



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

TTÜ TARTU KOLLEDŽ

JÄÄTUMISKINDLA LISANDI MÕJU BETOONI SURVETUGEVUSELE KÜLMAS KESKKONNAS

ANTIFREEZING ADDITIVE AFFECT TO COMPRESSION
STRENGTH IN BELOW FREEZING ENVIRONMENT

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Maikko Lõhmus

Üliõpilaskood: 122471EAEI

Juhendajad: Jaan Miljan, EMÜ professor
Jüri Resev, dotsent

Tartu 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

ABSTRACT

Lõhmus, M. Antifreezing additive affect to compression strength in below freezing environment. Master's thesis. In one volume. Tartu, 2019. 48 pages, 14 tables, 21 drawings. On A4 paper, in Estonian language.

In this Master's thesis, a antifreeze additive of concrete was studied in a cold environment. The test specimens were compared regarding their average compressive strengths. These experiments were conducted to determine the positive effect of the antifreeze additive on the compressive strength of concrete.

The aim of the work was to find changes in the compressive strength of concrete using two types of test specimens (with and without an additive) in a cold environment.

The Master's thesis consists of three chapters. The first chapter describes concreting in winter. The second chapter provides an overview of the preparation of the test specimens and the test methods. The third chapter introduces the test results and gives conclusions.

The results of the tests carried out revealed that the concrete additive used (Remei REBA FS-3) was not able to ensure the same compressive strength of the test specimen, hardened in normal ambient temperatures. The compressive strength of the test specimens in the cold environment increased slowly and the expected end result was not achieved. It was exposed that the final strength of the concrete with the additive was higher than that of the concrete without the additive.

The results of the research can be used as a basis for future studies on the performance of antifreeze additive in low temperatures.

Keywords: concrete, compressive strength, antifreeze additive, cold environment

SISUKORD

ABSTRACT	3
SISSEJUHATUS.....	5
1 ÜLEVAADE TALVISEST BETONEERIMISEST.....	7
1.1 TALVISE BETONEERIMISE PÕHITÕED	7
1.1.1 <i>Betoonitootmise külmapiirid</i>	<i>7</i>
1.1.2 <i>Betoonisegude transport ja pumpamine talvel</i>	<i>7</i>
1.1.3 <i>Minimaalne vajalik betooni tugevus enne läbikülmumist</i>	<i>8</i>
1.1.4 <i>Betooni tugevus enne lahtirakestamist ja koormamist</i>	<i>9</i>
1.2 BETOONI JÄÄTUMISKINDLUSE TAGAMISE VÕIMALUSED TEHASES	9
1.2.1 <i>Betoonisegu eelsoojendamine</i>	<i>9</i>
1.2.2 <i>Tsemendi tüübi ja liigi muutmine</i>	<i>10</i>
1.2.3 <i>Betooni tugevusklassi tõstmine</i>	<i>12</i>
1.2.4 <i>Kiirendite kasutamine</i>	<i>13</i>
1.2.5 <i>(Super)plastifikaatorite kasutamine</i>	<i>13</i>
1.2.6 <i>Jäätumiskindlate lisandite kasutamine</i>	<i>13</i>
1.3 BETOONI JÄÄTUMISKINDLUSE TAGAMISE VÕIMALUSED EHTUSPLATSIL	14
1.3.1 <i>Külmunud pindande soojendamine ning puhastamine</i>	<i>14</i>
1.3.2 <i>Betoneeritud konstruktsiooni katmine</i>	<i>15</i>
1.3.3 <i>Betoneeritud konstruktsiooni soojendamine kuuma õhuga</i>	<i>15</i>
1.3.4 <i>Betoneeritud konstruktsiooni soojendamine elektriga</i>	<i>15</i>
1.3.5 <i>Betoneeritud konstruktsiooni soojendamine infrapunakiirgusega</i>	<i>16</i>
1.4 BETOONI SURVETUGEVUSE HINDAMISE VÕIMALUSED.....	16
1.4.1 <i>Temperatuuri registreerijaga andmete salvestamine</i>	<i>16</i>
1.4.2 <i>Temperatuuri registreerija andmete analüüs.....</i>	<i>17</i>
1.4.3 <i>Betooni survetugevuse hindamine pörkevasaraga.....</i>	<i>19</i>
1.4.4 <i>Betooni survetugevuse hindamine pörkevasara-ultraheli kombineeritud meetodiga.....</i>	<i>20</i>
1.4.5 <i>Betooni survetugevuse määramine purustava meetodiga.....</i>	<i>21</i>
2 BETOONI SURVETUGEVUSE MÄÄRAMINE	23
2.1 KATSEKEHADE ETTEVALMISTAMINE	23
2.2 KATSEMETOODIKAD.....	28
2.2.1 <i>Mittepurustava katse meetodika pörkevasaraga Digi-Scmidt 2000</i>	<i>28</i>
2.2.2 <i>Purustava survekatse meetodika universaalse katsemasinaga P-125</i>	<i>29</i>
3 KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS.....	32
3.1 BETOONI SURVETUGEVUSE MÄÄRAMISE KATSE TULEMUSED	32
3.2 BETOONI SURVETUGEVUSE MÄÄRAMISE KATSETULEMUSTE ANALÜÜS.....	44
KOKKUVÕTE.....	46
KASUTATUD KIRJANDUS	47
LISAD	49
LISA 1 KATSEKEHADE SURVETUGEVUSE MÄÄRAMINE MITTEPURUSTAVA MEETODIGA.....	50
LISA 2 KATSEKEHADE SURVETUGEVUSE MÄÄRAMINE PURUSTAVA MEETODIGA.....	51
LISA 3 KATSEKEHADE PURUNEMISGRAAFIKUD JA -PILDID (BETONIMEISTER TARTU AS).....	52
LISA 4 KATSEKEHADE PURUNEMISGRAAFIKUD JA -PILDID (RUDUS AS).....	59

SISSEJUHATUS

Antud lõputöö „Jäätumiskindla lisandi mõju betooni survetugevusele külmas keskkonnas“ teema valikul lähtuti, et betoonkonstruktsioonidel on suur oht läbikülmumisele Eesti geograafilise asukoha tõttu novembrist aprillini. Värske betoonkonstruktsiooni läbikülmumise vältimiseks kõige lihtsam viis on jäätumiskindla lisandi kasutamine.

Uurimistöö tegemise põhjus oli see, et siiani pole katsetatud jäätumiskindlat lisandit sisaldava betoonisegu käitumist, kui see on koheaselt asetatud külma keskkonda. Tallinna Tehnikaülikoolis on varem uurinud Jürgen Jõgeva oma lõputöös „Betooni varajase läbikülmumise mõju betooni omadustele“ 1,3 ja 7 päeva vanuselt külma keskkonda pandud jäätumiskindla lisandiga betoonisegusid. Käesolevas magistritöös uuritakse, kas jäätumiskindla lisandi kasutamine betoonisegus selle koheaselt paigutamisel külma keskkonda tagab hilisemal paigutamisel sooja keskkonda ette nähtud survetugevuse. [1]

Betooni jäätumiskindlaid lisandeid on väga erinevaid, töös lähtuti materjalide kättesaadavusest. Uurimustöös kasutati Remei REBA FS-3 lisandit, mida kasutavad enamik Eesti suuremaid segusõlmesid. Jürgen Jõgeva oma lõputöös kasutas lisandit Mapefast SA-450 firmalt Mapei. Lõputöö eesmärk on välja selgitada, kas jäätumiskindla lisandi kasutamine õigustab ennast, kuna läbikülmumise vältimiseks on ka teisi võimalusi ja selle lisamine segusse tõstab hinda. Jäätumiskindla lisandi kasutamise põhjus on selle lihtsus, teised meetodid on keerulisemad ja kulukamad. [1]

Magistritöö keskenduti külmas keskkonnas viibinud katsekehade survetugevuse määramisele. Selleks kasutati laboris kliimakambrit, mis imiteeris külma keskkonna tingimusi. Eesmärkide saavutamiseks kasutati 42 katsekeha, millest 18 lisandiga ja 24 lisandita katsekeha purustati 28 päeva vanuselt. See andis võimaluse võrrelda lisandiga ning lisandita betoonisegude survetugevuste erinevusi.

Lõputöö koosneb kolmest peatükist. Esimene peatükk annab ülevaate talvisest betoneerimisest, mis tutvustab talvise betoneerimise põhitõdesid ning erinevaid betooni jäätumiskindluse tagamise võimalusi nii tehases kui ka ehitusplatsil. Teine peatükk keskendub katsekehade valmistamisele, betooni survetugevuse määramisele mittepurustavalt ja purustavalt. Kolmandas peatükis kirjeldatakse katse tulemusi ning tehakse nendest järeldused.

Töö autor tänab:

1. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituudi nooremteadur Martti-Jaan Miljanit, kes koolitas laboris lõputöös kasutatuid seadmeid kasutama;
2. Betoonimeister Tartu AS, kust saadi vajalik betoon katsekehade valmistamiseks;
3. Rudus AS, kust saadi vajalik betoon katsekehade valmistamiseks.

1 ÜLEVAADE TALVISEST BETONEERIMISEST

1.1 Talvise betoneerimise põhitõed

1.1.1 Betoontootmise külmapiirid

Tuleb arvestada, et betooni ei väljastata ning pumpamist ei teostata, kui õhutemperatuur on alla -15°C või tuulekülma alla -20 °C. Betooni pumpamist ei garanteerita, kui õhutemperatuur on vahemikus -10°C kuni -15 °C või tuulekülma vahemikus -10 °C kuni -20 °C (vt. Tabel 1.1, hall piirkond). Betooni pumpamine toimub tarnija otsusel. Kiirete ja pidevate betoneerimiste (vahelaed, vundamendid jms) puhul tavaliselt luba antakse. Aeglase ja katkestustega valamistele tihti peale pumpamist ei võimaldata, kuna sellisel juhul pole betoon torudes pidevas liikumises. Samuti tuleb vältida pooltühjasid koormaid, betoon võib külmuda osaliselt trummeli külge. Alla -5 °C on soovituslik vältida väiksemaid kui 1m³ koormaid. Betooni temperatuur enne raketisse paigaldamist peab talvel olema vähemalt +5 °C, soovituslikult isegi +15 °C. Talvise betoneerimise kõige suuremaks mõjuteguriks on tuul, mis koos külma ilmaga põhjustab betooni kiiret jahtumist. [2]

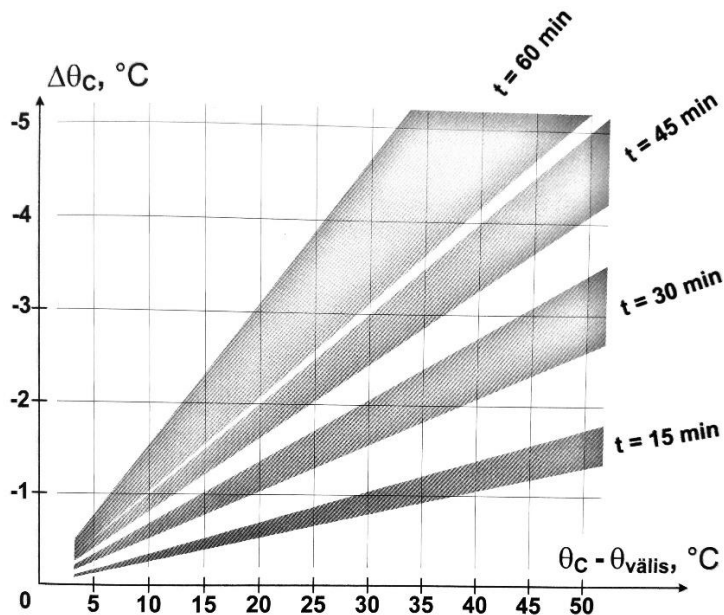
Tabel 1.1 Tuule ja õhutemperatuuri koosmõju soojakadudele [3]

Tuule kiirus, m/s	Õhutemperatuur, °C						
	10	5	0	-5	-10	-15	-20
	Konstruktsiooni pinna				temperatuur, °C		
Tuulevaikus	10	5	0	-5	-10	-15	-20
2	9	4	-1	-6	-11	-16	-21
4	5	-1	-7	-13	-18	-24	-30
6	3	-4	-10	-17	-24	-30	-37
8	1	-6	-13	-20	-27	-34	-41
10	0	-8	-15	-22	-30	-37	-44
12	-2	-9	-17	-24	-32	-39	-47
14	-2	-10	-18	-26	-33	-41	-49
16	-3	-11	-19	-27	-34	-42	-50
20	-3	-11	-19	-27	-35	-43	-51
22	-4	-12	-20	-28	-36	-44	-52

1.1.2 Betoonisegude transport ja pumpamine talvel

Miinuskraadidel, eriti tuulise ilmaga, on segul suur oht külmuda juba transpordi käigus, betoonisegurautode ja betoonipumpade torustikes pumpamise käigus on risk veel suurem. Betooni tarnimise oluliseks tingimuseks on selle temperatuur saabumisel objektile. Transpordi planeerimisel peab arvestama segu temperatuuri alanemist transpordil. Erinevad tegurid, nagu transpordivahend, välisõhu temperatuur, betoonisegu kogus ja ehitusplatsi kaugus mõjutavad betooni temperatuuri muutust. Joonisel 1.1 (kus, ϑ_c - betooni temperatuur segusõlmest väljumisel,

$\vartheta_{\text{välis}}$ - välisõhu temperatuur, $\Delta\vartheta_c$ – betooni temperatuuri muutus sõltuvalt ajast) on esitatud graafik, mis kehtib täiskoormas veoki kohta ja aitab hinnata betooni temperatuuri alanemist transpordil segusõlmest objektile. [4]



Joonis 1.1 Betoonisegu temperatuuri langus sõltuvalt betooni ja välistemperatuuri erinevusest ning möödunud ajast [5]

1.1.3 Minimaalne vajalik betooni tugevus enne läbikülmumist

Vee külmumine algab temperatuuril 0 °C, betoonis tsemendi mineraalide tõttu on vee jäätumistemperatuur paar kraadi madalam. Mõned kraadid alla nulli on madalam ka survelees poorivee jäätumistemperatuur. Talvel kerkib betooni puhul esile oluline tugevusnäitajaga, milleks on kriitiline tugevus. Kriitiline tugevus on väikseim tugevus, mida betoon peab omama läbikülmumise hetkel. Betooni liiga kiire läbikülmumine toob kaasa survetugevuse olulise languse ning teiste betooni püsivusomaduste (külmakindluse ja veetiheduse) halvenemise. Kriitiline tugevus tagab betoonile vajaliku vastupanuvõime seguvee külmumisel tekkinud jää poolt tekitatud rõhu suhtes kui ka betooni võime kivineda pärast ülessulamist ilma tugevusnäitajate olulise vähenemiseta. Vee paisumine külmumisel 9% ja poorides oleva vee rõhk põhjustavad pingeid betoonis, seetõttu peab kivistuva betooni tugevus enne külmumist olema piisavalt suur. Betooni kriitiliseks tugevuseks on kõikidel tugevusklassidel 5 MPa. Pärast 5 MPa saavutamist jätkub betooni külmakahjustusteta kivistumine ka pärast ajutist külmumist, kui jätkatakse betooni soojendamist. Läbikülmumine enne 5 MPa saavutamist võib vähendada betooni survetugevust isegi 50 kuni 80%. Juhul kui betoonile esitatakse kõrged nõudmised veetiheduse ja külmakindluse osas, on betooni läbikülmumine lubatud alles suurema tugevuse saavutamisel. Minimaalsel lubatud tugevusel läbikülmunud betooni survetugevus ei vähene, kuid mõningad betooni struktuuri kahjustused

põhjustavad veetiheduse ja külmakindluse vähenemist. Betooni külmumisel enne kivistumist suureneb ka betooni poorsus, mis vähendavad naket tsemendikivi ja täitematerjali vahel ning betooni ja armatuuri vahel. Võivad tekkida isegi mikropraod, mille tagajärjel on betoon püsivalt kahjustunud. [6]

1.1.4 Betooni tugevus enne lahtirakestamist ja koormamist

Lahtirakestamisel tuleb eelkõige arvestada raketise kandvate osade eemaldamist. Kandvad pinnad ja toestused võib eemaldada alles siis, kui konstruktsioon on võimeline vastu võtma rakenduvaid reaalseid koormusi, esmajoones omakaalu. Kui projektis puudub nõue lahtirakestamise kohta, siis praktiline soovitus on, et betoon oleks saavutanud vähemalt 70% etteantud tugevusest. [7]

Ehituse käigus koormatakse konstruktsioone lisaks omakaalule teiste ehitusosade ning tehnoloogiliste koormustega. Milline peab olema betooni tugevus enne konstruktsioonelemendi koormamist, tuleb teha konkreetseid tugevusarvutused projekterija poolt. Hoonele võib anda kasutusloa ainult juhul, kui betoon on saavutanud projektikohase tugevuse. [7]

1.2 Betooni jäätumiskindluse tagamise võimalused tehases

1.2.1 Betoonisegu eelsoojendamine

Eelsoojendatud betoonina käsitletakse segusõlmes valmistatud segu, mille täitematerjalid ja vesi on soojendatud, millega tagatakse transportitava betoonsegu nõutud temperatuur saabumisel objektile. [8]

Eelsoojenduse põhieesmärgiks on tagada kivistumisreaktsiooni käivitumine parast betooni transportimist ja paigaldamist. Tähtsaks peetakse ka betooni tugevuse kasvu kiirendamist ja soojendamisvajaduse vähendamist ehitusplatsil. Eelsoojendatud betooni temperatuur tehases ei ole kõrgem kui +30 °C. Üldjuhul liigitatakse eelsoojendatud betoonisegu järgmiselt: Soe betoonisegu, kus betooni normaalse kivinemiskiiruse tagamiseks peaks betooni temperatuur valamisel olema vähemalt 10-20 °C. Sellisel juhul on võimalus saavutada vajalik survetugevus suhteliselt lihtsate lisameetoditega. Teine võimalus tõsta betooni kivinemiskiirust on kasutada kuumat betooni. Selle temperatuur on 20-35 °C, ning sobib vähemassiivsete ning kiiret kivinemist nõudvate konstruktsioonide ehitamiseks. Kuum betoon tardub sedavõrd kiiresti, et massiivsemate konstruktsioonide puhul tuleb kasutada aeglustit, mis tagab betooni töödeldavuse pikema aja jooksul. [6]

Betoonisegu väljastustemperatuur tehases lähtub betoonisegu tarnimistemperatuurist ehitusplatsil ja transportimisel toimuvatest temperatuurikadudest. [8]

Eelsoojendatud betooni vajalikku temperatuuri on kõige lihtsam saavutada segus kasutatava vee soojendamise kaudu, sest vee erisoojusmahtuvus on umbes viis korda suurem võrreldes teiste koostisainetega. Vee soojendamine on lihtne, siis soojendatakse see tavaliselt esimesena ja soojemaks kui muud koostisained. Vee temperatuuri saab lihtsalt mõõta ja kontrollida. Eelsoojendamisel ei tohiks vee temperatuur ületada +65 °C, kuna sel juhul võib segamise algaasis alata tsemendi tardumine, kuna vesi pole täitematerjalidega kokku puutunud ja selle temperatuur seetõttu langenud. Antud betoon pole enam transporditav ja ehitusplatsile jõuab poolkivistunud betoon. [7]

Täiendavaks probleemiks on külmunud või lumeseguse täitematerjali nõuetele vastavuse saavutamine. Soojendada võib kõiki täitematerjalide liike või osa neist, kõik täitematerjalid tuleb siiski sulatada. Soojendamist tuleb alustada peenematest liikidest, praktiliselt on siiski kasulikum killustiku soojendamine. Jäise täitematerjali segamine betoonisegusse on lõpptulemust kahjustav ja keelatud. Lisaks on talvel toodud täitematerjalide sorteerimine raskendatud. Lume ja jää olemasolul on õige fraktsiooni saavutamine ning selle säilitamine raskendatud. Lume ja jää sulamisel tekiv vesi põhjustab erinevusi niiskuses, mistõttu on niiskuse kontroll äärmiselt keeruline. Võimalusel tuleb täitematerjal ladustada lumesaju eest. Tähtis on, et soojendusseadmed on reguleeritud ja kogu täitematerjal jõutakse sulatada ja soojendada enne kasutamist. [7]

Betooni tuleks valmistada võimalusel soojas keskkonnas, et koostisainete temperatuur oleks maksimaalselt ära kasutatud. Vastavalt standardile EVS-EN 206:2014 ei tohi betoonisegu temperatuur ehitusplatsile jõudes olla madalam kui 5 °C. Madalama betooni temperatuuri korral on kivistumisreaktsiooni käivitumine liiga aeglane või puudub üldse. Betoonisegu temperatuuri kontroll toimub ka tehases ja seda tehakse eraldi igal segul. [9]

1.2.2 Tsemendi tüübi ja liigi muutmine

Talvel tuleks võimalusel eelistada kõrgema tugevusklassiga ja kõrge eeltugevusega tsemente, nendeks on 42,5R või 52,5R. Vastavalt standardile EVS-EN 197-1:2011 on normeeritud kolm eeltugevust, CEM III tüüpi räbutsementide puhul kasutame neist kahte: kõrge (R) ja tavaline (N) (vt. Tabel 1.2). Eestis toodetakse järgmisi standardile EVS-EN 197-1:2011 vastavaid ehitustsemendi liike: portlandtsementi, portland-põlevkivitsementi ja portland-komposiittsementi (vt. Tabel 1.3). Antud tsemente on saadaval normtugevusklassides 42,5 ja 52,5 nii tavalise kui ka kõrge eeltugevusega. Suurema tugevusklassiga ja suurema eeltugevusega tsementide kasutamisel on kergem saavutada talviseks betoneerimiseks sobivad segu omadused. See annab võimaluse lühendada valminud konstruktsioonide järelhooldamise aega ja kulusid. Samuti on kõrgema eeltugevusega tsementidel intensiivsem hüdratatsioonisoojuse eraldumine kivinemisprotsessi

algstaadiumis. Antud info põhineb AS Kunda Nordic Tsement toodangul orienteeritult Eesti ehitusturul tegutsevatele spetsialistidele. [10]

Tabel 1.2 Harilikele tsementidele normväärtusena määratletud mehaanilised ja füüsilised nõuded vastavalt standardile EVS-EN 197-1:2011 [10]

Mehaanilised ja füüsilised nõuded standardi EVS-EN 197-1:2011 järgi					
Tugevusklass	Survetugevus, MPa			Tardumise algus, min	Paisumine, mm
	Eeltugevus		Normtugevus		
	2- päevane	7- päevane	28-päevane		
32,5 N	-	≥16,0	≥32,5	≤52,5	≥75
32,5 R	≥10,0	-			
42,5 N	≥10,0	-	≥42,5	≤62,5	
42,5 R	≥20,0	-			
52,5 N	≥20,0	-	≥52,5	-	≥45
52,5 R	≥30,0	-			

