



Kevytsoraeristeharkot kerrostaloraken- tamisessa

Soveltuvuus ja mitoitus

Jalmari Heimonpoika Kauhanen

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2021

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Kauhanen, Jalmari Heimonpoika

Kevytsoraeristeharkot kerrostalorakentamisessa. Soveltuvuus ja mitoitus

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2021, 70 sivua

Tekniikan ja liikenteen ala. Insinööri, rakennus ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Harkkojen käyttö kerrostalojen ulkoseinärakenteina on Suomessa melko harvinaista. Harkkojen ajatellaan soveltuvan parhaiten pienempiin rakennushankkeisiin, mutta moni niiden ominaisuus on arvossa myös kerrostalotyömailla.

Tutkimuksessa selvitettiin toimeksiantajan, HB-betoniteollisuus Oy:n, tuottamien kevytsoraeristeharkkojen soveltuvuutta kerrostalojen ulkoseiniksi. Soveltuvuutta selvitettiin kirjallisten lähteiden ja mitoituslaskelmien pohjalta. Mitoituksen kohteena olivat kuvitteellisen esimerkkikerrostalon rakenteet. Mitoituskohteen lähtötietoja, kuten esimerkiksi kerrosmäärää, maastoluokkaa ja mitoittettavien seinän osien pituuksia varioitiin monipuolisten kuormitustapausten aikaan saamiseksi. Mitoittamalla kerättiin tietoa tuotteen käyttökohteista ja selvitettiin kantavuuden rajoja. Mitoituslaskelmia pyrittiin automatisoimaan mahdollisuuksien mukaan kehittämällä osana työtä excel-taulukkolaskentapohjia, jotka työn jälkeen jäivät toimeksiantajan käytettäväksi.

Tutkimuksen perusteella tutkittu tuote soveltui käytettäväksi kerrostalon ei kantavana ulkoseinänä tietyin rajoituksin. Rakenteen käytettävyyttä rajoitti erityisesti tuulikuorman suuruus, seinän tuentatapa ja seinän pituus. Kantavana seinänä tuote ei läpäissyt taulukkomuotoista palomitoitusta, johtuen sisäkuoren riittämättömästä paksuudesta. Jatkotutkimuskohteina esitettiin laskennallinen palomitoitus, tuotteen taivutusvetolujuuksien tarkempi määrittäminen sekä tuoteperheen laajentaminen harkolla, jonka sisäkuori on paksumpi. Kirjallisten lähteiden perusteella harkoilla havaittiin olevan potentiaalia nykyistä laajamittaisempaan käyttöön kerrostalorakentamisessa, mutta ongelmaksi nousi erityisesti osaavan työvoiman puute.

Avainsanat (asiasanat)

kevytsoraeristeharkko, harkko, muurattu rakenne, kerrostalo, mitoitus, eurokoodi, rakenne

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Kauhanen, Jalmari Heimonpoika

Apartment block made with blocks. Suitability and verification

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2021, 70 pages

School of Technology. Degree Programme in Construction and Civil Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

In Finland it is quite rare to see concrete blocks used as outer walls of apartment buildings. Blocks are thought to be suitable mainly in small scale construction projects, yet many of their properties are also valued in building sites of apartment blocks.

This thesis aimed to shed light on the usability of insulated lightweight aggregate blocks as outer walls of apartment buildings. The study concentrates on analyzing blocks produced by the commissioner of the study HB-Betoniteollisuus Ltd. Usability of the blocks was determined by studying pertinent literature and carrying out verification calculations. Objects of the calculations were structures of an imaginary apartment building. Initial information of the example building, such as number of storeys, terrain category and length of the wall being designed, were varied to generate diverse loading cases. The verification calculations were used to gather information of the product's possible applications and limits of its load bearing capacity. Spreadsheet computation was used where possible to automate the calculation process. The spreadsheets were formulated for the study and were given for use of the commissioner afterwards.

The study concluded that the blocks are suitable for non-load bearing walls of apartment buildings with certain limits. The limiting factors were magnitude of wind load, horizontal support of the wall and the wall's length. As a load bearing wall the product did not pass tabular structural fire design. Suggestions for follow-up research include calculated structural fire design, more accurate determination of the blocks' flexural strength and extension of the product family with a block that has a thicker inner leaf. Literal sources led to the conclusion that blocks do have potential as building material of apartment buildings, but lack of competent workforce is an issue.

Keywords/tags (subjects)

insulated lightweight aggregate block, masonry, apartment building, apartment block, block of flats, Eurocode, structure

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	Johdanto	4
2	Lähtökohdat	5
2.1	Kevytsoraeristeharkkojen ominaisuuksia	5
2.2	Näkökulmia harkkorakentamisesti.....	7
2.2.1	Rakentamisesta maailmalla	8
2.2.2	Rakentamisen ympäristövaikutukset	8
2.3	Paloturvallisuus	9
3	Rakenteen soveltuvuuden selvitys mitoittamalla	10
3.1	Aineiston keruu	11
3.1.1	Mitoituksen muuttujat	11
3.1.2	Rakennetyypit ja liittymät.....	12
3.2	Mitoitus	15
3.2.1	Kuormat	16
3.2.2	Rakenneanalyysi	18
3.2.3	Mitoitus puristukselle ja taivutukselle.....	21
3.2.4	Mitoitus tuulenpaineelle	27
3.2.5	Muuraussiteiden mitoitus	30
3.2.6	Palomitoitus.....	31
4	Tulokset.....	32
4.1	Ylimmän kerroksen ei kantavan seinän mitoitus	33
4.2	Alimman kerroksen ei kantavan seinän mitoitus.....	35
4.3	Alimman kerroksen kantavan seinän mitoitus	36
4.4	Keskeisiä havaintoja kirjallisuudesta.....	37
5	Pohdinta.....	38
5.1	Johtopäätökset.....	39
5.2	Jatkotutkimus ja kehitys.....	39
5.3	Tutkimuksen luotettavuus ja eettisyys	41
	Lähteet	43
	Liitteet	45
	Liite 1. Laskentaesimerkit.....	45

Kuviot

Kuvio 1 Ulkoseinän rakennetyyppi	12
Kuvio 2 Yläpohjan rakennetyyppi	13
Kuvio 3 Välipohjan rakennetyyppi	13
Kuvio 4 Yläpohjan liittymät ulkoseiniin.....	14
Kuvio 5 Välipohjan liittymät ulkoseiniin.....	15
Kuvio 6 Taivutusmomentin aiheuttamien puristuksen ja vedon muodostuminen	18
Kuvio 7 Kerroksittain nivelellisen rakennemallin muodostus.....	19
Kuvio 8 Välipohjan kuormat G_v ja Q_v välittyvät sisäkuoren yläpään epäkeskeisesti	20
Kuvio 9 Rakenteen kokonaistaivutusmomentin komponentit	20
Kuvio 10 Ei kantavan seinän rakennemalli	21
Kuvio 11 Seinän vaakasuuntaiset tuentatapaukset E ja G	30
Kuvio 12 Muuraussiteiden toimintaperiaate	30
Kuvio 13 Esimerkki virheellisen tuloksen esiintymisestä tulostaulukossa	41
Kuvio 14 Laskentaesimerkin rakennuksen päämitat	45
Kuvio 15 Kohteen rakennetyypit.....	48
Kuvio 16 Kohteen liittymätyypit	49
Kuvio 17 Tuulikuormien kuormakaavio	51
Kuvio 18 Mitoitus puristukselle ja taivutukselle käyttäen excel taulukkolaskentaa	64
Kuvio 19 Mitoitus tuulenpaineelle käyttäen excel taulukkolaskentaa	70

Taulukot

Taulukko 1 Tuulen nopeuspaineen ominaisarvot eri korkeuksilla maastoluokissa 3 ja 4.....	17
Taulukko 2 Ylimmän kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet maastoluokassa 3 tuentatapauksella G	33
Taulukko 3 Ylimmän kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet maastoluokassa 3 tuentatapauksella E	34
Taulukko 4 Ylimmän kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet maastoluokassa 4 tuentatapauksella G	34
Taulukko 5 Ylimmän kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet maastoluokassa 4 tuentatapauksella E	34
Taulukko 6 Alimman kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet kolmelta reunalta tuettuna .	35
Taulukko 7 Alimman kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet neljältä reunalta tuettuna ...	35
Taulukko 8 Kantavan päätyseinän käyttöasteet 3-kerroksisessa rakennuksessa maastoluokassa 3	36
Taulukko 9 Kantavan päätyseinän käyttöasteet 3-kerroksisessa rakennuksessa maastoluokassa 4	37
Taulukko 10 Kohteen perustiedot	46
Taulukko 11 Kohteen rakenteellinen järjestelmä	46
Taulukko 12 Normit ja kuormitukset	47
Taulukko 13 Alimman kerroksen kantavan päätyseinän kuormayhdistelmät	57

1 Johdanto

Kerrostalo työmaita ovat Suomessa perinteisesti hallinneet betonielementit. Viime aikoina markkinoita on vallannut myös erilaiset puuelementit, joiden käyttöä on helpotettu lainsäädännössä erityisesti palomääräysten osalta. Harkot ovat kuitenkin jääneet kerrostaloissa melko vähäiselle käytölle. Harkot mielletäänkin Suomessa helposti pientalojen, pohjarakenteiden ja maatalouden rakennustarvikkeeksi. Kuitenkin ominaisuudet, jotka tekevät harkoista suosittuja pienemmissä rakennushankkeissa, ovat arvostettuja myös kerrostalorakentamisessa.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia kevytsoraeristeharkkojen käyttömahdollisuuksia kerrostalojen ulkoseinissä. Soveltuvuutta tutkitaan tutustumalla aiheeseen liittyviin kirjallisiin lähteisiin ja mitoittamalla esimerkkikohteena toimivan kuvitteellisen kerrostalon rakenteita. Esimerkkikohteena toimii 30 m pitkä ja 10 m leveä niin sanottu kirjahyllyrunkoinen asuinkerrostalo, jonka lähtötietojen perusteella muodostetaan mitoittaville rakenteille kuormat. Näitä lähtötietoja varioimalla saadaan erilaisia kuormituksia, joiden avulla etsitään rakenteen kantavuuden reunaehtoja. Mitoittamalla rakenteita mahdollisimman realistisilla kuormilla saadaan tietoa tuotteen potentiaalisista käyttökohteista ja etsimällä kantavuuden reunaehtoja eri tilanteissa selvitetään rakenteeseen vaikuttavia muuttujia. Näiden muuttujien perusteella voidaan muodostaa jatkokehitys ideoita. Mitoituslaskuja pyritään automatisoimaan mahdollisimman paljon kehittämällä työtä varten ja toimeksiantajan käyttöön excel- taulukkolaskentapohjia. Tutkimuksella pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Soveltuuko kevytsoraeristeharkoista muurattu rakenne käytettäväksi kerrostalorakentamisessa?
- Mitkä ovat rakenteen kantavuuden reunaehdot?

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii HB-Betoniteollisuus Oy (tästä eteenpäin HB). Tutkimuksen aihe muotoutui keskustelussa toimeksiantajan edustajan kanssa. Tähän mennessä HB:n kevytsoraeristeharkoilla on toteutettu korkeintaan 2-kerroksisia pientaloja, ja kerrostalorakentamisen liisäys tuotteiden käyttökohteeksi olisi suuri potentiaalinen markkina-alueen laajennus. Työn aikana kehitettävät excel- taulukkolaskentaohjat jäävät toimeksiantajan käyttöön. Taulukkolaskentapohjia

voidaan käyttää apuna suunnittelun neuvonnassa ja niillä voidaan luoda kantokykytaulukoita. Taulukkolaskentapohjat toimivat eristeharkkojen lisäksi myös mitoitettaessa yksinkertaisia harkkoseiniä.

HB-Betoniteollisuus Oy on betonituotteita tehtaillaan Jyväskylässä ja Somerolla tuottava suomalainen perheyrius, jonka historia ulottuu lähes 60 vuoden päähän. HB:n tuotevalikoimaan kuuluu valu-, väliseinä-, kevytsorabetoni-, julkisivu- ja eristeharkkoja, erilaisia piha- ja muurikiviä, betoni- ja pesubetonilaattoja.

2 Lähtökohdat

2.1 Kevytsoraeristeharkkojen ominaisuuksia

Kevytsoraeristeharkot koostuvat kevytsorabetonisesta sisä- ja ulkokuoresta sekä niiden välisestä eristeestä. Kuorien runkoaineena toimii kevytsora, joka on pyörivässä uunissa poltettua ja paisutettua savea. Pyörivässä uunissa poltettuna savesta muodostuu halkaisijaltaan 1-20 mm olevia pyöreähköjä ja pinnaltaan tiiviitä rakeita, jotka erotellaan eri kokoluokkiin seulomalla. Huokoisen rakenteensa ansiosta kevytsora on hyvin lämpöä eristävää ja nimensä mukaisesti kevyttä. Kevytsorabetonin muita raaka-aineita ovat sementti, vesi, kiviaines ja lisäaineet. Eristeenä voidaan käyttää polyuretaania tai polystyreeniä. (Kaskiaro & Petrow 2016, 13-15.)

Harkoissa käytettävän kevytsorabetonin tiheys vaihtelee tuotteen mukaan välillä 700-1000 kg/m³. Puristuslujuus määräytyy tiheyden mukaan ja vaihtelee välillä 3-5 MN/m². Harkot ovat useimmiten saumoinen 500 tai 600 mm pitkiä ja 200 mm korkeita, leveyden vaihdellessa käyttötarkoituksen mukaan. Lämmöneristysvaatimuksien takia asuinrakennuksissa joudutaan käyttämään vähintään 350 mm leveitä harkkoja, tätä kapeampia harkkoja voidaan käyttää esimerkiksi puolilämpimissä tiloissa. (Kaskiaro & Petrow 2016, 13-15.)

HB:n tuotevalikoimaan kuuluu kaksi kevytsoraeristeharkkoa UEH-290 ja PEH-380, sekä yhteen sopivat palkki- ja kulmaharkot. Tässä tutkimuksessa keskitytään käsittelemään PEH-380 harkkoa. Eristeenä tuotteessa käytetään Ukorex-Grafit paisutettua polystyreeniä. Eriste on päistään ponnattu ja se on liitetty kevytsorabetonikuoriin ns. lohenvyrstöliitoksella. Rakenne muurataan käyt-

täen 10 mm vaakasaumaa ilman pystysaumalaastia. Vaakasaumoissa käytetään lämmöneristävyyden parantamiseksi 15-20 mm paksuista villakaistaa tai polyuretaanivaahtoa. Uretaanivaahtoa käytettäessä tulee varmistaa, ettei paisuva vaaho nosta seuraavaa harkkoa irti laastista. Pystysaumojen tiiviys varmistetaan pursottamalla polyuretaanisaumavaahtoa eristeen koloon, kun koko harkkovarvi on saatu muurattua. 4 mm ruostumattomia terässiteitä suositellaan käytettävän 4 kpl/m² aukkojen pielissä, yli 3,5 m korkeissa seinissä sekä ala-, väli- ja yläpohjissa palkkiharkkojen kanssa. (HB-eristeharkko suunnittelu- ja työohje, 3.)

Rakenteen massiivisuus

Massiivisilla rakenteilla on parempi ääneneristävyyden kuin kevyillä. Mikäli kevytsoraharkko ulkoseinältä vaaditaan 40 dB äänitasoeroa, tulee suunnittelussa, ikkunavalinnassa ja toteutuksessa kiinnittää erityistä huomiota ääneneristykseen. Äänitasoerovaatimuksen ollessa 35 dB, on kevyiden rakenteiden käyttö yleensä mahdollista. (Kylliäinen, 2011, 47.) Rakenteen massa vaikuttaa myös sen kykyyn varastoida lämpöä. Verrattuna kevyisiin rakenteisiin, massiivisilla rakenteilla voidaan saavuttaa 5-15 % säästö lämmitysenergian tarpeessa ja 20-50 % säästö jäähdytysenergian tarpeessa. Rakenteiden massan vaikutukset lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeeseen riippuvat rakennuksen käytöstä, massan sijoittelusta, ikkunoiden määrästä, sekä rakennuksen suuntauksesta. (Kivitalojen energiatehokkuus, 2010, 7-8.) Kevytsoraeristeharkkoista muuratut rakenteet ovat massiivisuudeltaan puu- ja betonielementtirakenteiden välimaastossa.

Ilmanpitävyys

Rakennuksen vaipan ilmanpitävyydellä on merkittävä vaikutus rakennuksen energian kulutukseen. Simuloinneissa tyypillisen 2-kerroksisen pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiakulutuksesta 15-30 % aiheutuu vuotoilmanvaihdosta ilmavuotoluvun arvolla $n_{50}=3,9$ l/h. Mikäli simuloinneissa ilmavuotolukua kasvatettiin yhdellä yksiköllä, lisääntyi tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergian kulutus 7% ja kokonaiskulutus 4%. (Vinha, Korpi, Kalamees, Jokisalo, Eskola, Palonen, Kurnitski, Aho, Salminen M, Salminen K & Keto 2009, 120.) Tutkimuksessaan Vinha & muut (2009) vertailivat eri runkoratkaisuilla toteutettujen pientalojen ja kerrostalojen ilmanvuotolukuja. Kevytsoraharkot asettuivat betonielementtien ja puurunkojen väliin. Betonielementtipientalon ilmavuotolukujen keskiarvo oli 2,6 l/h, kevytsoraharkkopientalon 3,2 l/h ja puurunkoisten pientalojen 3,9

l/h. Kerrostalojen puolella betonielementtiasuntojen ilmavuotolukujen keskiarvo oli 1,6 l/h ja puukerrostalojen asuntojen 2,6 l/h. (Mts. 29.) Tutkimuksessa ei ollut mukana kevytsoraeristeharkoin toteutettuja kerrostaloja.

2.2 Näkökulmia harkkorakentamisesti

Harkkojen käyttö tuo kerrostalorakentamiseen joustavuutta. Perinteiset elementtityömaat etenevät elementtitehtaiden aikataulujen mukaan ja elementtien varastointi työmaalla vie paljon tilaa. Vastaavasti harkot ovat varastotavaraa, jota saadaan työmaalle tarvittaessa lyhyelläkin varoitusaikalla ja harkkolavojen tilantarve työmaalla on pienempi. Toimituksien joustavuuden ja varastoinnin helppouden merkitys korostuu erityisesti kaupunkikeskusten ahtailla työmailla. Harkot antavat vapauksia sekä arkkitehti- että rakennesuunnitteluun. Muuratulla rakenteella on mahdollista toteuttaa monimuotoisia rakennuksia ja lopullisen rapatun pinnan värin voi valita melko vapaasti. Lisäksi suunnitelmia on mahdollista muuttaa vielä rakennusvaiheessakin ja mahdollisten virheiden korjaaminen on helppoa. (Simola, 2019, 12-15.)

Vastaavia kokemuksia on noussut esille myös rakennuttajien ja rakennusliikkeiden edustajien haastattelussa. Hyvä saatavuus ja toimitusten nopeus on erityisesti koettu harkkojen vahvuudeksi verrattuna elementteihin, joilla tuotantojonot voivat olla pitkiä. Harkkojen hinta on myös elementtejä vakaampi. Työmaalla harkkorakentaminen koettiin joustavaksi: elementtirakentamiseen verrattuna virheitä on helpompi korjata ja aikataulut ovat vähemmän sidonnaisia toimitusaikoihin. Nostokaluston tarve työmaalla on myös huomattavasti pienempi. Hankkeiden valmistumiseen oli haastattelun referenssikohteissa kulunut alle kuukausi enemmän aikaa vastaaviin elementtikohteisiin verrattuna, mutta sitä ei koettu ongelmalliseksi. Ongelmaksi harkkorakentamisessa sen sijaan koettiin kokemuksen ja osaavan työvoiman puute. (Helenius-Hirvonen, 2018, 25-29.)

Heikkilän (Suunnittelun vapautta ilman riskejä.) mukaan harkot ovat parhaimmillaan 1-4 kerroksissa rakennuksissa. Samoilla linjoilla on arkkitehti Mari Matomäki, joka toteaa harkkojen soveltuvan korkeintaan nelikerroksisiin pienkerrostaloihin, mutta kertoo, että Keski-Euroopassa on rakennettu korkeampiakin. (Simola, 2019, 12-15.)

2.2.1 Rakentamisesta maailmalla

Puurakentamisella on pitkät perinteet Yhdysvalloissa. Suuret metsävarannot ovat taanneet puun runsaan saatavuuden ja edullisen hinnan, mikä on johtanut rakennusteollisuuden voimakkaaseen sitoutumiseen puuhun. Teollinen vallankumous toi mukanaan teräksen laajamittaisen tuotannon, joka mahdollisti sen käytön rakennusmateriaalina. Teräs oli suosittua erityisesti kaupunkien tornitaloissa, joissa sen etuina betoniin verrattuna oli rakenteiden keveys ja nopea rakentaminen. Hyvä saatavuus ja teollisuuden pitkät perinteet ovat johtaneet puu- ja teräsrakentamisen kukoistamiseen näihin päiviin asti Yhdysvalloissa. (Khan, 2016.)

Euroopassa sitä vastoin puun saatavuus on pitkään ollut heikompaa, sillä suuri osa metsistä on harkattu jo satoja vuosia sitten, eikä Euroopan suuri asukastiheys ole mahdollistanut metsien kasvatusta takaisin. Puutavara on Euroopassa tämän takia kallista. Kivirakentamisella onkin Euroopassa pitkälle ulottuvat perinteet, joiden jatkuvuutta nykypäivänä siivittää betonisten- ja muurattujen rakenteiden ympäristöystävällisyys. (Roberts, 2014.)

2.2.2 Rakentamisen ympäristövaikutukset

Toimiemme vaikutus ympäristöön on yhä suuremmissa roolissa päätöksenteossa. Rakennettu ympäristömme kuormittaa luontoa eri tavoilla. Suomessa rakentamisen ja kiinteistöjen osuus energian kulutuksesta on noin 40 %, josta suurin osa kuluu kiinteistöjen lämmitykseen (Vihmo, Tilastot ja suhdanteet, n.d.). Lisäksi rakennusmateriaalien tuotannosta aiheutuu häiriötä luonnolle esimerkiksi hakkuiden ja kaivostoiminnan muodossa.

Rakennusta suunniteltaessa ja rakennettaessa on huolehdittava, että luonnonvaroja ja energiaa kuluu säästeliäästi. Rakennustuotteiden on mahdollistettava energiankulutuksen ja tehontarpeen jääminen vähäiseksi rakennuksen käytön aikana. (Rakentamismääräykset – Ympäristöministeriö, n.d.) Rakennuksen lämpöhäviöt koostuvat vaipan, vuotoilman sekä ilmanvaihdon lämpöhäviöistä. Lämpöhäviö saa olla korkeintaan rakennuksen eri osien vertailuarvoilla laskettu vertailulämpöhäviö. (A 1010/2017, 23§.) Rakennuksen vaipan lämpöhäviön vertailuarvo on seinien osalta 0,17 W/(m²K) (A 1010/2017, 24§). PEH-380 kevytsoraeristeharkko, U-arvo on 0,15 W/(m²K) kun vaaka-saumoissa käytetään villakaistaa (HB-Harkkotuotteet, 3).

