



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Karry Jallai

**TERASSARRUSE TUGEVUSOMADUSTE UURIMINE
ERINEVATES KESKKONDADES**

**ANALYSIS OF STRENGTH PROPERTIES OF STEEL REBAR
IN VARIOUS ENVIRONMENTS**

Magistritöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Vello Pallav

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Karry Jallai		Õppekava: Maaehitus (382)	
Pealkiri: Terrassarruse tugevusomaduste uurimine erinevates keskkondades			
Lehekülgi: 90	Jooniseid: 42	Tabeleid: 8	Lisasid: 9
Osakond / Õppetool:		Maaehituse ja veemajanduse õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Tsiviilehitus, T220	
Juhendaja:		Vello Pallav	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2018	
<p>Raudbetooni kui komposiitmaterjali konstruktsioonide töövõimet ja kasutusiga mõjutavad otseselt betooni ja terrassarruse kvaliteet ning koostöövõime. Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida terrassarruse korrosiooni tekkimise teoreetilisi käsitlusi ja erinevates keskkondades tekkinud korrosiooniprotsesside reaalsel mõju terrassarruse põhilistele tugevusomadustele.</p> <p>Magistritöö raames valmistati kokku 180 katsekeha, mis paigutati neljaks kuuks erinevatesse keskkondadesse. Uurimise aluseks valiti kuus erinevat keskkonda: 1) kuiv ja kõetud siseruum, kus korrosiooni tekkimise võimalused olid minimaalsed ning nende katsekehade tulemused võeti võrdluse aluseks teistele keskkondadele; 2) väliskeskond; 3) agressiivne keskkond; 4) osaliselt happeline keskkond; 5) happeline keskkond; 6) leeliseline keskkond. Pärast katsekehade keskkondadest eemaldamist viidi läbi tõmbekatsed. Läbiviidud tõmbeteimi tulemusena leiti terrasarmatuurist katsekehade põhilised tugevusomadused nagu tõmbetugevus, voolavuspiir ja katkevenivus.</p> <p>Katsetulemused näitasid, et võrdluse aluseks olnud esimese katseseeria tõmbetugevuse ning katkevenivuse tulemused olid kõige paremad. Esimese katseseeria katsetulemuste põhjal saadi keskmiseks tõmbetugevuseks 765,86 MPa. Kõige kehvemad tulemused olid neljanda katseseeria katsekehadel, mille keskmiseks tõmbetugevuseks saadi 741,03 MPa, mis on võrreldes esimese katseseeriaga 3,24 % madalam. Teostatud katsete tulemused näitasid, et korrosiooni mõjul terase põhilised tugevusomadused halvenevad. Teostatud katsete tulemusi saab kasutada alusmaterjalina tulevaste uuringute võrdluseks ning uute katseliste uuringute läbiviimiseks.</p>			
Märksõnad: terrassarrus, terase korrosioon, korrosiooni liigid			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Karry Jallai		Curriculum: Civil Engineering (Rural Buildings) (382)	
Title: Analysis of strenght properties of steel rebar in various environments			
Pages: 90	Figures: 42	Tables: 8	Appendixes: 9
Department / Chair:		Chair of Rular Buildings and Water Management	
Field of research and (CERC S) code:		Civil Engineering, T220	
Supervisors:		Vello Pallav	
Place and date:		Tartu 2018	
<p>The workability and service life of reinforced concrete as a composite material is directly influenced by the quality and workability of concrete and steel reinforcements. The aim of the master's thesis at hand was to study the theoretical procedures of corrosion in steel reinforcements and the real influence of corrosive processes of different environments on the main strength properties of steel reinforcements.</p> <p>In the course of the study, 180 test pieces were made, which were placed in different environments for four months. Six different environments were chosen as the basis of the study: 1) a dry and heated indoor room where possibilities for corrosion were minimal. The results from these test pieces were taken as a base of comparison for other environments; 2) outdoor environment; 3) aggressive environment; 4) partially acidic environment; 5) acidic environment; 6) alkaline environment. After removing the test pieces from the environments, breaking tests were conducted. As a result of the conducted breaking tests, the main strength properties of the steel reinforcement test pieces, such as tensile strength, yield strength and extension at break were learnt.</p> <p>The test results showed that the first test series, which was the basis for comparison, had the best results for tensile strength and extension at break. The average tensile strength based on the test results of the first test series was 765,86 MPa. The fourth test series had the worst results – 741,03 MPa as the average tensile strength, which is, compared to the first test series, 3,24% lower. The test results showed that the main strength properties of steel deteriorate under the effects of corrosion.</p> <p>The results of the tests conducted can be used as base material for comparison for future studies and for conducting new test studies.</p>			
Keywords: steel rebar, steel corrosion, types of corrosion			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1 TERASSARRUS, TERASE KORROSION JA KORROSIONI LIIGID	8
1.1 Terassarrus	8
1.1.1 Terassarruse ajalugu betoonkonstruktsioonides	9
1.2 Korrosioonist üldiselt.....	10
1.3 Terasarmatuuri korrosioon betoonis	10
1.3.1 Kloriidide sissetung betooni	13
1.3.2 Betooni karboniseerumine	14
1.4 Elektrokeemiline korrosioon.....	16
1.4.1 Teras korrosioon niiskes keskkonnas	16
1.5 Keemiline korrosioon	18
1.6 Terasarmatuuri korrosiooni liigid	18
1.6.1 Ühtlane korrosioon	19
1.6.2 Lokaalne korrosioon	19
1.6.3 Pinnaalne korrosioon	21
1.6.4 Pingekorrosioon.....	21
1.6.5 Bakteriaalne korrosioon.....	22
2 TERASSARRUSE KORROSIONIKAHJUSTUSED MATERJALI TASANDIL .	24
2.1 Betoonkonstruktsioonide korrosioonikahjustused	24
2.2 Terassarruse korrosioonikahjustused	25
3 TERASSARRUSE KORROSIONI TEKKE ENNETAMINE.....	27
3.1 Terassarruse katmine	27
3.2 Roostevabast terasest betoonisarrusteras	27
3.3 Inhibiitorid	28
3.4 Galvaaniline terassarruse katmine	28
4 ERINEVATESSE KESKKONDADESSE PAIGUTATUD TERASSARRUSE TUGEVUSOMADUSTE UURIMINE	30
4.1 Katsekehade ettevalmistamine ning paigutamine keskkondadesse	30
4.1.1 Katsekehad ning keskkonnad	30
4.2 Terasarmatuuri tõmbekatse meetodika	31
4.2.1 Universaalne katsemasin P-20.....	31
4.2.2 Katsekehade massi ja pikkuse määramine	32
4.2.3 Läbimõõdu määramine	33
4.2.4 Tõmbetugevuse määramine	34
4.2.5 Tingliku voolavuspiiri määramine.....	35
4.2.6 Katkevenivuse määramine.....	36
5 KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS	39

5.1	Tõmbekatsete tulemused ja analüüs	39
5.2	Katsetulemuste statistiline analüüs	50
5.2.1	Tõmbetugevuste statistiline analüüs ja usaldusintervallid.....	51
5.2.2	Tingliku voolavuspiiri statistiline analüüs ja usaldusintervallid	53
5.2.3	Katkevenivuse statistiline analüüs ja usaldusintervallid	54
5.2.4	Algristlõikepindala statistiline analüüs ja usaldusintervallid	55
KOKKUVÕTE		57
KASUTATUD KIRJANDUS		59
LISAD		61
Lisa 1. Betoonisarrusterase sertifikaat.....		62
Lisa 2. Ilmastikutingimuste kohta peetud ülevaade kuude lõikes.		63
Lisa 3. Betooni saateleht.....		67
Lisa 4. Terassarrusest katsekehade katkevenivuse määramine sõltuvalt purunemiskoha asukohast		68
Lisa 5. Kuue katseseeria tõmbetugevused		70
Lisa 6. Katseseeriade tõmbegraafikud.....		76
Lisa 7. Kuue katseseeria katsetulemuste põhjal saadud andmed.....		82
Lisa 8. Katsekehad peale keskkondadest eemaldamist		88
Lisa 9. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta		90

SISSEJUHATUS

Raudbetoonkonstruktsioonide kasutusiga soodsates keskkonnatingimustes küündib aastakümneteni, mõningatel juhtudel isegi kuni saja aastani või kauem. Kasutusiga võib märgatavalt lüheneda betoonis oleva terassarruse korrodeerumise tõttu. Üldjuhul teras korrodeerub kokkupuutel õhu ja niiskusega. Kvaliteetses ja terves raudbetoonkonstruktsioonis on terasarmatuur korrosiooni eest kaitstud. Betooni kõrge pH tase takistab terase korrosiooni, tekitades ümber terasarmatuuri passiivse kaitsekihi. Passiivne kiht takistab terassarruse korrosiooni ning maailmas on mitmeid näiteid sellest kuidas armatuurraud püsib betoonis üle 100 aasta korrodeerumata. Betooni pH taseme langemisel alla 9 algab terassarruse korrodeerumine. Terassarruse korrosiooni betoonis põhjustavad üldjuhul kaks betooni kahjustavat protsessi, milleks on betooni karboniseerumine või kloriidide sissetung. Nende kahjustuste korral terasarmatuuri kaitsev passiivne kiht laguneb ning teras hakkab korrodeeruma.

Raudbetoonkonstruktsioon on komposiitmaterjal terase ja betooni konstruktiivsest ühendusest. Teras- või klasskiudarmatuuri kasutatakse betoonis tõmbetugevuse parandamiseks. Betoon ise peab hästi vastu survetugevusele, kuid tõmbepingel korral on betoon võrdlemisi nõrk. Betoonisarrusterase kombineerimine betooniga võimaldab teha palju keerukamaid konstruktsioonilahendusi.

Armatuurraud ehk betooni sarrusteras on kuum- või külmavaltsitud teraslatt. Lisaks betoonkonstruktsiooni tõmbetugevuse parandamisele aitab armatuurraud vältida pragude tekkimist betooni pinnas. Terasarmatuuri kasutatakse betoonist sildades, vundamentides, hoone karkassides.

Käesoleva magistritöö põhiliseks eesmärgiks on katsete põhjal uurida erinevatesse keskkondadesse paigutatud armatuurvarraste korrosiooni mõju terassarruse põhilistele tugevusomadustele. Terassarruse tugevusomadusi hinnatakse terasarmatuuri kolme põhilise omaduse – katkevenivuse, tingliku voolavuspääri ning tõmbetugevuse põhjal. Pikaajaliselt kahjustavates keskkondades olev terassarrus hakkab korrodeeruma ning korrosiooniprotsessi mõju terasele on olulisi omadusi halvendav või lausa hävitav.

Käesoleva magistritöö ajend tuleneb praktilise töö käigus selgunud projekteerimisest tulenevatest kitsaskohtadest. Betoonist silohoidlate mõnes konstruktsiooni sõlmes jääb terasarmatuur kaitseta, olles otseselt avatud terase korrosiooni põhjustavatele teguritele (niiskus, õhk, silomahl). Magistritöö raames uuritakse 180 armatuurvarda käitumist kuues erinevas keskkonnas (kuus seeriat) ning peale nelja kuu möödumist eemaldatakse katsekehad keskkondadest ning seejärel viiakse läbi kuue erineva seeria tõmbekatsed.

Lähtuvalt uurimistöö eesmärgist on püstitatud hüpotees: erinevates keskkondades tekkinud korrosiooniprotsesside mõjul terassarruse mehaanilised tugevusomadused halvenevad.

Magistritöö kirjandusanalüüsi peatükkides antakse ülevaade: 1) terasest, 2) terase- ja raudbetooni ajaloost, 3) terase korrosioonist, 4) terase korrosiooni põhjustavatest protsessidest (karboniseerumine, kloriidide sissetung). Materjali ja meetodika peatükis kirjeldatakse magistritöös terase tõmbekatse meetodikat. Töö tulemuste ja arutelu peatükis on välja toodud katsetulemuste põhjal saadud andmete võrdlus ning järeldused.

Töö autor tänab Eesti Maaülikooli Maaehituse ja veemajanduse õppetooli lektorit Vello Pallavit, kes aitas kujundada töö sisulist ülesehitust ning andis juhiseid terve magistritöö koostamise vältel. Täna Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituudi, kelle katseseadmeid ja laboreid sai magistritöö autor kasutada. Kindlasti avaldan tänu Eesti Maaülikooli Maaehitus ja veemajandus õppetooli spetsialistile Renno Reitsnikule, kes selgitas universaalse katsemasina P-20 põhimõtteid ja aitas läbi viia mõned katsed. Tänu soovin ka avaldada Eesti Maaülikooli Metsakorralduse ja metsatööstuse õppetooli teadur Allar Padarit, kes abistas ning andis suuna kätte tulemuste statistilise analüüsi läbiviimiseks. Kindlasti tänan kõiki lähedasi, sõpru ja tuttavaid, kes olid abiks katsete läbiviimisel ja igal abistaval moel terve magistritöö koostamise vältel.

1 TERASSARRUS, TERASE KORROSION JA KORROSIONI LIIGID

1.1 Terassarrus

Armatuurraud ehk betooni sarrusteras on kuumvaltsimise (vt joonis 1.1) või külmaltsimise teel toodetud teraslatt. Terassarrust kasutatakse betoonkonstruktsioonide tõmbetugevuse parandamiseks ning pragude tekkimise vältimiseks. Armatuurraud on üldjuhul valmistatud keevitatavast terasest (süsiniku ekvivalendi arv on suhteliselt madal). Standardi EN 10080 kohaselt valmistatakse erineva pikkusega terasarmatuuri latte läbimõõduga 4 – 50 mm (EVS-EN 10080:2006). Terasel on head omadused tõmbel kui ka survel. Nii betoonil kui ka terasel on sarnased termopaisumise omadused, seega raudbetoonkonstruktsioonide temperatuuri muutused tekitavad armatuurile minimaalseid pingeid. (CRSI 2018)



Joonis 1.1. Terassarruse tootmine kuumvaltsimise meetodil (CRSI 2018).

Terasarmatuuri erinevate klasside mehaanilised omadused on erinevad. Normatiivsed tugevusomadused (tõmbetugevus, voolepiir ning katkevenivus) suurused sõltuvad armatuurile määratud klassist. Armatuuri klassid on üldjuhul tähistatud tähistega A, B ja C (nt. B500B). Kasutamise seisukohalt väljenduvad klassid selles, et klassi A kuuluv terassarruse tõmbetugevus on küll kõrgem, kuid katkevenivus on madalam ehk teras on vähem plastne võrreldes B või C klassi kuuluva armatuuriga. Terasarmatuuri valmistatakse raudsulamist. Valmistamise protsessi käigus kujundatakse terassarruse pinnale profiilid (ribid), mis aitavad betooni ja terasarmatuuri vahelisi koormusi üle kanda ning parandavad betooni ja sarruse omavahelist naket. (CRSI 2018)

1.1.1 Terassarruse ajalugu betoonkonstruktsioonides

Esimene spetsifikatsioon terassarrusele väljastati aastal 1910. Betoonis hakati armatuuri kasutama aastal 1849, mida peetakse ka raudbetooni sünniaastaks. Prantsuse advokaat Jean Louis Lambot valmistas betoonplaadi, mille ta armeeris terasega. Valmistatud betoonplaati võib nimetada esimese uuema aja betoon baasilise komposiitkonstruktsioonina. Antud plaat ei olnud veel klassikaline raudbetoon element, milles betoon võtab vastu survele tekkivaid pingeid ning teras tõmbepingeid. (Juurvee 2018)

1988. aastal avastati Kölnis arheoloogiliste väljakaevamiste käigus Rooma aegne (1. sajandist pärit) veereservuaar, mille seinad oli kolmeteistkümne ümara profiiliga raudvardaga ankurdatud põhja külge. (Juurvee 2018)

Raudbetooni laialdasem kasutuselevõtt leidis aset aastal 1867, kui aednik Joseph Monier võttis patendi armeeritud lillepotile. Kuna Monier ei mõistnud raudbetooni tööpõhimõtet, siis ei olnud tema paigutatud terasvõrk sugugi tõmbetsoonis. Teda peetakse ka raudbetooni leiutajaks, kuna peale tema tegemisi arenes terasega armeeritud lillepottide näitel mõte edasi, et hakata terasvardaid kasutama betoonkonstruktsioonides. (Juurvee 2018)

Terassarrus paigutati betoonkonstruktsioonis õigele kohale (tõmbetsoonis) alles siis, kui saksa insener Gustav Adolf Waysss ostis ära Monier'i patendi ja rajas selle alusel eduka raudbetooniettevõtte. Esimeste katsetustena tehtud raudbetoonist karkasshoonetes ei osatud poste ja talasid omavahel jäigalt ühendada. Sellele probleemile leidis lahenduse prantsuse

betonajaloos suurkujuks peetud Francois Hennebique kui ta 1892. aastal patenteeris oma süsteemi monoliitsete ehitiste püstitamiseks. (Trumm, Kangur 2014)

1.2 Korrosioonist üldiselt

Mis on korrosioon? Täpne nimetus tuleb ladina keelsest sõnast *corrodere*, mis tähendab ümbert (ära) närima, puruks närima (Kleis jt 2002: 285). Metallide ning teiste materjalide korrosioon on materjalide hävinemine ümbritseva keskkonna toimel. Korrosioonile alluvad kõik metallid ja sulamid, korrosiooni käigus toimub materjalide muutumine esialgseteks ühenditeks, millest neid saadi. Tulenevalt ainete omaduste erinevusest on ka korrosiooni põhjustavad tegurid keskkonnas vägagi erinevad. Metallide korrosiooniks nimetatakse metalli ning keskkonna (hapnik, pinna, vesi) omavahelist reaktsiooni, mille tulemusena metallide omadused halvnevad ning lõpptulemusena metall hävineb. (Talimets 2004)

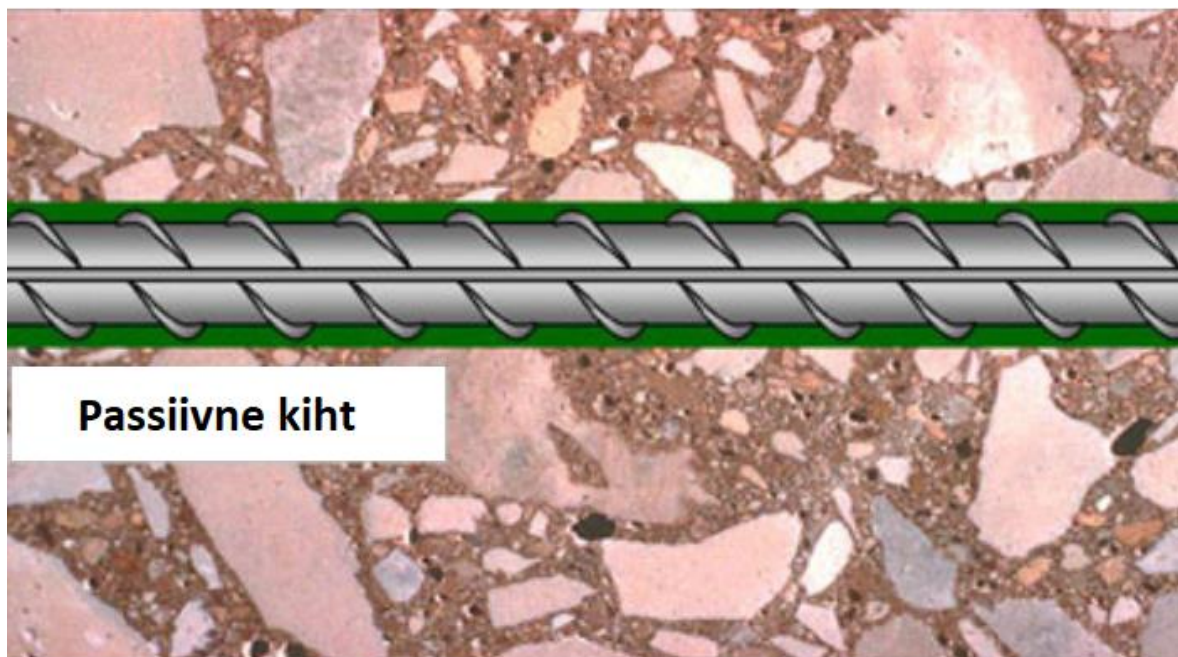
1.3 Terasarmatuuri korrosioon betoonis

Käesolev peatükk on refereering John P. Broomfieldi raamatust „*Corrosion of steel in concrete*” (Broomfield 1997) ja artiklist „*Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – review*” (Ahmad 2003). Miks teras betoonis roostetab? Palju olulisem on küsimus, et miks teras betoonis ei roosteta. Praktikast on teada, et kokkupuutel õhu ja veega teras hakkab roostetama. Teras korrodeerub, kuna tegemist ei ole looduses puhtal kujul esineva materjaliga (raua sulam). Kuigi betoon on poorne materjal ning sisaldab endas niiskust, siis mis põhjustel betoonis olev terasarmatuur ei roosteta?

Vastus eelnevale küsimusele on lihtne – betoonis on aluseline keskkond. Aluseline keskkond on vastandlik happelisele keskkonnale. Metallid korrodeeruvad happelistes tingimustes, vastupidiselt aluselistele ehk tugevatele leeliselistele keskkondadele, kus metallid on korrosiooni tekitavate protsesside eest kaitstud.

Betoon sisaldab endas mikropoore, lahustunud kaltsiumi-, naatriumi ning kaaliumoksiidide sisaldusega. Seda liiki oksiidid moodustavad veega kokkupuutel hüdroksiide, mis on väga leelised (pH 12-13,5).

Leeliseline keskkond tekitab omakorda betoonis olevale terasarmatuuri pinnale passiivse kihi (läbimatu kiht) (vt joonis 1.2). Iseloomult väga tihe kiht kaitseb terast ning hoiab ära selle korrodeerumise. Tõenäoliselt on antud kihi puhul tegemist raua oksiid/ hüdroksiidi ning osaliselt betoonist tulenevate mineraalide seguga. Kvaliteetne betoonisegu (madala vesitsementteguriga ja korralikult kivinenud betoon) on suure tihedusega, mis omakorda vähendab korrosiooni tekitavate tegurite (kloriid, süsinikdioksiid, niiskus jne.) sissetungi betoonis oleva terasarmatuuri pinnale.



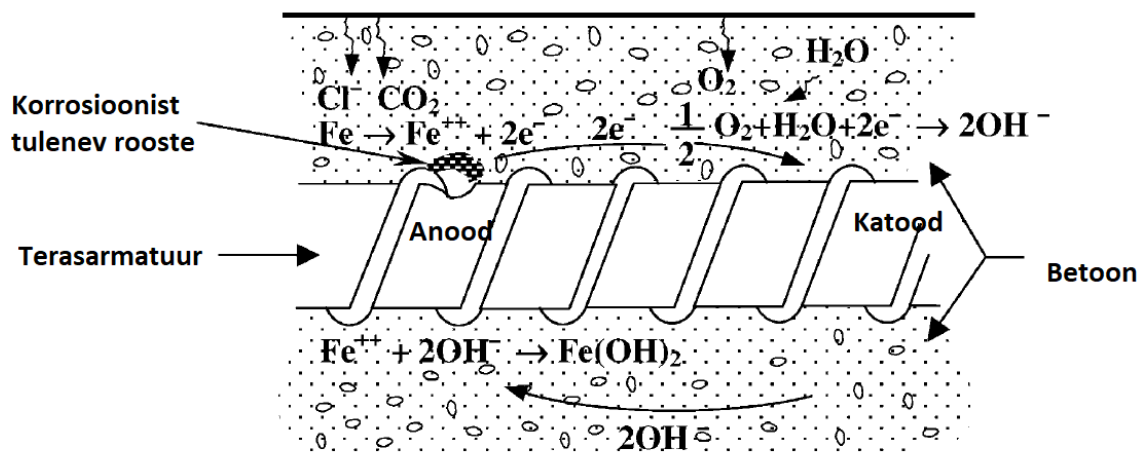
Joonis 1.2. Betoonis paiknev terassarrust ümbritsev passiivne kiht (PCA 2002).

Insenerid, kes on spetsialiseerunud korrosioonile, on pühendanud väga palju aega, et leida viise kuidas peatada ja ära hoida metallide korrosiooni, kattes neid erinevat tüüpi ainetega, millel on metalle kaitsvad omadused. Passiivne kiht on inseneride unistus, kuna see moodustub ja paraneb iseenesest. Passiivne kiht püsib senikaua kui terast ümbritseb tugev leeliseline keskkond. Passiivne kaitsekiht on siiani terast kaitsvatest viisidest kõige parem.

Siiski on kaks protsessi, mis suudavad passiivset kaitsvat keskkonda kahjustada. Nende protsesside tulemusena terasarmatuuri kaitsev kiht laguneb ning teras hakkab korrodeeruma. Nendeks protsessideks on betooni karboniseerumine ja kloriidide sissetung betooni.

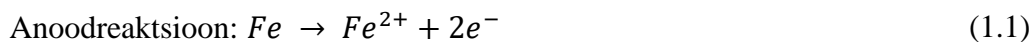
Terassarruse korrosioon betoonis on elektrokeemiline protsess. Antud protsessi on nimetatud sarnaseks akupatareis toimuvaga. Roostetava terasarmatuuri pealispind toimib

nagu elektrood, mis koosneb anoodidest ja katoodidest, mis on elektriliselt läbi terase ühendatud, selline olukord tekitabki anood- ja katoodreaktsioone. Nende protsesside käigus tekivadki korrosiooni kolded (vt. joonis 1.3).

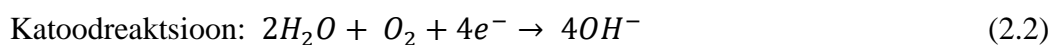


Joonis 1.3. Skemaatiline joonis terasarmatuuri korrosioonist betoonis – elektrokeemilise protsessi näol (Ahmad 2003).

Sellel hetkel kui passiivne kiht laguneb, hakkab terase pinnal moodustuma korrosiooni tekitavad protsessid. Keemilised reaktsioonid on samasugused, olenemata sellest kas korrosioon on tingitud kloriidide sissetungist või betooni karboniseerumisest. Teras oksüdeerub anoodses tsoonis. Oksüdeerudes raud lahustub betooni poorides olevas vees kaotades seeläbi elektrone. Raud lagunemisel ioonideks ja elektronideks tekib anoodreaktsioon:



Anoodreaktsiooni käigus tekivad raudioonid (Fe^{2+}), mis liiguvad betooni ja lahustuvad vesilahuses. Terassarruse pinnale jäänud kaks elektroni ($2e^{-}$) liiguvad katoodi alale, kus nad reageerivad betoonis oleva vee (niiskuse) ning hapnikuga. Antud reaktsiooni nimetatakse reduktsioonireaktsiooniks, mille üks levinumaid reaktsioone on:



Elektrilise neutraalsuse säilitamiseks liiguvad raudioonid läbi betooni poorides leiduva vee katoodialadele, kus nad reageerivad redoksreaktsiooni käigus tekkinud hüdroksiidioonidega, moodustades raudhüdroksiide:



Esialgselt sadestunud hüdroksiid kipub edasi reageerima hapnikuga (O₂), mis omakorda reageerides tekitab kõrgema astmega okside. Edasine omavaheline reaktsioon aga kasvatab enamgi roostest (rauaoksiididest) tekkinud terassarruse ruumala, viies betooniseste pingeteni, mis võib põhjustada betooni pealispinna mõranemist ja pealiskihi pudenemist.

