

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
EHITUSE JA ARHITEKTUURI INSTITUUT
EHITUSMATERJALIDE TEADUS- JA KATSELABORATOORIUM

Põlevkivituhk betoonilisandina – baasuuringud

ARUANNE

Projekti nr. 17942 // KIK20034

Lepingu nr. 3-2-1/10614-6/2020

Projekti toetab Keskkonnainvesteeringute Keskus

Tallinna Tehnikaülikool - Enefit Energiatootmine AS – HC Betoon AS

Projekti juht: Tiina Hain

Sisukord

Sissejuhatus	3
1. Kasutatud põlevkivituhkade loetelu ja tähistused.	4
2. Sideainete ja betoonide loetelu ja tähistused	5
3. Katsemeetodid	6
4. Katsed materjalidega	7
4.1 Põlevkivituhkade omadused	7
4.2 Sideainete füüsilised ja mehaanilised omadused	7
4.3 Täitematerjalide füüsilised omadused	8
5. Katsed betoonidega	10
5.1 Värske betoonisegu omadused	10
5.2 Betooni survetugevus	10
5.3 Betooni paindetugevus	15
5.4 Betooni külmakindlus	16
5.5 Betoonide mahumuutused	20
5.6 Betooni pind ja värvus	22
6. Pilootkatsetel kasutatud materjalide ja betoonide omaduste katsetamine ehitusmaterjalide katselaboris	23
6.1 Katsed tuhkadega	23
6.2 Katsed täitematerjalidega	23
6.3 Katsed betoonidega	24
6.3.1 Pilootbetoonide külmakindlus	24
6.3.2 Pilootbetoonide mahumuutused	25
7. Betoonitehases läbiviidud tööstusliku tootmise katsed	26
7.1 Katsete kirjeldus	26
7.2 Tootmises kasutatud materjalid	26
7.3 Katsete läbiviimine	27
7.4 Katsetulemused	27
7.4.1 Katsed CFB filtrituhaga	27
7.4.2 Katsed CFB „Auvere“ tuhaga	31
7.4.3 Katsed CFB „Bio“ tuhaga	33
7.5 Kokkuvõtte tööstusliku tootmise katsetest	34
8. Kokkuvõtte ja järeldused	37

Uuringu eesmärgiks oli uurida töödeldud keevkihtkatla (edasi CFB) põlevkivituhkade kasutamise võimalusi betooni tootmisel.

CFB tuhk tekib Narva Eesti Elektrijaamades umbes 1 mln. t. aastas, mis hetkel peamiselt ladestatakse jäätmetena. Tuha ladestamine avaldab negatiivset mõju keskkonnale, kuna tuha ladestamisel toimub õhu, pinnase ja vee saastumine.

Eelnevate uuringute tulemused näitavad CFB tuha kasutuspotentsiaali sideainena tsemendi ja betooni tootmisel. Samas, võrreldes varem kasutatud tolmpõletustuhkadega, käitub CFB tuhk tsemendi- ja betoonisegudes teistmoodi, mille tulemusena on betooni survetugevus madalam võrreldes varasemate tuhkadega tehtud betooniga. Keevkihtkatla põlevkivituhkasid iseloomustab putsolaanne kivinemistüüp ja betooni veevajaduse tõus putsolaanset tüüpi sideainete koostisosade kasutamisel.

Uuringus lähtuti peamiselt kahest aspektist:

- kuidas muutuvad CFB tuha omadused jahvatamisel ning
- kuidas mõjub jahvatatud CFB tuhk betooni survetugevusele ja püsivusomadustele.

Senine praktika põlevkivituha kasutamisel on olnud kas komposiitsemendi koostisosana, kus see lisatakse tsemendi tootmisel tsemendiklinkri jahvatamisel. Või on lisatud betoonitööstuses jahvatamata ehk originaalkujul. Puuduseks jahvatamata põlevkivituhal on madal survetugevus. Keevkihtkatla põletustemperatuuril (~850°C) ei teki tuhas piisavalt tsementeeruvaid mineraale, mis viib betoonisegule CFB tuha lisamisel lõpptoote survetugevuse langemisele. Turuvajadus madala klassiga betooni ja betoonitoodete järgi on väike. Varasemate uuringute tulemusena on selgunud, et jahvatamisel võib tuha survetugevus suurendada 5 MPa-st kuni 30 MPa-ni. Nende andmete alusel oletati, et jahvatatud CFB tuhal võib olla väga suur potentsiaal betooni tootmisel asendada osaliselt tsementi ja tõstatati vajadus käesolevaks uurimistööks. Senini ei ole veel teostatud ühtegi uuringut, kus oleks vaadeldud jahvatatud CFB tuha omadusi ja mõju betooni omadustele, kui jahvatatud tuhka lisatakse tsemendile ja täitematerjalidele betooni segamise protsessis.

Et uuring oleks jätkusuutlik ja praktikas otseselt kasutatav, teostati katsed ja betoonide uuringud nii laboris kui ka betoonitehases. Koostööpartneriteks olid Enefit Energiatootmine AS (kogus CFB põlevkivituha proovid labori- ja pilootkatseteks) ja HC Betoon AS, mille tehases teostati pilootkatsed jahvatatud tuhaga.

CFB tuhad kogus ja tarnis Tallinna Tehnikaülikooli ehitusmaterjalide laborisse Enefit Energiatootmise esindaja. Tsement ja täitematerjalid tarniti betoonitehases HC Betoon AS-i poolt, et teostada laborikatsed samade materjalidega, mis on kasutusel ka tööstuslikud pilootbetoonisegud valmistanud tehases.

Tuhad jahvatati laboris laboratoorses kuulveskis, määrati betooni valmistamiseks kasutatavate materjalide omadused. Seejärel valmistati laboris erinevad betoonisegud, kus tsement asendati 10% kuni 30% ulatuses tuhaga. Kivistunud betoonil määrati peamised parameetrid nagu survetugevus, külmakindlus, mahumuutused jm.

Tavapäraselt teostatakse materjalide uuringud laboratoorsetel katsetustel laboratoorsete seadmetega ja laboratoorsetes tingimustes. Selleks, et võrrelda laborikatsete ja tööstuses saadud tulemusi ning kontrollida laboritulemuste rakendatavust reaalsete toodete tootmisel, teostati pilootkatsed HC Betoon betoonitehases. Antud uurimistöo suurim väärtus seisnebki selles, et lisaks laboratoorsetele katsetustele valmistati betoonisegud tööstuslikult jahvatatud tuhaga tööstuslikult betoonitehases ja tarniti valmistatud betoonisegud reaalsetele objektidele. Põlevkivituhad tarniti Kunda Nordic Tsemendi tehasesse, kus need jahvatati ja seejärel tarniti HC Betooni betoonitehasesse.

Betoonitehases valmistatud pilootbetoonisegudel uuriti erinevaid omadusi, mis mõjutavad betoonisegu valmistamist, transportimist jm. Samuti katsetati kivistunud betooni omadusi nii betoonitehase laboris kui Tallinna Tehnikaülikooli ehitusmaterjalide laboris.

1. Kasutatud põlevkivituhkade loetelu ja tähistused.

Uuringu lähteülesande püstitamisel lähtunud võimalike tuhakoostiste valikut tuli töö käigus korrigeerida vastavalt sellele, millist tuhka oli võimalik saada ja mida tuhatootja pidas uurimise seisukohalt perspektiivikamaks ja otstarbekamaks.

Tuha proovid, mis saadeti Tallinna Tehnikaülikooli teadus- ja katselaborisse:

1. Plaan: CFB tuhk (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-1), **CFB P-or**. Tegelik: CFB tuhk (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-2), EDASI **CFB P-or**. Kütuse segu 90% põlevkivi+10% gaas.
2. Plaan: CFB tuhk + bio (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-2), EDASI **CFB B-or**. Tegelik: CFB tuhk + **gaas** (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-1), EDASI **CFB G-or**. Katsete läbiviimise ajal otsustati plokis bio mitte kasutada, seega oli võimalik saada proovid ainult gaasiga. Kütuse segu oli 50% põlevkivi + 50% uttegaas.
3. Plaan: CFB tuhk Auvere (Auvere jaama elektrifiltri I välja tuhk), EDASI **CFB A-or**. Tegelik: CFB tuhk Auvere (Auvere jaama elektrifiltri I välja tuhk), EDASI **CFB A-or**. Kütuste segu: põlevkivi 50%+gaas 9%+biomass 40%.

Tuha proovid, mis saadeti jahvatamisele Kunda Nordic Tsemendi tehasesse ja jahvatatult betoonitehasesse:

1. CFB tuhk (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-2), **CFB P**. Kütuse segu 90% põlevkivi+10% gaas. Proovi võtmise kuupäev 25.02.2021.
2. CFB tuhk (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-1), EDASI **CFB B**. Kütuse segu põlevkivi 69%+ biomass 11%+ 20% gaas. Proovi võtmise kuupäev 01.04.2021.
3. CFB tuhk Auvere (Auvere jaama elektrifiltri I välja tuhk), EDASI **CFB A**. Kütuste segu: põlevkivi 60%+gaas 15%+biomass 25%.

2. Sideainete ja betoonide loetelu ja tähistused

Sideained, nendega laboratooriumis valmistatud betoonide tähistused lähtuvalt kasutatud sideainest ja sideaine koostised betoonis

Portlandtsement CEM I 42,5R Kunda

- Etalon - CEM I (CEM I 100%)
- Etalon KK - CEM I (CEM I 100%) külmakindluse katseks

CFB tuhk Auvere (Auvere jaama elektrifiltri I välja tuhk)

- CFB A-or 15% (CEM I 85% + originaaltuhk 15% tsemendi massist)
- CFB A-j 15% (CEM I 85% + jahvatatud tuhk 15% tsemendi massist)
- CFB A-j 15% KK - (CEM I 85% + jahvat. tuhk 15%) külmakindluse katseks

CFB tuhk (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-2)

- CFB P-or 15% (CEM I 85% + originaaltuhk 15% tsemendi massist)
- CFB P-j 15% (CEM I 85% + jahvatatud tuhk 15% tsemendi massist)
- CFB P-j 10% (CEM I 90% + jahvatatud tuhk 10% tsemendi massist)
- CFB P-j 20% (CEM I 80% + jahvatatud tuhk 20% tsemendi massist)
- CFB P-j 30% (CEM I 70% + jahvatatud tuhk 30% tsemendi massist)
- CFB P-j 15% KK - (CEM I 85% + jahvat. tuhk 15%) külmakindluse katseks
- CFB P-j 30% KK - (CEM I 70% + jahvat. tuhk 30%) külmakindluse katseks

CFB tuhk + gaas (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-1)

- CFB G-or 15% (CEM I 85% + originaaltuhk 15% tsemendi massist)
- CFB G-j 15% (CEM I 85% + jahvatatud tuhk 15% tsemendi massist)
- CFB G-j 15% KK - (CEM I 85% + jahvat. tuhk 15%) külmakindluse katseks

Betoonitehases valmistatud betoonide tähistused lähtuvalt kasutatud sideainetest, nende tähistused ja koostised

Portlandtsement CEM I 42,5R Kunda

- Etalon - CEM I (CEM I 100%)
- Etalon KK - CEM I (CEM I 100%) külmakindluse katseks

CFB tuhk (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-2)

- CFB P 15% (CEM I 85% + jahvatatud tuhk 15% tsemendi massist)
- CFB P 30% (CEM I 70% + jahvatatud tuhk 30% tsemendi massist)
- CFB P 10% KK- (CEM I 90% + jahvat. tuhk 10%) külmakindluse katseks

CFB tuhk (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-1)

- CFB B 15%

CFB tuhk Auvere (Auvere jaama elektrifiltri I välja tuhk)

- CFB A 15%

3. Katsemeetodid

Katsete teostamisel lähtuti kehtivates standardites kirjeldatud katsemeetoditest.

Tuhkade mahupüsivus määrati standardkonsistentse taignaga vastavalt EVS-EN 196-3 nõuetele. Tuhapasta valmistamiseks võeti 500 g tuhka ja vastav kogus vett. Mahupüsivuse katse peamiseks eesmärgiks oli määrata kindlaks sidumata kaltsium- ja magneesiumoksiidi hüdratatsioonist tingitud paisumise oht. Mahupüsivus määratakse jälgides standardkonsistentsiga tsemendipasta mahu suurenemist katse läbiviimisel Le Chatelier' seadmega. Standardkonsistentsiga tsemendipasta avaldab kindlat vastupanu standardse varda sissevajumisele. Vajalik veehulk määratakse katsetades sissevajumist eri veesisaldusega pastadesse.

Tuhkmörtide kivinemiskineetika uurimiseks valmistati standardi EVS-EN 196-1 kohaselt katsekehad mõõtmetega (40 x 40 x 160) mm mördist seguvahekorraga 1 : 3 (tuhk : CEN standardliiv). Vesi/tuhk tegur 0,50. Vormitud ja tihendatud katsekehad kivinesid 48 h vormides niiskes kambris suhtelisel niiskusel > 95 % ja temperatuuri (20 ± 2) °C juures. Pärast 48 h kivinemist katsekehad vabastati vormidest ja asetati edasi kivinema niiskesse kambrisse suhtelise niiskuse > 95 % ja temperatuuri (20 ± 2) °C juures katsetamiseni.

Sideainete tihedus, eripind ja terastiku koostis määrati standardi EVS-EN 196-6, CaO_{vaba} sisaldus EVS-EN 451-1, kloori sisaldus ja kuumutuskaod EVS-EN 196-2 kohaselt.

Betoonide valmistamiseks valmistati materjalid ette, killustik kuivatati. Tuhk jahvatati laboratoorses kuulveskis 3 kg kaupa, à 3 tundi.

Betoonisegu segamine toimus laboratoorses betoonisegistis, kuhu lisati kõigepealt täitematerjal, sideained ja seejärel vesi. Et saada soovitud töödeldavusega betoonid vähema vee hulga juures, lisati plastifikaator. Erinevate betoonisegude valmistamisel oli eesmärgiks saada võrdse töödeldavusega segud. Töödeldavus määrati koonuse vajumise järgi (EVS-EN 12350-2). Betooni tihedus määrati EVS-EN 12350-6 ja õhusisaldus EVS-EN 12350-7 kohaselt. Betoonisegu vormiti järgides EVS-EN 12390-2 nõudeid. Vormides (mis vastavad EVS-EN 12390-1 nõuetele) hoiti katsekehi 24 h, seejärel vabastati vormist ja asetati kivinema vette (20±2) °C, kus hoiti kuni katsetamiseni.

