



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**TIMO JOKINEN**

**SEINÄÄ VASTEN OLEVAT LIITTOPILARIT TULIPALOSSA**

Diplomityö

Tarkastaja:  
professori Markku Heinisuo

Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tuotantotalouden ja rakentamisen  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
5. kesäkuuta 2013

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**JOKINEN, TIMO:** Seinää vasten olevat liittopilarit tulipalossa

Diplomityö, 66 sivua, 53 liitesivua

Elokuu 2013

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Markku Heinisuo

Avainsanat: Liittorakenteet, liittopilari, tulipalo, palomitoitus, elementtimenetelmä, eurokoodi

Maailmalla on paljon tietoa liittopilarien käyttäytymisestä tulipalossa, ja niille on olemassa hyviä mitoitushojeita. Suurimassa osassa tutkimuksia palon on kuitenkin oletettu vaikuttavan samalla tavalla jokaiseen pilarin sivuun, mutta todellisuudessa iso osa liittopilareista sijaitsee joko rakennuksen nurkassa, seinän vieressä tai osittain sen sisässä. Seinänvieruspilareissa tulipalo lämmittää suoraan vain osaa pilarin sivuista, jolloin pilari lämpenee ja laajenee eri tavalla, kuin keskellä huonetta sijaitseva pilari, millä on liittopilarin kantavuuden kannalta sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia.

Tässä tutkimuksessa on käsitelty laskennallisesti FEM-ohjelman avulla betonitäyhteisiä neliön muotoisia putkiliittopilareita, joihin vaikuttaa standardipalo suoraan vain joko yhdeltä sivulta, kahdelta (nurkka) sivulta tai kolmelta sivulta, ja saatuja tuloksia on verrattu normaaleihin neljän sivun tulipalon palonkestoaikoihin. Tämän lisäksi on tarkasteltu eri tapoja eristää pilari osittain palolta, jotka ovat adiabaattinen eristys (ideaalitalanne), betoniseinä ja pelti-villa-pelti -seinä. Tutkimuksen kohteena on raudoitetut 150x150, 250x250 ja 400x400 liittopilarit, joita on jokaista tarkasteltu kahdella eri nurjahduspituudella. Tutkimuksen lähtökohdaksi on otettu Eurokoodi 4 ja TRY:n Betonitäyhteisen teräslittopilarin suunnitteluohje, joita on täydennetty tarvittaessa muilla eurokoodeilla ja aiheeseen liittyvillä tutkimuksilla. Tutkimus suoritetaan tekemällä pilareille lämmönsiirtymisanalyysi ja kaksi erilaista kuormitusanalyysiä Abaquksella, joka on kaupallinen elementtimenetelmäohjelmisto.

Tutkimuksen tuloksena nähdään, että yhden, kahden ja kolmen sivun tulipaloissa liittopilarien palonkestoajat ovat keskimäärin noin 3,5, 2,1 ja 1,3-kertaisia normaaliin neljän sivun tapaukseen verrattuna. Työssä myös huomattiin, että pilaria vasten olevat betoniseinät toimivat tehokkaina lämpönieluina, joihin pilariin tuleva lämpö pääsee edelleen siirtymään, mikä parantaa näiden pilarien kestävyyttä entisestään. Tuloksista nähtiin myös, että liittopilarin hoikkuudella on suuri vaikutus siihen, mihin suuntaan se nurjahtaa; hoikat pilarit nurjahtavat helpommin kohti lämmitettäviä pilarin sivuja, kun taas tukevat pilarit nurjahtavat useammin pois päin näistä sivuista. Lisäksi saatujen palonkestoajojen perusteella tarkastelluille liittopilareille määritettiin karkeat ja likimääräiset mitoituskäyrät tutkituissa palotilanteissa.

Tulosten vahvistamiseen ja tarkkojen mitoitussääntöjen määrittämiseen tarvitaan vielä erityisesti kokeellisia jatkotutkimuksia.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

**JOKINEN, TIMO:** Embedded tubular composite columns in fire

Master of Science Thesis, 66 pages, 53 Appendix pages

August 2013

Major: Structural Design

Examiner: Professor Markku Heinisuo

Keywords: Composite structures, concrete filled steel tube column, CFT, CFST, fire, fire design, non-uniform fire, embedded, finite element method, FEM, Euro-code

The properties of concrete filled steel tube (CFT) columns in fire are well known. However, most of the research papers and design manuals only consider columns in the middle of the room, where heat is acting uniformly at all sides of the column during fire. In reality, many of the columns in buildings are located next to walls, are in corners or are partly embedded inside walls, and thus are exposed to fire non-uniformly. The non-uniform heating has both positive and negative effects on the column's fire resistance compared to normal uniform fire (slower heating rate, thermal bowing and shifting neutral axis)

Numerical analysis of embedded CFT columns in fire is conducted in this study. Thermal and mechanical analyses are done using a commercial finite element software Abaqus. Reinforced concrete filled square steel tubes are considered with three different section sizes (150x150, 250x250 and 400x400) and two different buckling lengths. The columns are subjected to ISO fire on one, two (adjacent) or three sides. The remaining sides of the columns are protected with adiabatic surfaces, concrete walls or sandwich panels. The columns are then compressed with constant loads to failure and the resulting fire resistance periods are compared to similar cases in uniform fire (4 sides). The temperature of the fire remains constant along longitudinal direction of the columns. The Eurocode 4 and a CFT design manual from TRY are chosen as the starting point of the study. The finite element analyses are split into separate heat transfer analyses and loading analyses.

The results show that the average fire resistance times increase with the ratios 1.3 (3 sides), 2.1 (2 sides) and 3.5 (1 side) with respect to the cases where fire is acting at all four sides. It was found that concrete wall can act as effective heat sink for embedded composite columns and improve the column's fire resistance even further. The results also show that the slenderness of the column affects its buckling direction; slender columns buckle more likely towards the fire and stocky columns away from the fire. Carrying capacity graphs were crudely calculated from fire resistance times for the studied columns.

Further research is required and tests are badly needed to validate the numerical calculations.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty opinnäytteenä Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitokselle diplomi-insinöörin tutkintoa varten. Työ on suoritettu TTY:n rakennustekniikan laitoksen metallirakentamisen tutkimuskeskuksen palveluksessa.

Suuret kiitokset Markku Heinisuolle työn mahdollistamisesta, rahoituksen hankkimisesta ja sen tarkistamisesta. Lisäksi haluan kiittää Seinäjoen Seudun Elinkeinokeskusta työn rahoituksesta, Tieteen tietotekniikka keskusta (CSC) Abaqus lisenssistä ja palvelimien laskenta-ajasta, sekä Hilikka Ronnia ja Mikko Salmista Abaquksen käyttöön opastamisesta.

Tampereella 27.8.2013

Timo Jokinen

## SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
1.1	Tutkimusongelma.....	1
1.2	Tavoitteet ja tutkimuskohteet.....	2
1.3	Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen suoritus .....	4
1.4	Rajaus.....	6
1.5	Aikaisemmat tutkimukset .....	7
2	Lämmönsiirtymisanalyysi.....	9
2.1	Materiaalien termiset ominaisuudet .....	9
2.1.1	Teräs.....	9
2.1.2	Betoni.....	10
2.1.3	Mineraalivilla.....	11
2.2	Palomalli .....	12
2.3	3D-malli ja elementit.....	14
2.3.1	Eristämättömät ja adiabaattisesti eristetyt pilarit .....	15
2.3.2	Betonia vasten olevat pilarit .....	16
2.3.3	Sandwich-paneeleita vasten olevat pilarit.....	16
2.4	Laskentamenetelmä ja asetukset .....	17
2.5	Lämmönsiirtymisanalyysien tulokset .....	18
2.5.1	Lämpötilakäyrät neljän sivun tulipalossa .....	18
2.5.2	Lämpötilajakaumat .....	20
2.5.3	Raudoituksen vaikutus lämpötiloihin .....	24
3	Kuormitusanalyysit .....	25
3.1	Materiaalien mekaaniset ominaisuudet.....	25
3.1.1	Teräs.....	26
3.1.2	Betoni.....	28
3.2	3D-malli ja elementit.....	30
3.3	Putken ja betonin välinen kontakti.....	31
3.4	Betonirauditus .....	33
3.5	Liittopilarien alkukäyryys .....	34
3.6	Pilarien tuenta.....	37
3.7	Pilarien kuormitus .....	38
3.8	Laskentamenetelmät ja asetukset .....	39
3.8.1	Vakiolämpötila-analyysi .....	39
3.8.2	Vakiokuormitusanalyysi .....	39
3.9	Pilarien kantavuudet neljän sivun tulipalossa .....	40
3.10	Vakiokuormitusanalyysin kuormat .....	43
4	Tulokset ja niiden tarkastelu .....	45
4.1	Aika–siirtymäkäyrät.....	45
4.2	Palonkestoajat .....	47
4.3	Nurjaldussuunnat.....	51

4.4 Alkukäyryyden suunta .....	54
4.5 Uudet mitoituskäyrät .....	58
5 Johtopäätökset ja yhteenveto .....	62
Lähteet .....	64
Liitteet .....	67

LIITE 1: Eristämättömien ja adiabaattisesti eristettyjen liittopilarien lämpötilat palossa

LIITE 2: Liittopilarien lämpötilat tulipalossa eri eristämistavoilla

LIITE 3: Liittopilarien aika–siirtymä käyrät tutkituissa palotilanteissa

LIITE 4: Liittopilarien suhteellisten hoikkuuksien, käyttöasteiden ja maksimikuormien laskeminen huoneenlämmössä

LIITE 5: Koejärjestelyt liittopilarien polttokokeisiin

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

4S	Palotilanne, jossa liittopilaria lämmitetään kaikilta neljältä sivulta.
1S, 2S, 3S	Palotilanne, jossa liittopilaria lämmitetään 1-3 sivulta ja muut sivut ovat adiabaattisia.
B1S, B2S ja B3S	Palotilanne, jossa liittopilaria lämmitetään 1-3 sivulta ja muut sivut ovat vasten betonia.
FEM	Finite Element Method; elementtimenetelmä.
Abaqus	Tässä työssä käytetty elementtimenetelmään perustuva ohjelmisto.
Adiabaattinen pinta	Pinta, jonka läpi ei siirry lämpöä kumpaankaan suuntaan.
Elementti	Elementit ovat alkioita, joihin rakenne jaetaan elementtimenetelmässä. Elementit voivat olla, joko sauvaelementtejä, kuorielementtejä tai kontinuumielementtejä.
Elementtimenetelmä	Elementtimenetelmä on numeerinen laskentamenetelmä, jossa rakenne jaetaan äärelliseen määrään elementtejä. Menetelmä on alun perin kehitetty lujuuslaskentaa varten, mutta nykyään sitä sovelletaan myös monilla muilla alueilla.
Eurokoodi	Eurokoodit ovat eurooppalaisia kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja.
Liittopilari	Terästä ja betonia yhdistävä liittorakenteinen pilari. Tässä työssä käsitellään vain liittopilareita, jotka koostuvat teräsputkesta ja sen sisään valetusta raudoitetusta betonista.
Liittorakenne	Kantava rakenneosa, jossa hyödynnetään kahta (tai useampaa) erilaista materiaalia, jotka ovat useimmiten teräs ja betoni. Normaalia teräsbetonia ei kuitenkaan yleensä lasketa liittorakenteeksi.
Nurjahdus	Tilanne, jossa puristettu sauva muuttuu epästabiiliksi ja menettää kantavuutensa.

R30, R60, R90, R120	Normaalisti näillä termeillä kuvataan rakenteen 30 – 120 minuutin palonkestoajoja. Tässä työssä merkitys on hie- man laajempi; näillä termeillä viitataan myös pelkkiin tuli- palon ajanhetkiin 30 – 120 min.
S1S, S2S ja B3S	Palotilanne, jossa liittopilaria lämmitetään 1-3 sivulta ja muut sivut ovat vasten sandwich-paneeleita.
SAFIR	SAFIR on ohjelma palolle altistuvien rakenteiden ana- lysointiin.
Sandwich-paneeli	Rakennuksissa käytettävä seinäelementti, jonka sisä- ja ul- kopinnassa on ohut teräslevy ja niiden välissä lämmöneris- tettä.
Solmu	Solmut ovat elementtimenetelmässä pisteitä elementtien päissä tai nurkissa, jotka kytkevät elementit toisiinsa kiinni.
TRY	Teräsrakenneyhdistys ry
Vakiokuormitus-analyysi	Tässä työssä tehty analyysi, jossa kuormitus pysyy vakiona ja lämpötilaa nostetaan. Tuloksena saadaan pilarin palon- kesto aika tietyllä kuormalla.
Vakiolämpötila-analyysi	Tässä työssä tehty analyysi, jossa lämpötila pysyy vakiona ja kuormaa nostetaan. Tuloksena saadaan pilarin kantavuus tietyllä ajanhetkellä tulipalossa.



# 1 JOHDANTO

Liittopilari on terästä ja betonia yhdistelevä liittorakenteinen sauvamainen puristettu rakenneosana. Liittopilari on osoittautunut suosituksi ja tehokkaaksi pilarityypiksi, jossa yhdistyy teräksen hyvä mekaaninen kestävyys, esteettinen pinta, mittatarkkuus ja lyhyt asennusaika, sekä betonin erittäin hyvä kestävyys tulipalossa [1]. Liittopilareita on useaa eri tyyppiä, mutta Suomessa käyttävät liittopilarit koostuvat lähes poikkeuksetta teräsputkesta, jonka sisään asetetaan raudoitteet, ja joka valetaan täyteen betonia. Kuvassa 1.1 on suomalainen pyöreä liittopilari ennen betonin valua.



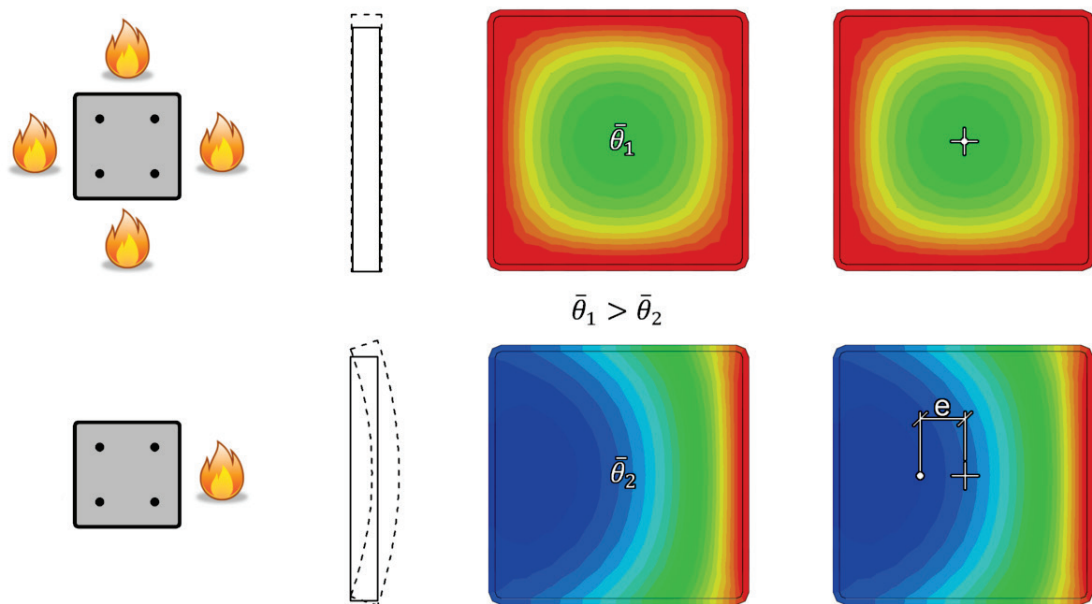
*Kuva 1.1. Suomalainen pyöreä liittopilari ennen betonin valua [2]*

## 1.1 Tutkimusongelma

Liittopilareita on tutkittu maailmalla runsaasti sekä huoneenlämmössä että tulipalossa. Näiden tutkimusten perusteella pilareille on luotu hyviä suunnitteluohjeita, kuten esimerkiksi Teräsrakenneyhdistyksen (TRY) tekemä Betonitäytteen teräслиittopilarin suunnitteluohje [1]. Tehdyt tutkimukset ja suunnitteluohjeet keskittyvät kuitenkin lähes yksinomaan pilareihin, joihin tulipalo vaikuttaa samalla tavalla sen jokaiseen sivuun, mutta todellisuudessa iso osa liittopilareista sijaitsee joko rakennuksen nurkassa tai seinän vieressä. Seinänvieruspilareissa tulipalo lämmittää suoraan vain osaa pilarin sivuista, jolloin pilari lämpenee ja laajenee eri tavalla, kuin keskellä huonetta sijaitseva pilari.

Pilarin osittainen lämmitys saa tulipaloon kohdistuvan sivun laajenemaan, jolloin pilari käyristyy, mikä puolestaan heikentää pilarin kestävyyttä. Toisaalta taas pilarin

poikkileikkauksen keskiarvoinen lämpötila pysyy kylmempänä, sillä pilaria lämmitetään pienemmältä pinta-alalta. Koska materiaalien lujuus pienenee lämmityksessä, heikkenee pilarin keskimääräinen lujuus myös vähemmän verrattuna joka puolelta palolle altistuvaan pilariin. Lisäksi liittopilarin materiaaliarvot heikkenevät pilarin poikkileikkauksen keskipisteen suhteen epäsymmetrisesti, jolloin poikkileikkauksen neutraaliakseli siirtyy lähemmäksi kylmempää reunaa. Tämä aiheuttaa kuorman resultantille epäkeskisyyttä aiheuttaen pilariin momenttia, joka edistää pilarin murtumista. Toisaalta taas syntynyt momentti taivuttaa pilaria eri suuntaan kuin lämpölaajeneminen. Nämä eroavaisuudet näkyvät kuvassa 1.2.



**Kuva 1.2.** Kantavuuden kannalta tärkeimmät eroavaisuudet kun pilari kohdistetaan tulipalolle joko kaikilta sivuilta tai vain osalta sivuista.

Koska tutkimuksia ei ole juuri tehty, ei tiedetä mikä on näiden ilmiöiden yhteisvaikutus. Jos kestävyyttä heikentävät ilmiöt dominoivat, nykyisissä liittopilareissa saattaa esiintyä turvallisuusriski, eli rakennuksissa olevat liittopilarit kantavat vähemmän mitä on suunniteltu. Jos taas suurin vaikutus on hitaammalla lämpenemisellä, nykyiset liittopilarien suunnittelumenetelmät voivat johtaa taloudellisiin riskeihin, eli seinänvieruspilarit kantavat huomattavasti enemmän mitä on suunniteltu. Aiheen tutkiminen on siis tarpeen.

## 1.2 Tavoitteet ja tutkimuskohteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on verrata laskennallisesti liittopilarien palonkestävyysaikoja tulipalossa, kun tulipalolle kohdistuu koko pilari tai vain osa pilarin sivuista, ja täten pyrkiä selvittämään johtavatko nykyiset suunnittelumenetelmät liittopilarien suureen ali- tai ylirajoitukseen. Työssä pyritään saamaan selville eri palotilanteiden palonkestoaikojen keskinäiset suhteet. Tässä tutkimuksessa keskitytään vain raudoitettuihin neliöliittopilareihin, joista valitaan tutkittavaksi kolme eri poikkileikkausta. Jokainen

poikkileikkaus tarkastellaan kahdella eri nurjahduspituudella. Tutkimuksen kohteena olevat liittopilarit on esitetty taulukossa 1.1.

**Taulukko 1.1.** Tutkimuksessa tarkastelun kohteena olevat liittopilarit.

Liittopilari	Pituus [m]	Teräsputki	Raudoitus	Betoni
I	2	CFRHS150x150x5, S355	4T12, A500HW	C40/50
II	3	CFRHS150x150x5, S355	4T12, A500HW	C40/50
III	3	CFRHS250x250x6, S355	4T20, A500HW	C40/50
IV	5	CFRHS250x250x6, S355	4T20, A500HW	C40/50
V	3	CFRHS400x400x10, S355	8T25, A500HW	C40/50
VI	6	CFRHS400x400x10, S355	8T25, A500HW	C40/50

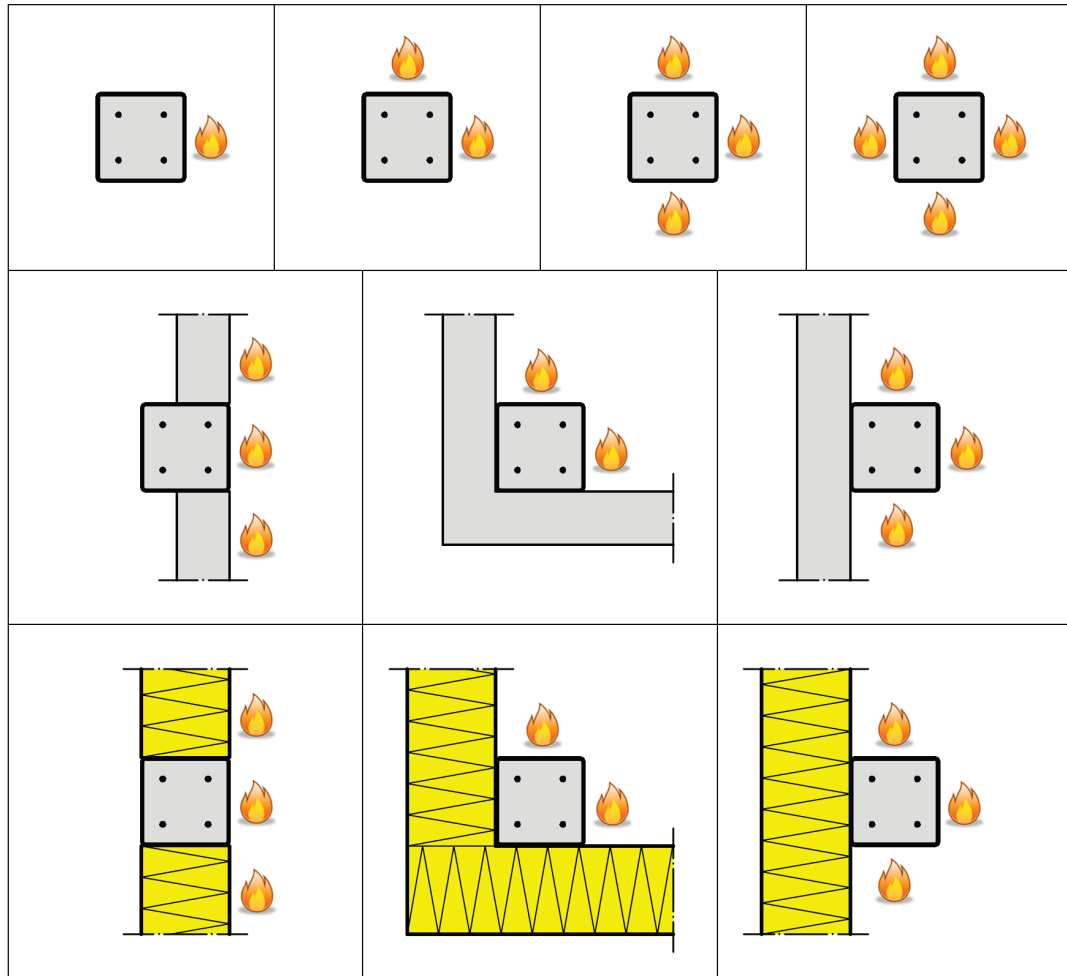
Palomallina käytetään SFS-EN 1991-1-2 standardipaloo [3], missä lämpötila oletetaan samaksi koko pilarin pystysuunnassa. Jokainen liittopilari analysoidaan neljässä eri palotilanteessa, jotka ovat:

- Tulipalo kohdistuu suoraan vain yhteen pilarin sivuun, eli pilari sijaitsee seinän sisässä.
- Tulipalo kohdistuu suoraan kahteen vierekkäiseen pilarin sivuun, eli pilari sijaitsee huoneen nurkassa.
- Tulipalo kohdistuu suoraan kolmeen pilarin sivuun, eli pilari sijaitsee seinän vieressä.
- Tulipalo kohdistuu suoraan jokaiseen pilarin neljään sivuun. Tämä on normaali-tilanne, jossa pilari on keskellä huonetta. Muiden tapausten tuloksia verrataan tähän.

Pilarien eristämistä tulipalolta tutkitaan kolmella eri tavalla. Aluksi pilarit eristetään ideaalisesti siten, että osa sivuista on adiabaattisia, eli niiden läpi ei siirry lainkaan lämpöä. Tämän jälkeen pilarit asetetaan betoniseinän viereen ja toistetaan analyysit. Lopuksi vaihdetaan betoniseinä pelti-villa-pelti sandwich-paneeleiksi ja suoritetaan analyysit kolmannen kerran. Kuvasta 1.3 näkyy kaikki käsiteltävät palotilanteet yhdelle pilarille.

Pilarien kuormitusten suuruudet pyritään valitsemaan niin, että palonkesto-aika neljän sivun palossa olisi lähellä 30, 60, 90 tai 120 minuutin ajanhetkiä. Kuormitusten suuruudet määritetään erillisellä analyysillä etsimällä pilareille maksimikantavuudet kyseisten ajanhetkien määrittämässä vakiolämpötiloissa neljän sivun tulipalossa ja vertaamalla niitä TRY:n suunnitteluohjeen käyrien kantavuusarvoihin.

Kun kaikki nämä tapaukset käydään läpi, tuloksena saadaan noin kaksisataa liittopilarin palonkesto-aikaa. Saatujen palonkesto-aikojen perusteella pyritään määrittämään myös likimääräisesti liittopilarien kantavuudet R30, R60, R90 ja R120 palonkestoajoilla jokaisessa neljässä palotilanteessa.

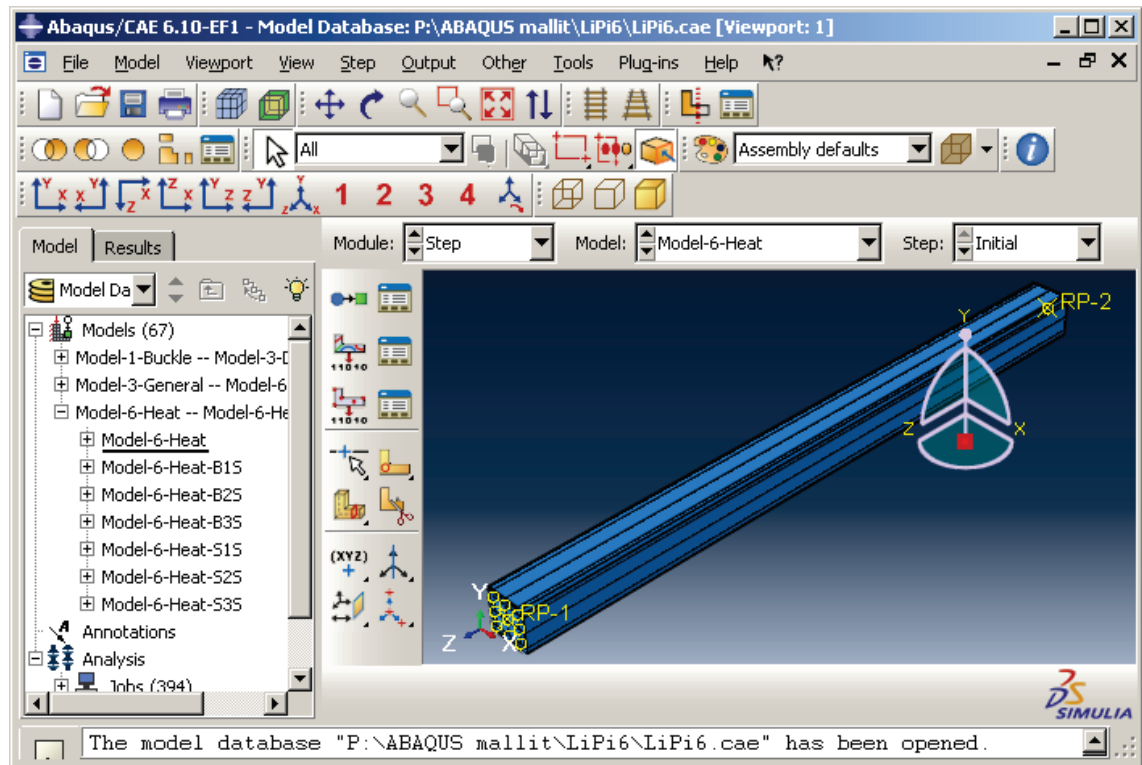


*Kuva 1.3. Analysoinnin kohteena olevat palotilanteet.*

### 1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen suoritus

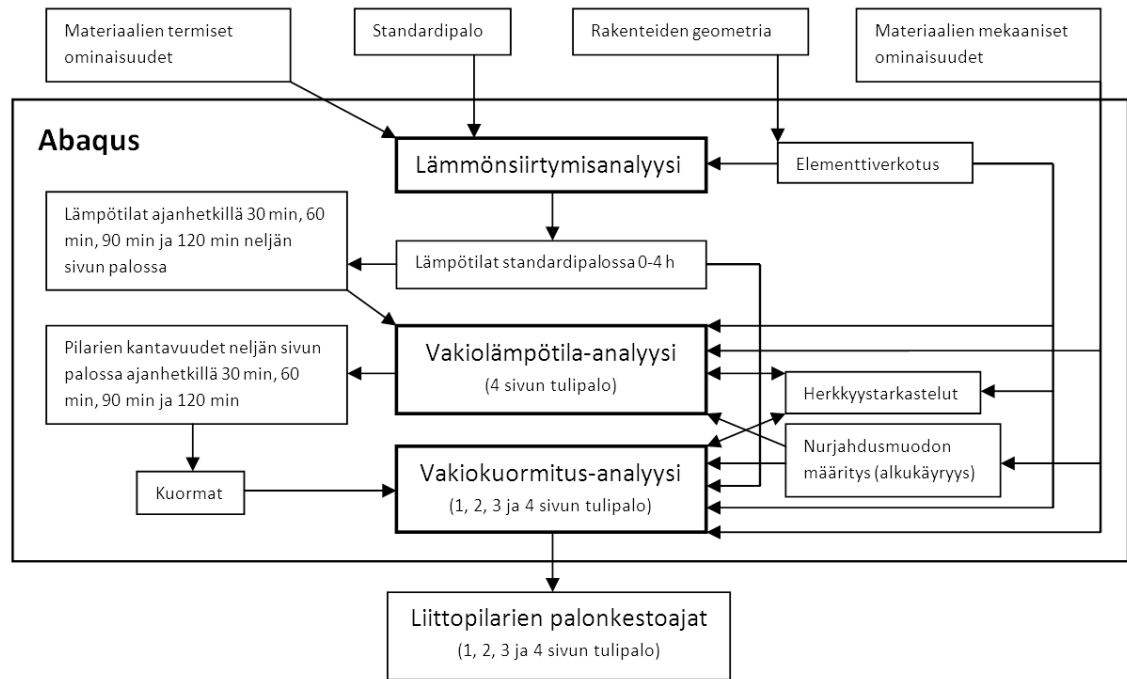
Tutkimus suoritetaan laskennallisesti hyödyntämällä elementtimenetelmään (FEM) perustuvaa tietokoneohjelmistoa. Elementtimenetelmä on numeerinen laskentamenetelmä, jossa rakenne jaetaan äärelliseen määrään sauva-, kuori- tai kontinuumielementtejä. FEM ongelmat soveltuvat erittäin hyvin tietokoneella ratkaistaviksi, ja siitä onkin tullut erittäin yleinen työkalu insinöörien ja tiedemiesten keskuudessa. Elementtimenetelmää käytettäessä ongelmaa ei usein tarvitse yksinkertaistaa liikaa ja tarkkuus voidaan yleensä valita käytettävissä olevan laskentakapasiteetin mukaan. Elementtimenetelmä on alun perin kehitetty lujuuslaskentaa varten, mutta se soveltuu myös lämmönsiirtymistarkasteleihin, sekä moniin muihin analyysityyppeihin useilla eri tieteenaloilla.

FEM-ohjelmistoksi valittiin kaupallinen ja yleiskäyttöinen Abaqus, jolla on pitkät perinteet ja jota käytetään paljon monella eri tekniikan alalla. Tässä työssä käytössä on Abaquksen versio 6.10-EF1 (kuva 1.4), jossa kaikki laskut suoritetaan Abaqus/Standard tilassa. Liittopilarit mallinnetaan ja laskentatiedostot luodaan Abaqus/CAE käyttöliittymän avulla, mutta suurin osa itse laskennasta suoritetaan Tieteen tietotekniikka keskuksen (CSC) tarjoamassa Unix-palvelinympäristössä.



**Kuva 1.4.** Kuva Abaquuksen graafisesta CAE käyttöliittymästä.

Tutkimuksen suoritus voidaan jakaa lämmönsiirtymisanalyysiin ja kahteen kuormitusanalyysiin. Lämmönsiirtymisanalyysissä lasketaan pilarin elementtiverkon jokaisen solmun lämpötila standardipalossa neljän tunnin ajalta kaikissa kuvan 1.3 tapauksissa. Kuormitusanalyysit ovat vakiolämpötila- ja vakiokuormitusanalyysit. Vakiolämpötila-analyysissä kuormitusta kasvatetaan lämpötilan pysyessä vakiona, ja tuloksena saadaan liittopilarin murtokuorma halutulla ajanhetkellä. Murtokuormat määritetään neljän sivun tulipalossa ajanhetkinä 30 min, 60 min, 90 min ja 120 min, ja näitä kantavuuksia käytetään kuormina vakiokuormitusanalyysissä. Vakiokuormitusanalyysissä lämpötilaa nostetaan kuormituksen pysyessä vakiona, ja sillä selviää pilarin palonkesto aika määrättyllä kuormituksella. Tämän analyysin avulla saadaan tutkimuksen päätulokset, eli liittopilarin palonkestoajat edellä kuvatuissa olosuhteissa. Kuvassa 1.5 on yksinkertaistettu kaavio tutkimuksen suorittamisesta. Tutkimuksen vaiheet on käyty seikkaperäisesti läpi kappaleissa 2 ja 3.



*Kuva 1.5. Kaaviokuva tutkimuksen suorittamisesta.*

## 1.4 Rajaus

Tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita vain liittopilareista, eikä teräs- ja betonipilareiden käyttäytymistä tarkastella erikseen. Tarkemmin sanottuna tutkimuksessa keskitytään vain taulukon 1.1 liittopilareihin. Esimerkiksi pyöreitä liittopilareita ei tarkastella lainkaan ja raudoittamattomia pilareitakin vain sivutaan pikaisesti. Muualla maailmalla esiintyvien muiden liittopilarityyppien tarkastelu jätetään myös kokonaan tekemättä. Liittopilarien liitoksia ei tarkastella, vaan ne oletetaan nivelpäisiksi sauvoiksi.

Liittopilareiden materiaaliominaisuuksille käytetään vain eurokoodi standardeista löytyviä arvoja. Tulipalo mallinnetaan eurokoodin standardipalon arvojen mukaan, jossa lämpötilan nousun oletetaan olevan sama koko pilarin pystysuunnassa, eikä muita mahdollisesti tarkempia palomalleja tutkita. Lisäksi kahden sivun palotilanne, jossa liittopilari on seinän sisässä ja palo kohdistuu pilarin vastakkaisiin sivuihin, jätetään tarkastelematta.

Tutkimus suoritetaan täysin laskennallisesti ilman poltto- ja kuormituskokeita. Saatujen tulosten lopullinen kokeellinen vahvistus jätetään myöhemmäksi tai jonkun muun tehtäväksi.

Näistä rajauksista johtuen tutkimuksen tuloksena ei voida saada yleispäteviä sääntöjä seinää vasten olevien liittopilarien käyttäytymisestä tulipalossa vaan ainoastaan viitteitä niistä.

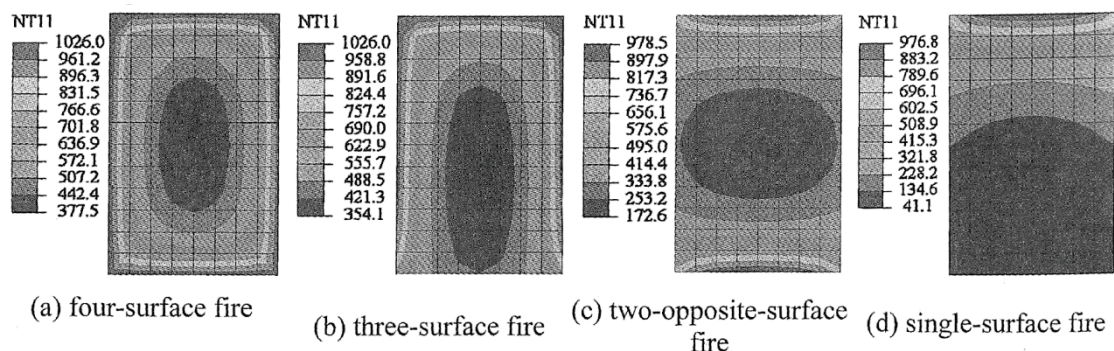
## 1.5 Aikaisemmat tutkimukset

Liittopilarien käyttäytymisestä normaalissa palossa löytyy hyvin tietoa. Tutkimuksen lähtökohdaksi otetaan Eurokoodi 4: betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu [4, 5], jota täydennetään tarvittaessa eurokoodi 2:lla (betonirakenteiden suunnittelu) ja eurokoodi 3:lla (teräsrakenteiden suunnittelu) [6, 7, 8, 9, 10].

Työssä on hyödynnetty vahvasti myös Teräsrakenneyhdistyksen (TRY) laatimaa eurokoodipohjaista Betonitäytteen teräслиittopilarin suunnitteluohjetta. TRY:n julkaisusta löytyy suunnitteluohjeiden lisäksi valmiita mitoituskäyriä liittopilareille normaaleissa neljän sivun tulipaloissa, joista saatuja kantavuuksia käytetään vertailuarvoina soveltuvien osin [1].

Lämpötila-analyysiin saadaan vertailulämpötiloja TRY:n suunnitteluohjeesta, Markus Kivimaan opinnäytetyöstä ja CIDECT:n suorittamasta tutkimuksesta. TRY:n ohjeessa ja CIDECT:n raportissa käsitellään vain joka puolelta lämpiäviä liittopilareita, mutta Kivimaan opinnäytetyössä on laskettu myös tämän tutkimuksen kanssa samanlaisia yhden, kahden ja kolmen sivun palojen lämpötiloja. [1, 11, 12]

Lähin aiheeseen liittyvä tutkimus on tehty Yangin, Liun ja Zhangin toimesta, jossa he ovat tutkineet liittopilarin palonkesto-aikaa samankaltaisissa palotilanteissa kuin tässä tutkimuksessa sekä laskennallisesti Abaquksella että kokeellisesti. Yang et al. ovat käyttäneet tutkimuksessaan ISO-834 paloa, ja heidän palotilanteet ovat muilta osin tämän työn kaltaisia, mutta heidän kahden sivun tulipalo ei kohdistu pilarin nurkan sivuihin vaan pilarin vastakkaisiin sivuihin. Heidän saamansa lämpötilakentät 120 minuutin palon jälkeen on esitetty kuvassa 1.6. Lisäksi Yangin, Liun ja Zhangin tutkimus eroaa tästä työstä siten, että he käsitelivät vain yhtä raudoittamatonta suorakaidepilaria (300x200x3000) ja vain yhdellä tavalla eristettynä palosta. [13]



**Kuva 1.6.** Yangin, Liun ja Zhangin saamat lämpötilakentät 120 minuutin palon jälkeen [13].

Yang et al. saivat tulokseksi kolmen sivun palolle 1.1-kertaisen kestävyuden, kahden sivun palolle 2,6-kertaisen kestävyuden ja yhden sivun palolle 4,8-kertaisen kestävyuden verrattuna neljän sivun paloon, mutta edellä mainituista syistä johtuen nämä tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia tähän tutkimukseen. Kyseinen tutkimus julkaistiin vasta jonkin aikaa sen jälkeen, kun tämä tutkimus oli jo aloitettu. [13]

FEM-mallin rakentamisessa on käytetty lisäksi hyväksi muita tutkimuksia, joissa liittopilareita on mallinnettu. Nämä julkaisut ovat Hongin ja Varman tutkimus [14], Espinosin, Romeron ja Hospitalerin tutkimus [15], Dingin, ja Wangin tutkimus [16], sekä Zengin ja Mäkeläisen tutkimus [17]. Kolmessa ensimmäisessä julkaisussa on käsitelty liittopilarien FEM-mallinnusta normaalissa joka puolelta pilariin vaikuttavassa tulipalossa, ja viimeisessä on tutkittu liittopilarien mallinnusta erityisesti liitosten näkökulmasta. Näihin julkaisuihin tullaan viittaamaan erityisesti luvussa 3, jossa käsitellään kuormitusanalyysien suorittamista.



## 2 LÄMMÖNSIIRTYMISANALYYSI

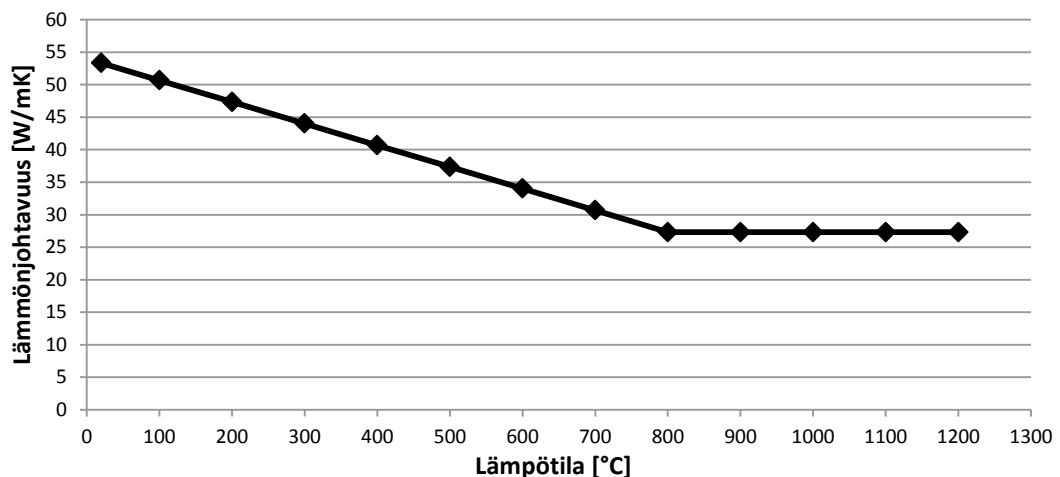
Lämmönsiirtymisanalyysissä lasketaan Abaquksella liittopilarin lämpötiloja standardipalossa. Analyysissä tarkastellaan tapaukset, joissa tulipalo kohdistuu pilarin yhdelle, kahdelle, kolmelle tai neljälle sivulle. Analyysi tehdään erikseen eristämättömille pilareille, adiabaattisesti eristetyille pilareille, betonia vasten oleville pilareille ja sandwich-paneeleita vasten oleville pilareille. Lämmönsiirtymisanalyysissä lasketaan vain lämpötiloja, joten pilarissa tapahtuvia lämpölaajenemisia ei vielä oteta huomioon. Lämpöliikkeet lasketaan kuormitusanalyysin yhteydessä. Lämpöanalyysien tuloksia on esitetty kohdassa 2.5. Abaqus-mallin asetuksiin (*Attributes*) asetettiin absoluuttiseksi nollapisteksi  $-273,15\text{ °C}$ , jotta voitaisiin hyödyntää Celsius-asteikkoa, sekä säteilylaskentaa varten Stefan-Boltzmannin vakioksi  $5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ .

### 2.1 Materiaalien termiset ominaisuudet

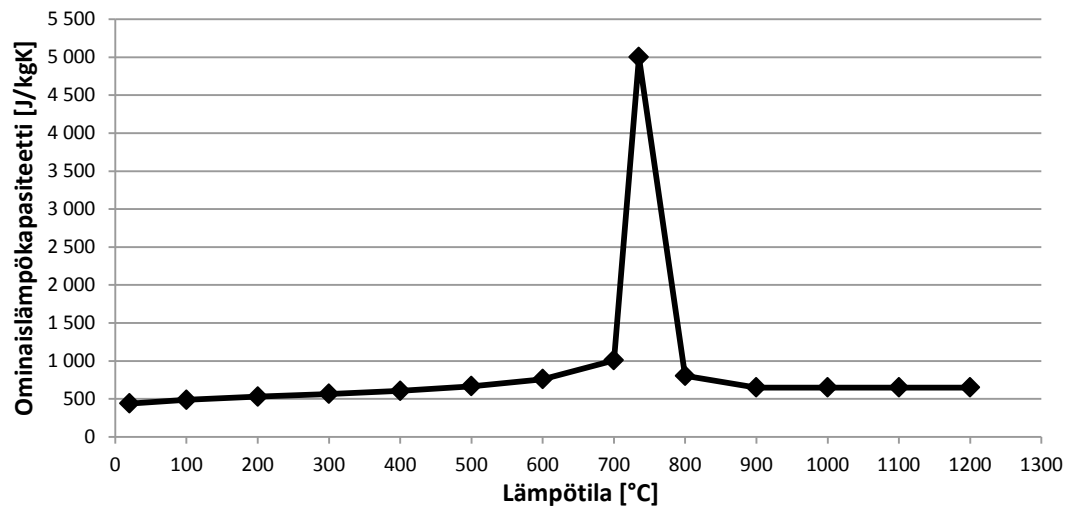
Abaquksessa ei ole mitään valmista materiaalikirjastoa, joten kaikki halutut materiaaliominaisuudet tulee syöttää ohjelmaan itse. Materiaalien termiset ominaisuudet on määritetty SFS-EN 1994-1-2 standardin [5] mukaisesti. Materiaaleille on annettu tiheys, lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti. Nämä löytyvät Abaquksen materiaali-funktioista nimillä *Density*, *Conductivity* ja *Specific Heat*.

#### 2.1.1 Teräs

Käytetyt teräksen lämmönjohtavuudet ja ominaislämpökapasiteetit on esitetty kuvissa 2.1 ja 2.2. Teräksen tiheytenä on käytetty lämpötilasta riippumatonta arvoa  $7850\text{ kg}/\text{m}^3$ .



*Kuva 2.1. Teräksen lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona*

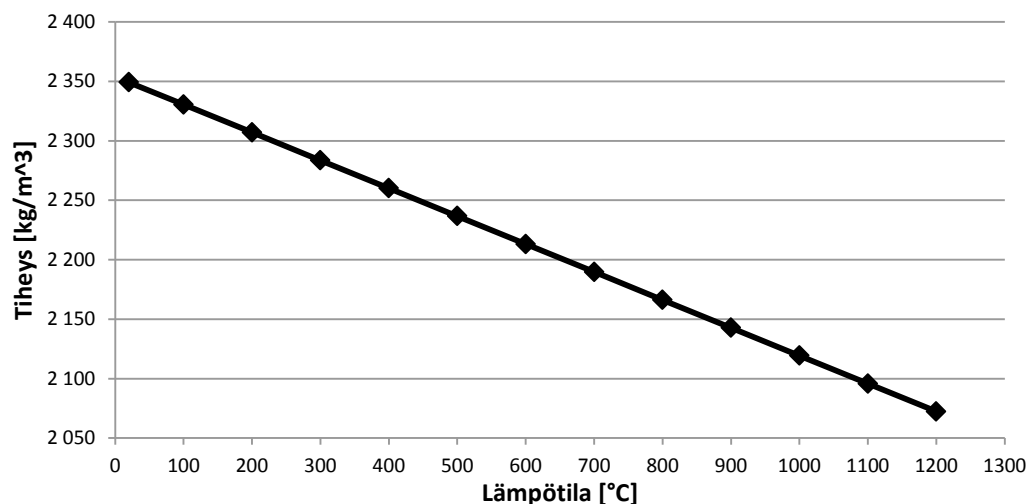


*Kuva 2.2. Teräksen ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona*

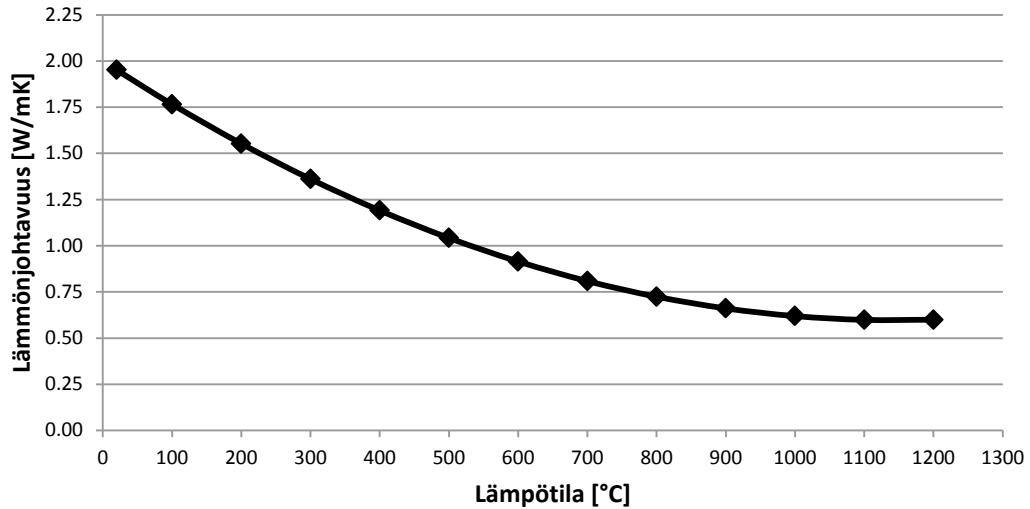
### 2.1.2 Betoni

Betonin kosteuspitoisuus on tuntematon, joten se on asetettu SFS-EN 1994-1-2 standardin [5] mukaisesti neljään painoprosenttiin. Kosteuspitoisuus vaikuttaa voimakkaasti betonin ominaislämpökapasiteetin lämpötilassa 115 °C esiintyvän piikin huippuarvoon veden haihtuessa betonista; mitä enemmän betonissa on vettä, sitä korkeammaksi piikki kasvaa. Veden höyrystymisestä mahdollisesti aiheutuvia paineita ei oteta huomioon tässä tutkimuksessa.

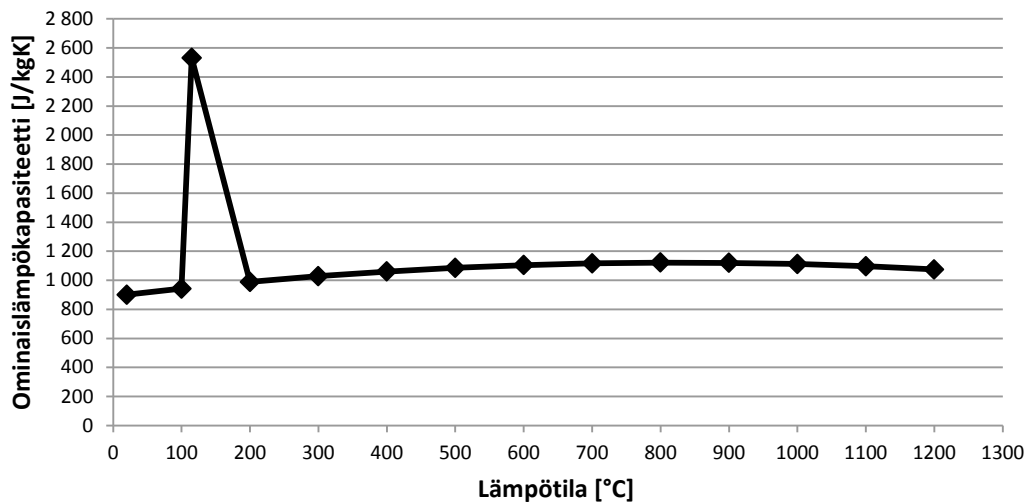
Liittorakenteiden eurokoodissa [5] betonin lämmönjohtavuudelle on annettu kaksi käyrää, mutta se suosittelee niistä suuremman käyttöä, joten tässä työssä betonin lämmönjohtavuudeksi on asetettu kyseinen ylärajakäyrä. Käytetyt betonin tiheydet, lämmönjohtavuudet ja ominaislämpökapasiteetit on esitetty kuvissa 2.3 – 2.5.



*Kuva 2.3. Betonin tiheys lämpötilan funktiona.*



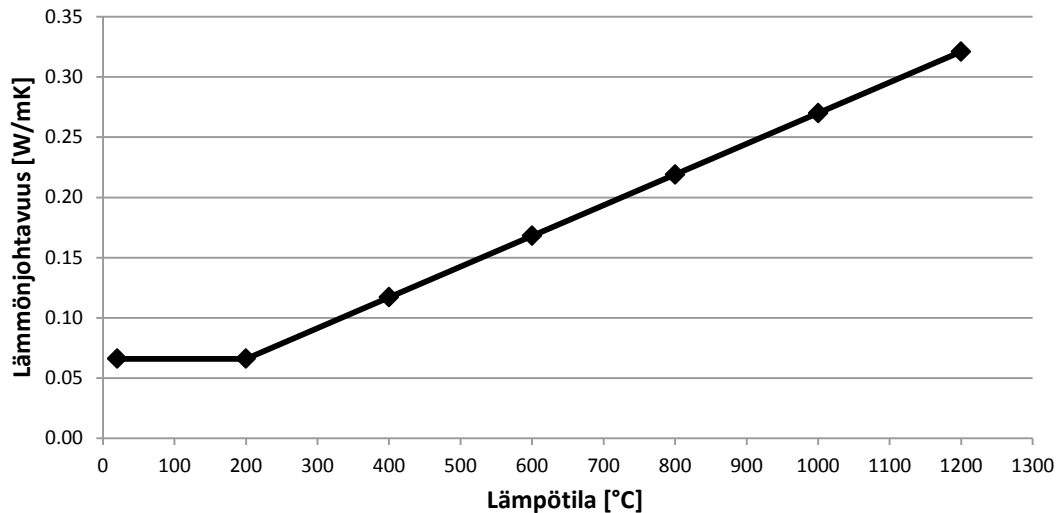
*Kuva 2.4. Betonin lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona (yläraja).*



*Kuva 2.5. Betonin ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona 4 p-% kosteuspitouksella.*

### 2.1.3 Mineraalivilla

Eurokoodista ei löydy valmiita arvoja mineraalivillan termisille ominaisuuksille, joten ne on haettu muualta. Tässä tutkimuksessa mineraalivillaa esiintyy ainoastaan sandwich-paneelien eristeinä, joten niille riittävät hieman karkeammatkin arvot. Näiksi arvoiksi on valittu samat, joita Salminen on käyttänyt lisensiaatintyössään [18]. Mineraalivillan tiheydeksi asetettiin  $128 \text{ kg/m}^3$  ja ominaislämpökapasiteetiksi  $840 \text{ J/kgK}$ , joiden kummankin oletetaan pysyvän riittävän vakiona lämpötilan noustessa. Käytetyt mineraalivillan lämpötilariippuvaiset lämmönjohtavuusarvot on esitetty kuvassa 2.6.



Kuva 2.6. Mineraalivillan lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona.

## 2.2 Palomalli

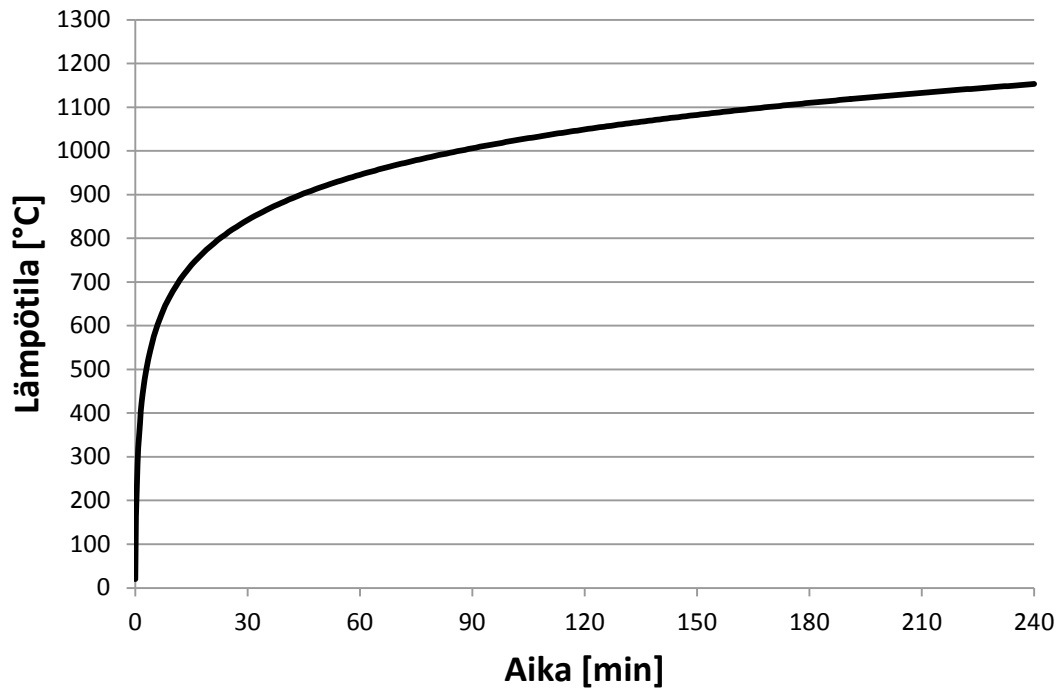
Tulipaloa on idealisoitu siten, että lämpötilan nousun oletetaan olevan sama koko putken pystysuunnassa. Ennen tulipaloa kaikkien rakenteiden alkulämpötila on 20 °C. Lämpötilan nousu on mallinnettu käyttämällä SFS-EN 1991-1-2 mukaista standardipaloa [3]. Lämmönsiirtymismuodoista on huomioitu säteily ja kuljettuminen, jotka vaikuttavat teräsputken ulkopintaan. Standardipalon lämpötila-aikakäyrä celsiusasteissa saadaan kaavasta:

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

missä  $t$  on aika minuutteina.

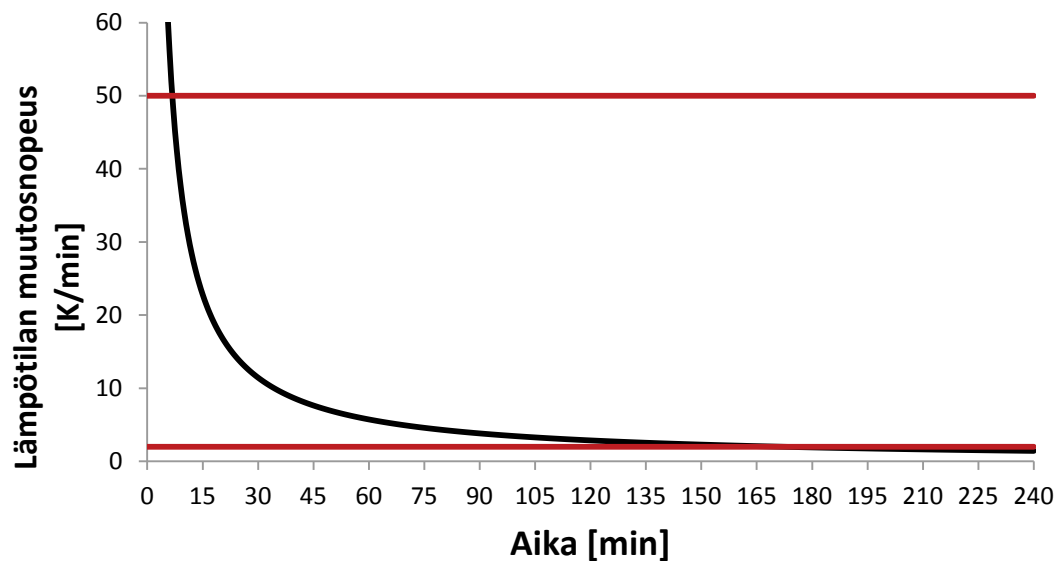
Pinnalle tuleva säteily saadaan Abaquksessa mallinnettua *Surface radiation* vuorovaikutuksella. Standardien SFS-EN 1992-1-2 ja SFS-EN 1993-1-2 mukaan sekä betonin että hiiliteräksen pintojen säteilykerroin on 0,7 [7, 9], joten tätä samaa kerrointa voidaan käyttää kaikille palolle altistuville pinnoille. Lämpötilan nousu saadaan tehtyä asettamalla ympäristön lämpötilaksi 1 °C ja määrittämällä amplitudiksi standardipalon mukainen lämpötila-aikakäyrä (*Create Amplitude -> Tabular*) käyttäen celsiusasteita ja sekunteja. Abaqus määrittää lämpötilan tietyllä ajanhetkellä kertomalla ympäristön lämpötilan ja muutoskäyrän pisteen keskenään. Abaqukseen syötettiin lämpötilat minuutin välein lukuun ottamatta aivan palon alkua, jossa välejä on tihennetty. Käytetty lämpötila-aikakäyrä on esitetty kuvassa 2.7.

Kuljettuminen voidaan mallintaa Abaquksessa *Surface film condition* vuorovaikutuksella. Standardipalon mukainen kuljettumisen lämmönsiirtokerroin on 25 W/m<sup>2</sup>K [3]. Lämpötilan nousu pilarin ympärillä on mallinnettu vastaavasti kuin edellä.



*Kuva 2.7. Standardipalon lämpötila-aikakäyrä.*

Luvussa 3.1.1 esitetyt eurokoodista katsotut hiiliteräksen mekaaniset ominaisuudet ovat eurokoodin mukaan voimassa vain lämpenemisnopeuden ollessa välillä 2-50 K/min [9]. Kuitenkin, jos standardipalon lämpötila-aikakäyrä derivoidaan, nähdään, että 50 K/min raja-arvo ylittyy tulipalon ensimmäisten seitsemän minuutin aikana. Myös 2 K/min alittuu noin kolmen tunnin jälkeen. Standardipalon lämpenemisnopeus ja materiaalimallin raja-arvot on esitetty kuvassa 2.8



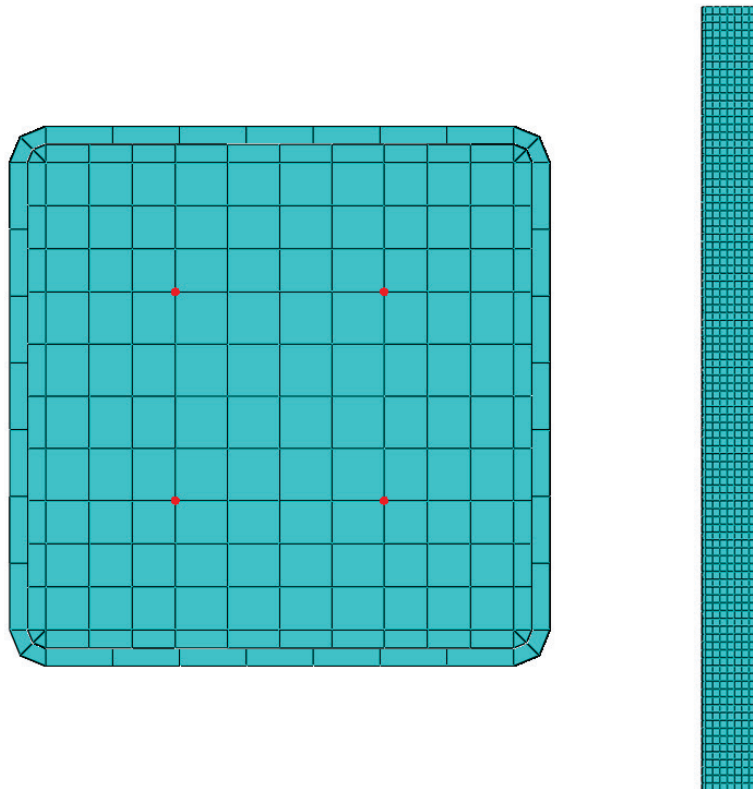
*Kuva 2.8. Standardipalon lämpötilan muutoskäyrä ja eurokoodin teräksen mekaanisille ominaisuuksille asetetut raja-arvot.*

Vaikka muutosnopeus ylittää hetken aikaa palon alussa 50 K/min, voidaan tämän vaikutus olettaa pieneksi. Sekä käytetyt materiaaliominaisuudet että standardipalo löytyvät Eurokoodin sisältä [9, 3], ja näiden yhteiskäyttö on yleistä. Esimerkiksi Salminen on tehnyt väitöskirjassaan saman huomion, ja hän jatkaa kuitenkin työssään standardipalon ja materiaalimalliensa yhteiskäyttöä [19], joten on melko turvallista käyttää edellä mainittuja arvoja myös tässä työssä. Erityisesti 2 K/min alitus voidaan katsoa vaarattomaksi, sillä valtaosan tarkasteltavista pilareista odotetaan murtuvan ennen kolmen tunnin ajanhetkeä.

