

BETOONI ÄKKPRAGUNEMINE TULEKAHJU TINGIMUSTES

Harri Korrovits, PhD, TÜV Nord Baltik OÜ

Vastavalt Eestis kehtivatele projekteerimisnormidele EPN 2.1.2 "Raudbetoonkonstruktsioonid. Osa 1.2 Tulepüsivus" (ET-1 0113-0394) tuleb raudbetoonkonstruktsioonid projekti kohaselt rajada tulepüsivatena. Lisaks tuleb kasutada normi EPN 1 "Projekteerimisealused. Koormused" osasid 1.1 "Projekteerimise alused" (ET-1 0113-0166) ja 2.7 "Tulekahjukoormused" (ET-1 0113-0209), samuti normi EPN 3 "Teraskonstruktsioonid" osa 1.2 "Tulepüsivus" (ET-1 0113-0088) ning normide EPN 4 "Komposiitkonstruktsioonid" osasid 1.1 "Hoonete komposiitkonstruktsioonide projekteerimiseeskirjad" (ET-1 0113-0176) ja 1.2 "Tulepüsivus" (ET-1 0113-0215).

Konstruktsiooni vastupidavuse arvutamisel tulekahjuolukorras peab arvestama järgmisi tegureid:

- võimalikku purunemisviisi;
- materjalideomadustesõltuvusttemperatuurist ja niiskusest;
- konstruktsioonelementide jäikust;
- soojuspaisumisejms temperatuurideformatsioonide (kaudse tulekahjukoormuse) mõju.

Nimetatud Eesti normide tulepüsivusarvutustes on neid mõjutegureid arvestatud, kuid mitte kõiki. Näiteks betooni äkkpragunemise vältimiseks on projekteerimisnormi EPN 2.1.2 jaotu-

se 4.1 punktis 2 soovitatud, et seal kus nõutav, tuleb rakendada asjakohaseid meetmeid (milliseid, poletäpsustatud). Punktis 3 on öeldud, et täpsemate andmetepuudumisel võib äkkpragunemise ohtu (koos reserviga) hinnata joonise A.18 abil. Täpsemal kontrollimisel tuleb arvestada niiskusesisaldust, täitematerjali liiki, betooni tihedust ja kuumenemise kiirust. Punkti 4 kohaselt ei nõuta 1. keskkonnaklassitingimustele (elu- ja kontoriruumid) vastavate konstruktsioonelementide äkkpragunemise kontrolli (vrd EPN 2.1.1 tabel 4.1).

Betooni äkkpragunemine, millega kaasnevad raudbetoonist piirdekstruktsioonide sisepindade pinnavaringud ja sügavamal betoonis tekkivad plahvatusetaolised purustused, on nähtus, mida maa-alustes ruumides puhkenud tulekahjude puhul on korduvalt täheldatud. Selle nähtuse olemust ja vastavaid turvameetmeid on tõsisemalt uurimata hakatud alles viimasel kümnendil.

Kemikaalide ja kütuste põlemine temperatuuril üle 1000 °C võib häirida liiklusehitiste püsivust ning ohustada liiklejate ja kaitsemeeskondade turvalisust. Sellepärast tuleb näiteks tunneli konstrueerimisel tagada kogu ehitise või selle oluliste osade kandevõime ja edasifunktsioneerimise tulekahju tingimustes. Tunnelieksploatatsioonivõime

(nt veekoguluses pinnases paikneva tunneli piirete tihedus) ei tohi kannata ka pärast tulekahju ning selle konstruktsiooni ei tohi tekkida jäävaid deformatsioone, sest tunneli kuiteeosa väljalangemises suurendakstranspordikulusid.

Rahvusvahelised lepingud maa-alusteliiklusrajatistestandardset tulekahjunäitajate kohta (nt temperatuurijakõverad ehituslike tuletõkkemeetmetehindamiseks) senipuuduvad, nagu kaandmed vastavatel katsetel kasutatud proovikehadeniiskusesisalduse kohta, kuigi betooni veesisaldus on tunneli sisepinna äkkpurunemise puhul otsustav tähtsusega. Need probleemid tuleb lahendada edasiste uuringute tulemusel.

