m/s) (kansallisen liitteen suositus Suomessa on 21m/s)

Maaston kaltevuus φ: 0
 Sijaintikerroin S: 0,8
 Pinnanmuodon vaikutus: 0 - 30,5 m

Kertoimet nopeuspaineelle:
 1,00 h
 1,00 h/2
 1,00 zmin

Ilman Tiheys ρ: 1,25 kg/m³ (EC suositusarvo = 1,25)
 (merenpinnassa, -30°C lämpötilassa = 1,45)

MAAOLosuhteet:

Tehokas kitkakuilma: 30
 Tilavuuspaino perustason YP: 17 kN/m³
 Tilavuuspaino perustason AP: 10 kN/m³
 Perustusvyövyys: 1,2 m

PIIPUN TIEDOT:

Korkeus h: 40,0 m (max 200m)
 Ulkohalkaisija b: 4,0 m
 Sisähalkaisija: 3,4 m
 Seinämän paksuus t: 0,3 m
 Aukon leveys ba: 0,0 m
 Aukon korkeus: 0 m (max 11m alareunasta)

lujuusluokka: C40/50
 Betonipeitepaksuus: 35 mm

Alimmat teräkset: Jako: k200 Laatu: A500HW
 Raudoitusten välinen tila: 182 mm
 kun vaakaraidoitus on sama
 kuin pystyraidoitus

PERUSTUKSEN TIEDOT:

Leveys: 6,0 m (B ja L)
 Korkeus: 0,80 m
 Pipun alapään ulkohalkaisija: 4 m (mahdollinen levvenys)

lujuusluokka: C30/37
 Betonipeitepaksuus: 50 mm
 Alapinnan raudoitus: Jako: k150 Laatu: A500HW #

MENEKIT:

Betonin hinta: 200 e/m³
 Teräksen hinta: 2,0 e/kg

Liite 1 Mitoitusohjelman laskentaosuus (13 sivua)

TULOKSET

KUORMITUKSET

Tuulikuorma ilman muotovaikutusta: Korkeus: h h/2 zmin
 1,02 kN/m² 20 m 0,89 kN/m² 1 m
 0,43 kN/m²

Rakenteen paino G: 3 487 kN
 Momentti korkeudella 0: 2 514 kNm

MURTORAJATILA MITOITUS

Piippu:
 Momentti korkeudella 0: 4 841 kNm

Betonin puristuskestävyys: 22,7 > 2,8
 [N/mm²] [N/mm²]

Terästen jatko pituus: 200 mm
 Asvaadittu
 Terästen vetokestävyys As: 13 146 > 6 974
 [mm²] [mm²]

Korkeus [m]	Momentti [kNm]	As vaad. [mm ² /m]	Φ16 mm k<	Φ12 mm k<	Φ10 mm k<
0,0	4 841	600	670	377	262
11,8	2 669	600	670	377	262
23,6	1 093	600	670	377	262
35,4	174	600	670	377	262
47,2	0	0	0	0	0
59,0	0	0	0	0	0
70,8	0	0	0	0	0
82,6	0	0	0	0	0
94,4	0	0	0	0	0
106,2	0	0	0	0	0
118,0	0	0	0	0	0
129,8	0	0	0	0	0
141,6	0	0	0	0	0
153,4	0	0	0	0	0
165,2	0	0	0	0	0

Perustukset:

Lävistyskestävyys VRd,c,s: 7 527 > 2 914 [kN] 39 %

Leikkausmitoitus VRd,c: 2 118 > 306 [kN] 14 %

Taivutusmitoitus As: 8042 > 6569 [mm²] 82 %

Maapohjan kantavuus Rd/A: 540 > 186 [kN/m²] 34 %

Luukkestävyys Rd: 1 605 > 180 [kN] 11 %

MENEKIT

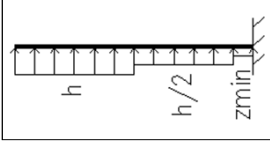
Betonim ³	Hinta[e]	Teräsim ^{kg}	Hinta[e]	Yht. [e]
139,0	27 808	3 487	6 974	34 783
28,7	5 737	906	1 813	7 550
				42 332 e

KÄYTTÖRAJATILA MITOITUS

Taipuma f: 4,8 mm
 Ominaisstaajuus: 1,75 Hz
 Taivutusvastus aukolla: 3,00 m³ ehjä: 3,00 m³

Vierekkäiset rakennukset:

Jos viereinen taso lähempänä kuin: 6 m, niin tuulen käyttäytyminen voi muuttua
 Jos viereinen piippu on välillä: 120 m - 14 m, niin kuormitus kasvaa 0-15%
 jos väli on vähemmän kuin: 14 m - 10 m, niin kuormitus kasvaa 15%
 jos väli on vähemmän kuin: 10 m, niin tarvitaan asiiantuntija lausunto



LASKENNAN KULKU

1 TUULIKUORMITUKSET

- 1.1 Puuskanopeuspaine
 - 1.2 Ulkopuolisen paineen kertoimet
 - 1.3 Rakennekerroin c_{sd}
 - 1.4 Ulkopintoihin vaikuttava tuulenpaine ja kokonaistuulikuormitukset
 - 1.5 Viereiset ja peräkkäiset rakennukset
- ### 2 MITOITUKSET
- 2.1 Käyttörajan mitoitukset
 - 2.1.1 Staattiset ominaisuudet
 - 2.1.2 Taipuma
 - 2.1.3 Pyörreratalmiö ja aerolaastiset epästabiilisuusliimit
 - 2.2 Muorajattilan mitoitukset
 - 2.2.1 Pipun betonin mitoitus
 - 2.2.2 Pipun raudoituksen mitoitus
 - 2.2.3 Perustusten rakenteellinen mitoitus
 - 2.2.4 Perustusten geotekninen mitoitus
 - 2.3 Menekit ja hinnat

LASKENTAOSUUS

1 TUULIKUORMITUKSET

1.1 Puuskanopeuspaine (EC luku4)

1.	2.	3.
z=h 40 m	z=h/2 20 m	z=z _{min} 1 m

Tuulennopeuden perusarvo:
 Tuulen nopeuden modifioimaton perusarvo v₀: 21 m/s (=10minuutin keskiarvo 10m korkeudella maanpinnasta)
 Suuntakerroin c_{dir}: 1,0
 Vuodenaikakerroin c_{season}: 1,0

Tuulen nopeuden perusarvo v_b: 21,0 m/s

Pinnanmuotokerroin:

Maaston kaltevuus φ: 0
 Sijaintikerroin S: 0,8
 Pinnanmuotokerroin C₀: 1

Valittu pinnanmuotokerroin: 1 1 1

Rosoisuuserroin:

Rosoisuusmitta z₀: 0,010 m
 Maastokerroin Kr: 0,170

Rosoisuuserroin Cr(z): 1,41

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo:

Tuulen nopeuden modifioitu perusarvo v_m(z): 29,57 m/s 27,10 m/s 16,42 m/s

Tuulen turbulenssi:

Pyörteisyyserroin k_t: 1,0

Tuulen puuskién intensiteetti I_v(z): 0,12 0,13 0,22

Puuskanopeuspaine:

Ilman tiheys p: 1,25 kg/m³

Puuskanopeuspaine q_p(z): 1007,5 N/m² 881,5 N/m² 424,5 N/m²

Puuskanopeuspaine q_p(z): 1,01 kN/m² 0,88 kN/m² 0,42 kN/m²

OHJEET JA HUOMIOT LASKELMAAN

Ohjelma laskee tuulesta syntyvän puuskanopeuspaineen 3 eri pisteessä:

1. z = h
2. z = h/2
3. z = z_{min}

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

$$c_{\phi} = 1 \quad \text{kun } \phi \leq 0,05$$

$$c_{\phi} = 1 + 2 \cdot s(\phi - 0,05) \quad \text{kun } 0,05 < \phi \leq 0,35$$

$$c_{\phi} = 1 + 0,6 \cdot s \quad \text{kun } \phi > 0,35$$

$$k_t = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$$

Huom. Kansallisen liitteen mukaan maastoluokassa 0 kr = 0,18

$$c_1(z) = k_t \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \text{kun } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_1(z) = c_1(z_{min}) \quad \text{kun } z \leq z_{min}$$

$$v_m(z) = c_1(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_t}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{kun } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{kun } z < z_{min}$$

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot I_v(z) \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_g(z) \cdot q_b$$

Huom. Pinnanmuotokerroimen c₀ laskennassa käytetään Suomen kansallisen liitteen kaavoja, mitkä on muokattu eurokoodista

Maastoluokka	z ₀ m	z _{min} m
0	0,003	1
I	0,01	1
II	0,05	2
III	0,3	5
IV	1,0	10

1.2 Ulkopuolisen paineen kertoimet (EC-7.9.1)

Reynoldsin luku:

Pipun halkaisija b: 4 m
 Ilman kinemaattinen viskositeetti v: 1,5E-05 m²/s (vakio)
 Ilman tiheys p: 1,25 kg/m³
 Tuulennopeus huipulla vm(z): 29,57 m/s
 Reynoldsin luku Re: 7,88E+06

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{v}$$

Paineen jakautumisen arvoja eri Reynoldsin luvun arvoilla ja ilman päätevaikutuksia (EC-taulukko 7.12):

Re	amin	cp0,min	αA	cp0,h
5E+05	85	-2,2	135	-0,4
2E+06	80	-1,9	120	-0,7
1E+07	75	-1,5	105	-0,8

Interpolointi Re:n arvoille korkeudella h:

7,88E+06	76,3	-1,61	109,0	-0,77
----------	------	-------	-------	-------

Tehollinen hoikkuus ja

päätevaikutuskertoimen (EC-7.13):

(Taulukko 7.16) hoikkuusluku λ: 7,00 , kun l ≥ 50
 10,00 , kun l < 15

Valitaan korkeuden ehdon mukaan λ: 7,86

Eheyysuhde φ: 1

(EC-kuva 7.13) Päätevaikutuskertoimen ψλ: 0,680

Ulkopuolisen paineen kerroin cpe:

α	ψλA:	cp0	cpe
0	1,000	1,000	1,000
15	1,000	0,488	0,488
30	1,000	-0,024	-0,024
45	1,000	-0,536	-0,536
60	1,000	-1,049	-1,049
75	1,000	-1,561	-1,561
90	1,000	-1,212	-1,212
105	1,000	-0,830	-0,829
120	0,680	-0,774	-0,526
135	0,680	-0,774	-0,526
150	0,680	-0,774	-0,526
165	0,680	-0,774	-0,526
180	0,680	-0,774	-0,526
195	0,680	-0,774	-0,526
210	0,680	-0,774	-0,526
225	0,680	-0,774	-0,526
240	0,680	-0,774	-0,526
255	1,000	-0,830	-0,829
270	1,000	-1,212	-1,212
285	1,000	-1,561	-1,561
300	1,000	-1,049	-1,049
315	1,000	-0,536	-0,536
330	1,000	-0,024	-0,024
345	1,000	0,488	0,488

(EC-kaava 7.17) Ympyräsiinterin päätevaikutuskertoimen:

$$\psi_{\lambda A} = 1 \quad \text{kun } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min}$$

$$\psi_{\lambda A} = \psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}}\right) \quad \text{kun } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_A$$

$$\psi_{\lambda A} = \psi_{\lambda} \quad \text{kun } \alpha_A \leq \alpha \leq 180^\circ$$

$$C_{pe} = C_{p0} \cdot \psi_{\lambda A}$$

(7.15)

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{v}$$

missä:

b on halkaisija

v on ilman kinemaattinen viskositeetti (v = 15 · 10⁻⁶ m²/s)

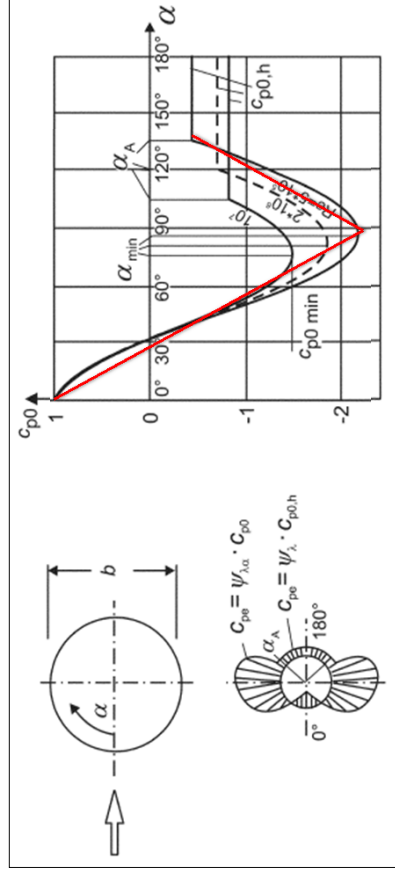
v(z_e) on kuvan 7.27 huomautuksessa 2 määritelty tuulen nopeuden huippuarvo korkeudella z_e

Taulukko 7.12 Paineen jakautumisen tyypillisiä arvoja ympyräsiinterille eri Reynoldsin luvun arvoilla ja ilman päätevaikutuksia

Re	amin	cp0,min	αA	cp0,h
5 · 10 ⁵	85	-2,2	135	-0,4
2 · 10 ⁶	80	-1,9	120	-0,7
10 ⁷	75	-1,5	105	-0,8

missä:

- amin on minimipaineen sijainti [°]
- cp0,min on painekertoimen minimiarvo
- αA on virtauksen irtoamisen sijainti [°]
- cp0,h on peruspaineen kerroin



Cp0:n arvot on laskennassa interpoloitu suoraviivaisesti ↑

(EC 5.3 kohta 4) Tuulesta syntyvän kitkan vaikutukset pintaan voidaan jättää huomiotta, kun kaikkien tuulen suuntaisten pintojen kokonaisala on enintään 4 kertaa kaikkien tuulta vastaan kohtisuorien ulkopintojen kokonaisala
 → Pyöreällä rakenteella suhde on 1, joten kitka jätetään huomioidmatta

