

EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut
Maaehituse osakond



Renno Reitsnik

**PÕRANDAPINNETE KAHANEMISPINGETE
MÄÄRAMINE**

Magistritöö tehnikateaduste magistrikraadi taotlemiseks maaehituse erialal

Juhendajad: dotsent Alexander Ryabchikov
dotsent Harri Lille

Tartu 2011

Lõputöö koostas iseseisvalt. Kõigile töös kasutatud teiste autorite töödele ja andmeallikatele on viidatud. Kinnitan, et annan oma intellektuaalomandi varalised õigused lõputöö tulemuste suhtes üle Eesti Maalikoolile.

.....
kuupäev /nimi / allkiri /

Tunnistan lõputöö kaitsmisvalmiks.

Juhendajad:

.....
.....
kuupäev /nimi / allkiri /

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Renno Reitsnik		Õppekava: Maaehitus (382)	
Pealkiri: Põrandapinnete kahanemispingete määramine			
Lk.: 69	Jooniseid: 38	Tabeleid: 5	Lisasid: 7
Osakond:	Maaehituse osakond		
Uurimisvaldkond:	Betooni kahanemine		
Juhendajad:	dots. Alexander Ryabchikov dots. Harri Lille		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu 2011		
<p>Betoonpõrandate vastupidavus on tänapäeval suureks probleemiks paljudes tööstusharudes. Erilist tähelepanu pööratakse põrandate kulumiskindlusele ja seetõttu kasutatakse selle parendamiseks erinevaid pinnakõvendeid. Esineb olukordi, kus põrandapind eraldub aluspinnast ja toimub nn kihistumine, mis on tekkinud tihedast pealispinnast ning betooni kivistumise käigus välja imbuvast veest. Pinnakihi alla tekivad õhu- ja veetaskud, mille koormamisel tihendatud põrandapind tõuseb aluspinnast lahti. Pinnakõvenditel ja aluspinnal on eeldatavasti erinevad kahanemised ja seda tuleks arvestada kui üht põhjust, mis võib nõrgestada põrandakonstruktsiooni.</p> <p>Uurimustöö eesmärgiks on uurida erinevate pinnakõvendite kahanemist, arvutada kahanemispinged ja võrrelda neid tavabetooni kahanemisega. Katseseeriaid tehti neli ja iga seeria koosnes 12 katsekehast. Pinnakõvendid olid valmis kuivsegud, millele lisati vett ja valati vormidesse. Kahanemise mõõtmisi tehti kahe meetodiga: ühel juhul mõõdeti katsekeha pikkuse muutu ja paralleelselt rakendati ka poolpurustavat augumeetodit. Esimese puhul teostati mõõtmised tuginedes standardile ASTM C490 ja teise puhul vastavalt standardile ASTM E837-08. Kahanemispingete määramiseks mõõdeti katsekehade elastsusmoodulid surve- ja paindekatssetega, kasutades tensoandureid. Kahanemispinged sõltuvad materjalide elastsusmoodulitest, millest tulenevalt muutuvad kahanemispingete väärtused süsteemis alus-pinne.</p> <p>Läbi viidud katsete tulemusena toimus suurem kahanemine pinnakõvenditel kui betoonil. Pinnakõvendite elastsusmoodulid tulid erinevad. Kahanemispingete erinevused saab määravaks siis, kui pinnakõvendi paigaldatakse kivistunud aluspinnale.</p>			
Märksõnad: kahanemispinged, pinnakõvendid, betoonpõrandad, pikkuse muudu mõõtmine, augumeetod			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Renno Reitsnik		Specialty: Agricultural Building (382)	
Title: Determination of shrinkage stresses in floor coatings			
69 pages	38 figures	5 tables	7 appendixes
Department:	Department of Rural Building		
Field of research:	Shrinkage of concrete		
Supervisors:	Assoc. Prof. Alexander Ryabchikov Assoc. Prof. Harri Lille		
Place and date:	Tartu 2011		
<p>Durability of concrete floors is a major problem in many industrial facilities nowadays. Particular attention is paid to the wear resistance of the floors and therefore different surface hardeners are used to improve this property. There are situations where floor surface separates from the subbase and so-called delamination takes place, which emerged from dense top surface and infiltrating water during the curing of the concrete. Under the surface layer, air- and waterpockets are being formed and when load is applied then the compacted floor surface detaches from the subbase. Surface hardeners and subbase are expected to have different shrinkage and should be taken into consideration as one of the reasons that can weaken a floor structure.</p> <p>The aim of this study is to research shrinkage of different surface hardeners, to calculate shrinkage stresses and to compare it with shrinkage of the concrete. Four series of experiments were carried out, each series consisted of 12 specimens. Specimens were casted by adding water to the dry mixes of surface hardeners. Determination of shrinkage was carried out by two methods: by length change measurements and by semi-destructive hole-drilling method. Experimental procedure was carried out according to the standards ASTM C490 and ASTM E837-08, respectively. Modulus of elasticity was measured with strain gauges by pressure test and bending test to determine shrinkage stresses. Shrinkage stresses depend on modulul of elasticity of hardeners and which affect the shrinkage stresses in system subbase-coating.</p> <p>Test results showed that surface hardeners had higher shrinkage than plain concrete. The difference of shrinkage stresses becomes a significant when surface hardener is poured onto the hardened subbase.</p>			
<p>Keywords: shrinkage stresses, surface hardeners, concrete floors, length change measurements, hole-drilling method</p>			

SISUKORD

Sissejuhatus	6
1. Kirjanduse ülevaade	8
1.1. Betooni kahanemise mehhanism	8
1.1.1. Plastne kahanemine	8
1.1.2. Autogeenne kahanemine	13
1.1.3. Kuivamisest tingitud kahanemine	18
1.1.4. Karboniseerumisest põhjustatud kahanemine	22
1.2. Pinnakõvendid.....	24
1.2.1. Epoksüvaikkate	25
1.2.2. Kuivmeetodil paigaldatud pinnakõvendi	26
1.2.3. Märmeetodil paigaldatud pinnakõvendi.....	28
2. Pinnakõvendite ja betooni kahanemise määramine	31
2.1. Uurimustöö eesmärgid.....	31
2.2. Katsetoodika ja –seadmed.....	31
2.2.1. Katsekehad	31
2.2.2. Elastsusmooduli määramine.....	32
2.2.3. Pikkuse muudu mõõtmine	38
2.2.4. Augumeetod	41
2.3. Katsetulemused ja analüüs	45
2.3.1. Elastsusmooduli määramine.....	45
2.3.2. Pikkuse muudu mõõtmine	48
2.3.3. Augumeetod	54
Kokkuvõte	56
Viidatud allikad.....	58
Lisad.....	61
Lisa 1. Betooni retsept.....	61
Lisa 2. Freesi fiksaatori koostejoonis	62
Lisa 3. Katsekeha fiksaatori koostejoonised	64
Lisa 4. Tensoandurite tareerimiste tulemused (kõitega kaasas oleval <i>CD</i> -plaadil) ...	68
Lisa 5. Elastsusmooduli määramise mõõtmistulemused (kõitega kaasas oleval <i>CD</i> -plaadil).....	68
Lisa 6. Pikkuse muudu ja massi kahanemise mõõtmistulemused (kõitega kaasas oleval <i>CD</i> -plaadil)	68
Lisa 7. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	69

Sissejuhatus

Betoon on üks enam levinud ehitusmaterjale nii Eestis kui ka mujal maailmas, kuna ta on suhteliselt heade omadustega (vormitav, tulekindel jm) ning lihtsalt kasutatav koos teiste materjalidega (loob head tingimused nende tööks, ühtlustab temperatuuri kõikumisest põhjustatud deformatsioone, vähendab agressiivse keskkonna mõjusid, näiteks terasele) nn ka komposiidina (liitmaterjalina). Siiski on betooni kivinemine äärmiselt keeruline protsess, millega võivad kaasneda ka betooni omadusi või välimust (oluline teatud konstruktsioonides) kahjustavad protsessid. Üheks selliseks protsessiks on betooni kahanemine kivinedes [1].

Pinnakõvendeid kasutatakse uute betoonpõrandate kulumiskindluse suurendamiseks ja betoonipinna tolmamise takistamiseks. Pulbrilisi pinnakõvendeid valmistatakse üldjuhul valitud kvartsibaasilistest kividest ning tsemendist. Värvilistes toodetes kasutatakse anorgaanilisi pigmente värvitooni saavutamiseks. Üldisemad kasutusalaad: laod, tootmisruumid, kauplused, hallid, parkimismajad, laadimisestakaadid, jäähallid, kergema koormusega tootmishallid, mehaanikatöökojad. Pulbrilised pinnakõvendid puistatakse betoonipinnale viimase plastilises staadiumis ja hõõrutakse terviklikuks monoliitseks pinnaks. Nii saavutatakse põrand, mis on suurema kulumiskindlusega, tolmuva ja kergelt puhastatav, tasane, valgust peegeldav, halvasti vedelikke neelav, soovitud värvitoonis. Selline põrand loob meeldiva töökeskkonna. Kuna pulbriline pinnakõvendi sisaldab kvartsibaasilisi kivikesi ja tsementi, siis võib eeldada, et kahanemine toimub sarnaselt betoonile.

Betooni kahanemist võib jagada varajaseks ja pikaajaliseks [2]. Varajaseks betooni kahanemiseks loetakse mahumuutusi segus esimese 24 tunni jooksul peale valamist. Varajane kahanemine jaotatakse omakorda kuivamisest tingitud kahanemiseks, autogeenseks kahanemiseks ja termilistest protsessidest tingitud kahanemiseks.

Kuivamisest tingitud kahanemist põhjustab vee aurustumine betooni pinnalt. Autogeenset kahanemist põhjustavad betooni sees toimuvad reaktsioonid. Mõnikord viidatakse varajasel perioodil toimuvale kahanemisele ka kui plastsele mahukahanemisele. Termin plastne tuleneb sellest, et värske betoon on veel vedel ja tekkinud pole nn skelett. Autogeenset kahanemist nimetatakse ka keemiliseks kahanemiseks. Mõlemal juhul kaasnevad kahanemisega tõmbepinged, mis võivad veel täielikult kivistumata betoonis põhjustada mikropragude tekkimise ja seega oluliselt nõrgestada pinnakihti.

Pikaajaliseks kahanemiseks loetakse betooni mahumuutusi, mis toimuvad peale 24 tunni möödumist. Pikaajaline kahanemine jaotatakse autogeenseks, kuivamisest tingitud, termilistest protsessidest tingitud ja karboniseerumisest põhjustatud kahanemiseks [1].

Selleks, et vähendada või isegi vältida betooni mahukahanemist, kasutatakse mitmesuguseid erinevaid võtteid alates sobivate keskkonnatingimuste loomisest kuni erinevate täitematerjalide, lisandite või kiudude kasutamiseni.

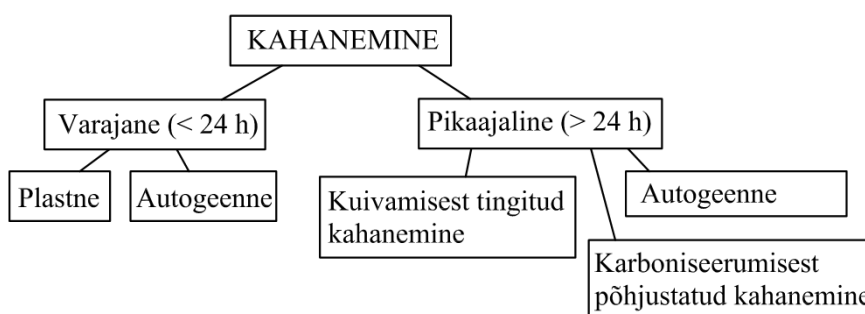
Käesoleva magistritöö eesmärgiks on mõõta kahel meetodil pikaajalist kahanemist betoonil ja erinevatel pinnakõvenditel ning määrata kahanemispinged. Katsed viiakse läbi kolme erineva pinnakõvendiga ja võrreldakse ilma lisanditeta betooni kahanemisega.

Magistritöö esimeses osas antakse kirjandusallikate põhjal lühike ülevaade betooni kahanemisega seotud mehhanismidest ning kirjeldatakse erinevaid kahanemise liike. Lisaks kirjeldatakse enamlevinud pinnakõvendeid. Töö teises osas antakse ülevaade katsete meetodidest ja -tulemustest.

1. Kirjanduse ülevaade

1.1. Betooni kahanemise mehhanism

Betooni kahanemine jaotatakse neljaks põhitüübiks: plastne, autogeenne, kuivamisest tingitud kahanemine ja karboniseerumisest põhjustatud kahanemine. Liigitus on kujutatud joonisel 1.1 [2].



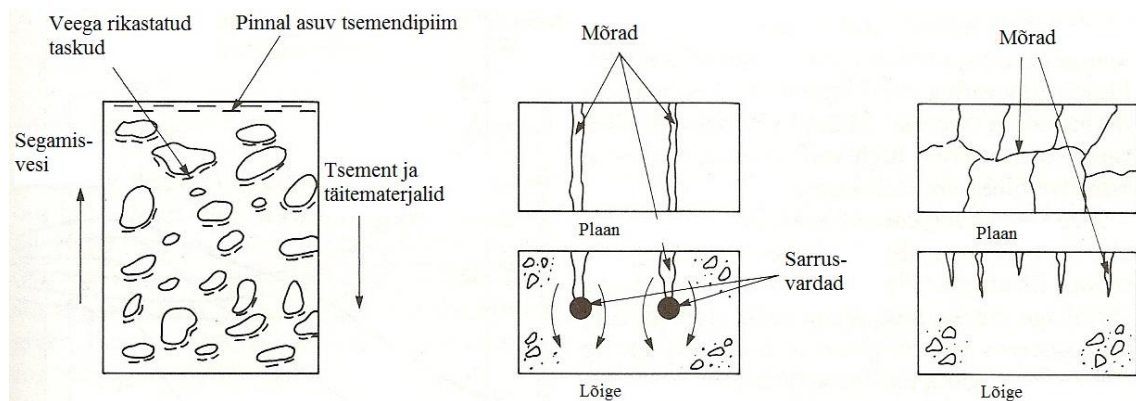
Joonis 1.1. Kahanemise liigitus [2]

Plastne kahanemine esineb tänu niiskuse kaole betooni kivinemise algstaadiumis. Autogeenne kahanemine on seotud vee kaoga kapillaarpooridest, mis tekib tsemendi hüdraatumisel [3]. Selline kahanemine kipub suurenema kõrgematel temperatuuridel ja suurema tsemendi sisalduse puhul. Üldiselt on autogeenne kahanemine suhteliselt väike ning pole eristatav kuivamisest tingitud kahanemisest. Karboniseerumisest põhjustatud kahanemine tekib tsemendi hüdraatumise saaduse keemilisel reaktsioonil õhus leiduva süsinikdioksiidiga. Selline kahanemine toimub tavaliselt betooni pinnal [3].

1.1.1. Plastne kahanemine

„Vaba vesi“ (*bleed water*), mis tõuseb betooni pinnale, on avatud keskkonnale ja aurustumisele. Kui vee aurustumiskiirus on suurem vee pinnale tõusmise kiirusest, siis

toimub betooni pinnal veesisalduse vähenemine ja leiab aset plastne kahanemine s.o kuivamisest tingitud kahanemine ajal, mil betoon on veel plastses olekus. Betoonisegu seab piirangud kahanemisele, mis põhjustab pinnal tõmbepingeid. Kuna betooni tõmbetugevus on suhteliselt väike, siis tekivad plastsest kahanemisest tingitud mõrad. Mõranemise muster (joonis 1.2) koosneb paljudest mikropragudest ja on seega selgesti eristatav mõradest, mis on tingitud plastsest tihenemisest [4].



