

Siim Õunloo

**BETOONIS KASUTATAVATE
HÜDROFOBISEERIVATE
LISAAINETE TOIME**

LÕPUTÖÖ

Ehitusteaduskond

Hoonete ehituse eriala

Tallinn 2015

Mina,

Siim Õunloo, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Lõputöö autor Siim Õunloo

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

Üliõpilase kood 100820555

Õpperühm EI-82

Lõputöö vastab sellele püstitatud kehtivatele nõuetele ja tingimustele.

Juhendajad Aivars Alt

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

Konsultandid Vallo Vardja

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

Kaitsmisele lubatud „.....“ mai 2015 a.

Ehitusteaduskonna dekaan Martti Kiisa

Teaduskonna nimetus

Nimi ja allkiri

Ehitusteaduskond

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja: **Siim Õunloo**
Üliõpilase kood: 100820555
Õpperühm: EI-82
Eriala: Hoonete ehitus (kood: 1827)
Lõputöö teema: **Betoonis kasutatavate hüdrofobiseerivate lisainete toime**

Lähteandmed töö koostamiseks:
Puuduvad

Töö koosseis, lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Töötada välja katsemetoodika betooni pragude „ise paranemise“ toime hindamiseks;
Hinnata lisandite mõju betooni omadustele: töödeldavus, õhusisaldus, survetugevus;
Hinnata lisandite toimet, mille tuvastamiseks uuritakse pragusid täiendavalt elektroonilise mikroskoobiga;
Selgitada betooni „ise paranemise“ toimet;
Hinnata lisandite toimet 7 ja 28-päevaselt tekitatud pragudes;
Hinnata betooni veepidavuse suurenemist lisandite kasutamisel.

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:

Seletuskirja maht kuni 60 lk. Uurimustöö seletuskirjas esitada teemaga seonduv teooria, katseplaani koostamine ja katsete tulemused.

Graafiline osa puudub.

Lõputöö konsultandid:

Konsultandi nimi	Valdkond	Allkiri	Kuupäev
Vallo Vardja	Katseplaani koostamine		

Lõputöö juhendaja:	Aivars Alt (nimi)	(allkiri)	(kuupäev)
Lõpetaja:	Siim Õunloo (nimi)	(allkiri)	(kuupäev)
Kinnitaja:	Martti Kiisa Ehitusteaduskonna dekaan	(allkiri)	(kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 16. juuni 2014 a.
Lõputöö esitamise tähtaeg: 11. mai 2015 a.

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1. UURIMISTÖÖGA SEONDUV TEOORIA	7
1.1. Praod betoonis	7
1.2. Betooni autogeenne tihenemine	8
1.3. Betooni veeläbilaskvuse sõltuvus vesitsementtegurist.....	9
1.4. Veepidavust tõstvate lisandite mõju betoonis	10
2. KATSEPLAAN.....	11
2.1. Katsesegude projekteerimine	11
2.2. Katsetoodikad lisandite veepidavuse ja „ise paranemise” kontrollimiseks.....	12
2.2.1. Standardiseeritud katsed.....	12
2.2.2. Standardiseerimata meetodiga läbiviidud katsed	13
2.2.2.1. Katsekehade projekteerimine.....	13
2.2.2.2. Pragude projekteerimine	16
2.2.2.3. Katsekehade kogus ja katsetamine.....	20
2.2.2.4. Katsekehades vee säilitamine ja toimunud muutuste protokollimine.....	21
2.3. Lisandite mõju betooni omadustele.....	23
2.4. Pragude hindamise meetodikad	23
2.4.1. Lisandite keemilise koostise katse	24
2.4.2. Pragude täitematerjali uurimine valgusmikroskoobiga.....	24
2.4.3. Pragude täitematerjali uurimine elektronmikroskoobiga	25
2.4.4. Intervallvõte pragude sulgumisest.....	26
3. KATSETE TULEMUSED.....	29
3.1. Betoonisegude omadused	29
3.2. Lisandite mõju betooni omadustele.....	31
3.2.1. Töödeldavus	31

3.2.2.	Õhusisaldus	31
3.2.3.	Survetugevus	32
3.3.	Lisandite toime	33
3.3.1.	Veepidavus	33
3.3.2.	7 päeva vanuselt tekitatud pragude sildamine	38
3.3.3.	7-päevaselt tekitatud lisaainetega katsekehade pragude võrdlus	43
3.3.4.	28 päeva vanuselt tekitatud pragude sildamine	43
3.4.	Järeldused	45
3.5.	Soovitused	46
KOKKUVÕTE		47
SUMMARY		49
VIIDATUD ALLIKAD		51
LISAD		53
Lisa 1. 7-päevaselt tekitatud pragude sildamise protokoll		54
Lisa 2. 28-päevaselt tekitatud pragude sildamise protokoll		55

SISSEJUHATUS

AS Rudus kvaliteedijuhile tehti ettepanek katsetada betooni veekindlust tõstvat (hüdrofobiseerivat) lisandit kohalike täitematerjalide ja Kunda portland-komposiitsemendiga toodetud betoonidel ning võrrelda tulemusi etalonbetooniga. Portland-komposiitsegment on teatavasti ebastabiilsem kui portlandtsegment oma suure põlevkivituha sisalduse poolest. Katsesse valiti teadlikult portland-komposiitsegment, mis on kaubabetooni tootjate poolt enam kasutatav, moodustades kogu Eestis kasutatavast tsemendist 40 protsenti. Betooni hüdroisoleerivaid lisaaineid on Eesti kaubabetoonides enim kasutusel kolme erinevat. Lisandite üheks omaduseks on tõsta betooni veepidavust ja teiseks kinni kasvatada betoonis tekkivad kappilaarid ning kuni 0,4 mm laiused praod. Tulemuste usaldusväärsuse huvides otsustas Rudus kaasata ka teised lisandite esindajad kirjeldatud katsesse. Koostöös lisandite esindajatega valmis katseplaan, mille eesmärgiks oli välja selgitada betooni hüdrofobiseerivate lisandite toimeefekt. Katseplaanis koostööl lastati katsetes kasutatava betooni retsept, katsemetoodika ning katsekehade kogus katsete läbiviimiseks. Kasutatavas betoonis määrati sisalduvad täitematerjalid, tsemendi hulk, vesi-tsementtegur ja plastifikaatori kogus.

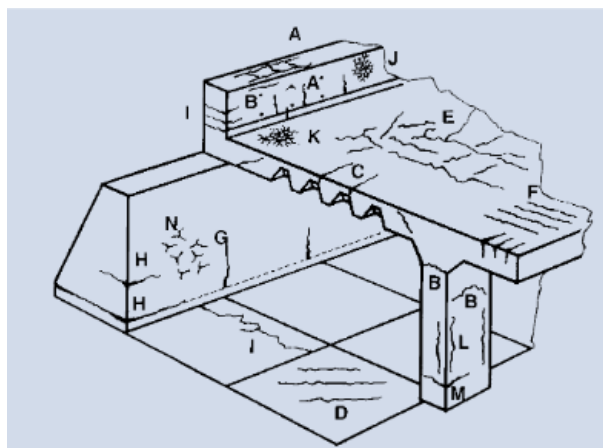
1. UURIMISTÖÖGA SEONDUV TEOORIA

1.1. Praod betoonis

Praad betoonis on tavaline nähtus ja kõige sagedasem kahjustusvorm, mis muudab betooni kergesti kahjustatavaks [1]. Betoonis esineb pragusid, mille tekitajateks võib olla mitmeid tegureid.

Konstruksioonides esinevate pragude (Joonis 1) tekkepõhjused [1]:

- tugevast vee-eraldusest põhjustatud plastiline vajumine (a, b, c);
- plastiline kahanemine, mis tuleneb betooni kiirest varajasest kuivamisest vee välja aurumise toimetel, kus armatuur on pinnale liiga lähedal (d, e, f);
- liiga suur soojaeraldus, põhjustades varast termilist kokkutõmbumist või kahanemist (g, h);
- mitteefektiivsetest vuukidest tingitud pikaaegne kuivamiskahanemine (i);
- võrkjas juuspragunemine, mille peamiseks tekitajaks on liigne betoonipinna hõõrutamine (j, k);
- armatuuri korrosioonist, mille tekkimist soodustab armatuuri kaitsekihi puudulikkus ja kaltsiumkloriidi kasutamine (l, m);
- lahtirakestamine, kus tõmbepinged ületavad värske betooni tõmbetugevuse;
- vahelduvad külmumise-sulamise tsüklid, kus poorides külmunud vesi lõhub betooni struktuuri;
- betooni ülemäärane koormamine.



Joonis 1. Konstruktsioonides esinevad praotüübid [1]

1.2. Betooni autogeenne tihenemine

Autogeenne tihenemine on pragude seisukohast naturaalne protsess, mis seisneb niiskuse olemasolus ja pingete puudumisel. Niiskus on vajalik protsessi tekkimiseks, kuid vesi hoolitseb lubisette lahustumise eest. Niiskuse aurustumisel toimub autogeenne tihenemine. [2, p. 114]

Tihenemine toimub esialgses hüdratatsiooniprotsessis reageerimata jäänud tsemendis leiduva kaltsiumhüdroksiidi karboniseerumisel süsinikdioksiidiga moodustades kaltsiumkarbonaadi (1) [3]. Süsinikdioksiidi leidub õhus ja vees.



Kaltsiumkarbonaat astub reaktsiooni veega, mis on küllastunud süsinikdioksiidiga. Moodustub kaltsiumvesinikkarbonaat (2) [3].

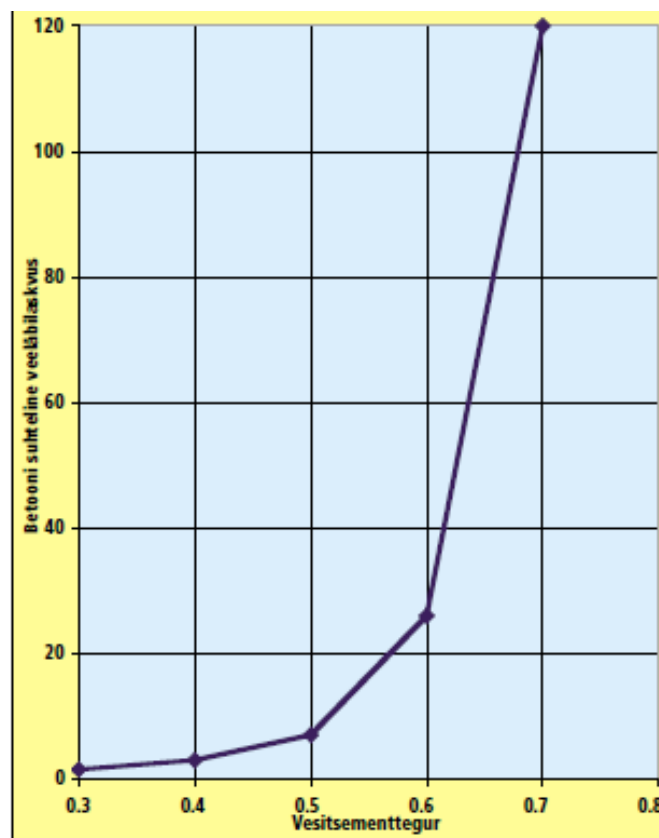


Sadestumine toimub kaltsiumkarbonaadi ja kaltsiumhüdroksiidi kristallisatsioonil, mis kogunevad ja kasvavad betooni pragudes. Selline keemiline liimimine põhjustab struktuuri tihenemist ning taastab mõningase tugevuse pragunenud betoonis. Reaktsioon pragudes on võimalik veega küllastunud olekus. Pidev küllastumine kiirendab tihendamise protsessi. Isegi üksik niisutamise-kuivatamise tsüklil võib põhjustada prao sulgumist. [2, p. 115]

1.3. Betooni veeläbilaskvuse sõltuvus vesitsementtegurist

Betooni kivinemine on füüsikalise-keemilise protsessi tsemendi ja vee vahel, kus betooni omadused sõltuvad vee ja tsemendi hulga suhtest. Mida väiksem on vee ja tsemendi suhe, seda tugevam on betoon. Keemilises reaktsioonis mitte osalev vesi moodustab lisapoore, mis põhjustab betooni tugevuse ja püsivusnäitajate languse, kaasa arvatud veepidavuse alanemise. Mida suurem on vesitsementtegur (v/ts) tegur, seda suuremad on betooni poorsus, betooni läbilaskvus (Joonis 2) ja keskkonnatingimuste mõju betooni omadustele. [4]

Joonis 2. Järeltub lineaarne veeläbilaskvuse suurenemine betoonidel, mille v/ts on suurem kui 0,6. Vesitsementtegur ei tohtinud katsesegudel lisandite esindajate sõnul olla suurem kui 0,55. Antud näitaja juures on betooni veeläbilaskvus madal, mis loob eeldused veetihedale betoonile. Veepidavust andvate lisaainete kasutamisel on oluline pöörata tähelepanu betooni enda veetihedusele, mis saavutatakse 0,6-st madalama v/ts teguriga.



