

Ilina Kovalainen

# ONTELOLAATASTOJEN PALONKESTO

Kandidaatintyö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Tarkastaja: Mikko Malaska  
06/2020

# TIIVISTELMÄ

lina Kovalainen: Ontelolaatastojen palonkesto (Fire resistance of hollow core slabs)  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Kesäkuu 2020

---

Ontelolaatat ovat Suomessa yleisimmin käytetty välipohjatyypin elementtirakenteisissa kerrostaloissa. Niitä käytetään yleisesti myös toimitila- ja teollisuusrakennuksissa. Välipohjien lisäksi ontelolaattoja voidaan käyttää ylä- ja alapohjissa sekä seinissä. Työn tarkoituksena oli tutkia, mitkä ovat ontelolaattojen vaurioitumismekanismit palossa ja selvittää, miten palonkesto määritellään määräyksissä. Tavoitteena oli selvittää, onko ontelolaattojen palonkesto luotettavasti määriteltävissä vai tarvitaanko aiheesta vielä jatkotutkimuksia. Työstä voi saada myös käsityksen ontelolaattojen palonkeston tutkimuksen nykytilasta.

Työ suoritettiin kirjallisuustutkimuksena, jossa hyödynnettiin muun muassa tieteellisiä artikkeleita, toteutuneiden tulipalojen onnettomuusraportteja, eurokoodeja ja polttokokeiden tuloksia. Ontelolaatoilla on palotilanteessa kolme vaurioitumismekanismia: taivutusmurtuma, ankkurointimurtuma ja leikkausmurtuma. Ankkurointi- ja leikkausmurtuma voivat tapahtua myös yhtäaikaaisesti. Lisäksi ontelolaatoissa esiintyy lämmöstä johtuvaa halkeilua vaak- ja pystysuunnassa tai räjähtävää lohkeilua, jotka vaikuttavat laattojen palonkesto- ja vaurioitumismekanismien ilmenemiseen. Tutkimuksessa selvisi, että leikkaus- ja ankkurointimurtumat ovat ontelolaatoilla tyypillisempiä palossa kuin taivutusmurtumat. On kuitenkin huomioitava, että taipumaa on tutkittu huomattavasti vähemmän kuin leikkaus- ja ankkurointimurtumia.

Ontelolaattojen taivutusmurron palomitoitus tehdään eurokoodin yksinkertaistettujen laskentamenetelmien avulla, joita on kaksi: isotermimenetelmä ja vyöhykemenetelmä. Eristävyys ja leikkauskestävyys voidaan määrittää eurokoodin taulukoiden avulla. Jos ontelolaatan palonkesto-luokka on vähintään R 60, leikkaus- ja ankkurointikestävyys tulee tarkistaa kokemuseräisellä laskentakaavalla.

Ontelolaattoja on sortunut tulipaloissa, ja tyypillisin vaurioitumistapa on vaakasuoran halkeaman syntyminen, joka jakaa laatan kahteen osaan. Halkeama voi johtaa ontelolaatan sortumiseen, jossa alaosa putoaa ensin ja yläosa myöhemmin. Työssä on pohdittu myös polttokokeiden tulosten ja eurokoodien palomitoitusmenetelmien luotettavuutta. Tutkimus osoittaa, että ontelolaattojen runsaasta käytöstä huolimatta aiheen tutkijoilla on hyvin erilaisia arvioita ontelolaattojen palonkestosta. Ristiriitaiset näkemykset osoittavat, että edelleen aiheen tarkempaa tutkimusta tarvitaan.

Avainsanat: Ontelolaatta, ontelolaattojen palonkesto, vaurioitumismekanismit, ontelolaattojen palomitoitus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. BETONIRAKENNE PALOSSA .....	3
2.1  Betoni.....	3
2.2  Jänneteräs .....	4
2.3  Teräsbetoni.....	5
3. ONTELOLAATAN VAURIOITUMISMEKANISMIT .....	6
3.1  Betonipinnan voimakas lohkeilu.....	6
3.2  Taivutus .....	7
3.3  Ankkurointi.....	7
3.4  Leikkaus.....	8
3.5  Vaakasuora halkeilu ja murtuma.....	9
4. ONGELMAT PALONKESTOSSA.....	10
4.1  Polttokokeiden tulokset .....	10
4.2  Toteutuneet onnettomuudet .....	12
4.2.1  Tavaratalon palo Vantaalla .....	12
4.2.2  Parkkihallin palo Rotterdamissa .....	15
4.2.3  Yhteenveto onnettomuuksista .....	17
4.3  Polttokokeiden luotettavuus .....	18
5. PALONKESTON OSOITTAMINEN .....	20
5.1  Eurokoodin mukainen palomitoitus .....	20
5.2  Eurokoodin mukainen polttokoejärjestely .....	22
6. PALONKESTON HAASTEET .....	24
7. YHTEENVETO.....	26
LÄHTEET .....	27

# 1. JOHDANTO

Elementtirakentaminen Suomessa yleistyi 70-luvulla, kun asuntoja piti saada rakennettua nopeasti, jolloin myös ontelolaattojen käyttö yleistyi. Elementtirakenteisissa kerrostaloissa ontelolaatta on yleisin välipohjaratkaisu. Ontelolaattoja käytetään paljon myös toimitila- ja teollisuusrakennuksissa ja niitä voidaan käyttää välipohjien lisäksi seinissä sekä ylä- ja alapohjissa. Ontelolaatat ovat onteloidensa ansiosta kevyempiä kuin massiivilaatat ja niiden valmistamiseen tarvitaan vähemmän betonia. Tehdasoloissa valmistettuina ontelolaatat ovat tasalaatuisia ja ne mahdollistavat myös pidemmät jännevälit kuin massiivilaatat.

Materiaalina betoni on palotilanteessa hyvä, koska se on palamaton materiaali eikä siten osallistu paloon. Betonirakenteita voidaan käyttää rakennuksissa, joissa vaaditaan korkeaa palonkestoa. Betonilla voidaan myös suojata esimerkiksi teräsrakenteita ja parantaa niiden palonkestoa. Ontelolaattojen paloluokka on vähintään R 60, eli niiden on kestävä palotilanteessa vähintään 60 min. Ontelolaattojen paloluokka voi olla REI 180 tai REI 240, eli ontelolaatoilla voidaan toteuttaa myös tiiveyttä tai eristävyyttä vaativia rakenteita. Palonkestoa voidaan parantaa alapintaan lisättävällä palonsuojalevytyksellä.

Vuosina 2009–2013 toteutettiin Holcofire -projekti, jossa on muun muassa analysoitu 162 aiemmin tehdyn polttokokeen tuloksia, sekä toteutettu polttokokeita lisää (Jansze et al. 2014, s. 5). Yksi syy projektiin oli parkkitalon tulipalossa osittain romahtaneet ontelolaatat Rotterdamissa vuonna 2007 (Jansze et al. 2014, s. 22). Vuonna 2010 Vantaalla syttyi tulipalo tavaratalossa, jossa osa ontelolaattarakenteisesta välipohjasta sortui (Onnettomuustutkintakeskus 2011). Täysin ongelmattomia ontelolaattojen palonkesto ei siis ole ollut.

Tässä työssä tarkastellaan, miten ontelolaatta toimii ja vaurioituu palossa ja esitellään vaurioitumismekanismit. Lisäksi selvitetään, miten palonkesto ilmoitetaan määräyksissä ja miten palonkesto määritellään kokeellisesti. Tavoitteena on selvittää kirjallisuustutkimuksen avulla, onko ontelolaattojen palonkestossa ongelmia, jotka tarvitsisivat jatkotutkimuksia tai lisäselvityksiä. Työssä tarkastellaan vain yksiaukkoisia ontelolaattoja, jollaisia ne yleisimmin ovatkin. Työstä on rajattu erilaisten tuentojen vaikutukset, jotta työn laajuus pysyy sopivana. Myös palonkestoan vaikuttavia seikkoja on esitelty työn laajuus-

den asettamissa rajoissa. Työ suoritetaan kirjallisuustutkimuksena, koska aiheesta löytyy eniten tietoa tieteellisistä artikkeleista ja myös polttokokeiden tulokset ovat kirjallisia. Suurimmaksi osaksi lähdemateriaali on englanninkielistä.

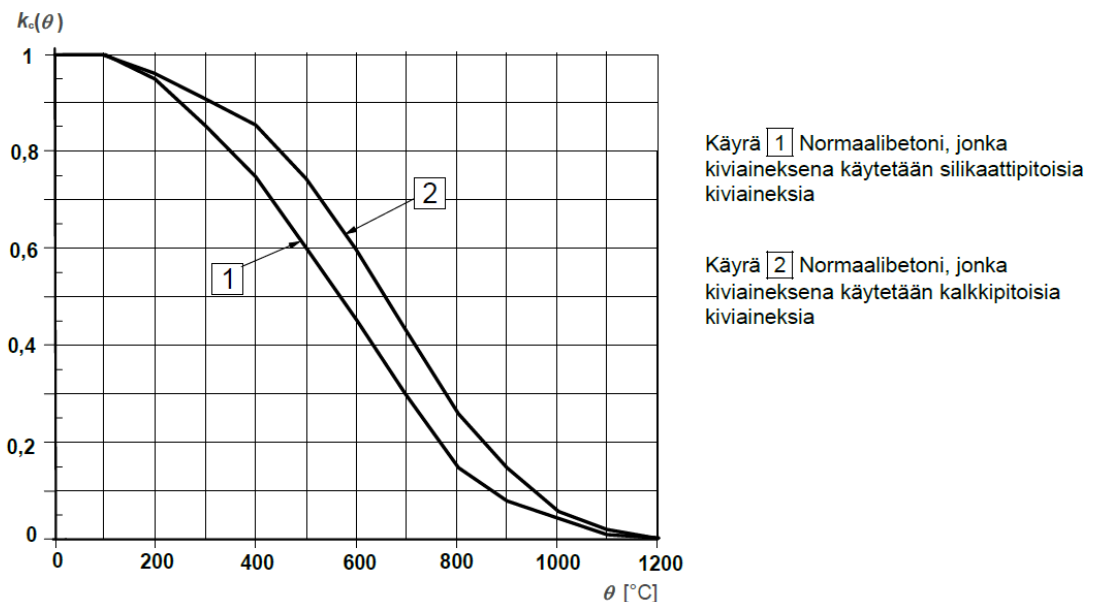
Luvussa 2 käsitellään yleisesti betonin, terästen ja teräsbetonirakenteiden toimintaa palossa. Luku 3 esittelee ontelolaattojen vaurioitumismekanismit palossa. Luvussa 4 tarkastellaan ontelolaattojen palonkeston ongelmia sekä vaurioitumismekanismeja vielä tarkemmin toteutuneiden onnettomuuksien ja polttokokeiden tulosten avulla sekä pohditaan polttokokeiden tulosten luotettavuutta. Luvussa 5 tutkitaan, miten ontelolaattojen palonkesto määritellään standardeissa ja tarkastellaan, miten polttokokeet toteutetaan standardien mukaisesti. Luvussa 6 pohditaan palonkeston haasteita ja luvussa 7 tehdään johtopäätökset.