1.3.1 Kloriidide sissetung betooni

Terasarmatuuri kokkupuutumine kloriididega on üks peamisi põhjuseid enneaegse korrosiooni tekkimisel. Kloriidide sissetungi puhul on tegemist terasarmatuuri lokaalse korrosiooniga. Kloriidioonide sissetung raudbetoonkonstruktsioonidesse (sillad, parklad, maanteed) võib esineda olukorras, kus kasutatakse jäitevastaseid soolasisid. Lisaks võivad kloriidid sattuda kivistunud raudbetoonkonstruktsioonidesse kokkupuutel mereveega ja merelise kliima tõttu. Terassarruse korrosioon tekib olukorras, kus kloriidioonid puutuvad terasarmatuuri pinnal kokku hapniku ja niiskusega. Vee toimel võivad lahustunud kloriidid tungida armatuurini läbi betooni või jõuda teraseni läbi betooni tekkinud pragude. Lisaks võivad korrosiooni põhjustada ka kloori sisaldavad lisandid. (Types and Causes of Concrete Deterioration 2002)

Kirjanduses ei ole välja toodud ühtegi teist saasteainet, peale kloriidioonide, mis tekitab terase korrosiooni. Kloriididest tingitud korrosiooni mehhanismi kohta pole teatavasti ühist kindlat arusaama. Kõige tuntuma teooria kohaselt tungivad kloriidioonid läbi vähemaktiivsete oksiidide poolt tekitatud passiivse kaitsekihi, lõhkudes selle ning muutes terasarmatuuri korrosiooniprotsessidele avatuks. (Types and Causes of Concrete Deterioration 2002)

Kloriidide sisalduse suurenemisega betoonis tõuseb ka oht terase korrosiooni tekkeks. Kui kloriidide sisaldus ületab terase pinnal teatud piiri, mida nimetatakse läviväärtuseks, hakkab

teras hapniku ning niiskuse (vesi) olemasolul roostetama. *Federal Highway Administration* (FHWA) poolt läbi viidud uuringu tulemused näitasid, et kogu kloriidide hulga piirmäär betoonis (happes lahustuvad) on 0,20 % tsemendi massist. Antud tulemus on saadud raudbetoonist sillaplaatide uuringute järel dustena (Clear 1976).

Kloriidid on otseselt seotud terasarmatuuri korrosiooni tekkega, tungides betooni ja hävitades armatuuri pinnal oleva passiivse kaitsekihi. *Nad on korrosiooni protsessi algatamises üks peamine tegur. Teisejärguline roll terase korrodeerumisel on hapniku ja niiskuse juurdepääs terasarmatuurile ja lisaks on mõju betoonis oleval pH tasemel ning temperatuuril. (Types and Causes of Concrete Deterioration 2002)

Betooni kloriidikindluse uurimist ning selle tõstmise võimalikkust betoonilisandi kasutamisel on põhjalikumalt käsitletud varasemalt koostatud Eesti Maaülikooli Maaehituse erialal õppinud tudengi magistritöös. Magistritöö käigus uuriti erinevast tugevusklassist betoonide kloriidikindlust ning survetugevust. Läbiviidud katsete eesmärgiks oli määrata hüdroisoleeriva betoonilisandi Penetron Admix mõju kloriidikindluse suurendamisel. (Persidski 2015)

1.3.2 Betooni karboniseerumine

Betooni karboniseerimine toimub juhul kui süsinikdioksiid (CO₂) tungib õhust betooni. Sellele järgneb reageerimine hüdroksiididega (kaltsiumhüdroksiid), mille tulemusel moodustuvad karbonaadid. Reaktsioonil kaltsiumhüdroksiidiga moodustub kaltsiumkarbonaat järgmiselt:



See reaktsioon vähendab betooni poorides oleva pH taseme 8,5ni. Sellise pH taseme korral muutub terasarmatuuri pealispinnal olev passiivne kaitsekiht ebastabiilseks. Karboniseerumine on üldjuhul aeglane protsess. Kõrge kvaliteediga betooni korral on karboniseerumise kiirus hinnanguliselt 1,0 mm aastas. Karboniseerumise protsess betoonis kiireneb oluliselt kui betoonisegu on kõrge vesi-tsementteguriga (V/TS tegur),

konstruktsioonil on olnud lühikene kivilõhkimisaeg ning suure poorsuse ja väikse tihedusega madala tugevusklassiga betooni korral. (ACI 201 1992)

Betooni karboniseerumine sõltub oluliselt suhtelisest õhuniiskusest. Kõige intensiivsemalt toimub betooni karboniseerumine oludes, kus suhteline õhuniiskus püsib konstantselt vahemikus 50% - 70%. Allpool 25% suhtelise õhuniiskuse tasemel on karboniseerumine võimalikkus madal. Üle 75% suhtelise õhuniiskuse korral hakkab betoonis olevates poorides tekkima niiskus ning see takistab süsinikdioksiidi (CO_2) sissetungi raudbetoonkonstruktsiooni (ACI 201 1992). Karboniseerumisega seotud terasarmatuuri korrosioon esineb sageli nendes konstruktsiooni osades, mis on otseselt avatud vihmaveele, mis on varjatud päiksevalguse eest ja kus armatuuri kaitsev betooni kaitsekiht on liiga õhuke (vt joonis 1.4). (PCA 2002)



Joonis 1.4. Karboniseerumisest põhjustatud terassarruse korrosioon (PCA 2002).

Kui karboniseerumise teel on raudbetoonkonstruktsioonis olev terasarmatuur hakanud korrodeeruma muutub see ebastabiilseks. Terassarruse korrosiooni tulemusena võib konstruktsioon muutuda mittekandvaks, mis omakorda võib põhjustada konstruktsiooni purunemise. (Ahmad 203)

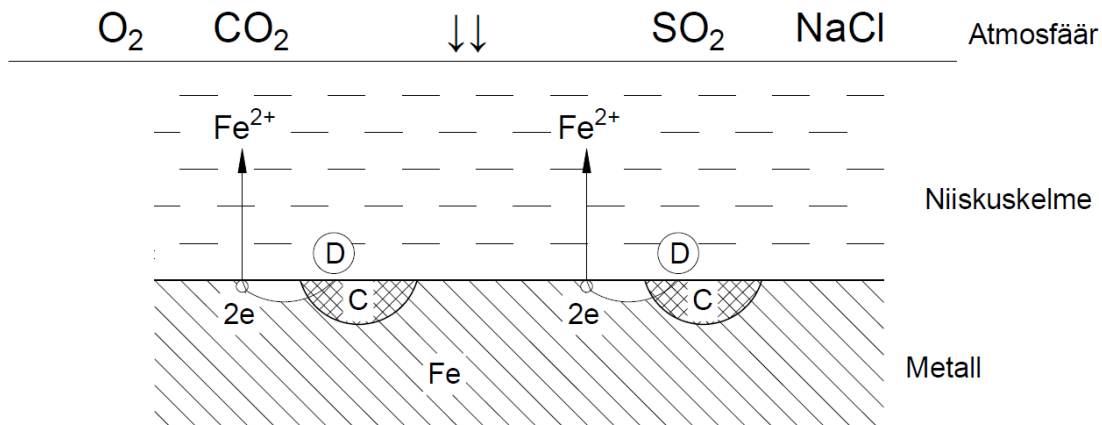
1.4 Elektrokeemiline korrosioon

Suurem osa (üle 80%) korrosioonikahjustustest on elektrokeemilise iseloomuga. Selle põhjuseks on terase termodünaamilise püsivuse puudumine meid ümbritsevas keskkonnas. Elektrokeemiline korrosioon leiab aset elektrolüütide lahuses. Peamiselt tekib elektrokeemiline korrosioon niiskes õhus. Elektrokeemilise korrosiooniga kaasneb alati elektrivoolu tekkimine. Peamised metalli liigid, mis elektrokeemilise korrosioonil käigus hävivad on erinevad raua sulamid, kuna need ei ole looduses puhtal kujul eksisteerivad materjalid (teras). (Ahmad 2003)

Korrosiooni tekkimiseks peavad omavahel kontaktis olema kaks metalli (või kaks ühenduskohta ühel metallil) erineva elektrilise potentsiaaliga. (Revie, Uhlig 2008)

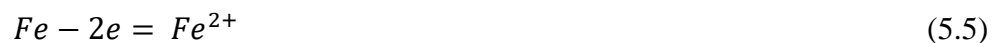
1.4.1 Teras korrosioon niiskes keskkonnas

Elektrokeemiline protsess leiab aset elektrolüütide lahuses ning seda põhjustavad elektrokeemilised reaktsioonid (anood- ja katoodprotsessid) terase ja elektrolüüdi kokkupuutepinnal. Teras korrosioon niiskes keskkonnas on elektrokeemiline protsess, kus terase põhikoostisosa raud on anoodiks ning katoodiks on korrosiooni galvaanielement rauast tekkinud positiivsema potentsiaaliga süsinik lahustatuna rauas, vaba grafiidina malmis või tsementiidina (Fe_3C) terases. Antud protsessi käigus on elektrolüüdiks terase pinnale kondenseerunud niiskuskelme koos lahustunud gaasidega (H_2O , SO_2 , CO_2 jt) ja sooladega (NaCl jt). Eelkõige toimub lahuses raua oksüdeerumine hapniku toimel ja lahusesse omakorda liiguvad raudioonid (Fe^{2+}) ning hapnikust (O^2) tekivad hüdroksiidid (vt. joonis 1.5). Nende tegurite koosmõjul käivitub elektrokeemiline protsess, mis hakkab paratamatult materjali lagundama. (Talimets 2004)



Joonis 1.5. Terase korrosiooni skeem niiskes keskkonnas (Talimets 2004).

Anoodialadel teras lahustub. Lahustumisel alles jäänud elektronid liiguvad edasi katoodialadele ning need seotakse elektrolüüdis leiduva katooddepolarisaatoriga. Rauda lahustumine anoodiprotsessi käigus toimub järgmiselt:



Katoodreaktsioon sõltub terase pealispinda katvast niiskuskihi pH tasemest.

Kui $pH > 7$, siis katoodil toimub reaktsioon:



Kui $pH = 7$, siis on katoodreaktsiooniks:



Sellisel juhul kui $pH = 0$, siis katoodreaktsioon on:



Kõikide nende reaktsioonide puhul saab öelda, et tegemist on niiskes õhus toimuva korrosiooniprotsessiga, kuna reaktsioonides osaleb hapnik (O_2). (Talimets 2004)

1.5 Keemiline korrosioon

Keemiline korrosioon leiab aset mitteelektrolüütsetes vedelikes (nafta, bensiin) ja kuivades gaasides (kaasaarvatud kuiv õhk), mis ei juhi elektrivoolu. Keemiline korrosioon on metalli vahetu ühinemine keskkonna oksüdeeriva komponendiga. Kõrgemate temperatuuride korral tekib metalli (terase) pinnale oksiidikiht, mis koosneb mitmest erinevast oksiidist. Moodustuv oksiidikiht on olemuselt poorne ja habras, mis sisaldab lõhesid ning on nõrgalt rauapinnaga seotud. Seetõttu jätkub metallide korrosiooniprotsess kuni metalli täieliku hävinemiseni. Antud juhul toimub metalli reageerimine otse keskkonna agressiivse komponendiga:



Raua keemiline reaktsioon toimub 570 °C korral. Kindlatel tingimustel toimub metallide oksüdeerumine metallurgilise töötuse käigus, kus gaaskorrosiooni tõttu võib materjali toodangu mass hävineda 3 - 5%. Erinevate metallide gaaskorrosioonile vastupidavust nimetatakse metalli kuumuspüsivuseks. Lisaks kuumuspüsivusele tuleb arvesse võtta ka metallide kuumustugevust ehk mehaanilist tugevust kõrgete temperatuuride korral. Erinevad sulamid on üldjuhul kuumuspüsivad, kuid kuumustugevad vaid temperatuuril alla 400 °C. (Talimets 2004)

1.6 Terasarmatuuri korrosiooni liigid

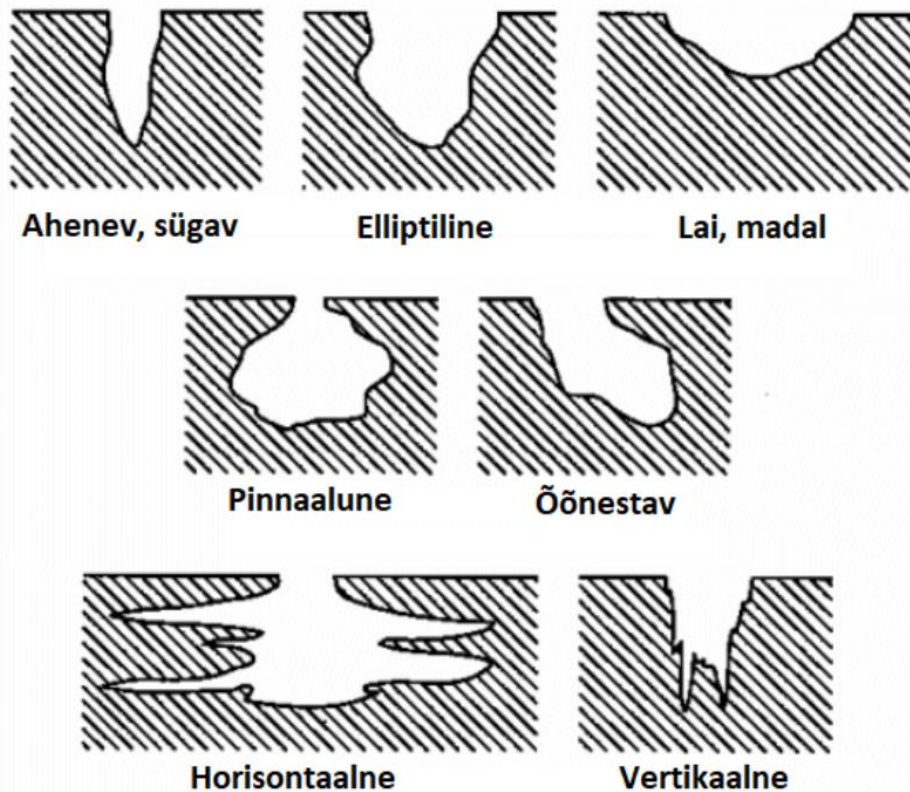
Terasarmatuur võib korrodeeruda mitmel erineval viisil, see sõltub sellest, milliste asjaolude tõttu armatuur on hakanud korrodeeruma. Teras võib korrodeeruda ühtlaselt ehk tegemist on lamekorrosiooniga või lokaalselt. Need on ka ühtlasi kaks kõige levinumat korrosiooni liiki. Lisaks võib kõrgtugevatel terastel esineda kristallidevahelist – ja sisemist korrosiooni. Terrassarrus võib korrodeeruda ka ilma hapniku juurdepääsuta, tekib „must rooste” ja bakteriaalsel mõjul. (Revie, Uhlig 2008)

1.6.1 Ühtlane korrosioon

Ühtlase korrosiooni korral korrodeerub metalli pealispind ühtlaselt kogu ulatuses. Metallide korrodeerumine toimub igas metallpinna punktis sama kiirusega. Metallide pinnal on katoodsed ja anoodsed piirkonnad, mis liiguvad teatud ajahetkede järel uude kohta. Pikema ajavahemiku möödudes on teatud pealispinna piirkond käitunud nii katoodi kui anoodina. Ühtlast korrosiooni ehk lamekorrosiooni on kerge avastada, mõõta ning kaitsta. Teras kaitsemisel on pikemalt peatunud eraldi peatükis (vt peatükk 3). (Siinor 2010)

1.6.2 Lokaalne korrosioon

Lokaalne ehk „*pitting*” korrosioon on lokaliseeritud korrosiooni vorm, mille käigus tekivad metalli pinnale õõnsused või „augud”. Lokaalse korrosiooni kahjustusi peetakse palju ohtlikumaks kui ühtlase korrosiooni kahjustusi, sest seda liiki korrosiooni on raskem tuvastada, ennetada ning terast selle eest kaitsta. Tihtipeale on tekkinud õõnsused kaetud korrosiooniprotsessi käigus tekkiva roostekihiga. Korrosioonist põhjustatud väikeste kitsaste õõnsuste tekkimine metallpinnale, mille puhul metallide materjalikadu on minimaalne, võib kaasa tuua kogu konstruktsiooni purunemise. Lokaalne korrosioon on peaaegu kõikide lokaliseeritud korrosiooni kollete peamiseks põhjuseks ning seda võib esineda mitmel erikujul (vt joonis 1.6). Lokaalse korrosiooni kahjustuste (õõnsuste) kuju saab tuvastada metallograafia abil, kus kahjustunud terasvarras lõigatakse kahjustuse koha pealt läbi (tekib ristlõige kahjustusest). Lähtuvalt ristlõikele on võimalik määrata õõnsuse kuju, suurus ja sügavus (ASTM G46 – 94 2013). (NACE International 2018)



Joonis 1.6. Lokaalse korrosiooni kollete erinevad tüübid (ASTM G46 – 94 2013).

Lokaalne korrosioon tekib üldjuhul lokaalse keemilise või mehaanilise kahjustuse puhul, kui passiivne kaitsekiht saab kannatada ning teras muutub korrosiooni tekitavatele teguritele avatuks. Raudbetoonkonstruktsioonides võib lokaalne terase korrosioon tekkida kui terasarmatuuri kaitsev betooni kaitsekiht ei ole piisavalt suur või kui betooni kaitsekihis tekib lokaalseid kahjustusi. Terasarmatuuri lokaalne korrosioon tekib eeldatavalt kohtades, kus raudbetoonkonstruktsioonis esinevad tsementkivi tühemikud või terasarmatuuri valmistamise käigus on jäänud terasvalus sulfidi taskud. Mõlemal olukorral on passiivse kaitsekihi kahjustamine lihtsam. Passiivkihi kahjustust põhjustavad kloriidioonide elektrokeemiliste potentsiaalide erinevus. Passiivkihi omaduste halvenemisega saavad korrosiooni tekitavad happed (vesinikkloriidhape, divesiniksulfiidhape) vormuda. Terasarmatuuri lahustumise protsessi algatuseks peavad raud ja vesi omavahel reageerima. (Broomfield 1997)

1.6.3 Pinnaalune korrosioon

Olukorras, kus anoodipiirkond ja katoodipiirkond on omavahel eraldatud ja õhu ligipääs raudbetoonkonstruktsiooni on madal, jääb rauaioon (Fe^{2+}) lahusesse. Keskkonnas, kus on kõrge vee küllastatuse tase ning hapniku (O^2) juurdepääs on madal või täielikult takistatud, võib see viia „musta rooste tekkimiseni”. Eeltoodud olukorra puhul terasarmatuuri kaitsev passiivne kaitsekiht võib hävineda. Selle protsessi tulemusena ei teki betoonis sisepingeid, betooni pealispinnale ei teki pragusid ning see muudab terasarmatuuri korrosiooni avastamise keerukaks. Antud olukord on konstruktsiooni püsivuse seisukohalt väga ohtlik. Selleks hetkeks kui korrosioon avastatakse, võib terassarrus olla tõsiselt kahjustunud. „Musta rooste” nimetus tuleneb musta või rohelise värvi vedeliku järgi, mis antud korrosiooni protsessi käigus tekib armatuuri pinnale. (Broomfield 1997)

1.6.4 Pingekorrosioon

Pingekorrosioon ehk kristallidevaheline (konstruktsioonisisene) korrosioon esineb kõrgtugevatel terastel (tõmbetugevus suurem kui 700 MPa) ja pingebetoonkonstruktsioonides. Antud korrosiooni liik on erinevatest korrosiooni liikidest kõige ohtlikum, kuna visuaalselt ei ole see märgatav ning materjali purunemise korral toimub see hrapalt, mis teeb probleemi olemuse keerukaks. Pingekorrosiooni mõjutab tõmbetugevuse ja korrosiivse keskkonna kombinatsioon (NACE 2018). Metallide pingekorrosioon esineb korrosioonialtis keskkonnas (vt tabel 1.1), kus materjal on tugeva pinge all. Tavaliselt esineb pingekorrosiooni protsessi korral kolm faasi:

1) pingekorrosiooni põhjustava keskkonna tekkimine, 2) pingekorrosiooni algus ja 3) pingekorrosiooni levik, kuni materjali purunemiseni. (Revie, Uhlig 2008)

Sõltuvalt metalli – keskkonna kombinatsioonist ja pingete tingimustest võib konstruktsiooni purunemise aeg varieeruda mõnest minutist kuni mitmete aastateni. Sellel põhjusel tuleks korrosiivsesse keskkonda paigutatud pingestatunud metalle (armatuuri) teatud ajahetkedel kontrollida, et kas terase pealispinda on tekkinud mõrasid ning vajadusel kasutada leevendatavaid protseduure, et ära hoida konstruktsioonide purunemist. Alltoodud tabelis (vt. tabel 1.1) on väljatoodud mõned rauasulamid ning keskkonnad, kus võib pingekorrosioon tekkida. (Revie, Uhlig 2008)

Tabel 1.1. Metallisulamite liigid ning keskkonnad, kus võib tekkida pingekorrosioon (Revie, Uhlig 2008)

Metallisulamite liik	Keskkond
Karastamata teras	NO ₃ ⁻ , OH ⁻
Kõrgtugevad terased	H ₂ O
Roostevabad terased, austeniit	Cl ⁻ , OH ⁻ , Br ⁻
α-messing	NH ₃ , amiinid (lämmastikuühendid)
Titaanisulamid (8% Al, 1 % Mo, 1 % V)	Cl ⁻ , Br ⁻ , I ⁻
Alumiiniumsulamid	H ₂ O, NaCl lahused
Tsirkooniumsulamid	Cl ⁻
Magneesiumsulamid	Cl ⁻
< 40 % Au-Cu	FeCl ₃ , kuninghape

Pingekorrosioonile on iseloomulik, et metalli tõmbepinge ja korrosiivne keskkond toimivad koos. Terasele kahjulikku mõju avaldavad anioonid ei ole otseselt seotud tavapäraste korrosiooni protsessidega. (Revie, Uhlig 2008)

1.6.5 Bakteriaalne korrosioon

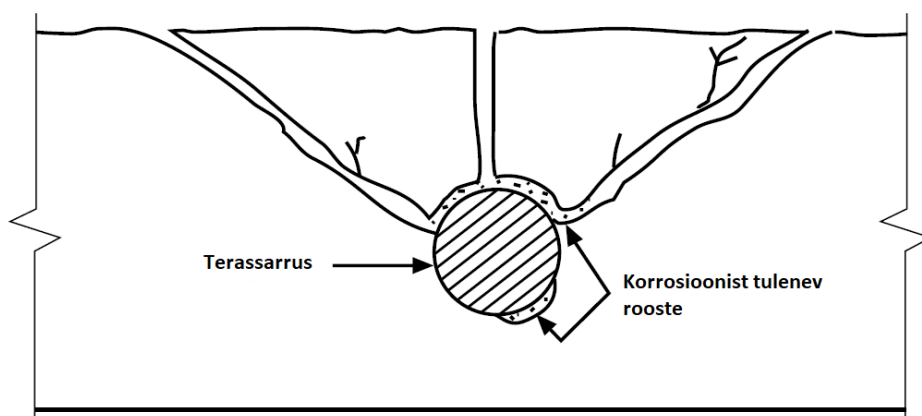
Mikroorganismid (bakterid, seened, vetikad jms.) tekitavad metallide või metallisulamite korrosiooni eritavate ainete toimel. Bakterite elutegevusest tekivad orgaanilised happed ja sulfo lipiidid võivad isegi kahjustada roostevabu terasmaterjale. Hallitusseened tekitavad erinevate metalsete materjalide pealispinnale sidrunhapet ja oblikhapet. Happed üldiselt omakorda põhjustavad elektrokeemilist ja keemilist korrosiooni. Bakterite ja seente kõige paremaks elukeskkonnaks on muld, pinnaveed, turvasmuld ning reoveed. Mikroorganismide poolt põhjustatud korrosiooni söövitav mõju metalsetele pindadele on eriti suur kui nende kontsentratsioon tõuseb väga kõrgele tasemele. Selline olukord võib tekkida kui mikroorganismid kasvatavad metallpinnale biokile ehk biofilmi. Biofilm sisaldab endas polümeere, mis takistavad ainete ja gaaside difusiooni pealispinna ja vesilahuse vahel. Biokile võimaldab ka kõrgelt struktureeritud mikroobsete kogukondade tekkimist metalli pealispinnale. Erinevate mikroobsete liikide koosmõjul tekivad metaboolsed aktivatsioonid, mis omakorda suurendavad korrosiivset toimet metalsetel pindadel. (Flemming, Geesey 1990: 155-156)

Bakteriaalse korrosiooni käigus muudab pinnasebakter (*thiobacilli*) väävli ja sulfiidid väävelhappeks. Selle happe ründav iseloom tekitab terase korrosiooni. Teine bakteriaalne liik, mis terases olevate sulfiididega (FeS) reageerib, on ferrobakter (*ferrobacilli*). Sageli on protsessiga kaasnevat lõhna võrreldud vesiniksulfaadi lõhnaga (halvaks läinud munad). Anaeroobses keskkonnas (hapnikuvaene) toimub selliste bakterite korrosioon lokaalse korrosioonina. (Broomfield 1997)

2 TERASSARRUSE KORROSIONIKAHJUSTUSED MATERJALI TASANDIL

2.1 Betoonkonstruktsioonide korrosioonikahjustused

Sellest hetkest kui korrosiooni protsess saab alguse, areneb see peaaegu ühtlase kiirusega. Korrosiooni protsessi tagajärjel hakkab konstruktsioonis toimuma mitmeid protsesse. Terasarmatuuri korrosiooni tagajärjel väheneb armatuurvarraste töötava ristlõike pindala, mis omakorda võib põhjustada terase tugevusomaduste muutuseid. Terasarmatuuri korrosiooni käigus armatuurvarraste ruumala suureneb. Tekkinud rooste ruumala on algsest terasarmatuuri omast kaks kuni neli korda suurem (CIP 25 1995) või isegi kuni kümme korda suurem (Broomfield 1997) ja korrosiooni produktid roostel puuduvad head mehaanilised omadused (CIP 25 1995). Armatuurvarraste ruumala suurenemise tulemusena võib kaasneeda betoonkonstruktsiooni pealispinna mõranemine, betooni ja terasesarruse omavahelise nakke muutus ning pealmiste betoonkihtide pudenemine. Kuna need protsessid võivad toimuda paralleelselt, siis lühendavad eelnimetatud protsessid otseselt raudbetoonkonstruktsiooni eluiga. Terasarmatuuri ruumala suurenemist ja sellest võimalikke tulenevaid kahjutusi illustreerib allolev joonis (joonis 2.1). (Ahmad 2003)



Joonis 2.1. Korrodeerumise tulemusena, tekivad betoonis tõmbepinged, mis võivad põhjustada betoonpinna mõranemise ning pudenemise (PCA 2002).