### 2.3 3D-malli ja elementit

Liittopilarista tehtiin 3D-malli Abaqukseen ja sille asetettiin elementtiverkko, joka pidettiin samana kaikkien analyysien läpi. Betoni ja teräsputki mallinnettiin kontinuumi (*solid*) elementeillä ja raudoitus palkkielementeillä (*beam*). Betonin ja putken elementtityypeiksi valittiin DC3D8 kuusitahokaselementit lukuun ottamatta putken kulmapyöristyksien kohdalla olevaa betonia, joiden kohdalle valittiin DC3D6 kiilaelementit. Raudoitukseen valittiin lineaariset DC1D2 elementit.

Betoniosassa käytetyt elementit ovat keskimäärin mitoiltaan 150x150 pilareissa  $13 \times 13 \times 25 \text{ mm}^3$ , 250x250 pilareissa  $23 \times 23 \times 40 \text{ mm}^3$  ja 400x400 pilareissa  $44 \times 44 \times 52 \text{ mm}^3$ . Putkissa vastaavat mitat ovat noin  $5 \times 19 \times 20$ ,  $6 \times 20 \times 40$  ja  $10 \times 39 \times 40 \text{ mm}^3$ . Kuvassa 2.9 näkyy esimerkki käytetystä elementtiverkotuksesta.



**Kuva 2.9.** 150x150 2m liittopilarin elementtiverkotus kuvattuna päältä ja sivulta. Raudoitteiden sijainnit ovat merkitty punaisilla pisteillä poikkileikkaukseen.

Mallia olisi saanut kevyemmäksi hyödyntämällä kuorielementtejä putkien seinämissä. Tästä kuitenkin aiheutui erinäköisiä ongelmia kuormitusvaiheessa, joita ei saatu ratkaistua muuten kuin kuorielementeistä luopumalla. Koko malli mallinnettiin raudoitusta lukuun ottamatta kontinuumina.

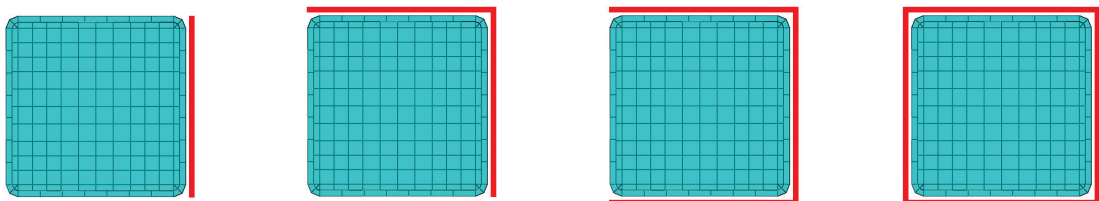
Raudoitukset mallinnettiin Abaquksen *stringer*-raudoitusmenetelmällä, jolla saadaan asetettua betonin sisään raudoituksen sauvaelementit. Nämä sauvaelementit kulkevat betonin kontinuumielementtien solmujen kohdilta ja ovat sidottuina niihin jokaisesta solmusta. Jotta raudoitukset olisi saatu käyttäytymään lämmönsiirtymisanalyysissä täysin oikein, olisi ne pitänyt mallintaa kontinuumina ja tehdä betonin verkotukseen terästen muotoiset reiät. Tästä olisi kuitenkin seurannut paljon ongelmia kuormitusanalyysissä, joten lämmönsiirtymisanalyysit suoritettiin ilman raudoitusta. Raudoitusta ei voinut kuitenkaan poistaa kokonaan lämmönsiirtymisanalyysin ajaksi, koska tällöin verkotusta olisi pitänyt muuttaa analyysien välissä. Tämä ratkaistiin muuttamalla raudoitusten poikkileikkaukset väliaikaisesti erittäin pieniksi ja asettamalla niiden materiaalit myös betoniksi, jolloin niiden vaikutukset saatiin minimoitua. Kuormitusanalyysissä raudoituksen lämpötila siis määräytyy raudoituksen kohdalla olevan betonin lämpötilan mukaan. Raudoitusten puuttumisen vaikutuksia lämpötiloihin on tutkittu laskemalla yksi tapaus, jossa liittopilariin on mallinnettu raudoitukset kontinuumina ja vertailemalla sitä muiden pilarien lämpötiloihin. Tämä vertailu on tehty kappaleessa 2.5.3.

Lämmönsiirtymisanalyysissä kaikki koskettavat pinnat kiinnitettiin toisiinsa Abaquksen *tie* liitoksilla, jotta lämpö siirtyisi osasta toiseen johtumalla. Teräsputkien kulumyöristykset katsottiin kylmämuovattujen putkien standardista [20, s. 32]

### 2.3.1 Eristämättömät ja adiabaattisesti eristetyt pilarit

Eristämättömät ja adiabaattisesti eristetyt pilarit ovat 3D-malliltaan samanlaisia ja ne mallinnettiin ilman ympäröiviä rakenteita. Kuvasta 2.10 näkyy esimerkkinä 150x150 liittopilarien poikkileikkaukset ja palolle altistuvat pinnat eri tapauksissa.

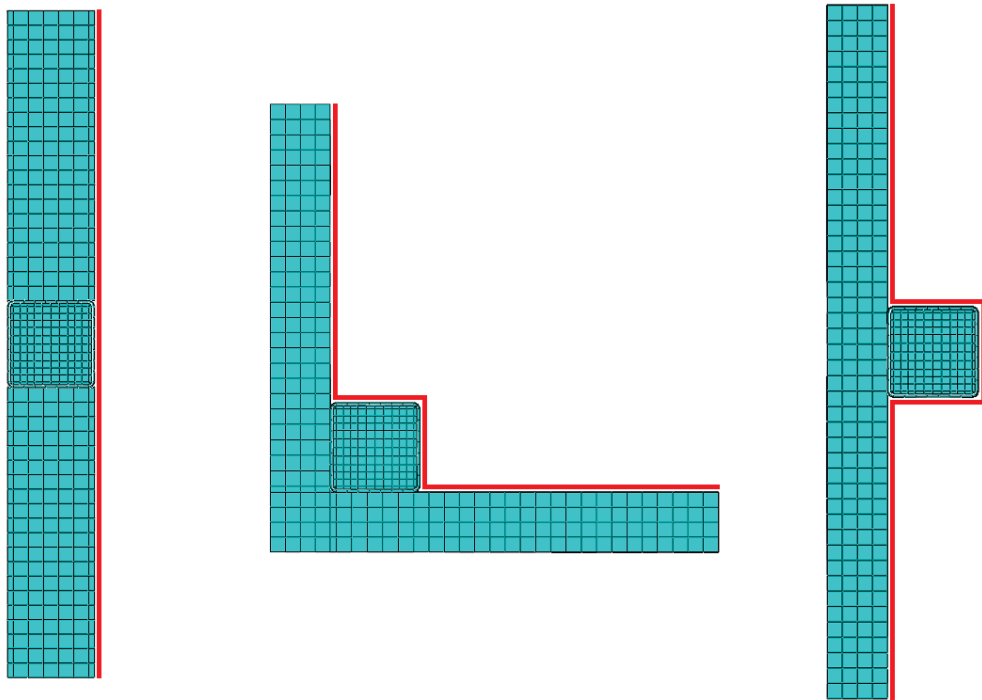
Eristämättömissä pilareissa tulipalo kohdistuu suoraan pilarin jokaiselle kyljelle. Adiabaattinen eristys on ideaalitilanne, jossa tulipalolle altistumattomat pinnat ovat adiabaattisia, eli niiden läpi ei siirry lainkaan lämpöä kumpaankaan suuntaan. Abaqus määrittää pinnat, joihin ei kohdistu mitään vuorovaikutusta, automaattisesti adiabaattisiksi.



**Kuva 2.10.** Adiabaattisesti eristetyt ja eristämättömät 150x150 liittopilarit eri palotilanteissa. Standardipalolle altistuvat pinnat on merkitty punaisella; muut pinnat ovat adiabaattisia.

### 2.3.2 Betonia vasten olevat pilarit

Analyysissä tutkittiin myös tapaukset, joissa osa pilarin kyljistä nojaa betoniseiniin suo-  
jaten niitä tulipalolta kuvan 2.11 mukaisesti. Betoniseinien paksuudeksi asetettiin 100  
mm, paitsi yhden sivun palossa, jossa seinä on yhtä paksu kuin tutkittava pilari. Betoni-  
seinät mallinnettiin täysin ilman raudoituksia. Jotta lämpö johtuisi pilarin ja seinien vä-  
lillä, yhdistettiin ne lämmönsiirtymisanalyysin ajaksi *tie* liitoksilla.

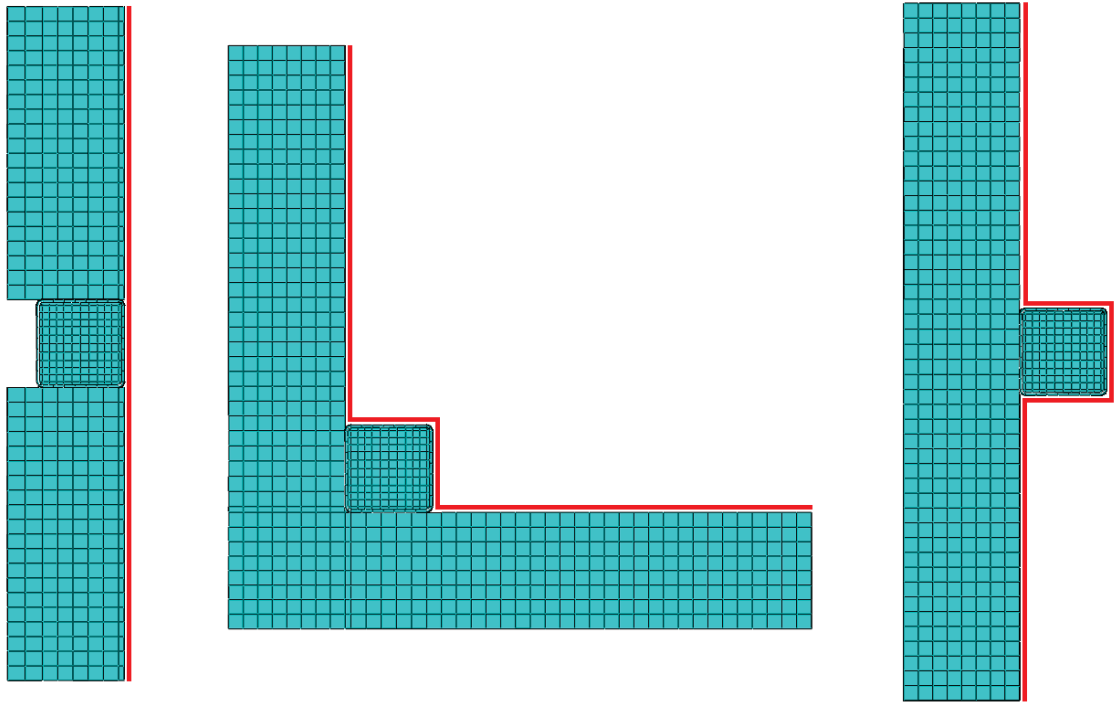


**Kuva 2.11.** Betonia vasten olevat 150x150 liittopilarit eri palotilanteissa. Standardipal-  
lolle altistuvat pinnat on merkitty punaisella; muut pinnat ovat adiabaattisia.

### 2.3.3 Sandwich-paneeleita vasten olevat pilarit

Edellä mainittujen tapausten lisäksi tutkittiin tilanteet, joissa osa liittopilarien kyljistä  
nojaa pelti-villa-pelti sandwich-paneeliin. Sandwich-paneeliksi valittiin paneelit,  
joissa on ulkopinnoissa 0,6 mm paksut pellit ja niiden välissä 200 mm mineraalivillaa.  
Paneelit mallinnettiin yksinkertaistetusti ilman kiinnikkeitä ja paneelien välisiä liitoksia  
kuvan 2.12 mukaisesti.

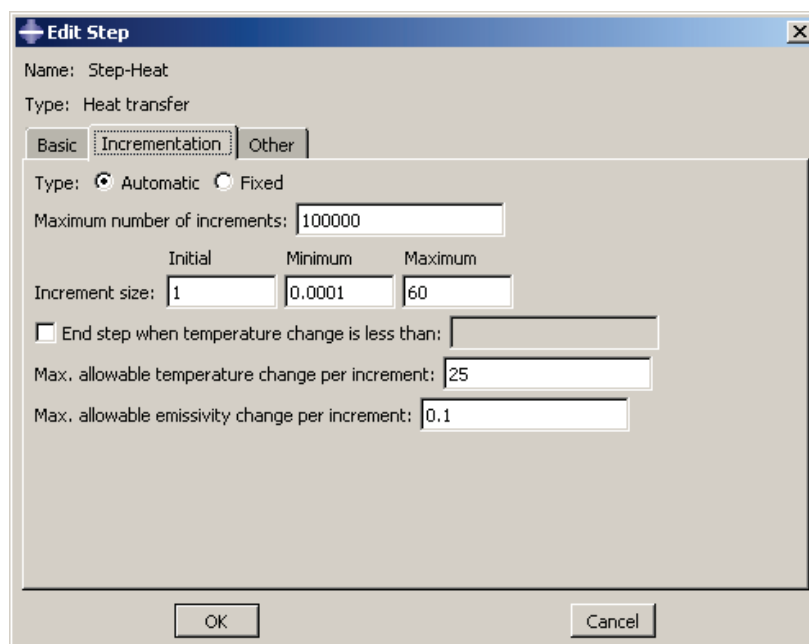




**Kuva 2.12.** Sandwich-paneeleita vasten olevat 150x150 liittopilarit eri palotilanteissa. Standardipalolle altistuvat pinnat on merkitty punaisella; muut pinnat ovat adiabaattisia.

## 2.4 Laskentamenetelmä ja asetukset

Lämmönsiirtymisanalyysi hoituu Abaquksessa *Heat transfer stepin* avulla. Laskennan kestoksi valittiin 14400 sekuntia (240 minuuttia). Käytetyt laskenta-asetukset on esitetty kuvassa 2.13



**Kuva 2.13.** Heat transfer stepin laskenta-asetukset Abaquksessa.

Aikainkrementit ovat askelia joiden mukaan analyysi etenee ja niiden suuruus kuvaa peräkkäisten laskentapisteiden aikaväliä. Inkrementtien maksimimääräksi on valittu niin suuri luku (10000), ettei raja tule vastaan keskeyttäen analyysiä ennenaikaisesti. Suurimmaksi mahdolliseksi yhden inkrementin suuruudeksi asetettiin aluksi 100 s, mutta se pienennettiin 60 sekuntiin tutkimuksen edetessä. Mitä pienempi väli, sitä tarkemmat tulokset, ja sitä todennäköisemmin saadaan arvo läheltä tarkasteltavaa ajanhetkeä (30 min, 60 min, 90 min ja 120 min), mutta toisaalta tiheät välit hidastavat analyysiä ja kasvattavat tulostiedoston kokoa.

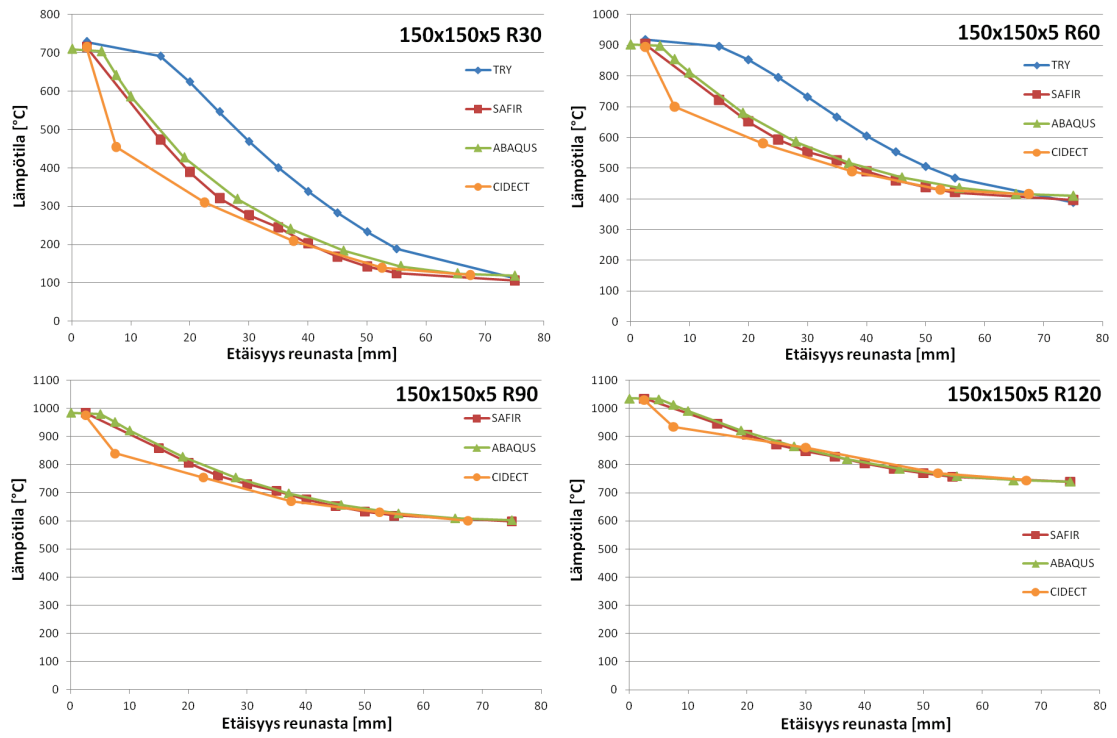
## 2.5 Lämmönsiirtymisanalyysien tulokset

Lämmönsiirtymisanalyysien tuloksena on saatu huomattava määrä lämpödataa; tallessa on lämpötilat jokaiselle pilarin poikkileikkauksen solmulle jokaisessa palotilanteessa neljän tunnin ajalta noin 60 sekunnin välein. Tästä johtuen lämpödatan täydellinen dokumentointi on mahdotonta. Lämpötiloista tyydytään piirtämään käyriä ja jakaumia vain 30, 60, 90 ja 120 minuutin ajanhetkiltä.

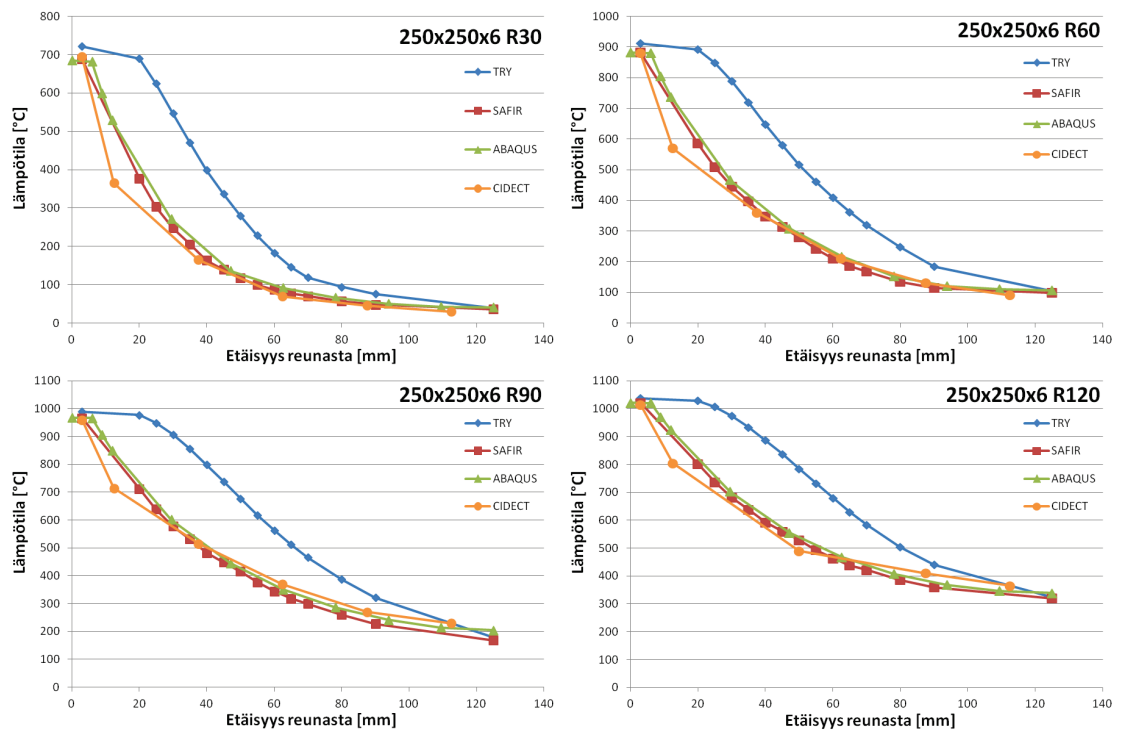
Neljän sivun tulipalotapauksesta löytyy liittopilareille vertailulämpötiloja TRY:n suunnitteluohjeesta kaikille tutkituille pilareille [1], Markus Kivimaan opinnäytetyöstä 150 mm ja 250 mm pilareille [11], sekä CIDECT tutkimusraportista 150 mm ja 250 mm pilareille [12]. Lisäksi adiabaattisesti eristetyille pilareille löytyy Kivimaan laskemia vertailuarvoja [11]. Käytetään näitä arvoja Abaquksella tehtyjen analyysien oikeellisuuden tarkistamiseen.

### 2.5.1 Lämpötilakäyrät neljän sivun tulipalossa

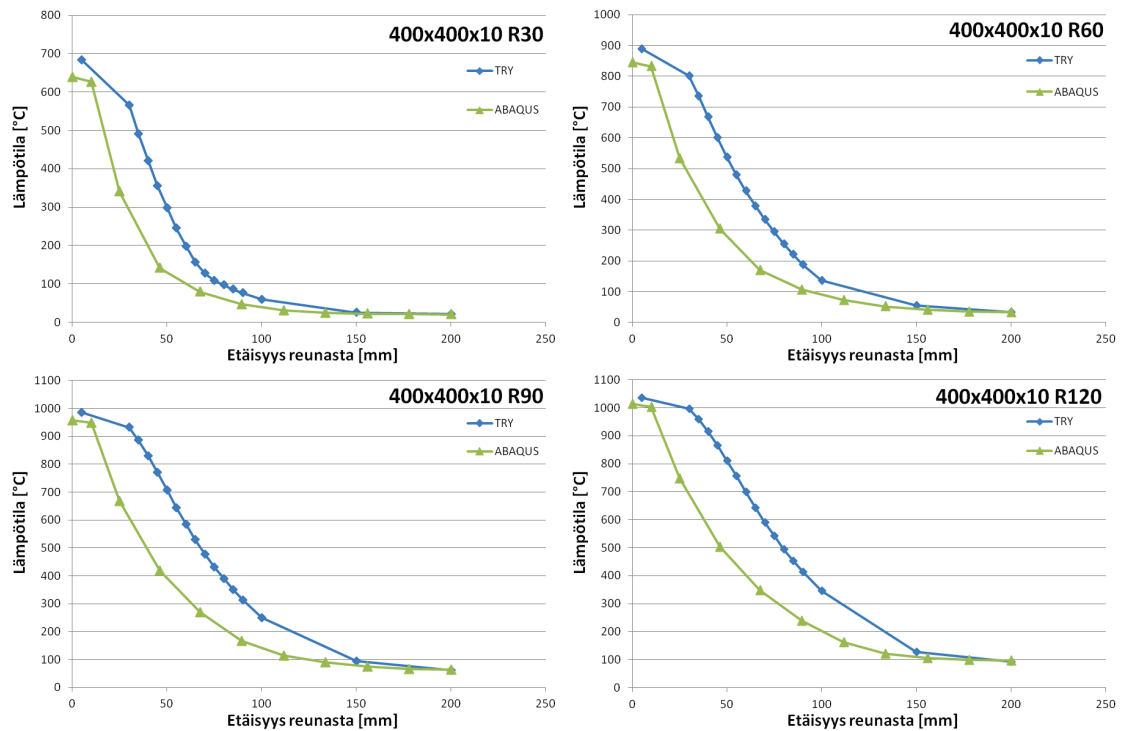
Vertaillaan tässä tutkimuksessa laskettuja liittopilarien lämpötila-arvoja (ABAQUS) TRY:n, Kivimaan (SAFIR) ja CIDECT:n arvoihin [1, 11, 12] kuvien 2.14–2.16 käyrien avulla. Lämpötilakäyrät on piirretty pilarin suoralta reunalta pilarin keskelle. 400 mm pilareille ei ollut saatavilla kuin TRY:n määrittämät lämpötila-arvot Abaquksella laskettujen lisäksi. Kivimaan ja CIDECT:n lämpötilakäyrät on määritetty laskennallisesti ja niissä on käytetty samoja materiaalien termisiä ominaisuuksia kuin tässä tutkimuksessa, mutta TRY:n lämpötilojen määrittämisestä ei ole saatavilla tarkkaa tietoa.



Kuva 2.14. 150x150 liittopilarien lämpötiläkäyrät neljän sivun tulipalossa.



Kuva 2.15. 250x250 liittopilarien lämpötiläkäyrät neljän sivun tulipalossa.



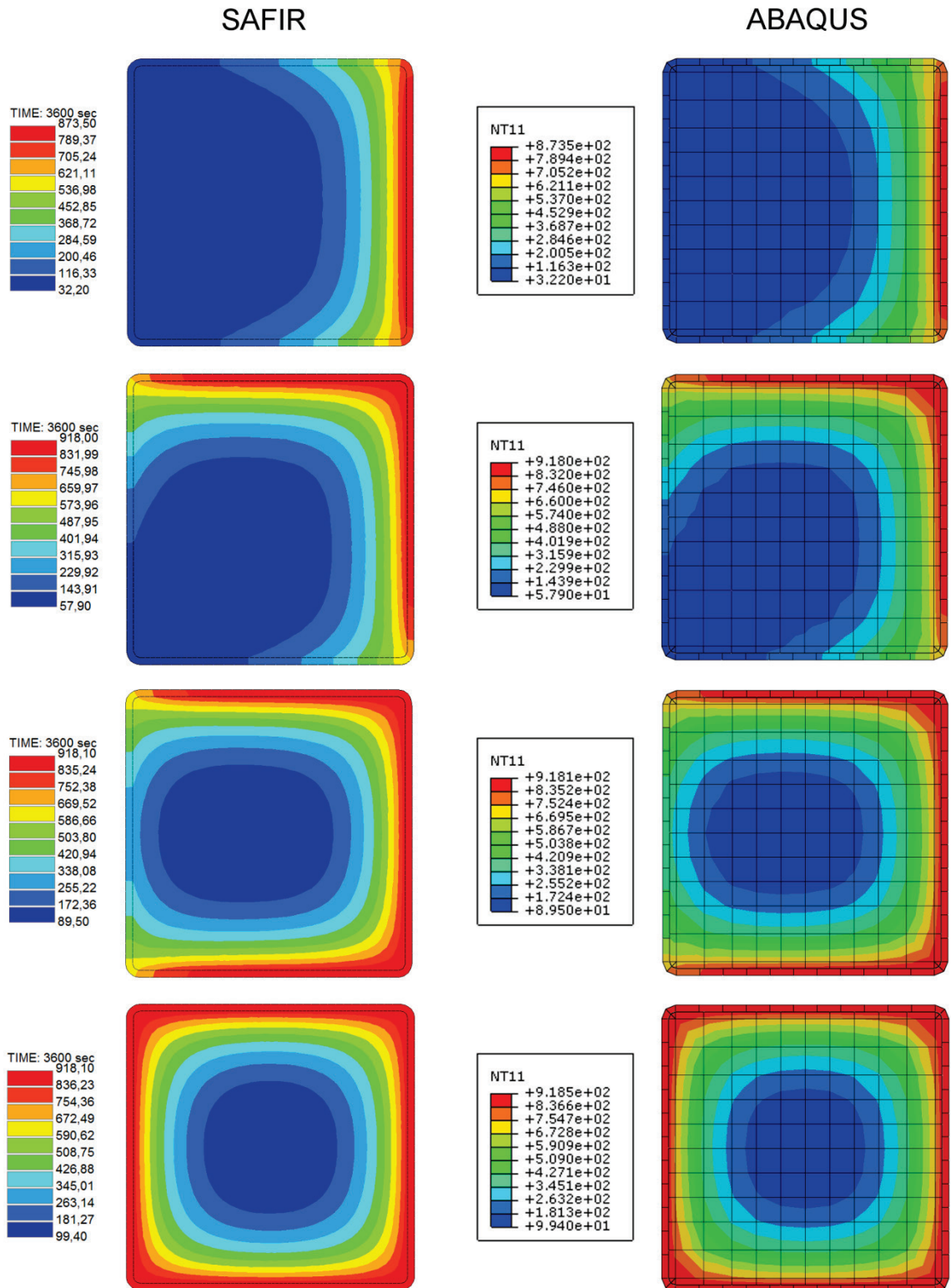
**Kuva 2.16.** 400x400 liittopilarien lämpötilakäyrät neljän sivun tulipalossa.

Edellä olevista käyristä nähdään, että kaikilla neljällä menetelmällä saadaan kuta-kuinkin samat lämpötilat pilarien reuna- ja keskipisteisiin, mutta näiden välillä osa käyristä erkanee. Abaquksella ja Safirilla lasketut käyrät vastaavat eniten toisiaan, ja ne kulkevat hyvin lähellä toinen toistaan jokaisessa lasketussa tapauksessa. Myös CIDECT:n lämpötilat ovat hyvin lähellä näitä kahta käyrää, paitsi pilarien toisissa laskentapisteissä ulkoapäin luettuna, joissa lämpötilat alittuvat jonkin verran. Osasyynä näille alituksille saattaa olla CIDECT:n laskentapisteiden vähyys. TRY:n lämpötilat sen sijaan ovat keskialueella huomattavasti korkeampia verrattuna muihin käyriin. Koska TRY:n lämpötilojen tarkkaa määrittämistä ei tiedetä, ei tälle poikkeamalle osata antaa selviä perusteluita. TRY:n lämpötila-arvot on annettu mitoituslaskelmia varten, joten on mahdollista, että niihin on lisätty ylimääräistä varmuutta. Näiden käyrien pohjalta voidaan kuitenkin sanoa, että luodussa lämmönsiirtymisanalyysissä ei todennäköisesti ole suuria virheitä ainakaan neljän sivun palotilanteessa.

## 2.5.2 Lämpötilajakaumat

Kivimaa on opinnäytetyössään laskenut SAFIR:lla 150x150 ja 250x250 liittopilareille lämpötiloja myös yhden, kahden ja kolmen sivun tulipaloissa [11]. Verrataan näitä lämpötiloja vastaaviin Abaquksella saatuihin arvoihin piirtämällä molemmista lämpötilajakaumat. Kuvassa 2.17 on verrattu 250x250 liittopilarin lämpötiloja 60 minuutin palon jälkeen. Liitteestä 1 löytyy vastaavat kuvat 150x150 ja 250x250 pilareille ajanhetkiltä 30 min, 60 min, 90 min ja 120 min. Nämä kuvat on yritetty piirtää mahdollisimman samoille asteikoille, mutta SAFIR ja Abaqus hyödyntävät värejä omissa asteikoissaan

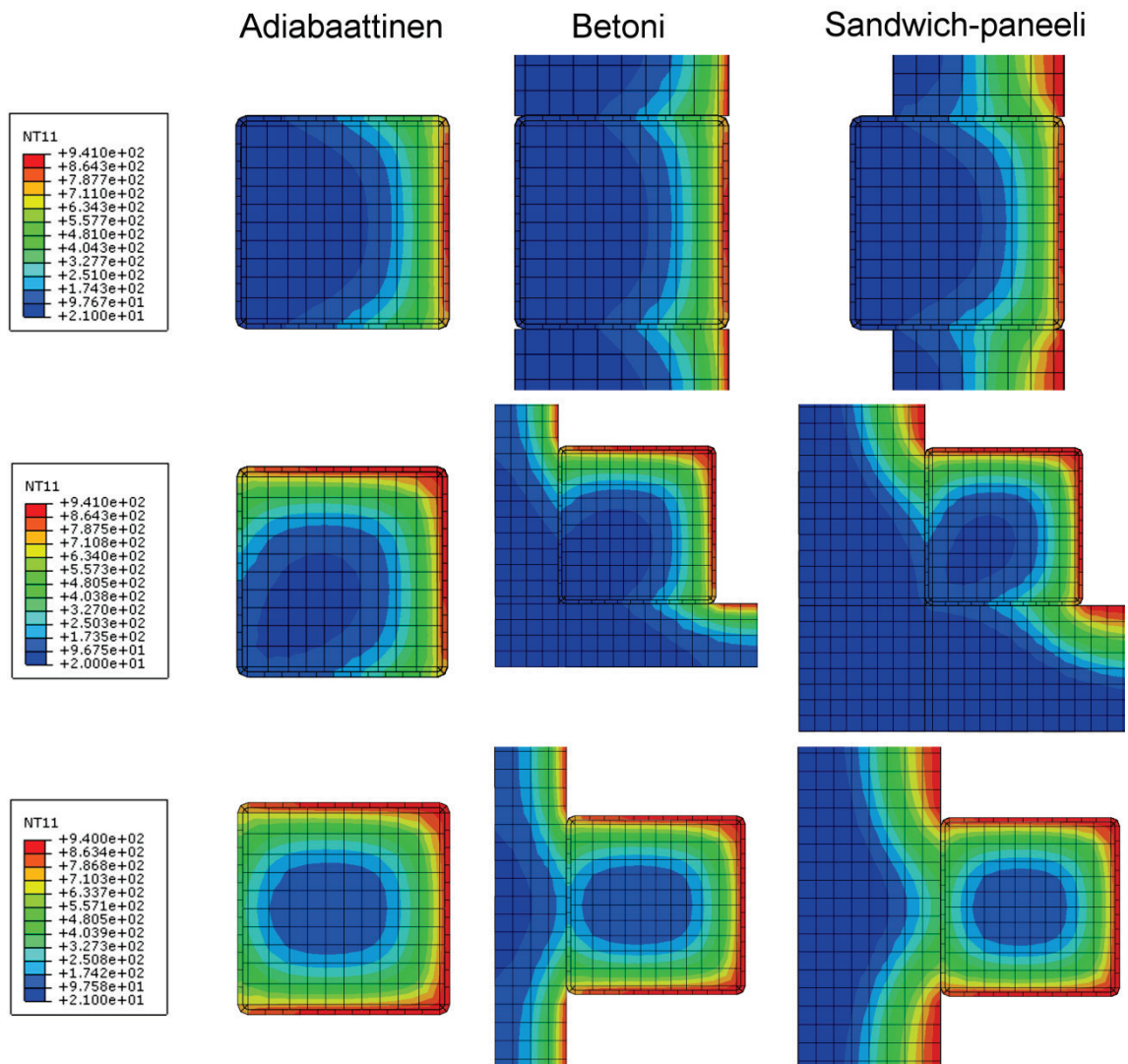
hieman eri tavalla. Liittopilarien sivut, jotka eivät altistu palolle, ovat tässä vertailussa adiabaattisia Abaquksella laskettaessa.



**Kuva 2.17.** Saadut 250x250 liittopilarin poikkileikkauksen lämpötilat 60 minuutin palon jälkeen (oikealla) verrattuna vastaaviin Kivimaan laskemiin lämpötiloihin [11] (vasemmalla) kaikissa neljässä eri palotilanteessa.

Kuvasta 2.17 ja liitteestä 1 voidaan nähdä, että Abaquksella ja SAFIR:lla saadaan tässäkin tilanteessa hyvin samanlaisia lämpötiloja. Kyseisistä kuvista huomataan kuitenkin myös, että Abaquksella lasketut pilarit lämpenevät hieman Kivimaan vastaavia pilareita nopeammin. Tämä näkyy selvimmin kahden ja kolmen sivun tulipalossa 120 minuutin ajanhetkellä. Ero voi johtua siitä, että SAFIR:lla laskettaessa palolle altistumattomat pinnat eivät välttämättä ole adiabaattisia, jolloin lämpö saattaa päästä osittain siirtymään niiden läpi pilarista ulos. Lämpötila-arvot ovat kuitenkin riittävän lähellä toisiaan, jotta näitäkin Abaquksella saatuja tuloksia voidaan pitää luotettavina.

Tässä tutkimuksessa pilarien pinnat voidaan eristää tulipalolta joka täysin tai sitten peittämällä ne betonilla tai sandwich-paneeleilla. Tarkastellaan näiden eri tapojen vaikutuksia lämpötiloihin lämpötilajakaumien avulla. 250x250 liittopilarin lämpötilat 60 minuutin palon jälkeen näkyy kuvassa 2.18, ja kaikki muut tapaukset ovat 30 minuutin intervallein liitteessä 2.



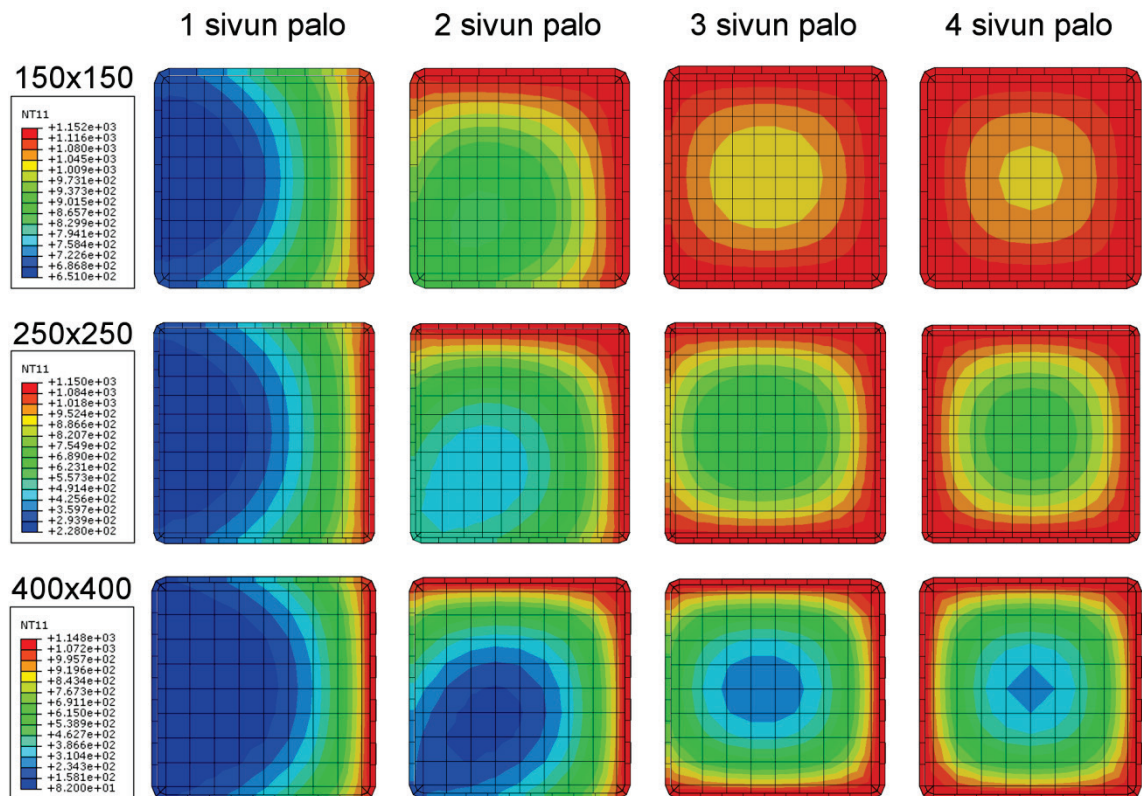
**Kuva 2.18.** 250x250 liittopilarin poikkileikkauksen lämpötilat 60 minuutin jälkeen eri eristämistavoilla yhden, kahden ja kolmen sivun tulipaloissa.

Kuvasta 2.18 ja liitteestä 2 voidaan nähdä, että betonia vasten olevat pilarit lämpenevät huomattavasti muita hitaammin. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että pilarin viereiset raskaat rakenteet eivät johda pilariin ylimääräistä lämpöä, kuten aluksi ajateltiin, vaan lämpövirran suunta on päinvastainen. Ison omanaislämpökapasiteettinsa ja melko suuren lämmönjohtavuutensa ansiosta betoni toimii hyvänä lämpönieluna, johon liittopilarin lämpö pääsee karkaamaan.

Sandwich-paneelit sen sijaan eivät toimi lämpönieluna, vaan päästävät lämpöä läpi hieman adiabaattista eristystä enemmän. Sandwich-paneelilla ja adiabaattisella eristyksellä saadaan kuitenkin erittäin lähellä toisiaan olevia lämpötilajakaumia. 400x400 kokoisille liittopilareille ei jostain syystä saatu laskettua lämpötiloja yhden sivun tulipalossa, kun eristeenä käytettiin sandwich-paneeleita, joten näille pilareille ei saada myöskään palonkestoajoja kyseisessä tilanteessa.

Pilarien palonkestoajojen uskotaan noudattavan tätä samaa järjestystä siten, että betonia vasten olevat pilarit kestävät kuormitusta pisimpään, adiabaattisesti eristetyt pilarit toiseksi eniten ja Sandwich-paneeleita vasten olevien pilarien vähiten. Adiabaattisesti eristettyjen ja Sandwich-paneeleita vasten olevien pilarien palonkestoajat ovat todennäköisesti myös melko lähellä toisiaan.

Osan pilareista uskotaan kestävän kuormitusta selvästi yli 120 minuuttia, joten kaikki lämpötila-analyysit on tehty 240 minuutin ajalta. Kuvasta 2.19 näkyy kuinka korkeaksi kaikkien adiabaattisesti eristettyjen ja eristämättömien liittopilarien lämpötilat tässä ajassa lopulta nousevat.

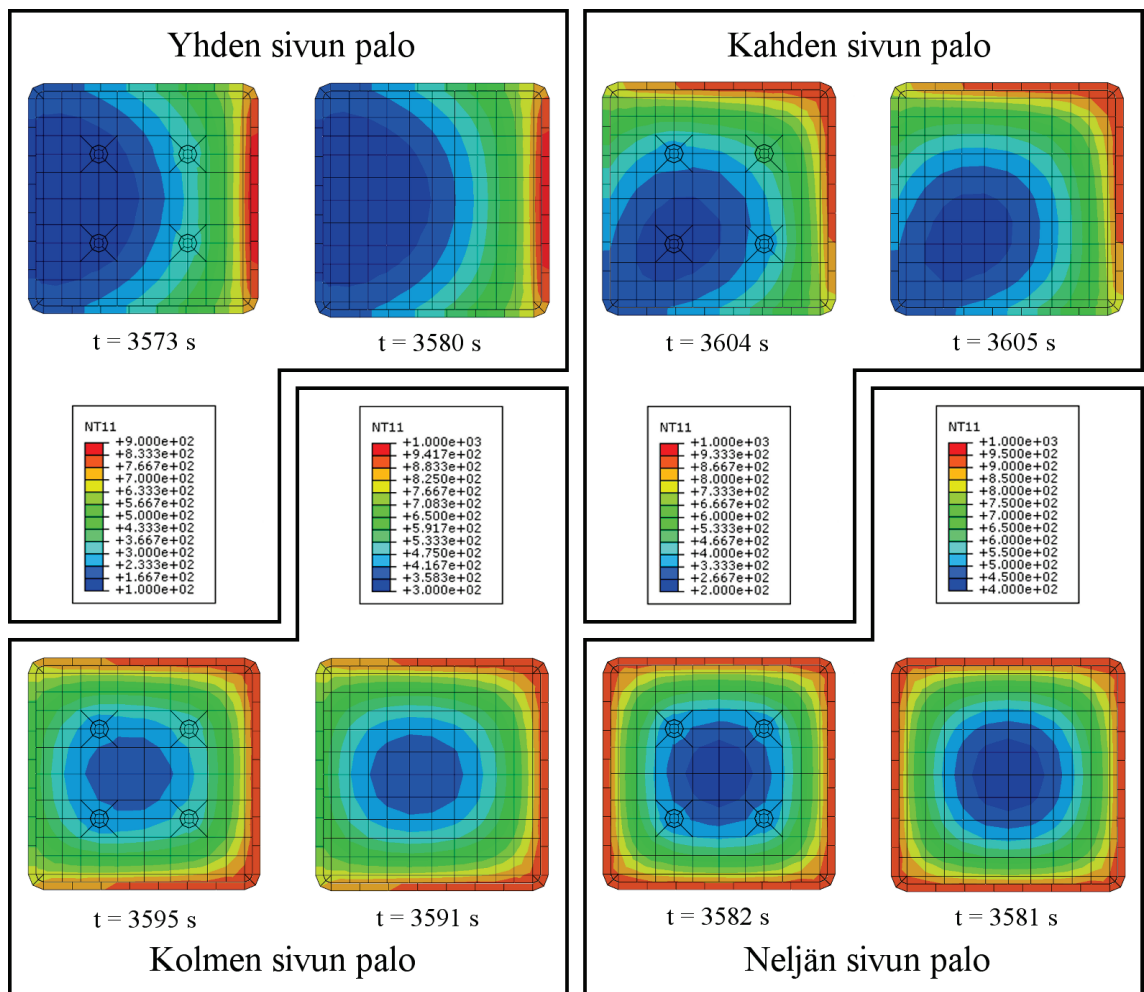


**Kuva 2.19.** Liittopilarien lopulliset lämpötilat 240 minuutin tulipalon jälkeen (adiabaattisesti eristetyt ja eristämättömät pilarit).

### 2.5.3 Raudoituksen vaikutus lämpötiloihin

Raudoituksen vaikutuksien lämpötilansiirtymiseen tutkittiin mallintamalla yhteen 150x150 pilariin pääraudoitteet kontinuumielementeillä, tekemällä lämmönsiirtymisanalyysi kaikissa neljässä eri palotilanteessa, ja vertailemalla lämpötiloja raudoittamattomiin pilareihin.

Kuvista 2.20 huomataan, että raudoitteet nostavat ympäröivän alueen lämpötilaa hieman, mutta muut muutokset jäävät vähäisiksi. Tästä on helppo päätellä, että raudoituksen poisjättämisellä lämmönsiirtoanalyysistä ei voi olla suuria vaikutuksia kuormitusanalyysin tuloksiin. Kaikki muut lämmönsiirtymisanalyysit on tehty ilman raudoituksia, ja raudoitteiden lämpötilaksi luetaan niiden paikalla olevan betonin lämpötila raudoittamattomista poikkileikkauksista.



**Kuva 2.20.** Laskettujen raudoitettujen ja raudoittamattomien 150x150 liittopilarien lämpötilojen vertailu 60 minuutin palon jälkeen.



### 3 KUORMITUSANALYYSIT

Abaquksella suoritettavat kuormitusanalyysit on jaettu kahteen eri tyyppiin, vakiolämpötila- ja vakiokuormitusanalyysihin, joiden laskentamallit ovat hyvin lähellä toisiaan. Vakiolämpötila-analyysissä kuormitusta kasvatetaan lämpötilan pysyessä vakiona, ja tuloksena saadaan liittopilarin murtokuorma halutulla ajanhetkellä. Vakiokuormitusanalyysissä lämpötilaa nostetaan kuormituksen pysyessä vakiona, ja sillä selviää pilarin palonkesto aika halutulla kuormituksella

Vakiolämpötila-analyysissä käsitellään vain joka puolelta palolle altistuvia pilareita ja siinä liittopilarin solmujen lämpötiloiksi luetaan lämmönsiirtymisanalyysistä saadut ajanhetkiä 30 min, 60 min, 90 min tai 120 min vastaavat lämpötilat, jonka jälkeen kuormaa kasvatetaan, kunnes liittopilari murtuu. Vakiolämpötila-analyysillä määritetään liittopilarien murtokuormat edellä mainituilla neljällä ajanhetkellä, ja saatuja kantavuuksia käytetään kuormina vakiokuormitusanalyysissä. Nämä kestävyudet esitetään kappaleessa 3.9, jossa niitä verrataan TRY:n suunnitteluohjeen mitoituskäyristä [1] saattujen kantavuuksien arvoihin. Tämän lisäksi kyseisellä analyysitavalla tehdään osa herkkyystarkasteluista, kuten alkukäyryyden ja betoniraudoituksen reunaetäisyyksien vaikutuksen tutkimista.

Vakiolämpötila-analyysillä ei voida tutkia osittain tulipalolle altistuvia pilareita, koska niiden kestävyteen vaikuttaa olennaisesti pilarin lämpölaajeneminen, eikä lämpölaajenemista voida ottaa tässä analyysityypissä helposti ja luotettavasti huomioon. Tästä johtuen tutkimuksen päätavoitteeksi on valittu osittaisesti palolle altistuvien liittopilarien palonkestoajojen selvittäminen tietyillä kuormilla sen sijaan, että kyseisille pilareille yritettäisiin suoraan määrittää uusia kantavuuskäyriä tutkittavissa palotilanteissa. Palonkestoajojen määrittäminen onnistuu vakiokuormitusanalyysin avulla, jossa kuorma nostetaan heti alussa täyteen arvoon, jonka jälkeen solmujen lämpötiloja nostetaan lämmönsiirtymisanalyysin tuloksien mukaisesti kunnes pilari murtuu.

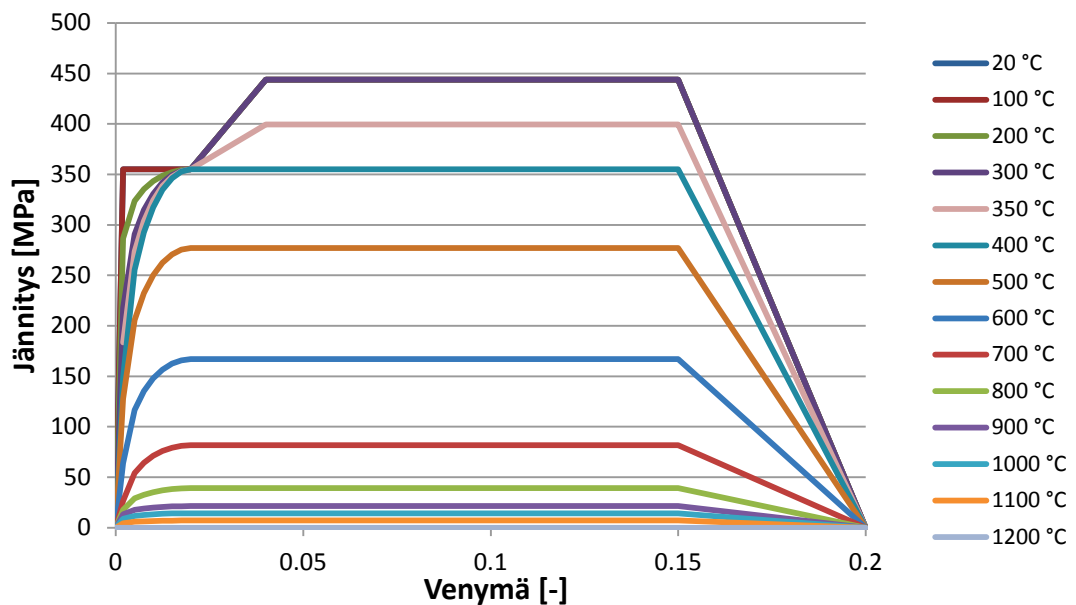
Jotta pilarit eivät olisi ideaalisen suorina, pilarille määritetään nurjahdusmuoto ja sen perusteella pilarin alkukäyryys ennen kuormitusanalyysia. Nurjahdusmuoto määritetään huoneenlämmössä omalla erillisellä analyysillä, joka suoritetaan erikseen jokaiselle pilarille.

#### 3.1 Materiaalien mekaaniset ominaisuudet

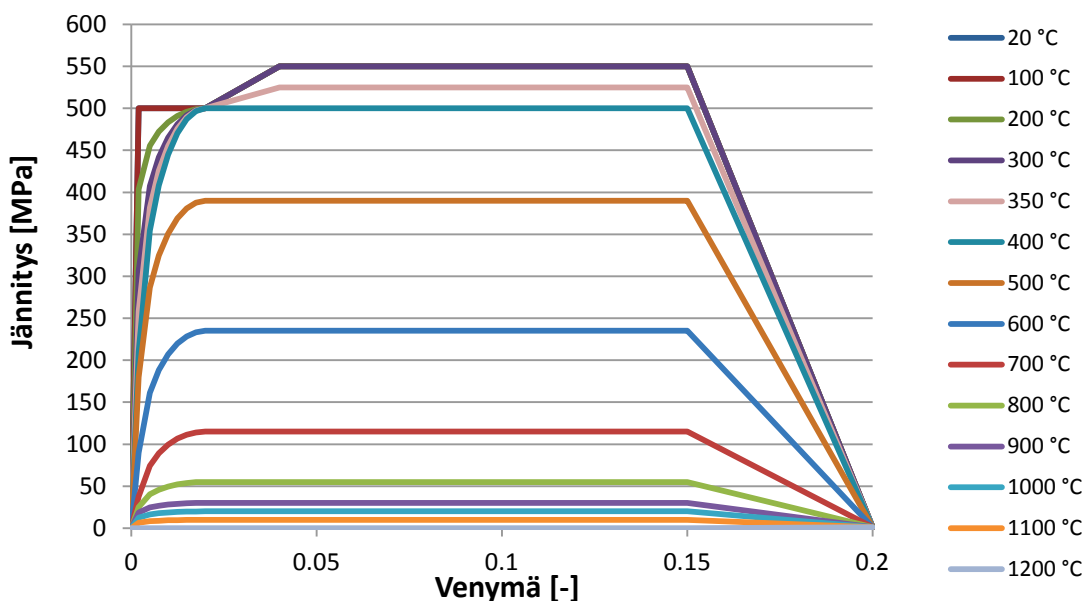
Vastaavasti kuin lämmönsiirtymisanalyysissä teräksen ja betonin mekaaniset ominaisuudet määritetään pääosin SFS-EN 1994-1-2 standardin [5] mukaisiksi. Sandwich-paneelissa esiintyvää mineraalivillaa ei kuormiteta, joten sille ei aseteta mitään lujuusarvoja.

### 3.1.1 Teräs

Rakenneputkien ja betonin raudoituksien teräslajit eroavat jonkin verran toisistaan, joten niille on määritettävä erilaiset mekaaniset ominaisuudet. Rakenneteräksen arvot on laskettu EN 1994-1-2 standardin kohdan 3.2.1 [5, s.27] kaavojen mukaan, ja betoniteräksen ominaisuudet saman standardin kohdan 3.2.3 [5, s.30] mukaan. Teräksien mallintamiseen käytetään Abaquksen *Elastic* ja *Plastic* materiaalfunktioita. Putkien teräksiksi on valittu S355 kylmämuokattu rakenneteräs ja betoniteräksiksi A500HW kuumavalsattu harjatanko. Teräslajit ovat samat mitä TRY:n liittopilarien mitoituskäyriä [1] on käytetty. Käytetyt lämpötilariippuvaiset jännitys-venymäkäyrät on esitetty kuvissa 3.1 ja 3.2.



Kuva 3.1. S355 rakenneteräksen jännitys-venymäkäyrät palotilanteessa.

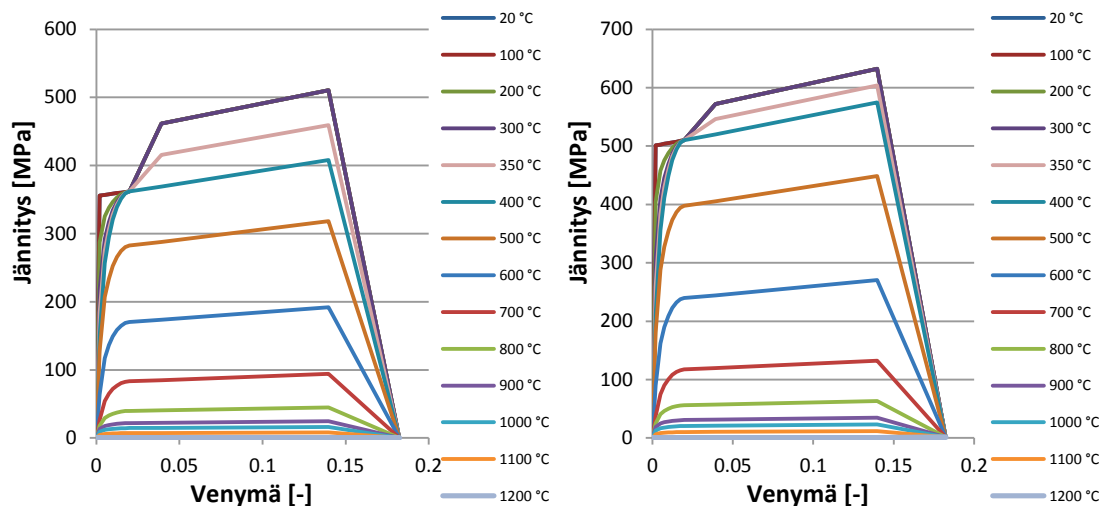


Kuva 3.2. A500HW betoniteräksen jännitys-venymäkäyrät palotilanteessa.

Eurokoodissa esiintyvät teräksen jännitys-venymäkäyrät on määritetty kokeellisesti vetämälle ne murtoon. Näissä käyrissä ei ole otettu kuitenkaan huomioon teräksen poikkipinta-alan pienenemistä venyttäessä, vaan jännitysarvot on laskettu alkupinta-alan suhteen. Kun pinta-alan pieneneminen otetaan huomioon, saadaan teräksen kestävyyksiksi normaalia suurempia arvoja. Näitä kutsutaan todellisiksi jännitys-venymäkäyriksi (true stress-strain). Normaalissa rakenteiden mitoituksessa ei myöskään oteta huomioon poikkipinta-alojen muutoksia, joten eurokoodin käyrät soveltuvat niihin sellaisenaan. FEM-laskennassa tämä muutos kuitenkin otetaan huomioon, ja tällöin yleensä hyödynnetään teräksen todellisia jännitysarvoja. Teräksen jännitys-venymäkäyrät voidaan muuttaa todellisiksi kaavoilla 2 ja 3, jotka löytyvät eurokoodista SFS-EN 1993-1-5 [10, s. 52]. Todellisiksi muutetut rakenne- ja betoniteräksen jännitys-venymäkäyrät näkyvät kuvassa 3.3.

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3)$$



**Kuva 3.3.** Rakenneteräksen ja betoniteräksen todellisiksi korjatut jännitys-venymäkäyrät.

Tutkimuksen alussa todelliset jännitykset jätettiin kuitenkin hyödyntämättä, eikä niitä haluttu ottaa käyttöön enää myöhemmissäkään vaiheissa vertailukelpoisuuden säilyttämisen nojalla. Tässä työssä on siis käytössä normaalit kuvien 3.1 ja 3.2 mukaiset käyrät. Tästä aiheutuva virhe ei voi olla kuitenkaan kovinkaan suuri, sillä todelliset jännitykset alkavat vaikuttamaan havaittavasti vasta suurilla muodonmuutoksilla, joita puristettuihin pilareihin ei helposti synny.

Teräksiin valssauksen tai kylmämuokkauksen seurauksena syntyviä jäännösjännityksiä ei tässä tutkimuksessa olla otettu huomioon.

Terästen kimmokertoimet on määritetty myös standardin EN 1994-1-2 kohtien 3.2.1 ja 3.2.3 mukaisesti [5] ja käytetyt arvot näkyvät taulukossa 3.1. Teräksen suppeumaluvuksi (Poissonin luku) on valittu 0,3 ja sen on otaksuttu olevan lämpötilasta riippumaton.

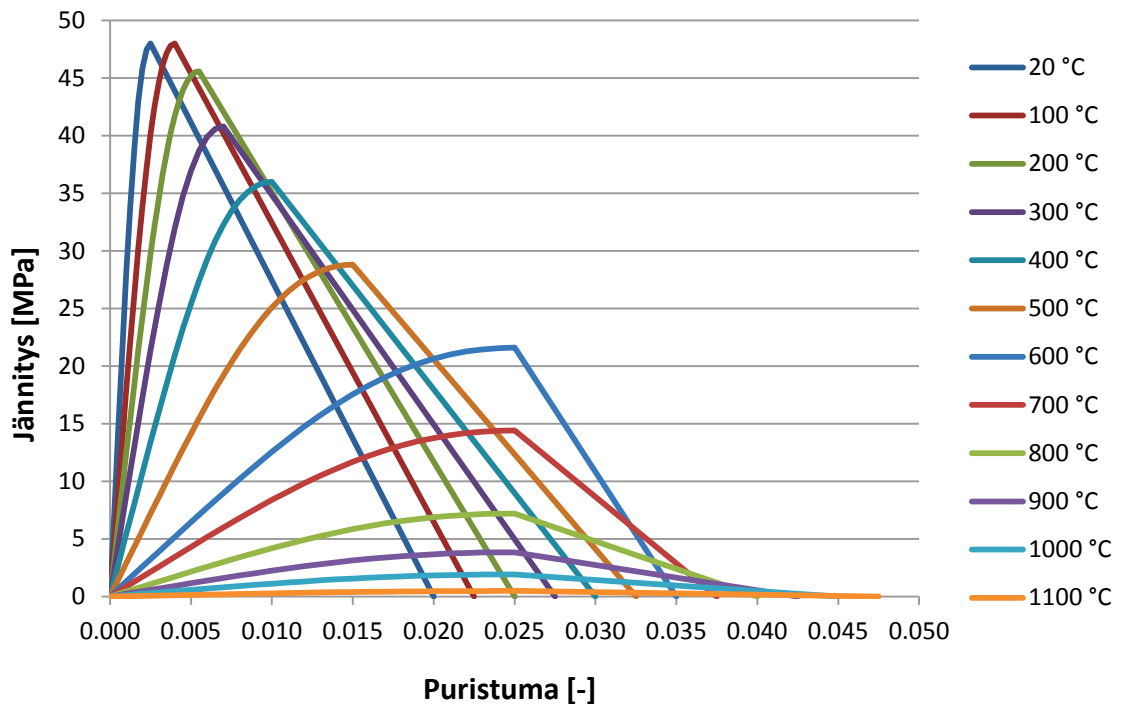
**Taulukko 3.1.** Rakenneteräksen ( $E_{a,\theta}$ ) ja betoniteräksen ( $E_{s,\theta}$ ) kimmokertoimet lämpötilan funktiona.

$\theta$ [°C]	$E_{a,\theta}$ [GPa]	$E_{s,\theta}$ [GPa]	$\theta$ [°C]	$E_{a,\theta}$ [GPa]	$E_{s,\theta}$ [GPa]
20	210,0	200,0	700	27,3	26,0
100	210,0	200,0	800	18,9	18,0
200	189,0	180,0	900	14,2	13,5
300	168,0	160,0	1000	9,5	9,0
400	147,0	140,0	1100	4,7	4,5
500	126,0	120,0	1200	0,0	0,0
600	65,1	62,0			

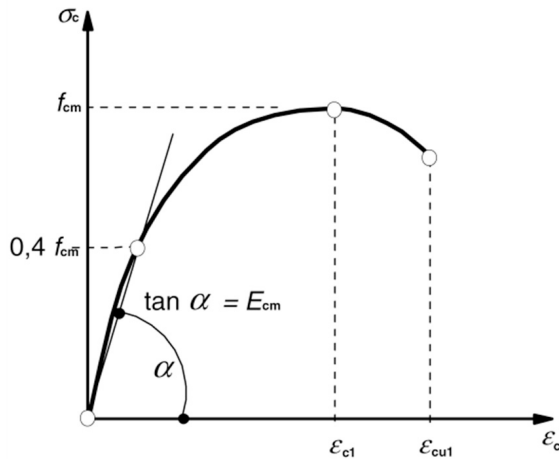
### 3.1.2 Betoni

Betonin mekaaniset ominaisuudet on vastaavasti määritetty EN 1994-1-2 standardin kohdan 3.2.2 [5, s.29] kaavojen mukaisesti. Betonin mallintamiseen käytetään Abaquksen *Elastic* ja *Concrete Smeared Cracking* materiaalifunktioita. Betonin lujuudeksi valittiin C40/50, jota on käytetty myös TRY:n mitoituskäyrissä [1]. Käytetyt lämpötilariippuvaiset jännitys-venymäkäyrät on esitetty kuvassa 3.4.

Betonin kimmokertoimen alenemista lämpötilan funktiona ei ole suoraan kerrottu eurokoodissa. Abaqukseen kimmokertoimet kuitenkin pitää syöttää, joten ne on määritetty jokaisen lämpötilan jännitys-puristumakäyrän kulmakertoimena suorasta, joka kulkee origosta pisteeseen, jossa jännitys on kasvanut 40 %:iin maksimiarvosta kuvan 3.5 mukaisesti. Betonin suppeumaluvuksi on valittu 0,2, jonka on oletettu olevan lämpötilasta riippumaton.