Tabel 1.3 Lahtiselt turustatavad ehitustsemendid [10]

Tsemendi kaubanimetus	Normaal-tsement	Kiir-tsement	Ultra-tsement	Sulfaadikindel tsement	Põlevkivi kiirtsement	Põlevkivi tsement
Tsemendi standard-tähistus	CEM I 42,5 N	CEM I 52,5 N	CEM I 52,5 R	CEM I 42,5 N-SR 5	CEM II/A-T 52,5 N	CEM II/B-T 42,5 R
Vastavus standardile	EVS-EN 197-1:2011					
Tsemendi nimetus standardi järgi	portlandtsement				portland-põlevkivitsement	portland-põlevkivitsement
Tsemendi tugevus-klass	42,5 N	52,5 N	52,5 R	42,5 N	52,5 N	42,5 R
Omadused						
Survetugevus, MPa						
1 päev	15	18	31	16	20	15
2 päeva	28	32	43	27	33	30
28 päeva	54	57	63	57	59	55
Tardumisaja algus, min	180	190	160	160	170	160

1.2.3 Betooni tugevusklassi tõstmine

Betooni tugevusklassi tõstmine on üks kõige efektiivsemaid lahendusi talvisel betoneerimisel. Soovitavalt kasutada betoone alates tugevusklassist C30/37. Mida kõrgem on valitud tugevusklass, seda suurema tõenäosusega saavutab betoon vajaliku tugevuse kiirema ajaga. Lisaks võimaldab kõrgema klassiga betooni kasutamine vähendada betooni talvise hoolduse aega isegi kuni kaks korda. Seda varianti on hea kasutada, kui konstruktsioonid on massiivsed ja neid on võimalik kiiresti kinni katta. Selliselt on võimalik valada betooni miinuskraadidel ilma lisasoojusenergiat andmata. Vähesemahuliste konstruktsioonide (postid, kandetalad) puhul on heaks valikuks betoonid alates tugevusklassiga C40/50. Sageli kasutatakse ühe tugevusklassi astme võrra kõrgemat betooni võrreldes projekteerituga. Tugevusklassi muutus tõstab küll betoonisegu hinda, kuid samas võimaldab kokku hoida küttekuludelt ning kiirema töö jätkamise pealt. Kõrgema tugevusklassiga betooni kasutamisel on mõistlik suurendada ka betoonisegu töödeldavust plastifikaatoritega. [7]

1.2.4 Kiirendite kasutamine

Ehitajat rahuldava betoneerimistööde kiiruse võib saavutada ka spetsiaalsete lisaainetega, kiirenditega. Standardite EVS-EN 934-2:2009 ning EVS-EN 934-A1:2012 [11] põhjal peab tardumise kiirendi tagama +20 °C temperatuuril esmase tardumise vähemalt 30 minutiga ning maksimaalselt 60% lisandivaba betoonisegu algsest tardumisajast +5 °C juures. Kivistumise kiirendi peab temperatuuril +20 °C andma vähemalt 120% lisandita betooni ühepäevasest survetugevusest ning temperatuuril +5 °C juures vähemalt 130% lisandita betooni kahepäevasest survetugevusest. Kiirkivinev betoon sisaldab tsemendi reageerimist aktiveerivat lisandit, mis võimaldab betooni hooldusaega lühendada. Nende keemilis-füüsikalise toime olemus seisneb selles, et lisandites sisalduvad keemilised ühendid suurendavad tsemendi mineraalide hüdratsiooni kiirust. Selle tulemusel tekib hüdratatsioonisoojus, mis omakorda annab betoonile kiiremini algatugevuse. Kiirkivinev betoon ei ole jäätumiskindel betoon, mida kahjuks nii betoonitootjad kui ka ehitajad püüavad aeg-ajalt väita. Kuigi betooni kivinemise kiirendi vähendab kaudselt betooni külmumise võimalust, tuleb siiski jälgida betooni temperatuuri betoonitööde käigus ja vastavalt sellele käituda. Kivineva betooni temperatuur peab olema vähemalt +5 °C, võimalusel isegi kuni +10 °C. Tuleb arvestada, et vesitsementtegur mõjutab kiirendite toimet. Mida kõrgem on vesitsementtegur, seda väiksem on kiirendite mõju betoonis. Madalatel temperatuuridel on mõistlik kasutada kiirendeid koos (super)plastifikaatoritega. [7]

1.2.5 (Super)plastifikaatorite kasutamine

Plastifikaatorid on modifitseeritud polümeeride segud, mis on arendatud spetsiaalsete betoonide valmistamiseks. Polümeerid on aktiivsed tsemendiosakeste kobarate hajutamisel ja kindlustavad kiire temperatuuri tõusu betooni sees. Plastifikaatorite abil saavutatakse betoonile esitatavate erinõudmistele vastavus. Neis on parimal moel kombineeritud suurepärase dispergeerimisvõime ja segude mõõdukas töötlemiskestus. Mis on kõige tähtsam talvistes tingimustes, et superplastifikaatorid võimaldavad veevajaduse vähendamist 12 kuni 45% ja toota kõrge tugevusklassiga betoone säilitades samal ajal madalatel vesitsementteguritel suurepäraseid töödeldavusomadused. Nende kasutamisel paraneb ka betooni varane survetugevus kui ka lõpptugevus. Samuti suureneb segu kohesiivsus, väheneb vee-eraldus ning paraneb pumpamine ja väheneb segregeerumise oht. [12]

1.2.6 Jäätumiskindlate lisandite kasutamine

Jäätumiskindel betoon on talvine eribetoon, kuhu on lisatud vedel kloorivaba lisand, mis on toodetud kaltsiumnitraadi baasil. Eelkõige kasutatakse betooni jäätumisvastase vahendina, aga ka madalatel temperatuuridel kivinemise kiirendina. Lisandi toimel saab lühendada tardumisaegu, parandada varast betooni tugevust ja vähendada külma toimet värskete valatud betoonisegule. See

ei lase tekkida betooni struktuuri lõhkuvatel jääkristallidel. Kuna lisandid on ka kloorivabad, siis toimivad need ka korrosiooni inhibiitorina. Samuti toimivad need antifriisina, alandades seguvee külmumispunkti, lisaks lühendavad lihvimise alguse ja lõpuaega ning vähendab vee eraldumist. Lisandeid kasutatakse eelkõige, et saavutada jäätumistugevus 5MPa enne betooni läbikülmumist vastavalt standardile EN 13670:2010. [13] Doseeringud (1-6%) sõltuvad väliskeskonna temperatuurist ja hooldusmeetmetest (vt. Tabel 1.4). Saavutamaks varasem külmumist taluv kriitiline tugevus, on soovitatav kasutada veel madalat vesitsementtegurit, kiirkivinevat tsemienti ning betoonisegu temperatuur ehitusplatsile jõudes võiks olla üle 15 °C. [14]

Tabel 1.4 Doseering tsemendi kaalust sõltuvalt väliskeskonna temperatuurist [15]

Maldalaim väliskeskonna temperatuur	Doseering, % tsemendi kaalust
Kuni -2°C:	1
Kuni -5°C:	3
Kuni -10°C:	4,5
Kuni -15°C:	6

Soovitus: Kasutatava tsemendi kogus min. 380 kg/m³ Soovitus: 4% korrosiooni kaitseks

1.3 Betooni jäätumiskindluse tagamise võimalused ehitusplatsil

1.3.1 Külmunud pindade soojendamine ning puhastamine

Betooni temperatuur langeb kiiresti kokkupuutel kontaktpindadega (raketis, maapind), seetõttu tuleks kokkupuute pinnad enne soojendada või üles sulatada. Kuna pindade sulatamine on väga energiamahukas, siis tuleb hästi läbi mõelda kogu protsess. Massiivsete konstruktsioonide puhul enamasti pole eelsoojendamine vajalik. Õhukeste konstruktsioonide puhul tuleb aga kindlasti pinnad vahetult enne betoneerimist soojendada. Pinnased, mis paisuvad külmudes ja tihenevad peale sulatamist tuleks kindlasti enne valamist soojendada. Külmunud pinnase mõju betoonisegu temperatuurile saab oluliselt vähendada soojusisolatsioonikihi paigaldamisega pinnasele. Armatuurterase eelsoojendamine ei ole oluline, kuna välisõhu keskkonnas jahtub soojendatud teras kiiresti. [7]

Talvel betoneerimise teevad lisaks külmale keerukamaks ka lumi ja jää. Raketised, armatuur ja aluspinnad tuleks võimalusel hoida lumest vabad, kõige lihtsam viis on valminud ala katmine. Vahetult enne betoneerimist tuleb pinnad puhastada lumest ja jääst. Puhastamiseks on mitmeid võimalusi, nendeks on lehepuhuri või suruõhuga puhastamine ning gaasipõletiga, auruga või soojapuhuritega alt poolt sulatamine. Olenevalt olukorrast tuleks kasutada neid meetodeid kombineeritult. [6]

1.3.2 Betoneeritud konstruktsiooni katmine

Tehasest tulnud eelsoojendatud betooni omasoojuse säilitamise seisukohalt on betoneeritud konstruktsiooni kiire katmine esmase tähtsusega. Katmata betoonkonstruktsiooni temperatuur võib langeda kiirusega 5-10 °C/h. Betoon tuleks katta võimalikult kiiresti pärast paigaldamist soojusisolatsiooniplaatidega, pakasemattidega vms kattega, vältimaks tsemendi reageerimisel tekkiva soojuse kadu. Tähelepanu tuleb pöörata ka ülekatetele, nurkade soojustamisele ning katte kinnitamisele. Kerged polüetüleenist kiled ei pruugi anda soovitud tulemust, tuleb lähtuda valitsevatest tingimustest. Oluline on kaitsta betooni tuule eest, mis soodustab pinna jahtumist. Kiire katmine on oluline vabaneva soojuse säilitamiseks, temperatuurierinevuste vähendamiseks, küttekulude vähendamiseks ja vee eraldumise takistamiseks. Betooni katmise kestvus sõltub katematerjalist, keskkonna temperatuurist, betooni margist jms. Ilma lisasoojendusega pole mõtet betooni kaitsta külma eest kauem kui 3-7 ööpäeva, selle aja jooksul eraldub betoonist eksotermiast tingitud soojus ja betooni temperatuur võrdsustub õhutemperatuuriga. [8]

1.3.3 Betoneeritud konstruktsiooni soojendamine kuuma õhuga

Sooja õhuga saab kütta betoonkonstruktsiooni alt või ümber perimeetri, selleks tuleb luua suletud õhuruum. Õhu soojendamiseks kasutatakse õli, gaasi, diisli ning elektri pealt töötavaid kuumaõhupuhureid. Suuremate objektide puhul kasutatakse ka kuumavee- või aurukalorifeere, mille tegelik kasutegur on ainult 30%. Puhurite võimsuste valik on päris suur, neid on saadaval 5-300 kW, ligikaudse võimsustarve saab tabelist 1.5. Erilist tähelepanu tuleb pöörata katmise kvaliteedile. [7]

Tabel 1.5 Puhurite ligikaudne võimsustarve kuuma õhuga soojendamisel

Plaadi paksus, mm	Valatava plaadi pindala, m ²			
	50	100	200	300
100	28 kW	56 kW	112 kW	168 kW
200	56 kW	112 kW	168 kW	336 kW
300	112 kW	168 kW	336 kW	672 kW

1.3.4 Betoneeritud konstruktsiooni soojendamine elektriga

Betooni elektriküttimine toimub enamasti spetsiaalse traadiga, kus elektrienergia transformeeritakse soojuseks takistustraadides. Väiksemate konstruktsioonide puhul kasutatakse ühefaasilist voolu pingega 220V. Suuremates konstruktsioonides kasutatakse kolmeefaasilist 380V pingega voolu, väljuv madalpingevool (U=42V) juhitakse plastiga kaetud kütetraadidesse. Monoliidi temperatuuri tõus peaks soovituslikult olema sujuvalt kiirusega 5 °C/h. Oluline on mitte hooletusse jätta aega, nii et temperatuur muutub ühtlaselt, see tagab konstruktsiooni tugevuse. Kütmiseks peab kasutama soovituslikke kütetraadide vahekauguseid, milleks on 20-40 cm, maksimaalselt

60 cm. Samuti peab arvestama paigaldusviisi, et kütetraat oleks vähemalt 2-3 cm betooni sees, traadid ei tohi omavahel kokku puutuda. Elektrienergia vajalik võimsus kütisel betooni mahu 1m³ kohta on umbes 1-6 kW. Jaotuskaablites tuleb teostada mõõtmist ampertangidega, et iga silmuse haru voolutugevus ei ületaks 270 A ja jaotusjuhtmetel 30 A. Korralikult valitud ja professionaalselt paigaldatud kütetraat suudab soojendada suurema mahuga betoonkonstruktsioone. Elektrienergia vähene tarbimine hoiab kokku objekti kuludelt ja vähendab oluliselt hinnangulisi töökulusid betooni järelhoolduselt. Traatsoojenduse tõhustamiseks tuleks kasutada eelsoojendatud betoonisegu. [7]

Saab kasutada ka statsionaarselt raketise sisse paigaldatud kütteelementidel põhinevat soojendamise tehnoloogiat, mis tagab soojuse liikumise ainult betoonile. Seinaraketistes ja laeraketistes kasutatakse nii ühekordse kui ka kahekordse isolatsiooniga kütetraate. Nõutav võimsus jääb 1,0-2,5 kW/m³ vahele ning see tähendab kummalegi raketise poolele 150-250 W/m². Sellisel juhul on energia tarbimine vahemikus 70-180 kWh/m³. [7]

1.3.5 Betoneeritud konstruktsiooni soojendamine infrapunakiirgusega

Kiirgussoojendamise põhiolemus on soojuse ülekandmine betoonile kiirgusenergia kujul, mille tulemuseks on selle muutumine soojuseks betooniga kokkupuutel. Soojuskandjaks on infrapunakiirgus, mis levib elektromagnetiliste lainetena, mille lainepikkus jääb nähtava valguse ja mikrolainekiirguse lainepikkuse vahele. Infrapuna kiirguse generaatorid võivad olla erinevad kütteseadmed, mida kuumutatakse elektrivoolu või muu soojusallika, näiteks gaasi või õli abil. Konstruktsiooni temperatuuri saab muuta reguleerides infrapunakiirgeneraatorite võimsust ja nende kaugust kuumutatud betooni pinnalt. Lisaks on selle abil võimalik termotöötamise lõpuks muuta betooni kuumutamise intensiivsust ja betooni jahutuse intensiivsust. Infrapunakiirgus sobib hästi suure pinnaga konstruktsioonide soojendamiseks ning ei sobi üksikute konstruktsioonide soojendamiseks. Kiirgurite võimsused jäävad vahemikku 2-35 kW ning võimsuse vajadus on keskmiselt 10 kW/m² kohta. Energiavajadust on vaja umbes 70-180 kWh kuupmeetri kohta. [7]

1.4 Betooni survetugevuse hindamise võimalused

1.4.1 Temperatuuri registreerijaga andmete salvestamine

Temperatuuri registreerija salvestusseade, mille külge ühendatakse juhtmete abil andurid. Elektrooniline mõõteseade teostab temperatuuri mõõtmisi programmi sisestatud aja järel. Seadmelt saadud andmete abil on võimalik kontrollida betoonkonstruktsiooni tugevust objektil mis tahes ajahetkel. Vanematel seadmetel (nt. Testo 175T3, vt. Joonis 1.2) tuleb konstruktsiooni paigaldatud anduritega mõõdetud ja salvestatud andmed tõmmata arvutisse, saades temperatuuri ja tugevusnäitajad mõõtmishetkel. Uuemate seadmete (nt. Telia SigFox device, vt. Joonis 1.3) puhul

on võimalik jälgida konstruktsiooni temperatuuri igal hetkel, saates andmeid kohe arvutisse paigaldatud programmi. Antud andmesalvestile on võimalik sisestada hoiatused temperatuuri alanemisel alla kriitilise piiri. See annab võimaluse jälgida temperatuuri muutusi ka öisel ajal, kui ehitusplatsil kedagi ei ole. Andmesalvestid kindlustavad täpsete mõõtmistulemuste pideva salvestamise ehitajat huvitava perioodi jooksul, esimese 12 tunni jooksul tuleks mõõta 2-3 tunni tagant ning hiljem 4-6 tunni tagant. Nende andmete põhjal on võimalik hinnata betooni lahtirakestamiseks või pingestamiseks vajaminevat soovitud tugevust, võimalike külmakahjustuste mõju ja määrata soojendamisvajadus. Selline meetod on betoneerimistöõde planeerimisel ja läbiviimisel tõhus töövahend. Meetodit kasutades on võimalik leida enne tööde algust nii ajaliselt kui ka majanduslikult säästvaim tehnoloogiline variant. Samuti saab ehitustööde käigus igal ajahetkel mitmekülgse ülevaate betoonkonstruktsioonis toimuvast. Mõõtepunktideks tuleks võtta konstruktsiooni kriitilised punktid ning ühe mõõtekorraga peaks mõõtmise teostama vähemalt kolmes eri kohas. Mõõtmise tulemustest joonistub välja ka graafik, mis näitab perioodi kivistumise kulgu. [6]



Joonis 1.2 Testo 175T3



Joonis 1.3 Telia SigFox seade

1.4.2 Temperatuuri registreerija andmete analüüs

Eestis on levinumaks ja usaldusväärsemaks arvutusviisiks Sadgrove valemi (vt. Valem 1.1) kasutamine, kus küpsustegur (tegur, mis teisendab reaalse kivistumistemperatuuri kestuse standardtingimustele vastava temperatuuri kestuseks) ning mille järgi betooni küpsusekvivalent

(aeg, mille jooksul betoon saavutab reaalsetes tingimustes kivinedes võrdse tugevuse standardtingimustel kivinenud betooniga) [7]:

$$T_{eq,n} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T+16}{36} \right)^2 * \Delta t_i, \text{ kus} \quad (1.1)$$

T - betooni keskmine temperatuur antud i perioodi kestel, °C,

Δt_i - kivistumise i perioodi kestus päevades.

Valemiga 1.1 määratud küpsusekvivalenti võrreldakse standardtingimustel temperatuuril +20 °C kivistunud betooni küpsusaega. Selleks on vaja betooni kivistumisgraafikut (vt. Joonis 2.6), mille esitab betooni tarnija. Antud valem õigustab ennast tugevusklassidega 42,5 ja 52,5 MPa tsementide baasil, temperatuurivahemikes 1-45 °C ning ajaliselt kasutatav 5 tundi kuni 28 päeva. Valemis 1.1 tuleks periood Δt_i valida selline, et betooni temperatuur selle kestel oleks enam-vähem stabiilne. Võimalusel kasutada tabelarvutusprogrammi, mille abil saab koostada algoritmi betooni tugevuse koheseks leidmiseks temperatuuri mõõtmistulemuste ja mõõtmise aja sisestamisel. Tabelis 1.6 on näha, et ca 2 ööpäevaga (48h) keskmiselt temperatuuril 10 °C juures on tegelik kivistumine standardtingimustel kivistumisgraafiku põhjal ainult 1 ööpäev (24h). [7]

Tabel 1.6 Sadgrove valemi kasutamise põhimõte

kuu-päev	Mõõtmise kellaeg	Mõõtmise vahe tundides	Mõõtmiste kasv, aeg tundides	Mõõtmiste vahe, ööpäevades	Mõõtmise intervall, ööpäevades (t)	Mõõdetud temp. °C	Keskmine temp. T °C	Ajavahemiku küpsemisaeg ööpäevades $((T+16)/36)^{2*t}$	Küpsemise aeg kokku
21.jaan	17:00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,20	0,00	0,00	0,00
22.jaan	07:00	14,00	14,00	0,58	0,58	13,50	11,85	0,35	0,35
22.jaan	17:30	10,00	24,00	1,00	0,42	7,50	10,50	0,23	0,57
23.jaan	10:00	17,00	41,00	1,71	0,71	8,80	8,15	0,32	0,89
23.jaan	16:00	6,00	47,00	1,96	0,25	7,20	8,00	0,11	1,00

Vähem levinumaks arvutusviisiks on Nykänen`i valem (vt. Valem 1.2).

$$N = (T + 10 \text{ °C}) * \frac{\Delta h}{24}, \text{ kus} \quad (1.2)$$

T - betooni temp. mõõdetuna ajahetkel h , °C,

Δh - kivinemiseaeg eelmisest mõõtmisest (mõõtmiste intervall), h,

k - $k=1$, kui $t > 0$ °C ja $k=0,4$, kui $t < 0$, °C.

