

Opinnäytetyö AMK

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri

2023

Patrik Keihäs

# Betoniseinien palomitoitus



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri

2023 | 50 sivua, 28 liitesivua

Patrik Keihäs

## Betoniseinien palomitoitus

Opinnäytetyö toteutettiin toimeksiantona A-Insinöörit Suunnittelu Oy:lle. Työn aiheena oli betoniseinien palomitoitus ja tavoitteena oli perehtyä betoniseinien palomitoitusmenetelmiin ja vertailla menetelmien käytettävyyttä. Tarkoituksena oli myös esittää esimerkkilaskut betoniseinien palomitoitukseen taulukkomitoituksella ja yksinkertaisilla mitoitustapojilla.

Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena hyödyntäen aiheeseen liittyviä oppikirjoja, ohjeita ja asiantuntija-artikkeleita. Opinnäytetyössä tarkasteltiin palon vaikutuksia teräsbetonista valmistettuihin seiniin, Eurokoodien mukaisia palon aikaisia kuormituksia ja betoniseinien palomitoitusmenetelmiä.

Työn tuloksien perusteella suunnittelija pystyy mitoitamaan palolle altistuneita seiniä käyttäen taulukkomitoitusta, 500°C isotermimenetelmää ja vyöhykemenetelmää.

Asiasanat:

Betoniseinä, palomitoitus, taulukkomitoitus, 500°C isotermimenetelmä, vyöhykemenetelmä

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Construction and Municipal Engineering

2023 | 50 pages, 28 pages in appendices

Patrik Keihäs

## Fire design of concrete walls

This thesis was carried out as an assignment for A-Insinöörit Suunnittelu Oy. The subject of the thesis was fire design of concrete walls and the objective was to take a look at the fire design methods for concrete walls and compare their usability. The purpose was also to provide example calculations for concrete walls using tabulated data and simplified calculation methods.

The thesis was carried out as a literature study using relevant textbooks, guidelines and expert articles. The thesis looked at the effects of fire on reinforced concrete walls, Eurocode-compliant fire loads and fire design methods of concrete walls.

Based on the results of this thesis, a designer is able to design concrete walls exposed to fire using tabulated data, 500°C isotherm method and zone method.

Keywords:

Concrete wall, fire design, tabular method, 500°C isotherm method, zone method

# Sisältö

<b>Käytetyt lyhenteet tai sanasto</b>	<b>8</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>10</b>
<b>2 Teräsbetonin käyttäytyminen palossa</b>	<b>11</b>
2.1 Betonin puristuslujuus	12
2.2 Betonin vetolujuus	13
2.3 Betoniteräkset	13
2.4 Betonin lohkeilu	14
2.5 Betonin halkeilu	14
2.6 Materiaaliominaisuuksien laskenta standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan	15
2.6.1 Betonin puristuslujuus palotilanteessa standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan	16
2.6.2 Betonin vetolujuus palotilanteessa standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan	17
2.6.3 Betoniteräksen lujuus palotilanteessa standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan	18
2.6.4 Betoniteräksen kimmokerroin palotilanteessa standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan	19
2.7 Korkealujuusbetoni	20
<b>3 Betonirakenteiden palomitoitus</b>	<b>22</b>
3.1 Yksityiskohtaisiin sääntöihin perustuva mitoitustapa	24
3.2 Toimivuuteen perustuva mitoitustapa	25
3.3 Palotilanteen kuormat	26
3.4 Lämpötilaprofiilit	29
3.5 Palotilan lämmön kehitys	31
<b>4 Betoniseiniä palomitoitusmenetelmät</b>	<b>36</b>
4.1 Taulukkomitoitus	37
4.2 500°C isotermimenetelmä	39
4.2.1 Edellytykset	40

4.2.2 Mitoituksen kulku	40
4.3 Vyöhykemenetelmä	42
4.4 Menetelmien vertailu	46
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>48</b>
<b>Lähteet</b>	<b>49</b>

## Liitteet

- Liite 1. Raudoitettu seinä – Mitoitus normaalilämpötilassa
- Liite 2. Raudoitettu seinä – REI 120 – Taulukkimitoitus
- Liite 3. Raudoitettu seinä – REI 120 – 500°C isotermimenetelmä
- Liite 4. Raudoitettu seinä – REI 120 – vyöhykemenetelmä

## Kaavat

Kaava 1. Mekaanisten materiaaliominaisuuksien mitoituservojen laskeminen (SFS-EN 1992-1-2, 14, kaava 2.1).....	15
Kaava 2. Betonin puristuslujuuden pieneneminen palotilanteessa .....	16
Kaava 3. Betonin heikentynyt vetolujuus palotilanteessa.....	17
Kaava 4. Betoniteräksen heikentynyt lujuus palotilanteessa.....	18
Kaava 5. Betoniteräksen kimmokertoimen aleneminen palotilanteessa .....	19
Kaava 6. Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelmä (SFS-EN 1990, 80, kaava 6.11a).....	26
Kaava 7. Kuormien laskennan yksinkertaistus (SFS-EN 1992-1-2, 15, Kaava 2.4).....	27
Kaava 8. Pienennyskertoimen laskenta, kun käytetään SFS-EN 1990 kaavaa 6.10 (SFS-EN 1992-1-2, 15, Kaava 2.5) .....	28
Kaava 9. Pienennyskertoimen laskenta, kun käytetään SFS-EN 1990 kaavaa 6.10a (SFS-EN 1992-1-2, 15, Kaava 2.5a).....	28

Kaava 10. Pienennyskertoimen laskenta, kun käytetään SFS-EN 1990 kaavaa 6.10b (SFS-EN 1992-1-2, 15, Kaava 2.5b).....	28
Kaava 11. Standardipalon lämpötila-aikakäyrä (SFS-EN 1991-1-2, 40, Kaava 3.4).....	32
Kaava 12. Ulkopuolisen palon lämpötila-aikakäyrä (SFS-EN 1991-1-2, 42, Kaava 3.5).....	34
Kaava 13. Hiilivetypalon lämpötila-aikakäyrä (SFS-EN 1991-1-2, 42, Kaava 3.6).....	34
Kaava 14. Parametrisen palon kuumenemisvaiheen lämpötila-aikakäyrä (SFS-EN 1991-1-2, 50, Kaava A.1).....	34
Kaava 15. Hyväksikäyttöasteen laskeminen.....	38
Kaava 16. Heikentyneen alueen kasvaminen korkealujuusbetonilla (SFS-EN 1992-1-2, 55, kaava 6.4).....	41
Kaava 17. Poikkileikkauksen keskimääräisen pienennyskertoimen laskeminen.....	44
Kaava 18. Heikentyneen vyöhykkeen laskenta.....	44

## Kuvat

Kuva 1. Betonin puristuslujuuden heikennyskerroin $k_{c\theta}$ (SFS-EN 1992-1-2, 29, kuva 4.1).....	16
Kuva 2. Betonin vetolujuuden heikennyskerroin $k_{c,t\theta}$ (SFS-EN 1992-1-2, 20, kuva 3.2).....	17
Kuva 3. Betoniteräksen lujuuden heikennyskerroin (luokka N) (SFS-EN 1992-1-2, 31, kuva 4.2a).....	18
Kuva 4. Teräksen kimmokertoimen heikennyskertoimet luokan N betoniteräksille (SFS-EN 1992-1-2, 22, Taulukko 3.2a).....	19
Kuva 5. Lujuuden pieneneminen korkeissa lämpötiloissa (SFS-EN 1992 kansallinen liite, s.33, Taulukko 1).....	20
Kuva 6. Vaihtoehtoiset mitoitusmenettelyt (RIL 201-2-2017, 18).....	23

Kuva 7. Toiselta puolelta altistuneen seinän lämpötilaprofiili (seinän paksuus 200 mm) (SFS-EN 1992-1-2, 58)	30
Kuva 8. Todellisen palon vaiheet ja lämpötilan muuttuminen (SSAB 2016, 340)	32
Kuva 9. Standardi-, ulkopuolisen- ja hiilivetypalon käyrät (Buchanan & Abu 2017, 63)	33
Kuva 10. Teräsbetonirakenteen pienennetty poikkileikkaus, kun paloaltistus on neljältä sivulta (SFS-EN 1992-1-2, 67, Kuva B.1)	42
Kuva 11. Poikkileikkauksen pienennys palossa (SFS-EN 1992-1-2, 71, kuva B.3)	43
Kuva 12. Pienennetyn poikkileikkauksen puristuslujuuden pieneneminen, kun käytetään silikaattipitoisesta kiviaineksesta valmistettavaa betonia. (SFS-EN 1992-1-2, 73, kuva B.5)	45

## Taulukot

Taulukko 1. Betonissa tapahtuvat reaktiot palossa (Suomen Betoniyhdistys ry n.d.)	12
Taulukko 2. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet (SFS-EN 1990, 86/ Ympäristöministeriö 2016, 17)	27
Taulukko 3. Kantavien seinien vähimmäismitat ja keskiöetäisyyden vähimmäisarvo (SFS-EN 1992-1-2, 42, Taulukko 5.4)	37
Taulukko 4. Ei-kantavien seinien (osastoivien seinien) vähimmäispaksuus (SFS-EN 1992-1-2, 42, Taulukko 5.3)	39
Taulukko 5. Poikkileikkauksen vähimmäisleveys palonkestävyyden funktiona (standardipaloaltistukselle) (SFS-EN 1992-1-2, 66, Taulukko B1)	40

## Käytetyt lyhenteet tai sanasto

$a$	keskiöetäisyys
$a_z$	heikentyneen alueen leveys
$a_{z,500}$	500°C isotermin syvyys
$A_d$	onnettomuuskuorman mitoitusarvo
$A_t$	vaipan kokonaispinta-ala
$A_v$	kaikissa seinissä olevien pystyaukkojen kokonaisala
$c$	tilaa ympäröivän rakenteen ominaislämpökapasiteetti
$E_d$	normaalilämpötilassa vaikuttavien kuormien mitoitusarvo
$E_{d,fi}$	palotilanteessa vaikuttavien kuormien vakio mitoitusarvo
$E_s$	betoniteräksen kimmokertoimen ominaisarvo
$E_{s,\theta}$	betoniteräksen kimmokertoimen mitoitusarvo palotilanteessa
$f_{cd,fi}$	betonin puristuslujuuden mitoitusarvo palotilanteessa
$f_{ck}$	betonin puristuslujuuden ominaisarvo
$f_{ctd,fi}$	betonin vetolujuuden mitoitusarvo palotilanteessa
$f_{ctk}$	betonin vetolujuuden ominaisarvo
$f_{y d,fi}$	betoniteräksen lujuuden mitoitusarvo palotilanteessa
$f_{yk}$	betoniteräksen lujuuden ominaisarvo
$G_{k,j}$	pysyvän kuorman ominaisarvo
$h_{eq}$	kaikissa seinissä olevien ikkunoiden korkeuksien painotettu keskiarvo



$k$	isotermiin muutoksen huomioon ottava kerroin
$k_{\theta}$	lujuus- tai muodonmuutosominaisuuden pienennyskerroin
$N_{Ed,fi}$	normaalivoiman mitoitusarvo palotilanteessa
$N_{Rd}$	kestävyyden mitoitusarvo normaalilämpötilassa
$Q_k$	muuttuvan kuorman ominaisarvo
$t$	lämpöaltistuksen kesto
$X_k$	lujuus- tai muodonmuutosominaisuuden ominaisarvo normaalilämpötilamitoituksessa
$X_{d,fi}$	mekaanisen materiaaliominaisuuden mitoitusarvo
$\gamma_G$	pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{Q,1}$	määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{M,fi}$	materiaaliominaisuuden osavarmuusluku palotilanteessa
$\eta_{fi}$	normaalilämpötilassa vaikuttavien kuormien pienennyskerroin
$\theta_g$	palotilan lämpötila
$\lambda$	tilaa ympäröivän rakenteen lämmönjohtavuus
$\mu_{fi}$	hyväksikäyttöaste
$\xi$	epäedullisen pysyvän kuorman pienennyskerroin
$\rho$	tilaa ympäröivän rakenteen tiheys
$\psi_{fi}$	tavallisten tai pitkäaikaisten muuttuvien kuormien yhdistelykerroin
$\psi_{i,i}$	muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

# 1 Johdanto

Opinnäytetyö käsittelee betoniseinien palomitoitusta ja se tehdään toimeksiantona A-insinöörit Suunnittelu Oy:lle. Opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä betoniseinien palomitoitusmenetelmiin ja vertailla niiden ominaisuuksia ja käytettävyyttä käytännön mitoituksessa toisiinsa. Yleensä betoniseinien palomitoitus tehdään taulukkomitoituksena, mutta taulukkomitoituksen rajoitukset voivat johtaa siihen, että mitoitus kannattaa tehdä tarkemmalla palomitoitusmenetelmällä. Standardissa SFS-EN 1992-1-2 on betoniseinille sopiviksi palomitoitusmenetelmiksi esitetty kaksi yksinkertaista laskentamenetelmää (500°C isotermimenetelmä ja vyöhykemenetelmä), joiden avulla palomitoitus voidaan suorittaa. Menetelmät eroavat toisistaan mitoitusnopeudeltaan ja monimutkaisuudeltaan, mutta molemmilla menetelmillä on omat hyvät ja huonot puolensa.

Opinnäytetyön toisessa luvussa on esitetty betonin ja sen raudoituksen ominaisuudet palossa ja miten ne muuttuvat lämpötilan kasvamisen vaikutuksesta. Kolmannessa luvussa on taas kerrottu betonirakenteiden palomitoitusta koskevaa tietoa yleisesti ja neljännessä luvussa on keskitytty tarkemmin betoniseinien palomitoitukseen. Työn lopussa on esitetty esimerkit betoniseinän palomitoituksesta taulukko-, 500°C isotermi- ja vyöhykemenetelmällä.

## 2 Teräsbetonin käyttäytyminen palossa

Betonirakenteilla on tunnetusti hyvä palonkestävyys ja useita palolle altistuneita betonirakenteita on palon jälkeen pystytty korjaamaan ja ottamaan uudelleen käyttöön. Betoni luokitellaan palamattomaksi rakennusmateriaaliksi, sillä se ei levitä paloa, eikä haihduta myrkyllisiä kaasuja ja betoni johtaa lämpöä huonosti. Betonin lämpenemistä hidastaa myös lämpenevässä sementissä tapahtuva endoterminen reaktio, joka sitoo itseensä lämpöä. (Buchanan & Abu 2017, 195.)

Betonin melko alhainen lämmönjohtavuus aiheuttaa voimakkaita lämpötilajakautumia betonirakenteiden sisälle. Yhdessä korkean lämmönsietokyvyn kanssa, tämä tarkoittaa, että betonirakenteen ydinalueen lämpenemisessä voi kestää kauan. Betoni menettää puristuskestävyytensä nopeasti lämmitessään yli kriittisen lämpötilan, mutta koko profiilin kestävyys ei muutu ennen kuin suurin osa materiaalista saavuttaa saman lämpötilan. (Carvel ym. 2007, 1–2.)

Tulipalon loputtua betonin muuttuneet rakenteelliset ominaisuudet eivät palaudu takaisin, verrattuna esim. teräsrakenteisiin, jossa viilentyminen voi usein palauttaa materiaalin alkuperäiseen tilaansa, tämä johtuu sementin fysikaalisista ja kemiallisista muutoksista. Palon jälkeen betonirakenne voi näyttää vahingoittumattomalta, mutta joissain tapauksissa sen kestävyys voi olla kuitenkin heikentynyt. (Carvel ym. 2007, 3.)

Teräsbetoni laajenee voimakkaasti korkeissa lämpötiloissa, tehden rakenteeseen sopivien liikuntasauvojen suunnittelusta tärkeää, jotta tulipalon aiheuttamat muodonmuutokset huomioidaan ja niiden kasvu liian suuriksi estetään. Suurimmat vaikutukset teräsbetonirakenteen käyttäytymiseen palossa on rakenteen materiaaliominaisuuksilla, rakenteen muotoilulla, mitoilla ja liitoksilla. (by201 2004, 108, 113.)

Palolle altistuneen betonin lämpötekniset ja mekaaniset ominaisuudet muuttuvat lämpötilan nousun takia. Betonin lämpöteknisistä ominaisuuksista

muuttuvat lämmönjohtavuus ja ominaislämpö sekä mekaanisista ominaisuuksista muuttuvat puristuslujuus, vetolujuus, kimmokerroin ja jännitys-muodonmuutosominaisuudet. (Suomen Betoniyhdistys ry n.d.)

Taulukko 1. Betonissa tapahtuvat reaktiot palossa (Suomen Betoniyhdistys ry n.d.)

Betonissa tapahtuva reaktio palossa	
0–100°C	Sementin ja veden välinen hydrataatio tuoreessa betonissa Kovettuneesta betonista haihtuu vettä ja betoni pyrkii saavuttamaan tasapainokosteuden
100–200°C	Kapillaarinen ja adsorboinut vesi haihtuu Betoni kutistuu Sementtikiven lujuus säilyy ennallaan tai kasvaa Sementtikivi paisuu
200–500°C	Betonin huokosissa olevat vedet höyrystyvät aiheuttaen betoniin sisäisiä jännityksiä Betoni kutistuu kosteuden poistuessa Sementtikivessä tapahtuu dehydraatio Sementtikivi kutistuu voimakkaasti
500–600°C	Kiviaineksessa ja sementtikivessä tapahtuvat erilaiset tilavuudenmuutokset aiheuttavat halkeilua
850°C	Sementtikiven huokoisuus kasvaa Betonin tiheys alenee

## 2.1 Betonin puristuslujuus

Betonin kumentuessa siihen sitoutunut kosteus pyrkii poistumaan, kiviaines laajenee, mutta sementtikivi kutistuu aiheuttaen rakenteeseen mikrohalkeamia. Palon alkuvaiheessa voi betonin lujuus alkaa kasvamaan, mutta palon loputtua sen lujuus laskee normaalilämpötilan lujuuttakin pienemmäksi.

Tulipalon jälkeiseen lujuuteen vaikuttavat (Suomen Betoniyhdistys ry n.d.):

- betonissa käytetty kiviaines
- sementti
- sementin ja kiviaineksen suhde
- olosuhteet betonin viilentymisen jälkeen
- viilentymisnopeus

Betonit, joiden lujuudet ovat matalia, menettävät suhteellisesti vähemmän lujuuttaan korkeissa lämpötiloissa verrattuna betoneihin, joiden lujuudet ovat suuria. (by201 2004, 112.)

Tulipalon aikaiseen lujuuteen vaikuttavat (Suomen Betoniyhdistys ry n.d.):

- sementin ja kiviaineksen suhde
- kiviaineksen laatu (pehmeillä kiviaineksilla lujuuden aleneminen tapahtuu myöhemmin)
- kuormitusaste (betonin lujuus on suurempi kuormitettuna)

## 2.2 Betonin vetolujuus

Betonin vetolujuutta ei yleensä huomioida palotilanteessa. Alle 100°C betonin vetolujuus ei muutu normaalilämpötilasta, mutta betonin lämpötilan ylittäessä tämän lujuus alkaa laskea lineaarisesti 600°C asti, jolloin oletetaan, ettei betonilla ole enää vetolujuutta. (Suomen Betoniyhdistys ry n.d.)

## 2.3 Betoniteräkset

Betoniteräksen käyttäytyminen palossa ymmärretään hyvin. Betonin ja teräksen lämpölaajeneminen ovat samankaltaisia noin 400°C asti ja niiden lämmitessä tätä enemmän betoniteräksen laajeneminen kasvaa huomattavasti suuremmaksi kuin betonin ja noin 700°C lämpötilassa raudoituksen lujuus ja jäykkyys ovat laskeneet murto-osaan normaalilämpötilan arvoistaan. (Carvel ym. 2007, 6.)

Kantavissa betonirakenteissa olevien raudoitusten lämpötilaa pyritään pitämään alle 500°C. Raudoitusten lämpötilannousua voidaan hallita kasvattamalla palolle alttiin pinnan betonipeitteen paksuutta. Raudoituksen ja betonin välisen tartunnan lujuus heikkenee palon aikana ja voi vielä laskea rakenteen jäähtymisenkin jälkeenkin. (by 201 2004, 116, 109.)