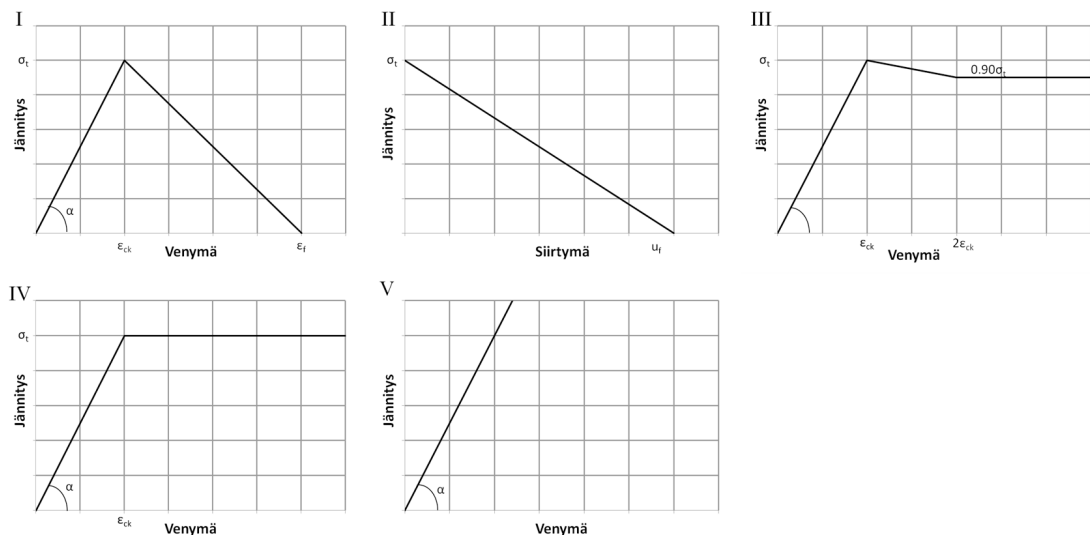
**Kuva 3.4.** C40/50 betonin jännitys-puristumakäyrät palotilanteessa.



**Kuva 3.5.** Betonin kimmokertoimen määrittäminen [6, kuva 3.2]

Betonin halkeileva vetopuoli aiheutti suuria vaikeuksia laskennan konvergenssissa, eli laskenta keskeytyi helposti liian aikaisin, eikä hyviä tuloksia saatu. Tämä johtuu FEM-laskennan laskentatavasta ja on yleinen ongelma FEM-analyysissä. Betonin vetopuolen mallintamista yritettiin monella eri tavalla ja sitä jouduttiin muuttamaan useaan kertaan.

Yritykset mallintaa betonin vetopuolen käyttäytyminen voidaan jakaa viiteen eri vaiheeseen, jotka on esitetty kuvassa 3.6. Vaiheet käytiin läpi I:stä alkaen ja lopulta päädyttiin tavan V mukaiseen käyrään. Betonin vetolujuuden maksimiarvoksi  $\sigma_t$  valittiin 9 % betonin puristuslujuudesta. Kaikissa tavoissa lujuus kasvaa maksimiarvoonsa betonin puristuspuolen kimmokertoimen  $E_c$  mukaisesti.



**Kuva 3.6.** Betonin vetopuolen käyttäytymisen mallintamiseen testatut viisi erilaista tapaa.  $\tan(\alpha) = E_c$

Vetolujuuden kehityksen lähtökohdaksi otettiin eurokoodin 1992-1-2 [7, s. 21] ohje. Tapa I onkin luotu tätä ohjetta hyvin lähelle noudattaen. Tällä tavalla laskentaa ei saatu kuitenkaan suoritettua loppuun kertaakaan, joten se piti hylätä täysin. Venymän  $\epsilon_f$  arvoiksi kokeiltiin eri arvoja väliltä 0.5 - 2.0 %.

Tavassa II on hyödynnetty Abaquksen mahdollisuutta mallintaa betonin vetopuoli jännitys-siirtymä yhteytenä. Abaquksessa tämä menetelmä saadaan käyttöön valitsemalla *Concrete Smeared Cracking* materiaalifunktion asetuksista *Tension Stiffening: Type: Displacement*. Siirtymän  $u_f$  arvoksi asetettiin 1 mm, joka sama mitä Zeng ja Mäkeläinen käyttivät omassa liittopilaritutkimuksessaan [17], mutta myös muita arvoja kokeiltiin. Analyysi edistyi pidemmälle mitä tavalla I päästiin, mutta ei vieläkään riittävästi.

Vaiheessa III siirryttiin takaisin normaaliin jännitys-venymä yhteyteen. Hong ja Varma [14] käyttivät omissa laskelmissaan vastaavaa käyrää. Hong ja Varma kokeilivat myös muita loppulujuuden arvoja ( $0.25\sigma_t$ ,  $0.50\sigma_t$ ,  $0.75\sigma_t$ ), mutta  $0.90\sigma_t$  oli ainoa mikä läpäisi laskennan myös palotilanteessa heidän tutkimuksessaan.

Tapa IV on hyvin lähellä tapaa III, mutta lujuus ei tässä tavassa laske vetomurtopisteen jälkeen lainkaan, jolloin laskennan eteneminen helpottuu vielä hieman. Tavalla III ja IV saadut tulokset eivät eronneet toisistaan käytännössä ollenkaan. Tavalla IV saatiin tuloksia jo sen verran johdonmukaisesti, että sen avulla saatiin vakiolämpötila-analyysit suoritettua.

Siirryttäessä vakiokuormitusanalyysiin tavan IV mukaiset laskut eivät enää konvergoineet. Tämä johtunee siitä, että mukaan otettiin lämpölaajeneminen, joka lisää betonin vetorasituksia paikoittain voimakkaasti. Lopulta päädyttiin tavan V mukaiseen hyvin yksinkertaiseen malliin, jossa betonin vetojännitys kasvaa kimmokertoimen määräämänä rajattomasti. Tämän lisäksi tuloksista seurattiin, ettei betoniin tule suuria vetojännityksiä ainakaan laajoilla alueilla. Vaikka malli on näinkin yksinkertainen, ei siitä uskota silti aiheutuvan suuria virheitä, sillä puristetussa pilarissa materiaalien puristuslujuus on paljon tärkeämpi tekijä. Tällä tavalla suoritettiin kaikki vakiokuormitusanalyysit.

Edellä mainittujen tapojen lisäksi kokeiltiin lyhyesti joitain muitakin malleja, kuten esimerkiksi betonin muuttamisesta isotrooppiseksi asettamalla veto- ja puristuslujuudet yhtä suuriksi ja määrittämällä maksimijännityksen näiden keskiarvona. Tulokset eivät kuitenkaan olleet vakuuttavia.

Tulevissa tutkimuksissa olisi järkevää siirtyä käyttämään Abaquksen *Concrete Damaged Plasticity* materiaalifunktiota, jonka käytöstä on maailmalla parempia kokemuksia. Myös Hong ja Varma, sekä Yang, Liu ja Zhang hyödynsivät tätä omissa tutkimuksissaan. [14, 13]. Tämän Abaquksen ominaisuuden hyödyntämistä kokeiltiin tässäkin tutkimuksessa, mutta sen käyttöönotto on *Smeared Cracking* materiaalifunktiota huomattavasti haastavampaa. Luotettavien arvojen syöttäminen *Damaged Plasticity* funktioon vaatisi sen teoriaan syvällistä perehtymistä varsinkin, kun lujuuskäyttäytymisestä halutaan lämpötilariippuvainen. Työ helpottuisi, jos saatavilla olisi valmiit esimerkkisarvot.

### 3.2 3D-malli ja elementit

Kuormitusvaiheessa mallin verkotusta ei saa enää muuttaa, sillä sen jälkeen solmuille lasketut lämpötilat eivät enää päde. Abaqus osaisi kyllä approksimoida uudelle verkolle

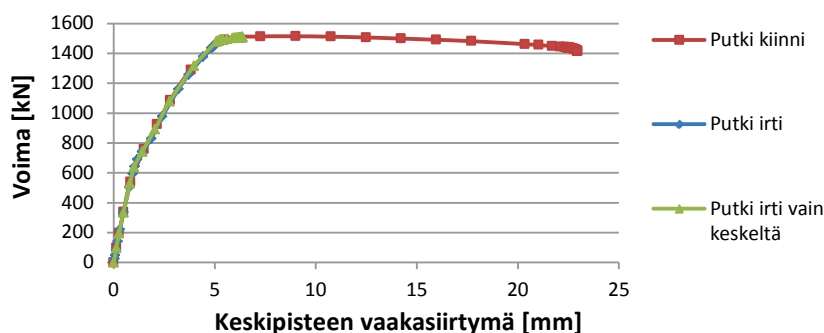
lämpötilat, mutta tämä ei ole suositeltavaa, sillä käytetty verkotus ei ole kovin tiheä. 3D malli ja elementtiverkotus säilyvät siis kuormitusanalyysissä samana kuin lämmönsiirtymisanalyysissä, mutta elementtityypit on muutettava kuormituselementeiksi. Betonin ja putken elementeiksi vaihdettiin C3D8 kuusitahokaselementit lukuun ottamatta taas betonin kulmapyöristyksiä, jonne vaihdettiin C3D6 kiilaelementit. Raudoituselementeiksi vaihdettiin lineaariset B31 palkkielementit.

Kuormitusanalyysissä poistettiin lämmönsiirtymisanalyysissä olleet betoniseinät ja sandwich-paneelit. Näiden seinien vaikutukset kestävyysnäkökulmasta ilmenevät vain käytettyjen lämpötila-arvojen kautta.

### 3.3 Putken ja betonin välinen kontakti

Vakiolämpötila-analyysissä putki sidottiin edelleen täysin kiinni betoniin *tie* liitoksella. Vakiokuormitusanalyysissä on kuitenkin lämpölaajeneminen mukana, jolloin nopeammin laajeneva putki aiheuttaisi kiinni ollessaan vetojännityksiä betoniin. Näiden jännitysten minimoimiseksi putki erotettiin betonista ja pintojen välille asetettiin kitkaton vuorovaikutus, vaikka todellisuudessa betonin ja putken välillä kitkaa kuitenkin jonkin verran on. Espinos, Romero ja Hospitaler vertailivat tutkimuksessaan kitkallisia ja kitkattomia putken sisäpintoja, ja he tulivat siihen tulokseen, ettei niillä kuitenkaan ollut juuri mitään vaikutusta pilarin kantavuuteen [15].

Putken kiinnityksen vaikutusta vertailtiin laskemalla yksi tapaus huoneenlämmössä niin, että putki oli joko täysin kiinni betonissa, irti betonista vain pilarin keskivaiheilla tai kokonaan irti betonista. Vertailu tehtiin tutkimuksen alkuvaiheilla, jolloin käytössä oli muun muassa monimutkaisempi betonin materiaalimalli. Kuvasta 3.7 näkyy, että kaikki käyrät nousevat identtisesti huippuarvoon, ja eroa syntyy vain täysin kiinni olevassa putkessa, josta saatiin arvoja murtumispisteen jälkeenkin muodonmuutosten kasvaessa voimakkaasti. Putken ollessa täysin kiinni pilarissa analyysi edistyi myös muita nopeammin.

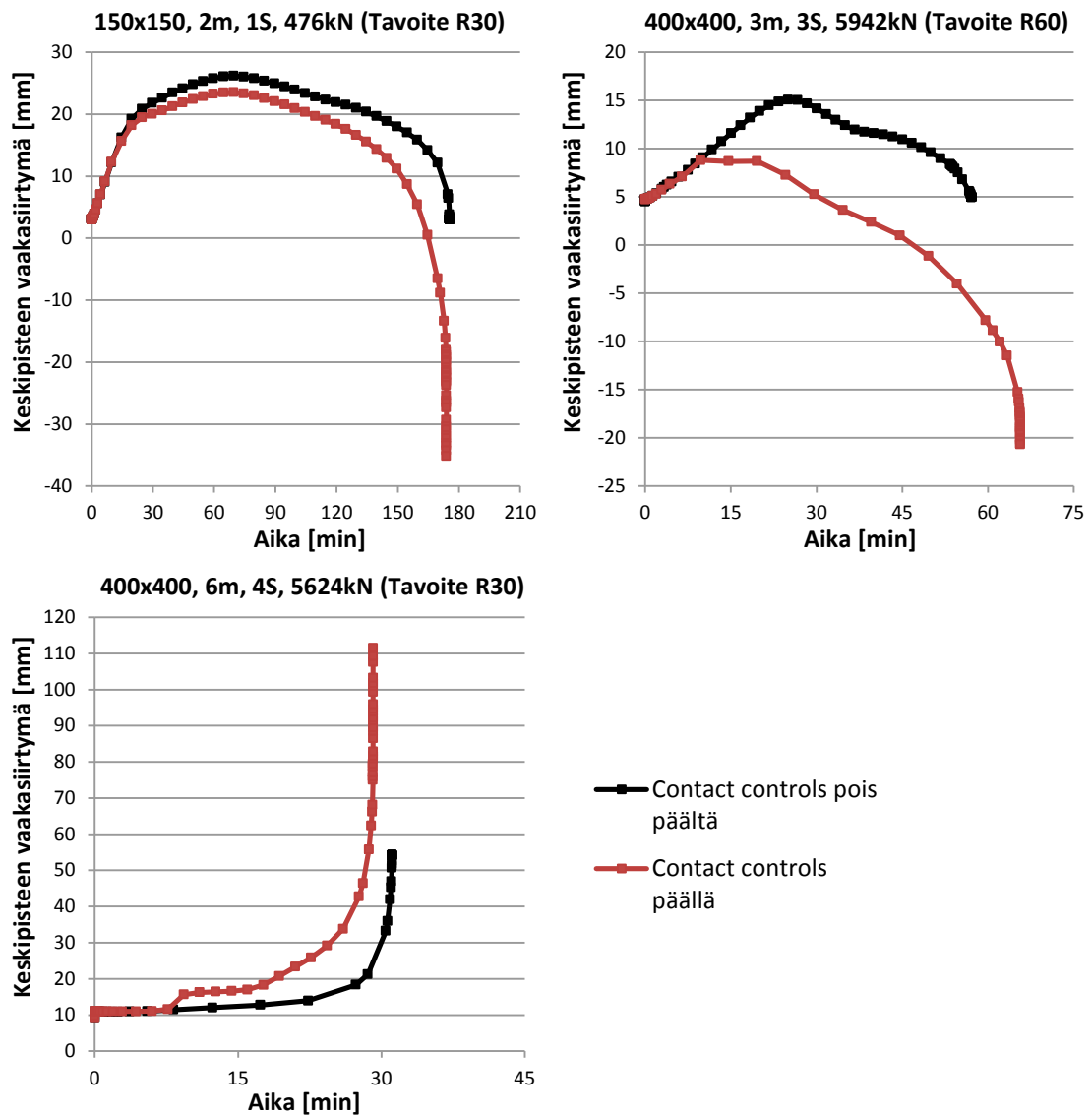


**Kuva 3.7.** Putken ja betonin välisen kiinnityksen vaikutus kolmen metrin pituisessa 150x150 liittopilarissa. Laskenta on suoritettu huoneenlämmössä.

Näillä asetuksilla saatiin suurin osa vakiokuormitusanalyysin tapauksista laskettua, mutta osa laskuista päättyi silti virheeseen, jonka lähteeksi saatiin määritettyä putken ja betonin välinen kontakti. Tämän välttämiseksi osassa tapauksista piti käyttöön ottaa

asetukset kontaktien ohjaukselle (*CONTACT CONTROLS, STABILIZE*). Tämä komento lisää kontaktipintojen väliin vaimennusta (viscous damping), joka helpottaa laskentaa ja yksikäsitteisten tulosten määrittämistä.

Abaquksen ohjekirjassa [21] kuitenkin varoitetaan, että tämän asetuksen käyttäminen saattaa johtaa joissain tilanteissa vääristyneisiin tuloksiin. Esimerkiksi tällaisesta tapauksesta manuaalissa annetaan ohutlevyrakenne, joten on todennäköistä, että tämän tutkimuksen tuloksiin asetuksella ei ole suurta vaikutusta. Lasketaan kuitenkin joitain jo onnistuneesti loppuun asti laskettuja tapauksia myös kontaktien ohjaus päällä, ja vertailaan tuloksia kuvan 3.8 aika–siirtymäkäyrien avulla.



**Kuva 3.8.** Contact controls asetuksen vaikutusten vertailu.

Yllä olevista kuvaajista nähdään, että osa tapauksista kestää yhtä kauan, osa vähän enemmän ja osa vähän vähemmän. Suurin ero on kuitenkin se, että ennen laskennan päättymistä pilariin tulee suuria muodonmuutoksia, mistä murtumisen ajanhetki on erittäin helppo määrittää. Lisäksi keskipisteen siirtymät näyttävät olevan alkua lukuun ottamatta hieman erilaisia. Erot eivät ole kuitenkaan kovin suuria, joten tapaukset joiden



laskentaa ei aikaisemmin saatu suoritettua loppuun, on laskettu uudestaan kontaktien ohjaus päällä.

### 3.4 Betoniraudoitus

Kuormitusanalyyseissä raudoituksen poikkileikkaukset muutettiin takaisin betoniteräksiksi poikkileikkauksiksi halutuilla halkaisijoilla. Liittopilarien raudoitteiksi valittiin seuraavat teräkset: 150x150 pilareihin 4T12, 250x250 pilareihin 4T20 ja 400x400 pilareihin 8T25. Näiden raudoitteiden valintaa voidaan perustella sillä, että niille on olemassa mitoituskäyrät TRY:n mitoitusohjeessa [1]. Liittopilarien raudoitussuhteet ovat tällöin:

- 150x150 4T12 pilareilla 2,3 %
- 250x250 4T20 pilareilla 2,2 %
- 400x400 8T25 pilareilla 2,7 %

Vakiolämpötila-analyysissä liittopilarien kantavuuksia laskettaessa on tarkasteltu myös muutamaa raudoittamatonta liittopilaria. Nämä tulokset on esitetty kappaleessa 3.9.

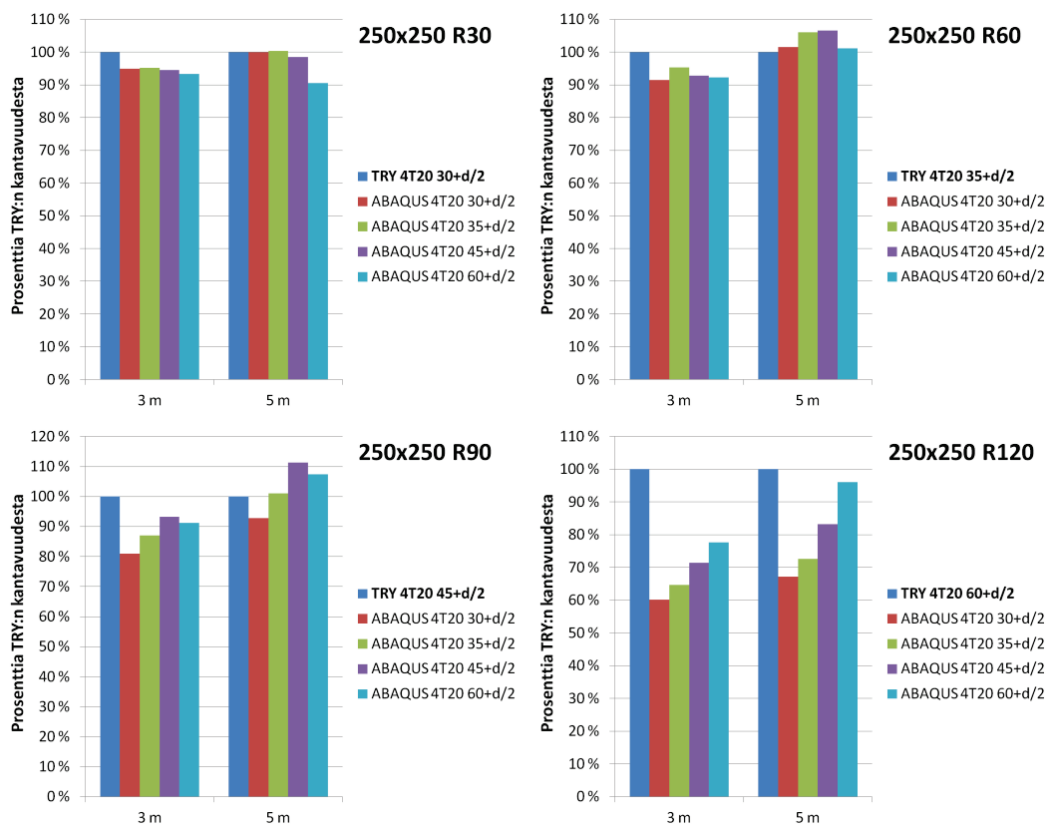
Raudoitteiden reunaetäisyyksien lähtökohtana käytettiin TRY:n suunnitteluohjeesta [1] saatua taulukkoa 3.2. Kuten tästä taulukosta nähdään TRY antaa raudoitukselle eri reunaetäisyydet liittopilarin paloluokasta riippuen. Tutkimuksen kannalta olisi kuitenkin mielekästä käyttää samaa reunaetäisyyttä aina tietylle pilarikoolle sen palonkestosta riippumatta. Jos reunaetäisyyksiä ei muuteta, säilyy elementtiverkotus samana, ja tarvittavien analyysien määrä pienenee huomattavasti.

**Taulukko 3.2.** TRY:n suosittelemat betoniraudoiden reunaetäisyydet putken sisäpinnasta raudoitteiden keskelle [1, s.49]

neliö	120x120	150x150	180x180	200x200	220x220	250x250	300x300	350*350	400x400	>400x400
ympyrä	D139,7	D168,3		D219,1		D273	D323,9	D355,6	D406,4	>D406,4
R30	30+d/2	30+d/2	30+d/2	30+d/2	30+d/2	30+d/2	30+d/2	30+d/2	30+d/2	30+d/2
R60	-	35+d/2	35+d/2	35+d/2	35+d/2	35+d/2	35+d/2	45+d/2	45+d/2	45+d/2
R90	-	-	-	45+d/2	45+d/2	45+d/2	45+d/2	45+d/2	45+d/2	55+d/2
R120	-	-	-	-	-	60+d/2	60+d/2	60+d/2	60+d/2	70+d/2

Tarkastellaan raudoituksen reunaetäisyyden vaikutuksia tutkimalla 250x250 liittopilarin kestävyksiä vakiolämpötila-analyysillä eri reunaetäisyyksillä ja vertaamalla niitä vastaaviin TRY:n mitoitusohjeen [1] kantavuuksiin. Kuvasta 3.9 nähdään, että maksimikantavuus on saatu suurimassa osassa tapauksista käyttämällä TRY:n suosittelemaa reunaetäisyyttä. Tuloksista nähdään myös, että käyttämällä jokaiselle paloluokal-

le TRY:n suosittelemien R30 ja R120 reunaetäisyyksien keskiarvoa, joka on tällä pilarilla 45 mm, päästään kohtuullisen lähelle TRY:n laskemia kestävyksiä.



**Kuva 3.9.** Reunaetäisyyksien vaikutusten vertailu TRY:n antamaan kantavuuteen (vakio-*lämpötila-analyysi*)

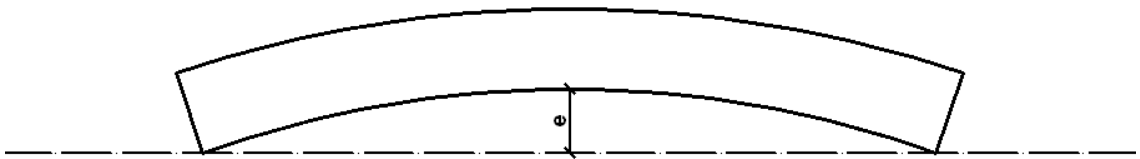
Edellä olevan tarkastelun pohjalta lopuissa vakio-*lämpötila-analyysissä*, sekä kaikissa vakiokuormitusanalyysissä, voidaan käyttää vain yhtä reunaetäisyyttä pilarikokoa kohden menettämättä liikaa tulosten vertailukelpoisuutta TRY:n arvoihin. Reunaetäisyyden suuruus määritetään TRY:n taulukon keskiarvona pyöristämällä lähimpään viiteen milliini, kuten edellä on tehty. Näin tutkittavien pilareiden raudoituksille saadaan seuraavat reunaetäisyydet:

- 150x150 4T12 pilareille 35+d/2
- 250x250 4T20 pilareille 45+d/2
- 400x400 8T25 pilareille 45+d/2

### 3.5 Liittopilarien alkukäyryys

Jotta mallinnetut liittopilarit eivät olisi ideaalisuoria, täytyy niille määrittää kuvan 3.10 mukainen alkukäyryys. Pilarin alkukäyryys on määritetty hakemalla pilarille nurjahdusanalyysillä pienimmän ominisarvon mukainen nurjahdusmuoto. Tämän jälkeen nurjahdusmuodolle voidaan asettaa haluttua alkukäyryyttä vastaava amplitudi. Nurjahdusana-

lyysin mallissa pitää käyttää samaa elementtiverkotusta mitä lämmönsiirtymis- ja kuormitusanalyysissä.



**Kuva 3.10.** Liittopilarien alkukäyryys. Alkukäyryyden amplitudi  $e$  vaihtelee pilarin pituuden mukaan.

Alkukäyryyden määrittämiselle ei löydy Abaquksesta valmiita käyttöliittymää, joten komennot pitää antaa tekstimuodossa. Aluksi kopioidaan lämmönsiirtymisanalyysin malli, ja tehdään siihen tarvittavat muutokset, jotta se saadaan muutettua nurjahdusanalyysiksi. Elementtityypit, raudoitukset ja tuenta ovat samat mitä kuormitusanalyysissä. Putki pidetään kiinnitettynä pilarissa, pilarin päähän asetetaan 100 kN suuruinen kuorma ja *step*:ksi valitaan *Linear perturbation* → *Buckle*. Tallennetaan mallin kaikki solmut yhdeksi joukoksi (*set*) ja lisätään *Keywords* komentotiedoston loppuun rivit:

```
*node file, nset=assembly.Set-All, mode=1, last mode=16
```

```
u
```

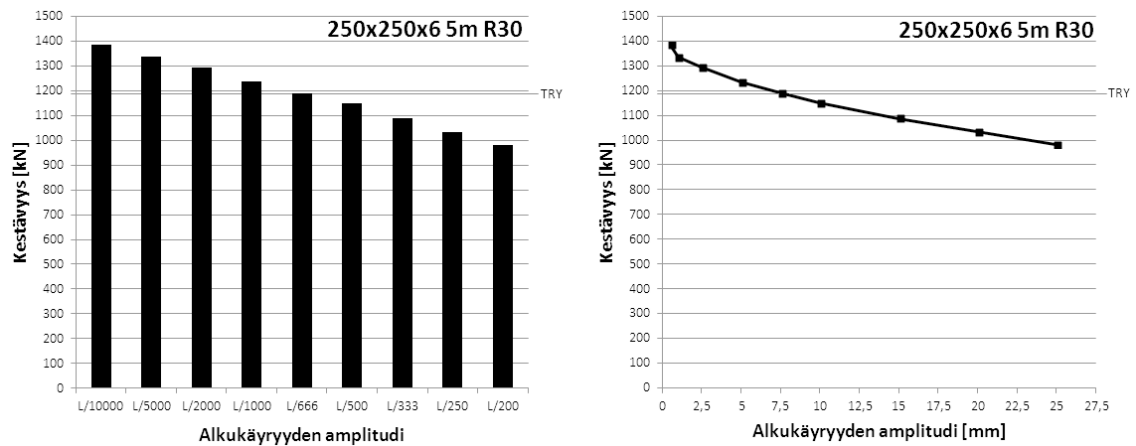
mikä tallentaa solmujen siirtymädatan erilliseen tiedostoon ja missä *Set-All* on tallennetun solmujoukon nimi. Nurjahdusanalyysin jälkeen kopioidaan malli uudestaan, jolloin se on helppo muuttaa halutuksi kuormitusanalyysiksi. Kuormitusanalyysissä komentotiedostosta poistetaan edellä lisätyt rivit ja siitä etsitään kohta, mistä *step*-moduuliin liittyvät komennot alkavat, ja lisätään näiden yläpuolelle komennot:

```
*imperfection, file=Job-Buckle, step=1, nset=assembly.Set-All
```

```
1,0.0045
```

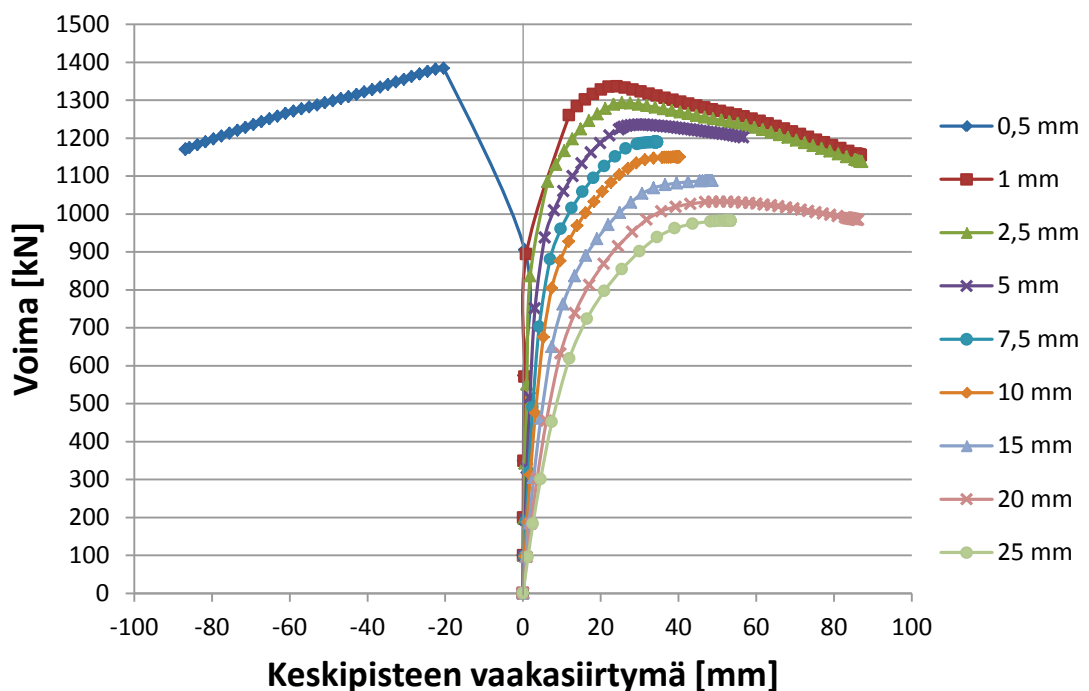
missä *Job-Buckle* on kyseessä olevan nurjahdusanalyysin laskentatyölle (*Job*) annettu nimi ja 0.0045 haluttu alkukäyryyden amplitudi metreinä. Koko prosessi pitää suorittaa uudestaan aina, kun mallin verkotusta muutetaan.

Pilarien alkukäyryyden amplitudeiksi kokeiltiin kylmämuovattujen putkien standardin käyryyden toleranssin [20, s. 10] arvoa  $L \cdot 0.0015$  ( $L/666$ ). Alkukäyryyden vaikutusta kestävyteen tutkittiin vakiolämpötila-analyysillä viiden metrin 250x250x6 liittopilareilla 30 minuutin palossa, jossa alkukäyryydelle kokeiltiin seuraavia amplitudeja: 0,5 mm ( $L/10000$ ), 1 mm ( $L/5000$ ), 2,5 mm ( $L/2000$ ), 5 mm ( $L/1000$ ), 7,5 mm ( $L/666$ ), 10 mm ( $L/500$ ), 15 mm ( $L/333$ ), 20 mm ( $L/250$ ) ja 25 mm ( $L/200$ ). Kuvassa 3.11 on saadut tulokset ja vastaava TRY:n mitoituskäyrän [1] kestävyysarvo.



**Kuva 3.11.** Alkukäyryyden amplitudin vaikutus normaalivoimakestävyteen.

Kuvasta 3.11 nähdään, että L/2000 suuremmilla alkukäyryyksillä alkukäyryyden vaikutus kestävyteen on melko lineaarista. Hyvin pienillä alkukäyryyksillä laskenta alkaa kuitenkin mennä epävarmaksi. 0,5 millimetrin amplitudilla pilari nurjahti jostain syystä alkukäyryyden vastakkaiseen suuntaan, kuten kuvasta 3.12 nähdään. Myös 1 millimetrin amplitudilla pilari taipui ensin hieman väärään suuntaan, kunnes se kuitenkin nurjahti positiiviseen suuntaan. Tästä johtuen alle L/2000 olevien alkukäyryyksien käyttöä on ehkä syytä välttää tämän tyyppisissä analyysissä.



**Kuva 3.12.** Voima–siirtymäkäyrät pilarin eri alkukäyryyksillä 250x250x6 5m liittopilarilla 30 minuutin palon jälkeen.

Eurokoodi 1994-1-1 suosittelee tämän tutkimuksen tyyppisille liittopilareille alkukäyryyttä L/300 [4, s. 60]. Muissa tutkimuksissa on liittopilareille kuitenkin käytetty huomattavasti pienempiäkin käyryksiä, joista yleisin on L/1000. Tätä alkukäyryyttä on

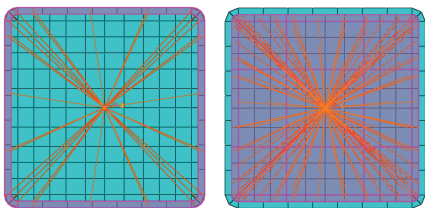
käytetty muun muassa Yangin, Liun ja Zhangin tutkimuksessa [13], Espinosin, Rome-ron ja Hospitalerin tutkimuksessa [15], sekä Dingin ja Wangin tutkimuksessa [16]. Ding ja Wang myös kokeilivat muita alkukäyryyksiä ja totesivat  $L/1000$  olevan riittävä [16]. Hongin ja Varman tutkimuksessa puolestaan käytettiin vielä huomattavasti pienempää arvoa  $L/7500$  [14]. Hong ja Varma perustelevat valintaansa raportissaan sillä, että Galambosin julkaisun mukaan rakenneputkien todelliset käyryydet ovat keskimäärin  $L/6500$  luokkaa [22]. Näiden asioiden perusteelle alkukäyryyden  $L/666$  käyttöä voidaan jatkaa kaikissa muissakin tapauksissa.

Tutkimuksen edetessä huomattiin, että alkukäyryyden vaikutus tuloksiin on tässä tutkimuksessa todennäköisesti pienempi mitä kuvasta 3.11 voisi olettaa. Tämä johtuu siitä, että yhden, kahden ja kolmen sivun tulipaloissa pilarin käyristyminen lämpöliik-keiden vaikutuksesta saattaa olla jopa yli kymmenkertainen alkukäyryyteen  $L/666$  ver-rattuna.

### 3.6 Pilarien tuenta

Liittopilarit mallinnetaan nivelellisesti tuettuina. Liittopilarien päiden solmut sidotaan yhteen päiden keskipisteisiin *coupling* liitoksella, jolloin päihin saadaan yksittäiset pis-teet, joihin voidaan sijoittaa tukia. Sidonta tehdään erikseen teräsputken pään solmuille ja betoniosan pään solmuille kuvan 3.13 mukaisesti, ja kummallekin alueelle asetetaan erilliset tuet. Tällöin osat pääsevät laajeneman lämmön vaikutuksesta eri tahtiin, ja be-toniin syntyy vähemmän analyysin etenemisen kannalta huonoja paikallisia vetojänni-tyksiä.

Tulevissa tutkimuksissa suositeltavaa olisi mallintaa pilarin päihin paksut teräslevyt kontinuumielementeistä, joihin tuet sijoitetaan, kuten on tehty Yangin, Liun ja Zhangin vastaavassa tutkimuksessa [13]. Tällöin pystyttäisiin välttämään vielä paremmin beto-niin tulevia suuria paikallisia jännityksiä.

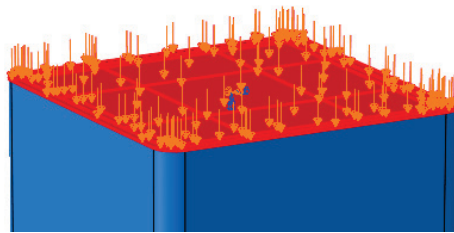


**Kuva 3.13.** Pilarin päiden solmujen yhdistäminen yhteen pisteeseen.

Pilarit tuetaan päätyjen keskipisteistä siten, että pilarin alapäässä vapaana on vain kiertymä  $y$ -akselin ympäri ja pilarin yläpäässä vapaana on  $z$ -akselin (pilarin) suuntainen siirtymä sekä kiertymä  $y$ -akselin ympäri. Muun suuntaiset päätepisteiden siirtymät ja kiertymät estetään. 2S-tilanteessa pilari nurjahtaa nurkan yli, eli siinä vapaana ovat li-säksi kiertymät  $x$ -akselin ympäri.

### 3.7 Pilarien kuormitus

Kuormitus tapahtuu asettamalla pilarin yläpäähän tasainen painekuorma kuvan 3.14 mukaisesti. Kuormituksen suuruus on siis betonilla ja teräsputkella sama pinta-alayksikköä kohti, eikä esimerkiksi lämpölaajenemisen vaikutusta kuorman jakautumiseen oteta huomioon. Vakiolämpötila-analyysissä kuormana on 100 kN:n suuruinen siemenkuorma, jota analyysi alkaa kasvattaa automaattisesti. Vakiolämpötila-analyysissä lopullinen kuorman suuruus on tuntematon, joka tämän prosessin avulla yritetään selvittää. Vakiokuormitusanalyysissä kuorman suuruus määritetään vakiolämpötila-analyysistä saatujen kestävyyksien perusteella. Nämä arvot löytyvät kappaleesta 3.9.

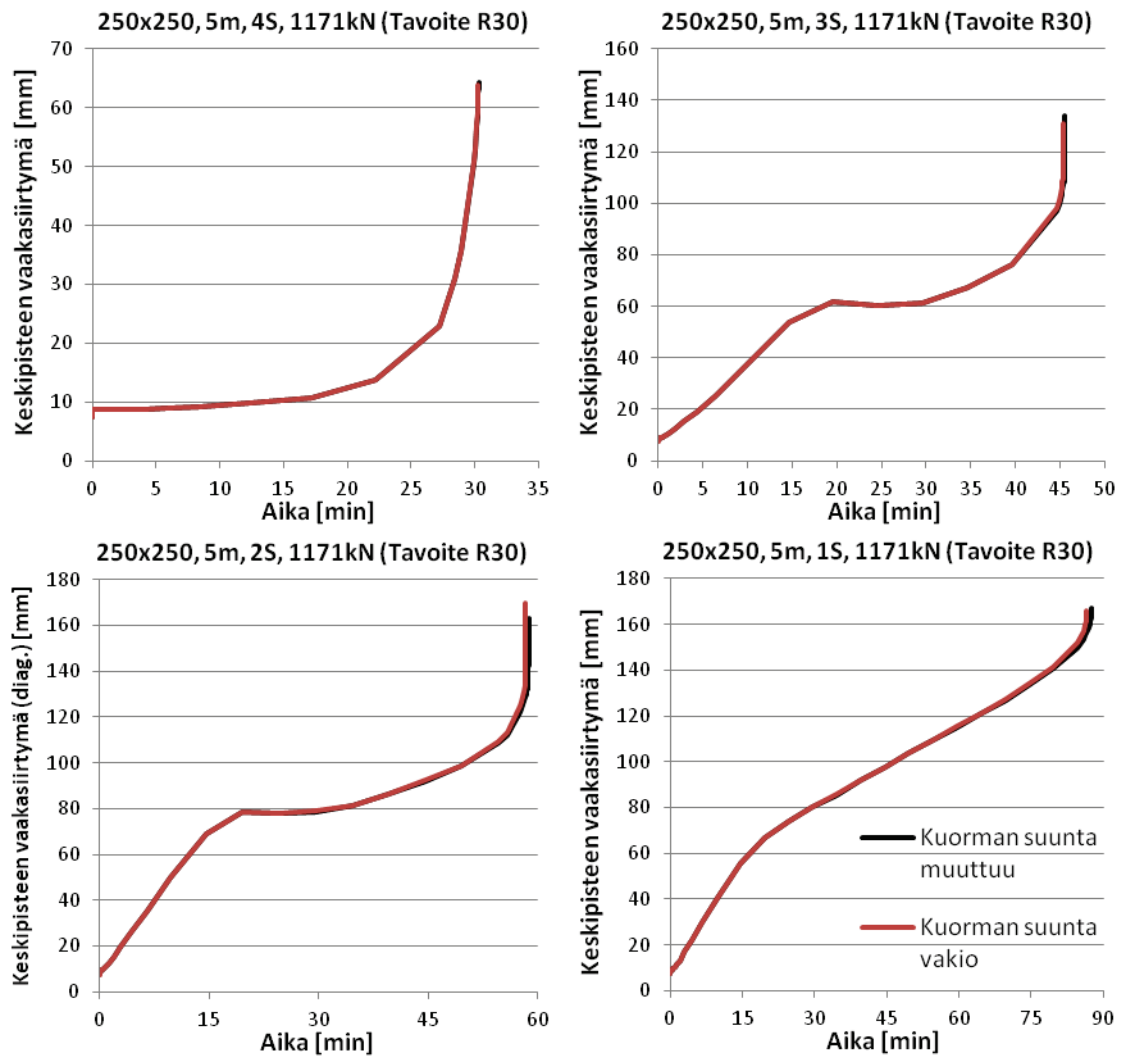


**Kuva 3.14.** Pilarin kuormitus.

Tasaiseksi kuormitukseksi valittiin Abaquksesta *Pressure*. Työn aivan loppuvaiheilla kuitenkin huomattiin, että kyseinen kuormitus on tyypiltään *follower*, eli sen suunta muuttuu pinnan kaltevuuden muuttuessa. Pilareihin kohdistuva kuormitus on kuitenkin lähtöisin pääosin painovoimasta, jonka suunta on aina suoraan alaspäin. Kuorman kääntymisestä aiheutuvat vaakavoimat siirtyvät suoraan pilarin päissä oleville niveltuille, mutta samalla kuorman pystysuuntainen resultantti pienenee, joka aiheuttaa tuloksiin virhettä. Jotta tämän virheen suuruutta voidaan arvioida, lasketaan muutama tapaus käyttämällä *Surface traction* kuormitusta, jonka suunta voidaan asettaa globaalisti vakioksi (*non-follower*). Tarkastellaan hoikinta pilaria suurimmalla kuormituksella (250x250 5m 1171kN), jolloin kiertymät ovat suurimmat ja täten myös aiheutuva virhe on todennäköisesti suuriin. Taulukosta 3.3 ja kuvasta 3.15 huomataan, että käytetty *follower* kuormatyyppi antaa hieman liian suuria tuloksia, mutta kyseinen virhe jää kuitenkin pieneksi ollen suurimmillaankin vain 1,17 %.

**Taulukko 3.3.** *Follower*-kuorman vaikutus tuloksiin.

Tapaus	Palonkesto aika, kuorman suunta muuttuu [s]	Palonkesto aika, kuorman suunta vakio [s]	Virhe
250x250, 1171kN, 1S	5255	5194	1,17 %
250x250, 1171kN, 2S	3527	3501	0,74 %
250x250, 1171kN, 3S	2733	2722	0,40 %
250x250, 1171kN, 4S	1818	1816	0,11 %



Kuva 3.15. Follower-kuorman vaikutus tuloksiin.

## 3.8 Laskentamenetelmät ja asetukset

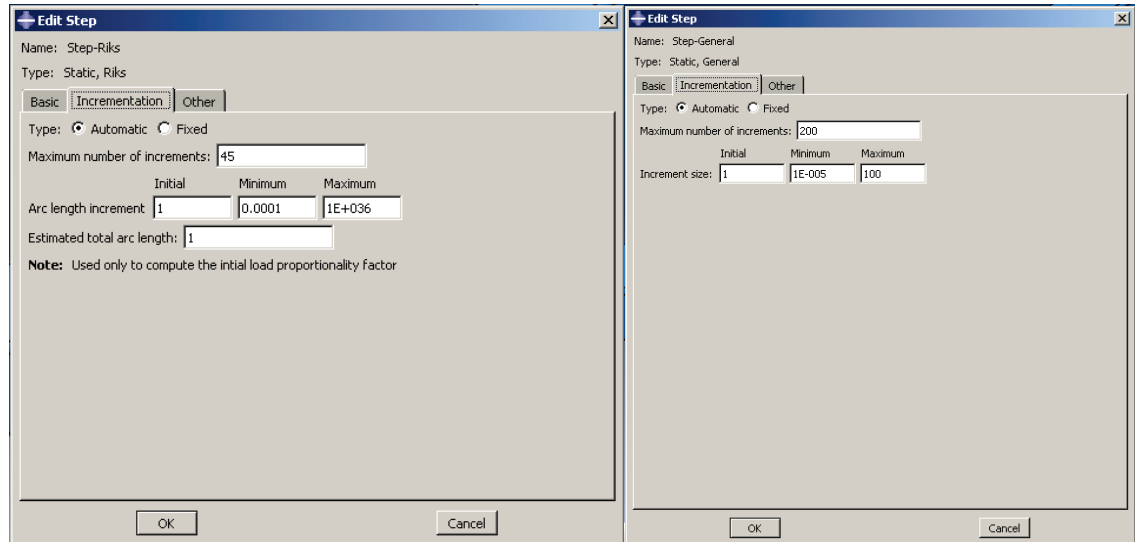
### 3.8.1 Vakiolämpötila-analyysi

Vakiolämpötila-analyysissä normaalivoimakestävyys lasketaan staattisena Abaquksen muokatulla Riksin menetelmällä (*Static, Riks*). Laskenta-asetukset pidetään oletusarvoissa, lukuun ottamatta epälineaarista geometriaa koskevaa asetusta *nlgeom*, joka on laitettu päälle. Kestävyys saadaan selville etsimällä kuormituskertoimen LPF (*Load Proportionality Factor*) maksimiarvo ja kertomalla se siemenkuormalla. Käytetyt laskenta-asetukset näkyvät kuvassa 3.16.

### 3.8.2 Vakiokuormitusanalyysi

Vakiokuormitusanalyysissä käytettiin yleistä staattista kuormitusmenetelmää (*Static, General*). Ennen lämmittämisen alkamista on asetettu *step*, jossa kuormitus nostetaan haluttuun arvoon huoneenlämmössä. Lämmityksen alkaessa kuormituksen maksimijaksi on asetettu 4 tuntia (14400 s), eli se ajanjakso jolle aikaisemmin on laskettu

lämpötila-arvot. Murtotilanteessa pilarin muodonmuutokset kasvavat nopeasti, jolloin analyysi ei pysy enää perässä ja se keskeytyy. Tätä ajanhetkeä voidaan pitää pilarin palonkestoaikana. Murtuminen pitää kuitenkin vielä tarkistaa tutkimalla pilarin keskipisteen aika-siirtymäkuvaajia. Käytetyt laskenta-asetukset näkyvät kuvassa 3.16.



**Kuva 3.16.** Vakiolämpötila- (vasen) ja vakiokuormitusanalyysien (oikea) laskenta-asetukset.

### 3.9 Pilarien kantavuudet neljän sivun tulipalossa

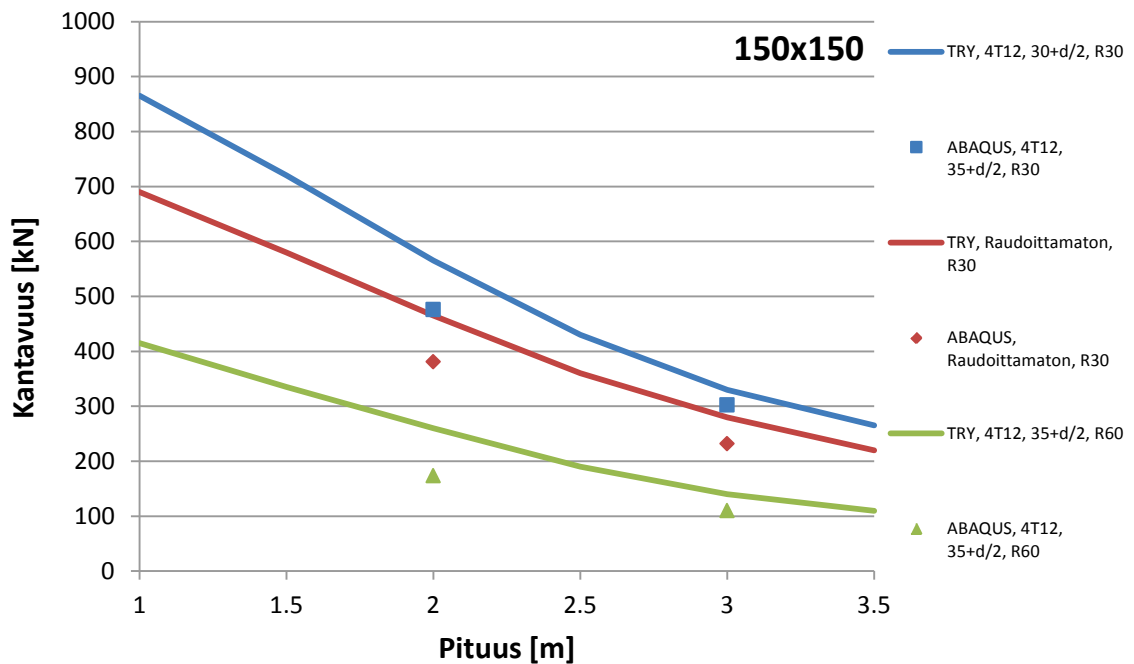
Vakiolämpötila-analyysissä on tutkittu taulukon 3.4 mukaiset tapaukset, jonka tuloksena on saatu pilarien maksimikuormat neljän sivun tulipalossa eri ajanhetkillä. Saatuja tuloksia vertaillaan TRY:n vastaaviin arvoihin [1]. Tässä osiossa tutkittava pilarijoukko on hieman laajempi kuin tutkimuksen pääjoukko; mukana on pääjoukon lisäksi raudoittamattomat pilarit ja 400x400 pilarit normaalia kevyemmällä raudoituksella. 150x150 pilareita ei kuormiteta kuin 30 ja 60 minuutin palon lämpötiloissa. Pidempi raudoittamaton 400x400 liittopilari on poikkeuksellisesti pituudeltaan 5 m eikä 6 m, koska TRY:n vertailuarvot loppuvat tällä pilarilla viiteen metriin.

**Taulukko 3.4.** Vakiolämpötila-analyysissä tutkitut tapaukset.

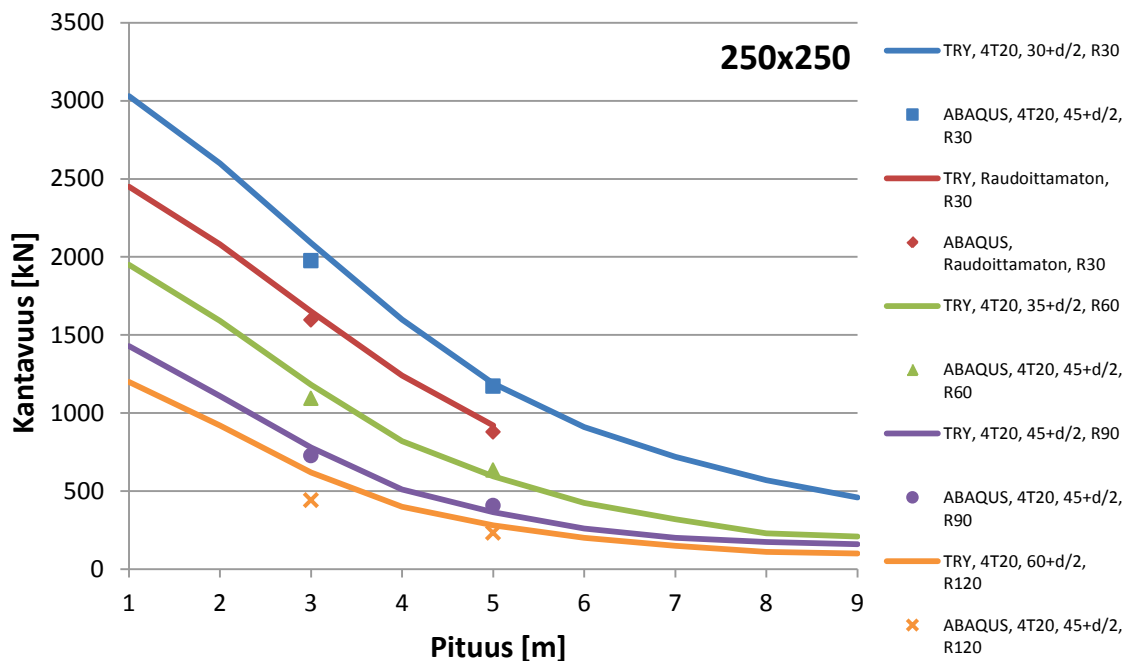
Ajanhetki tulipalossa (lämpötila)	Liittopilarit		
	150x150x5, 2m	250x250x6, 3m	400x400x10, 3m
	150x150x5, 3m	250x250x6, 5m	400x400x10, 6m
Raudoitusvaihtoehdot			
R30	Raudoittamaton, 4T12	Raudoittamaton, 4T20	Raudoittamaton (3m, 5m), 4T20, 8T25
R60	4T12	4T20	4T20, 8T25
R90	-	4T20	4T20, 8T25
R120	-	4T20	4T20, 8T25



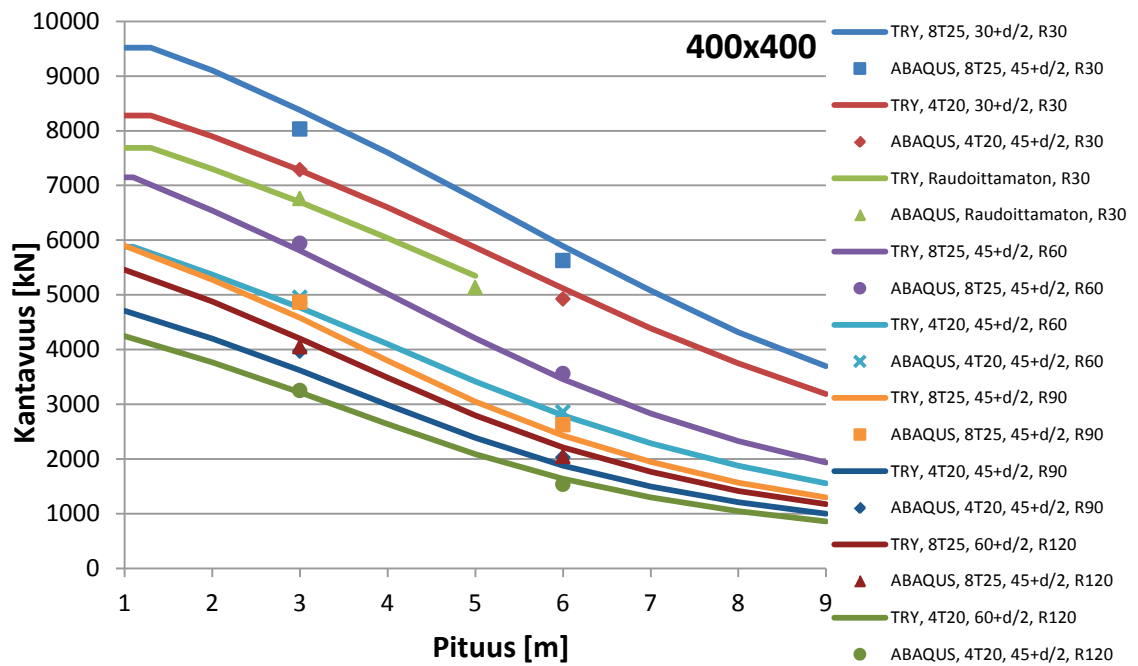
Kuvissa 3.17 – 3.19 on verrattu saatuja tuloksia TRY liittopilarien suunnitteluohjeen mitoituskäyriin [1].



*Kuva 3.17. Vakiolämpötila-analyysillä saadut kantavuudet ja TRY:n mitoituskäyrät 150 mm liittopilareille.*



*Kuva 3.18. Vakiolämpötila-analyysillä saadut kantavuudet ja TRY:n mitoituskäyrät 250 mm liittopilareille.*



**Kuva 3.19.** Vakiolämpötila-analyysillä saadut kantavuudet ja TRY:n mitoituskäyrät 400 mm liittopilareille.

Edellä olevista kuvista nähdään, että suurin osa saaduista kantavuuksista osuu lähelle TRY:n mitoitusohjeen arvoja. Suurin poikkeama esiintyy kahden metrin pituisilla 150x150 pilareilla, joille saatiin TRY:tä jonkin verran pienemmät kantavuudet. Myös muuten tutkimuksen ulkopuolella oleville raudoittamattomille pilareille saadaan järkevät kestävyysarvot. Jatkossa laskettuja kantavuuksia käytetään kuormina vakio-kuormitusanalyysissä. Kantavuudet tutkimuksen kannalta kiinnostavimmille liittopilareille on esitetty myös taulukossa 3.5, josta lihavoidut arvot siirtyvät kuormina seuraaviin analyysihin.

**Taulukko 3.5.** Lasketut liittopilarien maksimikuormat R30-R120 palonkestoajoilla. Li-havoituja arvoja käytetään pilarien kuormina vakiokuormitusanalyysissä.

Liittopilari	R30			R60		
	Kantavuus TRY [kN]	Kantavuus ABAQUS [kN]	Suhde	Kantavuus TRY [kN]	Kantavuus ABAQUS [kN]	Suhde
150x150x5, 4T12, 2m	565	<b>476</b>	84 %	260	<b>174</b>	67 %
150x150x5, 4T12, 3m	330	<b>303</b>	92 %	140	<b>110</b>	79 %
250x250x5, 4T20, 3m	2 090	<b>1 975</b>	94 %	1 180	<b>1 094</b>	93 %
250x250x5, 4T20, 5m	1 190	<b>1 171</b>	98 %	595	<b>634</b>	107 %
400x400x10, 8T25, 3m	8 380	<b>8 031</b>	96 %	5 810	<b>5 942</b>	102 %
400x400x10, 8T25, 6m	5 890	<b>5 624</b>	95 %	3 460	<b>3 564</b>	103 %

Liittopilari	R90			R120		
	Kantavuus TRY [kN]	Kantavuus ABAQUS [kN]	Suhde	Kantavuus TRY [kN]	Kantavuus ABAQUS [kN]	Suhde
150x150x5, 4T12, 2m	-	-	-	-	-	-
150x150x5, 4T12, 3m	-	-	-	-	-	-
250x250x5, 4T20, 3m	780	<b>728</b>	93 %	620	<b>443</b>	71 %
250x250x5, 4T20, 5m	365	<b>406</b>	111 %	280	<b>233</b>	83 %
400x400x10, 8T25, 3m	4 580	<b>4 868</b>	106 %	4 200	<b>4 053</b>	97 %
400x400x10, 8T25, 6m	2 430	<b>2 625</b>	108 %	2 210	<b>2 045</b>	93 %

### 3.10 Vakiokuormitusanalyysin kuormat

Vakiokuormitusanalyysin kuormat on saatu siis vakiolämpötila-analyysin perusteella. Kerätään nämä kuormat taulukkoon 3.6, ja lasketaan liittopilarien käyttöasteet huoneenlämmössä ilman varmuuslukuja puristuksen suhteen standardin SFS-EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.5 mukaisesti [4, s. 58]. Laskelmat on suoritettu liitteessä 4. Tavasta, jolla kuormituksen suuruudet on valittu, johtuen voidaan taulukkoon merkitä myös palonkestoaikatavoite. Tavoiteaikojen suuruudet pitäisi olla lähellä vakiokuormitusanalyysin tuloksena saatavia todellisia palonkestoajoja neljältä sivulta palolle altistuvissa tapauksissa. Tavoiteajat toimivat vain suuntaa antavana arvona, ja kaikki palonkestävyyksien vertailut tullaan suorittamaan tuloksena saatujen palonkestoajojen kesken.

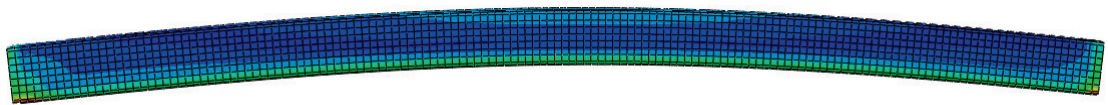
**Taulukko 3.6.** Vakiokuormitusanalyysissä käytettävien liittopilarien palonkesto-aikata-voitteet, kuormat ja käyttöasteet huoneenlämmössä ilman varmuuslukuja.

#	Liittopilari	Palonkesto- aikatavoite	Kuorma [kN]	Käyttöaste [-]
1	150x150, 2m	R30	476	0,27
2	150x150, 2m	R60	174	0,10
3	150x150, 3m	R30	303	0,20
4	150x150, 3m	R60	110	0,07
5	250x250, 3m	R30	1975	0,46
6	250x250, 3m	R60	1094	0,26
7	250x250, 3m	R90	728	0,17
8	250x250, 3m	R120	443	0,10
9	250x250, 5m	R30	1171	0,32
10	250x250, 5m	R60	634	0,18
11	250x250, 5m	R90	406	0,11
12	250x250, 5m	R120	233	0,06
13	400x400, 3m	R30	8031	0,67
14	400x400, 3m	R60	5942	0,50
15	400x400, 3m	R90	4868	0,41
16	400x400, 3m	R120	4053	0,34
17	400x400, 6m	R30	5624	0,52
18	400x400, 6m	R60	3564	0,33
19	400x400, 6m	R90	2625	0,24
20	400x400, 6m	R120	2045	0,19

Edellä olevasta taulukosta voidaan nähdä, että liittopilarien käyttöasteet vaihtelevat melko suurella välillä. Tämä johtuu siitä, että tutkittavana on useampi erikokoinen ja eripituinen liittopilari, mutta palonkesto-aikatavoitteet ovat jokaisella tapauksella samat. Koska paksummat poikkileikkaukset lämpenevät hitaammin sisältä, voidaan käyttöastetta nostaa alittamatta palonkesto-aikatavoitetta. Lisäksi nähdään, että pitkät palonkestoajat vaativat hyvin pieniä käyttöasteita huoneenlämmössä. Pieniä käyttöasteita voidaan tosin joskus hyödyntää rakennusvaiheessa siten, että vain putken oletetaan kantavan, jolloin betonin kovettumista ei tarvitse jäädä odottamaan ja asennus nopeutuu huomattavasti.

## 4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

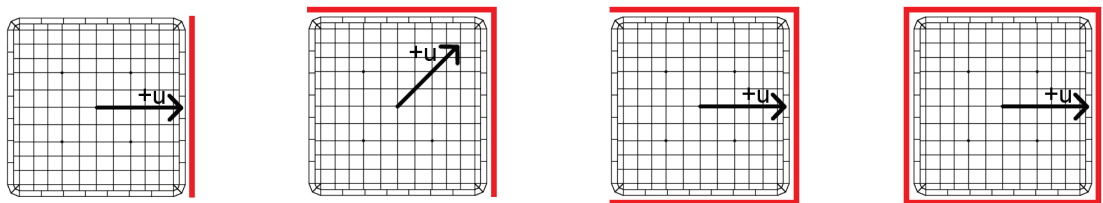
Analyysin tuloksena saadaan kuvan 4.1 mukaisia visualisointeja, joista on mahdollista nähdä pilarin elementtien jännityksiä ja siirtymiä jokaisella lasketulla ajanhetkellä. Kyseisestä näkymästä on kuitenkin hankala päätellä mitään, joten piirretään tästä datasta kaksiulotteisia kuvaajia.