Näide Nykänen'i valemi kasutamisest tabelites 1.7 ja 1.8. [8]

Tabel 1.7 Nykänen'i valemi kasutamine kohas nr. 1 nr. 2

Mõõtmiskoht 1				
intervall/h	aeg	t(°C)	Δh	N
	16:00	15		
6	10.12.2018 22:00	14	0,25	6,00
6	11.12.2018 04:00	13	0,25	5,75
6	11.12.2018 10:00	12	0,25	5,50
6	11.12.2018 16:00	11	0,25	5,25
6	11.12.2018 22:00	11	0,25	5,25
6	12.12.2018 04:00	10	0,25	5,00
6	12.12.2018 10:00	10	0,25	5,00
6	12.12.2018 16:00	10	0,25	5,00
6	12.12.2018 22:00	9	0,25	4,75
6	13.12.2018 04:00	9	0,25	4,75
6	13.12.2018 10:00	8	0,25	4,50
6	13.12.2018 16:00	8	0,25	4,50
6	13.12.2018 22:00	7	0,25	4,25
kokku :				65.50

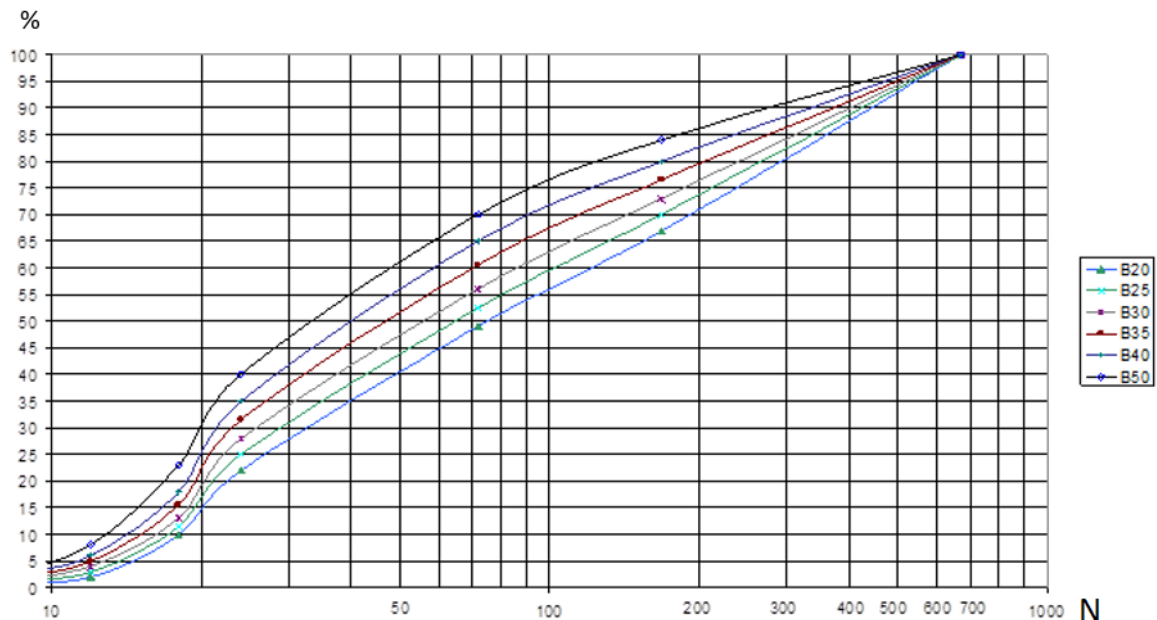
Tabel 1.8 Nykänen'i valemi kasutamine kohas nr. 2

Mõõtmiskoht 2				
intervall/h	aeg	t(°C)	Δh	N
	16:00	14		
6	10.12.2018 22:00	13	0,25	5,75
6	11.12.2018 04:00	13	0,25	5,75
6	11.12.2018 10:00	12	0,25	5,50
6	11.12.2018 16:00	11	0,25	5,25
6	11.12.2018 22:00	11	0,25	5,25
6	12.12.2018 04:00	11	0,25	5,25
6	12.12.2018 10:00	10	0,25	5,00
6	12.12.2018 16:00	10	0,25	5,00
6	12.12.2018 22:00	9	0,25	4,75
6	13.12.2018 04:00	9	0,25	4,75
6	13.12.2018 10:00	9	0,25	4,75
6	13.12.2018 16:00	8	0,25	4,50
6	13.12.2018 22:00	8	0,25	4,50
kokku :				66.00

Keskmine survetugevus BY 205 järgi :

$N = 65,75 = 50\% = 23 \text{ MPa}$

Tabelite 1.7 ja 1.8 põhjal saab betooni küpsusastme hindamise graafiku (vt. Joonis 1.4) alusel hinnata tugevust antud perioodi vältel, kus on näha, et $N=65,75$ korral on näiteks C35/45 tugevusklassi betooni survetugevus arenenud 50% ehk saavutanud tugevuse 23 MPa.

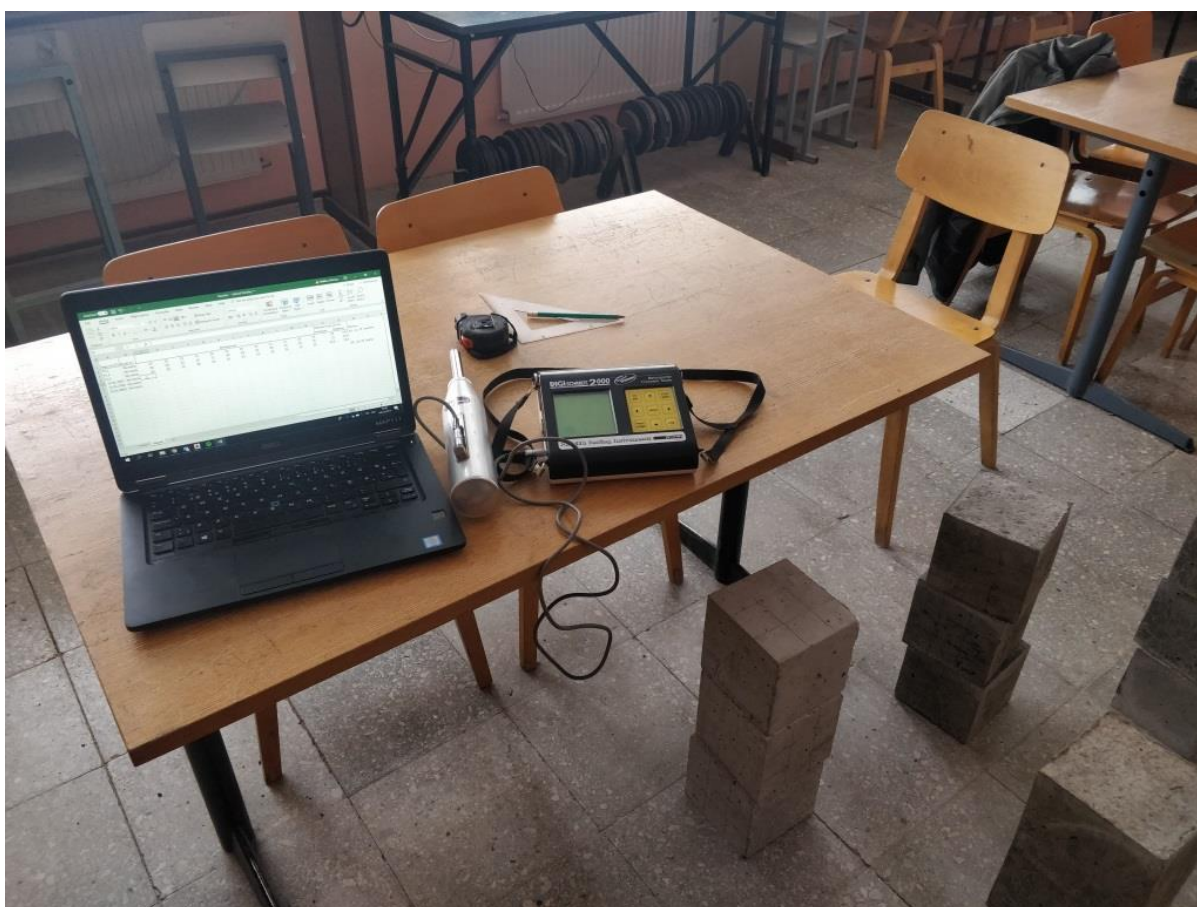


Joonis 1.4 Betooni küpsusastme hindamise graafik Nykänen'i valemi puhul

1.4.3 Betooni survetugevuse hindamine pörkevasaraga

Betooni survetugevuse hindamine pörkevasaraga (Schmidt'i vasar, vt. Joonis 1.5) on üks vanemaid, levinuimaid ja lihtsamaid meetodeid, kuna tegemist on mittepurustava katsega. Pörkevasar

surutakse katsepinna poole ning vedru vabastamisel tekkinud jõul liikuma pandud mass lööb pinnaga kontaktis olevale kolvile. Selliselt saadakse pörkearv, mis on kokkupörkekolvil tagasi pörganud massi tagasipörke teekonna pikkus väljendatud protsendina vedru algpikkusest. Lihtsamalt öeldes on see löögi kineetiline energia. Pörkearvu saab teisendada betooni survetugevuseks, selleks kasutatakse teisenduskõveraid. Konstruksioonides survetugevuse hindamise nõuded on kirjeldatud standardid EVS-EN 12504-2:2012. [16] Praktiliste kogemuste põhjal tuleb tõdeda, et pörkearvu võib pigem kasutada betooni ühtluse hindamiseks ning madala kvaliteediga ja kahjustatud betooni hindamiseks. [17]

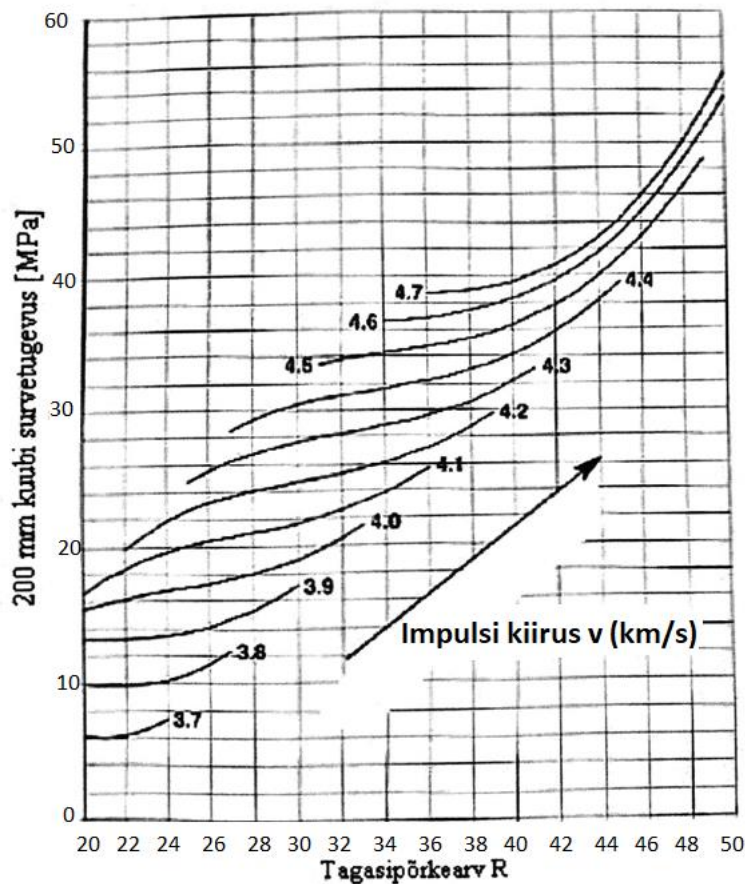


Joonis 1.5 Proceq Digi-Schmidt 2000 mudel ND

1.4.4 Betooni survetugevuse hindamine pörkevasara-ultraheli kombineeritud meetodiga

Suhteliselt levinud mittepurustav meetod on ultraheliimpulsi meetodi katse, mis on eelkõige suunatud betooni omaduste uurimisele, aga koos pörkearvudega võimalik leida ka survetugevust. Eraldiseisvalt sõltub ultraheliimpulsi levimise kiirus küll betooni tihedusest, mille on teatav seos betooni survetugevusega, aga selline hindamine pole usaldusväärne. Antud meetodi aluseks on pingete levimine lainetena, ehk mõõdetakse, kui palju aega kulub ultrahelilainetel läbimaks ettemääratud teepikkust. Seejärel jagades teepikkuse ajaga on võimalik leida ultraheli impulsi

kiirus. Teades ultraheli impulsi kiirust ning pörkearvu, siis on võimalik hinnata betooni survetugevust, kasutades teisenduskõveraid (vt. Joonis 1.6). Ultraheliimpulssi edastab elektroakustiline saatev andur ning impulsi võtab vastu vastuvõttev andur. Ultraheli impulsi kiiruse määramise katse on kirjeldatud standardis EVS-EN 12504-4:2004. [18]



Joonis 1.6 Ultraheli seadme Tico teisenduskõver portlandtsemendist tehtud betoonkatsekehadele [17]

1.4.5 Betooni survetugevuse määramine purustava meetodiga

Antud meetodi puhul saab proovikehi võtta konstruktsioonist väljapuurimise teel või valmistada valatava konstruktsiooni betoonisegust eraldi proovikehad. Kuubikukujulisi katsekehi surutakse risti valamise suunale. Koormamiseks kasutatakse enamasti hüdraulilisi survepresse (vt. Joonis 1.7), mille koormamise kiirus tuleb hoida stabiilsena 0,2-1,0 MPa/s. Koormust tuleb rakendada sujuvalt ja suurendatakse pidevalt valitud konstantse kiirusega $\pm 10\%$, kuni katsekeha purunemiseni. Maksimaalne koormusnäit ehk purustav jõud kuvatakse seadmel ning anduritega seadmetel ka arvutisse. Purustava jõu ja katsekeha ristlõike pindala kaudu on võimalik arvutada katsekehade survetugevus. Lisaks tuleb üle kontrollida ka purunemispilt, mis vastaks normidele. Proovikehade katsetulemuste hindamisel tuleb järgida kivistunud betooni katsetamist käsitlevate standardite

EVS-EN 12390-1:2012; EVS-EN 12390-2:2009; EVS-EN 12390-3:2009/AC2011 ja EVS-EN 206:2014 nõudeid. [9,19,20,21]



Joonis 1.7 Hüdrauliline survepress II-125

2 BETOONI SURVETUGEVUSE MÄÄRAMINE

2.1 Katsekehade ettevalmistamine

Talvise betoneerimise oludes (temperatuuril alla 5 °C) on vaja tagada kivinemiskiirus, siis tuleb kindlasti kasutada vastavaid meetodeid – betooni katmine, hilisem soojendamine. Kui see pole võimalik, siis tuleb kasutada sõltuvalt ilmastikust jäätumiskindlat lisandit, kiirtsementi, kiirendit, kõrgemat betooni tugevusklassi või neid kõiki korraga. [21]

Katsekehade valmistamise ja hoidmise aluseks on standard EVS-EN 12390-2:2009 [20] Kivistunud betooni katsetamine Osa 2: Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine. Katsekehade valmistamisel kasutati jäätumiskindlat lisandit, superplastifikaatorit, sooja betooni ning kõrgemat tugevusklassi, milleks oli C30/37 Rudus AS betoonitehasest ning Betoonimeister AS segusõlmest võetud betooni tugevusklassiks oli C25/30. Eesmärk on uurida jäätumiskindla lisandi kasulikkust betoonkonstruktsioonides (paneelidevahelised vuugid, õõnesplokkide täitmine ning vundamendid, sageli lintvundamendid). Sellistes olukordades ei suuda betoon ennast ise kütta, seega tuleks kindlasti kasutada vastavaid lisandeid. Betoonkonstruktsioonid (seinad, laed ja vundamendid, sageli kannvundamendid) suudavad saavutada jäätumistugevuse (5 MPa) kiiresti, sageli piisab ainult kinni katmisest või päevasest hilisemast kütmisest.

Uurimustöös kasutatud betooni keskkonnaklassid [22]:

XC2 – Märg, harva kuiv. Kaua veega kontaktis olevad betooni pinnad, paljud vundamendid

Uurimustöös kasutatud betooni lisandid:

Remei REBA FS-3 – vedel kloorivaba jäätumisvastane vahend ning madalate temperatuuride kivinemise kiirendi

Mapei Dynamon NRG 1010N – superplastifikaator, mis kiirendab kivistumise protsessi (kasutab Rudus AS Reola betoonitehas)

Remei Carboxyment 3400LL – superplastifikaator, mis võimaldab veevajaduse vähendamist ning parandab betooni varajast tugevust (kasutab Betoonimeister Tartu AS tehas)

Uurimustöö tarbeks valati betoonist katsekehad mõõtudega: 150 mm x 150 mm x 150 mm, milleks kasutati Eesti Maaülikooli spetsiaalseid vorme ning F/F vineerist ise tehtud vorme. Kokku valmistati 42 katsekeha, betooni valamine toimus kahel korral. Katsekehade valmistamiseks vajalik betoon saadi esimesel korral Betoonimeister Tartu AS segusõlmest (18.02.2019, katsekehasid 21) ning teisel korral Rudus AS Reola segusõlmest (25.02.2019, katsekehasid 21). Pärast katsekehade valmistamist transporditi need Eesti Maaülikooli laborisse. Katsete läbiviimiseks sai valitud kaks erinevat C30/37 (Rudus AS) ja kaks erinevat C25/30 (Betoonimeister AS) tugevusklassiga ning XC2

keskkonnaklassiga betoonisegu. Ainuke erinevus seisnes selles, et pooltele katsekehadele lisati jäätumiskindel lisand Remei REBA FS-3 + superplastifikaatorid (vt. Tabel 2.1).

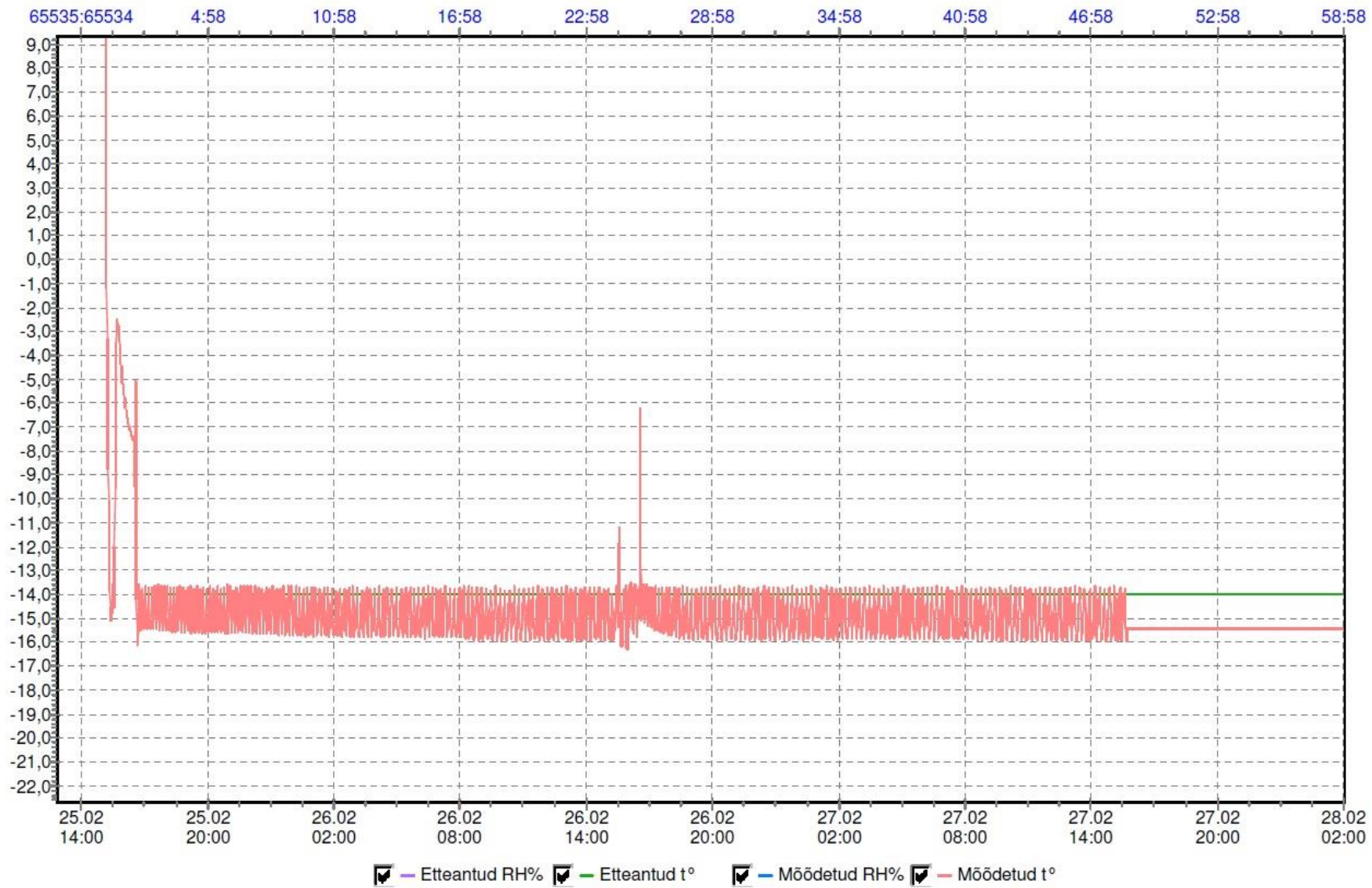
Tabel 2.1 Kasutatud betoonisegude retseptid

Tarnija	Betonimeister Tartu AS		Rudus AS	
Valmistamise kuupäev	18.02.2019		25.02.2019	
Survetugevusklass / keskkonnaklass / plastsus	C25/30 / XC2 / S3		C30/37 / XC2 / S2	
Komponendid (kg/m³)	Segu nr.1	Segu nr.2	Segu nr.3	Segu nr.4
Tsement CEM I 42,5 R	285	285	0	0
Tsement CEM I 52,5 N	0	0	285	285
Liiv	892	892	892	892
Killustik paas #8/16	786,4	786,4	786,4	786,4
Vesi	210	210	210	210
Lisand Reba FS3	17,1	0	17,1	0
Lisandi % tsemendi massist	6	0	6	0
Vesitsementtegur	0,74	0,74	0,74	0,74

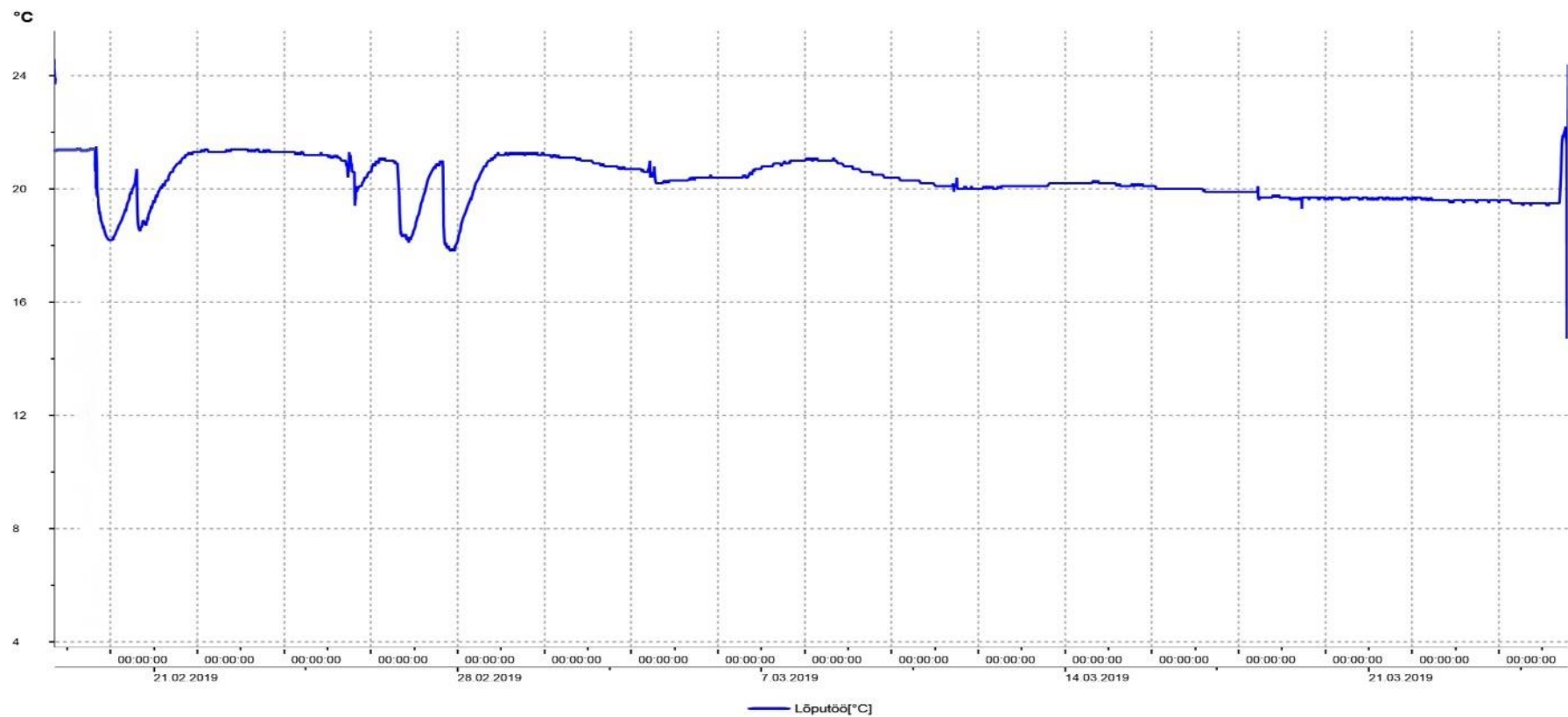
Betoonisegude kivilinemiskeskkondadeks sai valitud kaks erineva temperatuuriga keskkonda. Üheks oli kliimakamber FEUTRON (vt. Joonis 2.1), kus keskmiseks temperatuuriks oli -14 °C (vt. Joonis 2.2). Antud kliimakamber on võimeline langetama temperatuuri kuni -20 °C. Selline temperatuur sai valitud, kuna jäätumiskindel lisand 6% tsemendi massist peab tagama betooni varajase läbikülmumise kuni -15 °C juures. [23, 24]Teises keskkonnas oli keskmiseks temperatuuriks +20,3 °C (vt. Joonis 2.3). Koheselt külma pandud katsekehad võeti vormidest välja alles pärast 14 päeva, kuna varasemal raketise eemaldamisel oleks kuubikud olnud veel liiga toored. Eeliseks olid ka vormide kinnitusviisid, Maaülikooli vormidel poltliited ning ise tehtud vormide vineerid olid kinnitatud puidukruvidega, mille eemaldamine oli lihtne ning katsekehad saadi vigastamata kätte.