## 2.4 Betonin lohkeilu

Lohkeilu on yksi betonin monimutkaisimmista ja siksi vähiten ymmärretyistä käyttäytymisistä palossa. Räjähdyksmäisen lohkeilun oletetaan usein tapahtuvan vain korkeissa lämpötiloissa, mutta sitä on havainnointu tapahtuvan jo 200°C. Lohkeilulla voi olla haitalliset vaikutukset rakenteelle, jos teräksiä suojaava betoni irtoaa, altistaen ne korkeille lämpötiloille ja siten pienentäen niiden lujuutta ja rakenteen lujuutta kokonaisuutena. (Carvel ym. 2007, 4.)

Lohkeilu myös heikentää rakenteen lujuutta pienentämällä kuormia kantavaa poikkileikkausta nostaan jäävän poikkileikkauksen jännitystä. Tämä kannattaa ottaa huomioon, sillä lohkeilu voi tapahtua alhaisissa lämpötiloissa ennen kuin palo ehtii pienentämään betonin lujuutta. (Carvel ym. 2007, 4–5.)

Lohkeilun uskotaan tapahtuvan huokoisen betonin nopean lämpenemisen aiheuttaman korkean lämpörasituksen ja/tai betonissa olevan veden höyrystymisen aiheuttaman paineen kertymisestä. Nämä johtavat pintakerroksen halkeiluun ja palasten irtoamiseen. Lohkeilun päätekijäksi on määritelty vähintään 2 % kosteuspiitoisuus ja suuret lämpötilajakaumat betonissa. Lohkeiluun saattaa myös vaikuttaa betonin kestävyys ja siinä olevat kuidut. (Carvel ym. 2007, 5.)

## 2.5 Betonin halkeilu

Halkeilun uskotaan syntyvän samalla tavalla kuin lohkeilun. Lämpötilan aiheuttama laajeneminen ja betonin kosteuden haihtuminen voivat aiheuttaa halkeamia betoniin lohkeilun lisäksi. Halkeamat voivat toimia kulkureitteinä

raudoituksen lämpenemiselle, aiheuttaen mahdollisesti lisää lämpörasituksia ja halkeamia betoniin. Tietyissä olosuhteissa halkeamat voivat jopa toimia kulkureitteinä palon leviämiseen tilojen välillä ja mahdollistaa erilaisten palossa syntyvien haitta-aineiden, kuten PVC-muovien palamisesta syntyvän kloorivedyn ja sammutusveden yhdistymisessä syntyvän suolahapon, kulkeutumisen raudoituksiin. Betonissa vallitsevat rasitukset kannattaa huomioida halkeilua miettiessä, sillä lämpölaajenemisen mahdollisesti aiheuttamat puristuskuormat voivat tiivistää betonia ja estäen halkeamien syntymistä. (Carvel ym. 2007, 6/by201 2004, 110.)

## 2.6 Materiaaliominaisuuksien laskenta standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan

Standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan mekaanisten materiaaliominaisuuksien mitoitusarvot lasketaan kaavan 1 mukaan:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} X_k / \gamma_{M,fi}$$

Kaava 1. Mekaanisten materiaaliominaisuuksien mitoitusarvojen laskeminen (SFS-EN 1992-1-2, 14, kaava 2.1)

jossa

$k_{\theta}$  = lujuus- tai muodonmuutosominaisuuden pienennyskerroin, joka riippuu materiaalin lämpötilasta

$X_k$  = lujuus- tai muodonmuutosominaisuuden ominaisarvo normaalilämpötilamitoituksessa

$\gamma_{M,fi}$  = asianomaisen materiaaliominaisuuden osavarmuusluku palotilanteessa

Betonin ja betoniteräksen osavarmuusluville  $\gamma_{M,fi}$  käytetään Eurokoodin suomalaisen liitteen mukaan suositusarvoa 1,0 mekaanisille ja termisille ominaisuuksille.

### 2.6.1 Betonin puristuslujuus palotilanteessa standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan

Betonin pienennetty puristuslujuus palotilanteessa  $f_{cd,fi}$  saadaan SFS-EN 1992-1-2 mukaisesti laskettua kaavalla 2:

$$f_{cd,fi} = k_c(\theta) \cdot f_{ck} / \gamma_{M,fi}$$

Kaava 2. Betonin puristuslujuuden pieneneminen palotilanteessa

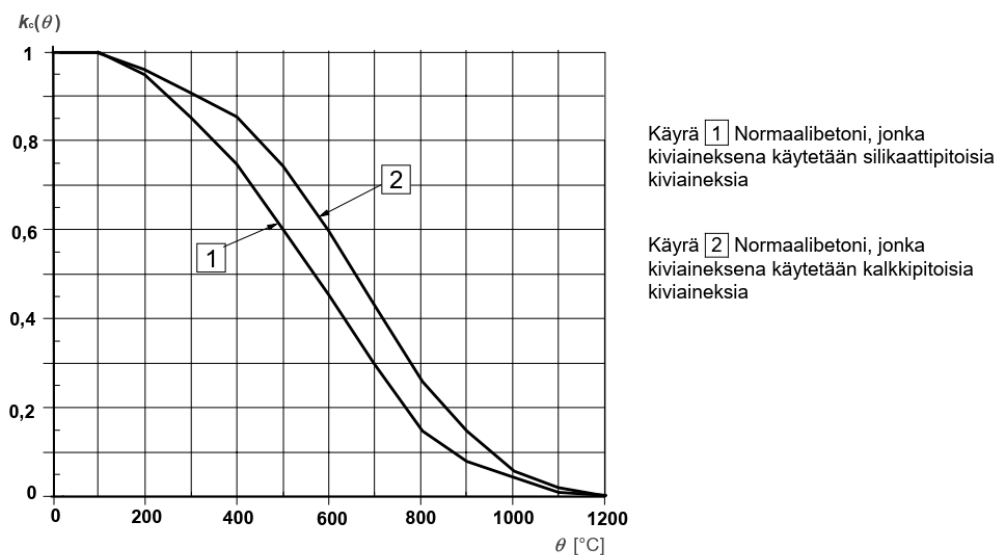
jossa

$k_c(\theta)$  = betonin puristuslujuuden heikennyskerroin

$f_{ck}$  = betonin puristuslujuuden ominaisarvo

$\gamma_{M,fi}$  = betonin puristuslujuuden osavarmuusluku palotilanteessa

Betonin puristuslujuuden heikennyskerroin  $k_c(\theta)$  voidaan valita kuvassa 1 esitetystä käyrästä. Käyrän 1 käyttö on suositeltavaa, sillä silikaattipitoiset kiviainekset ovat kalkkipitoisia yleisempiä Suomessa ja käyrää käyttämällä päästään varman päälle oleviin arvoihin.



Kuva 1. Betonin puristuslujuuden heikennyskerroin  $k_c(\theta)$  (SFS-EN 1992-1-2, 29, kuva 4.1)



## 2.6.2 Betonin vetolujuus palotilanteessa standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan

SFS-EN 1992-1-2 mukaan betonin pienentynyttä vetolujuutta palotilanteessa  $f_{ctd,fi}$  ei yleensä huomioida, mutta tarvittaessa se pystytään laskemaan kaavan 3 avulla:

$$f_{ctd,fi} = k_{c,t}(\theta) \cdot f_{ctk} / \gamma_{M,fi}$$

Kaava 3. Betonin heikentynyt vetolujuus palotilanteessa

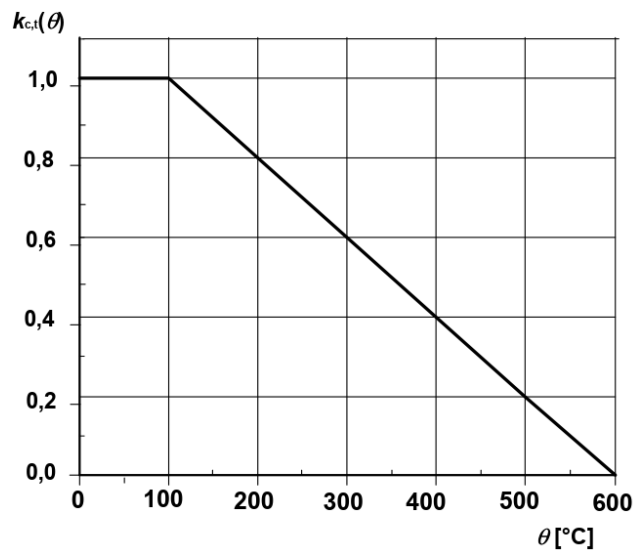
jossa

$k_{c,t}(\theta)$  = betonin vetolujuuden heikennyskerroin

$f_{ctk}$  = betonin vetolujuuden ominaisarvo

$\gamma_{M,fi}$  = betonin vetolujuuden osavarmuusluku palotilanteessa

Betonin vetolujuuden heikennyskerroin  $k_{c,t}(\theta)$  voidaan valita kuvasta 2 betonissa vallitsevan lämpötilan perusteella.



Kuva 2. Betonin vetolujuuden heikennyskerroin  $k_{c,t}(\theta)$  (SFS-EN 1992-1-2, 20, kuva 3.2)

### 2.6.3 Betoniteräksen lujuus palotilanteessa standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan

Betoniteräksen pienennetty lujuus palotilanteessa saadaan laskettu SFS-EN 1992-1-2 mukaan kaavan 4 avulla:

$$f_{y d, fi} = f_{yk} \cdot k_{s(\theta)} / \gamma_{M, fi}$$

Kaava 4. Betoniteräksen heikentynyt lujuus palotilanteessa

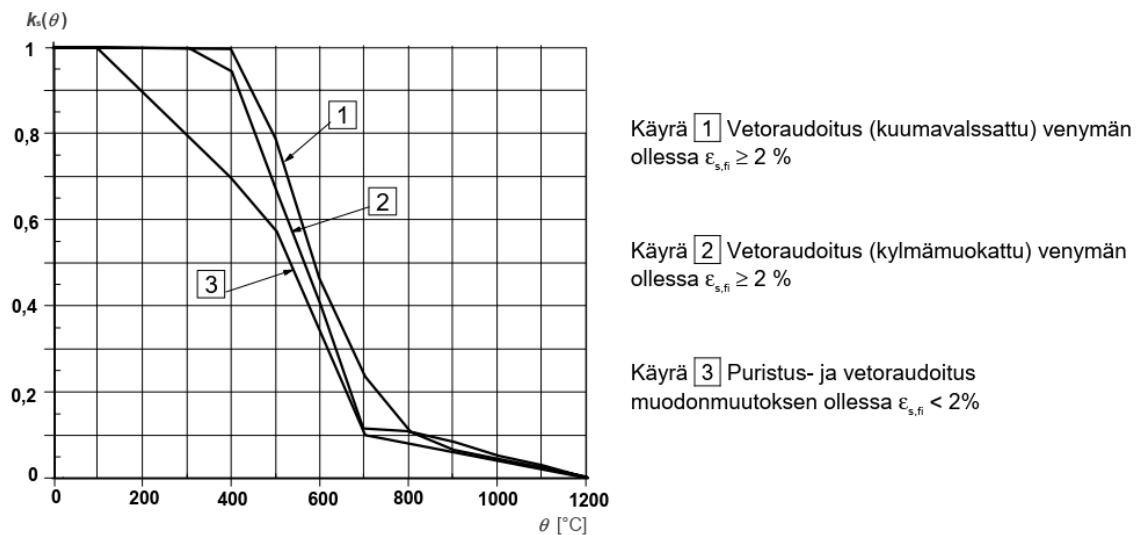
jossa

$f_{yk}$  = betoniteräksen lujuus normaalilämpötilassa

$k_{s(\theta)}$  = heikennyskerroin, joka saadaan valittua kuvasta 3.

$\gamma_{M, fi}$  = Betoniteräksen osavarmuusluku palotilanteessa

Kuvassa 3 esitetään betoniteräksen lujuuden heikennyskerroimet  $k_{s(\theta)}$  puristus- ja vetoraudoitukselle.



Kuva 3. Betoniteräksen lujuuden heikennyskerroin (luokka N) (SFS-EN 1992-1-2, 31, kuva 4.2a)

## 2.6.4 Betoniteräksen kimmokerroin palotilanteessa standardin SFS-EN 1992-1-2 mukaan

Betoniteräksen kimmokertoimen pieneneminen palotilanteessa saadaan laskettua SFS-EN 1992-1-2 mukaan kaavan 5 avulla:

$$E_{s,\theta} = k_{sE(\theta)} \cdot E_s / \gamma_{M,fi}$$

Kaava 5. Betoniteräksen kimmokertoimen aleneminen palotilanteessa

jossa

$E_s$  = betoniteräksen kimmokerroin normaalilämpötilassa

$k_{sE(\theta)}$  = heikennyskerroin, joka voidaan valita kuvasta 4

$\gamma_{M,fi}$  = Betoniteräksen osavarmuusluku palotilanteessa

Teräksen lämpötila $\theta$ [°C]	$E_{s,\theta} / E_s$	
	kuuma- valssattu	kylmä- muokattu
1	6	7
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,90	0,87
300	0,80	0,72
400	0,70	0,56
500	0,60	0,40
600	0,31	0,24
700	0,13	0,08
800	0,09	0,06
900	0,07	0,05
1000	0,04	0,03
1100	0,02	0,02
1200	0,00	0,00

Kuva 4. Teräksen kimmokertoimen heikennyskerroimet luokan N betoniteräksille (SFS-EN 1992-1-2, 22, Taulukko 3.2a)

## 2.7 Korkealujuusbetoni

EN 1992 kansallisen liitteen mukaan korkealujuusbetoniksi luokitellaan betoni, jonka lujuus on suurempi kuin C50/60. Korkealujuusbetonista valmistetuille rakenteiden palomitoitusta koskee lisäsääntöjä. Palomitoitusta tehdessä korkealujuusbetonista valmistetuille rakenteille, tulee muistaa ottaa huomioon korkealujuusbetonin ominaisuudet ja lohkeilun riski. (SFS-EN 1992-1-2, 54).

Korkealujuusbetonilla on huomattavasti pienempi huokoisuus ja absorptiokyky tavalliseen betoniin verrattuna. Tämä vähentää betonissa olevan kosteuden määrää, mutta samalla tekee kosteuden poistumisesta palon aikana vaikeampaa. Joidenkin tutkimuksien mukaan korkealujuusbetonin pieni huokoisuus ja sen kasvattama mahdollisuus korkean paineen syntymisestä rakenteen sisällä, tekee siitä alttiimman lohkeilulle. Toisten tutkimuksien mukaan korkealujuusbetonin paremmat lujuusominaisuudet voivat kuitenkin vastustaa voimia, jotka kasvattavat lohkeilun mahdollisuutta. (Carvel ym. 2007, 5.)

Korkealujuusbetonin lujuuden pieneneminen lämpötilan nousun takia voidaan katsoa kuvasta 5 kaikille korkealujuusbetonin lujuusluokille.

Betonin lämpötila $\theta$ °C	$f_{c,\theta} / f_{ck}$
	Luokka FI
20	1,00
50	1,00
150	0,75
300	0,75
800	0,15
900	0,08
1000	0,04
1100	0,01
1200	0,00

Kuva 5. Lujuuden pieneneminen korkeissa lämpötiloissa (SFS-EN 1992 kansallinen liite, s.33, Taulukko 1)

Rakenteiden betonin lujuusluokan ollessa  $80/95 < C \leq 90/105$  tulee lohkeilua estää ainakin yhdellä SFS-EN 1992-1-2 mainituista kolmesta menetelmästä. EN 1992 Suomen kansallisessa liitteessä on asetettu rajoituksia B menetelmälle ja A menetelmää ei voida sen mukaan käyttää.

- Menetelmä B: Käytetään betonityyppiä, jolle on kokeiden tai paikallisen kokemuksen perusteella osoitettu, ettei se lohkeile palon aikana. Suomen kansallisessa liitteessä on määritetty, että käytettävällä betonityypillä täytyy olla seuraavat ominaisuudet:
  - o Sementti CEM I 42,5 (tai 52,5) R
  - o Silikaa enintään 10 % sementin painosta
  - o Luonnonkiviaines
  - o pitkää kosteuden jälkihoitoa ei käytetä
- Menetelmä C: Käytetään sellaisia suojakerroksia, joille on osoitettu, ettei betoni lohkeile palolle altistettuna.
- Menetelmä D: Sekoitetaan betonimassaan yli  $2 \text{ kg/m}^3$  monofilamentti-propeenikuituja.

(SFS-EN 1992-1-2, 54; Ympäristöministeriö 2019, 32–33.)

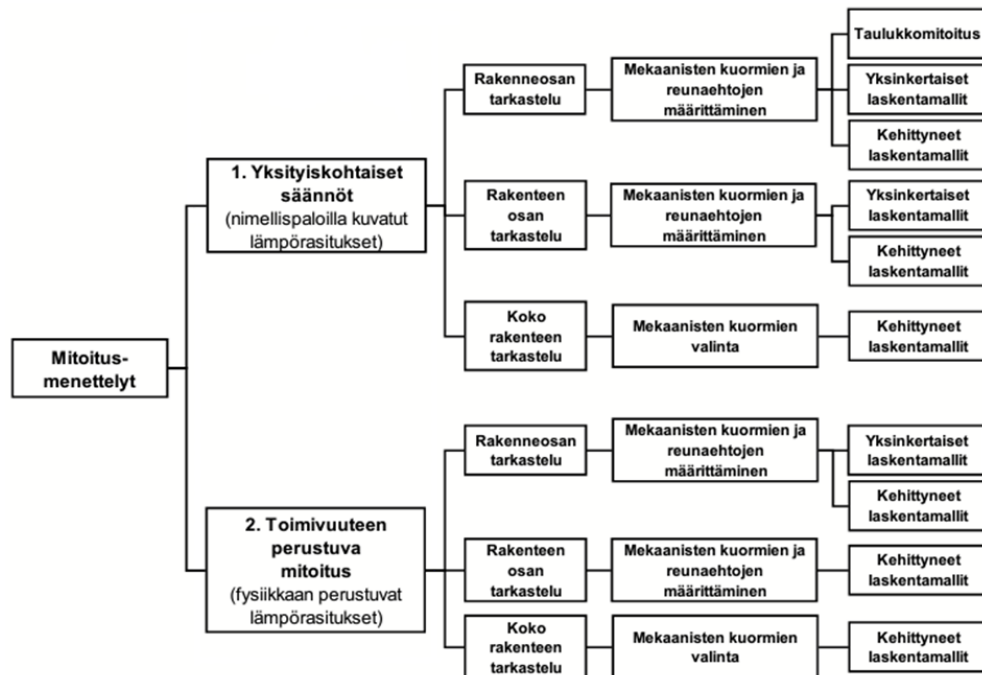
### 3 Betonirakenteiden palomitoitus

Maankäyttö- ja rakennuslaki edellyttää, että rakennukset suunnitellaan ja rakennetaan paloturvallisiksi niiden käyttötarkoitusten mukaan. Rakennuksien suunnittelun kannalta on hyvä muistaa, että kantavien rakenteiden tulee kestää vähimmäisajan huomioiden rakennuksen sortumisen, poistumisen turvaamisen, pelastustoiminnan ja palon hallintaan saamisen. Suunnittelijoiden tulee tehtäviensä mukaisesti huolehtia, että rakennus täyttää paloturvallisuudelle asetetut olennaiset tekniset vaatimukset. (Maankäyttö- ja rakennuslaki, 117 b.)

Paloturvallisuusvaatimukset katsotaan täyttyvän, kun rakennus suunnitellaan ja rakennetaan noudattaen Rakentamismääräyskokoelmassa esitettyjä paloluokkia ja lukuarvoja tai jos suunnittelu perustuu oletettuun palonkehitykseen, joka sisältää rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet. (Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta, 3.)