*Kuva 4.1. Tuloksena saatu datan kolmiulotteinen visualisointi Abaquksessa.*

### 4.1 Aika–siirtymäkäyrät

Tarkastellaan vakiokuormitusanalyysien tuloksia piirtämällä jokaisesta lasketusta tapauksesta aika–vaakasiirtymäkuvaajat pilarin keskipisteen suhteen. Merkitään siirtymä positiiviseksi kun se tapahtuu kohti tulipaloa. Kahden sivun tulipaloissa pilari nurjahtaa poikkeuksellisesti diagonaalisesti, joten piirretään näissä tapauksissa siirtymätkin kuvaajiin nurkan yli kuvan 4.2 mukaisesti. Kuvaajiin merkitään näkyviin myös liittopilarin alkukäyryydet, eli siirtymän nollakohta asetetaan ideaalisuoran pilarin keskipisteseen. Tilankäytöllisistä syistä seuraavissa kuvissa ja taulukoissa käytetään lyhenteitä 1S, 2S, 3S, 4S, B1S, B2S, B3S, S1S, S2S ja S3S, jotka kuvaavat eri eristämistapoja ja tulelle altistuvien sivujen määrää kussakin tilanteessa (katso kohta Termit ja niiden määritelmät)

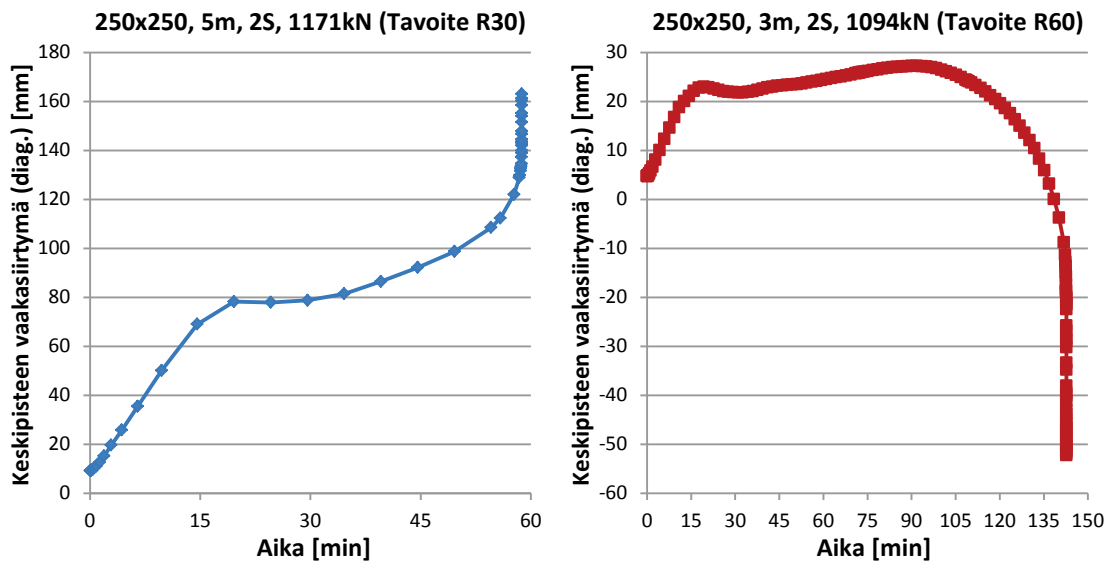


*Kuva 4.2. Aika–siirtymäkuvaajissa esiintyvien pilarien keskipisteiden positiivisten vaakasiirtymien suunnat eri palotilanteissa.*

Vakiokuormitusanalyysillä tarkasteltavia tapauksia tuli yhteensä 192, kun kahdeksaa tapausta ei saatu laskentaan puuttuvien lämpödatojen vuoksi (400x400 pilarit S1S palotilanteessa.). Tapausten suureen määrään vuoksi aika–siirtymäkuvaajat on nähtävillä liitteessä 3. Yhteen kuvaajaan on piirretty aina saman liittopilarin saman palotilanteen käyrät eri kuormituksilla.

Liitteen 3 kuvaajia tarkasteltaessa voidaan huomata, että suuressa osassa tapauksista käyrän tangentti kasvaa itseisarvoltaan erittäin suureksi laskennan loppuvaiheilla, eli pilarin keskipisteessä tapahtuu lyhyen ajan sisällä voimakkaita vaakasiirtymiä. Tämä on selvä merkki pilarin murtumisesta nurjahtaen, ja laskennan loppumispistettä voidaan pitää kyseisen liittopilarin palonkestoajana tarkastellussa palotilanteessa. Kuvassa 4.3 on kaksi esimerkkiä tällaisista murtumispisteen kannalta selvistä tapauksista.

Kuten käyristä nähdään, osa tapauksista nurjahtaa kohti tulipaloa (kuva 4.3 vasen) ja osa tapauksista nurjahtaa tulipalosta poispäin (kuva 4.3 oikea). Tätä ilmiötä on tarkasteltu tarkemmin kappaleessa 4.3. Kaikissa tapauksissa pilari käyristyy alkukäyryyteen verrattuna voimakkaasti lämpölaajenemisen vaikutuksesta, vaikka pilari lopulta nurjaisikin vastakkaiseen suuntaan. Tämä käyristymä on useimmissa tapauksissa 5-10 -kertainen alkukäyryyteen nähden.

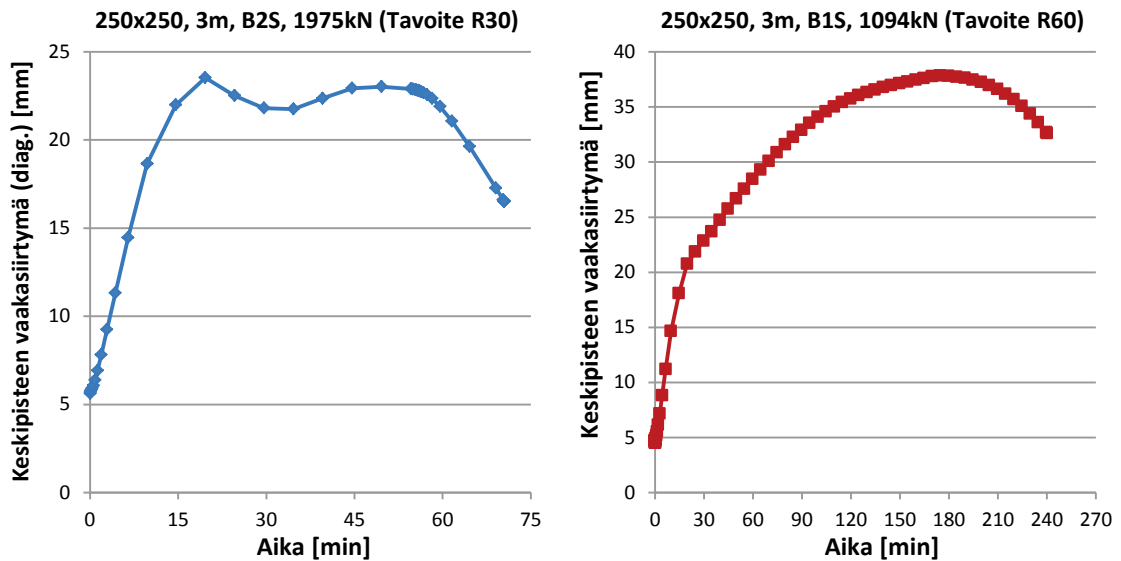


**Kuva 4.3.** Esimerkki saaduista aika–siirtymä käyristä, joista palonkestävyysaika voidaan helposti lukea. Vasen pilari nurjahtaa selvästi kohti tulipaloa ja oikea pilari poispäin paloa.

Kaikista lasketuista tapauksista ei palonkestoajaa kuitenkaan saada määritettyä. Osassa tapauksissa laskenta keskeytyy jostain tuntemattomasta syystä ennen, kuin siirtymät alkavat kasvamaan voimakkaasti, jolloin ei voida sanoa, keskeytyykö laskenta murtumiseen vai onko keskeytymisen syynä laskennassa tapahtunut virhe. Joissain tapauksissa taas pilari kestää kuormitusta yli neljä tuntia. Lämpötila-analyysit on suoritettu vain neljän tunnin ajanjaksolle, joten sen ylittyessä laskenta täytyy keskeyttää. Kuvassa 4.4 on kaksi esimerkkiä tällaisista murtumispisteen kannalta epäselvistä tapauksista. Suurin osa yli neljä tuntia kestävästä tapauksista on yhden sivun palotilanteita, mutta myös osa kahden sivun tilanteista kestää yhtä kauan.

Kaiken kaikkiaan tapauksia, joista palonkestoajaa saatiin määritettyä, tuli yhteensä 156 kappaletta. Tapauksia, joissa palonkestoajaa jäi epäselväksi, on yhteensä 36 kappaletta, joista 30 johtuu lämpödatan loppumisesta ja 6 muista syistä. Selviä tapauksia tul-

laan tarkastelemaan tarkemmin, kun taas epäselvät tapaukset jätetään pienemmälle huomiolle. Murtotapa on kaikissa selvissä tapauksissa nurjahdus.



**Kuva 4.4.** Esimerkki saaduista aika-siirtymäkäyristä, joista palonkestävyysaikaa ei voida varmuudella sanoa. Vasemmassa käyrässä laskenta on keskeytynyt ilman voimakasta siirtymän muutosta käyrän lopussa ja oikeassa käyrässä laskenta on keskeytetty lämpödatan loppumisen vuoksi.

## 4.2 Palonkestoajat

Kerätään kaikista liitteen 3 aika-siirtymäkäyristä palonkestoajat yhteen taulukkoon numero 4.1. Seuraavissa taulukoissa merkitään kuvan 4.4 mukaisista epäselvistä tapauksista saatuja palonkestoajoja punaisella värillä. Taulukkoa tarkastelemalla voidaan muun muassa huomata, että suurimman osan neljältä sivulta palolle altistuvien liittopilarien palonkestoajoista ovat lähellä niiden tavoiteaikoja, joten kuormien suuruuden valinta on onnistunut melko hyvin. Eniten tavoitteista poikkeavat 400x400 pilarien R90 ja R120 tapaukset, joissa jäädyään jostain syystä jonkin verran tavoitteen alle.

**Taulukko 4.1.** Saadut liittopilarien palonkestoajat eri palotilanteissa tietyillä kuormilla. Epäselvät tapaukset on merkitty punaisella.

#	Liittopilari	Tavoite- aika	Kuorma [kN]	Palonkestoaja [min]									
				4S	3S	2S	1S	B3S	B2S	B1S	S3S	S2S	S1S
1	150x150, 2m	R30	476	32.2	46.2	59.7	114.6	49.0	76.5	132.7	43.5	55.8	111.1
2	150x150, 2m	R60	174	65.4	89.3	113.2	175.4	98.3	154.2	212.1	84.9	110.1	170.0
3	150x150, 3m	R30	303	29.8	36.5	42.6	111.0	35.7	42.2	105.9	36.4	41.3	86.1
4	150x150, 3m	R60	110	72.6	72.4	108.1	212.0	78.0	139.0	240.0	71.8	103.9	183.5
5	250x250, 3m	R30	1975	31.2	47.7	77.7	144.2	47.2	70.5	186.2	47.1	73.3	160.2
6	250x250, 3m	R60	1094	56.9	82.2	142.7	240.0	87.9	179.0	240.0	80.1	137.5	237.6
7	250x250, 3m	R90	728	85.4	110.6	177.9	240.0	114.0	230.2	240.0	109.6	176.5	240.0
8	250x250, 3m	R120	443	119.3	141.6	232.4	240.0	147.1	240.0	240.0	140.1	226.3	240.0
9	250x250, 5m	R30	1171	30.3	45.6	58.8	87.6	44.7	52.3	94.8	44.6	64.7	87.6
10	250x250, 5m	R60	634	56.3	65.7	143.1	205.5	65.0	128.8	240.0	65.7	127.7	205.5
11	250x250, 5m	R90	406	89.7	119.2	224.8	240.0	106.4	169.9	240.0	103.5	215.6	240.0
12	250x250, 5m	R120	233	127.1	146.1	240.0	240.0	193.9	240.0	240.0	144.4	238.2	240.0
13	400x400, 3m	R30	8031	27.4	34.8	56.1	125.8	35.4	57.7	136.6	34.4	55.0	-
14	400x400, 3m	R60	5942	55.7	65.7	124.3	240.0	68.8	130.4	240.0	63.8	116.2	-
15	400x400, 3m	R90	4868	77.3	81.5	173.4	240.0	79.6	185.7	240.0	91.5	165.4	-
16	400x400, 3m	R120	4053	91.8	85.5	217.3	240.0	85.8	235.6	240.0	98.8	205.2	-
17	400x400, 6m	R30	5624	29.1	42.6	79.2	107.3	39.8	94.8	128.5	42.0	75.4	-
18	400x400, 6m	R60	3564	55.1	82.7	174.3	240.0	97.1	219.5	240.0	80.2	168.7	-
19	400x400, 6m	R90	2625	75.4	121.0	239.6	240.0	131.6	240.0	240.0	118.4	239.3	-
20	400x400, 6m	R120	2045	102.1	155.7	240.0	240.0	158.1	240.0	240.0	153.4	240.0	-

Vertailun helpottamiseksi jaetaan jokainen palonkestoaja saman pilarin neljän sivun palonkestoajalla, jolloin saadaan suhteelliset palonkestävyydet neljän sivun tilanteeseen verrattuna. Saadut arvot on esitetty taulukossa 4.2. Jos joko jakaja tai jaettava palonkestoaja on epäselvä, on saatu suhde myös epäselvä, ja sitä merkitään punaisella värillä. Taulukosta voidaan nähdä, että suurin osa pilareista kestää kauemmin kuin neljän sivun palon vertailuarvo, mutta mukana on vähän myös tapauksia, joissa suhteellinen palonkestävyysaika menee alle yhden.



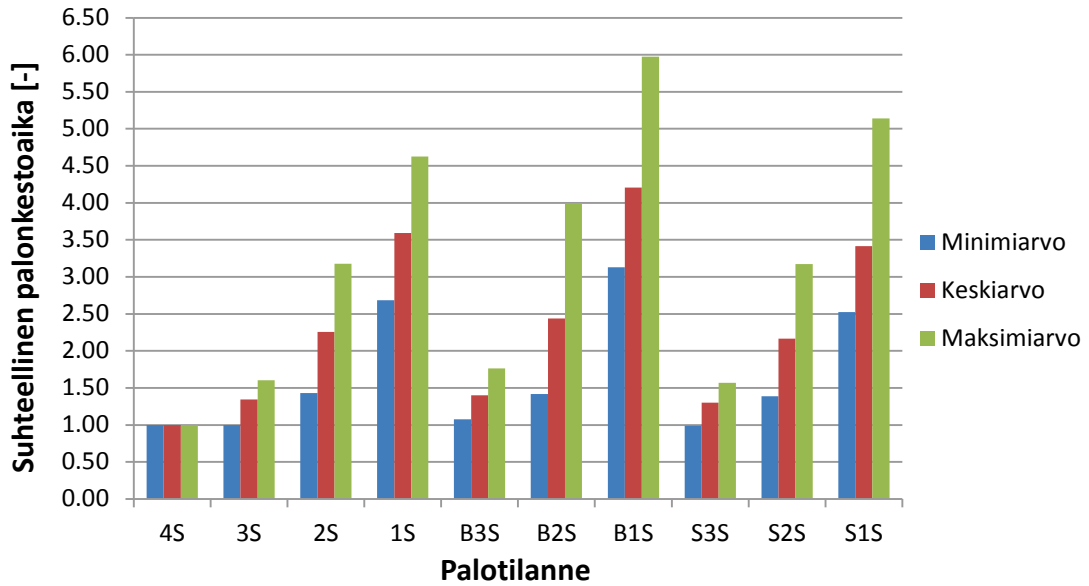
**Taulukko 4.2.** Liittopilarien suhteelliset palonkestoajat neljän sivun palotilanteeseen verrattuna. Epäselvät tapaukset on merkitty punaisella.

#	Liittopilari	Tavoite-aika	Kuorma [kN]	Suhde 4S palonkestoajaan [-]									
				4S	3S	2S	1S	B3S	B2S	B1S	S3S	S2S	S1S
1	150x150, 2m	R30	476	1.00	1.43	1.85	3.56	1.52	2.37	4.12	1.35	1.73	3.45
2	150x150, 2m	R60	174	1.00	1.37	1.73	2.68	1.50	2.36	3.24	1.30	1.68	2.60
3	150x150, 3m	R30	303	1.00	1.23	1.43	3.73	1.20	1.42	3.56	1.22	1.39	2.89
4	150x150, 3m	R60	110	1.00	1.00	1.49	2.92	1.07	1.91	3.30	0.99	1.43	2.53
5	250x250, 3m	R30	1975	1.00	1.53	2.49	4.63	1.51	2.26	5.97	1.51	2.35	5.14
6	250x250, 3m	R60	1094	1.00	1.44	2.51	4.22	1.54	3.15	4.22	1.41	2.42	4.18
7	250x250, 3m	R90	728	1.00	1.29	2.08	2.81	1.33	2.70	2.81	1.28	2.07	2.81
8	250x250, 3m	R120	443	1.00	1.19	1.95	2.01	1.23	2.01	2.01	1.17	1.90	2.01
9	250x250, 5m	R30	1171	1.00	1.50	1.94	2.89	1.47	1.72	3.13	1.47	2.14	2.89
10	250x250, 5m	R60	634	1.00	1.17	2.54	3.65	1.15	2.29	4.26	1.17	2.27	3.65
11	250x250, 5m	R90	406	1.00	1.33	2.51	2.68	1.19	1.89	2.68	1.15	2.40	2.68
12	250x250, 5m	R120	233	1.00	1.15	1.89	1.89	1.53	1.89	1.89	1.14	1.87	1.89
13	400x400, 3m	R30	8031	1.00	1.27	2.05	4.60	1.30	2.11	4.99	1.26	2.01	-
14	400x400, 3m	R60	5942	1.00	1.18	2.23	4.31	1.23	2.34	4.31	1.15	2.09	-
15	400x400, 3m	R90	4868	1.00	1.05	2.24	3.11	1.03	2.40	3.11	1.18	2.14	-
16	400x400, 3m	R120	4053	1.00	0.93	2.37	2.62	0.93	2.57	2.62	1.08	2.24	-
17	400x400, 6m	R30	5624	1.00	1.46	2.72	3.69	1.37	3.26	4.41	1.44	2.59	-
18	400x400, 6m	R60	3564	1.00	1.50	3.17	4.36	1.76	3.99	4.36	1.46	3.06	-
19	400x400, 6m	R90	2625	1.00	1.60	3.18	3.18	1.74	3.18	3.18	1.57	3.17	-
20	400x400, 6m	R120	2045	1.00	1.53	2.35	2.35	1.55	2.35	2.35	1.50	2.35	-

Kerätään edellä olevasta taulukosta selvien tapausten miniarvo, maksimiarvo, keskiarvo, keskihajonta ja lukumäärä jokaisessa palotilanteessa uuteen taulukkoon 4.3 ja piirretään niistä kuvaaja 4.5.

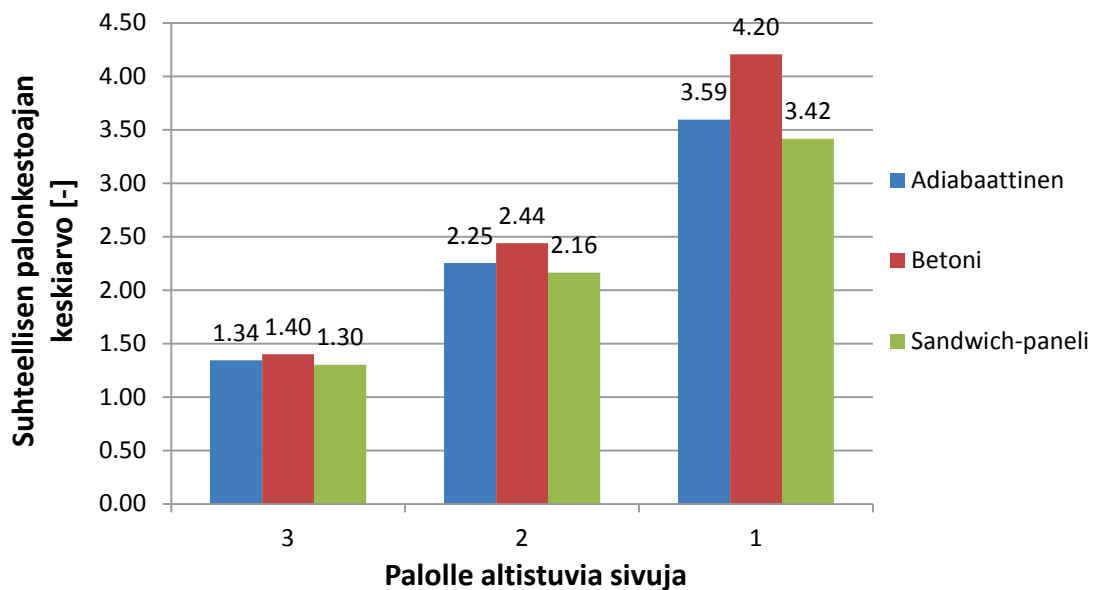
**Taulukko 4.3.** Selvien tapausten suhteellisten palonkestoajojen miniarvot, keskiarvot, maksimiarvot, keskihajonnat ja lukumäärät.

Selvät tapaukset	4S	3S	2S	1S	B3S	B2S	B1S	S3S	S2S	S1S
Minimiarvo	1.00	1.00	1.43	2.68	1.07	1.42	3.13	0.99	1.39	2.53
Keskiarvo	1.00	1.34	2.25	3.59	1.40	2.44	4.20	1.30	2.16	3.42
Maksimiarvo	1.00	1.60	3.18	4.63	1.76	3.99	5.97	1.57	3.17	5.14
Keskihajonta	0.00	0.17	0.48	0.70	0.20	0.63	1.02	0.16	0.46	0.90
Alkioiden lukumäärä	20	18	19	9	18	18	7	19	20	8



**Kuva 4.5.** Selvien tapausten suhteellisten palonkesto-aikojen miniarvot, keskiarvot ja maksimi-arvot.

Yllä olevasta taulukosta ja kuvaajasta nähdään, että kolmen sivun tulipalossa suhteellisen kestävyys miniarvot menevät pahimmillaan alle yhden, mutta suhteellisten palonkesto-aikojen keskiarvot ovat kuitenkin kaikissa tilanteissa reilusti suurempia kuin yksi. Kolmen sivun tulipalossa pilarit kestävät keskimäärin noin 1,34-kertaisesti ja kahden sivun palossa keskimäärin noin 2,25-kertaisesti verrattuna neljän sivun paloon. Yhden sivun palo sen sijaan kestää pienimmilläänkin yli 2,5-kertaisesti, suurimmillaan lähes kuusinkertaisesti ja keskimäärin noin 3,59-kertaisesti normaalitilanteeseen verrattuna. Taulukosta nähdään myös, että tuloksissa on hajontaa jonkin verran.



**Kuva 4.6.** Eri eristystapojen vaikutus suhteelliseen palonkestävyyteen.

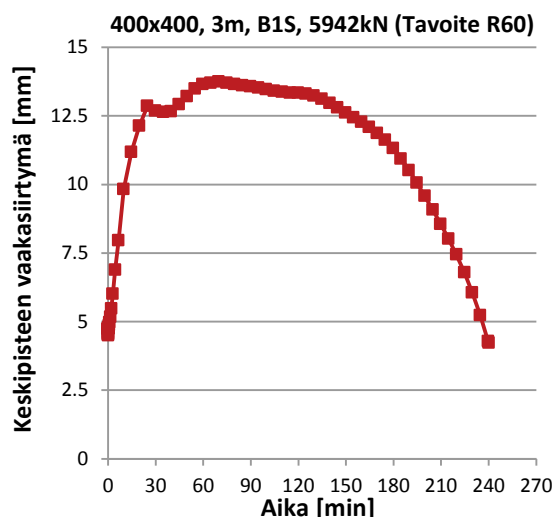
Vertaillaan vielä eri eristämistapoja ottamalla taulukon 4.2 selvistä arvoista keskiarvot jokaisesta sarakkeesta ja piirtämällä kuva 4.6. Nähdään, että palonkestävyydet

käyttäytyvät kuten lämpötila-analyysin tuloksista voitiin ennustaa, eli betonia vasten olevat pilarit kestävät kuormitusta pisimpään, adiabaattisesti eristetyt pilarit toiseksi eniten ja Sandwich-paneeleita vasten olevien pilarien vähiten. Adiabaattisesti eristettyjen ja Sandwich-paneeleita vasten olevien pilarien palonkestoajat ovat melko lähellä toisiaan.

Yang, Liu ja Zhang saivat tutkimuksessaan tulokseksi kolmen sivun palolle 1,1-kertaisen kestävyuden, kahden sivun palolle 2,6-kertaisen kestävyuden ja yhden sivun palolle 4,8-kertaisen kestävyuden [13], kun tässä tutkimuksessa vastaavat luvut siis olivat keskiarvoltaan 1,34, 2,25 ja 3,59. Yangin et al. kahden sivun palossa palolle altistui-  
vat kuitenkin pilarin vastakkaiset sivut, eivätkä yhden nurkan sivut, joten sen tapauksen tulokset eivät ole kovinkaan vertailukelpoisia. Lisäksi he käyttivät tutkimuksessaan rau-doittamatonta suorakaidepilaria (ei neliö), joka muotonsa ansiosta kuumenee siis yhden sivun tulipalossa pienemmältä ja kolmen sivun palossa suuremmalta suhteelliselta pinta-alalta (kuva 1.6) kuin tässä tutkimuksessa, mikä osaltaan selittää heidän suurempaa 1S/4S-kestävyyttä ja pienempää 3S/4S-kestävyyttä.

### 4.3 Nurjahdussuunnat

Liitteen 3 aika-siirtymäkuvaajista huomattiin, että osa pilareista nurjahtaa murtuessaan kohti tulipaloa ja osa pilareista nurjahtaa pois päin tulipalosta kuvan 4.3 mukaisesti. Tarkastellaan tätä ilmiötä tarkemmin keräämällä taulukkoon 4.4 kaikki nurjahdussuunnat pilareista, joista sen määrittäminen on mahdollista. Lasketaan myös pilarikohtaisesti kuinka monta nurjahdusta tapahtuu kuhunkin suuntaan. Osalle pilareista, joille ei voitu määrittää tarkkaa palonkestoaikaa, voidaan kuitenkin päätellä sen nurjahdussuunta suurella todennäköisyydellä. Kuvassa 4.7 on esimerkki tällaisesta tapauksesta.



**Kuva 4.7.** Esimerkki tapauksesta, josta tarkkaa palonkestoaikaa ei voida juuri ja juuri määrittää lämpödatan loppumisen vuoksi, mutta josta nurjahdussuunta voidaan päätellä suurella todennäköisyydellä (poispäin palosta).

**Taulukko 4.4.** Pilarien nurjahdussuunnat. *K* = pilari nurjahtaa kohti tulipaloo, *P* = pilari nurjahtaa pois päin tulipalosta. Tapaukset, joille ei voitu määrittää tarkkaa palonkesto-aikaa, on merkitty punaisella.

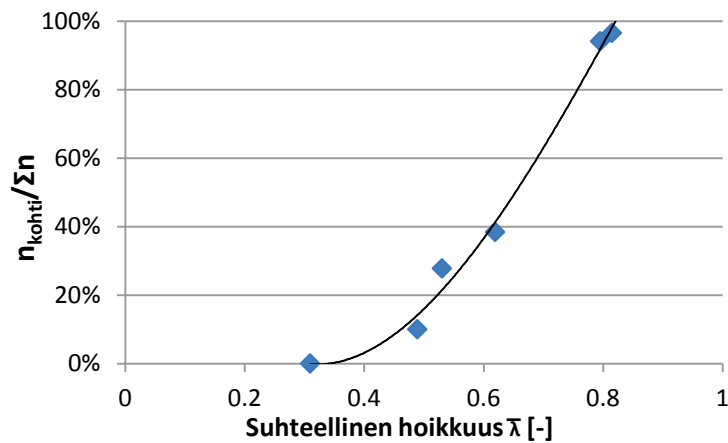
#	Liittopilari	Tavoite- aika	Kuorma [kN]	Nurjahdussuunta									n <sub>kohti</sub> [-]	n <sub>pois</sub> [-]
				3S	2S	1S	B3S	B2S	B1S	S3S	S2S	S1S		
1	150x150, 2m	R30	476	K	P	P	K	P	P	K	P	P	3	6
2	150x150, 2m	R60	174	K	P	P	P	P	P	K	P	P	2	7
3	150x150, 3m	R30	303	K	K	K	K	K	K	K	K	K	9	0
4	150x150, 3m	R60	110	K	K	P	K	K	-	K	K	K	7	1
5	250x250, 3m	R30	1975	K	P	P	K	P	P	K	P	P	3	6
6	250x250, 3m	R60	1094	P	P	P	P	P	P	P	P	P	0	9
7	250x250, 3m	R90	728	P	P	-	P	P	-	P	P	P	0	7
8	250x250, 3m	R120	443	P	P	-	P	-	-	P	P	-	0	5
9	250x250, 5m	R30	1171	K	K	K	K	K	K	K	K	K	9	0
10	250x250, 5m	R60	634	K	K	K	K	K	K	K	K	K	9	0
11	250x250, 5m	R90	406	K	K	-	K	K	-	K	K	-	6	0
12	250x250, 5m	R120	233	K	-	-	P	K	-	K	K	-	4	1
13	400x400, 3m	R30	8031	P	P	P	P	P	P	P	P	-	0	8
14	400x400, 3m	R60	5942	P	P	P	P	P	P	P	P	-	0	8
15	400x400, 3m	R90	4868	P	P	P	P	P	P	P	P	-	0	8
16	400x400, 3m	R120	4053	P	P	-	P	P	-	P	P	-	0	6
17	400x400, 6m	R30	5624	K	P	K	K	P	K	K	P	-	5	3
18	400x400, 6m	R60	3564	P	P	-	P	P	-	K	P	-	1	5
19	400x400, 6m	R90	2625	P	P	-	P	K	-	P	P	-	1	5
20	400x400, 6m	R120	2045	P	K	-	P	K	-	P	K	-	3	3

Edellä olevasta taulukosta voidaan päätellä, että liittopilarin nurjahdussuunnalla tutkituissa tilanteissa on yhteys pilarin hoikkuuden kanssa. Näyttää siltä, että pilarit, joilla on suuri hoikkuus nurjahtavat useammin kohti palavaa sivua kuin pilarit joilla on pienempi hoikkuus. Lasketaan liittopilareille suhteelliset hoikkuudet  $\bar{\lambda}$  huoneenlämmössä standardin SFS-EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.3 mukaisesti [4, s. 57]. Laskelmat ovat näkyvillä liitteessä 4. Lasketaan myös kohti paloa ja pois päin palosta nurjahtavien tapausten suhteelliset frekvenssit jokaisen pilarin suhteen.

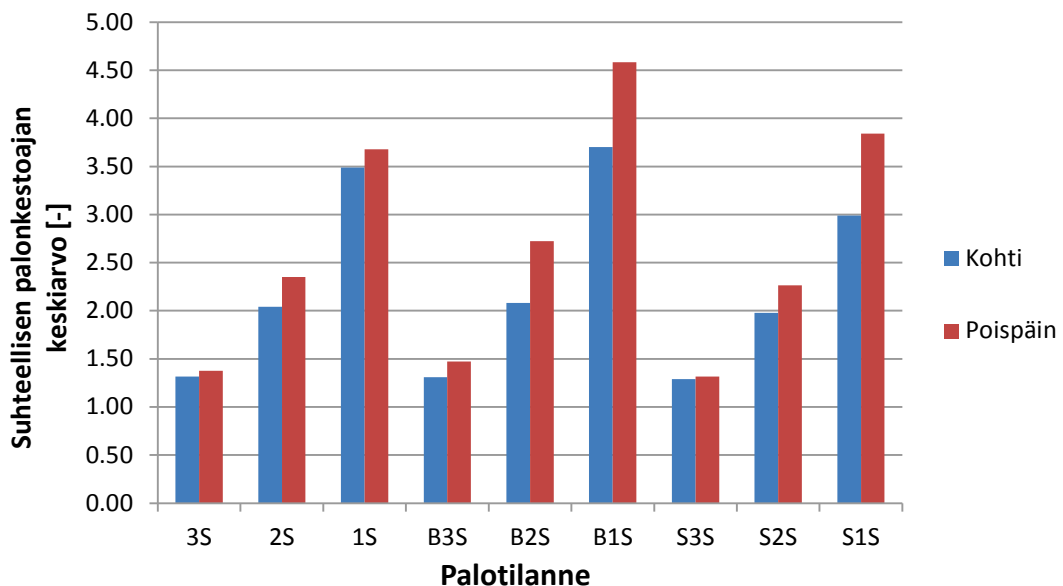
Vertaillaan hoikkuuksia ja nurjahdussuuntia taulukon 4.5 ja kuvan 4.8 avulla. Kyseisestä kuvasta ja taulukosta nähdään, että kun pilarin suhteellinen hoikkuus ylittää arvon noin 0,8 lähes kaikki tapaukset nurjahtavat kohti tulipaloo, kun taas hoikkuuden noin 0,4 alittavat pilarit nurjahtavat pois päin palosta. Välillä 0,4-0,8 suunnan todennäköisyys näyttää muuttuvan melko lineaarisesti pois päin nurjahduksesta kohti nurjahdukseen.

**Taulukko 4.5.** Liittopilarien suhteelliset hoikkuudet, nurjahdussuunnat ja nurjahdussuuntien suhteelliset frekvenssit tutkituissa tapauksissa.

Liittopilari	$\bar{\lambda}$	$n_{\text{kohti}}$	$n_{\text{pois}}$	$\Sigma n$	$n_{\text{kohti}}/\Sigma n$	$n_{\text{pois}}/\Sigma n$
250x250, 5m	0.81	28	1	29	97 %	3 %
150x150, 3m	0.80	16	1	17	94 %	6 %
400x400, 6m	0.62	10	16	26	38 %	62 %
150x150, 2m	0.53	5	13	18	28 %	72 %
250x250, 3m	0.49	3	27	30	10 %	90 %
400x400, 3m	0.31	0	30	30	0 %	100 %



**Kuva 4.8.** Pilarien suhteelliset hoikkuudet kohtinurjahduksen suhteellisen frekvenssin funktiona.



**Kuva 4.9.** Suhteellisten palonkestoajojen keskiarvot nurjahdussuuntien mukaan tutkituissa palotilanteissa.

Tarkastellaan vielä nurjahdussuunnan vaikutusta suhteelliseen palonkestoaikaan yhdistämällä taulukkojen 4.2 ja 4.4 tiedot ja piirtämällä kuva 4.9. Kuvasta huomataan,

että kaikki pois päin palosta nurjahtavat tapaukset kestävät keskimäärin hieman kauemmin kuin kohti paloa nurjahtavat tapaukset. Yksi syy tähän voi olla se, että pilarien alkukäyryys oli kaikissa tilanteissa kohti paloa, joka heikentää kohti paloa nurjahtavan tapauksen kestävyyttä, mutta vastaavasti lisää hieman pois päin nurjahtavan pilarin kestävyyttä. Tarkastellaan tätä tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

Todellisuudessa seinät osittain estävät pilarin nurjahdusta niitä kohti (pois päin palosta), ja esimerkiksi betoniseinillä tämä tukivaikutus voi olla merkittävä. Tätä ilmiötä ei kuitenkaan tarkastella tässä tutkimuksessa.

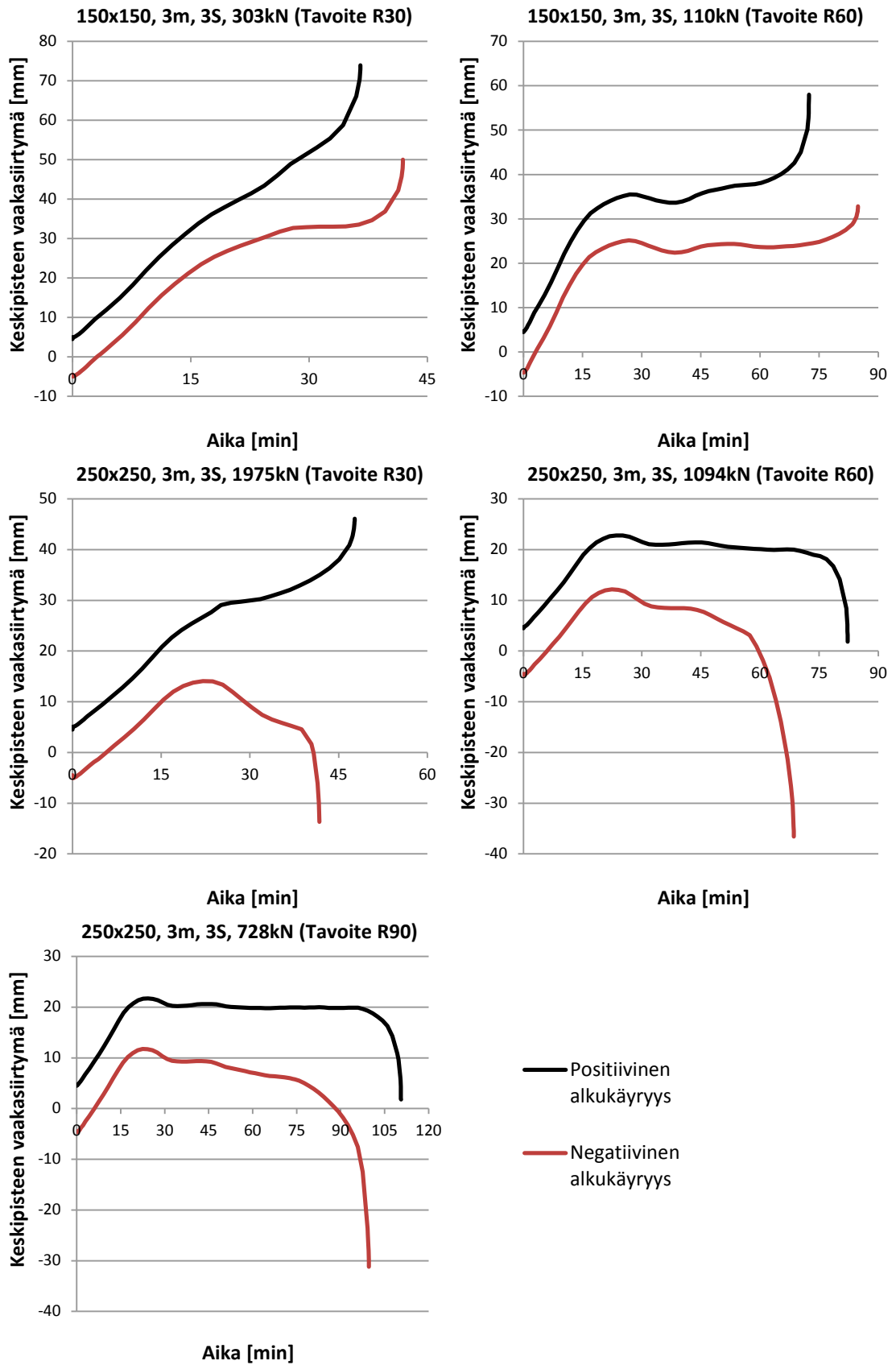
#### 4.4 Alkukäyryyden suunta

Tarkastellaan alkukäyryyden suunnan vaikutusta tuloksiin laskemalla muutama edellä käsitelty tapaus uudestaan negatiivisella alkukäyryydellä. Saadut palonkestävyydet ovat näkyvillä taulukossa 4.6 ja aika–siirtymäkäyrät kuvassa 4.10.

**Taulukko 4.6.** Alkukäyryyden suunnan vaikutus palonkestoaikoihin ja nurjahdussuuntaan.

Liittopilari	Tavoite-aika	Kuorma [kN]	Palonkestoaika [min]		Nurjahdussuunta	
			Alkukäyryys +4.5	Alkukäyryys -4.5	Alkukäyryys +4.5	Alkukäyryys -4.5
150x150, 3m	R30	303	36.5	41.9	Kohti	Kohti
150x150, 3m	R60	110	72.4	84.8	Kohti	Kohti
250x250, 3m	R30	1975	47.7	41.8	Kohti	Pois
250x250, 3m	R60	1094	82.2	68.6	Pois	Pois
250x250, 3m	R90	728	110.6	99.6	Pois	Pois

Saaduista tuloksista nähdään, että alkukäyryyden suunnalla on huomattava vaikutus pilarien käyttäytymiseen. Negatiivisella alkukäyryydellä kohti paloa nurjahtavat liittopilarit kestävät selvästi pidempään, ja pois päin nurjahtavat pilarit puolestaan kestävät selkeästi vähemmän. Lisäksi yksi tapaus jopa vaihtaa nurjahdussuuntaa alkukäyryyden suunnan mukaan.



**Kuva 4.10.** Alkukäyryyden suunnan vaikutus aika-siirtymäkäyriin.

Optimaalisin tilanne olisi laskea nyt jokainen käsitelty tapaus uudestaan negatiivisella alkukäyryydellä, ja valita palonkestoajoista aina pienempi. Tähän ei ole kuitenkaan

resursseja, joten tyydytään vain määrittämään pois päin palosta nurjahtavien pilareiden palonkestoajoille pienennyskertoimet, joilla pyritään likimääräisesti kumoamaan positiivisen alkukäyryyden palonkestoaikaa suurentava vaikutus. Määritetään pienennyskertoimet siten, että palonkestoajojen keskiarvot saadaan samoiksi nurjahdussuunnasta riippumatta eli niin, että kuvan 4.9 pylväävät ovat keskenään aina yhtä suuria. Pienennyskertoimet ovat tällöin taulukon 4.11 mukaiset.

**Taulukko 4.7.** Pienennyskertoimet pois päin palosta nurjahtavien tapausten palonkestoajoille.

	3S	2S	1S	B3S	B2S	B1S	S3S	S2S	S1S
$k_{red}$	1.05	1.15	1.05	1.12	1.31	1.24	1.02	1.14	1.28

Jaetaan taulukon 4.1 pois päin palosta nurjahtavien tapausten arvot pienennyskerroimilla, ja merkitään saadut ajat taulukkoon 4.8. Tehdään lisäksi taulukko 4.2, taulukko 4.3 ja kuvaaja 4.5 uudestaan pienennetyillä arvoilla (taulukot 4.9-4.10, kuva 4.11).

**Taulukko 4.8.** Pienennyskerroimilla jaetut palonkestoajat. Epäselvät tapaukset on merkitty punaisella.

#	Liittopilari	Tavoite-aika	Kuorma [kN]	Palonkesto aika [min]									
				4S	3S	2S	1S	B3S	B2S	B1S	S3S	S2S	S1S
1	150x150, 2m	R30	476	32.2	46.2	51.9	108.8	49.0	58.5	107.2	43.5	48.7	86.5
2	150x150, 2m	R60	174	65.4	89.3	98.3	166.4	87.5	117.9	171.2	84.9	96.2	132.3
3	150x150, 3m	R30	303	29.8	36.5	42.6	111.0	35.7	42.2	105.9	36.4	41.3	86.1
4	150x150, 3m	R60	110	72.6	72.4	108.1	201.1	78.0	139.0	240.0	71.8	103.9	183.5
5	250x250, 3m	R30	1975	31.2	47.7	67.5	136.8	47.2	53.9	150.3	47.1	64.0	124.7
6	250x250, 3m	R60	1094	56.9	78.6	124.0	227.7	78.2	136.8	193.8	78.6	120.1	184.9
7	250x250, 3m	R90	728	85.4	105.8	154.6	240.0	101.4	176.0	240.0	107.6	154.2	186.8
8	250x250, 3m	R120	443	119.3	135.4	201.9	240.0	130.9	240.0	240.0	137.5	197.6	240.0
9	250x250, 5m	R30	1171	30.3	45.6	58.8	87.6	44.7	52.3	94.8	44.6	64.7	87.6
10	250x250, 5m	R60	634	56.3	65.7	143.1	205.5	65.0	128.8	240.0	65.7	127.7	205.5
11	250x250, 5m	R90	406	89.7	119.2	224.8	240.0	106.4	169.9	240.0	103.5	215.6	240.0
12	250x250, 5m	R120	233	127.1	146.1	240.0	240.0	172.6	240.0	240.0	144.4	238.2	240.0
13	400x400, 3m	R30	8031	27.4	33.3	48.7	119.4	31.5	44.1	110.3	33.7	48.0	-
14	400x400, 3m	R60	5942	55.7	62.8	108.0	227.7	61.2	99.7	193.8	62.6	101.4	-
15	400x400, 3m	R90	4868	77.3	77.9	150.6	227.7	70.8	142.0	193.8	89.7	144.4	-
16	400x400, 3m	R120	4053	91.8	81.8	188.8	240.0	76.4	180.1	240.0	97.0	179.2	-
17	400x400, 6m	R30	5624	29.1	42.6	68.8	107.3	39.8	72.5	128.5	42.0	65.8	-
18	400x400, 6m	R60	3564	55.1	79.1	151.5	240.0	86.4	167.8	240.0	80.2	147.3	-
19	400x400, 6m	R90	2625	75.4	115.7	208.1	240.0	117.2	240.0	240.0	116.2	209.0	-
20	400x400, 6m	R120	2045	102.1	148.9	240.0	240.0	140.7	240.0	240.0	150.5	240.0	-

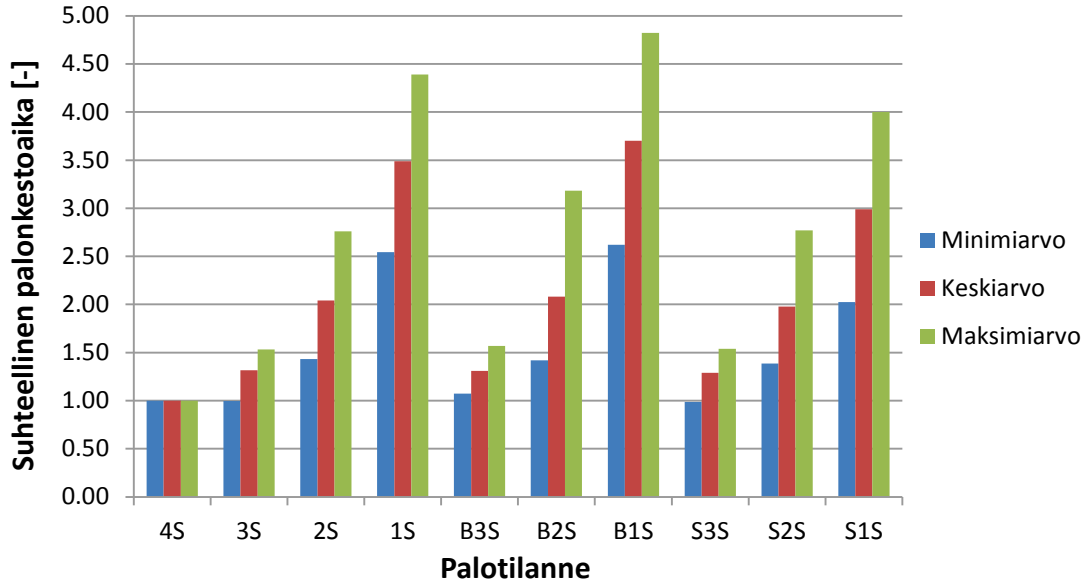


**Taulukko 4.9.** Pienennetyt liittopilarien suhteelliset palonkestoajat neljän sivun palotilanteeseen verrattuna. Epäselvät tapaukset on merkitty punaisella.

#	Liittopilari	Tavoite-aika	Kuorma [kN]	Suhde 4S palonkestoajaan [-]									
				4S	3S	2S	1S	B3S	B2S	B1S	S3S	S2S	S1S
1	150x150, 2m	R30	476	1.00	1.43	1.61	3.38	1.52	1.81	3.33	1.35	1.51	2.68
2	150x150, 2m	R60	174	1.00	1.37	1.50	2.54	1.34	1.80	2.62	1.30	1.47	2.02
3	150x150, 3m	R30	303	1.00	1.23	1.43	3.73	1.20	1.42	3.56	1.22	1.39	2.89
4	150x150, 3m	R60	110	1.00	1.00	1.49	2.77	1.07	1.91	3.30	0.99	1.43	2.53
5	250x250, 3m	R30	1975	1.00	1.53	2.16	4.39	1.51	1.73	4.82	1.51	2.05	4.00
6	250x250, 3m	R60	1094	1.00	1.38	2.18	4.00	1.37	2.40	3.41	1.38	2.11	3.25
7	250x250, 3m	R90	728	1.00	1.24	1.81	2.81	1.19	2.06	2.81	1.26	1.81	2.19
8	250x250, 3m	R120	443	1.00	1.14	1.69	2.01	1.10	2.01	2.01	1.15	1.66	2.01
9	250x250, 5m	R30	1171	1.00	1.50	1.94	2.89	1.47	1.72	3.13	1.47	2.14	2.89
10	250x250, 5m	R60	634	1.00	1.17	2.54	3.65	1.15	2.29	4.26	1.17	2.27	3.65
11	250x250, 5m	R90	406	1.00	1.33	2.51	2.68	1.19	1.89	2.68	1.15	2.40	2.68
12	250x250, 5m	R120	233	1.00	1.15	1.89	1.89	1.36	1.89	1.89	1.14	1.87	1.89
13	400x400, 3m	R30	8031	1.00	1.22	1.78	4.36	1.15	1.61	4.03	1.23	1.75	-
14	400x400, 3m	R60	5942	1.00	1.13	1.94	4.09	1.10	1.79	3.48	1.12	1.82	-
15	400x400, 3m	R90	4868	1.00	1.01	1.95	2.95	0.92	1.84	2.51	1.16	1.87	-
16	400x400, 3m	R120	4053	1.00	0.89	2.06	2.62	0.83	1.96	2.62	1.06	1.95	-
17	400x400, 6m	R30	5624	1.00	1.46	2.36	3.69	1.37	2.49	4.41	1.44	2.26	-
18	400x400, 6m	R60	3564	1.00	1.44	2.75	4.36	1.57	3.05	4.36	1.46	2.68	-
19	400x400, 6m	R90	2625	1.00	1.53	2.76	3.18	1.55	3.18	3.18	1.54	2.77	-
20	400x400, 6m	R120	2045	1.00	1.46	2.35	2.35	1.38	2.35	2.35	1.47	2.35	-

**Taulukko 4.10.** Selvien tapausten suhteellisten palonkestoajojen miniarvot, keskiarvot, maksimiarvot, keskihajonnat ja lukumäärät. Arvoissa on käytetty pienennyskertoimia.

Selvät tapaukset	4S	3S	2S	1S	B3S	B2S	B1S	S3S	S2S	S1S
Minimiarvo	1.00	1.00	1.43	2.54	1.07	1.42	2.62	0.99	1.39	2.02
Keskiarvo	1.00	1.32	2.04	3.49	1.31	2.08	3.70	1.29	1.98	2.99
Maksimiarvo	1.00	1.53	2.76	4.39	1.57	3.18	4.82	1.54	2.77	4.00
Keskihajonta	0.00	0.16	0.42	0.66	0.17	0.47	0.77	0.16	0.40	0.63
Alkioiden lukumäärä	20	18	19	9	18	18	7	19	20	8



*Kuva 4.11. Selvien tapausten suhteellisten palonkesto-aikojen miniarvot, keskiarvot ja maksimiarvot. Arvoissa on käytetty pienennyskertoimia.*

#### 4.5 Uudet mitoituskäyrät

Tutkimuksen tuloksena on saatu vain liittopilarien palonkesto-aikoja. Niiden perusteella voidaan kuitenkin määrittää karkeasti liittopilarien kantavuudet tarkastelluissa palotilanteissa ja piirtää uudet mitoituskäyrät. Tämä vaatii oletuksen, että kuormitus ja palonkesto-aika ovat tutkituissa olosuhteissa edes jollain tarkkuudella lineaarisesti riippuvaisia. Todellisuudessa tämä riippuvuus on todennäköisesti epälineaarista, ja tehty oletus on tällöin sitä epätarkempi mitä enemmän tapauksen laskettu palonkesto-aika eroaa sen tavoiteajasta.

Lasketaan liittopilarien uudet kantavuudet  $N_{ij}$  tutkituissa palotilanteissa suhteuttamalla palonkestoajat tavoiteaikoihin ja kertomalla se laskentakuormalla. Käytetään lisäksi pois päin palosta nurjahtaville tapauksille pienennyskertoimia. Laskentakaava on tällöin:

$$N_{ij} = \frac{t_{ij}}{k_{red,j} t_{tavoite}} N_{Ed,i} \quad (4)$$

missä  $t_{ij}$  on taulukon 4.1 mukainen analyysin tuloksena saatu palonkesto-aika,  $k_{red,j}$  on taulukon 4.7 mukainen pienennyskerroin (tai 1,0 jos kyseessä kohti paloa nurjahtava tapaus),  $t_{tavoite}$  on tapauksen palonkesto-aikatavoite (30, 60, 90 tai 120 min) ja  $N_{Ed,i}$  on taulukon 3.6 mukainen pilarin laskentakuorma. Lasketaan kantavuuksille arvot taulukon 4.11.

Lasketaan myös samaan taulukkoon liittopilarien maksimikantavuudet huoneenlämmössä ilman varmuuslukuja standardin SFS-EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.5 ja mukaisesti merkitsemällä käyttöasteeksi 1,0 [4, s. 58]. Laskelmat ovat näkyvillä liitteessä 4. Saaduista arvoista nähdään, että uudet lasketut kantavuudet ylittävät joissain tapauksissa

huoneenlämmön maksimikantavuudet, mikä on yksi merkki siitä, että tehty oletus ei ole tarkka, kuten jo aiemmin epäiltiin.

**Taulukko 4.11.** Kaavalla 4 lasketut likimääräiset liittopilarien kantavuudet tutkituissa palotilanteissa, sekä maksimikantavuudet huoneenlämmössä ilman varmuuslukuja. Epäselvät tapaukset on merkitty punaisella.

#	Liittopilari	Palonkes- toaika	Pituus [m]	Laskettu kantavuus [kN]										Max. kuorma [kN]
				4S	3S	2S	1S	B3S	B2S	B1S	S3S	S2S	S1S	
1	150x150, 2m	R30	476	511	732	822	1724	777	927	1699	690	773	1371	1740
2	150x150, 2m	R60	174	189	258	284	481	253	341	495	245	278	383	1740
3	150x150, 3m	R30	303	300	368	430	1119	360	426	1068	367	416	868	1520
4	150x150, 3m	R60	110	133	133	198	369	143	255	440	132	191	337	1520
5	250x250, 3m	R30	1975	2051	3139	4441	9003	3104	3545	9892	3102	4214	8206	4270
6	250x250, 3m	R60	1094	1038	1434	2261	4152	1426	2495	3533	1433	2190	3372	4270
7	250x250, 3m	R90	728	690	855	1250	1941	820	1423	1941	870	1247	1510	4270
8	250x250, 3m	R120	443	440	499	745	885	483	885	885	507	729	885	4270
9	250x250, 5m	R30	1171	1183	1779	2295	3420	1745	2041	3701	1740	2526	3420	3620
10	250x250, 5m	R60	634	595	694	1512	2171	686	1361	2535	694	1349	2171	3620
11	250x250, 5m	R90	406	405	538	1014	1083	480	766	1083	467	973	1083	3620
12	250x250, 5m	R120	233	247	284	466	466	335	466	466	280	462	466	3620
13	400x400, 3m	R30	8031	7321	8906	13046	31955	8443	11801	29515	9026	12847	-	11990
14	400x400, 3m	R60	5942	5514	6220	10697	22547	6060	9872	19189	6195	10046	-	11990
15	400x400, 3m	R90	4868	4178	4215	8145	12314	3831	7679	10480	4853	7812	-	11990
16	400x400, 3m	R120	4053	3100	2763	6377	8107	2579	6083	8107	3275	6054	-	11990
17	400x400, 6m	R30	5624	5458	7977	12899	20115	7452	13591	24080	7877	12343	-	10850
18	400x400, 6m	R60	3564	3270	4696	8995	14254	5134	9966	14254	4765	8749	-	10850
19	400x400, 6m	R90	2625	2200	3374	6069	6999	3417	6999	6999	3388	6094	-	10850
20	400x400, 6m	R120	2045	1739	2538	4090	4090	2398	4090	4090	2564	4089	-	10850

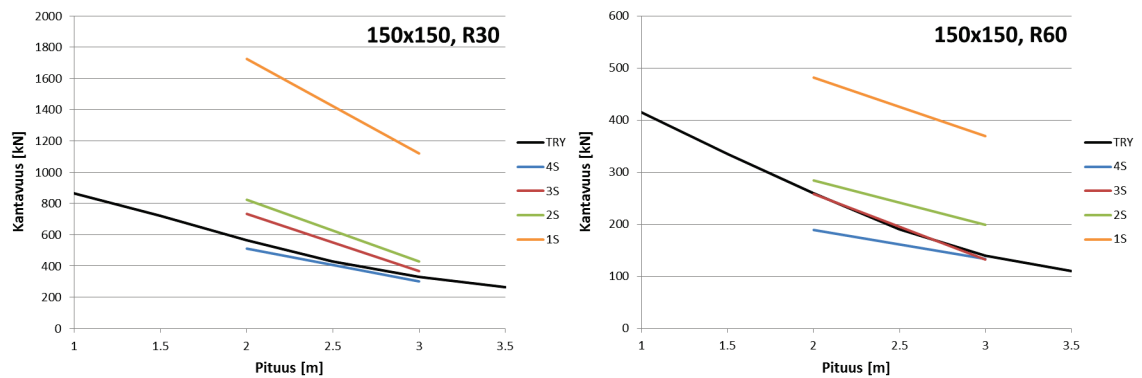
Kootaan käyrien piirtämistä varten edellisestä taulukosta uusi taulukko 4.12. Oteetaan arvot adiabaattisesti eristetyistä tapauksista, ja rajoitetaan kaikki ylittävät arvot karkeasti huoneenlämmön maksimiin. Koska adiabaattisten ja sandwich-paneelien tilanteet ovat melko lähellä toisiaan, voidaan lisäksi parissa epäselvässä tapauksessa korvata kantavuuden arvot sandwich-paneelin tilanteen arvoilla, jotta taulukosta saadaan mahdollisimman kattava. Taulukossa käytetty värikoodaus näkyy sen alapuolella.

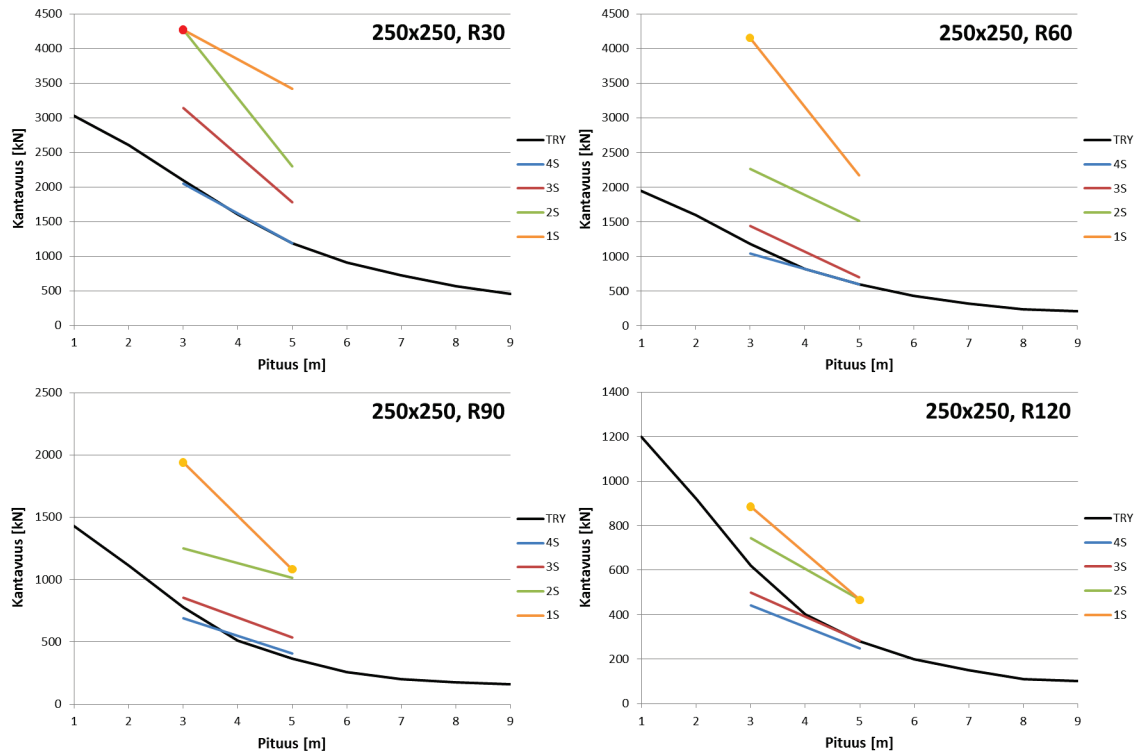
Piirretään taulukon pohjalta uudet mitoituskäyrät liittopilareille kuvaajiin 4.12-4.14. Merkitään samoihin kuviin myös TRY:n mitoituskäyrät normaalille palolle [1]. Nähdään, että noin puolet lasketuista 4S tapauksista osuu hyvin lähelle TRY:n käyrää, ja että toinen puoli tapauksista jää jostain syystä hieman TRY:n kantavuuksia pienemmäksi. Muiden tilanteiden kantavuudet jakautuvat tulosten perusteella melko odotetusti. Käyrien päätepisteissä on käytetty samaa värikoodausta kuin taulukossa 4.12 (Sandwich-paneelin tilanteesta saatu arvo, epäselvän tapauksen arvo tai maksimikuorman ylittävä arvo).

**Taulukko 4.12.** Lasketut kantavuudet mitoituskäyriä varten. Värikoodaus alapuolella.

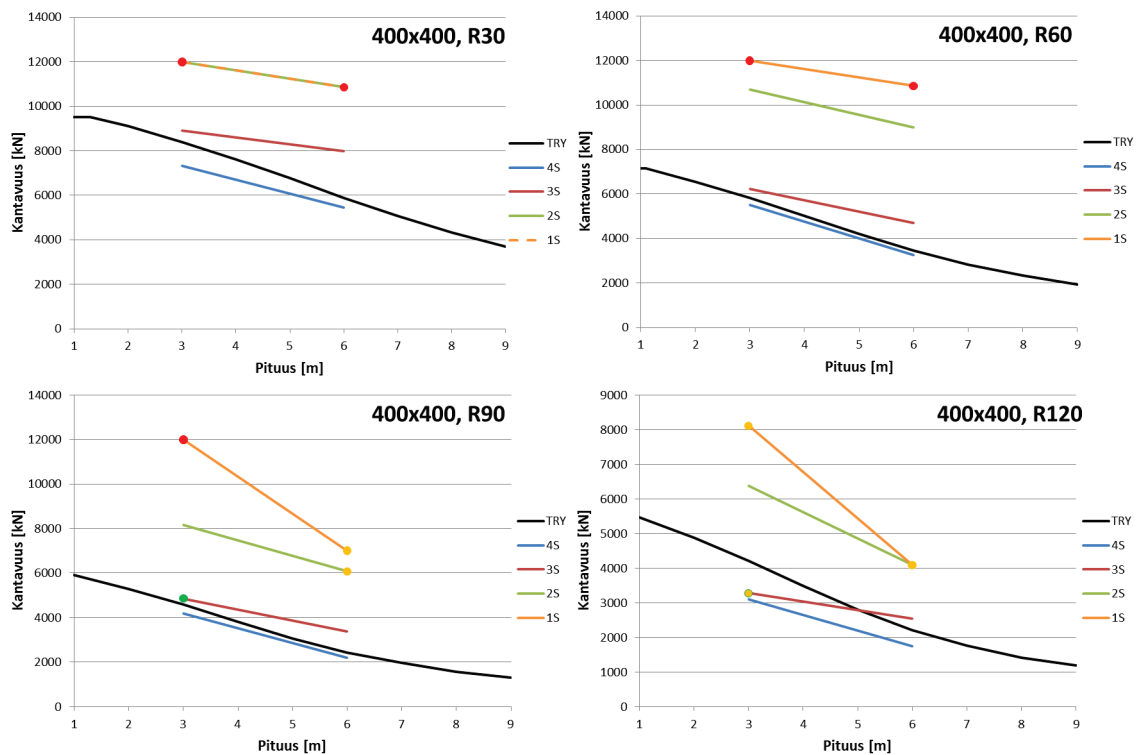
#	Liittopilari	Palonkesto- aika	Pituus [m]	Laskettu kantavuus [kN]			
				4S	3S	2S	1S
1	150x150, 2m	R30	2	511	732	822	1724
3	150x150, 3m	R30	3	300	368	430	1119
2	150x150, 2m	R60	2	189	258	284	481
4	150x150, 3m	R60	3	133	133	198	369
5	250x250, 3m	R30	3	2051	3139	4270	4270
9	250x250, 5m	R30	5	1183	1779	2295	3420
6	250x250, 3m	R60	3	1038	1434	2261	4152
10	250x250, 5m	R60	5	595	694	1512	2171
7	250x250, 3m	R90	3	690	855	1250	1941
11	250x250, 5m	R90	5	405	538	1014	1083
8	250x250, 3m	R120	3	440	499	745	885
12	250x250, 5m	R120	5	247	284	466	466
13	400x400, 3m	R30	3	7321	8906	11990	11990
17	400x400, 6m	R30	6	5458	7977	10850	10850
14	400x400, 3m	R60	3	5514	6220	10697	11990
18	400x400, 6m	R60	6	3270	4696	8995	10850
15	400x400, 3m	R90	3	4178	4853	8145	11990
19	400x400, 6m	R90	6	2200	3374	6069	6999
16	400x400, 3m	R120	3	3100	3275	6377	8107
20	400x400, 6m	R120	6	1739	2538	4090	4090

- = Sandwich-paneelin tilanteesta otettu kantavuus.
- = Epäselvän tapauksen kantavuus.
- = Käyttöaste huoneenlämmössä rajoittaa.