Joonis 2.1 Kliimakamber FEUTRON



Joonis 2.2 Temperatuur kliimakambris Rudus AS katsekehade katsetamisel (sama graafik Betoonimeister AS katsekehade katsetamisel)



Joonis 2.3 Toatemperatuur kogu katseperioodil

Nii Betoonimeister AS kui ka Rudus AS segusõlmedest tarnitud betoonist valmistatud katsekehade katsetamise meetod oli sarnane. 3 lisandita katsekeha kivistusid toatemperatuuril 28 päeva, 3 lisandita katsekeha viibisid üks päev kliimakambris ning 27 päeva toatemperatuuril, 3 lisandita katsekeha viibisid kaks päeva kliimakambris ning 26 päeva toatemperatuuril, 3 lisandita katsekeha viibisid ühe päeva toatemperatuuril, seejärel ühe päeva kliimakambris ning 26 päeva jälle toatemperatuuril. Täpselt sarnaselt käitusin lisandiga betoonide puhul, seda ei lisatud ainult koheselt toatemperatuurile, kuna antud uurimustöös polnud see tulemus oluline. (vt. Tabel 2.2). [25,26]

Tabel 2.2 Katseplaan

Segu	Lisand	Katsekehade kogus	Kohe kliimakambris?	Päevi kambris	Kohe toatemperatuurile?	Päevi toas	Hiljem kliimakambris?	Päevi kambris	Tagasi toatemperatuurile?	Päevi edasi toas	Päevi kokku	Tähistus
C25/30	6%	3	x	1		27					28	L1
		3	x	2		26					28	L2
		3			x	1	x	1	x	26	28	L3
	0%	3	x	1		27					28	T1
		3	x	2		26					28	T2
		3			x	1	x	1	x	26	28	T3
		3			x	28					28	T0
C30/37	6%	3	x	1		27					28	L1
		3	x	2		26					28	L2
		3			x	1	x	1	x	26	28	L3
	0%	3	x	1		27					28	T1
		3	x	2		26					28	T2
		3			x	1	x	1	x	26	28	T3
		3			x	28					28	T0
Kokku:		42					Kliimakambri temperatuur: -14 kraadi		Toatemperatuur: +20 kraadi			

2.2 Katsetamismeetodid

2.2.1 Mittepurustava katse meetodika pörkevasaraga Digi-Schmidt 2000

Mittepurustavad katsed toimusid Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituudi laboris. Katse aluseks on standard EVS-EN 12504-2:2012 Konstruktsiooni betooni katsetamine Osa 2: Mittepurustav katsetamine Pörkearvu määramine. [16]

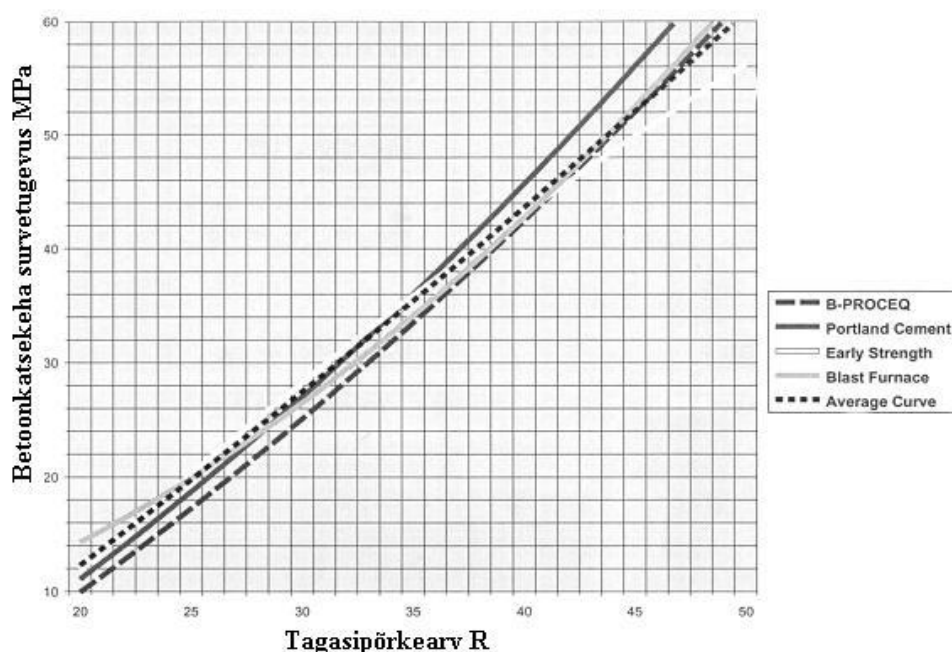
Katsetamise eesmärk oli katsekehade survetugevuse määramine, kui kuubikute valmistamisest oli möödas 14 päeva. See võimaldas välja selgitada, milline on miinustemperatuuride mõju betooni varajasele survetugevusele. Esialgu oli plaanis survetugevust mõõta pärast 7 päeva möödumist, aga katsetamise käigus selgus, et koheselt kliimakambris paigutatud betooni survetugevus on veel liiga madal.

Pörkekatsel kasutati Proceq'i pörkevasarat Digi-Schmidt 2000 ND, mille mõõtepiirkond on 10-70 MPa ning täpsus $\pm 0,2$ pörkearvu R. Sellise mudeliga saab katsetada konstruktsiooni paksusega

üle 100 mm. Põrkevasaraga on kaasas teisenduskõver, kus pörkearv on teisendatud 150 mm katsekeha survetugevusele. (vt. joonis 2.4).[17]

Kõikidele katsekehadele tehti katseseeria, mis koosneb 12 löögist, kuubi küljele joonistati ruudustik vahedega 50 mm, mille lõikepunktid võeti katsepunktideks. See võimaldas saada võrdlevaid tulemusi, kuna katsepunktid on sellisel juhul kõigil katsekehadel samas kohas. Katsepunkti asukohta muudeti ainult siis, kui katsepinna antud koht polnud kvaliteetne, seal olid tühimikud või/ja praod ning jämetäiteaine tükid. Löögid tehti katsekehale kolmest küljest ja igale küljele 4 lööki. Löökide arv võeti põrkevasara Digi-Schmidt 2000 ND kasutamise juhendist, kus vähim lubatud pörgete arv on 10 lööki, vastavalt standardile 9 lööki. Katsetamisel kasutasin teisenduskõverat B-Proceq, mis on mõeldud katsetamiseks 14-56 päeva vanust laboratooriumis valmistatud betooni. [17]

Survekatse tulemusi võrreldi Betoonimeister AS ja Rudus AS kivinemiskõveratega ning arvutuslike survetugevustega (vt. Jooniseid 2.4 ja 2.5). Magistritöös uuriti 14 päeva vanuseid katsekehasid, kokku 42 kuubikut mõõtmetega 150x150x150 mm.



Joonis 2.4 Digi-Schmidt 2000 teisenduskõverad

2.2.2 Purustava survekatse meetodika universaalse katsemasinaga P-125

Mittepurustavad katsed toimusid Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituudi laboris. Katse aluseks on standard EVS-EN 12390-3:2009 „Kivistunud betooni katsetamine“. [20] Survekatseid viidi läbi katsemasinaga hüdrauliline survepress II-125 (maksimaalse koormuse skaalaks valiti 1250 kN). Enne purustava survekatse tegemist mõõdeti survepinnad ning kaaluti katsekehad. Koormamise kiiruseks oli 0,2-1,0 MPa/s, maksimaalne koormusnäit ehk purustatav jõud registreeriti masinal.

Antud juhul oli katseseade ühendatud ka arvutiga, kust rakendatud koormusest ja siirdest joonistus välja survekatse graafik ning tulemuste tabel. Lähtuvalt purustavast jõust ja katsekeha ristlõike pinnast arvutatakse kivistunud betoonkatsekehade survetugevus f_c (täpsusega 0,1 N/mm²) vastavalt valemile 2.1 standardist EVS-EN 12390-3:2009 [17]:

$$f_c = \alpha \frac{F_c}{A}, \text{ kus} \quad (2.1)$$

α – parandustegur 150 mm küljepikkusega katsekehal on 1,0,

f_c – leitav survetugevus, MPa,

F_c – suurim jõud survel, N,

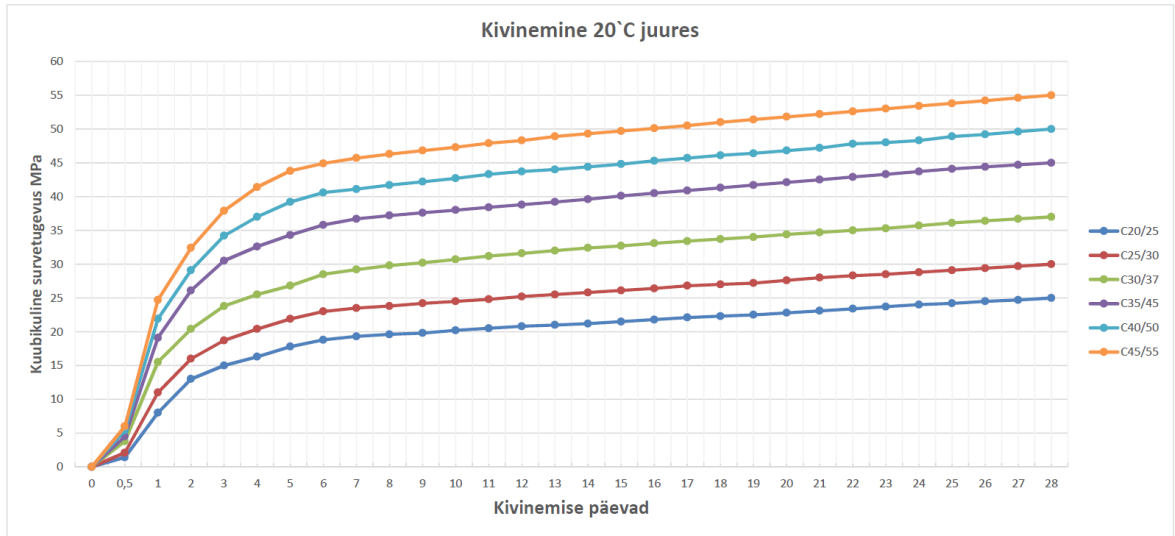
A – katsekeha ristlõikepindala, millele survejõud mõjub, mm².

Lisaks survetugevusele registreeriti ka katsekehade purunemispildid (vt. Joonis 2.5), mis kõikidel juhtudel loeti rahuldavaks. Survekatse tulemusi võrreldi Betoonimeister AS (vt. Joonis 2.6) ja Rudus AS (vt. Joonis 2.7) kivistuskõveratega ning arvutuslike survetugevustega. Magistritöös uuriti 14 päeva ja 28 päeva vanuseid katsekehasid, kokku 42 kuubikut mõõtmetega 150x150x150 mm. [19]

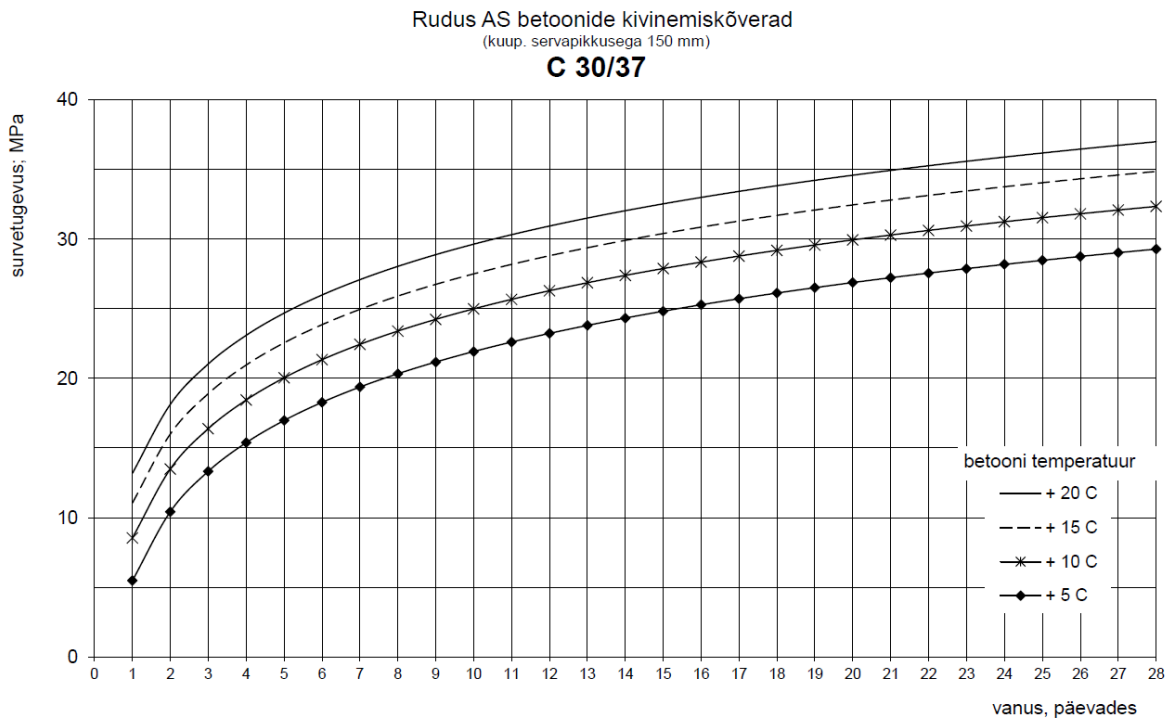


Plahvatuslik purunemine

Joonis 2.5 Kuubi rahuldavad purunemispildid



Joonis 2.6 Betoonimeister AS betoonide kivinemiskõverad



Joonis 2.7 Rudus AS betoonide kivinemiskõverad

3 KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1 Betooni survetugevuse määramise katse tulemused

Betooni toimunud muutusi külmas keskkonnas hinnati survetugevuse muutuse järgi. Purustaval katsel saadud survetugevusi võrreldi arvutuslike survetugevustega.

Katsekehade survetugevuste määramiseks tehti 14 päeva möödudes mittepurustav katse ning 28 päeva möödudes purustav katse. Survetugevuste võrdlus leiti betooni arvutusliku survetugevuse, kuupide keskmiste survetugevuste ning betoonitehaste kivinemiskõverate võrdlemisel. Katsete tulemuste kirjeldamisel kasutati kahte ajahetke, pärast 14 päeva ning pärast 28 päeva.

Katsekehade arvutuslik survetugevus t päeva vanuselt leiti valemiga 3.1 [22]:

$$f_{cm}(t) = f_{cm} e^{s(1 - \sqrt{\frac{28}{t}})} \quad , \text{ kus} \quad (3.1)$$

f_{cm} – 28 päeva vanuse betooni survetugevus, MPa

s – tsemendi aktiivsusest sõltuv tegur ($s=0,20; 0,25; 0,38$). Käesolevas töös kasutati tsemendi aktiivsustegurit $s=0,2$,

t – päevade arv.

Teoreetilist survetugevust (vt. Tabel 3.1) võrreldi C25/30 tugevusklassiga betoonist saadud 14 päevaste katsekehade mittepurustaval katsel saadud tulemustega.

Tabel 3.1 Laboris hoitud katsekehade keskmiste survetugevuse võrdlus teoreetilise survetugevusega

Betonimeister Tartu AS 14 päevased katsekehad				
Tähistus	Mittepurustava katse survetugevus MPa	Teoreetiline survetugevus MPa	Katsekehade vanus päevades	Survetugevuse erinevus %
T0	13,3	13,8	14,0	-3,6
T1	10,5	13,8	14,0	-23,9
T2	9,3	13,8	14,0	-32,6
T3	13,5	13,8	14,0	-2,2
L1	10,8	13,8	14,0	-21,7
L2	10,4	13,8	14,0	-24,6
L3	14,2	13,8	14,0	2,9

Mittepurustavate katsete tulemuste põhjal oli 14 päevaste katsekehade keskmine survetugevus võrreldes arvutusliku survetugevusega väiksem 15%. T2 (2 päeva külmas hoitud lisandita) katsekehade keskmine survetugevus oli peale 14 päeva möödumist 32,6% väiksem kui arvutuslik

survetugevus. 2,9% oli suurem L3 (teisel päeval üheks päevaks külma pandud lisandiga) katsekehade keskmine survetugevus (vt. Tabel 3.1).

Teoreetilist survetugevust (vt. Tabel 3.2) võrreldi C30/37 tugevusklassiga betoonist saadud 14 päevaste katsekehade mittepurustaval katsel saadud tulemustega.

Tabel 3.2 Laboris hoitud katsekehade keskmiste survetugevuse võrdlus teoreetilise survetugevusega

Rudus AS 14 päevased katsekehad				
Tähistus	Mittepurustava katse survetugevus MPa	Teoreetiline survetugevus MPa	Katsekehade vanus päevades	Survetugevuse erinevus %
T0	19,0	19,8	14,0	-4,0
T1	11,0	19,8	14,0	-44,4
T2	14,2	19,8	14,0	-28,3
T3	17,7	19,8	14,0	-10,6
L1	21,9	19,8	14,0	10,6
L2	18,8	19,8	14,0	-5,1
L3	17,5	19,8	14,0	-11,6

Mittepurustavate katsete tulemuste põhjal oli 14 päevaste katsekehade keskmine survetugevus võrreldes arvutusliku survetugevusega väiksem 13%. T1 (1 päev külmas hoitud lisandita) katsekehade keskmine survetugevus oli peale 14 päeva möödumist 44,4% väiksem kui arvutuslik survetugevus. 4,0% oli väiksem T0 (28 päeva toatemperatuuril lisandita) katsekehade keskmine survetugevus (vt. Tabel 3.2).

Teoreetilist survetugevust (vt. Tabel 3.3) võrreldi C25/30 tugevusklassiga betoonist saadud 28 päevaste katsekehade mittepurustaval katsel saadud tulemustega.

Tabel 3.3 Laboris hoitud katsekehade keskmiste survetugevuse võrdlus teoreetilise survetugevusega

Betonimeister Tartu AS 28 päevased katsekehad				
Tähistus	Purustava katse survetugevus MPa	Teoreetiline survetugevus MPa	Katsekehade vanus päevades	Survetugevuse erinevus %
T0	34,4	36,5	28,0	-5,8
T1	18,1	36,5	28,0	-50,4
T2	17,8	36,5	28,0	-51,2
T3	36,7	36,5	28,0	0,5
L1	20,8	36,5	28,0	-43,0
L2	20,2	36,5	28,0	-44,7
L3	33,3	36,5	28,0	-8,8

Purustavate katsete tulemuste põhjal oli 28 päevaste katsekehade keskmine survetugevus võrreldes arvutusliku survetugevusega väiksem 29%. T2 (2 päeva külmas hoitud lisandita) katsekehade keskmine survetugevus oli peale 28 päeva möödumist 51,2% väiksem kui arvutuslik

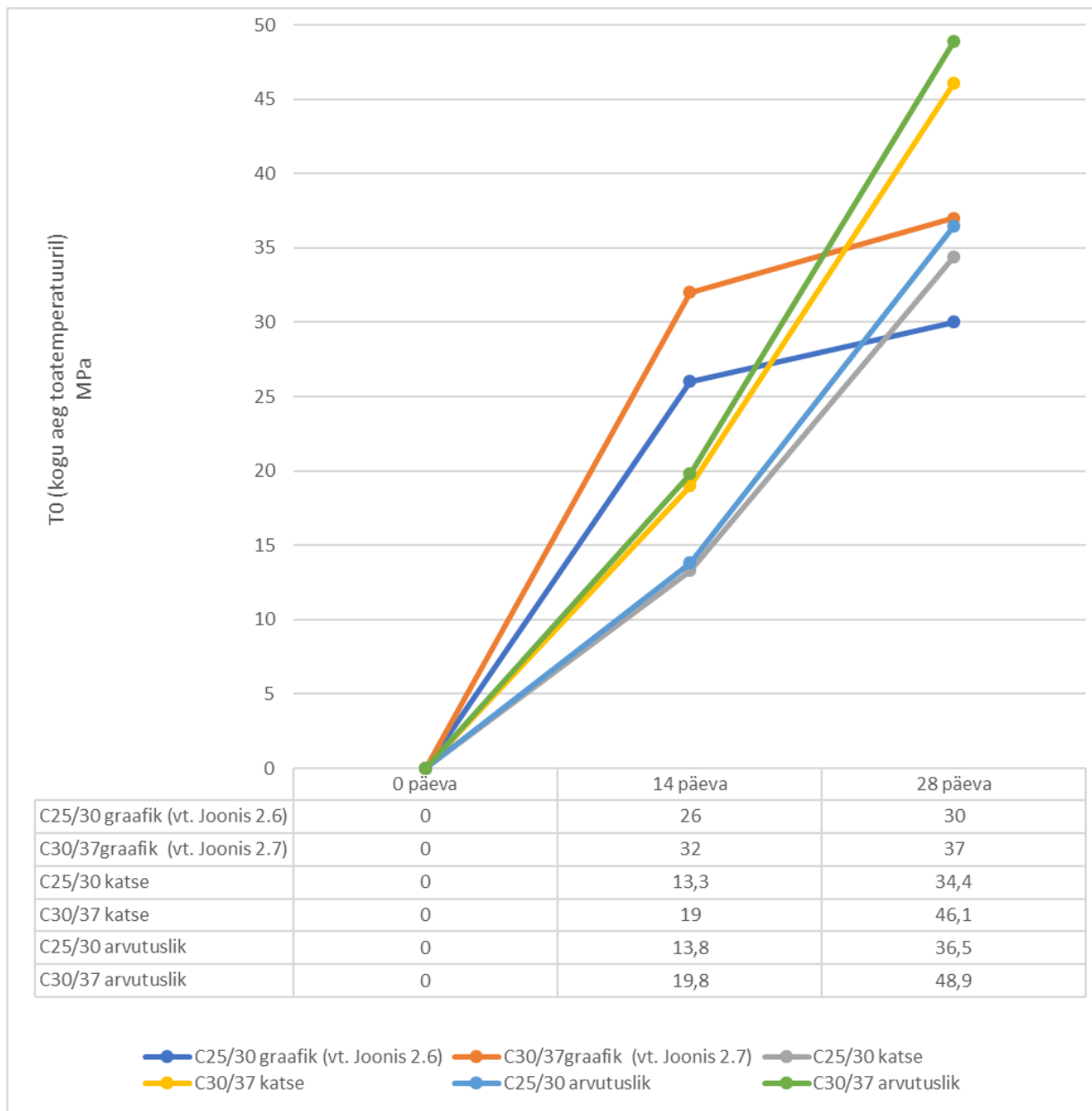
survetugevus. 0,5% oli suurem T3 (teisel päeval päevaks külma pandud lisandita) katsekehade keskmine survetugevus (vt. Tabel 3.3).