## 2. BETONIRAKENNE PALOSSA

Betoni koostuu runkoaineesta, sementtikivestä ja niiden lisäksi se sisältää myös vettä. Betonirakenteessa on yleensä myös teräksiä lisäämässä rakenteen kestävyyttä. Koska betonirakenne sisältää useita eri komponentteja, sen käyttäytyminen palossa riippuu niiden ominaisuuksista ja toiminnasta yhdessä ja on siten monimutkainen ilmiö.

### 2.1 Betoni

Betonin lujuuden aleneminen palossa johtuu osittain siitä, että sementtikivi kutistuu ja vastaavasti kiviaines paisuu aiheuttaen betoniin sisäisiä halkeamia. Lisäksi korkeassa lämpötilassa betonin huokosissa oleva nestemäinen vesi alkaa höyrystyä ja poistua rakenteesta, mikä aiheuttaa betoniin jännityksiä, jotka myös alentavat betonin lujuutta. (BY 2018, s. 121) Sementtikivi kutistuu dehydrataation seurauksena, mikä on päinvastainen reaktio hydrataatiolle, joka aiheuttaa sementtikiven kovettumisen. Dehydrataatiossa sementin kalsiumhydroksidi hajoaa kalsiumoksidiksi ja vedeksi. Vesihöyryn poistuessa sementtikivestä sen huokoskoko kasvaa, ja samalla tiheys ja lujuus pienenevät. (Hager 2013)



**Kuva 1:** Betonin lujuuden ominaisarvon pieneneminen lämpötilan funktiona (SFS-EN 1992-1-2 + AC 2011, s. 31)

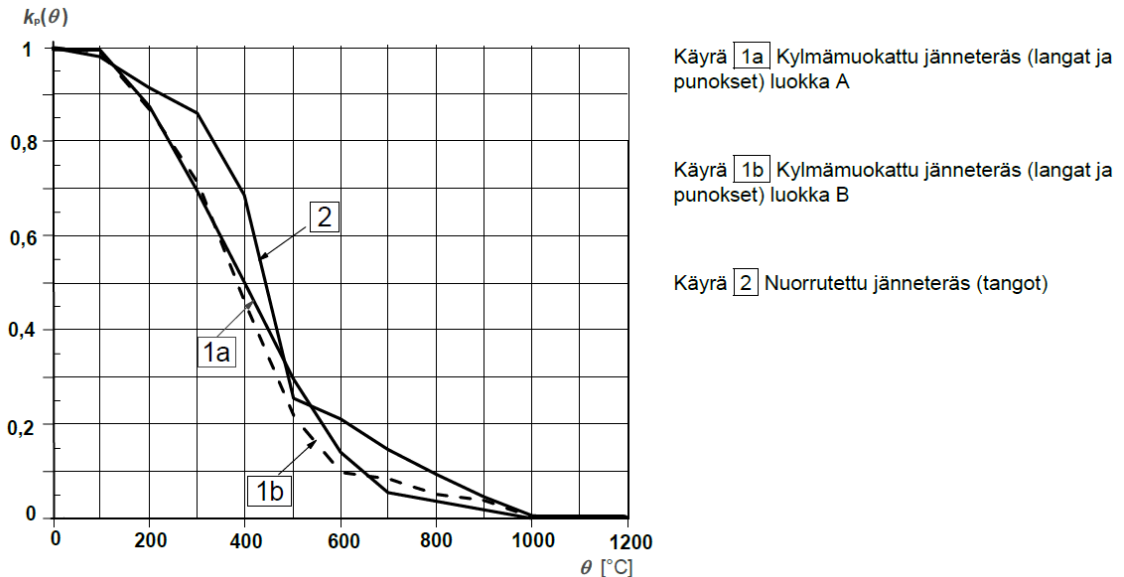
Kuvasta 1 nähdään, miten lämpötilan kohoaminen vaikuttaa betonin lujuuteen. Kalkkipitoista kiviainesta sisältävä betoni kestää jonkin verran paremmin korkeita lämpötiloja

kuin betoni, jossa on käytetty silikaattipitoista kiviainesta. Lujuus alkaa pienentyä sadassa celsiusasteessa, ja puolet lujuudesta on menetetty noin 550–650 °C:ssa riippuen kiviaineksestä. Noin 1 200 °C:ssa betonin lujuus alkaa lähestyä nollaa. Riippuen runkoaineesta tavallisen betonin sulamispiste on noin 1 300–1 500 °C (BY 2018, s. 121).

Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että betoni on lämpöä eristävä materiaali, eli se johtaa lämpöä melko heikosti (BY 2018, s. 120). Tämän seurauksena palotilanteessa rakenteen palolle altistumattoman puolen ja rakenteen sisäosan lämpötilat ovat matalammat kuin palolle altistuneella pinnalla ja viileämpien osien lujuus säilyy korkeampana palon alkuvaiheessa.

## 2.2 Jänneteräs

Ontelolaattojen esijännitys muodostetaan teräspunosten avulla ja lisäksi niiden tehtävänä on ottaa vastaan betonirakenteen vetojännitykset, sillä betonin vetolujuus on pieni. Terästen kyky johtaa lämpöä on suuri, ja siksi niiden palonkesto on heikko. Terästen lujuus pienenee voimakkaasti lämpötilan kohoamisen seurauksena, ja niiden myötääminen heikentää betonirakenteen palonkestoa. Jos teräkset pääsevät kuumenemaan liikaa, betonin halkeillessa ne eivät pysty vastaanottamaan vetojännityksiä.



**Kuva 2.** Jänneteräksen lujuuden ominaisarvon pieneneminen lämpötilan funktiona (SFS-EN 1992-1-2 + AC 2011, s. 31)

Kuvasta 2 nähdään, miten ontelolaatoissa käytettyjen jänneterästen (käyrä 1a) lujuus pienenee lämpötilan noustessa. Lujuus alkaa vähenemään jo 100 °C:ssa, ja 400 celsiusasteessa lujuudesta on jäljellä enää puolet. Kun saavutetaan 1 000 °C, jänneteräksillä ei

ole enää lujuutta. Palon jälkeen terästen jäähtyessä ne saavat suurimman osan lujuudestaan takaisin, mutta betonin lujuus palautuu halkeilun takia vain hieman.

## 2.3 Teräsbetoni

Betonin lämmönjohtavuus on pieni verrattuna betoniteräksiin, ja suojabetonipeitteen tarkoituksena on palossa suojata teräksiä voimakkaalta lämpötilan nousulta, jolloin terästen vetolujuus ei pienene haitallisesti. Suojabetonipeitteen paksuudella voidaan vaikuttaa palonkestoon. Jos palon seurauksena betoni halkeilee ja lohkeilee, teräkset kuitenkin lämpenevät voimakkaasti. Terästen tehtävänä on myös ottaa vastaan vetojännityksiä, jotka vapautuvat betonilta sen halkeillessa palon vaikutuksesta.

Fletcherin et al. (2007) mukaan 400 °C:een asti betonin ja terästen lämpölaajeneminen on yhtä suurta. Tätä korkeammassa lämpötiloissa teräs laajenee voimakkaammin kuin betoni, ja tämä heikentää tartuntajännitystä betonin ja terästen välillä (Fletcher et al. 2007). Terästen suurempi lämpölaajeneminen aiheuttaa terästen ympärille halkeamia betoniin, mikä aiheuttaa betonin ja terästen välisen tartuntajännityksen pienenemistä.

Ontelolaatan ollessa normaaleissa lämpöolosuhteissa ja kuormituksessa, esijännitys aiheuttaa laatan alaosaan puristusta ja taivutusrasitus puolestaan vetoa. Näiden yhteisvaikutuksesta laatan alapinnassa ei ole suurta aksiaalista jännitystä. Palossa ontelolaatan ala- ja yläosa ovat puristettuja, kun taas keskiosassa on vetojännitystä. Tämä johtuu siitä, että poikkileikkauksen teoreettinen lämpövenymä on epälineaarinen, kun taas Bernoullin hypoteesin mukaan venymä on lineaarinen. Kun lämpövenymä on suurempi kuin todellinen venymä, muodostuu poikkileikkaukseen puristusjännitystä, ja vastaavasti lämpövenymän ollessa pienempi kuin todellinen venymä, muodostuu poikkileikkaukseen vetojännitystä. (Leiminen 2015) Alaosan puristusjännitys pienenee ja muuttuu vetojännitykseksi, kun betonin lämpötila saavuttaa 700–800 °C, sillä betonin lämpölaajeneminen pysähtyy noin 700 °C:ssa. Polttokokeissa puristusjännityksen muuttuminen vetojännitykseksi tapahtuu noin 40 minuutin kuluttua. (Fellinger et al. 2004)



### 3. ONTELOLAATAN VAURIOITUMISMEKANISMIT

Ontelolaatan vaurioituminen tai sortuminen voi tapahtua tulipalossa monella eri tavalla. Janszen et al. (2014, s. 39) Holcofire-projektin polttokokeissa havaitsemat vaurioitumismekanismit olivat voimakas lohkeilu, poikkileikkauksen taivutusmurtuma, ankkurointimurtuma, taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutuksesta aiheutunut murtuma sekä vaakasuora murtuma onteloiden läpi. Tässä luvussa esitellään palotilanteen vaurioitumismekanismit. Jos vaurioitumismekanismeja esiintyy myös normaaleissa olosuhteissa, vertaillaan mekanismin eroja palotilanteeseen.