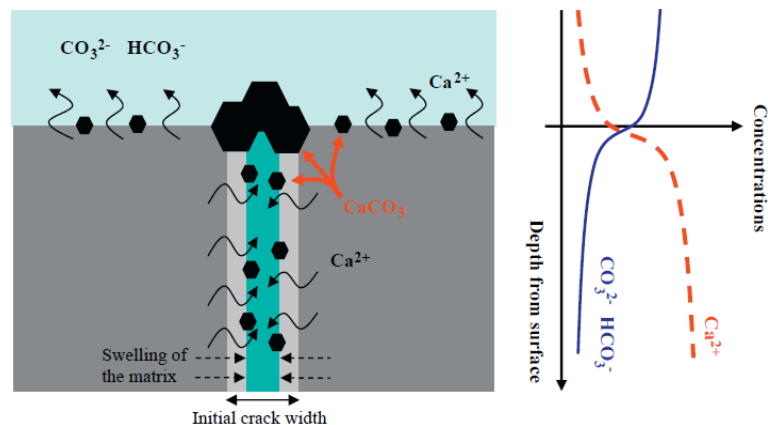
Joonis 2. Betooni veeläbilaskvuse sõltuvus vesitsementtegurist [4]

1.4. Veepidavust tõstvate lisandite mõju betoonis

Kuni 0,4 mm laiuste pragude sulgemiseks ning betoonile veepidavuse ja püsivuse andmiseks on välja arendatud keemilised lisaineid, mis lisatakse otse betoonisegusse. Lisandi kasutamise eesmärgiks on anda betoonile suurem veetihedus. Lisand hakkab tööle ehk reageerib veega, kui kivistunud betoonist hakkab vesi läbi tekkinud pragude või betoonis olevate pooride kaudu läbi tungima.

Kristalsed lisandid on sünteetilised tsemendipõhised materjalid, mis koosnevad reageerivatest ränidioksiididest ja teistest kristalsetest katalüsaatoritest. Reageerivad komponendid reageerivad kaltsiumhüdroksiidiga, moodustades kristalseidprodukte, mis sulgevad poore ja täidavad betooni pragusid. Kristalsed ained saavad tekkida ainult küllaldase niiskuse olemasolul. Pragude täitumisel toimub kaltsiumkarbonaadi sadestumine pragude suudmesse (Joonis 3), mis on optimaalne kaltsiumi ja karbonaadi ionide koos eksisteerimiseks. Kristalsete lisainete lisamisega vabastatakse rohkem kaltsiumi ioone, kui ilma lisandita betoonis. Lisaks soodustab lisandite kõrge pH tase kaltsiumkarbonaadi sadestumist. [5]

Lisained on mõeldud kasutamiseks betoonkonstruktsioonides, mis on vahetus või otseses kokkupuutes veega. Antud konstruktsioonideks võivad olla vundamendid, keldrid, tunnelid, metrood, parklate ehitised, reservuaarid või basseinid.



Joonis 3. Skemaatiline illustratsioon kaltsiumkarbonaadi sadestumisest [5]

2. KATSEPLAAN

2.1. Katsesegude projekteerimine

Katseplaani koostamisel projekteeriti katsesegud Rudus AS-i Lagedi tehases kasutusel oleva betooni retsepti järgi. Võrdluseks valmistati ilma lisandita ehk etaloni ja lisanditega katsekehad.

Katses kasutati kolme betoonisegusse lisatavat lisandit:

1. Penetron Admix,
2. Xypex Admix C1000 NF,
3. Betocrete C-17.

Etaloni ja iga lisandiga valmistati kolm betoonisegu. Vee sissetungimise katsekehad valmistati esimese segumiga, kus betoonisegu koguseks oli 65 liitrit. Survetugevuse katsekehad teise segumiga, mille koguseks oli 40 liitrit. Kahes koguses katsekehade valmistamine oli tingitud labori betoonisegisti mahust, mille segamismaht on maksimaalselt 75 liitrit. Kolmanda segumiga valmistati katsekehad pragude katseks. Segumi koguseks oli 150 liitrit, mis teostati suurema 250 liitrise betoonisegistiga.

Segude valmistamisel kasutati Eesti kohalikke toormaterjale:

- portland-komposiitsemment CEM II B/M 42,5 R – Kunda Nordic Tsement AS;
- Kuusalu liiv, fraktsiooniga 0/2 – Mineraal OÜ;
- Männiku liiv, fraktsiooniga 0/4 – Kiiu Soon OÜ;
- paekivi, fraktsiooniga 4/16 – Vão Paas OÜ.

Pulbrilised lisaaained nagu Penetron ja Xypex lisati segusse koos tsemendiga selle hulka segatuna. Betocrete-i puhul on tegemist vedelal kujul oleva lisaainega, mida doseeriti segusse pärast plastifikaatori lisamist. Madala vesitsementteguri saavutamiseks kasutati Mapei superplastifikaatorit Dynamon Xtend.

Betoonisegude koostis on toodud Tabel 1.

Tabel 1

Betoonisegude koostis

Materjal	Kogus, kg/m ³			
	Etalon	Penetron	Xypex	Betocrete C-17
CEM II/B-M 42,5R	325			
Liiv 0-2	290			
Liiv 0-4	736			
Paekivi 4-16	910			
Plastifikaator (% tsemendi massist)	0,8			
Lisand (% tsemendi massist/kg/m ³)	-	1/ -	-/ 2,8	-/ 7

Survetugevuse ja pragude katses kasutatavaid katsekehi hoiti pärast vormidest vabastamist Ruduse laboris kuni katsetamiseni niiskusega küllastunud kambris temperatuuril $+ (20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Katse kestel hoiti pragudega katsekehi Tallinna Tehnikakõrgkooli ehitusmaterjalide laboris temperatuuri $+ 18^\circ\text{C}$. Vee sissetungimise katsekehi talletati kuni katsetamiseni vees temperatuuri $+ (20 \pm 1)^\circ\text{C}$.

2.2. Katsetoodikad lisandite veepidavuse ja „iseparanemise” kontrollimiseks

2.2.1. Standardiseeritud katsed

Katsed viidi läbi paralleelselt etalonbetoonist ja lisandiga valmistatud katsekehadel. Kontrollimaks lisandite omadust suurendada betooni veepidavust viidi läbi standardiseeritud katsed [6]:

- Vee sissetungimise sügavuse määramine: EVS-EN 12390-8:2002. „Kivistunud betooni katsetamine. Osa 8: Surve all oleva vee sissetungimissügavus.”

Veepidavuse määramisel rakendati 72 ± 2 tunni vältel veesurve 500 ± 50 kPa kuubi 150×150 mm külgpinnale. Katse ajal jälgiti perioodiliselt, kas vesi pole imunud betoonkuupide vabadele pindadele. Pärast ettenähtud aja möödumist lõhestati betoonkuubid vee sissetungimissügavuse määramiseks risti veesurve rakendamise põhjapinnale ning mõõdeti veepiiri maksimaalne kaugus põhjapinnast.

- Veepidavuse määramine: Kontrollitakse veepidavust GOST 12730.5-84 järgi kuni veerõhu 2,0 MPa astmeni, mis vastab klassi W20 nõuetele. Betooni veepidavus määramisel tõsteti veerõhku astmeliselt, kusjuures iga veerõhu astme 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 ja 2,0 MPa juures hoiti silindreid 16 tundi.

Betooni veepidavuse rahuldavaks tulemuseks loeti seda rõhku, mille juures 4 silindril ei esinenud märga laiku pealispinnal. Katsekehadel, mille puhul läbijooksu ei ilmnunud lõhestati ja mõõdeti vee sissetungimissügavus. Vajadus GOST-i katseks nõudis asjaolu, kus varasemalt EVS-EN-i järgi läbiviidud katsed ei ole andud märkimisväärset erinevust etaloni ja lisandiga katsekehadel. GOST-i katses on veerõhk kuubi pinnale neli korda suurem, mille kasutamine annaks lisandite veepidavusest usaldusväärsemad tulemused.

EVS-EN-i järgne standard on katsestandardid, mis ei sisalda kriteeriume veepidavuse nõuetele. Ainsa dokumendi Eestis, kus kriteeriumid on kirja pandud, leiab Betooniühingu juhendist nr. 1. Juhenddokument näeb ehitistes paigaldatavate betoonide veepidavuse nõudes ette standardi EVS-EN 12390-8 kohaselt määratud vee sissetungimise sügavuseks maksimaalselt 100 mm. [7]

2.2.2. Standardiseerimata meetodiga läbiviidud katsed

Lisandite katsetamise peamiseks ideeks oli välja selgitada nende toime betooni pragude sildamisel. Antud probleemi välja selgitamiseks ei ole teadaolevalt ühtegi standardiseeritud katset. Olukord nõudis lahenduse välja töötamist.

Betoonisegusse doseeritud lisaained reageerivad vee tungimisel läbi betooni pooride, kappillaaride ja pragude, moodustades vees lahustumatu kristallisatsiooni, mis omakorda tõkestab vee edasise läbipääsu. Lisandite toimet arvestades, pidi katsekeha olema mahuti tüüpi, mis sisaldaks vett ning kuhu oleks võimalik kunstlikult pragusid tekitada. Pragude paiknemise loogikas lähtuti vee reservuaaride seintesse tekkivate pragude iseloomust, millest tulenevalt paiknevad praod katsekeha seintes vertikaalselt. Katsekehade sein pidi olema piisavalt massiivne, et see pragude tekitamisel ei murduks. Seina paksuseks eeldati vähemalt 50 mm.

2.2.2.1. Katsekehade projekteerimine

Esimene katsekeha (Foto 1) valmis koonilisest prüginoost ja väiksemast ämbrist. Ämber asetati prüginoosse, kus ämbri kõrguse fikseerimiseks tuli lisada vardad. Vardad ei lase ämbril betooniga

täitmisel soovitud kõrgusest enam kõrgemale tõusta. Probleemiks antud meetodi juures oli sisemise ämbri puudulik fikseerimine, mis põhjustas betoonkehadel seina paksuse kõikumisi. Keeruline oli saavutada ühesuguse konfiguratsiooniga katsekehi. Teiseks puuduseks oli katsekeha suurus, kus üks katsekeha vajanuks 45 liitrit betoonisegu.



Foto 1. Prototüüp nr. 1

Võttes esimese katsekeha puuduseid arvesse, valmis teine (Foto 2) ja kolmas prototüüp (Foto 3). Nende lahenduste puhul oli sisemine ja välimine nõu fikseeritud ning katsekeha suurused ca poole väiksemad. Katsekeha valamine toimus nendes tagurpidi, kus vormi täideti valmiva proovikeha põhja poolt valatuna. Sisemine nõu kinnitati plaadi keskele, mille ümber asetati suurem vorm, kus oli põhi ära lõigatud. Peamisteks miinusteks nende vormide juures oli katsekeha keerukas kättesaamine ning lõpliku versiooniga võrreldes ka suurem töömaht vormide valmistamisel.



Foto 2. Prototüüp nr. 2



Foto 3. Prototüüp nr. 3

Valminud vormid vajasid veel täiendamist. Vormides kasutatud sisemise ja välimise nõu proportsioonid ei sobinud omavahel, mis tingisid katsekehadel väga õhukese seina või põhja. Proportsioonidelt täiuslikumana valmis neljanda prototüübina (Foto 4) lõplik modifikatsioon. Vorm koosnes silindrikujulisest ämbrist, mille põhja puuriti auk. Läbi puuritud augu lisati ämbri tsentrisse 110 mm läbimõõduga toru. Toru kaeti ülevalt poolt kaanega, vältimaks valamisel betooniga

täitumist. Vormi valatakse põhja poolt valatuna. Vormi ettevalmistamine oli eelmistega võrreldes vähe aega nõudev. Katsekeha tuli hõlpsasti välimisest vormist välja. Algsest 45-st liitrist vajalikust betoonisegust üheks katsekehaks sai nüüd 21 liitrit. Ainsaks puuduseks oli sisemise toru eemaldamine, kus selle kättesaamiseks tuli kogu toru oma pikkuses purustada.

Katsekeha mõõdud (Foto 8):

- kõrgus- 370 mm,
- põhja läbimõõt- 260 mm,
- ülemise ääre läbimõõt- 282 mm,
- põhja paksus- 50 mm,
- seina paksus ülemises osa- 83 mm,
- seina paksus alumises osas- 72 mm,
- vedeliku mahutatavus- 3 liitrit.



Foto 4. Lõpliku katsekeha „lillepott” vorm

2.2.2.2. Pragude projekteerimine

Tava ehituspraktikas püütakse hoiduda betooni tekkivatest pragudest, antud töös aga oli tegemist vastupidise argumendiga. Tuli välja mõelda lahendus kuni toimiva teostuseni, mis võimaldaks katsekehadesse tekitada omavahel võrreldavate tunnustega kontrollitud praod. Antud ülesanne kujunes üheks keerulisemaks ettevõtmiseks terve töö juures.