Teoreetilist survetugevust (vt. Tabel 3.4) võrreldi C30/37 tugevusklassiga betoonist saadud 28 päevaste katsekehade mittepurustaval katsel saadud tulemustega.

Tabel 3.4 Laboris hoitud katsekehade keskmiste survetugevuse võrdlus teoreetilise survetugevusega

Rudus AS 28 päevased katsekehad				
Tähistus	Purustava katse survetugevus MPa	Teoreetiline survetugevus MPa	Katsekehade vanus päevades	Survetugevuse erinevus %
T0	46,1	48,9	28,0	-5,7
T1	25,4	48,9	28,0	-48,1
T2	27,5	48,9	28,0	-43,8
T3	45,6	48,9	28,0	-6,7
L1	50,2	48,9	28,0	2,7
L2	35,6	48,9	28,0	-27,2
L3	42,5	48,9	28,0	-13,1

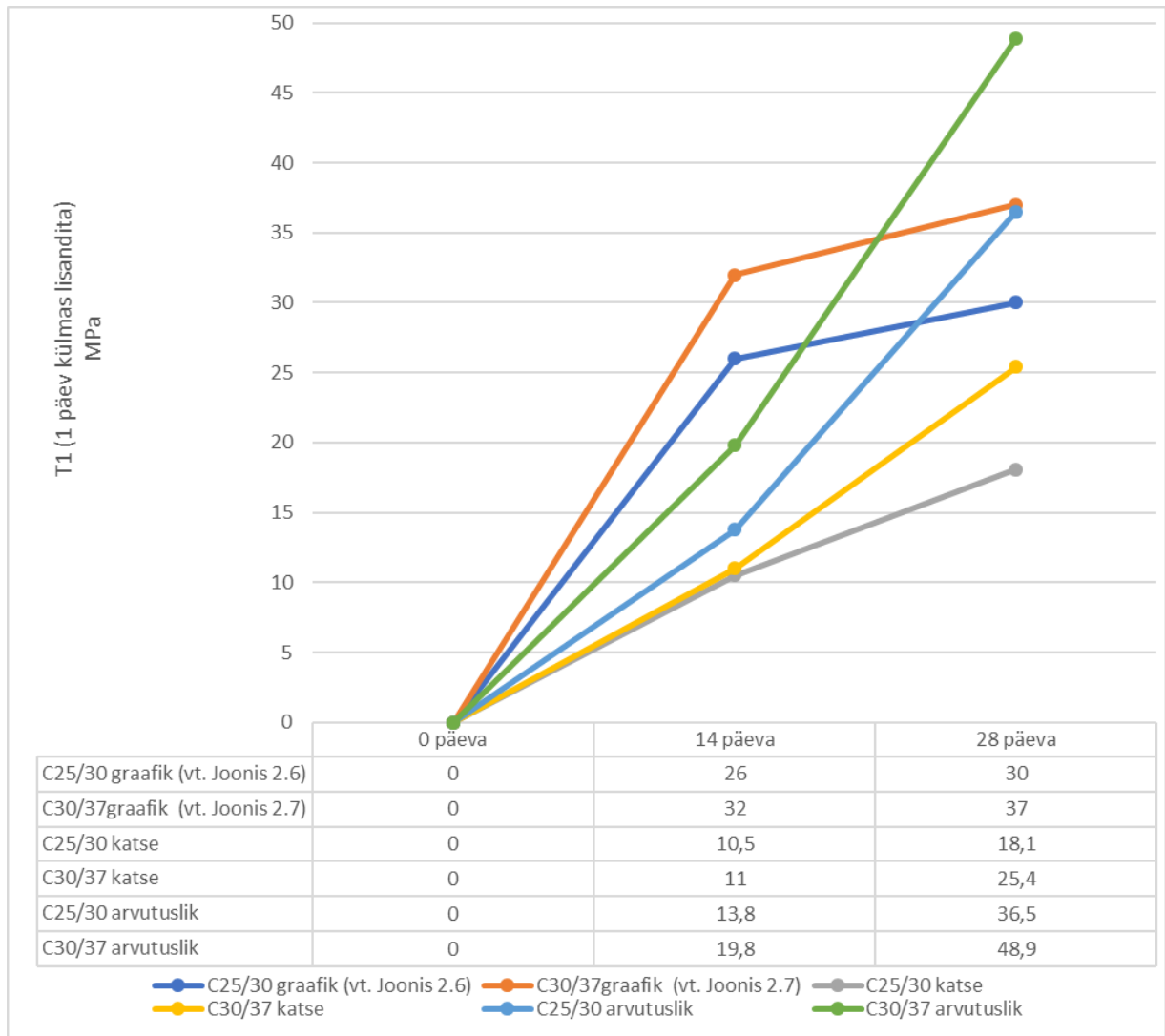
Purustavate katsete tulemuste põhjal oli 28 päevaste katsekehade keskmine survetugevus võrreldes arvutusliku survetugevusega väiksem 20%. T1 (1 päev külmas hoitud lisandita) katsekehade keskmine survetugevus oli peale 28 päeva möödumist 48,1% väiksem kui arvutuslik survetugevus. 2,7% oli suurem L1 (1 päev külmas olnud lisandiga) katsekehade keskmine survetugevus (vt. Tabel 3.4).



Joonis 3.1 T0 (kogu perioodi toatemperatuuril lisandita) katsekehade katseliste keskmiste survetugevuse areng võrreldes graafikute ning arvutuslike tulemustega

Joonisel 3.1 on võrreldud tavatingimustes olnud kuubikute katseliste survetugevuste erinevust kivinemiskõverate ning arvutuslike survetugevustega. Betoonimeister Tartu AS joonis 2.6 alusel peab C25/30 betooni survetugevus 14 päeval olema 26 MPa ning 28 päeval 30 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 13,3 MPa ja 34,4 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 13,8 MPa ning 36,5 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivinemist 48,8% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 3,6% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 14,7% kõrgem graafikulisest survetugevusest ning 5,8% madalam teoreetilisest survetugevusest. Rudus AS joonis 2.7 alusel peab C30/37 betooni survetugevus 14 päeval olema 32 MPa ning 28 päeval 37 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt

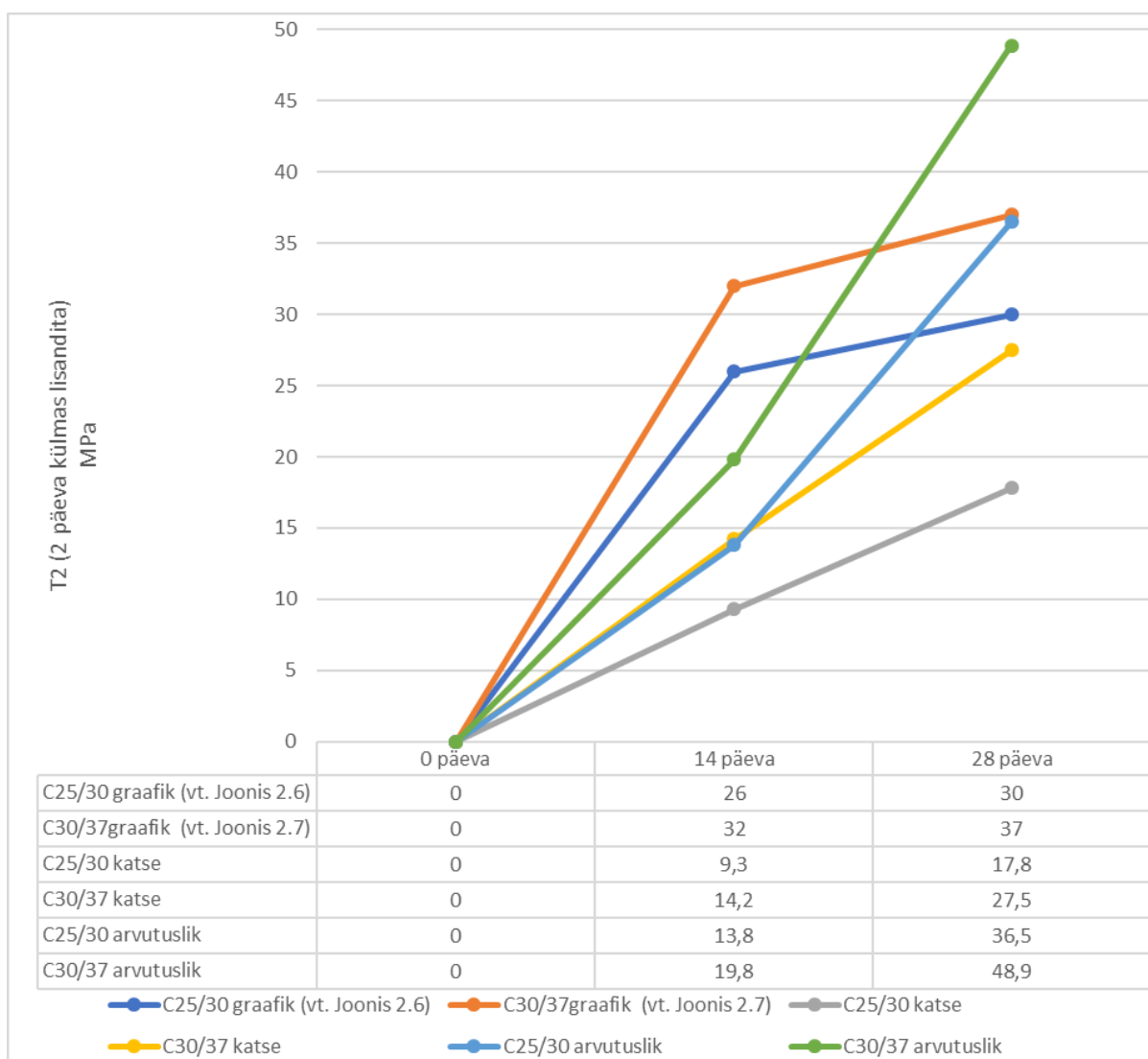
19 MPa ja 46,1 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 19,8 MPa ning 48,9 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivinemist 40,6% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 4,0% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 24,6% kõrgem graafikulisest survetugevusest ning 5,7% madalam teoreetilisest survetugevusest.



Joonis 3.2 T1 (1 päev külmas lisandita) katsekehade katseliste keskmiste survetugevuse areng võrreldes graafikute ning arvutuslike tulemustega

Joonisel 3.2 on võrreldud 1 päev külmas olnud lisandita kuubikute katseliste survetugevuste erinevust kivinemiskõverate ning arvutuslike survetugevustega. Betoonimeister Tartu AS joonis 2.6 alusel peab C25/30 betooni survetugevus 14 päeval olema 26 MPa ning 28 päeval 30 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 10,5 MPa ja 18,1 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 13,8 MPa ning 36,5 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivinemist 59,6% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 23,9% madalam võrreldes teoreetilise

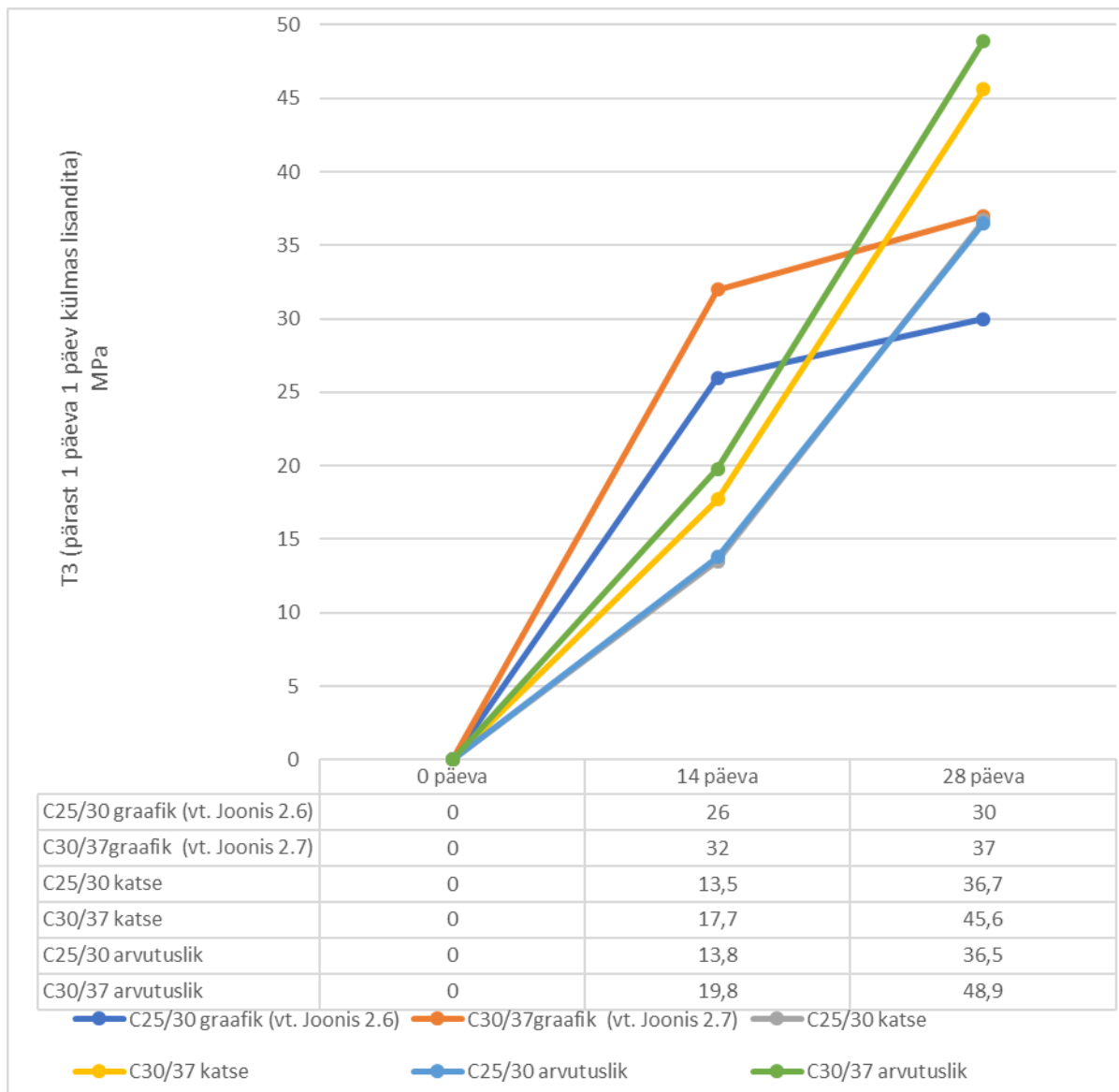
survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 39,7% madalam graafikulisest survetugevusest ning 50,4% madalam teoreetilisest survetugevusest. Rudus AS joonis 2.7 alusel peab C30/37 betooni survetugevus 14 päeval olema 32 MPa ning 28 päeval 37 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 11 MPa ja 25,4 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 19,8 MPa ning 48,9 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kividemist 65,6% madalam võrreldes graafikulisest survetugevusega ning 44,4% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 31,4% madalam graafikulisest survetugevusest ning 48,1% madalam teoreetilisest survetugevusest.



Joonis 3.3 T2 (2 päev külmas lisandita) katsekehade katseliste keskmiste survetugevuse areng võrreldes graafikute ning arvutuslike tulemustega

Joonisel 3.3 on võrreldud 2 päev külmas olnud lisandita kuubikute katseliste survetugevuste erinevust kividemiskõverate ning arvutuslike survetugevustega. Betoonimeister Tartu AS joonis 2.6 alusel peab C25/30 betooni survetugevus 14 päeval olema 26 MPa ning 28 päeval 30 MPa.

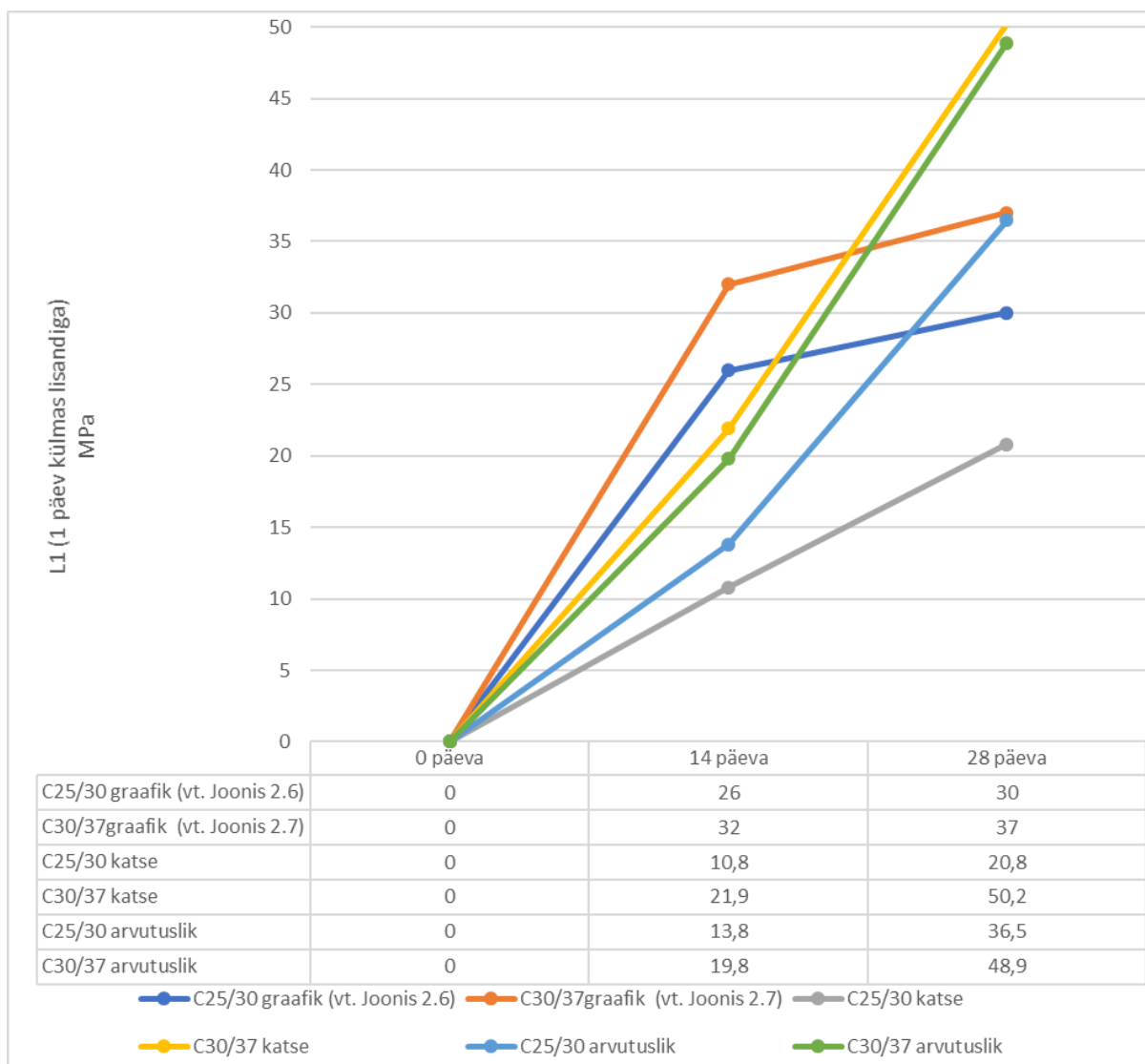
Katsetamise tulemused olid vastavalt 9,3 MPa ja 17,8 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 13,8 MPa ning 36,5 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kividemist 64,2% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 32,6% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 40,7% madalam graafikulisest survetugevusest ning 51,2% madalam teoreetilisest survetugevusest. Rudus AS joonis 2.7 alusel peab C30/37 betooni survetugevus 14 päeval olema 32 MPa ning 28 päeval 37 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 14,2 MPa ja 27,5 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 19,8 MPa ning 48,9 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kividemist 55,6% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 28,3% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 25,7% madalam graafikulisest survetugevusest ning 43,8% madalam teoreetilisest survetugevusest.