#### 3.1 Betonipinnan voimakas lohkeilu

Voimakas lohkeilu on seurausta betonin korkeasta kosteuspitoisuudesta. Jos kosteuspitoisuus on alle 2,5 painoprosenttia, lohkeilu on epätodennäköistä. Korkeassa lämpötilassa veden höyrystyminen huokosista aiheuttaa betoniin sisäistä painetta ja vetojännityksiä. Jos betonin vetolujuus ylittyy, seurauksena on lohkeilua. Mitä tiiviimpää betoni on, sitä vaikeampaa on veden poistuminen betonista ja lohkeilun todennäköisyys kasvaa. (BY 2018, s. 120–121)

Palotilanteessa ontelolaatoissa voi esiintyä lohkeilua myös muista syistä kuin betonin korkeasta kosteuspitoisuudesta. Lohkeilu voi aiheutua palolle altistuneen pinnan ja sisemmän betonin lämpötilaeron seurauksena. Tällöin pieniä betonin palasia lohkeilee laatan alapinnasta erityisesti terävistä kulmista ja epätasaisista kohdista. Tätä lohkeilutapaa havaitaan yleensä 10–15 minuutin jälkeen palon syttymisestä, kun lämpötilaerot laatan poikkileikkauksessa ovat vielä suuria. Toinen vesihöyryn paineesta riippumaton lohkeilutapa johtuu lämpölaajenemisesta. Ontelolaatan laajeneminen lämpötilan kohoamisen seurauksena aiheuttaa rakenteeseen sisäistä puristusjännitystä, mikä voi aiheuttaa suurien betonipalojen lohkeamista palon puoleiselta pinnalta. (Jansze et al. 2014, s. 192)

Betonin lohkeilu voi pienentää raudoitusten suojabetonipaksuutta, tai betoni voi lohkeilla niin, että raudotteet paljastuvat kokonaan, jos lohkeilu on voimakasta. Tämän seurauksena teräspunosten lämpötila nousee nopeammin ja niiden lujuus pienenee heikentäen koko rakenteen toimivuutta. Toinen lohkeilun negatiivinen vaikutus rakenteen toimivuuteen on poikkipinta-alan pieneneminen, mikä johtaa heikompaan kuormien kantokykyyn jännitysten kasvaessa. (Fletcher et al. 2007)

## 3.2 Taivutus

Koska betonin ja teräspunosten lujuudet pienenevät palotilanteessa ja sen seurauksena kuormien kantokyky pienenee, ontelolaatan taipumat kasvavat. Taipumien kasvaminen voi aiheuttaa laatan alapintaan halkeamia. Halkeamat eivät vielä tarkoita rakenteen sortumista, vaan teräkset ottavat vastaan lisää vetojännitystä. Raudoitus suunnitellaan niin, että teräkset saavuttavat myötölujuutensa ennen kuin betonin puristuspiinta murtuu. Näin murtumistavasta ei tule hauras ja rakenteen vaurioituminen on havaittavissa ennen sen sortumista.

Ontelolaattojen esijännitys teräspunosten avulla parantaa laatan taivutuksen kestoa. Tämä johtuu siitä, että teräspunosten avulla saatu puristus pienentää vetojännitystä laatan alapinnassa ja taipumasta aiheutuvien halkeamien syntymiseen tarvitaan suurempi kuorma. Ontelolaatoissa on myös esikorotus, joka muodostetaan laattoihin teräspunosten avulla. Esikorotus lisää osaltaan taivutuksen kestoa, sillä saman taipuman muodostamiseen tarvitaan suurempi kuorma kuin ilman esikorotusta. Palossa räjähtävä lohkeilu tai alapinnan halkeilu heikentää ontelolaatan taivutuskestävyyttä, sillä teräspunosten paljastuessa halkeilun takia ne kuumentuvat nopeammin ja voimakkaammin, jolloin niiden lujuus heikkenee ja laatan taipuma kasvaa.

## 3.3 Ankkurointi

Ontelolaattojen esijännitys saadaan aikaan tartuntajänteillä. Teräspunoksiin jännitetään vetojännitys ja ontelolaatta valetaan niiden ympärille. Kun betoni on saavuttanut tietyn lujuuden, teräspunosten jännitys vapautetaan ja ontelolaattoihin muodostuu puristusjännitys terästen ja betonin välisen tartunnan avulla. Tartuntajänteet myös ankkuroidaan terästen ja betonin välisellä tartunnalla, eikä erillisiä ankkurointikappaleita käytetä laatan päissä.

Ankkurointimurtuma johtuu normaaleissa olosuhteissa lähellä tukea ilmenevistä taivutushalkeamista, joita voi aiheuttaa suuri kuorma ontelolaatan päätyosassa. Halkeaman syntyessä betoniin, teräspunokset ei pysty vastaanottamaan vetojännitystä, koska lähellä laatan päätä tartuntalujuus punosten ja betonin välillä on heikompi lyhyemmän tartuntapituuden vuoksi. Ankkurointimurtuma voi olla murtumistavaltaan hauras tai sitkeä riippuen taivutushalkeaman etäisyydestä tuelta. Jos halkeama on riittävän lähellä ontelolaatan päätä, vetojännityksen siirtymistä betonilta teräkselle ei tapahdu ollenkaan ja laatta sortuu terästen irrotessa laatan päästä. Jos halkeama on lähellä tukea, mutta kriittisen etäisyyden ulkopuolella, niin murtuma on sitkeä. Teräs pystyy vielä vastaanottamaan halkeamasta johtuvan vetojännityksen, mutta kuorman kasvaessa teräspunokset

irtoavat tuelta ennen myötäämistä aiheuttaen laatan sortumisen. Kun taivutushalkeama syntyy tarpeeksi kauas tuelta, tartuntapituus on tarpeeksi pitkä ja teräkset myötäävät ennen niiden irtoamista tuelta. Ankkuroinnin kestävyys riippuu siis kriittisellä etäisyydellä tuesta laatan taivutushalkeaman syntymisestä ja tietyllä pituudella kriittisen etäisyyden ulkopuolella terästen ulosvetolujuudesta. (Fellinger et al. 2004)

Palotilanteessa ankkuroinnin käyttäytyminen on kuitenkin erilaista. Palossa kannaksiin syntyy pituussuunnassa jo aikaisessa vaiheessa lämmöstä johtuvia halkeamia, jotka etenevät laatan alapintaan taivutuksen vaikutuksesta (Fellinger et al. 2004). Tällöin Fellingerin et al. (2004) mukaan palossa teräspunosten ulosvetolujuus on määräävämpi tekijä ankkuroinnin kestävyuden kannalta kuin taivutushalkeaman syntyminen, sillä lämmöstä johtuvia halkeamia esiintyy aiemmin kuin betonin alapinnan halkeamista betonin vetojännityksen ylittymisen takia. (Fellinger et al. 2004) Lisäksi palotilanteessa betonin halkeilu ja lohkeilu alapinnasta ja erityisesti tukien lähellä todennäköisesti pienentävät ankkuroinnin kestävyyttä vaikuttamalla teräspunosten ja betonin väliseen tartuntaan. Fellingerin et al. (2004) mukaan palotilanteessa ontelolaattoihin voi syntyä lämpöjännityksistä johtuvia halkeamia myös teräspunoksia pitkin, jotka myös heikentävät ankkuroinnin kestävyyttä.

### 3.4 Leikkaus

Leikkausmurtuma voi olla normaaleissa olosuhteissa joko leikkauspuristusmurtuma tai leikkausvetomurtuma. Leikkauspuristusmurtuma voi syntyä poikkileikkaukseen, jossa on jo taipuman aiheuttamia pystysuoria murtumia laatan alapinnassa ja poikkileikkaus sijaitsee alueella, jossa on leikkausvoimaa ja taivutusmomenttia. Taivutuksesta aiheutunut pystysuora halkeama muuttuu edetessään kaltevaksi leikkausvoiman vaikutuksesta. Halkeamien muodostuttua leikkausvoima välittyy teräspunosten vaarnavaikutuksella, kivirakeiden kitkalla ja jäljellä olevalla betonin puristusvoimalla. (Fellinger 2004) Koska teräspunokset ja betoni ottavat vastaan leikkausvoimaa vielä halkeaman synnyttyä, tämä murtumistapa on sitkeä.

Normaaleissa olosuhteissa leikkausvetomurtuma syntyy kannaksiin ehyeen poikkileikkaukseen lähelle tukea ja se johtuu ontelolaatan kannaksiin kohdistuvista leikkausjännityksistä. Kun halkeama syntyy kannaksiin, siellä ei ole teräspunoksia ottamassa vastaan halkeamasta syntyviä vetojännityksiä, joten murtumistapa on hauras. Palotilanteessa näiden kahden murtumatyyppin välillä on vaikeaa havaita eroa, sillä ensin kannaksiin syntyvä halkeama viittaa leikkausvetomurtumaan, mutta murtuma ei ole kuitenkaan hauras, mikä puolestaan viittaa leikkauspuristusmurtumaan. Toisaalta leikkausvetomurtuma

syntyy halkeilemattomaan poikkileikkaukseen ja palotilanteessa kannaksiin syntyy jo aikaisessa vaiheessa, mikä viittaa leikkausmurtumatyyppin olevan leikkauksen- ja taivutuksen yhteisvaikutuksesta aiheutuva murtuma. Palotilanteessa leikkaus- ja ankkurointimurtuma esiintyvät usein yhdessä eli leikkausmurtuman syntyminen aiheuttaa myös terästen irtoamisen tuelta. (Fellinger et al. 2004)

### **3.5 Vaakasuora halkeilu ja murtuma**

Vaakasuora murtuma onteloiden kannasten läpi saattaa aiheuttaa laatan alaosan irtoamisen. Palon edetessä irronnut alaosa voi pudota ja sen seurauksena koko laatta voi sortua. Vaakasuoran murtuman esiintyminen palossa on yhdistetty ontelolaataston pinnalle usein lisättävään raudoitettuun pintavaluun. Kun laataston alapinta altistuu palolle ja sen lämpötila alkaa nousta, pintavalu säilyy viileämpänä. Kuumempi alapuoli pyrkii lämpölaajenemaan ja käyristymään leveyssuunnassa, mutta vahvistava pintavalu estää sen ja tämän seurauksena kannaksiin kohdistuu vetojännityksiä, joista voi seurata halkeaman syntyminen. (Jansze et al. 2014)

Vaakasuora murtuma ei itsessään aiheuta sortumista, eikä se sen vuoksi ole varsinainen sortumisen syy palotilanteessa. Murtuman syntyminen ja laatan jakautuminen kahteen osaan kuitenkin heikentää laatan toimintaa palossa merkittävästi ja se vaikuttaa muiden vaurioitumismekanismien syntymiseen.

