



## **TEKNIikka JA LIIKENNE**

**Rakennustekniikka**

**Talonrakennustekniikka**

## **INSINÖÖRITYÖ**

### **MUURATTUJEN RAKENTEIDEN MITOITUS EUROKOODIN MUKAAN**

**Työn tekijä: Ulla Hakulinen**  
**Työn ohjaajat: Jouni Kalliomäki**  
**Olli Saarinen**

**Työ hyväksytty: \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2009**

**Jouni Kalliomäki**  
**lehtori**



## ALKULAUSE

Kiitos Ammattikorkeakoulu Metropolialle ja Helsingin ammattikorkeakoulu Stadialle hyvästä opetuksesta. Kiitos myös Jouni Kalliomäelle insinöörityön opastuksesta ja neuvoista.

Kiitos Olli Saariselle tutkimuksen aiheesta ja ohjauksesta. Kiitos myös Seppo Suuriniemelle ja Vesa Järviselle kommentteista.

Erityisesti haluan kiittää Timo Tikanojaa kaikista neuvoista ja materiaalista. Ilman kaikkea saamaani materiaalia insinöörityön tekeminen olisi ollut paljon vaikeampaa.

Kiitos vanhemmilleni kannustuksesta sekä Arille tukemisesta ja muistuttamisesta, että elämässä on muutakin kuin insinöörityö. Lisäksi kiitos kaikille ystäville ja kavereille kannustuksesta. Erityinen kiitos Kaisalle oikoluvusta ja muista vinkeistä.

Kiitos A-Insinöörien Espoon yksikölle työntekomahdollisuudesta insinöörityön teon ohella. Kiitos kaikille työtovereille kannustuksesta ja neuvoista.

Kiitos myös #stadia@IRCnetin ihmisille hyvistä vinkeistä, neuvoista ja hauskoista jutuista, jotka ovat auttaneet jaksamaan vaikeinakin hetkinä.

Espoossa 27.4.2009

Ulla Hakulinen

## TIIVISTELMÄ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>Työn tekijä:</b> Ulla Hakulinen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                          |
| <b>Työn nimi:</b> Muurattujen rakenteiden mitoitus eurokoodin mukaan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                          |
| <b>Päivämäärä:</b> 27.4.2009                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>Sivumäärä:</b> 49 s. + 2 liitettä                     |
| <b>Koulutusohjelma:</b><br>Rakennustekniikka                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>Suuntautumisvaihtoehto:</b><br>Talonrakennustekniikka |
| <b>Työn ohjaaja:</b> lehtori Jouni Kalliomäki                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                          |
| <b>Työn ohjaaja:</b> Tekn. lis. Olli Saarinen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                          |
| <p>Eurokoodien käyttöönotto synnyttää tarpeen verrata käytössä olevaa mitoitus tapaa uuteen, euroopanlaajuiseen menetelmään. Tämä tutkimus tyydyttää osaltaan tätä tarvetta ja auttaa ymmärtämään uuden menetelmän hyötyjä ja haittoja nykyiseen verrattuna.</p> <p>Tämä insinöörityö tehtiin osana projektia koko eurokoodiston tutuksi tekemiseksi. Muita eurokoodin osia koskevat tutkimukset on tehty diplomitöinä Tampereen teknilliselle yliopistolle.</p> <p>Tutkimukseen valittiin tutkittavaksi viisi muurattua perusrakennetta: palkki, seinämäinen palkki, kantava väliseinä, julkisivumuuri ja maanpaineiseinä. Tutkimuksessa laskettiin näiden rakenteiden mitoitus läpi sekä eurokoodin että Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisesti. Lopputuloksia verrattiin toisiinsa suurimpien erojen selville saamiseksi.</p> <p>Tutkimuksen alussa oletettiin, että eurokoodin mukaan laskettaessa saadaan lopputulokseksi pienempiä rakenteita mahdollistavia tuloksia, eli suurempia kapasiteetteja ja pienempiä rauditusmääriä. Kaikissa rakenteissa näin ei kuitenkaan käynyt ja muutenkin lopputulokset olivat eri rakenteiden välillä niin erilaisia, ettei yhtenäistä sääntöä muurattujen rakenteiden käyttäytymisestä eurokoodin mukaan laskettaessa, nykyisin Suomessa käytössä olevaan käytäntöön verrattuna, pystytä osoittamaan.</p> <p>Muurattujen rakenteiden eurokoodin käyttöönotto tulee aiheuttamaan tiettyjen rakenteiden ja rakennustapojen osalta ongelmia. Eurokoodi käsittää kaikki muuratut rakenteet sekundaarisina rakenteina, mikä aiheuttaa Suomessa etenkin maanpaineiseinän laskennassa päänvaivaa, kun kaikkiin mitoitusvaiheisiin ei löydy ohjeistusta.</p> <p>Todennäköisesti eurokoodi 6 tulee jäämään Suomessa vähälle käytölle, sillä muuratut kantavat rakenteet ovat nykypäivänä kohtuullisen harvinaisia. Silti on hyvä, että aiheesta on tutkimustietoa olemassa, koska muurattuja, kantavia rakenteita silti yhä rakennetaan ja rakenteissa, joiden mitoituksesta suunnittelijoiden rutiini puuttuu, selkeiden mitoitusmallien rooli korostuu entisestään.</p> |                                                          |
| <b>Avainsanat:</b> eurokoodit, muuratut rakenteet, eurokoodi 6, EC6, tiili, kevytsoraharkko                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                          |

## ABSTRACT

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>Name:</b> Ulla Hakulinen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                |
| <b>Title:</b> Design of Masonry Structures According to Eurocodes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                |
| <b>Date:</b> 27 <sup>th</sup> May 2009                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Number of pages:</b> 49 + 2 appendices      |
| <b>Department:</b> Civil Engineering                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Study Programme:</b> Structural Engineering |
| <b>Instructor:</b> Olli Saarinen, Lich. Tech.<br><b>Supervisor:</b> Jouni Kalliomäki, Senior Lecturer                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                |
| <p>The European Union is synchronizing its various, national structural designing standards to unified methods. It creates a need to study and compare these new methods. This study aims to provide an understanding of the advantages and disadvantages in the introduction of Eurocodes compared to the standards used today.</p> <p>This thesis has been written as a part of a larger study of the whole Eurocode system. The other parts of the study were written as theses for Tampere University of Technology.</p> <p>Five basic masonry structures are considered in this thesis: a beam, a deep beam, a wall subjected to vertical loads, a wall subjected to horizontal loads and a wall subjected to loading from earth. In the study, the designing process analyzed using both Eurocodes and Finnish standards. The results were compared in order to find the greatest differences between the methods.</p> <p>In the beginning of the study it was assumed that according to Eurocodes the structures would end up being smaller. This was not the case with every structure. Altogether, the results were so different between the structures that no generalization can be drawn of the behaviour of the masonry structures, whether using Eurocodes or Finnish standards.</p> <p>In Finland the implementation of the Eurocodes will cause problems with some structures. According to Eurocodes masonry structures are always considered as secondary structures. This is problematic for example in designing a wall subjected to loading from earth, which is a primary structure. Therefore, there are no rules for all the necessary phases to design such a structure.</p> <p>It is probable that Eurocode 6 will be less used in Finland, because masonry structures are quite rare here. Therefore, it is useful to have models for designing since designers lack the designing routine.</p> |                                                |
| <b>Keywords:</b> Eurocodes, Eurocode 6, EC6, masonry structures, brick                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                |

## SISÄLLYS

### ALKULAUSE

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

|          |                                                |           |
|----------|------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>JOHDANTO</b>                                | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>MUURATUT RAKENTEET</b>                      | <b>2</b>  |
| 2.1      | Muurattujen rakenteiden historiaa              | 3         |
| 2.2      | Tutkittavat materiaalit ja niiden ominaisuudet | 6         |
| 2.2.1    | <i>Poltettu savitiili</i>                      | 7         |
| 2.2.2    | <i>Kalkkiahiekkatiili</i>                      | 8         |
| 2.2.3    | <i>KevytSORABETONIHARKKO</i>                   | 9         |
| 2.3      | Muita muurattavia materiaaleja                 | 10        |
| 2.3.1    | <i>Siporex-harkko</i>                          | 10        |
| 2.3.2    | <i>Betoniharkko</i>                            | 11        |
| 2.3.3    | <i>Valuharkko</i>                              | 11        |
| 2.4      | Lämpöliikkeet muuratuissa rakenteissa          | 12        |
| <b>3</b> | <b>TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄT NORMIT</b>        | <b>13</b> |
| 3.1      | RakMK:n osa B5: Kevytbetoniharkkorakenteet     | 13        |
| 3.2      | RakMK:n osa B8: Tiilirakenteet                 | 14        |
| 3.3      | Eurokoodi 6                                    | 14        |
| <b>4</b> | <b>TUTKITTAVAT RAKENTEET</b>                   | <b>16</b> |
| 4.1      | Muurattu palkki                                | 16        |
| 4.1.1    | <i>Tavallinen palkki</i>                       | 17        |
| 4.1.2    | <i>Seinämainen palkki</i>                      | 17        |
| 4.2      | Muurattu seinä                                 | 17        |
| 4.2.1    | <i>Kantava väliseinä</i>                       | 17        |
| 4.2.2    | <i>Julkisivu</i>                               | 18        |
| 4.3      | Muurattu maanpaineseinä                        | 18        |
| <b>5</b> | <b>TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄT KUORMAT</b>       | <b>18</b> |
| 5.1      | Kuormat                                        | 18        |
| 5.1.1    | <i>Pysyvät kuormat</i>                         | 19        |
| 5.1.2    | <i>Hyötykuormat</i>                            | 19        |
| 5.1.3    | <i>Luonnonkuormat</i>                          | 19        |
| 5.2      | Kuormitustapaukset                             | 20        |

|           |                                            |           |
|-----------|--------------------------------------------|-----------|
| <b>6</b>  | <b>RAKENTEESSA VAIKUTTAVAT JÄNNITYKSET</b> | <b>20</b> |
| 6.1       | Taivutusmomentti                           | 20        |
| 6.2       | Normaalivoima                              | 20        |
| 6.3       | Leikkausvoima                              | 21        |
| <b>7</b>  | <b>TUTKITTAVAT RAJATILAT</b>               | <b>21</b> |
| 7.1       | Murtorajatila                              | 21        |
| 7.2       | Käyttörajatila                             | 22        |
| <b>8</b>  | <b>LASKELMAT</b>                           | <b>22</b> |
| 8.1       | Palkki                                     | 23        |
| 8.2       | Seinämäinen palkki                         | 26        |
| 8.3       | Kantava seinä                              | 29        |
| 8.4       | Julkisivu                                  | 33        |
| 8.5       | Maanpaineseinä                             | 36        |
| <b>9</b>  | <b>TULOKSET JA ANALYYSI</b>                | <b>41</b> |
| 9.1       | Palkki                                     | 41        |
| 9.2       | Seinä                                      | 42        |
| 9.3       | Maanpaineseinä                             | 43        |
| 9.4       | Liikuntasaumot                             | 44        |
| 9.5       | Johtopäätökset                             | 44        |
| <b>10</b> | <b>YHTEENVETO</b>                          | <b>45</b> |
|           | <b>VIITELUETTELO</b>                       | <b>50</b> |
|           | <b>LÄHDELUETTELO</b>                       | <b>51</b> |
|           | <b>LIITELUETTELO</b>                       | <b>52</b> |

## 1 JOHDANTO

Työ tehtiin osana laajempaa eurokoodien mukaisen mitoittamisen tutkimusta. Tutkimuksen tarkoitus on saada käyttöön mahdollisimman laaja-alaista eurokoodiosaamista ennen normien lopullista käyttöönottoa ja sen jokainen osa käsittelee tiettyä rakennesuunnittelun osa-aluetta, yleensä yhden eurokoodin osan. Tämä insinööriyönä tehty tutkimus käsittelee muurattujen rakenteiden mitoittamista eurokoodien seitsemännen osan, eurokoodi 6:n mukaan. Tutkimuksen muut osat on tehty diplomitöinä Tampereen teknilliseen yliopistoon. Tutkimukseen kuuluu myös mahdollisuus opettaa tutkimuksen keskeiset asiat alalla toimivien yritysten henkilökunnille.

Euroopan talousalueella, Liechtensteinia lukuun ottamatta, sekä Sveitsissä otetaan maaliskuussa 2010 käyttöön koko alueen yhtenäiset rakennemitoitusnormit. Yhtenäisen normiston tarkoituksena on helpottaa suunnittelutoimistojen kansainvälistymistä sekä tarjouskilpailua Euroopan sisämarkkinoilla. eurokoodien käyttöönotto aiheuttaa kilpailutilanteen muuttumisen lisäksi haasteita suunnittelijoiden ammattitaidon säilymisessä myös uudessa mitoitussympäristössä ennen vanhoista, kansallisista normeista luopumista. Lisäksi tuttuihin, tietokoneella käytettäviin mitoitusohjelmistoihin täytyy tehdä muutoksia tai niiden tilalle löytää vastaavat, eurokoodien mukaiset ohjelmistot. Siksi kaikkiin osiin täytyy tutustua huolellisesti ja tehdä ajan kanssa vertailua vanhojen ja uusien normien välillä.

Insinööriyön tavoitteena on selvittää olennaisimmat erot Suomen rakentamismääräyskokoelman ja eurokoodien mukaisten mitoitusapojen välillä ja pohtia näiden erojen syitä. Lähtöoletuksena on, että eurokoodin mukaan mitoittaessa saadaan aikaan rakenteesta kuin rakenteesta tarkempia laskelmia ja täten voidaan käyttää pienempiä rakenteita, mikä johtaa vähempään rakennusmateriaalimenekkiin ja pienempiin kustannuksiin. Laskentavaihe eurokoodien mukaan mitoittaessa oletetaan pidemmäksi ja monimutkaisemmaksi kuin Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan laskettaessa.

Tutkimuksessa tarkastellaan tyypillisiä muurattuja perusrakenteita, joiksi valittiin palkki, seinämäinen palkki, kantava seinä, taivutettu seinä ja maanpainesinä. Kantavaksi seinäksi valittiin vain puristuskuormitettu väliseinä ja taivutetuksi ainoastaan tuulikuormalle altistettu julkisivukuori. Lisäksi tutki-

muksessa perehdyttiin liikuntasaumojen sijoitteluun annettuihin ohjeisiin eri normien mukaan. Tutkimuksen rakenteiden materiaaleiksi valittiin lisäksi kolme perusmateriaalia, joista muurataan suurin osa Suomen vuosittaisista muuratuista rakenteista. Nämä materiaalit ovat poltettu savitiili, kalkkietikka-tiili ja kevytsorabetoniharkko.

Tämän insinööritoiminnan tarkoitus on kerätä yhteen olennainen rakenteiden perusmitoitukseen liittyvä tieto niin Suomen rakentamismääräyskokoelman kuin eurokoodienkin vaatimuksien mukaan. Sen on tarkoitus toimia myös myöhemmin toteutettavan opetusmateriaalin pohjana ja mahdollisten tietokoneohjelmien ohjelmoinnin tukena.

## 2 MUURATUT RAKENTEET

Rakenteiden valmistaminen muuraamalla on erittäin vanha rakennusmuoto, joka on säilynyt perusominaisuuksiltaan samanlaisena näihin päiviin asti. Ajan myötä materiaaleja ja muuraustapoja on tietenkin kehitetty yhä enemmän, mutta rakenteen perusolemus on edelleen sama kuin se oli tuhansia vuosia sitten. Muurattu rakenne syntyy, kun samankaltaisia, käsin siirrettäviä kappaleita yhdistetään toisiinsa kovettuvalla sideaineella. Muuratun rakenteen ominaisuuksiin kuuluu hyvä puristuslujuus, mutta vetoa se kestää huonosti. [1, s. 76.]

Olennainen osa muurattuja rakenteita ovat myös erilaiset limitykset. Pääasiassa limitykset antavat arkkitehtonista vaihtelua tiilimuurin ulkonäköön, mutta niillä on vaikutusta myös rakenteen kantavuuteen. Tavallisin limitys on nykyään  $\frac{1}{2}$  kiven juoksulimitys, jossa jokaisen kerroksen sauma osuu edellisen kerroksen tiilen keskelle. Tällainen rakenne kantaa kuormaa parhaiten. Limityksestä on myös erilaisia versioita, kuten  $\frac{1}{3}$  kiven juoksulimitys sekä votsilimitys eli tiilten sijoittaminen täysin päällekkäin. Nämä kestävät kuormaa huonommin, eikä votsi käytännössä kannan ollenkaan kuormaa. Siksi sitä nähdään käytännössä vain julkisivuissa. Vanhemmissa rakennuksissa yleinen limitystyyppi on vuorolimitys, jossa joka toinen kerros on ladottu pitkittäin, joka toinen poikittain. Tästäkin on erilaisia muunnelmia, jotka muodostavat erilaisia kuvioita muuriin, kuten ristilimitys, goottilainen limitys ja munkkilimitys. [1, s. 88.]