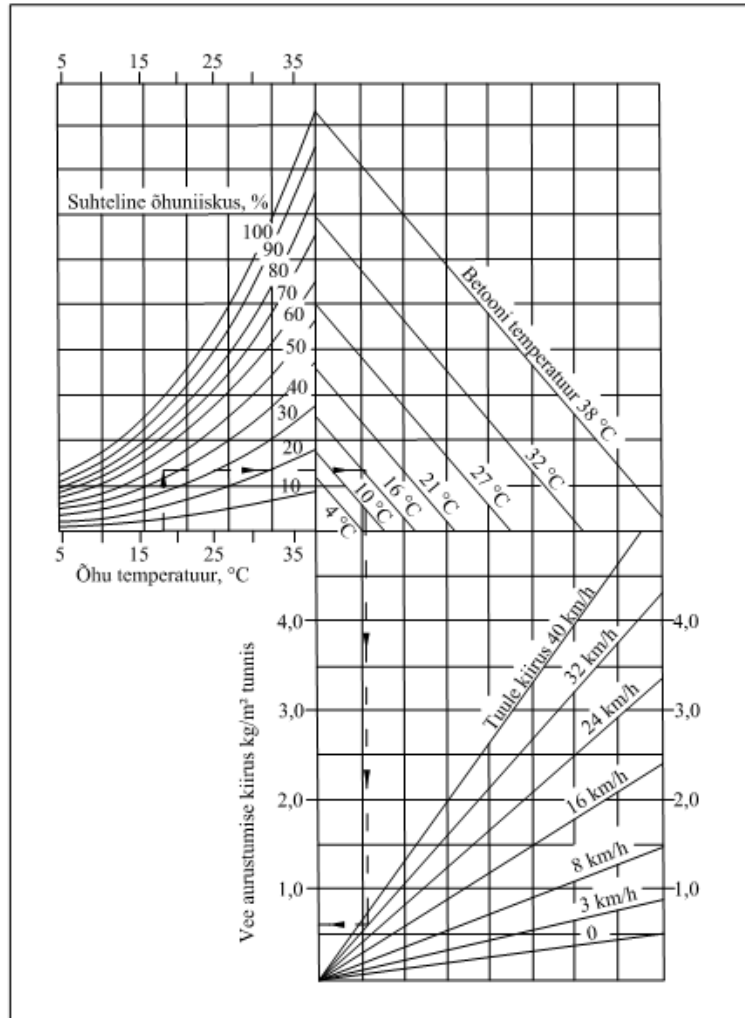
Joonis 1.2. Plastne kahanemine [4]

Plastse kahanemise suurust mõjutab betooni pinnalt ära aurustunud vee hulk, mis on tingitud temperatuurist, ümbritseva keskkonna suhtelisest niiskusest ja tuule kiirusest (tabel 1.1). Kuid vee aurustumise hulga järgi ei saa täpselt määrata plastset kahanemist, sest palju sõltub betoonisegu jäikusest. Vee aurustumise õigeaegne ennetamine pärast valu aitab vähendada võimalikku mõrade tekkimist.

Tabel 1.1. Vabas õhus kivistuva puhta tsemendipasta plastne kahanemine (suhteline niiskus 50% ja temperatuur 20°C) [5]

Tuule kiirus		Kahanemine 8 h pärast paigaldamist (10^{-6})
m/s	mph	
0	0	1700
0,6	1,35	6000
1,0	2,25	7300
7...8	16...18	14000

Plastsest kahanemisest tingitud praod tekivad suure tõenäosusega siis, kui betoon on soe ja välisõhk on kuiv (suhteline õhuniiskus on madal). Sellised praod asuvad täiesti juhuslikes kohtades [5].

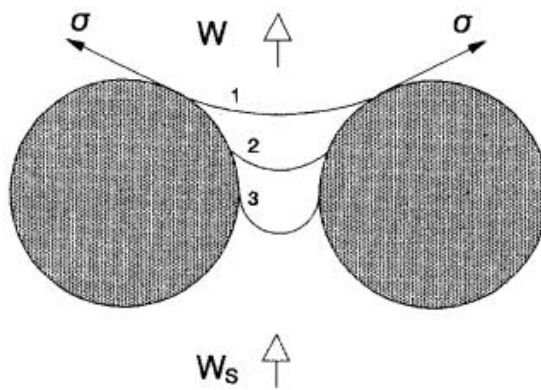


Joonis 1.3. Vaba vee aurustumise kiiruse määramise graafik [6]

Joonist 1.3 saab kasutada plastsest kahanemisest tingitud mõrade tekkimise ligikaudseks määramiseks. Graafik on koostatud pinnalt vee aurustumise järgi. See võtab arvesse õhutemperatuuri, suhtelise õhuniiskuse, tuule kiiruse ja betooni temperatuuri. Õhutemperatuuri, suhtelise õhuniiskuse ja tuule kiiruse puhul kasutatakse andmeid, mida saadakse ilmaprognoosidest. Kindlasti tuleks arvestada, et keskkonna tingimused ei ole ehitusplatsil samad. Betooni temperatuuri on võimalik mõõta kohapeal termomeetriga. Kui vee aurustumise kiirus ületab $1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, siis võib esineda plastsest kahanemisest tingitud pragusid [6].

Poorides olevate tühimike ja sisevee vastastikmõju sõltub niiskuse liikumisest, näiteks betoonipinnale imbuvast vabast veest. Värske betooni kuivamise ajal vee aurustumise

kiirus võib ületada pinnale kerkiva vee kogust ning aurustumise jätkudes taandub tinglikult aurustuva vee kiht järjest sügavamale katsekeha sisse [2]. Suuremad poorid kipuvad tühjenema esimesena, mille järel tühjenevad järjest väiksemad poorid. Kui poori läbimõõt on tühjenemisel vähenenud kuni suuruseni 50 nm, siis hakkavad moodustuma nõgusad kapillaarmeniskid. Kaardus meniskite teke katkestab tasakaalu pooris oleva vedeliku surve (*pore fluid pressure*) ja poori väliskeskkonna veeauru rõhu vahel. Nendevaheline erinevus põhjustab pingeid [7]. Joonisel 1.4 on näidatud, kuidas niiskuse liikumise ja kapillaarpingete tekke tõttu tõmmatakse veetaseme kiht järjest sügavamale betooni keha sisse. Mida sügavamal on menisk, seda suuremad kapillaarpinged tekivad.



Joonis 1.4. Meniski sügavuse ja kapillaarpingete sõltuvus

Betooni poorides olev vee surve või pigem imemisjõud tekib kapillaarjõudude mõjul. Imemisjõud on antud Laplace'i valemiga (1.1), kus kapillaarjõud sõltub meniski raadiusest.

$$s = \frac{2\sigma}{r}, \quad (1.1)$$

kus s – kapillaarides imavast jõust tekitatud surve (Pa),
 σ - pindpinevus õhu ja vee piiril (~0,074 N/m),
 r – meniski raadius (m).

Valemist tulenevalt on näha, et mida suurem on vee aurustumiskiirus ning sügavamal on meniski asukoht ja väiksem raadius, seda suuremad on kapillaarpinged ja seetõttu on ka suurem kahanemine. Kapillaarsurve võib olla vahemikus 10-100 MPa sõltuvalt õhuniiskusest [2].

Teine võimalus leida pingeid on läbi poori struktuuris oleva suhtelise õhuniiskuse, mida väljendab Kelvin-Laplace'i valem (1.2) [7]

$$s = -\frac{\ln(\varphi)RT}{v_m}, \quad (1.2)$$

kus s – kapillaarides imavast jõust tekitatud surve (Pa),
 φ – suhteline õhuniiskus katsekehas (%),
 R – universaalne gaasikonstant (8,314 J/Kmol^{°K}),
 T – temperatuur (°K),
 v_m – vee molaarruumala (0,0181 m³/Kmol).

See valem lubab kasutada betooni sisemist suhtelist niiskust parameetrina, et koostada mudel sisemiselt piiratud kuivamisest tingitud kahanemise poolt põhjustatud jääkpingete gradiendile.

Plastset kahanemist on võimalik vähendada järgmiste abinõudega:

1. Niisutada aluspinnast ja raketist enne betooni paigaldamist, kuid minimaalsel kogusel, mis kulub plastse kahanemise mõrade vältimiseks (võimaluse korral lõpetada aurutõkete kasutamine).
2. Kaitsta betooni kuivamise eest veepihustitega või katta see näiteks valgete plastikust tahvlite või niiske riidega. Betoon peaks olema kaetud paigaldamisest kuni viimistlemise alguseni. Aurustumise aeglusteid (nn ühemolekuline kile) võib samuti kasutada peale betoonipinna esmast tasandamist, et vähendada vee aurustumist enne lõplikku viimistlemist ja kivilinemist.
3. Paigaldada tuuletõkked, et kaitsta betoonipinda liigse tuule eest.

4. Püstitada kuuma ilma korral sirmid, mis kaitseksid betooni ülekuumenemise eest.
5. Vähendada kuumade ilmade korral betooni segamiseks kasutatava vee temperatuuri, lisades segamisveele jääd ja/või piserdada külma veega täitematerjalide varusid. Aurustumine aitab jahutada täitematerjale.
6. Vältida viivitusi, et betoon saaks platsile transporditud võimalikult kohe kui betoonisegu on valmis. Pikk segamine või loksutamine tõstab betooni temperatuuri.
7. Viivitada iga viimistlusastmega maksimaalselt kaua, ilma et seaks ohtu lõpptulemust.
8. Betooni kivistumine võiks alata kohe pärast viimistlemist [6].

Plastne kahanemine on seda suurem, mida suurem on tsemendi sisaldus segus ning mida väiksem on vesitsementtegur. Sõltuvus vaba vee pinnale tõusmise ja plastse kahanemise vahel ei ole lineaarne. Näiteks tardumise aeglustumine võimaldab suuremat vaba vee hulka betoonipinnal ja seega on suurendatud oht plastsele kahanemisele. Teisalt suurem vee eraldumine väldib liiga kiiret kuivamist betoonipinnal ja see vähendab plastsest kahanemisest tingitud pragunemist. Praktikas on pragude teke, mis saab määravaks [5].

1.1.2. Autogeenne kahanemine

Autogeenne kahanemine tähendab betooni mahumuutust ilma niiskuse kandumiseta väliskeskkonda. See on saaduseks keemilisest kahanemisest koos tsemendi hüdraatumisega [2].

Autogeenne kahanemine on põhjustatud iseeneslikust kuivamisest (*self-desiccation*), mis tekib kivilinenud tsemendikeha mikrostruktuuris olevate pooride tekkimisega ning tsemendi hüdraatumiseks vajamineva vee kulumisega. Selleks, et mõista autogeenset kahanemist, tuleks selgitada keemilist kahanemist, mikrostruktuuri ja iseeneslikku kuivamist [8].

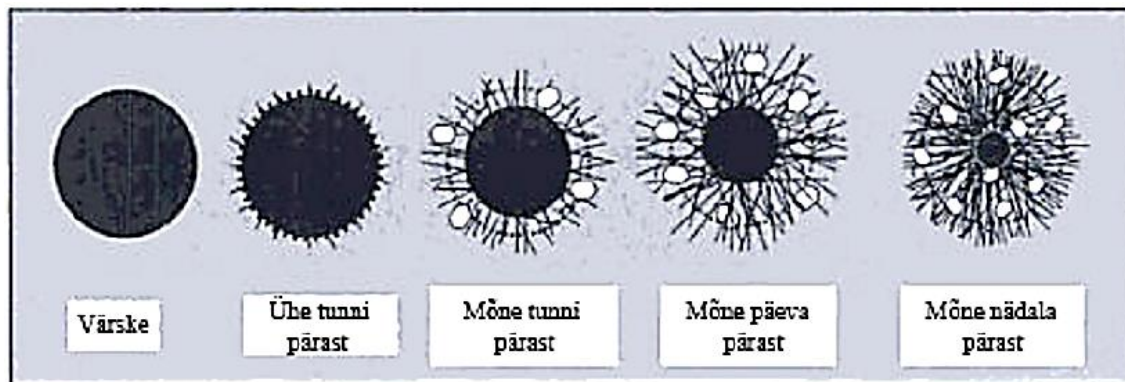
1) Keemiline kahanemine – tsemendi mineraalid toodavad hüdraatumisel erinevaid saadusi. Tahke ja vedela faasi koguruumala väheneb tänu reaktsioonidele. Tsement on betooni osis, mis keemilisel reaktsioonil seob betoonisegu üheks massiks. Põhilised tsemendimineraalid vajavad reageerimiseks vett. Tekkivad reaktsioonid on eksotermilised ning tulemuseks on reaktsioonisaaduste ruumala vähenemine. Selline reaktsioon leiab aset koheselt peale vee ja tsemendi segunemist ning reaktsioonikiirus on suurim esimeste tundide ja päevade jooksul [2, 8]. Tabelis 1.2 on antud, kuidas aliit (C_3S) kahaneb protsentuaalselt.

Tabel 1.2. Aliidi keemilise kahanemise arvutus [8]

	Hüdratatsioon				Keemiline kahanemine (%)
	$C_3S + 5.25H_2O \rightarrow C_{1.75}SH_{4.0} + 1.25CH$				
Mass	228.3	94.6	230.3	92.6	3.16
Tihedus	3.12	1.00	1.90	2.24	
Ruumala	73.2	94.6	121.1	41.3	
	$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$				
Mass	456.6	108.1	342.5	222.3	10.87
Tihedus	3.15	1.00	2.71	2.24	
Ruumala	145.0	108.1	126.4	99.2	

Tsemendipasta (*cement paste*) keemiline kahanemine ei ole mõjutatud vesitsementtegurist. Vesitsementtegur ning tsemendi peeneteralisus määravad keemilise reaktsiooni kiiruse. Sajaprotsendilise hüdratsioonimäära puhul mõjutab kahanemise lõplikku suurust ainult tsemendi keemiline koostis [2].

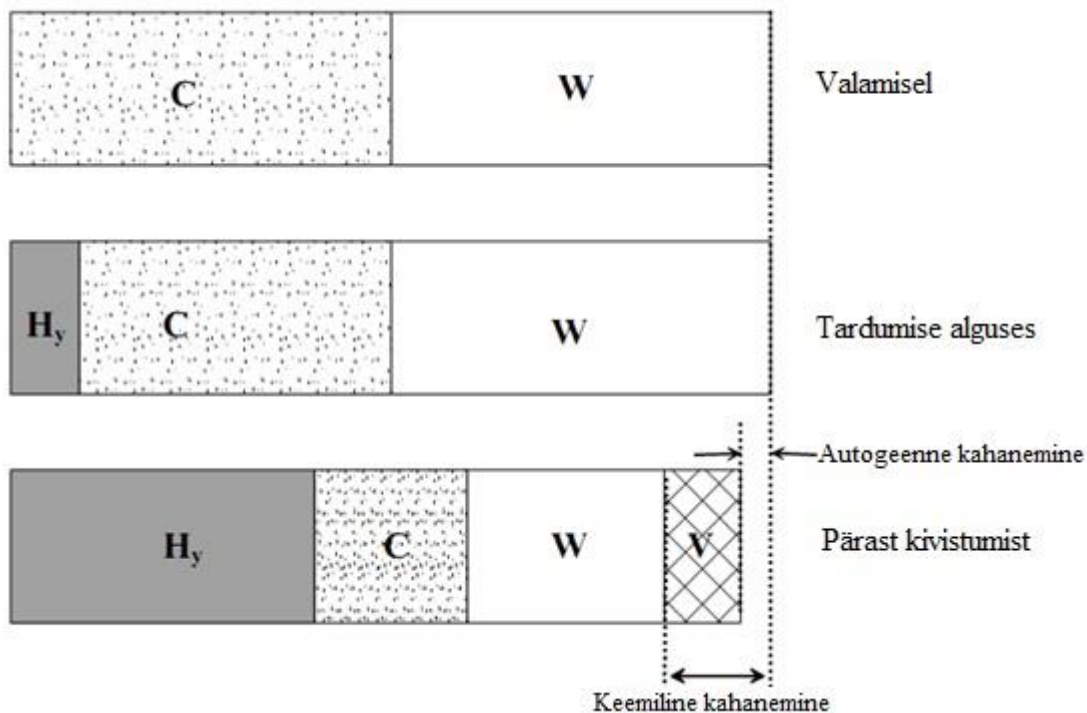
2) Mikrostruktuur – pärast skeleti moodustumist tsemendi tardumisel ei saa kivilinenud tsemendi keha kahaneda enam nii palju kui hüdraatumisest tingitud ruumala vähenemine (keemiline kahanemine) [8]. Mikrostruktuur moodustub betooni kivilinemise ajal toimuvate hüdraatumise füüsikaliste protsesside käigus, mis on sama olulised kui eelnevalt selgitatud keemilised protsessid. Joonisel 1.5 on kujutatud ühe tsemenditera hüdraatumist vees, mis kirjeldab betooni kivilinemisel tekkivat struktuuri.



Vesi
 Hüdratiseerumata tsement
 Hüdraadid (peamiselt C-S-H)
 Kaltsiidi kristallid

Joonis 1.5. Ühe tsemenditera hüdraatumine [1]

3) Iseeneslik kuivamine – vaba vee kogus kivistunud tsemendi kehas järk-järgult väheneb tänu tsemendimineraalide hüdraatumisreaktsioonile ning tekivad peenetera sarnased poorid. Iseenesliku kuivamise määr on tugevalt seotud mikrostruktuuri moodustumisega [8].



