

Betonirakenne tulipalossa

Mika Oikari

Dipl.ins., vanhempi asiantuntija
AFRY Finland Oy
mika.oikari@afry.com

Niin kauan kuin on rakennettu, on rakennuksia myös vaurioitunut tulipaloissa. Vaikka Suomessa tapahtuneiden rakennuspalojen määrä on ollut kokonaisuutena hienoisessa laskussa, hoitaa pelastustoimi edelleen lähes 5000 niihin liittyvää tehtävää vuosittain. Viime aikoina julkisuudessa on rakennuspaloihin liittyen herättänyt keskustelua palokatkosten toteutus tai toteuttamattomuus merkittävänä tekijänä palojen leviämisessä. Palokatkosten tai muiden rakenneyksityiskohtien toimintaan ei betonia käyttämällä voida vaikuttaa, mutta betoni itsessään on turvallinen materiaali tulipaloissa.

Nykyaikainen tulipalojen sammutus pyrkii osaltaan minimoimaan myös jälkivahinkoja. Sammutustyön aikana ensisijainen tavoite on kuitenkin saada riistäytynyt tuli hallintaan ja palon vaikutukset rajattua mahdollisimman suppealle alueelle. Tästä johtuen betonirakenteisiin kohdistuu tulipalon seurauksena muutakin rasituksia kuin vain poikkeuksellisen korkea lämpötila.

Betonirakenteen vauriot tulipalossa

Tyypillinen betonin vaurioittaja on sammutustyön aiheuttama lämpöshokki, kun kuuma betonipinta jäähtyy äkillisesti sammutusveden vaikutuksesta.

Lisäksi betonirakenteisiin voi syntyä sammutuksessa mekaanisia vaurioita rakenteiden yleensä melko väkivaltaisen ja vauhdikkaan purkamisen ja raivaamisen yhteydessä.

Samankaltaisia vaurioita voi lisäksi syntyä rakenteiden osittaisen sortumisen yhteydessä, kun rakenneosia kaatuu tai putoaa toistensa päälle. Tällainen rakenteiden osittainen sortuminen voi merkittävästi muuttaa betonirakenteisiin kohdistuvia kuormia, jolloin on vaarana, että paikallisesti syntyy ylikuormituksesta aiheutuvia vaurioita betoniin tai laajemmin betonirakenteisiin ja liitoksiin.

Rakennuspaloissa, ja yleensäkin betonin palovaurioita arvioitaessa, tulee aina tarkastella rakenteita kokonaisuutena. Vaurioitumisen laajuuden ja merkityksen arvioimisessa betonin materiaalitutkimukset ovat kuitenkin tärkeässä osassa.

Näkyvimpinä vaurioina betoniin syntyy tulipalossa erilaista halkeilua ja säröilyä, pinnan lohkeamia sekä värimuutoksia. Kokonaisia betonirakenteita tarkasteltaessa tyypillisimpiä vaurioita ovat lisäksi erilaiset muodonmuutokset sekä raudoitukseen liittyvät vauriot.

Värimuutokset betonirakenteissa

Värimuutosten luotettava havainnoiminen palaneista rakenteista edellyttää yleensä sitä, että palokohde on jo raivattu ja betonipinnat puhdistettu mekaanisesti noesta ja muusta liasta. Voimakkaan tulipalon jäljiltä rakenteen pinnat voivat olla myös täysin puhtaita noesta ilman puhdistustoimenpiteitäkin, jolloin betonipinta on hyvin nähtävissä ja vaurioituminen arvioitavissa aistinvaraisesti. Betonipintojen puhtaus palon jälkeen kertoo samalla yleensä siitä, että vallinnut lämpötila on ollut korkea ja mm. mahdollinen pinnoille kertynyt noki on palanut pois. Noettomuus ei kuitenkaan

AFRY - Corner

Betoni -lehden uusi
asiantuntijapalsta on
toteutettu yhteistyössä
AFRYn kanssa.

Betoniyhdistys By on 100-vuotias ja Betoni -lehti 95-vuotias. Molemmat ovat tehneet pitkän uran suomalaisen betoniosaamisen eteen ja jatkavat tärkeää tehtäväänsä edelleen huippukunnossa.

Millä hartioilla 7-vuotias AFRY saa palttilaa näin kovassa seurassa?