Käesolev ülevaade sisaldab uut infot äkkpragunemiste ja purunemiste põhjuste kohta ehitusosadest temperatuurikoormuste mõjul ning kirjeldab Viini Tehnikaülikooli kogemusi polüpropüleenkiudude (PP) lisamise kohta normaal- ja kõrgtugeva betooni äkkpragunemise vältimiseks.

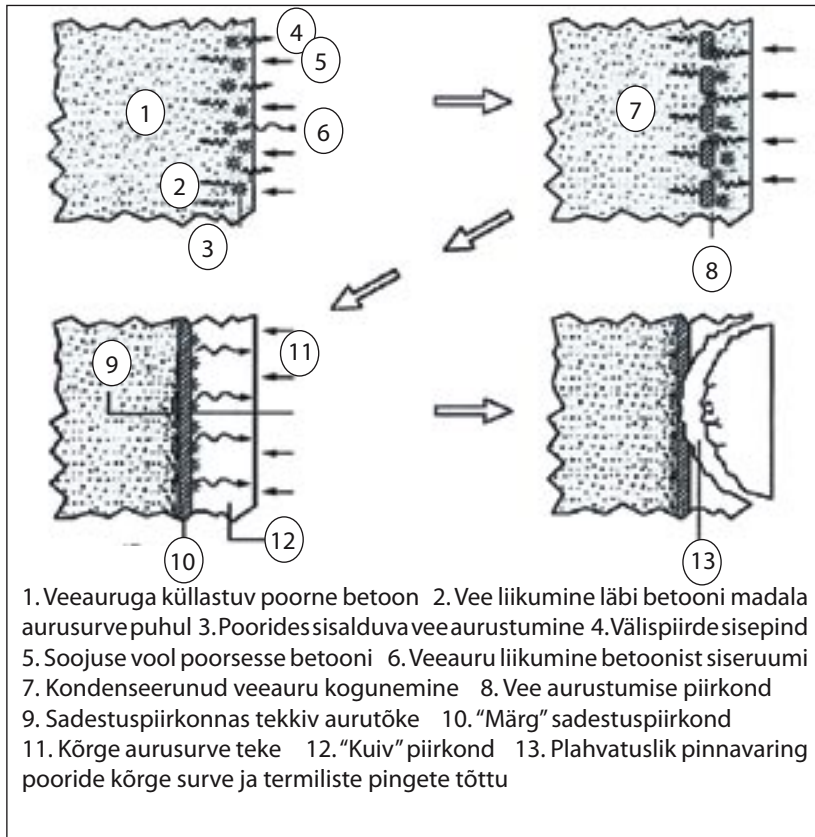
Tulekahju ajal betoonis toimuvad termilised protsessid

Tulemõju toimuvade ehitusosade betooni sees termilised protsessid (vt tabel 1), mis võivad niiskes (st kaaluliselt üle 2%), homogeenes või tihedas betoonis viia äkkpragunemiseni tulegakokkupuutuva betooni pinnal ja sees, mis omakorda võib kaasa tuua plahvatuslikke varinguid. Normaalebtoon ei pruugi pinnavaringuid tekkida, kui betooni niiskus on alla 2%. Sellest piirangust aga ei peeta (näiteks tunneliteehitusel) enamasti kinni. Nii võibki intensiivsete jakauakestvate põlengute korraleeldada pinnavaringute tekkimist.

Järgnevalt tutvustame äkkpragude tekke ja plahvatusetaoliste varingute peapõhjust.