Joonis 1.6. Keemilise ja autogeense kahanemise vaheline sõltuvus horisontaalses suunas [2]

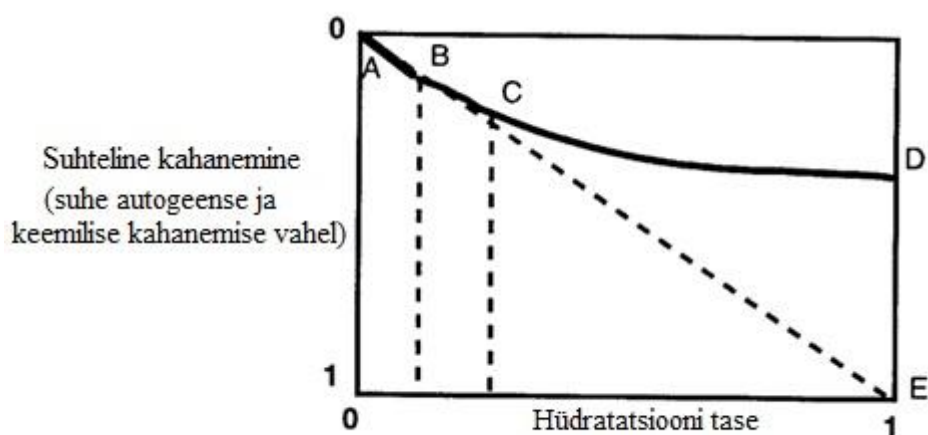
Joonisel 1.6 on kujutatud betooni koostise muutumist hüdraatumisel hermeetilises keskkonnas. Siit saab näha, kuidas autogeenne kahanemine on keemilise kahanemise osa. Keemiline kahanemine on sisemine ruumala vähenemine ja autogeenne kahanemine on välimine ruumala muutumine. Sellest tulenevalt on seda ka võimalik mõõta [2].

Tihti on vaieldud tegurite üle, mis mõjutavad autogeenset kahanemist. Ollakse seisukohal, et seda ei saa vältida betooni valamise, niisutamise või erinevate kivinemist mõjutavate meetoditega, kuid tuleks arvesse võtta betoonisegu retsepti arvutamisel.

Autogeenset kahanemist on esimest korda mainitud 1930. aastatel kaasaaitava deformatsioonina kogukahanemisse, mida oli tol ajal väga raske mõõta. Juba siis mõisteti, et autogeenne kahanemine esineb väga madalate vesitsementtegurite korral, kuid toona ei olnud sellistele betoonidele veel rakendust leitud. Nüüdisajal on autogeenne kahanemine taas kerkinud päevakorda, sest on kõrgemad nõuded konstruktsiooni tugevusele ja järelkult ka betooni omadustele. Neid saavutatakse väga madala vesitsementteguri ja erinevate betoonilisanditega nagu superplastifikaatorid. Järelkult on autogeense kahanemise tekkimise risk oluliselt suurem [2].

Autogeenset kahanemist esineb esimese päeva jooksul peale valamist kolmes erinevas faasis: vedelas olekus, betooni skeleti tekkimise ajal ning kivistumise ajal [2].

Skeleti tekkimise algul toimub betoonis keemiline ja autogeenne kahanemine samaaegselt. Mida tugevamaks betooni struktuur muutub, seda rohkem suudab see keemilise kahanemise tulemusel tekkinud pingetele vastu panna. Skeleti moodustumisel hakkavad tekkima kapillaarsurved ning võib tekkida kahanemine. Vesi hakkab liikuma pooride vahel, võttes kaasa poorides oleva vee. Sellest tingituna tekivad meniskid, mis kutsuvad esile järjest suuremaid kapillaarpingeid pooride seintes. Sellised protsessid toovad kaasa kahanemise sarnaselt peatükis 1.1.1 kirjeldatule. Joonisel 1.7 on antud autogeense kahanemise sõltuvus hüdratatsiooni tasemest.



Joonis 1.7. Autogeense kahanemise ja hüdratatsiooni taseme sõltuvus [2]

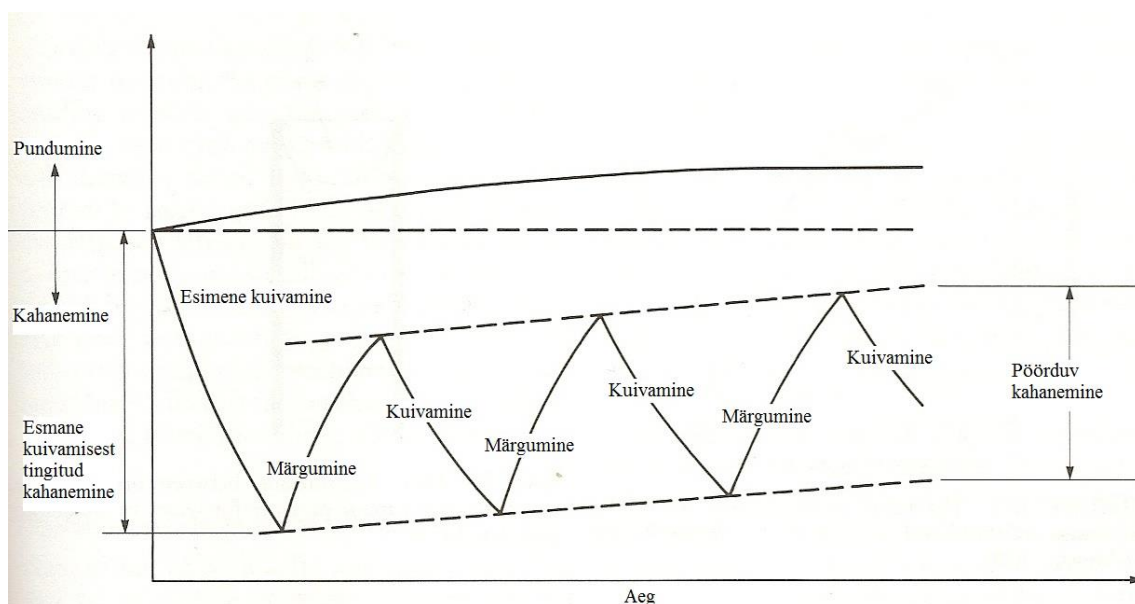
Tuginedes eelpool kirjeldatule, on autogeenne kahanemine võrdeline hüdratatsiooni tasemega (piirkond AB joonisel 1.7), siis kui betoon on veel plastne. See tähendab, et autogeenne kahanemine tekib ainult keemilisest kahanemisest. Piirkonnas BC on betooni skelett hakanud moodustuma ning keemiline kahanemine on üha enam piiratud [2].

Alates punktist C on materjal jäik ning sõltub järjest vähem keemilisest kahanemisest. Edasised ruumala muutused tekivad ainult iseenesliku kuivamise tagajärjel (*self-desiccation*). Tsemendi hüdraatumise edenemisel betoonis oleva õhu ruumala kasvab ning suhteline õhuniiskus langeb vähehaaval. Järelikult saadakse vajalik vesi kapillaarpooridest tahkete osakeste vahelt [2, 9].

Kuigi autogeenne kahanemine on ruumiline, väljendatakse seda tavaliselt lineaarse deformatsioonina, seega on võrreldav kõrvuti kuivamisest tingitud kahanemisega. Autogeensele kahanemisele iseloomulikud väärtused on $40 \cdot 10^{-6}$ esimese kuu lõpus ning $100 \cdot 10^{-6}$ viie aasta möödudes. Autogeenne kahanemine suureneb temperatuuri kasvades ja kõrgema tsemendisisaldusega segudes ning peeneteralistes tsementides, mis sisaldavad suuremas koguses C_3A (tseliit) ja C_4AF (ferriit). Konstantse tsemendi koguse korral suurem lendtuha (*fly ash*) sisaldus vähendab autogeenset kahanemist. Väga madala vesitsementteguri korral on autogeenne kahanemine väga suur: kahanemise suurus on $700 \cdot 10^{-6}$, juhul kui betooni vesitsementtegur on 0,17 [5].

1.1.3. Kuivamisest tingitud kahanemine

Kuivamisest tingitud kahanemine on betooni ruumala vähenemine vee ärakuivamise tõttu. Kuna vesi on betoonis ära kuivanud, siis selle tagajärjel see kahaneb. Esialgu pääseb vesi betooni pinnale väljaimbuva vaba veena, samal ajal kui raskemad täitematerjalide osakesed settivad. Vaba vesi saab pinnalt aurustuda ümbritsevasse keskkonda. Kui vaba vett enam ei ole, siis on betoon avatud kuivamisele ja liigne vesi kistakse betooni massi seest välja. Enamlevinud olukord kuivamisest tingitud kahanemise puhul on pragude teke betooni pinnale tardumise algusperioodil [2].

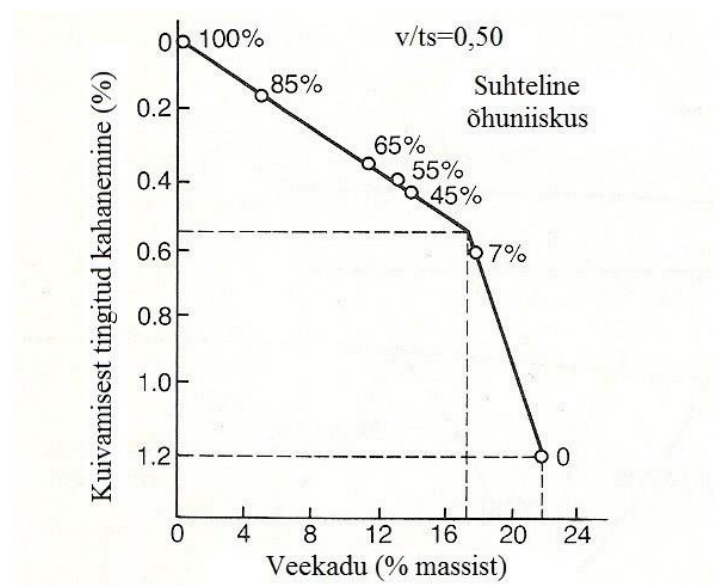


Joonis 1.8. Tsemendipastas või betoonis toimuvad ruumala muutused kuivamis- ja märgumistsüklite vaheldumisel [4]

Joonisel 1.8 kujutatud skeem kirjeldab kuidas tüüpiline kahanemise protsess toimub. Maksimaalne kahanemine esineb esimese kahanemise korral ja arvestatav osa sellest on pöördumatu, s.t et see ei taastu järgnevate märgumistsüklite korral. Edasine kuivamis- ja märgumistsüklite vaheldumine mõjutavad suuremal või väiksemal määral pöörduva kahanemise suurust. Samuti on joonisel näidatud kivistunud tsemendipasta pundumist, mis on pidev, kuid suhteliselt madal. Pundumise põhjuseks on betooni veega kastmine. Vee sisaldus suureneb hüdraatumise algul, et korvata iseenesliku kuivamise poolt kasutatud vee hulka ning hoida pastat küllastunud olekus. Teisalt – lisavesi kistakse C-S-H (kaltsiumsilikaathüdraat) struktuuri, et selle võrgustik ruumalalt paisuks. See on

paljude geelide üks omadusi, kuid kivistunud tsemendipastas on selline paisumine takistatud skeletilise struktuuri poolt ja siit tulenevalt on pundumise osakaal väike, võrreldes kuivamisest tingitud kahanemise deformatsioonidega [4].

Kuna kahanemine tuleneb vee kaost, siis on leitud suhe nende vahel. Joonisel 1.9 on esitatud andmed, mis näitavad, et kui suhtelise õhuniiskuse tase langeb alla 10 %, siis toimub järsk muutus kahanemises. See vihjab sellele, et kahanemist mõjutab rohkem kui üks tegur [4].



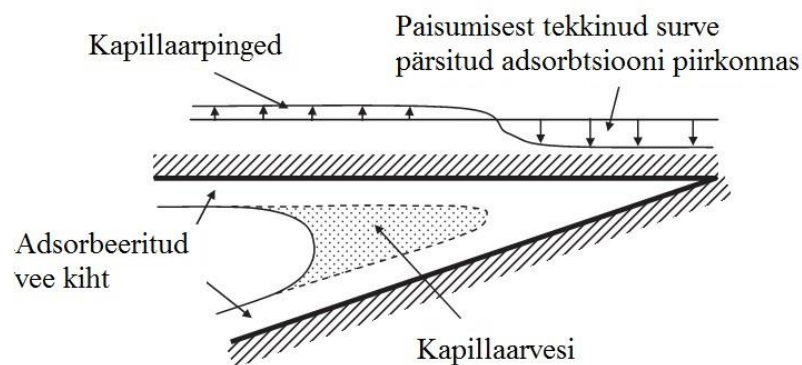
Joonis 1.9. Vee kaotuse mõju kuivamisest tingitud kahanemisele [4]

Kapillaarpinged. Kapillaaride ja suuremate geelipooride vaba veega pinnad on pindpinevad ning kui vesi hakkab langeva ümbritseva veeaururõhu toimele aurustuma, siis see vaba pind muutub järjest nõgusamaks ja pindpinevuspinged kasvavad. Tekkiva meniski läbimõõt ei saa olla kapillaari läbimõödust väiksem ja seega poor tühjeneb teatud veeaururõhu väärtuseni. Suurema vesitsemmenteguriga segud, mis on suurema poorsusega, kahanevad rohkem.

Pindpinevus või pinna energia. See on pinnanähtus, mis avaldub tahkise ja vedeliku pinnakihis, püüdes võimalikult palju kokku tõmbuda (nagu pinguletõmmatud kummikelmel). Pindpinevust põhjustab asjaolu, et pinnakihi molekulidele mõjub

molekulidevaheliste tõmbejõudude resultantjõud, mis suundub materjali sisse. Seepärast tuleb uute molekulide viimiseks pinnakihti – pinnakihi pindala suurendamiseks – teha tööd [10]. Osakeste pinnale vee adsorbeerumine vähendab pinna energiat, mille tõttu vähenevad sisemised tasakaalustavad survepinged, mis viib üleüldisele ruumala kasvule ehk pundumisele. See protsess on pöörduv. Suurimad muutused toimuvad siis, kui vee molekulid adsorbeeruvad või desorbeeruvad kuivadele või peaaegu kuivadele pindadele madalate aururõhkude juures [4].

Paisumisest tekkinud surve (*Disjoining pressure*). Joonisel 1.10 [11] on kujutatud tüüpiline tsemendi geelis leiduv poor. Laiem osa poorist sisaldab vaba vett, mis puutub kokku veeauruga. Kitsam osa on tahkete osakeste vahel, kus kogu vesi on mõjutatud pinnajõudude poolt. Adsorbeeritud vesi moodustab küllastumisel viiemolekulilise või 1,3 nm paksuse kihi kõvadele pindadele, mis on pingestatud pinna tõmbejõudude poolt. Piirkondades, mis on kitsamad kui 2,6 nm (s.o kahekordne kihi paksus), satub kihtidevaheline vesi pärsitud adsorbtsiooni tsooni. Selline olukord põhjustab pundumise või tekib poorides surve (*disjoining pressure*), mida tasakaalustavad osakeste sidemetevahelised tõmbepinged. Kuivamisel adsorbeeritud vee kiht kahaneb, mille tagajärjel väheneb poorides olev surve, põhjustades üleüldist kahanemist [4].

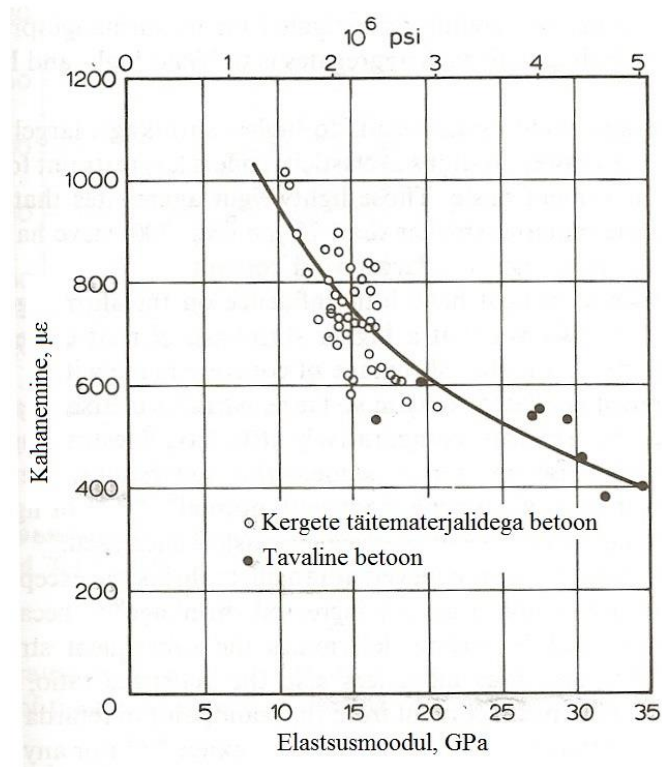


Joonis 1.10. Tsemendi geeli poor [11]

Kihtidevahelise veetaseme liikumine. Sellisel veetasemel on väga lähedane kontakt kõvade pindadega ja looklev teekond väliskeskkonnani. Vastava kihi liigutamiseks on vaja järsku hügroomeetrilise energia gradienti, kuid see tekitab tunduvalt suurema

kahanemise kui sama koguse vaba või adsorbeerunud vee liikumine. Seda võib seostada joonisel 1.9 kujutatud graafiku järema osaga, kus on madalamad suhtelised õhuniiskused [4].