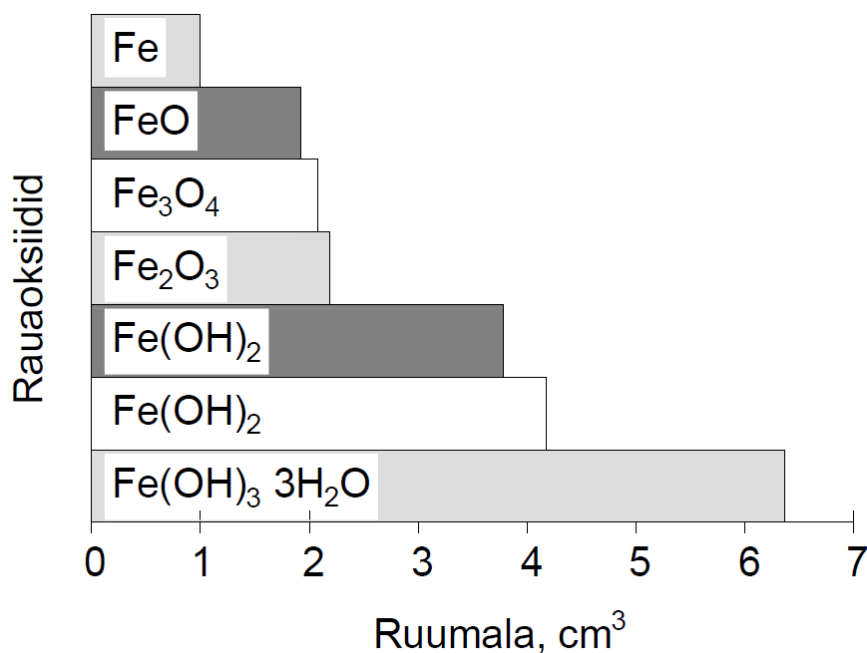
Korrosiooni kahjustavat mõju raudbetoonkonstruktsiooni kandevõimele (täpsemalt ribipaneelid) on käsitletud varasemalt koostatud Mihkel Kiviste magistritöös (Kiviste 2004).

2.2 Terassarruse korrosioonikahjustused

Korrosiooniprotsess põhjustab lohukeste või aukude tekkimist terasarmatuuri pinnale, mille tulemusena väheneb terassarruse töötav ristlõige, mis on ka ühtlasi üks tõsisemaid terasarmatuuri korrosiooni tagajärgi. Ristlõike vähenemisega muutuvad ka terasarmatuuri põhilised tugevusomadused madalamaks. (CIP 25 1995)

Kui korrosiooni tulemusena terasarmatuuri ristlõige väheneb ning konstruktsioon on koormuse all, siis pinged vähenenud ristlõikega terassarruses suurenevad. Armatuurraua diameetrit on võimalik mõõta purustava meetodiga, lüües armatuuri kaitsva betoonkihi maha. Mittepurustava meetodina saab armatuuri ristlõike vähenemist mõõta polarisatsiooni seadmetega. Seadmetega saab mõõta korrosioonivoolu.

Korrosiooni tekkega kaasneb korrosiooni produktidest terassarruse ruumala suurenemine. Erinevatel rauaoksiididel on omakorda erinev ruumala (vt joonis 2.2).



Joonis 2.2. Erinevad rauaoksiidid (korrosiooniproduktid) võrreldes raua ruumalaga (Nielsen 1985).

Terassarruse pealiskihile tekkinud rauaoksiidide ruumalast sõltuvad kahjustused raudbetoonkonstruktsioonides. Mida suurem on terasarmatuuri ruumala seda suuremad pinged konstruktsioonides tekivad, mis omakorda toovad kaasa betoonkonstruktsioonide pealispinnas tekkivaid pragusid ning pealiskihi pudenemist. (Nielsen 1985)

3 TERASSARRUSE KORROSIONI TEKKE ENNETAMINE

3.1 Terassarruse katmine

Üheks võimaluseks terasarmatuuri korrosiooni eest kaitsta on selle katmine. Protektor ehk galvaanilist tüüpi kaitsekatted on armatuurile kaitseks korrodeerumise eest. Teras katmine protektor katetega on efektiivne ka erinevate terase kahjustuste korral, kuna kate kaitseb terast edasise korrodeerumise eest. Terassarrust on võimalik katta väheaktiivsete metallidega, mis on madala korrosiooni intensiivsusega ning korrosiooni suhtes vastupidavamad (tina, kroom, väärismetallidest kuld ja nikkel). Eelnimetatud materjalide kasutamine kaitseb terast korrosiooni eest, väliskeskkonnas olevate kahjustavate tegurite eest nagu vesi (H_2O) ning hapnik (O_2). Teras on eelnimetatud oksüdeerivate materjalide eest kaitstud kuni kaitsekiht püsib tervena (kriimuvaba). Kaitsekatte kahjustuse korral algavad korrosiooniprotsessid ning teras hakkab hävima. Mittemetallsete kaitsekatetena kasutatakse epoksüüd tüüpi materjale. Nende materjalide alla kuuluvad erinevad värvid, lakid, plastik, kumm ja õlid. (Bentur jt 1997)

3.2 Roostevabast terasest betoonisarrusteras

Mõne teise metalli lisamisega on võimalik saavutada korrosioonikindlad sulamid. Kroomi lisamine raua sulamisse muudab terase roostevabaks. Et teras oleks korrosioonile vastupidav peab see sisaldama vähemalt 12% kroomi. Rauasulamisse lisatud kroom tekitab õhuga kokkupuutel terasarmatuuri pealispinnale õhukese oksiidikihi. (Bell 2016)

3.3 Inhibiitorid

Korrosiooni inhibiitorid ehk negatiivsed katalüsaatorid ehk ained, mis vähendavad ebasoovitavate reaktsioonide (korrosiooni) kiirust, takistades nende kulgemise kiirust. Inhibiitorid reageerivad metalli pinnal korrosiooni põhjustavate keskkonnagaasidega. Reageerimise käigus katkevad korrosiooni tekitavad keemilised reaktsioonid. Inhibiitorid võivad töötada adsorbeerides metalli pealispinnal, moodustades kaitsekihi. Neid kemikaale võib kasutada lahustena või kaitsva kihina dispersioonitehnikate abil. (Bell 2016)

Korrosiooniprotsessi aeglustamine inhibiitorite protsesside sõltub järgevatest teguritest:

- Anoodse või katoode polarisatsiooni iseloomuliku käitumise muutumine;
- Ioonide difusiooni vähenemine metalli pealispinnal;
- Elektritakistuse suurenemine metalli pealispinnal.

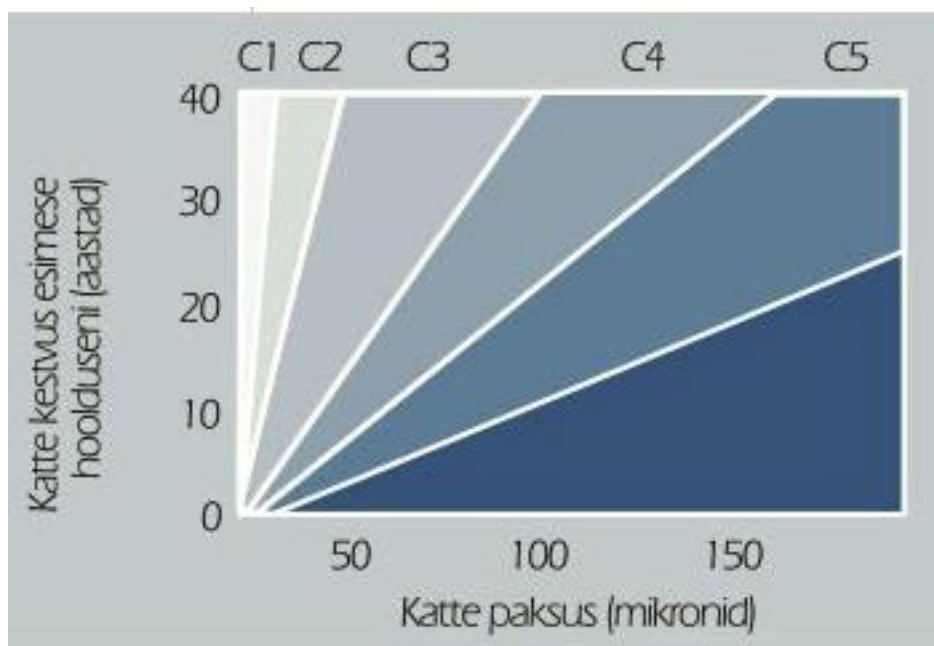
Põhilised tööstusharud, kus korrosiooni inhibiitoreid kasutatakse on nafta rafineerimine, nafta ja gaasi uurimiskeskustes, keemiatööstustes ja veepuhastusjaamades. Korrosioonivastaste inhibiitorite suureks eeliseks on see, et neid saab kasutada koha peal ootamatult tekkinud korrosioonikahjustuste vastu. (Bell 2016)

3.4 Galvaaniline terassarruse katmine

Galvaaniline terase katmine ehk terase tsinkimine on tuntud meetod terase vastupidavamaks muutmiseks. See tuntud meetod on olnud kasutusel juba alates 1930-ndatest. Teras galvaanilisel katmisel on mitmeid erinevaid tüüpe, kõige tuntum nendest on kuumtsinkimine. Lisavõimalustena kasutatakse veel pihustamise, difusiooni ja elektrilise sadestamise meetmeid. Kuumtsinkida on võimalik kõiki tavalise süsinik- ja valuteraseid, kus teras kastetakse kuuma (450°C) tsingivanni. Tsinkimise tulemused võivad olla väga erinevad, mis üldjuhul parandavad tsingi seotust terastootega, kuid samal ajal toimub ka oluline terase keemilise koostise muutus. (Revie, Uhlig 2008)

Enne terase tsinkimist peaks teadma, millistele keskkonnatingimustele teras peab vastama ja milline on soovituslik pinnakatte kestvus. Tsingikihi paksus sõltub terase valikust. Alloleval joonisel (vt joonis 3.1) on toodud tsinkkatte kestvus aastates, sõltuvalt ilmastiku-

või keskkonnatingimustest vastavalt standardile (EVS-EN ISO 14713-1:2017). Ilmastiku- või keskkonnatingimuste kohta on selgitused toodud allolevas tabelis (vt tabel 3.1).



Joonis 3.1. Tsinkkatte kestvus sõltuvalt katte paksusest ja väliskeskkonnast (EVS-EN ISO 14713-1:2017).

Tabel 3.1. Korrosioonikaitse määratavus sõltuvalt ilmastiku- või keskkonnatingimustest (EVS-EN ISO 14713-1:2017)

ISO 14713 Korrosiooni-kategooria	Tüüpiline väliskeskkond	Tsingi keskmine korrosiooniaste $\mu\text{m}/\text{aasta}$	ISO 14713 Korrosiivsuse kirjeldus
C1	Üksikud mägipiirkonnad, kuiv sisemaa	<0,1	Väga madal
C2	Kuiv/maa/linna, sisemaa – juhuslik kondensatsioon	0,1 – 0,7	Madal
C3	Rannikuäärsed kohad, kõrge niiskusega sisemaad	0,7 - 2	Keskmine
C4	Mereäärne (tuulevaikne), ujumisbasseinid	2 - 4	Kõrge
C5	Mereäärne (murdlainetus)/maatuul	4 - 8	Väga kõrge

Vastavalt keskkonnatingimustele vastavusele kuulub teras kindlasse korrosioonikategooriasse. Lähtuvalt ilmastiku- või keskkonnatingimustele tuleb määrata toote korrosioonikaitse nõuded ning anda hinnang pinnakatte vastupidavuse kohta. (EVS-EN ISO 14713-1:2017)

4 ERINEVATESSE KESKKONDADESSE PAIGUTATUD TERASSARRUSE TUGEVUSOMADUSTE UURIMINE

4.1 Katsekehade ettevalmistamine ning paigutamine keskkondadesse

4.1.1 Katsekehad ning keskkonnad

Käesolevas magistritöös viidi läbi 180 terasest armatuurvarda tõmbekatsed. Kasutati ribistatud betooni sarrusterast, mille terase mark on B500B, seega kuulub antud teras klassi B. Kasutatud betoonisarrusterase sertifikaat on esitatud lisa (lisa 1).

Terassarrusest katsekehad olid läbimõõduga 12 mm ja pikkusega 300 mm. Keskkondasid kuhu katsekehad paigutati oli kuus ning katsekehade arv igas keskkonnas oli 30 üksust.

Katsete eesmärk oli välja selgitada erinevatest keskkondadest tingitud kahjustavad mõjud (põhiliselt korrosioon) terassarruse tugevusomadustele.

Keskkonnad kuhu terassarrusvardad paigutati:

- 1) Tava- ehk sisekeskkond – katsekehad (KK-001 – KK-030) paigutati sisetingimustesse, kaitstuna terast kahjustavate tegurite eest;
- 2) Väliskeskkond – katsekehad (KK-031 – KK-060) paigutati ilmastikutingimustesse, antud magistritöö puhul olid talvised tingimused (temperatuurimuutsed, vihm, lumi, jää ja tuul);
- 3) Agressiivne keskkond – katsekehad (KK-061 – KK-090) paigutati silomahla sisse (maisisilo mahl), juurdepääs oli ka õhul ja niiskusel;
- 4) Osaliselt happeline keskkond – katsekehad (KK-091 – KK-120) paigutati osaliselt 33 protsendilisse vesinikkloriid- (HCl) ehk soolhappesse;
- 5) Happeline keskkond – katsekehad (KK-121 – KK-150) paigutati täielikult 33 protsendilisse vesinikkloriid- (HCl) ehk soolhappesse;
- 6) Aluseline keskkond – katsekehad (KK-151 - KK180) paigutati betoonkeha sisse ning seejärel asetati silosse.

Katsekehade paigutamiseks osaliselt happelisse ning täielikult happelisse keskkonda imiteeriti ja kiirendati lokaalse korrosiooni protsessi. Kuna käesoleva magistritöö katseperiood oli võrdlemise lühike (neli kuud), siis märgatavamate korrosioonikahjustuste esile toomiseks kasutati eelnimetatud lähenemist.

Kuna üheks keskkonnaks oli väliskeskkond, tuli pidada igapäevast ülevaadet ilmastikutingimuste kohta, mis on esitatud lisas (lisa 2). Ilmastiku kohta päeviku pidamine oli just oluline, kuna katseperiood oli talvistes tingimustes ning väliskeskkonnas olnud katsekehadele mõjusid, temperatuuri muutused, erinevad sademed, tuul jms.

Betoonkeha, kuhu olid paigutatud katsekehad (KK-151 - KK-180), asetati silosse, peale 28 päevast kivinemist. Kasutatud betooniklass oli C30/37 XF2+XC4+XA1. Kasutatud betooniklassi saateleht on esitatud lisas (lisa 3).

4.2 Terasarmatuuri tõmbekatse meetodika

Standardsed või mittestandardised katsekehad (teimikud) koormatakse purunemiseni. Jõu ja piknemise alusel koostatakse tõmbegraafik. Graafik viiakse üle pingesuhtelise piknemise skaalale (saadakse tõmbediagramm). (Fischer, et al. 2012: lk 189)

Tõmbekatse peamiseks eesmärgiks on terasest armatuurvarraste kolme põhilise tugevusomaduse – katkevenivuse, voolavuspääri ning tõmbetugevuse väljaselgitamine. Katsekehad olid paigutatud kuute erinevasse keskkonda. Igasse keskkonda paigutati 30 armatuurvarrast. Katsekehad olid pikkusega 300 mm ning läbimõõduga 12 mm ja otsad lõigatud 90° nurga all.

4.2.1 Universaalne katsemasin P-20

Erinevatesse keskkondadesse paigutatud armatuurvarraste tõmbekatsete läbiviimisel kasutati universaalset katsemasinat P-20 (toodetud 1985. aastal, *Armavir* tehases) ning pakke, mis armatuurvardaid kinni hoidsid. Seadmega oli võimalik läbi viia armatuuri tõmbekatse (vt joonis 4.1). Katseseadmepool on võimalik valida kolme erineva skaalapiirkonna vahel. Piirkonnad jagunesid järgmiselt: kuni 40 kN (skaala jaotisega 0,08 kN), kuni 100 kN

(skaala jaotisega 0,2 kN) ja kuni 200 kN (skaala jaotisega 0,4 kN). Käesolevas töös kasutati armatuurvarraste tõmbekatse puhul piirkorda kuni 100 kN (skaala jaotisega 0,2 kN).



Joonis 4.1. Universaalne katsemasin P-20 (Autori foto 2018).

Kasutatud katseseade oli ühendatud lauarvutiga, millega oli võimalik jäädvustada graafik, mille vertikaalteljel asetses jõud (ühik kN, skaala jaotisega 0,2 kN) ja horisontaalteljel nihe ehk deformatsioon (ühik mm, skaala jaotisega 1 mm).

4.2.2 Katsekehade massi ja pikkuse määramine

Erinevatest keskkondadest võetud katsekehadel määrati eelnevalt mass ning pikkus. Seejärel katsekehad puhastati korrosioonist tekkinud roostest ja jäätmetest ning määrati teistkordselt mass. Armatuurvarraste massi määramiseks kasutati elektroonilist kaalu KERN 572. Antud seadme täpsus oli 0,1 g ning maksimaalne raskus, mida antud seadmega kaaluda sai oli 12100 g.

4.2.3 Läbimõõdu määramine

Katsekehade diameetri mõõtmisel oli aluseks Eesti standard (EVS-EN ISO 6892-1:2016), mille põhjal kujundati sobiv meetodika katsete läbiviimiseks. Armatuurvarraste diameetri mõõtmiseks kasutati digitaalset nihikut, mille täpsus oli 0,01 mm. Nihikuga mõõtmisel pidi arvestama sellega, et haarad mahuksid armatuuri tihedama profiili vahele. Enne armatuurvarraste läbimõõdu määramist puhastati katsekehad täielikult betoonist, roostest ning erinevatest jääkidest (vt. lisa 9), mis olid erinevates keskkondades korrosiooni käigus tekkinud. Antud katsekehade puhul kasutati puhastamiseks ketaslõikuri otsa paigaldatud traatharja, kuid võib kasutada ka muidu abistavaid vahendeid (nt. mehaanilisi, keemilisi jne.). Katsekehade diameeter mõõdeti kolmest erinevast kohast (läbimõõduks võeti kõigi mõõtmistulemuste keskmine). Mõõtmised toimusid mitmes suunas ja määrati keskmine, sest korrodeerumise käigus ei jää ristlõige tavaliselt täpselt ringikujuliseks. Läbimõõdu määramisel tuli olla väga hoolas ja täpne, kuna saadud tulemust kasutatakse voolavuspiiri ning tõmbetugevuse määramisel. Katsekehade keskmise läbimõõdu järgi arvutatakse algristlõike pindala kasutades valemit 4.1.

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (4.1)$$

kus S_0 – algristlõike pindala mm²;
 d – keskmine läbimõõt kogu katsekeha ulatuses mm.



Joonis 4.2. Elektrooniline nihik MAHR 16ER, ühendatud PC-seadmega (Autori foto 2018).

Installides sülearvutisse elektroonilise nihiku tarkvara oli võimalik nihik USB kaabli abil ühendada sülearvutiga. Alg- ja lõppmõõtepikkuste määramisel pärast nihiku teravate haarade asetamisel kärnidesse, vajutades seadmel olevale nupule, saadeti loeteluna pikkuse arvvaartus otse sülearvutis programmi MS Excel (vt. joonis 4.2).

4.2.4 Tõmbetugevuse määramine

Tõmbekatse käigus tuli armatuurvardad koormata purunemiseni ning määrata maksimaalne tõmbejõud (ühik N), mida antud katsekeha suutis vastu võtta. Maksimaalne tõmbejõud ei olnud antud katsete puhul purustavaks jõuks. Tõmbetugevuse ehk tõmbepingi määramiseks tuleb tõmbeteimi käigus fikseeritud maksimaalne tõmbejõud jagada algristlõike pindalaga, sisuliselt on tegemist maksimaaljõule vastava pingega. Magistritöös võeti tõmbetugevuse arvutamise aluseks valem Mehhanotehnika ja metallide käsiraamatust, mis tugineb Eesti Standardile (EVS-EN ISO 6892-1-2016):

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0}, \quad (4.2)$$

kus R_m – tõmbetugevus $\frac{N}{mm^2} = MPa$;
 F_{max} – maksimaalne tõmbejõud N;
 S_0 – katsekeha algristlõikepindala mm^2 .

4.2.5 Tingliku voolavuspiiri määramine

Antud magistritöös läbiviidud tõmbekatsetes fikseeriti lisaks maksimaalsele tõmbejõule skaalal jõud, mille juures katsekeha hakkas voolama. Kasutatud katseseadme puhul oli seda küllaltki keerukas määrata, kuna mõningatel katsekehadel algas voolamine vaevumärgatava graafiku suunamuutusega. Kuni terase voolamiseni suureneb jõud ja deformatsioon (nihe) enam-vähem lineaarselt (graafikul ühtlane sirgjooneline liikumine). Graafik on küll vähesel määral hambuline, kuid see tuleneb katseseadme ebastabiilsusest. Kui teras hakkab voolama, siis nihe suureneb. Seejuures jääb jõud samaks või suureneb vähesel määral ja aeglaselt. Kui näidiku liikumine mõõteskaalal aeglustub või jääb hetkeks seisma tuli näit skaalal fikseerida. Tingliku voolavuspiiri saavutamise kinnituseks tuli arvutiekraanil ka jälgida graafiku joone käänakut. Voolavuspiiri arvvaartuse määramiseks tuleb omavahel jagada fikseeritud jõud skaalal algristlõike pindalaga, kuna terasvarraste voolamise algus on seotud vähima ristlõike pindalaga (EVS-EN ISO 6892-1:2016: lk16):

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \quad (4.3)$$

kus R_e – voolavuspiir $\frac{N}{mm^2} = MPa$;
 F_e – voolavuspiirile vastav tõmbejõud N;
 S_0 – katsekeha algristlõikepindala mm^2 .

4.2.6 Katkevenivuse määramine

Katkevenivuse leidmiseks märgiti enne katsetamist terasvarrastele algmõõtepikkused (L_0). Terasvardad jaotatakse mõtteliselt kolmeks erinevaks tsooniks (alumine-, keskmine- ja ülemine tsoon), olenevalt katsekeha asendist tõmbekatse ajal). Katsekehale märgiti kaks erinevat algmõõtepikkust (keskmine- ja servmine tsoon). Mitme algmõõtepikkuse märkimine tulenes sellest, et tõmbekatse käigus toimus katsekehade purunemine eri tsoonides. Algmõõtepikkused tähistati katsekehadele väikeste kärnidega, mis mõõdeti elektroonilise nihikuga individuaalselt iga varda puhul. Algmõõtepikkuse märkimisel võeti arvesse tingimust, kus algmõõtepikkus on seotud algristlõikepindalaga (EVS-EN ISO 6892-1:2016: lk45).

$$L_0 = k\sqrt{S_0}, \quad (4.4)$$

kus L_0 – algmõõtepikkus mm;

k – konstant 5,65;

S_0 – algristlõikepindala.

Jääkpikenemise määramiseks tuli katsekeha pooled hoolikalt omavahel uuesti kokku panna nii, et nende telg asuks ühel sirgel. Erilist tähelepanu tuli pöörata sellele, et katsekeha mõlemad pooled oleksid lõppmõõtepikkuse määramisel korrektselt koos. Lõppmõõtepikkus määrati elektroonilise nihikuga, mille mõõtetäpsus oli 0,01 mm. Lõppmõõtepikkuse ja algmõõtepikkuse vahe ($L_u - L_0$) tulemusena saadakse jääkpikenemine. Saadud väärtus kajastus 0,01 millimeetrise täpsusega. Saadud arväärtus jagatakse omakorda suurusega L_0 , millest järeldub katkevenivus protsentides. Saadud tulemused ümardati lähima 0,25 protsendini. (EVS-EN ISO 6892-1:2016: lk18).

Lähtuvalt katsekeha purunemise asukohast on katkevenivuse määramiseks Eesti Vabariigi standardis (EVS-EN ISO 6892-1:2016) välja toodud mitmeid meetodeid. Tuginedes EVS-ile kujundati mittestandardsete terassarrus varraste katkevenivuse määramiseks metoodika vastavalt antud magistritöö iseloomule, mis on esitatud lisas (lisa 4).

Läbiviidud katse meetodi kirjeldus:

1. Eeltööd – katsekehade valmistamine ja algandmete kogumine:
 - 1.1. Katsekehade valmistamine;
 - 1.2. Katsekehade asetamine kuute erinevasse keskkonda;
 - 1.3. Ilmastikutingimuste kohta päeviku koostamine.
2. Katsekehade eemaldamine keskkondadest:
 - 2.1. Katsekehad eemaldamine erinevatest keskkondadest, pärast nelja kuu möödumist;
 - 2.2. Katsekehade kaalumine enne puhastamist;
 - 2.3. Paralleelselt kaalumiseга määratakse katsekehade kogupikkus;
 - 2.4. Katsekehade puhastamine ketaslõikuri otsa paigaldatava traatharjaga;
 - 2.5. Katsekehade kaalumine pärast puhastamist;
 - 2.6. Katsekehade diameetri määramine;
 - 2.7. Katsekehade nummerdamine;
 - 2.8. Algmõõtepikkuste märkimine katsekehadele väikeste kärnidega (kolmnurk viiliga).
3. Tõmbeteim:
 - 3.1. Katsekeha paigutatakse pakkide vahele ning seejärel pakid suletakse;
 - 3.2. Viiakse läbi tõmbekatse;
 - 3.3. Määratakse lõppmõõtepikkus.

Tõmbekatse toimus seeriatega (keskkondade) kaupa. Tõmbekatse käigus ja pärast tõmbekatse läbiviimist koguti kõik vajalikud andmed edasiseks tulemuste analüüsiks ning järelduste tegemiseks. Pärast katsetamist ja vajalike andmete kogumist viiakse läbi katseülene analüüs saadud tulemustest.



Joonis 4.3. Katsekehade hoiustamine karpides pärast tõmbekatsete läbiviimist ja mõõtmisandmete kogumist (Autori foto 2018).

Pärast tõmbekatsete läbiviimist ja vajalike andmete kogumist asetati kõik katsekehad keskkondade kaupa hoiustus karpidesse ning paigutati arhiivi (vt joonis 4.3).

5 KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

5.1 Tõmbekatsete tulemused ja analüüs

Erinevate keskkondade poolt põhjustatud korrosiooni mõju terassarruse põhilistele tugevusomadustele hinnati tõmbetugevuse, katkevenivuse ning tingliku voolavuspiir põhjal.

Katsete käiku kuulus kuus erinevat seeriat:

- 1) seeria 1 – tava- ehk sisekeskkonda kuuluvad katsekehad (KK-001 – KK-030);
- 2) seeria 2 – välikeskkonda kuuluvad katsekehad (KK-031 – KK-060);
- 3) seeria 3 – agressiivsesse keskkonda kuuluvad katsekehad (KK-061 – KK-090);
- 4) seeria 4 – osaliselt happelisse keskkonda kuuluvad katsekehad (KK-091 – KK-120);
- 5) seeria 5 – happelisse keskkonda kuuluvad katsekehad (KK-121 – KK-150);
- 6) seeria 6 – leeliselisse keskkonda kuuluvad katsekehad (KK-151 – KK-180).

Terassarruse tugevusomaduste kahjustava korrosiooni mõju väljaselgitamisel võeti kõikide katsetulemuste võrdluse aluseks esimese seeria (korrosiooni eest kaitstud) terasvarraste katsetulemused.

Katsetamisel olnud armatuurvardad on vastavalt terassarruse sertifikaadile (lisa 1) külmalvaltsitud ribilise profiiliga terasarmatuur tugevusklassiga B500B. Vastavalt standardile (EVS-EN 10080:2006) on B500B tugevusklassi kuuluva armatuuriterase normtugevus (fyk) 500 MPa (N/mm²) ja arvutustugevus (fyd) 435 MPa (N/mm²). Arvutustugevuse varuteguriks on arvestatud $\gamma_s = 1,15$. Sertifikaadi kohaselt on katsetamisel olnud armatuurvarraste katseline tõmbetugevus 653 MPa, voolavuspiir 554 MPa ning katkevenivus maksimaalse koormuse korral 12,2 %. Antud magistritöös saadud tulemuste kohta saadud andmed on välja toodud allolevates järeldustes ja katsetamise käigus saadud andmete põhjal koostatud tõmbegraafikud on esitatud lisa (vt. lisa 7).