Rakennusmateriaalien tuotannon saralla, sementin hiilidioksidipäästöt ovat aiheuttaneet huolta viime aikoina. Betoniteollisuudessa tähän on vastattu korvaamalla osa sementistä masuunikuo- nalla ja lentotuhkalla, jolla päästöjä onkin saatu alennettua. Lisäksi betonista purkujätettä voidaan murskata ja käyttää uudelleen betonin runkoaineena tai tienrakennuksessa. Puun ja betonin tuo- tantoa verrattaessa, osoittautuvat betonin ympäristövaikutukset pienemmiksi. Metsät toimivat hiilidioksidinieluinä ja metsän kyky sitoa itseensä hiilidioksidia kasvaa metsän iän myötä. Tämä hii- lidioksidin sitominen päättyy, kun metsä kaadetaan puutavaraksi, ja vaikka metsä istutetaankin uu- desta ei metsän kyky varastoida hiilidioksidia palaudu ennalleen vuosikymmeniin. Vastaavasti betonista aiheutuu hiilidioksidipäästöjä lähinnä sementin tuotannon aikana. Lopputulemana beto- nirunkoisena toteutettuna 220 m² rakennuksen hiilidioksidijalanjälki jää pienemmäksi jo yhden vuoden aikana rakentamisesta. (CO2 Impact - Wood vs Concrete, n.d..)

2.3 Paloturvallisuus

Rakennus tulee suunnitella ja rakentaa paloturvalliseksi käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla. Kantavien rakenteiden on palon sattuessa kestävä vähimmäisajan, joka mahdollistaa turvallisen poistumisen, pelastustoiminnan ja palon hallintaan saamisen. Rakentamisessa käytettävien tuot- teiden on oltava paloturvallisuuden kannalta soveltuvia. (Rakentamismääräykset – Ympäristömi- nisteriö n.d.)

Pienkerrostalot sijoittuvat kerroslukumääränsä, korkeutensa, kerrosalansa sekä henkilömääränsä perusteella yleensä paloluokkaan P2. P2-paloluokassa 2-kerroksisten asuinrakennusten korkeus saa olla enintään 9 m eikä kerrosalaa tai asuntojen henkilömäärää ole rajoitettu. Vastaavasti yli 2- kerroksisten asuinrakennusten suurin sallittu korkeus on 28 m, suurin kerrosluku 8, suurin kerros- ala 12000 m² ja suurin henkilömäärä 1000. (A 848/2017, 8 §). Rakennukset, jotka ylittävät nämä arvot sijoittuvat paloluokkaan P1.

Rakenteiden kantavuuden tulee säilyä tietyn vähimmäisajan, joka riippuu paloluokasta, tilojen pa- lokuormasta, rakennuksen kerrosluvusta ja korkeudesta sekä käyttötarkoituksesta. Asuntojen pa- lokuormaryhmä on alle 600 MJ/m² (A 848/2017, 7 §). P2-paloluokassa 1-2-kerroksisen rakennuk- sen rakenteiden paloluokitus tulee yleensä olla vähintään R30, kun taas yli 2-kerroksisessa rakennuksessa R60. Lisäksi P2-paloluokan yli 2-kerroksisissa rakennuksissa tulee olla automaatti-

nen sammutuslaitteisto ja lämmöneristeiden on oltava vähintään A2-s1, d0 -luokkaa. P1-paloluokassa alle 28 m asuinrakennuksen rakenteiden paloluokituksen tulee yleensä olla vähintään R60, lisäksi yli 2-kerroksisten rakennusten kantavien rakenteiden tulee olla vähintään A2-s1, d0 -luokkaa. (A 848/2017, 12 §).

Asuinrakennuksissa osastoivien rakenneosien palonkesto aika vaatimus paloluokassa P1 on EI60. P2-paloluokan yli 2-kerroksissa rakennuksissa vaatimus on EI60 ja 1-2-kerroksissa rakennuksissa EI30. (A 927/2020, 16 §).

Yli 2-kerroksissa rakennuksissa palon leviäminen eristeessä tulee estää korkeintaan kahden kerroksen välein tarkoitukseen sopivalla tarvikkeella, mikäli eriste ei täytä D-s2, d2 -luokan vaatimuksia. Korkeintaan 28 metriä korkeissa rakennuksissa tätä vaatimusta ei tarvitse noudattaa, mikäli ulkoseinässä ei ole tuuletusväliä ja palon leviäminen eristeeseen rakennuksen ulkopuolelta on eristeen sijoituksella ja suojauksella rajoitettu puoleen tilan osastoivien rakenneosien palonkestävyyssaikevaatimuksesta. (A 927/2020, 25 §).

Kevytsoraeristeharkoissa eristeenä käytettävän EPS:n paloluokitus on E, joka ei täytä P2-paloluokan vaatimuksia yli 2-kerroksissa rakennuksissa. Täten kevytsoraeristeharkoin toteutetun yli 2-kerroksisen rakennuksen paloluokka on P1.

3 Rakenteen soveltuvuuden selvitys mitoittamalla

Työssä mitoitetaan kohteena toimivan kuvitteellisen kerrostalon rakenteita. Mitoitettaviksi rakenteiksi on valittu kerrostalon alimman kerroksen kantava ja ei kantava ulkoseinä sekä ylimmän kerroksen ei kantava ulkoseinä. Mitoitettavien rakenteiden kantavuutta testattiin erilaisissa tapauksissa. Mitoituksessa hyödynnetään työn aikana toimeksiantajalle kehitettyjä excel- taulukkolaskentapohjia.

Rakennuksen alimman kerroksen kantava seinä mitoitetaan puristukselle ja taivutukselle ja ylimmän kerroksen ei kantava seinä mitoitetaan tuulenpaineelle. Alimman kerroksen ei kantavan seinän tapauksessa ei ole etukäteen itsestään selvää kumpaa mitoitusta tulisi käyttää, sillä kyseisen

seinän rasitukset ovat pääasiassa puristetun ja vaakakuormitetun seinän rajalla. Pääasiassa vaakakuormitetun seinän mitoituksessa annetaan selkeä yläraja pystysuuntaiselle puristukselle, jonka ylittyessä seinä tulee mitoittaa puristukselle ja taivutukselle. Tätä rajaa käytetään määritettäessä kummalla tavalla alimman kerroksen ei kantava seinä mitoitetaan eri tapauksissa.

3.1 Aineiston keruu

Tietoa rakenteiden kantavuudesta kerättiin mitoittamalla kuvitteellisen rakennuskohteen rakenteita. Kohde on Jyväskylässä sijaitseva pienkerrostalo, jonka pohja kattaa 10 m * 30 m suuruisen alan. Kohteen runkojärjestelmänä toimii kantavat seinät ja laatat. Kantavina seininä toimivat rakennuksen päätyseinät sekä niiden suuntaiset väliseinät. Kantavat laatat ovat ontelolaattoja. Runkojärjestelmän valinta mahdollistaa kevytsoraeristeharkkojen mitoituksen kantavana- ja ei kantavana seinänä.

3.1.1 Mitoituksen muuttujat

Monipuolisten tulosten saamiseksi, mitoitettavien rakenteiden kantavuutta testattiin erilaisissa tilanteissa. Seinän kantavuuteen vaikuttavista tekijöistä valittiin viisi muuttujaa, joiden arvoja vaihtelemalla voidaan etsiä rakenteiden kantavuuden rajoja. Muuttujiksi valittiin seinän pituus, seinän tuentatapaus, rakennuksen kerrosten lukumäärä, rakennuksen sijainnin maastoluokka sekä väli- ja yläpohjalaatastojen jänneväli. Muuttujien valinnan perusteena on niiden vaikutus mitoitettavien rakenteiden kuormitukseen sekä toimintaan. Näiden muuttujien sekä muiden lähtötietojen pohjalta on muodostettu rakennemallit sekä kuormat asiaan kuuluvien ohjeiden mukaisesti.

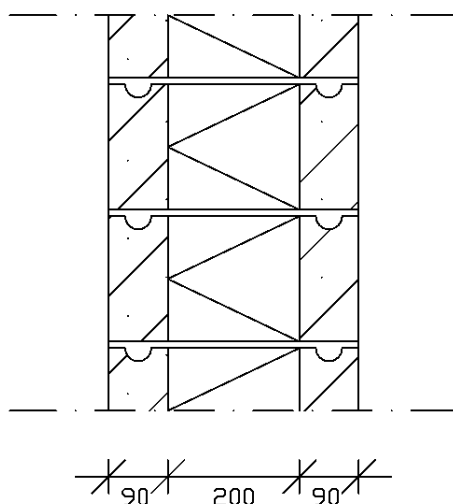
Ylä- ja välipohjalaatastojen jännevälit ovat olennainen tekijä kantavan seinän kuormituksessa. Jänneväliä kasvattamalla kasvaa myös laatastojen omapaino sekä niiden kannattelemat muuttuvat kuormat kuten oleskelu- ja lumikuorma. Laatastot aiheuttavat kantaville seinille puristusjäännitystä sekä taivutusmomenttia epäkeskisen tuennan takia. Tässä työssä laatastojen jänneväliä vaihdellaan välillä 2 - 6 metriä. Mitoitettavan seinän osan pituus vaikuttaa sen toimintaan sivuttaissuuntaisen tuennan kautta. Vaikutus esiintyy mitoitettaessa sekä puristukselle ja taivutukselle, että tuulenpaineelle. Pituuden ja korkeuden suhde sekä tuentatapauksen vaikutus seinän kantavuuteen huomioidaan kertoimilla. Tässä työssä mitoitettavien seinien pituutta vaihdellaan välillä 1 - 8 metriä.

Yhdessä laatastojen jännevälit ja seinien pituudet asettavat reunaehdoja tilasuunnittelulle. Näitä muuttujia tarkastelemalla saadaan tietoa rakenteiden käyttömahdollisuuksista. Pidemmät seinät ja laatastojen jännevälit mahdollistavat vapaamman tilasuunnittelun sekä parantavat tilojen muuntojoustavuutta myös rakentamisen jälkeen.

Kerrosten lukumäärä lisää alimpien kerrosten seinien puristusjännitystä ja ylimpien kerrosten seinien tuulikuormaa. Tässä työssä tutkitaan 2 - 5 kerroksisia rakennuksia. Maastoluokka vaikuttaa suoraan tuulikuorman suuruuteen. Luokista tutkitaan maastoluokka 3, joka vastaa esikaupunkialuetta sekä maastoluokka 4 joka vastaa kaupungin ydinkeskustaa.

3.1.2 Rakennetyypit ja liittymät

Mitoitettavina rakenteina käytetään HB:n PEH-380 kevytsoraeristeharkoista muurattua ulkoseinää (kuvio 1). Harkon kokonaisleveys on 380 mm ja se koostuu kahdesta 90 mm harkkokuoresta, joiden välissä on 200 mm polystyreeni eriste. Rakennuksen kerroskorkeus on 3,0 m, jolloin seinän vapaaksi korkeudeksi jää 2,8 m. Harkkokuorten runkoaineena toimii kevytsora. Muurauksessa käytetään yleislaastia, jonka puristuslujuus on $10,0 \text{ N/mm}^2$. Ulkopintana on kaksikerrosrappaus ja sisäpintana tasoite ja maali.



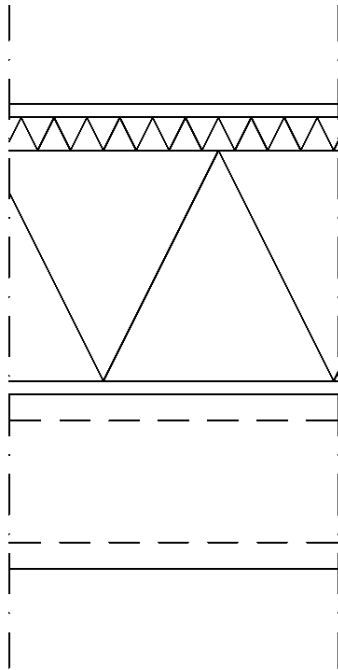
Ulkoseinä

- 1 Kaksikerrosrappaus
- 2 PEH-380
- 3 Laasti
- 4 Tasoite

Rakenteen omapaino $g_k=2,55 \text{ kN/m}^2$

Kuvio 1 Ulkoseinän rakennetyyppi

Yläpohjana on tasakatto, jonka kantavana rakenteena toimii ontelolaatta O27 (Kuvio 2). Läm-
mönneristeenä käytetään yhteensä 400 mm mineraalivillaa, veden eristeenä bitumikermiä ja kallis-
tukset toteutetaan betonivalulla. Välipohjarakenteena on ontelolaatta O20 ja kelluva teräsbetoni-
laatta (Kuvio 3).

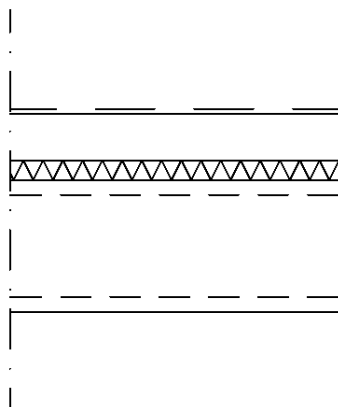


Yläpohja

- 1 Suojakiveys d=8-10mm
- 2 Bitumikermi
- 3 Uritettu mineraalivilla 50mm
- 4 Mineraalivilla 350mm
- 5 Höyrysulku
- 6 Kallistusbetoni 20mm
- 7 Ontelolaatta O27
- 8 Rappaus

Rakenteen omapaino $g_k=6,00\text{kN/m}^2$

Kuvio 2 Yläpohjan rakennetyyppi



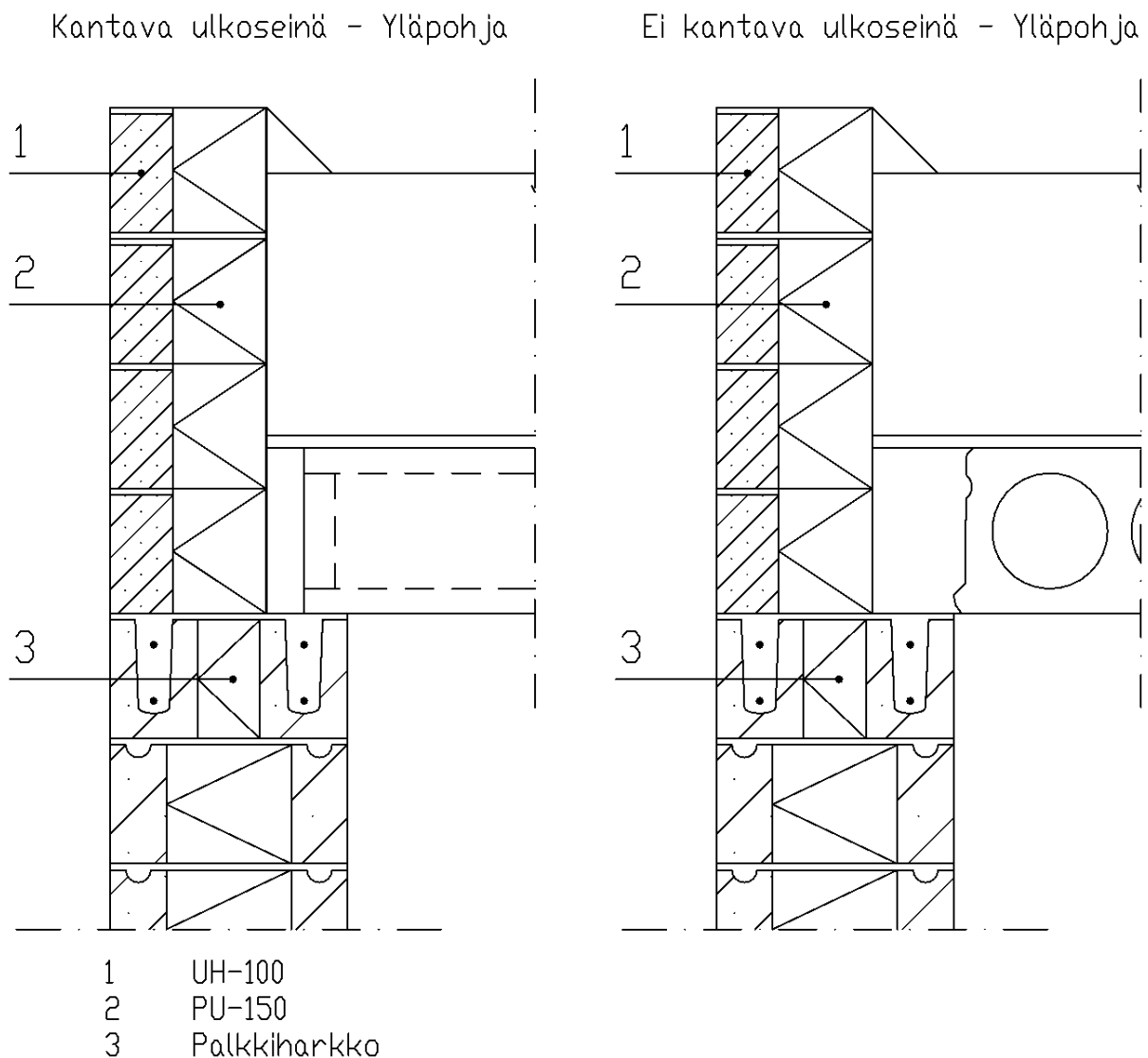
Välipohja

- 1 Lattiapinnoite
- 2 Solumuovi
- 3 Teräsbetonilaatta 70mm
- 4 Askeläänieriste
- 5 Ontelolaatta O20
- 6 Rappaus

Rakenteen omapaino $g_k=4,70\text{kN/m}^2$

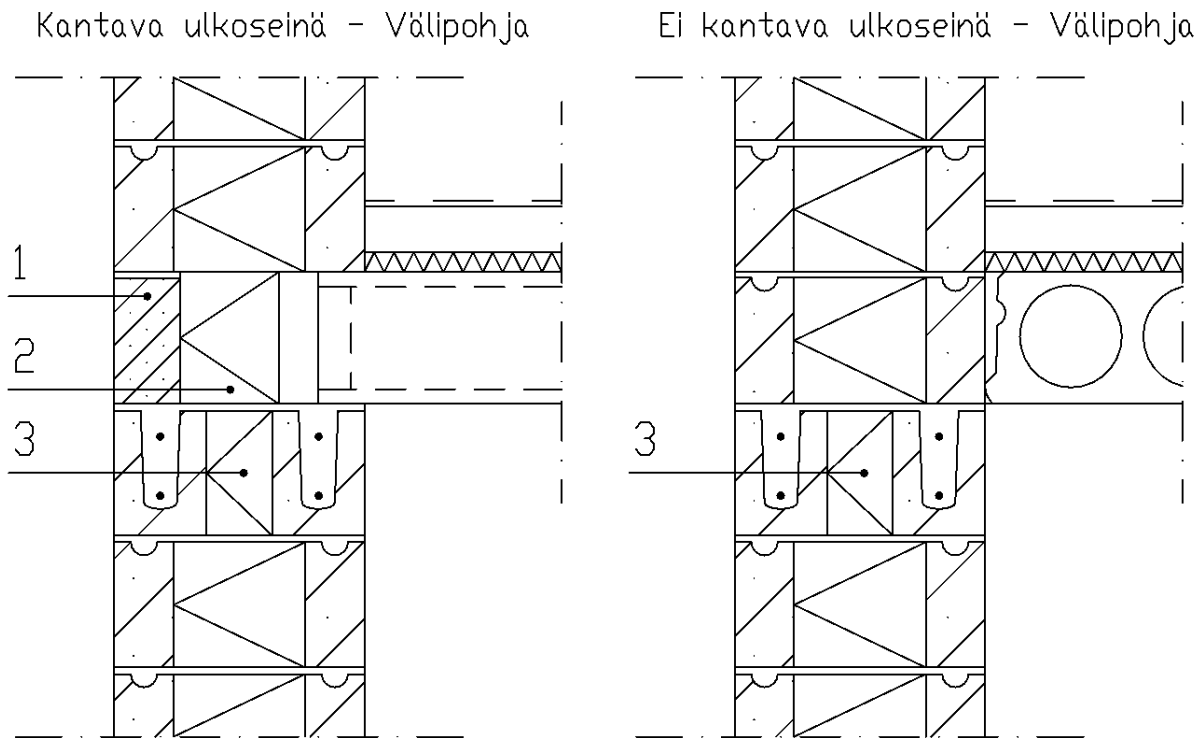
Kuvio 3 Välipohjan rakennetyyppi

Ylä- ja välipohjien liittymissä käytetään koko rakennuksen kiertävää palkkiharkkoveria. Kantavissa seinissä ylä- ja välipohjat tukeutuvat palkkiharkkojen päälle ja niiden tukipinta on 70 mm, jolloin kuorman vaikutuspisteen epäkeskisyyden seinän sisäkuoreen nähden on 10 mm. Liittyvien vaakarakenteiden kohdalla ulkoseinissä käytetään UH-100 umpiharkkoa ja PU-150 polyuretaani eristettä. Yläpohja liittymä kantavaan- ja ei kantavaan seinään on esitetty kuviossa 4, ja välipohjan liittymä kantavaan seinään kuviossa 5. Kuvioissa 4 ja 5 esitetty omapaino koostuu UH-100, PU-150 ja palkkiharkkojen painoista.



Rakenteen omapaino $G_k=1,00\text{kN/m}$

Kuvio 4 Yläpohjan liittymät ulkoseiniin



- | | |
|---|--------------|
| 1 | UH-100 |
| 2 | PU-150 |
| 3 | Palkkiharkko |

Rakenteen omapaino $G_k=0,64\text{kN/m}$

Kuvio 5 Välipohjan liittymät ulkoseiniin

3.2 Mitoitus

Mitoituslaskelmat suoritetaan eurokoodien SFS-EN 1991 ja SFS EN 1996 sekä Suomen kansallisten liitteiden mukaan. Apuna käytetään Suomen Rakennusinsinöörien Liiton RIL soveltamisohjeita RIL 201-1-2017 ja RIL 206-2010. Vaikka mitoitus suoritetaan työn kannalta olennaisilta osin kuten oikeassa rakennuskohteessa, eivät tämän työn laskelmat suoraan sovellu käytettäväksi todellisissa rakennuskohteissa.

Mitoituslaskelmissa käytetään rajatilamitoitusta. Mitoitus perustuu rajatiloja kuvaaviin rakenne- ja kuormitusmalleihin. Rajatilat eivät saa ylittyä käytettäessä kuormille ja materiaaleille ominaisia mitoitusarvoja. Mitoitusarvot muodostetaan käyttäen osavarmuuslukumenetelmää. (Tikanoja, Sumkin & Åström, 2017, 30.)

Kuormille ja rakennusmateriaaleille käytetään niille ominaisia osavarmuuslukuja. Kuormien osavarmuusluvut riippuvat kuormien pysyvyydestä. Pysyville kuormille käytettävät osavarmuusluvut ovat 0,9, 1,15 ja 1,35 tilanteesta riippuen. Muuttuvien kuormien osavarmuusluku on 1,5, edullisia muuttuvia kuormia ei huomioida. (Tikanoja, Sumkin & Åström, 2017, 53.) Muurauskappaleiden murtorajatilan materiaalin osavarmuusluku riippuu käytettävän muurauskappaleen kategoriasta ja laastista. Tässä työssä käytetään kategorian I muurauskappaleita ja ominaisuuslaastia, jolloin osavarmuusluku on 1,8. (Tikanoja, 2010, 25).