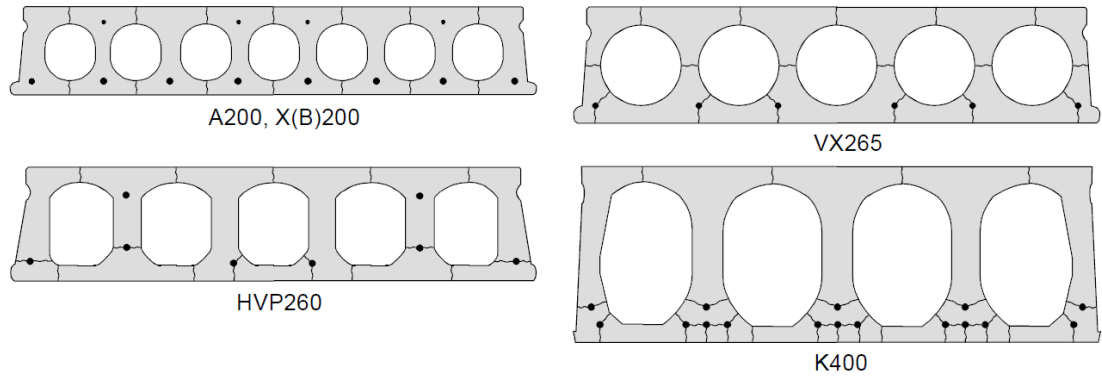
## 4. ONGELMAT PALONKESTOSSA

Polttokokeilla voidaan saada oikein toteutettuna tietoa siitä, miten rakenne käyttäytyy palossa. Polttokokeiden avulla voidaan vertailla esimerkiksi eripaksuisten ontelolaattojen toimintaa palossa tai tutkia tiettyä vaurioitumismekanismia. Tässä luvussa tarkastellaan ontelolaattojen käyttäytymistä polttokokeissa ja tulipaloissa sekä pohditaan, voidaanko polttokokeilla arvioida luotettavasti rakenteen toimintaa onnettomuustilanteessa.

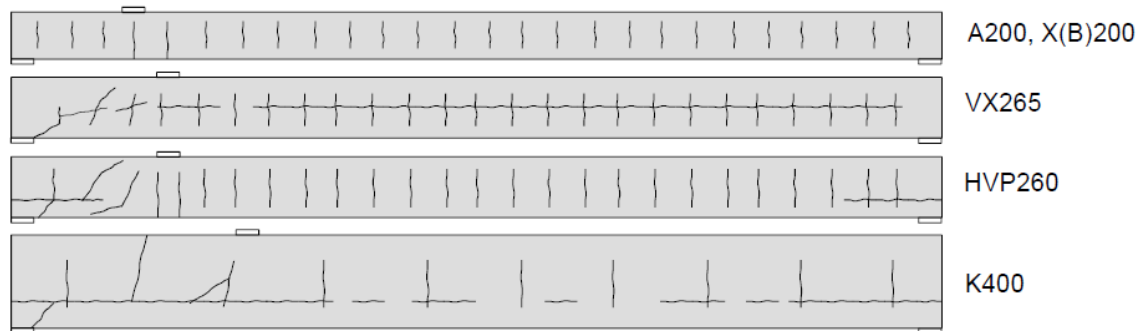
### 4.1 Polttokokeiden tulokset

Fellinger et al. (2004) toteuttivat ontelolaattojen polttokokeita selvittääkseen etenkin leikkaus- ja ankkurointimurtumien syitä. Kokeiden järjestely oli toteutettu niin, että kyseisten vauriomekanismien ilmeneminen olisi todennäköistä. Fellingingerin et al. (2004) suorittamissa polttokokeissa tutkittiin myös, miten ontelolaattojen lämpölaajenemisen estäminen ja onteloiden täyttäminen betonilla tukien lähellä sekä terästen sijoittelu poikkileikkauksessa vaikuttavat palonkestoon.

Kuvassa 3 on esitetty polttokokeissa käytetyt poikkileikkaukset, niiden rauditus sekä polttokokeissa syntyneet halkeamat. Poikkileikkauksen tunnuksessa oleva numero kuvaa laatan paksuutta. Kuvasta 3 havaitaan, että osassa poikkileikkauksista laatan lyhyemmälle sivulle syntyi pystysuoria halkeamia, jotka ulottuivat sekä laatan ala- että yläreunan läpi. Tämä ei kuitenkaan vielä aiheuttanut laatan sortumista, vaan halkeamat jakoivat laatan pituussuuntaisiin kaistoihin, jotka olivat yhä tuettuja kummastakin päästään (Fellinger et al. 2004). Kaikissa polttokokeissa havaittiin onteloiden välisissä uumakanaksissa pystysuoria halkeamia, jotka jakoutuivat tasaisesti laatan pituussuunnassa. Pystyhalkeamat on esitetty kuvassa 4. Pystysuorat halkeamat syntyivät, kun paloa oli kestänyt 14–16 minuuttia (Fellinger et al. 2004). Halkeamat johtuivat lämpöjännityksistä ja syntyivät kannaksiin, sillä kuten luvussa 2.3 todettiin, palon alkuvaiheessa vetojännitykset kohdistuvat kannaksiin ja laatan ylä- ja alaosassa on puristusjännitystä.



**Kuva 3:** Havainnekuvat erikorkuisiin ontelolaattoihin polttokokeissa syntyneistä halkeamista (Fellinger et al. 2005, s. 91)



**Kuva 4:** Piirros polttokokeissa syntyneistä vaurioista ontelolaattojen pituussuunnassa (Fellinger et al. 2005, s. 91)

Kuvassa 4 on esitetty ontelolaattoihin niiden pituussuunnassa syntyviä vaurioita. Kuvassa näkyvät lämpöjännityksistä syntyneet pystysuorat halkeamat, vaakasuorat halkeamat sekä leikkausvoimasta aiheutuneet halkeamat. 200 mm paksut laatat murtoivat joko ankkurointimurtuman tai taivutusmurtuman vuoksi, eikä leikkausmurtumaa tai vaakasuoraa halkeamaa havaittu lainkaan. (Fellinger et al. 2004) Kuvassa 4 esitetyssä laattassa HVP260 ei ole myöskään vaakasuoraa halkeamaa koko pituudella. Vaikuttaa siis siltä, että matalammilla laatoilla vaakasuora murtuma ei ole todennäköinen.

Onteloiden täyttäminen raudoitetulla betonilla ei odotusten mukaan parantanut ontelolaattojen palonkestoa. Onteloiden täytön olisi tarkoitus vahvistaa laatan poikkileikkausta ja lisätä laatan leikkauskestävyyttä sekä mahdollistaa kannaksiin kohdistuvien vetojännitysten jakautuminen myös onteloissa olevaan betoniin. Polttokokeiden jälkeen Fellinger et al. (2004) havaitsivat, että ontelolaatan ja täytteen välillä ei ollut tartuntaa, joten koko rasitus kohdistui ontelolaattaan, eikä laatan palonkesto parantunut. (Fellinger et al. 2004) Jos palonkestävyyttä halutaan parantaa täyttämällä onteloita, tartunta laatan ja onteloiden täytössä käytettävän betonin välillä tulee varmistaa huolellisesti.

Vaakasuorat murtumat syntyivät joko kannasten kapeimpaan kohtaan tai ne kulkivat teräspunoksia pitkin. Vaakasuoria murtumia ilmeni kannasten kapeimmassa kohdassa, vaikka laatan lämpöpiteneminen estettiin. Tämän perusteella vaakasuorat halkeamat eivät voi johtua laatan pituussuuntaisesta lämpöpiteneemisestä, vaan ainoastaan lämpöjännityksistä laatan leveyssuunnassa. Toisaalta lämpöpiteneminen estäminen rajoitti jonkin verran pystysuorien halkeamien kasvua ja pienensi merkittävästi teräspunosten liukumaa, mikä paransi laatan leikkauskestävyyttä. (Fellinger et al. 2004)

Ankkurointimurtumaa ei havaittu polttokokeissa yhtä aikaa vaakasuoran halkeaman kanssa, vaan se alkoi kannaksiin lämpöjännityksistä aiheutuneista pystysuorista halkeamista kannaksissa. Taivutusmomentin maksimikohdassa pystysuora halkeama voi taivutusrasituksen vaikutuksesta edetä laatan alapintaan asti. Halkeaman etenemiseen voi vaikuttaa myös ontelolaatan heikentynyt esijännitys. Palon edetessä taivutushalkeama kasvaa ja vetojännitykset siirtyvät teräspunoksille. Jos teräspunokset eivät lyhyen tartuntapituuden takia pysty tuen läheisyydessä vastaanottamaan vetojännitystä, teräkset irtoavat tuelta. Leikkausmurtuma puolestaan syntyi silloin, kun kannaksissa oli vaakasuora halkeama. Palon aikana vaakasuora ja pystysuora halkeama yhdistyivät, mikä johti laatan sortumiseen. (Fellinger et al. 2004)

Fellingerin et al. (2004) suorittamien polttokokeiden tuloksista on syytä huomioida se, miten teräspunosten etäisyys palolle altistuneelta pinnalta vaikuttaa palonkestoon. Etäisyyden kasvattaminen vähentää terästen kuumenemistä ja liukumaa, mutta samalla lisää todennäköisyyttä laatan taivutushalkeilulle sekä punoksia myöden kulkevien halkeamien syntymiselle, mikä vaikuttaa leikkauskestävyyteen. (Fellinger et al. 2004) Lisäksi on huomioitava, että ankkurointi- ja leikkausmurtumien syntymiseen vaikuttavat lämpöjännityksistä aiheutuvat pysty- ja vaakasuorat halkeamat, joita esiintyy jo palon aikaisessa vaiheessa.