Palomitoituksessa rakenne suunnitellaan kestämään sille annettu palonkestävyysluokka. Palonkestävyysluokassa esitetään kirjaintunnuksilla rakenneosan mekaaninen kestävyys (R), tiiviys (E) ja eristävyys (I) ja palonkestoaja minuutteina. Palonkestoajalla määritetään, kuinka kauan rakenteen tulee säilyttää sille palonkestoluokassa annetut vaatimukset. Palonkestoajat ovat yleensä 30, 60, 90, 120, 180 ja 240 min. (by211-1, 67.)

Rakenteen palomitoitus voidaan suorittaa kuvan 6 mukaisesti taulukkomitoituksena, yksinkertaisilla laskentamalleilla tai kehittyneillä laskentamalleilla riippuen valitusta mitoitustavasta ja rakenteen tarkastelutavasta. Rakennetta voidaan tarkastella koko rakenteena, rakenteen osana tai rakenneosana.



Kuva 6. Vaihtoehtoiset mitoitusmenettelyt (RIL 201-2-2017, 18)

Rakenteen kokonaistarkastelussa otetaan huomioon rakenteen kaikki vuorovaikutukset muiden osien kanssa, huomioiden lämpölaajenemisten ja muodonmuutosten vaikutukset. Myös kyseeseen tuleva murtumistapa paloaltistuksessa, lämpötilasta riippuvat materiaaliominaisuudet ja rakenneosien jäykkyydet otetaan huomioon. Kokonaistarkastelu on todenmukainen ja monimutkainen, joten tarkastelu pitää tehdä tietokoneavusteisesti. (SFS-EN 1992-1-2, 16–17.)

Rakenteen osan tarkastelussa koko rakenne jaetaan osiin, jotka suunnitellaan erikseen. Tarkasteltavan rakenteen osa tulisi määrittää mahdollisten muodonmuutosten avulla siten, että ajasta riippumattomilla tuki- ja reunaehdoilla pystyttäisiin ottamaan huomioon muodonmuutosten yhteisvaikutus muiden rakenteen osien kanssa. Määritetyn rakenteen osan sisällä pitää huomioida kyseeseen tuleva murtumistapa paloaltistuksessa, lämpötilasta riippuvat materiaaliominaisuudet ja rakenneosien jäykkyydet sekä lämpölaajenemisten ja muodonmuutosten vaikutukset. Rakenteen osaan vaikuttavat kuormat määritetään hetkellä  $t = 0$ . Rakenteen osan tarkastelu on

yksinkertaisempi kuin rakenteen kokonaistarkastelu, sillä vähemmän muuttujia huomioidaan kerrallaan, mutta otetaan kuitenkin huomioon rakenteen osien vaikutukset toisiinsa. (SFS-EN 1992-1-2, 16–17.)

Rakenneosatarkastelussa kuormat määritetään hetkellä  $t = 0$  ja oletetaan sillä hetkellä vallitsevien reunaehtojen säilyvän samoina koko palonkestävyyssajan. Tapahtuvista lämpölaajenemisista tarvitsee ottaa huomioon vain poikkileikkauksen epätasaisista lämpötilakehityksistä aiheutuvien muodonmuutosten vaikutukset, sen sijaan pituussuuntaiset ja poikkileikkauksen tasossa tapahtuvat laajenemiset voidaan jättää huomioimatta. Rakenneosatarkastelu on yksinkertaisempi rakenteen osan tarkasteluun verrattuna tehtyjen yksinkertaistuksien takia. (SFS-EN 1992-1-2, 15–16.)

Rakenteiden palonkestävyys voidaan myös todeta kokeellisesti tai kokeiden ja laskennan yhdistelmällä. Täydellisessä laskennallisessa palomitoituksessa huomioidaan rakennejärjestelmän toiminta korkeissa lämpötiloissa, mahdollinen lämmölle altistuminen sekä aktiivisten ja passiivisten palosuojausjärjestelmien edulliset vaikutukset samoin kuin näihin kolmeen tekijään liittyvät epävarmuudet ja rakenteen merkitys. (SFS-EN 1990, 68/ SFS-EN 1991-1-2, 12.)

Rakenteiden palomitoituksessa tarvittaessa huomioidaan paloskenaarioiden valinta, mitoituspalojen määrittäminen, rakenneosien lämpötilojen kehittymisen laskenta ja mitoitettavan rakenteen mekaanisen toiminnan laskenta, johon vaikuttaa rakenteeseen kohdistuvat lämpörasitukset ja niiden vaikutukset rakenteen materiaaliominaisuuksiin ja välillisiin mekaanisiin kuormiin. (RIL 201-2-2017, 24.)

### 3.1 Yksityiskohtaisiin sääntöihin perustuva mitoitusmenettely

Yksityiskohtaisiin sääntöihin perustuvalla mitoitusmenettelyllä tarkasteltavan rakenteen mukaan voidaan mitoitusta suorittaa kehittyneillä laskentamenetelmillä, yksinkertaisilla laskentamenetelmillä tai taulukkomitoituksella.



Tällä mitoitusmenettelyllä lämpörasitusten selvittämiseen käytetään nimellispaloa kuten standardi-, ulkopuolisen- ja hiilivetypalonkäärää. Taulukkomitoituksessa on hyvä muistaa, että standardin SFS-EN 1992-1-2 esittämät taulukot seinien palomitoitukselle ovat luotuja perustuen vain standardipaloon, toisilla nimellispalloilla voidaan myös käyttää taulukkomitoitusta, mutta taulukot pitää ensin luoda kyseisille paloille. Yksinkertaisilla laskentamalleilla laskettaessa on tärkeää huomioida, että SFS-EN 1992-1-2 esitetyt lämpötilaprofiilit sopivat vain standardipalolle ja materiaalmalleja voi käyttää silloin kun kuumenemisnopeus on samanlainen standardipalon kanssa. (SFS-EN 1991-1-2, 12/ SFS-EN 1992-1-2, 9.)

Yksityiskohtaisiin sääntöihin perustuvissa mitoitusmenettelyissä on otettu huomioon rakennejärjestelmän toiminta korkeissa lämpötiloissa, mahdolliset lämmölle altistumiset sekä palosuojausjärjestelmien edulliset vaikutukset, vaikka niiden huomioimista ei suoraan näe. (SFS-EN 1992-1-2, 8.)

### 3.2 Toimivuuteen perustuva mitoitusmenettely

Toimivuuteen perustuvassa mitoitusmenettelyssä ”toiminnallisessa palomitoituksessa” käytetään luonnollisia (parametrisia) palomalleja, joilla lämpötila-analyysi tehdään kattamaan koko palon ajan, sisältäen myös palon jäähtymisvaiheen. (SFS-EN 1991-1-2, 10, 36)

Tällä mitoitusmenettelyllä tarkasteltavan rakenteen mukaan, voidaan mitoitus tehdä vain kehittyneillä laskentamenetelmillä tai mahdollisesti yksinkertaisilla laskentamenetelmillä, jos sellaisia on käytettävissä. SFS-EN 1992-1-2 esitettävien yksinkertaisten mitoitusmenetelmien 500°C isotermimenetelmän ja vyöhykemenetelmän käyttö parametrisille paloille on kielletty Suomen kansallisessa liitteessä. (SFS-EN 1992-1-2, 9/ Ympäristöministeriö 2019, 34.)

Toimivuuden perustuvan mitoitusmenettelyn käyttö arvioidaan aina kohdekohtaisesti ja sen käyttö on yleensä hyödyllistä silloin kun kohde on vaativa tai pyritään hankkia kustannussäästöjä.

### 3.3 Palotilanteen kuormat

Tulipalo on onnettomuustilanne, joten tulipalon aiheuttamat kuormat ovat onnettomuuskuormia, jolloin niille käytetään kaavan 6 mukaista onnettomuustilanteiden kuormitusyhdistelmää.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + (\psi_{1.1} \text{ tai } \psi_{2.1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Kaava 6. Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelmä (SFS-EN 1990, 80, kaava 6.11a)

jossa

$j$  = pysyvän kuorman indeksi

$i$  = muuttuvan kuorman indeksi

$G_{k,j}$  = pysyvän kuorman ominaisarvo

$A_d$  = onnettomuuskuorman mitoitusarvo

$Q_{k,1}$  = määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

$Q_{k,i}$  = muun muuttuvan kuorman ominaisarvo

$\psi_{1.1}$  = määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin  $\psi_1$

$\psi_{2.1}$  = määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin  $\psi_2$

$\psi_{2,i}$  = muun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin  $\psi_2$

Valinta yhdistelykertoimien välillä on esitetty SFS-EN 1990 kansallisessa liitteessä. Kerrointa  $\psi_{1.1}$  käytetään kun pääasiallinen kuorma on lumi-, jää tai tuulikuorma, jos määräävä muuttuva kuorma on jokin muu, käytetään yhdistelykerrointa  $\psi_{2.1}$ . Taulukossa 2 on esitetty yhdistelykertoimia muuttuville kuormille. (Ympäristöministeriö 2016, 21.)

Taulukko 2. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet (SFS-EN 1990, 86/  
Ympäristöministeriö 2016, 17)

Kuorma	$\psi_{1.1}$	$\psi_{2.i}$
Hyötykuormat rakennuksissa		
Luokka A: asuintilat		0,3
Luokka B: toimistotilat		0,3
Luokka C: kokoontumistilat		0,3
Luokka D: myymälätilat		0,6
Luokka E: varastotilat		0,8
Luokka F: liikennöivät tilat, esim. autotallit		0,6
Luokka G: Liikennöivät tilat, raskaat ajoneuvot		0,3
Luokka H: vesikatot		0
Lumikuorma, kun		
$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,5	0,2
Rakennuksen tuulikuormat	0,2	0

Mitoituksesta voidaan tehdä helpompaa käyttämällä pienennyskerrointa  $\eta_{fi}$ , jolloin palotilanteessa vaikuttavien kuormien vakiomitoitusarvot  $E_{d,fi}$  pystytään laskea normaalilämpötilamitoituksessa käytetyistä arvoista  $E_d$  kaavan 7 mukaan. (SFS-EN 1992-1-2, 15.)

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d$$

Kaava 7. Kuormien laskennan yksinkertaistus (SFS-EN 1992-1-2, 15, Kaava 2.4)

jossa

$E_{fi,d}$  = palotilanteessa vaikuttavien kuormien vakioimitoitussarvot

$E_d$  = normaalilämpötilassa vaikuttavien kuormien mitoitussarvo

$\eta_{fi}$  = pienennyskerroin, joka voidaan laskea kaavan 8 mukaan, jos käytetään standardin SFS-EN 1990 mukaista kuormitus yhdistelmää (6.10).

SFS-EN 1990 mukaisia kuormitusyhdistelmiä 6.10a ja 6.10b käytettäessä  $\eta_{fi}$  on pienempi kaavojen 9 ja 10 arvoista. Yksinkertaistuksena pienennyskerroimen  $\eta_{fi}$  arvona voi käyttää 0,7 (SFS-EN 1992-1-2, 15.)

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

Kaava 8. Pienennyskerroimen laskenta, kun käytetään SFS-EN 1990 kaavaa 6.10 (SFS-EN 1992-1-2, 15, Kaava 2.5)

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}}$$

Kaava 9. Pienennyskerroimen laskenta, kun käytetään SFS-EN 1990 kaavaa 6.10a (SFS-EN 1992-1-2, 15, Kaava 2.5a)

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

Kaava 10. Pienennyskerroimen laskenta, kun käytetään SFS-EN 1990 kaavaa 6.10b (SFS-EN 1992-1-2, 15, Kaava 2.5b)

jossa

$Q_{k,1}$  = on määräävä muuttuvakuorma

$G_k$  = pysyvän kuorman ominaisarvo

$\gamma_G$  = pysyvän kuorman osavarmuusluku

$\gamma_{Q,1}$  = määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku

$\psi_{fi}$  = tavallisten tai pitkäaikaisten muuttuvien kuormien yhdistelykerroin. Yhdistelykertoimena käytetään joko  $\psi_{1,1}$  tai  $\psi_{2,1}$ .

$\xi$  = epäedullisen pysyvän kuorman  $G$  pienennyskerroin

Lämpötilankasvun aiheuttamien muodonmuutosten synnyttämät kuormavaikutukset tulee ottaa mitoituksessa huomioon. Nämä kuormavaikutukset voidaan huomioida niiden laskemisen lisäksi valitsemalla varmalla puolella olevat reunaehdot. Tilanteissa, joissa todetaan näiden vaikutuksien olevan huomaamattomia tai edullisia, voidaan ne jättää huomioimatta. (RIL 201-2-2017, 31.)

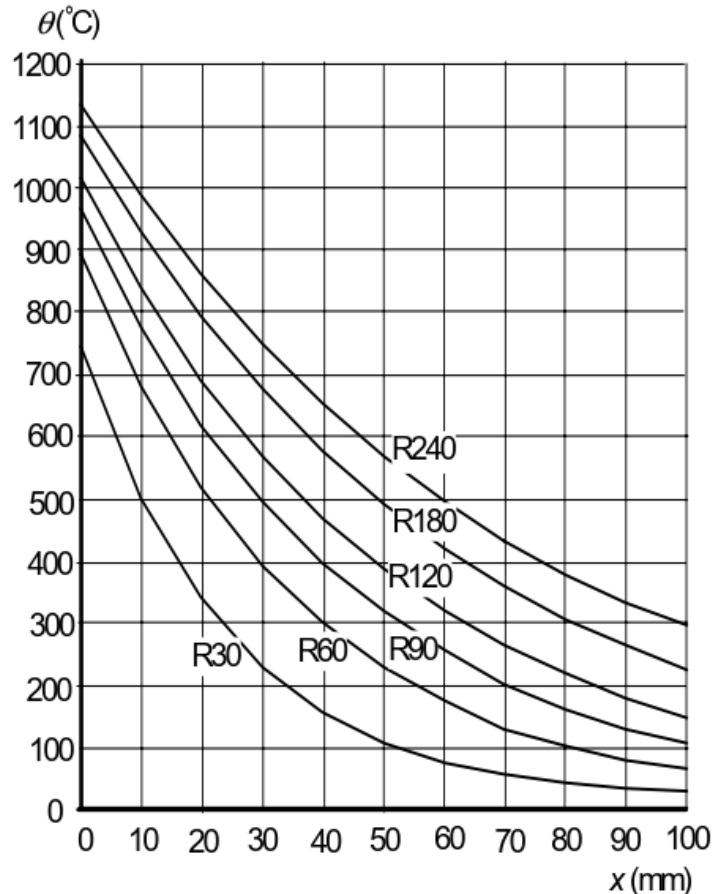
Seuraavat asiat tulee myös huomioida (RIL 201-2-2017, 31–32)

- palamisen aiheuttaman hyötykuormien vähenemistä ei tule ottaa huomioon
- Tapauskohtaisesti arvioidaan, tarvitseeko lumikuormaa ottaa huomioon lumen sulamisen takia
- teollisuuden toiminnoiden aiheuttamia kuormia ei tarvitse huomioida
- toisistaan riippumattomien onnettomuuskuormien samanaikainen esiintyminen ei tarvitse huomioida
- Muita palon aiheuttamia lisäkuormia voi olla tarpeen tarkastella, riippuen tarkasteltavasta onnettomuustilanteesta

### 3.4 Lämpötilaprofiilit

Standardin SFS-EN 1992-1-2 liite A tarjoaa sarjan lämpötilaprofiileja laatoille, erikokoisille pilareille ja palkeille standardipalossa. Laattoja koskeva kuva 7 sopii myös käytettäväksi toiselta puolelta altistuneille seinille. Kuvan 7 vaaka-akselilla esitetään syvyys profiilissa ja pystyakselilla betonin lämpötila. Annettujen lämpötilaprofiilien avulla pystytään nopeasti määrittämään mitoitettavan profiilin betonin ja raudoitusten lämpötilat eri alueilla ilman

tietokonelaskentaa. Kannattaa huomioida, että lämpötilaprofiilien arvot ovat varmalla puolella sillä niiden laskennassa on käytetty useita oletuksia esimerkiksi kosteuspuitoisuudesta. Standardi sallii myös muista tutkimuksista saatuja lämpötilaprofiilien käytön. (SFS-EN 1992-1-2, 57.)



Kuva 7. Toiselta puolelta altistuneen seinän lämpötilaprofiili (seinän paksuus 200 mm). (SFS-EN 1992-1-2, 58)

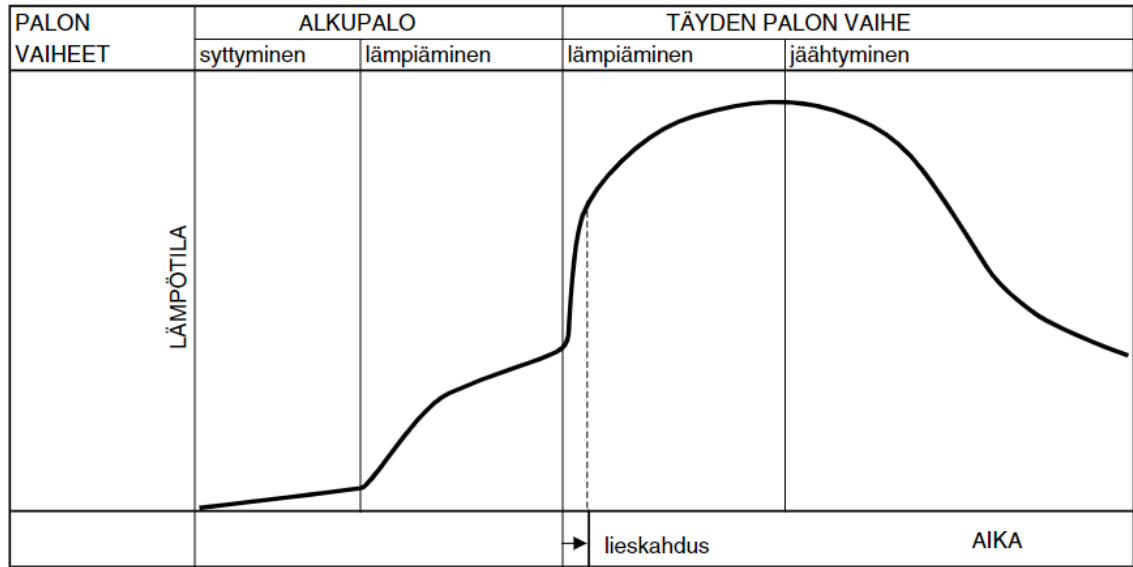
Lämpötilaprofiilin valintaan vaikuttaa mitoitettavan rakenteen poikkileikkauksen mitat, vaadittu palonkesto-aika ja rakenteen palolle altistuneiden sivujen lukumäärä. Vaikka monissa kirjoissa ja tutkimuksissa on esitetty lämpötilaprofiileja eri rakenteille, voi niiden laskeminen tietokoneavusteisesti tulla tarpeen tapauksissa, joissa mitoituksen tuloksia halutaan tarkentaa tai kyseiselle poikkileikkaukselle ei löydy lämpötilaprofiilia kirjallisuudesta. Tapauksissa, joissa laskettavalle poikkileikkaukselle ei löydy lämpötilaprofiilia, voidaan käyttää pienemmän poikkileikkauksen vastaavaa profiilia. Kunhan

poikkileikkauksen muut parametrit ovat samoja, tällöin betonin lämpötilojen arviot ovat varmanpuolella.

### 3.5 Palotilan lämmön kehitys

Vapaasti kehittyvän todellisen tulipalon lämpötila palon eri vaiheissa on havainnollistettu kuvassa 8. Kuvan esittämät palon vaiheet voivat muuttua suuresti riippuen palosta, mutta kuvasta näkee kuinka lämpötilat vaihtelevat eri palon vaiheissa. (SSAB 2016, 340.)