Kivistunud betooni tugevus vastavatel vanustel teostati „Matest“ survepressiga EVS-EN 12390-3 kohaselt. Survetugevus määrati katsekehadega (100x100x100) mm.

Kivistunud betooni tihedus määrati EVS-EN 12390-7 järgi.

Katsekehade paindetõmbetugevus katsetati prismadega (100x100x400) mm „Matest“ paindepressiga EVS-EN 12390-5 kohaselt.

Normaalbetooni külmakindluse katsed teostati vastavalt standardile EVS 814:2020. Katsekehade külmutamine ja sulatamine toimus standardis etteantud režiimi kohaselt õhu sundtsirkulatsiooniga kliimakambris. Külmutusaineks katsetataval pinnal oli 3 mm paksune 3 % NaCl vesilahuse kiht. Ühe külmutus-sulatustsükli kestuseks oli 24 tundi. Pärast 7, 14, 28, 42 ja 56 tsüklit määrati katsekeha pealispinnalt murenenud materjali kogus. Külmakindluse hindamiseks arvutati nelja katsekeha keskmine massikadu pinnaühiku kohta.

Betooni mahumuutused määrati betoonkatsekehadega (70x70x280) mm. Otstes reeperitega varustatud katsekehade pikkusi mõõdeti katsekellaga.

4. Katsed materjalidega

4.1 Põlevkivituhkade omadused

Tuhksideaine esimeseks iseloomulikuks omaduseks on tema võime veega reageerides hüdratatsioonireaktsioonide tardumise ja kivinemise käigus moodustada tehiskivi. Nende reaktsioonide iseloom ja kulgemise kiirus erinevad oluliselt.

Tabel 1 Tsemendi ja originaaltuhkade keemilised ja füüsilised omadused

Sideaine	Tihedus, g/cm ³	Eripind, m ² /kg	CaO _v , %	Cl, %	Kuumutuskadu, %			Terastiku koostis, %		
					105 °C	105-375 °C	375-975 °C	90µm	63µm	32 µm
CEMI42,5R	3,17	424	-	-	0,09	0,31	1,97	0,1	1,3	16,5
CFB A-or	2,92	602	18,53	0,29	0,02	0,03	5,82	0,1	1,0	9,9
CFB P-or	2,83	332	10,54	0,26	0,02	0,01	3,35	2,9	6,3	20,8
CFB G-or	2,78	326	10,70	0,30	0,01	0,03	3,69	5,8	7,6	21,8

Põlevkivituhad jahvatati laboratoorses kuulveskis. Jahvatuse kestus 3 tundi.

Tabel 2 Jahvatatud tühkade keemilised ja füüsilised omadused

Sideaine	Tihedus, g/cm ³	Eripind, m ² /kg	CaO _v , %	Terastiku koostis, %		
				90µm	63µm	32 µm
CFB A-j	2,92	1092	19,18	0,0	0,0	3,2
CFB P-j	2,83	695	10,53	0,0	0,2	4,5
CFB G-j	2,78	727	10,68	0,0	0,1	4,3

4.2 Sideainete füüsilised ja mehaanilised omadused

Tsemendi ja põlevkivituhkade normaalkonsistents iseloomustab nende sideainete veevajadust ehk kindla töödeldavusega sideainepasta saamiseks vajalikku vee hulka %-des sideaine hulgast.

Survetugevus EVS-EN 196-1 kohaselt valmistatud katsekehade mõõtmetega (40x40x160) mm mördist seguvahekorraga 1 : 3 (sideaine : CEN standardliiv). Vesi/sideaine tegur 0,50. Tsementmördist katsekehad kivistati vees (20 ± 2) °C ja tuhmörtide katsekehad vee kohal suhtelise niiskuse > 95 % ja temperatuuri (20 ± 2) °C juures. Survetugevuse katseks katsekehad eelnevalt poolitati. Katsetulemused on toodud tabelis 3.

Tabel 3 Tsement- ja tuhmörtide tugevused 28 päevaselt

Sideaine	Veevaja- dus, %	Paisumine, mm	Survetugevus, 28 päeva, N/mm ²						
			Üksiktulemid						Keskmine
CEM I 42,5R	27,5	0,5	53,6	53,6	53,3	53,8	52,7	53,5	53,4
CFB A-or	39,0	2,0	4,1	4,1	4,1	4,2	4,2	4,0	4,1
CFB A-j	32,5	0,5	15,4	15,1	14,9	14,4	14,6	14,3	14,8
CFB P-or	35,0	1,0	5,8	6,2	5,6	5,9	5,9	5,6	5,9
CFB P-j	29,0	0,5	22,2	21,5	22,3	21,5	21,4	21,8	21,8
CFB G-or	35,0	1,5	5,3	5,6	5,4	5,4	5,3	5,4	5,4
CFB G-j	28,5	1,0	31,2	31,4	30,9	31,4	31,5	32,2	31,4

Originaaltuhkade väiksematest eripindadest (tabel 1) ja seega suurematest terasuurustest ning väiksemast puistetihedusest tulenevalt on originaaltuhkade veevajadused suuremad kui jahvatatud tuhkal. Fotolt 2 on näha, et originaaltuhaga tuhkmördist katsekehade struktuur on oluliselt koredam kui jahvatatud tuhaga tuhkmördist katsekehadel (foto 3). Kõige suurem on CFB A-or tuha veevajadus. Samuti on jahvatatud tuhkadest kõrgeim veevajadus CFB A-j tuhal.

Le Chatelier paisumised (tabel 3) on originaaltuhkadel 1,0...2,0 mm ja jahvatatud tuhkadel 0,5...1,0 mm. Erinevused marginaalsed, rahuldavad nõudeid (< 10 mm) ja seega võib eeldada, et uuritud põlevkivituhaga valmistatud betoonidel mahupaisumisest tingitud pragunemise ohtu ei ole.



Foto 1 Tuhkmördist katsekehad vesivannil. Kivistamine kaanega kaetult.



Foto 2 Originaaltuhaga valmistatud tuhkmördist katsekehad

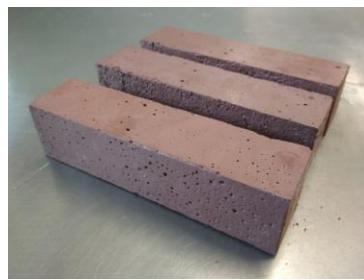


Foto 3 Jahvatatud tuhaga valmistatud tuhkmördist katsekehad

Fotodelt 1...3 on selgelt näha CFB tuhka jahvatamisega kaasnev nähtus, kus jahvatamise tulemusel tuhad värvuvad punakaks. Samuti on punaka värvusega nendega valmistatud tuhkmördid. Värvuse intensiivsus on korrelatsioonis mördi niiskuse sisaldusega – niiskusesisalduse tõusuga värvus intensiivistub, katsekehade väljakuivamise protsessis värvitoon muutub heledamaks.

Auvere tuha CFB A-or algne eripind $602 \text{ m}^2/\text{kg}$ (tabel 1) oli suurem kui teistel originaaltuhkadel. Seetõttu oli ka jahvatatud CFB A tuha eripind võrdse jahvatuskestusega jahvatusel kõige kõrgem. Kuid hoolimata ca 1,5 korda suuremast eripinnast on CFB A-j tuhkmördi 28 päevane survetugevus teistest jahvatatud tuhkadest madalam. CFB G tuha jahvatamine tõstab tuhkmördi survetugevust ligi kuus korda – 5,4 MPa pealt 31,4 MPa-ni.

4.3 Täitematerjalide füüsilised omadused

Betoonide valmistamisel laboris valiti jämedaks täitematerjaliks graniitkillustik, kuna uurimistöö eesmärgiks oli uurida põlevkivituha jahvatuse mõju. Graniitkillustiku mõju betooni omaduste muutumisele on tunduvalt väiksem kui paekivikillustiku võimalikud kõrvalmõjud betooni omadustele.

Jämetäitematerjal: Tardkivi, fraktsiooniga 5,6/16 mm, karjäär Jelsa, päritolu Norra

Peentäitematerjal: Liiv 0/4 mm, segatud fraktsioon 0/2+0/4 mm, karjäär Männiku, Silikaat AS

Täitematerjalidel määrati peamised füüsilised omadused, mis iseloomustavad nende kvaliteeti ja mida kasutati lähteandmetena betoonikoostiste projekteerimisel. Killustiku ja liiva katsetulemused on toodud tabelites 4 ja 5.

Tabel 4 Täitematerjalide füüsilised omadused

Omadus	Liiv	Graniitkillustik
Puistetiheus, Mg/m ³	1590	1530
Näivtiheus, Mg/m ³	2,63	2,72
Huumuse sisaldus	puhas	-
Tolmu ja peenosiste sisaldus, %	0,5	1,8

Tabel 5 Täitematerjalide terastikulised koostised

Sõela ava, mm	Sõela jääk, %			
	Liiv		Graniitkillustik	
	Osajääk, %	Täisjääk, %	Osajääk, %	Täisjääk, %
20	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	2,6	2,6
8	0,3	0,3	53,8	56,4
5,6	0,3	0,6	27,3	83,7
4	0,2	0,8	9,0	92,7
2	1,9	2,7	4,0	96,7
1	10,5	13,2	0,4	97,1
0,5	26,3	39,5	0,4	97,5
0,25	48,5	88,0	0,4	97,9
0,125	10,6	98,6	0,2	98,1
0,063	0,9	99,5	0,1	98,2
<0,063	0,5	100,0	1,8	100,0

5. Katsed betoonidega

5.1 Värske betoonisegu omadused

Betoonisegu segamine toimus laboratoorses betoonisegistis, kuhu lisati kõigepealt täitematerjal, sideained ja seejärel vesi. Et saada soovitud töödeldavusega betoonid vähema vee hulga juures, lisati plastifikaator Carboxyment R3K 0,63 % tsemendi massist. Erinevate betoonisegude valmistamisel oli eesmärgiks saada võrdse töödeldavusega segud koonuse vajumiga (15 ± 1) cm.

Tabel 6 Laboris valmistatud betoonide koostised ja värske betoonisegu omadused.

Sideaine	Sideaine hulk betoonis, kg/m ³	Vesi/tsement tegur	Värske betoonisegu		
			Tihedus, kg/m ³	Koonuse vajumine, cm	Õhusisaldus, %
Etalon	305	0,62	2410	15	2,5
CFB A-or 15 %	305	0,64	2400	16	2,1
CFB A-j 15 %	305	0,65	2430	14	2,7
CFB P-or 15 %	305	0,64	2430	16	2,4
CFB P-j 15 %	305	0,62	2430	16	2,3
CFB P-j 10 %	305	0,62	2440	16	2,0
CFB P-j 20 %	305	0,62	2430	15	2,7
CFB P-j 30 %	305	0,64	2390	15	3,3
CFB G-or 15 %	305	0,65	2420	15	1,6
CFB G-j 15 %	305	0,63	2410	15	2,4

Sideaine (tsement + põlevkivituhk) hulgaks valiti kõigi betoonide puhul 305 kg/m³. Peent ja jämedat täitematerjali lisati vastavalt: liiva 46 % ja graniitkillustikku 54 %. Tsemendi asendamine jahvatatud tuhkadega ühegi tuha ega erinevate tuhahulkade puhul betooni õhusisaldust oluliselt ei mõjutanud, see on näha nii õhusisaldustest kui ka tiheduse näitajatest. CFB P-j 30 % sideainega valmistatud betooni õhusisaldus on kõige suurem ja tihedus väiksem, kuid vahed teiste betoonide tulemustega on nii väikesed, et võib väita, et tuha, kui betooni koostiskomponendi lisamise mõju betooni õhusisaldusele ja tihedusele on minimaalne.

5.2 Betooni survetugevus

Valmistati laboris erinevad betoonisegud, kus tsement asendati 10% kuni 30% ulatuses originaal- või jahvatatud tuhaga. Etaloniks on CEM I 42,5R tsemendiga ilma põlevkivituhata valmistatud betoon. Survetugevuse määramiseks valmistati betoonkuubid (100x100x100) mm. Pärast vormimist ja tihendamist hoiti 24 h vormis, seejärel vabastati vormist ja kivistati vees (20 ± 2) °C katsetamiseni. 2, 7, 28 ja 56 päevaselt katsetati betoonkuubid survetugevusele „Matest“ survepressiga. Survetugevused vastavatel vanustel ja kivistunud betoonkuupide tihedused on esitatud tabelis 7 ja joonisel 1.