## **4.2 Toteutuneet onnettomuudet**

Tässä luvussa tutkitaan kahta tulipaloa, joissa ontelolaatat ovat sortuneet tai vaurioituneet. Tulipalot ja onnettomuudet eivät ole toivottavia, mutta niistä voidaan saada tärkeää tutkimustietoa rakenteiden käyttäytymisestä todellisissa rakennuksissa ja oikeissa palotilanteissa ja -olosuhteissa.

### **4.2.1 Tavaratalon palo Vantaalla**

23. joulukuuta vuonna 2010 Vantaalla sijainneen tavaratalon alakerrassa syttyi tulipalo, jonka tarkkaa syttymissyytä ei ole tiedossa. Onnettomuustutkintakeskuksen raportissa

(2010) kerrotaan, että rinteessä sijainneen tavaratalon ontelolaattarakenteinen välipohja sortui lähes koko kaksikerroksiselta alueelta. Lisäksi laaja alue yläpohjan ontelolaatoista ja osa julkisivua sortui. Vuonna 1986 valmistuneen tavaratalon ontelolaattojen paksuus oli 265 mm ja niissä oli 60 mm:n paksuinen pintavalu. Ontelolaattojen palonkestoksi oli määritelty palonkestävä, mikä vastaa nykyistä paloluokkaa P1 ja laatasto oli suunniteltu kestämään standardikäyrän mukaista paloa 120 minuuttia. (Onnettomuustutkintakeskus 2010)

Onnettomuustutkintakeskuksen raportin mukaan (2010) ontelolaattojen alkavan vaurioitumisen havaitsi toisessa kerroksessa ollut sammutuspari. Välipohjan ontelolaattojen yläpinnassa oli halkeamia, joista tuli savua ja lattiapinnassa oli muodonmuutoksia. Hie-man tämän jälkeen rakennuksessa havaittiin tärähdys ja kuultiin paukahdus, jolloin sammutusyksiköiden oli poistuttava rakennuksesta. Ensimmäiset sortumat ilmenivät arvion mukaan suunnilleen 90 minuutin jälkeen palon syttymisestä, mikä aiheutti palon voimakkaamman leviämisen toiseen kerrokseen ja sammutustöiden vaikeutumisen. Paikallisia sortumia on kuitenkin voinut tapahtua jo ennen tätä. (Onnettomuustutkintakeskus 2010)

Sortumisen syy ennen ontelolaattojen palonkeston mukaista aikaa on arvioitu olevan standardipalokäyrää voimakkaampi palo. Tila on ollut matala ja siellä on säilytetty palolle herkkiä kemikaaleja, jotka ovat lisänneet palotehoa. Lisäksi ontelolaattojen sortuminen vaikeutti palon sammuttamista ja onnettomuushetkellä vallinnut kova pakkaneen vioitti sammutuskalustoa. Noin kahden ja puolen tunnin kuluttua palon syttymisestä paikalle saatiin kaksi lentokenttäpaloautoa, jotka saivat palon hallintaan. (Onnettomuustutkintakeskus 2010) Onnettomuustutkintakeskuksen raportissa (2010) todetaan, että tilan mataluuden vuoksi liekit ovat osuneet suoraan ontelolaattoihin ja kääntyneet katon suunnan mukaisiksi. Tämä voi selittää sitä, miksi ontelolaattojen vauriot olivat suuremmat kuin pilari- ja palkkirakenteiden. On kuitenkin huomioitava, että tässä palossa runkorakenteiden teräsbetoniset pilarit ja palkit eivät kokeneet läheskään yhtä vakavaa vaurioitumista kuin ontelolaatat, vaikka paloa on kuvailtu erittäin voimakkaaksi ja myös pilarit ja palkit ovat altistuneet standardipaloa voimakkaammalle palolle. Liekkien osuessa ontelolaattojen alapintoihin, niiden on täytynyt osua myös palkkien alapintoihin ja pilarien yläosiin. Näin ollen ne ovat altistuneet ainakin lähes samanlaisille olosuhteille kuin ontelolaatatkin. Kuvasta 5 on havaittavissa, että pilarit ja palkit näyttävät lähes vaurioitumattomilta, kun taas ontelolaatat ovat sortuneet täysin.





**Kuva 5:** *Sortuneita välipohjan ontelolaattoja (Onnettomuustutkintakeskus 2010, s. 16)*

Ontelolaattojen sortumisen vaiheet ovat pääteltävissä, sillä laatat sortuivat palon etene-  
misen mukaisesti ja palon katkaisukohtalla laatat olivat sortuneet vasta osittain. Laatto-  
jen sortumisessa on havaittavissa kolme vaihetta. Laatat ovat hajonneet ensin kahteen  
osaan, kun kannaksiin on tullut vaakasuora halkeama. Osassa laatoissa alapinta oli tai-  
punut ja lohkeillut, mutta alapinnan tukeutuminen palkeille oli estänyt sen putoamisen.  
Toisessa vaiheessa laatan alapinta oli pudonnut alempaan tilaan. Yläosa oli ilmeisesti  
tukeutunut viereisiin laattoihin ja pysynyt paikallaan. Lopulta kolmannessa vaiheessa  
myös yläosa pintavaluineen oli sortunut alapuoliseen tilaan. (Onnettomuustutkintakes-  
kus 2010)

Laatan hajoaminen kahteen osaan viittaa kappaleessa 3.5 esiteltyyn vaakasuoraan mur-  
tumaan. Näissä ontelolaatoissa oli myös pintavalu, mikä tukee Janszen et al. (2014)  
esittämää teoriaa, jossa pintavalu estää alapinnan lämpölaajenemisen, mikä aiheuttaa  
vaakasuoran murtuman. Samaa teoriaa on pohdittu myös Onnettomuustutkintakeskuk-  
sen raportissa (2010). Kun alapinta on irronnut yläpinnasta, niin yläpinta on kantanut  
suurimman osan yläpuolella olevista kuormista. Ontelolaatan alapinta on irronnut ensin  
toiselta tuelta, mikä viittaa luultavasti ankkuroinnin murtumiseen tai leikkausmurtumaan  
kyseisellä tuella. Kun alaosa on pudonnut, palo on päässyt kuumentamaan yläosaa en-  
tistä voimakkaammin. Todennäköisesti yläosa ei ole pystynyt kuumentamisen aiheutta-  
man lujuuden heikkenemisen vuoksi kantamaan kuormaa ja lopulta myös se on sortunut.  
Laatan poikkileikkaus on ollut myös paljon pienempi alaosan pudottua, mikä on heiken-  
tänyt kestävyyttä.

## 4.2.2 Parkkihallin palo Rotterdamissa

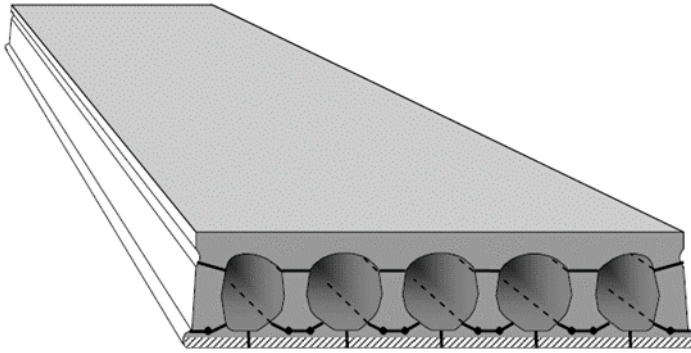
Lokakuussa 2007 Alankomaiden Rotterdamissa kerrostalon alakerrassa sijainneessa kaksikerroksisessa parkkihallissa syttyi tulipalo. Palo johtui auton syttymisestä tuleen parkkihallin alemmassa kerroksessa, ja palo levisi useampaan autoon. Palossa ontelolaattoja ei sortunut, mutta tulelle altistuneiden ontelolaattojen alapintaa vaurioitui räjähtävän lohkeilun takia. Räjähtävää lohkeilua oli havaittavissa myös parkkihallin seinien sisäpinnalla. Lisäksi ontelolaatoissa ilmeni vaakasuoria halkeamia, minkä takia laattojen alaosa putosi alempaan tilaan noin 70 neliömetrin alueelta. Laattojen yläosa kesti palon ja parkkihallin toisessa kerroksessa olleet autot pystyttiin siirtämään rakennuksesta seuraavana päivänä. Laattojen paksuus oli 260 mm ja niiden päällä oli pintavalu, jonka paksuus oli 70–90 mm. Pintavalun päällä oli vielä asfaltointi. Ontelolaattoja kannattivat THQ-teräspalkit ja laattojen päät tukeutuivat palkkien ulokkeille. Teräspalkkien ja -ulokkeiden näkyvät pinnat oli suojattu palonsuojalevytyksellä. (Efectis Nederland 2007)

Pelastushenkilökunta saapui kohteeseen alle kymmenessä minuutissa hälytyksestä ja keskittyi aluksi rakennuksessa olleiden henkilöiden evakuointiin. Kymmenen minuutin jälkeen saapumisestaan sammutusyksiköt yrittivät mennä parkkihallin ovesta sisälle, mutta näkyvyys oli liian huono. Sammutusyksiköt sammuttivat paloa kauempaa, mutta heidän täytyi vetäytyä, koska rakennuksesta kuului kovaäänisiä paukahduksia. Tällöin palokunta oli ollut paikalla noin 25 minuuttia. (Jansze et al. 2014) Vaurioiden perusteella äänet kuuluivat joko ontelolaattojen ja seinien räjähtävästä lohkeilusta tai ontelolaattojen hajoamisesta kahteen osaan. Koska rakennus sijaitsi veden äärellä, pystyttiin palon sammuttamiseen käyttämään sammutusvenettä, joka alkoi suihkuttaa vettä rakennukseen pian sammutusyksiköiden vetäytymisen jälkeen. Sammutusveneiden avulla tulipalo saatiin hallintaan noin kymmenessä minuutissa ja koko tulipalon kesto oli noin 45 minuuttia. (Jansze et al. 2014)

Janszen et al. (2014) mukaan kahden ontelolaatan alaosa on onnettomuuspaikalta otettujen kuvien perusteella sortunut vasta palon sammumisen jälkeen. Jansze et al. (2014) ovat epäilleet, että osa laatoista on voinut sortua sammutusveneiden käytön takia, koska sen suihkuttama vesisuihku on ollut voimakas ja se on kohdistanut laattoihin merkittävän voiman. Tätä ei ole kuitenkaan voitu varmistaa (Jansze et al. 2014).