Syttymisvaiheessa palotilassa oleva potentiaalinen palava aine lämpenee ja syttyy palamaan. Alkupalon lämpenemisvaiheessa useimmat palot leviävät ensin hitaasti palavilla pinnoilla ja sen jälkeen nopeammin palon kasvaessa, tällöin palosta säteilee lämpöä muihin tilassa oleviin palaviin aineisiin, ja palosta syntyvät kuumat kaasut leviävät katon alalle, lämmittäen koko huonetta. Jos palon ylempien kerrosten lämpötilat nousevat noin 600°C, palamisnopeus nousee huomattavasti, aiheuttaen lieskahduksen, joka johtaa täyden palon vaiheeseen. Alkupalon vaiheessa palamisnopeus yleisesti riippuu palavien pintojen luonteesta, kun taas täyden palon vaiheessa lämpötilat ja lämpösäteily huoneessa ovat niin suuria, että kaikki suojaamattomat pinnat ovat tulessa ja palamisnopeus riippuu palavan aineen sijasta huoneen ilmanvaihdosta. Täyden palon vaihe on pääsääntöisesti se mikä vaikuttaa rakenteiden kestävyysiin. Jos palon annetaan palaa, kunnes kaikki tilassa oleva palava aines loppuu, alkaa palon jäähtymisvaihe, jossa palamisnopeus riippuu taas palavasta aineesta eikä ilmanvaihdosta. (Buchanan & Abu 2017, 10.)



Kuva 8. Todellisen palon vaiheet ja lämpötilan muuttuminen (SSAB 2016, 340)

Palomitoituksessa palotilan lämpötilan kehitystä kuvataan lämpötila-aikakäyrillä. Käytettävät käyrät ovat joko tietylle ajanjaksolle määritettyjä nimellisiä lämpötila-aikakäyriä, kuten standardipalo, ulkopuolinen palo ja hiilivetypalokäyrät. Tai käyrät voivat olla parametrisia lämpötila-aikakäyriä, joissa otetaan huomioon muun muassa palokuorman suuruus, palo-osaston koko ja tuuletusaukkojen määrä. (SSAB 2016, 340.)

Standardipalokäyräksi kutsutaan kaavan 11 mukaista, standardin EN 1363-1 (ISO 834) määrittämää lämpötila-aikakäyriä.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

Kaava 11. Standardipalon lämpötila-aikakäyrä (SFS-EN 1991-1-2, 40, Kaava 3.4)

jossa

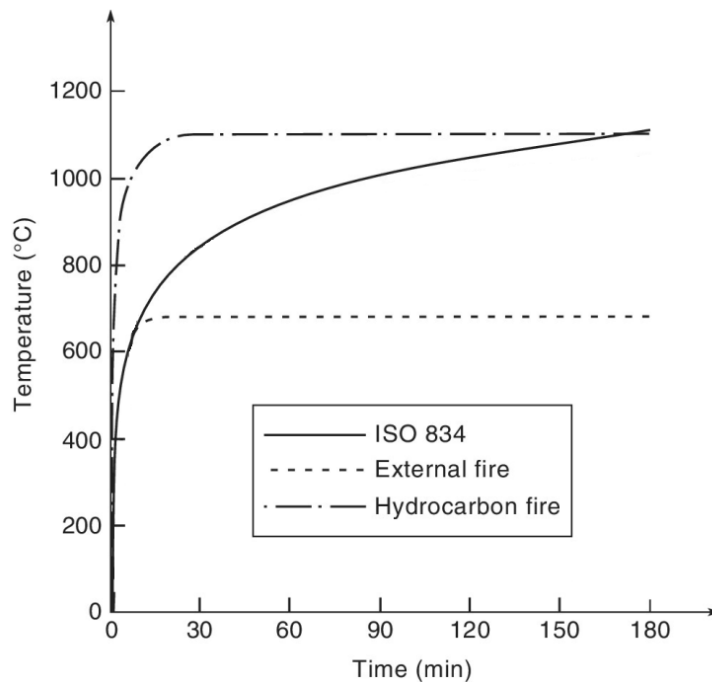
$$\theta_g = \text{palotilan lämpötila } [^{\circ}\text{C}]$$

$$t = \text{lämpöaltistuksen kesto [min]}$$



Standardipalokäyrässä kuvattu palo on yksivyöhykkeinen, mikä tarkoittaa, että lämpötila on sama kaikkialla palon vaikuttamassa tilassa. Tämä on hyvin karkea yksinkertaistus, koska todellisuudessa lämpötilat huoneen yläosissa ovat suuremmat, kuin lattian tasolla. Standardipalokäyrä on kuitenkin turvallinen arvio palon kulusta pienellä alueella ja sen käyttö on yksinkertaisempaa verrattuna parametriseen palon käyriin. (Kowalski 2009, 66.)

Standardipalokäyrässä ei oteta huomioon palon syttymis-, kytemis- tai jäähtymisvaihetta. Luonnollisen palon lämpötila-aikakäyrissä ne yleensä esiintyvät. Standardipalokäyrän muoto on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Standardi-, ulkopuolisen- ja hiilivetypalon käyrät (Buchanan & Abu 2017, 63)

Ulkopuolisen palon käyrää käytetään oletetun palon kohdistuessa ulkoseinän ulkopinnalle. Ulkopuolisen palon käyrän lämpötila kasvaa standardipalokäyrän tapaan, mutta lämpötila rajoittuu vain 680°C. Käyrän muoto tulee kaavan 12 mukaan.

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t})$$

Kaava 12. Ulkopuolisen palon lämpötila-aikakäyrä (SFS-EN 1991-1-2, 42, Kaava 3.5)

Hiilivetypalokäyrää käytetään usein kemianteollisuudessa kuvaamaan nestemäisiä polttoaineita sisältävän palon kehitystä. Standardipalokäyrään verrattuna hiilivetypalolla on paljon nopeampi lämpiämisvaihe ja korkeat lämpötilat saavutetaan kahdenkymmenen minuutin sisällä palon alkamisesta. Käyrän muoto tulee kaavan 13 mukaan. (Carvel ym. 2007, 7.)

$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t})$$

Kaava 13. Hiilivetypalon lämpötila-aikakäyrä (SFS-EN 1991-1-2, 42, Kaava 3.6)

Parametrisen palon käyrät kuvaavat yksinkertaisessa huoneessa olevan kaasun lämpötilaa, ottaen huomioon huoneen koon, ilmanvaihdon, palokuorman ja ympäröivien rakenteiden lämpötekniset ominaisuudet. (RIL 201-2-2017, 33.)

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*})$$

Kaava 14. Parametrisen palon kuumenemisvaiheen lämpötila-aikakäyrä (SFS-EN 1991-1-2, 50, Kaava A.1)

jossa

$$\theta_g = \text{palotilan lämpötila } [^{\circ}\text{C}]$$

$$t^* = t * \Gamma \quad [\text{h}]$$

jossa

$$t = \text{aika } [\text{h}]$$

$$\Gamma = [O / b]^2 / (0,04 / 1160)^2$$

$$b = \sqrt{(\rho c \lambda)} \text{ [J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K]} \quad \text{Rajoituksena: } 100 \leq b \leq 2200.$$

$$\rho = \text{tilaa ympäröivän rakenteen tiheys [kg/m}^3\text{]}$$

$$c = \text{tilaa ympäröivän rakenteen ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]}$$

$$\lambda = \text{tilaa ympäröivän rakenteen lämmönjohtavuus [W/mK]}$$

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \text{ [m}^{1/2}\text{]}, \text{ Aukkotekijä} \quad \text{Rajoituksena: } 0,02 \leq O \leq 0,20$$

$$A_v = \text{kaikissa seinissä olevien pystyaukkojen kokonaisala [m}^2\text{]}$$

$$h_{eq} = \text{kaikissa seinissä olevien ikkunoiden korkeuksien painotettu keskiarvo [m]}$$

$$A_t = \text{Vaipan kokonaispinta-ala (seinät, katto ja lattia, aukot mukaan lukien) [m}^2\text{]}$$

Jos  $\Gamma$  arvoksi saadaan 1, parametrisen palon lämpötila-aikakäyrä on hyvin lähellä standardipalon lämpötila-aikakäyrää.

## 4 Betoniseinien palomitoitusmenetelmät

Palo on yksi vakavimmista tapahtumista, joka voi kohdistua rakenteeseen sen käyttöiän aikana. Turvallisuuden takia rakenteiden osien ei pelkästään pidä täyttää vaatimukset murto- ja käyttörajatilassa, mutta niillä täytyy olla myös tarpeeksi suuri palonkestävyys. (Chudyba & Seręga 2013, 17)

Keinot teräsbetonirakenteiden palonkestävyyden arvioimiseen voidaan jakaa yleisesti kolmeen ryhmään: Taulukkomitoitukseen, yksinkertaisiin laskentamenetelmiin ja kehittyneisiin laskentamenetelmiin.

Taulukkomitoitus perustuu kokemuksen vahvistamaan kokeelliseen perustaan, josta tulokseksi saadaan vähimmäisetäisyydet raudoituksen keskipisteestä palolle altistuneeseen pintaan ja poikkileikkauksen vähimmäispaksuus. Taulukkoihin perustuva mitoitus on selkeää, mutta sillä on rajoituksensa esimerkiksi taulukot 4 ja 5 koskevat vain standardipaloa. Lisäksi taulukkomitoituksessa ei selvitetä rakenteen kestävyuden mitoitusarvoa palotilanteessa. (Chudyba & Seręga 2013, 18/ Kowalski 2009, 66.)

Yksinkertaisissa laskentamenetelmissä käytetään samoja menettelytapoja, kuin normaalilämpötilamitoituksessa huomioiden betonin ja raudoituksen lujuuden pientymiset korkeissa lämpötiloissa. Betonin lujuuden heikentyminen otetaan huomioon pienentämällä rakenteen poikkileikkausta vähentämällä siitä tietyn lämpötilan ylittämä betoni. (SFS-EN 1992-1-2, 67, 72.)

Kehittyneillä laskentamenetelmillä on luotu malleja, joilla voidaan ottaa huomioon lämpötilan, kosteuden, betonin ja raudoituksen ominaisuudet. Kehittyneitä laskentamalleja on kahta eri tyyppiä. Termisen vasteen malleilla määritetään lämpötilan kehittyminen ja sen jakautuminen rakenneosan sisällä. Mekaanisen vasteen malleilla sen sijaan selvitetään rakenteen tai sen osan mekaaninen toiminta. Kehittyneiden laskentamenetelmien avulla saadaan hyvä käsitys betonirakenteiden käyttäytymisestä palossa, mutta jokapäiväiseen mitoitukseen ne ovat liian monimutkaisia. (Chudyba & Seręga 2013, 18/ SFS-EN 1992-1-2, 31.)

#### 4.1 Taulukkomitoitus

Taulukkomitoitus on betoniseinien palomitoitusmenetelmistä yksinkertaisin ja nopein. Kantaville seinille taulukoissa on esitetty vähimmäismitat seinän paksuudelle ja raudoituksen keskiöetäisyydelle, kahdella eri kuormitustasolla ja toispuolisella ja molemminpuolisella olevalle palolle. Taulukossa 3 esitetyllä raudoituksen keskiöetäisyydellä tarkoitetaan seinän pääraudoituksen keskipisteen etäisyyttä lähimmästä palolle alttiista betonipinnasta. (by211-1, 67.)

Taulukoissa on annettu palonkestävyysajat 240 minuuttiin asti ja ne ovat luotuja empiiristen tutkimusten perusteella ja varmistettu kokemuksen ja teoreettisten tarkastelujen kautta.

Taulukko 3. Kantavien seinien vähimmäismitat ja keskiöetäisyyden vähimmäisarvo (SFS-EN 1992-1-2, 42, Taulukko 5.4)

Standardi- palonkestävyys	Vähimmäismitat (mm)			
	Seinän paksuus / keskiöetäisyys			
	$\mu_{fi} = 0,35$		$\mu_{fi} = 0,7$	
	Altistus toiselta puolelta	Altistus molemmilta puolin	Altistus toiselta puolelta	Altistus molemmilta puolin
1	2	3	4	5
REI 30	100/10*	120/10*	120/10*	120/10*
REI 60	110/10*	120/10*	130/10*	140/10*
REI 90	120/20*	140/10*	140/25	170/25
REI 120	150/25	160/25	160/35	220/35
REI 180	180/40	200/45	210/50	270/55
REI 240	230/55	250/55	270/60	350/60

\* Tavallisesti standardin SFS-EN 1992-1-1 edellyttämä betonipeitteen paksuus on määräävä.

Taulukossa 3 esitetty hyväksikäyttöaste  $\mu_{fi}$  lasketaan kaavan 15 mukaan.

$$\mu_{fi} = N_{Ed,fi} / N_{Rd}$$

Kaava 15. Hyväksikäyttöasteen laskeminen

jossa

$N_{Ed,fi}$  = normaalivoiman mitoitusarvo palotilanteessa.

$N_{Rd}$  = seinän kestävyuden mitoitusarvo normaalilämpötilassa.

Osastoiville ei-kantaville seinille esitetään vaatimukset seinän vähimmäispaksuudelle taulukossa 4.

SFS-EN 1992-1-2 (55–56) mukaan taulukkomitoitus voidaan myös suorittaa korkealujuusbetonista valmistetuille seinille, kun kasvattaa poikkileikkauksen vähimmäismittoja seuraavasti:

- $(k - 1)a$  vain toiselta puolelta altistuneelle seinälle
- $2(k - 1)a$  molemmilta puolilta altistuneelle seinälle ja keskiöetäisyys kerrotaan kertoimella  $k$ .

jossa

$k$  = kerroin, joka ottaa huomioon isotermin muutoksen. Suomen kansallisen liitteen mukaan  $k = 1,3$

$a$  = taulukossa 3 esitettävä keskiöetäisyys

Taulukko 4. Ei-kantavien seinien (osastoivien seinien) vähimmäispaksuus (SFS-EN 1992-1-2, 42, Taulukko 5.3)

Standardi- palonkestävyys	Seinän vähimmäis- paksuus (mm)
1	2
EI 30	60
EI 60	80
EI 90	100
EI 120	120
EI 180	150
EI 240	175

Kantavien ja ei-kantavien seinien taulukkomitoituksen ehtona on, että seinän vapaan korkeuden suhde paksuuteen rajoitetaan arvoon 40 ja seinän tulee olla sivusiirtymätön. Jos ei-kantavissa tai kantavissa seinissä käytetään kalkkipitoisia kiviaineksia, voidaan taulukkojen 4 ja 5 mukaisia seinän vähimmäispaksuuksia pienentää 10 % (SFS-EN 1992-1-2, 41.)

Kun mitoitus suoritetaan taulukkomitoituksena, ei tarvita lisätarkastuksia leikkauksen, väännön ja ankkuroinnin osalta sekä normaalibetonia käytettäessä räjähdysmäisestä lohkeilusta. (SFS-EN 1992-1-2, 33.)

#### 4.2 500°C isotermimenetelmä

500°C isotermimenetelmä perustuu oletukseen, jossa yli 500°C betonia ei oteta huomioon rakenteen kestävyyttä laskettaessa ja alle 500°C betoni säilyttää täyden lujuutensa. Rakenteen poikkileikkauksesta vähennetään yli 500°C lämmennyt betoni ja sen kestävyys lasketaan käyttäen tätä uutta poikkileikkausta, raudoituksille heikennettyjä lujuuksia ja betonille huoneen lämpöisen betonin lujuuden arvoja. Isotermimenetelmällä voidaan ottaa huomioon toisen kertaluvun vaikutukset ja sillä pystytään laskemaan rakenteiden taivutus- ja puristuskestävyys. (SFS-EN 1992-1-2, 28, 66.)

#### 4.2.1 Edellytykset

Isotermimenetelmässä voidaan käyttää standardipalokäyrää ja muita palokäyriä, jotka aiheuttavat rakenteeseen samanlaisia lämpötilakenttiä. Jos käyrän aiheuttamat lämpötilakentät eivät ole samanlaisia, tulee tehdä erillinen laaja-alainen analyysi huomioiden betonin suhteellinen lujuus lämpötilan funktiona. (SFS-EN 1992-1-2, 66.)

Isotermimenetelmää voidaan käyttää, jos rakenteen poikkileikkaus on taulukon 5 mukainen.

Taulukko 5. Poikkileikkauksen vähimmäisleveys palonkestävyyden funktiona (standardipaloaltistukselle) (SFS-EN 1992-1-2, 66, Taulukko B1)

Palonkestävyys	R60	R90	R120	R180	R240
Poikkileikkauksen vähimmäisleveys (mm)	90	120	160	200	280

#### 4.2.2 Mitoituksen kulku

Seuraavaksi esitetään SFS-EN 1992-1-2 (66–67) mukaiset 500°C isotermimenetelmän vaiheet:

1. Määritetään seinälle lähtötiedot
2. Määritetään 500°C betonin syvyys palonkestoluokan, poikkileikkauksen koon ja palolle alttiiden sivujen määrän määrittämistä lämpötilaprofiilista tai laskemalla se tietokoneavusteisesti. Seinät altistuvat palolle useimmiten vain toiselta puoleltaan, mikä rajaa lämpötilaprofiilien valintaa paljon. Laskemista varten vahingoittumattoman betonin ala eli 500°C isotermin rajaama alue, muutetaan suorakaiteeksi, jolla on yhtä suuri ekvivalentti pinta-ala kuin isotermin rajaamalla alalla. Yleisesti samoilla palonkestävyyssajoilla 500°C isotermi sijaitsee lähempänä



poikkileikkauksen ulkopintaa suuremmilla poikkileikkauksilla, antaen suuremman vahingoittumattoman pinta-alan betonille.

3. Lasketaan poikkileikkauksen uusi leveys  $b_{fi}$  ja uusi tehollinen korkeus  $d_{fi}$ , kun alkuperäisestä poikkileikkauksesta vähennetään yli 500°C asteinen betoni.

Jos seinä on valmistettu korkealujuusbetonista, kasvatetaan heikentyneen alueen suuruutta kaavan 16 mukaan:

$$a_z = k a_{z,500}$$

Kaava 16. Heikentyneen alueen kasvaminen korkealujuusbetonilla (SFS-EN 1992-1-2, 55, kaava 6.4)

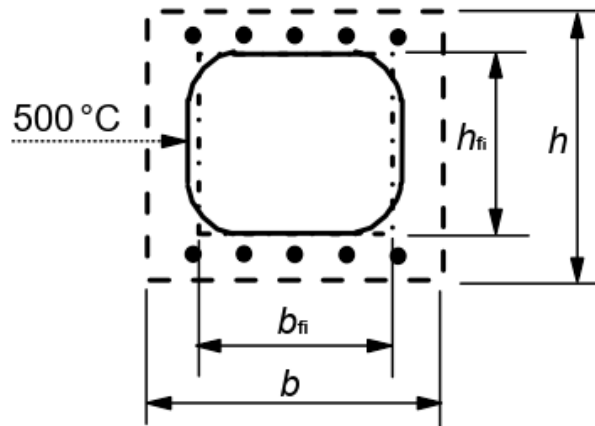
jossa

$k$  = kerroin, joka ottaa huomioon isotermin muutos.

Suomen kansallisen liitteen mukaan  $k = 1,3$

$a_{z,500}$  = 500°C isotermin syvyys

Kuvan 10 mukaisen 500°C betonin syvyyden luoman rajan kulmapyöristykset pystytään huomioida arvioimalla sen todellista muotoa suorakaiteella.



Kuva 10. Teräsbetonirakenteen pienennetty poikkileikkaus, kun paloaltistus on neljältä sivulta (SFS-EN 1992-1-2, 67, Kuva B.1)

4. Katsotaan betoniteräksien lämpötila kohdassa 2 määritetystä lämpötilaprofiilista/laskentatuloksista. Osa betoniteräksistä voi jäädä uuden poikkileikkauksen ulkopuolelle kuvan 10 mukaisesti. Vaikka ne ovat pienennetyn poikkileikkauksen ulkopuolella, voidaan ne kuitenkin huomioida poikkileikkauksen murtorajatilan mukaisen kestävyuden mitoituksessa.
5. Lasketaan raudoitusten heikentynyt lujuus  $f_{y,d,fi}$  ja kimmokerroin  $E_{s,\theta}$  niille määritetyissä lämpötiloissa ( $\theta$ ) kaavan 4 ja 5 avulla.
6. Lasketaan rakenteen murtorajatilan kestävyys tavanomaisilla laskentamenetelmillä käyttäen kohdassa 2 selvitettyä pienennettyä poikkileikkausta ja betoniterästankojen lujuutena kohdassa 5 laskettua raudoitusten heikentynyttä lujuutta.