Tabel 7 Betoonide 2, 7, 28 ja 56 päevased survetugevused

Vanus, päeva	Mõõtmed, mm			A, mm ²	Mass, g	Tihedus, kg/m ³	Surve- jõud, kN	Survetugevus, MPa	
	a	b	h					üksik	keskm
Etalonbetoon									
2	100,0	99,0	100,5	99,0	2,408	2420	201	20,3	21,1
	100,0	100,0	100,5	100,0	2,395	2380	210	21,0	
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,378	2400	217	21,9	
7	100,0	99,5	100,0	99,5	2,374	2390	351	35,3	35,5
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,414	2410	353	35,3	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,395	2400	358	35,8	
28	100,0	99,0	100,0	99,0	2,397	2420	415	41,9	41,4
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,393	2390	406	40,6	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,394	2390	417	41,7	
56	100,0	99,0	100,0	99,0	2,377	2400	434	43,8	43,0
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,365	2390	427	43,1	
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,353	2380	416	42,0	
CFB A-or 15%									
2	100,0	98,0	100,0	98,0	2,413	2460	150	15,3	15,7
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,408	2430	155	15,7	
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,403	2430	159	16,1	
7	100,0	100,0	100,0	100,0	2,444	2440	283	28,3	28,0
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,446	2450	273	27,3	
	100,0	99,0	101,0	99,0	2,441	2440	280	28,3	
28	100,0	99,0	100,0	99,0	2,419	2440	334	33,7	34,0
	99,0	100,0	100,5	99,0	2,430	2440	338	34,1	
	99,0	100,0	100,5	99,0	2,427	2440	339	34,2	
56	100,0	99,0	100,0	99,0	2,410	2430	361	36,5	36,1
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,431	2430	371	37,1	
	100,0	99,5	100,0	99,5	2,420	2430	344	34,6	
CFB A-j 15%									
2	100,0	99,0	100,0	99,0	2,422	2440	168	17,0	16,6
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,420	2420	161	16,1	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,411	2410	166	16,6	
7	100,0	100,0	100,0	100,0	2,424	2420	299	29,9	30,0
	100,0	100,0	100,5	100,0	2,448	2440	303	30,3	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,428	2430	299	29,9	
28	100,0	99,0	99,5	99,0	2,400	2440	350	35,4	36,5
	100,0	99,0	100,5	99,0	2,431	2440	358	36,2	
	99,5	99,5	100,0	99,0	2,424	2450	376	38,0	
56	100,0	99,0	100,0	99,0	2,423	2450	390	39,4	39,5
	100,0	99,5	100,0	99,5	2,420	2430	387	38,9	
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,424	2450	398	40,2	
CFB P-or 15%									
2	100,0	99,0	100,0	99,0	2,424	2440	164	16,6	16,6
	100,0	100,0	101,0	100,0	2,439	2420	162	16,2	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,443	2440	171	17,1	
7	100,0	99,0	100,0	99,0	2,405	2430	307	31,0	30,7
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,411	2440	298	30,1	
	100,0	98,5	100,0	98,5	2,400	2440	306	31,1	
28	100,0	100,0	100,5	100,0	2,438	2430	384	38,4	38,5
	100,0	100,0	100,5	100,0	2,436	2420	378	37,8	
	100,0	100,0	100,5	100,0	2,442	2430	392	39,2	
56	100,0	99,0	100,0	99,0	2,365	2390	417	42,1	41,2
	100,0	99,5	100,0	99,5	2,411	2420	408	41,0	
	100,0	99,5	100,0	99,5	2,403	2420	404	40,6	

Põlevkivituhk betoonilisandina – baasuuringud
Tallinna Tehnikaülikool 2021

Tabel 7 järg

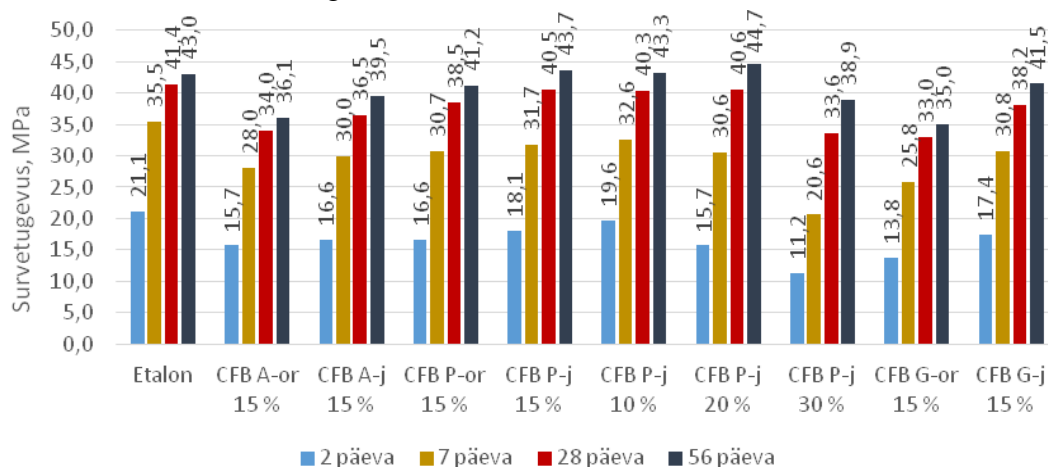
Vanus päeva	Mõõtmed, mm			A, mm ²	Mass, g	Tihedus kg/m ³	Survejõud, kN	Survetugevus, MPa	
	a	b	h					üksik	keskm
CFB P-j 15%									
2	100,0	98,0	100,0	98,0	2,411	2460	179	18,3	18,1
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,424	2450	179	18,1	
	100,0	99,0	101,0	99,0	2,432	2430	176	17,8	
7	100,0	99,0	100,0	99,0	2,419	2440	309	31,2	31,7
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,426	2450	322	32,5	
	100,0	99,5	100,0	99,5	2,438	2450	313	31,5	
28	100,0	100,0	100,0	100,0	2,454	2450	400	40,0	40,5
	100,0	100,0	101,0	100,0	2,464	2440	415	41,5	
	100,0	100,0	100,5	100,0	2,457	2440	400	40,0	
56	100,0	100,0	100,0	100,0	2,434	2430	427	42,7	43,7
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,441	2440	441	44,1	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,449	2450	443	44,3	
CFB P-j 10 %									
2	100,0	99,0	100,0	99,0	2,415	2440	193	19,5	19,6
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,431	2460	194	19,6	
	100,0	98,0	100,0	98,0	2,404	2450	194	19,8	
7	100,0	99,5	100,0	99,5	2,431	2440	330	33,2	32,6
	100,0	99,5	100,0	99,5	2,428	2440	321	32,3	
	100,0	99,5	100,0	99,5	2,432	2440	321	32,3	
28	100,0	100,0	100,0	100,0	2,445	2450	404	40,4	40,3
	100,0	99,5	100,0	99,5	2,426	2440	401	40,3	
	100,0	99,0	101,0	99,0	2,433	2430	398	40,2	
56	100,0	100,0	100,0	100,0	2,422	2420	426	42,6	43,3
	100,0	100,0	100,5	100,0	2,434	2420	433	43,3	
	100,0	100,0	100,5	100,0	2,432	2420	441	44,1	
CFB P-j 20%									
2	100,0	99,0	100,0	99,0	2,427	2450	156	15,8	15,7
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,429	2450	155	15,7	
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,414	2440	155	15,7	
7	100,0	101,0	100,0	101,0	2,449	2430	309	30,6	30,6
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,449	2450	300	30,0	
	100,0	99,5	100,0	99,5	2,424	2440	309	31,1	
28	100,0	99,0	100,0	99,0	2,419	2440	412	41,6	40,6
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,406	2430	397	40,1	
	100,0	99,0	101,0	99,0	2,402	2400	397	40,1	
56	100,0	99,0	100,0	99,0	2,398	2420	438	44,2	44,7
	100,0	99,0	100,5	99,0	2,411	2420	441	44,5	
	100,0	99,0	100,5	99,0	2,403	2420	450	45,5	
CFB P-j 30%									
2	100,0	98,0	100,0	98,0	2,393	2440	112	11,4	11,2
	100,0	98,0	100,0	98,0	2,399	2450	109	11,1	
	100,0	98,0	100,0	98,0	2,382	2430	108	11,0	
7	100,0	99,0	100,5	99,0	2,402	2410	200	20,2	20,6
	100,0	99,0	100,5	99,0	2,405	2420	204	20,6	
	100,0	99,0	100,5	99,0	2,411	2420	207	20,9	
28	100,0	99,0	100,0	99,0	2,406	2430	333	33,6	33,6
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,421	2420	337	33,7	
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,405	2430	333	33,6	
56	100,0	100,0	100,0	100,0	2,427	2430	394	39,4	38,9
	100,0	99,5	100,5	99,5	2,430	2430	386	38,8	
	100,0	100,0	100,5	100,0	2,438	2430	385	38,5	

Tabel 7 järg

Vanus päeva	Mõõtmed, mm			A, mm ²	Mass, g	Tihedus kg/m ³	Survejõud, kN	Survetugevus, MPa	
	a	b	h					üksik	keskm
CFB G-or 15%									
2	100,0	99,0	101,0	99,0	2,426	2430	135	13,6	13,8
	100,0	99,0	101,0	99,0	2,424	2420	140	14,1	
	100,0	99,0	101,0	99,0	2,404	2400	136	13,7	
7	100,0	98,0	100,0	98,0	2,394	2440	255	26,0	25,8
	101,5	99,0	100,0	100,5	2,408	2400	256	25,5	
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,399	2420	257	26,0	
28	100,0	98,0	100,0	98,0	2,380	2430	326	33,3	33,0
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,412	2430	329	33,2	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,421	2420	324	32,4	
56	100,0	100,0	100,5	100,0	2,441	2430	354	35,4	35,0
	100,0	100,0	101,0	100,0	2,449	2430	344	34,4	
	100,0	100,0	101,5	100,0	2,451	2420	351	35,1	
CFB G-j 15%									
2	100,0	99,0	100,0	99,0	2,422	2450	172	17,4	17,4
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,418	2440	170	17,2	
	100,0	99,0	99,5	99,0	2,398	2430	173	17,5	
7	100,0	100,0	100,0	100,0	2,443	2440	307	30,7	30,8
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,435	2440	303	30,3	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,433	2430	313	31,3	
28	100,0	100,0	100,0	100,0	2,424	2420	366	36,6	38,2
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,448	2450	390	39,0	
	100,0	99,0	100,5	99,0	2,449	2460	385	38,9	
56	100,0	99,0	101,0	99,0	2,434	2430	411	41,5	41,5
	100,0	100,0	101,0	100,0	2,457	2430	411	41,1	
	100,0	100,0	101,0	100,0	2,453	2430	420	42,0	

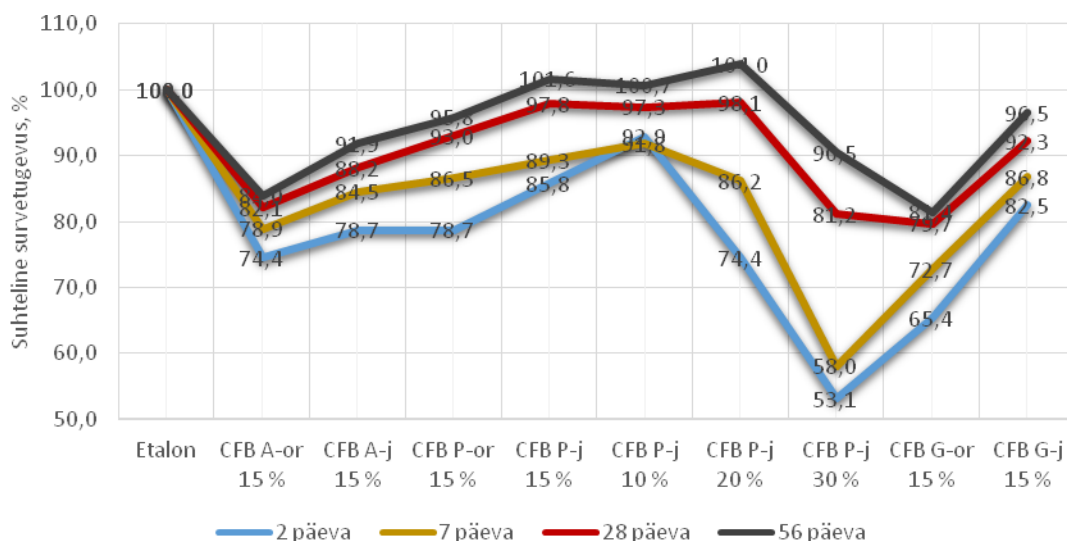
Tabelis 7 toodud survetugevuste keskmiste tulemuste alusel koostatud joonisel 1 on näha, kuidas muutuvad betoonide survetugevuste näitajad erinevatel vanustel.

Joonis 1 Betoonide survetugevused



Andmaks visuaalset ülevaadet katsetatud tuhade ja tuhakoostiste mõjust betoonide survetugevusele erinevatel vanustel on joonisel 2 esitatud betoonide suhtelised survetugevused etalonbetooniga võrreldes.

Joonis 2 Betoonide suhtelised survetugevused



Betoonid valmistati samasuguste koostistega. Peamiseks muutujaks sideaines tsemendi asendamine tuhaga. Seega kuna muud betooni tugevust mõjutavad tegurid nagu sideaine ja täitematerjalide hulgad, betoonisegu konsistentsid jm olid katsetatud betoonidel samad, siis saab tulemustest otseselt välja lugeda erinevate tuhkade ja nende hulkade mõju betooni tugevusele. Tsemendi asendamisel CFB tuhkadega kaasneb betooni survetugevuse langus. Kuna CFB tuhkade tardumine ja kivistumiskiirus on aeglasem kui portlandtsemendil, siis kõige enam langevad tuhka sisaldavate betoonide varased survetugevused. Nagu jooniselt 2 on täheldatav, siis suurim on CFB mõju 2 päevasele tugevuse langusele. Vanuse kasvades vahe hakkab kompenseeruma, survetugevuse vahe etalonbetooniga väheneb ja mõnede katsetatud betoonide 56 päeva vanuste CFB sisaldusega tuhkade tugevusnäitajad on ligilähedased etalonbetoonile või isegi ületavad seda.

Tabelis 3 on toodud tuhkmörtide 28 päevased tugevused, kus originaaltuhkade näitajad on väiksed, ca 5 MPa. See kajastub ka betooni tugevustes. 15% tsemendi asendamisel originaaltuhaga andis paremaid tulemusi CFB P-or tuhk. 2 päevane survetugevus langes ~21% ja 28 päevane ~7%. 15% CFB G-or lisamisel tuleb arvestada vastavalt ~35% ja ~20% survetugevuse langusega.

Jahvatatud tuha lisamisel betoonide survetugevused tõusevad võrreldes originaaltuhaga saadud tulemustega. CFB A-j 15% tuhaga betooni 2 päevane survetugevus on etalonist madalam 4,5 MPa võrra (langus ~21%), 28 päevane survetugevus jääb 12% väiksemaks.

CFG-j 15% betooni 2 päevane survetugevus on etalonist madalam 3,7MPa (17,5%) ja 28 päevane 3,2 MPa (7,7%).

Katsetatud tuhkadest kõrgeimad tulemusi andsid CFB P-j tuhaga betoonid. Tuha sisalduse tõusuga 10%-lt 30%-ni kõigil vanustel tugevusnäitajad langevad. Oluliselt kukuvad tugevused 30% CFB P-j sisalduse juures. Betoonide, mille varane tugevus ei ole oluline, valmistamisel võiks CFB P-j tuhka kasutada kuni 20% tsemendi massist. CFB P-j 20% betoonide varane survetugevus on etalonist väiksem 25%. Samas 28 päevane survetugevus on peaaegu lähedane etalonile (vahe 0,8 MPa) ja 56 päevaseks on etalonist 1,7 MPa kõrgem. Kuna 30% CFB tuha sisalduse juures tugevus kukub oluliselt, siis antud uuringu tulemuste alusel üle 20% ei ole soovitatav jahvatatud CFB tuhkaid betoonile lisada.