Betooni kuivamisest tingitud kahanemine on väiksem kui tsemendipasta kahanemine, sest täitematerjalid, mille mõõtmete muutused on erinevates niiskuseludes stabiilsemad, ohjeldavad kahanemise suurust. Tavalise betooni kahanemine on tsemendipasta kahanemisest 10-30 %. T. W. Reichard leidis korrelatsiooni betooni kahanemise ja elastsusmooduli vahel, mis sõltub täitematerjalide kokkusurutavusest (joonis 1.11). Näiteks savisisaldus täitematerjalides vähendab kahanemise piiramist ja kuna savi ka ise kahaneb, siis võib betooni kahanemine tõusta kuni 70 %. Graniiti, paekivi ja kvartsiiti oleks soovitatav kasutada täitematerjalina, sest need ei kahane [4, 5].



Joonis 1.11. Kahanemise ja elastsusmooduli korrelatsioon [5]

Betooni katsekeha suurus ja kuju mõjutavad niiskuse kadu ja üldist kahanemise suurust katsekeha keskel, kus on niiskuse sisaldus suurem kui pinnaaladel. Kahanemise kiirus ja suurus ning pinnaalade mõranemisele kalduvus on selle tõttu mõjutatud.

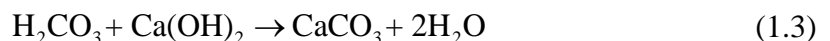
Lühem vee difusioon suurendab kahanemist. Näiteks T-tala kuivab kiiremini kui sama pindalaga riskülikukujulise ristlõikega tala ja seega on kahanemine samuti kiirendatud [2, 4].

Võib öelda, et suure C₃A ja sulfaatide sisaldusega tsemendid annavad suurema kahanemise. Samuti omab olulist efekti leeliste sisaldus ja tsemendi peeneteralisus. Siit võib järeldada, et tsemendi koostis mõjutab kahanemist üsnagi suurel määral, kuid seda on raske ennustada [4].

Kuivamisest tingitud kahanemine võib olla betoonkonstruktsioonide olukorra halvenemise üks peamisi põhjusi. Materjali kokkutõmbumine on tavaliselt takistatud kas sisemiste või välimiste piirangutega ning tõmbepinged avalduvad. Need pinged võivad ületada konstruktsiooni tõmbetugevust ja põhjustada pragunemist. Sellised probleemid esinevad enamasti portlandtsemendiga tehtud betoonis. Isegi kui struktuurse terviku omadused ei ole kahjustatud, jäävad vastupidavuse probleemid püsima. Sisemised piirangud on põhjustatud niiskusgradiendist, mis eksisteerib nii kaua, kui on saavutatud hügromeetriline tasakaal ümbritseva keskkonnaga. Välimised takistavad asjaolud on betooni parandamise puhul nake uue ja vana kihi vahel või plaatide puhul hõõre plaadi ja aluspinna vahel. Tekkivad tõmbepinged võivad ületada materjali tõmbetugevuse ja see võib põhjustada betooni pragunemise või kihtidevahelise nakke kadumise [12].

1.1.4. Karboniseerumisest põhjustatud kahanemine

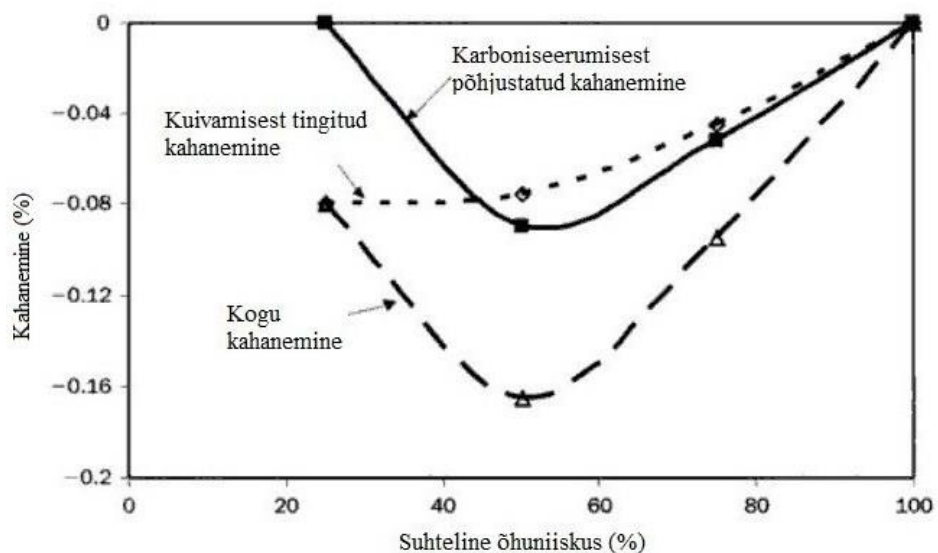
Karboniseerumine esineb siis, kui kivistunud betoonis tsemendipasta reageerib õhus oleva niiskuse ja süsihappegaasiga. Valemiga 1.3 on näidatud betoonis toimuva karboniseerumise keemiline reaktsioon. See reaktsioon põhjustab betoonis pH taseme languse ja väikese kahanemise. Korrodeeruv rooste põhjustab betoonis paisumise, pragunemise ja kihistumise [2].



Karboniseerumise hulk sõltub betooni tihedusest ja kvaliteedist ning reaktsioon toimub tavaliselt mitte enam kui 2 cm sügavusel betooni pinnast. Samuti on see sõltuv betooni vanusest ning ümbritseva keskkonna tingimustest. Karboniseerumine mõjub betooni vastupidavusele paljude aastate möödudes, kahjustades betooni struktuuri [2].

Eelpool toodud reaktsiooni tulemusena vabaneb vesi ning toimub betoonisegu massi suurenemine. Sellega kaasneb kahanemine, segu tugevus kasvab ja vee läbilaskvus väheneb. seda võiks kirjeldada nii, et kaltsiumhüdroksiid lahustub enam pingestatud piirkondades, põhjustades kahanemise ja kaltsiumkarbonaat kristalliseerub poorides. Tulemuseks on väiksem läbilaskvus ja suurem tugevus.

Karboniseerumise kiirus ja hulk sõltuvad betoonis olevast suhtelisest niiskusest. Kui betoon on veest küllastunud, siis süsihape ei tungi betooni ning vastavat reaktsiooni ei toimu. Kui vastupidi, betoon on liiga kuiv, siis ei leidu süsihapet. Maksimaalne karboniseerumisest põhjustatud kahanemine esineb 25-50%-lise niiskussisalduse juures ning see võib olla samas suurusjärgus kuivamisest tingitud kahanemisega. Joonisel 1.12 on näidatud ümbritseva keskkonna suhtelise niiskuse mõju kuivamisest tingitud ja karboniseerumisest põhjustatud kahanemisele [4].



Joonis 1.12. Ümbritseva keskkonna mõju kahanemisele [11]

Betooni poorsus on oluline kahanemist mõjutav tegur. Keskmise tugevusega betooni, mis on hästi tihendatud ja kivistunud, karboniseerumise tase tungib aastatega kõigest mõni sentimeeter materjali sisse. Kõrgtugevates betoonides toimub sellist liikumist isegi vähem. Halva kvaliteediga betooni puhul on olukord vastupidine ning see võib viia suurte probleemideni, kui betoon on sarrustatud [4].

Kuivamisest tingitud ja karboniseerumisest põhjustatud kahanemise järjekord mõjutab suurel määral kogu kahanemise suurust. Samaaegne kahanemine on väiksem olukorras, kus kuivamine järgneb karboniseerumisele, sest esimesel juhul on niiskussisaldus üle 50% ja sellistel tingimustel on karboniseerumisest põhjustatud kahanemine aeglasem (joonis 1.12).

Kui betoon on avatud tsüklilisele märgumisele ja kuivamisele süsihappegaasi sisaldavas õhus, siis karboniseerumisest põhjustatud kahanemine (kuivamistsükli ajal) avaldub üha rohkem. Kogu kahanemine mistahes ajahetkel on suurem kui betooni kivistumine toimub CO₂-ga õhuruumis. Seega karboniseerumine suurendab pöördumatut kahanemist ja aitab kaasa katmata betooni mikropragude tekkele [5].

1.2. Pinnakõvendid

Tööstushoonete keskkond seab karmid nõuded põrandatele, mida tavaliselt tavabetoonist põrand ei suuda taluda. Selleks, et pikendada nende põrandate kasutusiga, paigaldatakse tihti alusbetoonile kõrgekvaliteetne pinnakõvendi või -kate. Tahkete jäätmekäitluse käigus on ühed kõrgeimad nõudmised põrandatele, sest toimub pidev põrandahõõrdumine masinatega ja kokkupuude erinevate keemiliste ühenditega. Jäätmekäitlusfirmade rasketes tingimustes kasutamiseks mõeldud põrandad on hea näide selleks, kuidas peavad sellised põrandad olema ehitatud. Pidev raskeliiklus ja käideldavate jäätmekäitluse mitmekesisus selleks ette nähtud hoonetes kiirendavad enamuse tavapäraste põrandatüüpide kvaliteedi halvenemist. Tihedad remonditööd on kulukad, rääkimata äritegevusele seisakute tekitamisest [6].

1.2.1. Epoksüvaikkate

Põrandad ei ole ehituskonstruksioonidena ekspluatatsioonis täielikult jäigid. Koormuste mõjumisel tekivad põrandaplaadis väikesed deformeerumised, mille käigus peavad konstruktsiooni pealmised kihid ja alumised osad taluma surve- ja tõmbejõude. Samuti peavad põrandad olema vastupidavad löökidele, abrasiioonile ehk kulumisele, vibratsioonile ja temperatuuri muutustele. Eelnevast tuleneb, et vastupidav põrand peab olema võimalikult monoliitne, kusjuures põranda pealispind peab olema kõrge survetugevusega ja kulumiskindel, kuid samas piisavalt elastne [13].

Selleks, et betoonpõrand erinevaid koormusi taluks, tuleks põrandale ehitada kattekiht, mis oleks hästi nakkuv aluspinnaga. Üheks selliseks vahendiks on epoksüvaiksüsteemidest pinnakatted. Neil on head liimimis- ja nakkuvusomadused enamuste põrandamaterjalidega, eeskätt betoonalustega. Koormusi võtab vastu nii põrandakate kui aluspind ise. Epoksüvaikkatted on vastupidavad paljudele agressiivsetele kemikaalidele, näiteks happed, alused, lahustid, õlid või rasvad. Sobivate täitematerjalide lisamisel on võimalik saavutada põrandatele suurem mehaaniline tugevus ja kulumiskindlus [13].

Epoksüvaikkatted puhtal kujul ei taga alati piisavat tugevust põrandal. Erinõudmiste täitmiseks tuleb hoolikalt valida kõvendi ja täitematerjal. Eelpool nimetatud lisandite valik tugineb põranda põhilisele kasutusviisile [14].

Epoksüvaik esineb nii tahkes kui vedelas olekus. Vedelas olekus vaike on alati kasutatud põrandate katmiseks. Sobiva viskoossuse saavutamiseks kasutatakse tihti reageerivaid ja mittereageerivaid lahusteid. Viskoossuse vähendamine tagab paremad voolavusomadused iseäranis isetasanduvate segude korral ning lubab katta suurema pindalaga alasid kiiremini. Lahustite kasutamine on tulusam paigaldajale, kuid vähendab epoksüvaigu põhilisi füüsikalisi ja keemilisi omadusi. Siiski on neid võimalik kasutada seal, kus on põrandale madalamad nõudmised. Toiduainetetööstuse põrandatel on oluline, et lahusteid ei kasutataks, sest siis ei teki ohtu, et toit puutuks tootmise käigus kokku kemikaalidega [14].



Joonis 1.13. Epoksüvaikkatte paigaldamine [15]

Keskmine epoksüvaigust pinnakatte paksus on 5-6 mm pahtellabidaga silumise (joonis 1.13) korral ja 2-3 mm isetasanduva segu paigaldamisel. Keemiline vastupanu on hea, kuid pole soovitatav kasutada aluspõhja kaitseks keemiliste ühendite eest. Epoksüvaigust pinnakatted sobivad hästi meiereisse, õlletehasesse, lihatööstusesse ja muudesse kõrgetele hügieeninõuetele vastavatesse tööstusharudesse [14].

1.2.2. Kuivmeetodil paigaldatud pinnakõvendi

Kuivmeetodil paigaldatud pinnakõvendeid kantakse betoonile, järgides ajastust ja pinna ettevalmistust ning pärast hõõrutakse pulber pinnaga tihedaks. Pinnakõvendi muutub siis aluspõrandaga ühtseks tervikuks, moodustades pinnale õhukese kihi [6]. Selleks, et saaks tekkida monoliitne tervik, peab aluspind eraldama piisavalt vett, et pulber oleks täielikult märgunud ja pulbri tsemendi komponent saaks lõpuni hüdraatuda. Praktika on näidanud, et 150 liitrit vett ühe kuupmeetri kohta on piisav tagamaks küllaldase vaba vee eraldumise. Siinkohal on arvestatud ka erinevate betoonide karakteristikuid [16].

Põranda kulumiskindlust saab parendada, paigaldades betooni pinnale mineraalist või metallist täitematerjali, mis on harilikult kokku segatud portlandtsemendiga. Protseduur väikesest kuni keskmise kulumiskindlusega põranda saamiseks on järgmine: pärast pinna hõõrumist kanda pool pulbri kogusest ning hõõruda see pinna sisse; oodata kuni betoon on piisavalt kivistunud (suudab kanda inimese raskust), siis kanda ülejäänud pulber ja viimistleda pind „helikopteriga“ [6].

Kõrge kulumiskindlusega põrandate tegemiseks tuleb pinnale kanda üks kolmandik pulbri kogusest kohe pärast esimest silumist. Oodata kuni väljaimbuv vaba vesi on ära aurustunud, siis laotada teine kolmandik ja hõõruda pinna sisse. Pärast betooni piisavat kivistumist (suudaks vastu panna inimese raskusele), kanda viimane kolmandik pulbrist ning „helikopteriga“ pind viimistleda tihedaks ja kõvaks pinnaks. Pulbrilise pinnakõvendiga põrandate valmistamiseks on nõutavad oskused ja selliseid töid peaksid tegema kogunud oskustöölised [6].

Sellised pulbrid avaldavad põrandal tööd tegevatele ja lähedal asuvatele inimestele ohtu, eriti tuuliste ilmade korral. Soovitav oleks kasutada vastavaid isikukaitsevahendeid. Käsitsi paigaldamisel on oht suurem, sest siis puutuvad töölised materjaliga rohkem kokku. Pulbrilist pinnakõvendit saab pinnale puistata kolmel erineval meetodil [16].

Masinaga (*mechanical application*) paigaldamine on sobilik suure pindalaga põrandate korral. Selle meetodi puhul puistatakse pinnakõvendi kohe pärast betooni paigaldamist sellele pinnale, ootamata vaba vee eraldumist. Betoon paigaldatakse sellisel juhul Laser Screed masinaga. Pärast piisavat pinna tardumist viimistletakse põrand „helikopteriga“, saavutamaks maksimaalne tulemus [16].



Joonis 1.14. Pinnakõvendi paigaldamine poolmehaaniliselt: käsilaotur (a), laotatud pinnakõvendi (b), „helikopter“ (c)

Poolmehaanilise (*semi-mechanical application*) paigaldamise puhul toimub pinnakõvendi puistamine käsilaoturiga (joonis 1.14, a). Laotustiheduse (joonis 1.14, b) ühtlus sõltub töölise kogemusest masinaga sujuvalt töötada. Puuduseks on rööbaste tekkimine uuele põrandale ning liiga hiline ja/või ebaühtlane puistamine. Tihendamine

toimub eelpool nimetatud meetodiga sarnaselt – „helikoperiga“ (joonis 1.14, c) ning kitsastes kohtades käsitsi [16].

Käsitsi (*manual application*) paigaldamisel kantakse pulber pinnale labidaga. Selline lähenemine on mõistlik ainult väga väikesel pinnal. Pulbrilist pinnakõvendit tuleb pinnale kanda ühtlaselt, mitte juhuslikult. Nõuab piisava pädevusega oskustöölisi [16].

1.2.3. Märkmeetodil paigaldatud pinnakõvendi

Selleks, et parandada põranda kulumiskindlust, valatakse värsketele või kivistunud betoonpõrandale pinnakõvendi märkmeetodil (joonis 1.15). Tänu pinnakõvendi suuremale paksusele kestab põrandapinne kauem kui kuivmeetodil peale kantud pinnakõvendi korral. Kulumis- ja kriimustuskindluse määrab ikkagi pinnakõvendis olev täitematerjal. Seega paksuse lisamisel jääb kulumäär samaks kui mineraalse täitematerjaliga pulbrilise pinnakõvendi korral [6].