Sisäpuolisen paineen kerroin cpi avoimille savupiipuille on -0,6
 → Sisäpuolisella paineella ei ole merkitystä laskettaessa kokonaistuulikuormaa.
 Voimien resultantiksi tulisi 0

→ Laskennassa lasketaan ulkopuolisen paineen kertoimet vain huipulle. Aiemmillä korkeuksilla käytetään huippuarvon ulkoisen paineen kertoimia, jotta laskenta olisi varmallia puolella

1.3 rakennekerroin cscd (EC-Liite B)

Tuulen turbulenssi:

Rakenteen korkeus z:	40 m	TARKISTA	0,91	kN/m ²
Rakenteen nopeuspainekorkeus zs:	24 m			
Tuulenpyörteen ulottuvuus:				
zt:	200 m	$L(z) = L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha$	kun	$z \geq z_{\min}$
Lt:	300 m			
z0:	0,010	$L(z) = L(z_{\min})$	kun	$z < z_{\min}$
a:	0,440			
Tuulenpyörteen ulottuvuus L(z):	147,83 m			

Ominaisuuksien (EC Liite F):

Rakenteen korkeus h1:	40 m	$h_{\text{eff}} = h_1 + \frac{h_2}{3}$
Alimman tuen korkeus h2:	0 m	
Tehollinen korkeus heff:	40 m	
ε1:	700 m	(betoni- sekä muuratut piliut 700, teräspiipulla 1000)
Ulkohalkaisija b:	4 m	
Jäykkyyteen vaikuttavien osien paino Ws:	3 487 kN	$n_1 = \frac{c_1 \cdot b}{h_{\text{eff}}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}}$ [Hz]
Savupiipun kokonaispaino Wt:	3 487 kN	
Alin ominaisaajuus n1:	1,75 Hz	

Tuulen taajuusjakauma korkeudella 0,6h:

Tuulen nopeuden modifioitu perusarvo v(zs):	27,75 m/s	$f_L(z, n) = \frac{n \cdot L(z)}{V_m(z)}$
Dimensioton taajuus fL(zs, n):	9,32 Hz	$S_L(z, n) = n \cdot S_L(z, n) = \frac{6,8 \cdot f_L(z, n)}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z, n))^{0,5}}$
Tuulen taajuusjakauma SL(zs, n):	0,031	

Rakennekerroin:

Taustapyörteiden vaikutusparametri B2:	0,705	(Varmalla puolella = 1)
voimakerron cf:	1	
k/b:	0,00025	$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \left(\frac{b+h}{L(z)}\right)^{0,85}}$
cf,0 =	0,86	$C_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \log(10 \cdot k/b)}{1 + 0,4 \log(Re/10^7)}$
Päättevaikutuskerron ψA:	0,68	
Tuulensuuntaisen kuorman voimakerron cf:	0,58	$C_T = C_{f,0} \cdot \psi_A$

Aerodynaamiset siirtokeroinfunktiot:

ηh:	11,61	$R_s = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h})$; $R_h = 1$ kun $\eta_h = 0$
ηb:	1,16	$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b})$; $R_b = 1$ kun $\eta_b = 0$
Alinta ominaismuotoa vastaavat aerodynaamiset siirtokeroinfunktiot:	0,082	missä: $\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z)} \cdot f(z, n_x)$ ja $\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z)} \cdot f(z, n_x)$
Rb:	0,527	

Ekvivalentti massa:

Alin ominaismuoto Φ1(z):	1	$\Phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^c$
Rakennuksen paino pitoisuuskerroin:	8 718 kg/m	$m_e = \frac{\int m(s) \cdot \Phi_1^2(s) ds}{\int \Phi_1^2(s) ds}$
Ekvivalentti massa me:	232,478 kg/m	

Vaimennuksen logaritminen dekrementti:

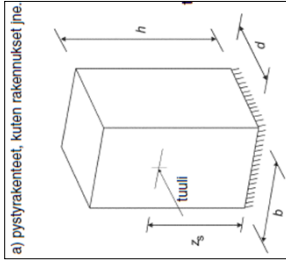
sisäisen vaimennuksen log-dekrementti δs:	0,03	(0,03=TB-piipuille, (taulukko F.2))
Aerod. vaimennuksen log-dekrementti δa:	0,0001	$\delta_a = \frac{c_1 \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e}$
Ertäislaiteiden log-dekrementti δd:	0	$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$
Vaimennuksen logaritminen dekrementti δ:	0,0301	

Resonanssivasteen vaikutusparametri R2:

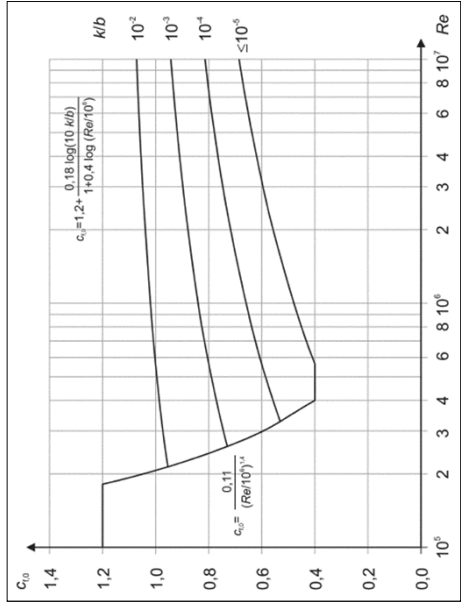
Resonanssivasteen vaikutusparametri R2:	0,22	$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_x) \cdot R_s(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b)$
Resonanssitaajuus:	0,86 Hz	$v = n_{1,x} \sqrt{B^2 + R^2}$; $v \geq 0,08$ Hz
Resonanssitaajuus v:		

Savupiipuille, joiden poikkileikkaus on pyöreä ja joiden korkeus on alle 60 m ja 6,5 kertaa halkaisija, rakennekerroin cscd voidaan käyttää arvoa 1.

→ Rakennekerroin arvon voi muuttaa syöttämällä sen rakennekerroin cscd -laskennan lopussa olevaan alleviivattuun soluun (E276)



→ zs = rakennekerrointa cscd laskettaessa käytettävä nopeuspainekorkeus 24 m



→ cf,0 - kertoimen kuvaaja. Reynoldsin luku ei koskaan mene lähellekkään kuvaajan vasenta reunaa, joten laskennassa on käytetty cf,0:n laskennassa oikean puoleista kaavaa

HUOM. 3 Kertoimen k_p, B ja R määrittämiseen käytettävä menetelmä voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Suositeltava menetelmä esitetään liitteessä B. Vaihtoehtoinen menetelmä esitetään liitteessä C. Käyttäjille voidaan ohjeena mainita, että liitettä C käytetään saatava rakennekerroimen c_s, c_f arvo eroaa liitteen B mukaisesta arvosta enintään noin 5 %.