Räjähtävä lohkeilu ulottui useiden senttimetrien syvyyteen ja osittain laattojen onteloihin asti. (Efectis Nederland BV 2007) Kuvassa 6 lohkeillut betoni on esitetty valkoisella vinyylivoitoksella. Koska rakennus oli rakennettu noin vuotta aiemmin, betoni on ollut suhteellisen tuoretta ja todennäköisesti sen kosteuspitoisuus on ollut yli 3 %. (Jansze et al. 2014) Luvussa 3.1 todettiin, että betonin korkea kosteuspitoisuus altistaa räjähtävälle

lohkeilulle veden höyrystymisestä johtuvan paineen takia. Parkkihalli oli avoin ulkoilmaan, mikä myös lisää korkean kosteuspitoisuuden todennäköisyyttä. Koska halli oli avoin ulkoilmaan, happea oli vapaasti saatavilla ja se on voinut osaltaan voimistaa paloa. (Efectis Nederland BV 2007)



**Kuva 6:** Piirros ontelolaatan poikkileikkauksesta, lohkeilusta ja halkeamista (Efectis Nederland BV 2007, s. 30)

Ontelolaatoissa esiintyi vaakasuorien halkeamien lisäksi pystysuoria halkeamia pituus suunnassa laatan alaosan ja onteloiden välillä (Efectis Nederland BV 2007). Halkeilua on havainnollistettu kuvassa 6. Janszen et al. (2014) mukaan vaakasuorat murtumat laattojen kannasten välillä on johtunut suhteellisen paksusta pintavalusta, josta on kerrottu tarkemmin luvussa 3.5. Teräspunokset ovat pitäneet alaosan paikoillaan, eikä se ole heti sortunut alapuoliseen tilaan. Palon edetessä laatan alaosan esijännitys on heikentynyt ja sen taipuma on kasvanut. Jansze et al. (2014) Jansze et al. (2014) esittävät, että kahtia jakautuneen laatan alaosa on suojelemaan yläosaa kuumenemiselta. Jos yksittäisen laatan taipuma kasvaa suureksi viereisiin laattoihin nähden tai on lohkeillut voimakkaasti, on kuitenkin mahdollista, että palokaasut pääsevät laatan osien väliin laatan reunoilta tai halkeamien läpi ja siten heikentävät sekä yläosan että alaosan palonkestoa verrattuna ehyeen laattaan. Laatan alaosa on pysynyt paikoillaan siihen asti, että teräspunosten ankkurointi on murtunut tai punokset ovat saavuttaneet murtorajansa (Jansze et al. 2014).

Kuvassa 7 on esitetty palossa syntyneitä vaurioita. Kuvasta nähdään, että teräspalkin ulokkeessa ei ole havaittavissa merkittävää taipumaa tai muita ulkoisia vaurioita. Ontelolaattojen alaosa on halkeillut voimakkaasti ja sortunut joko laatan toisen pään ankkuroinnin murtumisen tai terästen murtorajan ylittymisen takia. Kuvassa 7 olevalla tuella teräspunokset ovat vielä tarttuneet betoniin, eli ankkurointi on kestänyt murtumatta.



**Kuva 7:** Ontelolaatan liitos palkkiin ja alapinnan sortuminen (Efectis Nederland BV 2007 s. 29)

### 4.2.3 Yhteenveto onnettomuuksista

Huomionarvoista on, että sekä Vantaalla tapahtuneessa palossa että Rotterdamin parkkihallin palossa palon eteneminen ja ontelolaattojen vaurioituminen on ollut hyvin samantapaista. Kummassakin palossa havaittiin paukahduksia, jotka todennäköisesti johtuivat ontelolaattojen vaurioitumisesta ja niiden takia sammutusyksiköiden oli poistuttava rakennuksista. Ontelolaattoihin on aluksi muodostunut vaakasuora murtuma, joka on jakanut laatan kahteen osaan ja myöhemmin alempi osa on sortunut palavaan tilaan. Fellingierin et al. (2004) toteuttamissa polttokokeissa vaakasuoraa murtumaa ei havaittu ankkurointimurtuman kanssa. Sekä tavaratalon että parkkihallin palossa joidenkin laattojen alaosan sortuminen viittasi ankkuroinnin murtumiseen. Fellingierin et al. (2004) toteuttamien polttokokeiden mukaan ankkurointimurtumaa ei kuitenkaan esiintynyt vaakasuoran murtuman yhteydessä. Tähän on voinut olla syynä standardipaloa voimakkaampi palo, ja parkkihallissa räjähtävä lohkeilu on voinut heikentää ankkuroinnin kestävyyttä.

Vantaan tavaratalon palossa joistakin laatoista myös ylempi osa sortui, mutta Rotterdamin palossa tätä ei tapahtunut. Tähän voi vaikuttaa se, että Rotterdamissa palo saatiin nopeammin hallintaan sammutusveneen ansiosta ja parkkihallin laatoissa oli hieman paksumpi pintavalu sekä asfaltointi, jotka ovat lisänneet haljenneiden laattojen yläosan kestävyyttä. Jos parkkihallin palo olisi kestänyt pitempään, luultavasti myös siellä laatto-

jen yläosat olisivat sortuneet lujuuden heikentymisen seurauksena. Lisäksi Vantaan tulipalossa merkittävää oli tilan mataluus, mikä lisäsi ontelolaattojen palorasitusta. Kumpikin palo oli standardipalokäyrää voimakkaampi, mutta silti runkorakenteet kärsivät vain vähäisistä vaurioista ontelolaattojen vaurioiden ollessa vakavia. Näiden tulipalojen perusteella voidaan päätellä, että jos pintavalettu ontelolaatta vaurioituu palossa, todennäköinen vaurioitumismekanismi on vaakasuora halkeama, joka voi johtaa alaosan putoamiseen ja palon jatkuessa myös laatan yläosa voi sortua.

### 4.3 Polttokokeiden luotettavuus

Polttokokeita on tehty ontelolaatoille paljon, mutta niiden luotettavuutta on kritisoitu. Hertzin et al. (2016) mukaan epäily ontelolaattojen heikosta leikkauskestävyydestä palon aikana on johtanut polttokokeisiin, jotka keskittyvät leikkauskestävyyden tutkimiseen ja polttokokeissa käytetyt laattakoe-kappaleet ovat olleet lyhyitä. Taivutuksen ja leikkausvoiman yhteisvaikutuksesta johtuva murtuminen riippuu myös taivutuksesta, ja lyhyellä laotalla taipumat ovat pienempiä kuin pitkällä laotalla (Hertz et al. 2016). Lyhyemmällä laatoilla toteutetut polttokokeet voivat tämän takia antaa leikkauskapasiteetin kannalta parempia tuloksia. Myös Fellingner et al. (2004) toteavat, että polttokokeita on tehty tietyn tuloksen saavuttamisen ehdoilla, eikä tarkoituksena ole niinkään ollut vaurioiden tutkiminen.

Ongelmana on ollut myös polttokokeen pysäyttäminen, kun rakenne on kestänyt paloluokkansa vaatiman ajan. (Fellingner et al. 2004) Jos polttokokeita jatkettaisiin paloluokan mukaisen ajan saavuttamisen jälkeen murtoon asti, saataisiin tietoa siitä, mitkä vauriomekanismit ovat tyypillisimpiä sekä tietoa mekanismeihin vaikuttavista tekijöistä. Sekä Hertz et al. (2016) että Fellingner et al. (2004) ovat yhtä mieltä siitä, että monien polttokokeiden koejärjestelyt ja tulokset ovat melko huonosti raportoituja, eikä niiden tuloksia voida pitää siten kovinkaan luotettavina. Kokeita ei voi myöskään toteuttaa uudelleen puutteellisten raporttien takia ja siten todistaa niiden paikkansa pitävyyttä.

Hertz et al. (2016) ovat sitä mieltä, että Holcofire-projektissa analysoitujen 162 polttokokeiden tuloksista vain joitakin voidaan pitää luotettavana. Hertz et al. (2016) pitävät merkittävänä seikkana sitä, että aiemmin ontelolaatoissa on käytetty raudoitusta myös lyhyemmän sivun suunnassa, kun taas nykyään raudoitus on laatoissa vain pituussuunnassa. Holcofire-projektin analysoiduissa polttokokeissa on mukana myös ontelolaattoja, joissa on ollut kyseinen poikittaissuuntainen raudoitus, joka on parantaa ontelolaatan poikittaissuuntaista leikkauskestävyyttä (Hertz et al. 2016). Lyhyemmän sivun suuntainen raudoitus estää pitkittäissuuntaisten halkeamien syntymistä. Hertz et al. (2016) esittävät

väitteen, ettei ole todisteita siitä, että esijännitetyn ontelolaatan palonkesto olisi saavuttanut 120 minuuttia. Polttokokeiden ja analyysien perusteella noin 25 minuuttia on Hertzin et al. (2016) mielestä totuudenmukainen arvio ontelolaattojen palonkestolle.

## 5. PALONKESTON OSOITTAMINEN

Ontelolaattojen palonkestoa käsitellään standardin SFS-EN 1168 + A3 (SFS 2012) liitteessä G, jossa on viittauksia standardiin SFS-EN 1992-1-2 + AC (SFS 2011), joka koskee yleisesti betonirakenteiden palomitoitusta. Palonkestävyyden määrittämiseen voidaan käyttää yksinkertaistettuja laskentamenetelmiä tai taulukkomitoitusta. Ontelolaattojen taivutusmurron palonkestävyyden määrittämiseen ei voi kuitenkaan käyttää taulukkomitoitusta vaan kestävyys tulee määrittää laskentamenetelmällä. Standardin SFS-EN 1168 + A3 (2012) liitteessä G esitetään lisäksi ontelolaattojen palonkeston määrittämisessä käytetty polttokoejärjestely.