Eurokoodien myötä muurattuihin rakenteisiin tulee yksi mitoitus tekijä lisää: aukkoryhmät. Ryhmiä on neljä ja muurauskappaleet luokitellaan niihin niissä olevien reikien perusteella. Kullekin aukkoryhmälle on annettu SFS-EN 1996-1-1:n taulukossa 3.1 raja-arvot tiilen aukkojen tilavuudelle kokonaistilavuudesta ja seinämien ja kannasten paksuuksille. Näin reikätiiltä alhaisempi lujuus tulee otettua huomioon mitoituksessa automaattisesti.

## 2.1 Muurattujen rakenteiden historiaa

Yksi vanhimmista muuratuissa rakenteissa käytetyistä materiaaleista on luonnonkivi. Sen käyttö on aloitettu maailmalla jo ennen ajanlaskumme alkua. Suurimpia luonnonkivirakentamisen taidonnäytteitä ovat esimerkiksi Kiinan muuri, Egyptin pyramidit ja Keski-Amerikan intiaanien kivikaupungit, jota on esitetty kuvassa 1. [1 s. 45.]



Kuva 1. Yksityiskohta eräästä Chichen Itzassa, Meksikossa sijaitsevasta rakennuksesta. [2.]

Suomessa luonnonkivimuurausta on käytetty aina viime vuosituhannen alkupuolelta lähtien, jolloin sitä käytettiin lähinnä harmaakivikirkkojen ja linnojen rakennuksessa. Vähitellen 1700-luvulle tultaessa luonnonkiven aseman tärkeimpänä rakennusmateriaalina syrjäytti tiili, jonka valmistus oli tullut helpommaksi ja halvemmaksi teollisen toiminnan myötä. Aiemmin tiiltä oli valmistettu käsityönä, mikä teki siitä hyvin kalliin materiaalin. Siksi sitä käytettiin aluksi vain koristeena ja aukkojen muotoilussa, kuten kuvassa 2. Tällöinkin sitä valmistettiin pääasiassa paikallisesti työmaan oheen perustetuissa tiilipajoissa. Toisin kuin luonnonkiveä, tiiltä ei siis ollut kaikkialla saatavilla, mikä osaltaan ehkäisi tiilen laaja-alaista käyttöä. [1, s. 76.]



*Kuva 2. Olavinlinnan seinä- ja holvimuurausta 1500-luvulta. [3.]*

Maailmanlaajuisesti tiiltä on käytetty jo tuhansien vuosien ajan, esimerkiksi muinaisen Egyptin ja antiikin Rooman rakennukset muurattiin usein tiilestä. Muuraustaito levisi Italiasta ensin Keski-Eurooppaan ja sieltä pohjoisemmaksi. Samalla levisi tiilen nykyinen, roomalaisten käyttämä tiiltä korkeampi muoto. Keskiajalla muuraustaidon ylläpitäjinä toimivat katoliset munkit, myöhemmin työn suorituksesta vastasivat maallikkojen ammattikunnat, muurari-killat. Näistä killoista on myöhemmin saanut alkunsa nykyaikainen vapaa-muurariliike. [1, s. 76.]

Tiiliarkkitehtuurin huippu saavutettiin maailmanlaajuisesti 1100-luvulla, kun goottilainen rakennustyyli tuli muotiin. Muun muassa suippokaaria suosinut rakennustapa kehitti muuraustavat sellaiselle tasolle, ettei niitä vielääkään ole pystytty ylittämään. Gotiikassa kantavina rakenteina toimivat usein rakennuksen ulkopuolella olevat ohuet pilarit ja ruoteet, jolloin seinät vapautuivat arkkitehtuurin käyttöön. Tämä näkyi esimerkiksi entistä suurempia ikkunoita ja lasimalauksina. [1, s. 76.]

Suomessa tiilirakentamista on tavattu 1200-luvulta lähtien. Turun tuomiokirkko ja Hattulan kirkko edustavat Suomessa keskiaikaisia tiilikirkkoja ja Hämeen linna on suurilta osin muurattu tiilestä 1300-luvulla. Luonnonkivirakentamisen osalta 1700-luvulla koko Euroopan suurin rakennushanke, Viaporin linnoitus, tehtiin muurattuna rakenteena pääasiassa graniitista. 1776

annettiin Suomessa määräys, jonka mukaan kaikki julkisin varoin toteutettavat rakennushankkeet tulee rakentaa kivistä puun säästämiseksi, mikä lisäsi muurattujen rakenteiden käyttöä entisestään. [1, s. 46, 76.]

1800-luvulla vaikuttanut kansallisromanttinen tyyli vaikutti myös arkkitehtuuriin, ja luonnonkivirakentaminen oli jälleen arvossaan. Harmaasta graniitista tuli lähestulkoon suomalaisuuden symboli. Etenkin skotlantilainen rubble-limitys, kuten kuvassa 3, nautti suurta suosiota. Samaan aikaan tiilirakentaminen yleistyi rautateiden rakentamisen mahdollistettua tiilen kuljetamisen tehtailta ympäri Suomea. [1, s. 46, 76.]



*Kuva 3. Tampereen tuomiokirkon, valmistunut 1907, julkisivu on rubble-muurattua graniittia.*

Muurattu rakenne, etenkin tiilimuuraus, säilyi Suomessa pääasiallisena kantavana rakenteena 1960-luvulle asti, jolloin betonielementtien ilmestyminen markkinoille syrjäytti tiilen nopeasti. Sen jälkeen tiiltä on käytetty lähinnä väliseinä- ja julkisivumateriaalina.

1900-luvulla markkinoille on tullut myös muita muurattuja materiaaleja. Kalkkihiekkatiili kehitettiin 1890-luvulla, ja sen teollinen valmistus alkoi Suomessa 1908. Kevytbetonin kehitystyö alkoi 1920-luvulla.

## 2.2 Tutkittavat materiaalit ja niiden ominaisuudet

Tämän tutkimuksen laskelmissa käytetyt materiaalit ovat savitiili, kalkkihiekkatiili ja kevytsorabetoni. Suurin osa Suomessa muuratuista rakenteista tehdään käyttäen jotain näistä kolmesta materiaalista. Kaikki tutkimuksessa esitellyt materiaalit ovat palamattomia. Laskelmien rakenteet on kaikki oletettu muuratuksi M5-lujuusluokkaisella muurauslaastilla, paitsi maanpaineseinä M7,5-lujuusluokkaisella muurauslaastilla. Raudoituksena laskelmissa on käytetty A500HW-luokan terästä.

Kaikkien materiaalien tässä luvussa esitellyt ominaisuudet ovat nähtävissä materiaalivalmistajien CE-merkinnöistä, kuten kuvassa 4 näytetään. Eurokoodin käyttöönotto pakottaa materiaalivalmistajat tyyppihyväksyttämään tuotteensa, palkkioksi tästä he saavat CE-merkinnän. Merkinnästä käy ilmi useita mitoituksessa tarvittavia lähtötietoja, kuten normalisoitu puristuslujuus tai aukkoryhmä muurauskappaleilla ja lämmönvastus eristysmateriaaleilla.

|                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <br>01234                                                                                                                                                                 |                                      |
| AnyCo Ltd<br>07<br>01234-CPD-00234                                                                                                                                                                                                                          |                                      |
| EN 771-1+A1:2005                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |
| <b>HD-tiili, Katgoria I</b><br>NT-umpitiili (pituus 270 mm, leveys 130 mm, korkeus 75 mm)                                                                                                                                                                   |                                      |
| <b>Sallitut mittapoikkeamat:</b><br>mittapoikkeamaluokka<br>(pituus $\pm 7$ mm, leveys $\pm 5$ mm, korkeus $\pm 3$ mm)<br>hajontaluokka<br>(pituus $\pm 10$ mm, leveys $\pm 7$ mm, korkeus $\pm 5$ mm)<br>lappeiden tasaisuus<br>lappeiden yhdensuuntaisuus | T1<br>R1<br>NPD<br>NPD               |
| <b>Kappaleen muoto:</b>                                                                                                                                                                                                                                     | Aukkoryhmä 1                         |
| <b>Puristuslujuus:</b> <sup>1)</sup><br>kappaleen puristuslujuuden keskiarvo $f_{m,0} = 25$ N/mm <sup>2</sup> /NPD (Lape/pää)<br>normalisoitu puristuslujuus (keskiarvo) $f_b = 20$ N/mm <sup>2</sup> /NPD (Lape/pää)                                       |                                      |
| <b>Mittojen pysyvyys, kosteusmuodonmuutos:</b>                                                                                                                                                                                                              | NPD                                  |
| <b>Tartuntalujuus:</b><br>laastilla M 100/800 testattu ominaisarvo $f_{td,0} = 0,16$ N/mm <sup>2</sup>                                                                                                                                                      |                                      |
| <b>Liukoinen suolamäärä:</b>                                                                                                                                                                                                                                | NPD                                  |
| <b>Palokäyttäytyminen:</b>                                                                                                                                                                                                                                  | Euroluokka A1                        |
| <b>Vedenimukyky:</b> <sup>2)</sup>                                                                                                                                                                                                                          | Yläraja 17 %                         |
| <b>Vesihöyryn läpäisevyyden diffuusiokerroin <math>\mu</math>:</b><br>raja-arvot taulukosta                                                                                                                                                                 | 5/10                                 |
| <b>Ilmaääneneristävyyys:</b><br>bruttokuiva tiheys (keskiarvo)<br>kappaleen muoto                                                                                                                                                                           | 1360 kg/m <sup>3</sup><br>umpinainen |
| <b>Ekvivalentti lämmönjohtavuus:</b><br>$\lambda_{10,dy}$ keskiarvo taulukosta                                                                                                                                                                              | 0,3 W/mK                             |
| <b>Jäädytys-sulatuskestävyys:</b> SFS-käsikirjan osan III jäädytys-sulatustesti läpäisty                                                                                                                                                                    |                                      |
| <b>Vaaralliset aineet:</b>                                                                                                                                                                                                                                  | ks. alla oleva huomautus             |

Kuva 4. Esimerkki CE-merkinnästä [4.]

CE-merkintä oikeuttaa tuotteen markkinointiin koko EU:n alueella ja se takaa tuotteen olevan yleiseurooppalaisen laadun ja merkintätapojen mukainen. Näin se omalta osaltaan auttaa EU:n yhtenäisten sisämarkkinoiden synnys-  
sä.

### 2.2.1 *Poltettu savitiili*

Poltettu savi- eli punatiili syntyy, kun savesta muotoiltua kappaletta poltetaan n. 1000 °C:ssa. Tällöin savi sintraantuu ja muuttuu punaiseksi, kuten kuvasta 5 nähdään. Sintraus tarkoittaa raaka-aineiden yhdistämistä siten, etteivät rakeet pääse sulautumaan tiiviiksi massaksi. Näin alun perin jauhomaisen aineen hiukkasten suurentuessa aineeseen jää huokosia. Näiden huokosten lukumäärää lisätään sekoittamalla saveen sahanpurua, joka polttovaiheessa palaa jättäen rakenteeseen enemmän ilman täyttämiä huokosia. Näin parannetaan savitiilen pakkasenkestävyyttä. Samalla periaatteella tehdään myös kevytsorabetonissa runkoaineena käytettävä kevytsora. [1, s. 77.]



*Kuva 5. Vuorolimitetty savitiiliseinä*

Savitiilen valmistus alkaa saven muottiinpuristuksella. Menetelmiä on kaksi: kanki- ja kuivapuristus. Kankipuristuksessa puristimen suutin määrää kappaleen muodot ja reiät, kun kuivapuristuksessa tiilet puristetaan kovalla paineella kohtuullisen kuivasta massasta. Suurin osa Suomessa tehdyistä tiilisistä valmistetaan kankipuristamalla. Puristusvaiheen jälkeen tiili ensin kuivataan ja sitten poltetaan muutaman päivän ajan. [1, s. 78.]

Tiilen ominaisuuksiin vaikuttaa erityisen suuresti sen polttoaika: pidemmässä poltossa tiili kutistuu ja tiivistyy enemmän kuin nopeammassa kuumennuksessa ja näin sen lujuus myös kasvaa. Tiili kestää hyvin puristusta mutta huonosti vetoa tai taivutusta. Ilmaääneneristävyys savitiilellä on hyvä sen suuresta tiheydestä johtuen. Poltettu tiili kestää lämpöä hyvin, joten sitä käytetäänkin yleensä tulisijojen ja hormien muurauksessa. [1, s. 82.]

Tutkimuksen laskelmissa on käytetty Wienerberger Oy:n lujuusluokan 25 normaalireikätiiltä (NRT). Sen puristuslujuuden keskiarvo ( $f_{um}$ ) on  $25 \text{ N/mm}^2$ , normalisoitu puristuslujuus ( $f_b$ )  $20 \text{ N/mm}^2$  ja tartuntalujuus ( $f_{vk0}$ )  $0,17 \text{ N/mm}^2$ . Tutkimuksen rakenteessa on käytetty 15 mm saumavahvuutta.

### 2.2.2 Kalkkiehkekatiili

Kalkkiehkekatiili ei ole varsinaisesti tiili, koska sitä ei ole poltettu. Se tehdään kvartsipitoisesta hiekasta, poltetusta kalkista ja vedestä, jotka sekoitetaan ja puristetaan korkean paineen avulla tiiliraakileeksi. Sen jälkeen kivet karkaistaan kuumassa höyryssä paineella. Tällöin kalkki reagoi hiekan kvartsin ja piihapon kanssa kidemäiseksi kalsiumhydroksidiksi, joka kiinnittää hiekkaraakeet toisiinsa. Näin kalkkiehkekatiili saa lopullisen lujuutensa. [1, s. 98.]

Kalkkiehkekatiiltä käytetään erityisesti väliseinärakenteissa, koska huolimatta julkisivutiilen kohtalaisesta pakkasenkestävyydestä on tiili herkkä vaurioitumaan kosteuden ja pakkasen yhteysvaikutuksesta, kuten kuvasta 6 jo on havaittavissa. Kalkkiehkekatiilin lujuus on kohtalaisen hyvä ja sillä on hyvä ilmaääneneristämiskyky. [1, s. 100.]



Kuva 6. Kalkkiehkekatiiliiseinä 1/2-kiven juoksulimityksellä

Kalkkihiekkatiilen valmistus Suomessa alkoi 1897 Viipurissa, jossa tiilen valmistus tapahtui käsityönä. Tämä tuotti laadullisesti hyvin vaihtelevaa tiiltä, joten ensimmäiseen maailmansotaan mennessä oli kalkkihiekkatiilen valmistus Suomessa loppunut. Varsinainen teollinen valmistus alkoi 1908 Tvärminnessä Hangossa. Nykyään Suomessa toimii kolme kalkkihiekkatiilitehdasta. [1, s. 98.]

Laskelmissa käytetty kalkkihiekkatiili on Maxit oy:n väliseinätiili, ulkomitoiltaan 130 mm x 270 mm x 75 mm, jonka puristuslujuus on 20 N/mm<sup>2</sup>. Myös sen normalisoitu puristuslujuus on 20 N/mm<sup>2</sup>. Tutkimuksen rakenteessa on käytetty 15 mm:n korkuista saumaa.

### 2.2.3 Kevytsorabetoniharkko

Tutkimuksessa käytetty kevytsorabetoniharkko on Maxit Oy:n Leca-harkko. Kevytsorabetonia käytetään kantavissa ja lämmöneristävissä rakenteissa, Suomessa useimmiten maanpaineeseinissä, kuten kuvassa 7. Koska betonin runkoaineena käytetään ilmatäytteistä kevytsoraa, toimii kevytsorabetoniharkko hyvin sellaisenaan myös lämmöneristeenä. Muut ainesosat ovat sementti ja vesi, kuten tavallisessakin betonissa. Lisäksi kevytsorabetoniin saatetaan lisätä luonnonkiviainesta. Betonin tiivyydestä riippuen runkoaine täyttyy sementtiliimalla, joten kevytsorabetonin tiivistyessä lämmöneristämiskyky kärsii. [1, s. 118-120.]



Kuva 7. 1/3-kiven juoksulimitetty kevytsorabetoniharkkomuuri

Kevytsorabetonin tärkeimpiä ominaisuuksia betoniin verrattuna ovat keveys, hyvä lujuus ja lämmöneristävyys. Lisäksi kevytsorabetoni kestää hyvin pak-

kasta. Laskelmissa on käytetty reikäuraharkko (RUH) 200:a. Sen puristuslujuus on  $3,0 \text{ N/mm}^2$  ja normalisoitu puristuslujuus  $3,5 \text{ N/mm}^2$ .

## 2.3 Muita muurattavia materiaaleja

Tässä luvussa käsitellään erikoisempia, joskin laajalti Suomessa käytettäviä muurattavia materiaaleja. Eurokoodi 6 sisältää ohjeet myös näiden materiaalien mitoitusohjeeseen, joten tämän tutkimuksen laskelmamallit ovat sovellettavissa luvussa 2.2 käsiteltyjen materiaalien lisäksi myös seuraaviin materiaaleihin.