Tabel 1. Kvartsiliste ja kaltsiidsete täitematerjalidega (lisanditega) betooni tulekahju ajal aset leidvad termilised protsessid

Temperatuurivahemik, °C	Termilised protsessid
30...120	Vaba ja füüsiliselt seotud vee eraldumine
100...300	Geeli lagunemine, dehüdratsiooni algus
250...600	Keemiliselt seotud vee eraldumine
450...550	Kaltsiumhüdroksiidi lagunemine $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
573	Kvartsi struktuuri muutumine (α -st β -ks)
600...700	C_2S kujunemine
600...900	Kaltsiumkarbonaadi lagunemine $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
1200...1300	Tsementkivi sulamise algus
1400	Tsementkivi sulandub



Joonis 1. Pinnavaringute tekkeskeem

Termilised pinged ja struktuurimuutused

Betoonikehadesoojenemisel tekitavad termilised deformatsioonid soojenenud pealispinna piirkonnas survepingeid, mis betooni survetugevuse ületamisel võivad viia pragude tekkimiseni pealispinnal.

Betooni soojenemisel võivad esineda ka kohalikud deformatsioonide mittesobivused täitematerjalide ja tsementkivivahel, mille tõttu üleminekutsoonides võib kuivamisel ja dehüdratsiooni ajal tekkida täiendav pinge. Kui täitematerjalide paisumistemperatuurimõjul toimub vastavalt valemile $\alpha_t = 5 \times 10^{-6} \div 12 \times 10^{-6} / K$, siis tsementkivil on seesõltuvalt niiskusesisaldusest $\alpha_t = 8 \times 10^{-6} \div 23 \times 10^{-6} / K$.

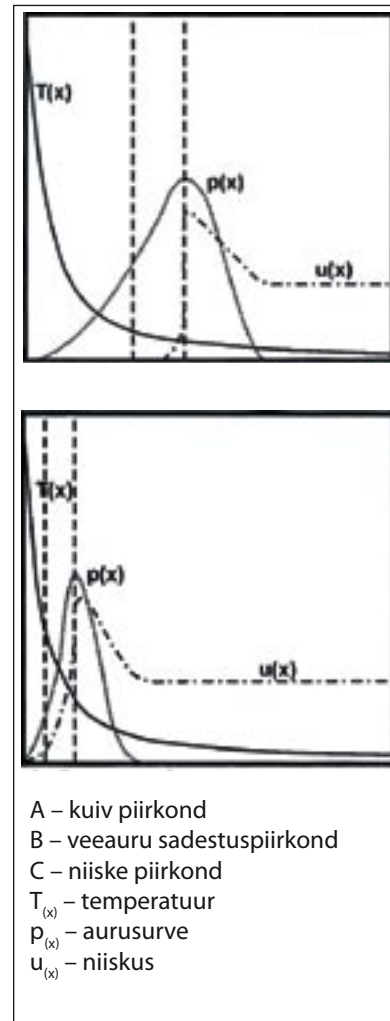
Kõrgematel temperatuuridel soodustavad veevabanemise reaktsioonid ja mineraalide (nt kvartsi) struktuurimuutused erinevates lisandites ja täitematerjalides omakorda pinnavaringute teket. Karbonaatlisandites on muidugi kõige tähtsam lubjakivi (kaltsiumkarbonaadi) lagunemine. Temperatuurivahemikus 1200...1300 °C hakkavad mõned betooni komponendid juba sulama, kusjuures betooni lisanditest (nt basaldist)

erituvad sinna kivi tekkimise ajal talletunud gaasid.

Termodünaamilised protsessid

Veeauru surve tekkimine Joonisel 1 on kujutatud tule mõjul tekkinud plahvatuslikke betoonikahjustusi.