#### 4.3 Vyöhykemenetelmä

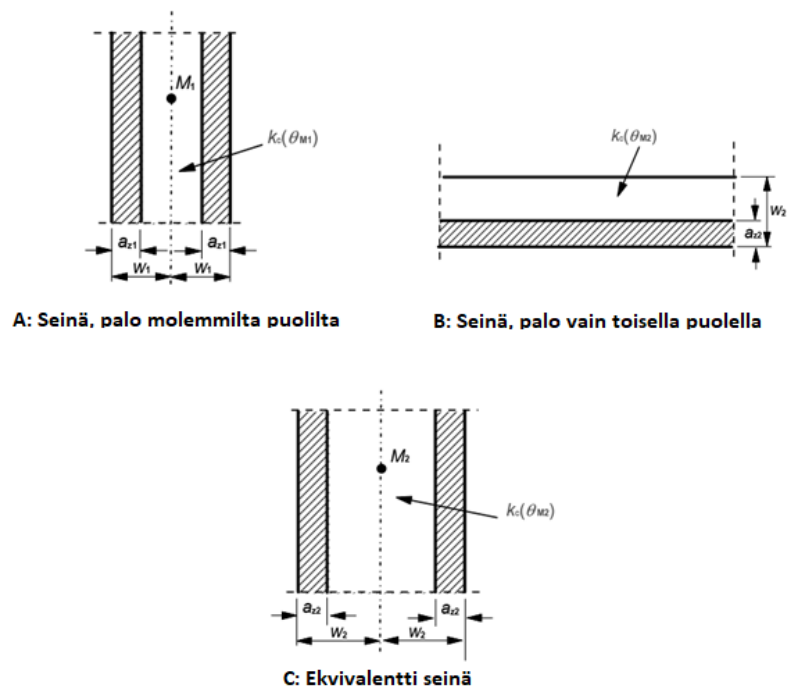
Vyöhykemenetelmän kehitti K. Hertz 1980-luvulla ja sitä voidaan käyttää 500°C isothermimenetelmän sijasta betonirakenteiden palomitoitukseen.

Vyöhykemenetelmän periaatteena on, että rakenteen poikkileikkauksesta

vähennetään palon altistamalla pinnoilla oleva tehoton vyöhyke. (Chudyba & Seręga 2013, 20)

Myös vyöhykemenetelmässä voidaan ottaa huomioon toisen kertaluvun vaikutukset ja sillä pystytään laskemaan rakenteiden taivutus- ja puristuskestävyys. Laskenta etenee seuraavien askelien mukaan:

1. Määritetään seinälle lähtötiedot
2. Seinän altistuessa palolle molemmilta puoliltaan on sen paksuus  $2w$  kuvan 11A mukaisesti ja seinän puolikas  $w$  jaetaan yhdensuuntaisiin saman paksuisiin vyöhykkeisiin. Jos seinä on altistunut palolle vain toiselta puoleltaan, sen paksuus on  $w$  kuvan 11B mukaisesti. Tässä tapauksessa heikentyneen vyöhykkeen  $a_z$  laskentaa varten käytetään kuvan 11C mukaista ekvivalenttia seinää, jonka paksuus on  $2w$  ja sen puolikas jaetaan vyöhykkeisiin. Vyöhykkeiden määrä tulee olla vähintään kolme ja niiden määrää kasvattamalla saadaan laskentaa tarkennettua, mutta liian monen vyöhykkeen käyttö hidastaa laskentaa huomattavasti.



Kuva 11. Poikkileikkauksen pienennys palossa (SFS-EN 1992-1-2, 71, kuva. B.3)

3. Määritetään jokaisen vyöhykkeen keskikohdan lämpötila käyttäen rakenteelle sopivaa lämpötilaprofilia.
4. Määritetään vyöhykkeen lämpötilaa vastaava puristuslujuutta koskeva pienennyskerroin  $k_c(\theta_i)$  jokaiselle vyöhykkeelle kuvasta 1.
5. Lasketaan poikkileikkauksen keskimääräinen pienennyskerroin  $k_{c,m}$  kaavalla 17.

$$k_{c,m} = \frac{(1 - 0,2/n)}{n} \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i)$$

Kaava 17. Poikkileikkauksen keskimääräisen pienennyskerroimen laskeminen

missä

$n$  = yhdensuuntaisten vyöhykkeiden lukumäärä.  $n \geq 3$ .

$k_c(\theta_i)$  = kerroksen betonin pienennyskerroin.

6. Lasketaan heikentyneen vyöhykkeen paksuus  $a_z$  seinille kaavalla 18.

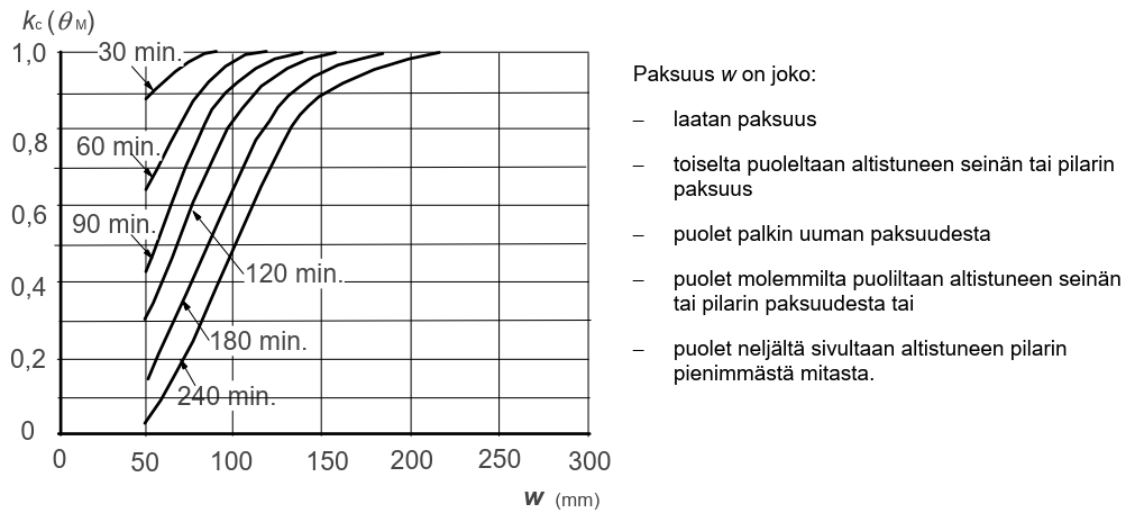
$$a_z = w \left[ 1 - \left( \frac{k_{c,m}}{k_{c(\theta_M)}} \right)^{1,3} \right]$$

Kaava 18. Heikentyneen vyöhykkeen laskenta

missä

$w$  = puolet seinän paksuudesta.

$k_{c(\theta_M)}$  = betonin lujuuden pienennyskerroin pisteessä M. Katsotaan kuvasta 12.



Kuva 12. Pienennetyn poikkileikkauksen puristuslujuuden pieneminen, kun käytetään silikaattipitoisesta kiviaineksesta valmistettavaa betonia. (SFS-EN 1992-1-2, 73, kuva B.5)

- Lasketaan seinän pienennetty poikkileikkaus vähentämällä alkuperäisestä poikkileikkauksesta heikentyneen vyöhykkeen paksuus.
- Määritetään raudoitusten lämpötila valitusta lämpötilaprofiilista ja lasketaan raudoitusten heikentynyt lujuus  $f_{y d,fi}$  ja kimmokerroin  $E_{s,\theta}$  määritetyillä lämpötiloilla ( $\theta$ ) käyttäen kaavoja 4 ja 5.
- Lasketaan rakenteen murtorajatilan kestävyys tavanomaisilla laskentamenetelmillä käyttäen selvitettyä pienennettyä poikkileikkausta, betonin lujuutena pienennyskerroimella  $k_{c(\theta_M)}$  alennettua lujuutta ja käyttäen betoniterästankojen lujuutena laskettua raudoitusten heikentynyttä lujuutta. Laskennassa tulee muistaa käyttää varmuusluvun  $\gamma_{M,fi}$  arvoja.

#### 4.4 Menetelmien vertailu

Taulukkomitoitus on seinien palomitoitusmenetelmistä yksinkertaisin ja nopein, sillä sitä käytettäessä suunnittelijan tarvitsee laskea normaalilämpötilan mitoituksen lisäksi vain seinälle tulevat kuormat palotilanteessa, saadakseen hyväksikäyttöasteen, jonka avulla taulukosta saadaan tarvittavat vähimmäismitat seinälle tietyllä palonkestävyydellä ja paloaltistuksella. Taulukkomitoituksesta saadut vähimmäismitat ovat kuitenkin varman päälle verrattuna muista menetelmistä saatuihin arvoihin. Liitteessä 1 esitetään 200 mm paksun raudoitetun seinän mitoitus normaalilämpötilassa, jonka pohjalta muiden liitteiden palomitoitukset suoritetaan. Liitteessä 2 esitetään molemmilta puolilta standardipalolle altistuneen raudoitetun seinän palomitoitus käyttäen taulukkoa 3.

Yksinkertaiset laskentamenetelmät ovat taulukkomitoitusta hitaampia toteuttaa, mutta niillä saadaan tarkempia tuloksia. Yksinkertaisilla laskentamenetelmillä työläin osuus on sopivan lämpötilaprofiilin etsiminen ja tulkitseminen. SFS-EN 1992-1-2 tarjoaa seinille vain yhden lämpötilaprofiilin, joka sopii vain 200 mm paksuille yhdeltä sivulta standardipalolle altistuneille seinille. Tämän takia lämpötilaprofiileja täytyy etsiä toisista lähteistä tai laskea ne tietokoneavusteisesti. Mitoitusta hidastavat myös mahdolliset muutokset esimerkiksi poikkileikkauksen paksuuteen, mikä aiheuttaa sen, että aiemmin käytetty lämpötilaprofiili ei sovi uudelle poikkileikkaukselle, jolloin täytyy hakea uudelle poikkileikkaukselle sopiva profiili ja määrittää seinässä vallitsevat lämpötilat uudelleen.

Betoniseinien palomitoitukseen SFS-EN 1992-1-2 esitetystä yksinkertaisista mitoituksimenetelmistä voidaan käyttää 500°C-isotermimenetelmää ja vyöhykemenetelmää. Liitteessä 3 esitetään esimerkki kahdelta puolelta standardipalolle altistuneen seinän palomitoituksesta isotermimenetelmällä ja liitteessä 4 esitetään saman seinän mitoitus vyöhykemenetelmällä. Molemmilla menetelmillä lasketut seinien käyttöasteet eroavat toisistaan noin 3 %. Erot johtuvat menetelmillä saaduista erisuuruuksista heikentyneiden vyöhykkeiden

paksuuksista ja vyöhykemenetelmässä laskuissa käytettävästä heikentyneestä betonin puristuslujuudesta. Koska menetelmien väliset erot ovat pienet, on suositeltavaa tehdä mitoitus käyttäen isothermimenetelmää, sillä sen vaatima työmäärä on huomattavasti pienempi vyöhykemenetelmään verrattuna. Vyöhykemenetelmästä työlään tekee eri vyöhykkeiden lämpötilojen ja lujuuksien heikennyskertoimien selvitys, verrattuna isothermimenetelmään, jossa tarvitsee selvittää vain isothermin syvyys ja raudoitusten lämpötila kestävyuden laskentaa varten.

Kehittyneiden laskentamenetelmien käyttö on monimutkaista ja aikaa vievää, joten useimmissa tapauksissa niiden käyttö seinien palomitoituksessa ei ole järkevää. Kehittyneiden laskentamenetelmien käyttöä vaikeuttaa myös se, että niiden käyttö tapahtuu tietokoneohjelmilla, verrattuna taulukkomitoitukseen ja yksinkertaisiin laskentamenetelmiin, joita voidaan tehdä käsin laskennalla. Kehittyneitä laskentamenetelmiä kannattaa kuitenkin käyttää silloin, kun halutaan tehdä tarkempia tarkasteluja rakenteen käyttäytymisestä palossa.

## 5 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä betoniseinien palomitoitusmenetelmiin ja vertailla niiden käytettävyyttä käytännön mitoituksessa. Betoniseinät voidaan mitoittaa palolle käyttäen taulukkomitoitusta, yksinkertaisia laskentamenetelmiä tai kehittyneitä laskentamenetelmiä. Valinta käytettävän mitoitusmenetelmän välillä riippuu siitä, kuinka tarkasti halutaan tarkastella seinän käyttäytymistä palossa ja mitä mitoitusmenettelyä halutaan mitoituksessa käyttää.

Mitoitusmenettelyjä on yksityiskohtaisiin sääntöihin perustuva menettely ja toimivuuteen perustuva menettely. Yksityiskohtaisiin sääntöihin perustuvassa menettelyssä palona käytetään nimellispaloja ja toimivuuteen perustuvassa menettelyssä käytetään luonnollisia paloja.

Taulukkomitoitus on betoniseinien mitoitusmenetelmistä yksinkertaisin ja sillä saa nopeasti varman päälle olevan tuloksen. Yksinkertaisista menetelmistä betoniseinille voidaan käyttää 500°C isotermimenetelmää ja vyöhykemenetelmää. Molempia menetelmiä voidaan käyttää käsin tehtävissä laskuissa, ja niistä saadut tulokset ovat lähellä toisiaan, joten on suositeltavaa käyttää yksinkertaisempaa isotermimenetelmää. Kehittyneillä laskentamenetelmillä saadaan tarkasti tutkittua betoniseinien käyttäytyminen palossa, mutta niiden käyttö ei ole suositeltavaa jokapäiväisessä mitoitustyössä niiden vaatiman työmäärän takia.

Rakennuksen paloturvallisuuteen annetaan vaatimukset Maankäyttö- ja rakennuslaissa ja rakenteiden palonkestävyysluokat määräytyvät lain esittämien rakennuksien paloluokkien ja palokuormaryhmien perusteella.

Betoniseinien kestävyteen palossa vaikuttaa materiaaliominaisuuksien muutokset nousevan lämpötilan takia, palolle altistuneiden sivujen määrä, palotilanteessa vallitseva kuormitus, seinän muoto ja mitat. Betonin ja raudoituksen lujuudet ja kimmokertoimet laskevat rakenteen lämpötilan nousun takia ja niiden arvot palotilanteessa saadaan pienentämällä normaalilämpötilojen arvoja SFS-EN 1992-1-2 esitetyillä heikennyskertoimilla.



## Lähteet

- Buchanan, A. & Abu, A. 2017. Structural design for fire safety. Vaatii käyttäjätunnuksen. Viitattu 28.1.2023.  
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/istructe/detail.action?docID=4770529>
- Carvel, R.; Fletcher, I.; Torero, J.; Usmani, A. & Welch, S. 2007. Behaviour of concrete structures in fire. Viitattu 28.1.2023.  
[https://www.researchgate.net/publication/253840357\\_Behaviour\\_of\\_concrete\\_structures\\_in\\_fire](https://www.researchgate.net/publication/253840357_Behaviour_of_concrete_structures_in_fire)
- Chudyba, K. & Seręga, S. 2013. Structural fire design methods for reinforced concrete members. Viitattu 30.1.2023.  
[https://www.researchgate.net/publication/279940859\\_Structural\\_fire\\_design\\_methods\\_for\\_reinforced\\_concrete\\_members](https://www.researchgate.net/publication/279940859_Structural_fire_design_methods_for_reinforced_concrete_members)
- Kowalski, R. 2009. Calculations of reinforced concrete structures fire resistance. Viitattu: 30.1.2023. <https://acee-journal.pl/cmd.php?cmd=download&id=dbitem:article:id=104&field=fullpdf>
- Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132.
- SFS-EN 1990+ A1 + AC. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- SFS-EN 1991-1-2 + AC. 2003. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- SFS-EN 1992-1-2 + AC. 2005. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1–2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- SSAB. 2016. SSAB Rakenneputket: EN 1993 – käsikirja. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.
- Suomen Betoniyhdistys ry. n.d. Betoni korkeissa lämpötiloissa. Vaatii käyttäjätunnuksen. Viitattu 28.1.2023.  
<https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/betonin-sailyvyys/betoni-korkeissa-lampotiloissa.html>

Suomen Betoniyhdistys ry. 2015. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja by 211 – osa 1. Tampere: Multiprint Oy

Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. Betonitekniikan oppikirja by 201. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2017. RIL 201-2-2017: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Tampere: Crano Oy

Wong, B. & Liu, J. 2013. Inherent fire protection design of concrete beams using shape memory alloys.

[https://www.researchgate.net/publication/277005283\\_Inherent\\_Fire\\_Protection\\_Design\\_of\\_Concrete\\_Beams\\_Using\\_Shape\\_Memory\\_Alloys](https://www.researchgate.net/publication/277005283_Inherent_Fire_Protection_Design_of_Concrete_Beams_Using_Shape_Memory_Alloys)

Ympäristöministeriö. 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus: Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. Viitattu 28.1.2023.

<https://www.eurocodes.fi/ymn-kansalliset-liitteet/>

Ympäristöministeriö. 2019. Rakenteiden lujuus ja vakaus: Betonirakenteet.

Viitattu 28.1.2023. <https://www.eurocodes.fi/ymn-kansalliset-liitteet/>

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen paloturvallisuudesta 28.11.2017/848.