Murtorajatiloista tässä työssä keskitytään tutkimaan rakenteen lujuutta eli STR murtorajatilaa. Käyttörajojen tarkastelut tehdään tapauskohtaisesti tarpeen mukaan.

3.2.1 Kuormat

Kuormat jaetaan luokkiin niiden ajallisen muuttumisen perusteella. Luokkia ovat pysyvät kuormat, muuttuvat kuormat sekä onnettomuuskuormat (Tikanoja, Sumkin & Åström, 2017, 31). Tässä työssä olennaisia ovat pysyviä kuormista rakenteiden omapainot ja muuttuvista kuormista oleskelu-, lumi- sekä tuulikuormat. Onnettomuuskuormat jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Kuormien ja kuormayhdelmien laskentaan on käytetty työtä varten kehitettyjä excel-taulukkolaskentapohjia. Liitteessä 1 on lisäksi esitetty mitoitusmerkkin kannalta olennaisten kuormien ja kuormayhdistelmien laskenta käsin suoritettuna.

Omapaino

Rakenteiden omapaino määritetään käyttäen rakenteiden mittoja sekä valittujen materiaalien tiheyksiä (Tikanoja, Sumkin & Åström, 2017, 67). Tässä työssä omapaino pitää sisällään kantavien ja ei kantavien rakenteiden painot.

Hyötykuorma

Tilojen käytöstä aiheutuvat kuormat huomioidaan mitoituksessa hyötykuormana. Hyötykuormaksi luetaan muun muassa ihmiset, ihmisten kokoontumiset, huonekalut sekä varastoitavat tavarat. Hyötykuormat määritellään jakamalla rakennuksen ylä-, väli- ja alapohjien alat käyttötarkoituksen mukaisesti luokkiin. (Tikanoja, Sumkin & Åström, 2017, 68.) Tässä työssä tarkasteltava kohde toimii kokonaisuudessaan asunto- ja majoitustilana, jolloin oleskelukuorman ominaisarvo on 2,00 kN/m².

Lumi

Lumikuorma luokitellaan muuttuvaksi kiinteäksi kuormaksi. Tavallisesti katon lumikuorma määritetään lumikuorman muodon ja maassa olevan lumikuorman perusteella. Tarvittaessa huomioidaan myös tuulensuojaisuus ja katon vähäisestä lämmöneristyksestä johtuva lämpövuoto. (Tikanoja, Sumkin & Åström, 2017, 93 100-101.) Tässä työssä käsiteltävä kohde on Jyväskylässä sijaitseva tasakattoinen asuinrakennus, jolloin lumikuorman ominaisarvo rakennuksen katolla on 2,00 kN/m².

Tuuli

Tuulikuormat ovat luonteeltaan vaihtelevia ja ne luokitellaan muuttuviksi kiinteiksi kuormiksi. Tuulesta johtuva paine rakenteiden ulko- ja sisäpintoihin aiheuttaa pintoja vastaan kohtisuoria voimia. Rakennosia mitoitettaessa käytetään painekerroin menetelmää, jossa rakennuksen pintoihin vaikuttavat tuulenpaineet lasketaan pinnoille ominaisten kertoimien avulla. (Tikanoja, Sumkin & Åström, 2017, 124-127.) Tuulenpaineen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat sijainnista riippuva maastoluokka, rakennuksen korkeus sekä edellä mainittu painekerroin (Tikanoja, Sumkin & Åström, 2017, 138). Rakenteiden kantavuutta testataan eri korkuisilla rakennuksilla. Tässä työssä käytetyt tuulen nopeuspaineen ominaisarvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1 Tuulen nopeuspaineen ominaisarvot eri korkeuksilla maastoluokissa 3 ja 4

Kerros lkm. / kokonais korkeus	Maastoluokka III		Maastoluokka IV		Tuuli pitkää sivua vasten		Tuuli lyhyttä sivua vasten	
	$q_p(z)$	Yksikkö	$q_p(z)$	Yksikkö	q_{pi}	yksikkö	q_{pi}	yksikkö
2krs. / 7m	0,43	kN/m ²	0,32	kN/m ²	-0,05	kN/m ²	-0,30	kN/m ²
3krs. / 10m	0,47	kN/m ²	0,32	kN/m ²	-0,05	kN/m ²	-0,30	kN/m ²
4krs. / 13m	0,53	kN/m ²	0,37	kN/m ²	-0,05	kN/m ²	-0,30	kN/m ²
5krs. / 16m	0,57	kN/m ²	0,41	kN/m ²	-0,05	kN/m ²	-0,30	kN/m ²

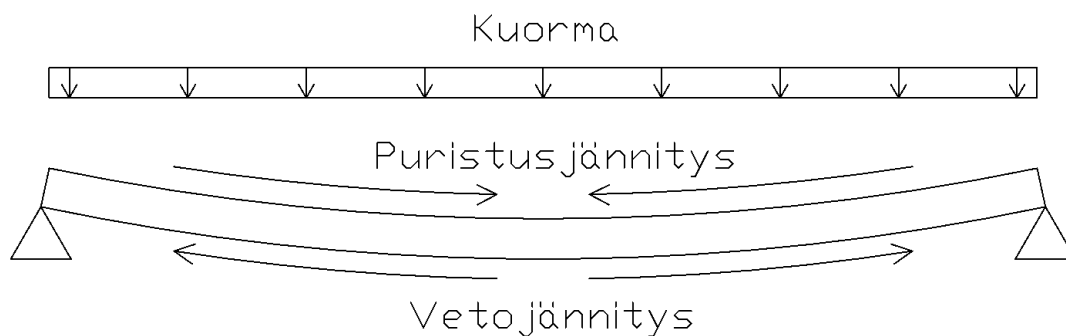
Kuormayhdistelmät

Rakennetta kuormittavat mitoitusarvot muodostetaan yhdistelemällä kuormatyypit toisiinsa käyttäen yhdistelykertoimia, ja murtorajatilan osavarmuuslukuja. Kuormayhdistelmien tarkoituksena on luoda rakenteelle tarpeeksi realistiset, mutta kuitenkin varmallalla puolella olevat kuormat. Kaikkien muuttuvien kuormatyyppien ei ajatella vaikuttavan samanaikaisesti täysivoimaisina, vaan yksi

kuormatyypeistä on määräävä ja loppujen vaikutusta pienennetään yhdistelykertoimilla. (Tikanoja, Sumkin & Åström, 2017, 39-40.)

Rasitukset

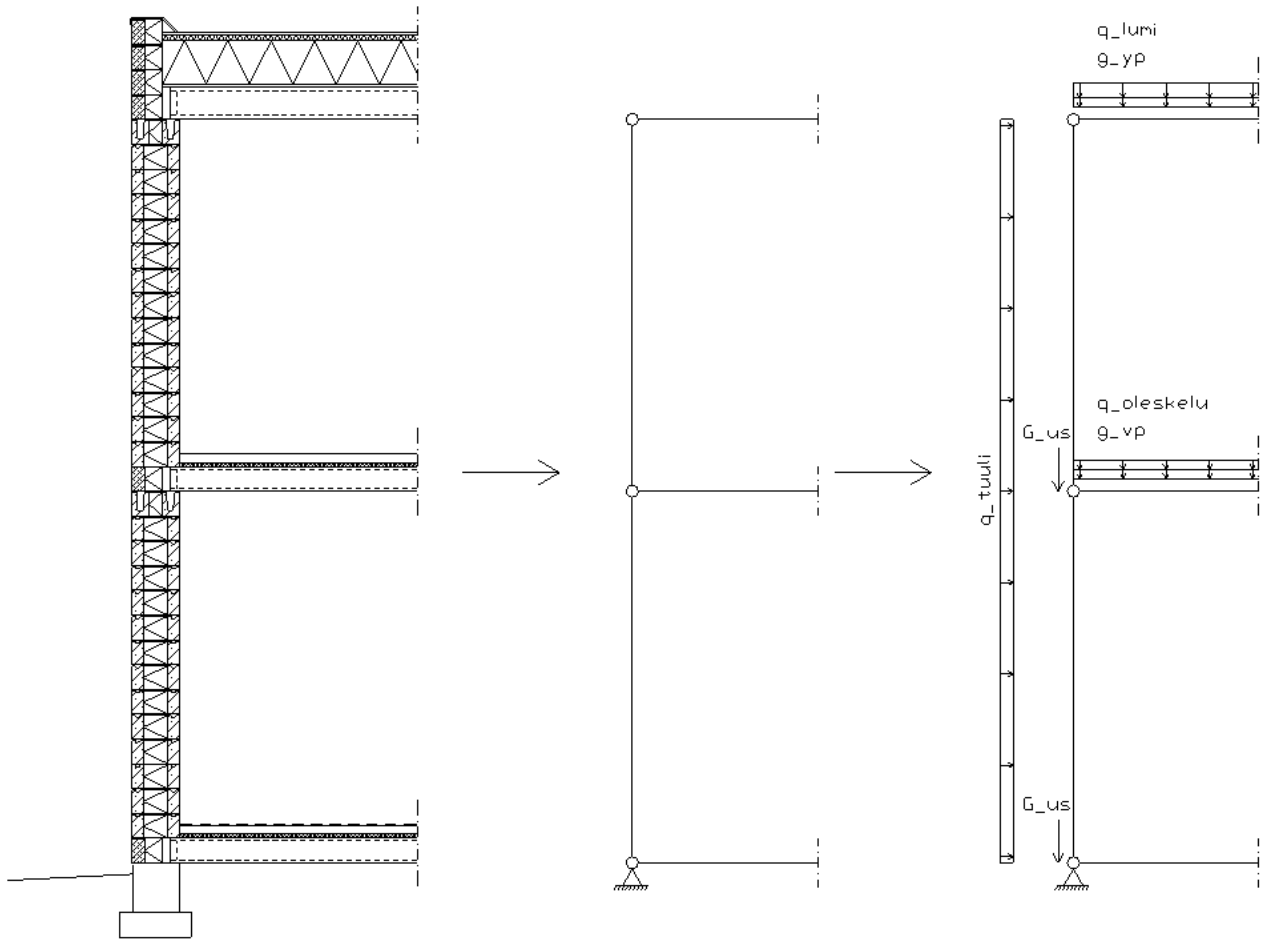
Kuormat aiheuttavat tarkasteltavalle rakenteelle jännityksiä, joiden suuruudet eivät saa ylittää rakenteen kestävyyttä. Erilaisia jännityksiä ovat puristus-, taivutus- sekä leikkausjännitys. Muuratut rakenteet kestävät hyvin puristusta mutta heikosti vetoa. Tämän takia taivutusmomentti muodostuu usein ongelmalliseksi muurattujen rakenteiden mitoituksessa, sillä taivutusmomentti aiheuttaa rakenteen vastakkaisille puolille vetoa ja puristusta (kuvio 6). Muuratun rakenteen kestävyyttä vetoa vastaan voidaan lisätä raudoituksella, joka samalla hillitsee kutistumishalkeilua.



Kuvio 6 Taivutusmomentin aiheuttamien puristuksen ja vedon muodostuminen

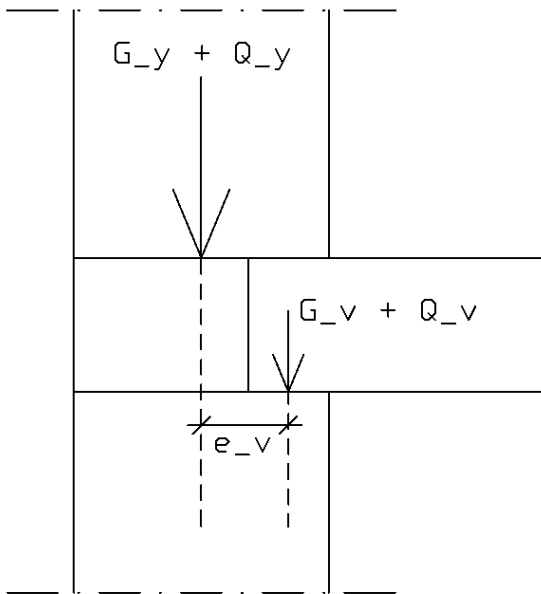
3.2.2 Rakenneanalyysi

Mitoituksessa käytetään rakennemalleja muuttujineen ja reunaehtoineen. Rakennemallin tulee perustua yleisesti tunnettuun rakennetekniikan teoriaan ja niiden avulla tulee voida tarkastella rakenteen toimintaa riittävällä tarkkuudella. (Tikanoja, Sumkin & Åström, 2017, 34). Tässä työssä käytetään kerroksittain nivelellistä rakennemallia (kuvio 7).



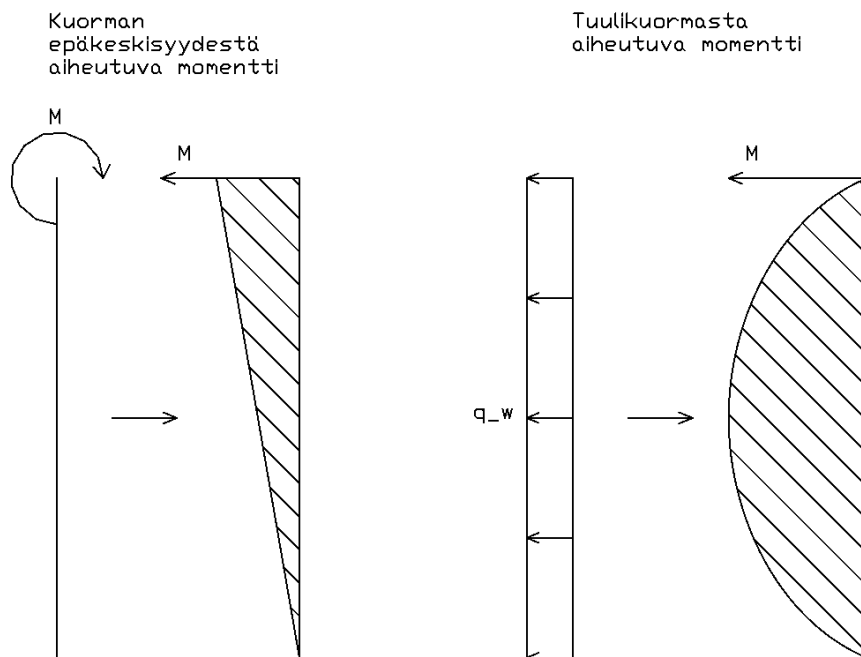
Kuvio 7 Kerroksittain nivelellisen rakennemallin muodostus

Kantavan ulkoseinän kannatteleman välipohjan kuormien vaikutuspiste sijaitsee ontelolaatan tukipinnan keskellä. Täten vaikutuspiste sijoittuu sisemmän harkkokuoren yläpään epäkeskeisesti, mistä aiheutuu sijaintiin taivutusmomentti (kuvio 8). Yläpuoliselta seinältä kuormat välittyvät keskeisesti. Seinän alapää on tuellaan keskeisesti. (Tikanoja, 2010, 62-64.)



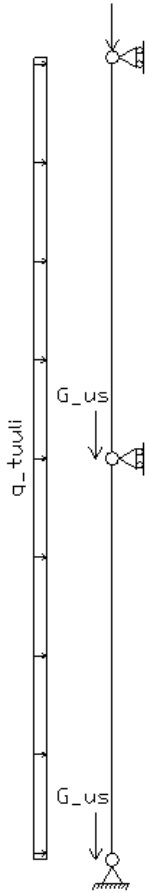
Kuvio 8 Välipohjan kuormat G_v ja Q_v välittyvät sisäkuoren yläpään epäkeskeisesti

Epäkeskisen kuormituksen aiheuttama taivutusmomentti lasketaan yhteen tuulikuorman aiheuttaman taivutusmomentin kanssa superpositioperiaatteen mukaisesti (kuvio 9). Tuloksena saadaan rakennetta rasittava kokonaistaivutusmomentti seinän eri korkeuksilla.



Kuvio 9 Rakenteen kokonaistaivutusmomentin komponentit

Ei kantavien seinien rakennemalli on edelleen kerroksittain nivelellinen. Ylä- ja välipohjalaatoilta ei välity kuormaa ei kantaville seinille mutta ne tukeva seiniä sivusuunnassa. Kuviossa 10 on esitetty ei kantavan seinän rakennemalli.



Kuvio 10 Ei kantavan seinän rakennemalli

3.2.3 Mitoitus puristukselle ja taivutukselle

Kohderakennuksen alimman kerroksen ulkoseinät mitoitetaan puristukselle ja taivutukselle päistään nivelöitynä sauvana. Tässä luvussa käydään läpi mitoituksen kulku. Liitteessä 1 on esitetty laske-
kentaesimerkki yhdestä työn mitoitus tapauksesta.

Mitoitus aloitetaan lähtötietojen määrittämisellä. Lähtötietoja ovat seinän vapaa korkeus, sisä- ja ulkokuoren paksuus sekä laastisauman leveys. Mitoitettavaa seinärakennetta käsitellään rakoseinä-
nänä ja kuorien välistä yhteistoimintaa hyödynnetään pystykuormia vastaan mitoitettaessa. Tämä

edellyttää, että muuraussiteiden vähimmäismäärä on 4 kpl neliömetrillä (Tikanoja, 2010, 90).

Tässä työssä sisäkuoren oletetaan kantavan niin ulko- kuin sisäkuorenkin pystykuormat. Vaakuormat jaetaan sisä- ja ulkokuorille niiden lujuuksien suhdetta käyttäen (Tikanoja, 2010, 70).

Kuormien mitoitusarvot ja kuormayhdistelmät on määritetty eurokoodi 0 ja eurokoodi 1 mukaisesti. Kuormayhdistelminä on huomioitu seuraavat:

- KY1 Rakenteiden omapainot
- KY2 Oleskelukuormat
- KY3 Lumi määräävä, oleskelu ja tuuli vaikuttavat
- KY4 Tuuli määräävä, oleskelu ja lumi vaikuttavat
- KY5 Tuuli määräävä, oleskelu vaikuttaa
- KY6 Tuuli

Muurin puristuslujuuden mitoitusarvo

Muurin puristuslujuuden ominaisarvo f_k määritetään kaavalla 1.

$$f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta \quad (1)$$

missä

f_b : on muurauskappaleiden normalisoitu puristuslujuus

f_m : on laastin puristuslujuus

K, α, β : ovat vakioita

Vakiot K, α ja β ottavat huomioon muurauskappaleiden tyyppin ja aukkoryhmän sekä käytettävän laastityypin (Tikanoja, 2010, 30-31).

Muurin puristuslujuuden mitoitusarvo f_d saadaan jakamalla f_k murtorajatilan materiaalin osavarmuusluvulla γ_M . Osavarmuuslukuun vaikuttavat muurauskappaleen kategoria sekä käytetty laasti. (Tikanoja, 2010, 25.) Muurauskappaleiden normalisoitu puristuslujuus, aukkoryhmä ja kategoria sekä laastin puristuslujuus saadaan valmistajan suoritusasoilmoituksesta.

Seinän tehollinen korkeus, tehollinen paksuus sekä hoikkuus

Seinän tehollisella korkeudella h_{ef} otetaan huomioon, miten mitoitettava seinä tukeutuu siihen liittyviin rakenteisiin ylä- ala- ja pystyreunoiltaan. Jotta seinän pystyreunoja voitaisiin pitää tuettuina, tulee niihin liittyvien seinien olla pituudeltaan vähintään 1/5 vapaasta kerroskorkeudesta ja paksuudeltaan vähintään 0,3 kertaa tuettavan seinän tehollinen paksuus. Tukiseiniä välin tulee myös olla korkeintaan 30 kertaa tuettavan seinän paksuus. Seinässä olevien aukkojen puoleisia reunoja pidetään vapaina, mikäli niiden vapaa korkeus ylittää 1/4 vapaasta kerroskorkeudesta, vapaa leveys ylittää 1/4 seinän pituudesta tai aukon kokonaisala ylittää 1/10 seinän alasta. Seinän tehollinen korkeus määritetään kaavalla 2. (Tikanoja, 2010, 50-51).

$$h_{ef} = \rho_n h \quad (2)$$

missä

h : on seinän vapaa kerroskorkeus

ρ_n : seinän tuentatavasta riippuva pienennyskerroin

Tässä työssä mitoitetaan seiiniä, jotka ovat tuettuja kolmelta ja neljältä sivulta, jolloin tuentatavasta riippuvana kertoimena käytetään ρ_3 ja ρ_4 . Ylä- ja alareunalta sekä yhdeltä pystyreunalta tuettun seinän pienennyskerroin ρ_3 lasketaan kaavalla 3 tai 4. Ylä- ja alareunalta sekä kahdelta pystyreunalta tuettun seinän pienennyskerroin ρ_4 lasketaan kaavalla 5 tai 6. (Tikanoja, 2010, 52-53).

$$\rho_3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_2 h}{3l}\right)^2} \rho_2, \text{ kun } h \leq 3,5l \quad (3)$$

tai

$$\rho_3 = \frac{1,5l}{h} \geq 0,3, \text{ kun } h > 3,5l \quad (4)$$

$$\rho_4 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_2 h}{l}\right)^2} \rho_2, \text{ kun } h \leq 1,15l \quad (5)$$

tai

$$\rho_4 = \frac{0,5l}{h}, \text{ kun } h > 1,15l \quad (6)$$

missä

$\rho_2 = 1,0$, kun rakennemalli on päistään nivelöity sauva

l : on seinän pituus

Rakoseinän tehollinen paksuus määritetään kaavalla 7, edellyttäen että ulko- ja sisäkuori ovat sidottu toisiinsa käyttäen muuraussiteitä (Tikanoja, 2010, 53).

$$t_{ef} = \sqrt[3]{k_{tef}t_1^3 + t_2^3} \quad (7)$$

missä

t_1 ja t_2 : ovat seinäpuoliskojen paksuudet

k_{tef} : on seinäpuoliskojen kimmokertoimien suhteen huomioiva kerroin

Jakamalla tehollinen korkeus tehollisella paksuudella saadaan seinän hoikkuusluku λ . Hoikkuusluvun maksimiarvo on 27, kun kyseessä on pääasiassa pystykuormitettu seinä. (Tikanoja, 2010, 53.)

Mikäli hoikkuusluku ylittää arvon 27 tulee parantaa sivusuuntaista tuentaa tai lisätä seinän paksuutta.

Mitoituskestävyydet

Koska rasitukset vaihtelevat seinän eri korkeuksilla, tulee mitoituskestävyys määrittää siellä missä rasitukset ovat suurimmat. Ei kuitenkaan ole itsestään selvää missä rasitusten vaikutus on suurin, joten mitoitus suoritetaan seinän yläpäässä, seinän puolivälissä sekä seinän alapäässä. Yläpäässä puristusrasitus on pienin, mutta toisen kerroksen välipohjan epäkeskisen tuennan aiheuttama taivutusmomentti on suurimmillaan. Puolivälissä puristusrasitus on yläpäästä suurempi ja tuulikuorman aiheuttama taivutusmomentti on suurimmillaan, mutta toisen kerroksen välipohjan aiheuttama taivutusmomentti on yläpäästä vähäisempi. Alapäässä puristusrasitus on suurimmillaan mutta taivutusmomentti on nolla, sillä tukea käsitellään nivelenä ja kuormitus on keskeinen.