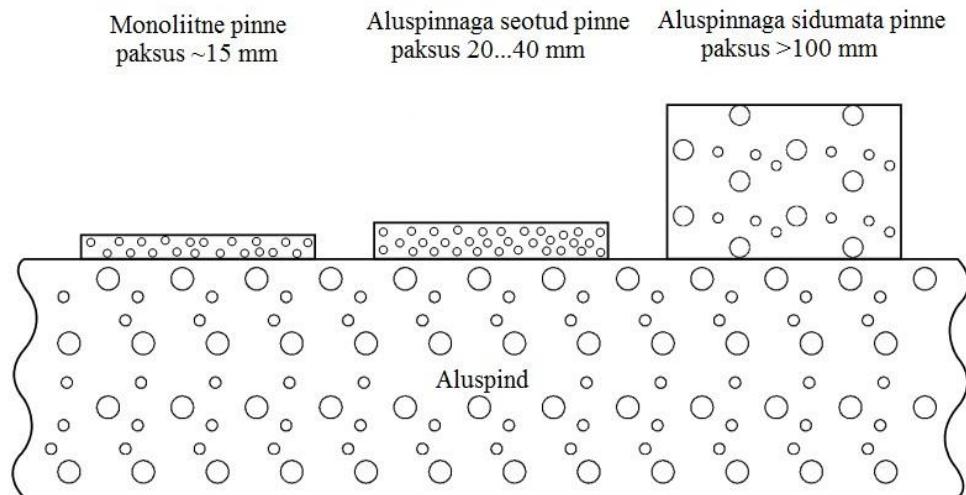


Joonis 1.15. Pinnakõvendi paigaldus märkmeetodil [17]

Rauda sisaldava täitematerjaliga pinnakõvendid on aegade jooksul edestanud kõiki teisi jäätmekäitlusjaamades kasutatavaid pindeid. Sellised põrandapinnad suudavad vastu võtta erinevate kemikaalide poolt põhjustatud kahjustusi ning korduvat masinate poolt

tingitud hõõrdumist, mis on tavalised jäätmekäitlemise puhul. Nende pinnete kulumiskvaliteet ning õlide, rasvade ja teiste agressiivsete vedelike läbilaskmatus on omadused, mis tagavad kauakestva tööpinna. Selline tööpind kestab neli kuni kaheksa korda kauem kui tavabetoon ning mineraalseid täitematerjale sisaldavad pinnakõvendid [6].

Märgmeetodil paigaldatud pinnakõvendit kasutatakse nii maapinnal kui ka õõnespaneelidel asuvatel põrandatel. Paigaldamisviisid on kolm: monoliitne, seotuna aluspinnaga ning aluspinnaga sidumata (joonis 1.16) [18].



Joonis 1.16. Pinnakõvendi paigaldamisviisid [18]

Monoliitse pinde korral toimub pinnakõvendi paigaldamine märgmeetodil siis, kui betoon on veel plastses olekus. See võimaldab pindel moodustada aluspõhjaga tervikliku konstruktsiooni. Kõrge tugevusega pinded on tavaliselt 12-20 mm paksud. Selline paigaldusviis vähendab pinde nakkuvuse lakkamist aluspõhjaga [19].

Aluspinnaga seotud pinde puhul paigaldatakse pinnakõvendi pärast betooni kivistumist. Pinde paksust ei arvestata alusplaadi mõõtmete juurde, sest sellel on konstruktiivselt väike mõju. Paigaldamisel peab aluspõhja jääme täitematerjal olema aluspinnast väljas. Aluspind peab olema enne pinde paigaldamist tolmust puhas. Tihtipeale kasutatakse kahe pinna sidumiseks liime või vastavaid lisandeid [19].

Aluspinnaga sidumata pinne nõuab suuremat paksust ja on ehitatud pinde ja aluspinna vahele asetatud niiskuskindla või isoleeriva membraani (kile) peale. Seda meetodit kasutatakse tihtipeale siis, kui on vajalik põrandat uuesti tasandada [19].

2. Pinnakõvendite ja betooni kahanemise määramine

2.1. Uurimustöö eesmärgid

Käesoleva uurimustöö eesmärgiks on kolme erineva pinnakõvendi kahanemis-deformatsioonide mõõtmine ja kahanemispingete määramine arvutamise teel ning nende võrdlemine tavabetoniga tehtud katsete tulemustega. Katsetes kasutatakse enamkasutatavaid pinnakõvendeid. Uurimustöö käigus viiakse läbi üks katseseeria iga pinnakõvendiga ning üks katseseeria betooniga.

Töös määratakse uuritavate materjalide kahanemispingete arvutamiseks vajalikud elastsusmoodulid.

Uurimustöös tehtavate katsete aluseks võetakse kaks standardit: pikkuse kahanemise puhul ASTM C490 [20] ja augumeetodi puhul ASTM E837 [21]. Standardite valikul said otsustavateks teguriteks katsekehade vormide olemasolu, erinevad kirjandusallikad ning eelmisel aastal läbi viidud uurimustöö [1].

2.2. Katsemetoodika ja –seadmed

2.2.1. Katsekehad

Kahanemise mõõtmiseks valmistati katsekehad vastavalt standardile ASTM C490, mõõtmetega 75×75×285 mm, mille baasmõõtepikkuseks on 250 mm (katsekehade sees asuvate tihvtide sisemiste otste vahekaugus) [20]. Katseseeriaid oli kokku neli, igas seerias 12 katsekeha. Üks seeria valmistati betoonist (retsept on esitatud lisas 1) ja kolm ülejäänut valmistati erinevatest pinnakõvenditest. Pinnakõvenditeks olid valitud firma

Rocland poolt pakutavad Qualitop Master ja Qualidur ning DCP Baltics-i pinnakõvendi Monoshake TF.

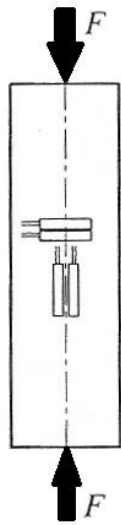
Katsekehade jaoks vajalik segu segati Eesti Maaülikooli ehitusmaterjalide laboris. Erinevalt lisas 1 retseptis toodud tsemendile, kasutati olemasolevat tsementi CEM I 42,5 N. Täitematerjalideks oli liiv fraktsiooniga 0-8 mm, killustik fraktsiooniga 4-12 mm ja killustik fraktsiooniga 8-16 mm. Pinnakõvendite segamisel lisati vett 3,1 l 25 kg kuivsegu kohta, tuginedes vastavate materjalide kasutusjuhendile, kus on antud vahemik 3-3,5 l vett 25 kg kuivsegu kohta. Katsekehade segud segati trelli otsas oleva vispli abil. Katseseeriade plastsusklassid olid vastavalt: Monoshake TF – S-1 (koonuse vajum 15 mm), Qualitop Master – S-1 (koonuse vajum 10 mm), Qualidur – S-1 (koonuse vajum 30 mm) ja betoon – S-1 (koonuse vajum 11 mm).

24 tunni möödudes segude valamisest eemaldati kivistunud katsekehad vormidest. Peale lahtirakestamist hoiti katsekehasid ehitusmaterjalide laboris selleks ette nähtud ruumis, õhu käes. Õhutemperatuur oli 20-21°C ja õhuniiskus kõikus vahemikus 30-70 %. Katsekehad tähistati seeria numbri ja katsekeha numbriga. I seeria – Monoshake TF, II seeria – Qualitop Master, III seeria – Qualidur ja IV seeria – betoon. Näiteks „II-7“ tähendab pinnakõvendi Qualitop Master 7. katsekeha.

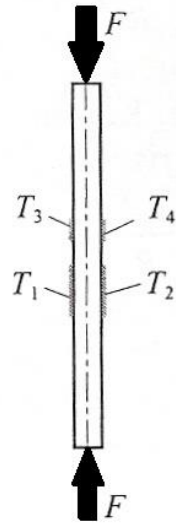
2.2.2. Elastsusmooduli määramine

Pingete arvutamiseks määrati katseliselt betooni ja pinnakõvendite elastsusmoodulid E ja Poisson'i tegurid μ . Katsekeha ristlõige oli mõõtmetega 75×75 mm ja pindalaga $A=5625 \text{ mm}^2$. Deformatsiooni mõõtmiseks liimiti katsekeha keskosa vastaskülgedele nii piki- kui ka põiksuunas traattensoandurid (ЦНИИски – baas 12 mm, takistus 200 Ω , tensotundlikkus 2,0). Andurite asetus proovikehal on kujutatud joonisel 2.1, kus T_1 ja T_2 ; T_3 ja T_4 on tähistatud vastavalt piki- ja põiksuunalised andurid. Temperatuuri kompenseerimiseks liimiti teisele katsekehale samast partiist andurid, mida ei koormata katse käigus. Kõigi tensoandurite baas b on 12 mm ja takistus $\sim 200 \Omega$. Töö- ja kompensatsioonandurid (vastavalt R_3 ja R_4) lülitati poolskeemi järgi, mis moodustab deformatsioonimõõturisestest anduritega (R_1, R_2) täissilla.

a)



b)



Joonis 2.1. Andurite asetus katsekehal (a) ja foto (b)

Tensometreerimise põhimõte on järgmine: andur liimitakse uuritava detaili (konstruktsiooni) pinnale nii, et baasi mõõt b ühtiks mõõdetava deformatsiooni suunaga. Anduri töö põhineb asjaolul, et objekti deformatsiooni korral traat (foolium) kas pikeneb või lüheneb ning oomiline takistus muutub selle tagajärjel. Katsed on näidanud, et oomilise takistuse muudu ΔR suhe takistusse R on proportsionaalne deformatsiooniga (valem 2.1)

$$\frac{\Delta R}{R} = \gamma_0 \varepsilon, \quad (2.1)$$

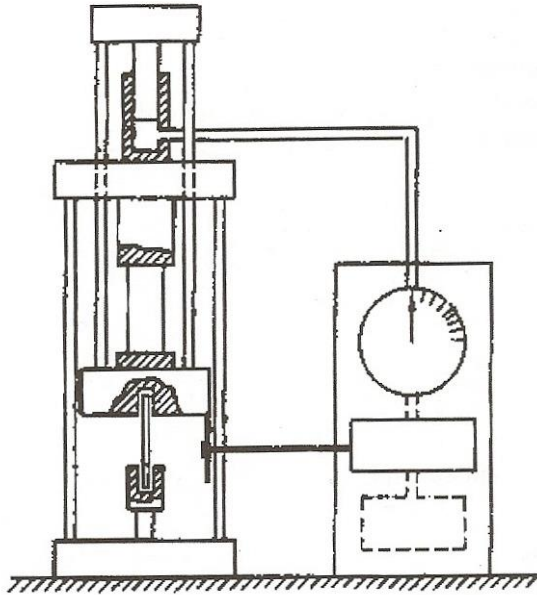
kus γ_0 – tensotundlikkuse tegur.

Tensotundlikkuse tegur on dimensioonitu suurus, mis sõltub materjali füüsikalistest omadustest ja väärtus kõigub 2...3,5. Konstantaanil $\gamma_0 = 2,0...2,1$; nikroomil 2,1...2,3; elinvaril 3,2...3,5. Vastavas töös on tensotundlikkuse tegur $\gamma_0 = 2,0$. [22]

Katsekeha surumiseks kasutati universaalset katsemasinat P-20 (joonis 2.2), mille poolt arendatav maksimaalne jõud on 200 kN. Jõu mõõtmiseks on kolm skaalat, vastavalt mõõtepiirkonnaga 8...40 kN, 20...100 kN ja 40...200 kN. Katsemasinal on jõu ja

pikenemise mõõtmiseks paigaldatud digitaalsed andurid, mille näidud suunatakse arvutisse. Hiljem on võimalik väljastada vastavast arvutiprogrammist $F(\Delta L)$ diagramm.

a)



b)



Joonis 2.2. Universaalse katsemasina P-20 skeem (a) [22], foto (b)

Deformatsioonide mõõtmiseks kasutatakse firmas Vishay Micro-Measurements valmistatud mikroprotsessoriga varustatud deformatsioonimõõturit P3 (joonis 2.3), mille mõõtetäpsus on $\pm 0,1\%$ pluss-miinus kolme lugemi kohta. Mõõtur lubab salvestada lugemid mõõtmise käigus või suunata nad otse arvutisse.



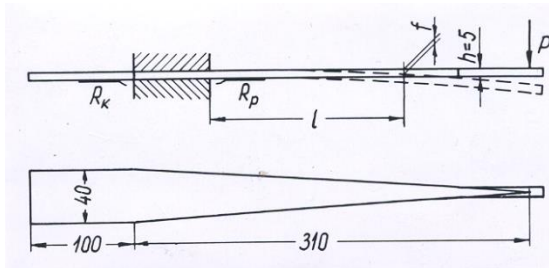
Joonis 2.3. Deformatsiooni mõõtur P3

Mõõtuuri ja andurite tareerimiseks kasutati tareerimissilda (vt joonis 2.4), mis on ehitatud konsooliselt kinnitatud võrdtugeva talana. Jõu rakendamisel paindub tala mööda ringjoone kaart [23]. Konstant arvutati valemiga 2.2:

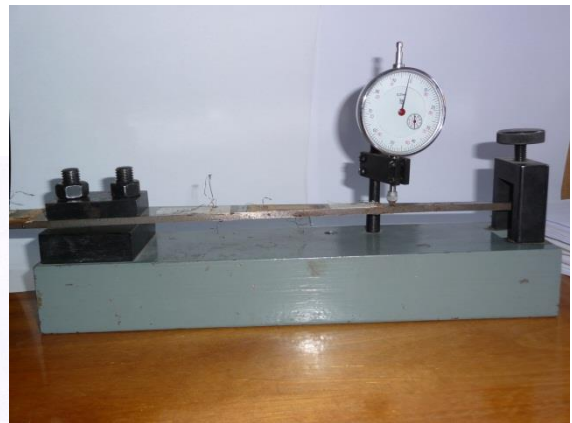
$$C = \frac{hf}{l^2 N}, \quad (2.2)$$

kus C – tareerimisel saadud deformatsiooni konstant,
 h – silla paksus ($h=4,95$ mm),
 f – läbipaine siirdemõõtuuri all,
 l – siirdemõõtuuri kaugus konsoolist ($l=168,6$ mm),
 N – deformatsiooni muut.

a)



b)



Joonis 2.4. Tareerimissilla skeem (a) [23], foto (b)

Tareerimise tulemusena saadi deformatsiooni konstandiks $C=2,044 \cdot 10^{-6}$ suhtelist deformatsiooni ühikut. Piki- ja pöikdeformatsioonide mõõtmisandurid lülitati poolsilda ja ühendati deformatsioonimõõtuuri vastavalt esimese ja teise kanaliga. Anduri all oleva deformatsiooni saame leida valemiga 2.3:

$$\varepsilon = C(A'' - A'), \quad (2.3)$$

kus A', A'' on vastavalt mõõtuuri alg- ja lõpplugem.

Tuntud Hooke'i seaduse järgi saab arvutada surveelastsusmoodulit järgmise valemiga (2.4):

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x}. \quad (2.4)$$

Siin pikipinge avaldub (2.5)

$$\sigma_x = \frac{\Delta N}{A}, \quad (2.5)$$

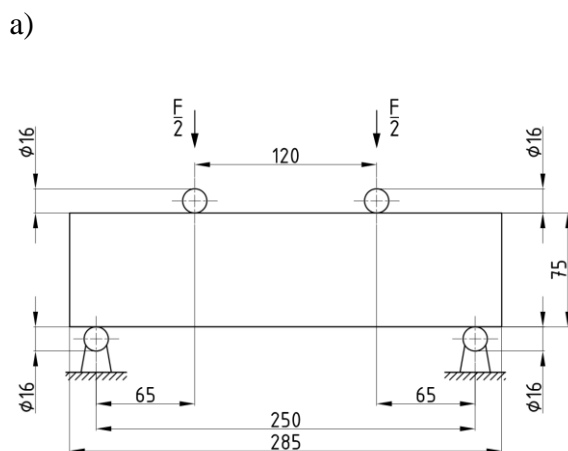
kus ΔN – jõu juurdekasv mõõdetud deformatsiooni korral.

Poisson'i tegur (valem 2.6) näitab materjali suhteliste põik- ja pikideformatsioonide suhet survel ja tõmbel.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right|, \quad (2.6)$$

kus $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – vastavalt piki- ja põikdeformatsioonid [22].