**Raudoitettu seinä - Mitoitus normaalilämpötilassa**Lähtötiedot

$l_w := 2.7 \text{ m}$	Korkeus
$b := 3 \text{ m}$	Leveys
$h := 200 \text{ mm}$	Paksuus
$c_{nom} := 20 \text{ mm}$	Betonipeitteen paksuus

Materiaaliominaisuudet

Betoni C25/30	Betoniteräs B500B
$f_{ck} := 25 \text{ MPa}$	$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$
$\gamma_c := 1.5$	$E_s := 200 \text{ GPa}$
$\alpha_{cc} := 0.85$	$\gamma_s := 1.15$
$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 14.167 \text{ MPa}$	$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \text{ MPa}$

Raudoitus

$\phi := 10 \text{ mm}$	Pystyraudoitus	$\phi_h := 8 \text{ mm}$	Vaakaraudoitus
$k_{jako,\phi} := 150 \text{ mm}$	Pystyraudoituksen k-jako		
$k_{jako,\phi} = 150 \text{ mm}$	<	$k_{jako,\phi,max} := \min(3 \cdot h, 400 \text{ mm}) = 400 \text{ mm}$	OK

$$A_{s,c} := \frac{\pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}{k_{jako,\phi}} = 523.599 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{Puristusraudoituksen pinta-ala metrin pituudella}$$

$$A_{s,t} := \frac{\pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}{k_{jako,\phi}} = 523.599 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{Vetoraudoituksen pinta-ala metrin pituudella}$$

$$A_s := A_{s,c} + A_{s,t} = 1047.198 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{Molempien pintojen pystyraudoitusten pinta-alat/m}$$

$$A_{s,vmin} := 0.002 \cdot h = 400 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} < A_s = 1047.198 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{OK}$$

$$A_{s,vmax} := 0.06 \cdot h = 12000 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} > A_s = 1047.198 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{OK}$$

Kuormat

$N_{Ed} := 2880 \text{ kN}$  Normaalivoiman mitoitusarvo normaalilämpötilassa

$n_{Ed} := \frac{N_{Ed}}{b} = 960 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$  Normaalivoima metrikuormana

Kuorman epäkeskisyys

$e_{ala} := 10 \text{ mm}$   $e_{ylä} := 50 \text{ mm}$

1-kertaluvun momentit

$m_{ala} := n_{Ed} \cdot e_{ala} = 9.6 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$   $m_{ylä} := n_{Ed} \cdot e_{ylä} = 48 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$

Vähimmäismomentti

$e_{0.min} := \max\left(\frac{h}{30}, 20 \text{ mm}\right) = 20 \text{ mm}$

$m_{0.min} := e_{0.min} \cdot n_{Ed} = 19.2 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$

$d' := c_{nom} + 1.1 \cdot \phi_h + \frac{1.1 \cdot \phi}{2} = 34.3 \text{ mm}$

$d := h - d' = 165.7 \text{ mm}$

$\rho := \frac{A_s}{d} = 0.00632 < 0.06$  Raudoitussuhde

$\rho_t := \frac{\rho}{2} = 0.003$  Raudoitussuhde - vetorausdoitus

$\rho_c := \frac{\rho}{2} = 0.003$  Raudoitussuhde - puristusraudoitus

$\omega := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{d \cdot f_{cd}} = 0.194$  Mekaaninen raudoitussuhde

$l_0 := l_w = 2.7 \text{ m}$  Nurjahduspituus

Hoikkuuden laskenta

$i := \frac{h}{\sqrt{12}} = 57.735 \text{ mm}$

$\lambda := \frac{l_0}{i} = 46.765$

Rajahoikkuuden laskenta

$$n := \frac{n_{Ed}}{d \cdot f_{cd}} = 0.409 \quad \text{Suhteellinen normaalivoima}$$

Kertoimet (Tarkkoja arvoja ei tunneta, joten käytetään suositeltuja arvoja)

$$A := 0.7 \quad B := 1.1 \quad C := 0.7$$

$$\lambda_{lim} := 20 \cdot A \cdot B \cdot C \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} = 16.857 \quad \text{Rajahoikkuus}$$

$$\lambda_{lim} = 16.857 < \lambda = 46.765 \quad \text{2. kertaluvun vaikutukset otettava huomioon}$$

1. Kertaluvun mitoitusmomentti

Korkeuteen liittyvä pienennyskerroin

$$\alpha_{h.test} := \max\left(\frac{2}{\sqrt{\frac{l_w}{m}}}, \frac{2}{3}\right) = 1.217 \quad \rightarrow \quad \alpha_h := \min(1, \alpha_{h.test}) = 1$$

$$\alpha_m := 1 \quad \text{Rakennneosien määrään liittyvä pienennyskerroin}$$

$$\theta_0 := \frac{1}{200} = 0.005$$

$$\theta_i := \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0.005 \quad \text{Vinous}$$

$$e_i := \theta_i \cdot \frac{l_0}{2} = 6.75 \text{ mm} \quad \text{Lisäepäkeskisyyss}$$

Rasitetumman pään korjattu momentti

$$m_{02} := e_i \cdot n_{Ed} + \max(m_{ylä}, m_{ala}) = 54.48 \frac{kN \cdot m}{m}$$

Vähemmän rasitetun pään korjattu momentti

$$m_{01} := e_i \cdot n_{Ed} + \min(m_{ala}, m_{ylä}) = 16.08 \frac{kN \cdot m}{m}$$

1. Kertaluvun mitoitusmomentti

$$m_{0e} := \max(0.6 \cdot m_{02} + 0.4 \cdot m_{01}, 0.4 \cdot m_{02}) = 39.12 \frac{kN \cdot m}{m} \quad \text{Jäykistetyille seinälle}$$

Toisen kertaluvun vaikutusten laskenta

2. kertaluvun momentti lasketaan nimellisen kaarevuuden menetelmällä

Tasapainomurtoa vastaavaa kaarevuus

$$\varepsilon_{yd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 0.00217$$

$$r_0 := \frac{1}{\frac{\varepsilon_{yd}}{0.45 \cdot d}} = 34.3 \text{ m}$$

Korjauskertoimet

$$n_u := 1 + \omega = 1.194$$

$$\nu := \frac{n_{Ed}}{d \cdot f_{cd}} = 0.409$$

$$n_{bal} := 0.4$$

$$K_r := \min \left( 1, \frac{n_u - \nu}{n_u - n_{bal}} \right) = 0.989$$

$$\varphi := 2 \quad \text{Virumaluku}$$

$$M_{suhde} := 0.7 \quad \text{Momenttisuhde}$$

$$\varphi_{ef} := \varphi \cdot M_{suhde} = 1.4$$

$$\beta := 0.35 + \frac{f_{ck}}{200 \text{ MPa}} - \frac{\lambda}{150} = 0.163$$

$$K_\varphi := \max \left( 1, 1 + \beta \cdot \varphi_{ef} \right) = 1.229$$

$$\nu'' := K_r \cdot K_\varphi \cdot \frac{1}{r_0} = 0.035 \frac{1}{\text{m}}$$

Pilarin suurimman taipuman laskenta

$$c := 10 \quad \text{Käyr. jakautuma kerroin}$$

$$e_2 := \nu'' \cdot \frac{l_0^2}{c} = 25.816 \text{ mm}$$

## 2. kertaluvun momentti

$$m_2 := e_2 \cdot n_{Ed} = 24.783 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Mitoitusmomentti

$$m_{Ed} := \max(m_{0e} + m_2, m_{02}, m_{0.min}) = 63.903 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Yhteisvaikutuskuvaajan laskenta

$$A_{s.tot} := A_s \cdot b = 3141.593 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_k := 0.8, \text{ kun } f_{ck} = 25 \text{ MPa} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$\omega_t := \frac{\omega}{2} = 0.097$$

$$\omega_c := \frac{\omega}{2} = 0.097$$

$$d_c := d' = 34.3 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{cu} := 0.0035$$

Betoniin murtopuristuma

$$M_{Ed} := m_{Ed} \cdot b = 191.71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_{Ed} = 2880 \text{ kN}$$

Erikoispiste A: Puhdas puristus

$$N_{Rd.A} := f_{cd} \cdot (h \cdot b - A_s \cdot b) + A_s \cdot b \cdot f_{yd} = 9821.404 \text{ kN}$$

$$M_{Rd.A} := 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Erikoispiste D:

$$N_{Rd.D} := \lambda_k \cdot b \cdot h \cdot f_{cd} + A_{s.c} \cdot b \cdot f_{yd} = 7482.955 \text{ kN}$$

$$M_{Rd.D} := \left( 0.125 - \frac{(\lambda_k - 0.5)^2}{2} \right) \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} + \left( \frac{h}{2} - d_c \right) \cdot A_{s.c} \cdot b \cdot f_{yd} = 180.87 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Erikoispiste B: Tasapainomurtuminen

$$N_{Rd.B} := b \cdot d \cdot f_{cd} \cdot \frac{\lambda_k \cdot \varepsilon_{cu} \cdot E_s}{f_{yd} + \varepsilon_{cu} \cdot E_s} = 3475.256 \text{ kN}$$

$$y_b := \frac{N_{Rd.B}}{f_{cd} \cdot b} = 81.771 \text{ mm}$$

$$d_s := \frac{f_{cd} \cdot b \cdot h \cdot (d - 0.5 \cdot h) + \frac{A_{s.tot}}{2} \cdot f_{yd} \cdot (d - d_c)}{f_{cd} \cdot b \cdot h + A_{s.tot} \cdot f_{yd}} = 65.7 \text{ mm}$$

$$x_b := \frac{y_b}{\lambda_k} = 102.213 \text{ mm}$$

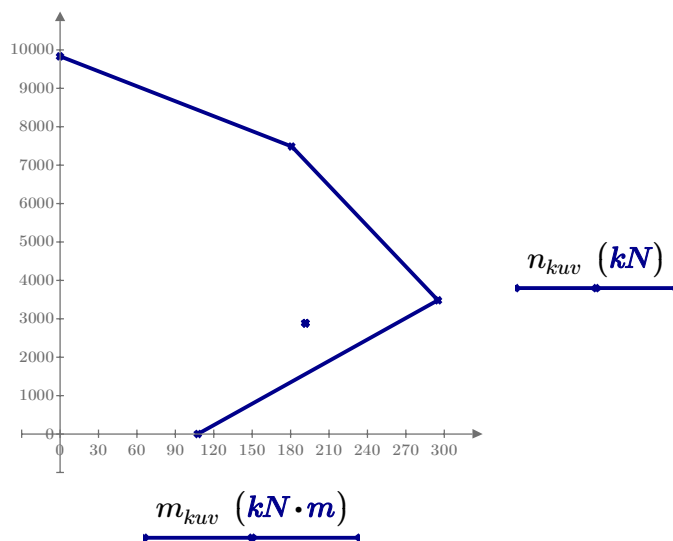
$$M_{Rd.B} := f_{cd} \cdot y_b \cdot b \cdot (d - d_s - 0.5 \cdot y_b) + \frac{A_{s.tot}}{2} \cdot f_{yd} \cdot (d - d_c - d_s) + \frac{A_{s.tot}}{2} \cdot f_{yd} \cdot d_s = 295.179 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Erikoispiste C: Puhdas taivutus

$$N_{Rd.C} := 0 \text{ kN}$$

$$M_{Rd.C} := \omega_t \cdot \left(1 - \frac{\omega_t}{2}\right) \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{cd} = 107.678 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$n_{kuv} := \begin{bmatrix} N_{Ed} & N_{Rd.A} \\ N_{Ed} & N_{Rd.D} \\ N_{Ed} & N_{Rd.B} \\ N_{Ed} & N_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2880 & 9821.404 \\ 2880 & 7482.955 \\ 2880 & 3475.256 \\ 2880 & 0 \end{bmatrix} \text{ kN} \quad m_{kuv} := \begin{bmatrix} M_{Ed} & M_{Rd.A} \\ M_{Ed} & M_{Rd.D} \\ M_{Ed} & M_{Rd.B} \\ M_{Ed} & M_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 191.71 & 0 \\ 191.71 & 180.87 \\ 191.71 & 295.179 \\ 191.71 & 107.678 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$





Käyttöasteen laskeminen

Lasketaan D-B ja origo-mitoituspiste suorien yhtälöt

Selvitetään suoran yhtälö, joka kulkee origon ja mitoituspisteen kautta

$$y_1 := 0 \text{ kN} \quad x_1 := 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$y_2 := N_{Ed} \quad x_2 := M_{Ed}$$

$$k := \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = 15.023 \frac{1}{\text{m}}$$

$$j := y_1 - x_1 \cdot k = 0 \text{ kN}$$

Selvitetään suoran yhtälö, joka kulkee erikoispisteiden D ja B kautta

$$y_{1.2} := N_{Rd.D} \quad x_{1.2} := M_{Rd.D}$$

$$y_{2.2} := N_{Rd.B} \quad x_{2.2} := M_{Rd.B}$$

$$k_2 := \frac{y_{1.2} - y_{2.2}}{x_{1.2} - x_{2.2}} = -35.06 \frac{1}{\text{m}}$$

$$j_2 := y_{1.2} - x_{1.2} \cdot k_2 = 13824.323 \text{ kN}$$

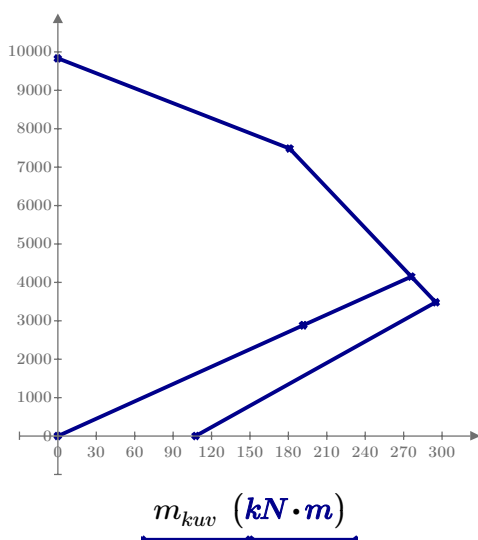
Selvitetään suorien leikkauspiste

$$x_{leik} := x_{leik} \cdot k_2 + j_2 = x_{leik} \cdot k + j \xrightarrow{\text{solve}, x_{leik}} 276.02813543449121077 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} = 276.028 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$y_{leik} := \frac{y_{leik} - j_2}{k_2} = \frac{y_{leik} - j}{k} \xrightarrow{\text{solve}, y_{leik}} 4146.6835263158200243 \cdot \text{kN} = 4146.684 \text{ kN}$$

$$n_{kuv} := \begin{bmatrix} 0 & N_{Rd.A} \\ N_{Ed} & N_{Rd.D} \\ N_{Ed} & N_{Rd.B} \\ y_{leik} & N_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 9821.404 \\ 2880 & 7482.955 \\ 2880 & 3475.256 \\ 4146.684 & 0 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$m_{kuv} := \begin{bmatrix} 0 & M_{Rd.A} \\ M_{Ed} & M_{Rd.D} \\ M_{Ed} & M_{Rd.B} \\ x_{leik} & M_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 191.71 & 180.87 \\ 191.71 & 295.179 \\ 276.028 & 107.678 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$



Käyttöaste:

$$\frac{N_{Ed}}{y_{leik}} = 69\%$$

**Raudoitettu seinä - REI 120 - Taulukkomitoitus**Lähtötiedot: $l_w := 2.7 \text{ m}$  Korkeus $b := 3 \text{ m}$  Leveys $h := 200 \text{ mm}$  Paksuus $c_{nom} := 20 \text{ mm}$  Betonipeitteen paksuus $\frac{l_w}{h} = 13.5 < 40 \quad \text{OK} \quad \text{Korkeuden ja paksuuden suhde}$ 

Palo molemmilla puolilla seinää - REI 120 - Standardipalo

Kuormat: $g_k := 545 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$  Omapainot $q_k := 222 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$  Hyötykuormat $\psi_{fi} := 0.3$  Muuttuvan kuorman yhdistelykerroin Luokka C: kokoontumistilat (Opinnäytetyö taulukko 3) $N_{Ed,fi} := (g_k + \psi_{fi} \cdot q_k) \cdot b = 1834.8 \text{ kN}$  Normaalivoiman mitoitusarvo palotilanteessaSeinän kestävyys normaalilämpötilassa:  $N_{Rd} := 4091.6 \text{ kN}$  $\mu_{fi} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}} = 0.448$  Pyöristetään seuraavaan arvoon ->

Katsotaan taulukosta 4. kantavien seinien vähimmäismitat ja keskiöetäisyyden vähimmäisarvot:

Kun:  $\mu_{fi} := 0.7$  + seinä palolle alttiina molemmilta puolin & REI 120-> Taulukosta saadaan seinän vähimmäispaksuudeksi:  $h_{min} := 220 \text{ mm} > h := 200 \text{ mm}$ -> Ja vähimmäiskeskiöetäisyydeksi:  $d'_{min} := 35 \text{ mm} > d' := 34 \text{ mm}$ 

-&gt; Seinän paksuutta ja raudoitusten keskiöetäisyyttä tulisi kasvattaa, jotta seinä kestäisi 120 min palossa

**Raudoitettu seinä - REI 120 - 500°C isotherminen menetelmä**Lähtötiedot

$l_w := 2.7 \text{ m}$	Korkeus
$b := 3 \text{ m}$	Leveys
$h := 200 \text{ mm}$	Paksuus
$c_{nom} := 20 \text{ mm}$	Betonipeitteen paksuus
$\gamma_{M,fi} := 1.0$	Materiaaliominaisuuksien osavarmuusluku palotilanteessa

Materiaaliominaisuudet

Betoni C25/30	Betoniteräs B500B
$f_{ck} := 25 \text{ MPa}$	$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$
$f_{cd,fi} := f_{ck} \cdot \gamma_{M,fi} = 25 \text{ MPa}$	$E_s := 200 \text{ GPa}$

Palon tiedot

Palonkesto aika = 120 min & palo seinän molemmilla puolilla & standardipalo

$a_{z,500} := 40 \text{ mm}$  500°C betonin syvyys (katsotaan sopivasta lämpötilaprofiilista, esimerkissä syvyys on laskettu FIN EC-ohjelmalla. Lämpötilaprofiili esitetty laskun perässä)

Raudoituksien etäisyys lähimmästä pinnosta = 34 mm (raudoituksen keskeltä seinän reunaan)

$\theta_{t1} := 534$  Seinän 1. puolen raudoituksien lämpötila [°C]

$\theta_{t2} := 534$  Seinän 2. puolen raudoituksien lämpötila [°C]

Raudoitusten lujuuksien pienennys

Taulukko: Puristusraudoitukselle 0,2-rajaa vastaava lujuuksien heikkenemiskertoimet, joita voidaan myös käyttää vetöraudoitukselle palotilanteen venymän ollessa alle 2%. Luokan N raudoituksille. (SFS-EN 1992-1-2, s.29-30)

	Kaava:	Ehto:
$k_{S(\theta)}$	1,0	Kun $20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C}$
$k_{S(\theta)}$	$0,7 - 0,3 \cdot (\theta - 100) / 300$	Kun $100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$
$k_{S(\theta)}$	$0,57 - 0,13 \cdot (\theta - 400) / 100$	Kun $400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 500^{\circ}\text{C}$
$k_{S(\theta)}$	$0,1 - 0,47 \cdot (\theta - 500) / 200$	Kun $500^{\circ}\text{C} < \theta \leq 700^{\circ}\text{C}$
$k_{S(\theta)}$	$0,1 \cdot (1200 - \theta) / 500$	Kun $700^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$k_{s,\theta_1} := 0,1 - 0,47 \cdot \frac{\theta_{t1} - 700}{200} = 0,49 \quad \text{Seinän 1. puolen raudoitusten heikennyskerroin}$$

$$k_{s,\theta_2} := 0,1 - 0,47 \cdot \frac{\theta_{t2} - 700}{200} = 0,49 \quad \text{Seinän 2. puolen raudoitusten heikennyskerroin}$$

$$k_{s,\theta} := k_{s,\theta_1} = 0,49 \quad \text{Raudoitusten lämpötilat samat -> lujuudet yhtä suuria}$$

$$f_{sd,fi} := k_{s,\theta} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M,fi}} = 245,05 \text{ MPa} \quad \text{Raudoitusten pienentyneet lujuudet}$$

Raudoituksen heikentynyt kimmokerroin

Teräksen lämpötila $\theta$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$E_{s,\theta} / E_s$	
	kuumavalssattu 6	kylmämuokattu 7
1		
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,90	0,87
300	0,80	0,72
400	0,70	0,56
500	0,60	0,40
600	0,31	0,24
700	0,13	0,08
800	0,09	0,06
900	0,07	0,05
1000	0,04	0,03
1100	0,02	0,02
1200	0,00	0,00

Taulukko luokan N raudoitusten kimmokertoimien heikennyskerroimille (SFS-EN 1992-1-2, s.22, taulukko 3.2a)

Taulukon arvojen välillä saa interpoloida.