Seinän yläpäässä vallitsevat rasitukset:

- Puristus:
 - Yläpuolisten rakenteiden omapainot
 - Yläpuoliset hyötykuormat
 - Luomikuorma
- Taivutusmomentti
 - 2. krs. välipohjan epäkeskisyyden vaikutus

Seinän puolivälissä vallitsevat rasitukset:

- Puristus:
 - Kaikki seinän yläpään kuormat
 - Mitoitettavan seinän omapaino puolivälin yläpuolella
- Taivutusmomentti:
 - Puolet 2. krs. välipohjan epäkeskisyyden vaikutuksesta
 - Tuulikuorman aiheuttama momentti

Seinän alapäässä vallitsevat rasitukset:

- Puristus:
 - Kaikki seinän yläpään kuormat
 - Mitoitettavan seinän omapaino kokonaisuudessaan
- Taivutusmomentti nolla

Seinän kestävyttä tarkastellaan sen geometrian, epäkeskisyyksien vaikutusten ja materiaaliominaisuuksien perusteella. Mitoitusehdon mukaisesti mitoituskuorman tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin seinän kestävyden mitoitusarvo. Seinän mitoituskestävyys puristusta vastaan saadaan kaavalla 8. (Tikanoja, 2010, 61.)

$$N_{Rd} = \Phi t f_d \quad (8)$$

missä

Φ : on hoikkuuden ja kuormituksen epäkeskisyyden pienennyskerroin
 t : on seinän paksuus
 f_d : on muurin puristuslujuuden mitoitusarvo

Pienennyskerroimella Φ huomioidaan hoikkuuden ja kuormituksen epäkeskisyyden vaikutukset seinän kestävyteen sen eri korkeuksilla. Seinän ylä- tai alapään mitoituskestävyttä laskettaessa Φ_i saadaan kaavalla 9. (Tikanoja, 2010, 62.)

$$\Phi = 1 - 2 \frac{e_i}{t} \quad (9)$$

missä

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} + e_{init} \geq 0,05t \quad (10)$$

missä

M_{id} : on taivutusmomentin mitoitusarvo

N_{id} :	on normaalivoiman mitoitusarvo
e_{he} :	on vaakakuormien aiheuttama epäkeskisyyys
e_{init} :	on alkuepäkeskisyyys
t :	on seinän paksuus

Kaavan 10 termi, seinän ylä- tai alapään epäkeskisyyys e_i ottaa huomioon seinään vaikuttavien kuormien aiheuttaman taivutusmomentin sekä eri syistä aiheutuvat epäkeskisyydet (Tikanoja, 2010, 62).

Seinän puolivälin pienennyskerroin Φ_m voidaan laskea käyttämällä kaavaa 11 (Tikanoja, 2010, 104). Vaihtoehtoisesti Tikanoja (2010, 63-66) antaa Φ_m :n arvoille materiaalin kimmomoduuli koh-
taiset kuvaajat.

$$\Phi_m = A_1 e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (11)$$

missä

$$A_1 = 1 - 2 \frac{e_{mk}}{t}$$

$$u = \frac{\lambda - 0,063}{0,73 - 1,17 \frac{e_{mk}}{t}}$$

missä

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{\frac{f_k}{E}}$$

E : on muurauskappaleen pitkäaikaiskimmokerroin

$$e_{mk} = e_m \geq 0,05t$$

missä

$$e_m = \frac{M_{md}}{N_{md}} + e_{hm} \pm e_{init}$$

Seinän kestävyyttä taivutusmomenttia vastaan ei erikseen tarkasteta, sillä taivutusmomentin vaikutus on sisällytetty seinän puristuskestävyyden laskentaan. Taivutusmomentin lisäys lopulta pienentää hoikkuuden ja kuormituksen kerrointa Φ , joka johtaa puristuskestävyyden alenemiseen.

3.2.4 Mitoitus tuulenpaineelle

Kohderakennuksen ylimmän kerroksen ei kantavat seinät mitoitetaan tuulenpaineelle. Tässä luvussa käydään läpi mitoituksen kulku. Liitteessä 1 on esitetty laskentaesimerkki yhdestä työn mitoitustapauksesta. Lähtötiedot ovat samat kuin mitoitettaessa puristukselle ja taivutukselle: seinän pituus, seinän vapaa korkeus, seinän- ja laastisauman paksuudet.

Muurin mitoituslujuudet

Mitotettaessa muurattua rakennetta taivutukselle, tulee taivutuskestävyys tarkastaa sekä vaakasaumojen että pystysaumojen suuntaisissa murtotasossa. Taivutusvetolujuuden ominaisarvot vaakasaumojen suuntaisessa murtotasossa f_{xk1} sekä vaakasaumojen vastaan kohtisuorassa murtotasossa f_{xk2} , saadaan valmistajan suoritustasoilmoituksesta. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää kansallisen liitteen taulukkoarvoja, kunhan on varmistettu, etteivät ne ole suurempia kuin valmistajan suoritustasoilmoituksessa annetut arvot. (Tikanoja, 2010, 39-41.)

Valmistajan suoritustasoilmoituksessa on annettu PEH-380 kevytsoraeristeharkon taivutusvetolujuuksille vähimmäisarvot, jotka ovat $f_{xk1} \geq 0,20 \text{ N/mm}^2$ ja $f_{xk2} \geq 0,13 \text{ N/mm}^2$ (Suoritustasoilmoitukset-harkot, 2021, 9). Tämän työn laskennassa käytetään näitä minimiarvoja.

Taivutusvetolujuuksien lisäksi mitoituksessa tarvitaan muurin puristuslujuuden arvo, jonka määrittäminen on esitetty aiemmin tässä työssä. Lujuuksien mitoitusarvot saadaan jakamalla ominaisarvot murtorajatilan materiaalin osavarmuusluvulla γ_M .

Rakenteeseen vaikuttavaa pystysuuntaista puristusjännitystä voidaan hyödyntää käyttämällä korotettua taivutusvetolujuutta $f_{xd1,app}$ joka määritetään kaavalla 12. (Tikanoja, 2010, 69-70.)

$$f_{xd1,app} = f_{xd1} + \sigma_d \quad (12)$$

missä

f_{xd1} : on taivutusvetolujuuden mitoitusarvo vaakasaumojen suuntaisessa murtotasossa
 σ_d : on seinän pystysuuntaisista pysyvistä kuormista aiheutuva puristusjännitys

Seinän pystysuuntainen puristusjännitys saa olla enintään $0,2f_d$. Mikäli puristusjännitys ylittää tämän arvon, tulee rakenne mitoittaa puristukselle. (Tikanoja, 2010, 70.)

Alimman kerroksen ei kantavan seinän tapauksessa pystysuuntaisen puristusjännityksen suuruutta eri tapauksissa hyödynnetään käytettävän mitoituksen valinnassa. Rakenne tulee mitoittaa puristukselle, mikäli puristusjännityksen suuruus ylittää arvon $0,2f_d$.

Momenttikestävyyden mitoitusarvot

Seinän momenttikestävyyden mitoitusarvot M_{Rd} määritetään vaaka- ja pystysuuntaisessa murtotasossa sekä ulko- että sisäkuorelle. Momenttikestävyydet määritetään vaakasuuntaisessa murtotasossa kaavalla 13 ja pystysuuntaisessa murtotasossa kaavalla 14. (Tikanoja, 2010, 69.)

$$M_{Rd1} = f_{xd1,app}Z \quad (13)$$

$$M_{Rd2} = f_{xd2}Z \quad (14)$$

missä

$$Z = \frac{t^2}{6} \quad \text{on poikkileikkauksen kimmainen taivutusvastus} \quad (15)$$

Kaavasta 15 huomataan, että harkkokuoren paksuudella t on suuri merkitys poikkileikkauksen kimmoiseen taivutusvastukseen ja sitä myötä seinän momenttikestävyyteen.

Momentin mitoitusarvot

Momentin mitoitusarvot määritetään niin ikään vaaka- ja pystysuuntaisissa murtotasossa. Momenttien suuruuksiin vaikuttavat olennaisesti seinän reunojen tuenta. Reunat voivat olla vapaita, vapaasti tuettuja tai jäykästi kiinnitettyjä/jatkuvia. Vaakakuormitetun seinän pystyreunaa voidaan pitää jäykästi tuettuna, mikäli se on limitetty tukena toimivaan pystykuormitettuun seinään. Kiinnityksen tapahtuessa sitein, oletetaan reunan olevan osittain kiinnitetty. Liikuntasäily aiheuttaa seinään vapaan reunan. Vaikka rakoseinän kuorista vain toinen on limitetty tuelle, voidaan molempia kuoria pitää jatkuvina, mikäli kuorten välillä käytetään riittävästi siteitä. (Tikanoja, 2010, 59.)

Momentin mitoitusarvo M_{Ed} määritetään kolmelta ja neljältä reunalta tuetuille seinille vaakasuuntaisessa murtotasossa kaavalla 16 ja pystysuuntaisessa murtotasossa kaavalla 17 (Tikanoja, 2010, 59).

$$M_{Ed1} = \alpha_1 W_{Ed} l^2 \quad (16)$$

$$M_{Ed2} = \alpha_2 W_{Ed} l^2 \quad (17)$$

missä

α_1 ja α_2 : ovat plastisuus- ja kimmoteorian mukaisia, seinän reunojen tuennasta riippuvia kertoimia

W_{Ed} : on vaakakuorman mitoitusarvo

l on seinän pituus

Yksinkertaisille seinille kertoimet α_1 ja α_2 saadaan RIL 206-2010 Liite E taulukoista. Kyseisessä liitteessä on esitetty taulukoituna α_2 :n arvoja eri tuentatapauksille. Kertoimen α_2 arvoon vaikuttavat seinän vaaka- ja pystysuuntaisten taivutuslujuuksien välinen ortogonaalisuhde μ sekä seinän korkeuden ja pituuden suhde. Ortogonaalisuhteen μ laskennassa voidaan käyttää korotettua taivutusvetolujuutta $f_{xd1,app}$, jolloin seinän pystysuuntaisen kuormituksen lisääminen kasvattaa myös seinän kestävyttä tuulenpainetta vastaan. Kertoimien α_1 ja α_2 välillä pätee kaava 18. (Tikanoja, 2010, 59.)

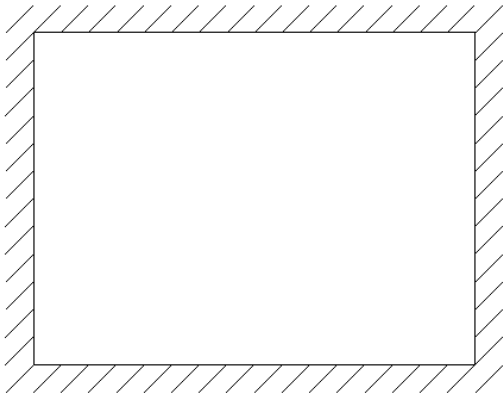
$$\alpha_1 = \mu \alpha_2 \quad (18)$$

missä

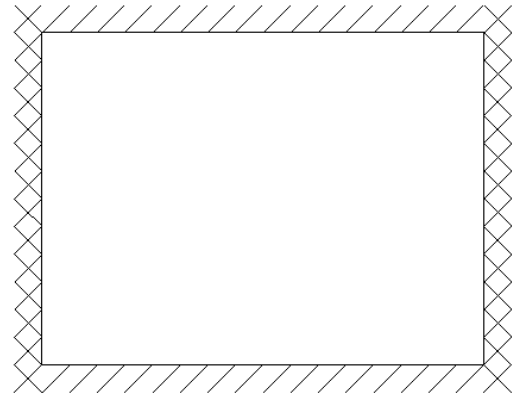
μ : on seinän taivutuslujuuksien mitoitusarvojen ortogonaalisuhde, f_{xd1}/f_{dx2} tai $f_{xd1,app}/f_{xd2}$

Tässä työssä käsitellään em. liitteen tuentatapauksia E ja G (kuvio 11). Tuentatapaus E vastaa vaaka- ja pystyreunoilta vapaasti tuettua seinää ja tuentatapaus G vastaa vaakareunoilta vapaasti tuettua ja pystyreunoilta jäykästi tuettua seinää.

Tuentatapaus E



Tuentatapaus G



////// Vapaasti tuettu reuna

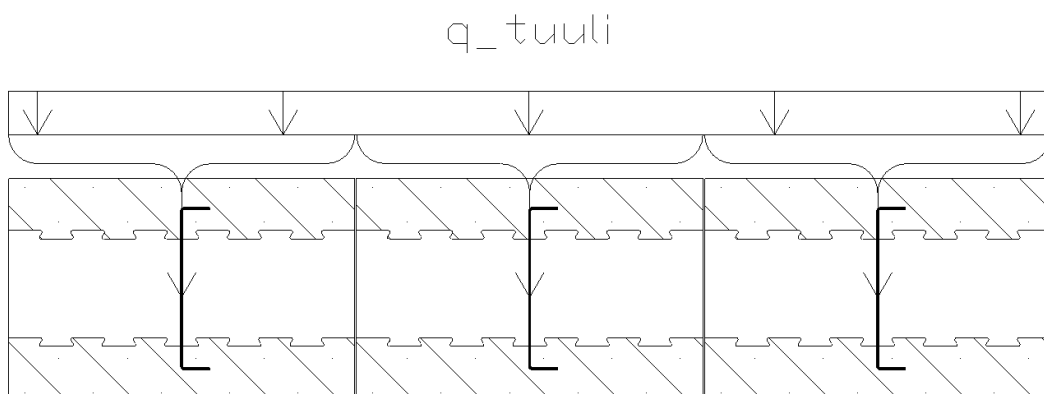
XXXXXX Jäykästi kiinnitetty/jatkuva reuna

Kuvio 11 Seinän vaakasuuntaiset tuentatapaukset E ja G

Rakoseinän vaakakuorma voidaan jakaa seinän ulko- ja sisäkuorelle niiden momenttikestävyyksien mitoitusarvojen tai jäykkyyksien suhteessa. Tällöin puoliskojen väliset siteet tulee mitoittaa siirrettävälle voimalle. (Tikanoja, 2010, 70.)

3.2.5 Muuraussiteiden mitoitus

Muuraussiteillä välitetään harkkokuorten välisiä voimia. Kuviossa 12 on esitetty tuulikuorman välittyminen ulkokuorelta siteiden kautta sisäkuorelle.



Kuvio 12 Muuraussiteiden toimintaperiaate

Muuraussiteitä mitoitettaessa tulee huomioida sidottavien rakenneosien välinen liike, tuulikuorma ja rakoseinän seinäpuoliskojen välillä siirtyvät voimat. Siteiden minimimäärä pinta-alayksikköä kohtaan n_t saadaan kaavalla 19. (Tikanoja, 2010, 71-72.)

$$n_t \geq \frac{W_{Ed}}{F_d} \quad (19)$$

missä

W_{Ed} : on siteisiin kohdistuva vaakakuorma pinta-alayksikköä kohden
 F_d : on muuraussiteiden puristus- tai vetolujuuden mitoitussarvo

Valmistaja ilmoittaa standardin EN 845-1 mukaisten muuraussiteiden lujuuden ominaisarvon, josta saadaan mitoitussarvo jakamalla se varmuusluvulla γ_M (Tikanoja, 2010, 72). Vaihtoehtoisesti muuraussiteen voi mitoitaa puristettuna sauvana asiaankuuluvien teräsrakenteiden mitoitussarvojen mukaisesti.

3.2.6 Palomitoitus

Palomitoituksessa muuratun seinän minimipaksuus t_F määritetään taulukkomitoituksella standardin SFS EN1996-1-2 kansallisen liitteen mukaisesti. Mikäli rakoseinän kuorien välissä on palavaa materiaalia, tai ulkokuori on sisäkuorta ohuempi, tulee rakoseinän sisemmän kuoren minimipaksuus määrittää kuten yksinkertaisella seinällä. Palomitoitus voidaan suorittaa myös laskennallisesti. Lähtötietojen huonon saatavuuden takia laskentamenetelmien käyttö on kuitenkin lähes mahdotonta. (Tikanoja, 2010, 109.)

Ulomman seinäkuoren paksuus t_1 :	90 mm
Sisemmän seinäkuoren paksuus t_2 :	90 mm
Runkoaineen tiheys:	750...850 kg/m ³
Aukkoryhmä:	1

2-Kerroksinen rakennus:

Rakennuksen paloluokka:	P2
Kantavien rakenteiden palonkesto-aika vaatimus:	R30
Osastovien rakenteiden palonkesto-aika vaatimus:	EI30

Ei kantavat seinät (E30):

Sisäkuoren minimipaksuus: $t_F = 70 \text{ mm} \leq t_2$ Ok

Kantavat seinät (R30):

Molempien kuorien minimi paksuus: $t_F = 90 \leq t_1, t_2$ Ok

Sisäkuoren minimipaksuus: $t_F = 100 \text{ mm} > t_2$ Ei ok

Yli 2-kerroksinen, alle 28m korkea rakennus:

Rakennuksen paloluokka: P1

Kantavien rakenteiden palonkesto aika vaatimus: R60

Osastovien rakenteiden palonkesto aika vaatimus: EI60

Ei kantavat seinät (EI60):

Sisäkuoren minimipaksuus: $t_F = 70 \text{ mm} \leq t_2$ Ok

Kantavat seinät (R60):

Molempien kuorien minimi paksuus: $t_F = 90 \text{ mm} \leq t_1, t_2$ Ok

Sisäkuoren minimipaksuus (R60): $t_F = 125 \text{ mm} > t_2$ Ei ok

Sisäkuoren minimipaksuus (REI60): $t_F = 100 \text{ mm} > t_2$ Ei ok

Taulukkomitoituksen lähde: (Tikanoja, 2010, 113-115).

Sisäkuoren paksuus ei ole riittävä kantavien seinien toteutukseen palonkesto aikavaatimuksen ollessa R30 tai R60. Palonkesto aikavaatimuksilla EI30 ja EI60, ei kantavien seinien toteutus sitä vastoin on mahdollista.

4 Tulokset

Työn tuloksena esitellään taulukoituja mitoitustuloksia PEH-380 -kevytsoraeristeharkoin toteutetuista rakenteista, sekä keskeisimpiä löydöksiä artikkeli-, kirjallisuus- ja tutkimuslähteistä. Taulukoissa esitetään rakenteeseen kohdistuvan mitoitukskuorman prosenttiosuus rakenteen mitoituskäytävyydestä eli käyttöaste. Mitoitustulosten tulkinnan helpottamiseksi taulukoiden solut on värjätty käyttöasteen mukaan: alle 85 % on merkitty vihreällä, 85-100 % keltaisella ja yli 100 % punaisella. Taulukoihin ja taulukoiden otsikoihin on merkitty olennaiset mitoituksessa käytetyt tiedot.

4.1 Ylimmän kerroksen ei kantavan seinän mitoitus

Ylimmän kerroksen ei kantava seinä mitoitettiin tuulenpainetta vastaan. Mitoituslaskuissa käytetyt muuttujat olivat seinän pituus, tuentatapaus, rakennuksen kerrosten lukumäärä sekä maastoluokka. Taulukoissa W_{Ed} merkitsee tuulikuorman mitoitusarvoa ja n_{Ed} normaalivoiman mitoitusarvoa. RIL206-2010 Liite E:n mukaisista tuentatapauksista tutkittiin E ja G. Tuentatapaus E vastaa kaikilta reunoiltaan vapaasti tuettua seinää ja tuentatapaus G vastaa ylä- ja alareunoiltaan vapaasti tuettua ja pystyreunoiltaan jäykästi kiinnitettyä seinää.

Rakenteen käyttöaste maastoluokassa 3 on esitetty taulukoissa 2 ja 3 ja maastoluokassa 4 taulukoissa 4 ja 5. Maastoluokassa 4 tuulen nopeuspaineen ominaisarvo pysyy samana 10 metriin asti, tästä johtuen 2- ja 3-kerroksisen rakennuksen mitoistulokset ovat samat eikä taulukoissa 4 ja 5 ole esitetty 2-kerroksisen rakennuksen tuloksia. Tuloksista on huomattavissa tuulenpaineen vaikutus muurattuun rakenteeseen. Vertailemalla eri maastoluokista saatuja tuloksia, voidaan havaita, että maastoluokassa 4 on mahdollista toteuttaa noin metrin pidempiä seiniä kuin maastoluokassa 3.

Tuentatavasta riippuvalla kertoimella α_2 ja sitä myötä seinän pituudella ja tuentatapauksella on suuri merkitys mitoituksen tulokseen. Kertoimen α_2 arvot on esitetty taulukoituna RIL206-2010 Liitteessä E. Kahden α_2 arvon välistä interpolointia ei ole erikseen sallittu, joten tässä työssä käytetään epäedullisempaa arvoa. Tästä on seurauksena epäjohdonmukaisuuksia mitoituksen tuloksissa kun α_2 :n arvo vaihtuu seinän pituutta kasvatettaessa. Tämä on erityisen huomattavaa taulukoissa 4 ja 5, joissa käyttöaste paikoin pienenee seinän pituuden kasvaessa.

Taulukko 2 Ylimmän kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet maastoluokassa 3 tuentatapauksella G

		Seinän pituus						W_{Ed}	n_{Ed}	Kuormat
		2,00m	2,25m	2,50m	2,75m	3,00m	3,25m			
Kerros lkm.	2	44 %	50 %	62 %	75 %	76 %	89 %	103 %	0,585 kN/m ²	4,72 kN/m
	3	48 %	54 %	67 %	81 %	81 %	96 %	111 %	0,630 kN/m ²	4,72 kN/m
	4	55 %	62 %	76 %	92 %	93 %	109 %		0,720 kN/m ²	4,72 kN/m
	5	58 %	66 %	81 %	98 %	99 %	116 %		0,765 kN/m ²	4,72 kN/m
			0,037	0,033	0,033	0,033	0,028	0,028	0,028	
		Tuentatavasta riippuva kerroin α_2								

Taulukko 3 Ylimmän kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet maastoluokassa 3 tunetatapauksella E

		Seinän pituus				W_{Ed}	n_{Ed}	
		2,00m	2,25m	2,50m	2,75m			
Kerros lkm.	2	71 %	77 %	96 %	116 %	0,585 kN/m ²	4,72 kN/m	Kuormat
	3	76 %	83 %	103 %		0,630 kN/m ²	4,72 kN/m	
	4	87 %	95 %	118 %		0,720 kN/m ²	4,72 kN/m	
	5	93 %	101 %			0,765 kN/m ²	4,72 kN/m	
		0,059	0,051	0,051	0,051			
		Tuentatavasta riippuva kerroin α_2						

Taulukko 4 Ylimmän kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet maastoluokassa 4 tunetatapauksella G

		Seinän pituus						W_{Ed}	n_{Ed}		
		3,25m	3,50m	3,75m	4,00m	4,25m	4,50m				4,75m
Krs.	3	66 %	77 %	69 %	79 %	90 %	99 %	111 %	0,435 kN/m ²	4,72 kN/m	Kuormat
	4	75 %	87 %	79 %	89 %	101 %			0,495 kN/m ²	4,72 kN/m	
	5	84 %	98 %	88 %	100 %				0,555 kN/m ²	4,72 kN/m	
		0,028	0,028	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022			
		Tuentatavasta riippuva kerroin α_2									

Taulukko 5 Ylimmän kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet maastoluokassa 4 tunetatapauksella E

		Seinän pituus						W_{Ed}	n_{Ed}		
		2,00m	2,25m	2,50m	2,75m	3,00m	3,25m				3,50m
Krs.	3	53 %	58 %	71 %	86 %	84 %	99 %	115 %	0,435 kN/m ²	4,72 kN/m	Kuormat
	4	60 %	66 %	81 %	98 %	96 %	113 %		0,495 kN/m ²	4,72 kN/m	
	5	67 %	73 %	91 %	109 %				0,555 kN/m ²	4,72 kN/m	
		0,059	0,051	0,051	0,051	0,042	0,042	0,042			
		Tuentatavasta riippuva kerroin α_2									

4.2 Alimman kerroksen ei kantavan seinän mitoitus

Mitoitettaessa alimman kerroksen ei kantavaa seinää, ei ollut etukäteen itsestään selvää, tulisiko rakenne mitoittaa tuulenpaineelle vai puristukselle ja taivutukselle. Rajana käytettiin seinän pystysuuntaisen puristuksen σ_d suuruutta, mikäli σ_d ylitti arvon $0,2f_d$, mitoitettiin rakenne puristukselle ja taivutukselle. σ_d alittaessa arvon $0,2f_d$ tulisi rakenne mitoittaa tuulenpaineelle. Alimman kerroksen ei kantavan seinän mitoitus tuullen paineelle rajattiin tämän työn ulkopuolelle, sillä vastaava mitoitus suoritettiin epäedullisemmin rasiitetulle ylimmän kerroksen ei kantavalle seinälle, eikä mitoituksen toistaminen tälle rakenteelle toisi lisäarvoa tutkimukselle.