Esimene robustne meetod ülesande lahenduseks seisnes löökkkoormuse rakendamisel. Katsekeha seina 1/3 kõrgusele puuriti 1/3 seina paksusest sügavusele auk (Foto 5). Auku asetati metallvarras, mille teise otsa rakendati haamriga löökkkoormus. Prao tekitamine nõudis tähelepanu, kuna oli oht prao ebaõnnestumiseks. Ebaõnnestumist võis põhjustada varda vale nurk löögi hetkel puuritud augu suhtes. Varda vale asendi korral võis tekkida seina auk enne, kui sinna oleks moodustunud piisava laiusega pragu. Teiseks miinuseks antud lahenduse puhul on kontrollimatu löökkkoormus, mis erineb igal tekitatud praol.



Foto 5. Löökkkoormusega tekitatud pragu

Võimalikult identsete pragude tekitamine nõudis paremat lahendust. Järgmiseks sai pragude tekitamist katsetatud Tallinna Tehnikakõrgkooli ehitusteaduskonna labori jõuraamiga. Katsekeha seina puuriti sarnaselt eelmisele meetodile auk. Puuritud auku asetati terava tipuga kooniline pulk, mida hakati koormuse all suruma. Pulk oli 20 mm läbimõõduga ning 70 mm kõrge. Pulga koonuse tipu läbimõõduks oli 1 mm. Pulka suruti koormuse all järk-järgult sügavamale. Samal ajal jälgiti prao tekkimist. Koormust tõsteti kuni 1 kN suuruse jõuni, kui tekkis silmaga nähtav mikropragu. Pragu pidi olema maksimaalselt 0,4 mm laiune, mis ei olnud veel saavutatud. Koormuse edasisel lisamisel proovikeha murdus (Foto 6). Pressiga pragude tekitamine ei õnnestunud, mis nõudis uue lahenduse välja töötamist.



Foto 6. Murdunud proovikeha

Pragude tekitamine oli lisandite mõju hindamise ja omavaheliseks võrdluseks oluline, mis tähendas jätkuvat ideede praktiseerimist. Kolmandaks välja pakutud lahenduseks oli 14 mm läbimõõduga betooniankrute kasutamine, mis nõudis ankrule augu puurimist. Auku asetatud ankrusse kinnitati omakorda polt, mis hakkab ankrut puuritud augus laiali pressima. Ankru laiali pressimine tekitab katsekeha seina vertikaalse prao. Betooniankru ja poldi vahele pandi seibiks mutter, mis hõlbustas betooniankru paremat kinnitamist. Esmalt puuriti ankrule auk kõrgusele $\frac{1}{3}$ seina kogu kõrgusest. Esimene katse nurjus, kui purunes ankrupolt. Teisel katsel tehti kehale prao suuna ja -kergemaks avanemiseks ülemisse pinda sisselõige, mis tekitas kontrollitud prao (Foto 7). Ankur võimaldas pragu soovitud laiuse juures fikseerida. Prao laius oli fikseeritud ning proovikeha jäi terveks.



Foto 7. Õnnestunud proovikeha

Õnnestunud pragude tekitamine toimus esimese prototüübiga, kuna lõplik katsekeha polnud veel kindel. Pärast neljanda prototüübi ehk katses kasutatava proovikeha valmimist tuli pragude tekitamise meetod ka selle peal järgi katsetada. Uue proovikeha diameetri ja seina paksuse suhe oli väiksem, mis sai ka tõenäoliselt määravaks eelnevalt proovitud lahenduse mitte töötamisel. Kasutusele tuli võtta ühe prao tekitamiseks kaks ankrut (Foto 8). Vertikaalse prao saamiseks tuli ankrud paigaldada proovikeha ülaservast 75 mm ja 135 mm kaugusele. Need ei saanud olla ülemisele servale liiga lähedal, kus ülemine ankur tekitas proovikeha servas sedavõrd suured tõmbepinged, mis põhjustas ankru ja sellest ülespoole jäävas osas pragudega kolmnurkse fragmendi väljalõiget. Ankrute omavaheline kaugus sai valitud kõige väiksem, kus mõlemad ankrud aitavad kaasa vertikaalse prao tekkimiseks.

Ankrutele puuriti $1/2$ seina paksusest augud. Aukude sügavus ei saanud olla väiksem. Vähem sügavust põhjustas augu ümbrusest materjali rebenemist ning prao ebaõnnestumist. Suurema sügavusega või läbiva augu korral oleks vertikaalne pragu tekkinud küll väiksemate jõududega, kuid katsekeha veega täitmisel tähendanuks see vee suuremat läbijooksu, mis oleks piiranud katsekehade veesamba kõrgust või antud alas suuremat tööd aukude hermetiseerimisel.

Sisselõiked prao kergemaks avanemiseks ja suuna andmiseks on tehtud ratsionaalsetel kaalutlustel 30 mm sügavuselt. Väiksem sügavus ei aidanud prao avanemisele kaasa, mis poleks täitnud

eesmärki. Suurema sügavusega lõikamiseks polnud eelkõige vajadust ning jällegi oleks see vähendanud katsekehade veesamba kõrgust.



Foto 8. Katsekeha tekitatud pragude ja mõõtudega

2.2.2.3. Katsekehade kogus ja katsetamine

Vee sissetungimise sügavuse EVS-EN-i järgseks katseks valmistati iga lisandiga ja etaloniga 8 katsekeha, milleks on kuubid servapikkusega 150 mm. Esimene katseseeria nelja kuubiga viidi läbi 30 ja teine katseseeria ehk pikema säilitusajaga 86 päeva vanuselt. Pikema säilitusajaga katsekehade eesmärk oli tõestada või ümber lükata lisandite omadust tõsta betooni veekindlust lühema katseseeriaga võrrelduna. Katsekehi hoiti kuni katsetamiseni vees, mis peaks soodustama lisandite toimet. GOST-i järgseks katseks valmistati iga lisandiga ja etaloniga 12 katsekeha, milleks on silindrid läbimõõdu ja kõrgusega 150 mm. Katsed viidi läbi kahes katseseerias: 30 ja 86 päeva vanuselt.

Lisandite autogeense paranemise välja selgitamiseks kuni 0,4 mm laiuste pragude juures valmistati iga lisandi ja etaloniga 6 katsekeha. Kolmele katsekehale kuuest tekitati praod 7 päeva vanuselt ning ülejäänud kolmele 28-päevaselt. Katsekehade vanuse määramisel sai aluseks võetud standardsed vanused kivinenud betooni katsetamiseks. Lõputöös kasutatud kirjandusele toetudes on teada, et betoonile endale on omane iseparanemisvõime. Betoonis kasutatava tsemendi reageerimisel veega tekivad valdavalt mikroskoopilised uusühendid, mille juurdekasv põhjustav

tugevuse kasvu ehk kivilinemise. 7-päevasel betoonil on reageerimata tsemendiosakesi enam kui vanemal. Tema potentsiaal „iseparanemiseks” ehk pragude ja defektide kinnikasvamiseks on seetõttu suurem. Kivilinemise käigus tekkivad uusmoodustised peaksid suutma kinni kasvatada vaid mikropraod, mille laius ulatub kuni 0,15 mm-ni. [1]

Igasse katsekehasse tekitati kolm pragu. Etaloni ja iga lisandiga on seega 7-ja 28-päevaseid pragusid 9. Pragude laiuste mõõtmiseks on kasutatud pragude joonlauda (Foto 9) ja luupi. Joonlaua on märgitud 0,1 kuni 0,4 mm laiused jooned. Joonte kõrvutamisel pragudega on võimalik hinnata prao laiust. Prao laiust mõõdeti prao välispinnalt.



Foto 9. Pragude laiuse joonlaud

2.2.2.4. Katsekehades vee säilitamine ja toimunud muutuste protokollimine

7 päeva vanustel katsekehadel hermetiseeriti ankrutest kõrgemal olev pragu kinni. Selles osas oli pragude avanemine sedavõrd suur, mille töö koosseisu jätmisel polnud otstarvet. Katses jälgiti ainult ankrutest allapoole jäävat fragmenti, sest sinna tekitati kuni 0,4 mm laiusega praod, mis lisandite mõjude kohaselt peaksid sulguma. Teiseks võimaldas pragude osaline hermetiseerimine veega täitmisel lisada korraga suuremat kogust vett ning tõsta vedelikusamba rõhku. Pärast osalist isoleerimist täideti katsekehad veega. Veega täideti neid 2 kuni 4 korda nädalas, millega püüti hoida pidev vesi katsekehades, mis on vajalik betooni doseeritud lisandi reageerimiseks ning kristallisatsiooni tekkimiseks. Katseala laboris läbiviidud katsekehadega on välja toodud Foto 10.

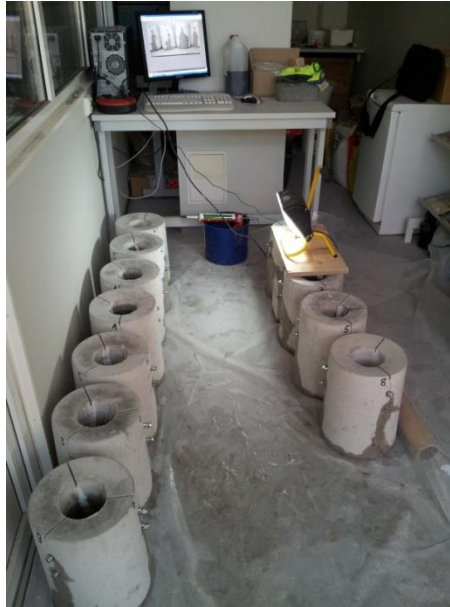


Foto 10. Pragudega katsekehade katseala

Võrreldes 7 päeva vanuste katsekehadega muudeti 28-päevastel vee lisamise tehnoloogiat. Manuaalne ehk käsitsi vee lisamine asendati vee voolamisega läbi vooliku oma raskusjõu tõttu kõrgemal asuvast anumast. Vooluhulk katsekehadesse reguleeriti vooliku otsetesse paigutatud pipettidega. Antud lahendus võimaldas katsekehades hoida teatud veetasel sõltuvalt pragude vee läbilaskvusest ning imiteerida olukorda, kus mahuti seinaga toimub pidev vee läbivool.

Pragude paranemist protokolliti kord nädalas, mille muutused märgiti tabelisse, mis kajastub lisas 1 ja lisas 2. Tabelis on info pragude vanusest nende ülevaatusel, märke toimunud muutustest, täielikult kinnikasvanud ja uuesti avanenud ning ebaõnnestunud pragudest. Ülevaatusel käigus puhastati pragude välispinnad kuhjunud kristallist metallist joonlauaga. Kogunenud kristalli eemaldamise eesmärgiks oli identifitseerida prao sulgumine. Katse käigus puudus veel ülevaade kristalli sadestumisest prao suudme välispinnale, mis põhjustab prao sulgumist. Pragude sulgumine välispinnale sadestunud kristalli teel selgus lõputöö koostamise käigus.

28 päeva vanustel katsekehadel, erinevalt 7-päevastest, fikseeriti prao laiused pärast nende tekitamist. Prao laiused jagati tsoonideks:

- tsoon A – kuni 0,2 mm,
- tsoon B – 0,3 kuni 0,4 mm,
- tsoon C – 0,4 mm ja rohkem.

Tsoonideks jagamine kergendas pragude ülevaatust, kuna algselt olid määratud pragude suurused. Seega tuli märke muutusest teha vastavasse tsooni. Katse lõppemisel oli koheselt olemas ülevaade sulgunud pragude laiustest.

2.3. Lisandite mõju betooni omadustele

Betooni töödeldavust kontrolliti standardse koonuse vajumiskatsega EVS-EN 12350:2009 „Betonisegu katsetamine. Osa 2: Vajumiskatse.” Segumite plastsus ehk koonuse vajumine pidi vastama pumbatava kaubabetooni konsistentsile ning plastsusklassile S4, kus koonuse vajum etalonbetoonil on soovitatavalt 170 kuni 180 mm.

Betonisegude õhusisaldust kontrolliti rõhumõõturimeetodil, mis näitab betoonis oleva õhu sisaldust protsentides. Õhusisalduse mõõtmine toimus standardi kohaselt EVS-EN 12350:2009 „Betonisegu katsetamine. Osa 7: Betonisegu õhusisaldus– rõhumeetod.”

Lisandite mõju betooni survetugevusele mõõdeti standardse katsega EVS-EN 12390-3:2009+AC:2011 „Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus.” Valmistati iga lisandi ja etaloniga 4 kuubikut vastavalt EVS-EN 12390-2:2009 „Kivistunud betooni katsetamine. Osa 2: Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine.” Katsed viidi läbi Rudus AS laboris.

2.4. Pragude hindamise meetodikad

Lisandite toime tuvastamiseks ja etaloniga võrdluseks oli algselt plaanis uurida lisandite keemilist koostist selleks mõeldud katsega, kuid mida ei olnud võimalik siiski teostada. Teise mõttena oli uurida pragude täitematerjali silikaatkoostise analüüsiga, et hinnata selle sisu ja erinevusi etaloni ja lisandiga valmistatud katsekehadel.