Seinässä on käytetty kuumavalssattuja raudoituksia.

$$\theta_{t1} = 534 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{t2} = 534 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$k_{sE,1} := 0.5014$  Seinän 1. puolen raudoituksen kimmokertoimen heikennyskerroin

$k_{sE,2} := 0.5014$  Seinän 2. puolen raudoituksen kimmokertoimen heikennyskerroin

$k_{sE} := k_{sE,1} = 0.5014$  Raudoitusten lämpötilat samat -> kimmokertoimet yhtä suuria

$E_{s,fi} := k_{sE} \cdot \frac{E_s}{\gamma_{M,fi}} = 100280 \text{ MPa}$  Raudoituksen heikentynyt kimmokerroin palotilanteessa

### Poikkileikkauksen pienennys

$h_{fi} := h - 2 \cdot a_{z,500} = 120 \text{ mm}$  Pienennetty paksuus, kun palo seinän molemmilla puolilla

$b_{fi} := b = 3000 \text{ mm}$  Leveys ei pienene, kun palo ei seinän reunoilla

### Raudoitus

Seinä ei luultavasti kestä normaalilämpötilan mitoituksessa käytetyllä raudoituksella, joten kokeillaan seuraavia raudoituksia:

$\phi := 12 \text{ mm}$  Pystyraudoitus

$k_{jako,\phi} := 100 \text{ mm}$  Pystyraudoituksen k-jako

$\phi_h := 8 \text{ mm}$  Vaakaraudoitus

$A_{s,c} := \frac{\pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}{k_{jako,\phi}} = 1130.973 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$  Puristusraudoituksen pinta-ala metrin pituudella

$A_{s,t} := \frac{\pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}{k_{jako,\phi}} = 1130.973 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$  Vetoraudoituksen pinta-ala metrin pituudella

$A_s := A_{s,c} + A_{s,t} = 2261.947 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$  Molempien pintojen pystyraudoitusten pinta-alat/m

Kuormat

$$N_{Ed.fi} := 1834.8 \text{ kN}$$

Normaalivoiman mitoitusarvo palossa

$$n_{Ed.fi} := \frac{N_{Ed.fi}}{b_{fi}} = 611.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Normaalivoima metrikuormana

Kuorman epäkeskisyys

$$e_{ala} := 10 \text{ mm}$$

$$e_{ylä} := 50 \text{ mm}$$

1-kertaluvun momentit

$$m_{ala} := n_{Ed.fi} \cdot e_{ala} = 6.116 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_{ylä} := n_{Ed.fi} \cdot e_{ylä} = 30.58 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Vähimmäismomentti

$$e_{0.min} := \max\left(\frac{h}{30}, 20 \text{ mm}\right) = 20 \text{ mm}$$

$$m_{0.min} := e_{0.min} \cdot n_{Ed.fi} = 12.232 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$d' := c_{nom} + 1.1 \cdot \phi_h + \frac{1.1 \cdot \phi}{2} = 35.4 \text{ mm}$$

$$d_{fi} := h_{fi} + (a_{z.500} - d') = 124.6 \text{ mm}$$

$$\rho := \frac{A_s}{d_{fi}} = 0.01815 < 0.06 \quad \text{Raudoitussuhde}$$

$$\rho_t := \frac{\rho}{2} = 0.009 \quad \text{Raudoitussuhde - vetorausdoitus}$$

$$\rho_c := \frac{\rho}{2} = 0.009 \quad \text{Raudoitussuhde - puristusraudoitus}$$

$$\omega := \frac{A_s \cdot f_{sd.fi}}{d_{fi} \cdot f_{cd.fi}} = 0.178 \quad \text{Mekaaninen raudoitussuhde}$$

$$l_0 := l_w = 2.7 \text{ m} \quad \text{Nurjahduspituus}$$

Hoikkuuden laskenta

$$i := \frac{d_{fi}}{\sqrt{12}} = 35.969 \text{ mm}$$

$$\lambda := \frac{l_0}{i} = 75.065$$

Rajahoikkuuden laskenta

$$n := \frac{n_{Ed,fi}}{d_{fi} \cdot f_{cd,fi}} = 0.196 \quad \text{Suhteellinen normaalivoima}$$

Kertoimet (Tarkkoja arvoja ei tunneta, joten käytetään suositeltuja arvoja)

$$A := 0.7 \quad B := 1.1 \quad C := 0.7$$

$$\lambda_{lim} := 20 \cdot A \cdot B \cdot C \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} = 24.328 \quad \text{Rajahoikkuus}$$

$$\lambda_{lim} = 24.328 < \lambda = 75.065 \quad 2. \text{ kertaluvun vaikutukset otettava huomioon}$$

1. Kertaluvun mitoitusmomentti

Korkeuteen liittyvä pienennyskerroin

$$\alpha_{h.test} := \max\left(\frac{2}{\sqrt{\frac{l_w}{m}}}, \frac{2}{3}\right) = 1.217 \quad \rightarrow \quad \alpha_h := \min(1, \alpha_{h.test}) = 1$$

$$\alpha_m := 1 \quad \text{Rakennneosien määrään liittyvä pienennyskerroin}$$

$$\theta_0 := \frac{1}{200} = 0.005$$

$$\theta_i := \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0.005 \quad \text{Vinous}$$

$$e_i := \theta_i \cdot \frac{l_0}{2} = 6.75 \text{ mm} \quad \text{Lisäepäkeskisyyys}$$

Rasitetumman pään korjattu momentti

$$m_{02} := e_i \cdot n_{Ed,fi} + \max(m_{ylä}, m_{ala}) = 34.708 \frac{kN \cdot m}{m}$$

Vähemmän rasitetun pään korjattu momentti

$$m_{01} := e_i \cdot n_{Ed,fi} + \min(m_{ala}, m_{ylä}) = 10.244 \frac{kN \cdot m}{m}$$

1. Kertaluvun mitoitusmomentti

$$m_{0e} := \max(0.6 \cdot m_{02} + 0.4 \cdot m_{01}, 0.4 \cdot m_{02}) = 24.923 \frac{kN \cdot m}{m} \quad \text{Jäykistetylle seinälle}$$

Toisen kertaluvun vaikutusten laskenta

2. kertaluvun momentti lasketaan nimellisen kaarevuuden menetelmällä

Tasapainomurtoa vastaavaa kaarevuus

$$\varepsilon_{yd} := \frac{f_{sd,fi}}{E_{s,fi}} = 0.00244$$

$$r_0 := \frac{1}{\frac{\varepsilon_{yd}}{0.45 \cdot d_{fi}}} = 22.945 \text{ m}$$

Korjauskertoimet

$$n_u := 1 + \omega = 1.178$$

$$\nu := \frac{n_{Ed,fi}}{d_{fi} \cdot f_{cd,fi}} = 0.196$$

$$n_{bal} := 0.4$$

$$K_r := \min \left( 1, \frac{n_u - \nu}{n_u - n_{bal}} \right) = 1$$

$K_\varphi := 1$  Viruman vaikutusta ei huomioida palotilanteessa

$$\nu'' := K_r \cdot K_\varphi \cdot \frac{1}{r_0} = 0.044 \frac{1}{\text{m}}$$

Pilarin suurimman taipuman laskenta

$c := 10$  Käyr. jakautuma kerroin

$$e_2 := \nu'' \cdot \frac{l_0^2}{c} = 31.771 \text{ mm}$$

2. kertaluvun momentti

$$m_2 := e_2 \cdot n_{Ed,fi} = 19.431 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Mitoitusmomentti

$$m_{Ed} := \max(m_{0e} + m_2, m_{02}, m_{0,min}) = 44.354 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$



Yhteisvaikutuskuvaajan laskenta

$$A_{s,tot} := A_s \cdot b = 6785.84 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_k := 0.8, \text{ kun } f_{ck} = 25 \text{ MPa} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$\omega_t := \frac{\omega}{2} = 0.089$$

$$\omega_c := \frac{\omega}{2} = 0.089$$

$$\varepsilon_{cu} := 0.0035 \quad \text{Betoinin murtopuristuma}$$

$$N_{Ed} := N_{Ed,fi} = 1834.8 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} := m_{Ed} \cdot b = 133.062 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Erikoispiste A: Puhdas puristus

$$N_{Rd,A} := f_{cd,fi} \cdot (h_{fi} \cdot b_{fi} - A_s \cdot b_{fi}) + A_s \cdot b_{fi} \cdot f_{sd,fi} = 10493.224 \text{ kN}$$

$$M_{Rd,A} := 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Erikoispiste D:

$$N_{Rd,D} := \lambda_k \cdot b_{fi} \cdot d_{fi} \cdot f_{cd,fi} + A_{s,c} \cdot b_{fi} \cdot f_{sd,fi} = 8307.435 \text{ kN}$$

$$M_{Rd,D} := \left( 0.125 - \frac{(\lambda_k - 0.5)^2}{2} \right) \cdot b_{fi} \cdot d_{fi}^2 \cdot f_{cd,fi} + \left( d_{fi} - \frac{h}{2} \right) \cdot A_{s,c} \cdot b_{fi} \cdot f_{sd,fi} = 113.604 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Erikoispiste B: Tasapainomurtuminen

$$N_{Rd,B} := b_{fi} \cdot d_{fi} \cdot f_{cd,fi} \cdot \frac{\lambda_k \cdot \varepsilon_{cu} \cdot E_{s,fi}}{f_{sd,fi} + \varepsilon_{cu} \cdot E_{s,fi}} = 4402.34 \text{ kN}$$

$$y_b := \frac{N_{Rd,B}}{f_{cd,fi} \cdot b_{fi}} = 58.698 \text{ mm}$$

$$d_s := \frac{f_{cd,fi} \cdot b_{fi} \cdot d_{fi} \cdot (d_{fi} - 0.5 \cdot h_{fi}) + \frac{A_{s,tot}}{2} \cdot f_{sd,fi} \cdot \left( \left( d_{fi} - \frac{h_{fi}}{2} \right) \cdot 2 \right)}{f_{cd,fi} \cdot b_{fi} \cdot d_{fi} + A_{s,tot} \cdot f_{sd,fi}} = 64.6 \text{ mm}$$

$$x_{b,fi} := \frac{y_b}{\lambda_k} = 73.372 \text{ mm}$$

$$M_{Rd,B} := f_{cd,fi} \cdot y_b \cdot b_{fi} \cdot (d_{fi} - d_s - 0.5 \cdot y_b) + \frac{A_{s,tot}}{2} \cdot f_{sd,fi} \cdot \left( d_{fi} - \frac{h_{fi}}{2} \right) + \frac{A_{s,tot}}{2} \cdot f_{sd,fi} \cdot d_s = 242.358 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

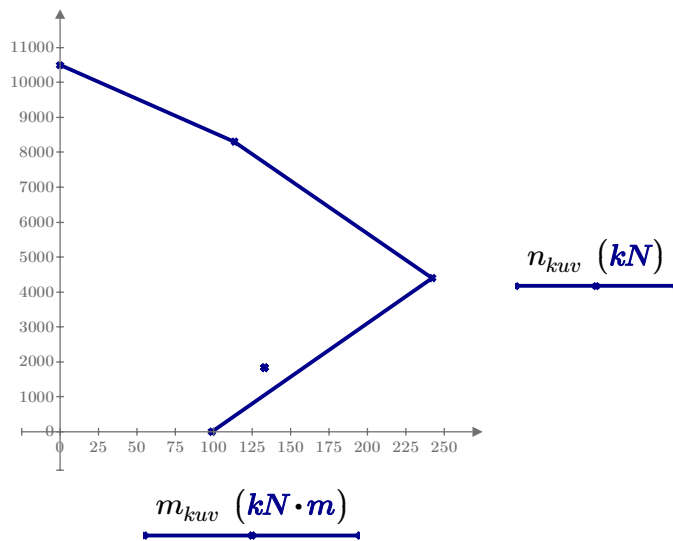
Erikoispiste C: Puhdas taivutus

$$M_{Rd.C} := \omega_t \cdot \left(1 - \frac{\omega_t}{2}\right) \cdot b_{fi} \cdot d_{fi}^2 \cdot f_{cd.fi} = 98.988 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_{Rd.C} := 0 \text{ kN}$$

$$n_{kuv} := \begin{bmatrix} N_{Ed} & N_{Rd.A} \\ N_{Ed} & N_{Rd.D} \\ N_{Ed} & N_{Rd.B} \\ N_{Ed} & N_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1834.8 & 10493.224 \\ 1834.8 & 8307.435 \\ 1834.8 & 4402.34 \\ 1834.8 & 0 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$m_{kuv} := \begin{bmatrix} M_{Ed} & M_{Rd.A} \\ M_{Ed} & M_{Rd.D} \\ M_{Ed} & M_{Rd.B} \\ M_{Ed} & M_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 133.062 & 0 \\ 133.062 & 113.604 \\ 133.062 & 242.358 \\ 133.062 & 98.988 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$



Käyttöasteen laskeminen

Lasketaan B-C ja origo-mitoituspiste suorien yhtälöt

Selvitetään suoran yhtälö, joka kulkee origon ja mitoituspisteen kautta

$$y_1 := 0 \text{ kN} \quad x_1 := 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$y_2 := N_{Ed} \quad x_2 := M_{Ed}$$

$$k := \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = 13.789 \frac{1}{\text{m}}$$

$$j := y_1 - x_1 \cdot k = 0 \text{ kN}$$

Selvitetään suoran yhtälö, joka kulkee erikoispisteiden B ja C kautta

$$y_{1.2} := N_{Rd.B} \quad x_{1.2} := M_{Rd.B}$$

$$y_{2.2} := N_{Rd.C} \quad x_{2.2} := M_{Rd.C}$$

$$k_2 := \frac{y_{1.2} - y_{2.2}}{x_{1.2} - x_{2.2}} = 30.706 \frac{1}{\text{m}}$$

$$j_2 := y_{1.2} - x_{1.2} \cdot k_2 = -3039.556 \text{ kN}$$

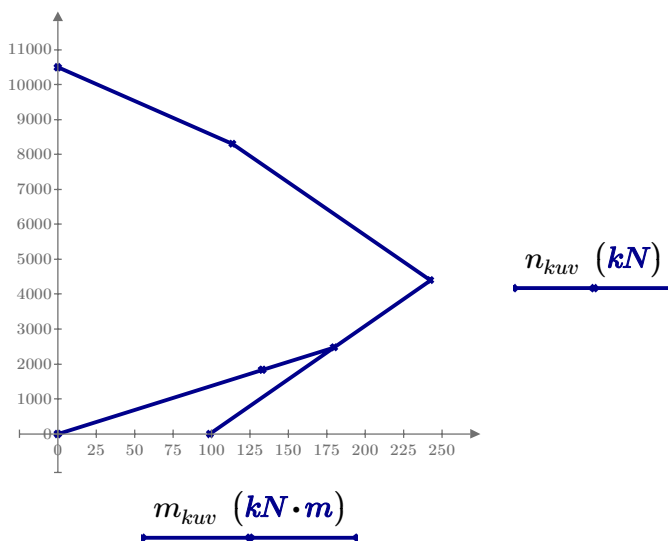
Selvitetään suorien leikkauspiste

$$x_{leik} := x_{leik} \cdot k_2 + j_2 = x_{leik} \cdot k + j \xrightarrow{\text{solve}, x_{leik}} 179.67239154273802443 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} = 179.672 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$y_{leik} := \frac{y_{leik} - j_2}{k_2} = \frac{y_{leik} - j}{k} \xrightarrow{\text{solve}, y_{leik}} 2477.5060883603685609 \cdot \text{kN} = 2477.506 \text{ kN}$$

$$n_{kuv} := \begin{bmatrix} 0 & N_{Rd.A} \\ N_{Ed} & N_{Rd.D} \\ N_{Ed} & N_{Rd.B} \\ y_{leik} & N_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 10493.224 \\ 1834.8 & 8307.435 \\ 1834.8 & 4402.34 \\ 2477.506 & 0 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

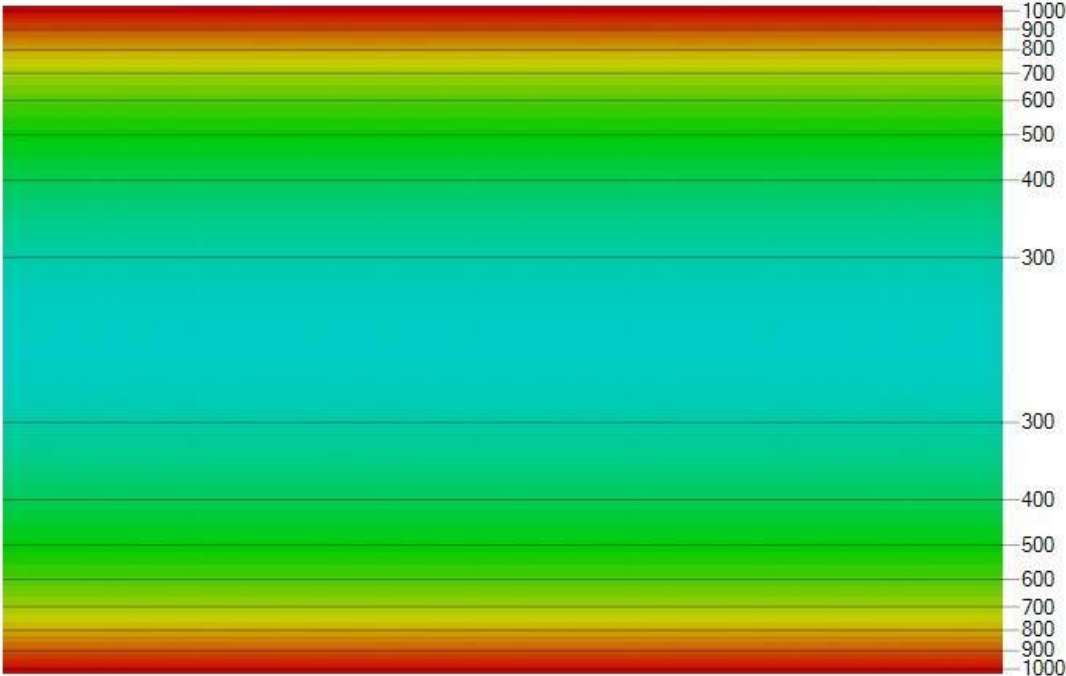
$$m_{kuv} := \begin{bmatrix} 0 & M_{Rd.A} \\ M_{Ed} & M_{Rd.D} \\ M_{Ed} & M_{Rd.B} \\ x_{leik} & M_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 133.062 & 113.604 \\ 133.062 & 242.358 \\ 179.672 & 98.988 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$



Käyttöaste:

$$\frac{N_{Ed}}{y_{leik}} = 74\%$$

Temperature profile 200 mm wall t=120 min



**Raudoitettu seinä - REI 120 - vyöhykemenetelmä**Lähtötiedot

$l_w := 2.7 \text{ m}$	Korkeus
$b := 3 \text{ m}$	Leveys
$h := 200 \text{ mm}$	Paksuus
$c_{nom} := 20 \text{ mm}$	Betonipeitteen paksuus
$\gamma_{M,fi} := 1.0$	Materiaaliominaisuuksien osavarmuusluku palotilanteessa

Materiaaliominaisuudet

Betoni C25/30	Betoniteräs B500B
$f_{ck} := 25 \text{ MPa}$	$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$
	$E_s := 200 \text{ GPa}$

Palon tiedot

Palonkesto aika = 120 min & palo seinän molemmilla puolilla & standardipalo

$$w := \frac{h}{2} = 100 \text{ mm} \quad (\text{palo 1. puolelta } w = h \text{ ja palo molemmilta puolilta } w = h/2)$$

$$v_m := 10 \quad \text{Vyöhykkeiden määrä (vähintään 3)}$$

$$v_p := \frac{w}{v_m} = 10 \text{ mm} \quad \text{Vyöhykkeiden paksuus}$$

Alla jokaisen vyöhykkeen keskipisteen sijainti  $v_i$  (Katso sopivasta lämpötilaprofiilista keskipisteen lämpötila ja SFS-EN 1992-1-2 taulukosta 3.1 lämpötilaa vastaava betonin heikennyskerroin)

Lämpötilat laskettu FIN EC-ohjelmalla, käytetty samaa lämpötilaprofiilia kuin isothermimenetelmässä

Keskipisteen sijainti	Lämpötila	Heikennyskerroin
$v_1 := \frac{v_p}{2} = 5 \text{ mm}$	$T_1 := 933 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_{c,1} := 0.06$
$v_2 := v_1 + v_p = 15 \text{ mm}$	$T_2 := 778 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_{c,2} := 0.183$
$v_3 := v_2 + v_p = 25 \text{ mm}$	$T_3 := 649 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_{c,3} := 0.3765$
$v_4 := v_3 + v_p = 35 \text{ mm}$	$T_4 := 542 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_{c,4} := 0.537$

$v_5 := v_4 + v_p = 45 \text{ mm}$	$T_5 := 460 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_{c.5} := 0.66$
$v_6 := v_5 + v_p = 55 \text{ mm}$	$T_6 := 397 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_{c.6} := 0.753$
$v_7 := v_6 + v_p = 65 \text{ mm}$	$T_7 := 348 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_{c.7} := 0.8$
$v_8 := v_7 + v_p = 75 \text{ mm}$	$T_8 := 312 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_{c.8} := 0.84$
$v_9 := v_8 + v_p = 85 \text{ mm}$	$T_9 := 290 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_{c.9} := 0.86$
$v_{10} := v_9 + v_p = 95 \text{ mm}$	$T_{10} := 279 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_{c.10} := 0.871$