Joonis 3.4 T3 (pärast 1 päeva 1 päev külmas lisandita) katsekehade katseliste keskmiste survetugevuse areng võrreldes graafikute ning arvutuslike tulemustega

Joonisel 3.4 on võrreldud pärast 1 päeva 1 päev külmas olnud lisandita kuubikute katseliste survetugevuste erinevust kivinemiskõverate ning arvutuslike survetugevustega. Betoonimeister Tartu AS joonis 2.6 alusel peab C25/30 betooni survetugevus 14 päeval olema 26 MPa ning 28 päeval 30 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 13,5 MPa ja 36,7 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 13,8 MPa ning 36,5 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivinemist 48,1% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 2,2% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 22,3% kõrgem graafikulisest survetugevusest ning 0,5% kõrgem teoreetilisest survetugevusest. Rudus AS joonis 2.7 alusel peab C30/37 betooni survetugevus 14 päeval olema 32 MPa ning 28 päeval 37 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 17,7 MPa ja 45,6 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt

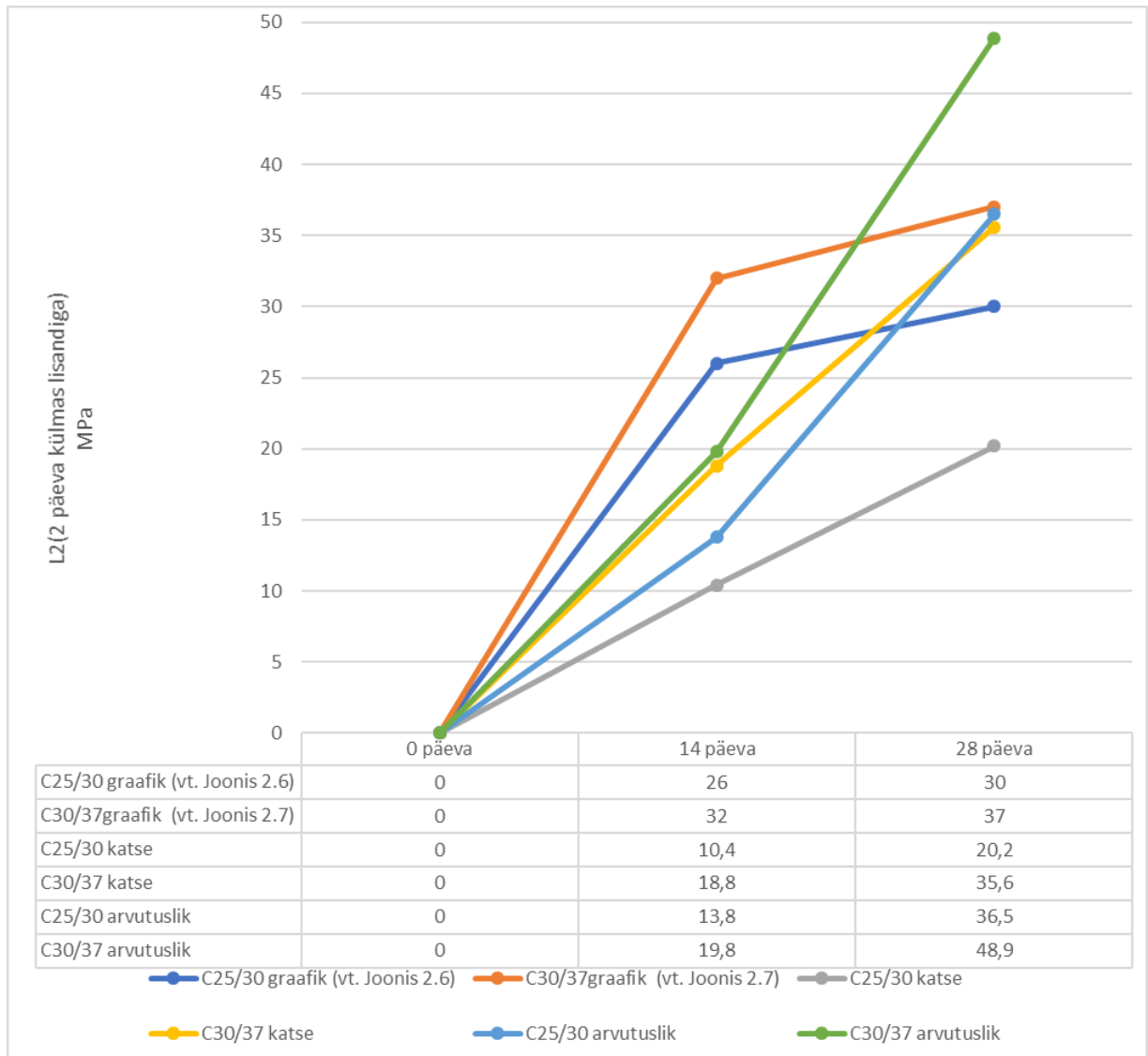
19,8 MPa ning 48,9 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivilinemist 44,7% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 10,6% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 23,2% kõrgem graafikulisest survetugevusest ning 6,7% madalam teoreetilisest survetugevusest.



Joonis 3.5 L1(1 päev külmas lisandiga) katsekehade katseliste keskmiste survetugevuse areng võrreldes graafikute ning arvutuslike tulemustega

Joonisel 3.5 on võrreldud 1 päev külmas olnud lisandiga kuubikute katseliste survetugevuste erinevust kivilinemiskõverate ning arvutuslike survetugevustega. Betoonimeister Tartu AS joonis 2.6 alusel peab C25/30 betooni survetugevus 14 päeval olema 26 MPa ning 28 päeval 30 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 10,8 MPa ja 20,8 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 13,8 MPa ning 36,5 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivilinemist 58,5% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 21,7% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 30,7% madalam

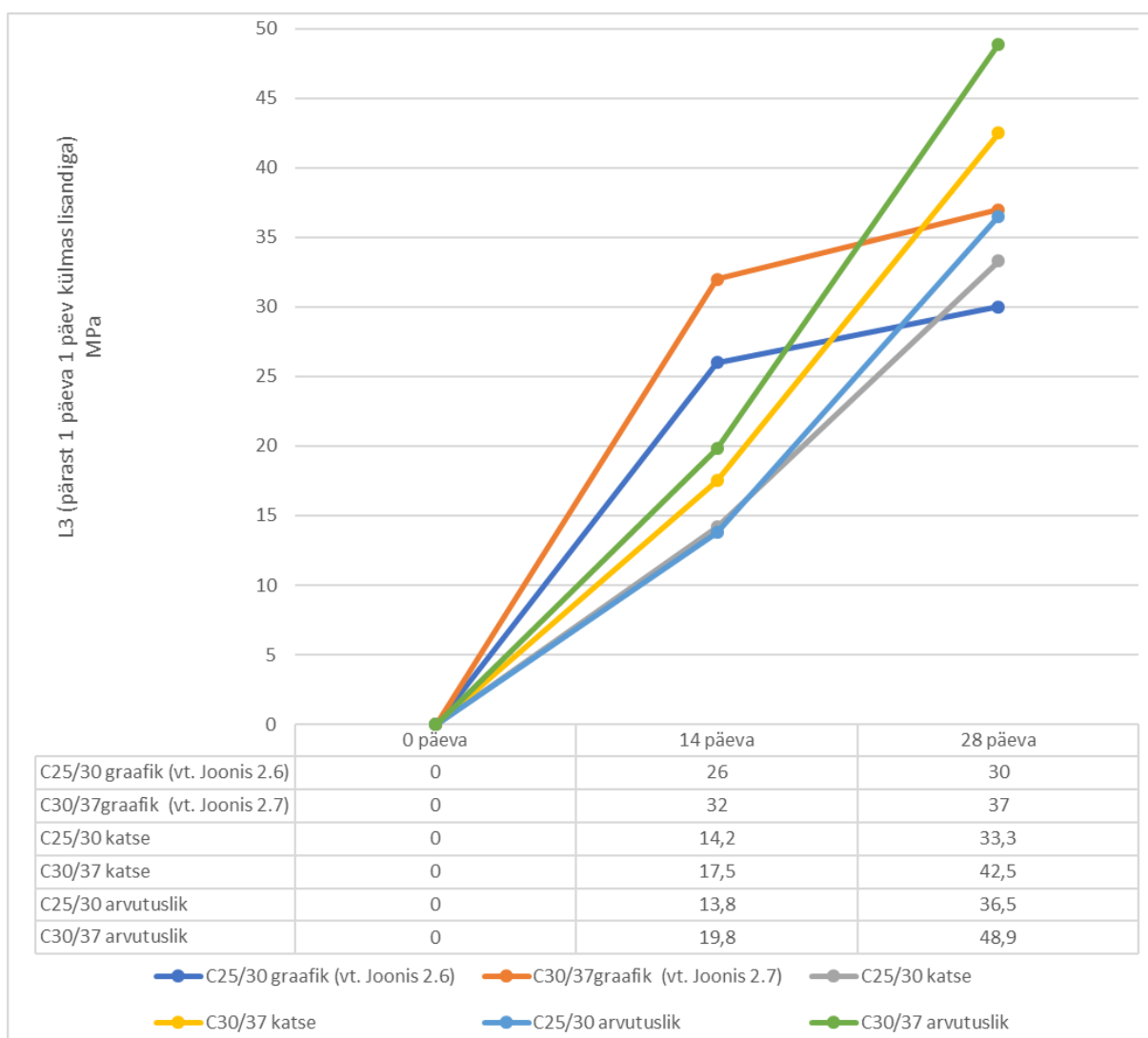
graafikulisest survetugevusest ning 43,0% madalam teoreetilisest survetugevusest. Rudus AS joonis 2.7 alusel peab C30/37 betooni survetugevus 14 päeval olema 32 MPa ning 28 päeval 37 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 21,9 MPa ja 50,2 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 19,8 MPa ning 48,9 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivinemist 31,6% madalam võrreldes graafikulisest survetugevusega ning 10,6% kõrgem võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 35,7% kõrgem graafikulisest survetugevusest ning 2,7% kõrgem teoreetilisest survetugevusest.



Joonis 3.6 L2(2 päev külmas lisandiga) katsekehade katseliste keskmiste survetugevuse areng võrreldes graafikute ning arvutuslike tulemustega

Joonisel 3.6 on võrreldud 2 päev külmas olnud lisandiga kuubikute katseliste survetugevuste erinevust kivinemiskõverate ning arvutuslike survetugevustega. Betoonimeister Tartu AS joonis 2.6 alusel peab C25/30 betooni survetugevus 14 päeval olema 26 MPa ning 28 päeval 30 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 10,4 MPa ja 20,2 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt

13,8 MPa ning 36,5 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivilinemist 60,0% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 24,6% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 32,7% madalam graafikulisest survetugevusest ning 44,7% madalam teoreetilisest survetugevusest. Rudus AS joonis 2.7 alusel peab C30/37 betooni survetugevus 14 päeval olema 32 MPa ning 28 päeval 37 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 18,8 MPa ja 35,6 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 19,8 MPa ning 48,9 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivilinemist 41,3% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 5,1% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 3,8% madalam graafikulisest survetugevusest ning 27,2% madalam teoreetilisest survetugevusest.



Joonis 3.7 L3(pärast 1 päeva 1 päev külmas lisandiga) katsekehade katseliste keskmiste survetugevuse areng võrreldes graafikute ning arvutuslike tulemustega

Joonisel 3.7 on võrreldud pärast 1 päeva 1 päev külmas olnud lisandiga kuubikute katseliste survetugevuste erinevust kivilinemiskõverate ning arvutuslike survetugevustega. Betoonimeister Tartu AS joonis 2.6 alusel peab C25/30 betooni survetugevus 14 päeval olema 26 MPa ning 28 päeval 30 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 14,2 MPa ja 33,3 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 13,8 MPa ning 36,5 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivilinemist 45,4% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 2,9% kõrgem võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 11,0% kõrgem graafikulisest survetugevusest ning 8,8% madalam teoreetilisest survetugevusest. Rudus AS joonis 2.7 alusel peab C30/37 betooni survetugevus 14 päeval olema 32 MPa ning 28 päeval 37 MPa. Katsetamise tulemused olid vastavalt 17,5 MPa ja 42,5 MPa ning arvutuslikud tulemused vastavalt 19,8 MPa ning 48,9 MPa. Katsekehade survetugevus oli pärast 14-päevast kivilinemist 45,3% madalam võrreldes graafikulise survetugevusega ning 11,6% madalam võrreldes teoreetilise survetugevusega. 28-päevaste katsekehade keskmine survetugevus oli 14,9% kõrgem graafikulisest survetugevusest ning 13,1% madalam teoreetilisest survetugevusest.

3.2 Betooni survetugevuse määramise katsetulemuste analüüs

Analüüsidest saadud katsetulemusi saab teha järgmised järeldused:

1. Betoonimeister Tartu AS C25/30 survetugevusklassiga betoonisegude varajase survetugevuse areng pärast kliimakambri välja tõstmist oli väga aeglane, kuna 14-päeva järgselt lisandita betoonisegud omandasid 20-29% vähem survetugevust võrreldes normaaltingimustel kivilinenud betooniga. 14-päeva järgselt lisandiga betoonisegud omandasid 18-21% vähem survetugevust võrreldes normaaltingimustel kivilinenud betooniga. Nende tulemuste põhjal saab järeldada, et lisandiga betoonisegu ei suuda saavutada normaaltingimustel kivilinenud betooniga võrdset varajast survetugevust.
2. Rudus AS C30/37 survetugevusklassiga betoonisegude varajase survetugevuse areng pärast kliimakambri välja tõstmist oli väga aeglane, kuna 14-päeva järgselt lisandita betoonisegud omandasid 24-40% vähem survetugevust võrreldes normaaltingimustel kivilinenud betooniga. 14-päeva järgselt lisandiga betoonisegud omandasid kuni 6% rohkem survetugevust võrreldes normaaltingimustel kivilinenud betooniga. Nende tulemuste põhjal saab järeldada, et lisandiga betoonisegu ei suuda saavutada normaaltingimustel kivilinenud betooniga võrdset varajast survetugevust.
3. Betoonimeister Tartu AS C25/30 survetugevusklassiga betoonisegude lõplik survetugevus oli väga madal, kuna 28-päevased lisandita betoonisegud omandasid 45% vähem survetugevust võrreldes normaaltingimustel kivilinenud betooniga. 28-päevased lisandiga betoonisegud omandasid 37% vähem survetugevust võrreldes normaaltingimustel kivilinenud betooniga. Nende tulemuste põhjal saab järeldada, et lisandiga betoonisegu ei suuda saavutada normaaltingimustel kivilinenud betooniga võrdset lõplikku survetugevust.
4. Rudus AS C30/37 survetugevusklassiga betoonisegude lõplik survetugevus oli väga madal, kuna 28-päevased lisandita betoonisegud omandasid 38-42% vähem survetugevust võrreldes normaaltingimustel kivilinenud betooniga. 28-päevased lisandiga betoonisegud omandasid 3-21% vähem survetugevust võrreldes normaaltingimustel kivilinenud betooniga. Nende tulemuste põhjal saab järeldada, et lisandiga betoonisegu ei suuda saavutada normaaltingimustel kivilinenud betooniga võrdset lõplikku survetugevust.
5. Betoonimeister Tartu AS C25/30 survetugevusklassiga 1-päeva vanuselt külma keskkonda paigutatud katsekehade (nii lisandiga kui ka lisandita) varajane survetugevus võrreldes normaaltingimustel kivilinenud katsekehaga oli sama. Samamoodi ei sama Rudus AS C30/37 varajane survetugevus võrreldes normaaltingimustel kivilinenud katsekehaga. Nende tulemuste põhjal saab järeldada, et 1-päeva vanuselt saavutas katsekeha vähemalt kriitilise

(5MPa) survetugevuse, seetõttu külma keskkonda varajast survetugevuse arengut ei mõjutanud.

6. Betoonimeister Tartu AS C25/30 survetugevusklassiga 1-päeva vanuselt külma keskkonda paigutatud katsekehade (nii lisandiga kui ka lisandita) lõplik survetugevus võrreldes normaaltingimustel kivilinenud katsekehaga oli sama. Samamoodi oli sama Rudus AS C30/37 lõplik survetugevus võrreldes normaaltingimustel kivilinenud katsekehaga. Nende tulemuste põhjal saab järeldada, et 1-päeva vanuselt saavutas katsekeha vähemalt kriitilise (5 MPa) survetugevuse, seetõttu külma keskkonda lõpliku survetugevuse arengut ei mõjutanud.

KOKKUVÕTE

Käesolevas uurimustöös keskenduti betooni jäätumiskindla lisandi mõju uurimisele külmas keskkonnas, mida hinnati survetugevuse muutumise põhjal. Betooni vajaliku survetugevuse saavutamiseks ja arenguks külmas keskkonnas saab kasutada erinevaid lisandeid. Käesolevas magistristöös kasutati Remei REBA FS-3 lisandit, mille toimet saab tootja informatsiooni kohaselt lühendada tardumisaegu, parandada varast betooni tugevust ja vähendada külma toimet värsketele betoonisegule.

Magistristöökäigus uuriti külmas keskkonnas nelja erinevat betoonisegu: 1) C25/30 XC2, 2) C25/30 XC2 lisandiga Remei REBA FS-3, 3) C30/37 XC2, 4) C30/37 XC2 lisandiga Remei REBA FS-3. Eesmärk oli katsetulemuste põhjal määrata jäätumiskindlate betoonilisandite kasulikkust külmas keskkonnas.

Tuginedes magistristöös saadud mõõtmistulemustele järeldati:

1. Jäätumiskindel lisand parandas betooni survetugevust võrreldes lisandita betooniga. C25/30 betooni puhul ca. 10%, C30/37 puhul lausa ca. 35%
2. Jäätumiskindel lisand ei aita saavutada normaaltingimustel kivilinenud betooniga sama survetugevust. Survetugevuse oli madalam C25/30 betooni puhul ca. 25%, C30/37 puhul ca. 10%.
3. Jäätumiskindlat lisandit pole vaja kasutada, kui betoon saavutab kriitilise tugevuse (5 MPa), sellisel juhul on lisandita ja lisandiga betooni survetugevuse areng sarnane.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Jõgeva, J.** (2017). Betooni varajase läbikülmumise mõju betooni omadustele. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikool. Tallinn.
2. **Järve, J.** (2018). Talvised betoonid ja betoonitarned. [WWW] <https://rudus.ee/media/2014/07/Talvebetoonid-2018-2.pdf>
3. BY 201. (2018). Betonitehnikan oppikirja. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry.
4. Betoonimeister AS. Talvine betoneerimine. [WWW] <https://betoonimeister.ee/kasulik-info/talvine-betoneerimine/>
5. Betoonimeister AS. Betoonisegude transport ja pumpamine talvel [WWW] <https://betoonimeister.ee/kasulik-info/talvine-betoneerimine/betooni-pumpamine-talvel/>
6. **Järve, J.** (2002). Talvine betoneerimine. [WWW] <https://ekool.ttkk.ee/mod/resource/view.php?id=7584> (01.11.2002)
7. **Laur, T., Laurson, M., Möisja, V., Oras, R., Ramjalg, K.** (2014). Batoon ja raudbatoon. Talvised betoonitööd. Tallinn. Eesti Betooniühing. ET INFOkeskuse AS
8. **Uustalu, E.** (2000). Talvine betoneerimine. [WWW] https://www.knc.ee/en/system/files_force/assets/document/talvine_betoneerimine.pdf (01.11.2000)
9. EVS-EN 206:2014+A1:2016/AC:2019. Batoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus. (2019). Tallinn: Standardikeskus
10. Kunda Nordic Tsement AS. Lahtiselt turustatavad tsemendid [WWW] <https://www.knc.ee/et/node/4187>
11. EVS-EN 934-2:2009+A1:2012. Betooni, mördi ja süstmördi keemilised lisandid. Osa 2: Betooni keemilised lisandid. Määratlused, nõuded, vastavus, tähistus ja sildistus. (2012). Tallinn: Standardikeskus
12. Mapei S.p.A. (2014). Dynamon NRG 1010. [WWW] https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider55/products-documents/756_dynamonnrg1010_gbb62fb87479c562e49128ff01007028e9.pdf?sfvrsn=f65a5f4a_0 (01.02.2014)
13. EVS-EN 13670:2010. Batoonkonstruktsioonide ehitamine . (2010). Tallinn: Standardikeskus
14. Remei Baltica OÜ. Reba FS-3. [WWW] <http://remei.ee/wp-content/uploads/2014/11/REBA-FS-3-eesti-k.pdf>
15. Mapei S.p.A. (2016). Mapefast SA-450. [WWW] http://www.velvemt.ee/uploads/Mapefast_SA_450_ee.pdf (07.12.2016)
16. EVS-EN 12504-2:2012. Konstruktsiooni betooni katsetamine. Osa 2: Mittepurustav katsetamine. Põrkearvu määramine. (2012). Tallinn: Standardikeskus
17. **Kiviste, M.** (2010). Ehitusmaterjalid. Laboratoorsete tööde juhend. Eesti Maaülikooli metsandus ja maaehitusinstituut. Tartu.
18. EVS-EN 12504:2004. Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. (2004). Tallinn: Standardikeskus
19. EVS-EN 12390-3:2009. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus. (2009). Tallinn: Standardikeskus
20. EVS-EN 12390-2:2009. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 2: Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine. (2009). Tallinn: Standardikeskus

21. EVS-EN 12390-1:2012. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 1: Kuju, mõõtmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded. (2012). Tallinn: Standardikeskus
22. **Otsmaa, V., Pello, J.** (2016). (Raud)betoonkonstruktsioonide üldkursus 1 osa Tallinn. [WWW]
https://www.ttu.ee/public/e/ehitusteaduskond/Instituudid/Ehitiste_projekteerimise_instituut/Oppematerjalid/Betoonkonstruktsioonid/Betoonkonstruktsioonid_I/Raudbetoon_I_1.pdf (04.05.2018)
23. **Korhonen, C., Cortez, E., Durning, T., Jeknavorian, A.** (1997). Antifreeze Admixtures for Concrete. [WWW]
https://www.researchgate.net/profile/Ara_Jeknavorian/publication/277858102_Antifreeze_Admixtures_for_Concrete/links/56cf06ed08ae059e375864fd.pdf (01.10.1997)
24. **Korhonen, C.** (2004) Antifreeze Concrete Paving. Admixtures Facilitate Cold-Weather Construction. [WWW] <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews232rpo.pdf> (01.06.2004)
25. **Korhonen, C.** (2002). Off-the-Shelf Antifreeze Admixtures. [WWW]
<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a401312.pdf> (01.04.2002)
26. **Korhonen, C.** (1990). Antifreeze Admixtures for Cold Regions Concreting. [WWW]
<https://erdc-library.erdcdren.mil/xmlui/bitstream/handle/11681/11681/SR-90-32bw.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (01.09.1990)

LISAD

Lisa 1 Katsekehade survetugevuse määramine mittepurustava meetodiga

Tabel 1.1 C25/30 survetugevusklassiga katsekehade mõõtmistulemused pörkevasaraga Digi-Scmidt 2000