Vastavalt kõikidele katsetulemustele esines maksimaalne tõmbetugevus esimesse seeriasse kuulunud katsekehal, milleks oli 792,96 MPa, mis on ümardatult 1,6 korda suurem kui normatiivne tõmbetugevus ning 1,2 korda suurem kui sertifikaadis märgitud katseline

tõmbetugevus. Minimaalne tõmbetugevus 716,27 MPa oli neljandas seerias ning keskmiseks tõmbetulemuseks saadi tõmbekatsete käigus 755,78 MPa (vt tabel 5.1).

Katsetulemustest võib järeldada, et armatuurterast tootev ettevõtte teeb igast tehasepartiist mõned proovikatsed. Vastavalt tulemustele otsustakse, kas toodang vastab nõuetele ja kas terrassarrus antakse kasutusse või mitte. Kuna armatuuri normatiivne tugevus peab olema tagatud 0,95 % tõenäosusega, siis arvestatakse tootmise käigus teatava varuteguriga. Tõmbekatsede tulemusi analüüsides, ei saa neid normatiivse tõmbetugevuse võrreldes teha järeldusi, et korrosiooni põhjustavate protsesside käigus tõmbetugevus suureneb.

Tingliku voolavuspiiri kogu katseseeriade maksimaalne väärtus 682,06 MPa esines kuuenda seeria katsekehal. Minimaalne tinglik voolavuspiir 594,35 esines neljanda katseseeria katsekehal ning kõigi kuue katseseeriade keskmine tingliku voolavuspiiri tulemus oli 638,02 MPa (vt tabel 5.1).

Katsetulemuste põhjal selgus, et kõikide katseseeriade maksimaalne katkevenivus 26,78 % esines just esimesse seeriasse kuulunud katsekehal. Minimaalne katkevenivus 12,69 % esines viiendas seerias ning seeriade keskmine katkevenivus oli 18,73 % (vt. tabel 5.1).

Tabel 5.1. Kuue katseseeria tugevusnäitajate maksimaalsed, minimaalsed ning keskmised tulemused

	Tõmbetugevus (MPa)	Tinglik voolavuspiir (MPa)	Katkevenivus (%)
Seeria 1 Tava- ehk sisekeskkond			
Maksimaalne	792,96	675,66	26,78
Minimaalne	724,00	612,76	15,75
Keskmine	765,86	636,39	20,47
Seeria 2 Väliskeskkond			
Maksimaalne	783,28	674,66	25,68
Minimaalne	748,24	633,64	14,84
Keskmine	762,89	652,26	19,72
Seeria 3 Agressiivne keskkond			
Maksimaalne	781,90	672,47	23,74
Minimaalne	725,11	611,54	14,60
Keskmine	756,81	645,73	18,44
Seeria 4 Osaliselt happeline keskkond			
Maksimaalne	764,70	651,11	20,54
Minimaalne	716,27	594,35	12,69
Keskmine	741,03	619,79	14,87

	Tõmbetugevus (MPa)	Tinglik voolavuspiir (Mpa)	Katkevenivus (%)
Seeria 5 Happeline keskkond			
Maksimaalne	772,57	672,26	23,55
Minimaalne	722,64	598,95	12,81
Keskmine	743,01	624,16	17,66
Seeria 6 Leeliseline keskkond			
Maksimaalne	787,06	682,06	24,67
Minimaalne	753,30	631,06	15,00
Keskmine	765,10	649,77	18,99
Kõikide katseseeriade maksimaalsed, minimaalsed ning keskmised tulemused			
Maksimaalne	792,96	682,06	26,78
Minimaalne	716,27	594,35	12,69
Keskmine	755,78	638,02	18,73

Esimese katseseeria maksimaalne tõmbetugevus esines katsekehal nr. KK-010, mille suuruseks oli 792,96 MPa ning mis oli ühtlasi ka kõige suurema tõmbetugevusega armatuurvarras kõikide katsekehade hulgast. Minimaalne tõmbetugevus 724,00 MPa esines katsekehal nr. KK-012. Vastavalt 95% usaldusintervallile on esimese seeria katsekehade keskmine tõmbetugevus $765,86 \pm 5,84$ MPa.

Esimese katseseeria armatuurvarraste purunemispilt oli üpriski korrapäratu. Kolmekümnest katsekehadest 11 purunes pakkide lähedalt. 14 katsekeha purunes keskmises mõõteskaala tsoonis ja 5 armatuurvarrast äärmises mõõteskaala tsoonis (vt joonis 5.1).



Joonis 5.1. Esimese katseseeria terasvarraste purunemine (Autori foto 2018).

Teise katseseeria maksimaalne tõmbetugevus oli 783,28 MPa, mis esines katsekehal nr. KK-059. Minimaalne tõmbetugevus esines katsekehal nr. KK-045, mille tõmbetugevuse väärtuseks oli 748,24 MPa. Vastavalt 95% usaldusintervallile on teise seeria katsekehade keskmine tõmbetugevus $762,89 \pm 3,52$ MPa. Teise seeria katsekehade keskmine tõmbetugevus on 0,39% madalam kui võrdluse aluseks olnud esimese seeria armatuurvarrastel. Katsetulemustest võib järeldada, et korrosiooni mõju ilmastikuoludes olnud armatuurvarraste tõmbetugevusele ei ole katseperioodi jooksul olnud märgatav.

Teise katseseeria armatuurvarraste purunemispilt oli erinevalt esimese seeria purunemisele üpris korrapärase. Kolmekümnest katsekehast purunes ainult 4 pakkide lähedalt, 18 katsekehas purunes keskmises mõõteskaala tsoonis ja 8 armatuurvarrast äärmises mõõteskaala piirkonnas (vt joonis 5.2).



Joonis 5.2. Teise katseseeria terasvarraste purunemine (Autori foto 2018).

Kolmanda katseseeria maksimaalne tõmbetugevus esines katsekehal nr. KK-061, mille suuruseks oli 781,90 MPa. Minimaalne tõmbetugevus oli 725,11 MPa, mis esines katsekehal nr. KK-064. Vastavalt 95% usaldusintervallile on kolmanda seeria katsekehade keskmine tõmbetugevus $756,81 \pm 5,10$ MPa. Kolmanda seeria katsekehade keskmine tõmbetugevus on 1,18 % madalam kui võrdluse aluseks olnud esimese seeria armatuurvarrastel. Katsetulemustest võib järeldada, et korrosiooni mõju terasvarraste tõmbetugevusele agressiivses keskkonnas (silomahlas) on olnud suurema kahjustav toimega, kui ilmastikutingimuste käes olnud katsekehadel.

Kolmandas katseseerias ei olnud ühtegi armatuurvarrast mis oleks purunenud väljaspool mõõteskaalat (vt joonis 5.3). Kolmekümnest katsekehast 23 purunes keskmises mõõteskaala tsoonis ja 7 armatuurvarrast äärmises mõõteskaala piirkonnas.



Joonis 5.3. Kolmanda katseseeria terasvarraste purunemine (Autori foto 2018).

Neljanda katseseeria maksimaalseks tõmbetugevuseks oli 764,70 MPa, mis esines katsekehal nr. KK-106. Minimaalse tõmbetugevuse suuruseks oli 716,27 MPa, mis esines katsekehal nr. KK-096. Vastavalt 95% usaldusintervallile on neljanda seeria katsekehade keskmine tõmbetugevus $741,03 \pm 4,06$ MPa. Neljanda katseseeria katsekehade keskmine tõmbetugevus on 3,24 % madalam kui võrdluse aluseks olnud esimese seeria armatuurvarrastel. Selle seeria keskmine tõmbetugevus oli võrreldes teiste katseseeriatega kõige madalam. Katsetulemustest võib järeldada, et osaliselt happelises keskkonnas (soolhappes) olnud armatuurvarraste tõmbetugevus on katseperioodi jooksul märgatavalt langenud.

Neljanda katseseeria kolmekümnest armatuurvardast 2/3 purunes mõõteskaalalt väljaspool ehk vardaid kinni hoidnud pakkide lähedalt. Keskmises mõõtetsoonis ei purunenud ükski terasvarras ning 10 armatuurvarrast purunes äärmises mõõteskaala piirkonnas. (vt joonis 5.4). Antud olukord võib sõltuda katsetingimustest, sest katsekehad olid poolenisti soolhappes ja pool terasvardast oli väljaspool hapet. Katsekehade läbimõõdu määramisel täheldati asjaolu. Osa, mis oli olnud happes, selle läbimõõd oli tunduvalt väiksem, kui osal, mis ulatus happest välja. Suure tõenäosusega toimus purunemine pooles, mis oli soolhappes.



Joonis 5.4. Neljanda katseseeria terasvarraste purunemine (Autori foto 2018).

Viienda katseseeria maksimaalne tõmbetugevus esines katsekehal nr. KK-125, mille suuruseks oli 772,57 MPa. Minimaalne katseseeria tõmbetugevus oli 722,64 MPa, mis esines katsekehal nr. KK-122. Lähtuvalt 95% usaldusintervallile on viienda seeria katsekehade keskmine tõmbetugevus $743,01 \pm 4,61$ MPa. Viienda katseseeria katsekehade keskmine tõmbetugevus on 2,98 % madalam kui võrdluse aluseks olnud esimese seeria armatuurvarrastel. Katsetulemustest võib järeldada, et osaliselt happelises keskkonnas ning täielikult happelises (soolhappes) olnud armatuurvarraste tõmbetugevus on katseperioodi jooksul märgatavalt langenud.

Viienda katseseeria kolmekümnest armatuurvardast pooled ehk 15 tükki purunes mõõteskaalalt väljaspool ehk vardaid kinni hoidnud pakkide lähedalt. Keskmises mõõtetsoonis purunes 4 terasvarrast ja 11 armatuurvarrast äärmises mõõteskaala piirkonnas. (vt joonis 5.5) Antud seeria puhul olid terasvardad täielikult soolhappes.



Joonis 5.5. Viienda katseseeria terasvarraste purunemine (Autori foto 2018).

Kuuenda katseseeria katseandmete põhjal esines maksimaalne tõmbetugevus katsekehal nr. KK-158, mille suuruseks oli 787,06 MPa. Minimaalne katseseeria tõmbetugevus 753,30 MPa esines katsekehal nr. KK-178. Vastavalt 95% usaldusintervallile on kuuenda seeria katsekehade keskmine tõmbetugevus $765,10 \pm 4,08$ MPa. Kuuenda katseseeria katsekehade keskmine tõmbetugevus on 0,1 % madalam kui võrdluse aluseks olnud esimese seeria armatuurvarrastel. Katsetulemuste põhjal saab järeldada, et leeliselises keskkonnas olnud armatuurvarraste tõmbetugevus ei ole muutnud. Kuna käesoleva magistritöö katseperiood oli võrdlemisi lühikene, siis silomahl ei jõudnud antud perioodi vältel tungida läbi betoonkeha kaitsekihi terassarruseni. Kuna terast kahjustavad ained ei jõudnud terasesarruseni, ei tekkinud olukorda, kus terasarmatuur oleks saanud hakata roostetama (vt joonis 5.6). Samuti võib eeldada, et eelnevas peatükis (vt peatükk 1) kirjeldatud betoonis tekkiv terasarmatuuri kaitsev passiivne kiht on terast kaitsnud.



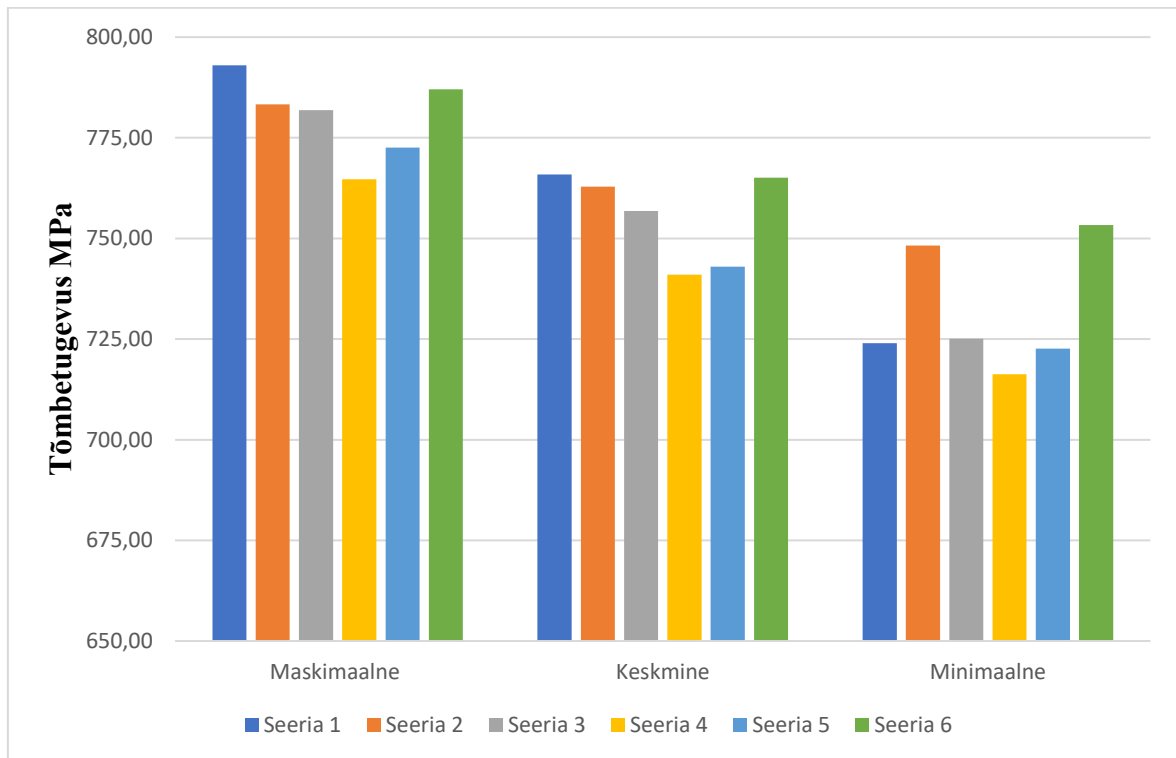
Joonis 5.6. Betoonkehas ja silos olnud katsekehade eemaldamine (Autori foto 2018).

Kuuenda katseseeria kolmekümnest armatuurvardast kõigest 3 tükki purunesid mõõteskaalast väljaspool ehk vardaid kinni hoidnud pakkide lähedalt. Keskmises mõõtetsoonis purunes 7 terasvarrast ja 20 armatuurvarrast äärmises mõõteskaala piirkonnas. (vt joonis 5.7) Antud seeria puhul olid terasvardad betoonkeha sees, leeliselises keskkonnas.



Joonis 5.7. Kuuenda katseseeria terasvarraste purunemine (Autori foto 2018).

Kõikide kuue katseseeriate keskmised tulemused on kujutatud tulpdiaagrammina alloleval joonisel (vt. joonis 5.8).



Joonis 5.8. Kuue katseseeriade tõmbetugevuse maksimaalsed, keskmised ning minimaalsed tulemused.

Katsete tulemusena saab järeldada, et erinevad keskkonnad mõjutavad terasarmatuuri korrodeeruvuse ulatust ja kiirust, mis väljendub otseselt tõmbetugevuses.

Kõige suurema tõmbetugevusega oli esimene katseseeria, mis oli ka eeldatav, kuna katsekehad olid kaitstud korrosiooni põhjustavate mõjutuste eest ja algsed tugevusomadused olid säilinud.

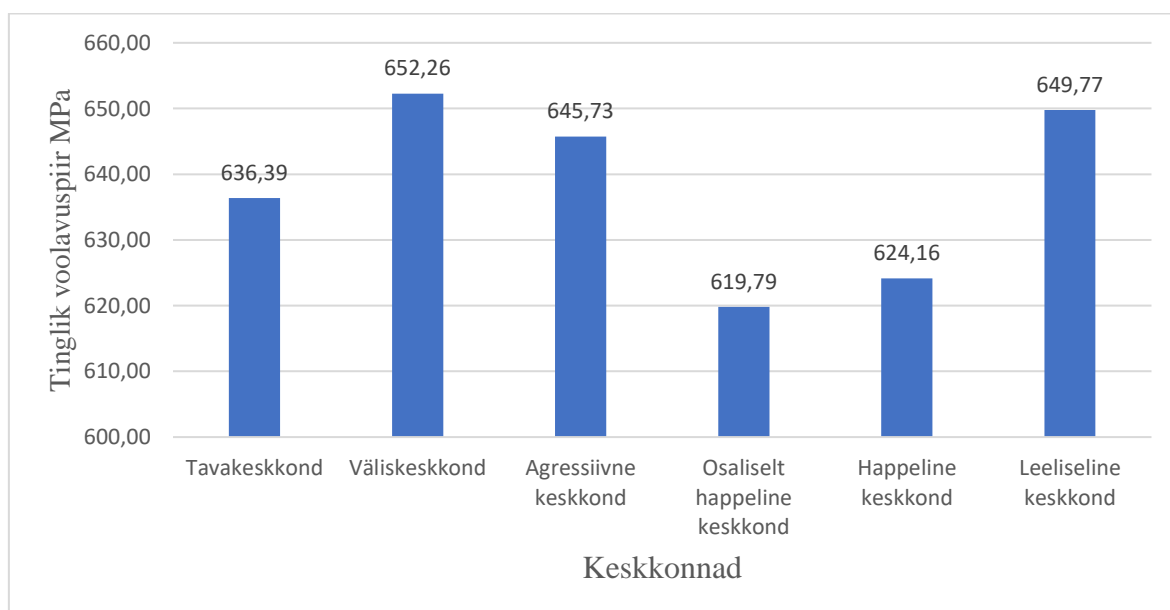
Väliskeskkonnas olnud katsekehade tõmbetugevus oli võrreldes esimese katseseeriaga vähenenud üpriski vähe. Et saada konkreetsemaid ja täpsemaid tulemusi väliskeskkonnast tingitud korrosiooni mõjule ning kiirusele peaks katseperiood olema tunduvalt pikem.

Kolmanda katseseeria katsekehad, mis olid agressiivses keskkonnas (silomahlas) ja samal ajal avatud õhule oli tõmbetugevuse vähenemine juba märgatavam. Kuigi antud katseperiood oli võrdlemisi lühikene, oli korrosiooni poolt tekitatud kahjustused eristatavad. (vt. tabel 5.1)

Nii osaliselt kui ka täielikult happes olnud katsekehade tõmbetugevus võrreldes teiste keskkondadega oli kõige madalam. Kõige madalamad tulemused tõmbetugevuse seisukohalt andsid neljanda katseseeria katsekehad (osaliselt soolhappes), mis on üllatav, kuna katsekehad olid osaliselt soolhappes. Antud asjaolu võib olla tingitud sellest, et lisaks soolhappetele oli katsekehadele ligipääs ka õhuniiskusel.

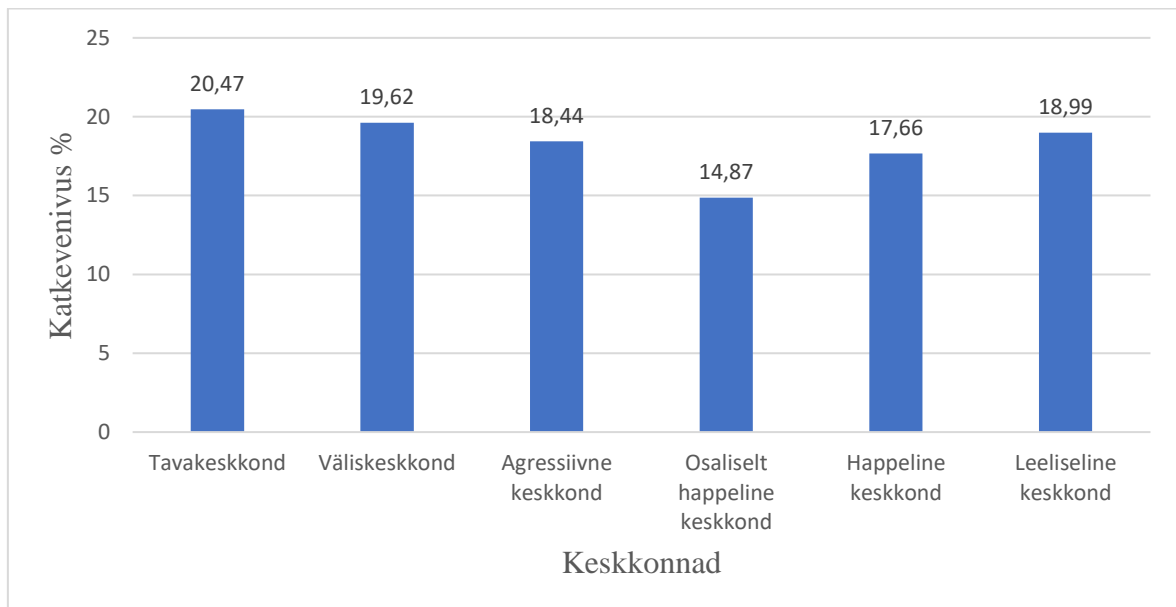
Leeliselises keskkonnas olnud katsekehadele tõmbetugevuse vähenemise erinevust märgata ei olnud. Kuuenda katseseeria katsekehad olid eelnevalt valatud betoonkehasse ja seejärel paigaldatud silosse. Antud katseperioodil ei jõudnud silomahla sisaldavad keemilised ained läbi betooni terassarruseni tungida ning betoon kaitses terasarmatuuri täielikult korrodeerumise eest.

Katsetamise käigus saadud katseseeriade tingliku voolavuspiiri tulemuste keskmised olid väga laialivalguvad (vt. joonis 5.9) ning keskkondade vaheline kindel seos puudub. Täpset selgitust katsetulemustele on välja tuua raske. Neljanda ja viienda katseseeria tulemustest võib täheldada tingliku voolavuspiiri vähenemist võrreldes esimese katseseeria tulemustega. Antud keskkondades olnud katsekehade korrosioonist tulenevalt on ka teised tugevusomadused märgatavalt vähenenud. Antud tulemused võivad olla tingitud sellest, et oli liialt lühikene katseperiood. Suure tõenäosusega on väga vähe materjale, mis oleksid perfektsed. Katsete tulemused võivad tuleneda terasevalu ebaühtlusest, kuna et tegemist oli masstoodangu käigus toodetud terasarmatuuriga.



Joonis 5.9. Katseseeriade tingliku voolavuspiiri tulemuste keskmised.

Katkevenivuse tulemuste keskmiste kohaselt oli kõige kõrgem katkevenivus esimese seeria katsekehadel. Kõige madalamad tulemused olid neljanda- ja viienda katseseeria katsekehadel. (vt. joonis 5.10) Erinevate keskkondade katsekehade tõmbetugevuse tulemuste ja katkevenivuse keskmiste vahel võis täheldada seost, et mida madalam on tõmbetugevus, seda madalam oli ka katkevenivus (vt. tabel 5.1). Tugevusomaduste vahelisest sõltuvusest võib järeldada, et mida madalam on katkevenivus, seda nõrgem oli vastupanu katsekehade purunemisele, mis avaldus ka terasvarraste tõmbekatsete käigus. Madalama katkevenivuse korral purunemise hetkel katsekeha purunemine toimus hapramalt kui kõrgema katkevenivusega katsekehadel.



Joonis 5.10. Katseseeriade katkevenivuse tulemuste keskmised.

Kõigi kuue katseseeria katsekehade katsetulemuste põhjal saadud erinevad parameetrid on välja toodud lisa 6).

Käesoleva magistritöö raames kasutati katsekehade valmistamisel ainult ühe tootja poolt valmistatud terasarmatuuri. Igal tootjal on erinevad tootmis viisid. Lähtuvalt sellest ja paljudest muudest asjaoludest on ka terasarmatuuri kvaliteet erinev. Isegi esimese seeria katsekehade tulemused oli küllaltki suure varieeruvusega (vt lisa 7), mis näitab terase ebaühtlust ning toodetud terasarmatuuri kvaliteeti. Tulevikus tehtavates uuringutes oleks huvitav tuua võrdlusi erinevate tootjate poolt valmistatud terasarmatuuri omaduste vahel.

Täpsemate ja veel suuremate mõjutustega tulemuste ning järelduste tegemiseks, tuleks katsed läbi viia pikema ajaperioodi jooksul. Täpse võrdluse jaoks võiks katsete ajaline periood olla aastate lõikes (katsetamine ning andmete kogumine pärast (esimest aastat, teist aastat, kolmandat aastat, neljandat aastat, viiendat aastat). Selline katsetamise viis eeldab suurt hulka katsekehasid ning mahukat andmete analüüsi.

5.2 Katsetulemuste statistiline analüüs

Katsetulemuste statistilise analüüsi tegemiseks sisestati tabelitöötlusprogrammi Microsoft Excel faili „Katseandmed ja tulemused”. Failis on kokku kaheksa andmestikku. Töölehel „kõik andmed” on kõikide katsekehade (180 tk.) algandmed, katsetulemused ning põhiandmed, mis on arvutuslikud tugevusnäitajad algandmete ning katsetulemuste põhjal. Eraldi töölehtedena on kõikide kuue erineva keskkonna andmed, kus on lisaks välja toodud andmete minimaalsed, maksimaalsed ning keskmised väärtused ja eraldi tööleht on veel võrdluste, jooniste, tabelite ja diagrammide tarbeks.

Statistilise analüüsi eesmärgiks on uurida tunnuste omavahel seotust ja saadud tulemuste usaldusväarsust. Tunnuste vahelist sõltuvust uuriti dispersioonianalüüsi meetodiga. Kõige tähtsam analüüsi tulemus on olulisuse tõenäosus, mille väärtuse põhjal saab järeldada, kas põhiandmete vahelised seosed on usaldusväärsed. Käesolevas magistritöös kasutati andmete uurimisel MS Exceli tabelitöötlusprogrammi erinevaid funktsioone. Tunnuste uurimisel kasutati MS Exceli statistilise andmetöötluse vahendite komplekti *Data Analysis*. Täpsemalt kasutati kolme analüüsivahendit, milleks olid: F-test *Two-Sample for Variances*; t-test *Two-Sample Assuming Equal Variances* ning t-test *Two Sample Assuming Unequal Variances*. T-test toob välja katsetulemuste keskmiste olulised erinevused. Kui olulisus tõenäosus $p < 0,05$, siis võib järeldada, et tulemuste omavahelised erinevused on statistiliselt olulised ning usaldusväärsed, mida lähemale nullile p väärtus on seda olulisemad. Kui olulisuse tõenäosuse arv väärtus $p > 0,05$, siis katsete keskmised tulemused ei ole statistiliselt niivõrd olulised. T-testi liik valiti vastavalt F-testi tulemuste põhjal, kui $p < 0,05$, siis toimus kahe üldkogumi keskmiste tulemuste võrdlemine erinevate dispersioonide (*Unequal Variances*) korral. Kui $p > 0,05$, siis toimus kahe üldkogumi keskmiste tulemuste võrdlus võrdsete dispersioonide (*Equal Variances*) korral.