Mitoitus puristukselle ja taivutukselle suoritettiin 5-kerroksisen esimerkkirakennuksen alimman kerroksen ei kantavalle seinälle. Tuentatapauksista mitoitettiin ylä- ja alareunaltaan sekä yhdeltä pystyreunalta tuettu seinä (taulukko 6) ja ylä- ja alareunalta sekä kahdelta pystyreunalta tuettu seinä (taulukko 7). Maastoluokista tutkittiin 3 ja 4. Taulukoissa N_d tarkoittaa normaalivoiman mitoitusarvo ja M_d taivutusmomentin mitoitusarvoa. Taulukoiden 6 ja 7 tuloksia vertailemalla havaitaan seinän tuennan suuri merkitys sen kantavuuteen, neljältä sivulta tuettuna seinän pituutta voidaan tässä tapauksessa kasvattaa yli kaksin kertaiseksi kolmelta sivulta tuettuun verrattuna.

Taulukko 6 Alimman kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet kolmelta reunalta tuettuna

	Seinän pituus								N_d	M_d
	1,00m	1,25m	1,50m	1,75m	2,00m	2,25m	2,50m	2,75m		
Maastolk. 3	75 %	98 %	124 %						38,80 kN/m	0,617 kNm
Maastolk. 4	58 %	71 %	85 %	99 %	111 %				38,80 kN/m	0,426 kNm
ρ_3	0,53	0,64	0,72	0,78	0,82	0,96	0,97	0,97		

Taulukko 7 Alimman kerroksen ei kantavan seinän käyttöasteet neljältä reunalta tuettuna

	Seinän pituus								N_d	M_d
	2,00m	2,50m	3,00m	3,50m	4,00m	4,50m	5,00m	5,50m		
Maastolk. 3	56 %	63 %	75 %	91 %	107 %				38,80 kN/m	0,617 kNm
Maastolk. 4	46 %	51 %	58 %	67 %	76 %	85 %	94 %	102 %	38,80 kN/m	0,426 kNm
ρ_4	0,36	0,44	0,53	0,61	0,67	0,72	0,76	0,79		

4.3 Alimman kerroksen kantavan seinän mitoitus

Mitoitettava rakenne ei läpäise RIL206-2010 Liitteen 4 taulukkomuotoista palomitoitusta. 2-kerroksisen P2-paloluokan asuinrakennusten kantavien seinien palonkestoavaatimus on R30 ja yli 2-kerroksisten P1-paloluokan asuinrakennusten R60. Koska harkkokuorien välinen eriste on palavaa materiaalia, tulee sisemmän kuoren minimipaksuus mitoittaa kuin yksikertaisella seinällä. REI30 ja REI60 palonkestoajat saavutetaan 100 mm materiaalivahvuudella, kun taas PEH-380 harkkokuoret ovat 90 mm paksuiset.

Taulukossa 8 on esitetty 3-kerroksisen rakennuksen alimman kerroksen kantavan seinän mitoituksen tulokset maastoluokassa 3 ja taulukossa 9 maastoluokassa 4. Tuentatapaukseltaan seinä on kaikilta reunoiltaan tuettu ja seinän pituus vaihtelee välillä 2-4,75 m. Seinä kannattelee välipohjalaatastoa, jonka jänneväli vaihtelee välillä 2-6 m. Vertaamalla taulukoita 8 ja 9 keskenään huomataan taivutusmomentin suuri vaikutus rakenteen kestävyteen.

Taulukko 8 Kantavan päätyseinän käyttöasteet 3-kerroksisessa rakennuksessa maastoluokassa 3

		Seinän pituus					N_d	M_d	
		2,00m	2,25m	2,50m	2,75m	3,00m			
Laatastojen jänneväli	2,00m	74 %	79 %	85 %	94 %	103 %	45,69 kN/m	0,831 kNm	Kuormat
	2,25m	75 %	80 %	85 %	94 %	102 %	48,70 kN/m	0,836 kNm	
	2,50m	76 %	81 %	86 %	94 %	103 %	51,71 kN/m	0,841 kNm	
	2,75m	78 %	82 %	87 %	95 %	103 %	54,69 kN/m	0,845 kNm	
	3,00m	79 %	84 %	89 %	97 %	105 %	57,70 kN/m	0,850 kNm	
	3,25m	81 %	86 %	91 %	99 %	106 %	60,71 kN/m	0,855 kNm	
	3,50m	83 %	88 %	93 %	100 %		63,71 kN/m	0,860 kNm	
	3,75m	85 %	90 %	95 %	102 %		66,70 kN/m	0,864 kNm	
	4,00m	87 %	92 %	97 %	104 %		69,70 kN/m	0,869 kNm	
	4,25m	90 %	94 %	99 %	107 %		72,71 kN/m	0,874 kNm	
	4,50m	92 %	96 %	101 %			75,72 kN/m	0,878 kNm	
	4,75m	94 %	99 %	104 %			78,70 kN/m	0,883 kNm	
	5,00m	96 %	101 %				81,71 kN/m	0,888 kNm	
	5,25m	99 %	108 %				84,72 kN/m	0,892 kNm	
	5,50m	101 %					87,72 kN/m	0,897 kNm	
		0,36	0,40	0,44	0,49	0,53			
		Tuentatavasta riippuva kerroin ρ_4							

Taulukko 9 Kantavan päätyseinän käyttöasteet 3-kerroksisessa rakennuksessa maastoluokassa 4

		Seinän pituus										N _d	M _d	
		2,00m	2,25m	2,50m	2,75m	3,00m	3,25m	3,50m	3,75m	4,00m	4,25m			
Laatastojen jänneväli	2,00m	58 %	61 %	64 %	69 %	74 %	80 %	87 %	93 %	100 %	108 %	45,69 kN/m	0,582 kNm	Kuormat
	2,25m	60 %	63 %	66 %	71 %	76 %	82 %	89 %	95 %	102 %		48,70 kN/m	0,586 kNm	
	2,50m	62 %	65 %	69 %	74 %	79 %	85 %	91 %	97 %	104 %		51,71 kN/m	0,591 kNm	
	2,75m	64 %	66 %	70 %	76 %	81 %	87 %	94 %	100 %	106 %		54,69 kN/m	0,596 kNm	
	3,00m	67 %	70 %	73 %	79 %	84 %	90 %	96 %	102 %			57,70 kN/m	0,600 kNm	
	3,25m	69 %	72 %	76 %	81 %	86 %	92 %	99 %	105 %			60,71 kN/m	0,605 kNm	
	3,50m	72 %	75 %	78 %	84 %	89 %	95 %	102 %				63,71 kN/m	0,610 kNm	
	3,75m	74 %	77 %	81 %	86 %	92 %	98 %	105 %				66,70 kN/m	0,614 kNm	
	4,00m	77 %	80 %	84 %	89 %	94 %	101 %					69,70 kN/m	0,619 kNm	
	4,25m	79 %	82 %	86 %	92 %	97 %	103 %					72,71 kN/m	0,624 kNm	
	4,50m	82 %	85 %	89 %	95 %	100 %						75,72 kN/m	0,629 kNm	
	4,75m	84 %	88 %	91 %	97 %	103 %						78,70 kN/m	0,633 kNm	
	5,00m	87 %	90 %	94 %	100 %							81,71 kN/m	0,638 kNm	
	5,25m	89 %	93 %	97 %	103 %							84,72 kN/m	0,643 kNm	
	5,50m	92 %	95 %	100 %	106 %							87,72 kN/m	0,647 kNm	
	5,75m	94 %	98 %	102 %								90,71 kN/m	0,652 kNm	
6,00m	97 %	101 %									93,71 kN/m	0,657 kNm		
		0,36	0,40	0,44	0,49	0,53	0,57	0,61	0,64	0,67	0,70			
		Tuentatavasta riippuva kerroin ρ ₄												

4.4 Keskeisiä havaintoja kirjallisuudesta

Harkoilla on monia etuja kilpailijoihinsa nähden kerrostalorakentamisessa. Harkkoja on saatavilla nopeallakin varoitusajalla ja toimitukset ovat joustavia. Työmaalla varastotilan ja nostokaluston tarve on vähäinen elementteihin verrattuna. Aikataulutus on joustavampaa ja suunnittelu- ja työvirheiden korjaaminen on helpompaa. Harkot myös mahdollistavat monimuotoisen arkkitehtuurin.

Vastaavasti harkkorakentamisen haasteina on runkoa rakennettaessa työvoimaintensiivisyys, telinetöiden paljous sekä ergonomia. Erityiseksi haasteeksi on koettu kokemuksen ja osaavan työvoiman puute. Kerrostalon runkovaihe on myös hieman pidempi elementteihin verrattuna, mutta tätä ei koettu ongelmaksi.

Ominaisuuksiltaan harkot asettuvat puu- ja betonielementtien läheisyyteen. Kevytsoraeristeharkkorakenteet ovat massiivisempia kuin puurakenteet mutta kevyempiä kuin betoni. Rakenteen suurempi massiivisuus tuo mukanaan paremman ääneneristävyyden ja kyvyn varastoida lämpöä. Tutkittavan rakenteen ilman pitävyys asettui myös puun ja betonin välimaastoon. Harkkokuorissa

käytetty kevytsorabetoni on itsessään lämpöä eristävää eikä osallistu paloon, kun taas eristeenä käytetty EPS on palava materiaali. Eri materiaalien ympäristövaikutuksia punnittaessa, nousee pinnalle sementin tuotannosta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt, joita on pyritty hillitsemään käyttämällä sementin seassa masuunikuonaa ja lentotuhkaa. Tuotteen elinkaaren kannalta betonin hiilidioksidipäästöt ovat kuitenkin kertaluontoisia, kun taas puun tuottamiseksi kaadetun metsän kyky sitoa hiilidioksidia ei palaa ennalleen vuosikymmeniin.

5 Pohdinta

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää HB-betoniteollisuus Oy:n PEH-380 kevytsoraeristeharkon soveltuvuutta kerrostalorakentamiseen. Soveltuvuutta selvitettiin yleisemmällä tasolla tutustumalla aiheisiin liittyviin kirjallisiin lähteisiin ja erityisellä tasolla mitoittamalla esimerkkikohteena toimineen kerrostalon rakenteita PEH-380 kevytsoraeristeharkkoa käyttäen. Mitoittamalla rakenteen kestävyyttä eri tilanteissa selvitettiin sen käyttökohteita ja soveltuvuuden reunaehtoja. Tutkimusta varten ja toimeksiantajan käyttöön kehitettiin excel-taulukkolaskentapohja muurattujen rakenteiden mitoitukseen tuulenpaineelle sekä mitoitukseen puristukselle ja taivutukselle.

Tutkimusta tehdessä huomattiin muuratun rakenteen soveltuvuuden reunaehtojen etsimisen olevan moniulotteinen ongelma. Rakenteen käyttöaste koostuu sen kuormituksesta, dimensioista sekä tuennasta. Nämä muuttujat ovat edelleen jaettavissa pienempiin osiin. Kuormitukseen vaikuttavat rakennemalli, rakennuksen mitat sekä sijainti ja käytetyt materiaalit. Dimensiot pitävät sisällään seinän pituuden, korkeuden ja paksuuden. Rakenteen tuenta puolestaan on riippuvainen siihen liittyvistä rakenteista ja liitoksen tyypistä. Muuttujien jakamista aina vain pienempiin osatekijöihin voidaan jatkaa edelleen, jolloin niiden määrä räjähtää käsiin hyvin nopeasti. Yksi työn haasteista olikin näiden muuttujien hallinta. Osa muuttujista saatiin vakioitua työn rajauksilla, kuten tutkimalla vain yhtä muurauskappaletta ja keskittymällä analysoimaan vain ns. kirjahyllyrunkoisen kerrostalon rakenteita. Toisaalta osalle muuttujista löytyi järkevät raja-arvot vasta kokeilemalla. Tässä työssä muuttujiksi valikoitui seinän ja laatastion pituus, maastoluokka, rakennuksen kerrosten lukumäärä sekä seinän tuentatapaus.

5.1 Johtopäätökset

Koemitoittamalla esimerkkikohteena toimineen kerrostalon ulkoseinärakenteita, PEH-380 kevytsoraeristeharkon havaittiin soveltuvan ei kantavien ulkoseinien rakennusmateriaaliksi tietyin reunaehdoin. Erityisen merkittäviksi seinän käyttöasteeseen vaikuttavista muuttujista osoittautui taivutusmomentin suuruus, seinän tuentapaus ja seinän pituus. Maastoluokassa 4, eli kaupungin keskustaa vastaavassa ympäristössä, ei kantavan seinän maksimipituudet ovat ylimmässä kerroksessa tutkituilla tuentatapauksilla ja kerrosten lukumäärillä välillä 2,50-4,00 m. Vastaavasti maastoluokassa 3 seinän maksimipituudet ovat välillä 2,00-3,25 m.

Kantavan seinän mitoituksessa rajoittavaksi tekijäksi osoittautui sisäkuoren paksuus 90 mm, joka ei läpäise taulukkomuotoista palomitoitusta palonkestoaikavaatimuksilla R30 ja R60. Palonkestoaikavaatimus R30 ja REI60 on taulukkomitoituksen mukaan saavutettavissa sisäkuoren ainevahvuudella 100 mm. Palomitoitus on mahdollista suorittaa myös laskennallisesti, jolloin palomitoituksen tuloksena saatava minimiainevahvuus saattaa olla pienempi. Rakenteellisesti PEH-380 kevytsoraeristeharkolla on mahdollista toteuttaa 2-4 m pitkiä kantavia seiniä, tuetun laataston pituuden vaihdellessa välillä 2-6 m.

Tutkitun rakenteen soveltuvuus kerrostalon ulkoseinäksi on siis jokseenkin rajallinen. Seinä vaatii kestääkseen hyvän tuennan, joka voidaan saavuttaa esimerkiksi säännöllisillä sivutukena toimivilla seinillä. Pisimmät tuentavälit saavutetaan maastoluokan 4 mukaisessa ympäristössä. Kirjallisten lähteiden perusteella harkoilla onkin puu- ja betonielementteihin nähden tiettyjä etuja juuri kaupunkien ahtailla työmailla, kuten esimerkiksi joustava logistiikka ja pieni säilytystilan tarve. Elementtirakentamisen vastaus kaupunkien ahtaiden työmaiden vaatimuksiin on ollut ”just in time” -malli, jossa elementit käytännöstä nostetaan suoraan paikalleen kuljetusauton lavalta. Tämä kuitenkin entisestään lisää työmaan aikatauluriippuvuutta, kun taas yhdeksi harkkojen eduksi on koettu nimenomaan aikataulujen joustavuus.

5.2 Jatkotutkimus ja kehitys

Yleisesti harkoilla on käyttöpotentiaalia kerrostalorakentamisessa. HB:n PEH-380 kevytsoraeristeharkon käyttökohteet voisivat olla laajennettavissa lyhyisiin kantaviin seiniin tutkimalla laskennallista palomitoitusta. Taulukkomitoituksessa tuotteen seinä vahvuus jää 10 mm vaaditusta. Ero on

melko vähäinen, joten laskennallisesti saatu seinä vahvuus vaatimus saattaa olla tuotteen käyttökohteiden kannalta merkittävästi pienempi.

Tuotteen suoritusasoilmoituksessa taivutusvetolujuuden ominaisarvojen f_{xk1} ja f_{xk2} suuruuksille on annettu alaraja tarkan arvon sijaan. Mikäli näitä arvoja tarkennetaan ja ne osoittautuvat suuremmiksi, lisäksi se rakenteen kestävyttä mitoituksessa tuulenpainetta vastaan, sillä taivutusvetolujuuden ominaisarvoilla on suurehko vaikutus rakenteen momenttikestävyden mitoitusarvoihin. Momenttikestävyden mitoitusarvojen lisääntyminen laajentaa seinän käyttökohteita mahdollistamalla pidemmät seinät, epäedullisemmat tuentatapaukset ja suuremman tuulikuorman keston.

Tässä työssä tutkittiin seinän tuentatapauksia melko niukasti. Erityisesti mitoitettaessa tuulenpainelle erilaisia tuentatapauksia on lukuisia, joista tutkittiin vain kaksi. Ei kantavilla seinillä on usein paljon aukkoja kuten ikkunoita ja parvekkeen ovia, jolloin seinä jää joltakin reunalta vapaaksi. Tutkimalla tuentatapauksia, joissa on vapaita reunoja, antaisi lisätietoa rakenteen soveltuvuudesta tällaisiin paikkoihin. Työssä ei myöskään käsitelty jäykistäviä seiniä, jotka ovat olennaisia rakennuksen vakauden kannalta. Jäykistävät seinät tulisikin huomioida mahdollisissa jatkotutkimuksissa.

Kevytsoraeristeharkkojen tuoteperheen laajentaminen uudella paksumman sisäkuoren omaavalla harkolla mahdollistaisi tuoteperheen käyttökohteiden laajenemisen. Esimerkiksi 125 mm paksulla sisäkuorella saavutetaan taulukkomuotoisessa palomitoituksessa R60 ja REI90 palonkestoajat, joka mahdollistaisi tuotteen käytön kantavana rakenteena yli kaksi kerroksisissa, enintään 28 m korkeissa P1 luokan asuinrakennuksissa. Sisäkuoren paksuudella on myös suuri merkitys momenttikestävyteen mitoitettaessa rakennetta tuulenpainelle. Mitoitettaessa rakennetta puristukselle ja taivutukselle, tulee sisäkuoren paksuus vastaan määritettäessä hoikkuuden ja kuormituksen epäkeskisyyden pienennyskerrointa Φ ja mitoituskestävyyttä. Uuden tuotteen kehittäminen vaatii kuitenkin merkittäviä investointeja ja ennen tuotekehityksen aloitusta tulisikin selvittää minkä verran uudelle tuotteelle on kysyntää ja kuinka voitetaan harkkorakentamisen haasteita, kuten osaan työvoiman puute. Tämän työn tulosten ja excel-lasekentapohjien avulla voidaan myös suuntaa antavasti selvittää mahdollisen uuden tuotteen mitoituksellista kestävyttä.

5.3 Tutkimuksen luotettavuus ja eettisyys

Käyttämällä excel-taulukkolaskentapohjia saatiin mitoitusta automatisoitua huomattavasti, samalla vähenee virheiden mahdollisuus. Virheiden paikasi jäivät tällöin näppäilyvirheet täyttäessä taulukoiden lähtöarvoja ja itse taulukoiden laadinnassa tapahtuneet virheet. laskentataulukoiden oikeellisuutta on pyritty varmistamaan vertaamalla niiden antamia tuloksia tämän työn liitteessä 1 esitettyihin käsin laskettuihin laskuihin, RIL 206-2010 Muurattujen rakenteiden suunnitteluohjeessa (Tikanona, 2010, 130-142) sekä Harkkokäsikirja 2016 Muurattujen harkkorakenteiden mitoitushjeessa (Kaskiaro & Petrow 2016b, 29-41) esitettyihin esimerkkilaskuihin. Pienet erot näiden esimerkkien ja excel-taulukoiden tulosten välillä on selitettävissä pyöristyksillä, joita esimerkkilaskuissa tehdään välivaiheittain. Näppäilyvirheiden mahdollisuutta on vaikea kokonaan sulkea pois, mutta virheitä on pyritty havaitsemaan tulostaulukoista käyttäen apuna tulosten värjäystä. Kuviossa 13 on esitetty tulostaulukko, jossa on virheellisesti kaksi samaa tulosta vierekkäin, mikä erottuu tulossolujen ehdollisen muotoilun ansiosta. Tuloksia tarkastaessa ehdollinen muotoilu oli asetettu värjäämään solut niiden arvojen perusteella siten, että pienimmät arvot saavat vihreän värin ja väri muuttuu liukuvasti keltaisen kautta punaiseksi solun arvon kasvaessa.

		Seinän pituus										N _d	M _d	
		2,00m	2,25m	2,50m	2,75m	3,00m	3,25m	3,50m	3,75m	4,00m	4,25m			
Laatastojen jänneväli	2,00m	58 %	61 %	64 %	69 %	74 %	80 %	87 %	93 %	100 %	108 %	45,69 kN/m	0,582 kNm	Kuormat
	2,25m	60 %	63 %	66 %	71 %	76 %	82 %	89 %	95 %	102 %	48,70 kN/m	0,586 kNm		
	2,50m	62 %	65 %	69 %	74 %	79 %	85 %	91 %	97 %	104 %	51,71 kN/m	0,591 kNm		
	2,75m	64 %	66 %	70 %	70 %	81 %	87 %	94 %	100 %	106 %	54,69 kN/m	0,596 kNm		
	3,00m	67 %	70 %	73 %	79 %	84 %	90 %	96 %	102 %	57,70 kN/m	0,600 kNm			
	3,25m	69 %	72 %	76 %	81 %	86 %	92 %	99 %	105 %	60,71 kN/m	0,605 kNm			
	3,50m	72 %	75 %	78 %	84 %	89 %	95 %	102 %	63,71 kN/m	0,610 kNm				
	3,75m	74 %	77 %	81 %	86 %	92 %	98 %	105 %	66,70 kN/m	0,614 kNm				
	4,00m	77 %	80 %	84 %	89 %	94 %	101 %	69,70 kN/m	0,619 kNm					
	4,25m	79 %	82 %	86 %	92 %	97 %	103 %	72,71 kN/m	0,624 kNm					
	4,50m	82 %	85 %	89 %	95 %	100 %	75,72 kN/m	0,629 kNm						
	4,75m	84 %	88 %	91 %	97 %	103 %	78,70 kN/m	0,633 kNm						
	5,00m	87 %	90 %	94 %	100 %	81,71 kN/m	0,638 kNm							
	5,25m	89 %	93 %	97 %	103 %	84,72 kN/m	0,643 kNm							
	5,50m	92 %	95 %	100 %	106 %	87,72 kN/m	0,647 kNm							
	5,75m	94 %	98 %	102 %	90,71 kN/m	0,652 kNm								
6,00m	97 %	101 %	93,71 kN/m	0,657 kNm										
		0,36	0,40	0,44	0,49	0,53	0,57	0,61	0,64	0,67	0,70			
		Tuentatavasta riippuva kerroin ρ ₄												

Kuvio 13 Esimerkki virheellisen tuloksen esiintymisestä tulostaulukossa

Pidän mitoituksen tuloksia sekä excel-taulukkolaskentapohjia luotettavina. Itse mitoitukselaskelmissa jää tulkinnan varaan hyvin vähän, mikä edelleen vähentää virheiden määrää. Tulkinnan varaan jäävät asiat liittyvät lähinnä rakennemalliin ja rakenteen toimintaan ja tulkinnan varaisissa kohdissa on pyritty valitsemaan vaihtoehtoista varmallalla puolella oleva.