**Kuva 4.12.** Uudet karkeasti määritetyt mitoituskäyrät 150x150 pilareille.



Kuva 4.13. Uudet karkeasti määritetyt mitoituskäyrät 250x250 pilareille.



Kuva 4.14. Uudet karkeasti määritetyt mitoituskäyrät 400x400 pilareille.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Tutkimuksessa tutkittiin FEM-ohjelman avulla liittopilareita neljässä eri palotilanteessa ja sen tuloksena saatiin noin 150 tapaukselle laskettua yksikäsitteinen palonkesto-aika. Näiden tulosten perusteella saatiin määritettyä liittopilareille suhteellinen kestävyys neljän sivun paloon verrattuna; kolmen sivun tulipalossa pilarit kestivät keskimäärin noin 1,34-kertaisesti, kahden sivun palossa keskimäärin noin 2,25-kertaisesti ja yhden sivun palossa keskimäärin noin 3,59-kertaisesti verrattuna neljän sivun tapauksen palonkesto-aikaan. Tuloksissa oli kuitenkin jonkin verran hajontaa. Pienin suhteellinen palonkesto esiintyi 3S-tapauksessa, jossa menttiin pienimmillään juuri ja juuri alle yhden.

Lämmönsiirtymisanalysissä huomattiin, että betoni toimii tehokkaana lämpönieluna, eli tulipalosta liittopilariin tullut lämpö siirtyy edelleen pilarista betoniin, jolloin betonilla eristetyt pilarit pysyvät selvästi viileämpinä kuin adiabaattisesti eristetyt pilarit. Vastaavaa ilmiötä ei esiinny sandwich-paneeleita vasten olevissa pilareissa, vaan ne puolestaan lämpiävät hieman enemmän kuin adiabaattisesti eristetyt pilarit. Palonkestoajat käyttäytyivät odotetusti eri eristämistavoilla näissä samoissa suhteissa, eli betonia vasten olevien pilarien palonkesto-aika oli keskimääräisesti 12 % suurempi ja sandwich-paneeleita vasten olevien pilarien palonkesto-aika oli keskimääräisesti 4 % pienempi kuin adiabaattisesti eristetyillä pilareilla.

Tuloksia tarkastellessa huomattiin, että liittopilarien nurjahduksen suunta tutkituissa palotilanteissa riippuu voimakkaasti pilarin hoikkuudesta. Kun pilarin suhteellinen hoikkuus ylittää arvon noin 0,8 lähes kaikki tapaukset nurjahtavat kohti tulipaloa, kun taas suhteellisen hoikkuuden noin 0,4 alittavat pilarit nurjahtavat pois päin palosta. Arvojen 0,4-0,8 välillä suunnan todennäköisyys käyttäytyy melko lineaarisesti suhteellisen hoikkuuden mukaan.

Tutkimuksessa huomattiin myös, että alkukäyryyden suunnalla on melko merkittävä vaikutus liittopilareiden palonkesto-aikoihin 1S, 2S ja 3S-paloissa. Tarkkojen tulosten määrittämiseksi pitäisi jokainen tapaus laskea kahdella erimerkkisellä alkukäyryydellä. Tässä tutkimuksessa käytettiin kuitenkin vain positiivista alkukäyryyttä, ja tyydyttiin vain pienentämään pois päin palosta nurjahtavien tapausten liian pitkiä palonkesto-aikoja pienennyskertomella. Kun tämä kerroin otetaan huomioon pienenevät keskimääräiset suhteelliset palonkestoajat arvoihin 1,32, 2,04 ja 3,49 (3S/4S, 2S/4S ja 1S/4S). Lisäksi pilarin kuormitus mallinnettiin hieman väärin, mistä aiheutuva virhe jäi kuitenkin pieneksi.

Palonkesto-aikojen perusteella saatiin tutkituille tapauksille määritettyä myös likimääräiset mitoituskäyrät. Kyseiset käyrät ovat kuitenkin lähes varmuudella ainakin osit-

tain epätarkkoja, joten ne toimivat vain suuntaa antavina, eikä niiden perusteella pidä vielä mitoittaa mitään.

Nähdään siis myös, että nykyiset mitoituskäytännöt johtavat tutkituissa vain yhdeltä, kahdelta tai kolmelta sivulta palolle altistuvissa pilareissa minimissään lähes samaan palonkestoajaan ja keskimäärin suurempaan palonkestoajaan, eli nykyisissä liittopilareissa ei tämän tutkimuksen tuloksien perusteella ole turvallisuusriskejä. Sen sijaan osassa tapauksista palonkestoajojen ero on niin suuri, että pieni taloudellinen riski löytyy, ja osaa pilareista voitaisiin helposti pienentää.

Työssä esiintyneistä ongelmista huolimatta se onnistui kuitenkin melko hyvin. Suurimmalle osalle johdannossa esitellyistä tapauksista saatiin laskettua yksikäsitteiset tulokset. Niille tapauksille, joille kirjallisuudesta löytyi vertailuarvoja, saatiin myös määritettyä samankaltaisia tuloksia niin lämpötilojen kuin palonkestoajojenkin osalta. Eniten ongelmia aiheuttivat betonin materiaaliominaisuuksien mallintaminen sekä betonin ja putken välinen kontakti. Syy näihin ongelmiin oli ennen kaikkea mallintajan kokemattomuus.

Tutkimuksen aihepiiri kaipaisi kipeästi jatkotutkimuksia. Erityisesti joitain koe-kuormituksia 1S, 2S, 3S ja 4S paloissa pitäisi saada tehtyä, jotta tuloksien oikeellisuus voitaisiin varmistaa. Liitteestä 5 löytyy professori Markku Heinisuon suunnittelema valmis esimerkki tällaisista liittopilarien polttokokeiden koejärjestelyistä. Tarkempien mitoitusohjeiden määrittämiseksi myös tämän tutkimuksen kaltaisia laskennallisia tarkasteluja olisi hyvä saada lisää, sillä tämän työn pilarikonaisuus ei kaikesta huolimatta kata lähellekään kaikkia käytössä olevia liittopilarivaihtoehtoja.

## LÄHTEET

- [1] Betonitäytteisen teräsluottopilarin suunnitteluohje. Helsinki 2004, Teräsrakenneyhdistys ry. 114 s.
- [2] Ruukki [WWW]. [viitattu 14.11.2012]. Saatavissa: <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Rakentamisen-ratkaisut/Terasrunkorakenteet/Liittopilari/>
- [3] SFS-EN 1991-1-2. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. Helsinki 2003, Suomen standardisoimisliitto. 102 s.
- [4] SFS-EN 1994-1-1. Eurokoodi 4. Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki 2005, Suomen standardisoimisliitto. 101 s.
- [5] SFS-EN 1994-1-2. Eurokoodi 4. Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. Helsinki 2006, Suomen standardisoimisliitto. 99 s.
- [6] SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki 2005, Suomen standardisoimisliitto. 221 s.
- [7] SFS-EN 1992-1-2. Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. Helsinki 2005, Suomen standardisoimisliitto. 92 s.
- [8] SFS-EN 1993-1-1. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki 2005, Suomen standardisoimisliitto. 99 s.
- [9] SFS-EN 1993-1-2. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. Helsinki 2005, Suomen standardisoimisliitto. 75 s.
- [10] SFS-EN 1993-1-5. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet. Helsinki 2006, Suomen standardisoimisliitto. 57 s.
- [11] Kivimaa, M. Liittopilarien lämpötilat palossa. Insinööriyö. Seinäjoki 2011. Seinäjoen ammattikorkeakoulu, Talonrakennustekniikka. 37 s.



- [12] CIDECT. Improvement and extension of the simple calculation method for fire resistance of unprotected concrete filled hollow columns. Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France 2004, CTICM, CIDECT Research Project 15Q-12/03. 101 p.
- [13] Yang, H., Liu, F., Zhang, S. Fire performance of CFST columns in non-uniform fire. Proceedings of EUROSTEEL 2011 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Budapest, Hungary, August 31- September 2, 2011. Brussels, Belgium 2011, ECCS. pp. 1563-1568,
- [14] Hong, S., Varma, A. Analytical modeling of the standard fire behavior of loaded CFT columns. Journal of Constructional Steel Research 65(2009)1, pp. 54-69.
- [15] Espinos, A., Romero, M., Hospitaler A. Advanced model for predicting the fire response of concrete filled tubular columns. Journal of Constructional Steel research 66(2010)8-9, pp. 1030-1046
- [16] Ding, J., Wang, Y.C. Realistic modelling of thermal and structural behaviour of unprotected concrete filled tubular columns in fire. Journal of Constructional Steel research 64(2008)10, pp. 1086-1102
- [17] Zeng, J., Mäkeläinen, P. Finite Element Modelling of Semi-Rigid Composite Joint in a Slim Floor Frame. Proceedings of Nordic Steel Construction Conference, Malmö, Sweden, September 2-4, 2009. Stockholm, Sweden 2009, Stålbyggnadsinstitutet, pp. 335-342.
- [18] Salminen, M. Shear Buckling Resistance of Thin Metal Plate at Non-Uniform Elevated Temperatures. Licentiate thesis. Tampere 2010. Tampere University of Technology, Structural Engineering, Research Report 151. 132 p.
- [19] Salminen, M. Shear resistance of thin metal plate at non-uniform elevated temperatures. Doctoral dissertation. Tampere 2012. Tampere University of Technology, Publication 1012. 176 p.
- [20] SFS-EN 10219-2. Kylmämuovattut hitsatut seostamattomista teräksistä ja hienoraeteräksistä valmistetut rakenneputket. Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkeikkaussuureet. Helsinki 2006, Suomen Standardisoimisliitto. 51 s.

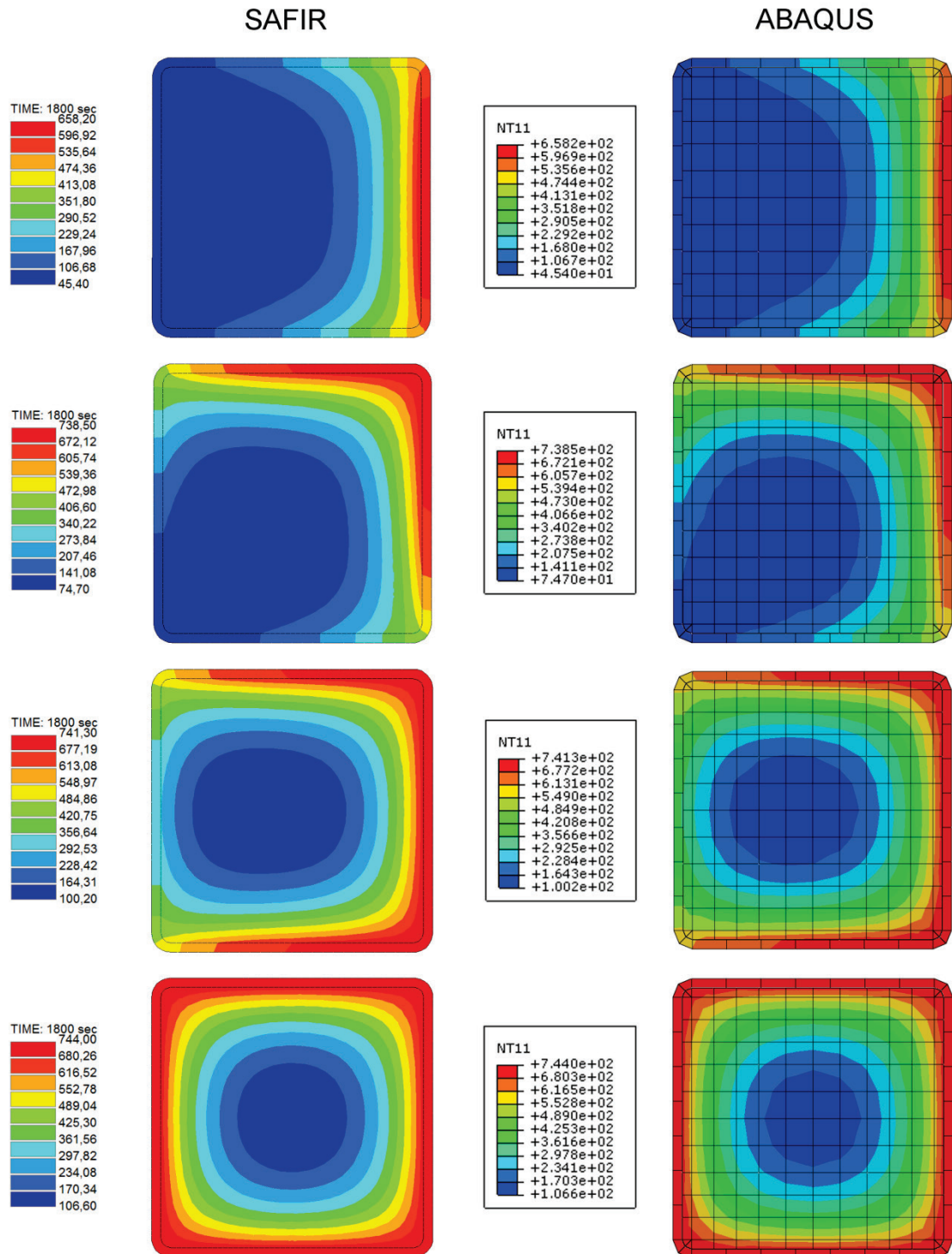
- [21] Abaqus 6.10-EF Analysis User's manual. Volume V: Prescribed Conditions, Constraints & Interactions. Providence, RI, USA 2010, Dassault Systèmes. 904 p.
- [22] Galambos, T.V. Guide to stability design criteria for metal structures. 5th edition. New York, NY, USA 1998, John Wiley and Sons Inc. 944 p.

## LIITTEET

### LIITE 1: Eristämättömien ja adiabaattisesti eristettyjen liittopilarien lämpötilat palossa

Kuvissa oikealla on Abaquksella lasketut lämpötilan arvot joita verrataan vasemmalla oleviin Kivimaan SAFIR:lla laskettuihin arvoihin [11].

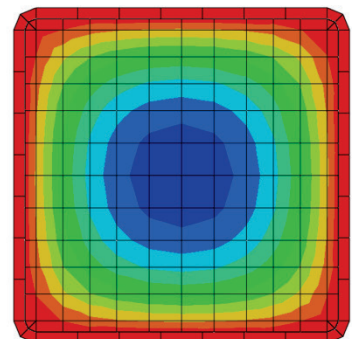
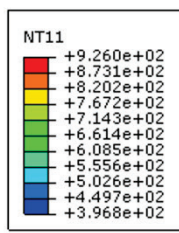
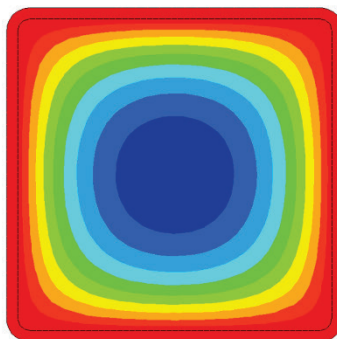
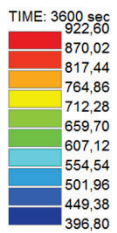
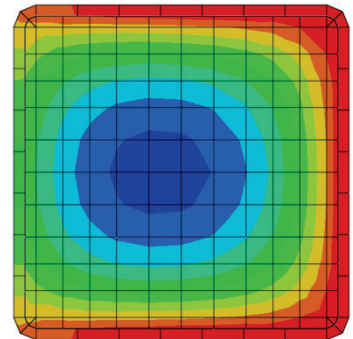
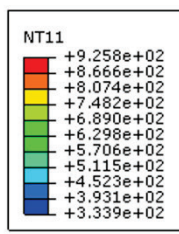
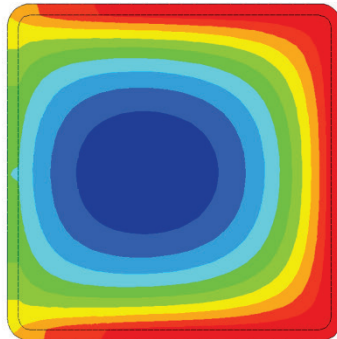
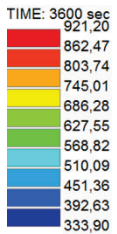
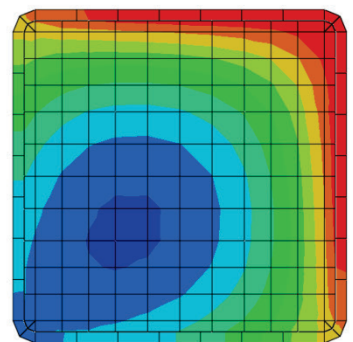
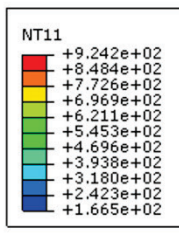
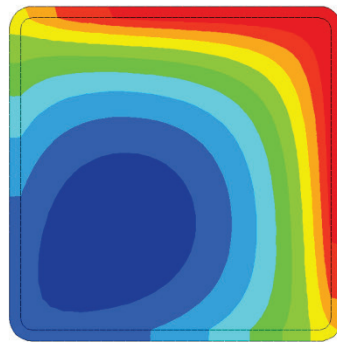
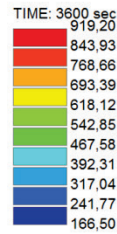
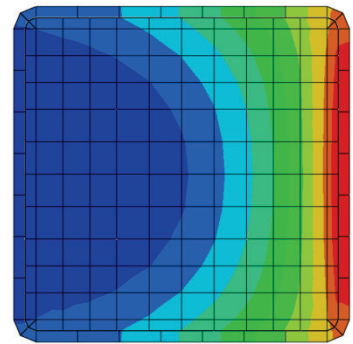
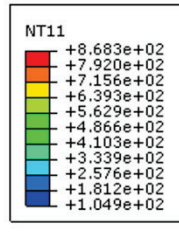
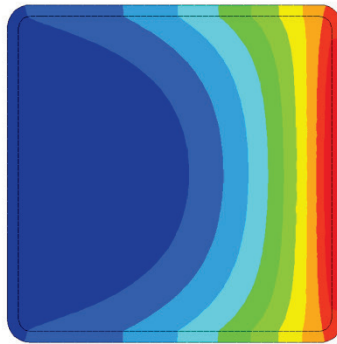
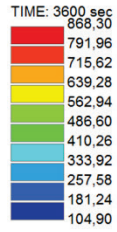
#### 150x150 R30



# 150x150 R60

SAFIR

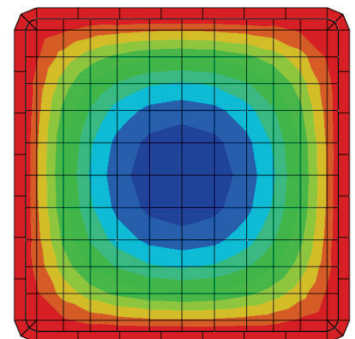
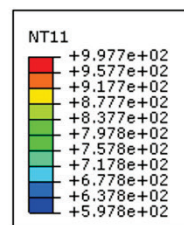
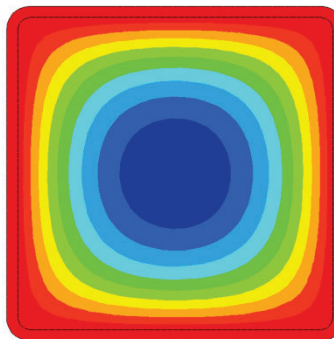
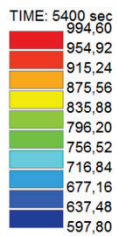
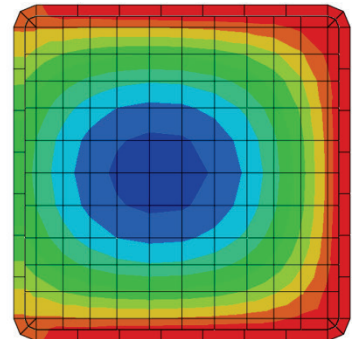
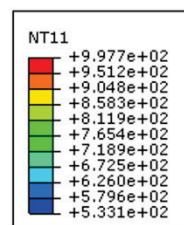
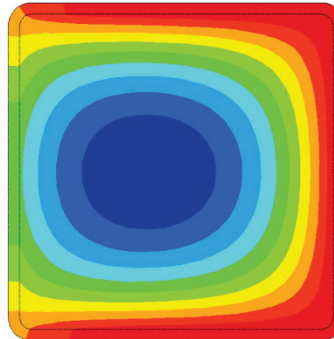
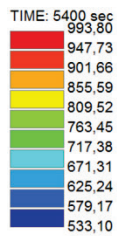
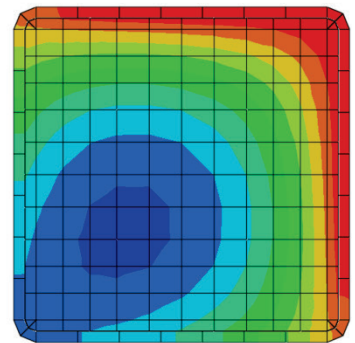
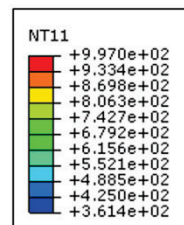
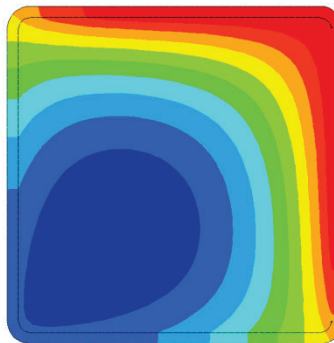
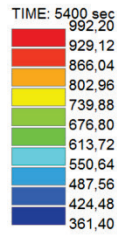
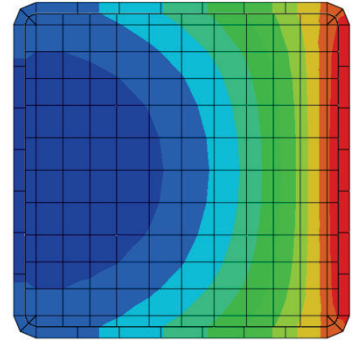
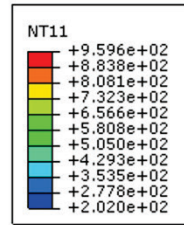
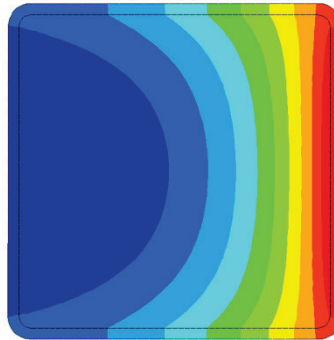
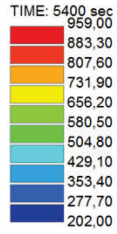
ABAQUS



# 150x150 R90

SAFIR

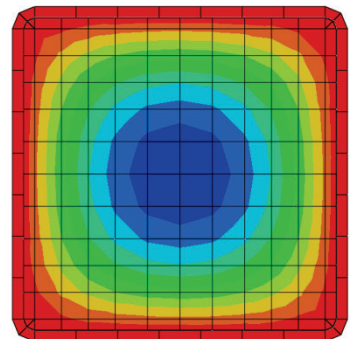
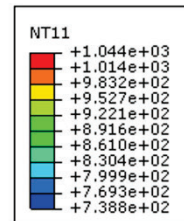
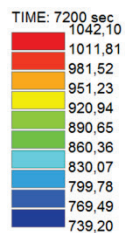
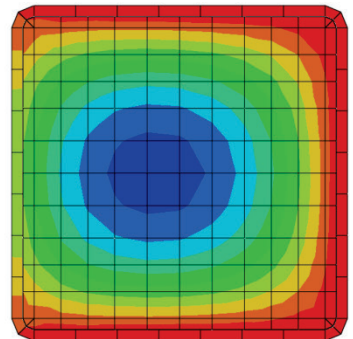
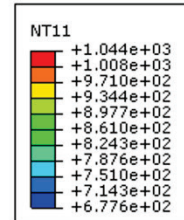
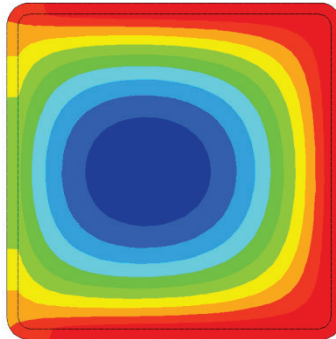
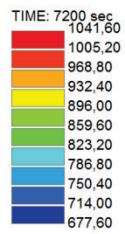
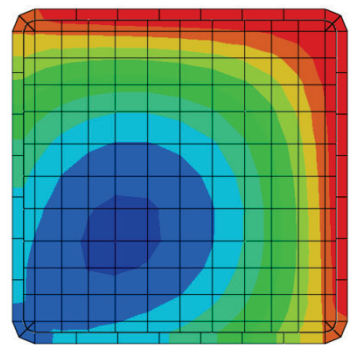
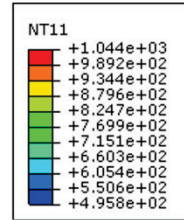
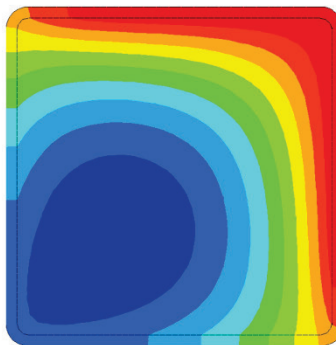
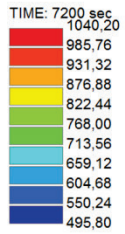
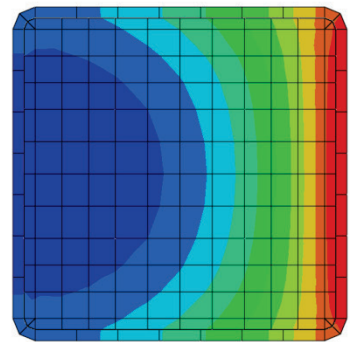
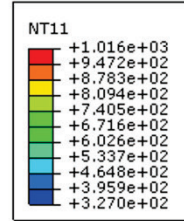
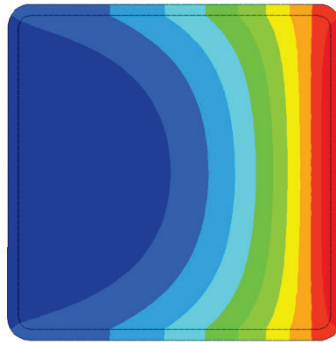
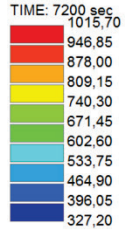
ABAQUS



# 150x150 R120

SAFIR

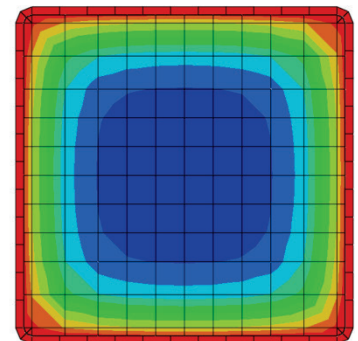
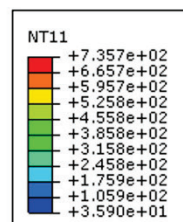
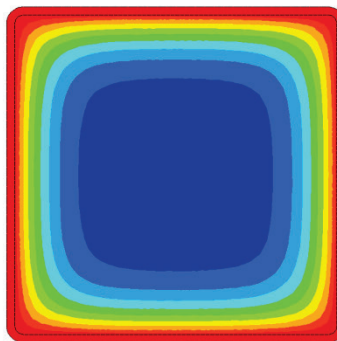
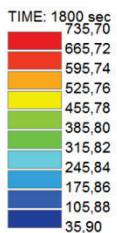
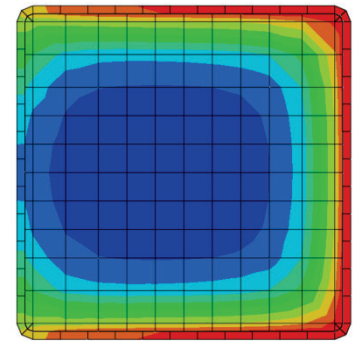
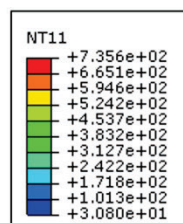
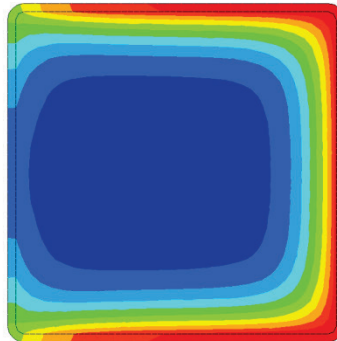
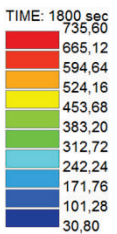
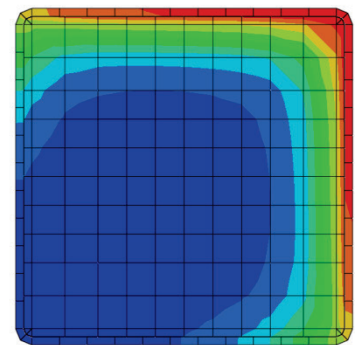
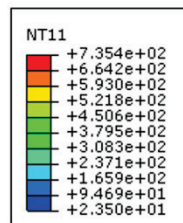
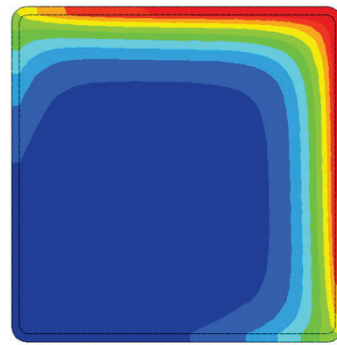
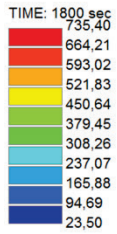
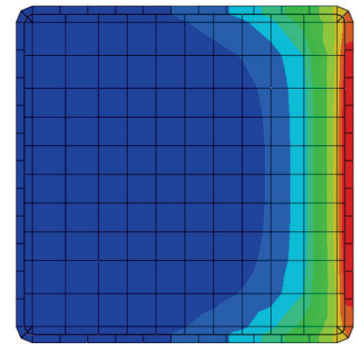
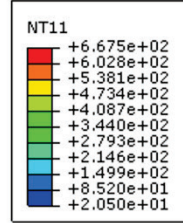
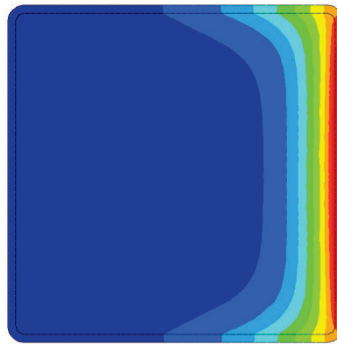
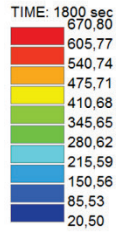
ABAQUS



# 250x250 R30

SAFIR

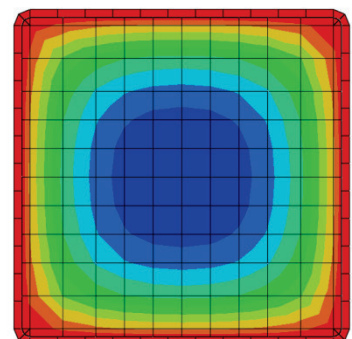
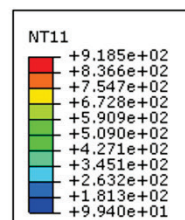
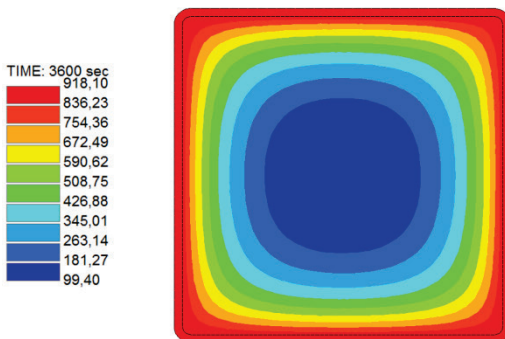
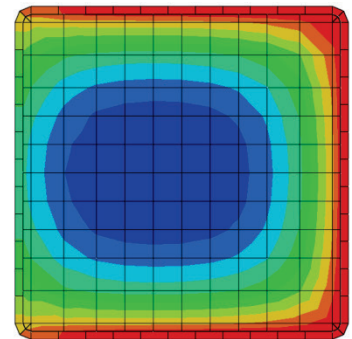
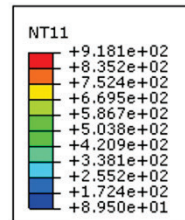
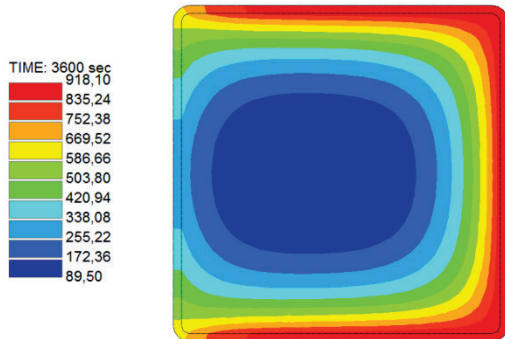
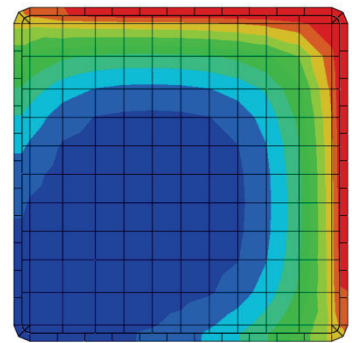
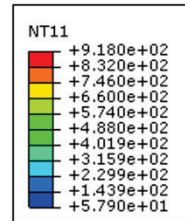
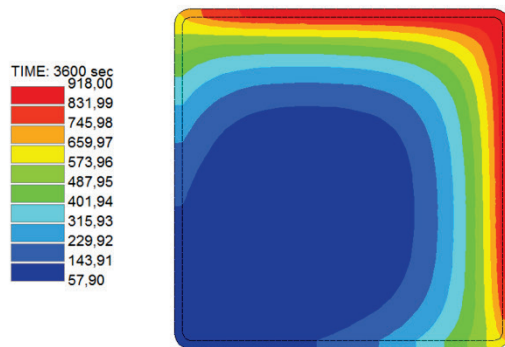
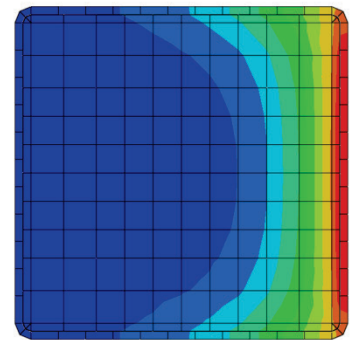
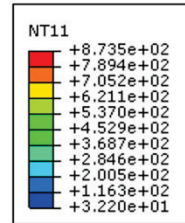
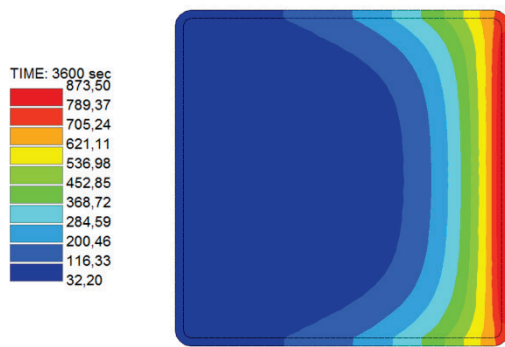
ABAQUS



# 250x250 R60

SAFIR

ABAQUS

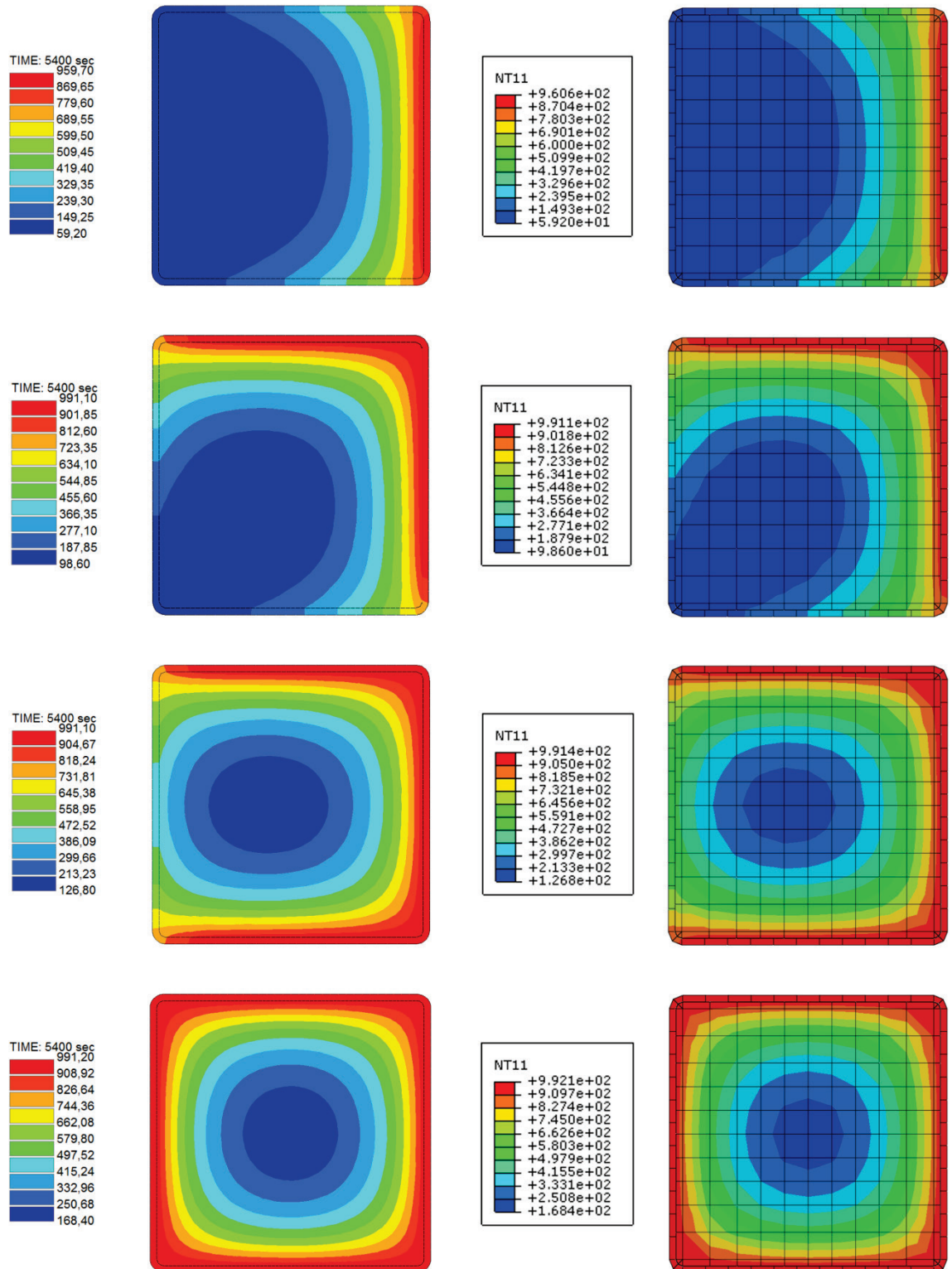




# 250x250 R90

SAFIR

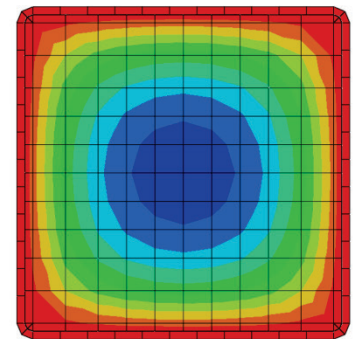
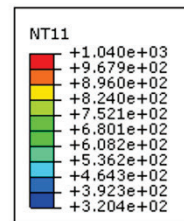
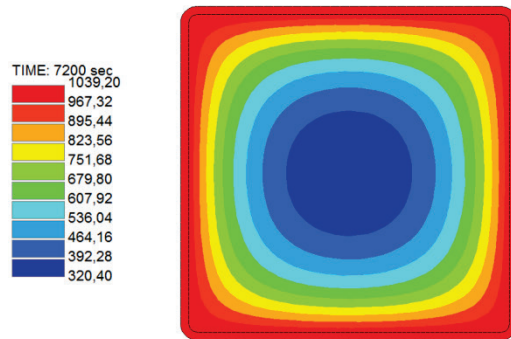
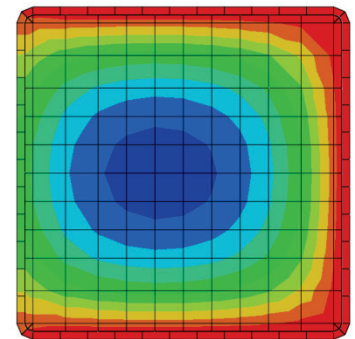
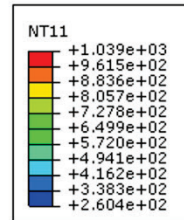
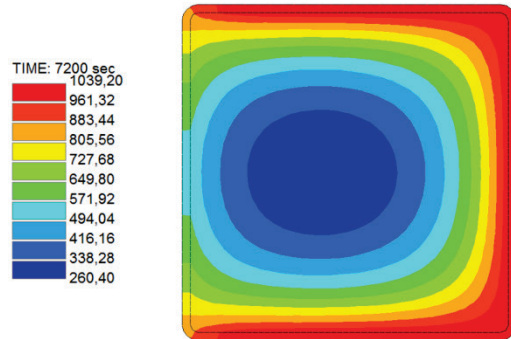
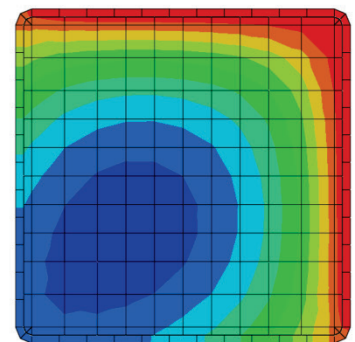
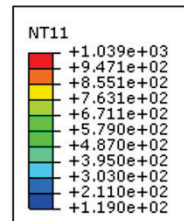
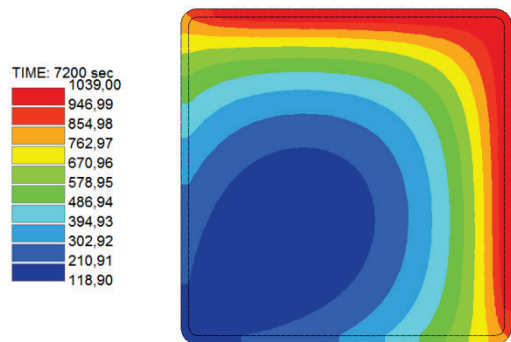
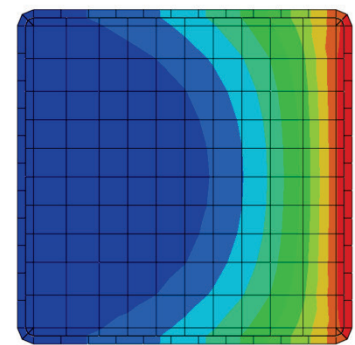
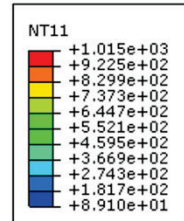
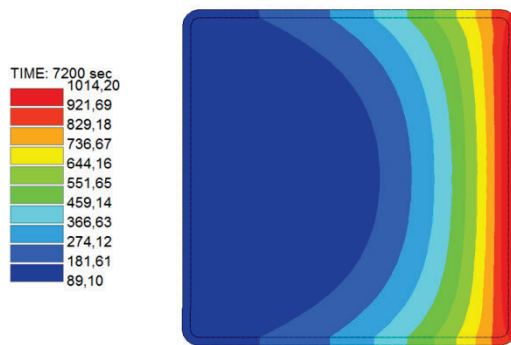
ABAQUS



# 250x250 R120

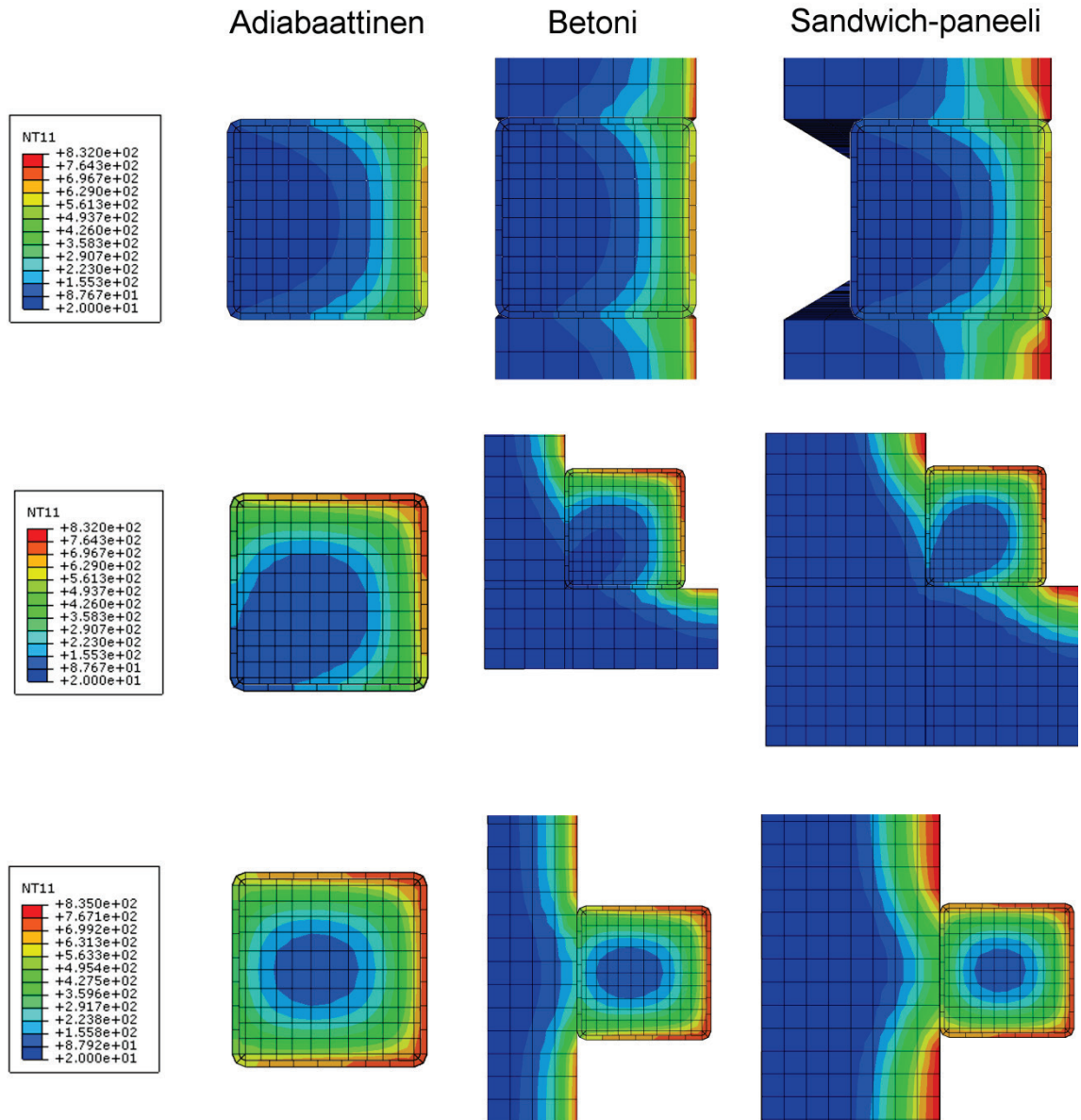
SAFIR

ABAQUS



## LIITE 2: Liittopilarien lämpötilat tulipalossa eri eristämistavoilla

### 150x150 R30

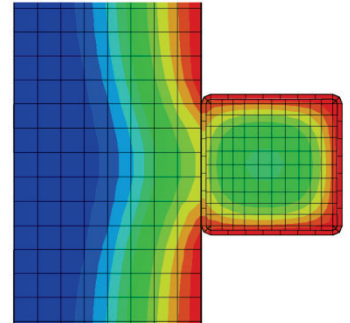
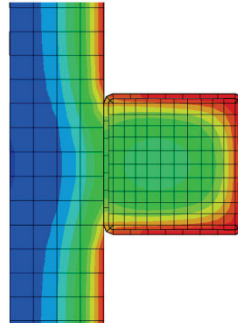
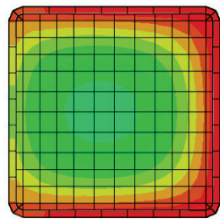
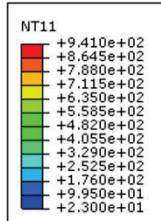
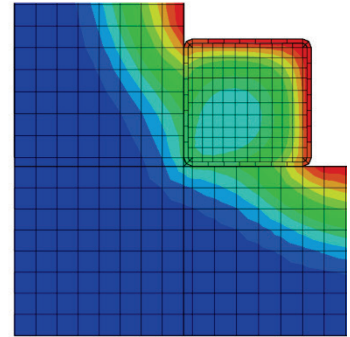
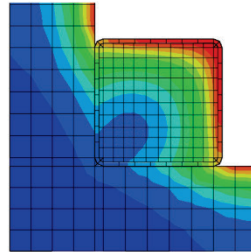
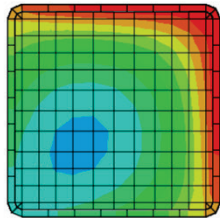
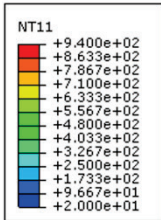
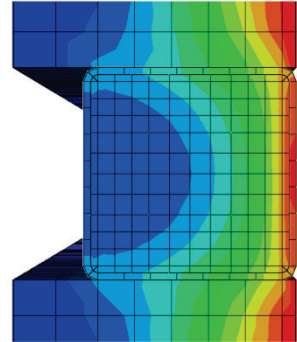
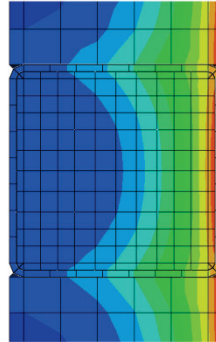
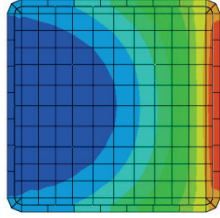
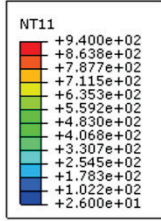


# 150x150 R60

Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli

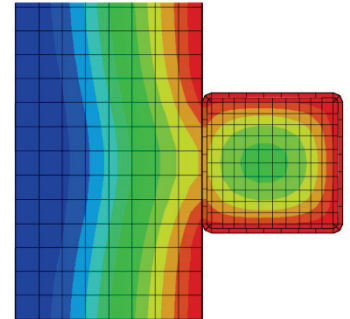
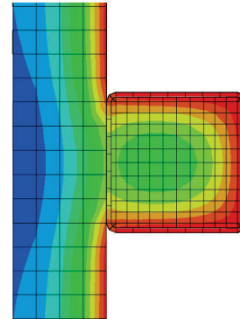
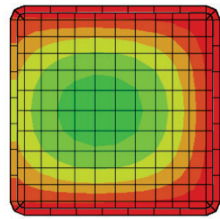
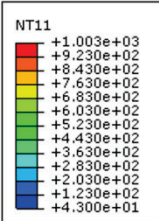
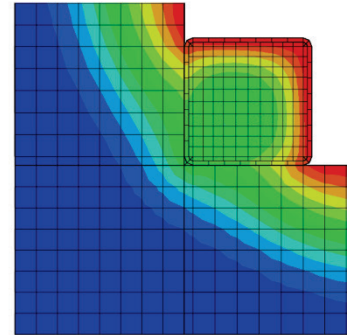
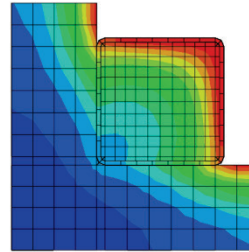
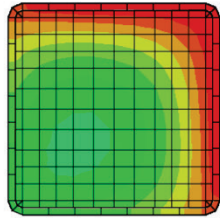
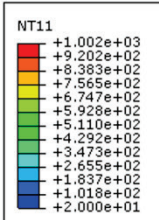
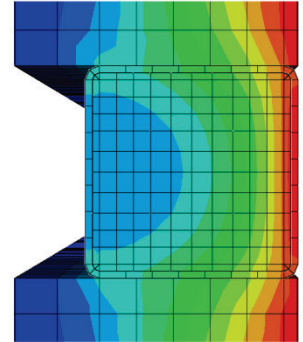
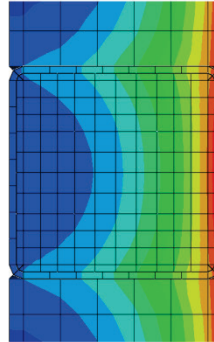
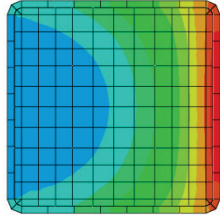
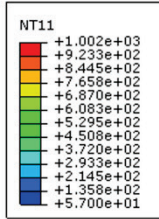


# 150x150 R90

Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli

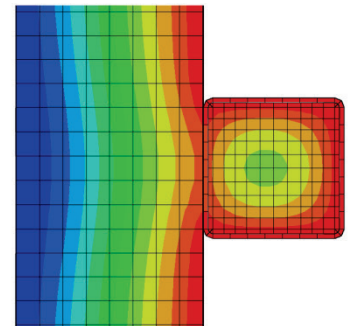
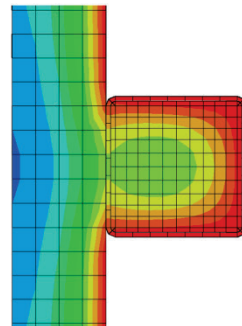
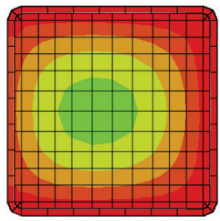
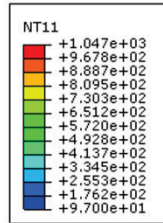
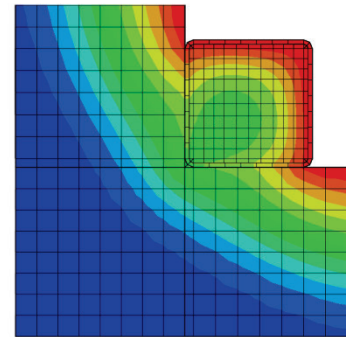
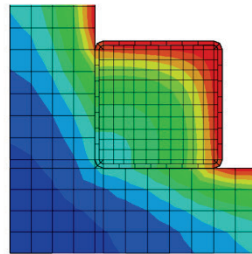
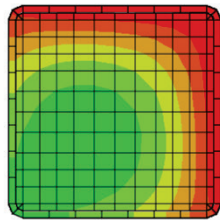
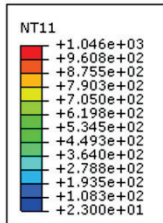
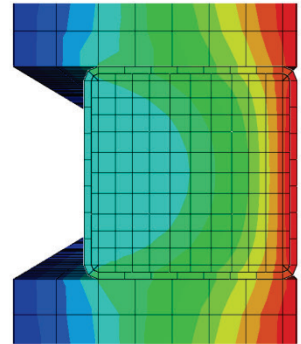
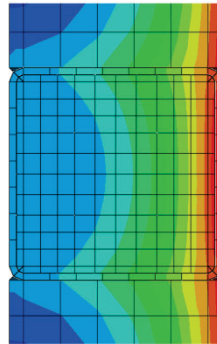
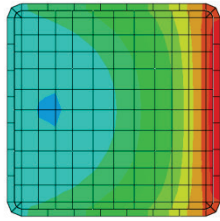
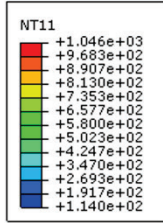


# 150x150 R120

Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli

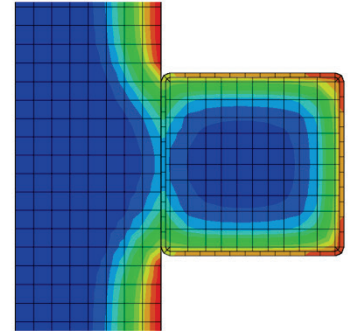
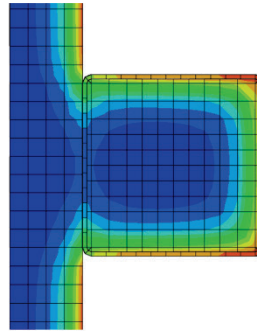
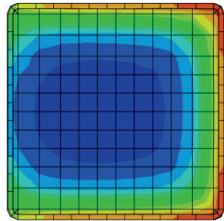
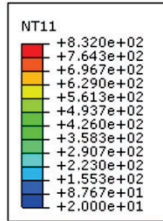
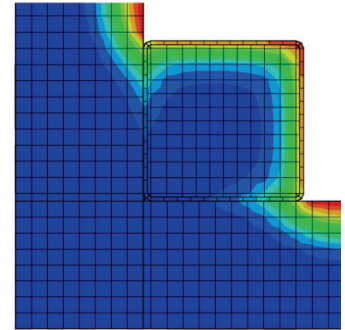
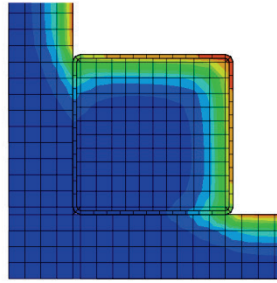
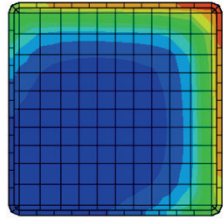
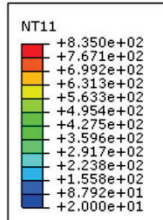
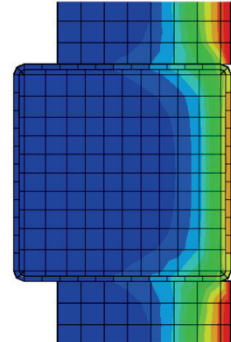
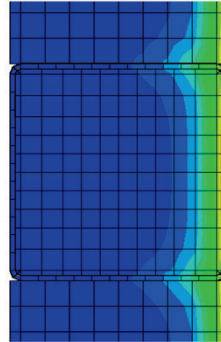
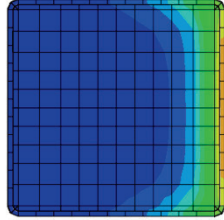
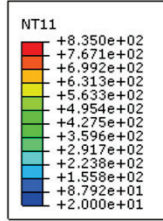


# 250x250 R30

Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli

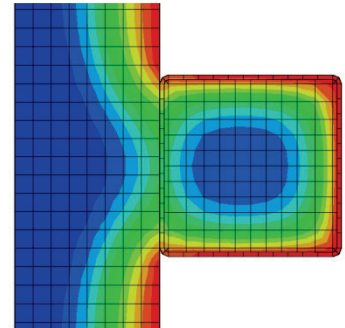
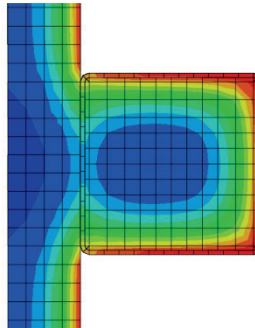
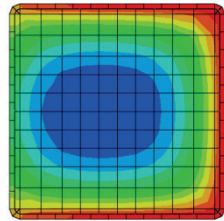
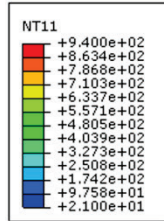
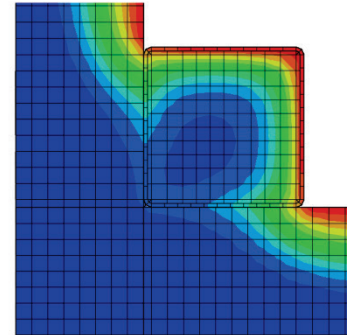
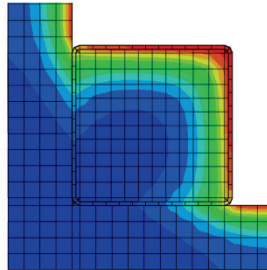
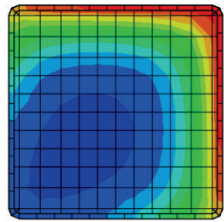
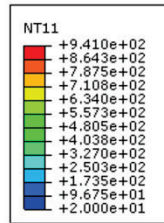
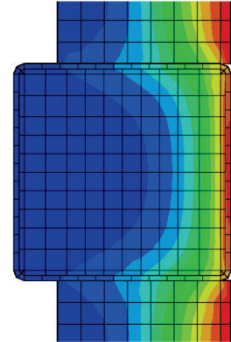
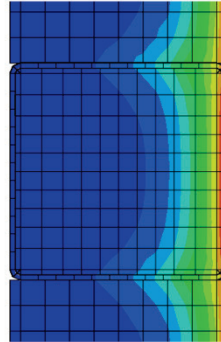
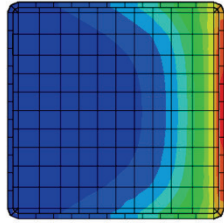
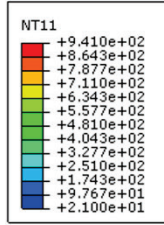


# 250x250 R60

Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli



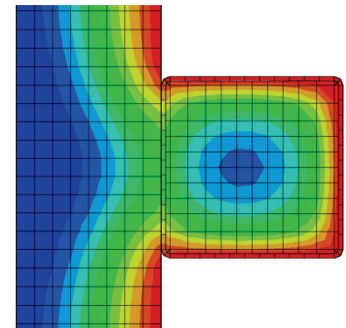
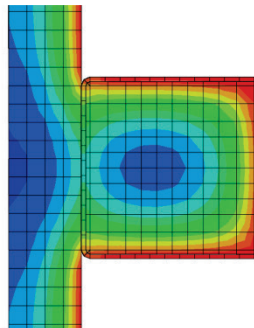
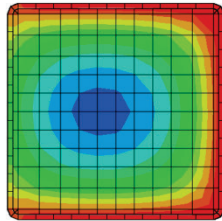
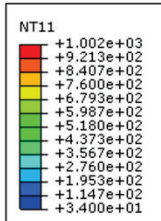
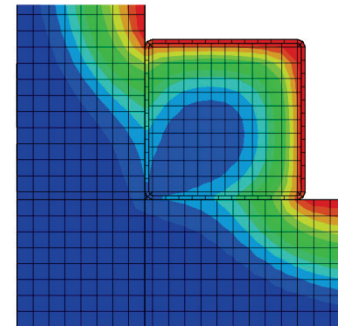
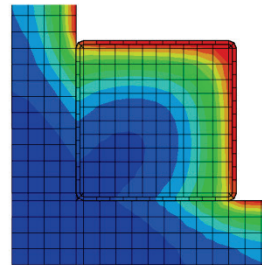
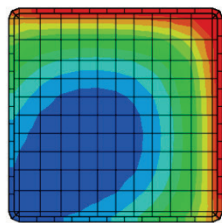
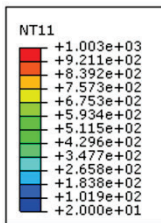
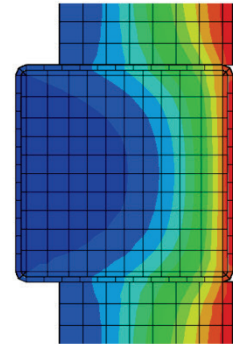
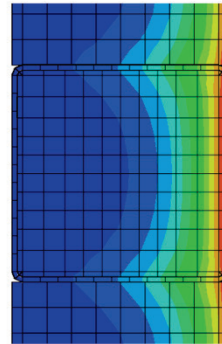
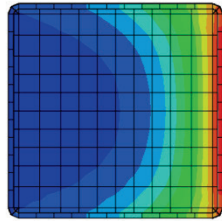
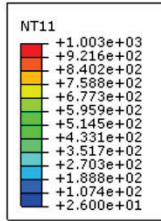