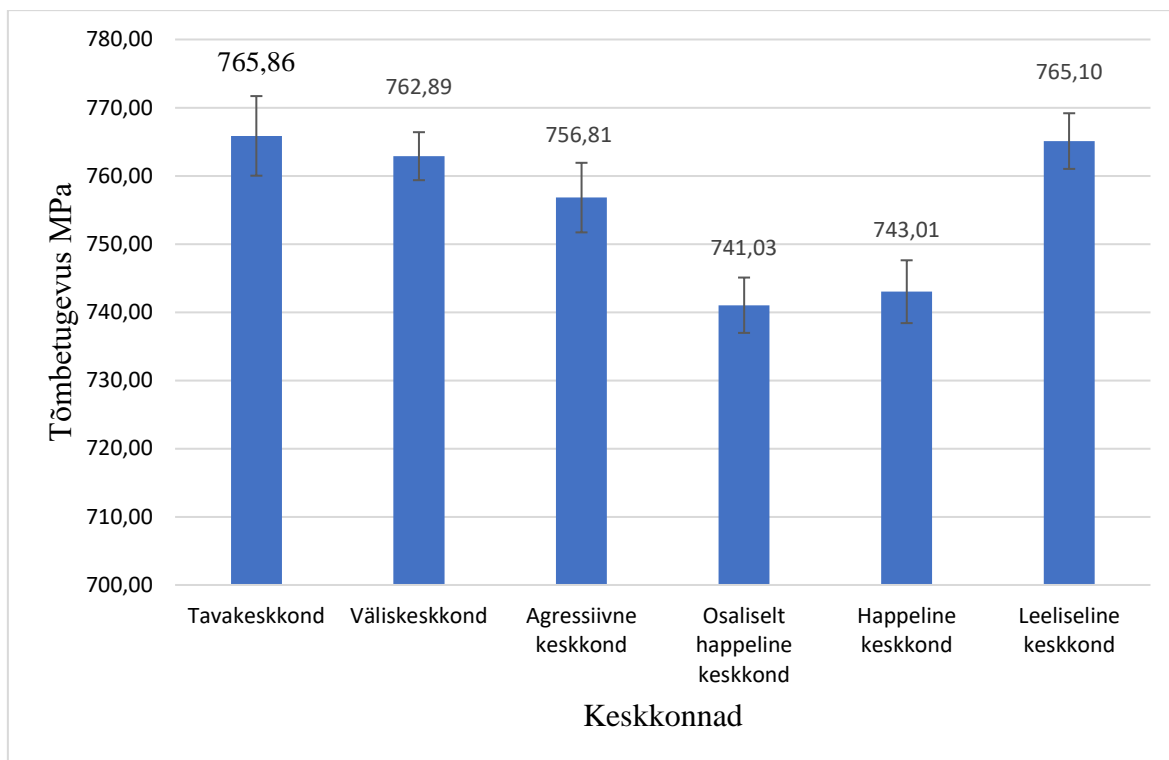
Tabel 5.2. Katseseeriade tugevusnäitajate keskmised tulemused ja 95 % usaldusintervallid

	Tugevusnäitajad	Seeria 1	Seeria 2	Seeria 3	Seeria 4	Seeria 5	Seeria 6
Keskmesed tulemused	tõmbetugevus (MPa)	765,86	762,89	756,81	741,03	743,01	765,10
	tinglik voolavuspiir (MPa)	636,39	652,26	645,73	619,79	624,16	649,77
	katkevenivus (%)	20,47	19,62	18,44	14,87	17,66	18,99
	algristlõike pindala (mm ²)	102,99	101,82	102,42	98,66	95,16	101,43
95 % usaldusintervallid	tõmbetugevus (MPa)	5,84	3,52	5,10	4,06	4,61	4,08
	tinglik voolavuspiir (MPa)	5,77	4,54	5,51	5,72	6,74	5,04
	katkevenivus (%)	1,80	1,15	1,07	1,77	1,76	1,24
	algristlõike pindala (mm ²)	0,73	0,26	0,53	0,34	0,22	0,26

Käesoleva magistritöö käigus uuriti 180 katsekeha (teras armatuurvarda) tunnuste keskmiste väärtuste (vt. tabel 5.2) omavaheliste erinevuste statistilist olulisust ja nende usaldusväärsust. Võrreldavateks tunnustusteks on armatuurvarraste tõmbetugevus, katkevenivus, tinglik voolavuspiir ja algristlõike pindala. Võrdluse aluseks on eelkõige esimese seeria katsetulemuste põhjal saadud, eelpool nimetaud tunnuste väärtused.

5.2.1 Tõmbetugevuste statistiline analüüs ja usaldusintervallid

Tõmbetugevuste keskmiste väärtuste võrdluse aluseks oli esimese katseseeria keskmised tulemused. Käesolevas magistritöös püstitatud hüpoteesi tõendati katsetulemuste põhjal. Allolevas tulppiagrammis (vt joonis 5.11) on välja toodud kõikide keskkondade tõmbetugevuse keskmised väärtused ning 95 % usaldusintervallide piirkonnad. Kuna käesoleva magistritöö eesmärkidest tulenevalt on hüpoteesina välja toodud, et korrosiooni mõjul terasarmatuuri tugevusomadused halvenevad, siis kasutati katsetulemuste erinevuste statistilise olulisuse tõenäosuse (p – väärtus) leidmiseks ühepoolset T-testi.



Joonis 5.11. Kuue erineva keskkonna keskmised tõmbetugevuse väärtused ning keskkondade tõmbetugevuse 95 % usaldusintervallid.

Tulpdiagrammil (joonis 5.11) olevate usalduspiiride põhjal võib järeldada, et esimese seeria katsetulemustega võrreldes on olulised erinevused kolmanda, neljanda ja viienda seeria katsetulemustega. Vähem usaldusväärsed ning olulised katsetulemuste keskväärtuste erinevused on teise ning kuuenda seeria tulemustega. Antud tulemuste põhjal võib järeldada, et väliskeskkonnas olnud katsekehadele mõjunud korrosioonikahjustused ei olnud katsetamise perioodi jooksul piisavalt märgatavad. Keskmiste tulemuste erinevused oleksid olulised, kuigi tõmbetugevuse keskmine väärtus on madalam kui esimese katseseeria keskväärtus. Kuna esimese ja kuuenda katseseeria keskmiste tulemuste erinevused ei ole statistiliselt olulised, saab järeldada, et leeliselises keskkonnas olnud armatuurvardad ei hakanud katseperioodi jooksul korrodeeruma.

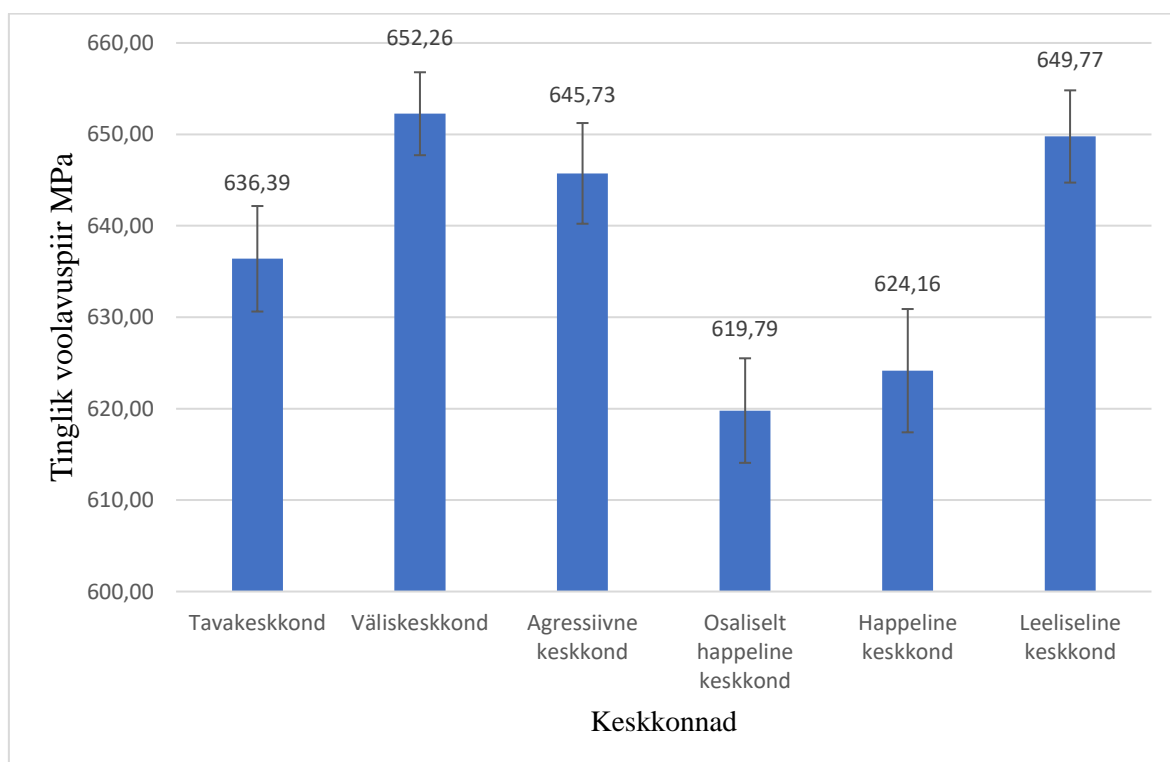
Tabel 5.3. Tõmbetugevuste keskmiste statistiliselt olulised erinevused (olulisuse tõenäosuse p-väärtused)

	Seeria 2	Seeria 3	Seeria 4	Seeria 5	Seeria 6
Seeria 1	0,1883	0,0101	$1,5065 \cdot 10^{-9}$	$2,3089 \cdot 10^{-9}$	0,4143

Tulpdiagrammide kinnituseks on eelnevas tabelis (vt. tabel 5.3) välja toodud statistilised olulisus tõenäosuse (p-väärtused) näitajad. Kui p-väärtus on üle $p > 0,05$, siis tulemuste erinevused ei ole usaldusväärsed ehk statistiliselt olulised, kuid kui $p < 0,05$, siis tulemuste vahelised erinevused on olulised.

5.2.2 Tingliku voolavuspiiri statistiline analüüs ja usaldusintervallid

Sarnaselt tõmbetugevuste keskmiste väärtuste statistiliste olulisuste võrdluseks, olid ka tingliku voolavuspiiri keskmiste väärtuste statistilise võrdluse aluseks esimese katseseeria tulemused. Allolevas tulpdiagrammis (vt joonis 5.12) on välja toodud kõikide keskkondade tinglike voolavuspiiride keskmised väärtused ning 95 % usaldusintervallide piirkonnad. Kuna käesoleva magistritöö eesmärkidest tulenevalt on hüpoteesina välja toodud, et korrosiooni mõjul terasarmatuuri tugevusomadused halvenevad, siis kasutati katsetulemuste erinevuste statistilise olulisuse tõenäosuse (p – väärtus) leidmiseks ühepoolset T-testi.



Joonis 5.12. Kuue erineva keskkonna keskmised tingliku voolavuspiiri väärtused ning keskkondade tõmbetugevuse 95 % usaldusintervallid.

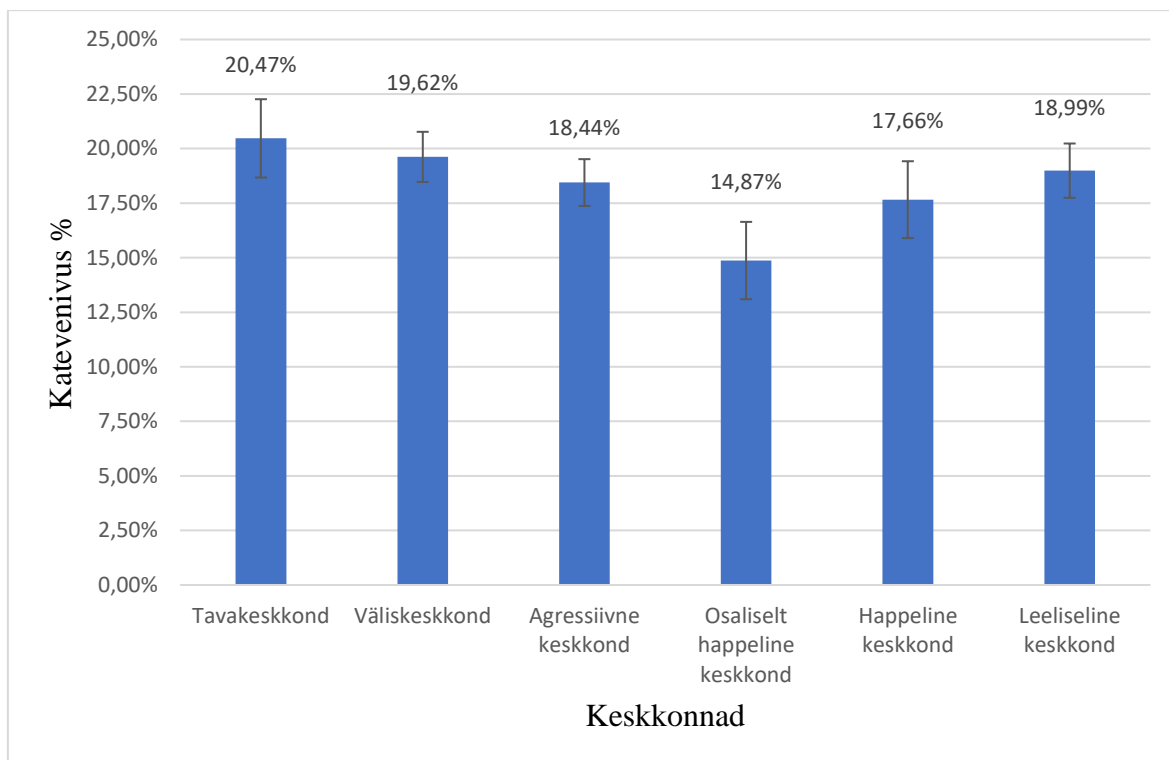
Tabel 5.4. Tingliku voolavuspiiri keskmiste tulemuste statistiline olulisus (p-väärtused)

	Seeria 2	Seeria 3	Seeria 4	Seeria 5	Seeria 6
Seeria 1	$2,1819 \cdot 10^{-5}$	0,0099	$4,9854 \cdot 10^{-5}$	0,0033	$6,1517 \cdot 10^{-5}$

T-testi läbiviimise käigus saadud tingliku voolavuspiiri keskmiste tulemuste vahelised erinevus on küll olulised ning usaldusväärased (vt. tabel 5.4) aga nagu tõmbekatsete tulemuste peatükis (vt alapeatükk 5.1) välja toodud järeldustele on neljanda-, viienda ja kuuenda katseseeria katsetulemuste vaheliste erinevused esimese seeriaga olulised ning loogilised. Teise- ja kolmanda seeria tulemuste erinevuse olulisus esimesega on küll p-väärtuse näol olemas aga kindlat järeldust nende põhjal esile tuua on keeruline.

5.2.3 Katkevenivuse statistiline analüüs ja usaldusintervallid

Võrdluse aluseks olid esimese katseseeria keskmised tulemused. Allolevas tulppiagrammis (vt. joonis 5.13) on välja toodud kõikide keskkondade katkevenivuse keskmised väärtused ning 95 % usaldusintervallide piirkonnad. Kui keskkondade vahelised usaldusintervallid ei kattu üksteisega, siis sellest saab järeldada, et võrdlevate tunnuste vahelised erinevused on piisavad, et need oleksid statistiliselt olulised ning usaldusväärased. Lähtuvalt magistritöö eesmärkidest tulenevalt on hüpoteesina välja toodud, et korrosiooni mõjul terasarmatuuri tugevusomadused halvenevad, siis kasutati katsetulemuste erinevuste statistilise olulisuse tõenäosuse (p – väärtus) leidmiseks ühepoolset T-testi.



Joonis 5.13. Kuue erineva keskkonna keskmised katkevenivuse väärtused ja keskkondade tõmbetugevuse 95 % usaldusintervallid.

Tabel 5.5. Katkevenivuse keskmiste tulemuste statistiline olulisus (p-väärtused)

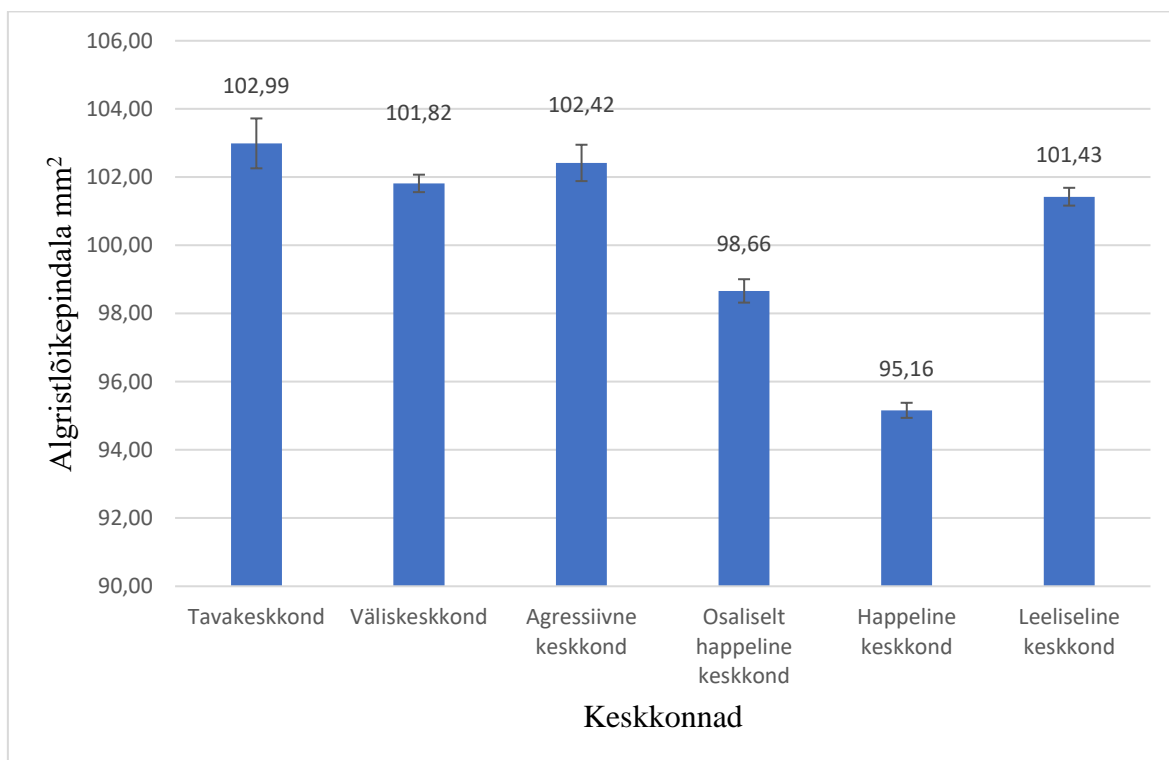
	Seeria 2	Seeria 3	Seeria 4	Seeria 5	Seeria 6
Seeria 1	0,2244	0,0188	$5,9688 \cdot 10^{-5}$	0,0133	$6,1516 \cdot 10^{-5}$

Antud analüüsi tulemusena saab järeldada, et kolmanda-, neljanda-, viienda- ja kuuenda katseseeria keskmised katkevenivuse tulemused on esimesest katseseeriast niivõrd erinevad, et T-testi läbi viimisel saadud olulisuse tõenäosuse väärtuste põhjal saab väita, et need on statistiliselt olulised, usaldusväärsed ja üksteisest sõltuvad (vt. tabel 5.5). Kuna teise seeria katsetulemuste erinevused on suhteliselt väikesed, siis nende tunnuste vahelist erinevust ei saa nimetada oluliseks ega usaldusväärseks.

5.2.4 Algristlõikepindala statistiline analüüs ja usaldusintervallid

Analoogselt eelnevatele terrassaruse tugevusomaduste võrdluse aluseks on ka algristlõikepindala keskmiste väärtuste võrdluse aluseks esimese katseseeria keskmised tulemused. Allolevas tulpdiagrammis (vt joonis 5.14.) on välja toodud kõikide keskkondade

algristlõikepindalade keskmised väärtused ning 95 % usaldusintervallide piirkonnad. Käesoleva magistr töö eesmärkidest tulenevalt on hüpoteesina välja toodud, et korrosiooni mõjul terasarmatuuri tugevusomadused halvenevad, sellest lähtuvalt on üks tunnus kõikide teiste tunnuste võrdlemise. Seega kasutati katsetulemuste erinevuste statistilise olulisuse tõenäosuse (p – väärtus) leidmiseks ühepoolset T-testi.



Joonis 5.14. Kuue erineva keskkonna keskmised algristlõikepindalade väärtused ning keskkondade algristlõikepindalade 95 % usaldusintervallid.

Tabel 5.6. Katkevenivuse keskmiste tulemuste statistiline olulisus (p-väärtused)

	Seeria 2	Seeria 3	Seeria 4	Seeria 5	Seeria 6
Seeria 1	0,0019	0,1006	$4,5472 \cdot 10^{-14}$	$2,0848 \cdot 10^{-21}$	0,0001

Lähtuvalt keskmistest tulemustest ning nende usaldusintervallidest (vt. tabel 5.6) ja t-testi läbiviimise tulemusel saadud statistiliste olulisust näitava p-väärtustest, saab järeldada, et statistiliselt olulised võrreldes esimese katseseeria tulemustega on teise-, neljanda-, viienda- ja kuuenda seeria algristlõikepindala keskmised tulemused. Teistest märgatavalt suurem erinevus on neljanda- ja viienda katseseeria tulemused. Algristlõike puhul muudab vähem usaldusväärsemaks saadud tulemused asjaolu, et katsetatud terrassarrusel ei pruugi olla ideaalselt sama läbimõõt.

KOKKUVÕTE

Terassarrus omab suurt osatähtsust betoonkonstruktsioonide töövõime seisukohast. Betoonil on kõrge survetugevus, kuid tõmbepingete korral on betoon iseseisvalt võrdlemisi nõrk. Teras- või klaaskiudsarruse lisamisega tõstetakse suurel määral betoonkonstruktsiooni vastupidavust tõmbepingete korral.

Soodsates keskkondades on raudbetoonkonstruktsioonide eluiga pikk. Peamiseks raudbetoonkonstruktsioonide kasutusea lühenemise põhjuseks on betoonis oleva terassarruse korrodeerumine. Terassarruse korrodeerumine võib põhjustada kogu raudbetoonkonstruktsiooni hävinemise. Koostatud magistritöö peamiseks eesmärgiks oli uurida erinevate keskkondade mõjurite poolt põhjustatud korrosiooni kahju terassarruse põhilistele tugevusomadustele.

Magistritöö kirjanduse analüüsi põhjal uuriti terasarmatuuri korrosiooni põhjuseid ja tagajärgi. Täpsemalt on uuritud erinevaid korrosiooni protsesse, korrosiooni liike ning korrosiooni ennetavaid meetodeid.

Käesoleva magistritöö raames valmistati 180 katsekeha, mis paigutati neljaks kuuks kuute erinevasse keskkonda. Peale nelja kuu möödumist eemaldati katsekehad keskkondadest ning enne tõmbekatsete läbiviimist katsekehad kaaluti, puhastati ning valmistati ette tõmbekatsete läbiviimiseks. Tõmbekatsed viidi läbi seeriade kaupa, iga seeria katsekäigu ajal ning peale katsetamist koguti kõik vajalikud andmed andmetöötluse jaoks. Terassarruse tõmbekatse tulemusena leiti terasarmatuurist katsekehade tõmbetugevus, voolavuspiir ja katkevenivus.

Katsetulemustest saadud andmeid töödeldi tabelitöötlusprogrammis Microsoft Excel, kus teostati andmete statistiline analüüs ning teostati vajalike andmete saamiseks arvutused. Statistilisest analüüsist lähtuvalt saab väita, et korrosioonist tulenevalt terasarmatuuri tugevusomadused halvenevad, välja arvatud tingliku voolavuspiiri tulemused, mille puhul osade katseseeriade tulemuste vahelised erinevused on ebaselged. Kõige paremad tõmbetugevuse tulemused saadi võrdluste aluseks olnud esimese seeria katsekehadel, mis olid korrosiooni eest kaitstud. Maksimaalse tõmbetugevusega katsekeha esines just selles katseseerias. Kõige parema katsekeha tõmbetugevus oli 792,96 MPa. Esimese katseseeria

keskmise tõmbetugevus oli 765,86 MPa. Kõige madalama keskmise tõmbetugevusega oli neljas katseseeria, mille suuruseks saadi 741,01 MPa, mis on 3,24% madalam kui esimese katseseeria keskmine tulemus. Teise katseseeria keskmiseks tõmbetugevuseks saadi 762,86 MPa, kolmandal 756,81 MPa ja viienda katseseeria tõmbetugevuse keskmiseks tulemuseks oli 743,01 MPa. Kuuenda katseseeria katsekehad, mis olid leeliselises keskkonnas, kaitstud korrosiooni eest, nende katsekehade keskmine tõmbetugevus oli 765,10 MPa, mis on praktiliselt sama esimese katseseeria tulemustega. Leeliseline betooni keskkond kaitses terasarmatuuri katseperioodi vältel, kuna silost tulenevad kahjulikud happed ei jõudnud tungida terasarmatuurini ega põhjustada kahjustusi.

Tingliku voolavuspääri tulemusest lähtuvalt saab usaldusväärseteks tulemusteks pidada neljanda- ja viienda katseseeria tulemusi, kuna need olid märgatavalt madalamad, kui võrdluse aluseks olnud esimese katseseeria tulemused.

Katkevenivuse tulemustest saab välja tuua seose tõmbetugevusega. Mida madalam on tõmbetugevus seda madalam on ka katkevenivus, millest saab järeldada, et katsekehad ei veninud purunemise hetkel sama palju kui kõrgema tõmbetugevusega katsekehad. Antud järelduse kinnituseks on tõmbetaksete ajal täheldatud purunemine, katsekehad mille katkevenivus on madalam, purunesid järsemalt, mis kajastub ka purunemispiltidel.

Katsetulemustest tehtud järeldusi kinnitavad statistilise analüüsi käigus leitud statistilised seosed nagu tunnuste omavahelised sõltuvused ning olulisused.

Magistritöös püstitatud hüpotees sai enamjaolt kinnitust, kuid täpsemate ning statistiliselt olulisemate tulemuste saamiseks peaks korrosioonist tulenevate kahjustuste mõju terassarrusele uurima pikema ajaperioodi jooksul.

Magistritöös üles kerkinud probleemid, mida tuleks edasi uurida:

- Uurida pikema ajaperioodi jooksul väliskeskkonnast tuleneva korrosiooni kahjustavat mõju terassarrusele.
- Uurida pikema ajaperioodi jooksul betooni kloriidide sissetungist või betooni karboniseerumisest tulevalt terasarmatuuri korrosiooni kahjustusi.
- Uurida terase korrosiooni ennetavate võimaluste toimivust.