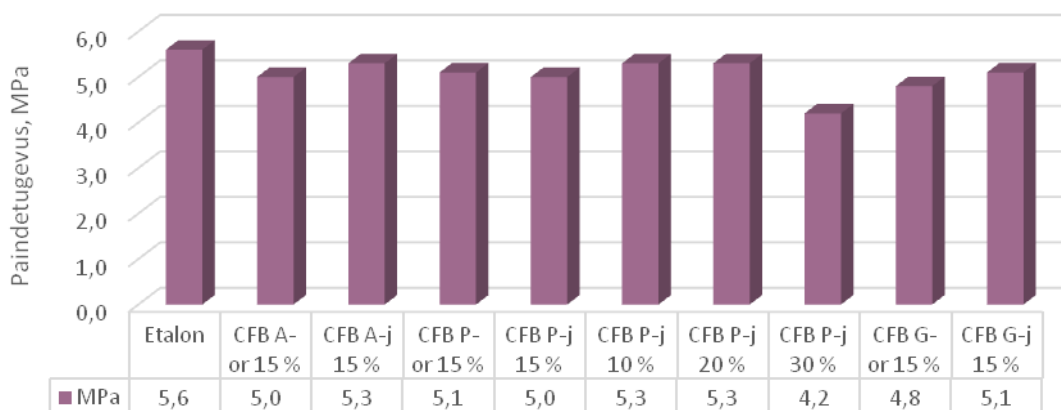
5.3 Betooni paindetugevus

Paindetugevused katsetati (10x10x400) mm betoonkatsekehade ga 28 päeva vanuselt. Tulemused on esitatud tabelis 8 ja joonisel 3.

Tabel 8 Betoonide paindetugevused 28 päeva vanuses

Tähis	Mõõtmed, mm		Tugede vahe, mm	F, kN	Paindetugevus, MPa	
	d1	d2			üksik	keskm
Etalon	100,0	102,0	300	17,0	4,9	5,6
	98,0	101,5	300	20,8	6,2	
	99,0	101,0	300	19,4	5,8	
CFB A-or 15%	99,0	101,0	300	17,3	5,1	5,0
	99,5	101,0	300	17,5	5,2	
	99,0	101,0	300	15,8	4,7	
CFB A-j 15%	98,5	101,0	300	19,4	5,8	5,3
	101,0	102,0	300	18,6	5,3	
	99,5	101,5	300	16,4	4,8	
CFB P-or 15%	99,0	101,5	300	17,4	5,1	5,1
	98,0	102,0	300	17,4	5,1	
	100,0	102,0	300	17,8	5,1	
CFB P-j 15 %	100,0	102,0	300	16,2	4,7	5,0
	100,0	101,0	300	17,5	5,1	
	100,0	101,5	300	17,6	5,1	
CFB P-j 10 %	99,0	101,0	300	19,4	5,8	5,3
	100,0	102,0	300	17,5	5,0	
	100,0	101,5	300	17,8	5,2	
CFB P-j 20 %	99,5	101,0	300	16,8	5,0	5,3
	100,0	101,0	300	17,9	5,3	
	99,5	101,0	300	18,6	5,5	
CFB P-j 30 %	99,0	101,5	300	14,0	4,1	4,2
	100,0	102,0	300	15,5	4,5	
	99,0	101,5	300	13,5	4,0	
CFB G-or 15%	100,0	101,5	300	17,3	5,0	4,8
	100,0	102,0	300	15,8	4,6	
	99,5	101,0	300	15,8	4,7	
CFB G-j 15%	100,0	102,0	300	16,1	4,6	5,1
	99,5	101,5	300	18,7	5,5	
	100,0	102,0	300	17,8	5,1	

Joonis 3 Betoonide 28 päevased paindetugevused



Betoonide paindetugevustes olulisi erinevusi ei ole. Kuni 20 %-line tuhasisaldus, nii originaal- kui ka jahvatatud tuhkadega, betoonide paindetugevust ei mõjuta. Langeb paindetugevus betoonis tsemendi asendamisel 30% CFB tuhaga.

5.4 Betooni külmakindlus

Betoonide külmakindluse määramiseks valmistati eraldi betoonisegud. Lisati õhku manustavat lisandit REBALit LP40. Õhu sisalduse suurenemine betoonis tõstab betooni külmakindlust, samas kuna langeb survetugevus, suurendati tsemendi kogust.

Plastifikaatorit Carboxyment R3K lisati 0,65 %.

Õhku manustavat lisandit REBALit LP40 0,50 %

Peent ja jämedat täitematerjali vastavalt: liiva 41 % ja graniitkillustikku 59 %.

Tabel 9 Külmakindluse katseks valitud betoonide koostised ja värske betoonisegu omadused.

Sideaine	Sideaine hulk betoonis, kg/m ³	Vesi/tsement tegur	Värske betoonisegu		
			Tihedus, kg/m ³	Koonuse vajumine, cm	Õhusisaldus, %
Etalon	380	0,44	2340	16	7,9
CFB A-j 15 %	380	0,46	2350	16	6,4
CFB P-j 15 %	380	0,44	2360	16	6,3
CFB P-j 30 %	380	0,45	2340	16	7,9
CFB G-j 15 %	380	0,44	2360	15	6,2

Tabel 10 Külmaskindluse katseks valmistatud betoonide 28 päevased survetugevused

Vanus, päeva	Mõõtmed, mm			A, mm ²	Mass, g	Tihedus, kg/m ³	Survejõud, kN	Survetugevus, MPa	
	a	b	h					üksik	keskm
Etalon	100,0	100,0	100,5	100,0	2,320	2310	501	50,1	50,4
	100,0	100,0	100,5	100,0	2,310	2300	498	49,8	
	100,0	100,5	100,0	100,5	2,311	2300	517	51,4	
CFB A-j 15 %	100,0	99,5	100,0	99,5	2,325	2340	451	45,3	44,8
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,352	2350	443	44,3	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,340	2340	448	44,8	
CFB P-j 15 %	100,0	100,0	100,0	100,0	2,277	2280	485	48,5	48,3
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,293	2290	486	48,6	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,284	2280	477	47,7	
CFB P-j 30 %	100,0	100,0	100,0	100,0	2,347	2350	394	39,4	40,4
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,355	2360	407	40,7	
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,343	2370	406	41,0	
CFB G-j 15 %	100,0	100,0	100,0	100,0	2,317	2320	454	45,4	45,4
	100,0	99,0	100,0	99,0	2,305	2330	447	45,2	
	100,0	100,0	100,0	100,0	2,323	2320	456	45,6	

Normaalbetooni külmaskindluse katsed teostati vastavalt standardile EVS 814:2020. Katsekehade külmutamine ja sulatamine toimus standardis etteantud režiimi kohaselt õhu sundtsirkulatsiooniga kliimakambris. Külmutusaineks katsetataval pinnal oli 3 mm paksune 3 % NaCl lahuse kiht. Ühe külmutus-sulatustsükli kestuseks oli 24 tundi. Pärast 7, 14, 28, 42 ja 56 tsüklit määrati katsekeha pealispinnalt murenenud materjali kogus. Külmaskindluse hindamiseks arvutati nelja katsekeha keskmine massikadu pinnaühiku kohta. Kõik katsetulemused on esitatud tabelis 11 ja keskmised massikaod pärast 28 ja 56 tsüklit joonisel 4.

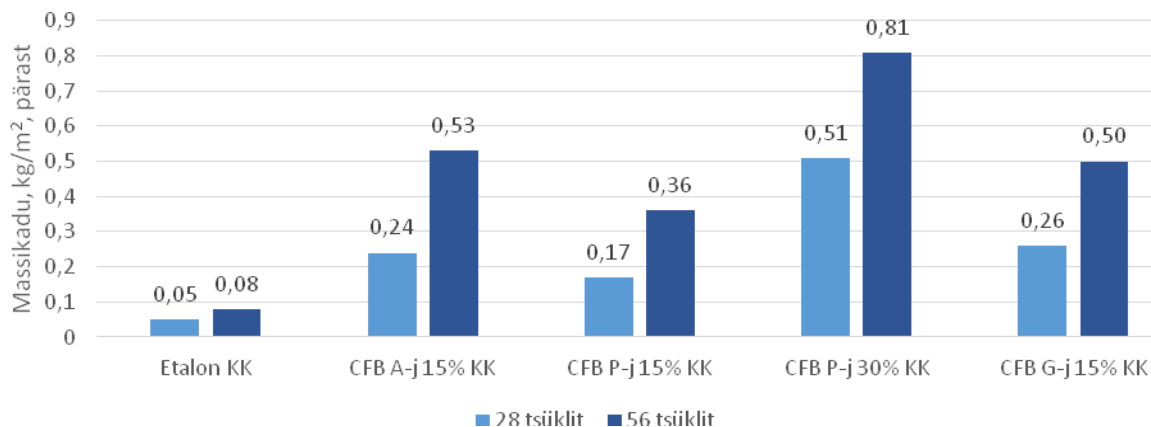
Tabel 11 Betoonide külmaskindlused massikao järgi 3% NaCl lahuses

Proovi jrk.nr.	Mõõtmed, mm			A, cm ²	Massikadu g / (kg/m ²) pärast tsükleid				
	a	b	h _{keskm}		7	14	28	42	56
Etalon KK									
1	150,0	150,0	50,6	225,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3
					0,02	0,02	0,04	0,06	0,06
2	146,5	150,0	50,4	219,8	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4
					0,02	0,04	0,06	0,08	0,08
3	147,5	150,0	50,9	221,3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
					0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
4	149,0	150,0	50,3	223,5	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3
					0,00	0,02	0,04	0,04	0,06
				kesk	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4
					0,02	0,03	0,05	0,07	0,08
CFB A-j 15% KK									
1	147,0	150,0	49,8	220,5	0,1	0,3	0,9	1,4	2,3
					0,02	0,06	0,18	0,28	0,46
2	146,0	150,0	50,5	219,0	0,2	0,5	1,1	1,8	2,8
					0,04	0,10	0,22	0,36	0,55
3	147,0	150,0	50,0	220,5	0,2	0,6	1,3	1,8	2,8
					0,04	0,12	0,26	0,36	0,56
4	147,0	149,0	49,8	219,0	0,3	0,6	1,4	2,0	2,8
					0,06	0,12	0,28	0,40	0,56
				kesk	0,2	0,5	1,2	1,8	2,7
					0,04	0,10	0,24	0,35	0,53

Tabel 11 järg

Proovi jrk.nr.	Mõõtmed, mm			A, cm ²	Massikadu g / (kg/m ²) pärast tsükleid					
	a	b	h _{keskm}		7	14	28	42	56	
CFB P-j 15% KK										
1	147,0	150,0	51,0	220,5	0,1	0,3	0,8	1,4	1,9	
					0,02	0,06	0,16	0,27	0,37	
2	148,0	150,0	51,7	222,0	0,1	0,3	0,7	1,2	1,7	
					0,02	0,06	0,14	0,23	0,33	
3	146,0	150,0	51,3	219,0	0,2	0,6	1,1	1,5	1,9	
					0,04	0,12	0,21	0,29	0,37	
4	147,0	150,0	51,2	220,5	0,2	0,4	0,8	1,3	1,8	
					0,04	0,08	0,16	0,25	0,35	
					kesk	0,2	0,4	0,9	1,4	1,8
						0,03	0,08	0,17	0,26	0,36
CFB P-j 30% KK										
1	148,0	150,0	51,0	222,0	0,4	1,2	2,1	2,8	3,5	
					0,08	0,24	0,41	0,55	0,69	
2	149,0	150,0	49,9	223,5	0,6	1,5	3,1	4,2	4,7	
					0,12	0,30	0,62	0,84	0,94	
3	147,0	150,0	51,3	220,5	0,6	1,6	3,1	4,0	4,6	
					0,12	0,31	0,60	0,78	0,90	
4	146,0	150,0	51,5	219,0	0,5	1,3	2,1	3,0	3,6	
					0,10	0,25	0,41	0,58	0,70	
					kesk	0,5	1,4	2,6	3,5	4,1
						0,11	0,28	0,51	0,69	0,81
CFB G-j 15% KK										
1	147,5	150,0	50,4	221,3	0,4	0,8	1,7	2,5	3,2	
					0,08	0,16	0,34	0,50	0,63	
2	147,5	150,0	51,2	221,3	0,6	1,1	1,8	2,6	3,3	
					0,12	0,21	0,35	0,51	0,64	
3	149,0	150,0	50,6	223,5	0,1	0,3	0,7	1,0	1,4	
					0,02	0,06	0,14	0,20	0,28	
4	147,0	149,0	50,5	219,0	0,2	0,5	1,0	1,7	2,3	
					0,04	0,10	0,20	0,34	0,46	
					kesk	0,3	0,7	1,3	2,0	2,6
						0,07	0,13	0,26	0,39	0,50

Joonis 4 Betoonide külmakindlused massikao järgi 3% NaCl lahuses



Betoonid valmistati graniitkillustikuga ja õhkumanustava lisandiga. Külmutuskeskkonnaks 3% NaCl vesilahus. Kõigi betoonidega teostati võrdluseks ka külmakindluskatse destilleeritud veega. Kuna kõigil katsekehadel oli massikadu destilleeritud veega 56 tsükli järel 0,00 kg/m², ehk massikadu ei esinenud, siis katsetulemusi eraldi aruandesse ei lisatud.

Järgnevalt on esitatud fotod 4...8 katsekehadest pärast 56 külmutustsükli. Vasakpoolse katsekeha külmutusaineks oli 3% NaCl lahus ja parempoolse katsekehal destilleeritud vesi.



Foto 4 Etalon KK



Foto 5 CFB A-j 15% KK



Foto 6 CFB P-j 15% KK

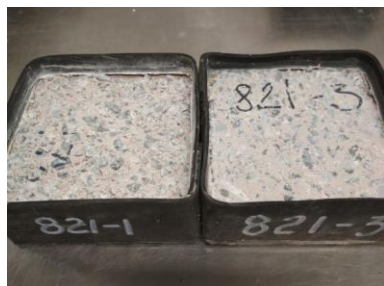


Foto 7 CFB P-j 30% KK



Foto 8 CFB G-j 15% KK

CFB tuha sisaldustega betoonide puhul pinnalt koorunud materjali kogus suureneb, seega betoonide külmakindlus halveneb. Etalonbetoon rahuldab keskkonnaklasside XF2/XF4 nõudeid.

CFB A-j 15% KK tuhalisandiga betoon vastab külmakindlusklassile KK2-50, CFB G-j 15% KK tuhalisandiga betoon külmakindlusklassile KK2-100. Võrreldes CFB P-j tuhaga erinevatel tuha sisaldustel valmistatud betoonide külmakindluskatsete tulemusi, on selgelt näha külmakindluse halvenemist tuha sisalduse suurenemisel. Kui CFB P-j 15% KK tulemus rahuldab külmakindlusklassi KK2-100 (nõue $S_{56} \leq 0,50 \text{ kg/m}^2$), siis suurendades tuha hulka kaks korda (15%-lt 15%-ni), langeb külmakindlus üle kahe korra ja ei rahulda XF2/XF4 keskkonnaklassidele kehtestatud nõudeid. Murenemine kõigi katsetatud betoonide ja erinevate tuhade puhul toimus tsemendikivis.