Tulemuste visuaalseks analüüsiks pragudesse sadestunud kristalli omaduste ja struktuuri uurimiseks kasutati alguses valgusmikroskoopi. Valgusmikroskoopi andis prao pinnast küll suurendatud pildi, kuid suurendus jäi tulemuste analüüsimiseks liiga pealispinnaliseks. Parema tulemuse saamiseks katsetati pragude uurimiseks skaneerivat elektronmikroskoopiat.

2.4.1. Lisandite keemilise koostise katse

Keemilise koostise tulemustest oleks saanud läbi keemiliste võrrandite koostamise järeldada, millised ühendid tsemendis ja lisaainetes on võimalised omavahel reageerima. Keemilise koostise kasutamine ei saanud teoks, kuna antud katse nõuaks patenteeritud segude/lisaainete koostise avalikustamist, mida ei tee endast lugupidav teaduslaboratoorium.

Silikaatkoostise katse nõudis 20 grammi pulbrit katsematerjali, mida oli märgatavalt rohkem, kui seda katsekehadelt oleks puhtal kujul võimalik kätte saada. Teiseks puuduseks katse juures oli tulemuste esitatavus. Analüüs sisaldas SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , MnO , TiO_2 , P_2O_5 , K_2O , Na_2O ja S-i hulga määramist, mis tõenäoliselt poleks andnud objektiivset ülevaadet pragudes moodustunud täitematerjalide koostise erinevustest.

2.4.2. Pragude täitematerjali uurimine valgusmikroskoobiga

Tulemuste analüüsimiseks, kus pragude välispinnale sadestunud kristalli struktuuri ja omaduste uurimiseks, kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Materjaluuringu teaduskeskuses asuvat valgusmikroskoopi. Kõigepealt teostati eelkatse, millega oli kavas enne põhikatsete alustamist kindlaks teha valgusmikroskoobi kasutamine katsekehade vaatlusel ja selle otsatarbekusel. Katsekeha ei vajanud väiksemaks saagimist. Algupärase suuruse kasutamine võimaldanuks jäädvustada puutumata prao sulgumist. Väiksemaks lõigatud katsekehal on oht prao avanemisele selle töötlemise käigus. Valgusmikroskoop andis kristallist suurendatud kujutise, kuid selline suurendus ei võimaldanud kristalli struktuuri ning omaduste hindamist etaloni ja lisandiga katsekehadel (Foto 11). Tuli loobuda valgusmikroskoobi kasutamisest ning uurida paremaid võimalusi tulemuste kujundamiseks, kõrvutamaks neid teoreetiliste seletustega.



Foto 11. Valgusmikroskoobiga tehtud pilt prao välispinnale sadestunud kristallist

2.4.3. Pragude täitematerjali uurimine elektronmikroskoobiga

Pragudesse moodustunud täitematerjali uuriti Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituudi elektronmikroskoopia (SEM) laboris. SEM on skaneeriv elektronmikroskoop, mis võimaldab vaadelda, pildistada ja analüüsida mikroskoopilisi objekte suurusega 0,001 kuni 1 mm [8].

Pärast katsetulemuste töötlust valiti mõlema vanusega katsekehade hulgast keskmise näitajaga praod, et viia läbi elektronmikroskoobi uuring tekkinud kristallstruktuuri omavaheliseks võrdluseks. Plaan oli lõigata ühest praost vähemalt kolme erineva prao laiusega katsekeha, mille resultaadiks oleks kokkuvõtte lisandiga ja etalonbetooni pragude sulgumine määratud laiuste korral. Esimese katsena lõigati proovikehast 40x30x40 mm suurused katsekehad elektronmikroskoobiga vaatluseks. Lõikamine toimus teemantkettaga märglõikamise teel. SEM-iga pragude täitematerjalide uurimine ebaõnnestus, kuna lõikuse käigus oli prao lõikepinnalt kogu täide ketta suure pööremiskiiruse ja vee tõttu minema uhutud. Pragu paistis mikroskoobiga vaadeldes täiesti puhas. Järgmiseks lõigati proovikeha kuivsaagimise meetodil, et säilitada prao lõikepinnal selle täitematerjal. Lähenemine ei andnud samuti tulemust. Alternatiivse variandina lõigati samasugused proovikehad, mis murtaks prao kohast pooleks. Sedasi oleks võimalik pildistada prao seintele moodustunud kristalse aine struktuuri. Esimese katsekehaga läbiviidud uuringud oli eelmisi arvestades edukas. Õnnestus pildistada pragude seintele moodustunud kristallstruktuuri, kuid tulemuste hindamiseks jäid need

uduseks (Foto 12). Suuremaks suurenduseks ja teravuse andmiseks tuli proovikehad kullata. Proovikeha kuldamine siiski tulemust ei andnud. Eelnevalt läbiviidud katsed sai teostada madalvaakumis, kuid üle kullatud proovikeha nõuab SEM-i kasutamist kõrgvaakum režiimis, mida ei saavutatud tõenäoliselt betooni suure poorsuse tõttu. Elektronmikroskoobi kasutamine osutus antud meetoditega pragude täitematerjalide visuaalseks tõlgendamiseks tarbetuks.

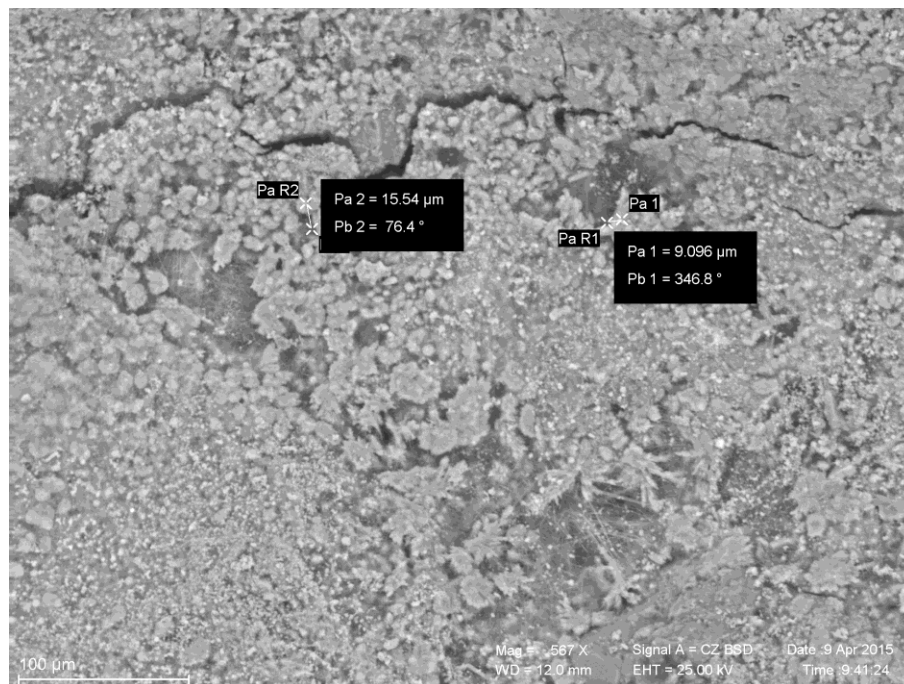


Foto 12. Kuldamiseta tehtud foto SEM-is

2.4.4. Intervallvõtte pragude sulgumisest

Intervallvõtte ehk time-lapse video loomine pragude sulgumisest sisaldab pragude pildistamist kogu katse kestel. Pragude pildistamine toimus intervallidega iga nelja tunni tagant. Pildistati nii 7 kui 28-päevaselt tekitatud pragusid. Salvestatud piltide põhjal valmis video pragude sulgumisest, mis esitatakse käesoleva lõputöö kaitsmisel.

Iga lisandi ja etaloniga tekitatud 9 prao hulgast valiti antud katsesse üks, mis valiti võimalikult sarnased. Sarnasuse all hinnati pragude väliselt hinnatavad omadusi: prao laiust ja kuju. Alljärgnevalt on välja toodud 7-päevaselt tekitatud pragudest salvestatud pildid. Pildidel asuvad vasakult paremale praod Betocrete-iga, Xypex-iga, Penetroniga ja ilma lisandita. Foto 13 on praod pärast nende tekitamist. Foto 14 on näha toimunud kinnikasvamisi pragudes pärast kaheksat päeva. Foto 15 on praod 89 päeva vanused, kui pragude jälgimine lõpetati.



Foto 13. 7-päevaselt tekitatud praod



Foto 14. 7-päevaselt tekitatud praod 8 päeva vanuselt



Foto 15. 7-päevaselt tekitatud praod 89 päeva vanuselt

3. KATSETE TULEMUSED

3.1. Betoonisegude omadused

Katsekehade betoonisegude valmistamisel tehtud mõõtmised ja arvulised näitajad on väljatoodud Tabel 2.

Tabel 2

Betoonisegude omadused

Omadus	Selgitus	Mõõtmised/näitajad										
		Etalon			Penetron			Xypex		Betocrete		
Lisand		694	695	E	702	703	E + 1	710	E + 2	716	717	E + 3
Katse number/tähis												
Koonuse vajumine, mm	Algne vajumine	10	10	10	20	45	25	20	30	35	35	20
Koonuse vajumine, mm	Pärast plastifikaatori lisamist	185	185	200	185	185	190	185	195	170	170	190
Koonuse vajumine, mm	1h möödumisel	85	75	-	110	120	-	165	-	145	145	-
Segu temperatuur, °C	Pärast valmistamist	27	27	15	24	23	14	18	15	21	20	13
Segu temperatuur, °C	1h möödumisel	27	27	-	24	23	-	18	-	21	19	-
Õhusisaldus, %	Pärast valmistamist	2,5	3,2	2,0	2,5	1,6	2,4	2,2	2,2	3,0	2,5	2,9

Omadus	Selgitus	Mõõtmised/näitajad										
Lisand		Etalon			Penetron			Xypex		Betocrete		
Õhusisaldus, %	1h möödumisel	2,8	3,1	-	2,8	2,4	-	2,8	-	3,1	2,7	-
Kogu vesi, kg/m ³	Sisaldab täitematerjalide niiskust	192	193	193	190	190	192	193	185	189	189	185
Vesi/tsement tegur	Arvutuslik	0,590	0,595	0,595	0,585	0,585	0,590	0,594	0,570	0,581	0,581	0,570
Ruumiõhu temperatuur, °C		25	25	17	20	20	17	16	17	17	17	17
Välisõhu temperatuur, °C		31	31	0	19	19	1	6	-4	8	8	-2
Õhusisaldus, %	Enne Betocrete-i lisamist									2,5	2,3	-
Koonuse vajumine, mm	Pärast Betocrete-i lisamist/ 7 min. hiljem									100/ 40	130/ 45	-/ 210
Koonuse vajumine, mm	Doseeriti lisaks 0,6% plastifikaatorit									160	175	-

0,8 protsendilise plastifikaatori koguse kasutamine tsemendi massist ei taganud siiski kavandatud v/ts tegurit 0,55. 0,55 v/ts tegurist sai 0,58–0,59, mis ei suurenda oluliselt betooni veeläbilaskvust (Joonis 2). Kõikide katsesegude v/ts tegurid jäid alla 0,6, mis annab eeldused veetihedale betoonil.

3.2. Lisandite mõju betooni omadustele

3.2.1. Töödeldavus

Pulbriliste lisandite nagu Xypex-i ja Penetroni täpset mõju betooni omadustele oli keeruline hinnata, kuna need lisati segusse koos tsemendiga, selle sisse segatuna. Nende lisandiga segudel võrreldes etaloniga koonuse vajumisel ja v/ts teguritel märkimisväärseid kõikumisi ei olnud. Betocrete-i lisamine segusse toimus pärast plastifikaatori lisamist, kus ilmnas omapärane tendents. Pärast Betocrete-i lisamist, kui oli segatud kaks minutit, tõmbus segu keskmiselt 55 mm tagasi. Tagasitõmbumine väljendus betoonisegu esialgse plastsuse ehk töödeldavuse kaotust pärast Betocrete-i lisamist. Järgneva seitsme minuti jooksul kaotas segum veel 75 mm koonusega mõõdetud plastsusest. Töödeldavuse andmiseks tuli segumitele doseerida lisaks 0,6% plastifikaatorit. Kolmas Betocrete-iga valmistatud segum oma töödeldavust ei kaotanud. Sellisest kõikumisest betooni plastsusele võib järeldada lisandi ebastabiilsust betoonisegus, mis võib olla tingitud kasutatud tsemendi või plastifikaatori ja lisandi koosmõjust.

Tund aega pärast segumi valmimist mõõdeti uuesti betoonisegude plastsust. Etalonsegu töödeldavus oli antud hetkeks vähenenud keskmiselt 95 mm. Penetroniga 70 mm, Xypex-iga 20 mm ning Betocrete-iga, kuhu lisati 0,6% rohkem plastifikaatorit, 25 mm.