Huippuarvokerroin:

T: 600 sek (Tuulenopeuden modifioidun perusarvon mittausaika)
kp min: 3,70

Huippuarvokerroin kp: 3,70
kp valittu: 3,70

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}}$$

Rakennekertoimen cscd:

Tuulen puuskien intensiteetti lv(zs): 0,128

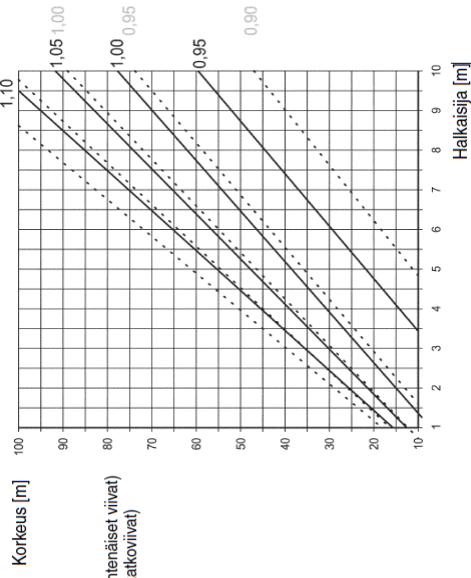
Rakennekertoimen cscd: 1,009

Kertoimen hyväksyttävä minimiarvo: 0,8

Ohjeiman varmalla puolella oleva minimiarvo: 1,0

$$c_{s,c_d} = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_s(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_s(z_s)}$$

Rakennekertoimeksi valitaan cscd: **1,0094**

c_{s,c_d} vuoraamattomille betonisavupiipuille

HUOM. Rakennekertoimen viittäessä arvon 1,1 voidaan käyttää kohdassa 6.3 esitettyä yksityskohontaista menetelyä (rakennekertoimen c_{s,c_d} hyväksyttävä minimiarvo on 0,85).

1.4 Ulkopintoihin vaikuttava tuulenpaine ja kokonais tuulikuormitukset pintapaineiden mukaan (EC-5.3(3)) → Taulukko laskee kuormitukset [kN] yhden metrin korkeus alueelle

(EC) Tuulesta syntyvän kitkan vaikutukset pintaan voidaan jättää huomiotta, kun kaikkien tuulen suuntaisten (tai lähes tuulen suuntaisten) pintojen kokonaisala on enintään 4 kertaa kaikkien tuulta vastaan kohtisuorien (tuulenpuoleisten ja suojapuoleisten) ulkopintojen kokonaisala.
 → **Laskenta ei huomioi kitkan vaikutuksia kokonaistuulikuormituksissa**

Sisäpintoihin vaikuttavaa painetta ei huomioida, koska:
 → **Piipun sisällä on eurokoodin mukaan tasainen alipaine mikä ei vaikuta kokonaistuulikuormitukseen**

Rakennekerroin c_{sd}: 1,01
 Piipun ulkopintojen ala: 502,7 m²
 Tuulikuorman vaikutusala A_{ref} 15° alueelle: 0,52 m²
 Puuskanopeuspaine q_p(h): 1,01 kN/m²
 Puuskanopeuspaine q_p(h/2): 0,88 kN/m²
 Puuskanopeuspaine q_p(z_{min}): 0,42 kN/m⁴

$$W_e = q_p(z_e) \cdot C_{pe}$$

z	c _{pe}	w _e (h) [kN/m ²]	q _w e(h) [kN/m ²]	F _w e(h) [kN]	F _w e(h/2) [kN]	F _w e(z _{min}) [kN]
0	1,00	-1,01	-1,02	-0,53	-0,53	-0,47
15	0,49	-0,49	-0,50	-0,25	-0,25	-0,11
30	-0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
45	-0,54	0,54	0,55	0,20	0,00	0,00
60	-1,05	1,06	1,07	0,56	0,00	0,00
75	-1,56	1,57	1,59	0,83	0,22	0,00
90	-1,21	1,22	1,23	0,65	0,00	0,00
105	-0,83	0,84	0,84	0,44	-0,11	-0,05
120	-0,53	0,53	0,53	0,28	-0,14	-0,06
135	-0,53	0,53	0,53	0,28	-0,20	-0,08
150	-0,53	0,53	0,53	0,28	-0,24	-0,10
165	-0,53	0,53	0,53	0,28	-0,27	-0,11
180	-0,53	0,53	0,53	0,28	-0,28	-0,12
195	-0,53	0,53	0,53	0,28	-0,27	-0,11
210	-0,53	0,53	0,53	0,28	-0,24	-0,10
225	-0,53	0,53	0,53	0,28	-0,20	-0,08
240	-0,53	0,53	0,53	0,28	-0,14	-0,06
255	-0,83	0,84	0,84	0,44	-0,11	-0,05
270	-1,21	1,22	1,23	0,65	0,00	0,00
285	-1,56	1,57	1,59	0,83	0,22	0,00
300	-1,05	1,06	1,07	0,56	0,00	0,00
315	-0,54	0,54	0,55	0,29	0,00	0,00
330	-0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
345	0,49	-0,49	-0,50	-0,25	-0,25	-0,11
Yht. Σ:				-1,83	-3,25	-2,84

ulkopuoliset kuormat: (5.5)

$$F_{w,ed} = c_{pe} \cdot c_{pd} \cdot \sum_{pinnat} W_e \cdot A_{ref}$$

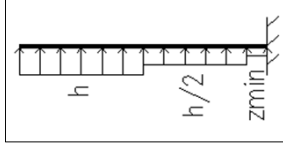
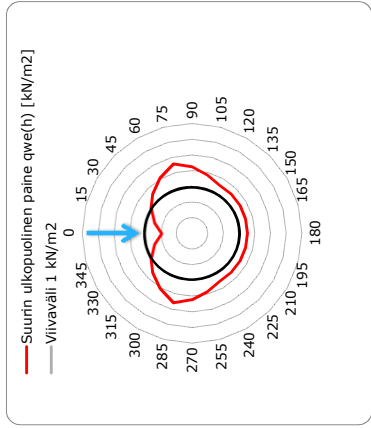
sisäpuoliset kuormat: (5.6)

$$F_{w,ei} = \sum_{pinnat} W_i \cdot A_{ref}$$

kitkakuormat: (5.7)

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr}$$

Tuulikuormitukset:	[kN/m]	KRT [kN/m ²]	[kN/m]	MRT [kN/m ²]	z [m]
korkeudella h:	3,25	0,81	4,87	1,22	40,0
korkeudella h/2:	2,84	0,71	4,26	1,06	20,0
korkeudella z _{min} :	1,37	0,34	2,05	0,51	1,0



Vertailtava laskenta voimakertoimia käyttäen:

A_{ref}: 160 m² (b*h)
 q_p(z_e): 1,01 kN/m² (korkeudella h)
 c_{sd}: 1,01
 cf: 0,58 Neilömatselle rakenteelle 1,28-1,49 Rillin mukaan -> yli 2x kuormitus
 F_w: 94,63 kN

KRT M: 1 893 kNm

(Tässä tulee pienempi momentti, koska pintapaine laskennassa on jätetty huomioimatta tukevat tuulenpaineet) joten momentti on 33 % varmalla puolella

Tämä laskenta ei huomioi pinnanmuodostuksesta johtuvia paineen lisäyksiä kuin piipun huipulla

$$F_w = c_{pe} \cdot c_{pi} \cdot c_{pd} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

Suurin Momentti KRT (h=0): 2 514 kNm
 Keskimääräinen neliökuorma KRT: 0,75 kN/m²
 Epäkeskisyysdesta lisämomentti: 1 069 kNm
 Suurin Momentti MRT (h=0): 4 841 kNm
 Keskimääräinen neliökuorma MRT: 1,13 kN/m²

Viiva rakenteen sisällä = puristus, ulkopuolella = veto

1.5 Viereiset ja peräkkäiset rakennukset

Viereinen rakennus:

Jos viereissä oleva rakennus on lähempänä kuin $1,5 \cdot b = \underline{6}$ m, niin eurokoodin mukaan tarvitaan asiantuntijalausuntoja tuulikuormituksen muuttumisesta ks. Kuva 7.29 →

Laitetaanko tuloksiin pieniin sallittava etäisyys lähimpään rakennukseen milloin asiantuntija lausuntoa ei tarvita?