Opinnäytetyötä tehdessä on pyritty noudattamaan tutkimuksen eettisiä periaatteita. Lähteet ja lähdeviitteet on pidetty mukana heti työn alusta asti ja niiden merkinnässä on käytetty JAMK:in ohjeistusta. Työssä on käytetty lähteinä artikkeleita, lainsäädäntöä, esitteitä, suunnitteluohjeita sekä aikaisempia tutkimuksia ja lähdekritiikkiä on pyritty noudattamaan. Työ on toteutettu ajanjaksona, jona on ollut voimassa vaihtelevia suosituksia julkisilla paikoilla liikkumisesta ja välillä jopa kirjastoja on pidetty suljettuina, niinpä työtä tehdessä on mahdollisuuksien mukaan käytetty sähköisiä lähteitä. Tutkimuksen mitoituksellinen osa on pyritty pitämään mahdollisimman avoimena ja tulkinnat on esitetty sitä mukaan, kun niitä on tehty. Mitoitukselaskelmien kulku on esitetty vaiheittain itse työssä sekä esimerkin omaisesti käsin laskentana liitteessä 1. Käytetyt lähtötiedot ja niiden määräytymisperusteet on pyritty esittämään työn eri vaiheissa. Mitoituksen tulostaulukot on muotoiltu siten, että jokaista tulossolua vastaavat rasiusten mitoituksesarvot sekä tuentatavasta riippuvat kertoimet ovat nähtävillä. Tulostaulukoissa on myös esillä mitoituksesarvojen ja kertoimien muodostusperusteita, kuten kuormituspituus ja seinän pituus. Esittämällä mitoituksen kulku, tehdyt tulkinnat sekä mitoituksesarvot muodostumisperusteineen on pyritty mahdollistamaan työn toistaminen.

Lähteet

A 848/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Viitattu 24.3.2021. <https://www.finlex.fi> .

A 927/2020. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta annetun ympäristöministeriön asetuksen muuttamisesta. Viitattu 24.3.2021. <https://www.finlex.fi> .

A 1010/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Viitattu 17.4.2021. <https://www.finlex.fi> .

CO2 Impact - Wood vs Concrete. N.d. Artikkel. Rastra. Viitattu 17.4.2021. https://www.rastra.com/docs/sales/CO2_Impact_-_Wood_vs_Concrete.pdf .

Helenius-Hirvonen, M. 2018. Harkkojen käyttökokemuksia pienkerrostalorakentamisessa. Opinnäytetyö, AMK. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, tekniikan- ja liikenteen ala, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma. Viitattu 24.3.2021. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018121321425> .

Kaskiaro, T. & Petrow, S. 2016. Harkkokäsikirja 2016 Kevytsoraharkot ja betoniharkot. Helsinki: Betoniteollisuus

Kaskiaro, T. & Petrow, S. 2016. Harkkokäsikirja 2016 Muurattujen harkkorakenteiden mitoitusohje (liite1). Helsinki: Betoniteollisuus

Khan, M. 2016. Comparison of construction practices in different countries. Bradley university. Viitattu 4.4.2021. <https://www.linkedin.com/pulse/comparison-construction-practices-different-countries-khan> .

Roberts, P. 2014. European construction versus North American construction. Masonry design blogi. Julkaistu 25.12.2014. Viitattu 4.4.2021. <http://masonrydesign.blogspot.com/2014/01/european-construction-versus-north.html> .

HB-eristeharkko suunnittelu- ja työohje UEH380 ja PEH380. Esite. Jyväskylä. HB-Betoniteollisuus Oy. Viitattu 28.4.2020. http://www.hb.fi/media/kuvat/aineistot-suunnittelukaytto-ohjeet-harkot/ueh-380_peh-380-tyoohje.www.pdf .

Simola, L-K. 2019. Harkkorakentaminen tuo pienkerrostaloihin uuden ulottuvuuden. Kivestä muuraamalla 1, 12-15. Viitattu 28.4.2020. https://kivitaloinfo.fi/wp-content/uploads/2019/03/KM_1_2019_Final.pdf .

Heikkilä, A. Suunnittelun vapautta ilman riskejä. Artikkel. Kivitaloinfo.fi. Viitattu 28.4.2020. <https://kivitaloinfo.fi/harkkojen-aarrearkku/pienkerrostalo-harkoista/suunnittelun-vapautta-ilman-riskeja/> .

Kylliäinen, M. 2011. Kivitalojen ääneneristys. Helsinki: Suomen Rakennusmedia. Viitattu 28.4.2020. <https://kivitaloinfo.fi/julkaisut/suunnitteluohjeet/kivitalojen-aaneneristys/> .

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. 2009. Asionrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tutkimus raportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Viitattu 29.4.2020. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-2011122914971> .

Kivitalojen energiatehokkuus. 2010. Suomen Rakennusmedia. Viitattu 2.5.2020. https://is-suu.com/kivirakentaminen/docs/kivitalon_energiatehokkuus_kirja .

Rakentamismääräykset – Ympäristöministeriö. N.d. Viitattu 24.3.2021. <https://ym.fi/rakentamis-maaraykset>

SFS-EN 1990+A1+AC:2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Viitattu 1.3.2021. <https://janet.finna.fi> , SFS Online.

Suoritustasoilmoitukset-harkot. 2021. Suoritustasoilmoitus. Viitattu 11.4.2021. <https://hb.fi/wp-content/uploads/2021/02/Suoritustasoilmoitukset-harkot.pdf> .

Tikanoja, T. 2010. RIL 206-2010 Muurattujen rakenteiden suunnitteluohje: eurokoodi EN 1996-1-1 ja taulukkomitoitus palotilanteessa. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL

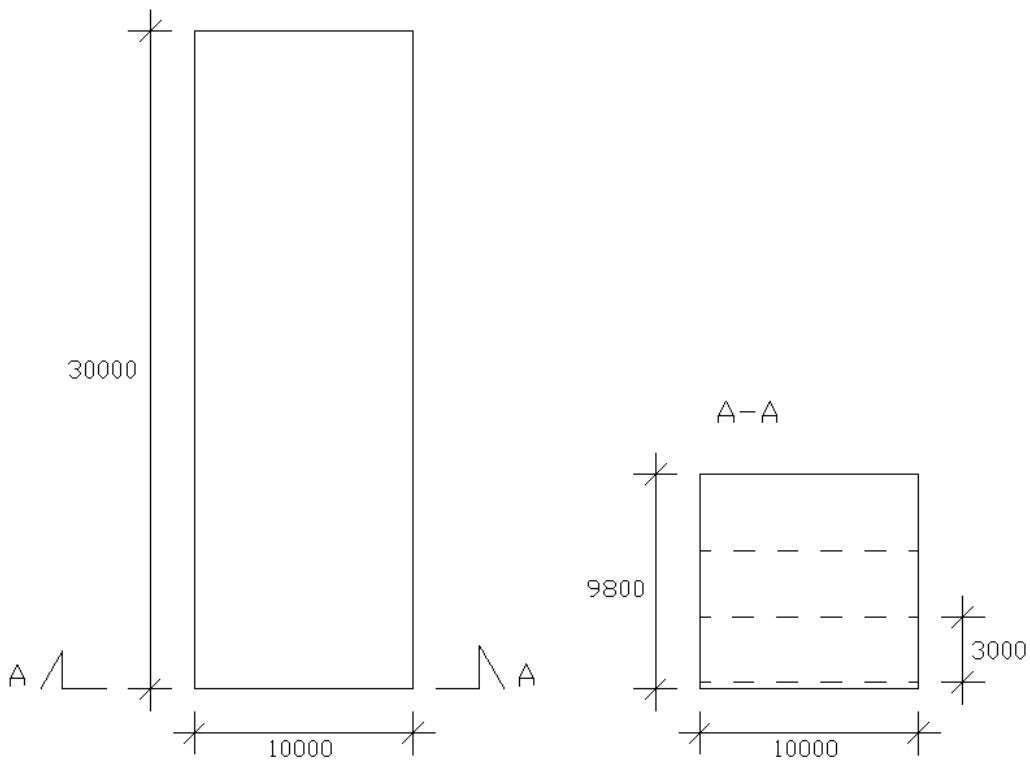
Tikanoja, T. Sumkin, H. & Åström, G. 2017. RIL 201-1-2017 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat: eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4. Helsinki: Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL

Vihmo, J. Tilastot ja suhdanteet – Rakennusteollisuus RT. N.d. Viitattu 3.5.2020. <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Talous-tilastot-ja-suhdanteet/> .

Liitteet

Liite 1. Laskentaesimerkit

Tässä liitteessä esitetään kuvitteellisen rakennuskohteen mitoituslaskelmia. Kohde on kolmikerroksinen asuinkerrostalo, jonka pohja kattaa 10m*30m kokoisen alueen, kerroskorkeus on 3,0m ja rakennuksen kokonaiskorkeus 9,8m (kuvio 14). Mitoitettavat rakenteet ovat alimman kerroksen kantava ulkoseinä rakennuksen päädyssä, sekä ylimmän kerroksen ei kantava ulkoseinä rakennuksen pitkällä sivulla. Kantavan seinän mitoituksessa käytetään mitoitusta puristukselle ja taivutukselle ja ei kantava seinä mitoitetaan tuulenpaineelle. Ulkoseinärakenteena käytetään HB-betoniteollisuus Oy:n PEH-380 kevytsoraeristeharkkoa. Liittyvinä kantavina vaakarakenteina toimivat ontelolaatat. Kohde sijaitsee Jyväskylässä esikaupunkialueella.



Kuvio 14 Laskentaesimerkin rakennuksen päämitat

Taulukko 10 Kohteen perustiedot

Työ nro	1
Kohteen nimi	Opinnäytetyö esimerkki
Sijainti	Jyväskylä, esikaupunkialue, maastoluokka 3
Pääasiallinen käyttötarkoitus	Asuinrakennus
Rakenteiden vaativuusluokka	Vaativa
Seuraamusluokka	CC2
Paloluokka	P1
Pääasiallinen rakennusmateriaali	Kevytsoraharkko
Pääasiallinen rakennustapa	Paikalla rakentaminen
Kerrosluku	3
Kokonaiskorkeus	9,8m
Bruttopinta-ala yhteensä	900m ²

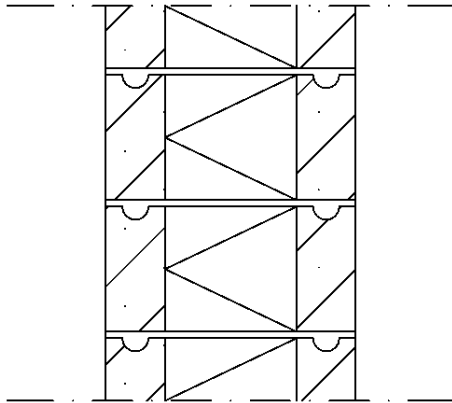
Taulukko 11 Kohteen rakenteellinen järjestelmä

Runkojärjestelmä	Kantavat seinät ja laatat
Ulkoseinät	
Kantavat seinät	Paikalla rakennettu kevytsoraeristeharkkoseinä
Ei kantavat seinät	Paikalla rakennettu kevytsoraeristeharkkoseinä
Laattarakenteet	
Välipohjat	Ontelolaatta
Yläpohja	Ontelolaatta

Taulukko 12 Normit ja kuormitukset

Määräykset ja ohjeet	
Suunnitteluperusteet	SFS EN 1990
Rakenteiden omapainot ja hyötykuormat	SFS EN 1991-1-1
Lumikuormat	SFS EN 1991-1-3
Tuulikuormat	SFS EN 1991 1-4
Soveltamisohje	RIL 201-1-2017
Muuratut rakenteet	SFS EN 1996-1-1
Soveltamisohje	RIL 206-2010
Palonkestovaatimus	
Kantavat seinät	R60
Ei kantavat seinät	EI30
Kuormitukset	
Yläpohja	6,00 kN/m ²
Välipohja	4,70 kN/m ²
Ulkoseinä	2,55 kN/m ²
Hyötykuorma	2,00 kN/m ²
Lumikuorma maan pinnalla	2,50 kN/m ²
Tuulikuorma	0,47 kN/m ² nopeuspaineen ominaisarvo

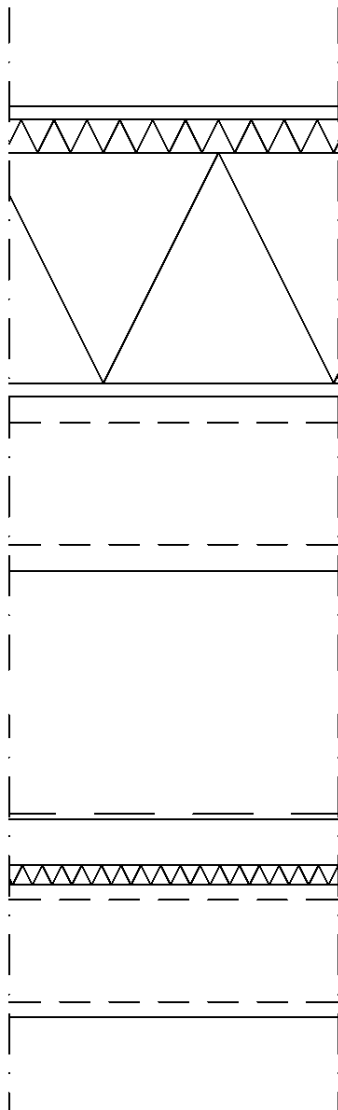
Rakennetyypit



Ulkoseinä

- 1 Kaksikerrosrappaus
- 2 PEH-380
- 3 Laasti
- 4 Tasoite

Rakenteen omapaino $g_k=2,55\text{kN/m}^2$



Yläpohja

- 1 Suojakiveys $d=8-10\text{mm}$
- 2 Bitumikermi
- 3 Uritettu mineraalivilla 50mm
- 4 Mineraalivilla 350mm
- 5 Höyrysulku
- 6 Kallistusbetoni 20mm
- 7 Ontelolaatta $\square 27$
- 8 Rappaus

Rakenteen omapaino $g_k=6,00\text{kN/m}^2$

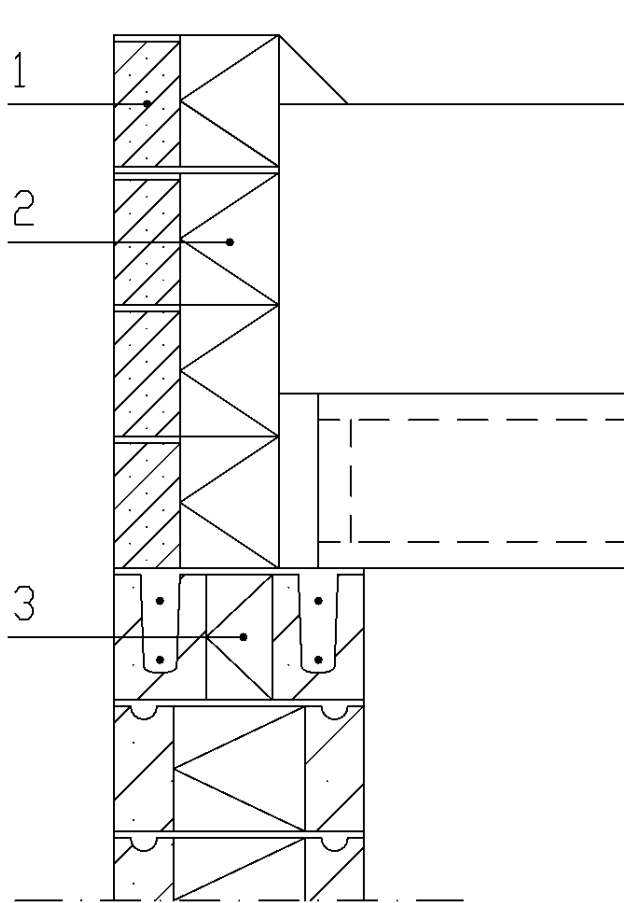
Välipohja

- 1 Lankkulaminaatti 8mm
- 2 Solumuovi
- 3 Teräsbetonilaatta 70mm
- 4 Askeläänieriste
- 5 Ontelolaatta $\square 20$
- 6 Rappaus

Rakenteen omapaino $g_k=4,70\text{kN/m}^2$

Kuvio 15 Kohteen rakennetyypit

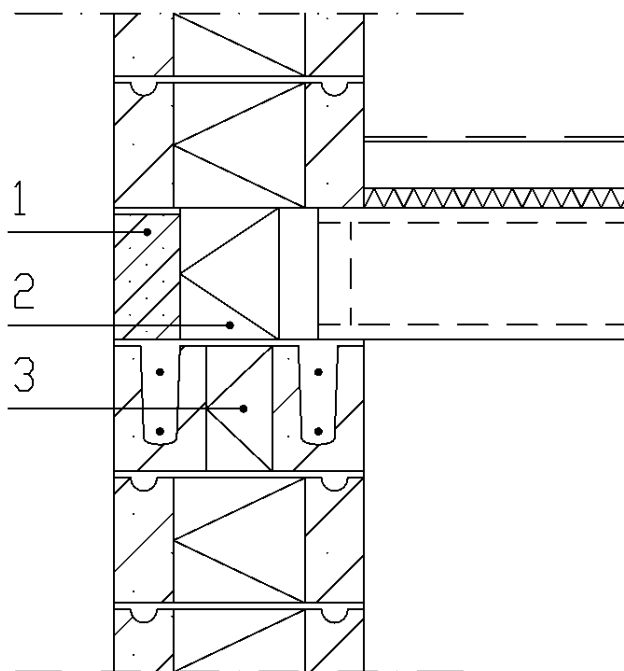
Liittymätyypit



Ulkoseinä - Yläpohja liittymä

- 1 UH-100
- 2 PU-150
- 3 Palkkiharkko

Rakenteen omapaino $G_k=1,00\text{kN/m}$



Ulkoseinä - välipohja liittymä

- 1 UH-100
- 2 PU-150
- 4 Palkkiharkko

Rakenteen omapaino $G_k=0,64\text{kN/m}$

Kuvio 16 Kohteen liittymätyypit

Kuormat

Rakenteiden omapainot

Rakennuksen kantavan päätyseinän kannattelemat laatastot ovat 2,75 m pituisia, jolloin kuormitusleveydeksi tulee 1,375 m.

Yläpuoliselta seinältä tulevat omapainot $G_{k,y}$:

Yläpohja:	$6,00 \text{ kN/m}^2 * 1,375 \text{ m} =$	8,25 kN/m
Välipohja:	$4,70 \text{ kN/m}^2 * 1,375 \text{ m} =$	6,46 kN/m
Seinä:	$2,55 \text{ kN/m}^2 * 2 * 2,6 \text{ m} =$	13,26 kN/m
Seinä yläpohjan kohdalla:		1,00 kN/m
Seinä välipohjien kohdalla:	$2 * 0,64 \text{ kN/m} =$	1,28 kN/m

Yhteensä: 30,25 kN/m

Välipohjalta tulevat omapainot (epäkeskinen) $G_{k,v}$:

Välipohja:	$4,70 \text{ kN/m}^2 * 1,375 \text{ m} =$	6,46 kN/m
------------	---	-----------

Yhteensä: 6,46 kN/m

Mitoitettavan seinän omapainot:

Seinän puolivälissä $G_{k,sp}$:	$2,55 \text{ kN/m} * 1,3 \text{ m} =$	3,32 kN/m
Seinän alapäässä $G_{k,sa}$:	$2,55 \text{ kN/m} * 2,6 \text{ m} =$	6,63 kN/m

Oleskelukuormat

Yläpuoliselta seinältä tulevat oleskelukuormat $Q_{k,y}$:

$$2,00 \text{ kN/m}^2 * 1,375 \text{ m} = 2,75 \text{ kN/m}$$

Välipohjalta tulevat oleskelukuormat (epäkeskinen) $Q_{k,v}$:

$$2,00 \text{ kN/m}^2 * 1,375 \text{ m} = 2,75 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma

Katon lumikuorma s :

$$s = \mu_i C_e C_t S_k$$

(RIL 201-1-2017 Osa 1.3 kaava 5.1)

missä

Katon muotokerroin:	$\mu_i = 0,8$	(RIL 201-1-2017 Osa 1.3 Taulukko 5.2)
Lumikuorma maassa:	$S_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$	(RIL 201-1-2017 Osa 1.3 Kuva 1)
Tuulensuojuskerroin:	$C_e = 1,0$	(RIL 201-1-2017 Osa 1.3 Taulukko 2)

Lämpökerroin: $C_t = 1,0$

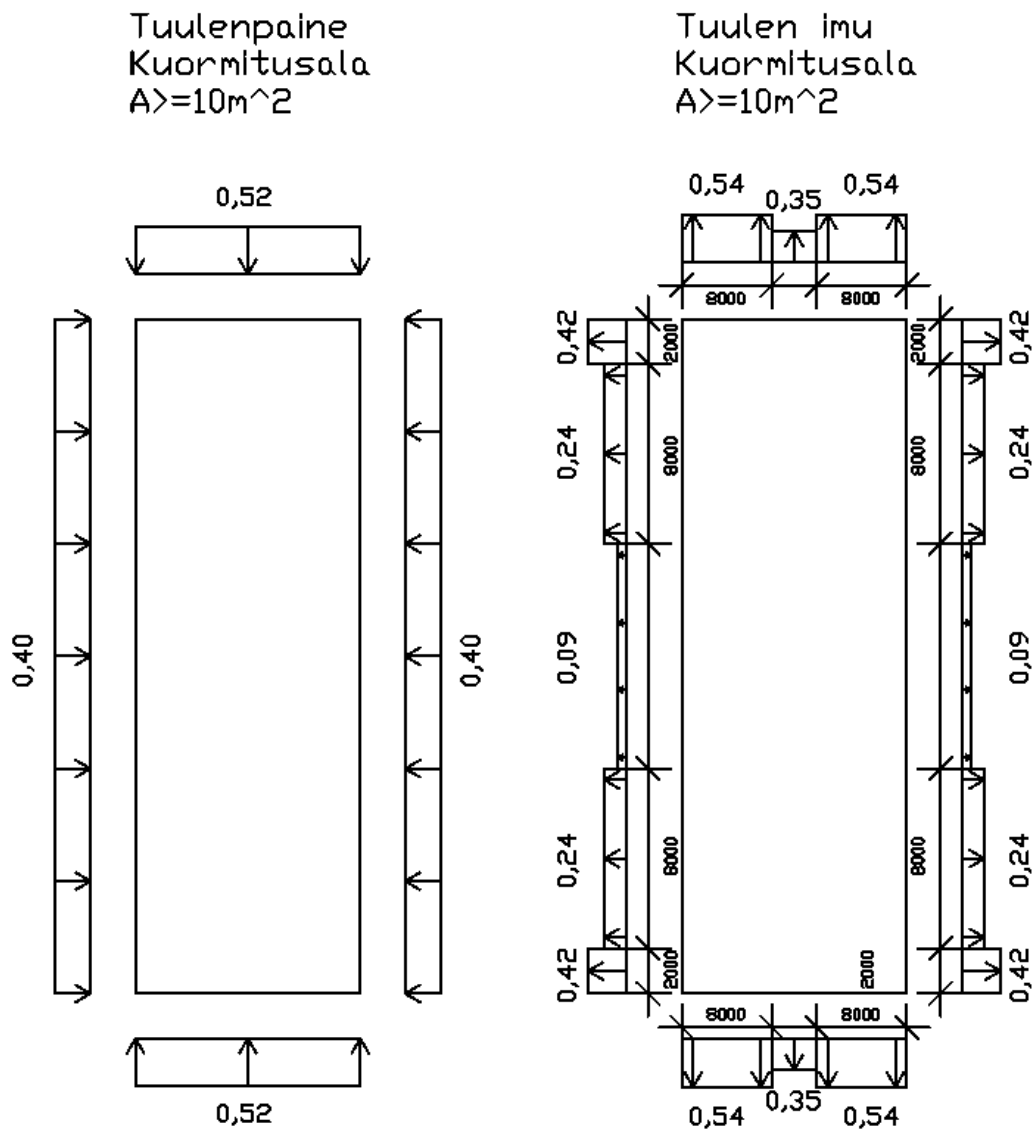
$$s = 0,8 * 1,0 * 1,0 * 2,5 \text{ kN/m} = 2,00 \text{ kN/m}^2$$

Merkitään: $s = q_{k,lumi} = 2,00 \text{ kN/m}^2$

Lumikuorman aiheuttama viivakuorma $Q_{k,lumi}$:

$$Q_{k,lumi} = 2,00 \text{ kN/m}^2 * 1,375 \text{ m} = 2,75 \text{ kN/m}$$

Tuulikuorma



Kuvio 17 Tuulikuormien kuormakaavio

Lähtötiedot

Maastoluokka:	3
Rakennuksen korkeus:	9,8m, käytetään 10,0m
Rakennuksen pituus:	30m
Rakennuksen leveys:	10m
Katon kaltevuus α :	$<5^\circ$

Tuulikuorman määrittäminen

Tässä esitetään tuulikuorman suurimpien arvojen määrittäminen rakennuksen päätyseinälle. Kaikkien ulkoseiniin vaikuttavien tuulikuormien suuruudet on esitetty kuviossa 17.