AFRYn juuret juontavat 130 vuoden päähän Ruotsin höyrypannyyhdistykseen, josta syntyi konsulttitalo ÅF. Suomessa juuret ovat vuonna 1958 perustetussa Jaakko Pöyry Oy:ssä. Näiden vahvojen vaikuttajien yhdistyttyä seitsemisen vuotta sitten syntyi AFRY (ÅF ilman ruotsalaisen oon pallukkaa ja loppuosa Pöyrystä).



1 Betoni kestää korkeita lämpötiloja.

AFRY vahvisti betoniteknologian osaamistaan ostamalla vuonna 1955 perustetun Vahasen (alun perin Insinööritoimisto Mikko Vahanan Oy) nelisen vuotta sitten. Vahasen betonitutkimuksilla ja omalla betonilaboratoriolalla on yli 30-vuotinen historia, johon mahtuu soveltavaa tutkimusta niin kentällä kuin laboratoriossa sekä yhteistyötä eri alojen suunnittelijoiden kanssa. Yhtä lailla on vaikutettu alan kehitysryhmissä ja koulutuksissa. Erityisasiantuntijuudellamme osallistumme uuden "cornerin" ylläpitoon.

Cornerin isäntänä häärin minä, *Sami Niemi*. Minulla ei ole niin suuria betonisia saappaita, kuten isänsä *Mikko Vahasen* jälkeen yrityksen vetovastuun ottaneella *Risto Vahasella*. Betoniteknikka vei kuitenkin sydämeni vuonna 1992, kun syksyllä syvennyin TKK:lla Betoniteknikkaan. Betonilta se oli kova suoritus, koska rakastuin vaimooni vain muutama kuukausi aiemmin. Valmistuttuani ajauduin ikisuosikkiaiheeseen: betonin kosteuteen, joista olen

kirjoittanut useita artikkeleita *Betoni*-lehteen ja luennoinut monilla tahoilla. Asioiden kehittäminen on intohimoni, ja tykkään erityisesti soveltaa asetuksia, ohjeita ja standardeja. Koko totuushan ei ole niissä, vaan kovassa osaamisessa ja ilmiöiden ymmärtämisessä.

AFRYllä on suuri joukko rakennusalan asiantuntijoita, joita kannustan jatkossa kirjoittamaan eri aiheista *Betoni*-lehteen. Tulen itsekkin tarttumaan ajankohtaisiin tai muuten mielenkiintoisiin aiheisiin. Yksi kiinnostavista käsiteltävistä aiheista on muun muassa kuntotutkimukset ja se, miten usein niissä pyritään säästämään ja loppujen lopuksi säästämisellä hanke tulee kalliiksi.

Tämän ensimmäisen AFRY-Cornerin ammatillisen katsauksen kirjoitti kuntotutkimusten konkarimme ja opiskelutoverini *Mika Oikari*. Koko Suomessa on ollut varsin kylmää edellisen *Betoni*-lehden ilmestymisen jälkeen – suoranaisia tulipalopakkasia. Niinpä *Mika* kertoo yhdestä erikoisosaami-

salueestaan: betonirakenteista tulipalossa – tarkemmin ottaen tulipalon jälkeen. *Mika* kirjoitti paloiheesta myös *Betoni* 3/2017 -lehdessä kollegoidensa kanssa otsikolla "Betonin palovaurioiden tutkiminen". Artikkelitarkasteli tuolloin aihetta tutkimisen näkökulmasta, mutta samalla käsiteltiin jonkin verran myös kosteusvahinkoja. Uudessa artikkelissa keskitytään betonirakenteen vaurioitumiseen materiaalin näkökulmasta.

Kuulumisiin jatkossakin tällä palstalla ja hyviä lukuelämyksiä asiantuntijoidemme artikkelien parissa.



Sami Niemi

Kehityspäällikkö

AFRY Finland Oy

Rakennusfysiikka ja erikoisasiantuntijapalvelut

sami.niemi@afry.com



Mika Oikari, AFRY Finland Oy

2



Mika Oikari, AFRY Finland Oy

3



Mika Oikari, AFRY Finland Oy

4

2 Esimerkki tyypillisestä näkymästä palokohteessa betonirakenteiden vaurioitumista selvitettäessä. Betonisen välipohjan alapinnassa näkyy erilaisia ja eri-ikäisiä vaurioita. Erityisesti korvausvastuukysymyksiä selvitettäessä on tärkeää erottaa tulipalon aiheuttama vaurioituminen tavanomaisesta ikääntymisestä sekä aiemman käytön aikana syntyneistä vaurioista.