Antud uurimistöö tulemusel võib nentida, et kuigi betoonis tsemendi asendamisel tuhkadega kõigi katsetatud tuhade puhul betooni külmakindlusnäitajad halvenevad, siis kuni 15 % ulatuses tsemendi asendamisel jahvatatud tuhaga on võimalik saada betoone, mida võib kasutada ka mõõdukalt veega küllastunud ja jätevastase ainega keskkonnas. Betoonides, mis peavad vastama külmakindlusklassidele, üle 15 % tsemendi asendamine põlevkivituhaga ei ole soovitatav.

5.5 Betoone mahumuutused

Betoone mahumuutuste määramiseks valmistati betoonkatsekehad mõõtmega (70x70x280) mm. Katsekehade otstes metallist reeperid pikkuste mõõtmiseks fotol 9 toodud mõõteseadmega. Vormist vabastati katsekehad 24 h pärast betoonisegu valmistamist. Koheselt peale vormist vabastamist fikseeriti algnäit (1 päeva), mille suhtes edasised pikkuse muutumise arvutati. 28 päeva kivistati katsekehi veevannis +20°C ja edasi tõsteti ümber kliimaruumi hoiutingimustele (23±2)°C ja (50±5)% RH (foto 10). Ettenähtud aegadelt mõõdeti katsekehade pikkused, tulemused on esitatud tabelis 12 ja joonisel 5.

Tabel 12 Betoone mahumuutused

Tähis	Mõõtekella näit, päeva							Katsekehade pikkuse muutus mm/m, pärast												
								14 päeva		28 päeva		42 päeva		56 päeva		84 päeva		140 päeva		
	1	14	28	42	56	84	140	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm	
Etalon	5,92	5,93	5,93	5,90	5,88	5,86	5,84	0,036		0,036		-0,071		-0,143		-0,214		-0,286		
	8,50	8,52	8,53	8,49	8,48	8,46	8,44	0,071	0,048	0,107	0,071	-0,036	-0,071	-0,071	-0,119	-0,143	-0,190	-0,214	-0,262	
	8,76	8,77	8,78	8,73	8,72	8,70	8,68	0,036		0,071		-0,107		-0,143		-0,214		-0,286		
CFBA-or 15%	7,56	7,57	7,58	7,52	7,52	7,50	7,47	0,036		0,071		-0,143		-0,143		-0,214		-0,321		
	7,36	7,37	7,38	7,33	7,33	7,30	7,28	0,036	0,048	0,071	0,083	-0,107	-0,131	-0,107	-0,131	-0,214	-0,202	-0,286	-0,286	
	8,62	8,64	8,65	8,58	8,58	8,57	8,55	0,071		0,107		-0,143		-0,143		-0,179		-0,250		
CFBA-j 15%	2,06	2,07	2,07	2,03	2,02	2,00	1,98	0,036		0,036		-0,107		-0,143		-0,214		-0,286		
	3,45	3,46	3,46	3,41	3,40	3,38	3,36	0,036	0,036	0,036	0,036	-0,143	-0,143	-0,179	-0,167	-0,250	-0,226	-0,321	-0,298	
	3,80	3,81	3,81	3,75	3,75	3,74	3,72	0,036		0,036		-0,179		-0,179		-0,214		-0,286		
CFBP-or 15%	9,28	9,30	9,33	9,27	9,26	9,26	9,24	0,071		0,179		-0,036		-0,071		-0,071		-0,143		
	0,93	0,95	0,96	0,90	0,90	0,88	0,87	0,071	0,071	0,107	0,143	-0,107	-0,060	-0,107	-0,083	-0,179	-0,119	-0,214	-0,179	
	8,73	8,75	8,77	8,72	8,71	8,70	8,68	0,071		0,143		-0,036		-0,071		-0,107		-0,179		
CFBP-j 15%	8,08	8,10	8,13	8,06	8,06	8,05	8,03	0,071		0,179		-0,071		-0,071		-0,107		-0,179		
	8,19	8,21	8,23	8,18	8,18	8,16	8,15	0,071	0,071	0,143	0,167	-0,036	-0,048	-0,036	-0,048	-0,107	-0,107	-0,143	-0,167	
	7,83	7,85	7,88	7,82	7,82	7,80	7,78	0,071		0,179		-0,036		-0,036		-0,107		-0,179		
CFBP-j 10%	8,02	8,04	8,05	8,01	8,01	7,99	7,97	0,071		0,107		-0,036		-0,036		-0,107		-0,179		
	9,16	9,18	9,20	9,14	9,13	9,11	9,10	0,071	0,083	0,143	0,143	-0,071	-0,060	-0,107	-0,071	-0,179	-0,143	-0,214	-0,202	
	9,03	9,06	9,08	9,01	9,01	8,99	8,97	0,107		0,179		-0,071		-0,071		-0,143		-0,214		
CFBP-j 20%	6,00	6,03	6,05	5,99	5,98	5,97	5,95	0,107		0,179		-0,036		-0,071		-0,107		-0,179		
	6,25	6,27	6,30	6,24	6,24	6,22	6,20	0,071	0,083	0,179	0,179	-0,036	-0,036	-0,036	-0,060	-0,107	-0,107	-0,179	-0,179	
	6,08	6,10	6,13	6,07	6,06	6,05	6,03	0,071		0,179		-0,036		-0,071		-0,107		-0,179		
CFBP-j 30%	2,97	3,00	3,02	2,95	2,95	2,93	2,91	0,107		0,179		-0,071		-0,071		-0,143		-0,214		
	8,78	8,81	8,84	8,77	8,76	8,75	8,73	0,107	0,119	0,214	0,202	-0,036	-0,048	-0,071	-0,071	-0,107	-0,131	-0,179	-0,202	
	4,59	4,63	4,65	4,58	4,57	4,55	4,53	0,143		0,214		-0,036		-0,071		-0,143		-0,214		
CFBG-or 15%	9,96	9,98	9,99	9,95	9,95	9,93	9,90	0,071		0,107		-0,036		-0,036		-0,107		-0,214		
	8,14	8,16	8,17	8,11	8,11	8,08	8,06	0,071	0,071	0,107	0,119	-0,107	-0,071	-0,107	-0,071	-0,214	-0,167	-0,286	-0,250	
	7,88	7,90	7,92	7,86	7,86	7,83	7,81	0,071		0,143		-0,071		-0,071		-0,179		-0,250		
CFBG-j 15%	7,14	7,16	7,17	7,12	7,12	7,10	7,08	0,071		0,107		-0,071		-0,071		-0,143		-0,214		
	7,72	7,74	7,76	7,70	7,70	7,67	7,65	0,071	0,071	0,143	0,131	-0,071	-0,060	-0,071	-0,071	-0,179	-0,143	-0,250	-0,214	
	7,15	7,17	7,19	7,14	7,13	7,12	7,10	0,071		0,143		-0,036		-0,071		-0,107		-0,179		
Kivistamine:	vees +20°C			(+23±2)°C, (50±5)%				vees +20°C				(+23±2)°C ja (50±5)% RH								

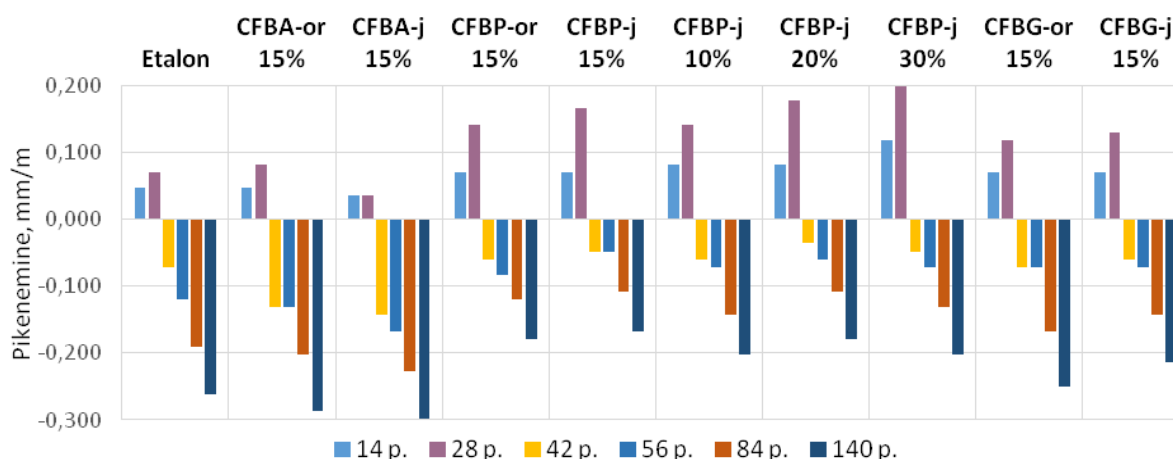


Foto 9 Katseseade mõõtekella ja katsekehaga



Foto 10 Katsesekad on asetatud kivinema kliimaruumis (23±2)°C ja (50±5)% RH

Joonis 5 Betoonide mahumuutused. Kivistamine 28 päeva vees, edasi (23±2)°C ja (50±5)% RH



Tabelis 3 toodud tsemenditaigna Le Chatelier mahupaisumise katse tulemusena selgunud CFB tuhade vähene mahumuutus leiab kinnitust ka betoonide mahumuutuse katsel. Summaarne mahumuutus jääb kõigil katsetatud betoonidel 0,3...0,4 mm/m vahele. Enam paisuvad veekeskkonnas CFB P tuhkadega valmistatud betoonid, nende kahanemine 50% RH keskkonnas on väiksem kui teistel betoonidel. CFB A tuhkadega betoonid paisuvad vees vähe, kuid nende kuivamiskahanemine on ca 0,1 mm/m kohta suurem kui CFB P ja CFB G tuhkadega betoonidel.

Summaarsete mahumuutuste graafiku (joonis 5) alusel võib välja tuua, et mida kauem saavad betoonid kivinemise varases staadiumis vees olla, seda vähem hiljem kahanevad.

5.6 Betooni pind ja värvus



Foto 11 Etalonbetoon



Foto 12 CFB A-or 15%



Foto 13 CFB A-j 15%



Foto 14 CFB P-or 15%



Foto 15 CFB P-j 15%



Foto 16 CFB P-j 10%



Foto 17 CFB P-j 20%



Foto 18 CFB P-j 30%



Foto 19 CFB G-or 15%



Foto 20 CFB G-j 15%

Fotodel esitatud katsekehadedest vasakpoolsed on kuivas olekus (30 % RH juures), parempoolsed immutatult. Betooni pindade vaatlemisel lähtuti BÜ4 juhendist.

CFB tuhade sisaldus betoonis betooni pinna omadusi ei mõjutanud ühegi katsetatud betooni puhul.

Ei ole täheldatav õhupooride arvu ega suuruse muutust, probleeme ei esinenud lahtirakestamisega. Pinnaülevaatusel kõik katsetatud betoonid aktsepteeritavad. CFB tuhade kasutamisel betoonis on iseloomulik värskete betoonisegu punakas värvus. Fotodel 12, 14 ja 19 on näha, et originaaltuhaga valmistatud betoon on sama värvi kui etalonbetoon, samas CFB tuhaga märg betoon on punaka varjundiga, CFB sisalduse suurenemisel värvus intensiivistub (fotol 18 on 30% CFB tuhaga betoon). Värvuse muutus tuleb esile vaid betooni märgumisel, kuiva betooni puhul vahed kaovad. See tendents leidis kinnitust ka tööstuslikult toodetud betoonide puhul, et kivilinenud betooni puhul oli tooni erinevus vaevu märgatav ja sisuliselt oli raske vahet teha, milline konstruktsiooni osa oli valatud tuha lisandiga valmistatud betooniga ja milline tavabetooniga (vt. lk. 35, ptk 7.5)

6. Pilootkatsetel kasutatud materjalide ja betoonide omaduste katsetamine ehitusmaterjalide katselaboris

HC Betoonis valmistatud pilootbetooni tegemisel kasutatud materjalide omadused määrati Tallinna Tehnikaülikooli ehitusmaterjalide teadus- ja katselaboratooriumis.

6.1 Katsed tuhkadega

Betooni valmistamiseks kasutatavatest Kunda Nordic Tsemendi veskis jahvatatud tuhkadest võeti proovid laboris katsetamiseks tsemenditehases ja toimetati Tallinna Tehnikaülikooli laborisse. Tabelis 13 on toodud jahvatatud tuhkade keemilised ja füüsilised omadused.

Tabel 13 Pilootkatsetel kasutatud tuhkade keemilised ja füüsilised omadused

Sideaine	Tihedus g/cm ³	Eripind, m ² /kg	CaO, %	Survetugevus, 28 päeva, N/mm ²						
				Üksiktulemid						Keskm
CFB P	2,85	975	10,36	35,6	38,0	38,0	38,5	37,8	38,5	37,7
CFB A	2,90	1090	12,98	34,1	34,8	34,7	35,1	34,2	34,9	34,6
CFB B	2,81	997	10,96	38,5	38,3	39,9	39,7	39,0	39,6	39,2

Tööstuslikult oli võimalik tuhad peenemaks jahvatada kui laboratoorselt, suurema eripinnaga tuhkade aktiivsus kõrgem ja väga head 28 päevased tuhkmörtide survetugevuse tulemused. Tabelis 14 on tuhkade aktiivsused ehk suhtelised survetugevused EVS 927:2018 lisa A järgi. Hinnatakse kontrollkoostisega (80% tsement CEM I + 20% CFB tuhast) ja etalon (100% CEM I) EVS-EN 196-1 kohaselt valmistatud, kivistatud ja katsetatud katsekehade 28 päevaseid survetugevusi. Aktiivsuse näitaja katsetamisel 28 päevaselt peab olema $\geq 85\%$.