Tuuli kohtisuoraan pitkää sivua vasten, Vyöhyke A

$$d = 10m$$

$$b = 30m$$

$$h = 10m$$

$$e = \min(b, 2h)$$

$$e = \min(30m, 2 * 10m) = 20m$$

$$e > d$$

$$e/5 = 20m/5 = 4m$$

Vyöhyke A:n pinta-ala:

$$4m * 10m = 40m^2$$

Vyöhyke A:n pinta-ala on yli 10m². Käytetään painekertoimelle c_{pe} arvoa $c_{pe,10}$.

Ulkopintoihin vaikuttava paine:

$$w_e = q_p(z_e)c_{pe}$$

(RIL 201-1-2017 Osa 1.4 Kaava 5.1)

missä

$$\text{Nopeuspainekorkeus: } z_e = h = 10m$$

(RIL 201-1-2017 Osa 1.4 Kuva 7.4)

$$\text{Puuskanopeuspaine: } q_p(10m) = 0,47 \text{ kN/m}^2$$

(RIL 201-1-2017 Osa 1.4 Taulukko 4.2S)

$$\text{Painekerroin: } c_{pe} = c_{pe,10} = -1,2$$

(RIL 201-1-2017 Osa 1.4 Taulukko 7.1)

$$w_e = 0,47 \text{ kN/m}^2 * -1,2 = -0,56 \text{ kN/m}^2$$

Sisäpintaan vaikuttava paine:

$$w_i = q_p(z_i)c_{pi}$$

(RIL 201-1-2017 Osa 1.4 Kaava 5.2)

missä

Nopeuspaine korkeus: $z_i = z_e = 10m$
 Puuskanopeuspaine: $q_p(10m) = 0,47 \text{ kN}/m^2$

Sisäpinnan painekerroin c_{pi} määritetään rakennuksen aukkosuhteen sekä sivusuhteen avulla. Rakennuksen eri sivuilla on sama ilmanläpäisevyys. Tällöin rakennuksen aukkosuhde μ saadaan lasketta rakennuksen sivusuhteen avulla. (RIL 201-1-2017 Osa1.4 luku 7.2.9)

$$\mu = \frac{\sum \text{rakennuksen sivut, joilla } c_{pe} \leq 0,0}{\sum \text{kaikki rakennuksen sivut}}$$

$$\mu = \frac{30m + 2 \cdot 10m}{2 \cdot 30m + 2 \cdot 10m} = 0,625$$

$$h/d = 10m/10m = 1$$

$$c_{pi} = -0,05 \quad (\text{RIL 201-1-2017 Osa 1.4 Kuva 7.13S})$$

$$w_i = 0,47 \text{ kN}/m^2 * -0,05 = -0,024 \text{ kN}/m^2$$

Tuulenpainneiden etumerkit viittaavat niiden vaikutussuuntaan kyseiseen pintaan nähden, negatiivinen arvo tarkoittaa pinnasta ulospäin.

Tuulen paine vyöhykkeellä A:

$$w_{k,A} = -0,56 \text{ kN}/m^2 + 0,024 \text{ kN}/m^2 = -0,54 \text{ kN}/m^2$$

Tuuli kohtisuoraan rakennuksen lyhyttä sivua vasten, Vyöhyke D

$$d = 30m$$

$$b = 10m$$

$$h = 10m$$

$$e = \min(b, 2h)$$

$$e = \min(10m, 2 * 10m) = 10m$$

$$e < d$$

$$e/5 = 10m/5 = 2m$$

Vyöhyke D:n pinta-ala:

$$10m * 10m = 100m^2$$

Vyöhyke D:n pinta-ala on yli 10m². Käytetään painekertoimelle c_{pe} arvoa $c_{pe,10}$

Ulkopintaan vaikuttava paine:

$$q_p(10m) = 0,47 \text{ kN/m}^2$$

$$c_{pe,10} = 0,8$$

$$w_e = 0,47 \text{ kN/m}^2 * 0,8 = 0,38 \text{ kN/m}^2$$

Sisäpintaan vaikuttava paine:

$$\mu = \frac{2*30m+10m}{2*30m+2*10m} = 0,875$$

$$h/d = 10m/30m = 0,33$$

$$c_{pi} = -0,3$$

$$w_i = 0,47 \text{ kN/m}^2 * -0,3 = -0,14 \text{ kN/m}^2$$

Tuulenpaine vyöhykkeellä D:

$$w_{k,D} = 0,38 \text{ kN/m}^2 + 0,14 \text{ kN/m}^2 = 0,52 \text{ kN/m}^2$$

Tuulenpaine $q_{k,tuuli} = 0,52 \text{ kN/m}^2$ tai $-0,54 \text{ kN/m}^2$ riippuen siitä kumpi aiheuttaa suuremman taivutusmomentin rakenteiden epäkeskisen kuormituksen kanssa.

Kuormitusyhdistelmät

Tässä laskentaesimerkissä esitetään päätyseinän alimman kerroksen kantavalle seinälle suurimman rasiituksen aiheuttavan kuormayhdistelmän laskenta. Loput kuormayhdistelmät esitetään taulukossa 13. Taulukon 13 kuormayhdistelmät on tuotettu käyttäen excel-työkalua, joten arvot poikkeavat hieman esitetyn laskun tuloksista välivaiheiden pyöristysten takia.

$$1,15 K_{FI} \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_j P + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\}$$

(RIL 201-1-2017 Kaava 6.10bS)

kuitenkin vähintään

$$1,35 K_{FI} \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \right\}$$

(RIL 201-1-2017 Kaava 6.10aS)

missä

$G_{k,j}$:	pysyvät kuormat
$Q_{k,1}$:	määräävä muuttuva kuorma
$Q_{k,j}$:	muut muuttuvat kuormat
ψ :	Yhdistelykerroin
P :	esijännitysvoima
K_{FI}	seuraamusluokan kuormakerroin

Esijännitysvoima on tässä esimerkissä 0 ja seuraamusluokan kuormakerroin 1,0.

Kuormayhdistelmä 4: Tuulikuorma määräävä, oleskelu- ja lumikuorma vaikuttavat.

Normaalivoima seinän yläpäässä:

$$N_{d,y4} = 1,15 K_{FI} (G_{k,y} + G_{k,v}) + 1,5 K_{FI} \psi_{0,o} (Q_{k,oy} + Q_{k,ov}) + 1,5 K_{FI} \psi_{0,lumi} Q_{k,s}$$

$$N_{d,y4} = 1,15 * 1,0 (30,25 + 6,46) \text{ kN/m} + 1,5 * 1,0 * 0,7 (2,75 + 2,75) \text{ kN/m} + 1,5 * 1,0 * 0,7 * 2,75 \text{ kN/m} = 50,88 \text{ kN/m}$$

Taivutusmomentti seinän yläpäässä:

$$M_{d,y4} = (1,15 K_{FI} G_{k,v} + 1,5 K_{FI} \psi_{0,o} Q_{k,v}) e_v$$

missä

e_v : välipohjan kuorman epäkeskisyyden 10mm

$$M_{d,y4} = (1,15 * 1,0 * 6,46 \text{ kN/m} + 1,5 * 1,0 * 0,7 * 2,75 \text{ kN/m}) * 0,01 \text{ m} = 0,103 \text{ kNm/m}$$

Normaalivoima seinän puolivälissä:

$$N_{d,p4} = N_{d,y4} + 1,15K_{FI}G_{k,sp}$$

$$N_{d,p4} = 50,88 \text{ kN/m} + 1,15 * 1,0 * 3,32 \text{ kN/m} = 54,70 \text{ kN/m}$$

Taivutusmomentti seinän puolivälissä:

$$M_{d,p4} = \frac{M_{d,y4}}{2} + \frac{1,5K_{FI}q_{k,tuuli}l^2}{2*8}$$

$$M_{d,p4} = \frac{0,103 \text{ kNm/m}}{2} + \frac{1,5*1,0*0,54 \text{ kN/m}^2*(2,8\text{m})^2}{8} = 0,845 \text{ kNm/m}$$

Normaalivoima seinän alapäässä:

$$N_{d,a4} = N_{d,y4} + 1,15K_{FI}G_{k,sa}$$

$$N_{d,a4} = 50,88 \text{ kN/m} + 1,15 * 1,0 * 6,63 \text{ kN/m} = 58,50 \text{ kN/m}$$

Taivutusmomentti seinän alapäässä:

$$M_{d,a4} = 0 \text{ kNm/m}$$

Taulukko 13 Alimman kerroksen kantavan päätyseinän kuormayhdistelmät

		Normaalivoima		Taivutusmomentti	
Seinän yläpää	KY1: Rakenteiden omapainot	N_{dy1}	49,56 kN/m	M_{dy1}	0,087 kNm
	KY2: Oleskelu määräävä, lumi ja tuuli vaikuttavat	N_{dy2}	53,35 kN/m	M_{dy2}	0,116 kNm
	KY3: Lumi määräävä, oleskelu ja tuuli vaikuttavat	N_{dy3}	52,12 kN/m	M_{dy3}	0,103 kNm
	KY4: Tuuli määräävä, oleskelu ja lumi vaikuttavat	N_{dy4}	50,88 kN/m	M_{dy4}	0,103 kNm
	KY5: Tuuli määräävä, oleskelu vaikuttaa	N_{dy5}	45,10 kN/m	M_{dy5}	0,133 kNm
	KY6: Tuuli	N_{dy6}	42,22 kN/m	M_{dy6}	0,074 kNm
Seinän puoliväli	KY1: Rakenteiden omapainot	N_{dp1}	54,03 kN/m	M_{dp1}	0,044 kNm
	KY2: Oleskelu määräävä, lumi ja tuuli vaikuttavat	N_{dp2}	57,17 kN/m	M_{dp2}	0,534 kNm
	KY3: Lumi määräävä, oleskelu ja tuuli vaikuttavat	N_{dp3}	55,93 kN/m	M_{dp3}	0,528 kNm
	KY4: Tuuli määräävä, oleskelu ja lumi vaikuttavat	N_{dp4}	54,69 kN/m	M_{dp4}	0,845 kNm
	KY5: Tuuli määräävä, oleskelu vaikuttaa	N_{dp5}	551,80 kN/m	M_{dp5}	0,845 kNm
	KY6: Tuuli	N_{dp6}	46,03 kN/m	M_{dp6}	0,831 kNm
Seinän alapää	KY1: Rakenteiden omapainot	N_{da1}	58,51 kN/m	M_{da1}	0 kNm
	KY2: Oleskelu määräävä, lumi ja tuuli vaikuttavat	N_{da2}	60,98 kN/m	M_{da2}	0 kNm
	KY3: Lumi määräävä, oleskelu ja tuuli vaikuttavat	N_{da3}	59,74 kN/m	M_{da3}	0 kNm
	KY4: Tuuli määräävä, oleskelu ja lumi vaikuttavat	N_{da4}	58,50 kN/m	M_{da4}	0 kNm
	KY5: Tuuli määräävä, oleskelu vaikuttaa	N_{da5}	55,62 kN/m	M_{da5}	0 kNm
	KY6: Tuuli	N_{da6}	49,84 kN/m	M_{da6}	0 kNm

Mitoitus puristukselle ja taivutukselle, kuormayhdistelmä 4

Lähtötiedot:

Seinän koko pituus:	$l_k = 10000\text{mm}$
Seinän tuentaväli:	$l = 2750\text{mm}$
Seinän vapaa korkeus:	$h = 2800\text{mm}$
Ulkokuoren paksuus:	$t_1 = 90\text{mm}$
Sisäkuoren paksuus:	$t_2 = 90\text{mm}$
Laastisauman leveys: Täysi laastisauma	

Kuormien mitoitusarvot:

Seinän yläpää:

Normaalivoima:	$N_{dy4} = 50,88 \text{ kN/m}$
Taivutusmomentti:	$M_{dy4} = 0,103 \text{ kNm}$

Seinän puoliväli:

Normaalivoima:	$N_{dp4} = 54,70 \text{ kN/m}$
Taivutusmomentti:	$M_{dp4} = 0,845 \text{ kNm}$

Seinän alapää:

Normaalivoima:	$N_{da4} = 58,50 \text{ kN/m}$
Taivutusmomentti:	$M_{da4} = 0 \text{ kNm}$

Muurin puristuslujuuden mitoitusarvo

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M}$$

(RIL 206-2010 Kohta 2.4.3)

missä

γ_M : murtorajatilan materiaalin osavarmuusluku

$$f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta$$

(RIL 206-2010 Kaava 3.1)

missä

f_b : on muurauskappaleiden normalisoitu puristuslujuus

f_m : on laastin puristuslujuus

K, α, β : ovat vakioita

$$f_b = 4,0 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Suoritustasoilmoitus})$$

$$f_m = 10 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Suoritustasoilmoitus})$$

$$f_{m,red} = \max(20 \text{ N/mm}^2, 2 * f_b)$$

$$f_{m,red} = \max(20 \text{ N/mm}^2, 2 * 4,0 \text{ N/mm}^2) = 8,0 \text{ N/mm}^2$$

$K = 0,65$	(RIL 206-2010 Taulukko 3.3FI)
$\alpha = 0,65$	(RIL 206-2010 Kohta 3.6.1.2)
$\beta = 0,25$	(RIL 206-2010 Kohta 3.6.1.2)

$$f_k = 0,65(4,0 \text{ N/mm}^2)^{0,65}(8,0 \text{ N/mm}^2)^{0,25} \approx 2,692 \text{ N/mm}^2$$

$$f_d = \frac{2,692 \text{ N/mm}^2}{1,8} \approx 1,496 \text{ N/mm}^2$$

Seinän tehollinen korkeus

$$h_{ef} = \rho_n h$$

(RIL 206-2010 Kaava 5.2)

missä

h : on seinän vapaa kerroskorkeus

ρ_n : seinän tuentatavasta riippuva pienennyskerroin

Seinä on tuettu kaikilta sivuiltaan ja $h \leq 1,15l$. Tällöin tuentatavasta riippuvan pienennyskerroinena käytetään ρ_4 .

$$\rho_4 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_2 h}{l}\right)^2} \rho_2$$

(RIL 206-2010 Kaava 5.8)

missä

$\rho_2 = 1,0$: Rakennemalli on päistään nivelöity sauva.

$$\rho_4 = \frac{1}{1 + \left(\frac{1,0 \cdot 2800 \text{ mm}}{2750 \text{ mm}}\right)^2} 1,0 \approx 0,491$$

$$h_{ef} = 0,491 \cdot 2800 \text{ mm} \approx 1375 \text{ mm}$$

Seinän tehollinen paksuus

$$t_{ef} = \sqrt[3]{k_{tef} t_1^3 + t_2^3}$$

(RIL 206-2010 Kaava 5.11)

missä

t_1 ja t_2 : ovat seinäpuoliskojen paksuudet

k_{tef} : on seinäpuoliskojen kimmokertoimien suhteen huomioiva kerroin

$$t_1 = t_2 = 90 \text{ mm}$$

Seinäpuoliskot ovat samaa materiaalia jolloin:

$$k_{tef} = 1$$

$$t_{ef} = \sqrt[3]{1,0(90mm)^3 + (90mm)^3} \approx 113mm$$

Seinän hoikkuus

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t_{ef}}$$

(RIL 206-2010 Kohta 5.5.1.4)

Pääasiassa pystykuormitetuilla seinillä hoikkuusluvun tulee olla korkeintaan 27.

$$\lambda = \frac{1375mm}{113mm} \approx 12,17 \leq 27$$

Alkuepäkeskisyyys

Alkuepäkeskisyyys huomioi rakennustyön epätarkkuudet ja vaikuttaa seinän koko korkeudella.

$$e_{init} \frac{h_{ef}}{450}$$

(RIL 206-2010 Kohta 5.5.1.1)

$$e_{init} = \frac{1375}{450} \approx 3,06mm$$

Seinän yläpään mitoituskestävyys

$$N_{Rd} = \Phi t f_d$$

(RIL 206-2010 Kaava 6.2)

missä

Φ : on hoikkuuden ja epäkeskisyyden pienennyskerroin

t : on seinän paksuus

f_d : on muurin puristuslujuuden mitoitusarvo

$$\Phi = 1 - 2 \frac{e_i}{t}$$

(RIL 206-2010 Kaava 6.4)

missä

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} + e_{init} \geq 0,05t$$

(RIL 206-2010 Kaava 6.5)

missä

M_{id} : on taivutusmomentin mitoitusarvo

N_{id} : on normaalivoiman mitoitusarvo

e_{he} : on vaakakuormien aiheuttama epäkeskisyyys

e_{init} : on alkuepäkeskisyyys

t : on seinän paksuus

$$e_i = \frac{0,103 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{50,88 \cdot 10^3 \text{ N/mm}} + 0 \text{ mm} + 3,06 \text{ mm} \approx 5,08 \text{ mm} \geq 0,05 \cdot 90 \text{ mm} = 4,5 \text{ mm}$$

$$\Phi = 1 - 2 \frac{5,08 \text{ mm}}{90 \text{ mm}} \approx 0,887$$

$$N_{Rdy} = 0,887 \cdot 90 \text{ mm} \cdot 1,496 \text{ N/mm}^2 \approx 119,43 \text{ N/mm}$$

Seinän alapään mitoituskestävyys

Alapään mitoituskestävyyden määrittäminen tapahtuu samalla tavalla kuin yläpään.

$$e_i = \frac{0 \text{ Nmm}}{58,50 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2} + 0 + 3,06 \text{ mm} = 3,06 \text{ mm} \leq 4,5 \text{ mm}$$

$$\Phi = 1 - 2 \frac{4,50 \text{ mm}}{90 \text{ mm}} \approx 0,900$$

$$N_{Rda} = 0,900 \cdot 90 \text{ mm} \cdot 1,496 \text{ N/mm}^2 \approx 121,18 \text{ N/mm}$$

Seinän puolivälin mitoituskestävyys

$$e_{mk} = e_m \geq 0,05t$$

(RIL206-2010 Kaava 6.6FI)

missä

$$e_m = \frac{M_{md}}{N_{md}} + e_{hm} \pm e_{init}$$

(RIL 206-2010 Kaava 6.7)

missä

- e_m : on kuormien aiheuttama epäkeskisyys
- M_{md} : on mitoittava taivutusmomentti seinän puolivälissä
- N_{md} : on mitoittava normaalivoima seinän puolivälissä
- e_{hm} : on vaakakuormien aiheuttama epäkeskisyys

$$e_m = \frac{0,845 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{54,70 \cdot 10^3 \text{ N/mm}} + 0 \text{ mm} + 3,06 \text{ mm} \approx 18,51 \text{ mm}$$

$$e_{mk} = 18,51 \text{ mm} \geq 0,05 \cdot 90 \text{ mm} = 4,5 \text{ mm}$$

Tässä esimerkissä hoikkeuden ja epäkeskisyyden pienennyskerroin seinän puolivälissä lasketaan RIL 206-2010 Liitteen G mukaisesti. Vaihtoehtoisesti kerroin voidaan määrittää kohdan 6.1.2.2 kuvaajien avulla.

$$\Phi_m = A_1 e^{-\frac{u^2}{2}}$$

(RIL 206-2010 Kaava G.1)

missä

$$A_1 = 1 - 2 \frac{e^{mk}}{t} \quad (\text{RIL 206-2010 Kaava G.2})$$

$$u = \frac{\lambda - 0,063}{0,73 - 1,17 \frac{e^{mk}}{t}} \quad (\text{RIL 206-2010 Kaava G.3})$$

missä

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{\frac{f_k}{E}} \quad (\text{RIL206-2010 Kaava G.4})$$

missä

$$E = K_E f_k \quad (\text{RIL 206-2010 Kohta 3.7.2})$$

missä

$$K_E = 700$$

$$E = 700 * 2,692 \text{ N/mm}^2 \approx 1884,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda = \frac{1375 \text{ mm}}{113 \text{ mm}} \sqrt{\frac{2,692 \text{ N/mm}^2}{1884,4 \text{ N/mm}^2}} \approx 0,460$$

$$u = \frac{0,460 - 0,063}{0,73 - 1,17 \frac{18,51 \text{ mm}}{90 \text{ mm}}} \approx 0,811$$

$$A_1 = 1 - 2 \frac{18,51 \text{ mm}}{90 \text{ mm}} \approx 0,593$$

$$\Phi_m = 0,593 * e^{-\frac{0,811^2}{2}} \approx 0,427$$

$$N_{Rdp} = 0,427 * 90 \text{ mm} * 1,496 \text{ N/mm}^2 \approx 57,49 \text{ N/mm}$$

Käyttöasteet ja koonti

Seinän yläpää:

$$N_{dy4} = 50,88 \text{ kN/m}$$

$$N_{Rdy} = 119,43 \text{ kN/m}$$

$$N_{Rdy} > N_{dy4}$$

Käyttöaste:

$$\frac{50,88 \text{ kN/m}}{119,43 \text{ kN/m}} * 100\% \approx 43\%$$

Seinän puoliväli:

$$N_{dp4} = 54,70 \text{ kN/m}$$

$$N_{Rdp} = 57,49 \text{ kN/m}$$

$$N_{Rdp} > N_{dp4}$$

Käyttöaste:

$$\frac{54,70 \text{ kN/m}}{57,49 \text{ kN/m}} * 100\% \approx 95\%$$

Seinän alapää:

$$N_{da4} = 58,50 \text{ kN/m}$$

$$N_{Rda} = 121,18 \text{ kN/m}$$

$$N_{Rda} > N_{da4}$$

Käyttöaste:

$$\frac{58,50 \text{ kN/m}}{121,18 \text{ kN/m}} * 100\% \approx 48\%$$

Kuviossa 18 on esitetty tämä mitoitus esimerkki laskettuna työtä varten kehitetyllä excel taulukko-laskentapohjalla.