3 Kuumuuden aiheuttamia pinnan lohkeamia betoniseinässä. Seinää vasten varastoituna ollut materiaalikasa (betonipinnassa näkyvän tumman vinon rajan alapuolella) on suojannut seinän alaosa kuumuudelta, mutta kasan yläpuolelle on syntynyt vaurioita. Lisäksi aivan kuvan yläosassa näkyy betonin raudituksen tukemisessa käytettyjen muovisia väliskeitä, jotka ovat kuumuuden vaikutuksesta sulaneet.

4 Tyypillinen sekundäärinen havainto palokohteessa tulipalon aikana vallinneista lämpötiloista. Alumiininen kaapelihylly on irronnut katosta ja pudonnut yläpohjan lämmöneristeiden päälle. Sulanut metalli on jähmettynyt uudelleen jäähdyttyään.

5 Palo jälkeä betonisen välipohjan alapinnassa. Kaikki liittyvät rakenteet on jo purettu pois, mutta palon vaikutuksia arvioitaessa myös niiden merkitys lämpötiloihin ja vaikutusaikeihin täytyy huomioida.



Mika Oikari, AFRY Finland Oy

aukottomasti ilmaise betonipinnan lämpötilaa, koska palokaasujen virtaukset vaikuttavat nokeentumiseen joskus hyvinkin paikallisesti ja lisäksi pinnoille voi kertyä uudelleen nokea ja likaa myös varsinaisen palorasituksen jo hellitettyä.

Betoniin kohdistuva kuumuus muuttaa vähitellen näkyvästi betonin väriä. Matalissa, alle 300 °C:n lämpötiloissa mitään muutosta ei ole havaittavissa, mutta lämpötilan edelleen noustessa betonin väri alkaa muuttua, ensin vaaleanpunaiseksi ja noin +600 °C:n jälkeen edelleen valkoisenharmaaksi. Todella korkeissa lämpötiloissa betonin väri tummuu uudelleen muuttuen ruskeankellertäväksi.

Värimuutoksiin, kuten yleisemminkin betonin palonkestävyyteen on vaikutusta käytetyn sementin koostumuksella. Tämän asian osalta olemme uuden äärellä, koska betonin valmistukseen on tullut ja tulee jatkossakin uusia, erilaisia side- ja seosaineita, joiden vaikutusta betonin käyttäytymiseen tulipalon kaltaisessa poikkeustilanteessa ei vielä kattavasti tunneta.

Halkeilu ja lohkeilu betonirakenteissa

Värimuutosten lisäksi toinen tulipalon seurauksena betonipinnoissa näkyvä vauriotapa on eriasteinen halkeilu ja lohkeilu. Ensimmäinen tulipalossa betonipintaan näkyvää säröilyä aiheuttava tekijä on kuivuminen. Pinnan lämpeneminen haihuttaa betonin huokosrakenteesta kaiken irtoavan veden, jolloin betoni luonnollisesti kutistuu, mikä näkyy pinnan voimakkaana säröilyinä.

Koska betonin lämmönjohtavuus on varsin huono, syntyy palotilanteessa aina suuria lämpötilaeroja rakenteen pintaosien ja syvemmällä

olevan betonin välille sekä betonirakenteen eri puolien välille. Tästä johtuen betoni vaurioituu palossa kerroksellisesti alkaen kuumimmasta pinnasta ja vaurioituminen etenee syvälle betoniin yleensä varsin hitaasti. Suoraan kuumuudelle altistuvassa betonin pintakerroksessa olevan vapaan veden höyrystyessä ja laajentuessa äkillisesti syntyy jopa räjähdysmäisesti pinnan lohkeamia. Tämä tapahtuu tyypillisesti varsin varhaisessa vaiheessa palon alussa. Myöhemminkin vastaavan kaltaisia lohkeamia voi edelleen syntyä lämpölaajenemiserojen seurauksena sekä rakenteen raudituksen kuumenemiseen liittyen. Lohkeamat voivat korkeammissa lämpötiloissa liittyä myös betonin kemiallisen rakenteen muutoksiin, erityisesti lämpötila-alueella noin +500 – +600 °C.