### 2.3.1 Siporex-harkko

Siporex-harkko on H+H Finland Oy:n höyrykarkaistun kevytsorabetoniharkon kauppanimi. Sen valmistusmenetelmä on kehitetty Suomessa 1930-luvulla ja sen teollinen valmistus alkoi vuonna 1935. Siporex-harkkoja käytetään ulko- ja väliseinärakenteissa, ja ne muurataan ohutsaumamuurauksena, niin kuin kuvassa 8. Ominaisuuksiltaan Siporex-harkko on erittäin samanlainen kuin kevytsorabetoniharkko, mutta mittatarkkuudeltaan se on tarkempi. [5.]



Kuva 8. Siporex-harkoista ohutsaumamuurattu seinä

Diplomi-insinööri Timo Tikanojan tekemällä, luvussa 10 esitellyllä mitoitusohjelmalla on mahdollista laskea tutkimuksessa käytettyjen materiaalien lisäksi myös karkaistuja kevytsorabetoniharkkoja.

### 2.3.2 Betoniharkko

Betoniharkkoja valmistetaan valamalla betonista halutun muotoisia kappaleita, joista voidaan tehdä rakenteita joko muuraamalla tai latomalla. Betoniharkkojen edeltäjien, sementtitiilien, teollinen valmistus alkoi Yhdysvalloissa 1890-luvulla ja 1940-luvulle tultaessa betonitiilet olivat jo yleisesti käytössä. Maaseudulla valmistettiin betonitiiliä itse savitiilen tavoin jo 1910-luvulla. Nykyaikaisia betoniharkkoja alettiin valmistaa 1950-luvulla. [1, s. 165.]

Käytännössä muurattava betoniharkko toimii kuten mikä tahansa muukin harkko raudoitusurineen ja putkitusonkaloineen. Harkko on tarkoitettu muurattavaksi 10 mm korkuisin saumoin. Betoniharkkoja saa myös erillisinä pilariharkkoina. Betoniharkkojen hyviin puoliin kuuluu niiden muita muurauskappaleita suurempi lujuus. [6.]

### 2.3.3 Valuharkko

Valuharkkoja valmistaa Suomessa esimerkiksi Lammin Betoni Oy, joka toi oman väliseinäharkkonsa ensimmäisenä suomalaisille markkinoille. Harkkojen valmistuksessa käytetään kevytsorabetonia ja muuraukseen käytetään ohutsaumamuurausta kuten kuvassa 9. Kantavia rakenteita tehtäessä harkkojen ontelot raudoitetaan ja valetaan täyteen betonia, jolloin ohutsaumamuurausta ei tarvita. [7.]



Kuva 9. Valuharkkoilla muurattu seinä

Valuharkkoja voidaan mitoittaa myös betonirakenteina, jolloin kantavaksi rakenteeksi lasketaan vain harkon valettava sisus.

## 2.4 Lämpöliikkeet muuratuissa rakenteissa

Muurattujen rakenteiden lämpöliikkeet ovat Suomessa kohtalaisen suuria merkittävien vuotuisten lämpötilaerojen takia varsinkin savitiiltä käytettäessä. Siksi ne on otettava aina huomioon suunnitteluvaiheessa. Muita muuria raskaita ilmiöitä ovat kosteudenvaihtelu, erilaiset painumat ja virumat sekä kuormien aiheuttamat jännitykset. Näistä johtuvaa muurin halkeilua, taipumista tai vääristymistä ehkäistään joko raudoittamalla tai käyttämällä liikuntasauvoja. [8, s.16.] Erilaiset muodonmuutokset ovat olennainen osa materiaalin fyysisiä ominaisuuksia eikä niitä siten voi välttää, joten rakennesuunnittelijan työnä on varmistaa muodonmuutosten hallittavuus. Tässä tutkimuksessa on keskitytty liikuntasauvojen käyttöön muodonmuutoksien hallitsemisessa.



Kuva 10. Liikuntasauvojen sijoitus luonnonkivimuurissa.

Liikuntasauvojen suunnittelussa tulee ottaa huomioon seuraavat seikat:

- liikuntasauvojen sijainti rakenteen luonnollisissa epäjatkuvuuskohdissa
- rakenteessa käytetyt materiaalit ja niiden lämpö- ja kosteusliikeominaisuudet sekä veto- ja leikkausominaisuudet
- rakenteen geometria aukotuksineen ja liitoksineen
- muurauskappaleiden ja sauman mitat
- tiilen limitys
- pitkä- ja lyhytaikaisen kuorman vaikutus rakenteeseen
- lämpö- ja ilmasto-olosuhteiden vaikutus rakenteeseen

- palonkestävyys
- lämpö- ja äänieristävyys
- mahdollinen rauditus
- vedenkestävyys ulkorakenteissa. [8, s.16, 9, s.88.]

Tässä tutkimuksessa keskitytään kolme metriä korkean, M5-lujuusluokan muurauslaastilla muuratun seinän liikuntasaumavälien suosituksiin.

*Taulukko 1. Kolme metriä korkean seinän liikuntasaumavälit eri normeilla [8, 10, 11, 12.]*

|                         | EC6  | EC6, Kansallinen liite | RakMK   |
|-------------------------|------|------------------------|---------|
| Poltettu savitiili      | 12 m | 15 m                   | 15 m    |
| Kalkkiehkeätiili        | 8 m  | 10 m                   | 10 m    |
| Kevytsementtinen betoni | 6 m  | 6 m                    | 10-20 m |

Taulukkoon 1 on koottu sekä eurokoodin, sen suomalaisen kansallisen liitteen että Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaiset säännökset. Arvot koskevat ainoastaan kylmiä ulkoseinärakenteita, kuten kuvassa 10. Kolme metriä matalammilla seinillä arvoja tulee pienentää, korkeammilla vastaavasti suurentaa.

### 3 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄT NORMIT

Tässä tutkimuksessa käytetyt normit ovat eurokoodi-standardiston (EC) osa 6 (SFS-EN 1996) ja Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) osat B5: Kevytbetoniharkkorakenteet ja B8: Tiilirakenteet. RakMK:n normien käyttö tullaan lopettamaan maaliskuussa 2010.

#### 3.1 RakMK:n osa B5: Kevytbetoniharkkorakenteet

Ohjeet kevytbetoniharkkorakenteiden suunnitteluun ja valmistukseen löytyvät Suomen rakentamismääräyskokoelman osasta B5. Siinä kevytbetoniharkkorakenteella tarkoitetaan tiheydeltään enintään 1000 kg/m<sup>3</sup> olevista kevytbetoniharkkoista muurauslaastilla muurattuja rakenteita. Osa on päivitetty viimeksi 25.5.2007 ja se sisältää seuraavat luvut:

- 1 Yleisohjeet
- 2 Muuraustarvikkeet
- 3 Rakenteiden suunnittelu
- 4 Rakenteiden valmistus
- 5 Laadunvalvonta
- 6 Rakenteiden kelpoisuus
- 7 Muurin lujuusominaisuuksien kokeellinen määrittäminen
- 8 Palotekninen mitoitus

Tässä tutkimuksessa on käytetty luvun 3 sisältämiä ohjeita.

### **3.2 RakMK:n osa B8: Tiilirakenteet**

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan B8 viimeisin versio on tullut voimaan 25.5.2007. Osa sisältää ohjeet tiilirakenteiden suunnitteluun ja valmistukseen. Osan ohjeet soveltuvat poltetuista tiilistä ja kalkkiehkektiilistä sekä -harkoista muurauslaastilla muurattuihin rakenteiden suunnitteluun ja valmistamiseen. Se jakautuu seuraaviin lukuihin:

- 1 Yleisohjeet
- 2 Muuraustarvikkeet
- 3 Rakenteiden suunnittelu
- 4 Rakenteiden valmistus
- 5 Laadunvalvonta
- 6 Rakenteiden kelpoisuus
- 7 Muurin lujuusominaisuuksien kokeellinen määrittäminen
- 8 Palotekninen mitoitus

Tässä tutkimuksessa on keskitytty lähinnä luvun 3 sisältämiin asioihin.

### **3.3 Eurokoodi 6**

Eurokoodi 6 on osa laajempaa, euroopanlaajuista eurokoodistandardistoa. Standardiston tarkoitus on luoda koko Euroopassa käytettävä, yhteneväinen rakennesuunnittelun säännöstö. Näin helpotetaan kansainvälistä kilpailua ja innovaatioiden käyttöönottoa. Eurokoodit tulevat voimaan kaikissa EU-maissa sekä Islannissa, Norjassa ja Sveitsissä.

Eurokoodien historia alkaa vuodesta 1975, jolloin päätettiin ensimmäisen kerran eurooppalaisten rakennesuunnittelunormien yhtenäistämisestä. En-

simmäisen sukupolven eurokoodit valmistuivat Euroopan yhteisön jäsenmaita edustavan komitean julkaisemana jo 1980-luvulla. Tarkoituksena oli alusta alkaen saada aikaan normisto, joka lopulta korvaisi kirjavat kansalliset käytännöt.

Vuonna 1989 eurokoodien määrittäminen siirrettiin eurooppalaisen standardoimisjärjestön CENin alaisuuteen. Tarkoituksena oli yhdistää rakennesuunnittelun säännöt muihin rakennusalan standardeihin, kuten rakennustuotemerkintöihin ja antaa normistolle eurooppalaisen EN-standardin asema. CENin määräysvalta ei kuitenkaan ole täydellinen, vaan jokaisessa eurokoodin osassa on luettelo kohdista, joissa jokainen valtio saa määrittää itse kansallisesti käytettävät parametrit. Nämä parametrit on koottu eurokoodin osien mukaisesti kansallisiksi liitteiksi, joihin suunnittelijan tulee tutustua ennen rakenteiden suunnittelemista. CEN julkaisi osia eurokoodeista esistandardeina (ENV) vuosina 1992-1998 ja ympäristöministeriö julkaisi niille kansallisia soveltamisasiakirjoja ennen varsinaisten standardien (EN) kehittämistä vuodesta 1998 alkaen.

Eurokoodit koostuvat tällä hetkellä 10 osasta:

- 0 suunnitteluperusteet (SFS-EN 1990)
- 1 rakenteiden kuormat (SFS-EN 1991)
- 2 betonirakenteiden suunnittelu (SFS-EN 1992)
- 3 teräsrakenteiden suunnittelu (SFS-EN 1993)
- 4 liittorakenteiden suunnittelu (SFS-EN 1994)
- 5 puurakenteiden suunnittelu (SFS-EN 1995)
- 6 muurattujen rakenteiden suunnittelu (SFS-EN 1996)
- 7 geotekninen suunnittelu (SFS-EN 1997)
- 8 maanjäristysmitoitus (SFS-EN 1998)
- 9 alumiinirakenteiden suunnittelu (SFS-EN 1999).

Normistoon suunnitellaan ainakin kahta uutta osaa, jotka tullevat koskemaan lasi- ja FRP- eli kuituvahvisteisten polymeerirakenteiden suunnittelua [13].

Tämä tutkimus käsittelee osaa 6: Muurattujen rakenteiden suunnittelu. Se jakautuu neljään osaan:

- yleiset säännöt (1996-1-1)
- palomitoitus (1996-1-2)

- rakenteiden suunnittelu, materiaalien valinta ja työnsuoritus (1996-2)
- yksinkertaistetut laskentamenetelmät (1996-3).

Tämän tutkimuksen laskelmat on tehty käyttäen osaa 1: yleiset säännöt sekä liikuntasuunnitelmia tutkittaessa osaa 2: rakenteiden suunnittelu, materiaalien valinta ja työnsuoritus.

Eurokoodit käsittelevät kaikkia muurattuja rakenteita sekundäärinä rakenteina muualla Euroopassa esiintyvien rakentamiskäytäntöjen mukaisesti. Suomessakin nämä käytännöt pitävät pääsääntöisesti paikkansa, mutta esimerkiksi maanpaineseinät ovat primäärirakenteita ja Suomessa yleisesti rakennettu muuraamalla. Tällaisten rakenteiden mitoituksissa esiintyy vielä ratkaisemattomia ongelmia, kun suunnittelijan tulee ottaa huomioon asioita, joihin eurokoodi ei anna ohjetta. Tämänkaltaiset ongelmat selviävät pikkuhiljaa normia käytettäessä ja niihin tullaan esittämään ratkaisumalleja suunnitteluohjeiden kehittyessä. Tässä tutkimuksessa on käytetty tämänhetkisiä tietoja ja oletuksia, jotka tulevat tulevaisuudessa tarkentumaan.

Eurokoodien käyttöönotto vaihtelee osittain ja niitä vahvistetaan sitä mukaa, kun standardeja ilmestyy. Kahden normiston rinnakkaiskäytöksen aloitti Suomessa ensimmäisten eurokoodien kansallisten liitteiden vahvistaminen 1.11.2007. Toisen kerran eurokoodeja on otettu käyttöön 15.7.2008. Lopullinen käyttöönotto ja vanhojen normien korvaaminen eurokoodeilla tapahtuu koko Euroopassa maaliskuun 2010 loppuun mennessä. [14.]

## 4 TUTKITTAVAT RAKENTEET

Tutkimuksessa määriteltiin palkin, seinämäisen palkin, kantavan seinän, julkisivun ja maanpaineseinän yksinkertaiset rakennemallit, joiden mukaan rakenteiden kestävyys määritettiin. Kaikki rakenteet ovat yksiaukkoisia. Rakennemallit määritettiin Suomen rakennemääräyksien ja yleisen rakennustavan mukaan. Rakenteiden kuormitukseen käytettävät kuormat on määritetty luvussa 5.

### 4.1 Muurattu palkki

Palkki on pääasiassa päältä kuormitettu, taivutettu rakenneosana. Palkkityyppejä ovat tavallinen palkki ja seinämäinen palkki. Tavallisen palkin toinen pinta on taivutuksesta johtuen veto- ja toinen puristusrasitettu. Palkki raudoi-

tetaan normaalisti alimmasta saumastaan kestävämpään paremmin vetorasitusta. Osa tavallisen palkin raudoituksesta voidaan katkaista palkin keskellä vaikuttamaan vain alueella, johon kohdistuu suurin momentti.

Seinämainen palkki on tavallista palkkia korkeampi ja taivutusmomentti muodostaa sen yläosaan puristuskaaren, jonka alueella palkin puristusrasitukset esiintyvät. Alaosassa esiintyy vetorasituksia, kuten tavallisessakin palkissa. Seinämäisen palkin käyttötarkoitus onkin vähentää tarvittavaa teräsmäärää, kun rakenteen sisäinen momenttivarsi kasvaa. Koska seinämäisen palkin raudoitus toimii kokonaisuudessaan vetotankoina, on muistettava, että kaikkien terästen on kuljettava koko rakenteen läpi. Niitä ei saa siis katkaista vaikuttamaan vain suurimman momentin alueella, kuten tavallisessa palkissa voidaan tehdä.

#### *4.1.1 Tavallinen palkki*

Laskelmissa mitoitettun palkin pituus on 2,5 m, korkeus 795 mm ja leveys 270 mm. Materiaalina on savitiili. Palkkia kuormitetaan hyötykuormalla 2,5 metrin levyisellä kuormitusalueella.

#### *4.1.2 Seinämäinen palkki*

Laskelmissa mitoitettun seinämäinen palkki on muutoin samanlainen kuin tavallinen palkki, mutta sen pituus on 2 m ja korkeus 1155 mm.

### **4.2 Muurattu seinä**

Seinärakenne voi olla kuormitettu joko päältä, sivulta tai molemmista. Seinä mitoitetaan kokonaan puristettuna rakenteena, erotuksena seinämäisestä palkista, joka on taivutettu rakenne. Seinät voivat olla joko kantavia tai ei-kantavia. Muurattu pilari lasketaan samalla periaatteella kuin muurattu seinä, joten erillistä laskelmaa ei tutkimuksessa ole esitetty. Tässä tutkimuksessa on esitetty sekä puristetun väliseinän että ei-kantavan, sivulta kuormitetun seinän laskentamallit.

#### *4.2.1 Kantava väliseinä*

Laskelmissa esitetty kantava seinä on muurattu kalkkiahiekkatiilestä ja sen korkeus on 2 m, leveys 130 mm ja pituus 2,5 m. Kuormituksena on hyötykuormaa 2,5 metrin levyisellä alueella.

#### 4.2.2 Julkisivu

Tutkimuksen julkisivu on savitiilestä muurattu, ei-kantava seinä, jota kuormittaa ainoastaan tuulikuorma. Mitoiltaan se on samanlainen kuin kantava väliseinä.

### 4.3 Muurattu maanpaineseinä

Maanpaineseinä on seinärakenne, jota kuormittaa koko korkeudeltaan maanpainon aiheuttama kuorma. Se on Suomessa tehtävistä kantavista muuratuista rakenteista suosituin. Kuormalle on tyypillistä sen kolmiomaisuus, joka voidaan muuttaa laskelmissa tasaiseksi, kun rakenne on vaakaraudoitettu, kuten tässä tutkimuksessa on tehty. Laskelmissa esitetty maanpaineseinä on muurattu kevytsorabetoniharkoista. Se on 2 m korkea, 200 mm paksu ja 2,7 m pitkä. Sitä kuormittaa hyötykuorma metrin levyisellä vyöhykkeellä.