# 250x250 R90

Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli

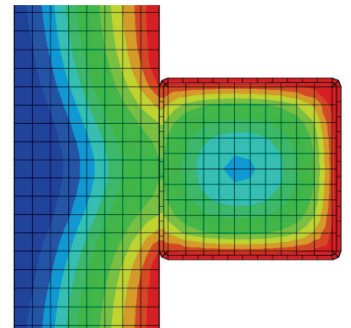
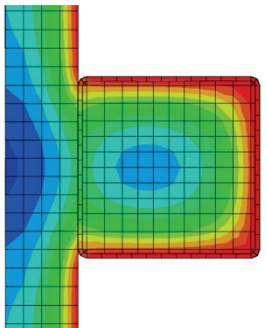
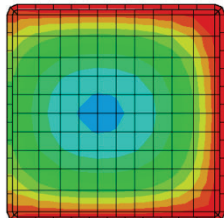
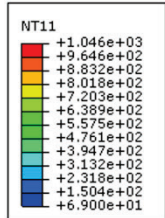
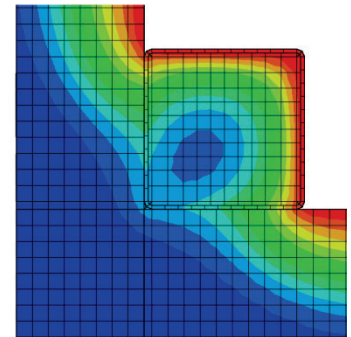
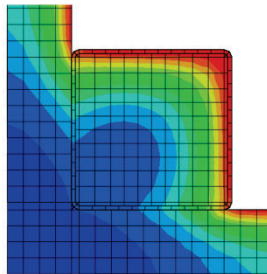
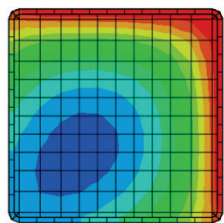
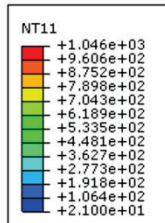
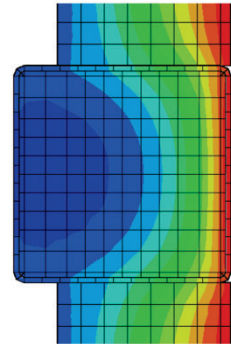
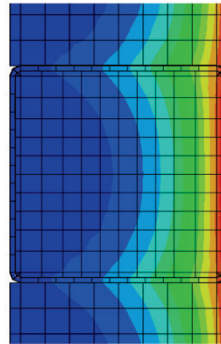
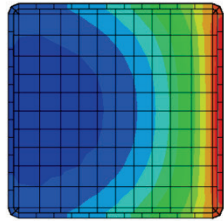
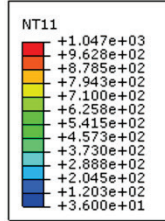


# 250x250 R120

Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli

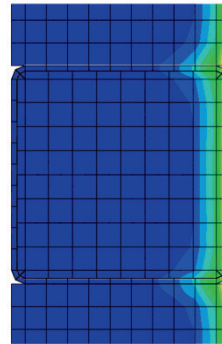
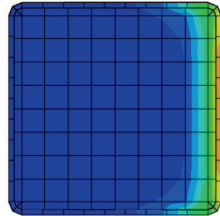
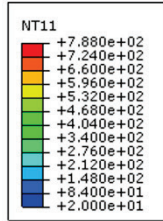


# 400x400 R30

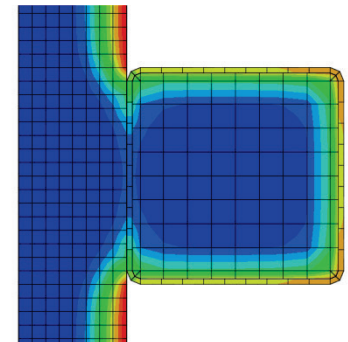
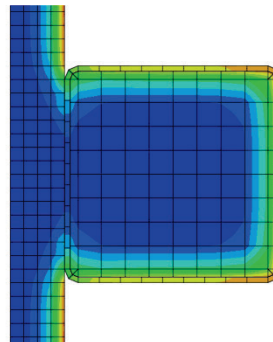
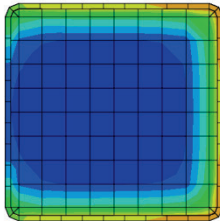
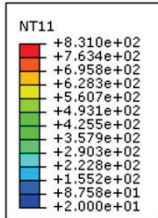
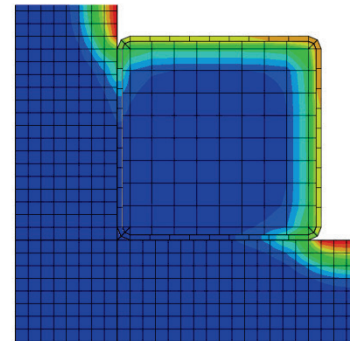
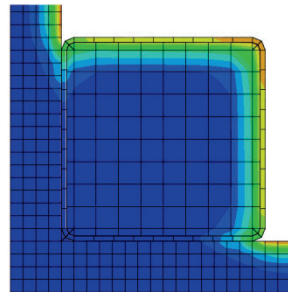
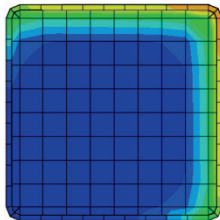
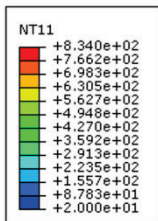
Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli



Ei tuloksia

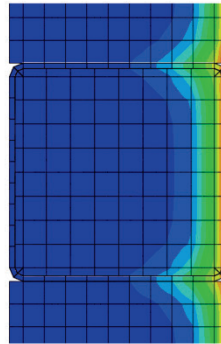
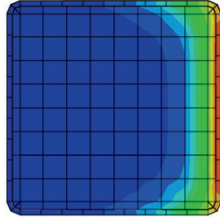
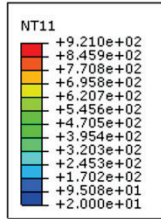


# 400x400 R60

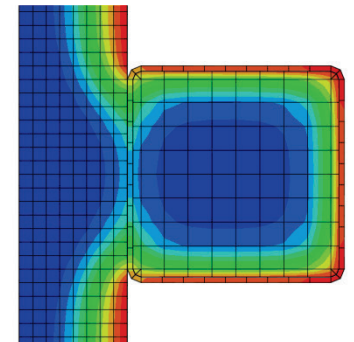
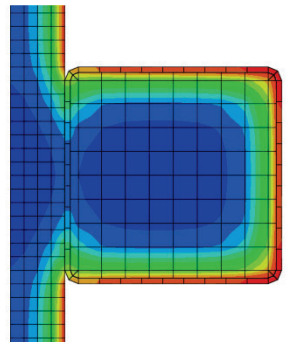
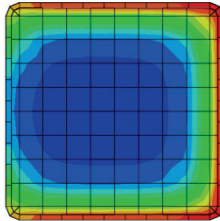
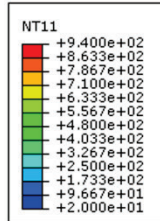
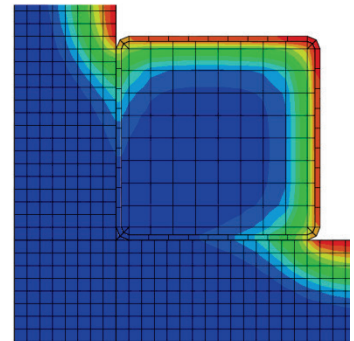
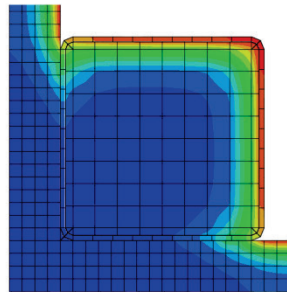
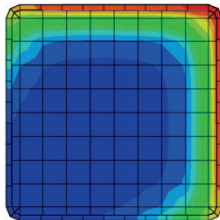
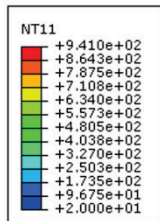
Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli



Ei tuloksia

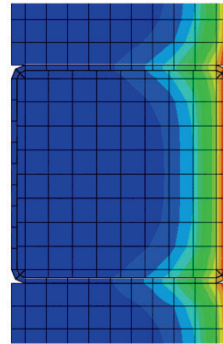
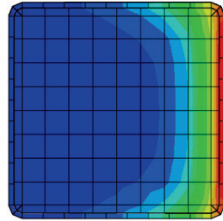
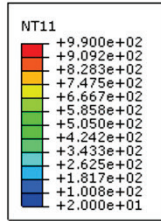


# 400x400 R90

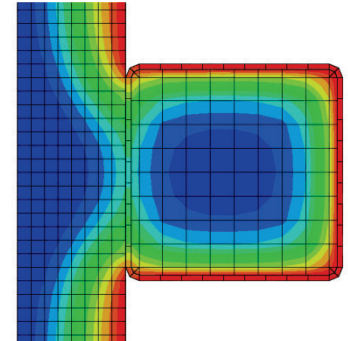
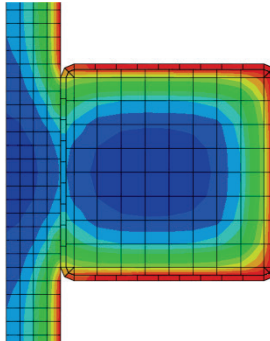
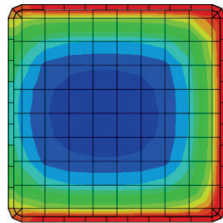
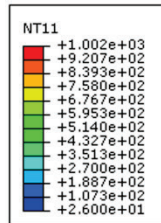
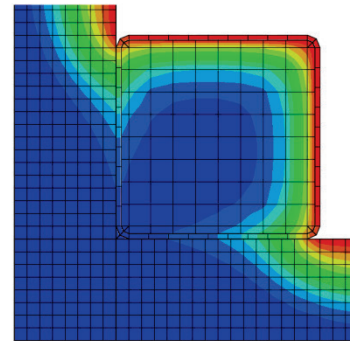
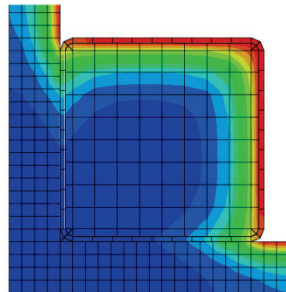
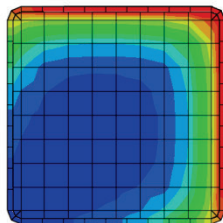
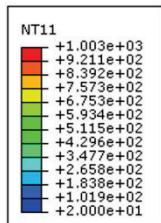
Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli



Ei tuloksia

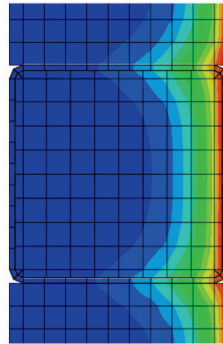
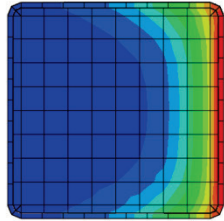
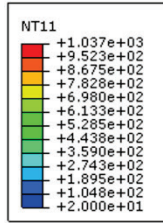


# 400x400 R120

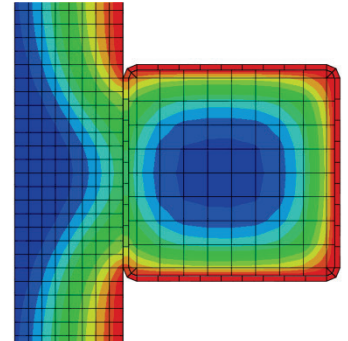
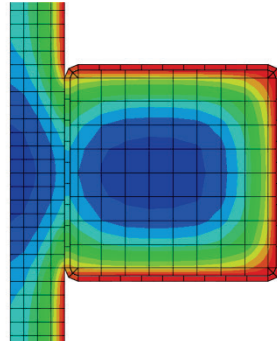
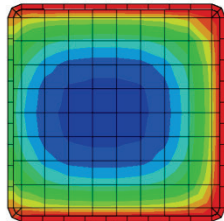
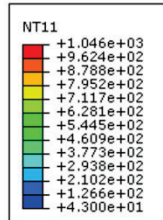
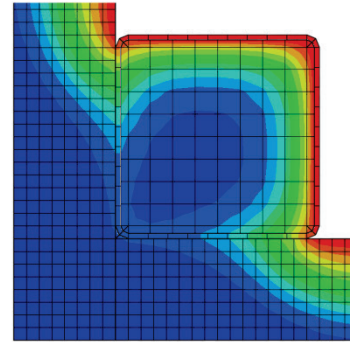
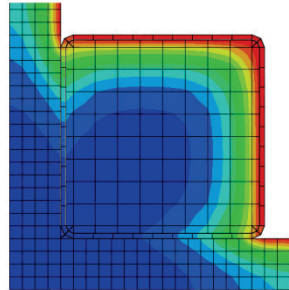
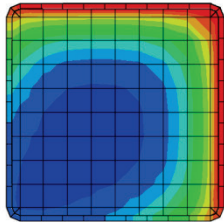
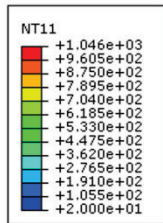
Adiabaattinen

Betoni

Sandwich-paneeli

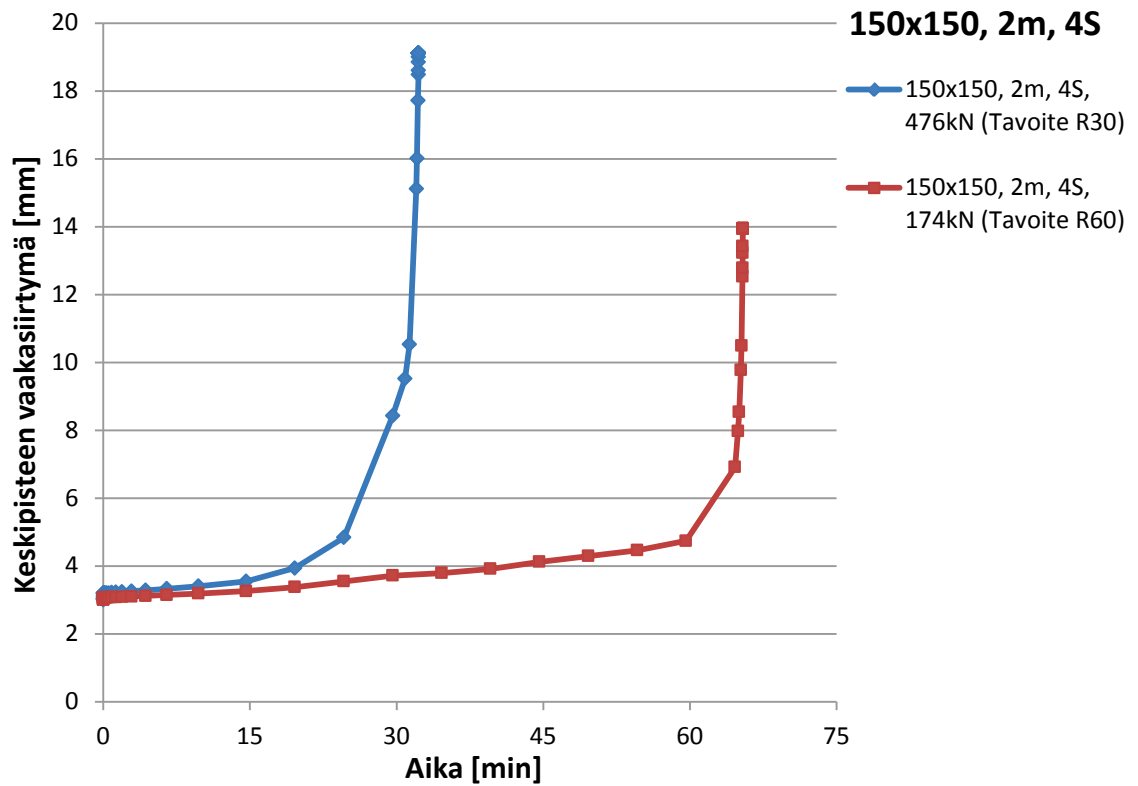


Ei tuloksia

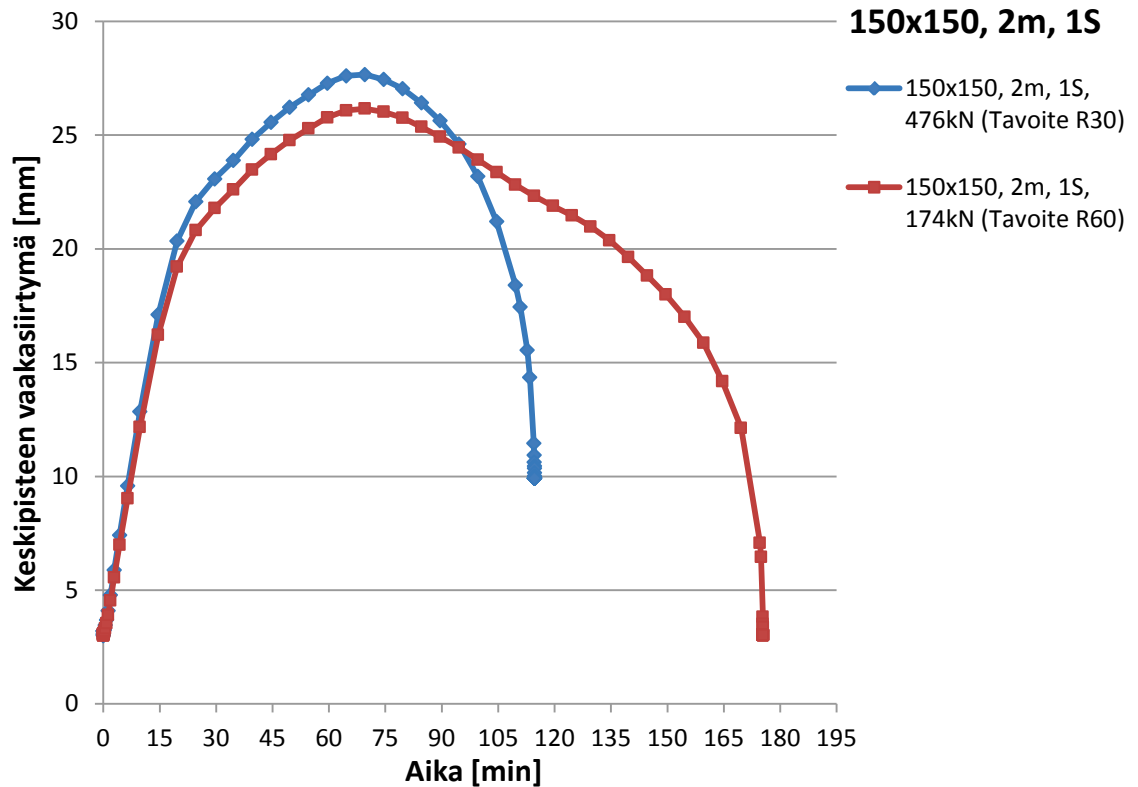


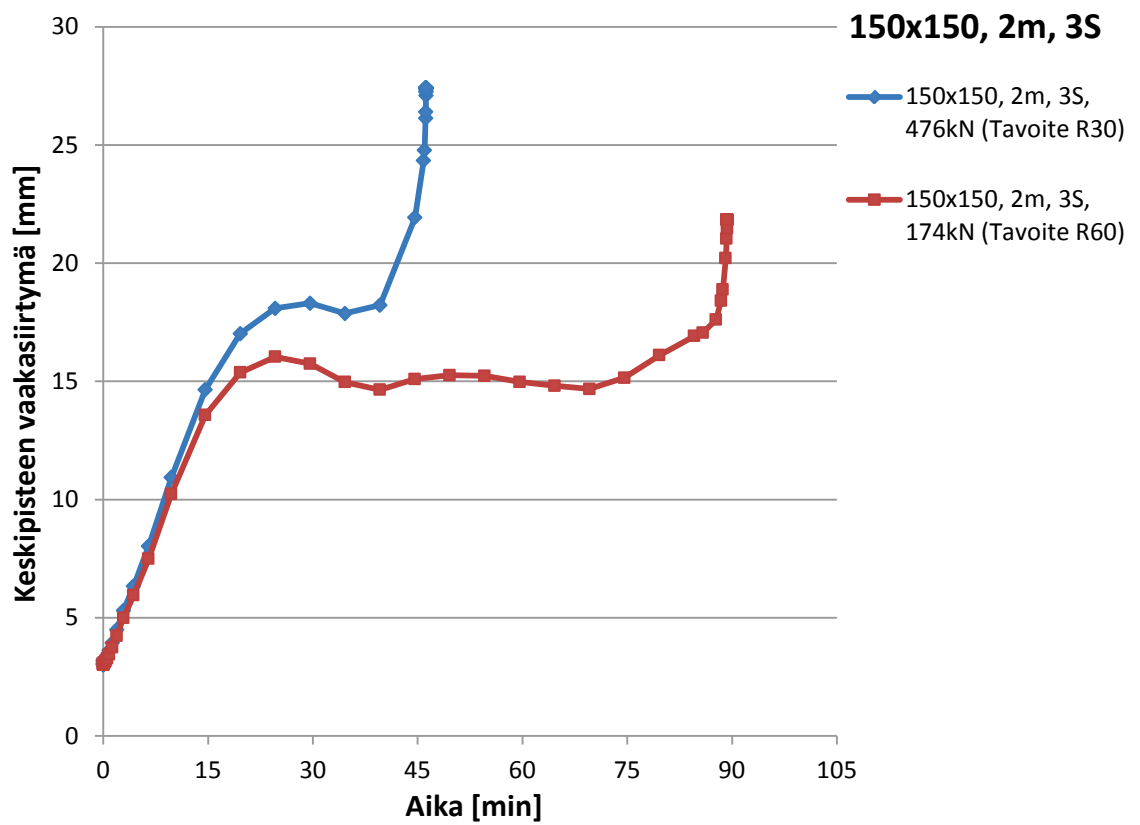
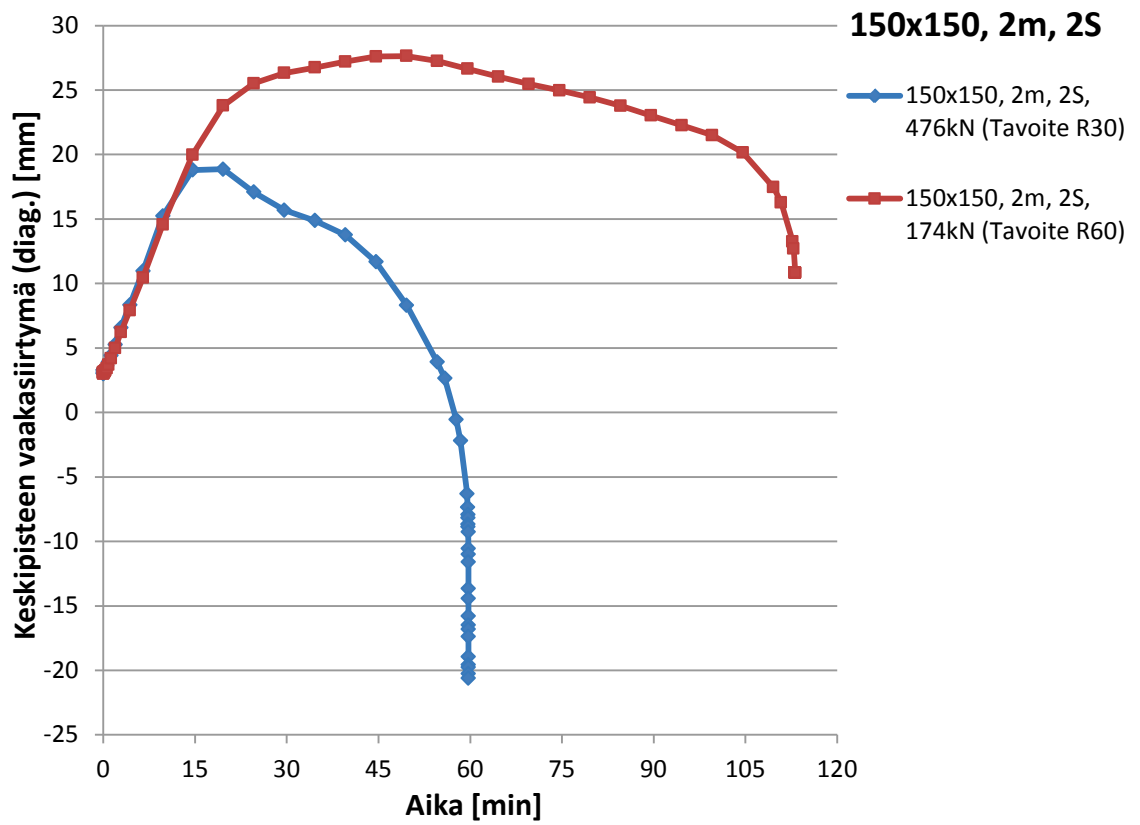
### LIITE 3: Liittopilarien aika–siirtymä käyrät tutkituissa palotilanteissa

#### 150x150, 2 m eristämättömät liittopilarit



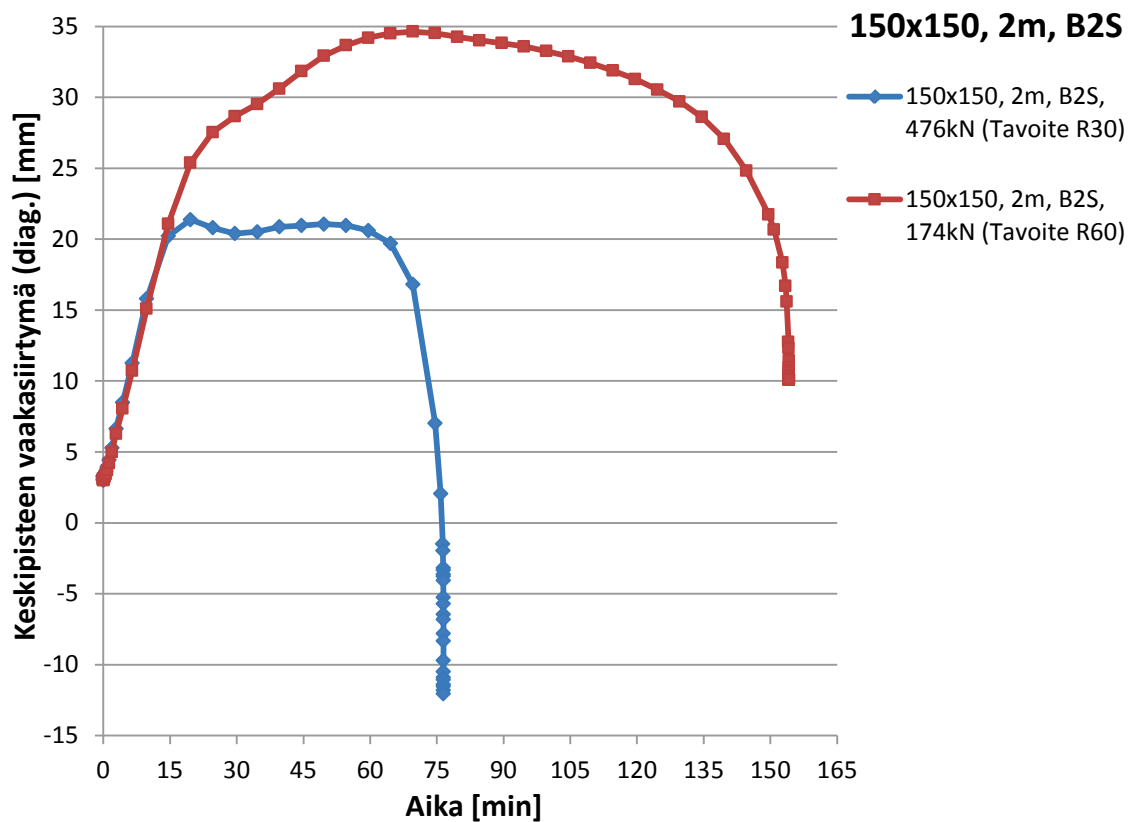
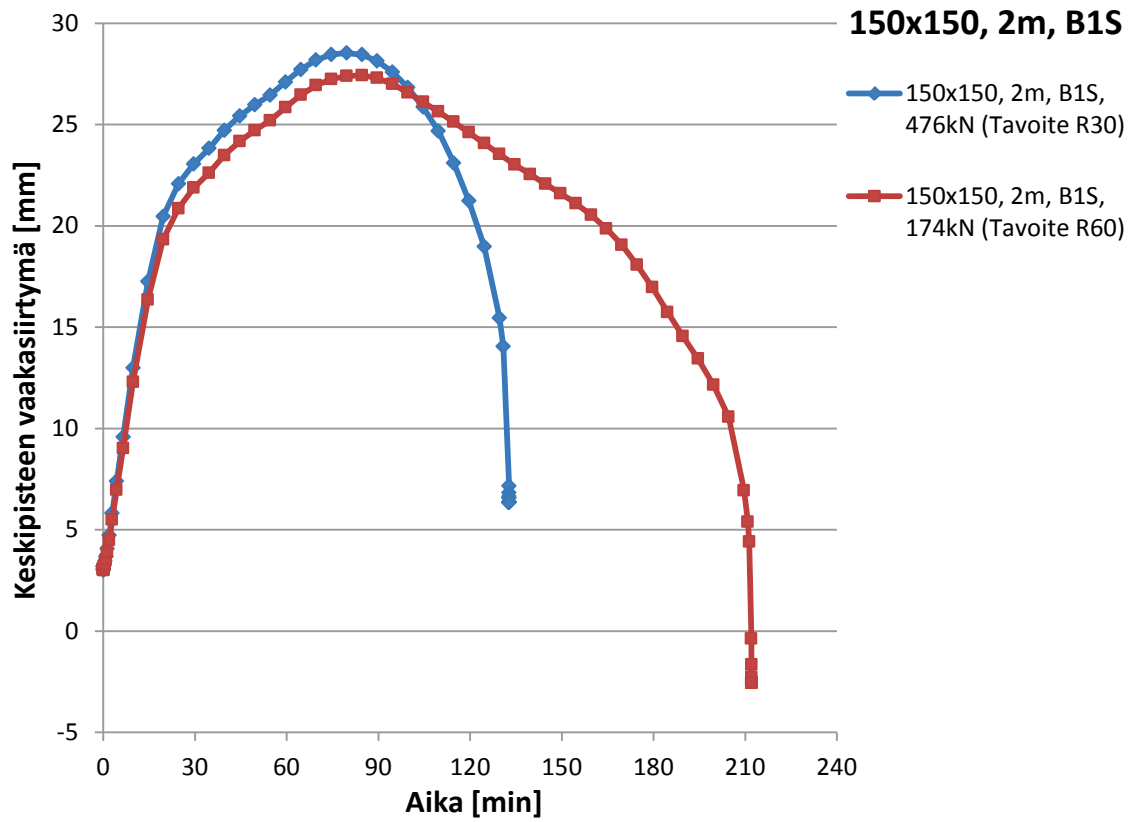
#### 150x150, 2 m adiabaattisesti eristetyt liittopilarit

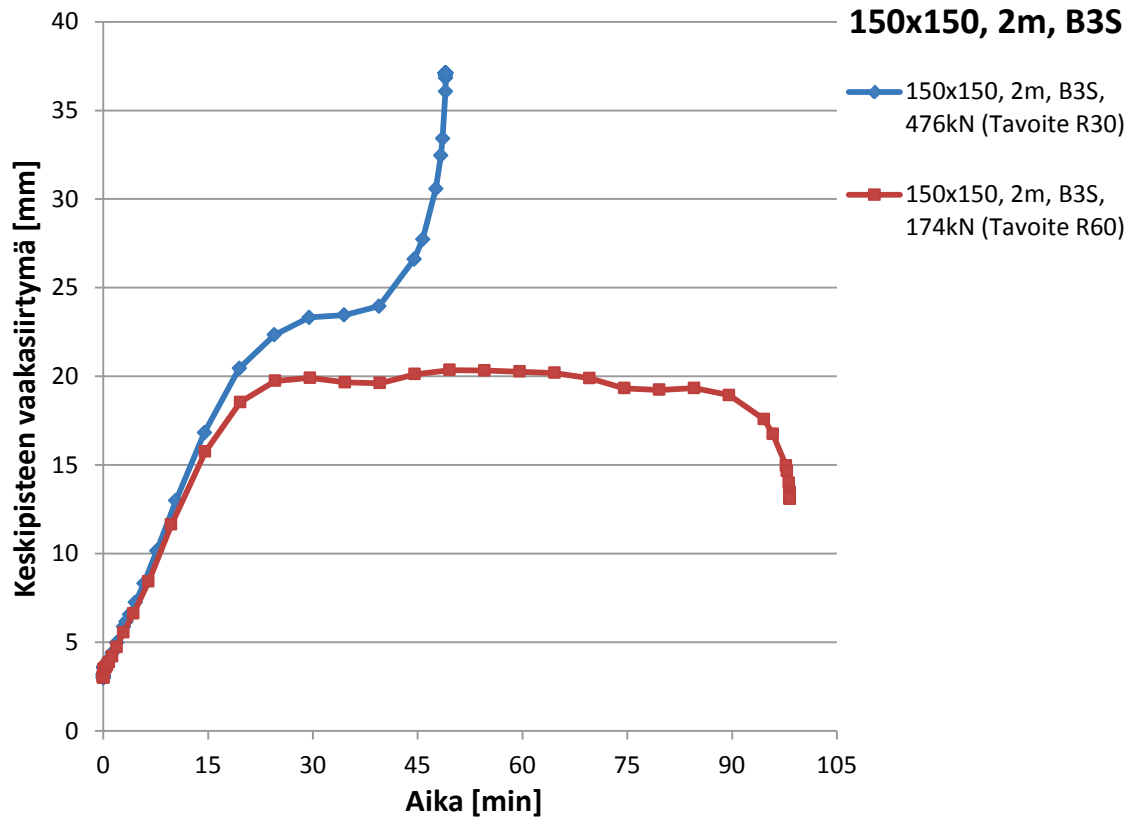




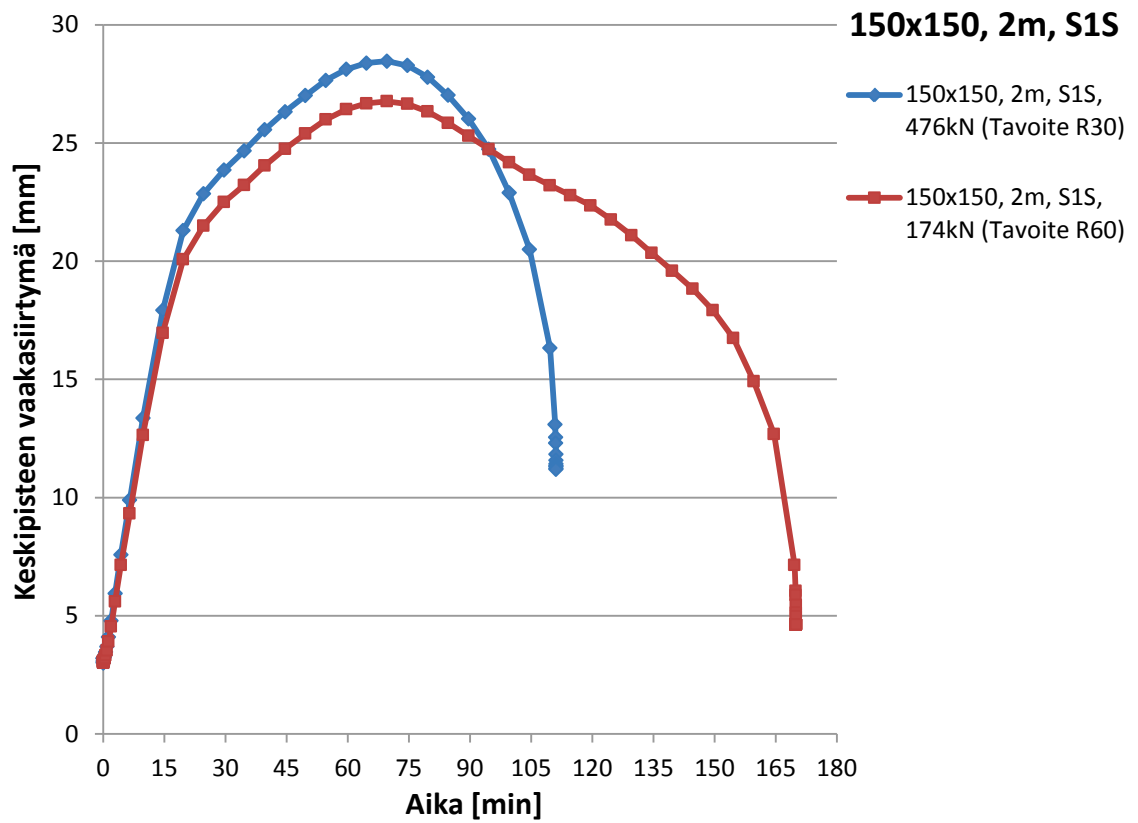


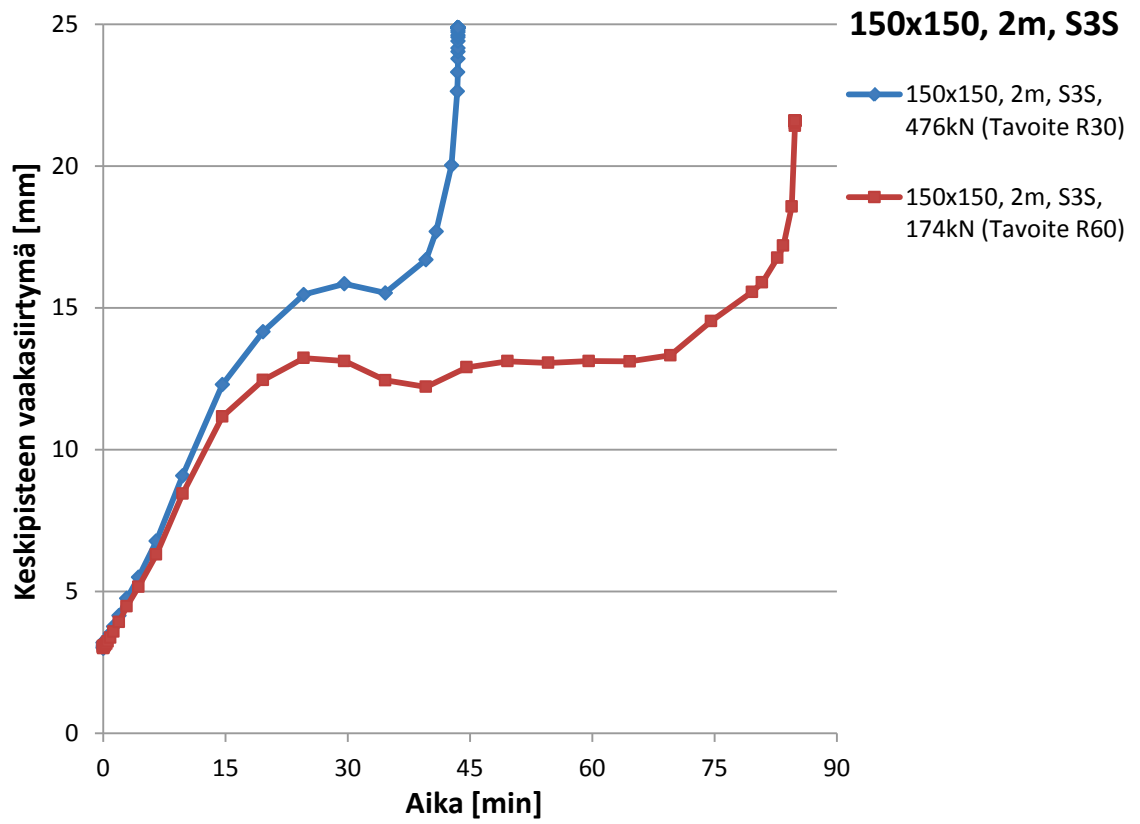
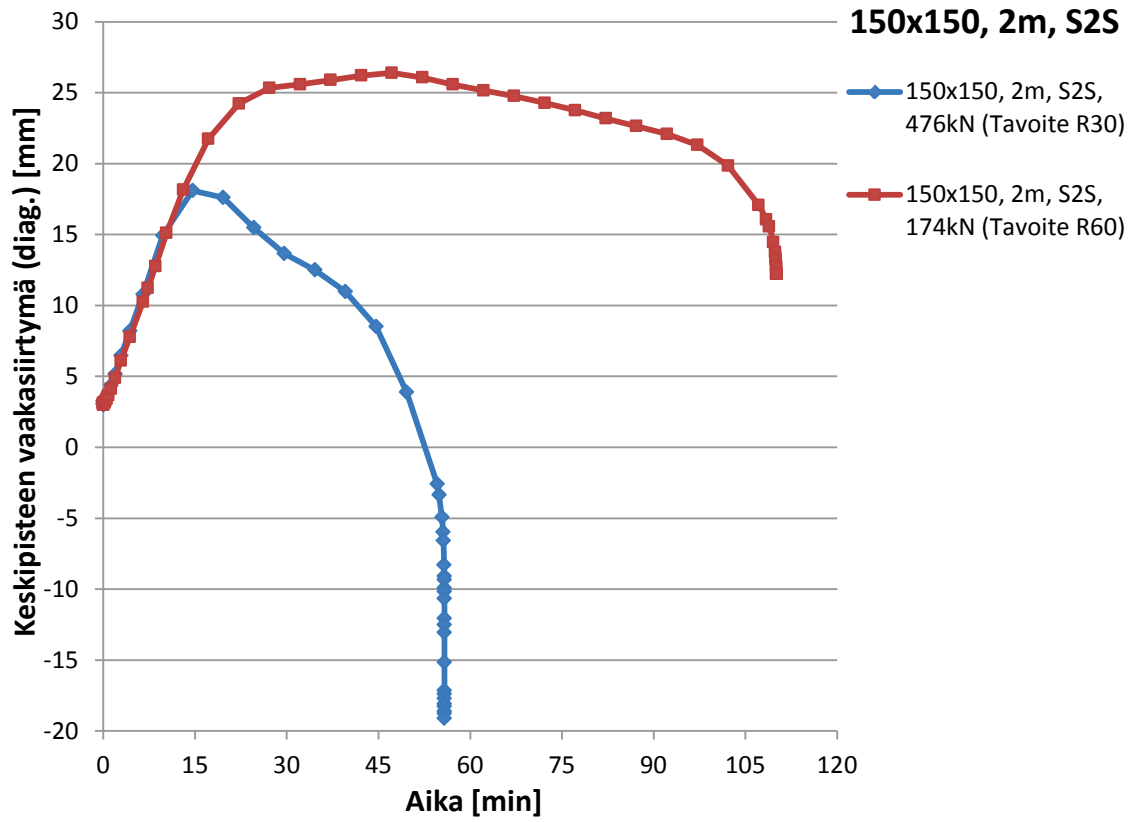
150x150, 2 m betonia vasten olevat liittopilarit



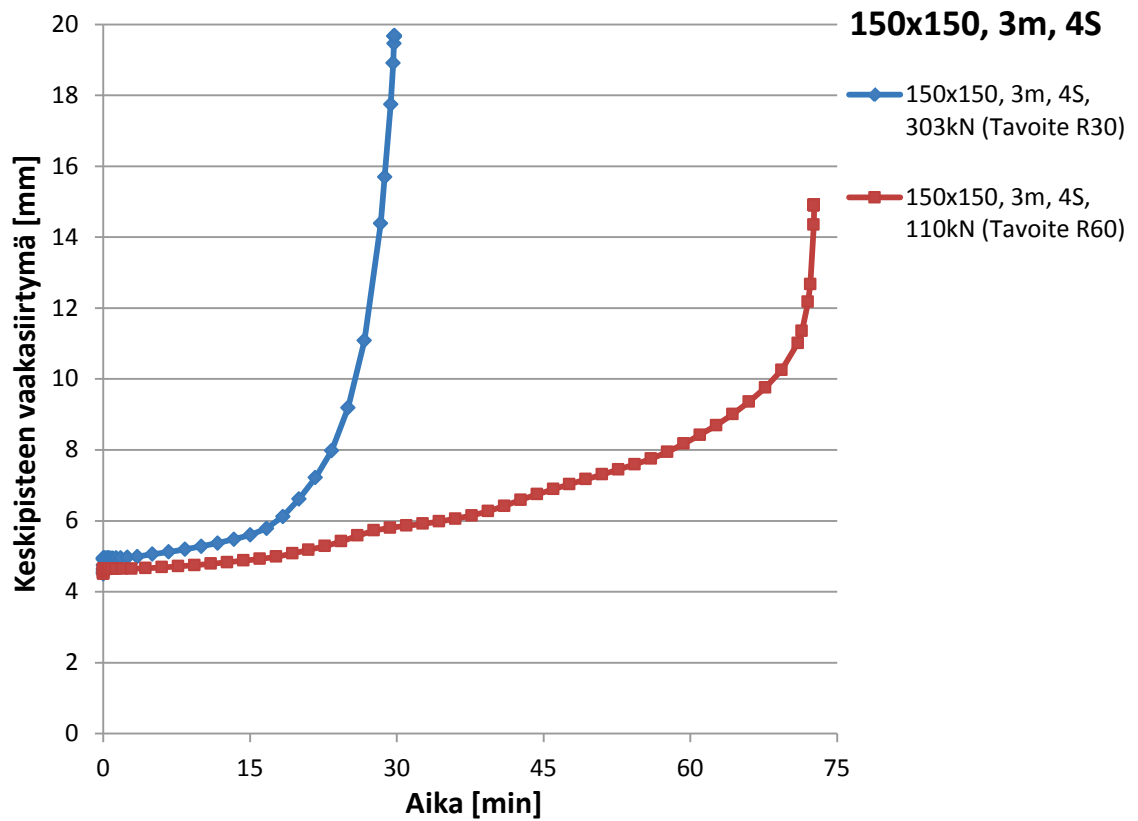


**150x150, 2 m sandwich-paneeleita vasten olevat liittopilarit**

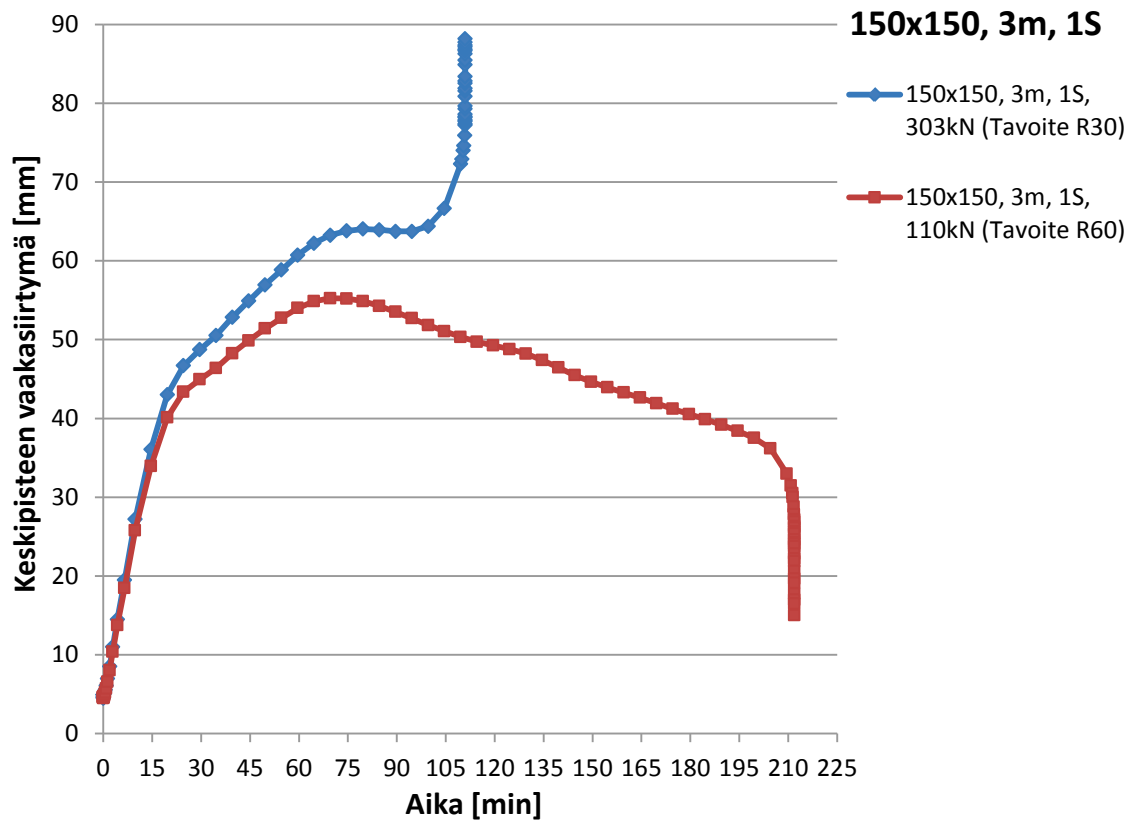


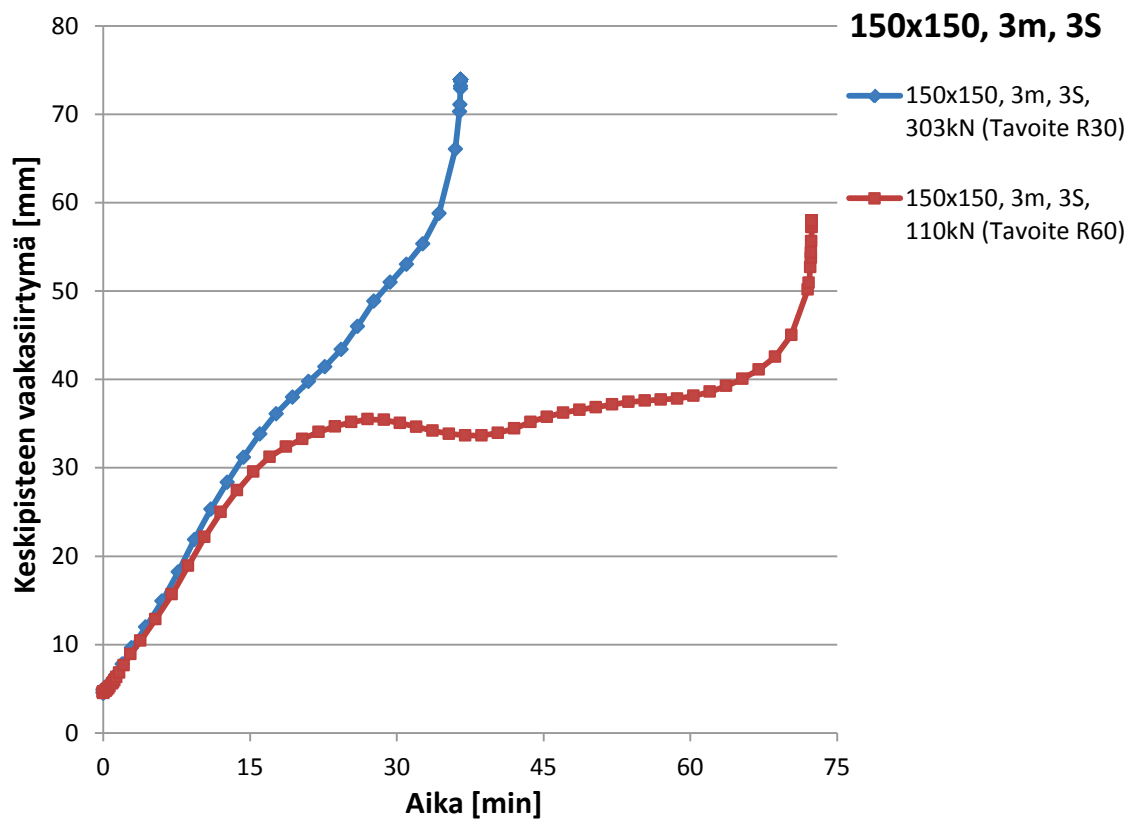
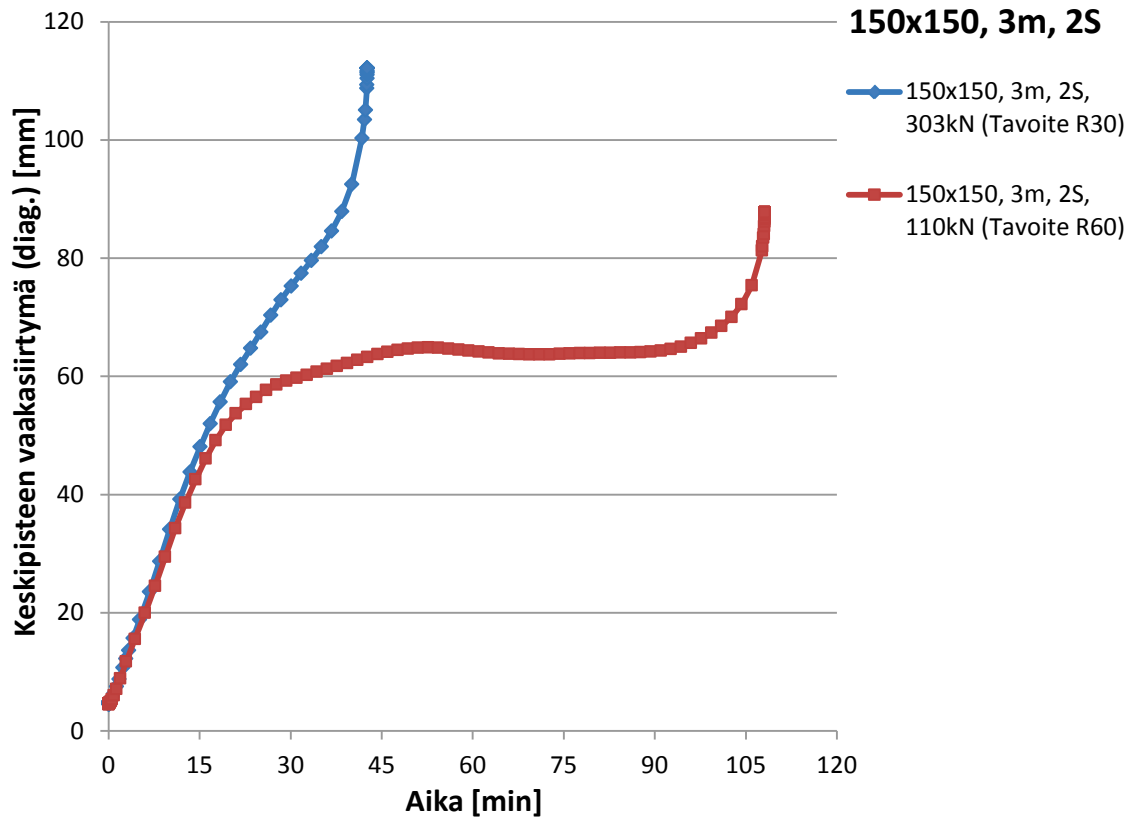


### 150x150, 3 m eristämättömät liittopilarit

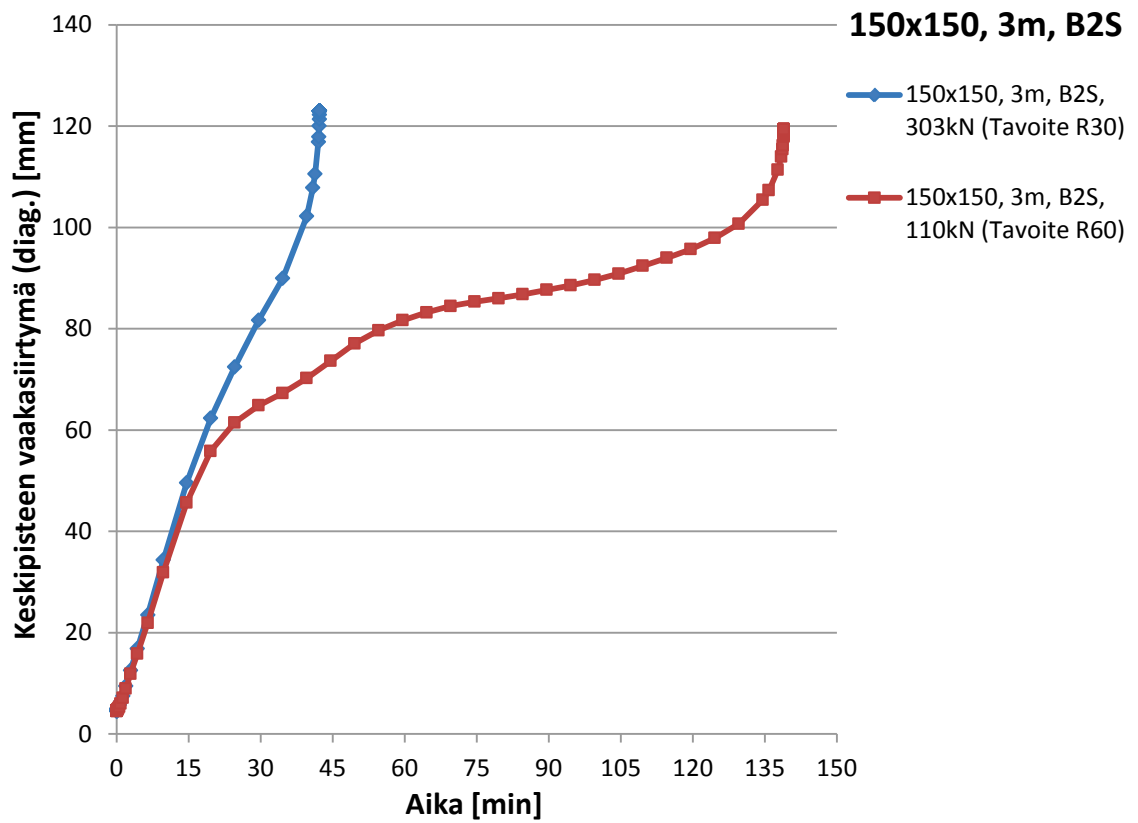
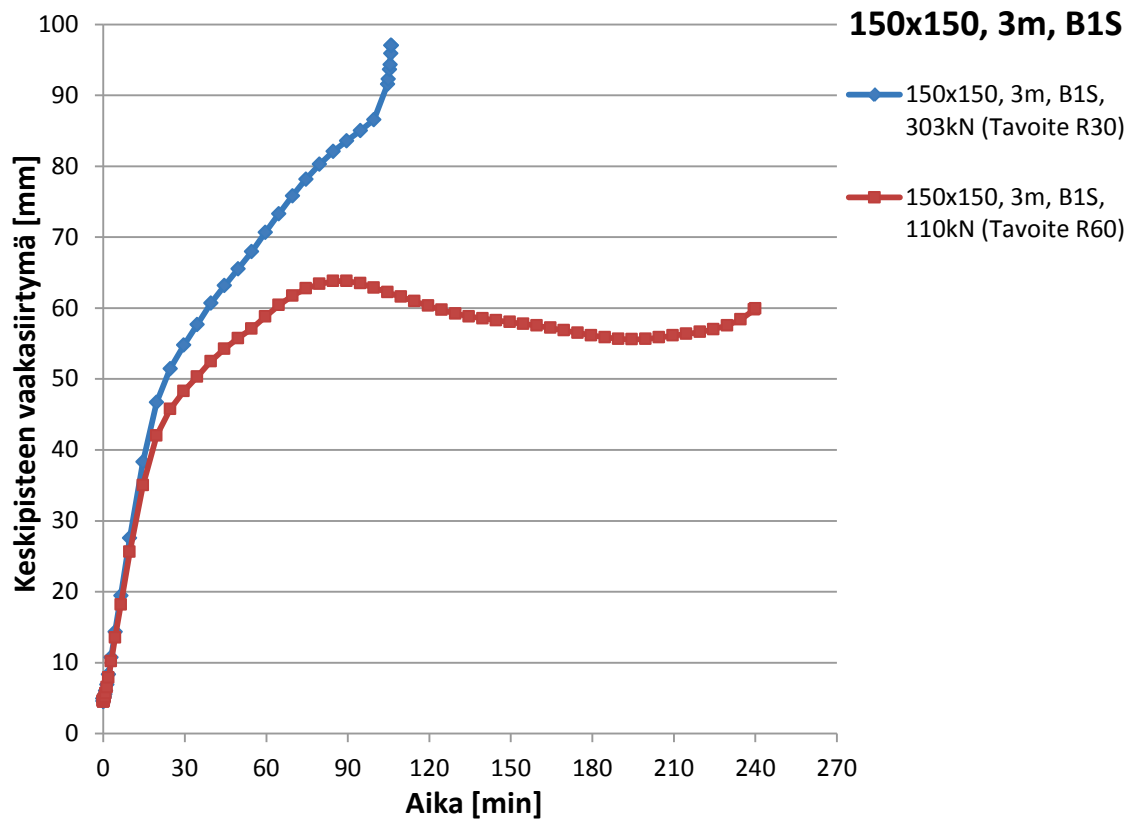


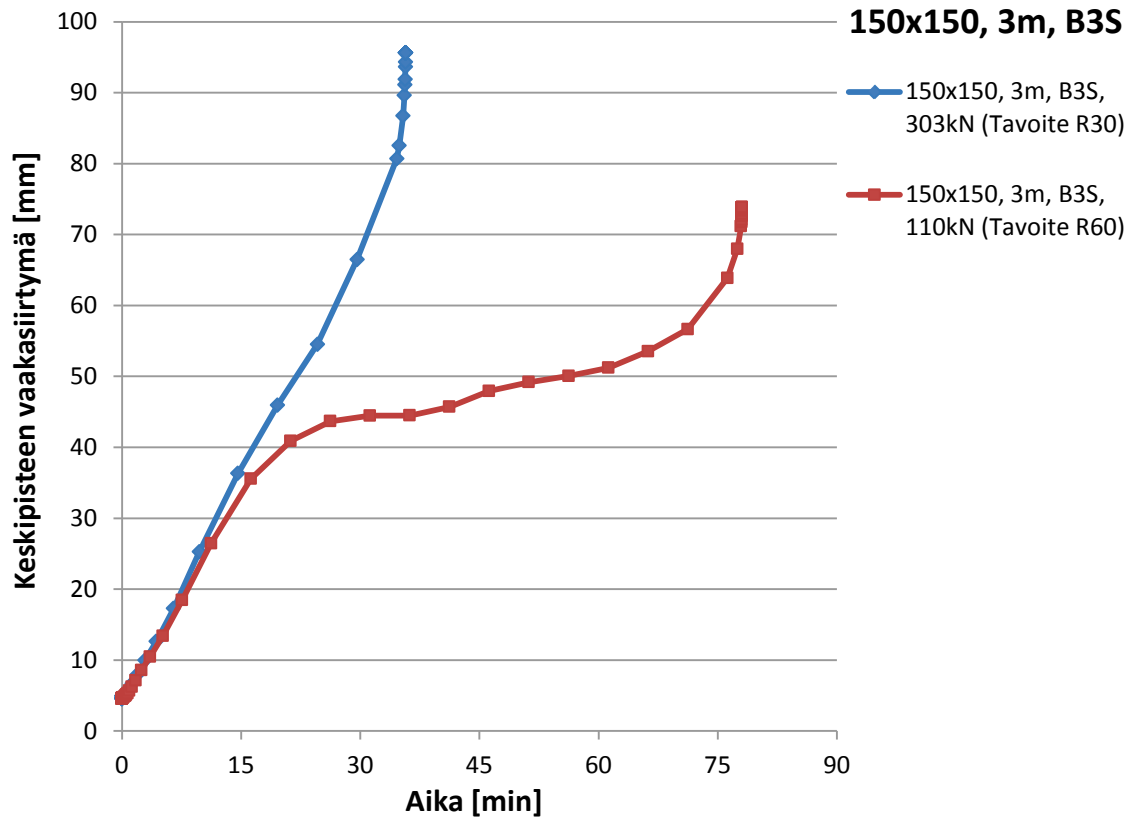
### 150x150, 3 m adiabaattisesti eristetyt liittopilarit