Tabel 14 Pilootkatsetel kasutatud tuhkade aktiivsused

Sideaine	Survetugevus, 28 päeva, N/mm ²							Aktiivsus, %
	Üksiktulemid						Keskm	
CEM I	54,6	54,5	54,3	55,8	54,9	54,1	54,7	
CFB P	55,5	55,6	54,5	54,4	55,0	55,2	55,0	100,6
CFB A	54,6	54,5	53,7	54,7	53,8	54,5	54,3	99,3
CFB B	53,9	55,2	55,0	54,0	54,2	55,6	54,7	100,0

6.2 Katsed täitematerjalidega

Tabel 15 Pilootkatsetel kasutatud killustike omadused

Sõela ava, mm	Paekillustik 4/16 01.03.21		Graniitkild 5/16 25.03.21		Paekillustik 4/16 30.03.21		Paekillustik-1 4/16 11.05.21		Paekillustik-2 4/16 11.05.21	
	Osajaak	Täisjaak	Osajaak	Täisjaak	Osajaak	Täisjaak	Osajaak	Täisjaak	Osajaak	Täisjaak
	%									
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	9,7	9,7	3,6	3,6	3,0	3,0	2,8	2,8	2,9	2,9
8	63,6	73,3	68,8	72,4	67,5	70,6	63,5	66,3	64,2	67,1
4	20,3	93,6	22,0	94,5	24,9	95,5	26,4	92,7	25,4	92,5
2	1,8	95,3	1,4	95,8	1,8	97,2	2,2	94,9	2,3	94,8
0,063	2,1	97,4	2,0	97,9	0,7	98,0	2,7	97,6	2,9	97,7
Peenosiste sisaldus	2,6	100,0	2,1	100,0	2,0	100,0	2,4	100,0	2,3	100,0

Tabel 16 Pilootkatsetel kasutatud liivade omadused

Sõela ava, mm	Liiv 0/4 01.03.21		Liiv 0/4 25.03.21		Liiv 0/4 30.03.21		Liiv-1 0/4 11.05.21		Liiv-2 0/4 11.05.21	
	Osajaak	Täisjaak	Osajaak	Täisjaak	Osajaak	Täisjaak	Osajaak	Täisjaak	Osajaak	Täisjaak
	%									
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,3	0,3	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
4	0,7	1,0	0,2	0,7	0,6	0,9	0,6	0,8	0,7	1,0
2	1,2	2,2	0,7	1,3	2,0	2,8	1,3	2,1	1,2	2,2
1	4,5	6,7	2,3	3,6	5,6	8,5	4,0	6,1	4,8	7,0
0,5	13,3	20,1	8,3	12,0	18,9	27,4	10,9	17,0	10,4	17,4
0,25	50,1	70,2	49,8	61,8	50,1	77,5	49,4	66,4	48,8	66,2
0,125	27,6	97,7	34,6	96,4	18,9	96,4	30,2	96,6	30,5	96,7
0,063	1,9	99,6	3,1	99,5	3,1	99,5	3,0	99,6	2,9	99,6
Peenosiste sisaldus	0,4	100,0	0,5	100,0	0,5	100,0	0,4	100,0	0,4	100,0

6.3 Katsed betoonidega

6.3.1 Pilootbetoonide külmakindlus

Betoonide omadused on esitatud p.7.4.1, tabel 3, lk.30.

Tabel 17 Pilootbetoonide külmakindlused massikao järgi 3% NaCl lahusega

Proovi jrk.nr.	Mõõtmed, mm			A, cm ²	Massikadu g / (kg/m ²) pärast tsükleid				
	a	b	h _{keskm}		7	14	28	42	56
Etalon KK									
1	149,0	150,0	50,9	223,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	147,5	149,5	51,4	220,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	148,5	150,0	51,1	222,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	149,0	150,0	50,1	223,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				kesk	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CFB P-j 15% KK									
1	149,0	150,0	51,2	223,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	149,5	149,5	51,5	223,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	149,0	150,0	50,7	223,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	149,0	150,0	50,4	223,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				kesk	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Pilootkatsetel valmistatud etalonbetooni ja 15% CFB P-j tuhaga betooni katsetamisel külmakindlusele EVS 814:2020 kohaselt 3% NaCl vesilahusega koorumine pinnalt oli 0,00 kg/m² ehk kummagi betooni puhul massikadu ei esinenud. Seega tsemendi asendamine betoonis 15% CFB P-j betooni külmakindlust ei mõjutanud.

6.3.2 Piloobetoonide mahumuutused

Betoonide mahumuutuste määramiseks valmistati betoonkatsekehad mõõtmetega (70x70x280) mm. Katsekehade otstes metallist reeperid pikkuste mõõtmiseks. Betoonide omadused on esitatud p.7.4.1, tabel 2, lk. 29. Vormist vabastati katsekehad 24 h pärast betoonisegu valmistamist. Koheselt peale vormist vabastamist fikseeriti algnäit, mille suhtes edasised pikkuse muutumise arvutati. 7 päeva kivistati katsekehi veevannis +20°C ja edasi tõsteti ümber kliimaruumi hoiutingimustele (23±2)°C ja (50±5)% RH. Ettenähtud aegadelt 3, 5, 7, 14, 28, 42, 56, 84 ja 140 päevaselt mõõdeti katsekehade pikkused, tulemused on esitatud tabelis 18.

Tabel 18 Piloobetoonide mahumuutused

Tähis	Katsekehade pikkuse muutus mm/m, pärast																	
	3 päeva		5 päeva		7 päeva		14 päeva		28 päeva		42 päeva		56 päeva		84 päeva		140 päeva	
	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm	üksik	keskm
	0,107		0,143		0,179		-0,214		-0,286		-0,321		-0,357		-0,429		-0,500	
CEM I	0,071	0,083	0,107	0,119	0,143	0,155	-0,179	-0,190	-0,250	-0,262	-0,321	-0,321	-0,393	-0,369	-0,429	-0,417	-0,464	-0,476
	0,071		0,107		0,143		-0,179		-0,250		-0,321		-0,357		-0,393		-0,464	
	0,107		0,143		0,179		-0,143		-0,214		-0,250		-0,286		-0,321		-0,393	
CFB P 15%	0,071	0,083	0,107	0,131	0,143	0,167	-0,143	-0,143	-0,214	-0,214	-0,286	-0,262	-0,321	-0,298	-0,357	-0,333	-0,393	-0,381
	0,071		0,143		0,179		-0,143		-0,214		-0,250		-0,286		-0,321		-0,357	

Veekeskkonnas CFB P 15% tuhaga betooni paisumine ületab vähesel määral etalonbetooni paisumisnäitajat. Edasisel kivistumisel (23±2)°C ja (50±5)% RH keskkonnas CFB P 15% tuhaga betoon kahaneb vähem kui etalonbetoon. Erinevused on marginaalsed. Tulemuste alusel võib öelda, et betoonis tsemendi asendamine 15% jahvatatud CFB P tuhaga ei suurenda betooni paisumist ega kahanemist.

7. Betoonitehases läbiviidud tööstusliku tootmise katsed

Peatüki koostas: Mikk Rõõmusoks, HC Betoon

7.1 Katsete kirjeldus

Betoonitehases läbiviidud tööstusliku tootmise katsete eesmärgiks oli uurida CFB tuha mõju betoonisegu ja betooni omadustele. Seda just betoonitehases valmis segatud ja ehitusplatsile transporditud segude näol. Selleks oli katseprogrammis Eesti Energia poolt tarnitud kolm erinevat CFB tuhka, milleks olid:

- CFB „Filtrituhk“
- CFB “Auvere”
- CFB “Bio”

Kõik need tuhad transporditi elektriijaama kogumispunktist Kunda Nordic Tsement Kunda tehasesse, kus tuhad jahvatati tsemendiklinkri jahvatamiseks mõeldud kuulveskis. Peale tuha jahvatamist transporditi jahvatatud tuhad Kundast HC Betoon Maardu tehasesse, kus need hoiustati katsete läbiviimise ajaks selleks eraldatud silos.

Katsesegu tootmiseks kasutati kahte baasretsepti, nn etalonkoostist. Üks nendest paekivitäitematerjali baasil. Teine tardkivim täitematerjal, millega toodeti ilmastikukindlat betooni. Etalon koostiste valikul arvestati, et need oleks koostised, mida igapäevases tootmises toodetakse suures mahus, ning need annaks ettekujutuse, kuidas tuha lisamine mõjutab tootmisprotsessi kulgu ja betooni omadusi.

Tuha lisamisel betoonisegu koostisse 30, 15 või 10% tsemendi massist arvutati etalonretsepti koostis ümber selliselt, et tuha arvelt vähendati tsemendi doseeringut, ning koostise mahu 1,0 m³ tagamiseks vähendati täiendavalt täitematerjalide mahtu.

Maardu tehases toimub betoonisegu tootmine automaatjuhtimisel. Tehase operaator sisestab betooni retsepti koodi ja toodetava mahu, tehase automaatika teostab kaalutavate materjalide mahtude arvutused ja kaalumised automaatselt.

Katsete läbiviimiseks kasutatud betoonitehase tehnilised parameetrid on:

- betoonisegisti suurus 2,25 m³
- täitematerjalide punkrite arv: 5
- sideaine ja peenlisandite silode arv: 4
- keemiliste lisandite doseerimissüsteem 5 lisandile
- küttesüsteem materjalide ja seguvee eelsoojendamiseks

7.2 Tootmises kasutatud materjalid

Tööstusliku tootmise katseteks kasutati tehases igapäevases tootmises olevaid täitematerjale ja keemilisi lisandeid. Kasutatud materjalid olid järgmised:

- Paekivikillustik fraktsiooniga 4/16 mm, päritolu: Väo karjäär, Harjumaa
- Tardkivimkillustik fraktsioon 5/16 mm, päritolu: Jelsa karjäär, Norra
- Ehitusliiv fraktsioon 0/4 mm, päritolu: Soodla karjäär, Harjumaa
- Tsemendina kasutati CEM I tüüpi portlandtsementi CEM I 42,5R. Kunda Nordic Tsement, Kunda tehas.
- Veevajadust vähendava keemilise lisandina kasutati superplastifikaatorit Dynamon SX-25. Tootja: Mapei AS.
- Õhku manustav lisand REBALit LP40%. Tootja: Remei Baltica OÜ.
- Tehases kasutatav vesi pärineb Maardu linna tsentraalveetrassist.

7.3 Katsete läbiviimine

Katsete tootmine ja betoonisegu katsetamine tehase laboris viidi läbi perioodil 01.03.2021 kuni 04.05.2021. Perioodi pikkuse dikteeris tuha jahvatamise ja transpordivõimaluste saadavus. Ning ka sobivate ehitusobjektide valik, kuhu betoonisegu tarnida. Betoonisegu realiseerimisel arvestati ehitusobjektidel teostatava konstruktsiooni spetsifikatsiooniga. Kuna konkreetsete jahvatatud tuhkade puhul eelkatseid ei olnud võimalik teha, pidi arvestama võimaliku betooni survetugevus varuga, et tarnitav segu vastaks kliendi poolt spetsifitseeritud tugevusklassile. Katsetulemustest on näha, et kõikidel juhtudel paekiviga valmistatud betooni survetugevusklass C25/30 oli ka tuhaga valmistatud betoonide puhul tagatud. Samuti oli ilmastikukindla betooni C35/45 tugevus tagatud.

Betoonisegu katsete läbiviimisel võeti seguproov betoonitehases segurautost peale koorma laadimist. Autol lasti enne proovi võtmist segu läbi segada vähemalt 3 minuti jooksul. Peale seda laaditi segurautost proovivõtmiskärusse segu mahus 60 kuni 70 liitrit. Fikseeriti visuaalselt segu homogeensus. Mõõdeti segu temperatuur pulktermomeetriga. Seejärel teostati segu konsistentsi määramine koonuse vajumi katsega. Kõikidel segudel, ka ilma õhkmanustvat lisandit kasutamata, määrati õhusisaldus rõhumeetodil töötava seadmega. Peale seda täideti katsekeha vormid vibreerimislaua kahe kihis tihendades. Ülejäänud segust võeti plastknõusse ca 20 liitri segu, millele teostati konsistentsi määramise katse 30 ja 60 minuti möödudes, arvestades segu väljalaadimsajast tehase segistist. Katseandmed fikseeriti vahetult peale katse sooritamist vastaval vormil.

Järgmisel tööpäeval vabastati katsekehad vormidest ja transporditi survetugevuse katsetamiseks ööpäeva vanuses HC Betoon Täna silma tehase laboratooriumisse. Ülejäänud katsekehad hoiustati sama labori veevannis kuni katsetamiseni ettenähtud vanuses. Survetugevuse katsed sooritati betooni 1, 2, 7 ja 28 päeva vanuses.

7.4 Katsetulemused

7.4.1 Katsed CFB filtrituhaga

Allpool on esitatud katsetulemused jahvatatud CFB filtrituhale, mis katseteprogrammis oli tähistatud „CFB P“.

Katse kuupäev	1.03.2021	1.03.2021	1.03.2021
Saatelehe nr, segu ID	94222	94216	94221
	etalon		
CFB lisandus	0%	15%	30%
Segu arvutuslik koostis [kg/m³]			
Tsement CEM I 42,5 R	318	270	223
CFB filtri, jahvatatud	0	48	95
Liiv 0/4	865	863	861
Paekivikillustik 4/16	980	975	972
Vesi*	189	189	189
Superplastifikaator	2,2	2,2	2,2
Õhku manustav lisand	0,0	0,0	0,0
Arvutuslik nt [kg/m ³]	2354	2347	2342
Segu katseandmed			

Põlevkivituhk betoonilisandina – baasuuringud
Tallinna Tehnikaülikool 2021

Segu temp. [°C]	13,1	10,8	12,7
Segu temp. 60 min [°C]	10,5	9,9	11,9
Õhusisaldus, % 5 min	1,3	1,6	1,4
Töödeldavus [mm], 5 min	220	200	210
Töödeldavus, 30 min	210	190	195
Töödeldavus, 60 min	170	185	180
Töödeldavus, 90 min	155	170	160
Töödeld. muutus 60 min	-50	-15	-30

Betooni survetugevus [MPa]

1 ööpäev	12,5	10,7	8,6
2 päeva	22,4	19,8	17,3
7 päeva	35,4	31,2	28,8
28 päeva 1/2	41,5	37,3	38,6
28 päeva 2/2	42,4	37,6	36,9
28 päeva keskmine	42,0	37,5	37,8

Betooni näivtihedus [kg/m³]

1 ööpäev	2360	2320	2340
2 päeva	2360	2340	2350
7 päeva	2370	2350	2350
28 päeva 1/2	2340	2340	2360
28 päeva 2/2	2350	2340	2340
28 päeva keskmine	2345	2340	2350

*tegelik veesisaldus betoonisegus erineb retsepti arvutuslikust veesisaldusest, tulenevalt konkreetse segumi täitematerjalide niiskussisaldusest. Tulenevalt sellest ei ole võimalik näidata konkreetse segu v/t teguri väärtust.