## 5 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄT KUORMAT

Rakenteiden mitoittamisessa kuormien määrittäminen on yksi olennaisimmista osista rakennesuunnittelijan työtä. Väärin arvioidut kuormat voivat pahimmassa tapauksessa johtaa rakenteiden murtumiseen ja rakennusten hallitsemattomaan sortumiseen. Tämän tutkimuksen kuormat on sovellettu Suomen rakentamismääräyskokoelman ja Suomen Rakennusinsinöörien liiton rakenteiden kuormitusohjeiden sekä eurokoodin toisen osan, eurokoodi 1 antamien ohjeiden mukaisesti. Lähtökuormat ovat osa rakenteiden mitoituksen kokonaisvarmuutta - esimerkiksi kun kuormien mitoituksessa on varmuutta enemmän, voivat rakenteiden materiaalihyvyydet olla laskelmissa lähempänä todellisia arvoja.

### 5.1 Kuormat

Koko laskentaprosessi aina kuormien määrittämisestä alkaen on tehty erikseen kummankin normin käytännön mukaisesti. Tutkimuksen laskelmien ominaiskuormina on käytetty kunkin normiston määrittämiä kuormia. Laskentakuormien määrittämisessä on käytetty kunkin normin omia varmuuskertoimia, joten määrittävät kuormat ja niistä johdettavat voimasuureet ovat eri normien mukaisissa laskelmissa erisuuruisia.

### 5.1.1 Pysyvät kuormat

Laskelmissa käytettävät pysyvät kuormat johtuvat rakenteiden omista painoista. Yleisesti pysyviä kuormia ovat rakenteiden omien painojen lisäksi muut rakenteeseen vaikuttavat muuttumattomat kuormat [15, s. 194]. Eurokoodin mukaisella varmuuskertoimella (1,15) kerrotut arvot ovat palkilla 4,94 kN/m, seinämäisellä palkilla 7,17 kN/m ja kantavalla seinällä 4,37 kN/m. RakMK:n mukaisella varmuuskertoimella (1,2) arvoiksi saadaan palkilla 5,15 kN/m, seinämäisellä palkilla 7,48 kN/m ja kantavalla seinällä 5,93 kN/m. Julkisivun ja maanpaineseinän laskennassa ei omaa painoa tarvitse ottaa huomioon.

### 5.1.2 Hyötykuormat

Hyötykuormiksi lasketaan henkilökuormat, tavarakuormat sekä joukko erilaisia liikkuvia kuormia. Hyötykuormien ominaisuuksiin kuuluu, etteivät ne ole tarkkaan määriteltävissä eivätkä ne kuormita rakennetta kuin rakennusajan jälkeen [15, s. 6-8, 194]. Tutkimuksessa hyötykuormina on käytetty RIL 144-2002:n mukaista oleskelukuorma II:a, 2 kN/m<sup>2</sup> sekä vastaavaa eurokoodin mukaista, luokan C1 hyötykuormaa, 2,5 kN/m<sup>2</sup> [16]. Molemmat ovat muun muassa toimisto- ja luokkatiloihin määriteltäviä kuormia. Maanpaineseinän laskelmissa käytetty, pihalla oleva pintakuorma on 2,5 kN/m<sup>2</sup>. Tämä on sekä eurokoodin luokan F että RIL 144-2002:n mukainen kuorma. Muita hyötykuormia ei laskelmissa ole otettu huomioon. Hyötykuorman varmuuskerroin on eurokoodin mukaan 1,5 ja RakMK:n mukaan 1,6.

### 5.1.3 Luonnonkuormat

Luonnonkuormiin kuuluvat lumi-, tuuli-, vedenpaine-, aalto- ja jääkuormat. Tutkimuksessa käytetty luonnonkuorma on RIL 144-2002:n mukaan määritetty esikaupunkialueen ominaistuulikuorma, 0,46 kN/m<sup>2</sup>, joka on pyöristetty 0,5 kN/m<sup>2</sup>:iin. Tämän pyöristyksen on katsottu olevan riittävän tarkka myös eurokoodin mukaisiin laskelmiin. Muita luonnonkuormia, kuten lumikuormaa, ei tutkimuksessa ole otettu huomioon. Luonnonkuorman varmuuskertoimet ovat samat kuin hyötykuormallakin, eli 1,5 eurokoodilla ja 1,6 Suomen normilla.

## 5.2 Kuormitustapaukset

Tutkimuksessa on kussakin rakenteessa käytetty vain yhtä kuormitustapaus-  
ta, jossa kaikki vaikuttavat kuormat kuormittavat täysimääräisinä. Tämä joh-  
tuu rakenteen yksiaukkoisuudesta sekä siitä, että kutakin rakennetta rasittaa  
pysyvän kuorman lisäksi vain yksi muuttuva kuorma.

## 6 RAKENTEESSA VAIKUTTAVAT JÄNNITYKSET

Rakenteessa vaikuttavat jännitykset syntyvät rakennetta kuormittavista kuor-  
mista. Rakenteen kestävyys perustuu jännitykseen, jota rakenne kestää  
murtumatta. Perustapauksessa rakenteen kestävyys tarkistetaan kolmelle  
murtavalle voimalle: taivutusmomentille, normaalivoimalle ja leikkausvoimal-  
le.

### 6.1 Taivutusmomentti

Taivutusmomentti on rakenteen taivuttamiseen pyrkivää voimaa. Se aiheut-  
taa rakenteen sisällä veto- ja puristusjännityksiä rakenteen eri reunoille. Tai-  
vutusmomenttia esiintyy käytännössä kaikissa rakenteissa, sillä rakennetta  
ei pysty valmistamaan niin mittatarkaksi, että normaalivoima kuormittaisi ra-  
kennetta täysin keskeisesti. Luvussa 5.2 kerrotuista syistä tämän tutkimuk-  
sen rakenteiden ulkoisesta kuormasta johtuvat taivutusmomentit lasketaan  
kaavasta 1:

$$M_d = \frac{p_d \cdot L^2}{8} \quad (1)$$

jossa  $M_d$  on laskentataivutusmomentti,  $p_d$  laskentakuorman suuruus ja  $L$  ra-  
kenteen pituus taivutettavassa suunnassa. Muurattua rakennetta vahviste-  
taan taivutusmomentin aiheuttamaa murtumista vastaan joko raudoittamalla  
tai rakenteen ulkomittoja kasvattamalla.

### 6.2 Normaalivoima

Normaalivoima on rakenteen suuntaista voimaa ja aiheuttaa koko rakentee-  
seen joko veto- tai puristusjännitystä voiman suunnasta riippuen. Normaali-  
voimaa esiintyy mitoittavana voimana yleensä pystyrakenteissa, kuten sei-  
nissä ja pilareissa. Tämän tutkimuksen rakenteiden normaalivoimat on saatu

laskemalla rakenteen suunnassa sitä kuormittavat voimat eli käytännössä pystysuuntaiset kuormat yhteen.

### 6.3 Leikkausvoima

Leikkausvoima on rakennetta vastaan kohtisuoraan vaikuttavaa voimaa, joka pyrkii katkaisemaan rakenteen. Leikkausvoima on taivutusmomentin kanssa toinen palkkirakenteissa esiintyvä, mitoittava voima. Luvussa 5.2 kerrotuista syistä johtuen tämän tutkimuksen rakenteiden leikkausvoimat lasketaan kaavalla 2:

$$V_d = \frac{p_d \cdot L}{2} \quad (2)$$

jossa  $V_d$  on laskentaleikkausvoima,  $p_d$  laskentakuorman suuruus ja  $L$  rakenteen pituus taivutettavassa suunnassa. Muurattujen rakenteiden vahvistaminen leikkausvoimaa vastaan raudoittamalla on hyvin hankalaa ja käytännössä leikkauskestävyyttä lisätään suurentamalla rakenteen ulkomittoja riittäväksi.

## 7 TUTKITTAVAT RAJATILAT

Rakenteita mitoitetaan sekä RakMK:n että eurokoodin mukaan rajatilamenettelyllä. Siinä määritellään rajat, joita rakenne ei saa käyttäytymisellään ylittää. Rajatilamenettely koostuu kahdesta osasta, murto- ja käyttörajatilasta.

### 7.1 Murtorajatila

Murtorajatilassa (MRT) määritellään rakenteiden kestävyydelle raja-arvot. Siihen kuuluvat olennaisena osana erilaiset varmuuskertoimet, joilla suurennetaan kuormien ja pienennetään materiaalivahvuuksien arvoja, jotta suunniteltua suuremmat käyttöaikaiset kuormat eivät rikkoisi rakennetta. Tarkasteluissa osoitetaan, etteivät kuormat aiheuta rakenteen kestävyysyden ylitystä [15, s.192]. Näin saadaan Suomen maankäyttö- ja rakennuslain vaatima riittävä varmuus rakenteiden kestävyydestä.

## 7.2 Käyttörajatila

Käyttörajatilassa (KRT) määritetään rakenteille raja-arvoja, joiden ylittäminen ei heikennä rakenteen fyysistä kestävyyttä tai aiheuta vaaratilanteita, vaan aiheuttaa vain käytettävyyden huononemisen. Käyttörajatilan tarkoitus onkin asettaa rakenteille epäesteettisyyden ja muita suunnittelualoja haittaavuuden marginaaliarvot. Rakenteelle tyypillisiä, usein ajan mukanaantuuomia ominaisuuksia ovat yleensä erilaiset muodonmuutokset, esimerkiksi taipuma, viruma ja halkeilu. Käyttörajatilamenettely ottaa huomioon myös rakenteen aiheuttamat värähtelyt muihin rakenteisiin. [15, s.192.]

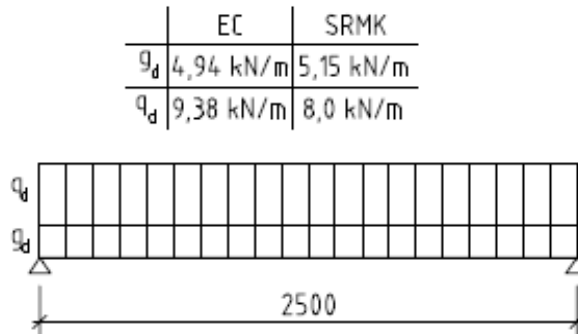
Muurattujen rakenteiden mitoituksessa tarvitsee käytännössä hyvin harvoin tehdä käyttörajatilamitoitusta. Suomen rakentamismääräyskokoelman osat B5 sekä B8 eivät anna käyttörajatilamitoitukseen ohjeita ja eurokoodin raja-arvot tarkastelun tekemiselle ovat niin järkyttävän suuret, palkilla tehollisen leveyden suhde teholliseen korkeuteen tai paksuuteen vähintään 20 ja taivutetulla seinällä 35, etteivät ne käytännössä koskaan toteudu. Ulokkeen vastaavat suhteet ovat pienemmät, palkilla 7 ja taivutetulla seinällä 18, joten niissä käyttörajatilamitoitus tulee teoriassa useammin tarpeeseen, mutta rakenteena muurattu uloke on erittäin harvinainen. Lisäksi ulkomitoiltaan käyttörajatilamitoituksen vaativa palkki kannattaisi hädin tuskin edes itseään, saati juurikaan ulkoista kuormaa.

## 8 LASKELMAT

Tähän lukuun on koottu laskelmat tutkimuksessa tutkittujen muurattujen rakenteiden mitoituksesta. Mitoituksen yhtäaikaisen seuraamisen ja keskinäisen vertailun helpottamiseksi mitoitukset ovat tässä esitetty vierekkäin. Eurokoodin mukaiset laskelmat ovat vasemmanpuoleisella palstalla ja Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaiset oikeanpuoleisella, kuitenkin niin, että jos Suomen rakentamismääräyskokoelmasta eurokoodia täysin vastaava kohta puuttuu, on eurokoodille varattu koko rivi. Laskelmissa käytetyt lyhenneet on selitetty liitteissä 1 ja 2. Laskelmissa on käytetty teräksen vetolujuutena  $f_{yk}=500\text{N/mm}^2$  ja kuormien sekä mitoittavien voimasuureiden määrittely on esitetty luvuissa 5 ja 6.

## 8.1 Palkki

Tässä luvussa on esitetty palkin mitoittaminen sekä eurokoodin että Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan. Palkin lähtötiedot ovat nähtävissä sekä graafisesti kuvassa 11 että lueteltu seuraavassa:



Kuva 11. Palkin staattinen rakennemalli

- $L=2500$  mm
- $b=270$  mm
- $h=795$  mm
- tukien leveys  $b_t=270$  mm
- savitiilen lujuusluokka=25,  $f_b=20$  N/mm<sup>2</sup>
- tiilen aukkoryhmä 2
- laastin lujuusluokka=M5,  $f_m=5$  N/mm<sup>2</sup>.

Mitoittavat taivutusmomentit ja leikkausvoimat sekä materiaalien osavarmuuskertoimet ovat seuraavat:

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| $M_d=10,76$ kNm (EC) | $M_d=9,82$ kNm (RakMK) |
| $V_d=17,22$ kN       | $V_d=15,71$ kN         |
| $\gamma_M=1,8$       | $\gamma_M=2,0$         |
| $\gamma_s=1,15$      | $\gamma_s=1,2$         |

Materiaalien osavarmuuskertoimet löytyvät SFS-EN 1996:n kansallisesta liitteestä kohdasta 2.4.3 sekä RakMK:n osan B8 taulukosta 5.

Ensin määritetään muurin laskennallinen puristuslujuus  $f_d$  eurokoodilla ja  $f_{cd}$  Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan.

Aukkoryhmän tietojen mukaan:

Aukkojen tilavuus  $V_h=0,25$

Seinämien paksuus  $c_t=0,16$

$$f_{b1} = \frac{f_b \cdot ct}{(1 - V_h)} = 4,267 \frac{N}{mm^2} \quad (3)$$

Eurokoodin mukaan laskettaessa arvo sijoitetaan muurin puristuslujuuden kaavaan  $f_b$ :n paikalle. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukainen puristuslujuuden ominaisarvo katsotaan osan B8 taulukosta 1.

$$f_k = 0,5 \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} = 1,92 \frac{N}{mm^2} \quad (4) \quad \left| \quad f_{ck} = 6,5 \frac{N}{mm^2} \right.$$

Kaavan 4 kertoimet ja potenssit löytyvät SFS-EN 1996-1-1:n kansallisesta liitteestä. Seuraavaksi määritetään muurin puristuslujuuden laskenta-arvo.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} = 1,067 \frac{N}{mm^2} \quad (5) \quad \left| \quad f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_M} = 3,25 \frac{N}{mm^2} \quad (6) \right.$$

Seuraavaksi lasketaan leikkauslujuus  $f_{vd}$ . Sen perusarvo saadaan eurokoodin mukaan valmistajan CE-merkinnästä ja RakMK:ssa osan B8 taulukosta 4.

$$f_{vk} = f_{vk0} = 0,17 \frac{N}{mm^2} \quad (7) \quad \left| \quad f_{vk} = 0,2 \frac{N}{mm^2} \right.$$

$$f_{vd} = \frac{f_{vk}}{\gamma_M} = 0,094 \frac{N}{mm^2} \quad (8) \quad \left| \quad f_{vd} = \frac{f_{vk}}{\gamma_M} = 0,1 \frac{N}{mm^2} \quad (8) \right.$$

Teräksen vetolujuus  $f_{yd}$  lasketaan seuraavasti:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434,783 \frac{N}{mm^2} \quad (9) \quad \left| \quad f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 416,667 \frac{N}{mm^2} \quad (9) \right.$$

Raudoituksen tartuntalujuus lasketaan SFS-EN 1996-1-1:n taulukosta 3.6 saatavasta perusarvosta  $f_{bok}$  seuraavasti:

$$f_{bok} = 1,8 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{bod} = \frac{f_{bok}}{\gamma_M} = 1 \frac{N}{mm^2} \quad (10)$$

Seuraavaksi eurokoodissa tarkastetaan, ettei palkki ole seinämäinen. Kaavan 12 tuloksen täytyy olla suurempi kuin palkin korkeus, jotta palkki voidaan mitoittaa tavallisena palkkina.

$$l_{cl} = L - b_t = 2,23m \quad (11)$$

$$1,15 \cdot \frac{l_{cl}}{2} = 1,282m \quad (12)$$

Määritetään tehollinen korkeus  $d$  ja jännemitta  $L_{ef}$ . Palkin erottaminen seinämäisestä palkista tapahtuu Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan juuri tehollisen korkeuden avulla: sen täytyy olla enintään puolet jännemitasta, eli tässä 1250 mm ja kymmenen kertaa palkin leveys, tässä 2700 mm.

$$d = h - 75mm - \frac{15mm}{2} = 712,5mm \quad (13) \quad \left| \quad d = 712,5mm \right. \quad (13)$$

$$L_{ef} = \min(3000mm, l_{cl} + d) = 2,942m \quad (14)$$

Molemmat RakMK:n edellytykset täyttyvät, joten palkki mitoitetaan tavallisena palkkina. Seuraavaksi tarkistetaan käyttörajoitilamitoituksen ehto. Jos kaavasta 15 saatu arvo on  $> 20$ , tulee käyttörajoitilamitoitus tehdä.

$$\frac{l_{ef}}{d} = 4,13 \quad (15)$$

Tässä tapauksessa ei siis tarvitse tehdä KRT-mitoitusta. Tarkistetaan sivutuennan riittävyys. Sivutukien välin,  $l_r$ :n, täytyy ylittää kaavasta 16 saatava minimiarvo.

$$l_r = L = 2500mm$$

$$l_{r\min} = \min\left(60 \cdot b, \frac{250 \cdot b^2}{d}\right) = 16,2mm \quad (16)$$

Taivutusmitoituksessa tarkistetaan ensin eurokoodissa suhteellinen momentti  $\mu$ , jonka täytyy olla alle 0,292 [4.] ja RakMK:ssa maksimimomenttipasiteetti, jonka täytyy olla suurempi kuin mitoittava momentti:

$$\mu = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_d} = 0,074 \quad (17) \quad \left| \quad M_{u \max} = 0,3 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 = 133,64 \text{ kNm} \quad (18) \right.$$

Molempien normien kohdalla vaadittu ehto siis täyttyy. Seuraavaksi tarkastettava puristuspuolelman suhteellinen korkeus lasketaan näin:

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = 0,074 \quad (19)$$

Seuraavaksi lasketaan sisäinen momenttivarsi  $z$ .

$$z = d \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 685,24 \text{ mm} \quad (20)$$

Lopulta saadaan selville tarvittava teräspinta-ala.