KASUTATUD KIRJANDUS

- ACI Committee 201. (1992). Guide to Durable Concrete, ACI 201.2R-92. Michigan: American Concrete Institute. 41 lk.
- Ahmad, S.** (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - a review - *Cement & Concrete Composites*. Toim. Banthia N. Volume 25, Issues 4-5. Department of Civil Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals. Dhahran, Saudi Arabia: Elsevier, lk 459-471.
- ASTM G46 – 94. (2013). Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bentur, A., Diamond, S., Berke, N. S.** (1997). Steel corrosion in Concrete: Fundamental and civil engineering practice. London: E & FN Spon. 201 lk.
- Betooni sarrusteras (2006). Betooni sarrusteras. Keevitatav sarrusteras. Üldsätted: Eesti standard EVS-EN 10080:2006. Tallinn: Eesti standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-10080-2006>
- Broomfield, P. J.** (1997). Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, investigation and repair. E & FN Spon. London. 240 lk.
- CIP 25 – Corrosion of Steel in Concrete. (1995). Concrete in Practice. National Ready Mixed Concrete Association. [on-line] <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/25p.pdf> (20.04.2018).
- Clear, K.C.** (1976). Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs. PB 258 446, Vol. 3. United States: Federal Highway Administration. 59 lk.
- Concrete Reinforcing Steel Institute (CRSI). Reinforcing Basics. [veebileht] <http://www.crsi.org/index.cfm/basics/reinforcing-steel> (05.04.2018)
- Flemming, C. H., Geesey, G. G.** (1990). Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems: What is Biocorrosion? California: Springer-Verlag. Lk 155 - 156.
- Fischer, U., Heinzler, M., Noher, F.** (2012). Mechanical and Metal Trades Handbook 3rd English ed. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel. 444 lk.
- Juurvee, U.** Eesti betooniühing. Betooni ajalugu. [veebileht] <http://www.betoon.org/betooni-ajalugu/> (7.03.2018)
- Karja, P., Kümnik, K. (2016) Betoonilisandite uurimine happelises ja liigniiskes keskkonnas sõltuvalt betooni tugevus- ja keskkonnaklassist. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus ja maehitusinstituut. Tartu.

- Kiviste, M. (2004). Armatuurterase korrosioon ja selle mõju ribipaneelide kandevõimele. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus ja maehitusinstituut. Tartu.
- Kleis, R., Torpats, Ü., Gross, L., Freymann, H.** (2002). Ladina-eesti sõnaraamat = Glossarium Latino-Estonicum. Tallinn: kirjastus Valgus. 1152 lk.
- Bell, T. (2016). Corrosion Prevention for metals. [veebileht] <https://www.thebalance.com/corrosion-prevention-2340000> (27.03.2018).
- Mehhanotehnika ja metallide käsiraamat. (2012). /Toim. P. Kulu, E. Hendre. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus. 447 lk.
- NACE International – The Worldwide Corrosion Authority. Corrosion Basics. [Veebileht] <https://www.nace.org/Corrosion-Basics/> (02.04.2018).
- Nielsen A. Durability in Beton Bogen, Aalborg Cement Company, Aalborg, 1985, pp. 200-243
- Persidski, R. (2015). Raudbetooni kloriidikindluse uurimine betooni tugevusklassi ja lisadi näitel. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus ja maehitusinstituut. Tartu.
- Revie, W.R. Uhlig, H. H.** (2008). Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. Neljas trükikordus. Kanada: John Wiley & Sons Ins. 490 lk.
- Siinor, L. (2010). Adsorption kinetics of ions at Bi single crystal planes from aqueous electrolyte solutions and room-temperature ionic liquids. (Dokoritöö). Tartu Ülikooli Loodus- ja tehnoloogiateaduskond. Tartu
- Švei, M.** [tõlkinud Masso, T.] (1961). Armatuuri- ja betooni tööd. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus. 247 lk.
- Talimets, E.** (2004). Metallide korrosioon ja korrosioonitõrje. Loengukonspekt. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus. 60 lk.
- Trumm, U., Kangur, Paavo.** (2014). Eesti betoonehituse ajalugu. Tallinn: In Nomine OÜ. 352 lk.
- Tsink katted (2017). Zinc coatings – Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures – Part 1: General principles of design and corrosion resistance (ISO 14713-1:2017): Eesti standard EVS-EN ISO 14713-1:2017. Tallinn: Eesti standardkikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-iso-14713-1-2017>
- Types and Causes of Concrete Deterioration. (2002). Portland Cement Association: IS536.01. Illinois: Skokie 16 lk. [on-line] http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/durability/is536-types-and-causes-of-concrete-deterioration.pdf?sfvrsn=4 (11.04.2018).
- Tõmbekatse meetodika (2016). Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2016): Eesti standard EVS-EN ISO 6892-1:2016. Tallinn: Eesti standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-iso-6892-1-2010>
- Portland Cement Association (PCA). Corrosion of Embedded Metals. [veebileht] <http://www.cement.org/learn/concrete-technology/durability/corrosion-of-embedded-materials> (20.03.2018).

LISAD

Lisa 1. Betoonisarrusterase sertifikaat



Сертификат качества №/Certificate of quality No. 20977 03.10.2017

Inspecta



No. 04-16-094

1613

Грузоотправитель:
Общество с ограниченной ответственностью
"НЛМК-Калуга"
Shipper Limited Liability Company "NLMK-Kaluga",
Russian Federation
Спецификация 401 от 19.09.2017 к контракту № СУ-98
or 12.05.2016
Specification 401 dtd 19.09.2017 to the Contract № СУ-98
dtd 12.05.2016

Грузополучатель/ Consignee:
ELME METALL OU, 11712, Эстония, Таллин, Копли, 103 /
ELME METALL OU, Kopli, 103, 11712, Tallinn, Estonia

Производитель/ Manufacturer:
Общество с ограниченной ответственностью "НЛМК-Калуга" (ООО "НЛМК-Калуга")
249020, РФ, Калужская обл., с. Ворсино, ул. Лыскова, 20/
Limited Liability Company "NLMK-Kaluga" (LLC "NLMK-Kaluga") 249020, RF,
Kaluga region, Vorsino, Lyskova, 20

Стр./Sh. 1

Страниц/Sheets 1

Станция назначения: САМОВЫВОЗ
Destination railway station:
Customer pick-up

Всего мест/ Total
packages: 10

Всего вес нетто/ Total
net weight: 20,362

Всего вес брутто/
Total gross weight: 20,442

Трансп. средство/Vehicle No. № 517BKREST

Вид упаковки/ Type of package: Пакеты/ Bundle

№	№ поз./ Position number	№ плавки/ No. of heat	Лот/ Lot	Класс прочности/ Strength class	Требования к химическому составу/ Requirements to chemical composition	Технические требования/ Technical requirements	Профильный стандарт/ Profile standart	Диаметр/ Diameter	Длина, мм/ Length, mm	Сорт/ Sort	Количество мест/ No of colli	Вес нетто / Net weight	Вес брутто / Gross weight
1	1	1706991	1	B500NC/K500C-T/ K500B-T/B500B/ B500B/B500B	NS 3576-3:2012 / SS-EN 10080:2005+SS 212540:2011 / SFS 1300:2014 / DIN 488 /LST EN 10080:2006	NS 3576-3:2012 / SS-EN 10080:2005+SS 212540:2011 / SFS 1300:2014 / DIN 488 /LST EN 10080:2006	NS 3576-3:2012 / SS-EN 10080:2005+SS 212540:2011 / SFS 1300:2014 / DIN 488 /LST EN 10080:2006	12	Мерная длина/ Fixed length 12000	1	10	20,362	20,442

Дополнительные технические требования/ Additional technical requirements:

Качественные характеристики/ Quality characteristics:

Химический состав/ Chemical composition %:

№ п/п	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N ₂	Mo	V	Seq
1	0,19	1,24	0,18	0,021	0,032	0,10	0,10	0,26	0,010	0,009	0,001	0,44

Механические свойства и технологические испытания/ Mechanical properties and proof test:

Временное сопротивлен ие / Tensile strength Rm	Предел текучести/ Yield point Re	Соотношение Rm/Re./ Ratio Rm/Re.	Общее удлинение при макс нагрузке/Total elongation at max. load Agt, %	Соотношение Re факт/Ре. ном ин /Ratio Re. actual/Re. no minal	Относительна я площадь ребра/Relative rib area, Rr	Способность к обратному изгибу/Сарап ty of backbending	Изгиб в холодном состоянии / Cold bending	Вес 1 метра/ Weight of one meter, kg/m	Отклонение от номинальной площади поперенного сечения/ Deviation from nominal area of cross-section ΔAн%
653	554	1,18	12,2	1,11	0,091	ВЫД/sat	ВЫД/sat	0,881	-0,7

Примечания/Notes: Прокатная маркировка № 9/47 / Rolling mark № 9/47

Продукция сертифицирована «Орган сертификации арматурной стали Швеция» («GlobeCert AB»). Швеция. Сертификат соответствия № 1613 от 10.08.2016. Учреждение по проверке материалов для строительства, представленное Техническим Университетом Мюнхен Сертификат соответствия № 2329/1-2015 от 01.05.2015. Сертификационный орган Inspecta, Финляндия. Сертификат соответствия № 10019-01 от 21.07.17 / Certified product. The Certification Authority for Reinforcing Steels («GlobeCert AB»), Sweden. Certificate of Conformity № 1613 dtd 10.08.2016. Authority of material inspection for construction represented by Technical University of Munich. Certificate of Conformity № 2329/1 dtd. 01.05.2015. Inspecta Seritifoint Oy, Finland. Certificate of Conformity № 10019-01 dtd 21.07.17.

Сертификат инспекции соответствует EN 10204 тип 3.1. / The certificate of inspection conforms to EN 10204 type 3.1.
99-2010/ Result of the radiation control. Удельная активность радионуклидов соответствует табл. Приложения № 4 СП 2.6.1.2612-10 ОСПОРБ 99-2010.
Допускается неограниченное использование металла/ Unlimited usage of material is allowed.



При переписке по вопросам качества
ссылайтесь на номер сертификата/
In the correspondence regarding quality
issues please mention the certificate No.

Подпись ОСК
Signature of Quality control department

Кайренс О.А./Kasrēns O.Ā.



Lisa 2. Ilmastikutingimuste kohta peetud ülevaade kuude lõikes.

Tabel L.2.1. Detsembrikuu ilmastikutingimuste kohta koostatud päevik

Kuupäev	Aeg	Välis t°	Tuul m/s	Kuiv	Vihm	Lörts	Lumi
03.12.2017	15:00	1	5	X			
04.12.2017	15:00	2	1,5	X			
05.12.2017	15:00	0	2	X			
06.12.2017	15:00	0	3,5			X	
07.12.2017	15:00	-2	2				X
08.12.2017	15:00	2	3,5		X		
09.12.2017	15:00	2	3,5	X			
10.12.2017	15:00	-2	2	X			
11.12.2017	15:00	-2	3,5	X			
12.12.2017	15:00	1	5,5			X	
13.12.2017	15:00	1	3	X			
14.12.2017	15:00	-1	5,5	X			
15.12.2017	15:00	0	3	X			
16.12.2017	15:00	-1	1	X			
17.12.2017	15:00	0	2			X	
18.12.2017	15:00	0	0	X			
19.12.2017	15:00	1	0		X		
20.12.2017	15:00	-2	2,5	X			
21.12.2017	15:00	0	3			X	
22.12.2017	15:00	0	1,5	X			
23.12.2017	15:00	0	5,5			X	
24.12.2017	15:00	2	5	X			
25.12.2017	15:00	-2	2	X			
26.12.2017	15:00	5	2		X		
27.12.2017	15:00	3	3	X			
28.12.2017	15:00	3	4		X		
29.12.2017	15:00	3	2		X		
30.12.2017	15:00	1	2	X			
31.12.2017	15:00	-1	3,5	X			

Lisa 2 järg

Tabel L.2.2. Jaanuarikuu ilmastikutingimuste kohta koostatud päevik

Kuupäev	Aeg	Välis t°	Tuul m/s	Kuiv	Vihm	Lörts	Lumi
01.01.2018	15:00	2	3	X			
02.01.2018	15:00	4	3		X		
03.01.2018	15:00	2	2		X		
04.01.2018	15:00	3	4,5	X			
05.01.2018	15:00	4	5,5	X			
06.01.2018	15:00	2	3	X			
07.01.2018	15:00	-1	4,5	X			
08.01.2018	15:00	-2	4	X			
09.01.2018	15:00	1	4	X			
10.01.2018	15:00	-2	1				X
11.01.2018	15:00	-2	2				X
12.01.2018	15:00	-6	2				X
13.01.2018	15:00	-8	1				
14.01.2018	15:00	-8	3	X			X
15.01.2018	15:00	-9	3				X
16.01.2018	15:00	-8	5				X
17.01.2018	15:00	-7	5	X			
18.01.2018	15:00	-4	1,5	X			
19.01.2018	15:00	-2	1,5	X			
20.01.2018	15:00	-3	2	X			
21.01.2018	15:00	-4	2				X
22.01.2018	15:00	-3	2				X
23.01.2018	15:00	-3	2,5				X
24.01.2018	15:00	-5	5,5				X
25.01.2018	15:00	4	4,5		X		
26.01.2018	15:00	3	2		X		
27.01.2018	15:00	2	2		X		
28.01.2018	15:00	1	3,5		X		
29.01.2018	15:00	0	1	X			
30.01.2018	15:00	-3	3				X
31.01.2018	15:00	-5	1	X			

Lisa 2 järg

Tabel L.2.3. Veebruarikuu ilmastikutingimuste kohta koostatud päevik

Kuupäev	Aeg	Välis t°	Tuul m/s	Kuiv	Vihm	Lörts	Lumi
01.02.2018	15:00	1	3				X
02.02.2018	15:00	0	3				X
03.02.2018	15:00	-1	1				X
04.02.2018	15:00	-6	3				X
05.02.2018	15:00	-6	3				X
06.02.2018	15:00	-7	1				X
07.02.2018	15:00	-3	3,5				X
08.02.2018	15:00	-8	2	X			
09.02.2018	15:00	-9	1	X			
10.02.2018	15:00	-5	1,5				X
11.02.2018	15:00	-4	2,5	X			
12.02.2018	15:00	-2	4	X			
13.02.2018	15:00	1	2	X			
14.02.2018	15:00	-2	2	X			
15.02.2018	15:00	-6	2,5				X
16.02.2018	15:00	-5	3		X		
17.02.2018	15:00	-3	1,5				X
18.02.2018	15:00	-5	1,5				X
19.02.2018	15:00	-7	2	X			
20.02.2018	15:00	-7	2				X
21.02.2018	15:00	-9	1	X			
22.02.2018	15:00	-10	1	X			
23.02.2018	15:00	-9	2	X			
24.02.2018	15:00	-12	2,5				X
25.02.2018	15:00	-10	2,5	X			
26.02.2018	15:00	-10	3	X			
27.02.2018	15:00	-15	4,5	X			
28.02.2018	15:00	-15	3,5	X			

Lisa 2 järg

Tabel L.2.4. Märtsikuu ilmastikutingimuste kohta koostatud päevik

Kuupäev	Aeg:	Välis t ⁰ :	Tuul m/s:	Kuiv	Vihm	Lörts	Lumi
01.03.2018	15:00	-7	4	X			
02.03.2018	15:00	-8	2,5	X			
03.03.2018	15:00	-6	2,5	X			
04.03.2018	15:00	-4	2,5	X			
05.03.2018	15:00	-5	2,5	X			
06.03.2018	15:00	-3	3,5	X			
07.03.2018	15:00	-1	3,5	X			
08.03.2018	15:00	-1	4				X
09.03.2018	15:00	1	3	X			
10.03.2018	15:00	1	2	X			
11.03.2018	15:00	3	3	X			
12.03.2018	15:00	3	3	X			
13.03.2018	15:00	4	3,5	X			
14.03.2018	15:00	-1	3	X			
15.03.2018	15:00	-5	4	X			
16.03.2018	15:00	-6	4	X			
17.03.2018	15:00	-4	2,5	X			
18.03.2018	15:00	2	4,5	X			
19.03.2018	15:00	2	5	X			
20.03.2018	15:00	1	3	X			
21.03.2018	15:00	-3	4	X			
22.03.2018	15:00	2	3	X			
23.03.2018	15:00	0	3	X			
24.03.2018	15:00	4	3	X			
25.03.2018	15:00	3	3,5	X			
26.03.2018	15:00	-3	3				X
27.03.2018	15:00	-1	2	X			
28.03.2018	15:00	-1	2	X			
29.03.2018	15:00	-1	2	X			
30.03.2018	15:00	-1	3	X			
31.03.2018	15:00	0	2	X			

Lisa 3. Betooni saateleht



PM Kaubandusgrupp OÜ
 Reg. nr 10210359
 KMKR: EE100491933
 Jur. address: Männi 10, Valga 68208
 Tehas: Viljandi 82C Valga
 Tel. 5883 9223, 5898 2445
 www.valgabeton.ee

VASTAVUSDEKLATSIOONI LISA

SAATEKIRI nr: 1021

Tellimuse nr: 706

Betoonisegu vastab standardile EVS-EN 206:2014+A1:2016 ja allpool toodud omadustele

Tame aadress: Tõntso Agro		Tellija: Mapri Ehitus OÜ	
		Telefon: 53339385	
Sõidujuhis ja muud lisaandmed:			
Betooni tugevusklass: C30/37		Keskkonnaklass: XF2, XC4, XA1	
Tööeldavus: S4	Kloriidisisalduse klass:	Eriomadused ja lisaandmed:	
Kiudude tüüp ja sisaldus:		Erinõuded/betoonilisandid: Carboxyment FM, REBAIt LP	
Jämetäitematerjal: Graniitkillustik		Täitematerjali Dmax: 16	
Vastavusdeklaratsiooni nr: 1/2016	Sertifitseerimisasutus: TTÜ Sertifitseerimisasutus	Tsement: Tsement CEM I 42,5 N	
Tellimuse kogumaht: 14,3 m3	Koorma maht: 7,3 m3	Veomaa objektile ja tagasi: km 66	
Transport: Segurauto	Autojuht: Valdo	Auto reg nr: 541BRG	
Väljastamise aeg: 11.12.2017 14:02:45	Objektile kell: 15:05	Mahalaadimise algus: 15:15	Mahalaadimise lõpp: 17:10
Märkused/muud lisaandmed:			

Agnes Dmitrijev

11.12.2017

Väljastaja

Kuupäev

Vastuvõtja nimi ja allkiri

Lisa 4. Terassarrusest katsekehade katkevenivuse määramine sõltuvalt purunemiskoha asukohast

1) Esimene meetod

Antud meetodit kasutakse sellisel juhul kui purunemiskoht jääb mõtteliselt kolmeks jaotatud lõppmõõtepikkuse keskmisesse alasse (joonis L.4.1). Lõppmõõtepikkus mõõdetakse keskmiste kärnide (piirmärkide vahe) järgi. Seejärel arvutatakse katkevenivus kasutades EVS-is välja toodud valemit (EVS-EN ISO 6892-1:2016: lk18).

$$A = \frac{L_U - L_0}{L_0} \cdot 100, \quad (4.1)$$

kus A – katkevenivus, %;

L_U – lõppmõõtepikkus, mm;

L_0 – algmõõtepikkus, mm.

Nii algmõõtepikkus kui ka lõppmõõtepikkus mõõdetakse elektroonilise nihikuga, mille mõõtetäpsus on 0,01 mm.

2) Teine meetod

Antud meetodit kasutatakse sellisel juhul kui purunemiskoht jääb mõtteliselt kolmeks jaotatud lõppmõõtepikkuse äärmistesse osasse (joonis L.4.1). Lõppmõõtepikkus mõõdetakse servmiste kärnide (piirmärkide vahe) järgi. Seejärel arvutatakse katkevenivus kasutades EVS-is välja toodud valemit (EVS-EN ISO 6892-1:2016: lk18).

$$A = \frac{L_U - L_0}{L_0} \cdot 100, \quad (4.1)$$

kus A – katkevenivus, %;

L_U – lõppmõõtepikkus, mm;

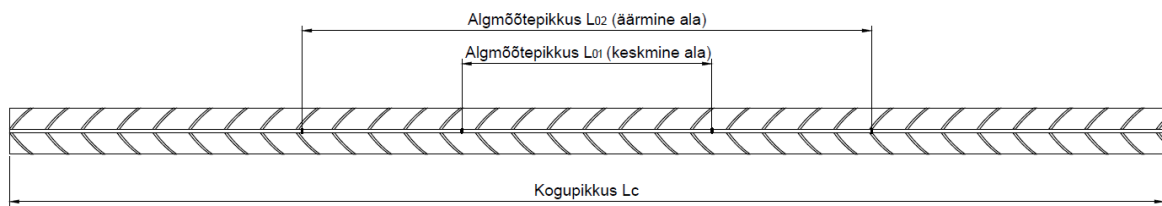
L_0 – algmõõtepikkus, mm.

3) Kolmas meetod

Järgnevat meetodit kasutakse juhul kui purunemiskoht jääb servmisest lõppmõõtepikkuse mõõteskaalalt välja (purunemine toimub pakkide juurest). Antud meetodi puhul täpseid tulemusi pole võimalik saada. Katsekehade ettevalmistuse käigus mõõdeti ka teras

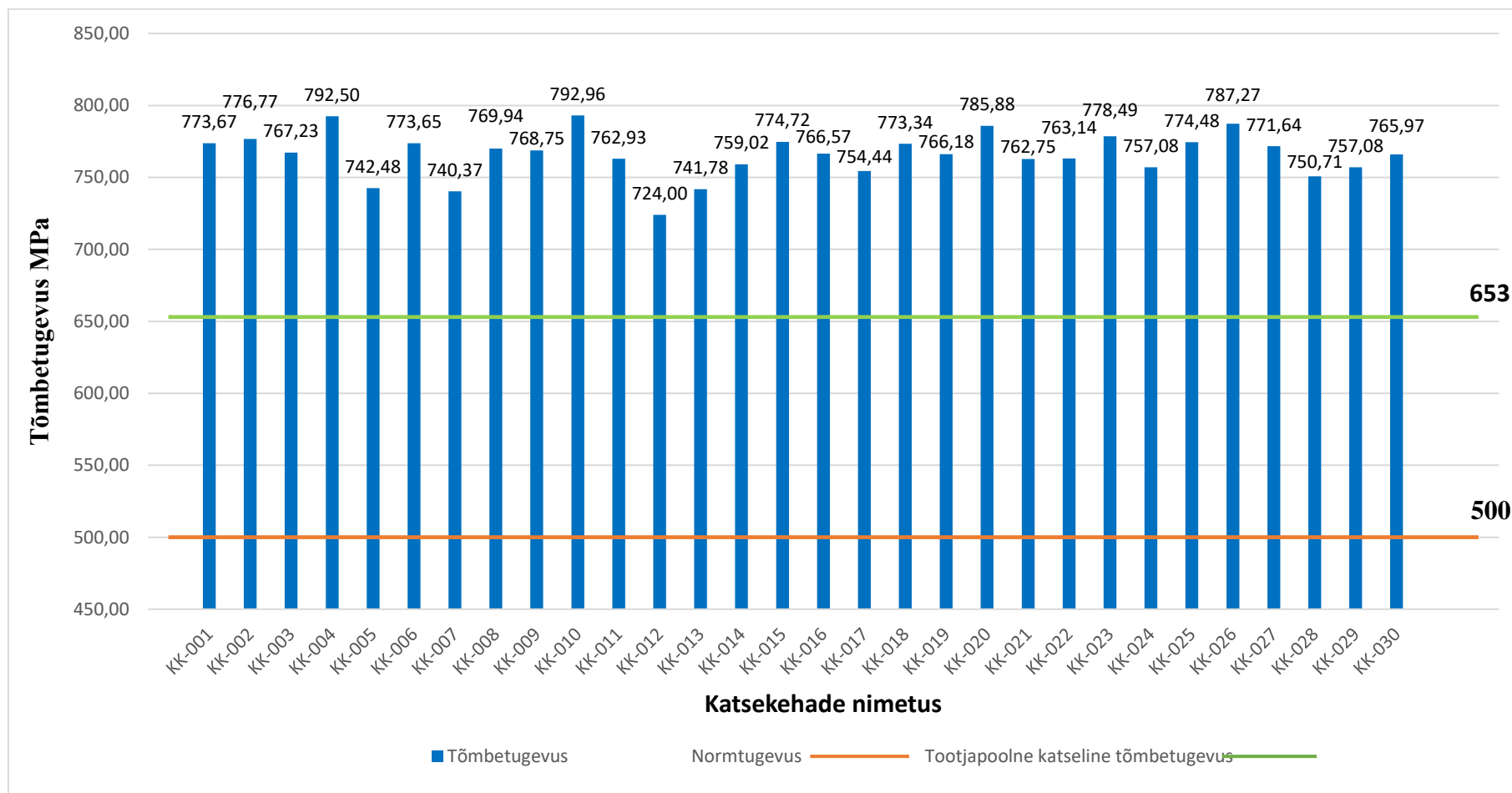
Lisa 4 järg

sarrusvarraste kogupikkus 8 meetri pikkuse mõõdulindiga, mis kuulub II täpsusklassi ning mille tolerants millimeetrites vastavalt EL normidele on $\pm 1,9$ mm. Mõõdulindi mõõtetäpsus on 1 mm. Selleks, et katsekehi ära visata, mõõdeti armatuurvarraste kogupikkus ka peale purunemist, mille järgi saab määrata jääkpikenemise ning saab kasutada kaudselt katkevenivuse arvutamisel (joonis L.4.1).



Joonis L.4.1. Katsekeha algmõõtepikkuste ning kogupikkuse märgistuste skeem.