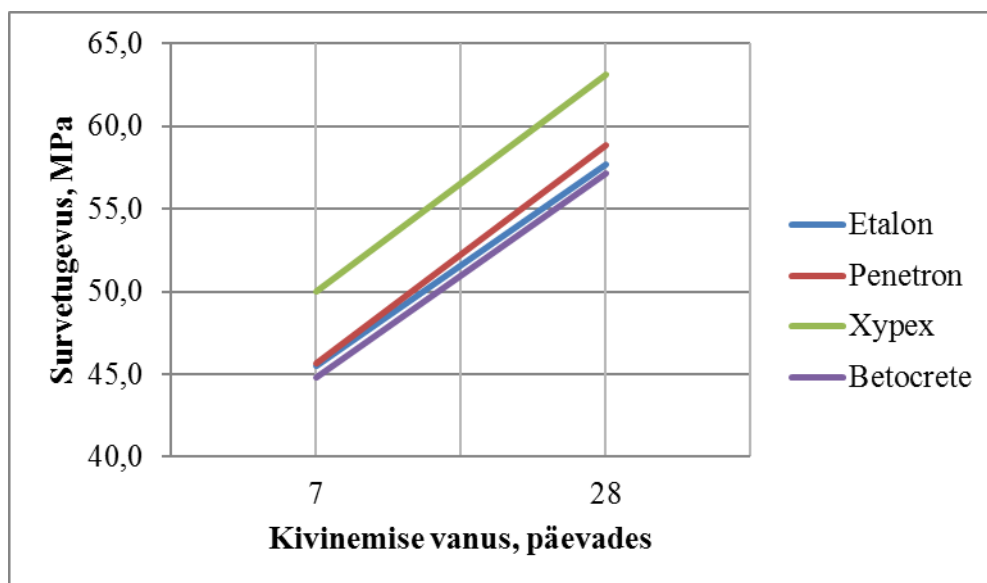
3.2.2. Õhusisaldus

Katses kasutatavad lisandid ei ole üheselt sertifitseeritud. Penetroni puhul on tegemist veeimavust vähendava lisandiga. Betocrete on määratletud plastifikaatorina ning Xypex kui tardumist aeglustava lisandina. Õhusisalduse piirväärtuste erinõuded veeimavust vähendatavate ja tardumist aeglustatavatele lisanditele ning plastifikaatoritele on välja toodud standardis EVS-EN 934-2:2009 „Betooni, mördi ja süstmördi keemilised lisandid. Osa 2: Betooni keemilised lisandid. Määratlused, nõuded, vastavus, tähistus ja sildistus.” Vastavalt standardis kehtestatule võib katsesegude õhusisaldus mahuliselt olla ≤ 2 % võrra suurem kui kontrollsegul, kui tootja pole sedastanud teisiti [9]. Kontrollsegul mõõdetud õhusisaldus jäi vahemikku 2,0 kuni 3,2%, mis lubanuks lisandiga

segudel maksimaalseks õhusisalduseks 5,2%. Betoonisegude õhusisaldust mõõdeti segu valmimisel ja 1 tunni möödumisel, mis jäid kõikidel lisandiga segumitel 1,6 kuni 3,1% vahemikku.

3.2.3. Survetugevus

Kivinenud betoonist katsekehi katsetati standardsetel vanusetel: 7 ja 28 päeva. Kaks kuupi katsetati 7 ning ülejäänud kaks 28 päeva vanuselt. Betooni vastas tugevusklassile C40/50. Betooni kivilinemine etaloni ja lisandiga valmistatud võrdluskupidel on kujutatud Joonis 4.



Joonis 4. Etaloni ja lisanditega betooni kivilinemise graafik

Võrreldes survetugevuste tulemusi, erinesid nii 7 kui 28 päeva Penetroni ja Betocrete-iga valmistatud kuupide tugevused etalon tulemustest vähesel määral. Penetroniga kuupidel olid 7 päeva keskmine survetugevus etaloniga võrreldes 0,4% ning 28-päevane 2,1% kõrgem. Betocrete-iga olid kuupide tulemused etaloniga kõrvutades vastavalt 1,5% ja 0,9% madalamad. Kõige kõrgemad survetugevuse näitajad saavutati Xypex-iga. 7 päeva keskmine survetugevus oli 9,9% ning 28 päeva keskmine 9,5% kõrgem etalonist. Survetugevuse tulemused on välja toodud allolevas tabelis (Tabel 3).

Tabel 3

Kivistunud betooni survetugevused

Katsekeha tähistus		Katsekeha mõõtmed, mm			Katsetamise kuupäev	Vanus katsel	Tihedus, kg/m ³	Purustav jõud, kN	Survetugevus, N/mm ²	
		l	b	h					üksik	keskmine
E-1	Etalon 22.10.14	150	150	150	29.10.14	7	2375	1013	45,0	45,5
E-2		150	150	150			2393	1035	46,0	
E-3		150	150	150	19.11.14	28	2399	1310	58,2	57,7
E-4		150	150	150			2375	1287	57,2	
E+1-1	Penetron Admix 22.10.14	150	150	150	29.10.14	7	2384	1035	46,0	45,7
E+1-2		150	150	150			2388	1019	45,3	
E+1-3		150	150	150	19.11.14	28	2400	1325	58,9	58,9
E+1-4		150	150	150			2403	1323	58,8	
E+2-1	Xypex Admix C-1000 NF 23.10.14	150	150	150	30.10.14	7	2409	1123	49,9	50,0
E+2-2		150	150	150			2397	1127	50,1	
E+2-3		150	150	150	20.11.14	28	2394	1418	63,0	63,2
E+2-4		150	150	150			2419	1424	63,3	
E+3-1	Betocrete C-17 23.10.14	150	150	150	30.10.14	7	2401	1015	45,1	44,8
E+3-2		150	150	150			2390	1001	44,5	
E+3-3		150	150	150	20.11.14	28	2388	1296	57,6	57,2
E+3-4		150	150	150			2394	1276	56,7	

3.3. Lisandite toime

3.3.1. Veepidavus

EVS-EN-i ja GOST-i järgses katses ühelgi katsekeha pealispinnal märga laiku ei esinenud. Sissetunginud veepiiri mõõtmiseks katsekehad lõhestati. EVS-EN-i kohaselt määratud vee sissetungimise sügavused vastasid ehitistes paigaldatavatele betooni veepidavuse nõudele. Vee sissetungimissügavused ei ületanud 100 millimeetrit. Erinevate segumitega katsekehade tulemused on esitatud Tabel 4 kuni Tabel 7.

Tabel 4

Etaloniga veepidavuskatse tulemused

Lisand		Vee sissetungimissügavus, mm			
		30 päeva		86 päeva	
ETALON		EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5	EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5
694	1	9	21	9	21
694	2	12	23	9	18
694	3	11	25	12	20
694	4	11	24	8	18
694	5	-	21	-	18
694	6	-	20	-	18
Minimaalne		9	20	8	18
Maksimaalne		12	25	12	21
Keskmine		10,8	22,3	9,5	18,8
Hälve 30. päeva katsega		-	-	12%	16%

Ilma lisandita katsekehadel suurenes veepidavus 86 päeva vanustel katsekehadel 30-päevastega võrreldes. EVS-EN-i katses vastavalt 12% ning GOST-i järgses 16% (Tabel 4).

Tabel 5

Penetroniga veepidavus katse tulemused

Lisand		Vee sissetungimissügavus, mm			
		30 päeva		86 päeva	
PENETRON		EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5	EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5
702	1	11	22	4	18
702	2	12	23	9	19
702	3	11	20	7	19
702	4	10	19	7	20
702	5	-	21	-	16
702	6	-	21	-	17

Lisand	Vee sissetungimissügavus, mm			
	30 päeva		86 päeva	
PENETRON	EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5	EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5
Minimaalne	10	19	4	16
Maksimaalne	12	23	9	20
Keskmine	11,0	21,0	6,8	18,2
Hälve 30. päeva katsega	-	-	39%	13%
Hälve etalonist	-2%	6%	29%	4%

Penetroniga läbiviidud veepidavuskatse tulemused 30 päeva vanuselt jäid etaloniga võrrelduna -2 ja +6 protsendi piiresse (Tabel 5). Oli ainuke lisand, mis saavutas GOST-i järgi 30 päeva vanuselt parema keskmise tulemuse kui ilma lisandita katsekehad (Joonis 6). Hälve etaloniga võrreldes oli 13 mm.

86 päeva vanuste EVS-EN-i katsete tulemused näitavad etaloniga võrreldes veepidavuse paranemist 27 mm (29%). GOST-i katsel paranes veepidavus 56 päeva möödumisel etaloniga võrreldes 6 mm (4%) (Tabel 5).

Tabel 6

Xypex-iga veepidavuskatse tulemused

Lisand		Vee sissetungimissügavus, mm			
		30 päeva		79 päeva	
XYPEX		EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5	EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5
710	1	-	20	-	14
710	2	-	28	-	12
710	3	-	24	-	14
710	4	-	25	-	13
710	5	-	22	-	14
710	6	-	24	-	14
Minimaalne		-	20	-	12
Maksimaalne		-	28	-	14

Lisand	Vee sissetungimissügavus, mm			
	30 päeva		79 päeva	
XYPEX	EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5	EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5
Keskmine	-	23,8	-	13,5
Hälve 30. päeva katsega	-	-	-	43%
Hälve etalonist	-	-7%	-	28%

Xypex-iga teostatud GOST-i järgsel veepidavuse määramisel olid esialgsed tulemused 15 mm (7%) halvemad etalonist. Katsekehade pikemaajalisel kivilinemisel vees, paranes veekindlus varasemaga võrreldes 103 mm (43%) ning etaloniga võrrelduna 53 mm, mis on 43 protsendi võrra parem (Tabel 6). Olles vees küll seitse päeva vähem kivilinenud, osutusid hilisemad tulemused Xypex-iga kõige tõhusamateks: 35 mm paremad Betocrete-ist ja 47 mm Penetronist.

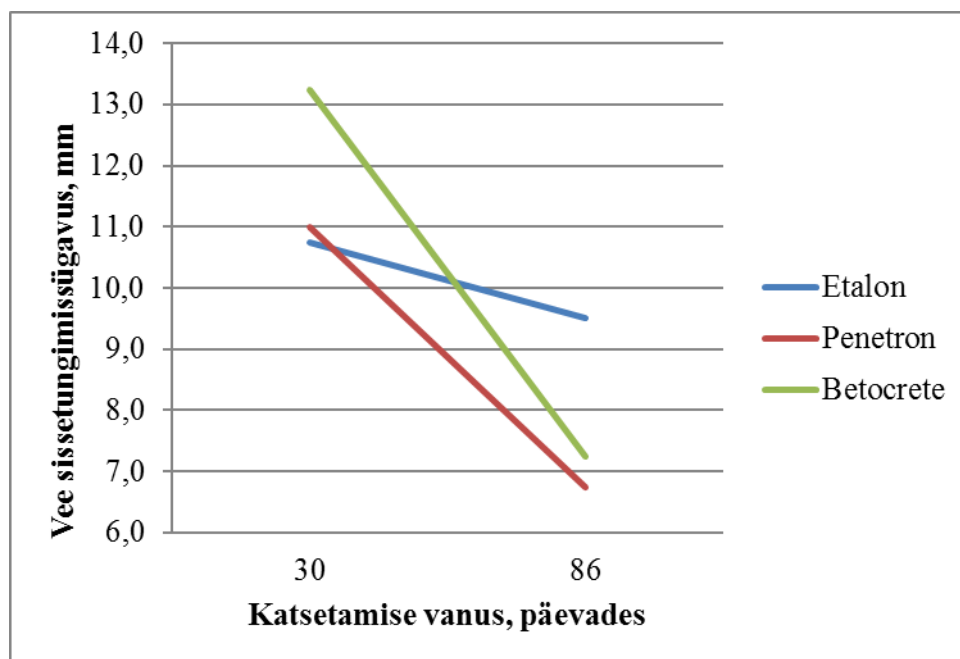
Tabel 7

Betocrete-iga veepidavuskatse tulemused

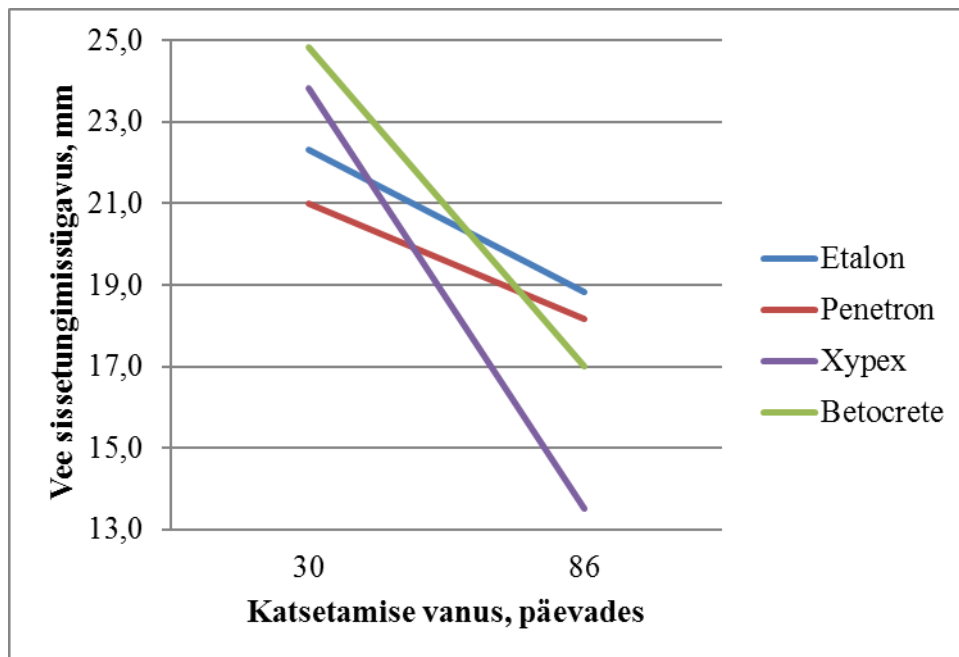
Lisand		Vee sissetungimissügavus, mm			
		30 päeva		86 päeva	
BETOCRETE		EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5	EVS-EN 12390-8	GOST 12730.5
716	1	16	30	7	15
716	2	14	29	7	18
716	3	11	22	7	18
716	4	12	23	8	17
716	5	-	23	-	18
716	6	-	22		16
Minimaalne		11	22	-	15
Maksimaalne		16	30	8	18
Keskmine		13,3	24,8	7,3	17,0
Hälve 30. päeva katsega		-	-	45%	32%
Hälve etalonist		-23%	-11%	24%	10%