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}} = 36,12 \text{ mm}^2 \quad (21) \quad \left| \quad A_s = \frac{M_d}{0,8 \cdot d \cdot f_{yd}} = 41,347 \text{ mm}^2 \quad (22) \right.$$

Näistä molemmista saadaan käytössä olevilla harjasteräskoilla raudoitukseksi 2  $\phi 6$ , yhteensä 57 mm<sup>2</sup>. Seuraavaksi tarkistetaan vielä minimiteräsmäärä.

$$A_{s \min} = 0,05\% \cdot b \cdot d = 96,19 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

Näin eurokoodin mukaan mitoitettun palkin todelliseksi teräsmääräksi valitaan 2  $\phi 8$ , yhteensä 101 mm<sup>2</sup>. Seuraavaksi tarkastetaan vielä leikkausvoimakapasiteetti.

$$V_{Rd} = f_{vd} \cdot b \cdot d = 18,17 \text{ kN} \quad (24) \quad \left| \quad V_u = f_{vd} \cdot b \cdot d = 19,24 \text{ kN} \quad (25) \right.$$

Kuten nähdään, molempien kaavojen mukaan leikkauskapasiteetin arvo ylittää palkkia kuormittavan leikkausvoiman arvon. Täten palkki kestää sitä kuormittavat voimat.

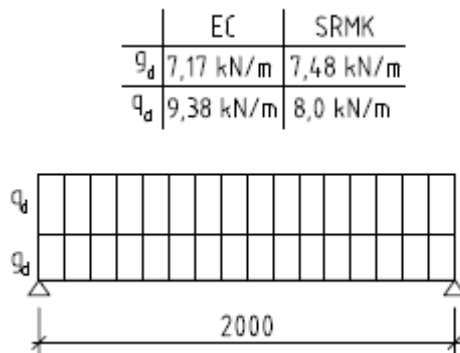
## 8.2 Seinämäinen palkki

Seinämäisen palkin lähtötiedot ovat seuraavat:

- $L=2000 \text{ mm}$
- $b=270 \text{ mm}$

- $h=1155$  mm
- tukien leveys  $b_t=270$  mm
- savitiilen lujuusluokka=25,  $f_b=20$  N/mm<sup>2</sup>
- tiilen aukkoryhmä 2
- laastin lujuusluokka=M5,  $f_m=5$  N/mm<sup>2</sup>

Lähtötiedot ovat nähtävissä graafisesti myös kuvasta 12.



Kuva 12. Seinämäisen palkin staattinen rakennemalli

Mitoittavat taivutusmomentit ja leikkausvoimat sekä materiaalien osavarmuuskertoimet ovat seuraavat:

|                     |                        |
|---------------------|------------------------|
| $M_d=8,27$ kNm (EC) | $M_d=7,75$ kNm (RakMK) |
| $V_d=16,55$ kN      | $V_d=15,48$ kN         |
| $\gamma_M=1,8$      | $\gamma_M=2,0$         |
| $\gamma_s=1,15$     | $\gamma_s=1,2$         |

Seinämäisen palkin mitoitus on tutkimuksessa täysin identtinen tavallisen palkin mitoitukseen verrattuna kaavoihin 3-11, joten tässä esitetään seinämäisen palkin laskenta vain niiltä osin, kuin se eroaa tavallisen palkin mitoituksesta.

$$1,15 \cdot \frac{l_{cl}}{2} = 0,995m \quad (12)$$

Kun kaavan 12 tulos jää pienemmäksi kuin palkin korkeus, kuten tässä tapauksessa käy, on palkki mitoittettava seinämäisenä palkkina. Seuraavaksi Eurokoodin mukaan määritetään tehollinen pituus  $L_{ef}$ .

$$L_{ef} = 1,15 \cdot l_{cl} = 1,989m \quad (26)$$

Tehollisen pituuden avulla saadaan selville sisäinen momenttivarsi:

$$z = \min(0,7 \cdot l_{ef}, 0,4 \cdot h + 0,2 \cdot l_{ef}) = 0,86m \quad (27)$$

Seuraavaksi lasketaan tehollinen korkeus. Eurokoodissa se lasketaan seinämäisellä palkilla eri lailla kuin palkilla, mutta RakMK:n mukaan kaava on sama.

$$d = 1,3 \cdot z = 1,118m \quad \left| \quad (28) \quad d = h - 75mm - \frac{15mm}{2} = 1073mm \quad (13) \right.$$

Kuten huomataan, ei kaavalla 13 laskettu d täytä sille RakMK:n mukaan luvussa 8.1 asetettuja ehtoja. Täten palkki on laskettava tämänkin normin mukaan seinämäisenä.

Seuraavaksi selvitetään taivutusmomentin vaatima teräspinta-ala.

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}} = 22,12mm^2 \quad (21) \quad \left| \quad A_s = \frac{M_d}{0,8 \cdot d \cdot f_{yd}} = 21,68mm^2 \quad (22) \right.$$

Molempien palkkien raudoitukseksi voidaan valita 1  $\phi 6$  eli  $28,3 \text{ mm}^2$  raudoitusta. Tarkistetaan vielä palkin minimiraudoitusvaatimus.

$$A_{s \min} = 0,05\% \cdot b \cdot d = 150,93mm^2 \quad (23)$$

Kuten kaavan 23 tuloksesta nähdään, täytyy eurokoodin mukaan palkkiin laittaa terästä 2  $\phi 10$  eli  $157 \text{ mm}^2$ .

Seuraavaksi tarkistetaan vielä, ettei palkin momenttikapasiteetti ylitä palkin maksimimomenttikapasiteettia.

$$\begin{array}{l} M_{Rd \max} = 0,3 \cdot b \cdot d^2 \cdot f_d \quad (29) \\ M_{Rd \max} = 107,96kNm \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} M_{u \max} = 0,3 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 \quad (30) \\ M_{u \max} = 302,81kNm \end{array} \right.$$

Momenttikapasiteetin jälkeen tarkistetaan vielä palkin leikkauskapasiteetti, jonka täytyy olla suurempi kuin mitoittava leikkausvoima.

$$V_{Rd} = f_{vd} \cdot b \cdot d = 28,51kN \quad (24) \quad \left| \quad V_u = f_{vd} \cdot b \cdot d = 28,96kN \quad (25) \right.$$

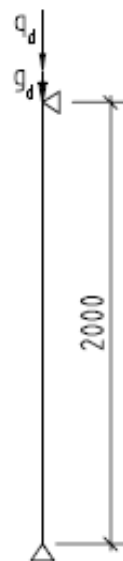
Tutkimuksen seinämäinen palkki kestää siis myös leikkausvoiman suhteen.

### 8.3 Kantava seinä

Tässä luvussa esitetään ainoastaan puristukselle mitoitettavan seinän mitoitustaslaskelmat. Kantavan seinän staattinen malli on esitetty kuvassa 13. Sen lähtötiedot ovat:

- $L=2500$  mm
- $t=130$  mm
- $h=2000$  mm
- kalkkihiekkatiilen lujuusluokka=20,  $f_b=20$  N/mm<sup>2</sup>
- tiilen aukkotyhmä 1
- laastin lujuusluokka=M5,  $f_m=5$  N/mm<sup>2</sup>
- Kimmokerroin  $E=1800$  MPa.

|       | EC      | SRMK    |
|-------|---------|---------|
| $g_d$ | 4,37 kN | 5,93 kN |
| $q_d$ | 9,38 kN | 8,0 kN  |



Kuva 13. Kantavan seinän staattinen rakennemalli

Mitoittavat taivutusmomentit ja normaalivoimat sekä materiaalien osavarmuuskertoimet ovat seuraavat:

|                    |                       |
|--------------------|-----------------------|
| $M_d=0,0$ kNm (EC) | $M_d=0,0$ kNm (RakMK) |
| $N_d=13,75$ kN     | $N_d=13,93$ kN        |
| $\gamma_M=1,8$     | $\gamma_M=2,0$        |

$$\gamma_s=1,15$$

$$\gamma_s=1,2$$

Kantavan väliseinän mitoittaminen aloitetaan samalla lailla kuin palkinkin: määrittämällä muurin puristuslujuus käyttämällä kaavoja 4-6. Kaavaa 3 ei tässä tapauksessa tarvitse käyttää, koska tiili on umpitiili, eli kuuluu aukko-ryhmään 1.

$$f_k = 0,6 \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} = 6,289 \frac{N}{mm^2} \quad (4)$$

$$f_{ck} = 4,5 \frac{N}{mm^2}$$

Kaavan 4 kertoimet ja potenssit löytyvät SFS-EN 1996-1-1:n kansallisesta liitteestä ja RakMK:n mukainen  $f_{ck}$  osan B8 taulukosta 2.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} = 3,494 \frac{N}{mm^2} \quad (5)$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_M} = 2,25 \frac{N}{mm^2} \quad (6)$$

Seuraavaksi määritetään seinän tehollinen korkeus  $h_{ef}$ . Tämän arvon määrittämiseen tarvitaan eurokoodilla SFS-EN 1996-1-1 kohdan 5.5.1.2 (11) mukaista pienennyskerroin  $\rho_2$ :a. RakMK:n mukaan laskettaessa määritetään lujuusopin mukainen nurjahduspituus. Koska tutkimuksen seinä on molemmista päistään tuettu, on sen nurjahduskerroin 1.

$$\rho_2 = 1$$

$$h_{ef} = \rho_2 \cdot h = 2000mm \quad (26)$$

$$h_0 = 1 \cdot h = h \quad (27)$$

Lisäksi laskennassa tarvitaan tehollinen paksuus  $t_{ef}$  eurokoodilla tai  $t_e$  RakMK:n mukaan. Sen määrittämiseen käytetään SFS-EN 1996-1-1 kohdan 5.5.1.3 mukaista jäykkyysskerroin  $\rho_t$ :a. RakMK:n mukaan yksinkertaisella seinällä sen tehollinen paksuus on sama kuin sen todellinen paksuus [11, s.13].

$$\rho_t = 1$$

$$t_{ef} = \rho_t \cdot t = 130mm \quad (28)$$

Kaikkien kantavien pystyrakenteiden mitoituksessa niin eurokoodin kuin RakMK:n mukaankin olennaista on rakenteen hoikkuus. Tätä arvoa mitataan hoikkuusluvulla  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t_{ef}} = 15,39 \quad (29) \quad \left| \quad \lambda = \frac{h_0}{t_e} = 15,39 \quad (30)\right.$$

Hoikkuuden pitää Eurokoodilla jäädä alle 27 [17, s.57] ja RakMK:lla alle 30 [11, s.11]. Tämä arvo täyttyy tutkimuksen seinällä kirkkaasti.

Koska pystyrakennetta ei käytännössä koskaan pystytä pystyttämään täysin kohtisuoraan ja niin, että kuorma osuisi täysin keskelle rakennetta, täytyy mitoituksessa ottaa huomioon epäkeskisyyksiä. Eurokoodissa lasketaan ensin perusepäkeskisyyys  $e_{init}$  kun taas RakMK antaa suoraan epäkeskisyyden minimiarvon  $e_{dmin}$ .

$$e_{init} = \frac{h_{ef}}{450} = 4,44mm \quad (31) \quad \left| \quad e_{dmin} = 0,05 \cdot t + e_w = 6,5mm \quad (32)\right.$$

Kaavassa 32 näkyvä  $e_w$  tarkoittaa vaakakuormien aiheuttamaa epäkeskiyyttä ja se lasketaan kaavalla 33. Sama termi löytyy myös eurokoodista symbolilla  $e_{hm}$  sillä erotuksella, että  $e_{hm}$  vaikuttaa ainoastaan palkin puolellavälissä. Koska tutkimuksen rakenteeseen ei vaikuta vaakakuormia, ei siten synny taivutusmomenttia eikä siitä johtuvaa epäkeskiyyttä.

$$e_{hm} = 0 \quad \left| \quad e_w = \frac{M_d}{N_d} = 0 \quad (33)\right.$$

RakMK:n mukaan laskettaessa tulee todelliseen epäkeskisyyteen laskea mukaan myös epäkeskisyydet seinän ylä- ja alapäässä. Näitä merkitään merkinnöillä  $e_1$  ja  $e_2$  ja ne ovat tutkimuksen rakenteessa molemmat 0 mm.

Seuraavaksi lasketaan todellinen epäkeskisyyys. Koska rakenteeseen ei aiheudu kuin pystykuormaa, on todellinen epäkeskisyyys sama kuin perus- tai minimiepäkeskisyyys. Kaavasta 35 tulee tulokseksi siis 0 mm.

$$e_m = \frac{M_d}{N_d} + e_{hm} + e_{init} = 4,44mm \quad (34) \quad \left| \quad e_d = 0,6 \cdot e_1 + 0,4 \cdot e_2 + e_w \quad (35)\right.$$

Koska RakMK:n mukaan on epäkeskisyydelle määritetty minimiarvo, tulee sitä käyttää todellisena epäkeskisyytenä ( $e_d$ ) tulevilla laskuilla.

Seuraavaksi eurokoodissa määritellään hoikkuuden ja epäkeskisyyden pienennyskerroin  $\Phi_m$ . Sen määrittäminen alkaa lopullisen viruman kertoimesta

$\Phi_\infty$ , joka tässä rakenteessa on 1 [17, s. 45]. Sitä käytetään viruman aiheuttaman epäkeskisyyden selvittämisessä kaavalla 36.

$$e_k = 0,002 \cdot \Phi_\infty \cdot \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \cdot \sqrt{t \cdot e_m} = 0,74 \text{ mm} \quad (36)$$

Sijoittamalla kaavan 36 lopputulos kaavaan 37 saadaan selville lopullinen epäkeskisyys seinän korkeuden puolivälissä. Tämä eroaa  $e_{hm}$ :n arvosta sillä, että  $e_{hm}$ :ssä oli otettu huomioon vain vaakakuormien aiheuttama epäkeskisyys, kun  $e_{mk}$ :ssa on kaikki vaikuttavat tekijät huomioitu.

$$e_{mk} = \max(e_m + e_k, 0,05 \cdot t) = 6,5 \text{ mm} \quad (37)$$

Lopullinen  $\Phi_m$  lasketaan muutaman apuarvon perusteella SFS-EN 1996-1-1 liitteen G mukaan seuraavasti:

$$\lambda_2 = \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \cdot \sqrt{\frac{f_k}{E}} = 0,909 \quad (38)$$

Tämä arvo sijoitetaan kaavaan 39.

$$u = \frac{\lambda_2 - 0,063}{0,73 - 1,17 \frac{e_{mk}}{t}} = 1,26 \quad (39)$$

Tämä sijoitetaan kaavaan 40.

$$A_1 = 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t} = 0,9 \quad (40)$$

Tästä saadaan viimein pienennyskerroin  $\Phi_m$ . Saman arvon voi lukea myös SFS-EN 1996-1-1 kuvasta G.1. RakMK:n mukaisen pienennyskerroimen  $k_s$  arvo voidaan lukea osan B8 kuvasta 6.

$$\Phi_m = A_1 \cdot e^{\frac{-u^2}{2}} = 0,407 \quad (41) \quad \left| \quad k_s = 0,45 \right.$$

Näiden pienennyskerroimien avulla saadaan laskettua kantavan seinän normaalivoimakapasiteetti metrin pituisella vyöhykkeellä.

$$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot f_d \cdot 1m = 184,73kN \quad (42) \quad \left| \quad N_u = k_s \cdot t \cdot f_{cd} \cdot 1m = 131,63kN \quad (43) \right.$$

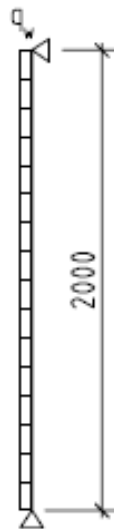
Koska molempien normien mukaan kapasiteetit ylittävät kuormittavat voimasuureet helposti, kestää kyseinen seinä kyseistä rasiusta.