### 5.1 Eurokoodin mukainen palomitoitus

Taivutuskestävyyden laskentamenetelmä on ontelolaatoille sama kuin massiivilaatoille, mutta poikkileikkauksen lämpötilaprofiili on erilainen massiivilaatoihin verrattuna. Ontelolaatan poikkileikkauksesta määritetään taso  $a_{50\%}$ , jolla laatan uumien leveyksien summa on sama kuin onteloiden leveyksien summa. Tämän tason alapuolella lämpötilan voidaan olettaa olevan sama kuin massiivilaatoilla, joka määritetään standardin SFS-EN 1992-1-2 + AC kuvan A.2 lämpötilaprofiilien mukaisesti. Tason  $a_{50\%}$  yläpuolella lämpötila voidaan määrittää lineaarisella interpolaatiolla tasolla  $a_{50\%}$  vallitsevan lämpötilan ja laatan yläpinnan lämpötilan välillä. Yläpinnan lämpötila on korkeintaan 160 °C, joka määräytyy eristävyysvaatimusten perusteella. (SFS 2012)

Yksinkertaistettu laskentamenetelmä sisältää kaksi vaihtoehtoista menettelytapaa: isothermimenetelmän ja vyöhykemenetelmän. Isothermimenetelmässä poikkileikkauksen pinta-alaa pienennetään 500 °C isotermiä pitkin, eli vähintään 500 °C lämpötilan saavuttanutta betonia ei oteta huomioon. Alle 500 °C lämpötilassa olevalla betonilla oletetaan olevan täysi lujuus. Kun pienennetty poikkileikkaus on saatu selville ja raudoituksen lujuuden heikentynyt arvo on määritetty standardin SFS-EN 1992-1-2 + AC mukaisesti, voidaan murto-rajatilan kestävyuden määrittämiseen käyttää tavanomaisia laskentamenetelmiä. Jos teräspunoksia jää pienennetyn poikkileikkauksen ulkopuolelle, ne voidaan ottaa huomioon mitoituksessa käyttäen korkean lämpötilan vuoksi heikentynyttä lujuutta. (SFS 2012)

Vyöhykemenetelmässä poikkileikkaus jaetaan vähintään kolmeen yhtä paksuun yhden-suuntaiseen vyöhykkeeseen. Vyöhykkeiden keskimääräinen lämpötila ja vastaava keskimääräinen puristuslujuus sekä tarvittaessa kimmokerroin määritetään, joiden avulla

saadaan selville heikentyneen vyöhykkeen paksuus  $a_z$ . Heikentynyt vyöhyke vähennetään laatan poikkileikkauksesta, eikä sitä huomioida mitoituksessa. Jäljelle jääneen poikkileikkauksen lujuuksena käytetään pienennettyä lujuuksia, joka määritetään laatoille ekvivalentin seinän keskilinjan avulla. (SFS 2012) Sekä isotherminen menetelmä, että vyöhykemenetelmä perustuvat siis betonin heikentyneeseen lujuuteen ja pienennettyyn poikkileikkaukseen.

Taulukkomitoitusta voidaan käyttää ontelolaattojen eristävyden ja leikkauskestävyyden määrittämiseen. Tällöin palonkestävyys määräytyy laatan paksuuden ja teräspunosten keskiöetäisyyden perusteella (SFS 2012). Rakenteen palonkestävyyttä voidaan parantaa yksinkertaisesti kasvattamalla sen paksuutta ja terästen etäisyyttä palolle altistuneelta pinnalta. Standardin SFS-EN 1168 + A3 (SFS 2012) osassa G.2 on esitetty muunnoskaava, jolla voidaan laskea ontelolaatan tehollinen paksuus, joka vastaa standardin SFS-EN 1992-1-2 + AC (SFS 2011) taulukossa 5.8 esitettyä massiivilaatan vähimmäispaksuutta. Taulukkoon 1 on koottu muunnoskaavan avulla saatavat ontelolaattojen paksuudet ja massiivilaattojen paksuudet sekä terästen keskiöetäisyydet. Suomen kansallisessa liitteessä SFS 7016 ontelolaattojen paksuudet ovat suurempia kuin standardissa vaaditut paksuudet. Suuremmat arvot perustuvat siihen, että leikkausvoiman arvo palotilanteen kuormilla laskettuna saa olla korkeintaan 50 % laatan leikkauskapasiteetista. (SFS 2008) Taulukossa 1 on esitetty myös kansallisen liitteen arvot ontelolaatan paksuudelle.

**Taulukko 1:** Laattojen vähimmäismitat eristävyden kannalta palonkestoluokan mukaan (tiedot SFS-EN 1168 + A3 2012, SFS-EN 1992-1-2 + AC 2011, SFS 7016 2008)

Palonkestoluokka	Ontelolaatan paksuus (mm)	Ontelolaatan paksuus, kansallinen liite (mm)	Massiivilaatan paksuus (mm)	Keskiöetäisyys (mm)
REI 60	130	200	80	20+15
REI 90	160	250	100	30+15
REI 120	200	265	120	40+15
REI 180	250	300	150	55+15

Ontelolaatoissa käytettävien teräspunosten tai lankojen keskiöetäisyydelle käytetään 15 mm suurempia arvoja kuin betoniterästen keskiöetäisyydelle (SFS 2011). Taulukkoon 1 on merkitty betoniterästen keskiöetäisyys ja siihen lisättävät 15 mm, joka on teräspunosten keskiöetäisyys. Tämä johtuu siitä, että teräspunosten ja -lankojen kriittinen lämpötila on 350 °C, kun taas betoniterästen kriittinen lämpötila on 500 °C. Kriittisellä lämpötilalla



tarkoitetaan sitä terästen lämpötilaa, jolla rakenneosan oletetaan murtuvan palossa tiettyllä teräsjännityksellä. (SFS 2011) Taulukossa 2 on esitetty, miten leikkauskestävyys tuen kohdalla palossa  $V_{Rd,c,fi}$  voidaan määrittää normaalitilanteen leikkauskestävyyden  $V_{Rd,c,cold}$  avulla. Normaalitilanteen leikkauskestävyys  $V_{Rd,c,cold}$  on määritetty yksinkertaistetun leikkausvetomallin perusteella. Taulukossa 2 esitetyissä arvoissa on oletettu, että punokset on katkaistu ontelolaatan päiden kohdalta, laatan tukipituus on 70 mm ja laatasta on pituussuuntaista sideraudoitusta  $1,88 \text{ cm}^2/\text{m}$  suunnilleen laatan korkeuden keskellä. (SFS 2012)

**Taulukko 2:** Leikkauskestävyyden taulukkomitoitusarvot (SFS-EN 1168 + A3 2012, s. 47)

$V_{Rd,c,fi}/V_{Rd,c,cold}$ (%)	Laatan paksuus [mm]				
Palonkestävyys	160	200	240...280	320	360...400
REI 60	70 %	65 %	60 %	60 %	55 %
REI 90	65 %	60 %	60 %	55 %	50 %
REI 120	60 %	60 %	55 %	50 %	50 %
REI 180	45 %	50 %	50 %	45 %	45 %

Leikkaus- ja ankkurointimurron palonkestävyyden määrittämisessä tulee käyttää leikkaus- ja ankkurointimurron kokemusperäistä laskentamallia, joka on standardin SFS-EN 1168 + A3 liitteessä G. Jos palonkestoluokka on alle R 60, tätä laskentamallia ei tarvitse käyttää leikkaus- ja ankkurointimurron palonkestävyyden tarkistamiseksi. (SFS 2012)

## 5.2 Eurokoodin mukainen polttokoejärjestely

Koekappaleen palolle altistetun pituuden tulee olla vähintään 4 m ja leveyden on oltava vähintään 2,4. Jos kaikki laatat eivät mahdu polttokoeuuniin kokonaisina, käytetään reunimmaisena pituussuunnassa halkaistua laattaa. Polttokokeessa tulee olla ontelolaattojen lisäksi kannatinpalkit ja ontelolaataston liitosten niiden välillä tulee vastata käytännön olosuhteita. Laatat kiinnitetään palkkeihin raudoitetulla vähintään 100 mm leveällä jälki-  
valukaistalla, jolloin samaa koejärjestelyä voidaan soveltaa sekä palkkeihin että seinisiin tukeutuviin ontelolaatastoihin. (SFS 2012)

Yleensä polttokokeet toteutetaan niin, että ontelolaatat ovat yhteen suuntaan kantavia. Ontelolaatoissa voidaan käyttää betonitasoitetta tai raudoitettua pintavalua, mutta se ei ole pakollista. Ontelolaataston pituussuuntainen laajeneminen tulee estää käytännön olosuhteita vastaavasti joko vaakasuuntaisilla hydraulitunkeilla tai kahdella pituussuuntaisella terästangolla laataston kummassakin reunassa. Myös poikittainen laajeneminen tulee estää, jotta koejärjestely vastaa mahdollisimman hyvin todellisia olosuhteita ja se voidaan toteuttaa rakenteella, joka ympäröi laatastoa. Sideraudoitus, joka estää jatkuvan

sortuman, tulee asentaa joko onteloihin tai laattojen välisiin saumoihin käytännön olosuhteita vastaten. Lisäksi laatan kosteuspitoisuuden on vastattava todellisia olosuhteita, joten se ei saisi olla yli 3 painoprosenttia. Jos laattoja säilytetään kolme kuukautta sisäolosuhteissa, voidaan niiden kosteuspitoisuutta pitää hyväksyttävänä. (SFS 2012)

Jotta polttokokeiden tulokset ovat vertailukelpoisia ja niitä voidaan käyttää ontelolaatan toiminnan analysointiin todellisissa palotilanteissa, tulee kokeiden olla yhdenmukaisesti toteutettuja ja koejärjestelyiltään mahdollisimman pitkälle käytännön olosuhteita vastaavia. Myös taulukkomitoitus sekä leikkaus- ja ankkurointimurron kokemusperäinen laskentamalli perustuvat polttokokeissa saatuihin tuloksiin. Standardin SFS-EN 1992-1-2 + AC mukaan rakenteen palomitoitus voi perustua polttokokeiden tuloksiin tai polttokokeiden ja laskelmien yhteiskäyttöön (SFS 2011). Tällöin tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi on tärkeää noudattaa standardien mukaisia polttokoejärjestelyjä.