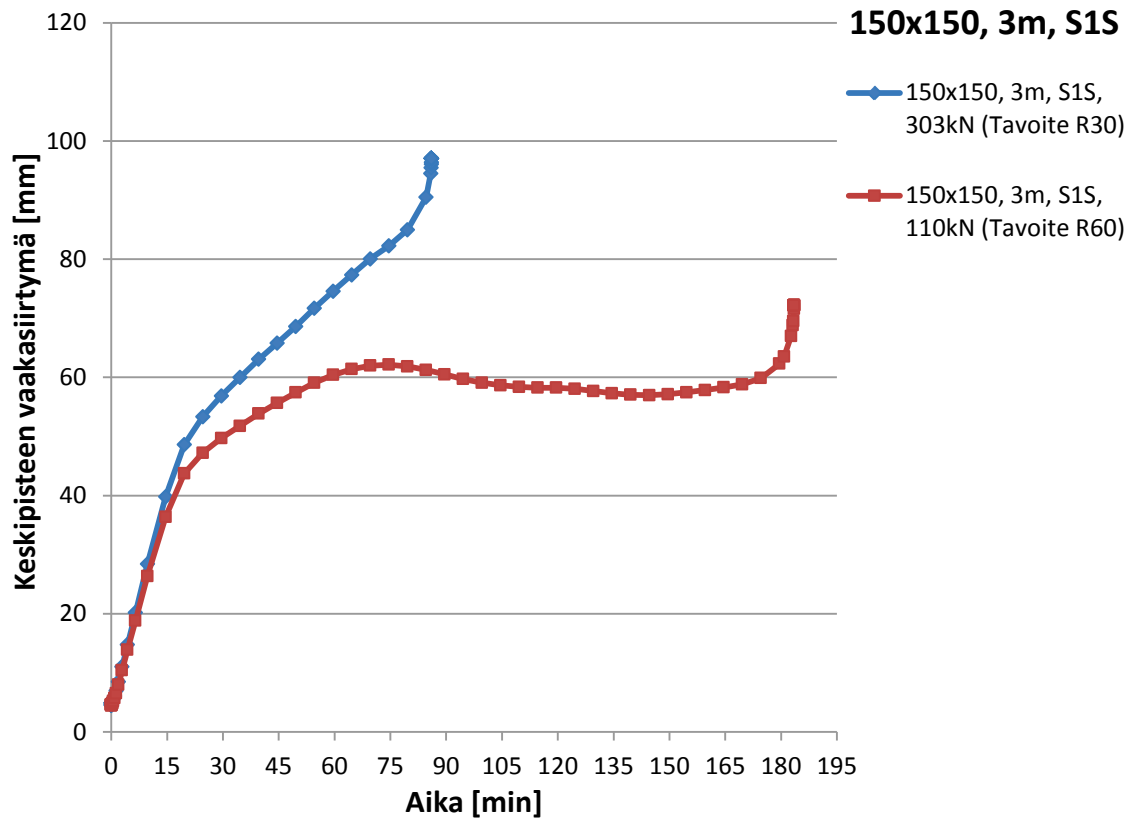


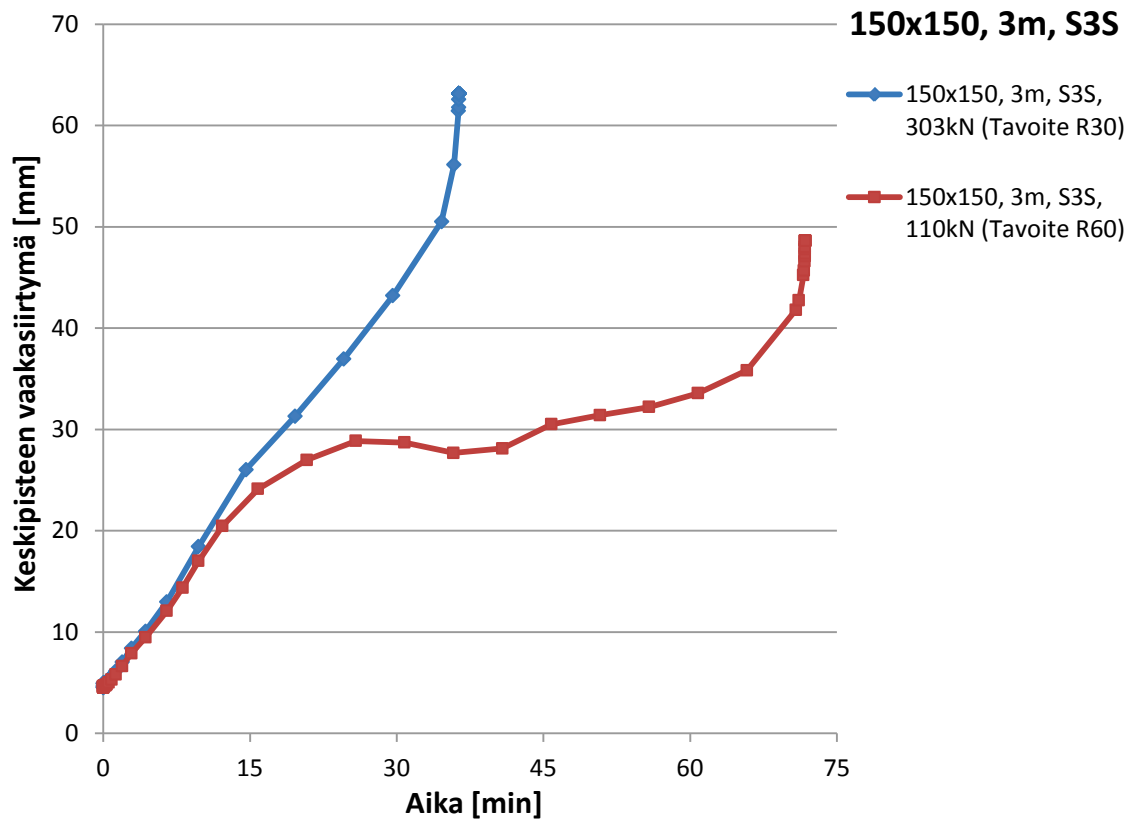
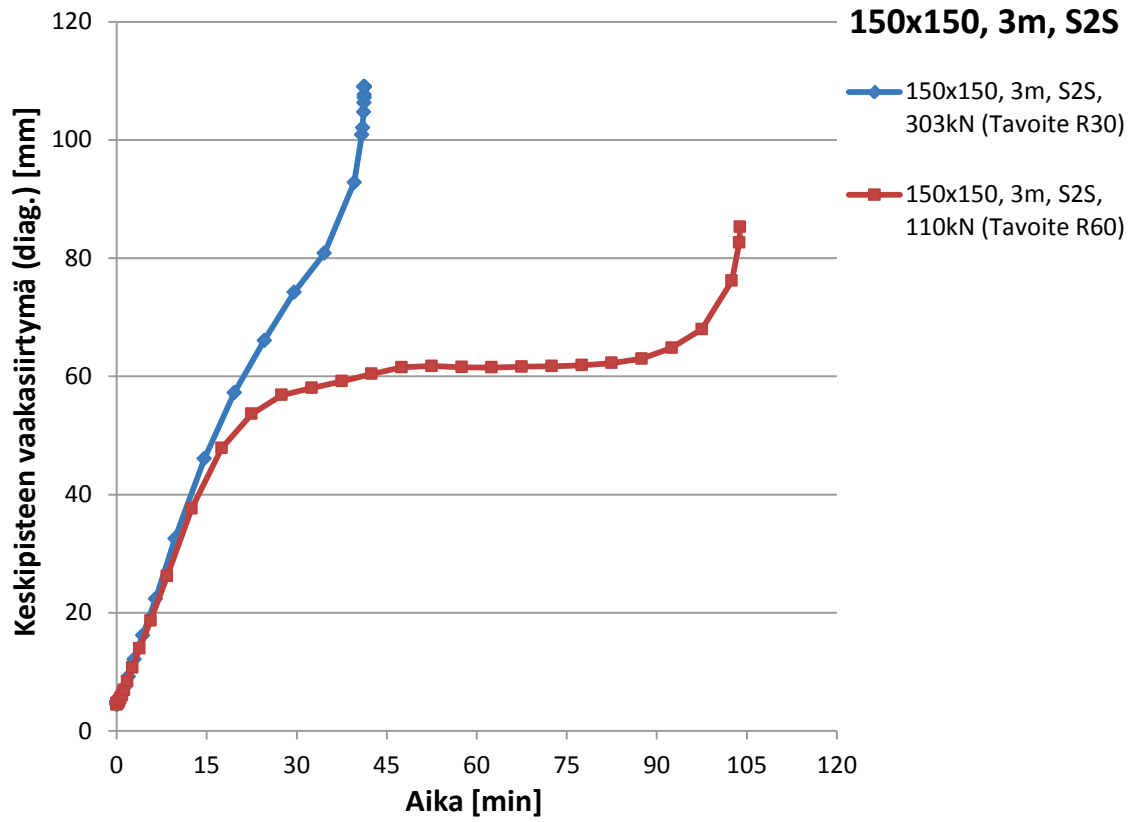
### 150x150, 3 m betonia vasten olevat liittopilarit





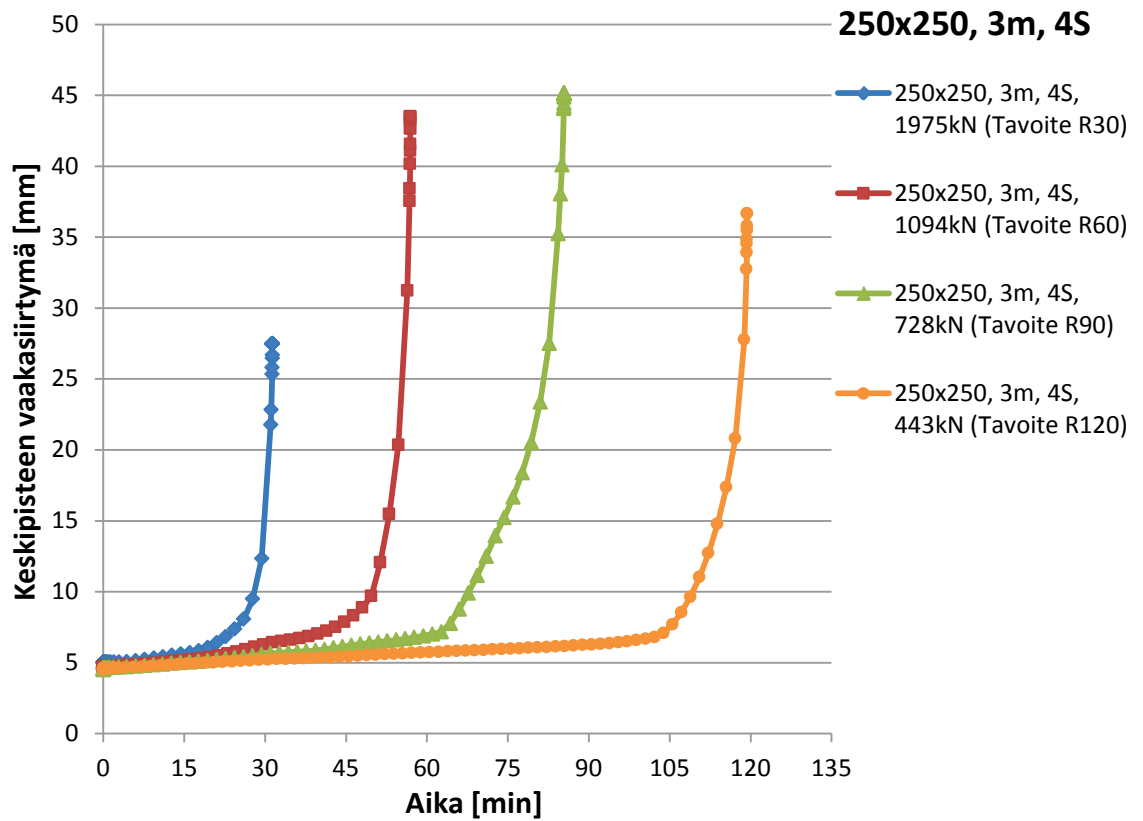
### 150x150, 3 m sandwich-paneeleita vasten olevat liittopilarit



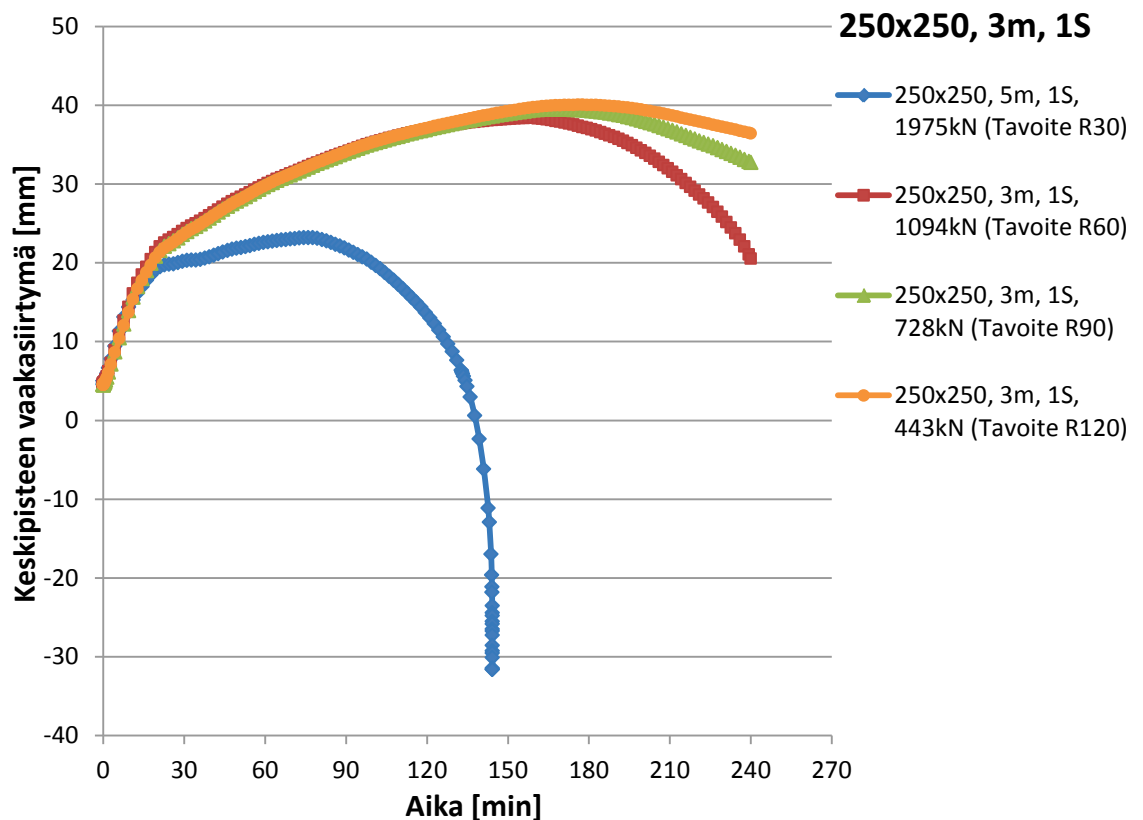


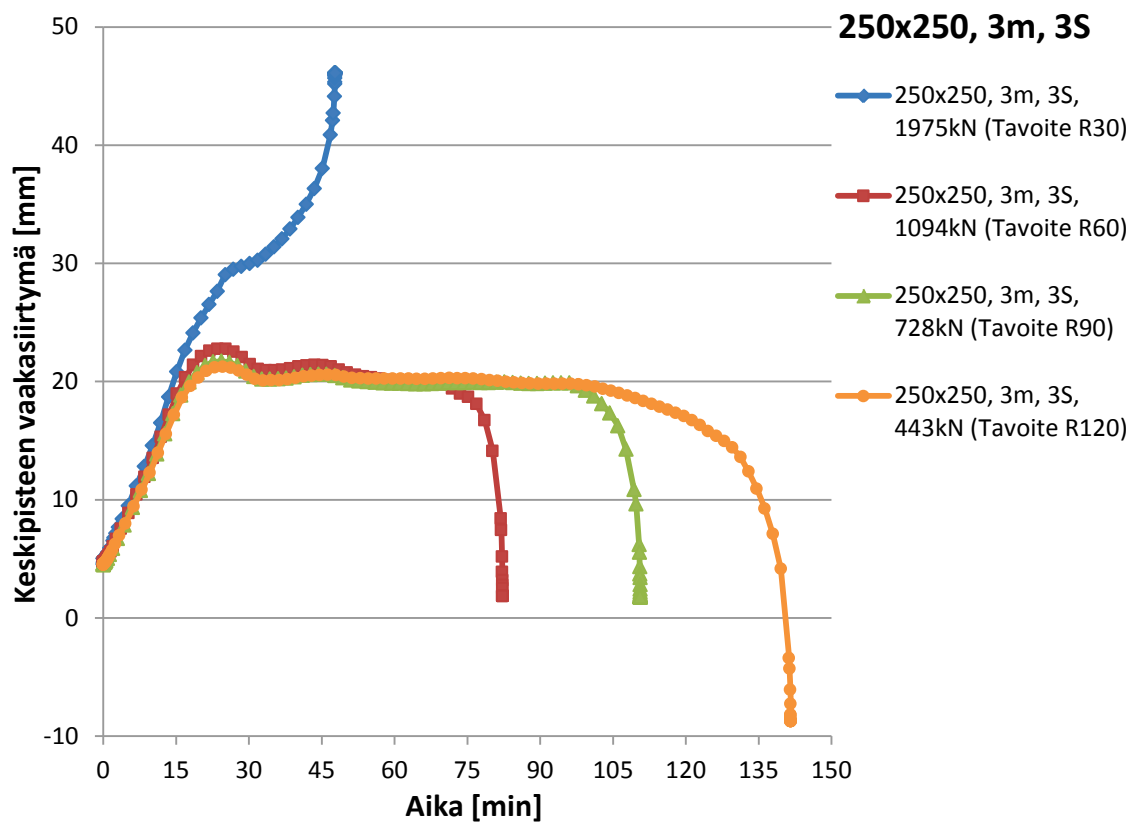
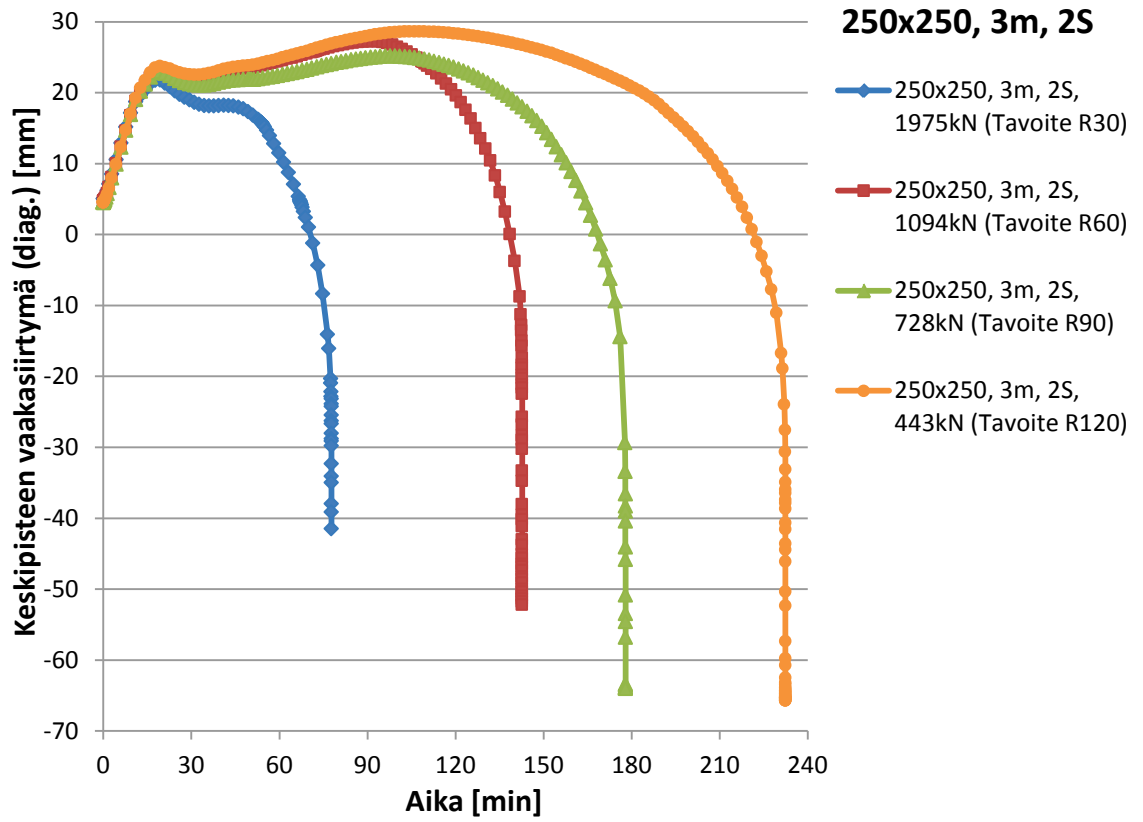


**250x250, 3 m eristämättömät liittopilarit**

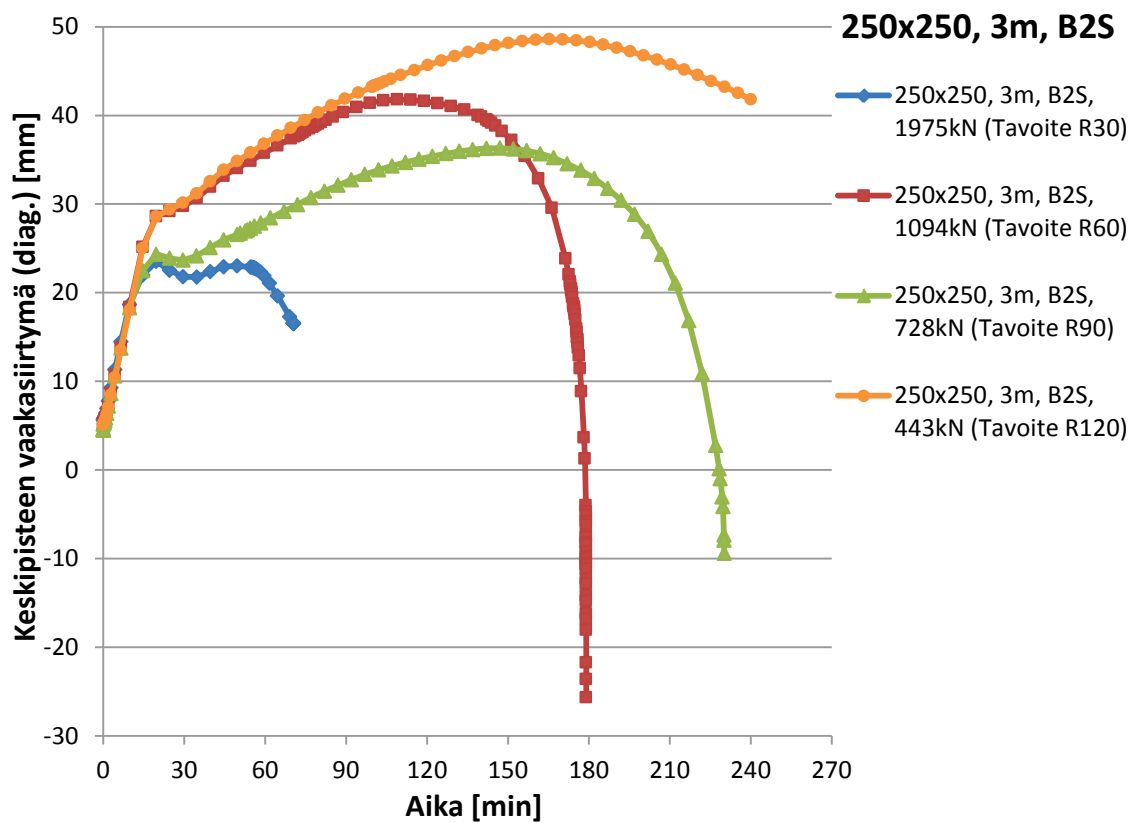
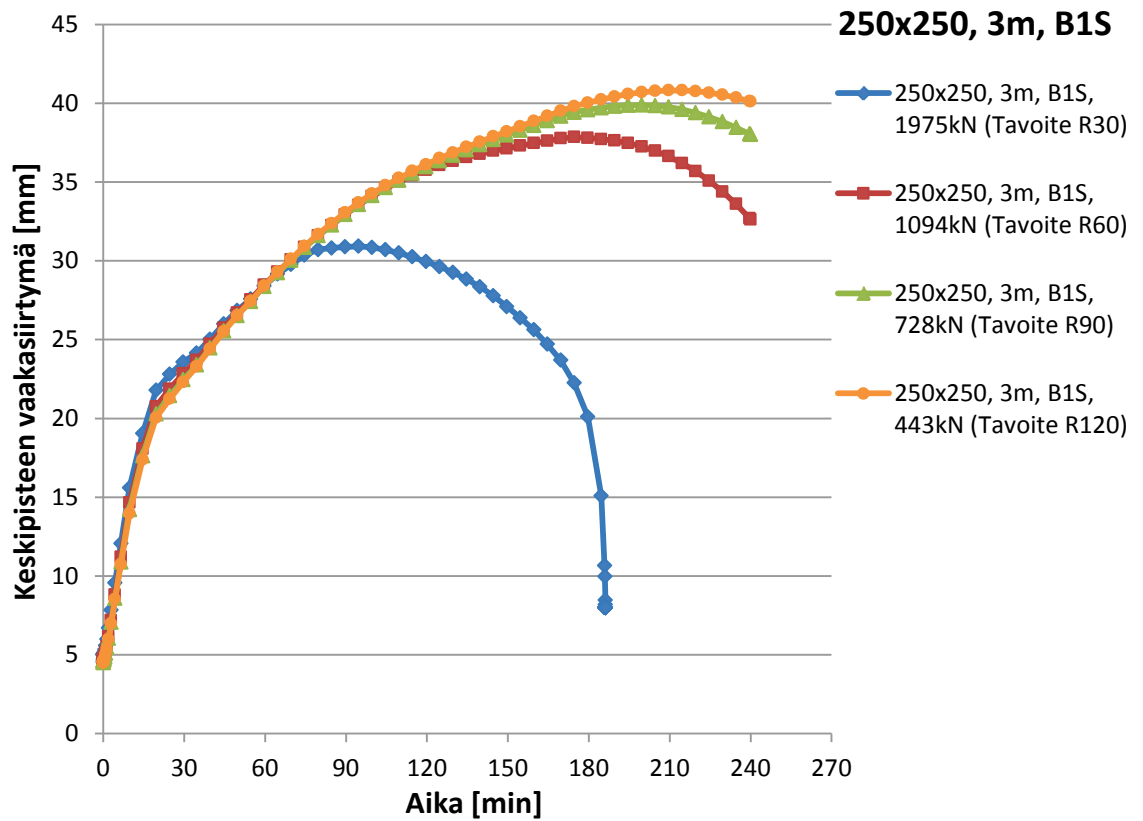


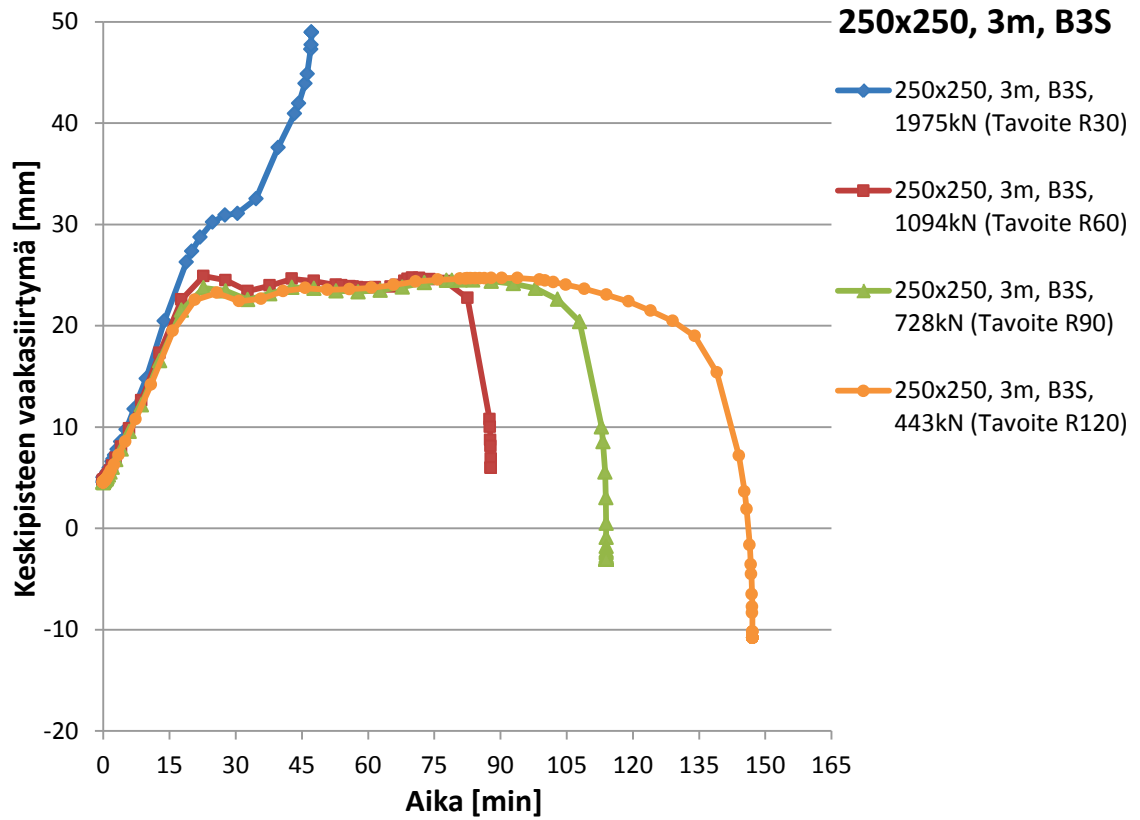
**250x250, 3 m adiabaattisesti eristetyt liittopilarit**



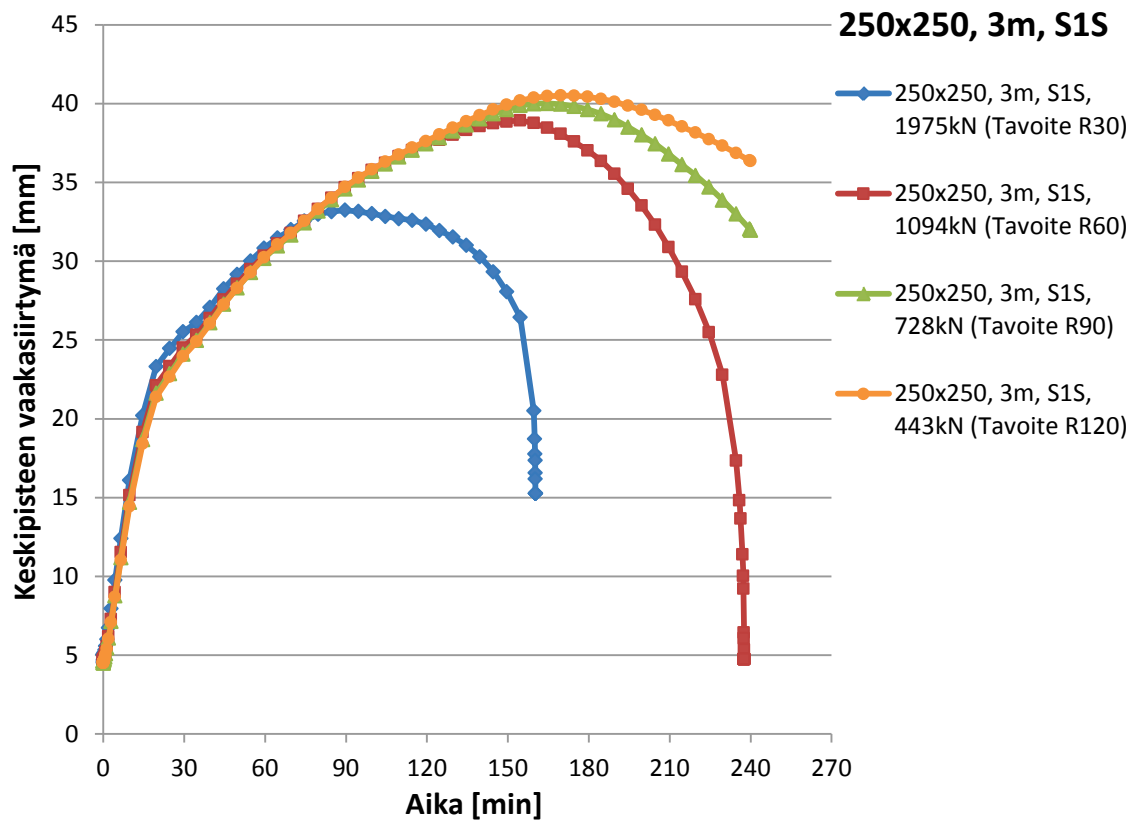


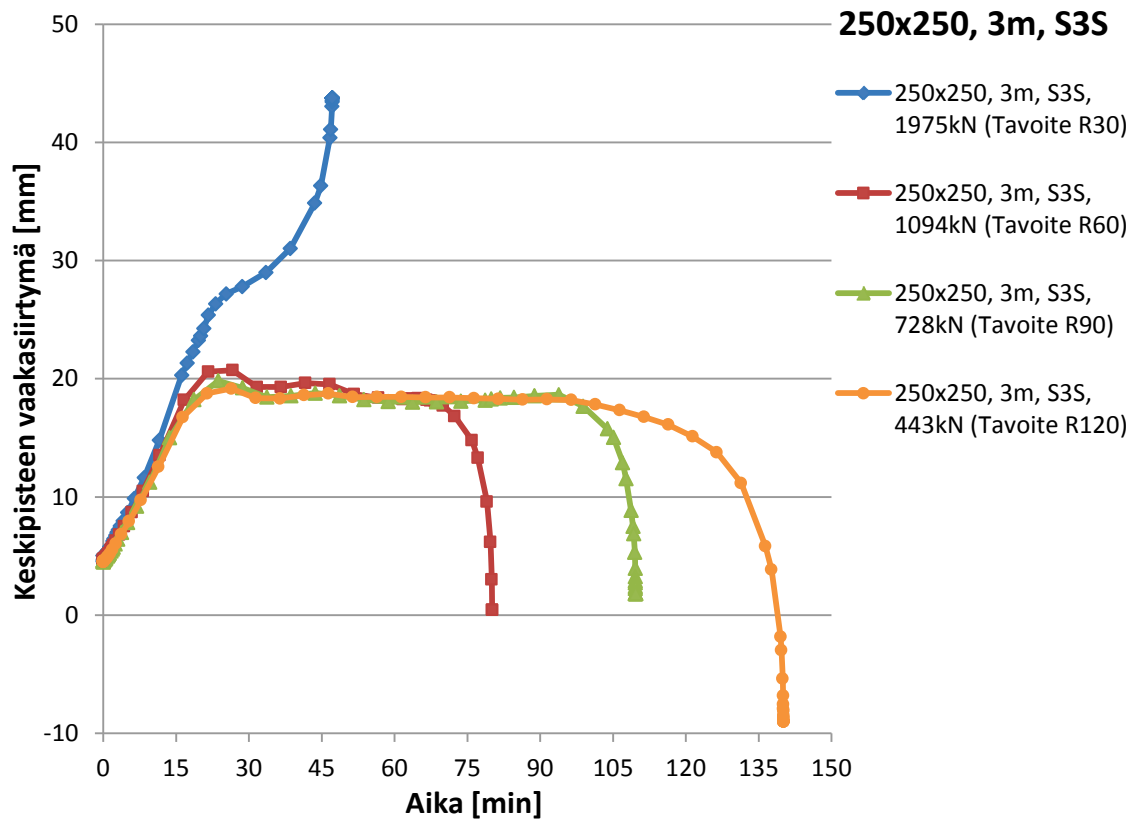
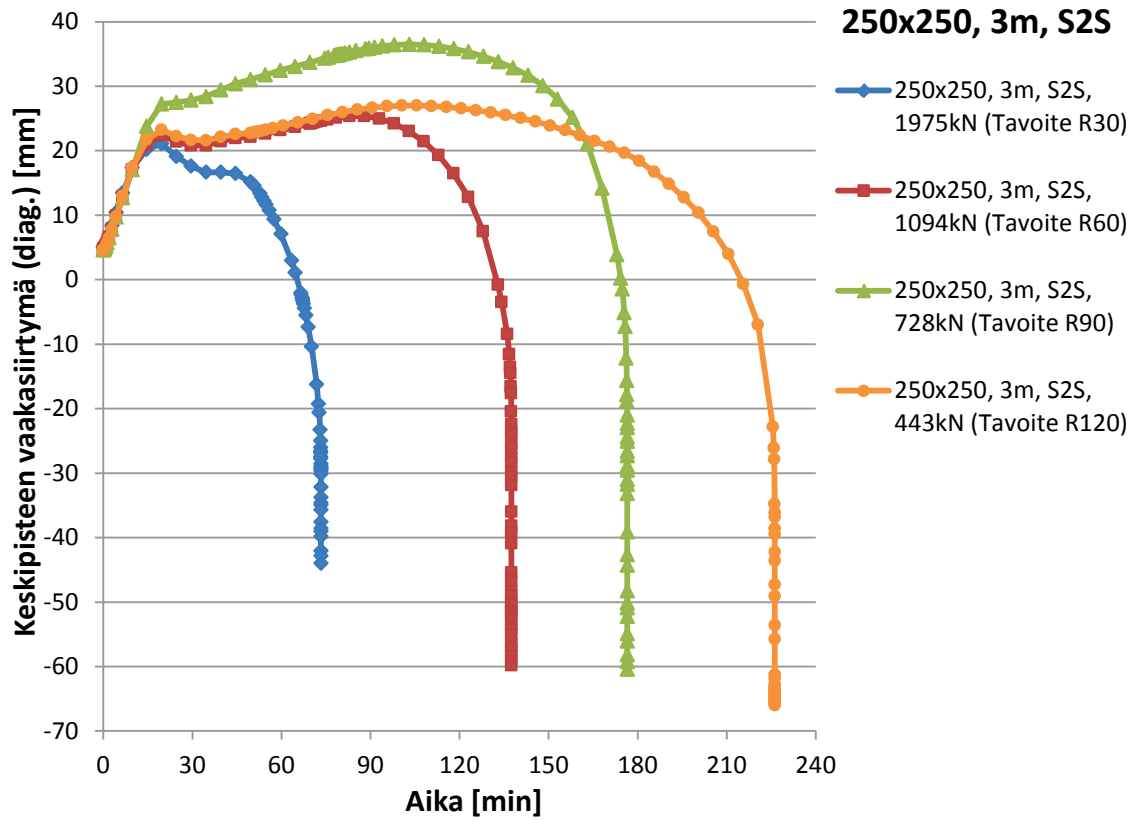
**250x250, 3 m betonia vasten olevat liittopilarit**



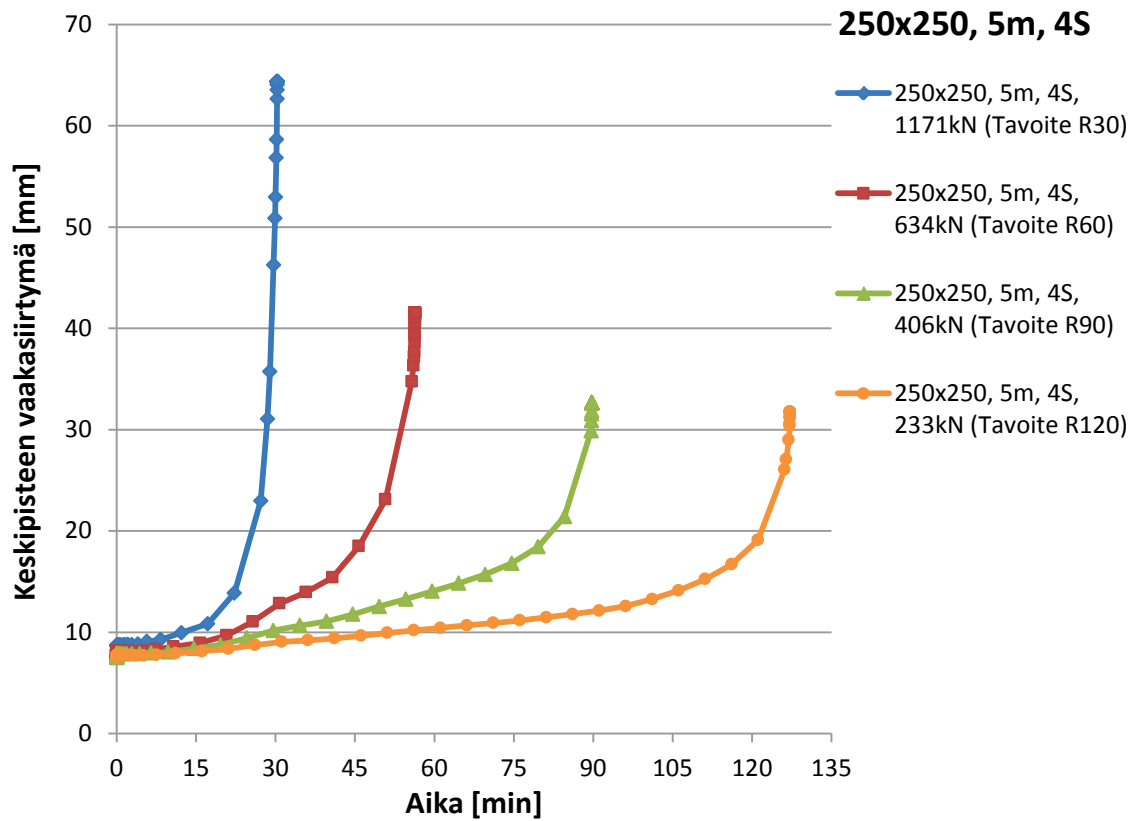


**250x250, 3 m sandwich-paneeleita vasten olevat liittopilarit**

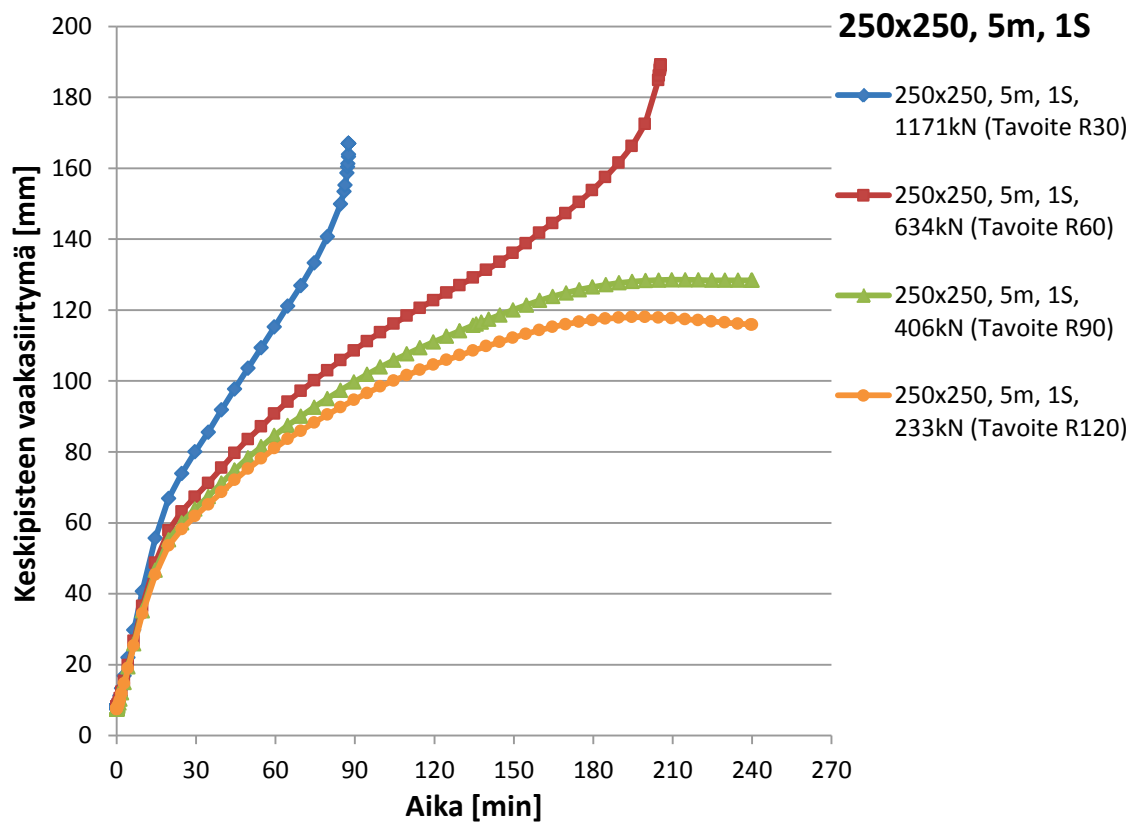


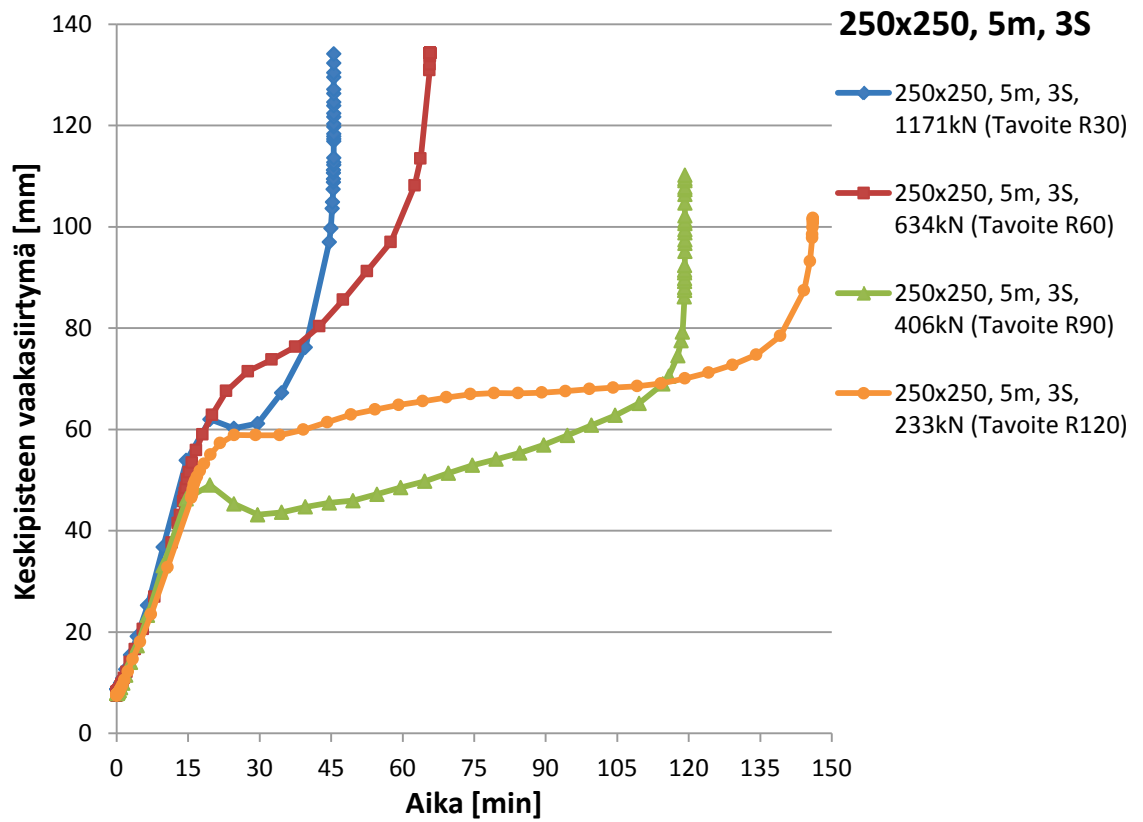
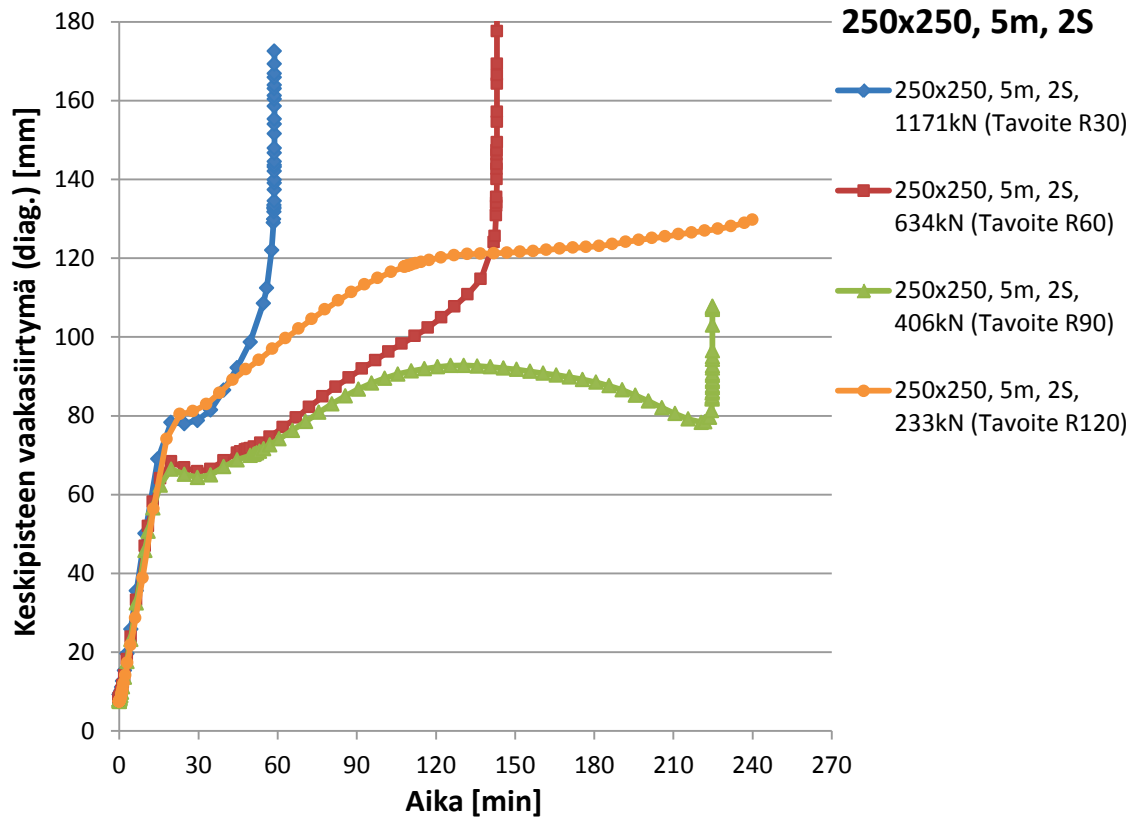


**250x250, 5 m eristämättömät liittopilarit**

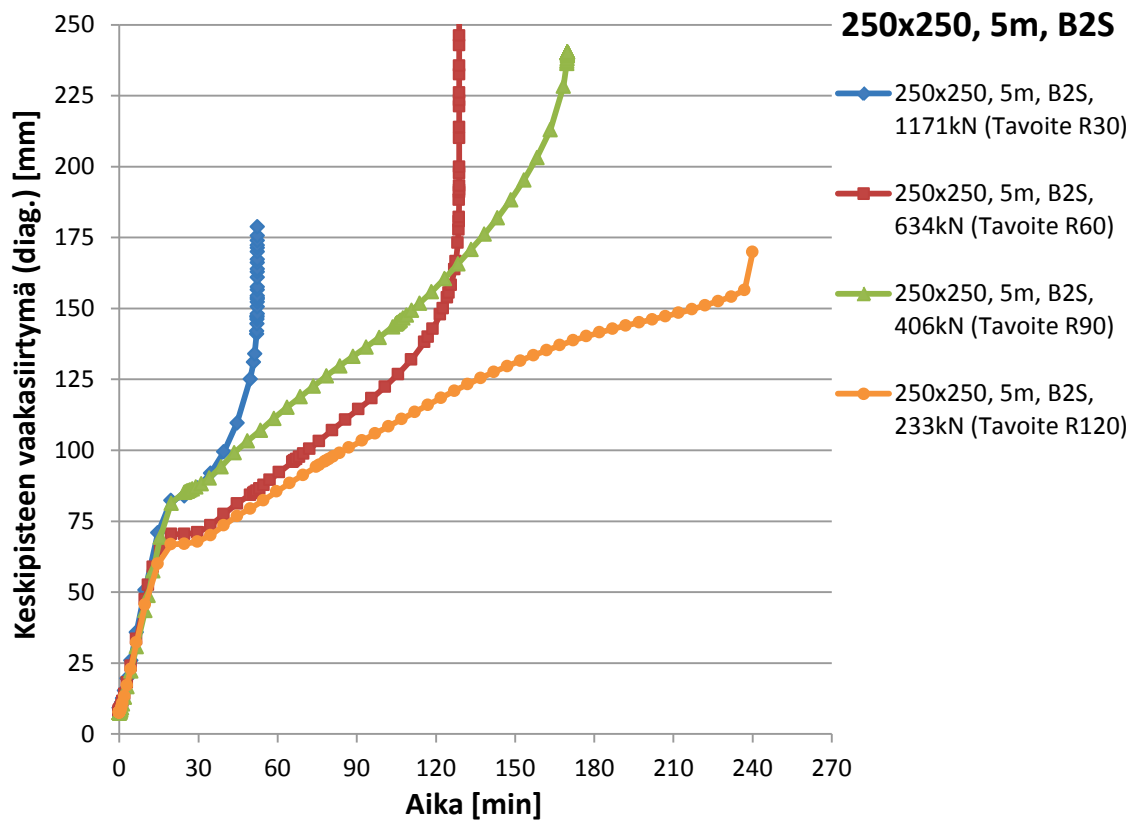
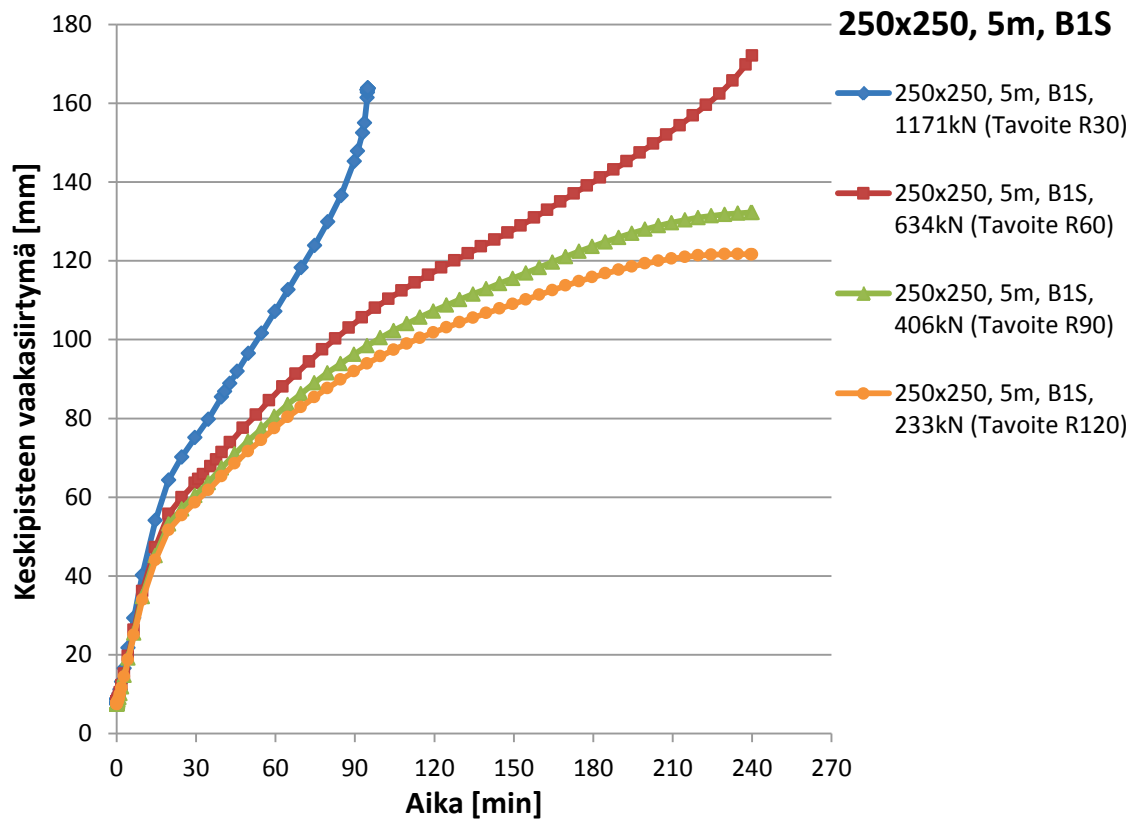


**250x250, 5 m adiabaattisesti eristetyt liittopilarit**

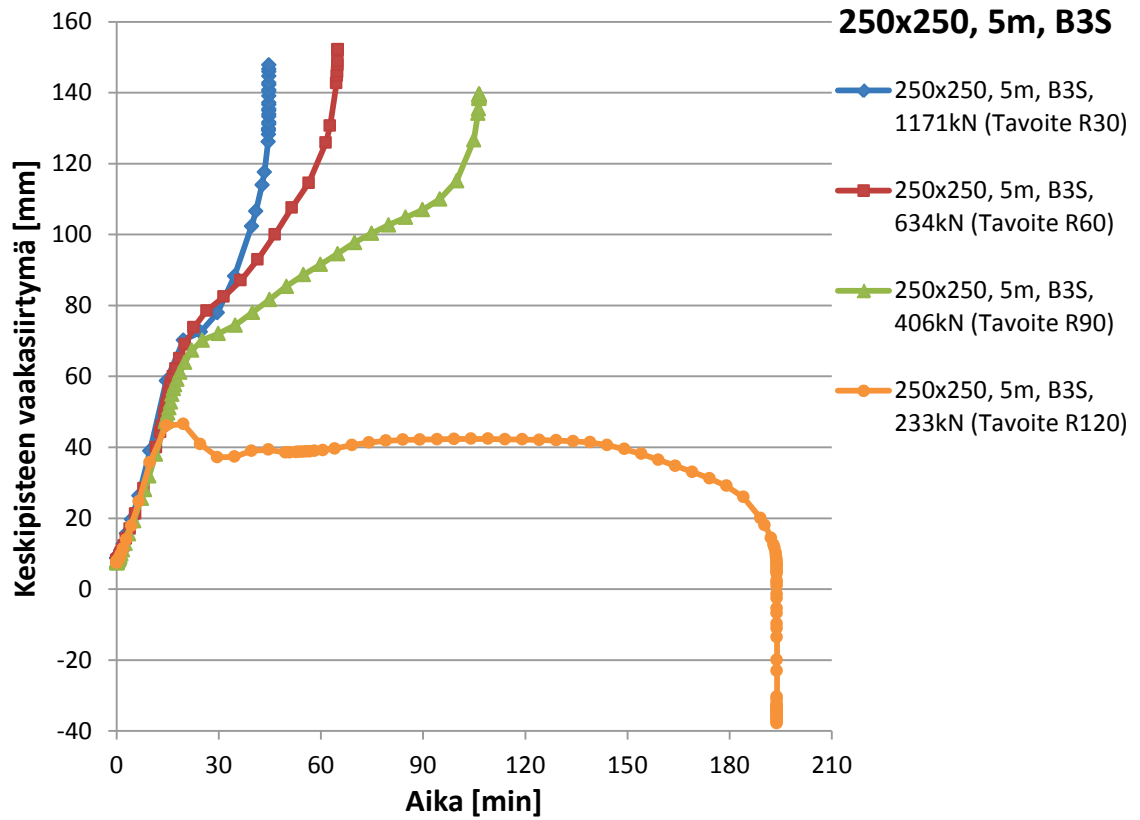




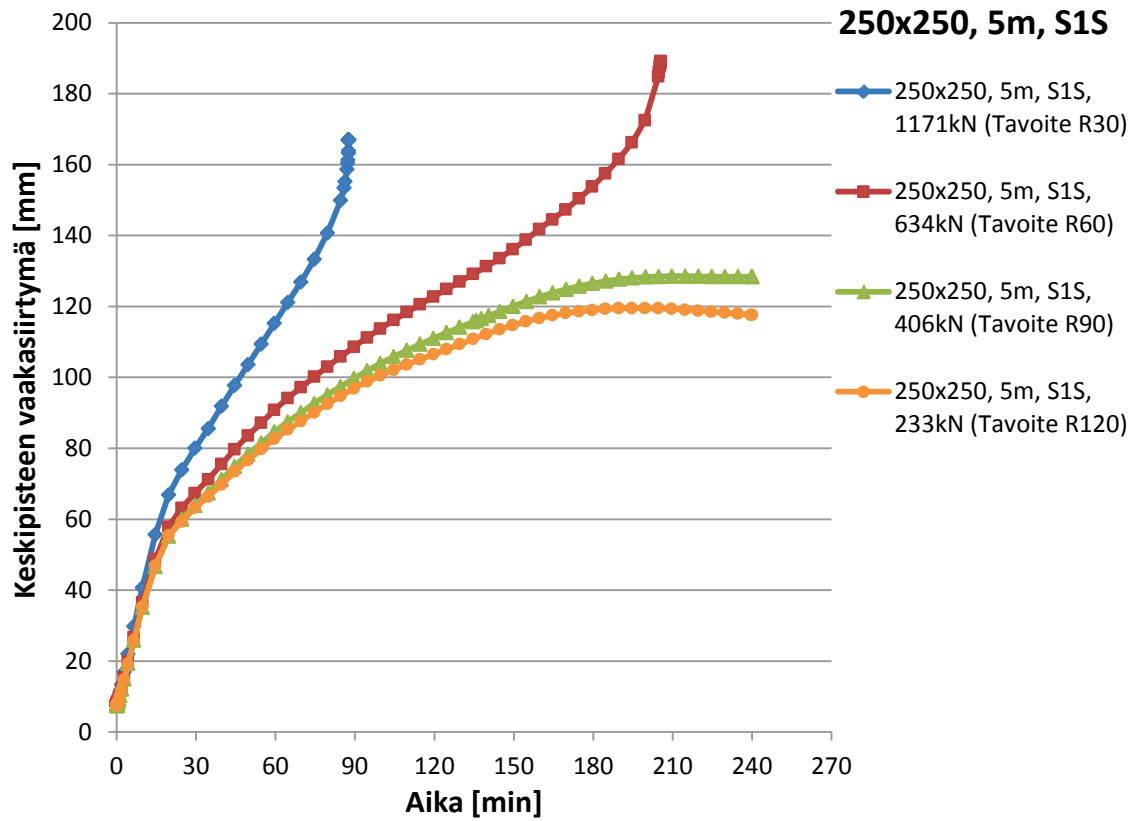
### 250x250, 5 m betonia vasten olevat liittopilarit

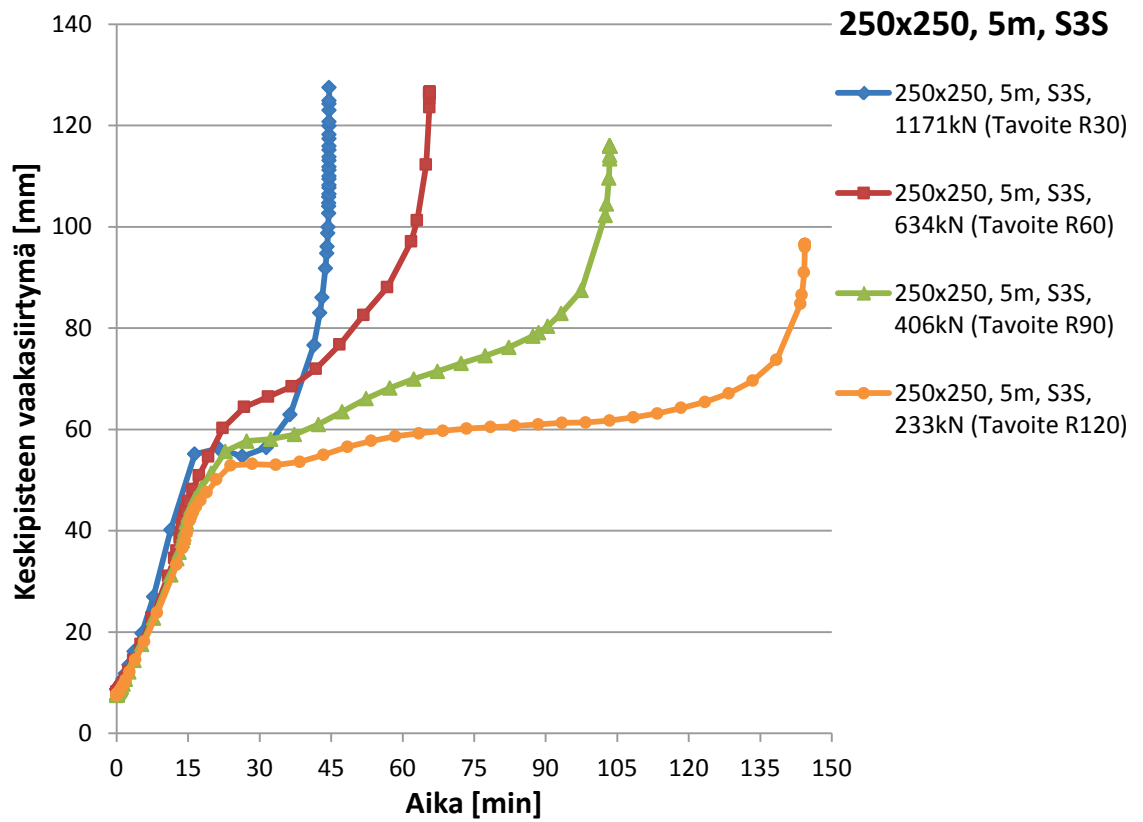
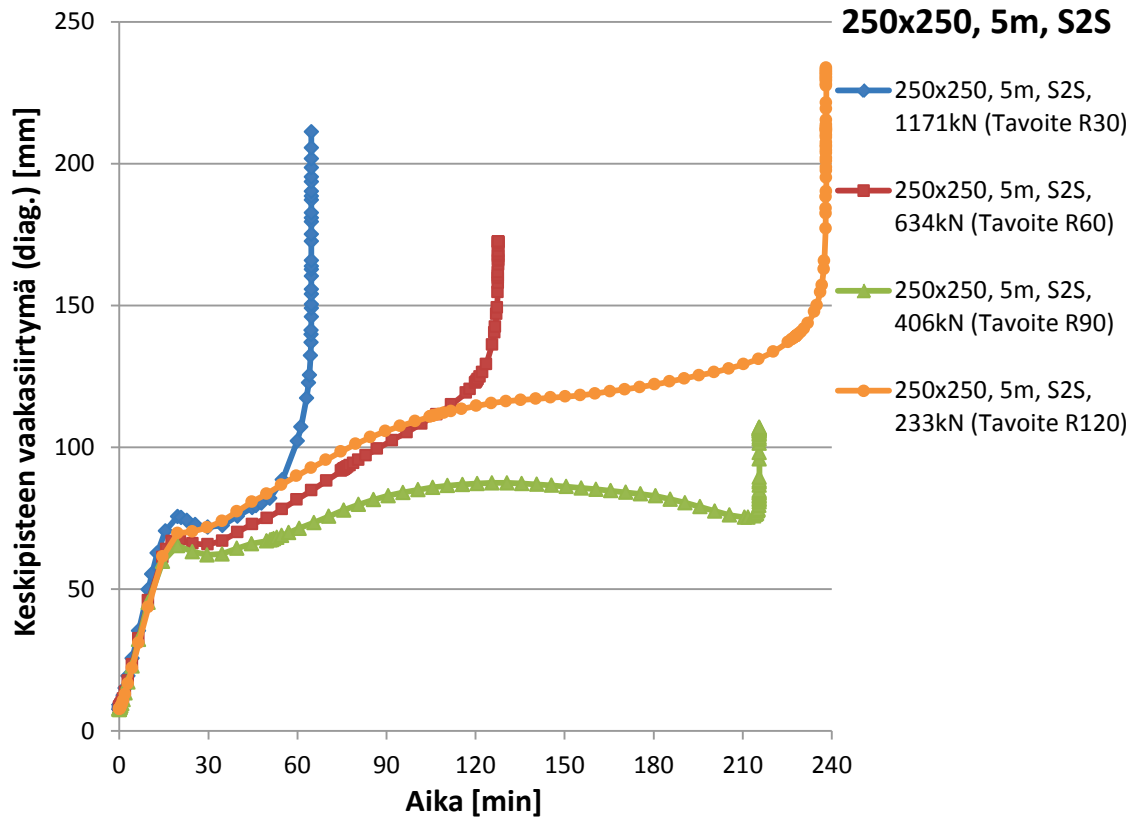