Betooni pinna intensiivsel kuumenemisel ruumivälispiirde desorbeerub esmalt sisepinnalähedal füüsiliselt seotud vesi ja teatud määralt tsementkivi geeli poorides seotud vesi (lisanditest ka kristallvesi). Osa aurustunud veest eraldub betoonist sisepinnale pooride kaudu, osa tungib betooni kehasse. Viimane osasatub jahedamasse tsooni, kus kondensatsioonitagajärjel tekib taas vesi. Selles piirkonnas täituvad poorid veega, luues ruumilise barjääri välispiirde ristlõike läbimiseks. Edaspidi tekkiv veeaur võib piirdest väljuda üksnes kuuma tsooni, st välispiirde sisepinna suunas. Kuni veeauru tekitatud surve sadestunud piirkonnas on väiksem kui betoonitõmbetugevus, toimub veeauru laminaarne vool betoonis rahulikult. Kui veeauru surve ületab betooni tõmbetugevuse, võib toimuda betooni

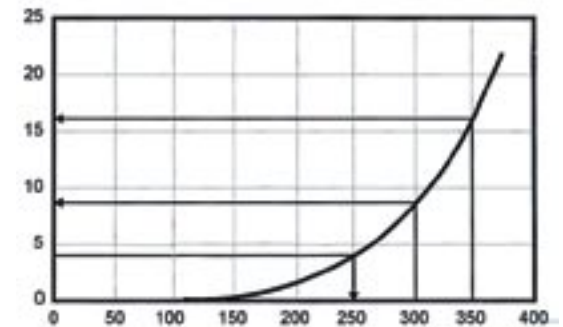


Joonis 3. Normaalebetooni ja kõrgtugevabetooni niiskumise erinevustulekahju tingimustes

plahvatuslik pinnavaring ja purunemine äkkpragunemise tagajärjel.

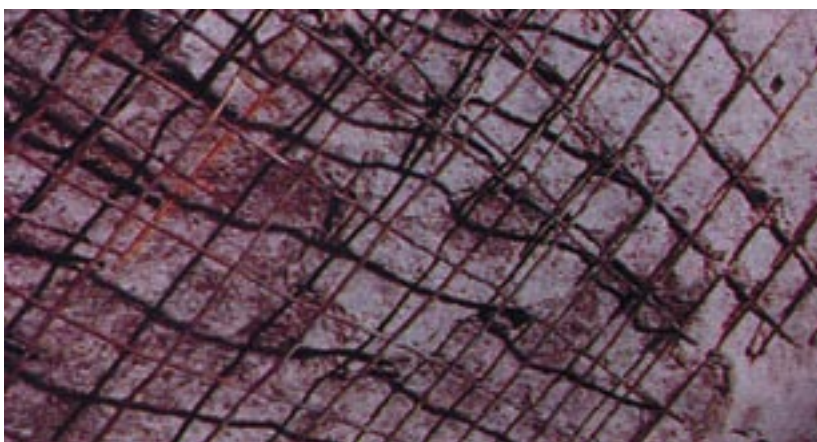
Nagu jooniselt 2 selgub, võrdsustub veeauru surve betooni kuumutamisel temperatuurini 250 °C suhteliselt kiiresti normaalbetooni tõmbetugevusega. Temperatuuril 300 °C võivad betoonis tekkida tõmbepinged 8 N/mm², mis 350 °C juures võivad juba kahekordistuda.

Joonis 2. Aurususve kõver





Joonis 4. Tulekatsel äkkvaringu tagajärjel tekkinud purustused



Joonis 5. Armatuuri eraldumine betoonist äkkpragunemise tagajärjel.

Kõrgtugeva betooni puhul asub sadestuspiirkond tihedam skeletitõttu lähemal välispiirde kuumenenud sise-pinnale, mis toob kaasa veeauru surve kiirema tõusu (joonisel 3 kõverate $T_{(x)}$ ja B löikumispunkt). See tähendab, et kõrgtugeva betooni puhul on plahvatuslik pinnavaringu jagunemise oht eriti suur (jn 4, 5).

Maa-aluste välispiirete sisepinna varingute ohu vähendamiseks tuleb betooniveesisaldust vähendada jassaa-vutada kõrgtugeva betooni niisugune struktuur, mille puhul veeaur saab eraldada enne kriitilisesurvetekkimist. Selleks tuleb luua võimalust täiendavate pooride tekkeks temperatuuri mõjul põlengualguses. Kuidas seda teostada, sellest allpool.