Peräkkäiset piiput:

Vaikutusta ei synny jos välinen etäisyys $a > 120$ m

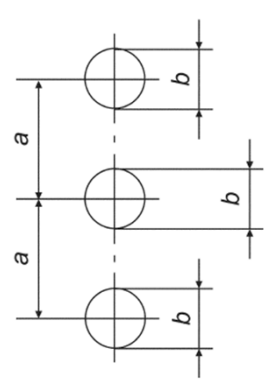
Jos piippujen välinen etäisyys on välillä: 120 m ja 14 m
niin kuormitusta lisäävä kerroin κ : 1 ja $1,15$

Jos piippujen välinen etäisyys on välillä: 14 m ja 10 m
niin kuormitusta lisäävä kerroin κ : $1,15$ (suurin arvo)

Jos piippujen välinen etäisyys < 10 m, niin tarvitaan asiantuntijalausunto

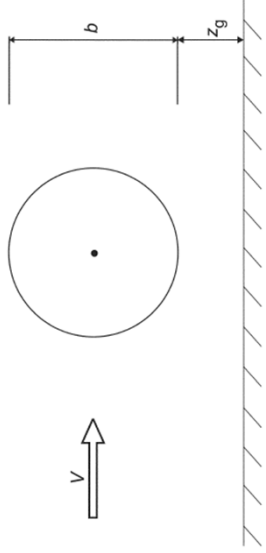
Taulukko 7.14 Pystysyylinterien peräkkäisyyskerroin κ

a/b	κ
$ A > 2,5 < a/b < 3,5 < A1$	1,15
$3,5 < a/b < 30$	$\kappa = \frac{210 - a}{180 \cdot b}$
$a/b > 30$	1,00



a : keskiväli
 b : halkaisija
!A1> HUOM. Kansallisessa liitteessä voidaan esittää arvoja parametreille κ , kun $a/b < 2,5 < A1$

(e) Syylinterille, jotka ovat lähellä tasopintaa suhteellisen etäisyyden ollessa $z_g/b < 1,5$ (ks. kuvaa 7.29), tarvitaan asiantuntijalausunto.



Kuva 7.29 Syylinteri lähellä tasopintaa

7.9.3 Peräkkäisten pystysyylinterien voimakerroimet

Pystysuuntaisten ympäräsyylinterien ollessa peräkkäin voimakerroin $c_{f,0}$ riippuu tuulen suunnasta rivin akseliin nähden sekä keskivälän a ja halkaisijan b suhteesta taulukossa 7.14 määritellyllä tavalla. Kunkin syylinterin voimakerroin c_f saadaan kaavasta (7.21):

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_A \cdot \kappa \quad (7.21)$$

missä:

$c_{f,0}$ on syylinterien voimakerroin, kun ilma ei pääse virtaamaan pään ohi (ks. kohtaa 7.9.2)

ψ_A on päätevaikutuskerroin (ks. kohtaa 7.13)

κ on taulukossa 7.14 esitetty peräkkäisyyskerroin (epäedullisimman tuulen suunnan vallitessa)

2 MITOITUKSET

2.1 Käyttörajan mitoitus

2.1.1 Staattiset ominaisuudet

Momentti korkeudella O:
Mk max, kun z=0m: 2 514,4 kNm

Jäyhyysmomentti:
fck: 40 N/mm²
Betoni kimmomoduuli (E_{cm}): 35 220 N/mm² 35 220 462 kN/m²

$$I = \frac{\pi}{4} (r_2^4 - r_1^4)$$

Jäyhyysmomentti I: 6,01 m⁴

Rakenteen paino:
Paino/m g: 87,2 kN/m
Rakenteen kokonaispaino G: 3 487 kN

Taivutusvastus:

Ehjän piipun taivutusvastus W: 3,003 m³

Aukon leveys ba: 0,0 m

Piipun ulkoreunan säde R: 2,00 m

Seinämäpaksuus t: 0,30 m

Piipun sisäreunan säde: 1,70 m

Säde seinän keskelle r: 1,85 m

Aukkoa vastaava keskuskulma β: 0,0 °

Ehjän osan keskuskulma: 360,0 °

Ehjän osan keskuskulman puolikas α: 180,0 ° radiaantit: 3,14

Koko poikkileikkauksen ala:

Aukon ala:

Ehjän osan poikkileikkauksen ala:

Ehjän osan painopiste keskeltä x: 0,00 m

Painopisteen suurin etäisyys reunaan e: 2,00 m

2.1.2 Taipuma

Keskimmäinen tuolenkuorma q,k: 3,14 kN/m

$$f = q l^4 / 8EI$$

Taipuma f: 4,8 mm

2.1.3 Pyörretailmiö ja aerolastiset epästabiilisuudet

Strouhalin luku: 0,18 (vakio ympyräpoikkileikkaukselle)

v_{crit},j: 38,9

1,25*V_m: 37,0

(1) Pyörretailmiön vaikutus tulee tutkia, kun tuulta vastaan kohtisuorassa tasossa rakenteen suurimman mitan suhde pienenempään mitaan on yli 6.

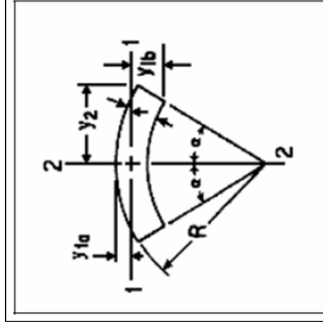
(2) Pyörretailmiön vaikutusta ei tarvitse tutkia, kun

$$V_{\text{crit}} > 125 \cdot V_m \quad (E.1)$$

→ Aukollisen poikkileikkauksen taivutusvastus lasketaan neliomomenttikaavalla:

$$W = \frac{I}{e}$$

jossa I on poikkipinnan neliomomentti ja e suurin reunäätäisyys neutraaliakselille taivutusmomentin tason suunnassa.