#### 8.4 Julkisivu

Tutkimuksen julkisivu on mitoitettu ainoastaan taivuttavalle kuormalle, edes omaa painoa ei ole otettu sen pienenä huomioon. Julkisivun staattinen malli on esitetty kuvassa 14 ja sen lähtötiedot ovat:

- $L=2500$  mm
- $t=130$  mm
- $h=2000$  mm
- savitiilen lujuusluokka=25,  $f_b=20$  N/mm<sup>2</sup>
- tiilen aukkoryhmä 1
- laastin lujuusluokka=M5,  $f_m=5$  N/mm<sup>2</sup>.

|       | EC                     | SRMK                  |
|-------|------------------------|-----------------------|
| $q_w$ | 0,75 kN/m <sup>2</sup> | 0,8 kN/m <sup>2</sup> |



Kuva 14. Julkisivun staattinen rakennemalli

Mitoittavat tuulikuormat ja normaalivoimat sekä materiaalien osavarmuuskertoimet ovat seuraavat:

|                                   |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| $q_w=0,75$ kN/m <sup>2</sup> (EC) | $q_w=0,8$ kN/m <sup>2</sup> (RakMK) |
| $N_d=0,0$ kN                      | $N_d=0,0$ kN                        |
| $\sigma_d=0$ N/mm <sup>2</sup>    | $\sigma_d=0$ N/mm <sup>2</sup>      |

$$\gamma_M=1,8$$

$$\gamma_S=1,15$$

$$\gamma_M=2,0$$

$$\gamma_S=1,2$$

Ei-kantavan julkisivun mitoitus aloitetaan selvittämällä tiilimuurin taivutuslujuus niin vaaka- kuin pystysuuntaista murtoa vastaan. Vaakasuuntainen murto merkitään alaindeksillä 1.

$$f_{xk1} = 0,20 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{xk1} = 0,20 \frac{N}{mm^2}$$

Pystysuuntaista murtoa vastaan mitoittaessa alaindeksi on 2.

$$f_{xk2} = 0,45 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{xk2} = 0,60 \frac{N}{mm^2}$$

Eurokoodissa taivutuslujuuden arvot saadaan SFS-EN 1996-1-1:n kansallisen liitteen kohdasta 3.6.3, RakMK:n mukaan mitoittaessa arvot löytyvät osan B8 taulukoista 3A ja 3B.

Seuraavaksi lasketaan mitoituslujuus vaakasuuntaiselle murrolle:

$$f_{xd1} = \frac{f_{xk1}}{\gamma_M} = 0,11 \frac{N}{mm^2} \quad (44)$$

$$f_{xd1} = \frac{f_{xk1} + \sigma_d}{\gamma_M} = 0,1 \frac{N}{mm^2} \quad (45)$$

Ja pystysuuntaiselle murrolle:

$$f_{xd2} = \frac{f_{xk2}}{\gamma_M} = 0,25 \frac{N}{mm^2} \quad (46)$$

$$f_{xd2} = \frac{f_{xk2}}{\gamma_M} = 0,3 \frac{N}{mm^2} \quad (46)$$

Eurokoodin mukaan lasketaan vaakasuuntaiselle murrolle vielä näennäinen taivutuslujuuden arvo kaavalla 47, jossa mahdollisen puristusjännityksen stabiloiva vaikutus on otettu huomioon.

$$f_{xd1app} = f_{xd1} + \sigma_d = 0,11 \frac{N}{mm^2} \quad (47)$$

Lopullisen, rakennetta rasittavan taivutusmomentin arvon laskentaan tarvitaan momenttikerroin  $\alpha$ , joka määritellään taivutuslujuuksien ortogonaalisuhteen ja rakenteen ulkomittojen suhteiden avulla. Ortogonaalisuhteen kaava vaihtelee raudoituksen mukaan ja on tarkistettavissa eurokoodin kohdassa

5.5.5. Tässä käytetty kaava 48 on tarkoitettu raudoittamattomalle rakenteelle.

$$\mu = \frac{f_{xd1app}}{f_{xd2}} = 0,444 \frac{N}{mm^2} \quad (48) \quad \left| \quad \mu = \frac{f_{xd1}}{f_{xd2}} = 0,333 \frac{N}{mm^2} \quad (49)$$

Ulkomittojen suhdeluku lasketaan seuraavasti:

$$\frac{h}{L} = 0,8 \quad (50) \quad \left| \quad \frac{h}{L} = 0,8 \quad (50)$$

Momenttikerroin  $\alpha$  saadaan tässä tapauksessa SFS-EN 1996-1-1:n liitteen E taulukosta E. Kyseisessä liitteessä on lukuarvot taulukoituna myös muilla tavoin tuetuille seinille. Sama taulukko löytyy myös viitteen 9 liitteestä 2/2 sekä muusta kirjallisuudesta.

$$\alpha_2 = 0,049 \quad \left| \quad \alpha = 0,054$$

Eurokoodin mukaan lasketaan suoraan vaakasuuntaisen murren momenttikerroimelle  $\alpha_1$  arvo kaavan 51 mukaan, RakMK ottaa kyseisen laskelman vasta myöhemmin huomioon.

$$\alpha_1 = \mu \cdot \alpha_2 = 0,022 \quad (51)$$

Seuraavaksi lasketaan lopulliset taivutusmomentin arvot, ensin vaakasuuntaan:

$$M_{d1} = \alpha_1 \cdot q_w \cdot L^2 = 0,102 \frac{kNm}{m} \quad (52) \quad \left| \quad M_{d1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_w \cdot L^2 = 0,09 \frac{kNm}{m} \quad (53)$$

Kuten nähdään, on kaavassa 53 otettu huomioon taivutuslujuuksien suhde  $\mu$  samalla lailla kuin se eurokoodissa huomioitiin jo kaavassa 51.

Lasketaan sama arvo pystysuuntaiselle murrelle:

$$M_{d2} = \alpha_2 \cdot q_w \cdot L^2 = 0,23 \frac{kNm}{m} \quad (54) \quad \left| \quad M_{d1} = \alpha \cdot q_w \cdot L^2 = 0,27 \frac{kNm}{m} \quad (55)$$

Aivan kuten kaavat 52 ja 53, ovat kaavat 54 ja 55:kin sisällöltään samanlaiset molemmissa normeissa.

Seuraavaksi tarkistetaan seinän momenttikapasiteetin riittävyys. Momenttikapasiteetin tarkintaan tarvitsemme taivutusvastuksen arvon:

$$Z = \frac{t^2}{6} = 2,817 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{m} \quad (56)$$

$$W = \frac{t^2}{6} = 2,817 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{m} \quad (57)$$

Tämän avulla saamme laskettua momenttikapasiteetit vaakasuuntaan:

$$M_{Rd1} = f_{xd1} \cdot Z = 0,313 \frac{kNm}{m} \quad (58)$$

$$M_{u1} = f_{xd1} \cdot W = 0,282 \frac{kNm}{m} \quad (59)$$

Ja pystysuuntaan:

$$M_{Rd2} = f_{xd2} \cdot Z = 0,704 \frac{kNm}{m} \quad (60)$$

$$M_{u1} = f_{xd2} \cdot W = 0,845 \frac{kNm}{m} \quad (61)$$

Kuten kaavoista 58-61 huomataan, eivät kaikki asiat uudistu normivaihdoksessaan. Tietty lujuusoppiset faktat pysyvät ennallaan, termit vain hieman vaihtuvat.

Viimeisenä tarkistetaan vielä eurokoodin mukainen käyttörajoitusraja. Siihen käytetään SFS-EN 1996-1-1:n liitettä F, kuvaa 4.1. Ulkomittojen suhteiden täytyy jäädä rajakäyrän alapuolelle, jotta KRT-mitoitusta ei tarvitse tehdä.

$$\frac{h}{t} = 15,385 \quad (62)$$

$$\frac{L}{t} = 19,231 \quad (63)$$

Kuten huomataan, voidaan KRT-mitoitus jättää tässäkin rakenteessa tekemättä.

## 8.5 Maanpaineseinä

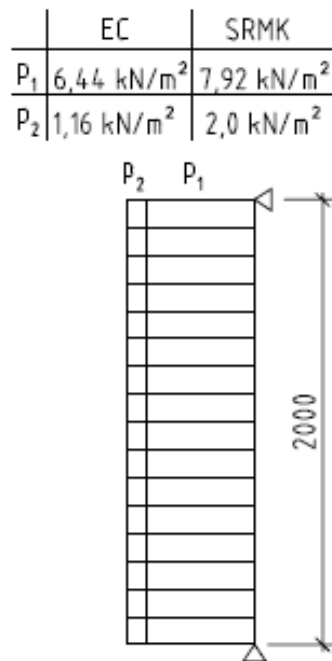
Maanpaineseinän lopulliset lähtötiedot ovat:

- L=2700 mm
- t=200 mm
- h=2000 mm
- b=1000mm

- laastin lujuusluokka=M7,5
- nimellispuristuslujuus  $f_{qm}=3 \text{ N/mm}^2$ , normalisoitu puristuslujuus  $f_b=3,5 \text{ N/mm}^2$
- harkon aukkoryhmä 1.

Maanpaineseinän staattinen rakennemalli on esitetty kuvassa 15.

Koska laastin puristuslujuus  $f_m$  saa eurokoodilla olla enintään kaksinkertainen  $f_b$ :hen verrattuna, käytetään sen arvona  $7 \text{ N/mm}^2$ .



Kuva 15. Maanpaineseinän rakennemalli

Mitoittavat taivutusmomentit ja leikkausvoimat sekä materiaalien osavarmuuskertoimet ovat seuraavat:

$$M_d=5,94 \text{ kNm (EC)}$$

$$V_d=9,5 \text{ kN}$$

$$\gamma_M=1,8$$

$$\gamma_s=1,15$$

$$M_d=7,75 \text{ kNm (RakMK)}$$

$$V_d=12,4 \text{ kN}$$

$$\gamma_M=2,0$$

$$\gamma_s=1,2$$

Maanpaineseinän mitoituksessa on ensin määritetty kevytsoraharkon tarvittava paksuus (t). Tämä vaihe on laskettu ainoastaan Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisilla laskukaavoilla, koska tarkoituksena oli saada selville yksi varsinaisen mitoituksen lähtötieto. Kaavat ovat johdettavissa mitoituksen kaavoista, joten tarkastelu on mahdollista tehdä myös eurokoodien mukaan.

Aluksi määritetään harkon puristuslujuus.

$$f_{ck} = 0,7 \cdot f_{qm} \quad (64)$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{2} = 1,05 \frac{N}{mm^2} \quad (65)$$

Seuraavaksi määritetään harkon tehollinen korkeus.

$$d = \sqrt{\frac{M_d}{0,4 \cdot b \cdot f_{cd}}} = 135,84mm \quad (66)$$

Tehollisen korkeuden avulla saadaan harkon tarvittava korkeus.

$$t = d + 50mm = 185,84mm \quad (67)$$

Saadun arvon avulla valitaan kevytsorabetoniharkon paksuus. Yleensä valitaan seuraava saatua  $t$ :n arvoa suurempi harkko, tässä tapauksessa 200 mm.

Varsinainen mitoitus aloitetaan laskemalla eurokoodilla maanpaineseinän mitoituspuristuslujuus käyttämällä kaavoja 4-5.

$$f_k = 0,65 \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} = 2,39 \frac{N}{mm^2} \quad (4)$$

Kaavan 4 kertoimet ja potenssien arvot löytyvät SFS-EN 1996-1-1:n kansallisesta liitteestä. Seuraavaksi määritetään muurin puristuslujuuden laskenta-arvo kaavalla 5. Vastaava RakMK:n arvo on laskettu jo aiemmin kaavalla 65.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} = 1,33 \frac{N}{mm^2} \quad (5)$$

Teräksen vetolujuus  $f_{yd}$  lasketaan seuraavasti:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434,783 \frac{N}{mm^2} \quad (9) \quad \left| \quad f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 416,667 \frac{N}{mm^2} \quad (9) \right.$$

Mitoitukseen tarvitaan myös taivutuslujuuden arvo pystysuunnassa:

$$f_{xk2} = 0,1 \cdot f_b = 0,35 \frac{N}{mm^2} \quad (68)$$

$$f_{xk2} = 0,1 \cdot f_{qm} = 0,3 \frac{N}{mm^2} \quad (69)$$

Ja sen mitoitusarvo:

$$f_{xd2} = \frac{f_{xk2}}{\gamma_M} = 0,19 \frac{N}{mm^2} \quad (46)$$

$$f_{xd2} = \frac{f_{xk2}}{\gamma_M} = 0,15 \frac{N}{mm^2} \quad (46)$$

Lisäksi tarvitaan raudoituksen tartuntalujuus, joka lasketaan SFS-EN 1996-1-1:n taulukosta 3.6 saatavasta perusarvosta  $f_{bok}$  seuraavasti:

$$f_{bok} = 2,7 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{bod} = \frac{f_{bok}}{\gamma_M} = 1,5 \frac{N}{mm^2} \quad (10)$$

Varsinainen mitoitus lähtee liikkeelle tehollisen korkeuden selvittämisestä.

$$d = t - 50mm = 150mm \quad (70)$$

$$d = t - 50mm = 150mm \quad (70)$$

Seuraavaksi tarkastetaan käyttörajoitusmitoituksen tarve eurokoodilla ulkomittojen suhteilla:

$$l_{ef} = L - t = 2500mm \quad (71)$$

Kaavan 72 tuloksen täytyy olla pienempi kuin 25, jotta käyttörajoitusmitoitusta ei tarvitse suorittaa. Raja on kansallinen suositus, varsinaisen eurokoodin mukaan raja on 35 [4].

$$\frac{l_{ef}}{t} = 12,5 \quad (72)$$

Seuraavaksi määritetään rakenteen tarvitsema raudoitus. Ensin mitoitetaan suhteellinen momentti:

$$\mu = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_d} = 0,20 \quad (17)$$

Seuraavaksi lasketaan puristuspinnan suhteellinen korkeus:

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = 0,22 \quad (19)$$

Seuraavaksi lasketaan sisäinen momenttivarsi  $z$ .

$$z = \min \left[ d \cdot \left( 1 - \frac{\beta}{2} \right), 0,95 \cdot d \right] = 133,18 \text{ mm} \quad (73)$$

Lopulta saadaan selville tarvittava rauditusmäärä.

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}} = 102,58 \text{ mm}^2 \quad (21) \quad \left| \quad A_s = \frac{M_d}{0,85 \cdot d \cdot f_{yd}} = 145,88 \text{ mm}^2 \quad (74)$$

Molempien normien mukaan rauditusmäärä 2  $\phi 10$ , 157 mm<sup>2</sup> riittää raudoitukseksi. Tarkistetaan vielä minimirauditus eurokoodin mukaan. RakMK:n mukaan laskettaessahan ei minimirauditukselle ole määritelmää.

$$A_{s \min} = \frac{0,03\% \cdot b \cdot d}{2} = 22,5 \text{ mm}^2 \quad (75)$$

Minimirauditus lasketaan yhtä pintaa kohti. Maanpaineseinässä rauditus toimii halkeiluraudoituksena, joten sen minimiarvoksi riittää 0,03 % tehollisesta pinta-alasta. Sen arvo on tässä pienempi kuin vaadittavan raudituksen, joten rauditusmäärä 2  $\phi 10$  metriä kohden on riittävä. Tämä tarkoittaa raudoitusta joka toisessa vaakasaumassa.

Seuraavaksi tarkistetaan vielä rakenteen leikkauskestävyys. Eurokoodilla ei ole varsinaisesti määritetty maanpaineseinän leikkausmitoitukselle ohjeita, joten sen laskennassa sovelletaan vanhoja, kansallisia ohjeita [4]. Tämä johtuu siitä, että eurokoodin mukaan muuratut rakenteet mitoitetaan aina sekundäärisinä rakenteina, mitä maanpaineseinä ei ole.