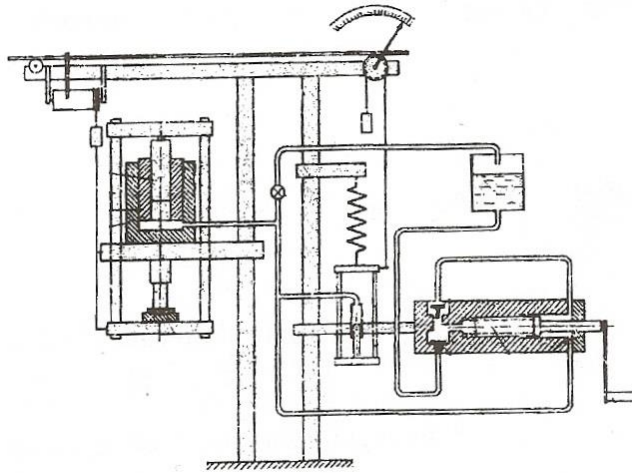
4-punkti painde (joonis 2.5) korral mõõdeti pikideformatsioone proovikeha vastaspindadel nii tõmbe- kui survetsoonis. Andurid on samad, mis survekatsel. Paindeelastsusmoodul leitakse deformatsioonikõveral kohas, kus joone ja selle puutuja vahel olevad hälbed on minimaalsed. Antud piirkond valitakse kõikide katsetatavate materjalide puhul sama.



Joonis 2.5. 4-punkti paindekatseskeem (a) ja foto (b)

Paindekatses sooritamiseks kasutati Amsleri universaalset katsemasinat (joonis 2.6). Masin on oma tööprintsibiilt hüdrauliline ning sellega saab teostada surve-, tõmbe-, painde ja teisi katseid. Masin võimaldab tekitada jõudu kuni 4000 kgf (39200 N) [22].

a)



b)



Joonis 2.6. Amsleri universaalse katsemasina skeem (a) [22] ja foto (b)

Tala deformeerudes tasapinnalisteks jäänud ristlõikepinnad pöörduvad ja tala kihid kõverduvad. Elementaarne kiht kaugusel z neutraalkihist saab uue pikkuse ja kihi normaaldeformatsioon avaldub valemiga 2.7 [24]

$$\varepsilon = \frac{z}{\rho}, \quad (2.7)$$

kus ε – deformatsioon,

z – neutraalkihi asukoht, läbib katsekeha keskelge,

ρ – kõverusraadius.

Kõverusraadius leitakse valemiga (2.8)

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_y}{EI_y}, \quad (2.8)$$

kus M_y – paindemoment,
 EI_y – katsekeha paindejäikus.

Puhta painde korral avaldub elastsusmoodul E :

$$E = \frac{z}{\varepsilon} \cdot \frac{M_y}{I_y}. \quad (2.9)$$

Elastsusmoodul (valem 2.9) võrdub paindemomendiga, korrutatud vaadeldava punkti kaugusega nulljoonest, jagatud ristlõike inertsimomendiga nulljoone suhtes ning tekkinud pikideformatsiooniga. See valem kehtib eeldusel, et tegemist on puhtpaindega ja see võeti ka käesolevas töös arvutamise aluseks. Deformatsioonid mõõdeti ühe ja sama anduriga nii surve kui tõmbetsoonis, pöörates katsekeha 180° ümber pikitelje pärast esimest mõõtmist.

2.2.3. Pikkuse muudu mõõtmine

Katsekehade kahanemise mõõtmist alustati koheselt peale vormidest eemaldamist. Sõltuvalt aja möödumisest, muudeti mõõtmiste intervalli ühest päevast kuni nelja päevani. Lõplikku kahanemist ei mõjuta mõõtmise intervallis esinevate erinevate katseseeriade väiksemad erinevused.

Katsekeha mõõdeti ühe mõõtmise korral neli korda. Esmalt teostati esimene mõõtmine (joonis 2.7), seejärel keerati katsekeha ümber oma telje 180° ja võeti teine mõõt. Katsekeha keeramine aitab vähendada tihti paigaldamisel tekkinud ebatäpsusi. Kolmas ja neljas mõõtmine teostati, et kontrollida kahe esimese mõõtmise tulemusi, sest iga väike betoonikilluke või liivatera katsekeha all tekitab mõõtmisvea.



Joonis 2.7. Kahanemise mõõtmine siirdemõõturiga

Vastavalt standardile ASTM C490 [20] on katsekehade pikkus 285 mm, mille kummaski otsas on sisse valatud metallist tihvtid. Kuna mõõtepikkuseks on 250 mm, siis järelikult ulatuvad tihvtid katsekeha sisse $17,5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Standardis on ristlõike mõõtmed jäetud vabalt valida. Katsekeha ristlõike mõõtmed on $75 \times 75 \text{ mm}$. Põhjuseks on eelnevalt valmis projekteeritud ja ehitatud vorm, mida kasutati 2010. aasta uurimuses [1].

Plastikust vormid on valmistatud Tööstusplast OÜ-s täpsusega 0,2 mm. Kokku valmistati neli vormi kaheteistkümnele katsekehale (igas vormis 3 katsekeha, joonis 2.8) [1].



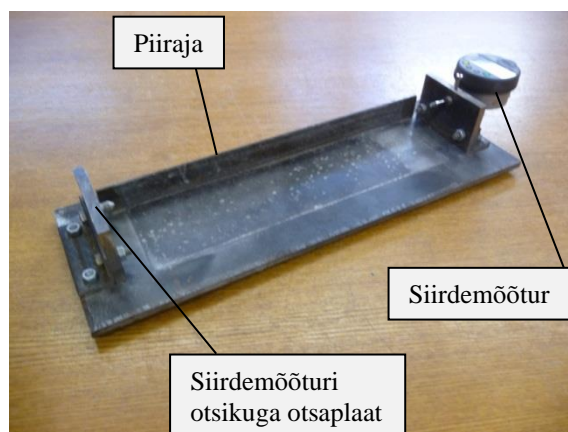
Joonis 2.8. Katsekehade vorm

Tihvtid valmistati keermelatist M6 pikkusega $27,5\pm 0,5$ mm (joonis 2.9). Tihvt ulatub katsekehast välja 10 mm. Katsekehast väljaulatuva tihvti otspind lasti käia peal tihvti teljega risti ning viiliti käsitsi üle, et vähendada mõõtmisel ebatasasustest tekkivaid vigu.



Joonis 2.9. Katsekehast välja ulatuv tihvt

Katsekehade mõõtmiseks valmistati rakis [1]. Rakis koosnes kahest püstisest otsaplaadist ning küljel paiknevast piirajast. Rakise ühe otsaplaadi külge on paigaldatud siirdemõõtu otsik ning teise otsaplaadi külge digitaalne siirdemõõtur. Piiraja oli vajalik selleks, et iga kord võtta mõõt täpselt sama koha pealt. Joonisel 2.10 on kujutatud katsekehade mõõtmise rakis.



Joonis 2.10. Katsekehade lühenemise mõõtmise rakis

Kahanemise mõõtmiseks kasutati digitaalset siirdemõõturit Mitutoyo ID-C112B, mille mõõtelugemi vahemik on 0,003 mm ja mõõtmistäpsus 0,001 mm [1].

Vastavalt standardile [20] arvutatakse pikkuse muut alljärgneva valemiga (2.10):

$$L = \frac{(L_x - L_i)}{G} \cdot 100, \quad (2.10)$$

kus L – pikkuse muut x aja möödudes (%),
 L_x – katsekeha mõõtmise lugem x aja möödudes (mm),
 L_i – katsekeha mõõtmise esmane lugem (mm),
 G – katsekeha algpikkus (250 mm).

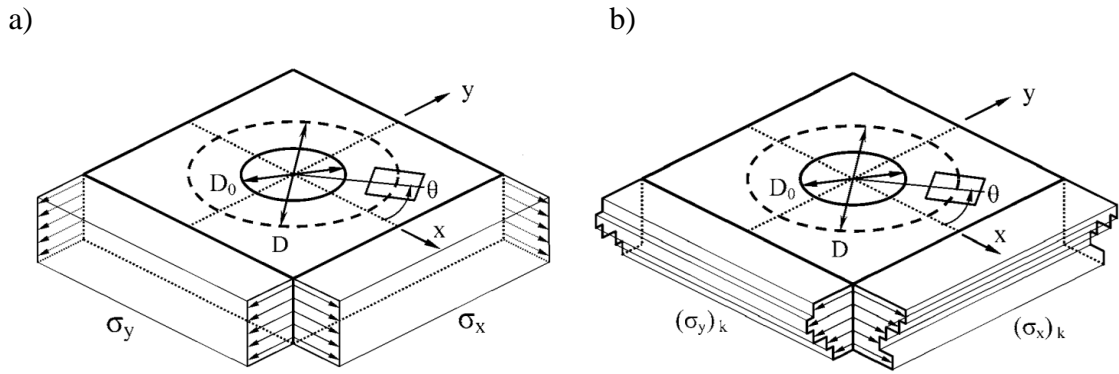
Iga katsekeha pikkuse muut tuleks arvutada täpsusega 0,001 % ning keskmised pikkuste muudud tuleks esitada täpsusega 0,01%.

Katsekehade veekao leidmiseks kaaluti nad. Kaalumiseks kasutati kaalu Kern 572-45, mille maksimum kaal on 12,1 kg ja mõõtmistäpsus on 0,1 g.

2.2.4. Augumeetod

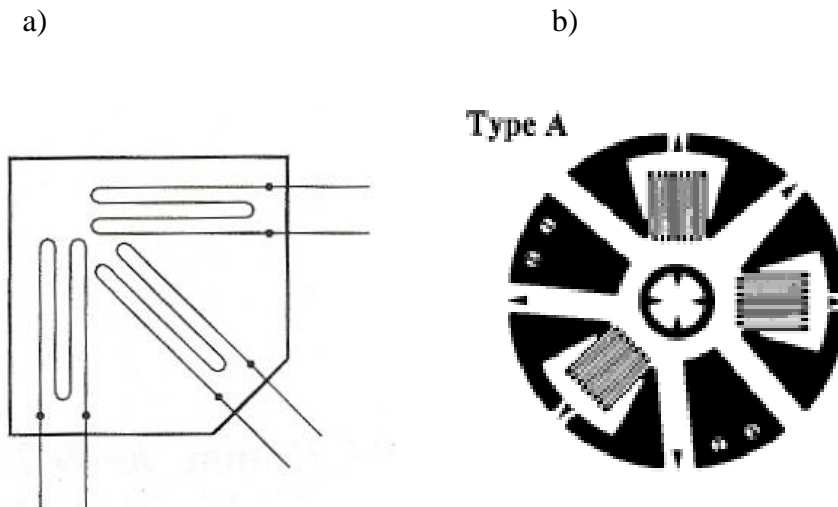
Üks levinumatest meetoditest jääk- ja kahanemispingete määramiseks on augumeetod. Augumeetodi puhul freesitakse uuritavasse materjali auk ja mõõdetakse tensoandurite roseti augu läheduses tekkinud deformatsioone ja hiljem nende deformatsioonide järgi arvutatakse pinged. Antud töös määrati kahanemispinged vastavalt standardile ASTM E837 [21].

Tensoandurite rosett liimiti katsekehale eemale äärtest ja ebatasasustest. Joonis 2.11 näitab, kuidas tekivad jääkpinged kohas, kus toimub freesimine. Eeldatakse, et need pinged on ühtlased kogu x - y tasapinnas. Vabanevad pinged tekivad ainult augu ümbruses, kaugemal olevad pinged seda ei mõjuta, seega augumeetod on lokaalne ja võimaldab mõõta jääk- ja kahanemispingeid väga piiratud alal.



Joonis 2.11. Augu geometria ja jääkpinged: ühtlased (a), ebühtlased (b) [21]

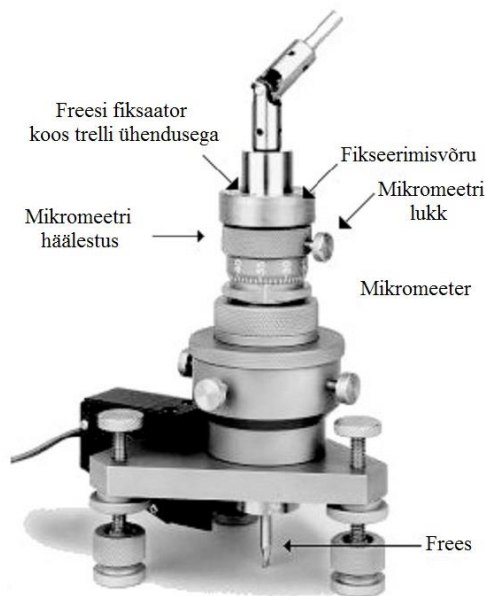
Keerulise konstruktsiooni pingeseisundi uurimisel tekib vajadus määrata peapingete suund. Selleks kasutatakse korraga kolme andurit, mis asetsevad omavahel 45° -ste nurkade all, nn andurite rosett (joonis 2.12). Kolme mõõdetud deformatsiooni järgi võib kergesti arvutada peapingete suuna [22].



Joonis 2.12. Tensoanduritega roseti skeem (a) [22] ja joonis (b) [21]

Rosett (Vishay Micro-Measurements EA-06-125RE-120) liimiti uuritava katsekeha pinnale nii, et deformatsioonianduri nr 1 telg ühtiks x -teljega (katsekeha pikitelg) ja y -telg on x -teljest 90° vastupäeva. Rosetti kaugus katsekeha lähimast servast peab olema $1,5D$, kus D on roseti keskläbimõõt. Antud töös kasutatud roseti korral pidi see asuma servast vähemalt 15,39 mm kaugusel. Anduri töö põhimõte on samasugune, nagu on kirjeldatud peatükis 2.2.2. Tensotundlikkuse tegur on siinkohal valitud $\gamma_0=2,0$ [21].

Augu freesimiseks kasutati firma Vishay Micro-Measurements poolt toodetud seadet RS-200 (joonis 2.13), mis lubab täpselt tsentreerida ning auku freesida läbi tensoanduritega roseti. Tsentreerimine toimus mikroskoobi abil täpsusega 0,038 mm ning seda kasutati ka augu läbimõõdu mõõtmiseks peale freesimist. Freesimist on võimalik teostada kahel viisil: aeglane freesimine trelli või puurpingi abil ning kiire freesimine õhutorbiini abil. Antud töös kasutatakse aeglast freesimist, mille jaoks valmistati freesi fiksaator (joonis lisas 2), kuhu kinnitatakse 6 mm saba läbimõõduga frees istuga ning pingutatakse küljelt poldiga [25].



Joonis 2.13. Augu freesimise seade RS-200 [25]

Deformatsioonid mõõdetakse Vishay Micro-Measurements seadmega P3, mis on kujutatud joonisel 2.3.

Katsekeha fikseerimiseks tuli kasutada selleks ettenähtud fiksaatorit, mis sai projekteeritud ja valmistatud käesoleva töö raames (joonis 2.14). Terasest fiksaator valmistati Powersteel OÜ-s täpsusega 0,5 mm. Lisas 3 on esitatud fiksaatori koostejoonised.



Joonis 2.14. Katsekeha fiksaator

Pingete arvutamiseks kasutatakse programmi *H-Drill*, mis on mõeldud augumeetodiga mõõdetud deformatsioonide pingeteks teisendamiseks. Antud programm tugineb standardile ASTM E837. Programm on sobilik järgmistel tingimustel: tensoanduritega rosett peab olema standardis välja toodud, katsekeha laius ületab kolmekordse roseti keskläbimõõdu, katsekeha paksus on suurem kui 1,2-kordne roseti keskläbimõõt (joonis 2.11) ja jääkpinged moodustavad vähem kui 60 % voolavuspingest.

Arvutuste aluseks võtab programm kolm meetodit:

1. Ühtlaste pingete meetod (*uniform stress method*) eeldab, et jääkpinged on jaotunud ühtlaselt kogu augu sügavuses. Puuduseks on ruumiline eraldusvõime. Kui mõõdetud jääkpinged on tegelikkuses ühtlased, on see meetod sobivaim valik.
2. Astmeseeriade meetod (*power series method*) on kesktee eelmise ja järgneva meetodi vahel. Annab suurema ruumilise eraldusvõime, eeldades et jääkpinged varieeruvad lineaarselt sõltuvalt augu sügavusest. See meetod on tundlikum, võrreldes eelmisega.
3. Integraalmeetodi (*integral method*) puhul arvutatakse jääkpinge iga puurimisastme järel. Seda meetodit on soovitatav kasutada tihedalt varieeruvate jääkpingete korral. Tundlikkus katsete vigadele on suurim, võrreldes eelmiste meetoditega [26].