Kuva 4. Leikatun sylinterin pääneliomomentit /4/

$$I_1 = R^2 t \left[\left(1 - \frac{3r}{2R} + \frac{r^3}{R^3} - \frac{r^3}{4R^3} \right) * \left(\alpha + \sin \alpha \cos \alpha - \frac{2 \sin^2 \alpha}{\alpha} \right) + \frac{r^2 \sin^2 \alpha}{3R^2 \alpha} \left(2 - \frac{r}{R} \right) \left(1 - \frac{r}{R} + \frac{r^2}{6R^2} \right) \right]$$

$$I_2 = R^2 t \left(1 - \frac{3r}{2R} + \frac{r^3}{R^3} - \frac{r^3}{4R^3} \right) * (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)$$

→ Ohjelma ei huomioi pyörretailmiötä eikä epästabiilisuilmiötä

2.2 Murtorajattilan mitoitukset

Momentti korkeudella O:
Md max, kun z=0m: 4 841 kNm

2.2.1 Betonin puristuslujuus

Jännitys momentista, kun z=0m σ : 1 612 kN/m² → 1,61 N/mm²

Rakenteen paino murtorajattilassa: 4 010 kN

Betonin pinta-ala Ac: 3,49 m²

Lisäjännitys omasta painosta: 1 150 kN/m² → 1,15 N/mm²

$$W = \frac{M}{\sigma}$$

Suurin puristusjännitys (omapaino+M) σ : 2,76 N/mm²

Betonin puristuslujuus f_{cd}: 40 N/mm²

Betonin laskenta puristuslujuus f_{cd}: 22,7 N/mm²

Mitotusehto: 22,67 > 2,76

Käyttöaste: 12 %

2.2.2 Raudituksen mitoitus

Terästen lujuus f_{yk}: 500 N/mm²

Terästen laskentalujuus f_{yd}: 434,8 N/mm²

Terästen jatkospituus (EC2-1-1):

Tartuntaolosuhte kerroin η_1 : 0,7 (=0,7 Luukuvaetuissa rakenteissa varmallalla puolella)

Tangon halkaisijan kerroin η_2 : 1,0

Betonin laskentavetolujuus f_{ctd}: 1,64 N/mm²

Tartuntalujuus f_{bd}: 2,58 N/mm²

Tangon jännitys jatkoskohdassa osd: 188,8 N/mm²

Jatkospituuden perusarvo l_{b,reqd}: 219 mm

$$l_{b,reqd} = \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} \quad (1) \text{ Jatkospituuden mitoitussarvo on}$$

$l_0 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 \alpha_7 \alpha_8 \alpha_9 \alpha_{10}$

missä

$f_{b,reqd}$ lasketaan kaavasta (8.3)

$l_{0,min} \geq \max(0,3 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 \alpha_7 \alpha_8 \alpha_9 \alpha_{10}; 200 \text{ mm})$

Tankojen muotokerroin α_1 : 1,0 (Suora teräs)

Betonipeite kerroin α_2 : 0,7 (=0,7-1,0)

Poikittainen laajenemisen estorauuditus α_3 : 1,0 (varmallalla puolella)

Hitsattu laajenemisen estorauuditus α_4 : 0,7 (aina 0,7)

Laajenemista estävä poikittaispaino α_5 : 1 (varmallalla puolella)

Limityksen samanaikaisuus kerroin α_6 : 1,5 (varmallalla puolella)

Jatkospituuden minimiarvo l_{0,min}: 200 mm

Jatkospituuden mitoitussarvo l_{bd}: 200 mm

Valitaan jatkospituudeksi: 200 mm (valitsee 200mm kerrannaisen)

→ Puristusmitoituksessa ei huomioida teräksiiä

2005.122

Taulukko 8.2 Kertoimien $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ja α_5 arvot		
Vaiuttava tekijä	Ankkurointityyppi	Betoniteräs vetoteräs
Tankojen muoto	Suora	$\alpha_1 = 1,0$
Betonipeite	Muu kuin suora (ks. kuvia 8.1 (b), (c) ja (d))	$\alpha_1 = 0,7$ jos $c_d > 3\phi$ muuten $\alpha_1 = 1,0$ (mitan c_d arvot ovat kuvassa 8.3)
	Suora	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - 3\phi)/\phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$
	Muu kuin suora (ks. kuvia 8.1 (b), (c) ja (d))	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - 3\phi)/\phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$ (mitan c_d arvot ovat kuvassa 8.3)
Poikittainen laajenemisen estorauuditus, jota ei ole hitsattu	Kalkki tyypit	$\alpha_3 = 1 - K/\lambda$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$
Poikittainen hitsattu laajenemisen estorauuditus*	Kalkki tyypit sijainti ja koko kuvassa 8.1 (e) määrättyillä tavoilla	$\alpha_4 = 0,7$
Laajenemista estävä poikittaispaino	Kalkki tyypit	$\alpha_5 = 1 - 0,04p$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$
missä		
λ	$\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{s,min})/A_s$	
ΣA_{st}	poikittaisraudoituksen poikittaiskausaala pitkin mitoitussarvon mukaista ankkurointipituutta l _{bd}	
$\Sigma A_{s,min}$	poikittaisraudoituksen poikittaiskausaala vähimmäisarvo = 0,25 A _s palkilla ja 0 laatoilla	
A _s	yksittäisen halkaisijaltaan suurimman ankkuroidun tangon poikittaiskausaala	
K	kuvan 8.4 arvot	
p	poikittaispaino [MPa] murtorajattilassa pitkin mitoitussarvon mukaista ankkurointipituutta l _{bd}	
* Ks. myös kohta 8.6: Valittomilla tuilla ankkurointipituuden mitoitussarvo l _{bd} voidaan käyttää pienempää arvoa kuin l _{0,min} mikäli tuen kohdalla on vähintään yksi hitsattu poikittaiskausaala. Tämän edellytetään olevan vähintään 15 mm tuen ulkopinnalta.		

Terästen mitoitus:

Poikkileikkaus aukolla

	Ulkoreuna	Sisäreuna	m
Teräslinjan piirini pituus:	12,31	10,94	10,94
Teräsmäärä:	5,0	5,0	5,0
Teräksiä yhteensä:	61,5	54,7	54,70
Terästen pinta-ala:	6 960	6 186	6 186

Ehjä poikkileikkaus

	Ulkoreuna	Sisäreuna	m
	12,31	10,94	10,94
	5,0	5,0	5,0
	61,54	54,70	54,70
	6 960	6 186	6 186

Terästen pinta-ala yhteensä As:	13 146	mm ²
Betonin pinta-ala Ac:	3 49	m ²
As/Ac:	0,00377	

Betonin omapaino murtorajatilassa:	3 138	kN
(tukeva voima, kerroin 0,9)		
Betonin omapainon tukeva jännitys:	0,90	N/mm ²
Momentin jännitys:	1,61	N/mm ²
Suurin vetojännitys:	0,71	N/mm ²

Suurin terästen jännitys, kun z=0:	188,8	N/mm ²
Terästen sallittu jännitys:	434,8	N/mm ²
Terästen vaadittava pinta-ala Asvaad:	5 710	mm ²

Mitoitusehto:	13 146	>	Asvaad	6 974	mm ²
---------------	--------	---	--------	-------	-----------------

Käyttöaste: 53 %

Minimiraudoitus:

Minimiraudoitus koko poikkileikkaukselle: 6 974 mm²

f _{ctm} :	3,5	N/mm ²
Palkin minimiraudoitus As _{min} :	471	mm ² /m
Paaluille As _{min} :	750	mm ² /m
Taivutetuille rakenteille Taulukko 5 As _{min} :	546	mm ² /m
Kansallisen liitteen minimiarvo:	600	mm ² /m

0,26*f_{ctm}*b*d/f_{yk}
0,0025*Ac
Taulukko 5 ->
9.6.2 ->

Korkeus	h-h/2	h/2-z _{min}	z _{min} -0	M [kNm]	As vaad	As vaad/m	As valittu
0,0	20,0	19,0	1,0	4 841	6 974	600	600
11,8	20,0	8,2	0,0	2 669	3 148	271	600
23,6	16,4	0,0	0,0	1 093	1 289	111	600
35,4	4,6	0,0	0,0	174	206	18	600
47,2	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
59,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
70,8	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
82,6	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
94,4	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
106,2	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
118,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
129,8	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
141,6	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
153,4	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
165,2	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0

† Korkeuspiste vaihtelee jatkospituuden mukaan.