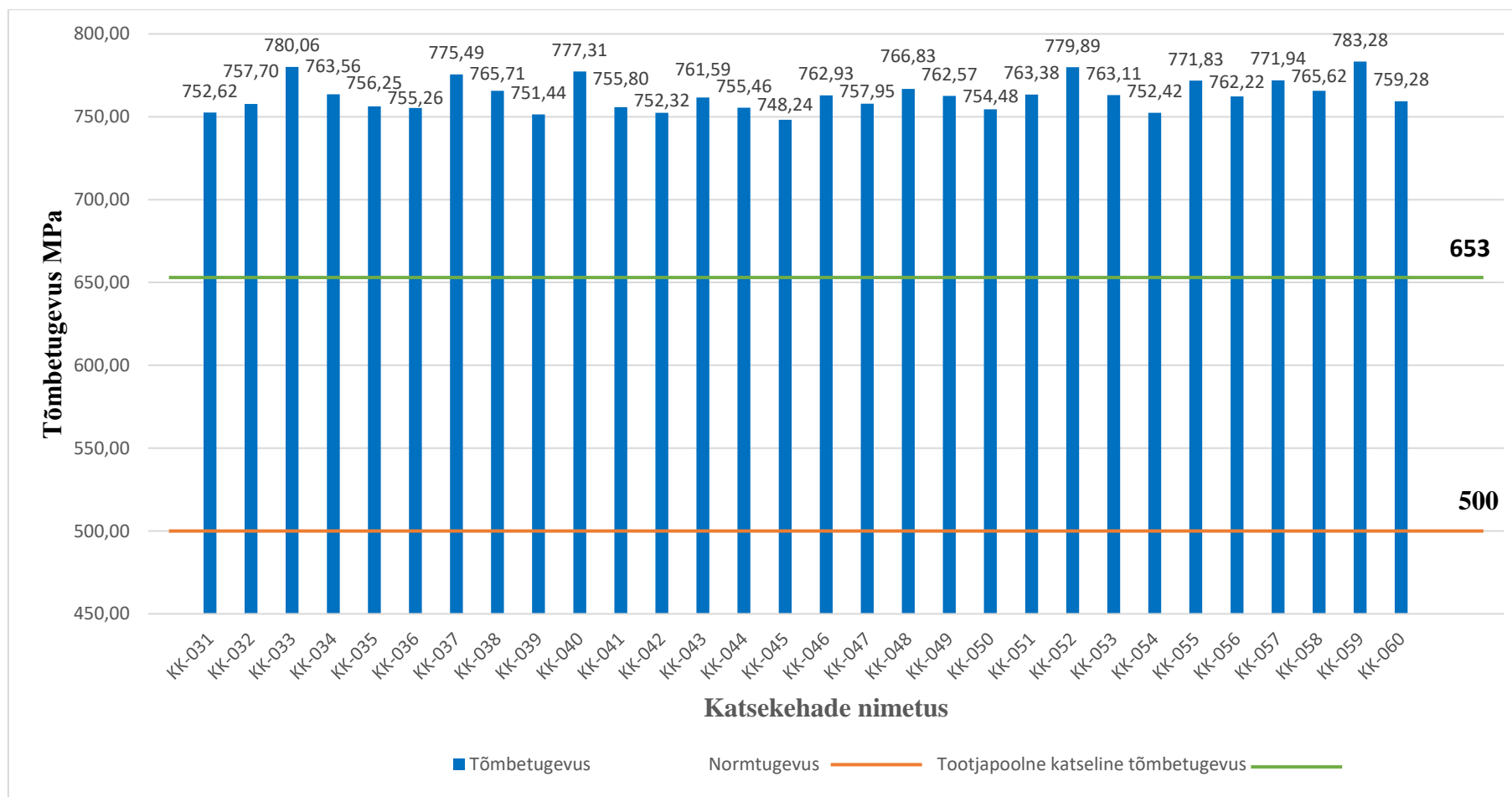
Lisa 5. Kuue katseseeria tõmbetugevused



0

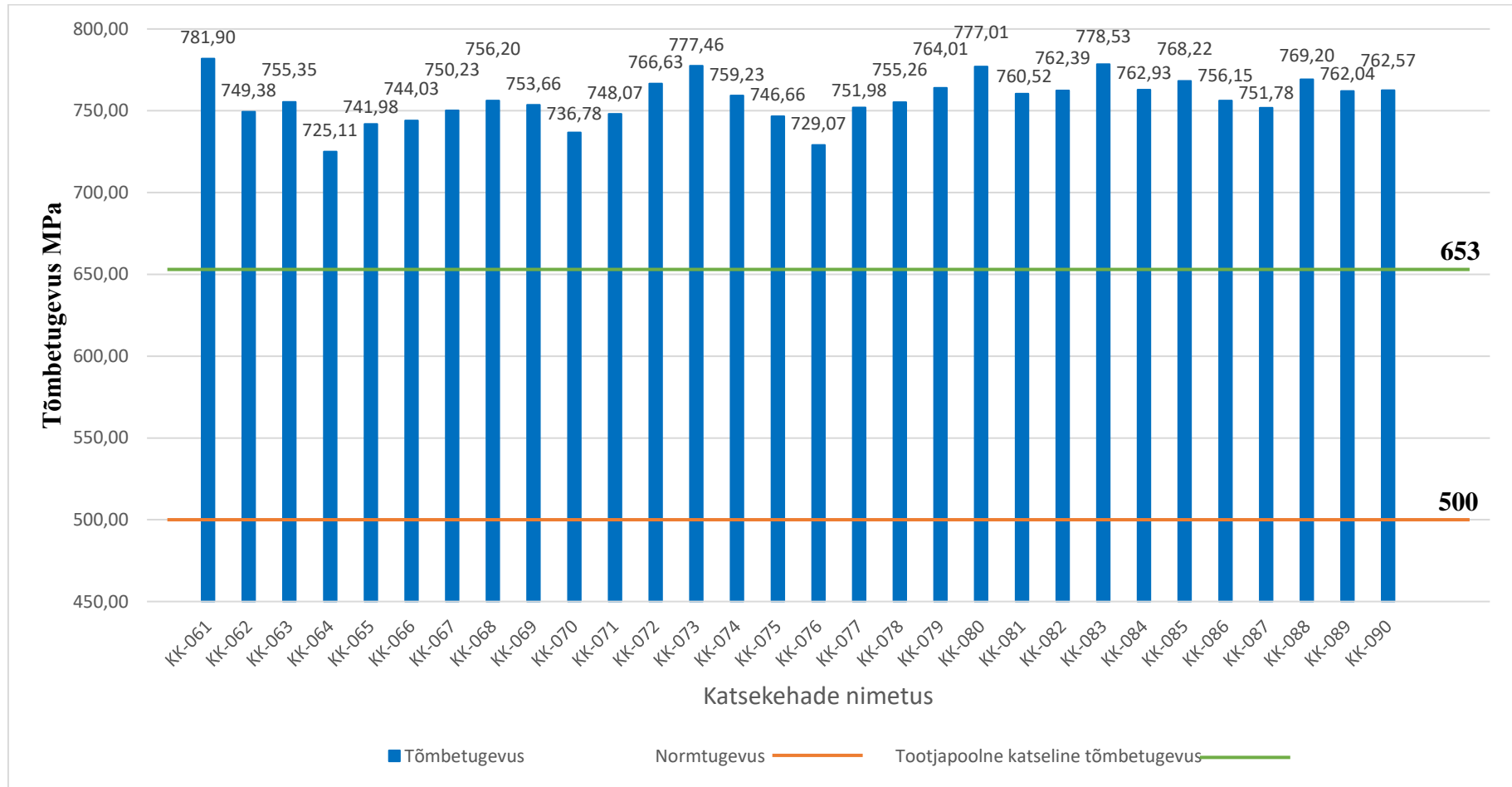
Joonis L.5.1. Esimese ehk tavakeskkonna katseseeria tõmbetugevused.

Lisa 5 järg



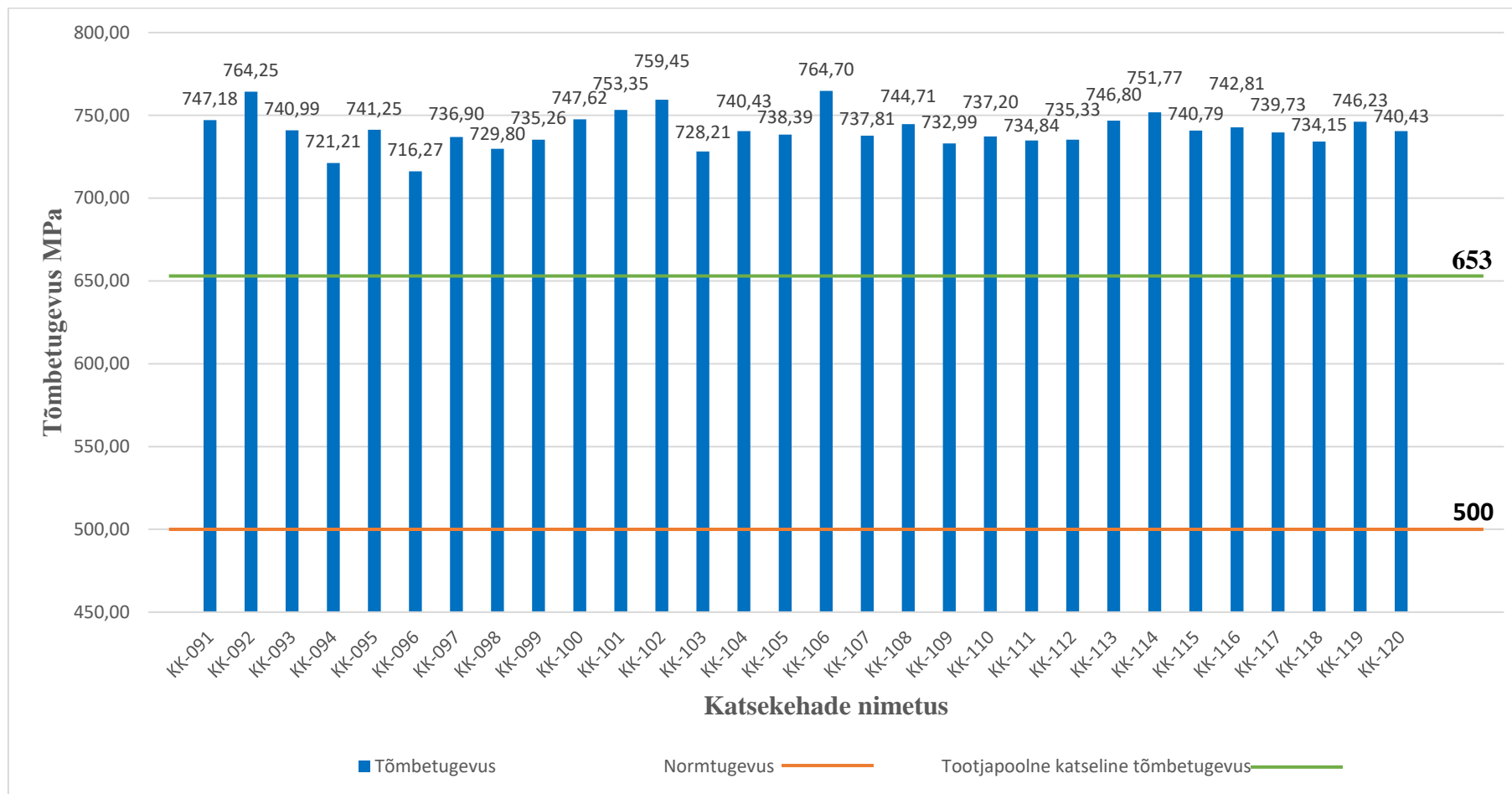
Joonis L.5.2. Teise ehk välikeskkonna katseseeria tõmbetugevused.

Lisa 5 järg



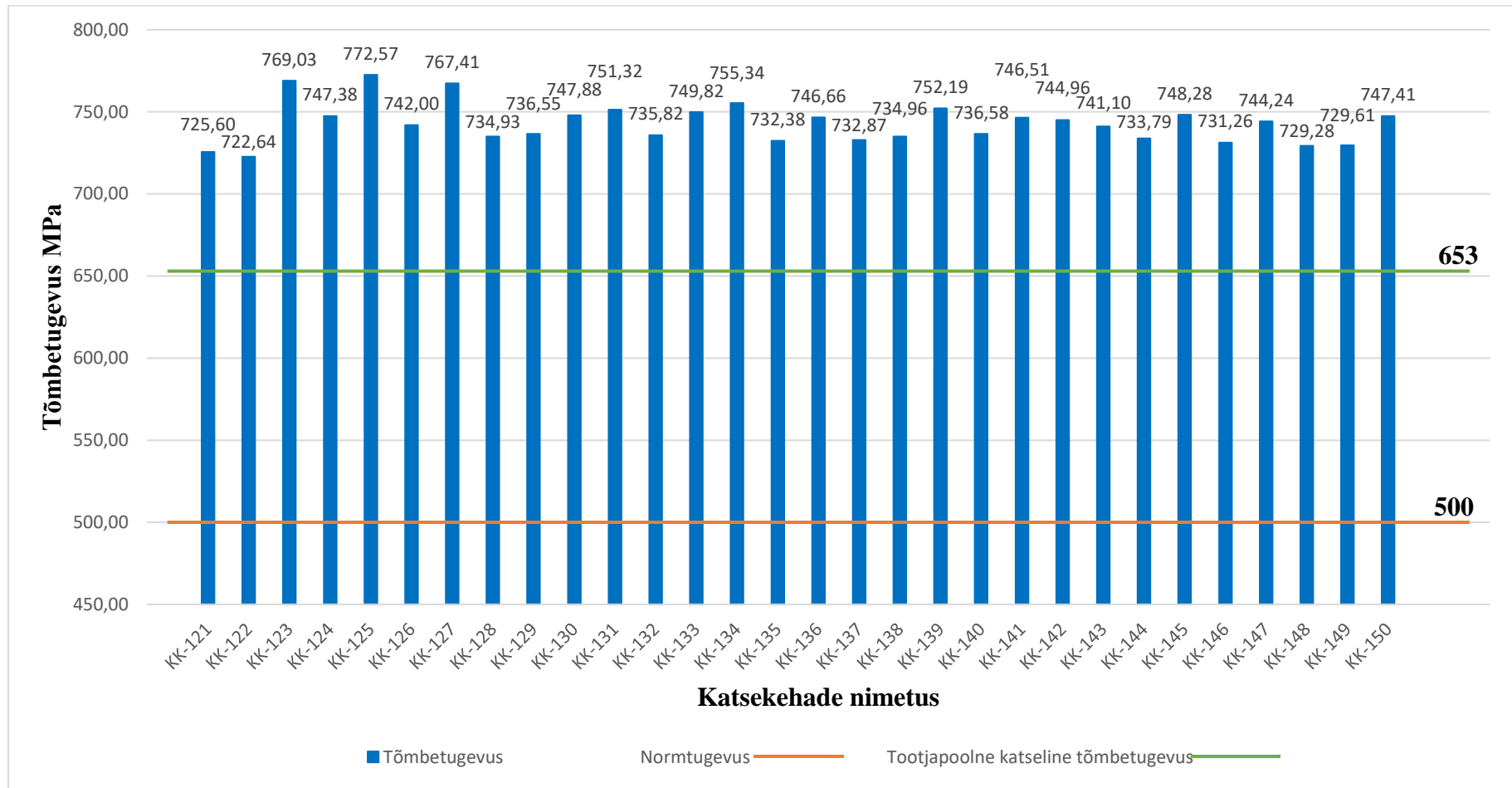
Joonis L.5.3. Kolmanda ehk agressiivse keskkonna katseseeria tõmbetugevused.

Lisa 5 järg



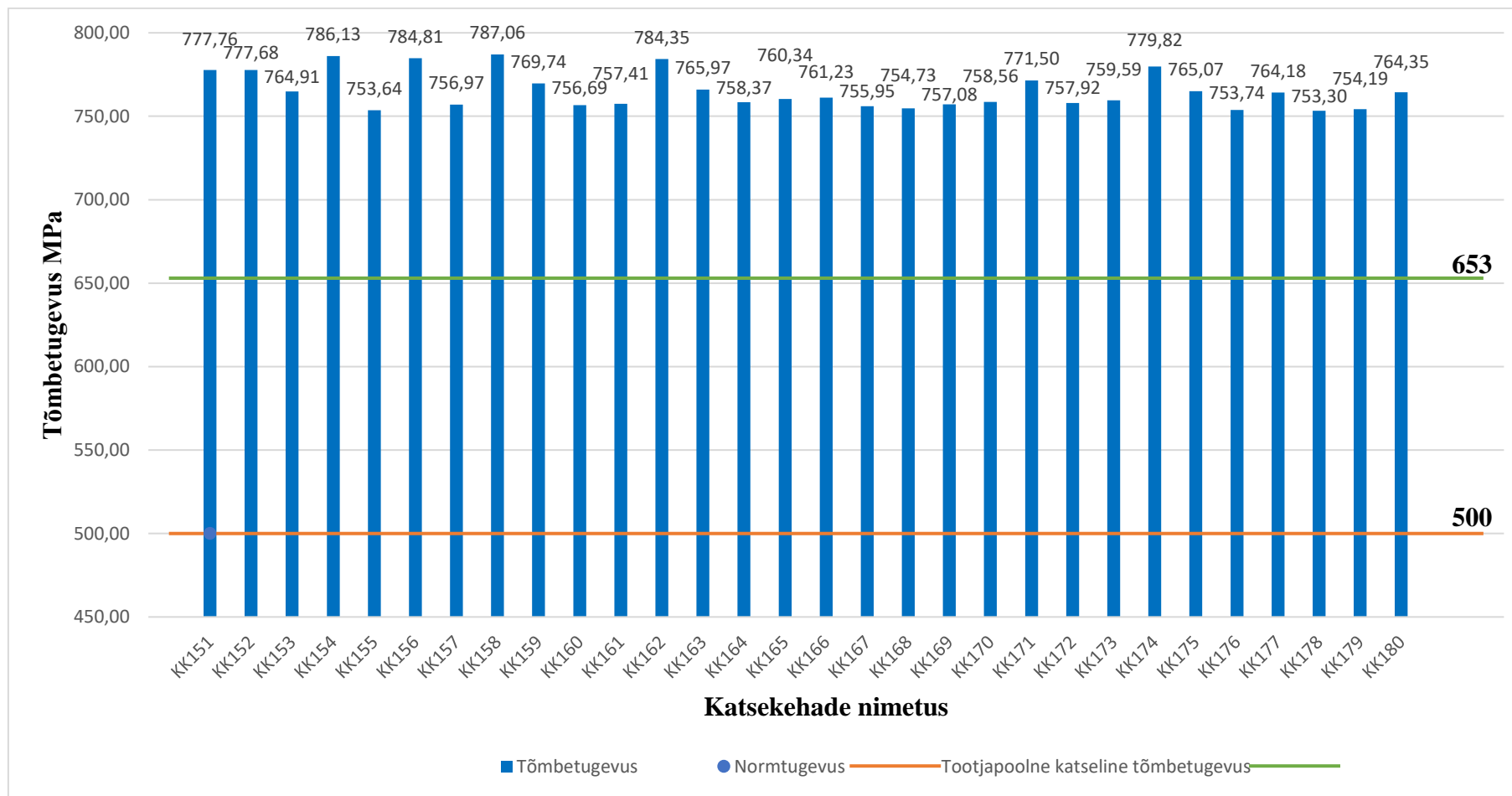
Joonis L.5.4. Neljanda ehk osaliselt happelise keskkonna katseseeria tõmbetugevused.

Lisa 5 järg



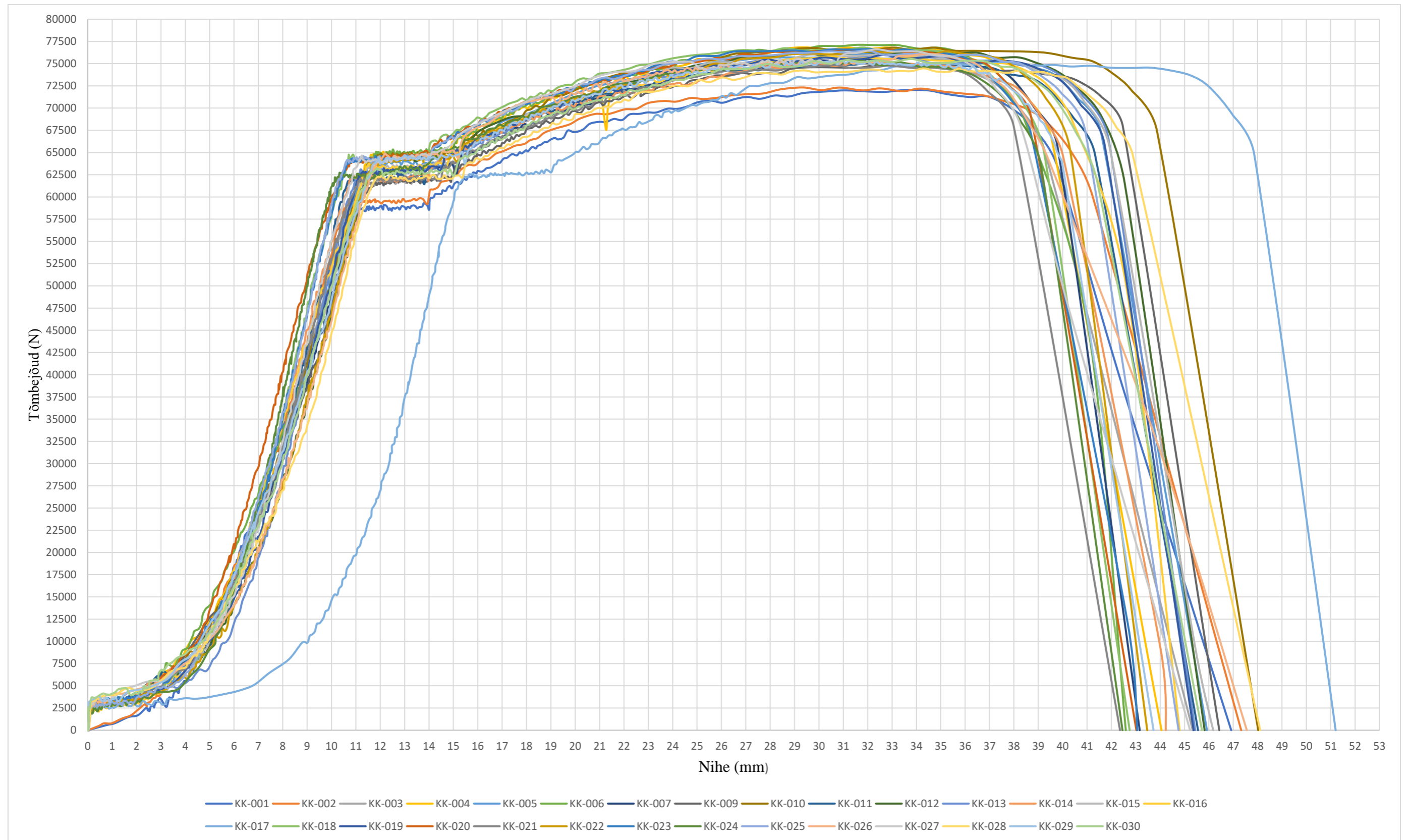
Joonis L.5.5. Viienda ehk happelise keskkonna katseseeria tõmbetugevused.

Lisa 5 järg

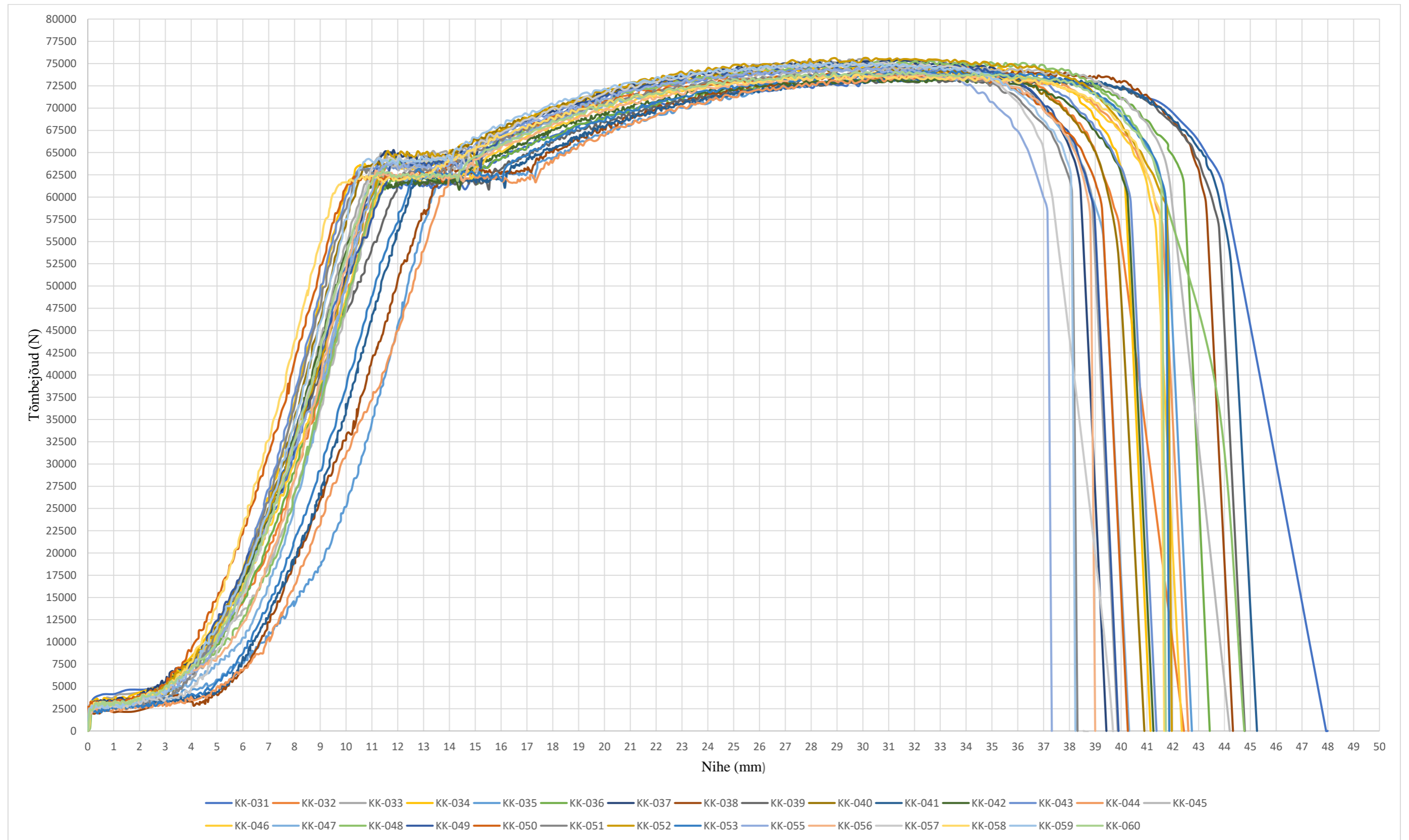


Joonis L.5.6. Kuuenda ehk leeliselise keskkonna katseseeria tõmbetugevused.

Lisa 6. Katseseeriade tõmbegraafikud

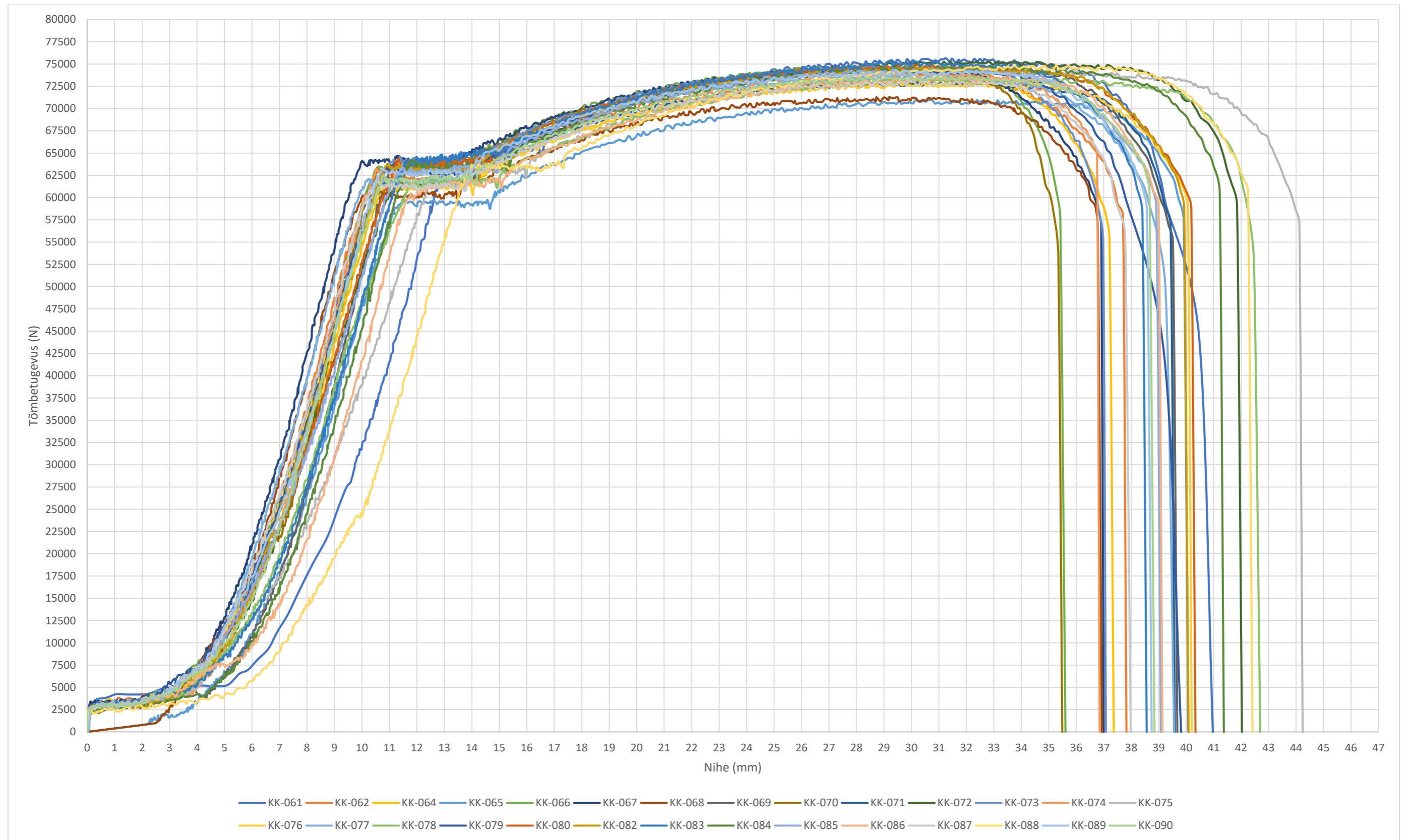


Joonis L.6.1. Esimese katseseeria tõmbegraafikud.