Kõige halvemad 30 päeva tulemused olid Betocrete-iga katsekehadel. EVS-EN-i kui ka GOST-i kohaselt olid tulemused 25 mm kehvemad etalonist, vastavalt 23 ja 11 protsenti. Pärast 56 päeva vees hoidmist paranesid tulemused 30 päeva vanuselt läbiviidud katsetega 45 ja 32 protsenti. Sama vanuse tulemusi etaloniga võrreldes on EVS-EN-i järgne vee sissetungimissügavus 22 mm (24%) ning GOST-i kohane veepidavus 18 mm (10%) parem (Tabel 7).

EVS-EN-i järgsed vee sissetungimissügavuse tulemused on välja toodud Joonis 5. GOST-i järgsed veepidavuskatse tulemused on kujutatud Joonis 6.



Joonis 5. EVS-EN-i järgsed vee sissetungimissügavused



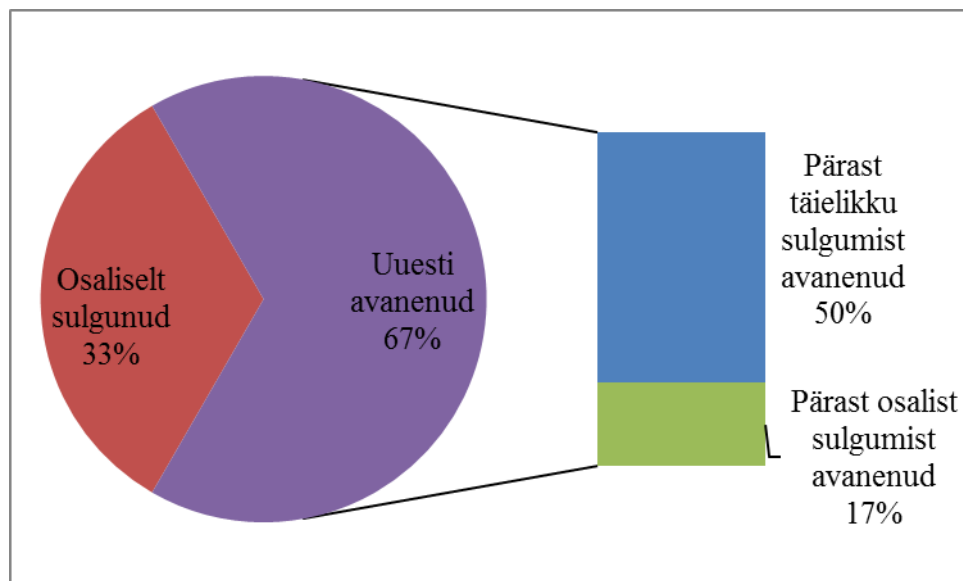
Joonis 6. GOST-i järgne veepidavuse määramine

3.3.2. 7 päeva vanuselt tekitatud pragude sildamine

Tulemuste võrreldavuse tagamiseks ei võetud etaloni ja lisandiga tekitatud üheksast praost ühes vanuses arvesse kahte ebaõnnestunud või halvemate näitajate pragu. Pragude paranemise protokollimisel valmis tabel (Lisa 1) pragude sulgumisel toimunud muutustest. 7-päevaselt tekitatud pragude kinnikasvamist jälgiti 89 päeva jooksul. Kogunenud tulemuste põhjal saab katse jagada tinglikult kolme staadiumi. Esiteks algstaadium, kus pragude sulgumisel ei toimunud suuri muutusi. Algstaadium kestis pärast pragude tekitamist 7 päeva vanustesse katsekehadesse kuni 22 päeva. Teine etapp on intensiivne- ehk keskstaadium. Selles staadiumis toimus vee läbijooksu peatumine pragudes ning kõige aktiivsem pragude sulgumine. Vee läbijooksu peatumise all on mõeldud vee nõretava läbivoolu peatumist läbi prao, kuid prao pind on endiselt märg. Pragude keskstaadium kestis alates 23. kuni 61. päevani. Pärast intensiivse perioodi lõppu, kui praod on vanuses 62 kuni 89, on tegemist lõppstaadiumiga. Siin ei toimu pragude sildamise juures enam märgatavaid muutusi.

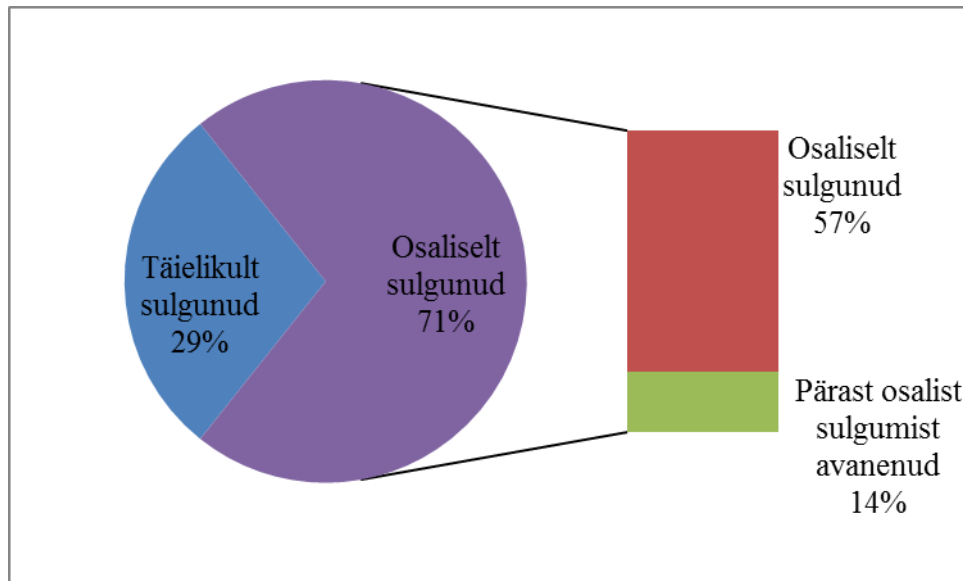
Varases staadiumis 22 päeva jooksul toimus etaloni kuues prao kokku viis muutust. Keskstaadiumis tõusis muutuste arv 14-ni, mis on 2,8 korda enam kui algstaadiumis. Samas etapis toimus ka kolme prao täielik kinnikasvamine, mis moodustas kõikidest etaloni pragudest 50%. Lõppstaadiumis kõik kolm sulgunud ning üks osaliselt sulgunud pragu avanesid. Neljast avanenud praost kolmel toimus

prao avanemine kõige kitsamas osas katsekeha põhja lähedal, kus on vedelikusamba rõhk praole kõige suurem. Katse lõpuks oli seega uuesti avanenud 67% pragudest (Joonis 7).



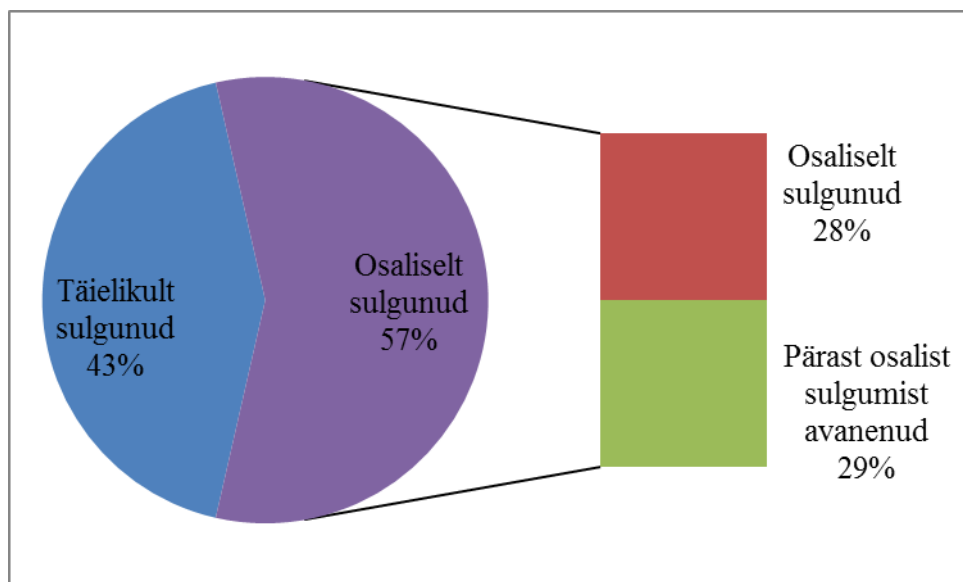
Joonis 7. Etalon pragude sulgumine

Penetroniga katsekehades toimus algstaadiumis kokku 7 muutust seitsmes praos. Keskstaadiumis oli muutusi kokku 15, mis on 2,1 korda rohkem kui algstaadiumis. Keskstaadiumis sulgus täielikult kaks pragu, mis teeb prao kinni kasvamiseks 29 protsenti. Lõppstaadiumis avanes üks ositi sulgunud pragu vahemikus 0,1 kuni 0,3 mm. Katse lõpuks jäi osaliselt sulgenuks kokku 5 pragu, mis kokkuvõttes teeb 71 protsenti (Joonis 8).



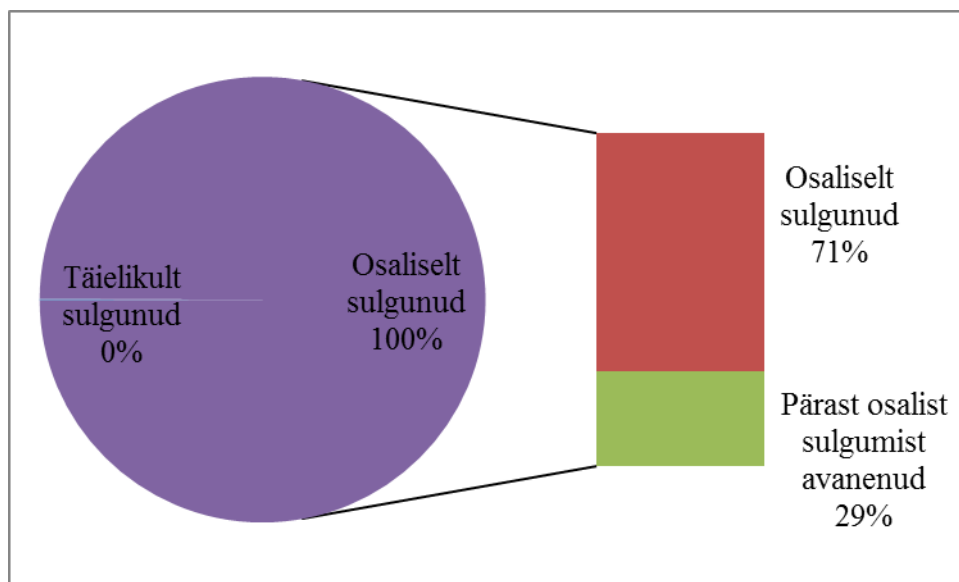
Joonis 8. Penetroniga pragude sulgumine

Kõige rohkem muutusi algstaadiumis oli Xypex-iga katsekehadel, kus vastav näitaja oli 9. Keskstaadiumis oli algstaadiumiga võrreldes muutusi 1,8 korda rohkem. Intensiivsel perioodil sulgus täielikult kolm pragu, mis teeb kinnikasvamise protsendiks 43 (Joonis 9). Lõppstaadiumis oli pragude sulgumine ammendunud. Selle asemel toimus kahe osaliselt sulgunud prao avanemine, mis esines pragude laiusel vahemikus 0,1 kuni 0,4 mm.