Välit lasketaan kaavalla: Raudituksen pisin mitta (1,2m) - jatkospituus

Kansallinen liite:

9.6.2 Pystyraudoitus

(1) Seinän pystysuoran raudituksen pinta-alan minimiarvo on $A_{s,min,vert}$ ja maksimi-arvo $A_{s,max,vert} = 0,06A_c$.

9.5.2 Pääraudoitus

(3) Pääraudoituksen ala saa olla enintään $A_{s,max}$. Pääraudoituksen enimmäisalan arvo on limityskohtien kohdalla $A_{s,max} = 0,12A_c$ ja limityskohtien ulkopuolella $A_{s,max} = 0,06A_c$.

Taulukko 9.6N Suositeltava pääraudoituksen vähimmäisala paikalla valettaville kaivettaville paaluille	Pääraudoituksen vähimmäisala: $A_{s,min}$
Paalun poikkileikkaus: A_c	$A_{s,min}$
$A_c \leq 0,5 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,005 \cdot A_c$
$0,5 \text{ m}^2 < A_c \leq 1,0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 25 \text{ cm}^2$
$A_c > 1,0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,0025 \cdot A_c$

Taulukko 5 Vähimmäisraudoitusmäärä	f_{cm}	Vähimmäisraudoitus % ($0,26f_{cm}/f_{yk}$)
f_{ek}	25	0,13
	28	0,14
	30	0,15
	32	0,16
	35	0,17
	40	0,18
	45	0,20
	50	0,21

Merkinnot
a Jossa $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$.

2.2.3 Perustusten rakenteellinen mitoitus

Lävistyskestävyys: RakMK:n mukaan

Momentti Md:	4 841	kNm
Normaalivoima Nd:	4 010	kN
Epäkiskisyys e:	1,21	m
Anturan tehollinen pinta-ala MRT:		
	21,51	m ²
Pohjapaine Pd:	186,4	kN/m ²
Kuormitus pinta-ala piipun ulkopuolella:		
	12,65	m ²
Kuormitus pinta-ala piipun sisäpuolella:	2,98	m ²
Kuormitus pinta-ala yhteensä:	15,63	

Lävistysraitus Ved,s:

laskentavoljisuus fctd:	1,35	N/mm ²
Tehollinen korkeus d:	726	mm
k:	1,1616	

Leikkauspinnan rajoittama piiri u:

Leikkauspinnan pinta-ala Au:	23,25	m ²
β:	0,26	

Teräsiän suhteelliset pinta-alat px, py:

Teräsiän suhteelliset pinta-alat px, py:	6,7
Suhteellisen teräspinta-alan kerroin p:	0,0017
	0,0017

Lävistyskapasiteetti VRd,c,s:

VRd,c,s	7 527	kN
---------	-------	----

Mitoitusehto:	VRd,c,s	Ved,s
	7 527	2 914

Käyttöaste:

39 %

Leikkausmitoitus:

Leikkausrasituksen pinta-ala:	1 644	m ²
Leikkausrasitus Ved:	306	kN

Betonin lieriöjuuuden ominaisarvo fck:

fck:	30	N/mm ²
------	----	-------------------

Yhdensuuntaisten terästen pinta-ala Asi:

Poikkileikkauksen pienin leveys bw:	8 042	mm ²
pi:	6 000	mm
	0,0018	

Betonin laskentapuristuslujuus fcd:

Ned:	17	N/mm ²
------	----	-------------------

Betonipolkileikkauksen ala Ac:

Ned:	4 010 243	N
ocp:	4 800 000	mm ²
	0,835	N/mm ²

k1:	0,15	vakio
vmin:	0,36	
CRd,c:	0,12	

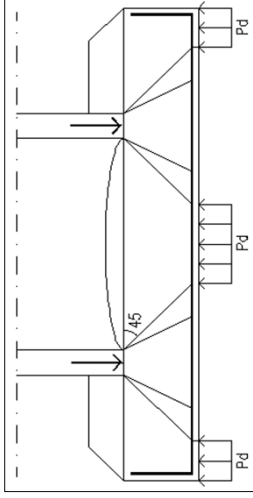
Leikkauskestävyys VRd,c:

VRd,c	1 956	kN
Mitoitusehto:	VRd,c	2 118
	2 118	kN

VRd,c	Ved
2 118	306

Käyttöaste:

14 %



$$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y} \leq 8 \text{ ‰}$$

ρ_x ja ρ_y ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa etäisyydellä 0,5 d tuen reunasta sijaitseissa poikkileikkauksissa olevat suhteelliset teräspinta-alat. Vedetyn pinnan raudoitusten tulee olla ankkuroitu mainittujen poikkileikkausten ulkopuolelle.

Suurien tukien kohdalla mitoitetaan vain nurkat lävistykselle (kuva 2.15). Poikkileikkaukseltaan pyöreät tuet, joiden halkaisija $\geq 3,5$ d, mitoitetaan leikkaukselle.

6.2.2 Leikkausraudoittamattomat rakenteet

(1) Leikkauskestävyyden $V_{Rd,c}$ mitoitusarvo lasketaan kaavasta

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho f_{ctd})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \quad (6.2a)$$

vähimmäisarvon ollessa

$$V_{Rd,c} = (V_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (6.2b)$$

missä

f_{ctd} on betonin lieriöjuuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä yksikkönä MPa

$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ missä d poikkileikkauksen tehollinen korkeus d on millimetreinä

$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w d} \leq 0,02$

A_{s1} on tarkasteltavasta poikkileikkauksesta momentin itseisarvon pienemmän puoleisen puolelta (ks. kuvaa 6.3) rantuottuvan vetöraudoituksen pinta-ala

b_w on poikkileikkauksen pienin leveys vedetyllä korkeudella [mm]

$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 f_{ctd}$ [MPa]

N_{Ed} on kuormituksesta tai jännepainosta aiheutuva poikkileikkauksen normaaliavoima [N] ($N_{Ed} > 0$ puristuksessa).

Pakkosirtymätilan vaikutusta normaaliavoimaan N_{Ed} ei tarvitse ottaa huomioon.