Segude tootmisel oli eesmärgiks, et võrreldavate segude algtöödeldavus on sarnane. Eesmärgiks seati, et segude töödeldavuse erinevus ei tohiks olla nende omavaheliseks võrdlemiseks suurem kui 20 mm. Need proovid, mis seda eesmärki ei täitnud, hüljati ja jätkati tootmist niikaua kuni saadi töödeldavuse kriteeriumit rahuldav proov. Kuna eelnevalt oli teda, et tuhalisandiga segude veevajadus on suurem, kui ilma tuhata valmisatud segudel, siis kõigi eelduste kohaselt etalonseguga sarnase töödeldavuse saavutamiseks sisaldavad tuhaga segud rohkem vett ja sellest tulenevalt ka kõrgemat vesi-tsementtegurit, seda tuleb arvestada survetugevuste võrdlemisel. Mis puudutab segu töödeldavust, siis antud konkreetse katse puhul etalonsegu töödeldavus ajas vähenes kiiremini kui tuha lisandiga segudel. Mis on mõnevõrra üllatav kuna eeldada oli vastupidist tulemust. Õhusisalduse määramise katse näitas, et jahvatatud tuha lisamine betoonisegusse ei tõsta segu õhusisaldust võrreldes etalonseguga. Seda näitab ka kivilinenud betooni katsekehade näivtiheduse võrdlus.

Betooni survetugevuse andmete võrdlemisel on selgelt näha tuha lisandi kivistumise aeglustav toime. Arvestada tuleb küll sellega, et etalonsegu 28 päeva vanune survetugevus on kõrgem kui 15% ja 30% tuha sisalduse puhul, kuid ka seda arvesse võttes võib järeldada, et antud koostise puhul lisatud tuhk vähendab varajast tugevust. Antud katsete puhul jäi tuha lisandiga 15% ja 30% survetugevus 28 päeva vanuses samasse suurusjärku. Kuigi oleks võinud eeldada, et suurema tuha sisaldusega segu, kus vähendati tsemendi mahtu rohkem, oleks pidanud andma madalama tugevuse.

Betooni mahukahanemise võrdluskatseteks valmistatud etalon segu ja 15% sisaldusega „CFB P“ segu ja betooni katseandmed on esitatud järgnevas tabelis.

Tabel 2 - Jahvatatud CFB filtrituhk [prismad]

Katse kuupäev	3.03.2021	3.03.2021
Saatelehe nr, segu ID	94327	94328
	etalon	
CFB sisaldus	0%	15%
Segu arvutuslik koostis [kg/m³]		
Tsement CEM I 42,5 R	318	270
CFB filtri, jahvatatud	0	48
Liiv 0/4	865	863
Paekivikillustik 4/16	980	975
Vesi*	189	189
Superplastifikaator	2,2	2,2
Õhku manustav lisand	0,0	0,0
Arvutuslik nt [kg/m ³]	2354	2347
Segu katseandmed		
Segu temp. [°C]	13,5	15,6
Segu temp. 60 min [°C]	12,8	14,5
Õhusisaldus, % 5 min	1,8	1,3
Töödeldavus [mm], 5 min	200	205
Töödeldavus, 30 min	180	200
Töödeldavus, 60 min	180	195
Töödeld. muutus 60 min	-20	-10
Betooni survetugevus [MPa]		
1 ööpäev**	-	-
2 päeva**	-	-
7 päeva	37,9	35,4
28 päeva 1/2	45,0	43,5
28 päeva 2/2	44,1	44,7
28 päeva keskmine	44,6	44,1
Betooni näivtihedus [kg/m³]		
1 ööpäev**	-	-
2 päeva**	-	-
7 päeva	2360	2360
28 päeva 1/2	2360	2370
28 päeva 2/2	2360	2360
28 päeva keskmine	2360	2365

*tegelik veesisaldus betoonisegus erineb retsepti arvutuslikust veesisaldusest, tulenevalt konkreetse segu täitematerjalide niiskussisaldusest. Tulenevalt sellest ei ole võimalik näidata konkreetse segu v/t teguri väärtust.

** ühe ööpäeva ja kahe ööpäeva vanuses survetugevuse katsetamiseks katsekehasid ei valmistatud.

Kuna kuupäeval 01.03.2021 mahukahanemise uurimiseks vormitud prismade teostamine ei õnnestunud siis korrati seda kuupäeval 03.03. Selleks toodeti tehases samad koostisega segud, mis olid tehtud 2 päeva varem võrdluskatseteks. Tabelis 2 esitatud katsetulemused annavad mõningase ettekujutuse tööstuslikult toodetud segu katse korratavusest.

Mõlema segu algtöödeldavused olid samas suurusjärgus. Ka sellel korral vähenes tuhalisandiga segu töödeldavus vähem kui ilma lisandita etalon segul, kuigi eeldus oli

vastupidine. Tuha 15% lisamine segu kaasatud õhu mahtu ei suurendanud. Ka mõlema segu näivtihedus on samas suurusjärgus.

Üllatav on, et etalonsegu ja 15% tuhalisandiga betooni survetugevus 28 päeva vanuses saadi katsetamisel sisuliselt sama. Kuigi tuhalisandiga betoonile oleks eeldanud madalamat survetugevust. Nii nagu näitas seda kuupäeva 01.03 tehtud katsete tulemus, kus etalonsegu ja 15% lisandiga segu survetugevuse erinevus oli 4,5 MPa.

Järgnevalt on esitatud betooni külmakindluse katsetamiseks valmisatud etalonsegu ja 10% „CFB P“ sisaldusega segu ja betooni katseandmed.

Tabel 3 - Jahvatatud CFB filtrituhk [külmakindluse katse]

Katse kuupäev	19.03.2021	19.03.2021
Saatelehe nr, segu ID	94702	94694
	etalon	
CFB lisaldus	0%	10%
Segu arvutuslik koostis [kg/m³]		
Tsement CEM I 42,5 R	410	369
CFB filtri, jahvatatud	0	41
Liiv 0/4	787	784
Tardkivimkillustik 5/16	1010	1008
Vesi*	152	152
Superplastifikaator	2,6	2,6
Õhku manustav lisand	4,5	4,5
Arvutuslik nt [kg/m ³]	2362	2357
Segu katseandmed		
Segu temp. [°C]	18,7	20,5
Segu temp. 60 min [°C]	10,5	14,5
Õhusisaldus, % 5 min	6,8	6,4
Töödeldavus [mm], 5 min	175	180
Töödeldavus, 30 min	140	140
Töödeldavus, 60 min	120	125
Töödeld. muutus 60 min	-55	-55
Betooni survetugevus [MPa]		
1 ööpäev	7,4	12,1
2 päeva	43,6	43,3
7 päeva	46,8	45,3
28 päeva 1/2	52,9	53,7
28 päeva 2/2	54,0	52,7
28 päeva keskmine	53,5	53,2
Betooni näivtihedus [kg/m³]		
1 ööpäev	2340	2340
2 päeva	2320	2330
7 päeva	2340	2340
28 päeva 1/2	2340	2330
28 päeva 2/2	2350	2350
28 päeva keskmine	2345	2340
Täiendavad andmed		
Õhusisaldus, % 30 min	5,2	4,9
Õhusisaldus, % 60 min	5,0	4,7
Segu vormimis temp. [°C]	14,5	16,3

*tegelik veesisaldus betoonisegus erineb retsepti arvutuslikust veesisaldusest, tulenevalt konkreetse segumi täitematerjalide niiskussisaldusest. Tulenevalt sellest ei ole võimalik näidata konkreetse segu v/t teguri väärtust.

Tabelis 3 esitatud andmetega segud valmistati õhku manustava lisandiga ja graniitkillustik täitematerjaliga, kuna eesmärgiks oli toota külmakindlat betooni. Antud koostisega betooni kasutatakse konstruktsioonide valmistamiseks nagu: maantee sillad ja viaduktid, sadamate kaid, parkimismajade betoonplaadid jne.

Kuna antud segude puhul oli eelduseks, et võrreldava segu saamisel peab olema etalonil ja 10% lisandiga segul samas suurusjärgus töödeldavus kui ka manustatud õhusisaldus, siis õnnestus see saavutada alles neljandal katsel. Eelnevatel kuupäevadel toodetud ja võrdluseks mitte sobivaks hinnatud segude andmeid antud aruandesse ei lisatud.

Tabelis 3 esitatud segude algtöödeldavused jäävad samasse suurusjärku. Sama saab öelda ka õhusisalduse kohta, kus oli eesmärgiks, et segude õhusisaldus ei erineks rohkem kui 0,5%. Segude töödeldavuse muutus 60 minuti jooksul oli mõlemal segul võrdne. Võib järeldada, et tsemendi mahu juures ~400 kg/m³ ja tuha lisamisel 10% segu töödeldavuse muutust ajas see ei mõjuta. Väga üllatav tulemus oli, et 10% jahvatatud tuha lisandiga segu varajane survetugevus oli peaaegu poole suurem kui etalon segul. Seda võib osaliselt põhjendada sellega, et etalon segu temperatuur katsekehade vormimise ajal oli paar kraadi madalam kui 10% tuhaga segul. Samas ei oleks see tohtinud avaldada nii suurt mõju kui antud katsed näitasid. Kahe ööpäeva vanuses katsetud suvetugevus oli juba mõlemal betoonil võrdne. Sama võib öelda ka 28 päevase survetugevus kohta kus etalonbetooni ja 10% lisandiga betooni tugevus oli praktiliselt sama.

7.4.2 Katsed CFB „Auvere“ tuhaga

Tuha tähis katseprogrammis „CFB A“

Tabel 4 -Jahvatatud "Auvere" tuhk

Katse kuupäev	30.03.2021	30.03.2021
Saatelehe nr, segu ID	94967	94965
	etalon	
CFB lisaldus	0%	15%
Segu arvutuslik koostis [kg/m³]		
Tsement CEM I 42,5 R	318	270
CFB filtri, jahvatatud	0	48
Liiv 0/4	865	863
Paekivikillustik 4/16	980	975
Vesi*	189	189
Superplastifikaator	2,2	2,2
Õhku manustav lisand	0,0	0,0
Arvutuslik nt [kg/m ³]	2354	2347
Segu katseandmed		
Segu temp. [°C]	15,2	14,6
Segu temp. 60 min [°C]	12,4	13,1
Õhusisaldus, % 5 min	1,9	2,3
Töödeldavus [mm], 5 min	110	120
Töödeldavus, 30 min	90	80
Töödeldavus, 60 min	80	70
Töödeld. muutus 60 min	-30	-50

Betooni survetugevus [MPa]

1 ööpäev	22,6	20,5
2 päeva	30,5	27,9
7 päeva	42,7	38,2
28 päeva 1/2	47,0	43,8
28 päeva 2/2	50,6	44,6
28 päeva keskmine	48,8	44,2

Betooni näivtihedus [kg/m³]

1 ööpäev	2360	2340
2 päeva	2380	2350
7 päeva	2380	2360
28 päeva 1/2	2390	2360
28 päeva 2/2	2390	2360
28 päeva keskmine	2390	2360

*tegelik veesisaldus betoonisegus erineb retsepti arvutuslikust veesisaldusest, tulenevalt konkreetse segumi täitematerjalide niiskussisaldusest. Tulenevalt sellest ei ole võimalik näidata konkreetse segu v/t teguri väärtust.

Tabelis 4 näidatud andmetega segud on valmistatud sama koostis kasutades, mida kasutati „CFB P“ korral. Erinevus on segu algtöödeldavuses. Kui eelnevalt katsetatud tuha puhul oli segu algtöödeldavus S4 klassi piires siis „Auvere“ tuhaga segu puhul oli segu algtöödeldavus S3 klassile vastav tulenevalt kliendi tellimusest. Tabelis 4 esitatud segude veesisaldus on erinev tabel 1 segudest, kuigi põhikoostis on sama. Erinev on ka tsemendi partii kui ka täitematerjalide omadused. Sellepärast ei ole erinevatel kuupäevadel valmistatud segud omavahel võrreldavad survetugevuse suhtes.

„Auvere“ tuhaga valmistatud etalonsegu ja 15% tuha lisandiga segu algtöödeldavuse erinevus oli 10 mm, mis täitis võrreldavuse saamiseks püstitatud kriteeriumit. Kui vaadata segu töödeldavuse muutus tunni aja jooksul, siis tuha lisandiga segu kaotas töödeldavuse kiiremini. Samas varajane algtugevus ei ole tuha lisandist niipalju mõjutatud kui seda oli „filtri“ tuha puhul. 28 päeva vanuses määratud survetugevuse erinevus etaloni 15% „Auvere“ tuha puhul jääb samasse suurusjärku, mis oli ka 15% „filtri“ tuhal ja tema etalonkoostisel. „Auvere“ tuha puhul võib märgata mõnevõrra kõrgemat kaasatud õhu sisaldust kui oli etalonsegul. Erinevust on näha ka kivistunud betooni näivtiheduses. Vahe etaloniga on 30 kg/m³.

7.4.3 Katsed CFB „Bio“ tuhaga

Tuha tähis katseprogrammis „CFB B“

Tabel 5- Jahvatatud "BIO" tuhk

	4.05.2021	3.05.2021
Katse kuupäev	4.05.2021	3.05.2021
Saatelehe nr, segu ID	96084	96037
	etalon	
CFB lisaldus	0%	15%
Segu arvutuslik koostis		
Tsement CEM I 42,5 R	318	270
CFB filtri, jahvatatud	0	48
Liiv 0/4	865	863
Paekivikillustik 4/16	980	975
Vesi*	189	189
Superplastifikaator	2,2	2,2
Õhku manustav lisand	0,0	0,0
Arvutuslik nt [kg/m ³]	2354	2347
Segu katseandmed		
Segu temp. [°C]	11,3	10,5
Segu temp. 60 min [°C]	9,6	9,6
Õhusisaldus, % 5 min	2,7	2,5
Töödeldavus [mm], 5 min	95	110
Töödeldavus, 30 min	60	80
Töödeldavus, 60 min	55	80
Töödeld. muutus 60 min	-40	-30
Betooni survetugevus [MPa]		
2 ööpäeva	23,0	21,4
3 päeva	33,4	28,4
7 päeva	46,9	40,0
28 päeva 1/2	51,7	48,0
28 päeva 2/2	51,9	48,8
28 päeva keskmine	51,8	48,4
Betooni näivtihedus [kg/m³]		
2 ööpäeva	2340	2330
3 päeva	2340	2320
7 päeva	2360	2340
28 päeva 1/2	2360	2340
28 päeva 2/2	2360	2340
28 päeva keskmine	2360	2340
Täiendavad andmed		
Õhusisaldus, % 60 min	2,9	2,6

*tegelik veesisaldus betoonisegus erineb retsepti arvutuslikust veesisaldusest, tulenevalt konkreetse segumi täitematerjalide niiskussisaldusest. Tulenevalt sellest ei ole võimalik näidata konkreetse segu v/t teguri väärtust.