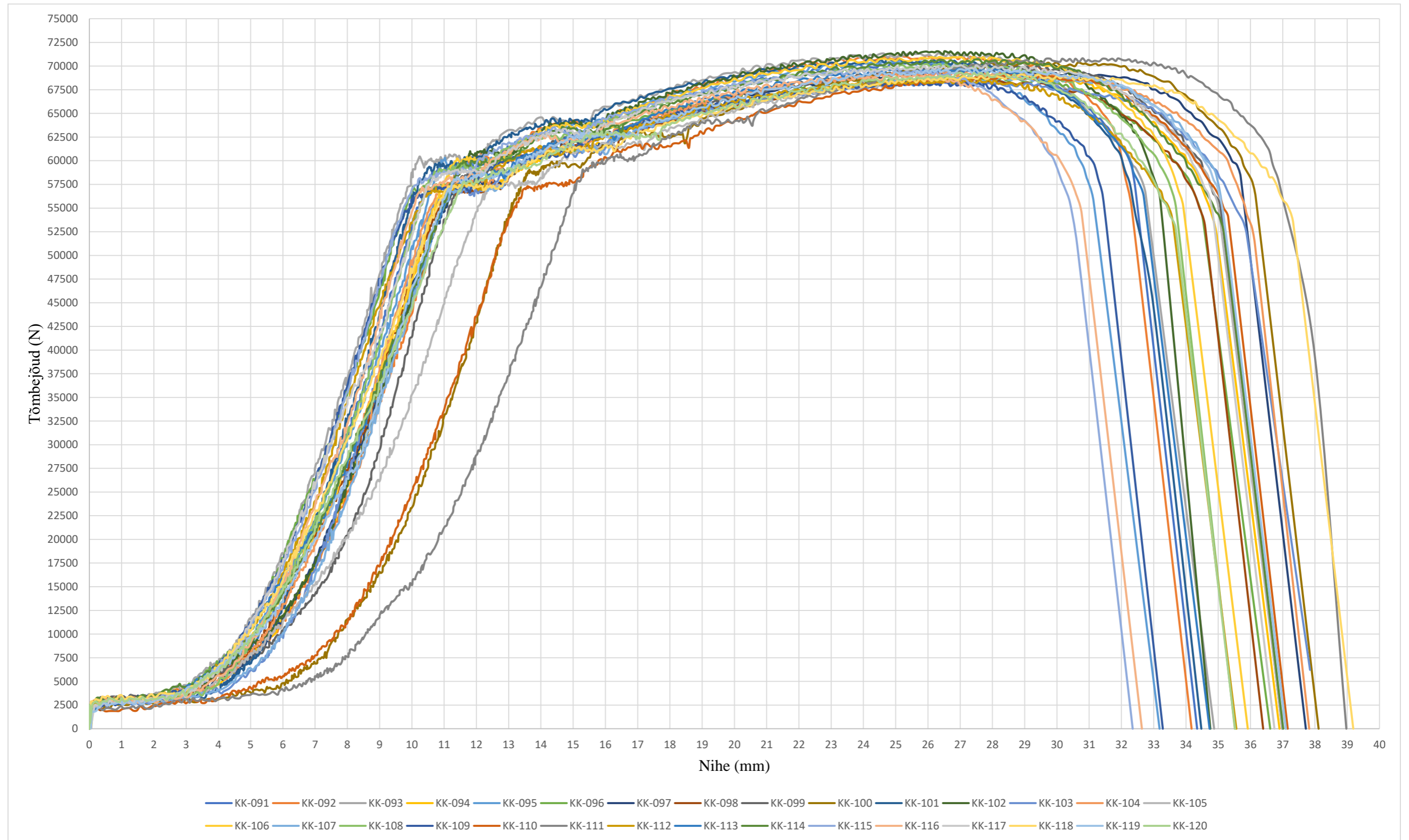


Joonis L.6.2. Teise katseseeria tõmbegraafikud.

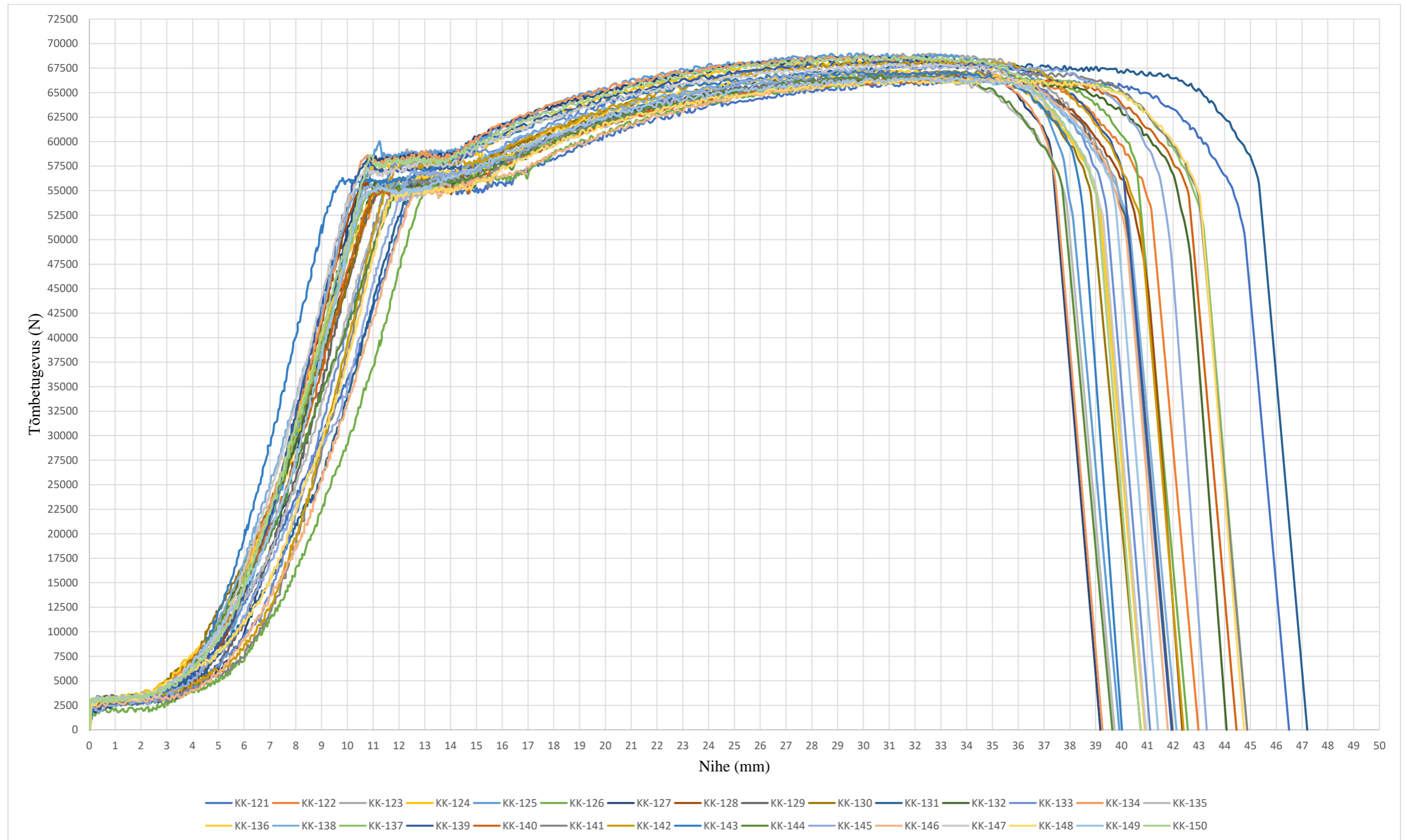
Lisa 6 järg



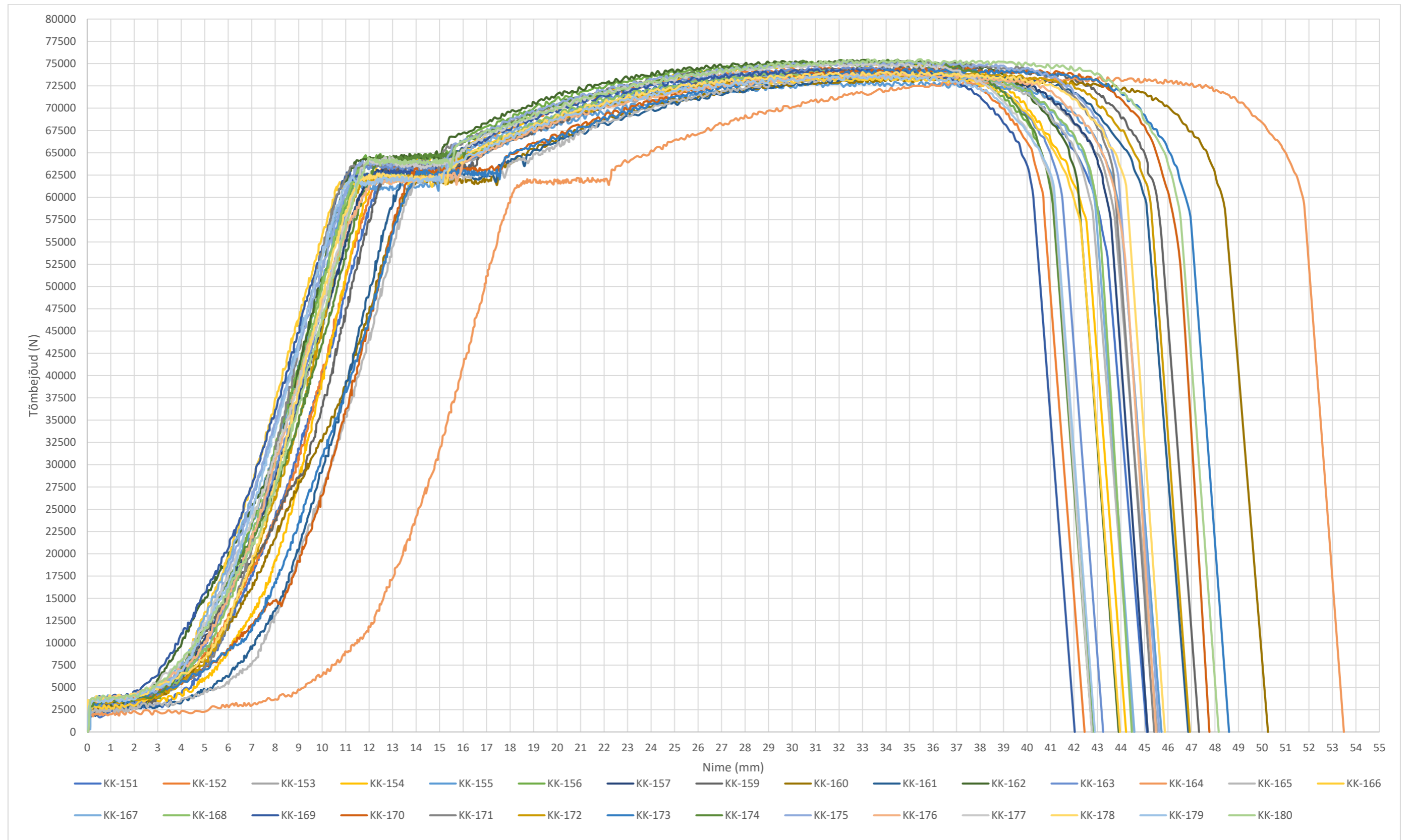
Joonis L.6.3. Kolmanda katseseeria tõmbegraafikud.



Joonis L.6.4. Neljanda katseseeria tõmbegraafikud.



Joonis L.6.5. Viienda katseseeria tõmbegraafikud.



Joonis L.6.6. Kuuenda katseseeria tõmbegraafikud.

Lisa 7. Kuue katseseeria katsetulemuste põhjal saadud andmed

Katsekeha nimetus	Tõmbetugevus (MPa)	Tinglik voolavuspiir (MPa)	Katkevenivus (%)	Algristlõike pindala S_0 (mm ²)	Jääkpikene-mine 1 (mm)	Jääkpikene-mine 2 (mm)
SEERIA 1 TAVA- EHK SISEKESKKOND						
KK-001	773,67	631,93	-	101,59	8,30	25,55
KK-002	776,77	649,11	24,31	101,83	15,72	17,19
KK-003	767,23	620,48	-	101,53	8,68	24,09
KK-004	792,50	615,94	22,38	100,82	14,52	23,73
KK-005	742,48	626,55	25,16	106,54	16,71	27,26
KK-006	773,65	636,95	17,20	103,15	11,19	23,29
KK-007	740,37	617,29	-	105,62	7,09	22,49
KK-008	769,94	641,45	16,70	101,18	10,95	23,13
KK-009	768,75	631,93	23,09	101,59	15,05	27,27
KK-010	792,96	666,92	20,77	100,76	13,49	27,74
KK-011	762,93	622,26	23,86	102,37	15,53	26,52
KK-012	724,00	612,76	-	109,67	8,07	26,01
KK-013	741,78	622,66	26,78	106,23	17,44	26,51
KK-014	759,02	630,90	24,85	103,03	16,22	25,68
KK-015	774,72	653,73	18,27	102,49	10,17	27,04
KK-016	766,57	649,60	18,58	103,45	12,16	25,10
KK-017	754,44	632,57	16,43	103,39	10,70	27,02
KK-018	773,34	633,17	-	103,45	8,13	23,94
KK-019	766,18	629,08	-	102,85	9,72	24,23
KK-020	785,88	627,13	-	101,41	7,94	23,35
KK-021	762,75	637,42	-	102,13	7,76	21,62
KK-022	763,14	614,73	-	104,11	7,75	20,92
KK-023	778,49	642,95	16,25	102,25	8,68	24,01
KK-024	757,08	630,74	21,63	103,69	14,34	24,09
KK-025	774,48	652,04	23,70	102,91	15,45	25,73
KK-026	787,27	675,66	16,14	100,35	9,99	23,91
KK-027	771,64	656,24	-	102,25	7,70	23,29
KK-028	750,71	633,40	17,03	103,57	8,92	25,19
KK-029	757,08	650,02	15,75	103,69	7,80	23,29
KK-030	765,97	646,16	-	101,83	8,07	21,93

Lisa 7 järg

Katsekeha nr.	Tõmbetugevus (MPa)	Tinglik voolavuspiir (Mpa)	Katkevenivus (%)	Algristlõike pindala S_0 (mm ²)	Jääkpikene-mine 1 (mm)	Jääkpikene-mine 2 (mm)
SEERIA 2 VÄLISKESKKOND						
KK-031	752,62	656,83	25,68	102,31	16,68	28,82
KK-032	757,70	651,11	23,20	103,21	15,05	23,75
KK-033	780,06	673,87	15,34	100,76	8,93	22,68
KK-034	763,56	653,64	20,39	101,89	13,32	24,20
KK-035	756,25	643,45	14,84	101,95	7,59	21,96
KK-036	755,26	640,50	18,75	101,95	12,25	24,94
KK-037	775,49	671,89	20,36	101,36	13,19	22,17
KK-038	765,71	654,35	21,11	101,47	13,67	24,62
KK-039	751,44	635,84	-	102,07	8,98	25,24
KK-040	777,31	668,68	-	100,35	8,13	24,14
KK-041	755,80	643,07	21,32	102,01	13,88	25,31
KK-042	752,32	633,64	-	101,95	8,08	23,65
KK-043	761,59	656,28	21,40	102,55	13,93	25,15
KK-044	755,46	641,94	22,86	102,19	14,89	23,12
KK-045	748,24	647,18	-	102,91	8,13	24,60
KK-046	762,93	647,90	16,79	101,71	8,01	24,86
KK-047	757,95	643,52	20,10	102,25	13,09	23,39
KK-048	766,83	655,47	16,66	102,37	7,11	24,84
KK-049	762,57	654,33	16,50	102,55	8,50	24,39
KK-050	754,48	636,07	16,85	102,19	8,46	24,94
KK-051	763,38	652,22	22,37	101,65	14,51	23,04
KK-052	779,89	674,26	23,63	101,30	15,33	26,08
KK-053	763,11	650,31	20,71	101,95	13,42	23,75
KK-054	752,42	635,84	20,99	102,07	13,63	25,86
KK-055	771,83	664,96	20,87	101,06	13,56	21,77
KK-056	762,22	650,79	18,77	101,41	12,18	22,68
KK-057	771,94	665,03	17,96	101,95	8,51	26,56
KK-058	765,62	645,47	18,16	100,70	11,76	22,10
KK-059	783,28	674,66	15,32	100,35	6,73	22,65
KK-060	759,28	644,65	21,72	102,07	14,07	25,47

Lisa 7 järg

Katsekeha nr.	Tõmbetugevus (MPa)	Tinglik voolavuspiir (Mpa)	Katkevenivus (%)	Algristlõike pindala S_0 (mm ²)	Jääkpikene-mine 1 (mm)	Jääkpikene-mine 2 (mm)
SEERIA 3 AGRESSIIVNE KESKKOND						
KK-061	781,90	672,47	15,41	100,52	10,25	22,14
KK-062	749,38	637,56	22,76	101,95	15,31	23,23
KK-063	755,35	639,37	22,55	100,88	14,91	25,84
KK-064	725,11	618,00	16,33	105,50	10,93	22,54
KK-065	741,98	628,35	17,61	102,97	11,71	23,62
KK-066	744,03	634,33	14,60	104,83	9,77	21,24
KK-067	750,23	644,99	15,44	103,57	6,77	23,25
KK-068	756,20	650,52	15,45	103,15	9,88	22,95
KK-069	753,66	643,65	14,75	103,63	7,36	22,08
KK-070	736,78	630,04	14,68	105,87	9,69	21,28
KK-071	748,07	629,59	18,97	102,13	12,54	25,06
KK-072	766,63	653,77	19,17	102,79	12,69	24,85
KK-073	777,46	670,09	16,56	100,58	11,04	21,49
KK-074	759,23	651,89	18,56	102,01	12,39	21,83
KK-075	746,66	639,86	17,46	103,93	9,98	26,01
KK-076	729,07	611,54	15,70	104,65	7,77	23,62
KK-077	751,98	636,44	23,00	102,13	15,26	24,93
KK-078	755,26	634,62	19,82	101,95	13,13	25,09
KK-079	764,01	655,00	21,61	101,83	14,34	22,67
KK-080	777,01	669,70	23,74	100,64	15,56	24,52
KK-081	760,52	646,54	15,89	101,77	7,22	23,79
KK-082	762,39	653,90	21,84	102,31	14,29	23,60
KK-083	778,53	665,33	15,20	100,70	9,41	22,75
KK-084	762,93	659,38	20,68	102,37	13,77	24,44
KK-085	768,22	655,94	21,67	101,53	14,39	24,23
KK-086	756,15	651,07	16,83	101,83	11,19	22,25
KK-087	751,78	639,90	18,50	101,89	12,21	22,33
KK-088	769,20	657,91	17,81	101,53	11,82	22,96
KK-089	762,04	641,25	20,81	101,83	13,70	23,83
KK-090	762,57	648,98	19,94	101,24	13,30	23,36

Lisa 7 järg

Katsekeha nr.	Tõmbetugevus (MPa)	Tinglik voolavuspiir (Mpa)	Katkevenivus (%)	Algristlõike pindala S_0 (mm ²)	Jääkpikene-mine 1 (mm)	Jääkpikene-mine 2 (mm)
SEERIA 4 OSALISELT HAPPELINE KESKKOND						
KK-091	747,18	628,56	-	98,64	4,71	12,62
KK-092	764,25	647,14	12,69	97,35	8,25	17,35
KK-093	740,99	628,45	-	100,41	5,10	12,95
KK-094	721,21	594,35	14,85	100,11	9,78	18,32
KK-095	741,25	634,93	-	99,70	4,01	12,02
KK-096	716,27	594,42	-	100,94	5,15	12,57
KK-097	736,90	610,03	13,39	98,52	2,21	19,79
KK-098	729,80	603,94	13,39	98,52	4,88	19,82
KK-099	735,26	615,41	-	99,28	5,52	13,49
KK-100	747,62	630,97	-	98,58	5,88	17,17
KK-101	753,35	637,30	-	98,23	5,22	18,26
KK-102	759,45	651,11	16,79	98,76	10,95	18,27
KK-103	728,21	600,77	-	98,87	5,80	19,67
KK-104	740,43	613,96	15,14	98,05	6,28	22,42
KK-105	738,39	612,94	-	98,05	5,13	18,54
KK-106	764,70	649,59	12,73	97,29	6,75	18,90
KK-107	737,81	608,21	-	97,99	5,95	19,26
KK-108	744,71	626,16	-	98,70	5,54	18,18
KK-109	732,99	603,70	-	98,23	5,17	15,06
KK-110	737,20	614,17	-	98,34	4,63	17,41
KK-111	734,84	618,66	-	100,70	4,41	10,18
KK-112	735,33	605,80	12,83	98,05	5,17	18,96
KK-113	746,80	621,66	-	98,29	4,96	17,13
KK-114	751,77	639,71	13,35	98,17	4,84	19,72
KK-115	740,79	618,33	-	98,81	4,51	16,42
KK-116	742,81	613,54	-	97,47	4,53	17,13
KK-117	739,73	616,78	-	99,23	6,59	20,51
KK-118	734,15	609,08	20,54	98,34	13,40	21,10
KK-119	746,23	626,10	-	98,23	4,91	12,86
KK-120	740,43	618,04	-	98,05	3,81	9,44

Lisa 7 järg

Katsekeha nr.	Tõmbetugevus (MPa)	Tinglik voolavuspiir (Mpa)	Katkevenivus (%)	Algristlõike pindala S ₀ (mm ²)	Jääkpikene-mine 1 (mm)	Jääkpikene-mine 2 (mm)
SEERIA 5 HAPPELINE KESKKOND						
KK-121	725,60	607,62	23,55	95,78	15,26	25,06
KK-122	722,64	610,26	16,07	95,21	7,49	23,65
KK-123	769,03	652,93	14,67	93,88	6,91	21,64
KK-124	747,38	631,35	-	95,67	7,31	18,02
KK-125	772,57	672,26	-	93,71	7,06	21,24
KK-126	742,00	619,56	12,81	95,55	6,44	18,91
KK-127	767,41	653,99	-	94,34	6,65	20,78
KK-128	734,93	613,84	21,51	94,98	14,00	24,16
KK-129	736,55	613,97	15,33	94,63	6,71	22,58
KK-130	747,88	625,00	-	94,40	6,47	20,65
KK-131	751,32	629,25	19,89	95,03	13,02	25,77
KK-132	735,82	617,75	-	94,86	7,25	25,36
KK-133	749,82	636,74	18,77	95,96	12,27	20,89
KK-134	755,34	649,38	13,93	95,32	6,62	20,56
KK-135	732,38	602,95	-	95,03	5,57	20,45
KK-136	746,66	631,55	-	94,69	6,39	16,74
KK-137	732,87	609,15	-	95,38	8,65	23,08
KK-138	734,96	609,15	-	95,38	7,11	23,38
KK-139	752,19	644,14	-	95,32	7,55	21,95
KK-140	736,58	610,31	-	95,03	7,95	24,59
KK-141	746,51	618,57	16,22	94,57	7,69	23,99
KK-142	744,96	624,44	15,25	96,25	6,58	22,60
KK-143	741,10	621,43	19,60	95,26	12,79	21,82
KK-144	733,79	610,45	-	95,67	5,50	17,16
KK-145	748,28	628,98	22,00	95,55	14,37	22,22
KK-146	731,26	609,03	-	95,73	6,19	20,12
KK-147	744,24	625,08	-	95,67	6,28	20,69
KK-148	729,28	599,35	16,88	95,44	9,39	24,96
KK-149	729,61	598,95	-	95,67	7,75	19,87
KK-150	747,41	647,27	18,41	94,86	12,18	22,54

Lisa 7 järg

Katsekeha nr.	Tõmbetugevus (MPa)	Tinglik voolavuspiir (Mpa)	Katkevenivus (%)	Algristlõike pindala S_0 (mm ²)	Jääkpikene-mine 1 (mm)	Jääkpikene-mine 2 (mm)
SEERIA 6 LEELISELINE KESKKOND						
KK-151	777,76	663,09	20,33	100,29	13,19	24,68
KK-152	777,68	660,88	15,00	100,17	6,67	22,07
KK-153	764,91	645,17	22,21	101,06	14,55	24,91
KK-154	786,13	672,26	15,77	100,11	7,10	23,35
KK-155	753,64	641,63	17,28	101,77	8,89	25,48
KK-156	784,81	677,25	21,27	100,41	13,90	23,23
KK-157	756,97	641,57	24,67	102,25	16,10	25,31
KK-158	787,06	682,06	21,77	99,99	14,07	23,56
KK-159	769,74	657,52	23,17	101,59	15,01	24,76
KK-160	756,69	636,95	18,62	101,89	9,36	27,44
KK-161	757,41	642,92	16,66	102,19	8,66	24,62
KK-162	784,35	665,90	15,98	100,47	7,42	23,53
KK-163	765,97	655,00	19,97	101,83	13,15	23,75
KK-164	758,37	638,21	16,35	101,53	7,80	24,09
KK-165	760,34	648,06	15,11	101,53	7,25	22,34
KK-166	761,23	640,93	-	101,41	7,21	22,23
KK-167	755,95	637,84	16,36	101,59	8,39	24,11
KK-168	754,73	639,90	23,22	101,89	15,15	25,32
KK-169	757,08	642,61	-	101,77	6,77	22,19
KK-170	758,56	644,58	20,71	101,77	13,48	24,78
KK-171	771,50	653,53	19,13	101,30	12,46	24,73
KK-172	757,92	636,85	17,27	101,59	8,17	25,48
KK-173	759,59	644,20	23,57	101,83	15,30	24,99
KK-174	779,82	668,42	15,02	100,54	6,87	22,11
KK-175	765,07	651,29	18,76	101,95	12,29	25,45
KK-176	753,74	631,06	16,84	101,89	8,54	24,86
KK-177	764,18	654,45	15,05	102,07	7,35	22,31
KK-178	753,30	631,68	24,26	101,95	15,92	26,39
KK-179	754,19	636,34	-	101,83	6,95	19,99
KK-180	764,35	650,97	18,36	102,31	11,91	26,41

Lisa 8. Katsekehad peale keskkondadest eemaldamist



Joonis L.8.1. Osaliselt happelisest keskkonnast eemaldatud katsekehad (Autori foto 2018).



Joonis L.8.2. Väliskeskkonnast eemaldatud katsekehad (Autori foto 2018).

Lisa 8 järg



Joonis L.8.3. Agressiivsest keskkonnast eemaldatud katsekehad (Autori foto 2018).

Lisa 9. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Karry Jallai,
sünniaeg 07.05.2018,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö Terassarruse tugevusomaduste uurimine erinevates keskkondades, mille juhendaja on Vello Pallav,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, _____
(kuupäev)

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)