A_c on betonipolkileikkauksen pinta-ala [mm²].

Taivutusmitoitus:

Taivutusrasitus Med:	559	kNm
Suhteellinen momentti μ :	0,010	$M_d / (f_{ctd} \cdot b \cdot d^2)$
Puristuspinnan suhteellinen korkeus β :	0,010	$1 - (1 - 2 \cdot \mu)^{0,5}$
Sisäinen momenttivarsi z:	722	$d \cdot (1 - \beta / 2)$
Terästen lujuus fyk:	500	N/mm ²
Terästen laskentalujuus fyd:	434,78	N/mm ²
Vaadittu teräsmäärä momentille Asvaad:	1 781	mm ²
fctm:	2,9	N/mm ²
Minimiraudoitus:	6 569	mm ²
Yhdensuuntaisten terästen pinta-ala As:	8 042	mm ²
Asvaad	6 569	
Mitoitusehto:	8 042	>
Käyttöaste:	82 %	

$$0,26 \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot d / f_{yk}$$

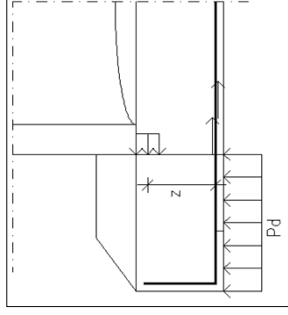
2.2.4 Perustusten geotekninen mitoitus

$$R/A' = q' \cdot N_q \cdot S_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_{\gamma} \cdot S_{\gamma} \cdot i_{\gamma}$$

Kuormat anturan alapinnassa:

Momentti Mk:	2 658	kNm
Normaalivoima Nk:	4 207	kN
Vaakakuorma Vk:	120	kN
Epäkeskisyys e:	0,63	m
Epäkeskyyden rajaehto b/3:	2,00	m
Anturan tehollinen pituus L':	6,00	m
Anturan tehollinen leveys B':	4,74	m
Anturan tehollinen pinta-ala:	28,4	m ² ->
Jännitys tehokkaalle pohjan alalle:	161,3	kN/m ²
Maan tehokas kitkakuuma ϕ :	30	°
Kriittisen tilän kitkakuuma ϕ_{cv} :	25	°
Kantavuuskertoimet:		
Nq:	18,40	
Ny:	20,09	
Muotokertoimet:		
sq:	1,395	
sy:	0,763	
iq:	0,956	
iy:	0,928	
mb:	1,559	
q':	20,4	kN/m ²
Kantokestävyyden ominaisarvo Rk/A':	838	kN/m ²
Kantokestävyyden laskenta-arvo Rd/A':	540,4	kN/m ²
Kuormien mitoitusarvo Vd/A':	185,5	kN
Mitoitusehto:	540	>
Käyttöaste:	34 %	

$$R_d = R_k / \gamma_{Rd} = 838 / 1,55 = 540,4 \text{ kN/m}^2$$



Avoimet olosuhteet

Kantokestävyyden mitoitusarvo voidaan laskea kaavasta:

$$R/A' = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_{\gamma} \cdot b_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot i_{\gamma} \quad (D.2)$$

jolloin yksiköttömät kertoimet ovat:

- kantokestävyydelle (vrt. taulukko 6.2S):

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan \phi} \cdot \tan^2 (45^\circ + \phi/2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi'$$

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

- perustuksen pohjan kaltevuudelle:

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

$$b_q = b_{\gamma} = (1 - \alpha \cdot \tan \phi')^2$$

- perustuksen muodolle:

$$s_q = 1 + (B'/L') \cdot \sin \phi'$$

$$s_{\gamma} = 1 + \sin \phi'$$

$$s_i = 1 - 0,3 \cdot (B'/L')$$

$$s_{\gamma} = 0,7$$

$$s_c = (s_q \cdot N_q - 1) / (N_q - 1) \text{ suorakaiteelle, neliölle tai ympyrälle}$$

- vaakakuorman H aiheuttamalle kuorman kaltevuudelle:

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

$$i_q = [1 - H / (V + A' \cdot c' \cdot \cot \phi')]^m$$

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

missä:

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

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

Tapauksissa, joissa kuorman vaakakomponentti vaikuttaa suunnassa, joka muodostaa kulman θ perustuksen tehokkaan pituuden L' :n suunnan kanssa, voidaan laskea kaavalla:

$$m = m_{\theta} = m_L \cos^2 \theta + m_B \sin^2 \theta$$

Liukumistarkastelu:

Kriittisen tilan kitkakulma(ϕ_{cv}):	25	*	
Pystykuorma (KRT):	4 207	kN	
Pystykuorma Vd:	3 786	kN	(Stabiiliva kuorma, joten kerroin = 0,9)
Liukumista vastustava kuorma Rd:	1 605	kN	$(Vd * \tan \phi_{cv}) / \gamma_{rh}$ (Yrh=1,1)
Vaakuorman laskenta-arvo Vd:	180	kN	$(V_k * 1,5)$
Rd		Vd	
Mitotusehto:	1 605	>	180
Käyttöaste:	11 %		

2.3 Menekit ja hinnat

Betonin hinta:	200	e/m ³	
Teräksen hinta:	2	e/kg	→ 15 700 e/m ³
Perustus:			
Perustuksen tilavuus:	28,8	m ³	
Perustuksen teräsmäärä/m:	6,67	kg/m	
Teräsmäärä:	0,115	m ³ (nostettu sivuilta viós)	
Betonimäärä:	28,7	m ³ (teräkset vähennetty)	
Teräksen hinta:	1 813	e	
Betonin hinta:	5 737	e	
Perustuksen kokonaihinta:	7 550	e	
Piippu:			
Ehjän piipun poikkileikkauksen pinta-ala:	3,487	m ²	
Aukon poikkileikkauksen pinta-ala:	0,000	m ²	
Piipun alapään poikkileikkauksen pinta-ala:	3,487	m ²	
Piipun teräsmäärä/m:	5,00	kg/m	
Ehjän piipun ulkoreunan teräsmäärä:	6 960	mm ²	
Aukon teräsmäärä:	0	mm ²	
Aukollisen ulkoreunan teräsmäärä:	6 960	mm ²	
Ehjän piipun sisäreunan teräsmäärä:	6 186	mm ²	
Aukon teräsmäärä:	0	mm ²	
Aukollisen sisäreunan teräsmäärä:	6 186	mm ²	
Ehjän piipun teräsmäärä yhteensä:	13 146	mm ²	→ 0,0131 m ²
Aukollisen piipun teräsmäärä yhteensä:	13 146	mm ²	→ 0,0131 m ²
Teräsmäärä ensimmäist 1,2m:	0,16	m ³	
Teräsmäärä keskimäärin:	0,0101	m ²	
Terästen pituus aukon jälkeen:	28,5	m	
Teräsmäärä yhteensä:	0,444	m ³	→ 3 487 kg
Betonimäärä yhteensä:	139,04	m ³	
Teräksen hinta:	6 974	e	
Betonin hinta:	27 808	e	
Piipun kokonaihinta:	34 783	e	
Koko rakennuksen kokonaihinta:	42 332	e	