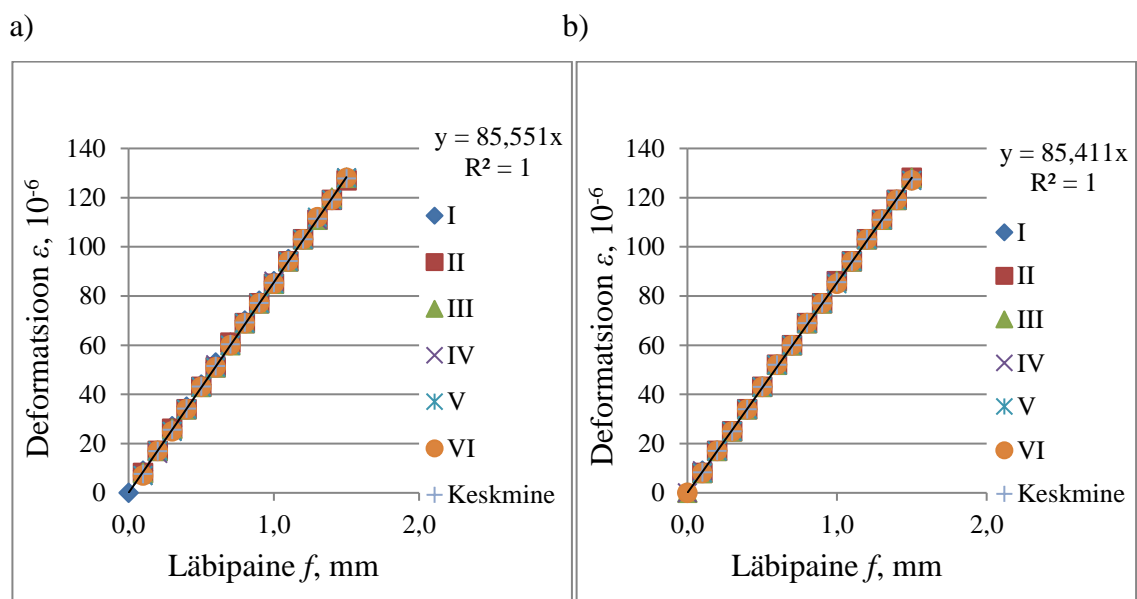
2.3. Katsetulemused ja analüüs

2.3.1. Elastsusmooduli määramine

Liimides andurid ühtlase jäikusega talale, määrati tareerimiskonstant. Mõõtmise katsete kordusi oli kuus, nii ühe anduriga kui ka kahe anduri koosmõjul. Talale anti läbipaine 0,1 millimeetri kaupa, rakendades jõudu selle otsale (joonis 2.1). Saadud andmed kanti tabelisse (lisa 4) ning leiti keskmised deformatsioonid. Arvutati tareerimiskõverad, kus ühel teljel on tala läbipaine siirdemõõturi all ja teisel teljel on suhteline deformatsioon.

Ühe anduriga mõõdetud (joonis 2.15, a) tulemusi kirjeldab väga hästi lineaarne funktsioon $y=85,551x$. Determinatsioonikordaja 0,9998 näitab, et saadud lineaarfunktsioon iseloomustab 99,98% suhtelise deformatsiooni varieeruvust. Mõõtemääramatus on $15,95\% \cdot 2=\pm 31,9\%$.

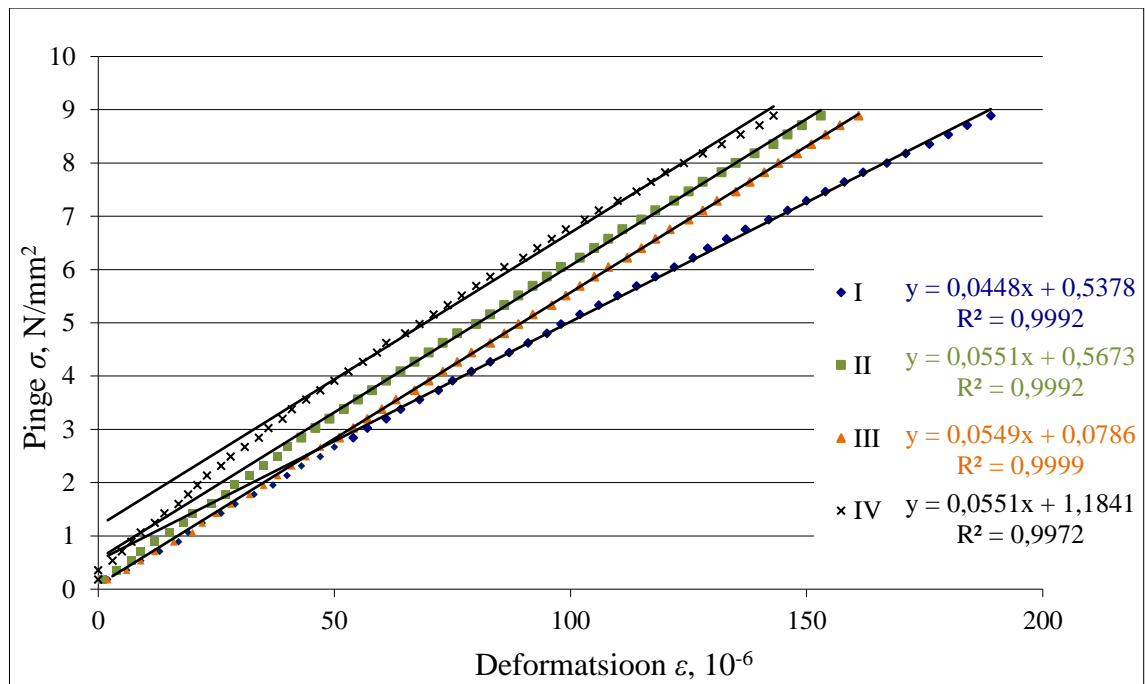
Kahe anduriga mõõdetud (joonis 2.15, b) tulemusi kirjeldab väga hästi lineaarne funktsioon $y=85,411x$. Determinatsioonikordaja 0,9999 näitab, et saadud lineaarfunktsioon iseloomustab 99,99% suhtelise deformatsiooni varieeruvust. Mõõtemääramatus on $15,87\% \cdot 2=\pm 31,7\%$.



Joonis 2.15. Tareerimistulemused ja lähendussirged

Kasutades valemit 2.2, saadi tareerimiskonstandid ühe anduri korral $C=2,045 \cdot 10^{-6}$ ja kahe anduri korral $C=2,042 \cdot 10^{-6}$. Edaspidistes arvutustes kasutati kahe konstandi aritmeetilist keskmist, milleks on $C=2,044 \cdot 10^{-6}$.

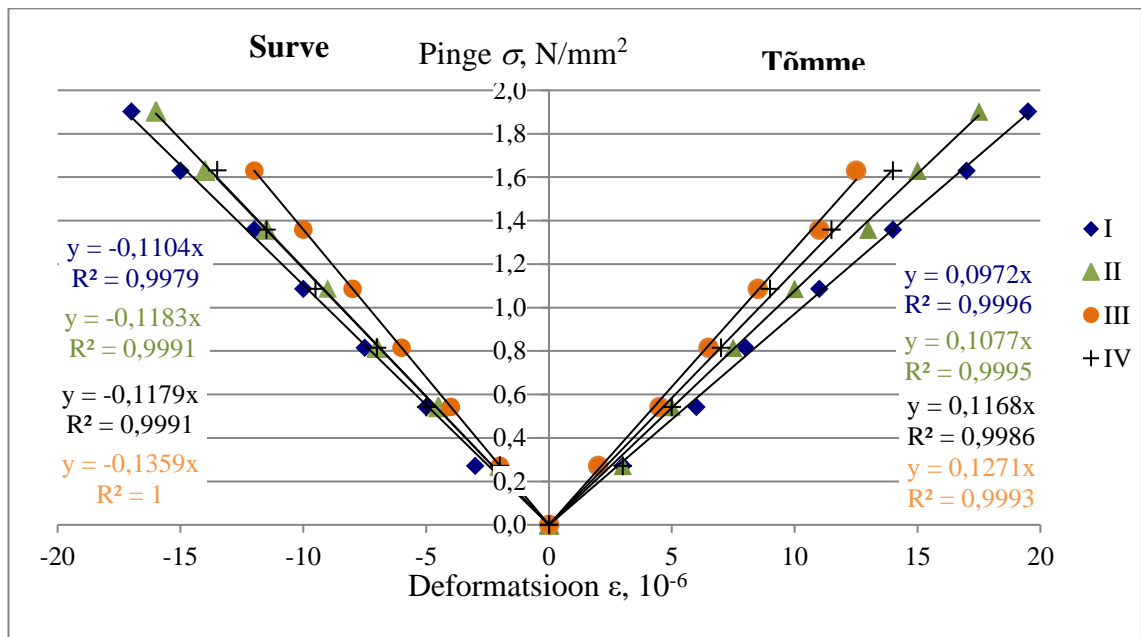
Elastsusmooduli määramisel survekatsega koormati katsekeha 1 kN astme kaupa ja võeti vastavad lugemid. Saadud tulemused kanti tabelisse (lisa 5), kus jõud viidi üle pingeteks. Koostati pinge-deformatsiooni graafik (joonis 2.16), kus määrati kõveral elastsusmooduli arvutamiseks piirkond. Selleks tõmmati graafikule puutuja (pidev joon) ja otsustati, et sobivaks piirkonnaks oli mõõdetud deformatsioonid alates pingest 2,844 MPa.



Joonis 2.16. Survekatsega määratud pinge-deformatsiooni katsetulemused ja lähendussirged

Saadud graafikult on näha, et II, III ja IV katseseeria graafiku tõusud on enam-vähem samad. Funktsioonide erinevus seisneb vabaliikmetes, mis annavad lõpptulemustele vahed. I katseseeria elastsusmoodul on teistega võrreldes tunduvalt väiksem. Survekatsetel määrati lisaks elastsusmoodulile ka Poisson'i tegur ja need on vastavalt katseseeriale järgmised: I – 0,14, II – 0,19, III – 0,19 ja IV – 0,19. Järelikult I seeria katsekehade põikeefekt on väiksem kui ülejäänud katseseeriatel.

Paindekatsesga elastsusmooduli määramisel koormati katsekeha 30 kgf astme kaupa ja kirjutati üles vastavad lugemid. Pärast survetsooni deformatsiooni mõõtmist keerati katsekeha 180° ümber oma kesktelje ja mõõdeti tõmbetsooni deformatsioonid. Tulemused kanti tabelisse (lisa 5), kus vastavale koormusele leiti vastav paindepinge. Koostati pinge-deformatsiooni graafik, kus määrati mõõtmistulemustele puutujad, milleks olid ilma vabaliikmeta lineaarfunktsioonid.



Joonis 2.17. Paindekatsesga määratud pinge-deformatsiooni katsetulemused ja lähendussirged

Jooniselt 2.17 on näha, et kõikide materjalide pinge-deformatsiooni kõveraid kirjeldab hästi lineaarne funktsioon. Materjalide võrdluses on suurim elastsusmoodul Qualiduri (III) pinnakõvendil ja kõige väiksem Monoshake TF (I) pinnakõvendil. Betooni (IV) ja pinnakõvendi Qualitop Master (II) elastsusmoodulid jäävad nende kahe vahele.

Tabel 2.1. Katseliselt määratud elastsusmoodulid

Materjal	Elastsusmoodul E , GPa		
	survekatsesga	paindekatsesga	
		survetsoonis	tõmbetsoonis
Monoshake TF	21,90	26,59	23,46
Qualitop Master	26,88	28,49	26,59
Qualidur	26,88	33,24	31,91
Betoon	27,13	29,55	28,49

Tabeli 2.1 järgi saab järeldada, et paindekatsel on elastsusmoodulid suhteliselt sarnased, väikeste erinevustega. Andmete usaldusväärsus on küsitav, sest katseid tehti iga materjali kohta ühel korral. Maksimaalne erinevus esines Qualidur pinnakõvendi korral, kus see on kahe tulemuse vahel 6,36 GPa.

2.3.2. Pikkuse muudu mõõtmine

Kahanemise mõõtmise kestvus oli 60 päeva, sest esimese 2-3 kuu jooksul esineb umbes 80% kogu kahanemisest [2]. Katsekehade hoiustamise ruumis muutusid ümbritseva keskkonna tingimused kütteperioodi lõppemisel ning see avaldus ka tulemustes (joonised 2.18 - 2.19, kus 30 ja 40 päeva juures oli toimunud hüppeline katsetulemuste muutus), kuid autor näeb vajalikuks näidata 60 päevase kahanemise tulemusi. Võrdlemiseks esitatakse kõik katseeriade tulemused 60 päeva vanuselt.

Kahanemise arvutamiseks võeti kõigepealt esimese ja teise mõõtmise tulemuste keskmine (peatükk 2.2.3), seejärel kolmanda ja neljanda mõõtmise tulemuste keskmine. Saadud tulemused lahutati eelmise mõõtmiskorra tulemustest. Kui tulemuste aritmeetiline keskmine oli negatiivne, siis on tegemist kahanemisega, vastupidisel juhul kasvamisega. Kahanemine ja kahanemine kokku on tabelis (kõitega kaasas oleval *CD*-plaadil lisas 6) esitatud positiivsena, sest sõna ise väljendab arvu väärtust ning negatiivne märk arvu ees ei ole vajalik. Kahanemine kokku leiti kahanemise liitmisel eelmise mõõtmiskorra kahanemisega kokku.

Kahanemispingete leidmiseks tuli kõigepealt leida suhtelised deformatsioonid (valem 2.10), kus x -nda päeva suhtelise deformatsiooni leidmiseks lahutati x -päeva kahanemine esimese mõõtmise tulemusest ja jagati katsekeha baasmõõtepikkusega, s.o 250 mm. Tulemus saadi kordajaga 10^{-6} (kasutusel on ka *microstrain*) ja see on dimensioonitu suurus. See tulemus korrutati peatükis 2.3.1 leitud tareerimiskonstandiga ja saadi katsekehas tekkinud deformatsioon. Kahanemispinged leiti Hooke'i seaduse (valem 2.4) järgi, kus pinged võrduvad elastsusmooduli ja deformatsiooni korrutisega. Elastsusmooduliks võeti tabelis 2.1 olev maksimaalne väärtus, mis saadi paindekatsel survetsoonis.

Katsetulemustest ülevaate saamiseks koostati regressioonanalüüs programmiga *MathCAD 15.0*, kus katsetulemused lähendatakse logaritmfunksiooniga (valem 2.11) [27]

$$\varepsilon(t) = a \cdot \ln(1+t^b), \quad (2.11)$$

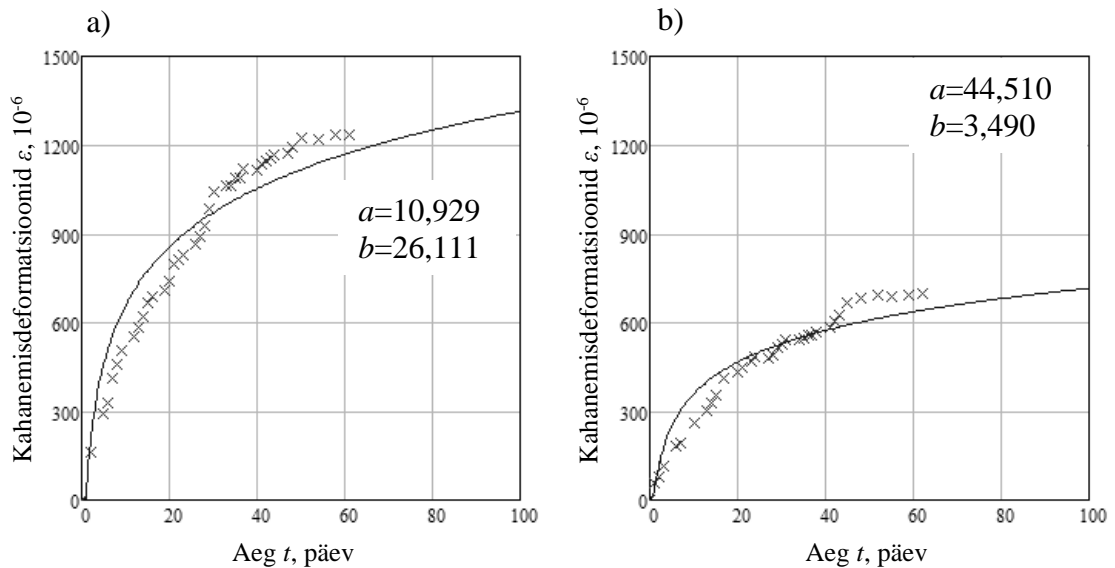
kus $\varepsilon(t)$ – kahanemisdeformatsioon,
 t – aeg (päev),
 a, b – konstandid.

Ülesande lahendamisel anti programmis konstandid ette ning toimus funktsiooni lähendamine mõõtmistulemustele. Saadud tulemustest kanti konstant b üle programmi *MS Excel*, milles koostati regressioonanalüüs, kus argumenttunnuseks oli $\ln(1+t^b)$ ja funktsioontunnuseks katsekehade kahanemisdeformatsioonid. Kõikidel katseseerialtel esines seos eelpool toodud funktsiooniga.

Järgnevalt on antud kõigi nelja katseseeria regressioonanalüüsi graafikud (joonised 2.18 - 2.19), mida iseloomustavad logaritm võrrandid ja determinatsioonikordajad. Determinatsioonikordaja iseloomustab, kui suur osa funktsioontunnuse varieeruvusest (hälvete ruutude summast) kirjeldatakse regressioonivõrrandiga [28]. Mõõtemääramatus arvutatakse 95%-lise usaldusnivoo juures, kasutades kattetegurit, mis on vastava usaldusnivoo juures $k=2$. Arvutamisel korrutatakse kattetegur keskmise standardveaga [29]. Mõõtemääramatusel esineb ka teisi mõõtmisvigu, kuid antud töö raames jäetakse need kõrvale, sest nende osakaal on väike, võrreldes standardveaga.