Lujuusominaisuuksien muutokset

Betonin lujuusominaisuudet heikkenevät korkean lämpötilan vaikutuksesta pysyvästi eli lämpötilan noususta johtuva lujuudenmenetys palon aikana ei juurikaan palaudu rakenteen jäähtyttyä.

Jo siinä vaiheessa, kun betonista on aistinvaraisesti havaittavissa vasta ensimmäisiä merkkejä värinmuutoksesta, on betonin lujuus jo selvästi alentunut. Jos betonin lämpötila kohoaa yli +500 °C:n, on lujuudesta jäljellä enää noin puolet. Lujuudenmenetystä arvioitaessa on tärkeää muistaa betonin huono lämmönjohtavuus eli esim. pintaosien värinmuutoksen perusteella ei voida arvioida syvemmällä rakenteessa olevan betonin lujuutta.

Palovaurioita arvioitaessa rakenteista valikoiduista kohdista irrotetut rakennekoekappaleet ovat ainoa luotettava tapa määrittää

betonin todellinen jäljellä oleva lujuus. Pintaosan lujuutta ja potentiaalisesti vaurioituneita rakenteita voidaan kartoittaa aistinvaraisesti mm. koputtelemalla sekä paikan päällä tehtävillä vertailevilla mittauksilla, kuten kimmo-vasaroinnilla. Betonin lujuusominaisuuksien muutoksen osalta on huomattava, että betonin kimmomoduuli ja taivutusvetolujuus heikkenevät lämpötilan noustessa huomattavasti aikaisemmin kuin puristuslujuus. Tämä yhdessä lämpötilan noustessa tapahtuvan raudituksen lujuuden alenemisen kanssa edesauttaa muodonmuutosten syntymistä rakenteisiin, esim. palkkien taipumista, vaikka betonissa ei merkittävää vaurioitumista vielä olisikaan nähtävissä.

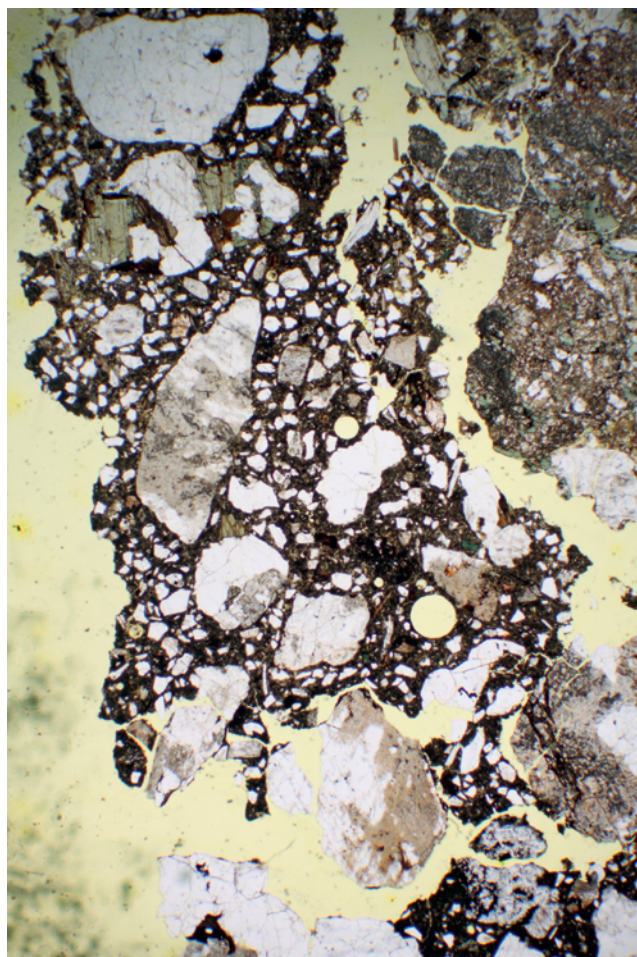
Betonirakenteiden palovaurioita arvioitaessa merkittävässä roolissa on aina raudituksen sekä erilaisten teräksisten kiinnitysosien vauriot. Betonin ja raudoitusterästen huomattavan erilaiset lämpölaajenemiskertoimet ovat tärkeä syy betonirakenteen vaurioitumiseen korkean lämpötilan vaikuttaessa rakenteisiin pidemmän aikaa. Raudituksen osalta keskeistä on huomioida erikseen, jos palolle on altistunut jännitetyjä betonirakenteita.