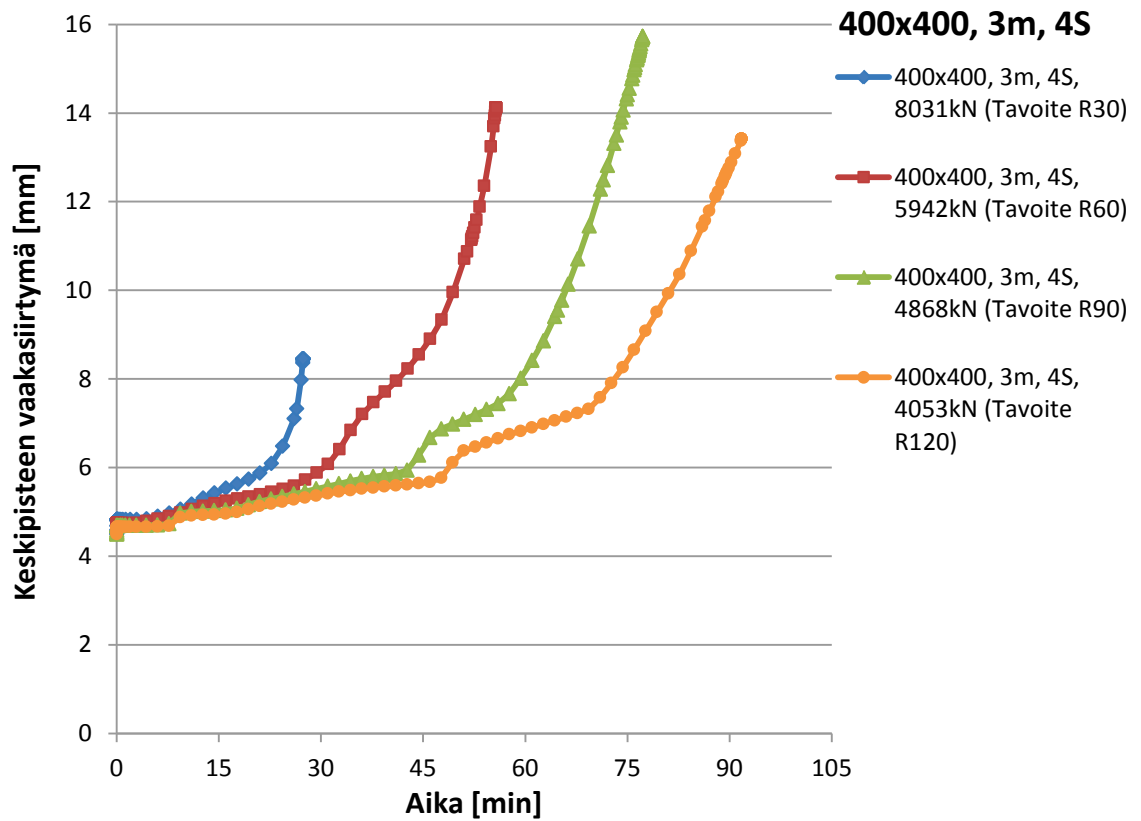


**250x250, 5 m sandwich-paneeleita vasten olevat liittopilarit**

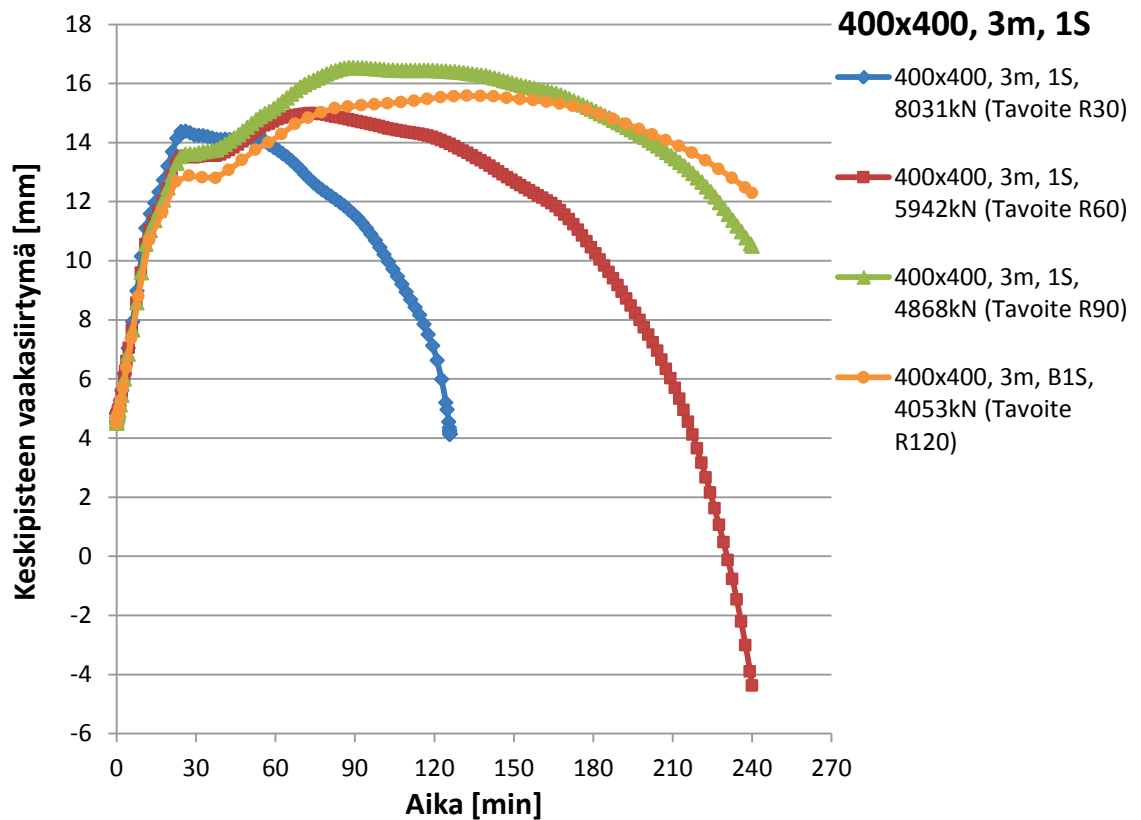


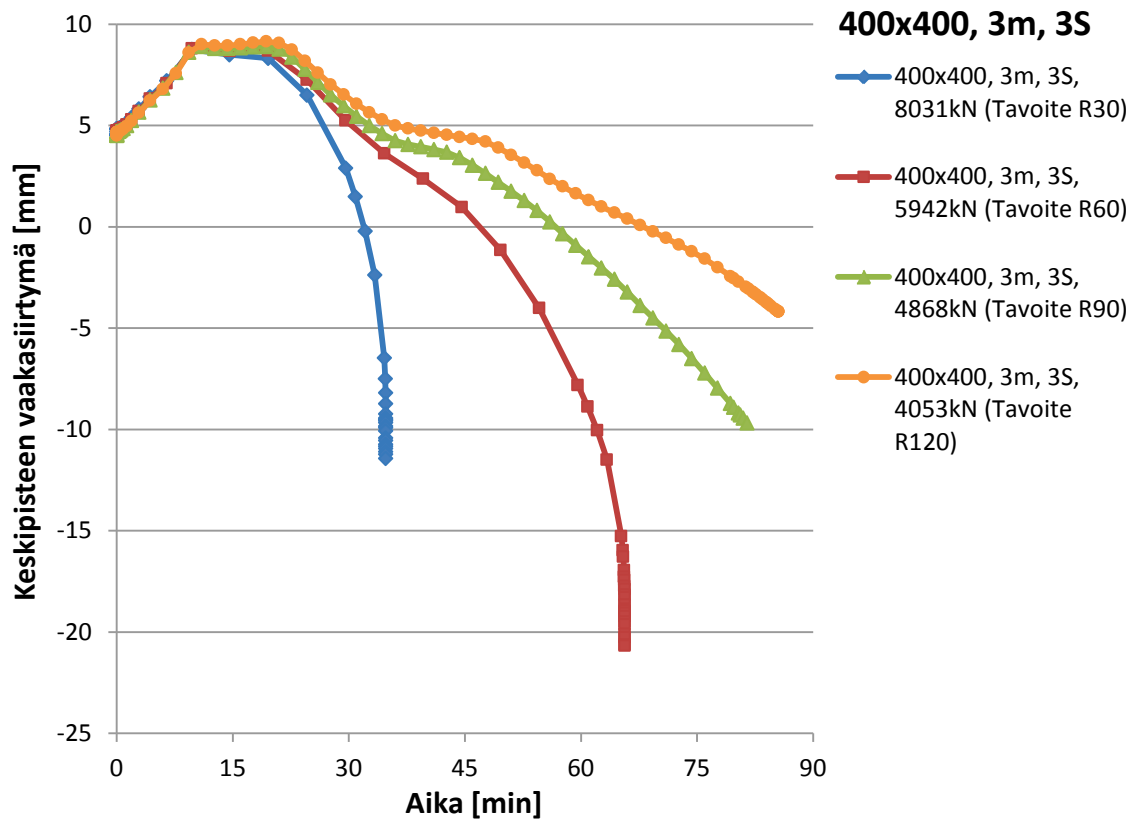
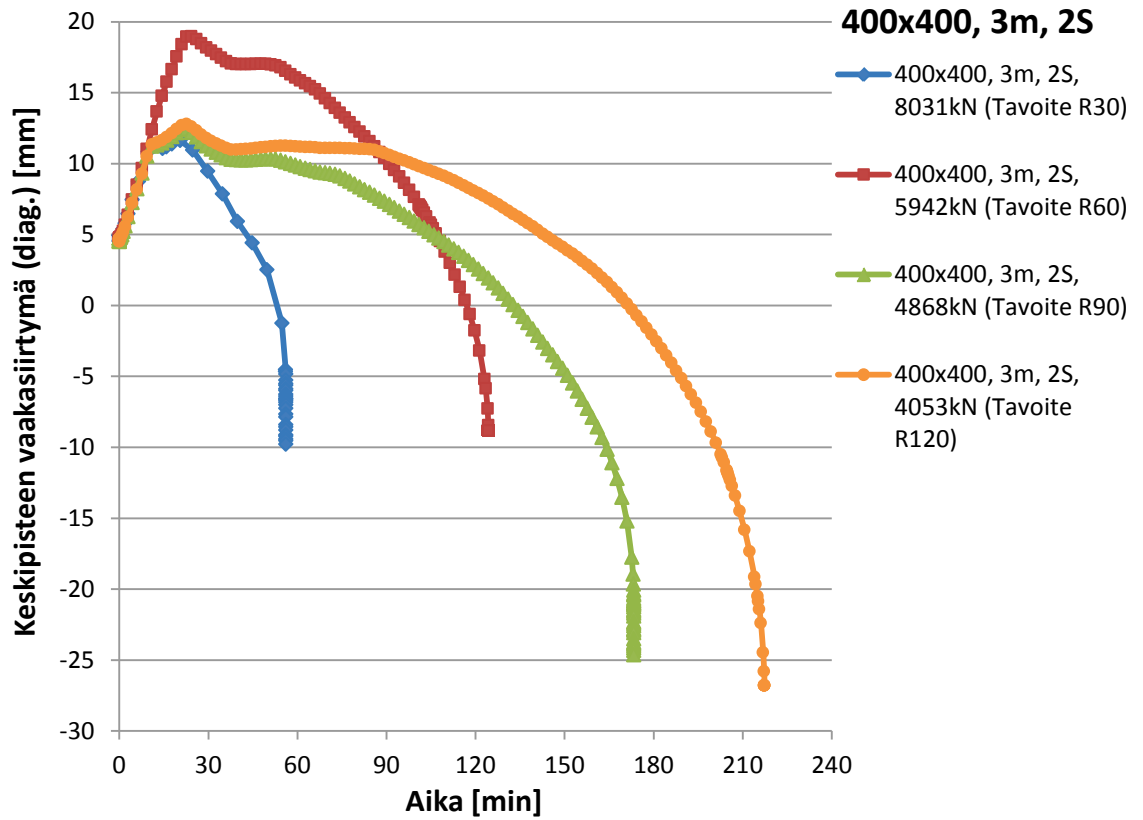


**400x400, 3 m eristämättömät liittopilarit**

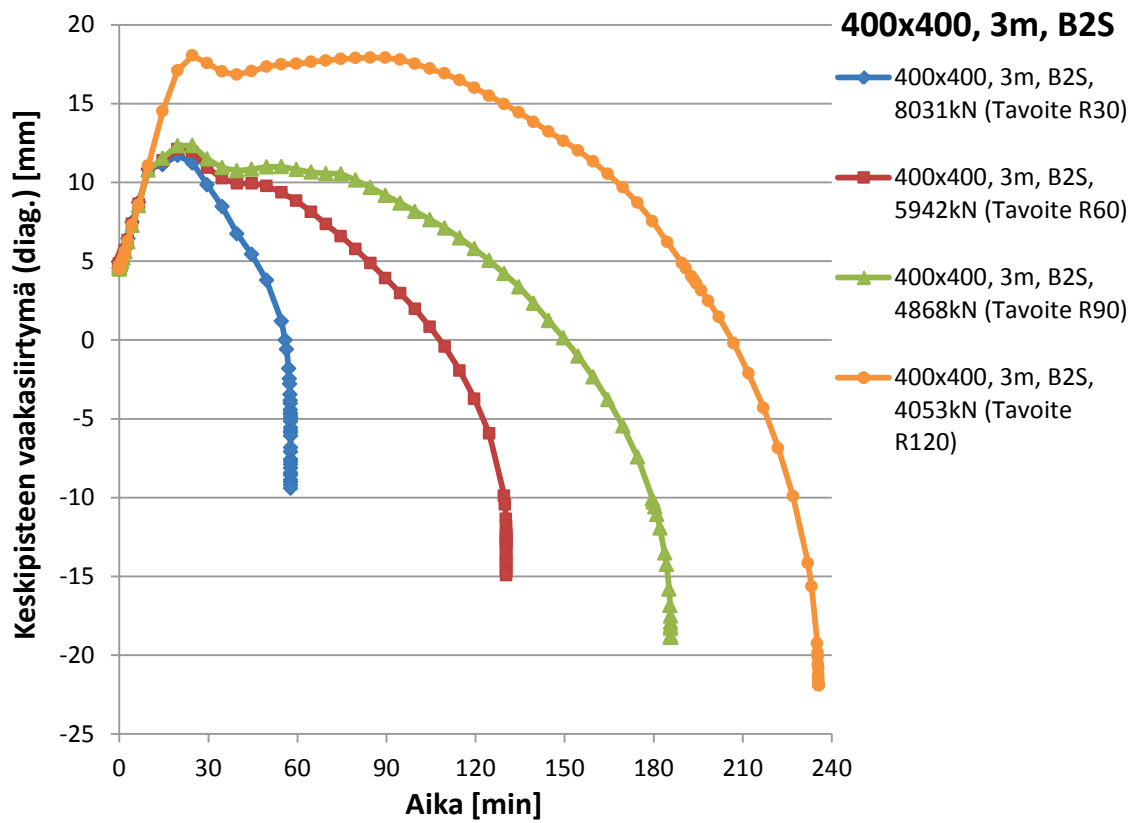
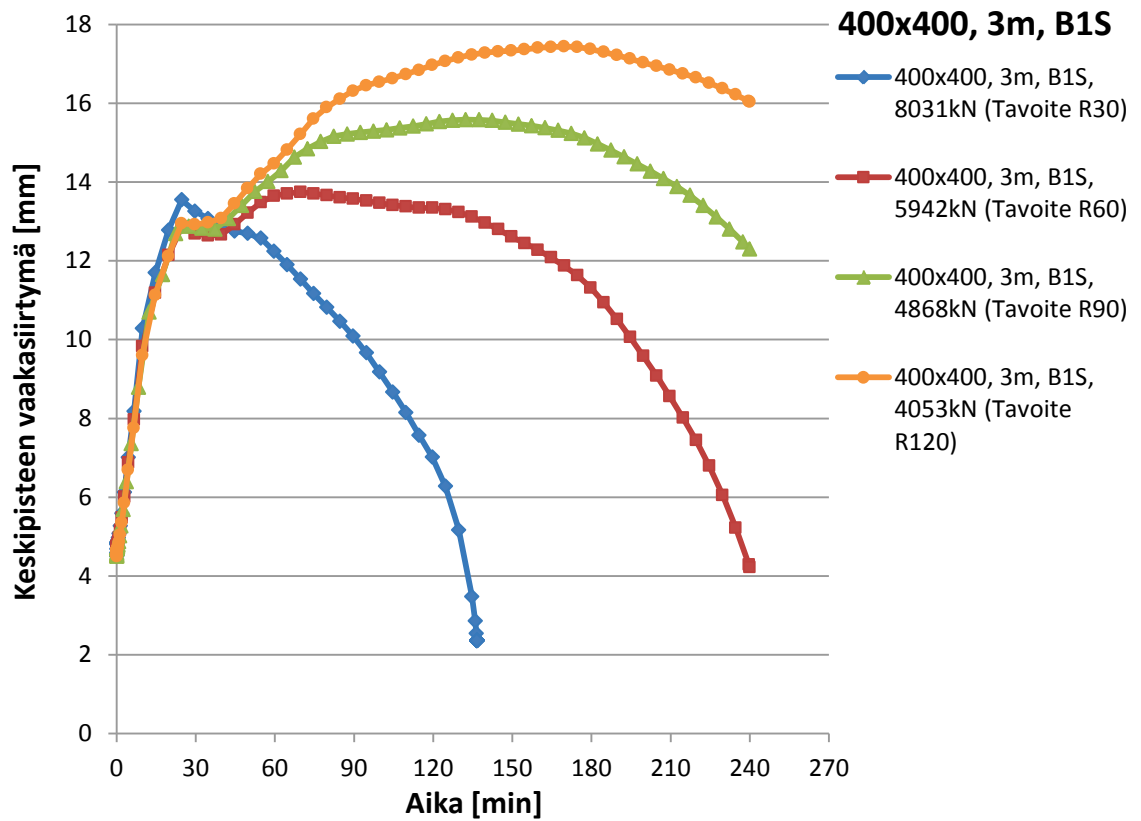


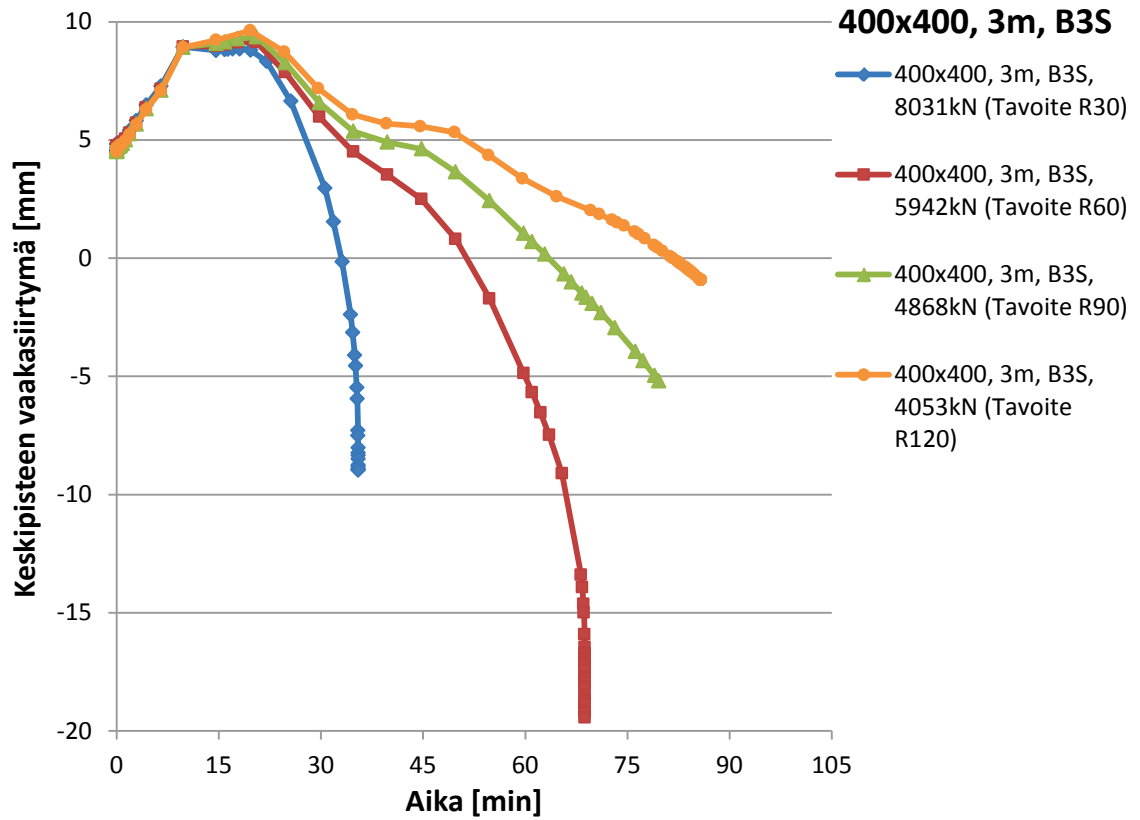
**400x400, 3 m adiabaattisesti eristetyt liittopilarit**



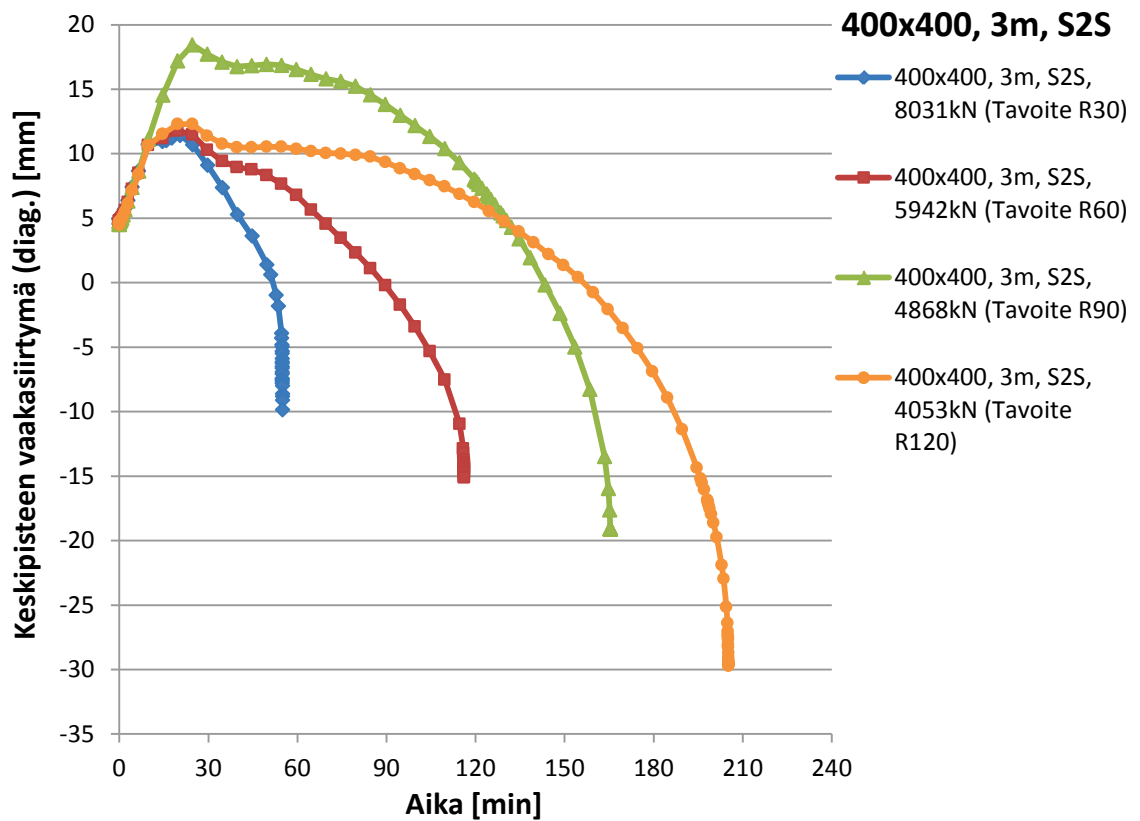


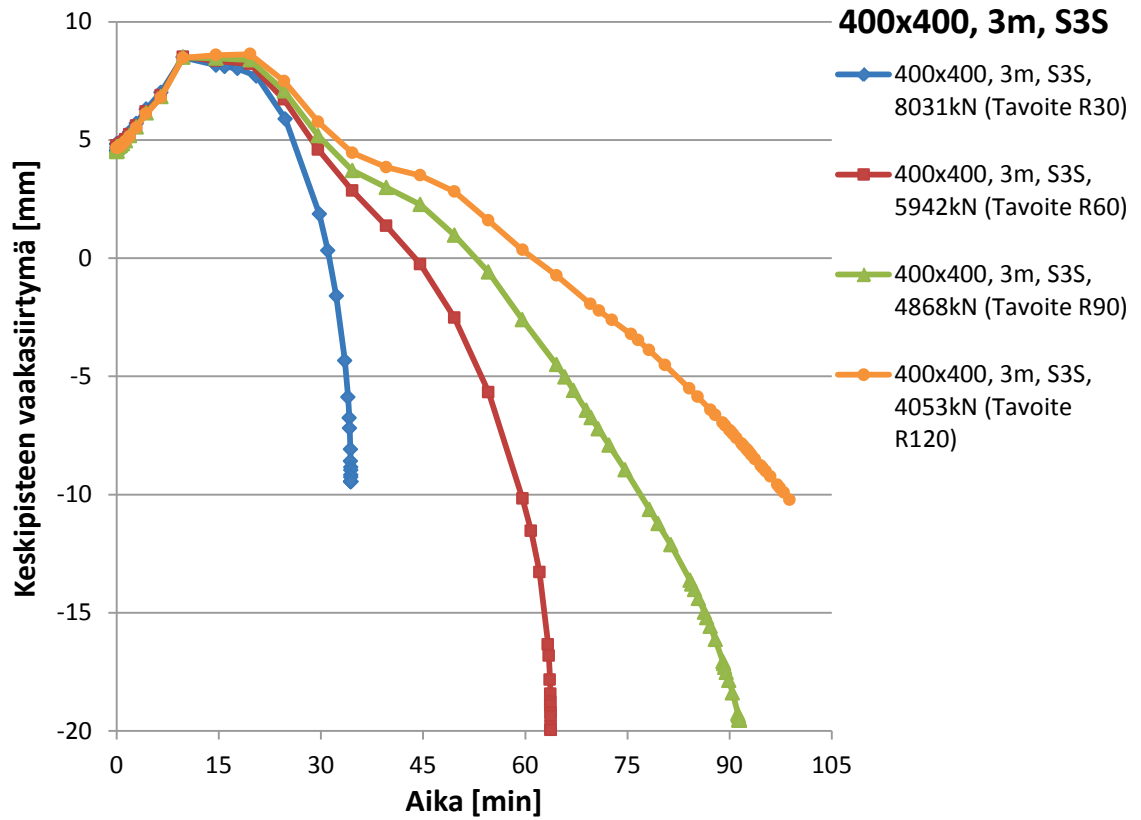
### 400x400, 3 m betonia vasten olevat liittopilarit



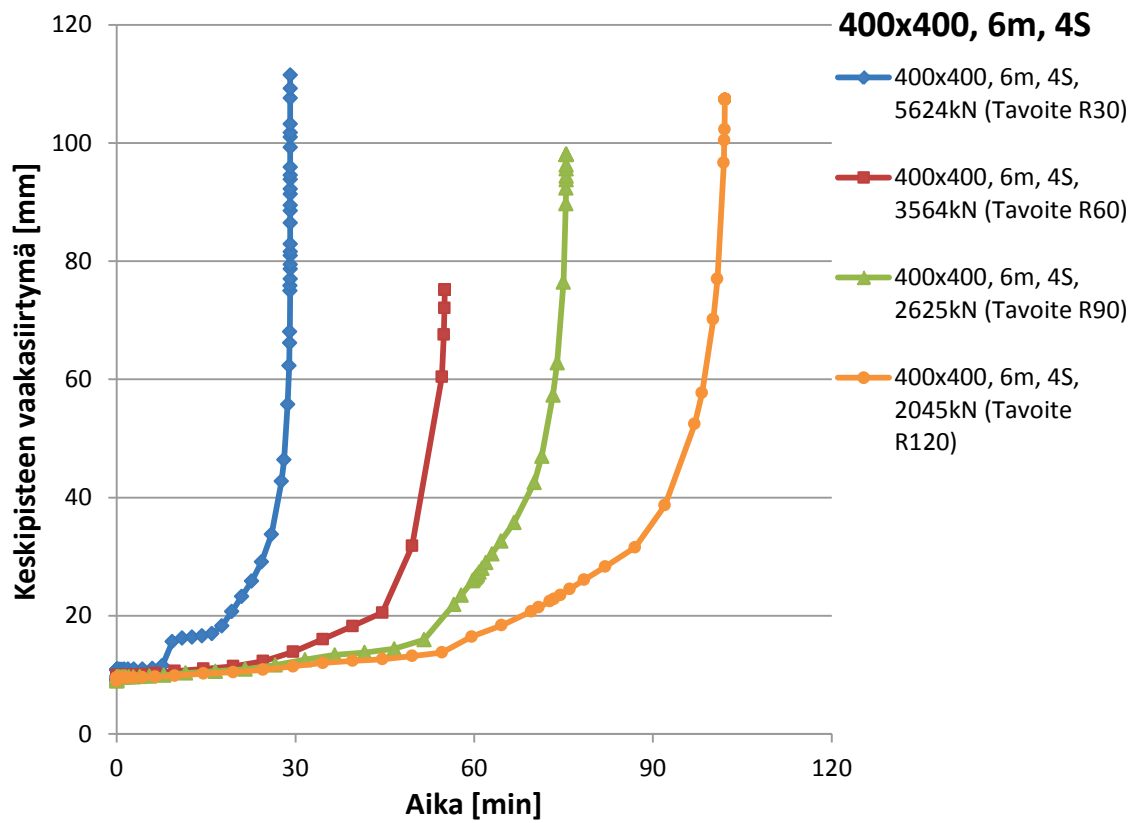


**400x400, 3 m sandwich-paneeleita vasten olevat liittopilarit**

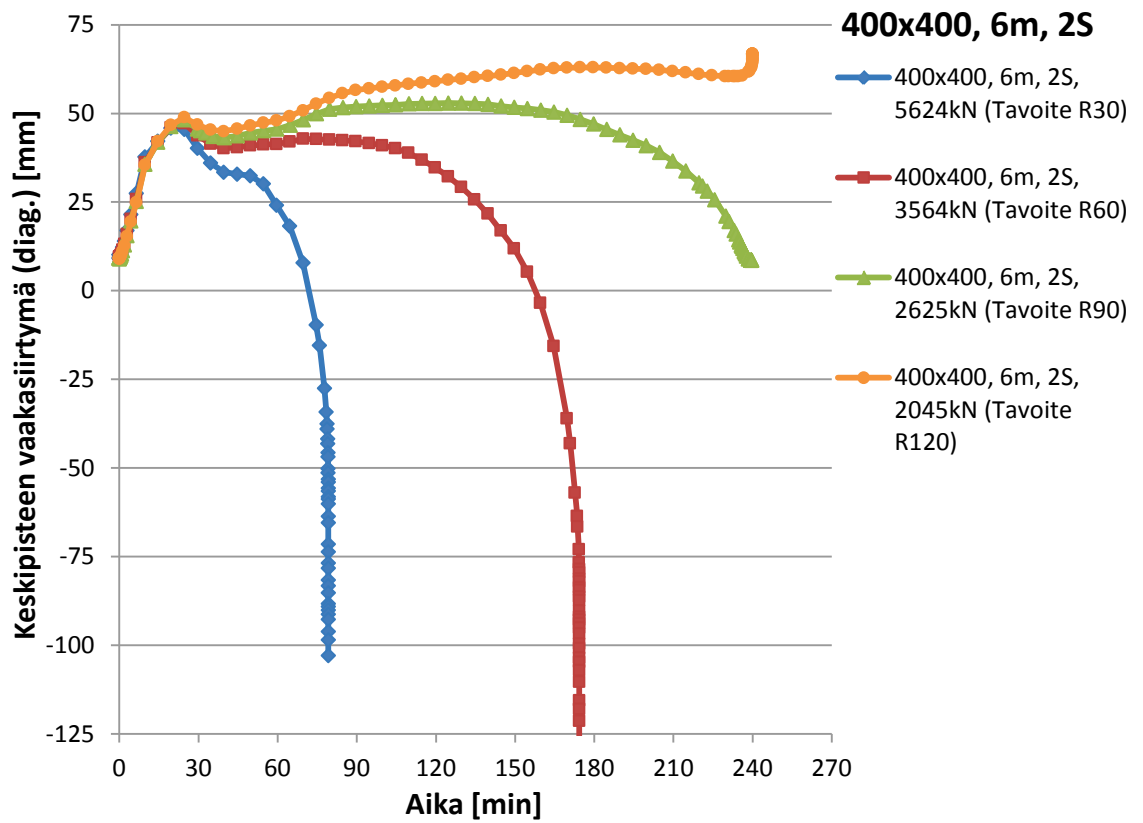
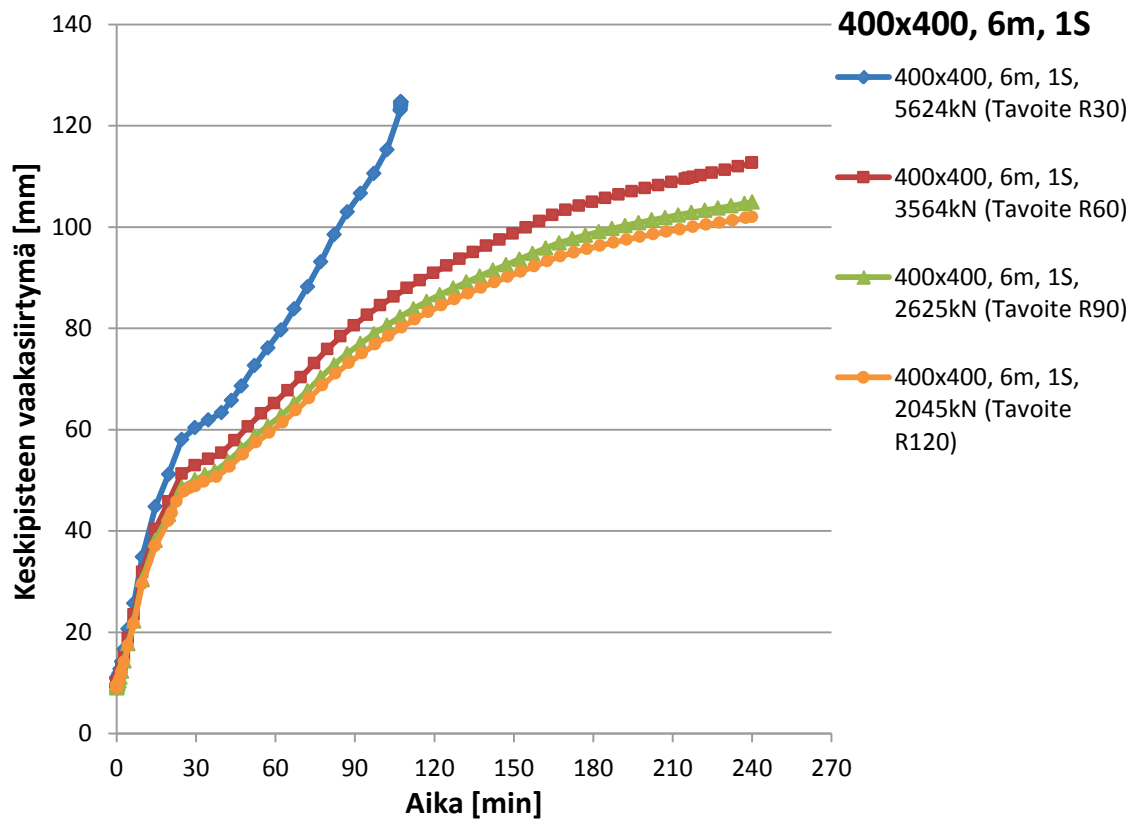




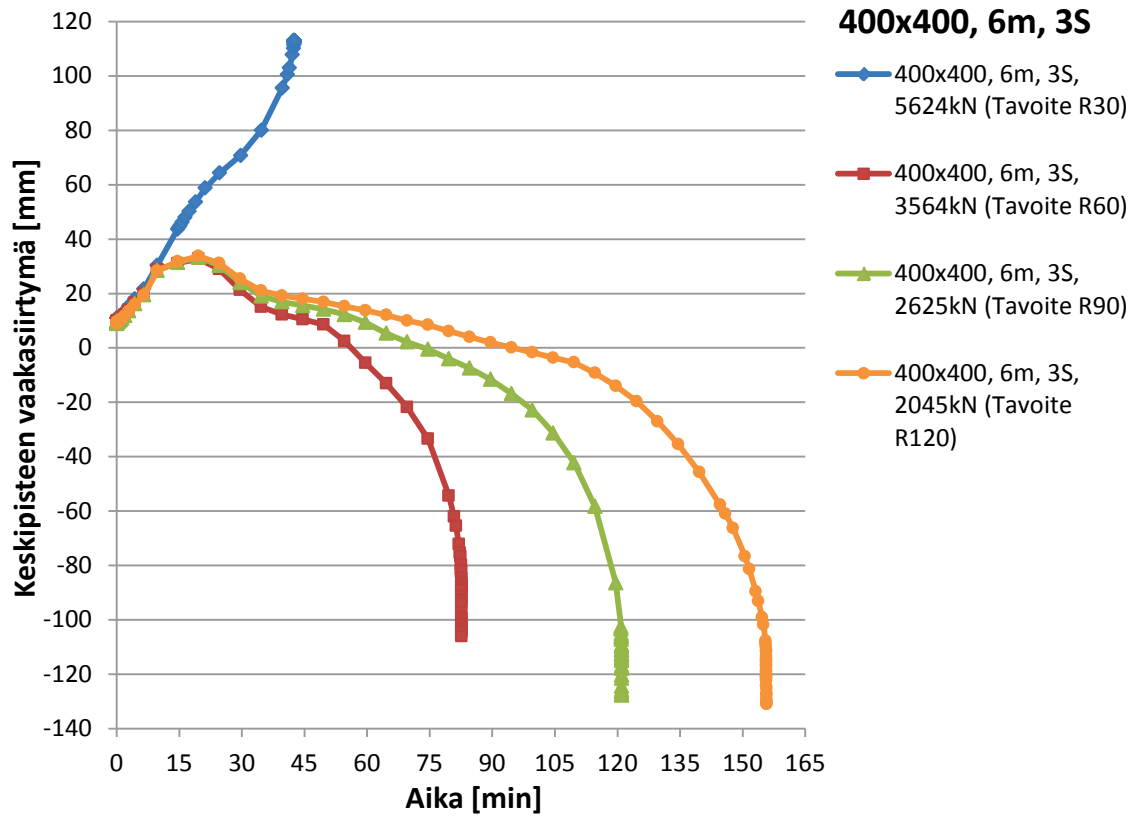
**400x400, 6 m eristämättömät liittopilarit**



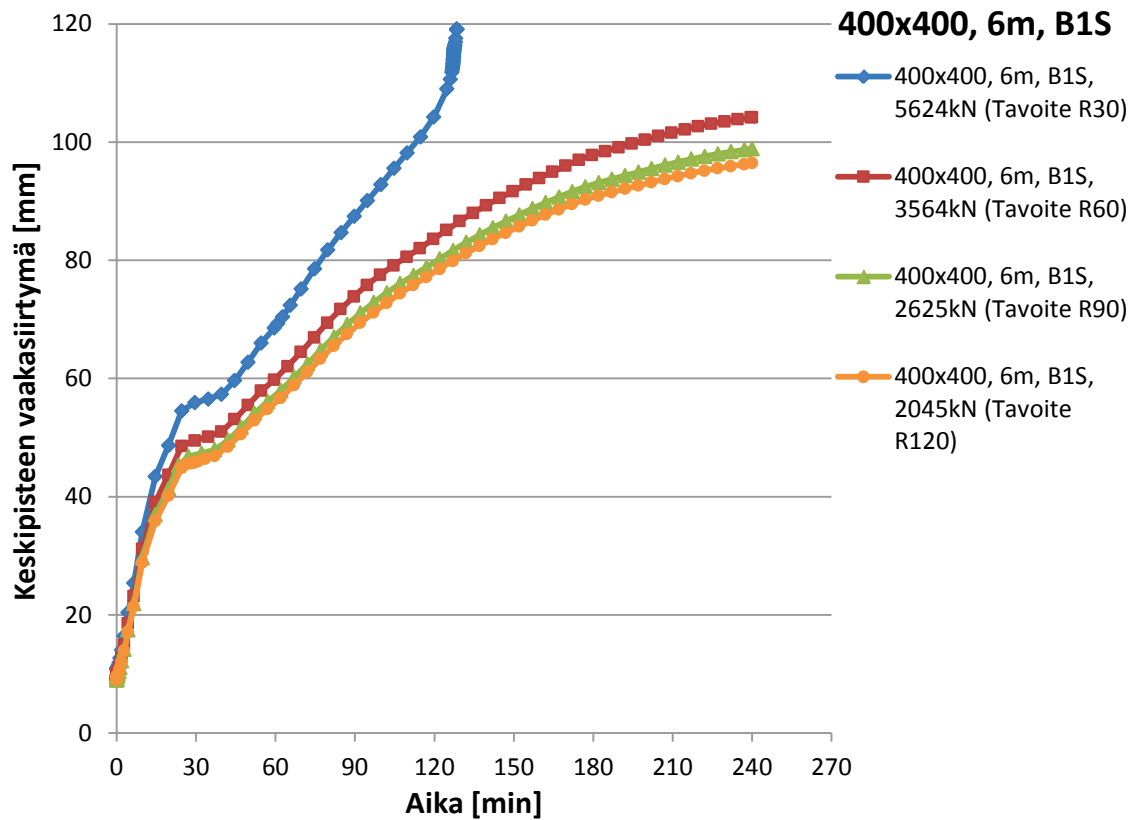
**400x400, 6 m adiabaattisesti eristetyt liittopilarit**

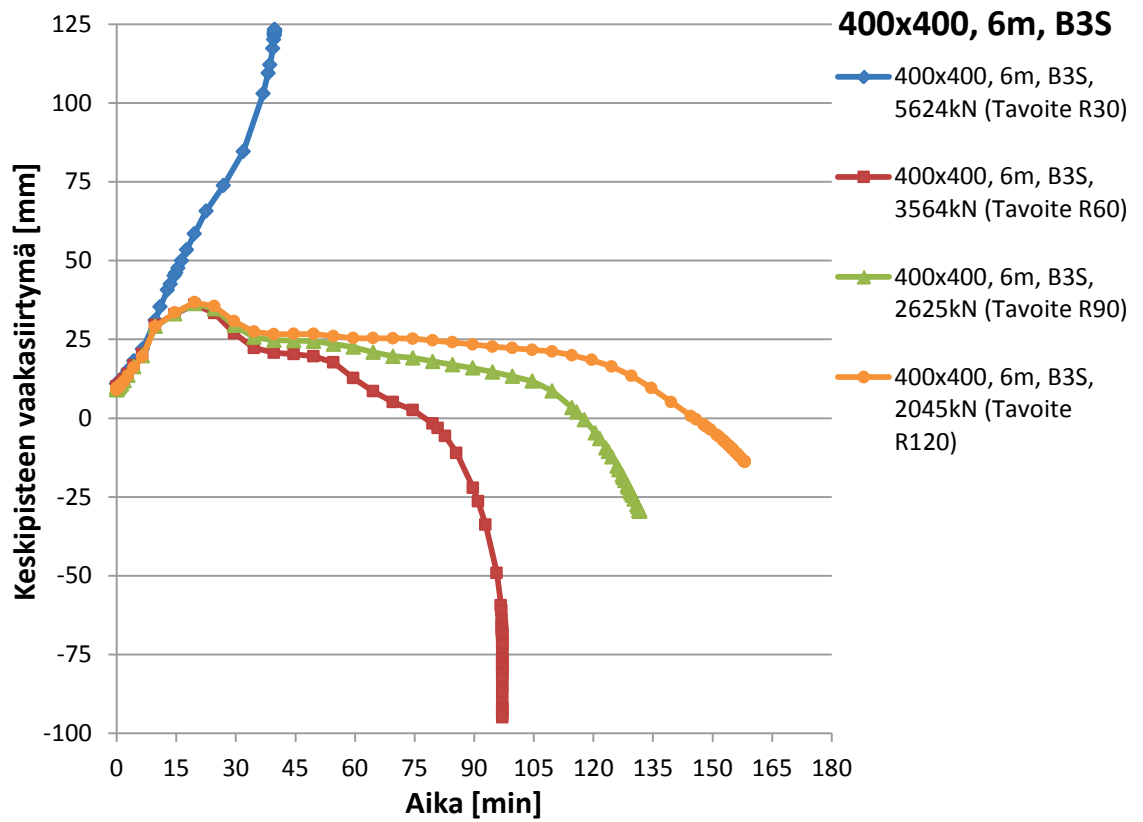
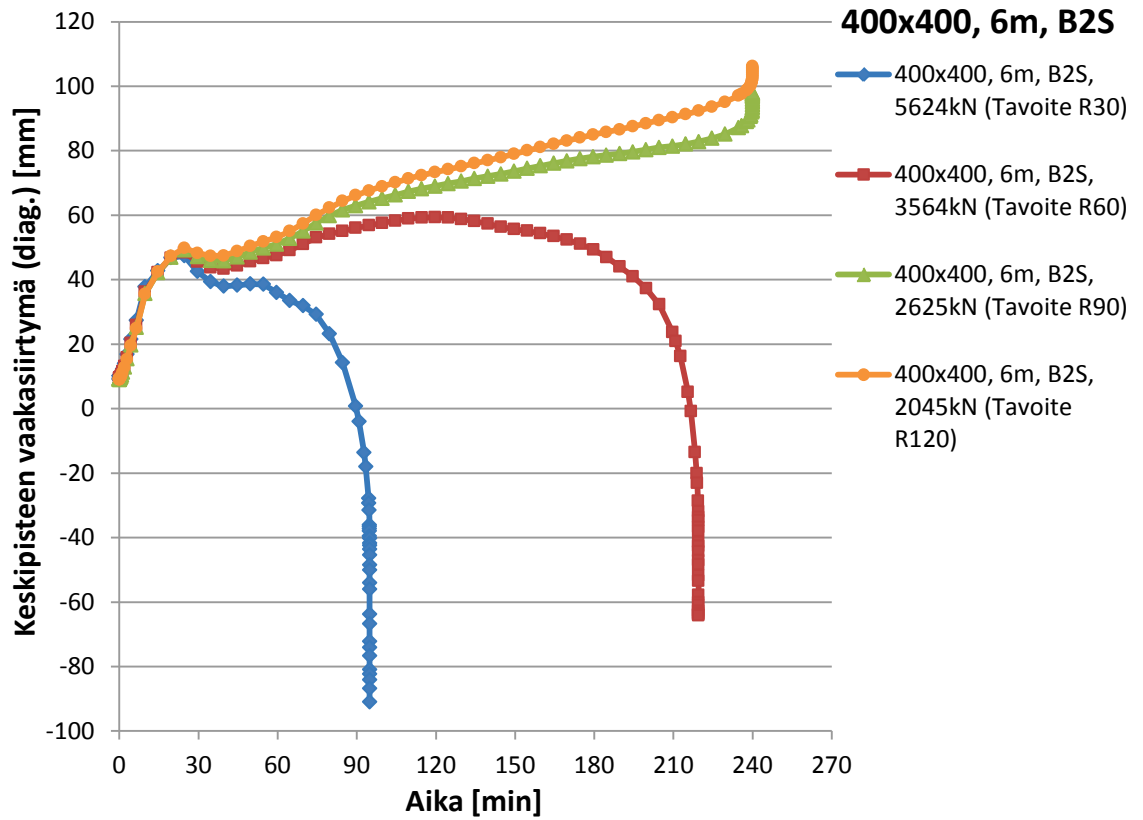




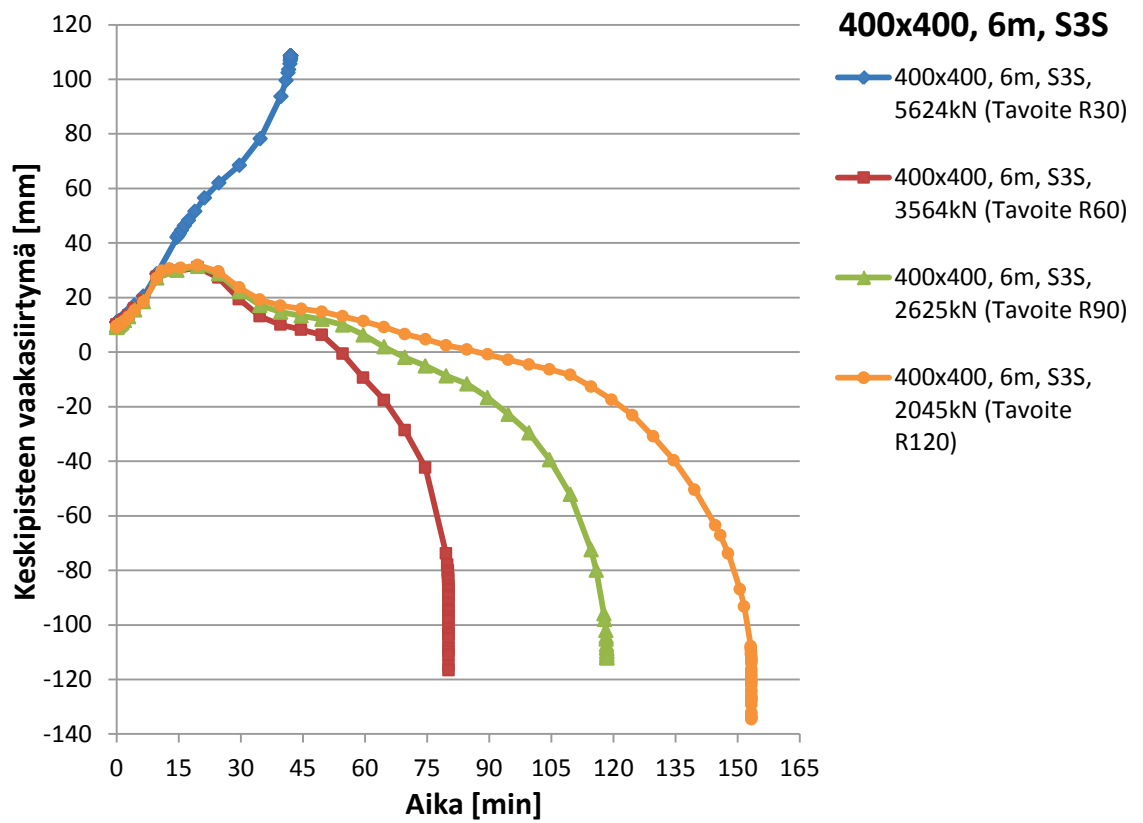
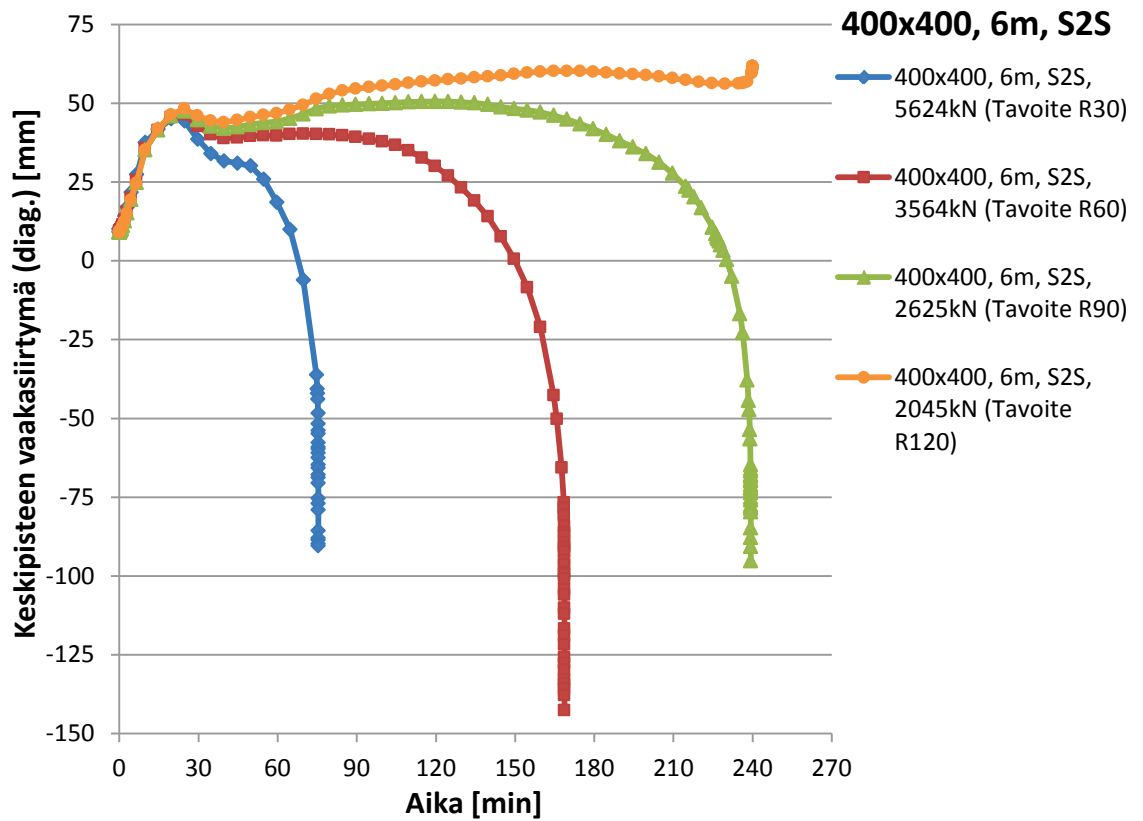


### 400x400, 6 m betonia vasten olevat liittopilarit





**400x400, 6 m sandwich-paneeleita vasten olevat liittopilarit**



**LIITE 4:** Liittopilarien suhteellisten hoikkuuksien, käyttöasteiden ja maksimikuormien laskeminen huoneenlämmössä.

### Liittopilarien suhteelliset hoikkeudet huoneenlämmössä

Lasketaan liittopilareille suhteelliset hoikkeudet  $\bar{\lambda}$  huoneenlämmössä standardin SFS-EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.3 mukaisesti [4, s. 57]. Alaindeksi  $a$  viittaa rakenneputkeen,  $c$  betoniin ja  $s$  betoniteräkseen. Suhteellinen hoikkuus lasketaan kaavalla:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}},$$

missä  $N_{pl,Rk}$  on plastisuusteorian mukainen liittopilarin poikkileikkauksen puristuskestävyyden ominaisarvo ja  $N_{cr}$  on kimmoteorian mukainen liittopilarin kriittinen kuorma, jotka lasketaan seuraavasti:

$$N_{pl,Rk} = A_a f_{yk} + 0,85 A_c f_{ck} + A_s f_{sk},$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{L_n^2},$$

missä  $(EI)_{eff}$  on tehollisen taivutusjäykkyyden ominaisarvo, joka voidaan laskea kaavalla:

$$(EI)_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + 0,6 E_{cm} I_c$$

Lasketaan arvot suhteellisille hoikkeuksille taulukkoon L4.1.

**Taulukko L4.1.** Liittopilarien suhteellisten hoikkuuksien laskenta huoneenlämmössä.

#	Liittopilari	D	t	d <sub>raud.</sub>	r <sub>nurkka</sub>	e <sub>reunae.</sub>	e <sub>keskie.</sub>	L <sub>n</sub>
-	-	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	150x150, 2m	150	5	12	5	41	29	2 000
2	150x150, 3m	150	5	12	5	41	29	3 000
3	250x250, 3m	250	6	20	9	55	64	3 000
4	250x250, 5m	250	6	20	9	55	64	5 000
5	400x400, 3m	400	10	25	15	58	133	3 000
6	400x400, 6m	400	10	25	15	58	133	6 000
#	I <sub>a</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>s</sub>	E <sub>a</sub>	E <sub>cm</sub>	E <sub>s</sub>	(EI) <sub>eff</sub>	N <sub>cr</sub>
-	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Nmm <sup>2</sup> ]	[N]
1	9,82E+06	3,20E+07	1,72E+04	210 000	35 000	200 000	2,74E+12	6,76E+06
2	9,82E+06	3,20E+07	1,72E+04	210 000	35 000	200 000	2,74E+12	3,00E+06
3	5,67E+07	2,67E+08	1,12E+05	210 000	35 000	200 000	1,75E+13	1,92E+07
4	5,67E+07	2,67E+08	1,12E+05	210 000	35 000	200 000	1,75E+13	6,93E+06
5	3,82E+08	1,74E+09	3,37E+05	210 000	35 000	200 000	1,17E+14	1,28E+08
6	3,82E+08	1,74E+09	3,37E+05	210 000	35 000	200 000	1,17E+14	3,20E+07

#	A <sub>a</sub> [mm]	A <sub>c</sub> [mm]	A <sub>s</sub> [mm]	f <sub>yk</sub> [Mpa]	f <sub>ck</sub> [Mpa]	f <sub>sk</sub> [Mpa]	N <sub>pl,Rk</sub> [N]	$\bar{\lambda}$ -
1	2 836	19 600	452	355	40	500	1,90E+06	0,53
2	2 836	19 600	452	355	40	500	1,90E+06	0,80
3	5 760	56 644	1 257	355	40	500	4,60E+06	0,49
4	5 760	56 644	1 257	355	40	500	4,60E+06	0,81
5	15 257	144 400	3 927	355	40	500	1,23E+07	0,31
6	15 257	144 400	3 927	355	40	500	1,23E+07	0,62

### Liittopilarien käyttöasteet huoneenlämmössä

Lasketaan vakiokuormitusanalyysissä käytettävien liittopilarien käyttöasteet huoneenlämmössä ilman varmuuslukuja standardin SFS-EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.5 mukaisesti [4, s. 58]. Käyttöasteet lasketaan seuraavasti:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rk}} \leq 1,0,$$

missä  $\chi$  on standardin SFS-EN 1993-1-1 kohdan 6.3.1.2 mukainen, asianomaista nurjahdusmuotoa vastaava ja siihen liittyvän suhteellisen hoikkuuden  $\bar{\lambda}$  mukainen pienennyskerroin [8, s. 61], joka lasketaan kaavasta:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \quad \chi \leq 1,0,$$

missä

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2],$$

ja missä  $\alpha$  on nurjahduskäyrän  $a$  mukainen epätarkkuustekijä, joka on nyt arvoltaan 0,21 [4, Taulukko 6.5].

Lasketaan arvot käyttöasteille taulukkoon L4.2

**Taulukko L4.2.** Vakiokuormitusanalyysien liittopilarien käyttöasteiden laskenta huoneenlämmössä ilman varmuuslukuja.

#	Liittopilari	$N_{Ed}$	$\bar{\lambda}$	$\Phi$	$\chi$	$N_{pl,Rk}$	KA
[-]	[-]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[-]
1	150x150, 2m	476	0,53	0,68	0,91	1899	0,27
2	150x150, 2m	174	0,53	0,68	0,91	1899	0,10
3	150x150, 3m	303	0,80	0,88	0,80	1899	0,20
4	150x150, 3m	110	0,80	0,88	0,80	1899	0,07
5	250x250, 3m	1975	0,49	0,65	0,93	4599	0,46
6	250x250, 3m	1094	0,49	0,65	0,93	4599	0,26
7	250x250, 3m	728	0,49	0,65	0,93	4599	0,17
8	250x250, 3m	443	0,49	0,65	0,93	4599	0,10
9	250x250, 5m	1171	0,81	0,90	0,79	4599	0,32
10	250x250, 5m	634	0,81	0,90	0,79	4599	0,18
11	250x250, 5m	406	0,81	0,90	0,79	4599	0,11
12	250x250, 5m	233	0,81	0,90	0,79	4599	0,06
13	400x400, 3m	8031	0,31	0,56	0,98	12289	0,67
14	400x400, 3m	5942	0,31	0,56	0,98	12289	0,50
15	400x400, 3m	4868	0,31	0,56	0,98	12289	0,41
16	400x400, 3m	4053	0,31	0,56	0,98	12289	0,34
17	400x400, 6m	5624	0,62	0,74	0,88	12289	0,52
18	400x400, 6m	3564	0,62	0,74	0,88	12289	0,33
19	400x400, 6m	2625	0,62	0,74	0,88	12289	0,24
20	400x400, 6m	2045	0,62	0,74	0,88	12289	0,19

### Liittopilarien maksimikuormat huoneenlämmössä

Lasketaan taulukkoon L4.3 maksimikuormat ilman varmuuslukuja edellisten kaavojen perusteella merkkäämällä  $N_{Ed}$  tuntemattomaksi ja käyttöasteeksi 1,0.

**Taulukko L4.3.** Liittopilarien maksimikuormien laskenta ilman varmuuslukuja huoneenlämmössä.

#	Liittopilari	$\bar{\lambda}$	$\Phi$	$\chi$	$N_{pl,Rk}$	$N_{max}$	$KA_{max}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[-]
1	150x150, 2m	0,53	0,68	0,91	1899	1740	1,00
2	150x150, 3m	0,80	0,88	0,80	1899	1520	1,00
3	250x250, 3m	0,49	0,65	0,93	4599	4270	1,00
4	250x250, 5m	0,81	0,90	0,79	4599	3620	1,00
5	400x400, 3m	0,31	0,56	0,98	12289	11990	1,00
6	400x400, 6m	0,62	0,74	0,88	12289	10850	1,00

**LIITE 5: Koejärjestelyt liittopilarien polttokokeisiin**

Professori Markku Heinisuon suunnittelemat koejärjestelyt liittopilarien kuormitukseen yhden, kahden, kolmen ja neljän sivun tulipalossa.