Leikkausmitoituksessa tarvitaan kerroin  $\beta_1$ , joka eurokoodilla löytyy SFS-EN 1996-1-1:n kansallisesta liitteestä ja RakMK:lla osan B5 taulukosta 4.

$$\beta_1 = 0,4 \quad \left| \quad \beta_1 = 0,4$$

Kertoimen avulla määritetään leikkauskapasiteetti.

$$V_{Rd} = \beta_1 \cdot f_{xd2} \cdot b \cdot d \quad (76) \quad \left| \quad V_u = 1,4 \cdot \beta_1 \cdot f_{xd2} \cdot b \cdot d \quad (77)$$

$$V_{Rd} = 11,67 \text{ kN}$$

$$V_u = 12,6 \text{ kN}$$

Molempien normien mukaan laskettuna rakenne kestää sille aiheutuvat rasitukset.

## 9 TULOKSET JA ANALYYSI

Tässä luvussa esitellään luvussa 8 esiteltyjen laskelmien tulokset ja niistä sekä taulukosta 1 (s. 13) tehdyt johtopäätökset. Seinien mitoituksessa esitetävä käyttöaste on laskettu jakamalla mitoittava voima rakenteen kyseisen voiman kapasiteetilla.

### 9.1 Palkki

Palkin lopputuloksissa silmiin pistää vaadittavan raudoituksen ero. Taivutusmomentin tarvitsema raudoitusmäärä on B8:n mukaan laskettuna  $43,2 \text{ mm}^2$  ja eurokoodilla  $37,6 \text{ mm}^2$ , näissä on eroa 13 %. Käytössä olevien harjateräskokojen vuoksi lopullisesta raudoitusmäärästä tulisi sama. Kuitenkin eurokoodissa annetaan vaatimus minimiraudoitukselle, mitä B8 ei tunne. Niinpä eurokoodin lopullinen teräsmäärä onkin  $96,2 \text{ mm}^2$ , yli kaksinkertaisesti (132 %) sen, mitä B8:n vaatii. Tämä ero on todella suuri ja yllättävä lähtöoletukseen verrattuna.

Raudoituksen vähimmäisvaatimus annetaan suoraan SFS-EN 1996-1-1:n kohdassa 8.2.3, ja se esitetään suhteena palkin teholliseen pinta-alaan. Kaava tulee todennäköisesti suoraan Ison-Britannian kansallisen rakennesuunnittelunormin BS5628 toisesta osasta. Esistandardissa kaava antaa vielä kaksinkertaisen arvon, varsinaiseen standardiin 0,1 % tehollisesta pinta-alasta on sentään vaihtunut 0,05 %:iin. [18.] Pienemmällä palkilla ei minimirauditus lisää raudoituksen pinta-alaa, mutta näinkin suuren rakenteen ollessa kyseessä raudoitusmäärä kasvaa hurjasti Suomen rakentamismääräyskokoelman vaatimuksiin verrattuna.

Leikkauskestävyydessä eri normien mukaan laskettuna on vain 5 % ero: eurokoodilla kestävyys on 18,2 kN ja B8:lla 19,2 kN. Tämä johtuu materiaalin leikkauskestävyyden erilaisesta määrittäytavasta: B8 antaa ominisarvon taulukosta, eurokoodilla ominisarvon antaa valmistaja. Eurokoodin mukaiset leikkauskestävyydetkin ovat järjestään pienempiä kuin B8:n taulukkoarvot.

Mielenkiintoiseksi leikkauskestävyytuloksen tekee fakta, että B8:n mukaan laskettu palkki olisi kestänyt yhtä tiilikerrosta pienempänäkin. Kun leikkausvoima tulee rakenteessa määrääväksi voimaksi lähes kaikissa tapauksissa, tulee eurokoodien käyttöönotto siis suurentamaan rakenteita. Tätä selittää osin se, että eurokoodien mukaan mitoittaessa muuratut rakenteet käsitellään sekundäärisinä rakenteina. Sellaisina niiden kantamat kuormat pysyvät pieninä, kun suurimman osan kuormista kantaa jostain toisesta materiaalista tehty rakenne. Näin muuratut rakenteet pysyvät pieninä. Silti on lähtöoletuksen vastaista, että eurokoodien mukaan laskeminen suurentaa rakenteita merkittävästi.

Seinämäisen palkin raudoituksen ero on teoriassa mitätön tavalliseen palkkiin verrattuna. Taivutusmomentin mukaan raudoitus olisi eurokoodilla  $22,1 \text{ mm}^2$  ja B8:lla  $21,7 \text{ mm}^2$ . Eroa syntyy prosentuaalisesti vain 1,8 % Suomen rakentamismääräyskokoelman eduksi. Kuitenkin eurokoodin minimiraudoitusvaatimus koskee myös seinämäistä palkkia, ja ero kasvaa vielä suuremmaksi kuin tavallisella palkilla. Eurokoodin mukaan seinämäistä palkkia täytyy raudoittaa  $150,9 \text{ mm}^2$  pinta-alaltaan olevalla raudoituksella, mikä on jopa 6,9 kertaa enemmän kuin Suomen rakennusmääräyskokoelman mukaan laskettuna.

Leikkauskestävyyttä on eurokoodin mukaan lasketulla seinämäisellä palkilla 28,5 kN ja B8:lla 29,0 kN. Ero on 1,5 % Suomen rakentamismääräyskokoelman hyväksi. Seinämäisen palkin tuloksiin eurokoodi ei siis tuo käytännössä juurikaan uutta, 6 % heikompi materiaalin leikkauskestävyys ja toisensalainen, 4 % suuremman arvon antava tehollisen korkeuden laskentatapa käytännössä kumoavat toisensa B8:n laskutapaan nähden.

## 9.2 Seinä

Kantavan seinän puristuskestävyys on eurokoodilla laskettuna 184,7 kN ja B8:lla 131,6 kN. Eroa on 29 % eurokoodien eduksi. Materiaalin puristuskestävyys on eurokoodilla 55 % suurempi kuin B8:lla ja kaavaan kuuluva pienennyskerroin 11 % pienempi kuin B8:lla. Seinän käyttöasteeksi tulee B8:lla 11 % ja eurokoodilla 7 %. Näin B8:a käyttämällä laskettu tulos on todellisuudessa tarkempi kuin eurokoodilla laskettu.

Laskettaessa ei-kantavan julkisivun kestävyyttä vaakasuuntaista murtoa vastaan eurokoodilla tulokseksi saadaan 0,31 kNm/m ja B8:lla 0,28 kNm/m,

tässä eroa saadaan 10 %. Kuormittavassa laskentamomentissa eroa on 13 % eurokoodin haitaksi. Kuormitusasteet ovat eurokoodilla 33 % ja B8:lla 32 %.

Pystysuuntaista murtoa vastaan olevat taivutusmomenttikestävyydet ovat hieman yllättäen 0,70 kNm/m eurokoodilla ja 0,85 kNm/m B8:lla. Jo taulukoidut materiaalien kestävyysarvot ovat eurokoodilla kolmasosan pienempiä kuin B8:lla. Eroa tästä tulee 18 % B8:n eduksi. Tulosta selventää, että kuormittavassa taivutusmomentissa eroa on 17 % B8:n haitaksi, käyttöasteiksi tulee näin 33 % eurokoodilla ja 32 % B8:lla, samoin kuin vaakasuuntaista murtoa vastaan. Näin eurokoodin tulokset ovat sittenkin aavistuksen tarkempia pystysuoran murron alemmasta taivutusmomenttikestävyydestä huolimatta. Käytännössä eroa ei kuitenkaan synny, prosenttiyksikön ero häviää jo standardoitujen rakennusmateriaalien käytössä.

### 9.3 Maanpaineseinä

Maanpaineseinän raudoitukseksi saatiin eurokoodilla 102,6 mm<sup>2</sup> ja B8:lla 145,9 mm<sup>2</sup>. Eroa syntyy siis 30 % eurokoodin eduksi. Käytettävissä olevista harjateräskoista johtuen molempiin kuitenkin tulee valittavaksi sama raudoitusmäärä, joten käytännön eroa ei rakenteen taivutusmomenttikestävyydessä pääse syntymään.

Leikkauskestävyyttä tutkimuksen maanpaineseinälle syntyy eurokoodin mukaan laskettuna 11,7 kN ja B8:n mukaan 12,6 kN. Näin eurokoodin mukaan laskettu tulos on 7 % B8:n tulosta tarkempi. Tässäkin yhteydessä määrääväksi rasitukseksi syntyvän leikkausvoiman kapasiteeteissa on paljon pienempi ero normien välillä kuin taivutusmomenttikapasiteeteissa.

Huomattavaa maanpaineseinän mitoituksessa on, että sekä momentti- että leikkausvoimakapasiteetti antavat heikomman tuloksen eurokoodin mukaan mitoitettaessa. Momenttikapasiteetissa tämä johtuu pitkälti pienemmästä kuormittavan taivutusmomentin arvosta, mutta leikkausvoimassa eroa syntyy materiaalilujuuksien välillä. Jälleen kerran Suomen rakentamismääräyskoelman taivutusvetolujuuden taulukoitu arvo antaa vahvemman arvon kuin eurokoodin puristuslujuuteen suhteutettu arvo.

## 9.4 Liikuntasaumat

Liikuntasaumojen osalta normimuutos ei tuo uutta kuin kevytsorabetonin osalta. Eurokoodin kansallinen liite määrää liikuntasaumojen enimmäispituuksiksi savi- ja kalkkihiekkatiileillä samat arvot, jotka ovat tähänkin asti olleet voimassa. Asiaan tulee kuitenkin kiinnittää erityistä huomioita suunniteltaessa rakenteita kansainvälisillä markkinoilla, sillä eurokoodin määräämät arvot ovat enintään 80 % suomalaisista arvoista. Tämä johtuu siitä, että suomalaiset ilmasto-olot poikkeavat huomattavasti yleiseurooppalaisesta. Täten Suomen oloissa useimmiten määrääväksi muodonmuutosilmiöksi näillä leveysasteilla muodostuu lämpöliikkeet, kun etelämpänä Euroopassa tärkeämpi rakenteita hajottava ilmiö on kosteus.

Kevytsorabetoni on ainoa tutkimuksessa käytetyistä materiaaleista, jonka osalta liikuntasaumojen välit ovat taulukkoarvoina muuttuneet. Käytännössä tilanne on kuitenkin toinen - myös eurokoodien käyttöönoton jälkeen valmistajien suositukset liikuntasaumaväleille vaihtelevat 10:stä jopa 20 metriin. Tämä johtuu siitä, että kevytsorabetonista tehdyt rakenteet ovat käytännössä aina raudoitettuja rakenteita. Tällöin rakenteen raudoituksen voidaan katsoa toimivan myös halkeilua estävänä raudoituksena, jolloin liikuntasaumaväli kasvaa normissa määrätystä 6:sta valmistajien suositusten mukaisiksi. [19.]

Liikuntasaumojen välejä käsitellessä on hyvä muistaa, että vasta nyt niille on määrätty enimmäisarvot. Aiemmin Suomessa on ollut käytössä ainoastaan hyvän rakennustavan mukaisia suosituksia.

## 9.5 Johtopäätökset

Kaiken kaikkiaan voi sanoa, että muurattujen rakenteiden mitoituksessa normien erot vaihtelevat mitoittavan rakenteen mukaan hyvinkin rankasti eikä yhtä, kaikkia rakenteita koskevaa nyrkkisääntöä voida luoda. Tapaukset menevät normien suhteen lähes tasan: lasketuissa yhteensä yhdeksässä mitoitusilanteessa eurokoodi on antanut vahvemman rakenteen viidessä, Suomen rakentamismääräyskokoelma neljässä tapauksessa [Taulukot 2-4].

Kaikissa tapauksissa, joissa rakenteet on mitoitettu sekä momentille että leikkausvoimalle on leikkausvoima ollut määräävä, mitoittava voima. Tätä tosin on yksittäistapausten perusteella vaikea näyttää muuratuille rakenteille tyypilliseksi käyttäytymiseksi, mutta se on hyvä ottaa huomioon mitoitukses-

sa senkin takia, että muurattuja rakenteita on käytännössä mahdotonta raudoittaa leikkausta vastaan.

Taivutettujen, raudoitettujen rakenteiden mitoituksessa tulee tapahtumaan suuria uudistuksia huonompaan suuntaan, kun eurokoodi ottaa käyttöön minimiraudoituksen. Tämän tutkimuksen palkkien kohdalla raudoitusmäärät moninkertaistuivat eurokoodien mukaan laskettaessa. Tämä on yksittäisistä asioista suurin mitoituseroavaisuuksiin vaikuttava tekijä ja täysin ennako-oletusta vastakkaiseen suuntaan.

Tutkimuksen lopputulos tukee joiltain osin oletusasetelmaa eurokoodien tarkkuudesta Suomen rakentamismääräyskokoelman metodeihin verrattuna. Tavallisen palkin heikko leikkauskestävyys ja siten palkkia suurentava vaikutus sotii täysin ennako-odotusta vastaan. Vaikka muurattu palkki on rakentamisessa äärimmäisen harvoin esiintyvä rakenne, on se silti rakennustekniikan perusrakenne materiaalista riippumatta, joten sen olettaa tukevan eurokoodien imagoa yhä tarkempien rakenteiden suunnittelutyökaluna. Laskelmat kyllä ovat pidempiä ja monimutkaisempia kuin Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan, aivan kuten oletettiin.

Eurokoodin tarkkuudelle ja monimutkaisemmille, useampia asioita huomioonottavalle laskutavalle on tilauksensa. Tarkemmat laskelmat takaavat teoriassa tarkemmat tulokset, pienemmät käyttöasteet ja mahdollisuuden käyttää yhä pienempiä rakenteita. Käytännössä tätä kuitenkin vaikeuttaa muurauskappaleiden standardoidut koot. Kun rakenteiden kokoa ei portaattomasti voi säätää, voivat eri normien mukaan mitoitettaessa arvot sattua samojen ulkomittojen kapasiteetin ylä- ja alalaitaan. Näin rakenteiden koossa ei eroa pääse syntymään.

## 10 YHTEENVETO

Insinööriyön tavoitteena oli tutustua muurattujen rakenteiden mitoitukseen niin eurokoodi 6:n kuin Suomen rakentamismääräyskokoelman osien B5 ja B8 mukaan. Lopputuloksena oli tarkoitus esittää näiden normien eroja mitoitustyön kussakin vaiheessa ja saada selville keskeiset erot niin mitoituksessa kuin lopputuloksessakin.

Aiheen laajuuden takia päätettiin jo tutkimuksen alkaessa keskittyä perusrakenteiden ja -materiaalien tutkimiseen. Materiaalivalinnoilla ei itse mitoitus-

sen kulkuun tosin ole juurikaan merkitystä, mutta tutkimuksessa haluttiin antaa laskentamallit mahdollisimman todennäköisille tilanteille sekä rajata esitettävien materiaalien määrää. Täten tutkimuksessa päädyttiin mitoittamaan seuraavat rakenteet:

- poltetusta savitiilestä valmistettu palkki
- poltetusta savitiilestä valmistettu seinämäinen palkki
- kalkkiahiekkatiilinen kantava väliseinä
- poltetusta savitiilestä valmistettu julkisivumuuri
- kevytsorabetoniharkoista muurattu maanpaineseinä.

Lisäksi tutkimuksessa tutkittiin ja vertailtiin liikuntasaumoille kummassakin normissa annettuja suosituksia.

Insinööriyön esitutkintavaiheessa tutustuttiin molempiin tutkittaviin normeihin ja alan muuhun kirjallisuuteen, jota Eurokoodeista ei kuitenkaan juuri löytynyt. Tutkimusta jatkettiin laskemalla samanlaisten ja samalla tavoin kuormitettujen rakenteiden mitoitus läpi molempien normien mukaisesti. Näiden laskelmien lopputuloksia sekä muutamia, tärkeitä väliarvoja verrattiin keskenään lopullisten johtopäätösten vetämiseksi. Laskelmista jäljitettiin syyseuraussuhteita aina erilaisten lähtöarvojen vertailuihin asti erojen syiden löytämiseksi.

Insinööriyön lopputuloksena voidaan todeta, että muurattujen rakenteiden osalta tarkkuus eurokoodin ja Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan laskiessa vaihtelee rakenteesta riippuen voimakkaasti. Näin ollen on hankala määrittää yhtenäistä sääntöä, jonka mukaan kaikki muuratut rakenteet käyttäytyisivät eurokoodin mukaan laskettuna, verrattuna Suomen rakentamismääräyskokoelmaan. Yksi suurimmista eroavaisuuksista kuitenkin löytyy raudoituksen mitoittamisesta. Eurokoodi määrää raudoitukselle minimiarvon, joka varsinkin seinämäisen palkin tapauksessa suurentaa raudoitusmääriä yli kaikkien oletusten. Tämä tulee näkymään myös käytännön suunnittelutyössä. Tutkimuksen seinämäinen palkki oli määritelmänsä alarajoilla. Kun jo sen Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan laskettu raudoitus on vain 14 % eurokoodin vaatimasta arvosta, voidaan vain kysyä, kuinka paljon raudoitusmäärät tulevat korkeammissa rakenteissa kasvaan.