Tavanomaisen raudoitusteräksen lujuus palautuu melko hyvin rakenteen jäähtyessä, mutta jänneteräksessä korkean lämpötilan vaikutuksesta tapahtuvat lujuusmuutokset ovat luonteeltaan pysyviä. Tavanomaisissa teräsbetonirakenteissa raudituksen vaurioituminen ei yleensä ole rakenteen korjattavuuden kannalta määräävässä asemassa, jos rakenteeseen ei palon aikana ole syntynyt poikkeavia muodonmuutoksia. Jännitetyissä rakenteissa rauditus, nimenomaan jännepunokset, on sitä



Mika Oikari, AFRY Finland Oy

6



Sonja Nieminen-Kahra, AFRY Finland Oy

7

vastoin voinut vaurioitua merkittävästikin ilman, että betonissa tai rakenteessa kokonaisuutena on aistinvaraisesti havaittavissa vaurioita. Tästä syystä rakenteessa palotilanteessa vallinneiden todellisten lämpötilojen määrittäminen on korjattavuutta arvioitaessa välttämätöntä jännitettyjen rakenteiden osalta, ellei ulkoisten sekundääristen havaintojen perusteella voida luotettavasti varmistaa, että ko. rakenteiden ympärillä vallinnut lämpötila on tulipalon aikana ollut vaurioitumisen kannalta alhainen tai hyvin lyhytkestoinen.

Raudoituksen jäännöslujuuksia voidaan tarvittaessa selvittää jälkikäteen myös laboratoriotutkimusten avulla, mutta koska se edellyttää raudoituksen katkaisemista soveltuvan näytteen irrottamiseksi, tulee näytteenoton tarve erikseen arvioida ja huomioida sekä näytteenoton että tulevan korjauksen suunnittelussa. Maksimilämpötila, jossa raudoitussyvyydellä oleva betoni on käynyt tulipalon aikana, on selvitettävissä laboratoriotutkimuksin, jolloin jännepunosten vaurioitumista voidaan luotettavasti arvioida.

Sekundääriset havainnot rakenteista

Betonirakenteiden tulipalovaurioiden arvioinnissa palopaikalta tehdyillä sekundäärisillä havainnoilla on suuri merkitys. Muista rakenteista ja materiaaleista tehtävät havain-

not auttavat arvioimaan palossa vallinneita lämpötiloja ja niiden vaikutusaikoja.

Aiemmin mainitusta betonin huonosta lämmönjohtavuudesta johtuen korkeiden lämpötilojen vaikutusaika on keskeinen tekijä, kun arvioidaan, onko edes ollut mahdollista, että betonirakenne on palossa merkittävästi vaurioitunut.

Tyypillisiä sekundääristen rakenteiden havaintoja, joiden avulla lämpötiloja ja vaikutusaikoja voidaan arvioida, ovat puuosien hiiltyminen, muoviosien sulaminen ja palaminen, lasin pehmeneminen, alumiiniosien sulaminen, erilaisten lämmöneristeiden vaurioituminen sekä teräsosien muodonmuutokset.

Sekundääristen havaintojen arvioinnissa on oleellista huomioida niiden paikallisuus. Tulipalon aikana rakennuksen sisällä vallitsee yleensä hyvin erilaiset olosuhteet lämpötilojen osalta johtuen mm. palokaasujen virtauksista.

Kaikki palopaikan lämpötiloista kerätty tieto auttaa myös muiden rakenneosien potentiaalisen vaurioitumisen arvioinnissa. Tyypillinen esimerkki on elementtirakenteiden palkkien laakerointikumit, joilla on merkitystä betonirakenteen toimintaan kokonaisuutena ja joihin voi syntyä toimenpiteitä vaativia vaurioita jo alhaisemmissa lämpötiloissa kuin niiden varassa olevaan palkkiin.

Laboratoriotutkimukset apuna betonin vaurioitumisen arvioinnissa

Kuten aiemmin esitettiin, laboratoriotutkimuksin voidaan selvittää betonin sisäosien maksimilämpötila palon aikana.