Joonis 9. Xypex-iga pragude sulgumine

Betocrete-iga katsekehades oli muutuste arv algstaadiumis 5. Keskstaadiumis tõusis muutuste arv algstaadiumiga võrreldes 3,2 korda, mis on kõrge vähete muutuste tõttu algstaadiumis. Suur muutuste arv ei saanud pragude kinnikasvamise kohapealt määravaks. Ükski pragu kogu katse kestel täielikult ei sulgunud (Joonis 10). Lõppstaadiumis oli sulgumine passiivne. Toimus ainult kahe prao avanemine vahemikus 0,1 kuni 0,4 mm.

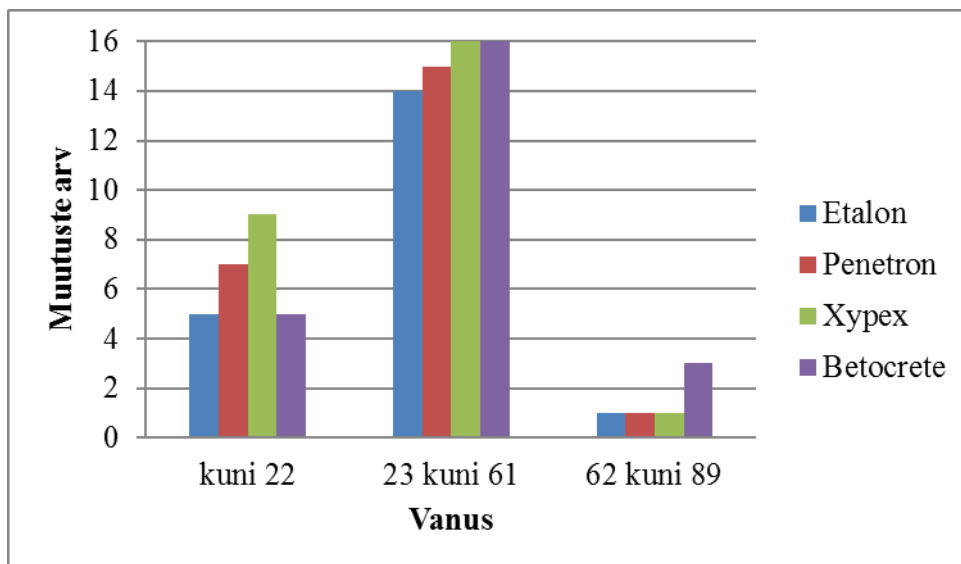


Joonis 10. Betocrete-iga pragude sulgumine

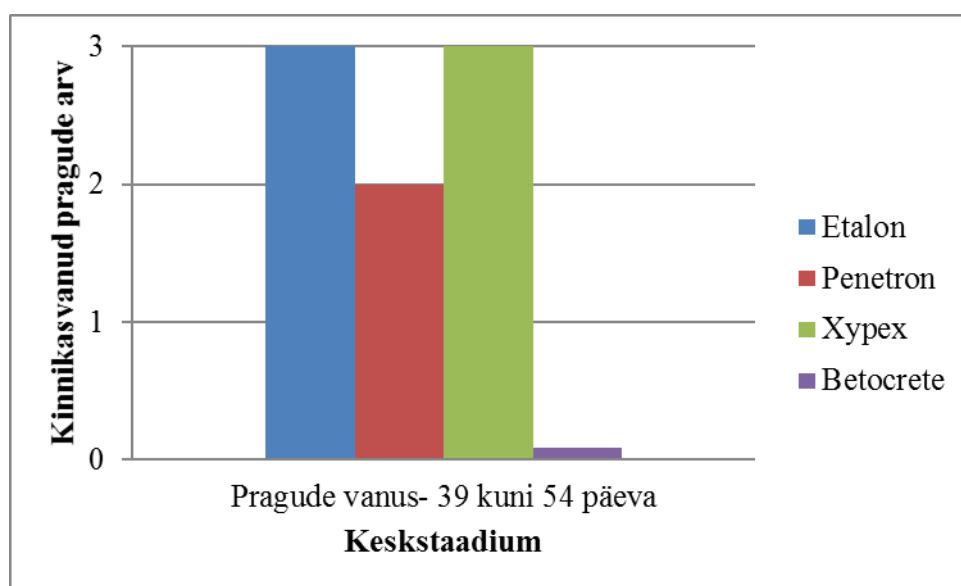
Etaloni ja lisandiga praod töötavad esmapilgul ühtemoodi (Joonis 11). On selgelt eristuvat kolm staadiumi nii etaloni kui lisanditega katsekehadel. Etaloniga tulemused on igas staadiumis mõne madalama tulemusega võrdsed või astme võrra madalamad. Siin tuleb arvestada etaloni kolme prao ebaõnnestumist. Teiste lisandite puhul sai tulemuste analüüsimisel välja jäetud kaks, siis etalonil kolm pragu.

Enne katse lõppu oleks olnud keeruline lisanditega pragusid eristada etaloni omadest. Pigem oli erinevus Betocrete-iga katsekehade ja ülejäänute vahel. Betocrete-iga katsekehades ei toimunud ühegi prao terviklikku sulgumist (Joonis 12). Etaloni ja teiste lisaainetega toimus aga intensiivsel perioodil osade pragude täielik sulgumine. Erinevus etaloni ja lisandiga katsekehade vahel tuli välja alles vanusel 81 päeva. Selles vanuses avanes etalonil kolm pragu neljast kõige kitsamas osas, mis jääb katsekeha alumisse piirkonda, kus praole avaldub kõige suurem vedelikusamba rõhk. Kuna pragudesse sadestunud kristalli tunnuste uurimine ebaõnnestus võib etaloni pragude uuesti avanemist põhjendada subjektiivsetel oletustel. Ilma lisandita praod esialgu küll sulguvad, kuid

sadestunud kristall pole sedavõrd püsiv, millest tingituna kaotavad praod aja jooksul oma vastupidavuse. Lisanditega pragudes toimus samuti avanemist, kuid antud avanemised toimusid laiemates pragudest, mis polnud veel tervikuna sulgunud.



Joonis 11. Erinevates staadiumites aset leidnud muutused



Joonis 12. Sulgunud praod katsel

3.3.3. 7-päevaselt tekitatud lisaainetega katsekehade pragude võrdlus

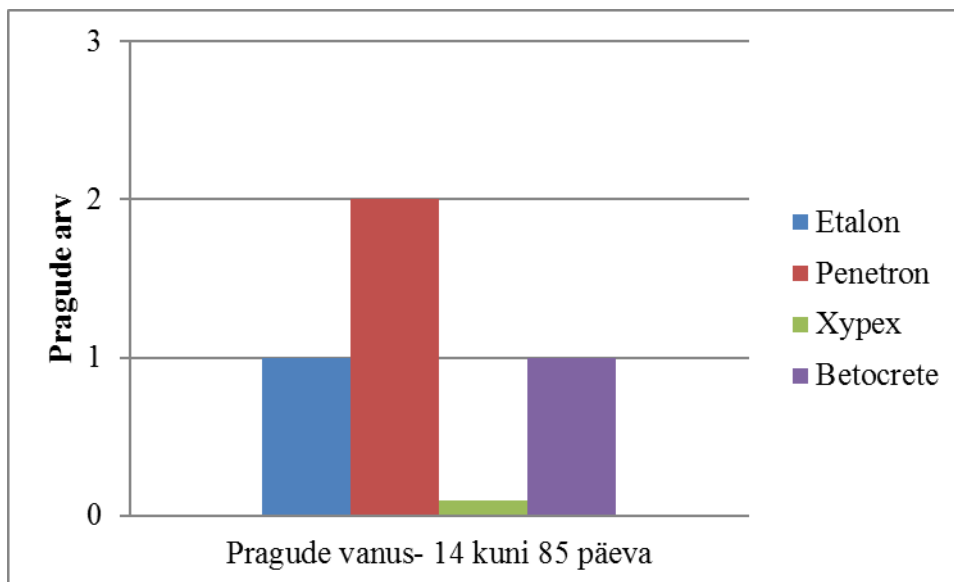
Algstaadiumis algas Xypex-iga valmistatud katsekehade pragudes teiste lisanditega võrreldes kõige aktiivsem sulgumine. Penetroniga ja Betocrete-iga praod olid vastavalt 0,8 ja 0,6 korda passiivsemad. Selles staadiumis ühtegi prao täielikku kinnikasvamist ei toimunud. Keskstaadiumis oli muutuste arv ühtlasem. Xypex-i ja Betocrete-iga pragudes oli kokku 16 muutust. Penetronil vastavalt 15. Keskstaadium oli kõige intensiivsem periood pragude sulgumisel. Xypex-iga sulgus täielikult 43 protsenti pragudest, mis ühikuna teeb kolm pragu. Penetronil oli vastav näitaja 29 protsenti ja kaks pragu. Betocrete-iga pragude puhul oli antud näitaja null. Lõppstaadium, kus tekitatud praod on vanuses 62 kuni 81 päeva, oli kõikide lisandite puhul inertne. Toimusid mõned üksikud muutused osaliselt sulgunud pragudes. 82 kuni 89 päeva vanuselt toimus osaliselt sulgunud pragude avanemine. Xypex-i ja Betocrete-iga katsekehades toimus avanemine 29 protsendil pragudes, mis on kokku kahel praol. Penetronil oli avanemine ühe prao võrra väiksem.

Välisvaatluse põhjal, kus prao laiust on mõõdetud katsekeha välispinnalt, on kõikide lisandite puhul võimalik 0,1 kuni 0,4 mm laiuse prao sulgumine. Arvestades täielikult sulgunud pragudele ka osalist, toimus ka neis kuni 0,4 mm laiuste pragude sulgumine. Katsetulemuste suur erinevus täielikul ja osalisel sulgumisel ning uuesti avanemisel on autoriarvates põhjendatav pragude füüsikaliste omadustega. Praod võivad välisvaatluse põhjal olla kuni 0,4 mm laiused, kuid prao seesmises osas võib purustus olla tunduvalt laiahaardelisem. Suuremad purustused tekitavad praost kiirema vee läbivoolu, mis halvendab kristallisatsioonist sadestumist prao suudmesse, kus toimub prao sulgumine.

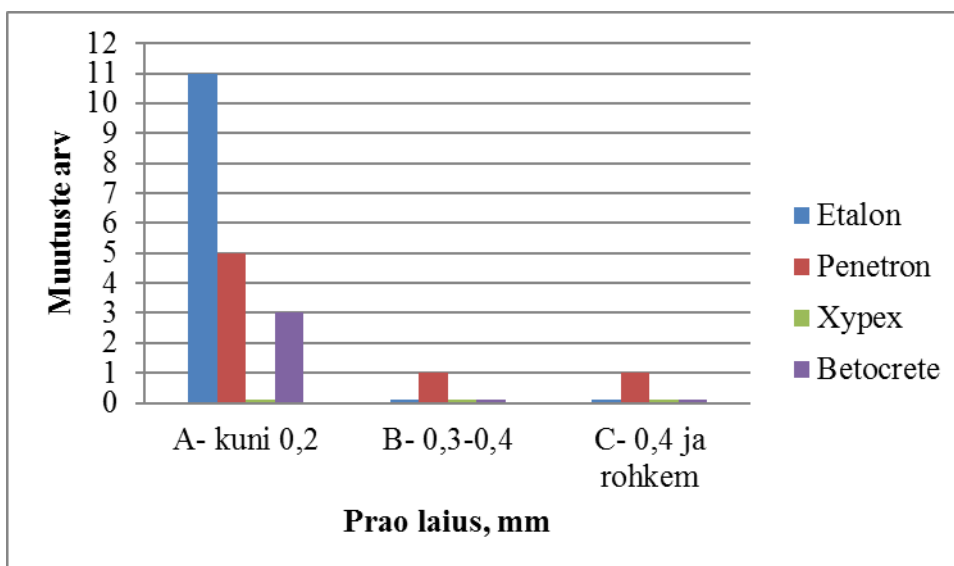
3.3.4. 28 päeva vanuselt tekitatud pragude sildamine

28-päevaselt tekitatud pragusid jälgiti 85 päeva jooksul. Praod olid neis vanuses katsekehadel jaotatud tsoonideks, mis võimaldas sulgunud prao laiust tuvastada (Lisa 2). Pragude sulgumisel olid terve katse jooksul väiksemad muutused. Ei esinenud ühegi prao täielikku sulgumist. Kui 7-päevaselt tekitatud pragudes oli 25. päevaks vee läbijooks peatunud, siis 28-päevastes toimus vee läbijooksu peatumine katsel vaid vähestes pragudes. Hälve etaloni ja lisandiga katsekehade vahel jäi kahe prao piiresse (Joonis 13), mille põhjal lisandite toimes erinevusi järeldada on ennatlik. Muutusi pragude kinnikasvamisel oli märgata kuni 0,2 mm laiuste pragude juures. Laiemate pragude korral märkimisväärsed muutusi ei toimunud.