Taulukko 2. Yhteenveto tutkimuksen taivutettuiden rakenteiden rauditusmääristä

|                | EC6                   | B8/5                  | EC6-B8/5                        |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Palkki         | 96,2 mm <sup>2</sup>  | 43,2 mm <sup>2</sup>  | 53 mm <sup>2</sup> (55 %)       |
| Seinäm. palkki | 150,9 mm <sup>2</sup> | 21,7 mm <sup>2</sup>  | 128,3 mm <sup>2</sup><br>(86 %) |
| Maanpaineseinä | 102,6 mm <sup>2</sup> | 145,9 mm <sup>2</sup> | -43,3 mm <sup>2</sup><br>(30 %) |

Yksi asia on kuitenkin selkeästi nähtävissä: kaikissa tutkimuksen taivutetuissa rakenteissa mitoittavaksi voimaksi tulee leikkausvoima. Leikkausvoimakapasiteettien normienväliset erot ovat järjestelmällisesti suhteellisesti pienemmät kuin rauditusmäärien, joten rakenteiden koot eivät sittenkään muutu niin radikaalisti kuin rauditusmäärien eron perusteella voisi olettaa. Lisäksi rakenteiden ulkomittojen muuttumiseen vaikuttaa muurauskappaleiden standardoidut koot, rakenteiden koot kun vaihtelevat portaittain eikä pienempi koko välttämättä enää riitä kapasiteetiltaan edes tarkemman lopputuloksen antavan normin mukaiseen mitoittamiseen. Eurokoodien käyttöönotto ei siis vaikuta muurattujen rakenteiden kokoon niin radikaalisti kuin aluksi saattoi olettaa.

Taulukko 3. Yhteenveto tutkimuksen taivutettuiden rakenteiden leikkauskapasiteeteista.

|                | EC6     | B8/5    | EC6-B8/5        |
|----------------|---------|---------|-----------------|
| Palkki         | 18,2 kN | 19,2 kN | -1 kN (5 %)     |
| Seinäm. palkki | 28,5 kN | 29,0 kN | -0,5 kN (1,5 %) |
| Maanpaineseinä | 11,7 kN | 12,6 kN | -0,9 kN (7 %)   |

Tutkimuksessa selvitettiin myös seinärakenteiden osalta niiden kapasiteetit. Kantavasta seinästä selvitettiin puristuslujuus ja julkisivusta sen kestävyys vaaka- ja pystysuuntaista murtoa vastaan. Tulokset on luettavissa taulukosta 4.

Taulukko 4. Yhteenveto tutkimuksen seinärakenteiden kapasiteeteista.

|                         | EC6        | B8         | EC6-B8            |
|-------------------------|------------|------------|-------------------|
| Kantava seinä, puristus | 184,7 kN   | 131,6 kN   | 53,1 kN (29 %)    |
| Julkisivu, vaakamurto   | 0,31 kNm/m | 0,28 kNm/m | 0,03 kNm/m (10%)  |
| Julkisivu, pystymurto   | 0,70 kNm/m | 0,85 kNm/m | -0,15 kNm/m (18%) |

Timo Tikanoja on ohjelmoinut MathCad-pohjaisen, eurokoodin mukaisen mitoitusohjelman, jolla todennäköisesti tullaan tulevaisuudessa mitoittamaan suuri osa muuratuista rakenteista. Ohjelman tarkastus on tätä kirjoitettaessa käynnissä Tampereen ammattikorkeakoulussa ja se tullaan julkaisemaan Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen Liiton SKOLin eurokoodien mukaisten laskentapohjien laatimishankkeen osanottajien kesken.

Tämä tutkimus käsittelee vain yleisimpiä perusrakenteita, joten lisätutkittavaa riittää monimutkaisempien rakenteiden osalta. Yksi tärkeimmistä lisätutkimuksen kohteista on muurattujen rakenteiden palomitoitus. Mitoitusmallien laajentaminen myös muihin yleisiin muurausmateriaaleihin vaatisi oman tutkimuksensa, samoin kuin sekä normaalivoimalle että taivutusmomentille mitoitettava seinä. Muuraussiteiden mitoitus kaipaa myös lähempää tarkastelua kuten erilaisten kaarirakenteidenkin mitoitus. Käyttörajatilamitoituksen kulun selvittäminen on myös hyödyllistä, vaikka sen tarkastelu onkin erittäin harvinaista.

Muurattuja rakenteita mitoittaessa on hyvä muistaa, että eurokoodi määrittää ne aina sekundäärisiksi rakenteiksi. Muurattuja primäärirakenteita mitoittaessa kohdataankin vaikeuksia, jotka johtuvat primäärirakenteissa huomioitavien mitoituskohtien ohjeiden ja määräysten puuttumisesta. Näin ollen eurokoodi 6 keskittyy suomalaisen rakennuskäytännön mukaan hieman väärin: ehdottomasti suosituin muurattu kantava rakenne Suomessa on primäärirakenteeksi laskettava maanpaineiseinä. Näihin kohtiin tullaan tulevaisuudessa, toivottavasti ennen normin lopullista käyttöönottoa, antamaan ratkaisumalleja.

Valitettavasti muurattuja rakenteita käytetään kantavina rakenteina nykyään Suomessa kovin vähän ja lähinnä vain pientaloissa, joten nämä muutamat vuosittaiset rakenteet rakennetaan yleensä valmistajien suositusten tai vanhojen mallien mukaisesti. Näin ei uusia, innovatiivisia rakennustapoja pääse syntymään eikä ala kehittymään. Se vähäkin osaaminen, mitä opiskeluvuosina on harvoille rakennesuunnittelijoille tullut hankittua, vaipuu vähitellen unholaan.

## VIITELUETTELO

- [1] Siikanen, Unto, *Rakennusaineoppi*. Helsinki: Rakennustieto Oy. 2001
- [2] Aino Hakulinen, 2006
- [3] Katriina Mikkonen, 2006
- [4] Timo Tikanojan ”Muuratut rakenteet” -kurssimateriaali Ammattikorkeakoulu Metropoliaan syksyllä 2008
- [5] H+H Finland Oy:n kotisivut [http://siporex.fi/ammattilaisille\\_siporex](http://siporex.fi/ammattilaisille_siporex). Luettu 19.3.
- [6] Betonikeskuksen harkkokotisivut <http://www.kevytsoraharkko.fi/fi/Betoniharkot/Muurattavat%20betoniharkot/>. Luettu 29.3.
- [7] Lammin Betoni Oy:n kotisivut <http://www.lamminbetoni.fi/portal/fi/tuotteet/lammikivi/>. Luettu 19.3.
- [8] Eurokoodi 6, SFS-EN 1996-1-2. Vahvistettu 13.2.2006
- [9] Kinnunen, Jukka, *Muuratut rakenteet 2: Rakennesuunnittelu*. Helsinki: Rakennustieto Oy. 2006
- [10] Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1996-2. Ehdotus 1.8.2008
- [11] Suomen rakentamismääräyskokoelman osa B8: Tiilirakenteet
- [12] Maxit Oy, *Leca-harkkorakenteet, suunnitteluohje 4-14*. 15.9.2008
- [13] Eurokoodi Help Desk -kotisivut <http://www.eurocodes.fi>. Luettu 24.3.2009
- [14] Eurokoodi 1, SFS-EN 1991-1-1. Vahvistettu 21.10.2002
- [15] Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, *Rakenteiden kuormitusohjeet RIL 144-2002*. Helsinki: RIL ry. 2002
- [16] Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-1, Ehdotus 15.10.2007
- [17] Eurocode 6, SFS-EN 1996-1-1. Vahvistettu 28.11.2005
- [18] Tikanoja, Timo, Rakennustieto Oy, Vs: Muuratun palkin minimiraudoituksesta eurokoodin mukaan. Vastaanottaja Ulla Hakulinen. Lähetetty 15.4.2009 [viitattu 17.4.2009].
- [19] Perustelut standardin SFS-EN 1996-2: 2006 kansalliselle liitteelle

## LÄHDELUETTELO

Suomen rakentamismääräyskokoelman osa B5: Kevytsorabetoniharkkorakenteet

Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1996-1. Luonnos

Eurokoodi, SFS-EN 1990. Vahvistettu 21.10.2002

Perustelut standardin SFS-EN 1996-1-1: 2005 kansalliselle liitteelle

Timo Tikanojan ”Muuratut rakenteet” -kurssimateriaali Ammattikorkeakoulu Stadiaan keväällä 2006

Bukh, Grete, *Murværkskonstruktioner*. Ingeniørhøjskolen i Århus, 2008

Euroopan komission kotisivut [http://ec.europa.eu/enterprise/construction/internal/essreq/eurocodes/eurointro\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/construction/internal/essreq/eurocodes/eurointro_en.htm). Luettu 24.3.2009

Eurocodes: Building the future -kotisivut <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=334>. Luettu 21.4.2009

van der Pluijm, Rob, *EN 1996-1-1*. PowerPoint-esitys [http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2009/2\\_6\\_Pluijm.pdf](http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2009/2_6_Pluijm.pdf). Luettu 21.4.2009

Lukkarinen, Sanna, *Jännitetyn laattapalkiston normivertailu*. Insinööritö. Helsingin ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Helsinki. 2008

**LIITELUETTELO**

1. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan lasketuissa laskelmissa käytettävät merkinnät
2. Eurokoodin mukaan lasketuissa laskelmissa käytettävät merkinnät

SUOMEN RAKENTAMISMÄÄRÄYSKOKOELMAN MUKAAN LASKETUISSA LASKEL-  
MISSA KÄYTETTÄVÄT MERKINNÄT

|            |                                                               |             |                                            |
|------------|---------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------|
| $A_s$      | raudoituspinta-ala                                            | $N_d$       | mitoitettavan normaalivoiman laskenta-arvo |
| $b$        | leveys                                                        | $N_u$       | puristuskapasiteetti                       |
| $d$        | tehollinen korkeus                                            | $q_w$       | tuulikuorman laskenta-arvo                 |
| $e_1$      | epäkeskisyys seinän yläpäässä                                 | $t$         | paksuus                                    |
| $e_2$      | epäkeskisyys seinän alapäässä                                 | $V_d$       | mitoitettavan leikkausvoiman laskenta-arvo |
| $e_d$      | perusepäkeskisyys                                             | $V_u$       | leikkauskapasiteetti                       |
| $e_{dmin}$ | vähimmäisepäkeskisyys                                         | $W$         | taivutusvastus                             |
| $e_w$      | vaakakuormista aiheutuva epäkeskisyys                         | $\alpha$    | momenttiluku                               |
| $f_{cd}$   | muurin puristuslujuuden laskenta-arvo                         | $\beta_1$   | leikkauskestävyyden pienennyskerroin       |
| $f_{ck}$   | muurin puristuslujuuden ominaisarvo                           | $\gamma_M$  | muurin osavarmuuskerroin                   |
| $f_m$      | laastin puristuslujuus                                        | $\gamma_s$  | raudoituksen osavarmuuskerroin             |
| $f_{qm}$   | kevytsorabetonin nimellispuristuslujuus                       | $\lambda_d$ | hoikkuusluku                               |
| $f_{vd}$   | muurin leikkauslujuuden laskenta-arvo                         | $\mu$       | taivutuslujuuksien suhde                   |
| $f_{vk}$   | muurin leikkauslujuuden ominaisarvo                           |             |                                            |
| $f_{yd}$   | raudoituksen vetolujuuden laskenta-arvo                       |             |                                            |
| $f_{yk}$   | raudoituksen vetolujuuden ominaisarvo                         |             |                                            |
| $f_{xd1}$  | taivutuslujuuden laskenta-arvo vaakasuuntaista murtoa vastaan |             |                                            |
| $f_{xd2}$  | taivutuslujuuden laskenta-arvo pystysuuntaista murtoa vastaan |             |                                            |
| $f_{xk1}$  | taivutuslujuuden ominaisarvo vaakasuuntaista murtoa vastaan   |             |                                            |
| $f_{xk2}$  | taivutuslujuuden ominaisarvo pystysuuntaista murtoa vastaan   |             |                                            |
| $h$        | korkeus                                                       |             |                                            |
| $h_0$      | nurjahduspituus                                               |             |                                            |
| $k_s$      | puristuskapasiteetin pienennyskerroin                         |             |                                            |
| $L$        | pituus                                                        |             |                                            |
| $M_d$      | mitoitettavan momentin laskenta-arvo                          |             |                                            |
| $M_u$      | momenttikapasiteetti                                          |             |                                            |
| $M_{umax}$ | enimmäismomenttikapasiteetti                                  |             |                                            |

## EUROKOODIN MUKAAN LASKETUISSA LASKELMISSA KÄYTETTÄVÄT MERKINNÄT

|              |                                                                          |             |                                                                   |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------|
| $A_s$        | raudoituspinta-ala                                                       | $f_{xk2}$   | taivutuslujuuden ominaisarvo pystysuuntaista murtoa vastaan       |
| $A_{smin}$   | vähimmäisraudoituspinta-ala                                              | $h$         | korkeus                                                           |
| $b$          | leveys                                                                   | $h_{ef}$    | tehollinen korkeus                                                |
| $ct$         | muurauskappaleen kannasten ja seinämien paksuus                          | $L$         | pituus                                                            |
| $d$          | tehollinen korkeus                                                       | $l_{cl}$    | vapaan välin pituus                                               |
| $e_{init}$   | alkuepäkeskisyyys                                                        | $l_{ef}$    | tehollinen pituus                                                 |
| $e_{hm}$     | vaakakuormista johtuva epäkeskisyyys                                     | $l_r$       | sivutukien etäisyys                                               |
| $e_k$        | viruman aiheuttama epäkeskisyyys                                         | $l_{rmin}$  | sivutukien vähimmäisetäisyys                                      |
| $e_m$        | kuormien aiheuttama epäkeskisyyys                                        | $M_d$       | mitoitettavan momentin laskenta-arvo                              |
| $e_{mk}$     | lopullinen epäkeskisyyys                                                 | $M_{Rd}$    | momenttikapasiteetti                                              |
| $E$          | kimmokerroin                                                             | $N_d$       | mitoitettavan normaalivoiman laskenta-arvo                        |
| $f_b$        | muurauskappaleen normalisoitu puristuslujuus                             | $N_{Rd}$    | puristuskapasiteetti                                              |
| $f_{b1}$     | muurauskappaleen puristuslujuuden ominaisarvo aukkoryhmissä 2-4          | $q_w$       | tuulikuorman laskenta-arvo                                        |
| $f_{bod}$    | raudoituksen tartuntalujuuden laskenta-arvo                              | $t$         | paksuus                                                           |
| $f_{bok}$    | raudoituksen tartuntalujuuden ominaisarvo                                | $t_{ef}$    | tehollinen paksuus                                                |
| $f_d$        | muurin puristuslujuuden laskenta-arvo                                    | $V_h$       | muurauskappaleen aukkojen tilavuus                                |
| $f_k$        | muurin puristuslujuuden ominaisarvo                                      | $V_d$       | mitoitettavan leikkausvoiman laskenta-arvo                        |
| $f_m$        | laastin puristuslujuus                                                   | $V_{Rd}$    | leikkaukskapasiteetti                                             |
| $f_{vd}$     | muurin leikkauslujuuden laskenta-arvo                                    | $z$         | sisäinen momenttivarsi                                            |
| $f_{vk}$     | muurin leikkauslujuuden ominaisarvo                                      | $Z$         | taivutusvastus                                                    |
| $f_{yd}$     | raudoituksen vetolujuuden laskenta-arvo                                  | $\alpha_1$  | momenttiluku vaakasuuntaista murtoa vastaan                       |
| $f_{yk}$     | raudoituksen vetolujuuden ominaisarvo                                    | $\alpha_2$  | momenttiluku pystysuuntaista murtoa vastaan                       |
| $f_{xd1}$    | taivutuslujuuden laskenta-arvo vaakasuuntaista murtoa vastaan            | $\beta$     | puristuspuunnan suhteellinen korkeus                              |
| $f_{xd1app}$ | näennäisen taivutuslujuuden laskenta-arvo vaakasuuntaista murtoa vastaan | $\beta_1$   | leikkauskestävyyden pienennyskerroin                              |
| $f_{xd2}$    | taivutuslujuuden laskenta-arvo pystysuuntaista murtoa vastaan            | $\gamma_M$  | muurin osavarmuuskerroin                                          |
| $f_{xk1}$    | taivutuslujuuden ominaisarvo vaakasuuntaista murtoa vastaan              | $\gamma_s$  | raudoituksen osavarmuuskerroin                                    |
|              |                                                                          | $\lambda$   | hoikkuusluku                                                      |
|              |                                                                          | $\mu$       | (palkeissa, mp-seinässä) suhteellinen momentti                    |
|              |                                                                          | $\mu$       | (julkisivussa) taivutuslujuuksien suhde                           |
|              |                                                                          | $\rho_2$    | tehollisen korkeuden pienennyskerroin                             |
|              |                                                                          | $\rho_\tau$ | tehollisen paksuuden pienennyskerroin                             |
|              |                                                                          | $\sigma_d$  | puristusjäännitys                                                 |
|              |                                                                          | $\Phi_m$    | hoikkuuden ja epäkeskisyyden pienennyskerroin seinän puolivälissä |