Uuringut tulemusena on selgunud, et äkkvaringute teke ehitusosades sõltub mitmetest teguritest, nagu kuumenemise kiirus, betooni temperatuur, niiskus, tugevus, pooride maht ja keskmine suurus, survepinge ehitusosas, inertsete täitematerjalide ja misandite mineraloogiline ja petrograafiline koosseis, ehitusosageomeetria ja armeerimine. Tegurite

suure arvu tõttu on kindlat mudelit pinnavarikutekke tõenäosuse ja ulatuse kohta raske koostada. Nii tulekski betoonrajatiste ehitusel ja kaitsmisel lähtuda olemasolevatest empiirilistest kogemustest.

Betooni passiivse kaitse tagamine

Plahvatuslike pinnavaringute ärahoidmiseks tuleks moodustada pooridesüsteem, mis hoiaks ära kriitilise auru surve tekke. Selleks võib betoonisegusselisada polüpropüleenist tehiskiude. PP-kiud sulavad umbes 160 °C juures, moodustades läbivaid mikropoore, mille kaudu saab veeaur betoonist väljuda.

Teraskiudesisaldav betooni kuumenemise tuleks kiiremini ja seega ka puruneda varem. Teisest küljest takistavad teraskiud lahtimurdunud betooni kamakate eraldumist, mis omakorda kaitseb veel mitte purunenud betooni otsese leegi eest, aeglustades temperatuuri tõusu materjali sees. Pikema ajalise tulekahju puhul see efekt muidugi kaob.

Katsed näitavad, et PP-kiudude lisamine armeerimata normaalbetooni allakolmeprotsendise niiskussastmepuhul pole tingimata vajalik. Kõrgtugeva betooni puhul on PP-kiudude lisamine otstarbekam, sest siis pinnavaringute tõenäosus väheneb ning termiliselt kahjustatud piirkonna pindala on enam piiratud. Sellel asjaolul on suur tähtsus hilisema saneerimise seisukohalt.

Betoonipinna veega kastmine põlengu järel on lubatud, sest see ei tekita täiendavat pinnakoordumisteinormaal-ega kõrgtugeva betooni puhul.

Kaitsemeetmed betooni äkkpragunemise vältimiseks

Tulekindlateraudbetoonistehitusosade rajamisel kasutatakse erilisi kaitse süsteeme, mis oma isoleerimisvõime tõttu vähendavad betooni liigset kuumenemist, sh

- vooderduskihid;
- betooni pinnale kantavad perliit-, vermikuliit- või mineraalkiududega pitskrohvid;
- tulekindlad plaadid;
- perforeeritud terasplekid tulekahju ajal paisuvates soojapidavate katetega.

Tehismaterjalist (nt PP) kiudude lisamine normaalbetoonile äkkpragude tekke vältimiseks on vajalik ainult suuremate konstruktsioonikoormuste korral ja juhul, kui veesisaldus betoonis on üle 2,6%. Kõrgtugevale betoonile on PP-kiudude lisamine soovitatav mahuvahemikus 0,1...0,6% sõltuvalt põlemiskõverast (temperatuuri tõusu intensiivsusest), betooni tugevusest ja veesisaldusest. Mida suuremad on need näitajad, seda rohkem tuleks kiude lisada. Äkkpragude tekke ärahoidmiseks peab armatuuri betoonist kaitsekihi paksus olema vähemalt 7 cm, kui betooni sisepind pole kaitstud liigse kuumenemise eest.

Kirjandus

- Ulrich Schneider, Johannes Horvath. Abplatzverhalten an Tunnelinnenschalenbeton. Beitrag zur Reduzierung von Abplatzungen. Beton- und Stahlbetonbau 2002, Heft 4
- Günther Brux. Beton miterhöher Brandbeständigkeit. Forschungsergebnisse aus Schweiz. Beton- und Stahlbetonbau 2001, Heft 2
- Harri Korrovits. Silikaat-tuletõkkeplaat PRO-MATECT. Ehitaja 1-3/2001