Kantavan seinän mitoitus puristukselle ja taivutukselle				
Kuormitusyhdistelmä 1	Arvo	Yksikkö		
Seinän yläpää:				
Mitoittava normaalivoima N_dy1	50,88	kN/m		
Mitoittava momentti M_dy1	0,103	kNm		
Seinän puoliväli:				
Mitoittava normaalivoima N_dp1	54,7	kN/m		
Mitoittava momentti M_dp1	0,845	kNm		
Seinän alapää:				
Mitoittava normaalivoima N_da1	58,5	kN/m		
Mitoittava momentti M_da1	0	kNm		
Rakenteen tiedot:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio
Seinän korkeus h	2800	mm		
Seinän pituus l	2750	mm		
Ulkokuoren paksuus t_1	90	mm		
Sisäkuoren paksuus t_2	90	mm		
Sauman leveys g	90	mm		Oletusarvo: g=t_2
Laskuri pienennyskerroin p_n	Arvo	Yksikkö		RIL 206-2010 Luku 5.5.1.2
Pienennyskerroin p_2	1			Ylä- ja alareunasta tuettu seinä
Pienennyskerroin p_3	0,897			Ylä- ja alareunasta sekä yhdeltä pystyrunalta tuettu seinä
Pienennyskerroin p_4	0,491			Ylä- ja alareunasta sekä kahdelta pystyrunalta tuettu seinä
Tuentatavasta riippuva pienennyskerroin p_n	0,491			
Muurauskappale:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio
Muurauskappaleen normalisoitu puristuslujuus f_b	4	N/mm ²		Muurauskappaleen suoritusasoilmoitus
Laastin puristuslujuus f_m	10	N/mm ²		Laastin suoritusasoilmoitus
f_mred	8	N/mm ²		RIL 206-2010 Luku 3.6.1.2
α	0,65			RIL 206-2010 Luku 3.6.1.2
β	0,25			RIL 206-2010 Luku 3.6.1.2
K	0,65			RIL 206-2010 Taulukko 3.3FI
Murtorajatilän osavarmuusluku Y_m	1,8			RIL 206-2010 Luku 2.4.3
Kimmokerroin K_E	700			RIL 206-2010 Luku 3.7.2
Apusuureet:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio
Laastisauman minimileveys g_min	36	mm	OK	RIL 206-2010 Luku 3.6.1.3
Seinän tehollinen korkeus h_ef	1375	mm		RIL 206-2010 Luku 5.5.1.2
Seinän tehollinen paksuus t_ef	113	mm		RIL 206-2010 Kaava 5.11
Seinän hoikkuus λ	12,12		OK	RIL 20-2010 Luku 5.5.1.4
Kuorman alkuepäkesisyyden e_init	3,06	mm		RIL 206-2010 Luku 5.5.1.1
Muurin puristuslujuus:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio
Puristuslujuuden ominaisarvo f_k	2,69	N/mm ²		RIL 206-2010 Kaava 3.1
Puristuslujuuden laskenta-arvo f_d	1,495	N/mm ²		RIL 206-2010 Luku 2.4.3
Seinän yläpään mitoituskestävyys:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio
Epäkesisyyden e_y	5,08	mm		RIL 206-2010 Kaava 6.5
Hoikkuuden ja epäkesisyyden pienennyskerroin Φ_1	0,887			RIL 206-2010 Kaava 6.4
Normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo N_Rd1	119,39	kN/m	OK	RIL 206-2010 Kaava 6.2
Käyttöaste:	42,62 %			
Seinän puolivälin mitoituskestävyys:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio
Epäkesisyyden e_mk	18,50	mm		RIL 206-2010 Kaava 6.5
Kimmomoduli E	1884,18	N/mm ²		RIL 206-2010 Luku 3.7.2
λ	0,458			RIL 206-2010 Kaava G.4
u	0,808			RIL 206-2010 Kaava G.3
A_1	0,589			RIL 206-2010 Kaava G.2
Hoikkuuden ja epäkesisyyden pienennyskerroin Φ_m	0,425			RIL 206-2010 Kaava G.1
Normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo N_Rdm	57,20	kN/m	OK	RIL 206-2010 Kaava 6.2
Käyttöaste:	95,63 %			
Seinän alapään mitoituskestävyys:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio
Epäkesisyyden e_a	4,50	mm		RIL 206-2010 Kaava 6.5
Hoikkuuden ja epäkesisyyden pienennyskerroin Φ_2	0,900			RIL 206-2010 Kaava 6.4
Normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo N_Rd2	121,13	kN/m	OK	RIL 206-2010 Kaava 6.2
Käyttöaste:	48,30 %			

Kuvio 18 Mitoitus puristukselle ja taivutukselle käyttäen excel taulukkolaskentaa

Mitoitus tuulenpaineelle:**Kuormat****Rakenteiden omapainot**

Seinä yläpohja kohdalla:	1,64 kN/m
<u>Yhteensä:</u>	<u>1,64kN/m</u>

Tuulikuorma:

Suurin tuulen paine saavutetaan vyöhykkeellä D tuulen suunnan ollessa kohtisuoraan pitkää sivua vasten ja suurin tuulen imu vyöhykkeellä A tuulen suunnan ollessa lyhyttä sivua vasten. Muita poikittaisia voimia ei esiinny, joten näistä valitaan itseisarvoltaan suurempi, tässä tapauksessa tuulen imu vyöhykkeellä A.

$$q_{k,tuuli} = 0,42 \text{ kN/m}^2$$

Kuormayhdistelmät

Mitoitettaessa tuulenpaineelle, pystykuormat ovat rakenteen kestävyydelle edullisia Tuuli on aina rakennetta rasittava muuttuva kuorma. Mahdollisia kuormayhdistelmiä on kaksi: rakenteiden omapaino tuulen kanssa ja ilman.

Normaalivoiman mitoitusarvo:

$$N_{Ed} = 0,9 K_{FI} (G_k)$$

$$N_{Ed} = 0,9 * 1,0 * 1,64 \text{ kN/m} = 1,48 \text{ kN/m}$$

Tuulikuorman mitoitusarvo:

$$W_{Ed} = 1,5 * q_{k,tuuli}$$

$$W_{Ed} = 1,5 * 0,42 \text{ kN/m}^2 = 0,63 \text{ kN/m}^2$$

Mitoituslaskelmat

Lähtötiedot:

Seinän osan pituus:	$l = 3000\text{mm}$
Seinän vapaa korkeus:	$h = 2800\text{mm}$
Ulkokuoren paksuus:	$t_1 = 90\text{mm}$
Sisäkuoren paksuus:	$t_2 = 90\text{mm}$
Laastisauman leveys:	Täysi laastisauma

Kuormien mitoitusarvot:

Tuulikuorma:	$W_{Ed} = 0,63 \text{ kN/m}^2$
Normaalivoima:	$N_{Ed} = 1,48 \text{ kN/m}$

Tuentatapaus:

Seinä on ylä- ja alareunoiltaan vapaasti tuettu ja pystyreunoiltaan jäykästi kiinnitetty.

Muurin mitoituslujuudet

Muurin taivutusvetolujuuden mitoitusarvot vaakasauman suuntaisessa murtotasossa f_{xd1} ja vaakasaumaa vastaan kohtisuorassa murtotasossa f_{xd2} .

$$f_{xd1} = \frac{f_{xk1}}{\gamma_M}$$

$$f_{xd2} = \frac{f_{xk2}}{\gamma_M}$$

missä

$\gamma_M = 1,8$ murtorajatilän materiaalin osavarmuusluku

$$f_{xk1} \geq 0,20 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{xk2} \geq 0,13 \text{ N/mm}^2$$

Mitoituksessa käytetään valmistajan suoritusasoilmoituksessa annettuja taivutusvetolujuuden ominaisarvojen minimiarvoja.

$$f_{xd1} = \frac{0,20 \text{ N/mm}^2}{1,8} = 0,111 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{xd2} = \frac{0,13 \text{ N/mm}^2}{1,8} = 0,072 \text{ N/mm}^2$$

Muurin puristuslujuuden mitoitusarvo f_d on määritetty jo aiemmin mitoituksessa puristukselle ja taivutukselle.

$$f_d = 1,496 \text{ N/mm}^2$$

Korotettu taivutusvetolujuus vaakasauman suuntaisessa murtotasossa

$$f_{xd1,app} = f_{xd1} + \sigma_d$$

(RIL 206-2010 Kaava 6.16)

missä

$$f_{xd1} = 0,111 \text{ N/mm}^2$$

σ_d : on seinän puristusjännitys, joka on korkeintaan $0,2 * f_d$

$$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{t} \leq 0,2f_d$$

$$\sigma_d = \frac{1,48 \text{ N/mm}}{90 \text{ mm}} \approx 0,016 \text{ N/mm}^2$$

$$0,2 * 1,496 \text{ N/mm}^2 \approx 0,299 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_d = 0,016 \text{ N/mm}^2 \leq 0,299 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{xd1,app} = 0,111 \text{ N/mm}^2 + 0,016 \text{ N/mm}^2 = 0,127 \text{ N/mm}^2$$

Momenttikestävyden mitoitusarvot

Momenttikestävyden mitoitusarvot lasketaan sisä- ja ulkokuorille erikseen.

$$M_{Rd1} = f_{xd1,app} Z \quad \text{vaakasauman suuntaisessa murtotasossa}$$

$$M_{Rd2} = f_{xd2} Z \quad \text{vaakasaumaa vasten kohtisuorassa murtotasossa}$$

(RIL 206-2010 Kaava 6.15)

missä

$$Z = \frac{t^2}{6} \quad \text{on poikkileikkauksen kimmainen taivutusvastus pituusyksikköä kohden}$$

$$Z_1 = \frac{t_1^2}{6} = \frac{(90 \text{ mm})^2}{6} = 1350 \text{ mm}^2 \quad \text{ulkokuori}$$

$$Z_2 = \frac{t_2^2}{6} = \frac{(90 \text{ mm})^2}{6} = 1350 \text{ mm}^2 \quad \text{sisäkuori}$$

Ulkokuoren momenttikestävyden mitoitusarvo murtotason ollessa vaakasaumojen suuntainen:

$$M_{Rd11} = 0,127 \text{ N/mm}^2 * 1350 \text{ mm}^2 \approx 0,171 \text{ kNm}$$

Ulkokuoren momenttikestävyden mitoitusarvo murtotason ollessa vaakasaumojaa vastaan kohtisuorassa:

$$M_{Rd21} = 0,072 \text{ N/mm}^2 * 1350 \text{ mm}^2 \approx 0,097 \text{ kNm}$$

Sisäkuoren momenttikestävyysmitoitussarvo murtotason ollessa vaakasaumojen suuntainen:

$$M_{Rd12} = 0,127 \text{ N/mm}^2 * 1350 \text{ mm}^2 \approx 0,171 \text{ kNm}$$

Sisäkuoren momenttikestävyysmitoitussarvo murtotason ollessa vaakasaumojen vastaan kohtisuorassa:

$$M_{Rd22} = 0,072 \text{ N/mm}^2 * 1350 \text{ mm}^2 \approx 0,097 \text{ kNm}$$

Momentin mitoitussarvot M_{Ed1} ja M_{Ed2}

$$M_{Ed1} = \alpha_1 W_{Ed} l^2 \quad \text{vaakasauman suuntaisessa murtotasossa} \\ \text{(RIL 206-2010 Kaava 5.17)}$$

$$M_{Ed2} = \alpha_2 W_{Ed} l^2 \quad \text{vaakasaumaa vasten kohtisuorassa murtotasossa} \\ \text{(RIL206-2010 Kaava 5.18)}$$

missä

α_1 ja α_2 : ovat seinän tuentatavasta riippuvia momenttikertoimia

$$\alpha_1 = \mu \alpha_2 \\ \text{(RIL 206-2010 Kohta 5.5.5)}$$

missä

μ : on taivutuslujuuksien mitoitussarvojen ortogonaalisuhde

$$\mu = \frac{f_{xd1,app}}{f_{xd2}} \\ \text{(RIL 206-2010 Kohta 5.5.5)}$$

$$\mu = \frac{0,127 \text{ N/mm}^2}{0,072 \text{ N/mm}^2} \approx 1,764$$

α_2 saadaan RIL 206-2010 liitteestä E käyttäen ortogonaalisuhdetta μ ja sivusuhdetta h/l . Liitteen E taulukoista valitaan oikea, seinän tuentatapauksen perusteella, tässä tapauksessa käytetään taulukkoa G.

$$h/l = \frac{2800 \text{ mm}}{3000 \text{ mm}} = 0,93$$

$$\alpha_2 = 0,028$$

$$\alpha_1 = 1,764 * 0,028 \approx 0,049$$

$$M_{Ed1} = 0,049 * 0,63 \text{ kN/m}^2 * (3,00 \text{ m})^2 \approx 0,278 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed2} = 0,028 * 0,63 \text{ kN/m}^2 * (3,00 \text{ m})^2 \approx 0,159 \text{ kNm}$$

Taivutusmomenttien mitoitussarvot jaetaan ulko- ja sisäkuorille niiden momenttikestävyyskertoimien suhteissa:

Ulkokuori, murtotaso vaakasaumojen suuntainen:

$$M_{Ed11} = \frac{M_{Rd11}}{M_{Rd11} + M_{Rd12}} M_{Ed1} \\ M_{Ed11} = \frac{0,171 \text{ kNm}}{0,171 \text{ kNm} + 0,171 \text{ kNm}} 0,278 \text{ kNm} \approx 0,139 \text{ kNm}$$

Ulkokuori, murtotaso vaakasaumoja vastaan kohtisuorassa:

$$M_{Ed21} = \frac{M_{Rd21}}{M_{Rd21} + M_{Rd22}} M_{Ed2}$$

$$M_{Ed21} = \frac{0,097kNm}{0,097kNm + 0,097kNm} 0,159kNm \approx 0,080kNm$$

Sisäkuori, murtotaso vaakasaumojen suuntainen:

$$M_{Ed12} = M_{Ed1} - M_{Ed11} = 0,278kNm - 0,139kNm \approx 0,139kNm$$

Sisäkuori, murtotaso vaakasaumoja vastaan kohtisuorassa:

$$M_{Ed22} = M_{Ed2} - M_{Ed21} = 0,159kNm - 0,080kNm \approx 0,079kNm$$

Koonti ja käyttöasteet

Ulkokuori, murtotaso vaakasaumojen suuntainen:

$$M_{Ed11} = 0,139kNm$$

$$M_{Rd11} = 0,171kNm$$

$$M_{Rd11} > M_{Ed11}$$

Käyttöaste:

$$\frac{0,139kNm}{0,171kNm} * 100\% \approx 81\%$$

Ulkokuori, murtotaso vaakasaumoja vastaan kohtisuorassa:

$$M_{Ed21} = 0,080kNm$$

$$M_{Rd21} = 0,097kNm$$

$$M_{Rd21} > M_{Ed21}$$

Käyttöaste:

$$\frac{0,080kNm}{0,097kNm} * 100\% \approx 82\%$$

Sisäkuori, murtotaso vaakasaumojen suuntainen:

$$M_{Ed12} = 0,139kNm$$

$$M_{Rd12} = 0,171kNm$$

$$M_{Rd12} > M_{Ed12}$$

Käyttöaste:

$$\frac{0,139kNm}{0,171kNm} * 100\% \approx 81\%$$

Sisäkuori, murtotaso vaakasaumoja vastaan kohtisuorassa:

$$M_{Ed22} = 0,079kNm$$

$$M_{Rd22} = 0,097kNm$$

$$M_{Rd22} > M_{Ed22}$$

Käyttöaste:

$$\frac{0,079kNm}{0,097kNm} * 100\% \approx 81\%$$

Kuviossa 19 on esitetty tämä mitoitus esimerkki laskettuna työtä varten kehitetyllä excel taulukko-laskentapohjalla.

Muuratun seinän mitoitus tuulenpainelle					
Voimasuureiden mitoitusarvot:	Arvo	Yksikkö			
Tuulikuorman mitoitusarvo W_{Ed}	0,630	kN/m ⁽²⁾			
Normaalivoiman mitoitusarvo n_{Ed}	1,48	kN/m			
Muurin tiedot:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio	
Ulkokuoren paksuus t_1	90	mm			
Sisäkuoren paksuus t_2	90	mm			
Ulkokuoren sauman leveys g_1	90	mm		Täysi sauma -> $g_1=t_1$	
Sisäkuoren sauman leveys g_2	90	mm		Täysi sauma -> $g_1=t_1$	
Muurauskappaleen normalisoitu puristuslujuus f_b	4,0	N/mm ⁽²⁾		Muurauskappaleen suoritusasoilmoitus	
Laastin puristuslujuus f_m	10,0	N/mm ⁽²⁾		Laastin suoritusasoilmoitus	
Muurin taivutusvetolujuuden ominaisarvot:					
Vaakasauman suuntainen murtotaso f_{xk1}	0,20	N/mm ⁽²⁾		Muurauskappaleen suoritusasoilmoitus	
Pystysauman suuntainen murtotaso f_{xk2}	0,13	N/mm ⁽²⁾		Muurauskappaleen suoritusasoilmoitus	
Puristulujuuden kertoimet			*	RIL 206-2010 Luku 3.6.1.2	
α	0,65			RIL 206-2010 Luku 3.6.1.2	
β	0,25			RIL 206-2010 Luku 3.6.1.2	
K	0,65			RIL 206-2010 Taulukko 3.3F1	
Murtoarajan osavarmuusluku γ_m	1,8			RIL 206-2010 Luku 2.4.3	
Rakenteen tiedot:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio	
Seinän vapaa korkeus h	2800	mm			
Seinän osan pituus l	3000	mm			
h/l	0,933				
Tuentatapauksesta riippuva kerroin α_2	0,028			RIL 206-2010 Liite E	Ortogonaalisuhde μ : 1,766
Muurin puristuslujuus:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio	
f_{mred}	8,000	N/mm ⁽²⁾		RIL 206-2010 Luku 3.6.1.2	
Puristuslujuuden ominaisarvo f_k	2,692	N/mm ⁽²⁾		RIL 206-2010 Kaava 3.1	
Puristuslujuuden mitoitusarvo f_d	1,495	N/mm ⁽²⁾		RIL 206-2010 Luku 2.4.3	
Mitoitusarvot:	Arvo	Yksikkö	*	Viite/Huomio	
Taivutusvetolujuuden mitoitusarvo, vaaka f_{xd1}	0,111	N/mm ⁽²⁾		RIL 206-2010 Luku 2.4.1	
Taivutusvetolujuuden mitoitusarvo, pysty f_{xd2}	0,072	N/mm ⁽²⁾		RIL 206-2010 Luku 2.4.1	
Seinän pystysuuntainen mitoitusjännitys σ_d	0,016	N/mm ⁽²⁾	OK	RIL 206-2010 Luku 6.3.1	
Korotettu taivutusvetolujuus $f_{xd1,app}$	0,128	N/mm ⁽²⁾		RIL 206-2010 Kaava 6.16	
Ortogonaalisuhde μ	1,766			RIL 206-2010 Luku 5.5.5	
Tuentatapauksesta riippuva kerroin α_2	0,028			RIL 206-2010 Liite E	
Tuentatapauksesta riippuva kerroin α_1	0,049			RIL 206-2010 Liite E	
Taivutusmomenttien mitoitusarvot:					
Murtotaso vaakasaumojen suuntainen M_{Ed1}	0,280	kNm		RIL 206-2010 Kaava 5.17	
Murtotaso pystysaumojen suuntainen M_{Ed2}	0,159	kNm		RIL 206-2010 Kaava 5.18	
Taivutusvastus pituusyksikköä kohden:					
Ulkokuori Z_1	1350	mm ⁽²⁾		RIL 206-2010 Sivu 139	
Sisäkuori Z_2	1350	mm ⁽²⁾		RIL 206-2010 Sivu 139	
Momenttikestävyden mitoitusarvot:					
Ulkokuori, vaaka M_{Rd11}	0,172	kNm		RIL 206-2010 Kaava 6.15	
Ulkokuori, pysty M_{Rd21}	0,098	kNm		RIL 206-2010 Kaava 6.15	
Sisäkuori, vaaka M_{Rd12}	0,172	kNm		RIL 206-2010 Kaava 6.15	
Sisäkuori, pysty M_{Rd22}	0,098	kNm		RIL 206-2010 Kaava 6.15	
Taivutusmomenttien mitoitusarvot kuorien momenttikestävyysien suhteessa:					
Ulkokuori, vaaka M_{Ed11}	0,140	kNm		RIL 206-2010 Luku 6.3.1	
Ulkokuori, pysty M_{Ed21}	0,079	kNm		RIL 206-2010 Luku 6.3.1	
Sisäkuori, vaaka M_{Ed12}	0,140	kNm		RIL 206-2010 Luku 6.3.1	
Sisäkuori, pysty M_{Ed22}	0,079	kNm		RIL 206-2010 Luku 6.3.1	
Koonti:	M_{Rd}	Yksikkö	M_{Ed}	Yksikkö	Käyttöaste
Ulkokuori, vaaka	0,172	kNm	0,140	kNm	81,42 %
Ulkokuori, pysty	0,098	kNm	0,079	kNm	81,42 %
Sisäkuori, vaaka	0,172	kNm	0,140	kNm	81,42 %
Sisäkuori, pysty	0,098	kNm	0,079	kNm	81,42 %

Kuvio 19 Mitoitus tuulenpainelle käyttäen excel taulukkolaskentaa