Tähistus	Kuup nr.	Betonimeister Tartu AS betooni C25/30 XC2 mittepurustav survekatsed -												Pörkearvude mediaan	Survetugevus, MPa	Keskmine, MPa
		Pörkearvud														
T3	04.03.2019	23	23	23	21	24	25	25	23	21	21	25	23	23	14,2	13,5
	04.03.2019	20	20	23	23	21	20	24	22	24	22	22	25	22	12,8	
	04.03.2019	19	20	22	26	19	25	23	24	20	21	25	23	22,5	13,5	
L3	04.03.2019	25	21	28	24	21	23	23	26	21	21	22	25	23	14,2	14,2
	04.03.2019	20	24	25	26	20	22	21	22	24	19	24	25	23	14,2	
	04.03.2019	20	23	21	27	19	24	24	21	23	22	23	28	23	14,2	
L1	04.03.2019	16	19	20	19	17	16	16	19	16	20	18	18	18	11,0	10,8
	04.03.2019	17	16	16	16	22	18	22	18	19	17	21	21	18	11,0	
	04.03.2019	16	16	20	21	16	16	17	19	21	16	17	18	17	10,4	
L2	04.03.2019	17	15	16	15	16	15	16	15	20	20	17	17	16,5	10,1	10,4
	04.03.2019	16	14	17	15	18	20	15	18	14	17	17	16	16,5	10,1	
	04.03.2019	16	16	17	18	18	18	21	21	15	16	18	19	18	11,0	
T1	04.03.2019	15	17	19	20	15	17	17	17	15	18	18	20	17	10,4	10,5
	04.03.2019	17	16	17	16	20	19	18	20	15	15	15	17	17	10,4	
	04.03.2019	16	16	18	18	16	17	21	19	20	16	17	18	17,5	10,7	
T2	04.03.2019	16	16	16	15	15	14	16	20	15	16	15	16	16	9,8	9,3
	04.03.2019	20	18	18	15	15	15	15	15	15	18	15	15	15	9,1	
	04.03.2019	16	17	16	15	14	15	21	17	15	15	15	15	15	9,1	
T0	04.03.2019	20	22	23	24	21	24	24	20	18	25	22	23	22,5	13,5	13,3
	04.03.2019	21	22	23	23	21	21	23	28	24	19	20	19	21,5	12,1	
	04.03.2019	27	24	27	25	18	21	24	23	20	21	23	22	23	14,2	

Tabel 1.2 C30/37 survetugevusklassiga katsekehade mõõtmistulemused pörkevasaraga Digi-Scmidt 2000

Tähistus	Kuup nr.	Rudus AS betooni C30/37 XC2 mittepurustav survekatsed -												Pörkearvude mediaan	Survetugevus, MPa	Keskmine, MPa
		Pörkearvud														
T1	11.03.2019	17	17	19	17	16	17	20	19	23	23	23	28	18	11,0	11,0
	11.03.2019	19	16	20	19	15	16	18	18	18	18	19	19	18	11,0	
	11.03.2019	18	19	25	18	15	19	16	22	19	15	17	18	18	11,0	
T2	11.03.2019	22	17	19	20	16	17	18	20	14	17	15	17	17	14,2	14,2
	11.03.2019	16	15	18	16	16	16	17	20	15	16	22	26	16	14,2	
	11.03.2019	21	22	21	19	15	20	21	24	16	15	15	19	19,5	14,2	
L2	11.03.2019	30	26	24	29	22	29	31	29	25	28	23	27	27,5	21,1	18,8
	11.03.2019	25	25	31	24	25	28	32	31	23	20	28	29	25,3	17,7	
	11.03.2019	25	27	27	29	24	28	31	29	27	29	35	30	25,2	17,5	
T3	11.03.2019	24	23	29	25	21	22	27	28	27	27	26	31	26,5	19,5	17,7
	11.03.2019	24	21	25	28	23	24	27	27	25	24	27	28	25	17,2	
	11.03.2019	23	23	23	27	25	22	25	26	24	24	31	30	24,5	16,5	
L3	11.03.2019	21	23	26	35	21	24	25	29	25	26	30	32	25,5	18,0	17,5
	11.03.2019	21	22	23	21	25	28	28	29	26	29	30	32	27	20,3	
	11.03.2019	22	28	21	28	23	24	28	24	19	20	19	23	23	14,2	
L1	11.03.2019	27	25	29	30	26	26	31	29	23	29	31	30	29	23,5	21,9
	11.03.2019	25	25	31	24	25	28	32	31	23	20	28	29	26,5	19,5	
	11.03.2019	25	27	27	29	24	28	31	29	27	29	35	30	28,5	22,7	
T0	11.03.2019	26	26	29	28	25	27	31	30	24	26	31	30	28	21,9	19,0
	11.03.2019	24	22	26	27	23	23	26	27	25	25	28	30	25	17,7	
	11.03.2019	21	24	23	28	23	25	27	27	23	25	26	29	25	17,5	

Lisa 2 Katsekehade survetugevuse määramine purustava meetodiga

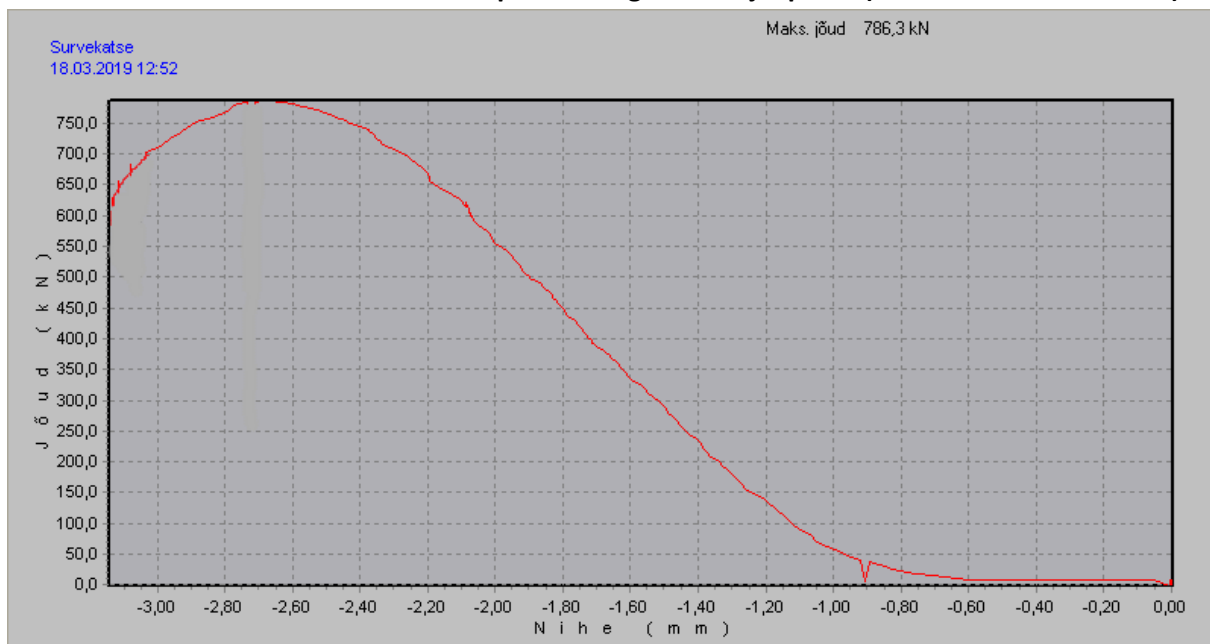
Tabel 2.1 C25/30 survetugevusklassiga katsekehade mõõtmistulemused purustaval meetodil

Number	Mõõtmed, mm			Betonimeister Tartu AS betooni C25/30 XC2 purustav survekatse				Tähistus	Keskmine kaal, g	Keskmine survetugevus, MPa
	a, mm	b, mm	A, mm ²	Fc, N	fc, MPa	Kaal, g				
1	150	150	22500	768200	34,1	7646,6	T0	7680,9	34,4	
2	148	150	22200	756000	34,1	7701,5				
3	150	150	22500	786300	34,9	7694,6				
4	152	152	23104	436200	18,9	8070,2	T2	8120,9	17,8	
5	152	152	23104	399327	17,3	8314,8				
6	148	152	22496	384900	17,1	7977,8				
7	150	150	22500	834200	37,1	7832,4	T3	7887,8	36,7	
8	150	152	22800	824900	36,2	7930,8				
9	150	150	22500	828400	36,8	7900,1				
10	148	152	22496	418600	18,6	7840,4	T1	8039,4	18,1	
11	152	152	23104	418000	18,1	8115,5				
12	152	152	23104	404600	17,5	8162,3				
13	152	149	22648	456500	20,2	7975,5	L2	8147,0	20,2	
14	152	152	23104	463400	20,1	8154,5				
15	152	152	23104	469000	20,3	8311,0				
16	152	151	22952	485900	21,2	8126,7	L1	8119,1	20,8	
17	152	150	22800	440800	19,3	8053,4				
18	152	150	22800	500200	21,9	8177,1				
19	150	151	22650	730200	32,2	7943,2	L3	7920,0	33,3	
20	151	152	22952	814900	35,5	7979,9				
21	150	152	22800	731200	32,1	7836,8				

Tabel 2.2 C30/37 survetugevusklassiga katsekehade mõõtmistulemused purustaval meetodil

Number	Mõõtmed, mm			Rudus AS betooni C30/37 XC2 purustav survekatse				Tähistus	Keskmine kaal, g	Keskmine survetugevus, MPa
	a, mm	b, mm	A, mm ²	Fc, N	fc, MPa	Kaal, g				
1	151	151	22801	1041133	45,7	8080,6	T0	8184,7	46,1	
2	152	150	22800	971433	42,6	8006,5				
3	152	152	23104	1158967	50,2	8467,0				
4	152	148	22496	1136100	50,5	8070,6	T3	8080,6	45,6	
5	152	151	22952	963000	42,0	8137,2				
6	152	152	23104	1024300	44,3	8034,1				
7	151	152	22952	1051500	45,8	7997,7	L3	8006,5	42,5	
8	150	152	22800	893200	39,2	8039,3				
9	150	152	22800	969600	42,5	7982,4				
10	150	152	22800	579600	25,4	8369,3	T1	8312,1	25,4	
11	152	152	23104	567000	24,5	8020,1				
12	152	152	23104	607400	26,3	8547,0				
13	152	148	22496	636600	28,3	8042,0	T2	8282,1	27,5	
14	152	152	23104	644400	27,9	8534,1				
15	152	152	23104	610200	26,4	8270,2				
16	152	152	23104	1242000	53,8	8579,4	L1	8467,0	50,2	
17	152	152	23104	1100800	47,6	8543,1				
18	152	152	23104	1134100	49,1	8278,6				
19	152	152	23104	850600	36,8	8246,8	L2	8136,9	35,6	
20	150	152	22800	778400	34,1	8068,2				
21	152	152	23104	831000	36,0	8095,7				

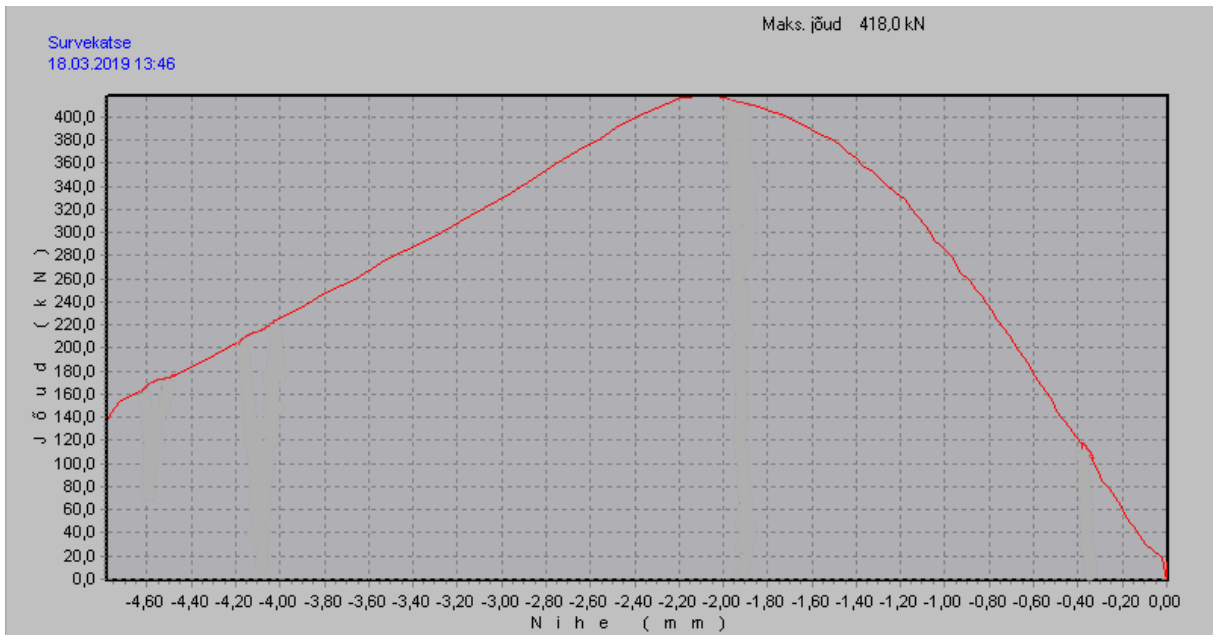
Lisa 3 Katsekehade purunemisgraafikud ja -pildid (Betonimeister Tartu AS)



Joonis 3.1 Katsekeha T0-3 (betoon C25/30 XC2 lisandita) survekatse purunemisgraafik



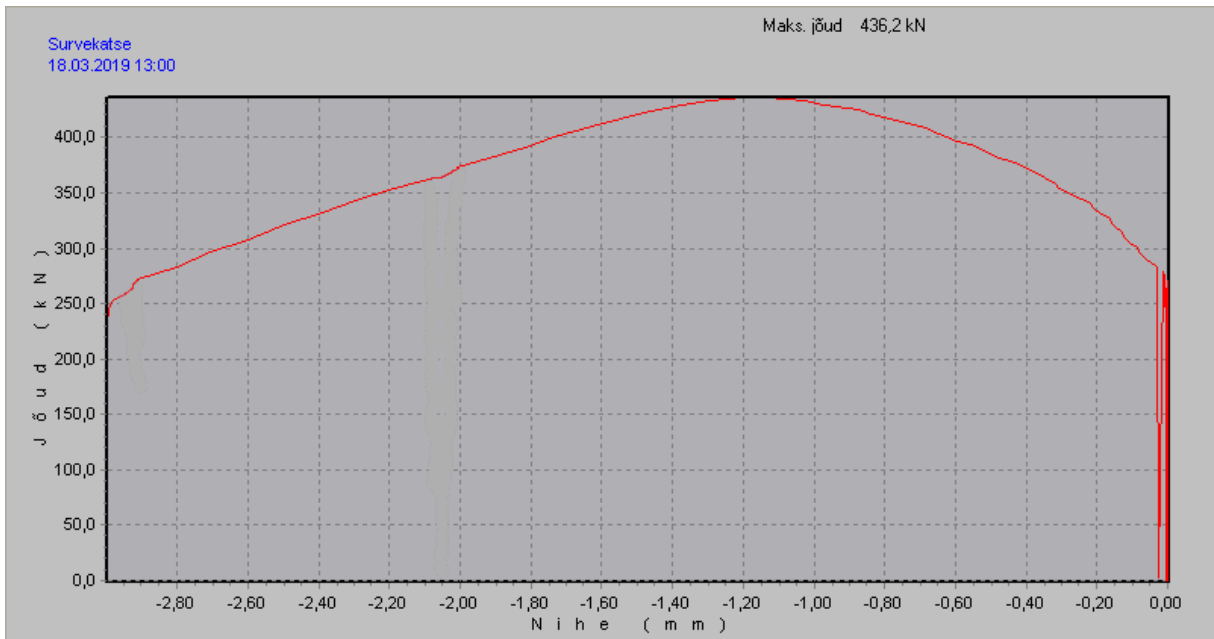
Joonis 3.2 Katsekeha T0-3 (betoon C25/30 XC2 lisandita) purunemispilt



Joonis 3.3 Katsekeha T1-10 (betoon C25/30 XC2 lisandita) survekatse purunemisgraafik



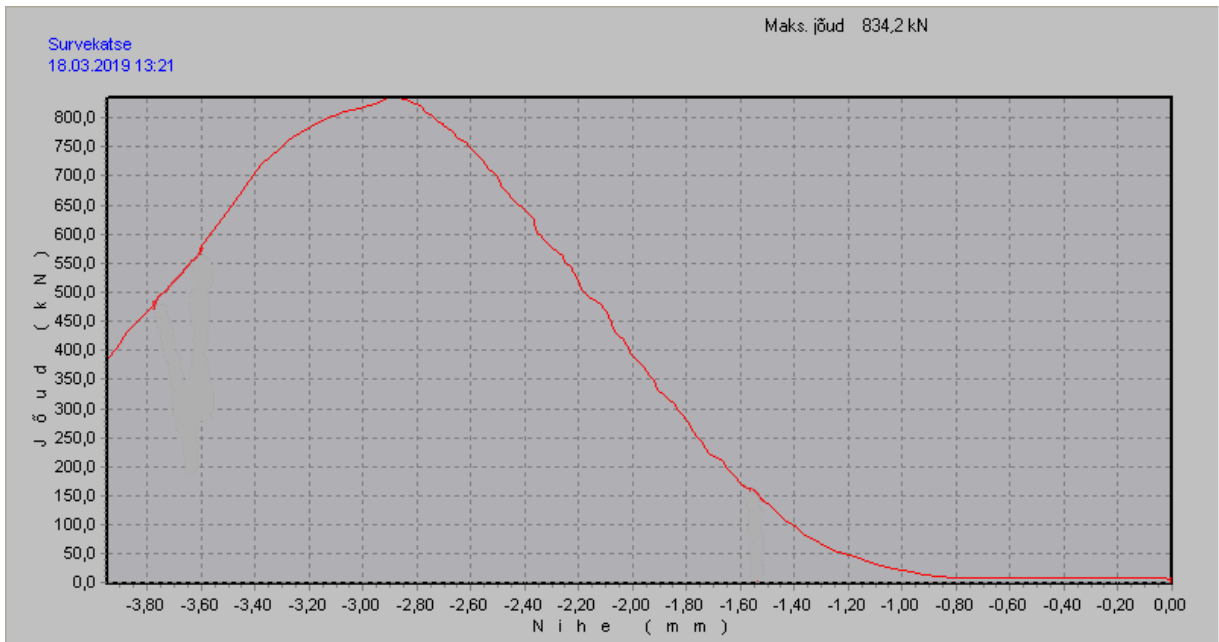
Joonis 3.4 Katsekeha T1-10 (betoon C25/30 XC2 lisandita) purunemispilt



Joonis 3.5 Katsekeha T2-4 (betoon C25/30 XC2 lisandita) survekatse purunemisgraafik



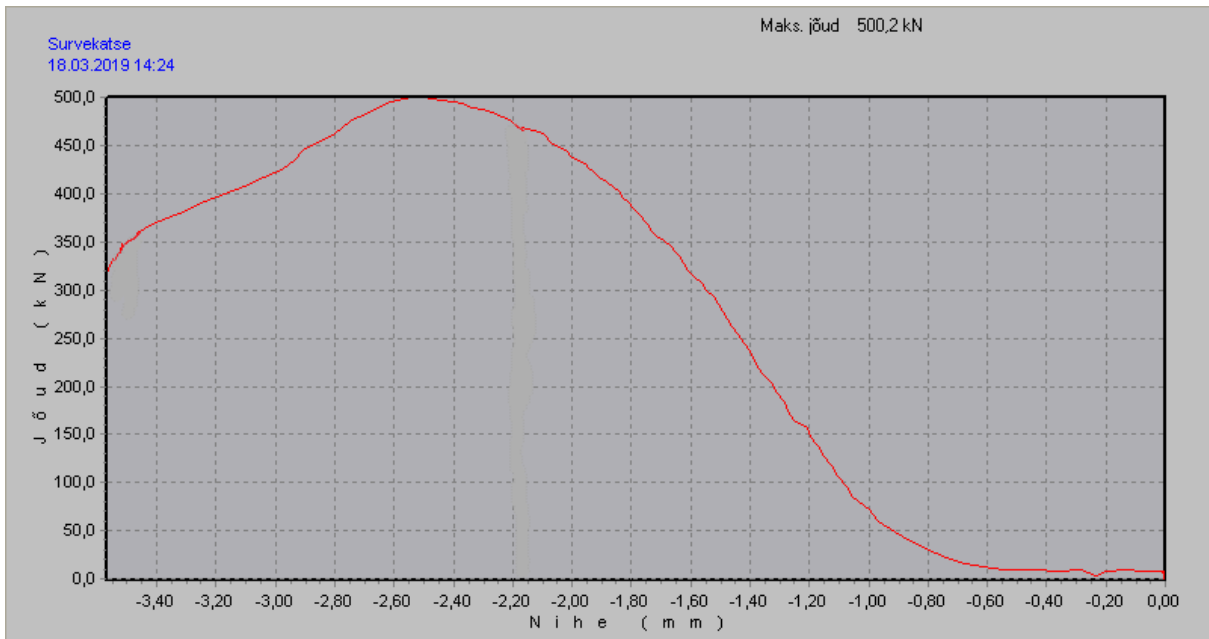
Joonis 3.6 Katsekeha T2-4 (betoon C25/30 XC2 lisandita) purunemispilt



Joonis 3.7 Katsekeha T3-7 (betoon C25/30 XC2 lisandita) survekatse purunemisgraafik



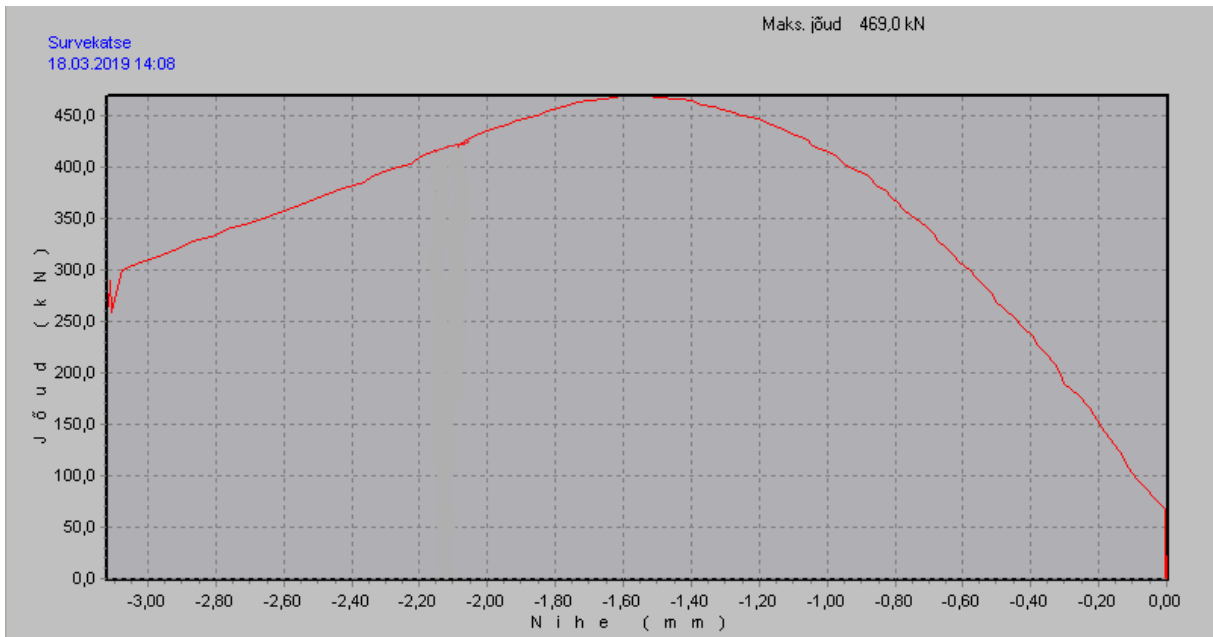
Joonis 3.8 Katsekeha T3-7 (betoon C25/30 XC2 lisandita) purunemispilt