## 6. PALONKESTON HAASTEET

Tutkimustulosten perusteella monet vaurioitumismekanismit kytkeytyvät toisiinsa, mikä vaikeuttaa perimmäisen vaurioitumismekanismien löytämistä. Esimerkiksi taivutusrasitus vaikuttaa leikkaus- ja ankkurointimurtumien syntymiseen. Tämä vaikeuttaa sekä polttokokeiden tulosten arviointia että tietyn vaurioitumismekanismien estämistä. Sortumiseen johtava vaurioitumismekanismi riippuu myös laatan paksuudesta, pituudesta ja poikkileikkauksesta. Jos vaurioitumismekanismia ei täysin tunneta, on ontelolaattoja vaikea mitoitaa kestämään vaaditun paloluokan edellyttämää palonkesto-aikaa. Mitoitus vaikeutuu edelleen, jos laatan rakenne tai kuormitus poikkeavat tavanomaisesta.

Hertz et al. (2016) pitävät ontelolaattojen palonkestoon liittyvän epävarmuuden keskeisinä syinä standardien mukaista lämpötilaprofiilin määrittämistä ja yksinkertaistettuja laskentamenetelmiä, joista on kerrottu tarkemmin luvussa 5.1. Onteloiden alapuolinen osa voi jäädä kokonaan tai suurimmaksi osaksi heikentyneeseen vyöhykkeeseen. Heikentynyt vyöhyke voidaan ottaa huomioon ontelolaattojen palomitoituksessa pienennetyn poikkileikkauksen avulla samalla tavalla kuin massiivilaatoilla, vaikka ontelolaatan poikkileikkaus muistuttaa ripalaattaa. Hertzin et al. (2016) mukaan ontelolaatan vaurioituminen voi johtua laatan poikkileikkauksesta ja kuormituksesta riippuen taivutuksesta, leikkautumisesta, ankkuroinnista tai laatan jakautumisesta kahteen osaan. Lisäksi onteloiden ja laatan alapinnan välille muodostuu jo palon aikaisessa vaiheessa halkeamia, jolloin palokaasut pääsevät onteloihin (Hertz et al. 2016). On epäselvää, pieneneekö laatan lämpötila lineaarisesti tason  $a_{50\%}$  ja laatan yläpinnan välillä, kuten standardin SFS-EN 1168 + A3 liitteessä G ohjeistetaan. Hertzin et al. (2016) mukaan olisi järkevämpää jättää yksinkertaisessa laskentamallissa laatan alaosa onteloiden alareunaan asti huomiomatta ja olettaa, että palo ympäröi kannaksia sekä sivuilta että alhaalta päin.

Monet aiheen tutkijat ovat polttokokeiden tuloksista eri mieltä ja esittävät palonkestosta ristiriitaisia väitteitä. Jansze et al. (2014) tulivat Holcofire-projektissaan siihen tulokseen, että ontelolaattojen palonkesto on hyvä ja ontelolaatat kestävät paloluokkansa vaatiman ajan. Hertz et al. (2016) puolestaan ovat sitä mieltä, ettei Holcofire-projektissa analysoidujen polttokokeiden tuloksiin voida luottaa, ja ontelolaatoille on riittävällä varmuudella osoitettavissa standaripalokäyrän mukaisessa palossa vain 25 minuutin palonkesto. Fellingner et al. (2004) tulivat polttokokeidensa perusteella siihen tulokseen, että leikkaus- ja ankkurointimurtumat voivat tapahtua ennen taivutuksesta aiheutuvaa murtumaa ja ontelolaatat tulisi mitoitaa niin, että leikkaus- tai ankkurointimurtuma tapahtuu ennen taivu-

tusmurtumaa. Hertzin et al. (2016) mielestä polttokokeet voivat koekappaleiden suhteellisen lyhyen jännevälin takia antaa leikkauskestävyydelle todellista palotilannetta parempia arvioita, sillä ontelolaattojen leikkauskestävyys riippuu myös taivutuksesta.

## 7. YHTEENVETO

Kirjallisuustutkimuksen päätavoitteena oli selvittää, mitkä ovat ontelolaatan vaurioitumis- mekanismit palon aikana ja mistä ne johtuvat. Tutkimuksessa selvisi toteutuneiden tuli- palojen perusteella, että ontelolaatan todennäköisin vaurio on vaakasuora murtuma on- teloiden läpi, joka voi johtaa alaosan irtoamiseen ja palon jatkuessa voimakkaana myös laatan yläosa voi sortua. Syy vaakasuoran murtuman syntymiseen on ontelolaatoissa yleisesti käytettävä pintavalu, joka estää laatan alaosan lämpöpitenemisen leveyssuun- nassa. Ontelolaattojen taivutuskestävyys palossa ei ole herättänyt keskustelua samalla tavalla kuin leikkaus- tai ankkurointikestävyys, ja todennäköisesti leikkaus- tai ankkuroin- timurtuma tapahtuu ennen taivutusmurtumaa. Toisaalta ontelolaattojen taivutuskestosta ei ole myöskään kovin paljon tutkimustietoa, sillä tutkimukset ovat keskittyneet leikkaus- ja ankkurointimurtumiin. Pitkillä jänneväleillä taivutusrasituksen ollessa suuri taivutus- kestävyuden merkitys kuitenkin korostuu.

Yksi merkittävä havainto oli se, miten terästen sijoittelu laatan poikkileikkauksessa vai- kuttaa palonkestoon. Standardin SFS-EN 1992-1-2 + AC (SFS 2011) taulukkomitoituk- sessa terästen keskiöetäisyyden kasvattaminen vaikuttaa vain positiivisesti palonkes- toon, kun taas Fellingner et al. (2004) osoittivat polttokokeillaan, että terästen suurempi keskiöetäisyys voi aiheuttaa teräksiä myöden kulkevia halkeamia.

Sekä Vantaan tavaratalon palossa että Rotterdamin parkkitalon palossa sammutusyksii- köt joutuivat perääntymään rakennuksesta ontelolaattojen vaurioitumisesta johtuneiden paukahdusten takia. Vaikka ontelolaatat eivät palossa sortuisikaan, niiden vaurioitumi- nen voi vaikeuttaa ja hidastaa palon sammuttamista merkittävästi, jolloin vauriot kasva- vat suuremmiksi. Jos paloa ei saada hallintaan nopeasti, se voi vaikeuttaa rakennuk- sessa mahdollisesti olevien henkilöiden evakuoitua ja pahimmassa tapauksessa levitä myös lähellä oleviin rakennuksiin.

Aiheen tutkijoiden ristiriitaiset väitteet ontelolaattojen palonkestosta osoittavat, että edel- leen jatkotutkimuksia tarvitaan. Myöskään vaakasuoran halkeaman estämiseen ei ole vielä standardeissa mitoitusmenetelmää, vaikka kyseinen vaurio on esiintynyt oikeissa palotilanteissa ja se on ollut yleinen myös polttokokeissa. Todennäköisesti tavanomai- sissa kohteissa, kuten asuinrakennuksissa ontelolaattojen palonkesto on luotettava, sillä tiedossa ei ole ontelolaatoista johtuvia sortumia. Suuret jännevälit ja kuormat kuitenkin vaikeuttavat mitoitusta. Toteutuneiden tulipalojen ja polttokokeiden perusteella voidaan todeta, että ontelolaattojen palomitoitus tarvitsee vielä kehitystä.

# LÄHTEET

Jansze, W., van Acker, A., Bella, B.D., Klein-Holte, R., Lindström, G., Py, J., Scalliet, M., Nitsch, A. & Benhöfer H. (2014). Structural behaviour of prestressed concrete hollow core floors exposed to fire. Boxpress, 's-Hertogenbosch, The Netherlands, 226 p.

Onnettomuustutkintakeskus (2011). Tavaratalon sortumiseen johtanut tulipalo Vantaalla 23.12.2010. Tutkintaselostus D8/2010Y. Helsinki. Saatavissa (viitattu 7.2.2020): [https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2010/d82010y\\_tutkintaselostus/d82010y\\_tutkintaselostus.pdf](https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2010/d82010y_tutkintaselostus/d82010y_tutkintaselostus.pdf)

BY 201 (2018). Betonitekniikan oppikirja 2018. Suomen Betoniyhdistys ry, Helsinki, 568 s.

Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, Vol. 61, No. 1, pp. 145-154.

SFS-EN 1992-1-2 + AC (2011). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 90 s.

Fletcher, I., Carvel, R., Torero, J., Usmani, A., & Welch, S. (2007). Behaviour of concrete structures in fire. Thermal Science, Vol. 11, No. 2, pp. 37-52.

Leiminen, A. (2015). Lämpökuormien ja betonin kutistumisen aiheuttamien rasitusten laskenta FEM-ohjelmilla ja niiden vaikutus betonisen allasrakenteen mitoitukseen. Diplomityö. TTY, Tampere.

Fellinger, J.H.H. (2004). Shear and Anchorage Behaviour of Fire Exposed Hollow Core Slabs. Proefschrift. Delft University Press, Delft, Holland.

Efectis Nederland BV (2007). Investigation of fire in Lloydstraat car park, Rotterdam. Report 2007-Efectis-R0894(E), Rijswijk. Saatavissa (viitattu 7.4.2020): <https://www.effectis.com/upload/documents/InvestigationfireLloydstraat.pdf>

Hertz, K., Giuliani, L. & Sørensen, L.S. (2016). Fire resistance of extruded hollow-core slabs. Danmarks Tekniske Universitet, Lungby, Denmark.

SFS-EN 1168 + A3 (2012). Betonivalmisosat. Ontelolaatat. Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 71 s.

SFS-7016 (2008). Esijännitetyiltä ontelolaatoilta eri käyttökohteissa vaadittavat ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot. Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 8 s.