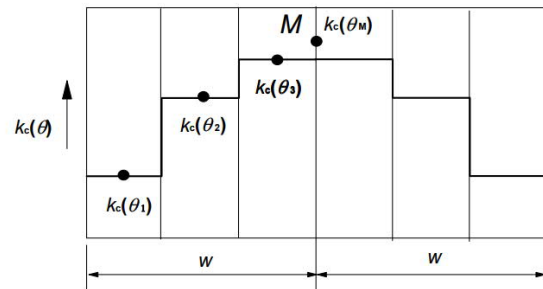
Poikkileikkauksen pienennyskerroin

$$k_{c.m} := \frac{\left(1 - \frac{0.2}{v_m}\right)}{v_m} \cdot (k_{c.1} + k_{c.2} + k_{c.3} + k_{c.4} + k_{c.5} + k_{c.6} + k_{c.7} + k_{c.8} + k_{c.9} + k_{c.10}) = 0.582$$

Valitaan betonin heikennyskerroin pisteessä M

Palo molemmin puolin seinää  
-> piste M on seinän keskellä

$$T_M := 276 \text{ } ^\circ\text{C} \quad k_{c.\theta M} := 0.874$$



$$f_{cd.fi} := f_{ck} \cdot \gamma_{M.fi} \cdot k_{c.\theta M} = 21.85 \text{ MPa} \quad \text{Pienennetty betonin puristuslujuus}$$

$$a_z := w \cdot \left(1 - \left(\frac{k_{c.m}}{k_{c.\theta M}}\right)^{1.3}\right) = 41.034 \text{ mm} \quad \text{Heikentyneen vyöhykkeen paksuus}$$

Raudoituksen etäisyys lähimmästä pinnosta = 34 mm (raudoituksen keskeltä seinän reunaan)

$$\theta_{t1} := 534 \quad \text{Seinän 1. puolen raudoituksen lämpötila [ } ^\circ\text{C ]}$$

$$\theta_{t2} := 534 \quad \text{Seinän 2. puolen raudoituksen lämpötila [ } ^\circ\text{C ]}$$

Raudoitusten lujuuksien pienennys

Taulukko: Puristusraudoitukselle 0,2-rajaa vastaava lujuuksien heikkenemiskertoimet, joita voidaan myös käyttää vetoraudoitukselle palotilanteen venymän ollessa alle 2%. Luokan N raudoituksille. (SFS-EN 1992-1-2, s.29-30)

	Kaava:	Ehto:
$k_{s(\theta)}$	1,0	Kun $20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C}$
$k_{s(\theta)}$	$0,7-0,3*(\theta-100)/300$	Kun $100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$
$k_{s(\theta)}$	$0,57-0,13*(\theta-500)/100$	Kun $400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 500^{\circ}\text{C}$
$k_{s(\theta)}$	$0,1-0,47*(\theta-700)/200$	Kun $500^{\circ}\text{C} < \theta \leq 700^{\circ}\text{C}$
$k_{s(\theta)}$	$0,1*(1200-\theta)/500$	Kun $700^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$k_{s,\theta_1} := 0.1 - 0.47 \cdot \frac{\theta_{t1} - 700}{200} = 0.49$$

Seinän 1. puolen raudoitusten heikennyskerroin

$$k_{s,\theta_2} := 0.1 - 0.47 \cdot \frac{\theta_{t2} - 700}{200} = 0.49$$

Seinän 2. puolen raudoitusten heikennyskerroin

$$k_{s,\theta} := k_{s,\theta_1} = 0.49$$

Raudoitusten lämpötilat samat -> lujuudet yhtä suuria

$$f_{sd,fi} := k_{s,\theta} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M,fi}} = 245.05 \text{ MPa}$$

Raudoitusten pienentyneet lujuudet

Raudoituksen heikentynyt kimmokerroin

Teräksen lämpötila $\theta$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$E_{s,\theta} / E_s$	
	kuumavalssattu	kylmämuokattu
1	6	7
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,90	0,87
300	0,80	0,72
400	0,70	0,56
500	0,60	0,40
600	0,31	0,24
700	0,13	0,08
800	0,09	0,06
900	0,07	0,05
1000	0,04	0,03
1100	0,02	0,02
1200	0,00	0,00

Taulukko luokan N raudoitusten kimmokertoimien heikennyskerroimille (SFS-EN 1992-1-2, s.22, taulukko 3.2a)

Taulukon arvojen välillä saa interpoloida.

Seinässä on käytetty kuumavalssattuja raudoituksia.

$$\theta_{t1} = 534 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{t2} = 534 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$k_{sE,1} := 0.5014$  Seinän 1. puolen raudoituksen kimmokertoimen heikennyskerroin

$k_{sE,2} := 0.5014$  Seinän 2. puolen raudoituksen kimmokertoimen heikennyskerroin

$k_{sE} := k_{sE,1} = 0.5014$  Raudoitusten lämpötilat samat -> kimmokertoimet yhtä suuria

$E_{s.fi} := k_{sE} \cdot \frac{E_s}{\gamma_{M,fi}} = 100280 \text{ MPa}$  Raudoituksen heikentynyt kimmokerroin palotilanteessa

### Poikkileikkauksen pienennys

$h_{fi} := h - 2 \cdot a_z = 117.931 \text{ mm}$  Pienennetty paksuus, kun palo seinän molemmilla puolilla

$b_{fi} := b = 3000 \text{ mm}$  Leveys ei pienene, kun palo ei seinän reunoilla

### Raudoitus

Seinä ei luultavasti kestä normaalilämpötilan mitoituksessa käytetyllä raudoituksella, joten kokeillaan seuraavia raudoituksia:

$\phi := 12 \text{ mm}$  Pystyraudoitus

$k_{jako,\phi} := 100 \text{ mm}$  Pystyraudoituksen k-jako

$\phi_h := 8 \text{ mm}$  Vaakaraudoitus

$A_{s,c} := \frac{\pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}{k_{jako,\phi}} = 1130.973 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$  Puristusraudoituksen pinta-ala metrin pituudella

$A_{s,t} := \frac{\pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}{k_{jako,\phi}} = 1130.973 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$  Vetoraudoituksen pinta-ala metrin pituudella

$A_s := A_{s,c} + A_{s,t} = 2261.947 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$  Molempien pintojen pystyraudoitusten pinta-ala/m



Kuormat

$$N_{Ed.fi} := 1834.8 \text{ kN}$$

Normaalivoiman mitoitusarvo palossa

$$n_{Ed.fi} := \frac{N_{Ed.fi}}{b_{fi}} = 611.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Normaalivoima metrikuormana

Kuorman epäkeskisyys

$$e_{ala} := 10 \text{ mm}$$

$$e_{ylä} := 50 \text{ mm}$$

1-kertaluvun momentit

$$m_{ala} := n_{Ed.fi} \cdot e_{ala} = 6.116 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_{ylä} := n_{Ed.fi} \cdot e_{ylä} = 30.58 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Vähimmäismomentti

$$e_{0.min} := \max\left(\frac{h}{30}, 20 \text{ mm}\right) = 20 \text{ mm}$$

$$m_{0.min} := e_{0.min} \cdot n_{Ed.fi} = 12.232 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$d' := c_{nom} + 1.1 \cdot \phi_h + \frac{1.1 \cdot \phi}{2} = 35.4 \text{ mm}$$

$$d_{fi} := h_{fi} + (a_z - d') = 123.566 \text{ mm}$$

$$\rho := \frac{A_s}{d_{fi}} = 0.01831 < 0.06 \quad \text{Raudoitussuhde}$$

$$\rho_t := \frac{\rho}{2} = 0.009 \quad \text{Raudoitussuhde - vetorausdoitus}$$

$$\rho_c := \frac{\rho}{2} = 0.009 \quad \text{Raudoitussuhde - puristusraudoitus}$$

$$\omega := \frac{A_s \cdot f_{sd.fi}}{d_{fi} \cdot f_{cd.fi}} = 0.205 \quad \text{Mekaaninen raudoitussuhde}$$

$$l_0 := l_w = 2.7 \text{ m} \quad \text{Nurjahduspituus}$$

Hoikkuuden laskenta

$$i := \frac{d_{fi}}{\sqrt{12}} = 35.67 \text{ mm}$$

$$\lambda := \frac{l_0}{i} = 75.693$$

Rajahoikkuuden laskenta

$$n := \frac{n_{Ed.fi}}{d_{fi} \cdot f_{cd.fi}} = 0.227 \quad \text{Suhteellinen normaalivoima}$$

Kertoimet (Tarkkoja arvoja ei tunneta, joten käytetään suositeltuja arvoja)

$$A := 0.7 \quad B := 1.1 \quad C := 0.7$$

$$\lambda_{lim} := 20 \cdot A \cdot B \cdot C \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} = 22.65 \quad \text{Rajahoikkuus}$$

$$\lambda_{lim} = 22.65 < \lambda = 75.693 \quad \text{2. kertaluvun vaikutukset otettava huomioon}$$

1. Kertaluvun mitoitusmomentti

Korkeuteen liittyvä pienennyskerroin

$$\alpha_{h.test} := \max\left(\frac{2}{\sqrt{\frac{l_w}{m}}}, \frac{2}{3}\right) = 1.217 \quad \rightarrow \quad \alpha_h := \min(1, \alpha_{h.test}) = 1$$

$$\alpha_m := 1 \quad \text{Rakenneseosien määrään liittyvä pienennyskerroin}$$

$$\theta_0 := \frac{1}{200} = 0.005$$

$$\theta_i := \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0.005 \quad \text{Vinous}$$

$$e_i := \theta_i \cdot \frac{l_0}{2} = 6.75 \text{ mm} \quad \text{Lisäepäkeskisyyys}$$

Rasitetumman pään korjattu momentti

$$m_{02} := e_i \cdot n_{Ed.fi} + \max(m_{ylä}, m_{ala}) = 34.708 \frac{kN \cdot m}{m}$$

Vähemmän rasitetun pään korjattu momentti

$$m_{01} := e_i \cdot n_{Ed.fi} + \min(m_{ala}, m_{ylä}) = 10.244 \frac{kN \cdot m}{m}$$

1. Kertaluvun mitoitusmomentti

$$m_{0e} := \max(0.6 \cdot m_{02} + 0.4 \cdot m_{01}, 0.4 \cdot m_{02}) = 24.923 \frac{kN \cdot m}{m} \quad \text{Jäykistetyille seinälle}$$

Toisen kertaluvun vaikutusten laskenta

2. kertaluvun momentti lasketaan nimellisen kaarevuuden menetelmällä

Tasapainomurtoa vastaavaa kaarevuus

$$\varepsilon_{yd} := \frac{f_{sd,fi}}{E_{s,fi}} = 0.00244$$

$$r_0 := \frac{1}{\frac{\varepsilon_{yd}}{0.45 \cdot d_{fi}}} = 22.755 \text{ m}$$

Korjauskertoimet

$$n_u := 1 + \omega = 1.205$$

$$\nu := \frac{n_{Ed,fi}}{d_{fi} \cdot f_{cd,fi}} = 0.227$$

$$n_{bal} := 0.4$$

$$K_r := \min \left( 1, \frac{n_u - \nu}{n_u - n_{bal}} \right) = 1$$

$K_\varphi := 1$  Viruman vaikutusta ei huomioida palotilanteessa

$$\nu'' := K_r \cdot K_\varphi \cdot \frac{1}{r_0} = 0.044 \frac{1}{\text{m}}$$

Pilarin suurimman taipuman laskenta

$c := 10$  Käyr. jakautuma kerroin

$$e_2 := \nu'' \cdot \frac{l_0^2}{c} = 32.037 \text{ mm}$$

2. kertaluvun momentti

$$m_2 := e_2 \cdot n_{Ed,fi} = 19.594 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Mitoitusmomentti

$$m_{Ed} := \max(m_{0e} + m_2, m_{02}, m_{0.min}) = 44.517 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Yhteisvaikutuskuvaajan laskenta

$$A_{s,tot} := A_s \cdot b = 6785.84 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_k := 0.8, \text{ kun } f_{ck} = 25 \text{ MPa} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$\omega_t := \frac{\omega}{2} = 0.103$$

$$\omega_c := \frac{\omega}{2} = 0.103$$

$$\varepsilon_{cu} := 0.0035 \quad \text{Betoinin murtopuristuma}$$

$$\nu = 0.227$$

$$\mu := \frac{m_{Ed}}{d_{fi}^2 \cdot f_{cd,fi}} = 0.133$$

$$N_{Ed} := N_{Ed,fi} = 1834.8 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} := m_{Ed} \cdot b = 133.55 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Erikoispiste A: Puhdas puristus

$$N_{Rd,A} := f_{cd,fi} \cdot (h_{fi} \cdot b_{fi} - A_s \cdot b_{fi}) + A_s \cdot b_{fi} \cdot f_{sd,fi} = 9244.993 \text{ kN}$$

$$M_{Rd,A} := 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Erikoispiste D:

$$N_{Rd,D} := \lambda_k \cdot b_{fi} \cdot d_{fi} \cdot f_{cd,fi} + A_{s,c} \cdot b_{fi} \cdot f_{sd,fi} = 7311.217 \text{ kN}$$

$$M_{Rd,D} := \left( 0.125 - \frac{(\lambda_k - 0.5)^2}{2} \right) \cdot b_{fi} \cdot d_{fi}^2 \cdot f_{cd,fi} + \left( d_{fi} - \frac{h}{2} \right) \cdot A_{s,c} \cdot b_{fi} \cdot f_{sd,fi} = 99.661 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Erikoispiste B: Tasapainomurtuminen

$$N_{Rd,B} := b_{fi} \cdot d_{fi} \cdot f_{cd,fi} \cdot \frac{\lambda_k \cdot \varepsilon_{cu} \cdot E_{s,fi}}{f_{sd,fi} + \varepsilon_{cu} \cdot E_{s,fi}} = 3815.703 \text{ kN}$$

$$y_b := \frac{N_{Rd,B}}{f_{cd,fi} \cdot b_{fi}} = 58.211 \text{ mm}$$

$$d_s := \frac{f_{cd,fi} \cdot b_{fi} \cdot d_{fi} \cdot (d_{fi} - 0.5 \cdot h_{fi}) + \frac{A_{s,tot}}{2} \cdot f_{sd,fi} \cdot \left( \left( d_{fi} - \frac{h_{fi}}{2} \right) \cdot 2 \right)}{f_{cd,fi} \cdot b_{fi} \cdot d_{fi} + A_{s,tot} \cdot f_{sd,fi}} = 64.6 \text{ mm}$$

$$x_{b,fi} := \frac{y_b}{\lambda_k} = 72.763 \text{ mm}$$

$$M_{Rd,B} := f_{cd,fi} \cdot y_b \cdot b_{fi} \cdot (d_{fi} - d_s - 0.5 \cdot y_b) + \frac{A_{s,tot}}{2} \cdot f_{sd,fi} \cdot \left( d_{fi} - \frac{h_{fi}}{2} \right) + \frac{A_{s,tot}}{2} \cdot f_{sd,fi} \cdot d_s = 221.36 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

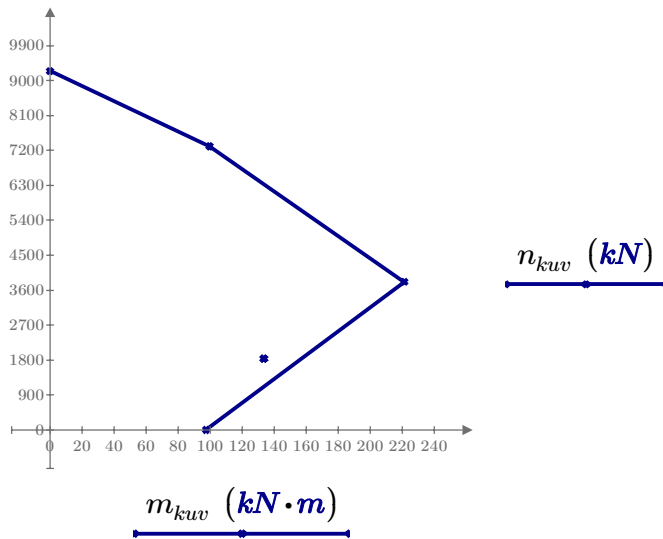
Erikoispiste C: Puhdas taivutus

$$M_{Rd.C} := \omega_t \cdot \left(1 - \frac{\omega_t}{2}\right) \cdot b_{fi} \cdot d_{fi}^2 \cdot f_{cd.fi} = 97.464 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_{Rd.C} := 0 \text{ kN}$$

$$n_{kuv} := \begin{bmatrix} N_{Ed} & N_{Rd.A} \\ N_{Ed} & N_{Rd.D} \\ N_{Ed} & N_{Rd.B} \\ N_{Ed} & N_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1834.8 & 9244.993 \\ 1834.8 & 7311.217 \\ 1834.8 & 3815.703 \\ 1834.8 & 0 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$m_{kuv} := \begin{bmatrix} M_{Ed} & M_{Rd.A} \\ M_{Ed} & M_{Rd.D} \\ M_{Ed} & M_{Rd.B} \\ M_{Ed} & M_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 133.55 & 0 \\ 133.55 & 99.661 \\ 133.55 & 221.36 \\ 133.55 & 97.464 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$



Käyttöasteen laskeminen

Lasketaan B-C ja origo-mitoituspiste suorien yhtälöt

Selvitetään suoran yhtälö, joka kulkee origon ja mitoituspisteen kautta

$$y_1 := 0 \text{ kN} \quad x_1 := 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$y_2 := N_{Ed} \quad x_2 := M_{Ed}$$

$$k := \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = 13.739 \frac{1}{\text{m}}$$

$$j := y_1 - x_1 \cdot k = 0 \text{ kN}$$

Selvitetään suoran yhtälö, joka kulkee erikoispisteiden B ja C kautta

$$y_{1.2} := N_{Rd.B} \quad x_{1.2} := M_{Rd.B}$$

$$y_{2.2} := N_{Rd.C} \quad x_{2.2} := M_{Rd.C}$$

$$k_2 := \frac{y_{1.2} - y_{2.2}}{x_{1.2} - x_{2.2}} = 30.798 \frac{1}{\text{m}}$$

$$j_2 := y_{1.2} - x_{1.2} \cdot k_2 = -3001.661 \text{ kN}$$

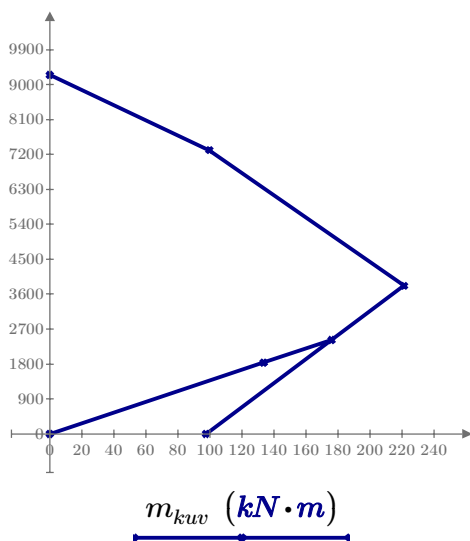
Selvitetään suorien leikkauspiste

$$x_{leik} := x_{leik} \cdot k_2 + j_2 = x_{leik} \cdot k + j \xrightarrow{\text{solve}, x_{leik}} 175.95706584322336308 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} = 175.957 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$y_{leik} := \frac{y_{leik} - j_2}{k_2} = \frac{y_{leik} - j}{k} \xrightarrow{\text{solve}, y_{leik}} 2417.4099632930410982 \cdot \text{kN} = 2417.41 \text{ kN}$$

$$n_{kuv} := \begin{bmatrix} 0 & N_{Rd.A} \\ N_{Ed} & N_{Rd.D} \\ N_{Ed} & N_{Rd.B} \\ y_{leik} & N_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 9244.993 \\ 1834.8 & 7311.217 \\ 1834.8 & 3815.703 \\ 2417.41 & 0 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$m_{kuv} := \begin{bmatrix} 0 & M_{Rd.A} \\ M_{Ed} & M_{Rd.D} \\ M_{Ed} & M_{Rd.B} \\ x_{leik} & M_{Rd.C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 133.55 & 99.661 \\ 133.55 & 221.36 \\ 175.957 & 97.464 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$



$n_{kuv}$  (kN)

Käyttöaste:

$$\frac{N_{Ed}}{y_{leik}} = 76\%$$