Tabelis 5 esitatud „Bio“ tuha ja etalonsegu koostised on samad, mida kasutati eelnevalt katsetud tuhkadega segude tootmisel. Kuna „Bio“ tuhaga toodetud segu ja etalonsegu algtöödeldavus jääb samasse suurusjärku nagu oli seda ka „Auvere“ tuha katsetel, siis mööndusega võib „Bio“ ja „Auvere“ tuhade survetugevusi omavahel võrrelda. Küll tuleb arvestada seda, et „Bio“ tuhaga segu oli valmistatud ligikaudu kuu aega hiljem, millest tulenevalt on tsemendi omadused kindlasti erinevad ja selle baasil ei ole suvetugevused üksteisele võrreldavad.

Segude etalon ja 15% „Bio“ tuha lisandit töödeldavuse erinevused 60 minuti möödudes on sisuliselt samad. Kui võrrelda eelnevalt katsetatud „Auvere“ tuha töödeldavuse vähenemist „Bio“ tuhaga siis on see „Bio“ tuha kasuks, mille töödeldavus vähenes 60 min jooksul 20 mm võrra vähem. Kui võrrelda „Auvere“ ja „Bio“ tuhade mõju varasele tugevusele, siis see jääb samasse suurusjärku ja erinevus on katsevea piirides. Olulist erinevust ei ole ka 28 päeva vanuses survetugevustel, kui võrrelda omavahel „Bio“ ja „Auvere“ tuha andmeid vastava etaloniga. Andmetest on näha, et 15 % „Bio“ tuhaga segu on etalonsegust võrreldes 15% „Auvere“ tuhaga toodetud segu ja tema etalonist 1,2 MPa võrra kõrgema survetugevusega.

Üllatava asjaoluna saab märkida, et nii etalonsegu kui ka 15% „Bio“ tuha lisandiga segude manustatud õhu sisaldus oli kõrgem kui varasemalt toodetud segudel. Tavapäraselt ei ületa kaasatud õhu sisaldus tootmisel 2,0%. Miks kuupäeval 04.05 toodetud segu sisaldas rohkem kaasatud õhku ei oska põhjenda. Aga kuna 15% tuha lisandiga segu sisaldas vähem õhku, siis võib konstateerida, et tuhaga lisamise korral manustatud õhu sisaldus segus ei suurene.

7.5 Kokkuvõtte tööstusliku tootmise katsetest

Tulenevalt läbiviidud tööstuslikest katsetest ja saadud katseandmetest võib öelda, et jahvatatud CFB tuhkadega betoonisegu tootmine on võimalik. Eelduseks on kaubabetooni tehases vaba silo olemasolu. Antud katseprogrammi raames oli maksimaalseks tuha lisamise määraks valitud 30% tsemendi kaalust. Mille korral ei täheldatud mingit negatiivset mõju segu või betooni omadustele. Esialgu võiks tootmises perspektiivikaks pidada jahvatatud tuha lisamise mahus 10 kuni 20% tsemendi kaalust. Kõrgemate doseeringute kasutamine nõuab veel lisakatseid.

Läbiviidud tööstusliku tootmise katsete korral realiseeriti segu erinevatel ehitusobjektidel. Nii tarnetel kui segude pumpamisel ei täheldatud tuha lisandi negatiivset mõju betoonisegu omadustele. Küll tuleb arvestada sellega, et tarnet teostati mitte märkimisväärses mahus ning konstruktsioonid, mis valiti betoneerimiseks, ei olnud ohutuse mõttes pretensioonikad. Võimalik, et mahukama ja laialdasema tootmise käigus võivad esineda ka mõned negatiivsed aspektid. Ühena nendest mis ilmnes, võib ära märkida betoonisegu värvuse. Nimelt värvusid jahvatatud tuhalisandiga betoonisegud kergelt roosas-pruunikaks. Segu värvitooni erinevus on selgelt märgatav kui samale objektile oli eelnevalt tarnitud ilma tuhata betoonisegu. Samas kivinenud betooni puhul on tooni erinevus vaevu märgatav ja sisuliselt on raske vahet teha, milline konstruktsiooni osa oli valatud tuha lisandiga valmistatud betooniga.

Üks asjaolu, mis tööstusliku tootmise katsete juures jäi testimata, oli segu temperatuuri ja välistemperatuuri mõju tuhaga valmistatud segude töödeldavuse kestvusele ajas. Märtsis ja aprillis toodetud segude temperatuurid tehases jäid piiridesse 10...20°C ning sel puhul jahvatatud „filtri“ tuhaga segude puhul võis tuha lisamisel fikseerida töödeldavuse kestvusele võrreldes etaloniga isegi positiivset mõju. Kuidas muutub aga tuha lisandiga segude töödeldavus suvisel perioodil kui segu temperatuur on 20...30°C ning välisõhu temperatuur tarne ajal isegi kõrgem, ei ole teda.

Teostatud katsete juures kõige positiivsema tulemusena võib ära märkida jahvatatud „filtri“ tuhaga tehtud külmakindla segu katset, kus tuha lisand oli 10%. Selle katse puhul lisand ei mõjutanud võrreldes etaloniga segu algtöödeldavust, töödeldavuse muutust ajas ega ka 28

päeva vanust survetugevust. Kuid samas mõjus positiivselt betooni varajasele algtugevusele. Kõikidel teisel teistel katsetel vähendas tuha lisamine varajast (1 ööpäeva) vanust algtugevust. Kokkuvõttes võib pidada jahvatatud tuha kasutamist betooni toomises perspektiivikas. Kindlasti on regulaarse tootmise läbiviimiseks vajalik jätkusuutlik jahvatatud tuha tarne. Eeldusel, et ka tuha kvaliteet ja jahvatuse omadused oleks võimalikult vähe hälbivad. Loomulikult sõltub perspektiivikus ka toote turustamishinnast. Laiemat CFB tuha kasutamist kaubabetooni tootmises piirab see, et CFB ei ole standardile EN 450 vastav. Sellest tulevalt ei saa kasutada EN 206 kirjeldatud k-väärtus kontseptsiooni, mis lubaks oluliselt suurendada tuha mahtu betooni koostises.

Foto 1 HC Betoon Maardu kaubabetoonitehas



Foto 2 Tehase pulbermaterjalide silod



Foto 3 Tehase täitematerjalide vaheladu. Materjalid: liiv 0/4 ja paekillustik 4/16



Foto 4 Betoonitehase laboris katsete käigus vormitud katsekehad



Foto 5 Tänaõhku laboris katsekehade hoiustamise veevann



Foto 6 Katsekehade survetugevuse katsetamise press



8. Kokkuvõte ja järeldused

Uuringu eesmärgiks oli uurida töödeldud keevkihtkatla (CFB) põlevkivituhkade kasutamise võimalusi betooni tootmisel asendades osaliselt tsementi.

Katsed teostati esimeses etapis laboratoorselt Tallinna Tehnikaülikooli ehitusmaterjalide katselaboris ja teises etapis valmistati pilootbetoonid betoonitehases tööstuslikult jahvatatud CFB tuhaga.

Katsetusteks valiti järgmised tuhad:

- CFB tuhk (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-2), CFB P
- CFB tuhk Auvere (Auvere jaama elektrifiltri I välja tuhk), CFB A
- CFB tuhk + gaas (8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-1), CFB G

Jahvatatud CFB tuha aktiivsus on kordades kõrgem võrreldes originaalkujul CFB tuhaga. Jahvatamine suurendas tuhkmörtide tugevust 4...6 korda.

Jahvatamata CFB tuhad on kõrge veevajadusega ja nende lisamine toob kaasa betooni veevajaduse tõusu. Jahvatamine vähendas tuhade veevajadust ca 6% võrra.

Tuhapasta paisumised olid originaaltuhkadel 1,0...2,0 mm ja jahvatatud tuhkadel 0,5...1,0mm.

CFB tuha, kui betooni koostis komponendi, lisamine betooni õhusisaldust ja tihedust oluliselt ei mõjutanud. Valmistatud betoonide õhusisaldused jäid vahemikku 1,6...2,7%. Kõige kõrgem oli õhusisaldus 30% CFB P-j tuhaga betoonil – 3,3%.

Tsemendi asendamisel CFB tuhkadega kaasnes betooni survetugevuse langus, eriti varases vanuses. Vanuse kasvades vahe hakkas kompenseeruma, survetugevuse vahe etalonbetooniga vähenes ja mõnede katsetatud betoonide 56 päeva vanuste CFB sisaldusega tuhade tugevusnäitajad olid ligilähedased etalonbetoonile või isegi ületasid seda.

Betoonide, mille varane tugevus ei ole oluline, valmistamisel võiks jahvatatud CFB tuhkasid kasutada kuni 20% tsemendi massist. CFB P-j 20% betoonide varane survetugevus oli etalonist väiksem 25%. Samas 28 päevane survetugevus oli peaaegu lähedane etalonile (vahe 0,8 MPa) ja 56 päevaselt oli etalonist 1,7 MPa kõrgem.

Kuni 20%-line tuhasisaldus, nii originaal- kui ka jahvatatud tuhkadega, betoonide paindetugevust ei mõjutanud. Langes paindetugevus betoonis tsemendi asendamisel 30% CFB tuhaga.

Betoonis tsemendi asendamisel CFB tuhkadega kõigi katsetatud tuhade puhul betooni külmakindlusnäitajad halvenesid, kuid kuni 15% ulatuses tsemendi asendamisel jahvatatud tuhaga on võimalik saada betoone, mida võib kasutada ka mõõdukalt veega küllastunud ja jäitevastase ainega keskkonnas. Betoonides, mis peavad vastama külmakindlusklassidele, üle 15% tsemendi asendamine põlevkivituhaga ei ole soovitatav.

Olulisi mahumuutuste muutusi erinevates keskkondades kõigi katsetatud betoonide puhul võrreldes etalonbetooniga ei esinenud. CFB tuha kasutamine betoonis nii originaal- kui jahvatatud kujul ei põhjusta betoonis ei paisumis- ega kahanemisohtu.

CFB tuhjade jahvatamisega kaasneb nähtus, kus jahvatamise tulemusel tuhad värvuvad punakaks. Punaka värvusega on nii nendega valmistatud tuhmördid kui betoonid. Värvuse intensiivsus on korrelatsioonis niiskuse sisaldusega – niiskusesisalduse tõusuga värvus intensiivistub, katsekehade väljakuivamise protsessis värvitoon hajub. Nii laborikatsetel kui ka tööstuslikult toodetud betoonide puhul täheldati, et kivinenud betooni tooni erinevus etalonbetoonist oli vaevu märgatav.

CFB tuhjade sisaldus betoonis betooni pinna omadusi ei mõjutanud ühegi katsetatud betooni puhul. Õhupooride arvu ega suuruse muutust ning muid võimalikke probleeme pinnaülevaatusel ei täheldatud ei laborikatsetel ega ehitusobjektidele tarnitud betoonide puhul.

Antud uuringu laborikatsete tulemuste alusel üle 20% tsemendi massist ei ole soovitatav jahvatatud CFB tuhkasid betoonile lisada, kuna katsetatud 30% CFB P tuhaga betoonide omadused (survetugevus, paindetugevus, külmakindlus) halvenesid oluliselt.

Tööstuslikult oli võimalik tuhade peenemaks jahvatada kui laboratoorselt, seega tõusid oluliselt ka tööstuslikult jahvatatud tuhjade aktiivsused ja survetugevused.

Pilootbetoonides tsemendi asendamine betoonis 15% CFB P tuhaga betooni külmakindlust ei mõjutanud; etalonbetoonil ja CFB P-j 15% betoonil katsetades 3% NaCl vesilahusega massikadu ei esinenud.

Pilootbetoonide mahumuutuste määramisel etalonbetooni ja CFB P-j 15% betooni alusel ilmnes, et tsemendi asendamine 15% jahvatatud CFB P tuhaga ei suurenda betooni paisumist ega kahanemist.

Segu realiseerimisel erinevatel ehitusobjektidel nii tarnetel kui segude pumpamisel ei täheldatud tuha lisandi negatiivset mõju betoonisegu omadustele.

Tulenevalt läbiviidud tööstuslikest katsetest ja saadud katseandmetest võib öelda, et jahvatatud CFB tuhkadega betoonisegu tootmine on võimalik, perspektiivikaks võiks pidada jahvatatud tuha lisamise mahus 10% kuni 20% tsemendi massist. Asendades betoonisegudes tsemendi osaliselt jahvatatud CFB tuhaga, saab tuha tootja oma jäätmete ladestamist vähendada ning betoonitootja oma toodete keskkonnasõbralikkust tõsta.

Kindlasti on regulaarse tootmise läbiviimiseks vajalik jätkusuutlik jahvatatud tuha tarne. Vajalik on ka, et tuha kvaliteet ja jahvatuse omadused oleks võimalikult vähe hälbivad. Perspektiivikus sõltub oluliselt ka jahvatatud tuha, kui toote, turustamishinnast.

Käesolevas töös on välja toodud tuhasisaldusega betoonide baasomadused, mis on sisendiks erinevate betoonitoodete tootmiseks. Uuringu andmete põhjal saab iga betoonitootja hinnata jahvatatud tuha kasutamise võimalikkust oma kaubabetooni või betoonitoodete tootmisel.

Uurimistöo tulemuste kasutamine ei piirne Eesti turuga. Kõrge kvaliteediga tuha maksumus on kõrgem võrreldes madala kvaliteedi tuhaga. See lubab tuhka Euroopasse transportida ja müüa. Sellisel juhul kasvab tuha taaskasutuspotentsiaal ringmajanduse tegevusena kordades. See võimaldab ühelt poolt vältida jäätmete teket ehk tuha ladestamist ja sellega seotud keskkonnamõjusid ja teiselt poolt toetada maapõueressursi säilitamist (tsemendi/betooni vajaliku toorme mitte välja kaevandamist) ning vältida ressursi kaevandamisega seotud keskkonnamõjusid.