Joonis 3.9 Katsekeha L1-18 (betoon C25/30 XC2 lisandiga) survekatse purunemisgraafik



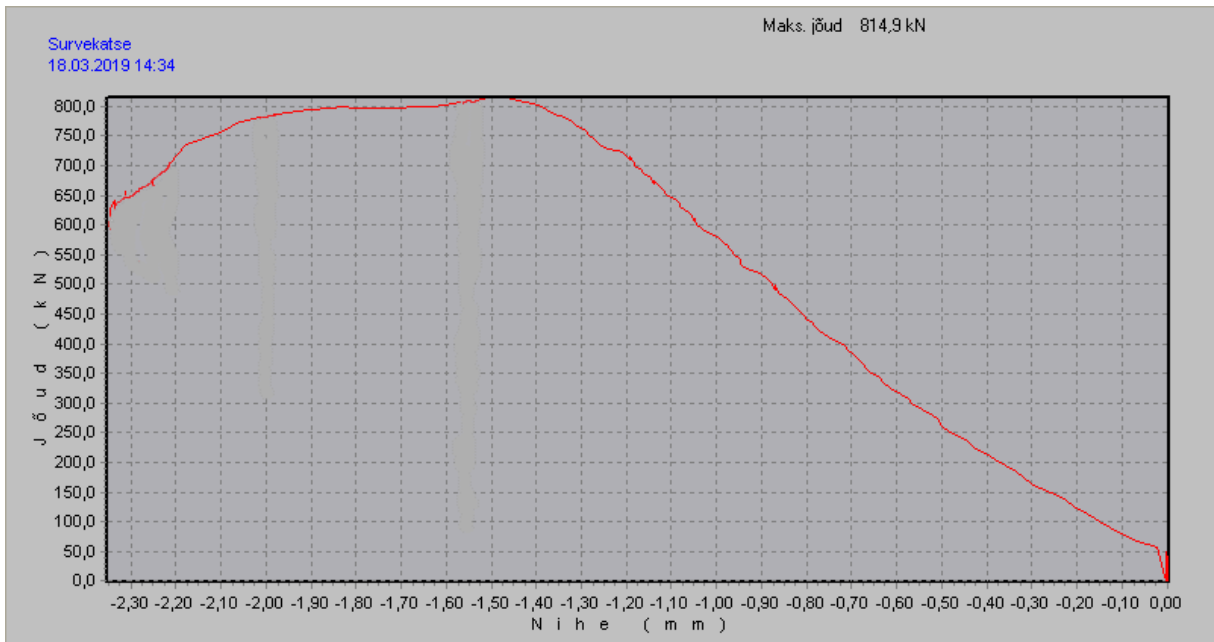
Joonis 3.10 Katsekeha L1-18 (betoon C25/30 XC2 lisandiga) purunemispilt



Joonis 3.11 Katsekeha L2-15 (betoon C25/30 XC2 lisandiga) survekatse purunemisgraafik



Joonis 3.12 Katsekeha L2-15 (betoon C25/30 XC2 lisandiga) purunemispilt

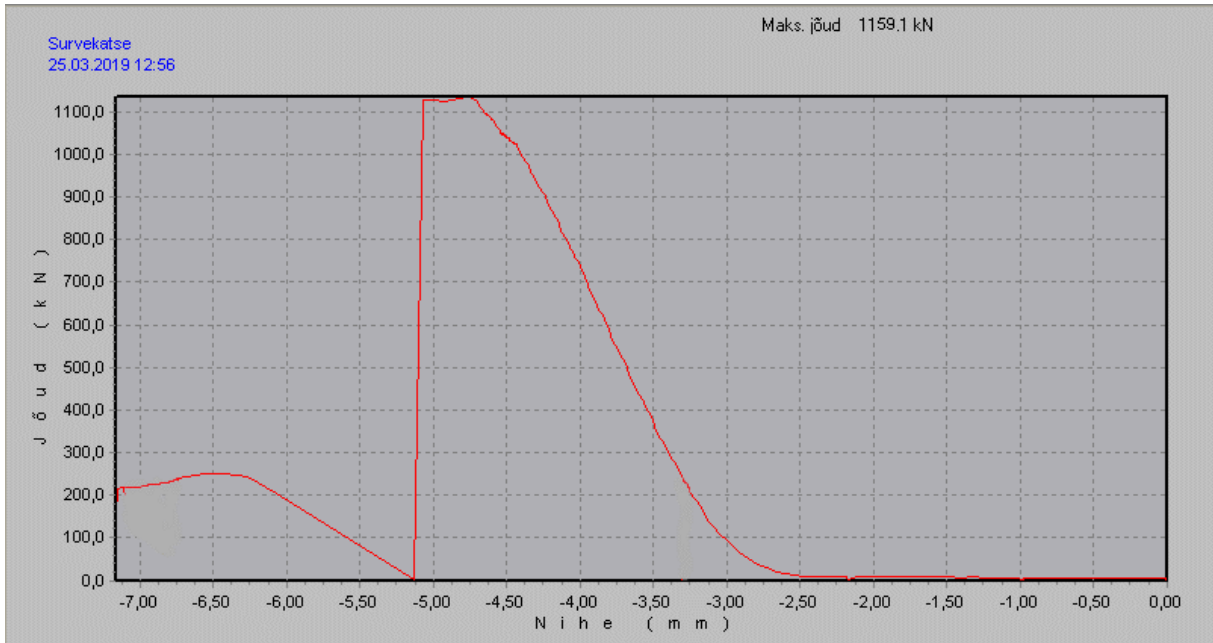


Joonis 3.13 Katsekeha L3-20 (betoon C25/30 XC2 lisandiga) survekatse purunemisgraafik



Joonis 3.14 Katsekeha L3-20 (betoon C25/30 XC2 lisandiga) purunemispilt

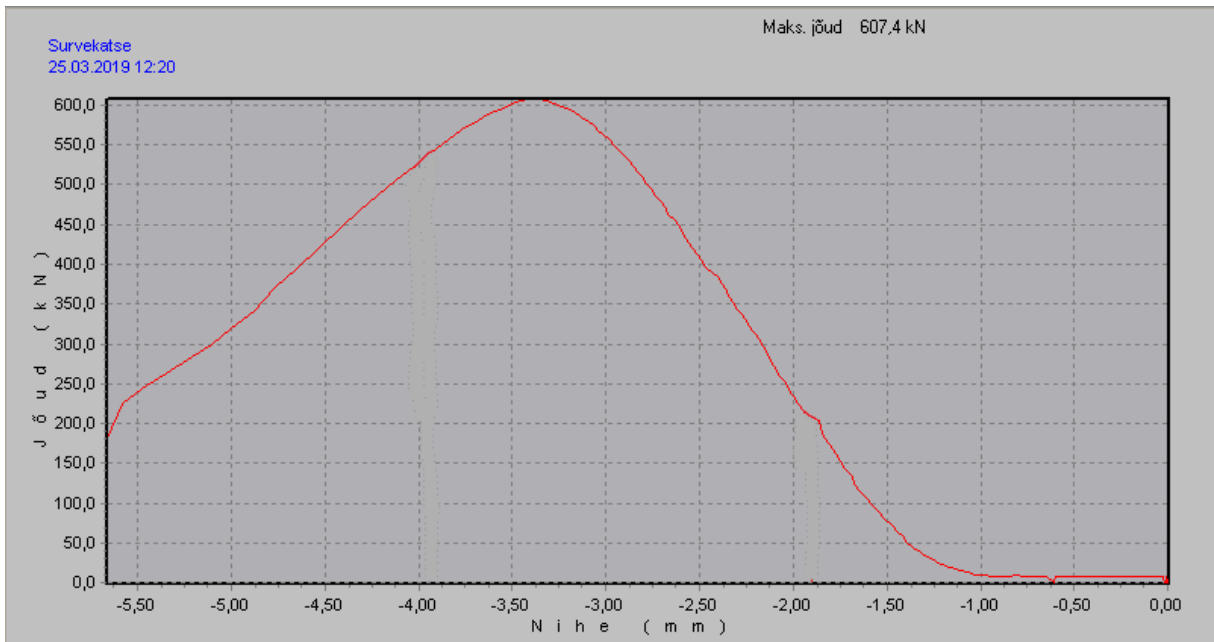
Lisa 4 Katsekehade purunemisgraafikud ja -pildid (Rudus AS)



Joonis 4.1 Katsekeha T0-3 (betoon C30/37 XC2 lisandita) survekatse purunemisgraafik



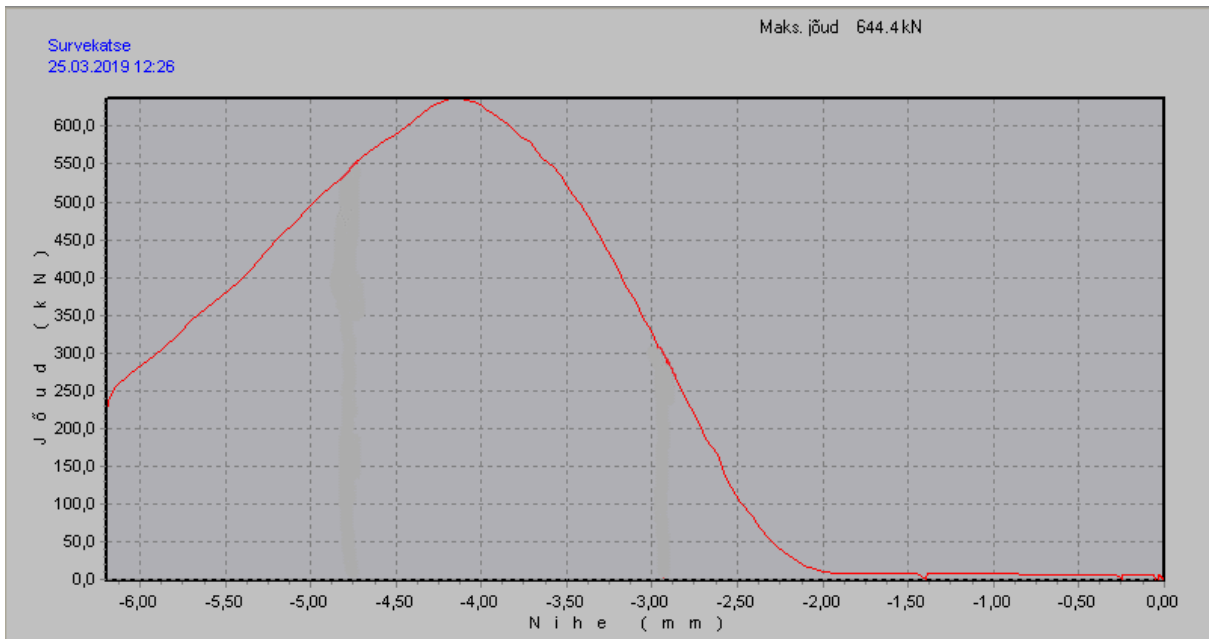
Joonis 4.2 Katsekeha T0-3 (betoon C30/37 XC2 lisandita) purunemispilt



Joonis 4.3 Katsekeha T1-12 (betoon C30/37 XC2 lisandita) survekatse purunemisgraafik



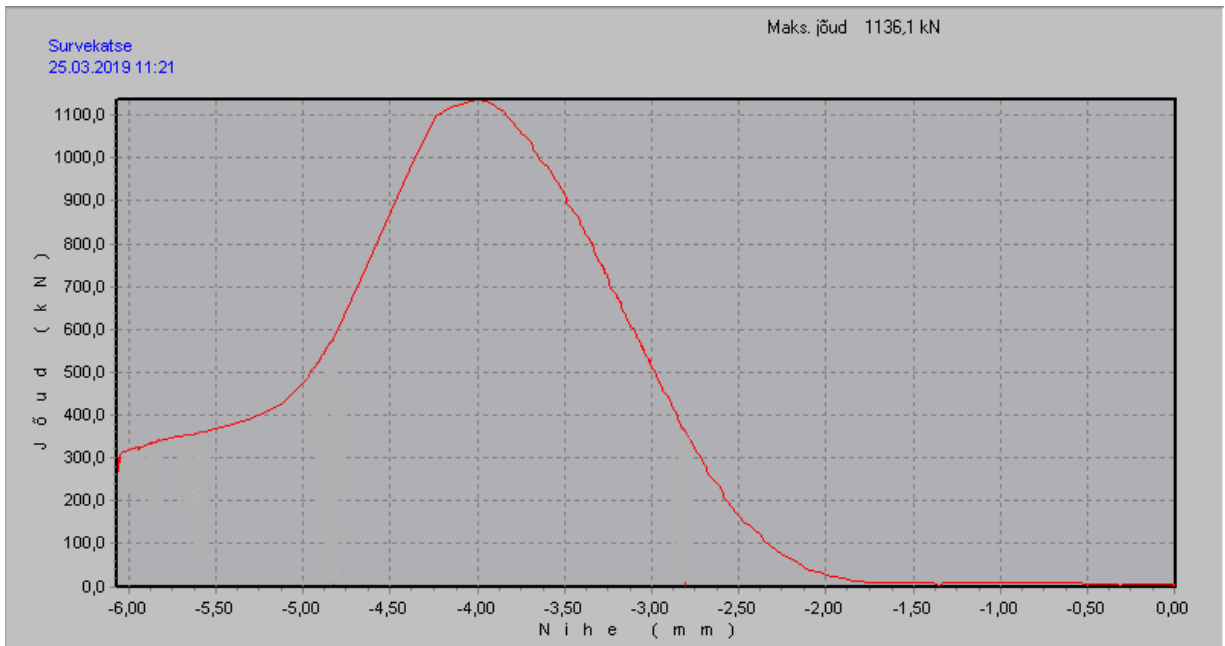
Joonis 4.4 Katsekeha T1-12 (betoon C30/37 XC2 lisandita) purunemispilt



Joonis 4.5 Katsekeha T2-14 (betoon C30/37 XC2 lisandita) survekatse purunemisgraafik



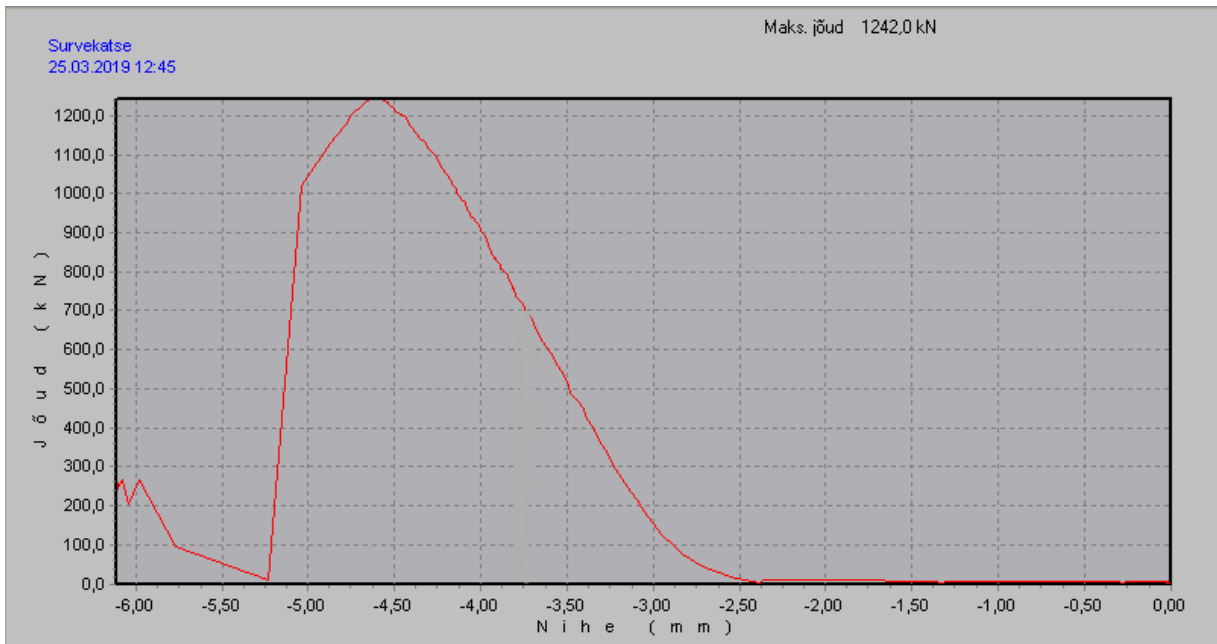
Joonis 4.6 Katsekeha T2-14 (betoon C30/37 XC2 lisandita) purunemispilt



Joonis 4.7 Katsekeha T3-4 (betoon C30/37 XC2 lisandita) survekatse purunemisgraafik



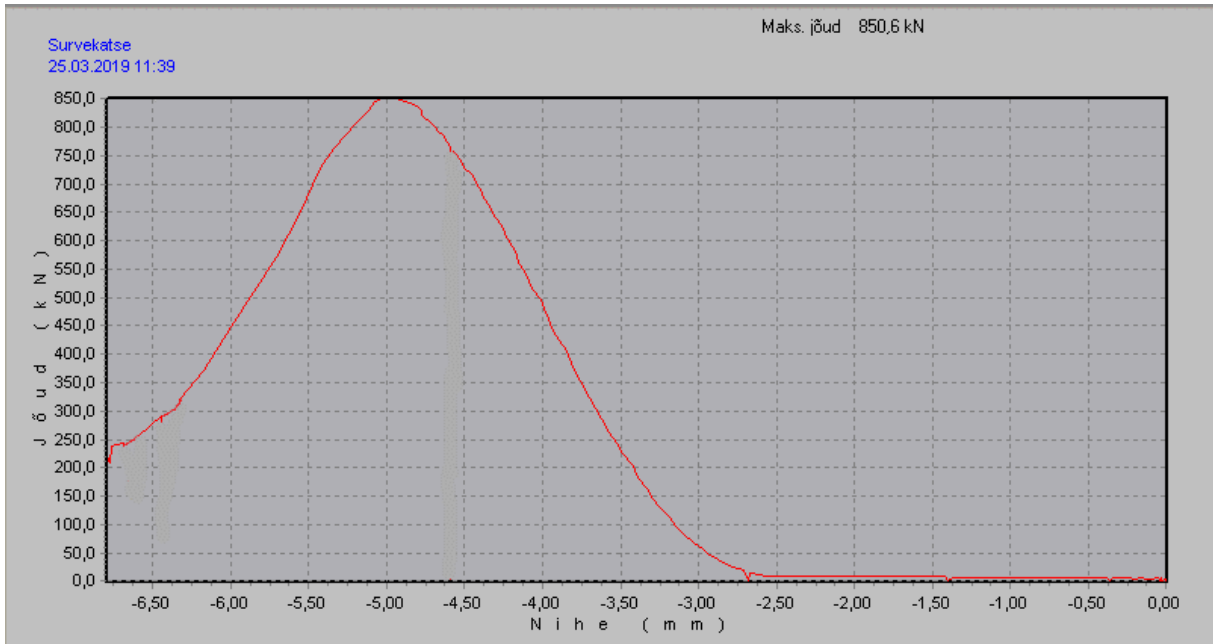
Joonis 4.8 Katsekeha T3-4 (betoon C30/37 XC2 lisandita) purunemispilt



Joonis 4.9 Katsekeha L1-16 (betoon C30/37 XC2 lisandiga) survekatse purunemisgraafik



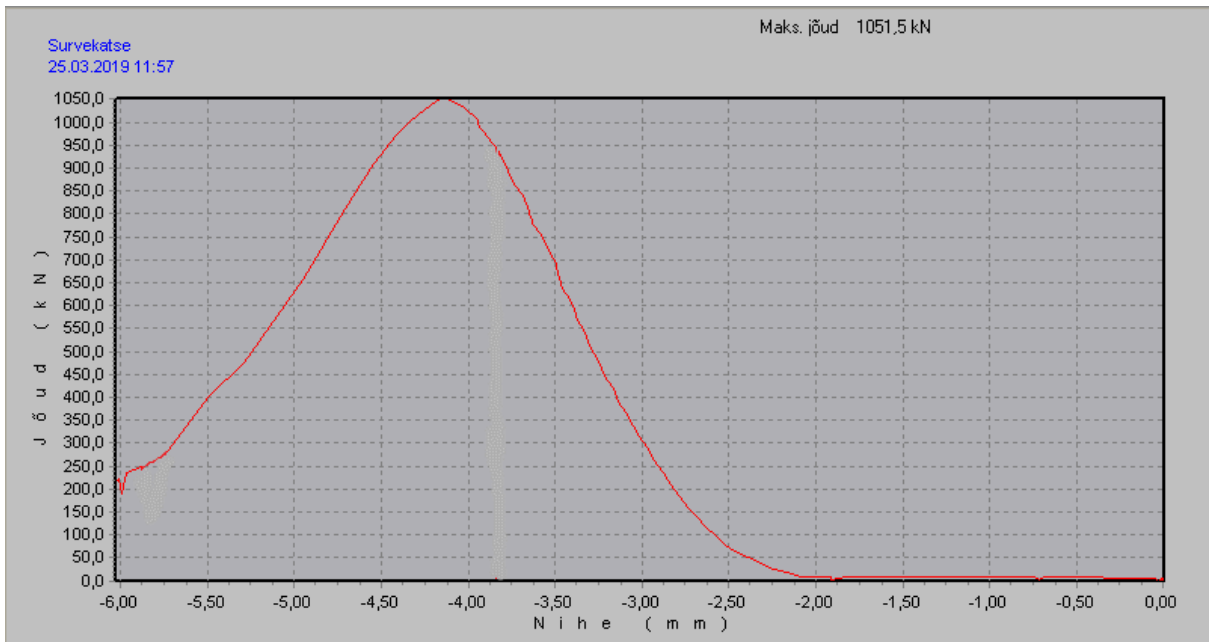
Joonis 4.10 Katsekeha L1-16 (betoon C30/37 XC2 lisandiga) purunemispilt



Joonis 4.11 Katsekeha L2-19 (betoon C30/37 XC2 lisandiga) survekatse purunemisgraafik



Joonis 4.12 Katsekeha L2-19 (betoon C30/37 XC2 lisandiga) purunemispilt



Joonis 4.13 Katsekeha L3-7 (betoon C30/37 XC2 lisandiga) survekatse purunemisgraafik



Joonis 4.14 Katsekeha L3-7 (betoon C30/37 XC2 lisandiga) purunemispilt