Tärkein laboratoriomenetelmä betonin vaurioitumisen arvioimiseksi on ohuthieanalyysi, jonka avulla voidaan tutkia betonin sisäistä vaurioitumista mikroskoopin avulla. Ohuthietutkimuksessa rakenteesta timanttiporaamalla irrotetusta betoninäytteestä valmistetaan lasilevylle noin 0,025 mm:n paksuinen leike, jota voidaan tutkia valomikroskoopin avulla.

Tyypillisiä muita laboratoriotutkimusmenetelmiä, joita käytetään betonin palovaurioiden ja korjattavuuden arvioimisessa, ovat puristus- ja vetolujuuden määrittäminen sekä kloridianalyysi.

Kuten rakenteiden tutkimuksessa yleensäkin, palovaurioiden ja rakenteiden korjattavuuden arvioinnin kannalta materiaalinäytteiden oikea kohdistaminen sekä asiantunteva näytteenotto ovat keskeisessä roolissa siinä, että saadut tulokset kuvaavat tutkittavan rakenteen kuntoa luotettavasti.

Palovaurioiden korjaaminen on käsiteltävä omana aihekokonaisuutena, mutta pääosin korjaamisessa voidaan soveltaa, lääkäriterminologiaa käyttäen, oireenmukaista hoitoa. Koska vauriot aiheuttaneet ulkoiset



8

6 Materiaalinäytteiden ottoa betoniseinästä. Lieriönäytteet irroitetaan timanttiporaamalla ja toimitetaan laboratorioon tutkittavaksi.

7 Betonin pinnan mikrorakenne kuvattuna tasopolarisoidussa valossa, pinta on kuvassa vasemmalla. Pinta on voimakkaan epätasainen, betonia on irronnut. Kiviaines näkyy kuvassa vaaleina rakeina, sideainematriisi koostumuksesta ja tiiviydestä riippuen vaalean kellertävän ruskeana - tumman ruskeana. Halkeamat ja huokokset ovat keltaisia. Betonin pinnassa on epä säännöllistä ja voimakasta tulipalon aiheuttamaa halkeilua. Kuvan lyhyt sivu vastaa näytteessä 3,5 mm.

8 Rouhepinnoitettu betonisokkeli rakennuspalon jälkeen. Pinnoitteet vaurioituvat palossa helposti, mutta usein ne suojaavat vielä irrottuaankin hyvin alla olevaa betonipintaa. Erilaisia näkyviä kiteytymiä voi syntyä sammutusveden kuivumisen seurauksena, mutta ne voivat olla kertyneet betonin pintaan pinnoitteen alle myös jo paljon aikaisemmin.

tekijät ovat poistuneet, voidaan korjaustoimet ensisijaisesti suunnitella niin, että niillä palautetaan rakenteen alkuperäinen toimintakyky. Lisäksi voi olla tarvetta toteuttaa rakenteisiin tarttuneen noen ja hajujen vuoksi erilaisia kapselointeja ja tiivistyksiä sekä kastumisen seurauksena kuivaustoimenpiteitä.

Palovauriokorjauksissa on tärkeää muistaa, että korjauksella tulee palauttaa rakenteen varmuus myös seuraavaa vastaavaa poikkeustilannetta kuormitustilannetta ajatellen eli rakenteen tulee toimia esimerkiksi uudessa tulipalossa samalla varmuudella kuin sen on alunperinkin suunniteltu käyttäytyvän. •

Concrete structures in a fire

As a rule, concrete is a safe building material in a fire but it may sustain severe damage from both fire and extinguishing efforts. In addition to high temperatures, factors affecting concrete structures include rapid cooling by firewater, mechanical disassembly and demolition as well as a partial structural collapse.

Fire-induced damage of concrete typically occurs as cracking, scaling, discoloration, deformations, and reinforcement damage. The damage usually spreads deeper quite slowly into the structure from the surface due to the poor thermal conductivity of concrete.

The strength of concrete deteriorates permanently with increasing temperature and will not be restored when the structure cools down. The very first discoloration already indicates a clear loss of strength and at high temperatures, it is possible that the concrete only has a part of its strength left. Prestressed structures are especially challenging and may sustain severe damage without any visible indications on the concrete. For this reason, the assessment of fire damage calls for a comprehensive analysis, observations made at the scene of the fire, and often also laboratory tests.

Repairs must be designed to restore the safety and functionality of the structure also in any future abnormal conditions. •