Etaloni ja lisanditega pragude vahel saab välja tuua teatud erinevuse (Joonis 14). Tsoonis A, kus prao laiuseks on kuni 0,2 mm on näha etaloni katsekehade pragudes suuremat aktiivsust kinnikasvamisel. Muutuste arv lisaainetega võrreldes on 2,2 korda suurem.



Joonis 13. Pragude läbijooksu peatumine



Joonis 14. Pragude tsoonides aset leidnud muutused

28-päevaselt tekitatud pragudes ei esinenud kaltsiumkarbonaadi sedavõrd aktiivselt kristallisatsioon kui 7-päevastes. Betooni kivinemise käigus on esialgses hüdratatsiooniprotsessis reageerimata jäänud tsemendiosakesed 28. päevaks suuremal hulgal aktiveerinud. Tulemuseks on

lisandite toimet pärssiv väiksem kaltsiumhüdroksiidi hulk, kus lisandite komponendid reageerivad kaltsiumhüdroksiidiga, et soodustada kaltsiumkarbonaadi formeerimist.

3.4. Järeldused

Standardsete katsetena läbiviidud veepidavuse katsed tõestasid lisandite omadust muuta betoon pikemaajalisel vees kivinemisel vettpidavamaks. Nii EVS-EN-i kui GOST-i järgselt viidi läbi katsed kahes vanuses. Katsetulemused kajastasid 30-päevaselt lisanditega läbiviidud tulemustes teatavat veepidavuse vähenemist etaloniga võrreldes. 86 päeva vanuselt ületasid aga kõik lisanditega tulemused etaloni näitajat. GOST-i järgseid hilisemaid katsetulemusi võrreldes vähenes Xypex-iga katsekehade vee sissetungimissügavus etalonist 56 mm, Betocrete-iga 18 mm ja Penetroniga 6 mm.

Tuginedes lõputöö koostamisel kasutatud viidatud allikatele ning pragude kinnikasvamise tulemustele toimub pragude kinnikasvamine karboniseerumise tulemusena. Kasutatavad lisaained peaksid vabastama rohkem kaltsiumi ioone ning nende kõrge pH tase peaks soodustama kaltsiumkarbonaadi sadestumist. Sellest tulenevalt ei ole karboniseerumine võimalik ainult lisandiga betoonidel, vaid kaltsiumkarbonaadi sadestumine toimub ka ilma lisandita ehk etalonbetoonil. 7 päeva vanuste pragudesse sadestunud kristalli omaduste võrdlemisel avaneid 81 päeva vanuselt etalonbetoonist praod, mis olid katse kestel täielikult sulgunud. Subjektiivsetel oletustel võib järeldada, et sadestunud kristalli omadused ei ole etalonbetoonil nii püsivad kui Penetronil või Xypex-iga. Betocrete-iga katsekehades ei toimunud ühegi prao täielikku sulgumist, kuid välivaatluse põhjal toimus 7-päevaselt tekitatud pragudes nii etaloni kui kõikide lisandite puhul kuni 0,4 mm laiuste pragude osalist sulgumist.

28-päevaselt tekitatud pragudes ei ilmnenud ühegi prao täielikku sulgumist. Sellises vanuses tekitatud pragudele osutus keerukaks ka vee läbijooksu peatumine, mis 7-päevaselt tekitatud pragudes toimus keskmiselt 25 päeva jooksul. Siinkohal on betooni enda „iseparanemisvõime” seletatav tsemendi reageerimisel tekkivate mikroskoopiliste uusühendite juurdekasvul põhineva tugevuse kasvuga. 7 päeval betoonil on reageerimata tsemendiosakesi enam kui 28-päeval. Materjali potentsiaal pragude kinnikasvamiseks on seetõttu suurem. Mõne vettpidava lisandi tootelehel on väidetud, et lisand on aktiivne kuni ehitise kasutuse lõpuni, kuid võrdluskatsed 7 ja 28-päevaselt tekitatud pragude puhul näitasid 28-päevastes pragudes kinnikasvamisi kuni 0,2 mm

laiuste pragude juures. 28-päevaselt tekitatud etalonpragudes olid muutused lisanditega võrreldes mõnevõrra aktiivsemad, kuid tulemustele see mõju ei avaldanud.

3.5. Soovitused

Tulemustest järeldades võib väita, et Penetroni ja Xypex-i kasutamisel on võimalik betooni autogeenne paranemine. Autogeenset paranemist on võimalik ära kasutada kuni 0,4 mm laiuste pragude tekkimisel värselt valatud konstruktsioonides. Analoogiline suundumus esines 7-päevaselt tekitatud pragudes, kus intensiivne pragude sulgumine esines 23. kuni 61. päeval pärast pragude tekitamist. Koheselt toimus ka katsekehade veega täitmine, mis põhjustas pragude veega küllastumist. Protsessis on tähtsal kohal ka konstruktsioonide võimalikult varakult veega täitmine juhul, kui see on lubatud konstruktsioonile. Kahe kuu jooksul peaks seega olema toimunud pragude sulgumine kristallisatsiooni teel, kus tekkinud kristall sadestub pragude suudmesse, millega muudetakse praod veetihedaks. Selleks ajaks mitte sulgunud pragude sulgemiseks tuleb kasutada injekteerimist.

Oluline soovitus pragude sulgemiseks on mitte eemaldada betooni järeltöötamise käigus praod välispinnale tekkinud materjali. Sulgumine ei toimu tegelikkuses terves praos, vaid leiab aset praod suudme välispinnal. Välispinnale kogunenud materjal on sinna sadestunud kaltsiumkarbonaat, mis muudab praod veetihedaks.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö koostamisel võeti hüdrofobiseerivate lisandite toimeefekti tuvastamisel aluseks lisandite tootelehtel lubatud mõjud. Muijal maailmas läbiviidud katsed ei anna tõepärast infot lisandite positiivsetest või negatiivsetest mõjudest koos Eestis kasutatavate kohalike täitematerjalide ja Kunda portland-komposiitsemendiga toodetud betoonidega. Katseplaan valmis koostöös AS Ruduse ning katses kasutatavate lisandite Penetroni, Xypex-i ja Betocrete-i Eesti esindajatega.

Autor on töös kirjeldanud katsemetoodikaid lisandite veepidavuse ja „ise paranemise” kontrollimiseks. Katsemetoodikad jagunevad standardiseeritud katseteks, mis sisaldasid vee sissetungimissügavuse määramist ning standardiseerimata meetoditel läbiviidud katseteks. Põhjalikumalt on käsitletud standardiseerimata katseid, mis hõlmavad endas katsekehade ja pragude moodustamist.

Tulemustes on tehtud kokkuvõtted lisandite mõjust betooni omadustele. Omaduste juures on välja toodud lisandite mõju betooni plastsusele, õhusisaldusele ja survetugevusele. Lisandite toimetest on välja toodud veepidavuse suurenemist ning kuni 0,4 mm laiuste pragude sulgumist. Veepidavuse all on mõeldud betooni veepidavamaks muutmist lisandite kasutamiseiga. Töös selgitati betooni ise paranemise võimet lisandiga ja ilma lisandita.

Lisanditest avaldas betooni plastsusele mõju Betocrete. Kahel segumil kolmest vajab betoonisegu pärast Betocrete lisamist töödeldavuse taastamiseks lisaks 0,6% plastifikaatorit. Kuna selline tendents ei esinenud aga kõigil Betocrete-iga segumitel, võib oletada lisandi toime ebastabiilsust betoonisegus, mida võib põhjustada lisandi ja tsemendi või plastifikaatori koosmõju.

7 päeva vanuselt tekitatud pragudes näitas etalonbetoon pragude sulgumisel ühesuguseid tulemusi Xypex-i ja Penetroniga. Aktiivne periood kestis 23. kuni 61. päevani pärast pragude tekitamist. Toimus mitme praod täielik kinnikasvamine. Katse lõpus, kui praod olid 81 päeva vanad, avanesid etalonbetooniga sulgunud praod. Parima tulemusega Xypex-i ja Penetroniga pragudes sellist nähtust ei esinenud. Ehk sellest saab järeldada lisandite efekti võrdluses etalonbetooniga.

28-päevaselt tekitatud pragudes toimus sulgumine nii etaloni kui ka lisanditega kuni 0,2 mm laiustes pragudes. Sellises vanuses tekkinud pragude potentsiaal kinnikasvamiseks on väiksem, mis on seletatav betoonis leiduva veel reageerimata tsemendiosakeste väiksema hulgaga kui 7-päevaselt tekitatud pragudega katsekehades.

SUMMARY

The Effect of Hydrophobic Additives Used in Concrete

The effects of hydrophobic additives stated in product sheets were used as the basis of detecting the effects of the respective additives. Tests performed in other countries do not provide accurate information on the positive or negative effects of additives combined with local filling materials and concretes produced in Kunda from Portland-composite cements that are used in Estonia. The experimental plan was prepared in cooperation with AS Rudus and the Estonian representatives of Penetron, Xypex, and Betocrete – additives used in the experiment.

In the thesis, the author has described testing methods for checking the water-tightness and 'self-improvement' of the additives. The testing methods are divided into standardised tests, which included the determination of the penetration depth of water, and non-standardised methods for conducting tests. Non-standardised tests, which involve the formation of test pieces and cracks, are covered in detail.

The effects of the additives on the properties of concrete have been summarised in the results. With regard to the properties, the effect of the additives on the plasticity, air concentration, and compressive strength on concrete have been specified. With regard to the effects of the additives, increases in water-tightness and closure of cracks that are up to 0.4 mm in width have been indicated as well. Water-tightness is defined as an increase in the water-tightness of concrete by the use of the additives. In the thesis, the ability of concrete to self-improve with the help of an additive and without additives was tested.

Out of additives, Betocrete had an effect on the plasticity of concrete. In the case of two mixes out of three, the concrete mix needed an extra 0.6% of plasticiser to restore its treatability after the addition of Betocrete. However, since this tendency was not evident in the case of every mix that included Betocrete, one might presume that the effect of the additive in concrete mixes is unstable, which may be caused by a co-effect of additives and cement or plasticisers.

In cracks created in 7-day-old concrete, the reference concrete displayed identical results with regard to the closure of cracks by the use of Xypex and Penetron. The active period lasted from the 23rd to the 61st day following the creation of cracks. Several cracks closed completely. At the end of the experiment, when cracks were 81 days old, the closed cracks in the reference concrete opened. This effect was not witnessed in the cracks to which Xypex and Penetron, the additives with the best result, had been applied. In other words, we can draw conclusions on the effect of the additives in comparison to the reference concrete from this.

In cracks created in 28-day-old concrete, closure occurred in the case of both the reference concrete, as well as the additives in cracks of up to 0.2 mm in width. The closing potential of cracks that have developed in these later stages is smaller, which can be explained by the lower amount of cement particles that have not yet reacted compared to cracks in test pieces created in 7-day-old concrete.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] E. Uustalu, „Betooni pragunemine,“ 2001. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.betoon.org/wp-content/themes/betoon/pdf/EH01_6.pdf. [Kasutatud 3. aprill, 2015].
- [2] R. D. Woodson, Concrete portable handbook, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [3] D. Palin, „Autogenous healing of marine exposed concrete: Characterization and quantification through visual crack closure,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884615000630>. [Kasutatud 15. aprill, 2015].
- [4] E. Uusatalu, „Vee lisamisest betoonisegusse ehitusplatsil,“ 2001. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.betoon.org/wp-content/themes/betoon/pdf/EH01_9_2_001.pdf. [Kasutatud 14 aprill, 2015].
- [5] K. Sisomphon, „Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946512000133#>. [Kasutatud 15. aprill, 2015].
- [6] Tallinna Tehnikaülikooli Ehitustootluse Instituudi ehitusmaterjalide teadus- ja katselaboratoorium, Surve all oleva vee sissetungimissügavuse määramine betoonisse; Betooni veepidavuse W 20 määramine: Katseprotokoll, Tallinn, 2014, 2015.
- [7] Eesti Betooniühing, „Ehitisse paigaldatavad betoonsegud,“ 2006. [Võrgumaterjal]. Available: http://betoon.org/wp-content/themes/betoon/pdf/JUHEND1_2006.pdf. [Kasutatud 18 aprill, 2015].
- [8] TTÜ Geoloogia Instituut, „Elektronmikroskoopia labor,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.gi.ee/index.php?page=74>. [Kasutatud 16 aprill, 2015].

- [9] EVS-EN 934-2:2009+A1 Betooni, mördi ja süstmördi keemilised lisandid. Osa 2: Betooni keemilised lisandid. Määratlused, nõuded, vastavus, tähistus ja sildistus, Eesti Standardikeskus, 2012.

LISAD

Lisa 1. 7-päevaselt tekitatud pragude sildamise protokoll

Lisa 2. 28-päevaselt tekitatud pragude sildamise protokoll

Lisa 1. 7-päevaselt tekitatud pragude sildamise protokoll

Lisa 2. 28-päevaselt tekitatud pragude sildamise protokoll