I katseseeria regressioonikõverat (joonis 2.18, a) iseloomustab logaritmfunksioon $\varepsilon(t)=10,929 \cdot \ln(1+t^{26,111})$, millele vastav kahanemispingete funktsioon on $\sigma(t)=0,592 \cdot \ln(1+t^{26,137})$. Determinatsioonikordaja $R^2=0,9886$ näitab, et saadud logaritmfunksioon iseloomustab 98,86% kahanemispingete varieeruvusest. Mõõtemääramatus on $2,938 \cdot 2 = \pm 5,88$ MPa ja p -arv on $8,089 \cdot 10^{-37}$, järelikult saadud mudel on statistiliselt oluline.

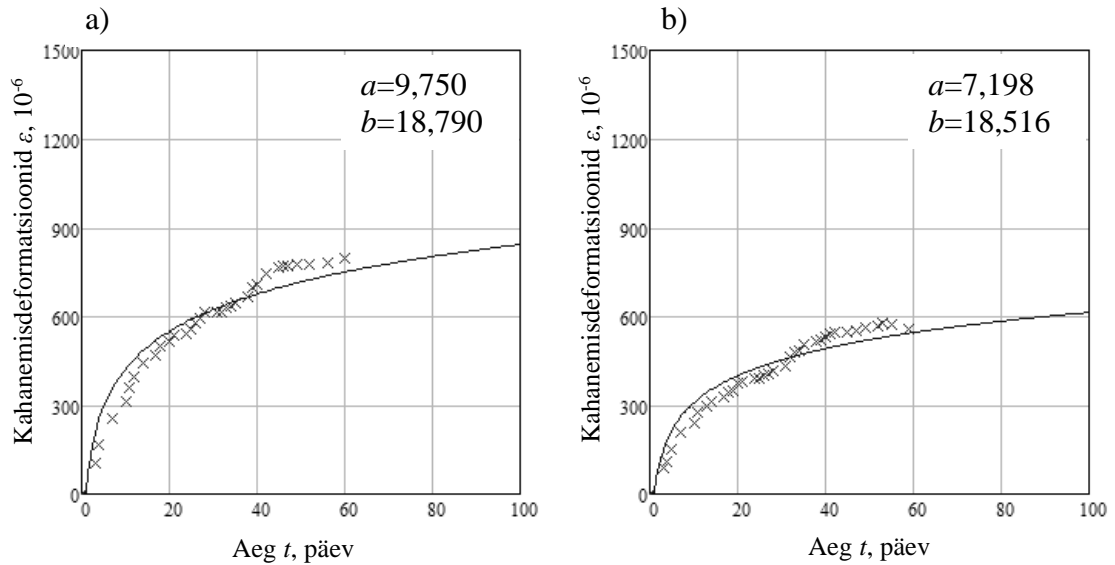
II katseseeria regressioonikõverat (joonis 2.18, b) iseloomustab logaritmifunktsioon $\varepsilon(t)=44,510 \cdot \ln(1+t^{3,490})$, millele vastav kahanemispingete funktsioon on $\sigma(t)=2,587 \cdot \ln(1+t^{3,490})$. Determinatsioonikordaja $R^2=0,9889$ näitab, et saadud logaritmifunktsioon iseloomustab 98,89% kahanemispingete varieeruvusest. Mõõtemääramatus on $1,988 \cdot 2 = \pm 3,98$ MPa ja p -arv on $4,687 \cdot 10^{-33}$, järelikult saadud mudel on statistiliselt oluline.



Joonis 2.18. Monoshake TF (a) ja Qualitop Master (b) kahanemine sõltuvalt ajast

III katseseeria regressioonikõverat (joonis 2.19, a) iseloomustab logaritmifunktsioon $\varepsilon(t)=9,750 \cdot \ln(1+t^{18,790})$, millele vastav kahanemispingete funktsioon on $\sigma(t)=0,661 \cdot \ln(1+t^{18,790})$. Determinatsioonikordaja $R^2=0,9922$ näitab, et saadud logaritmifunktsioon iseloomustab 99,22% kahanemispingete varieeruvusest. Mõõtemääramatus on $2,443 \cdot 2 = \pm 4,89$ MPa ja p -arv on $1,826 \cdot 10^{-34}$, järelikult saadud mudel on statistiliselt oluline.

IV katseseeria regressioonikõverat (joonis 2.19, b) iseloomustab logaritmifunktsioon $\varepsilon(t)=7,198 \cdot \ln(1+t^{18,516})$, millele vastav kahanemispingete funktsioon on $\sigma(t)=0,434 \cdot \ln(1+t^{18,504})$. Determinatsioonikordaja $R^2=0,9910$ näitab, et saadud logaritmifunktsioon iseloomustab 99,10% kahanemispingete varieeruvusest. Mõõtemääramatus on $1,534 \cdot 2 = \pm 3,07$ MPa ja p -arv on $1,465 \cdot 10^{-36}$, järelikult saadud mudel on statistiliselt oluline.

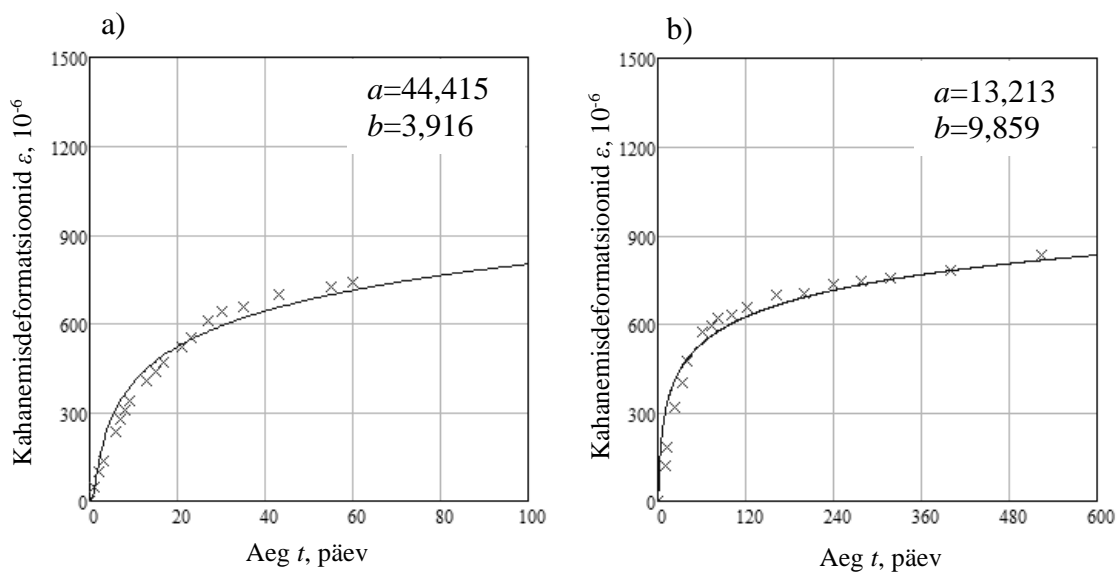


Joonis 2.19. Qualiduri (a) ja betooni (b) kahanemine sõltuvalt ajast

Võrdlemiseks kasutati 2010. aasta magistritöös [1] ja 2004. aastal avaldatud artiklis [30] esitatud tavabetooni kahanemist. Pingeteks teisendamisel korrutati suhteline deformatsioon käesoleva töö tareerimiskonstandiga ja elastsusmooduliks võeti allikas [29] esitatud väärtus, mis oli 20 GPa.

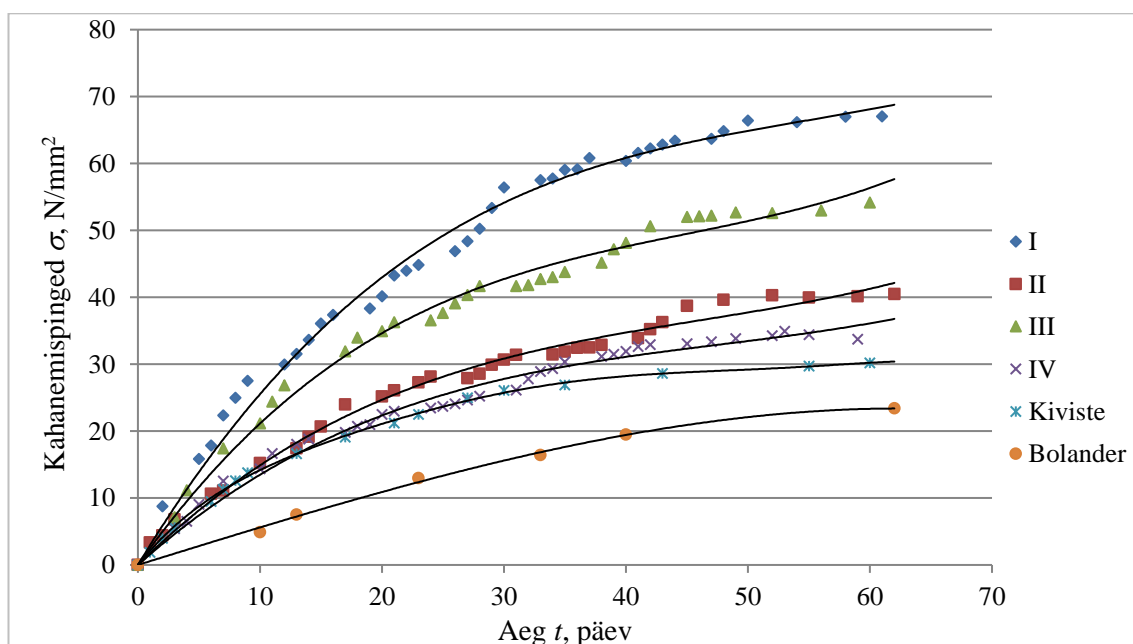
Töös [1] katseseeria regressioonikõverat (joonis 2.20, a) iseloomustab logaritmifunktsioon $\epsilon(t)=44,415 \cdot \ln(1+t^{3,916})$, millele vastav kahanemispingete funktsioon on $\sigma(t)=1,816 \cdot \ln(1+t^{3,916})$. Determinatsioonikordaja $R^2=0,9927$ näitab, et saadud logaritmifunktsioon iseloomustab 99,27% kahanemispingete varieeruvusest. Mõõtemääramatus on $2,231 \cdot 2 = \pm 4,46$ MPa ja p -arv on $7,942 \cdot 10^{-20}$, järelikult saadud mudel on statistiliselt oluline.

Töös [30] katseseeria regressioonikõverat (joonis 2.20, b) iseloomustab logaritmifunktsioon $\epsilon(t)=13,213 \cdot \ln(1+t^{9,859})$, millele vastav kahanemispingete funktsioon on $\sigma(t)=0,541 \cdot \ln(1+t^{9,844})$. Determinatsioonikordaja $R^2=0,9882$ näitab, et saadud logaritmifunktsioon iseloomustab 98,82% kahanemispingete varieeruvusest. Mõõtemääramatus on $2,360 \cdot 2 = \pm 4,72$ MPa ja p -arv on $4,626 \cdot 10^{-17}$, järelikult saadud mudel on statistiliselt oluline.



Joonis 2.20. Kiviste (a) ja Bolander (b) kahanemine sõltuvalt ajast

Katsetulemuste lihtsamaks analüüsimiseks esitati tulemused ühel graafikul. Koondgraafik (joonis 2.21) koostati *MS Excel* keskkonnas pingeteks teisendatuna.



Joonis 2.21. Katseseeriade keskmistatud kahanemispinged

Jooniselt 2.21 on näha, et kõige suuremad kahanemispinged tekivad I katseseerias, seejärel III katseseerias. II ja IV katseseerias on tekkinud kahanemispinged suhteliselt võrdsed. Esimese paari päeva jooksul on tekkivad pinged samad. Suurem osa pingetest

tekib esimese 15-20 päeva jooksul, mil toimub järsem tõus, hiljem hakkab tekkinud pingete suurus tasapisi vaibuma. Eelmise aasta magistritöö [1] uurimuse tulemustel arvatud pinged on väiksemad. Üheks põhjuseks võib olla elastsusmooduli valik, mis on võetud 20 GPa, kuid mis ei pruugi vastata tegelikkusele.

2004. aastal [30] mõõdetud betooni kahanemine (joonis 2.20, b) langeb kokku käesoleva töö autori poolt mõõdetud tulemustega (joonis 2.19, b). 2010. aasta [1] mõõtmised erinevad eelpool toodutest ~32%. Eeldatavasti on selle põhjuseks hoiustamise ruumi niiskusrežiimi järsk muutus, mis häiris regresseeruvat kahanemist oluliselt ning võis aidata kaasa kahanemise progresseerumisele.

Tabel 2.2. Suhtelise deformatsiooni ja pinge arvutusel saadud konstandid

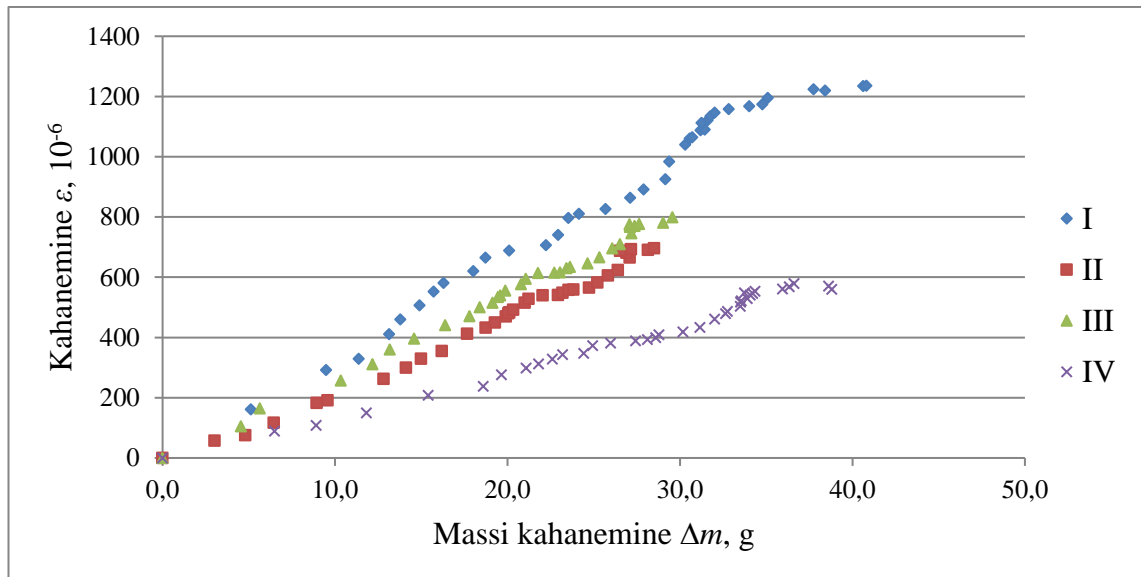
Materjal	Deformatsioonide arvutamisel		Pingete arvutamisel	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Monoshake TF	10,929	26,111	0,592	26,137
Qualitop Master	44,510	3,490	2,587	3,490
Qualidur	9,750	18,790	0,661	18,790
Betoon	7,198	18,516	0,434	18,504
Kiviste, 2010	44,415	3,916	1,816	3,916
Bolander, 2004	13,213	9,859	0,541	9,844

Tabelis 2.2 on välja toodud kõikide materjalide suhtelise deformatsiooni ja pinge regressioongraafikute konstandid. Tegemist on ühikuta suurustega. Konstandi *b* puhul on näha suhteliselt väikeseid erinevusi, s.t graafikud on sama kujuga. Esimese konstandi suur erinevus tuleneb erinevatest ühikutest: deformatsiooni puhul on ühikuks 10^{-6} ja pinge korral vastavalt MPa.

Mõõtmistulemusi võisid mõjutada ka välisõhu eest kaitsmata metallist tihvtiotsad, millel võis tekkida korrosioon, mida pole võimalik silmaga näha, kuid mis mõjutab sellise täpsusega mõõtmise korral saadud tulemusi. Korrodeerumisel metalli ruumala suureneb ja kahanemise tulemused vähenevad.

Kõigi katsekehade kahanemise mõõtmiste juures kaaluti iga katsekeha. Mõõtmistulemuste arvutamisel lahutati järgmise mõõtmiskorra katsekeha mass eelmise

mõõtmiskorra omast, mille tulemusena saadi mõõtmiskordade vaheline massi kahanemine. Kogu kahanemise leidmiseks saadud tulemused liideti. Graafiku koostamiseks erinevate materjalide masside kahanemised keskmistati. Katsete tulemused on esitatud tööga kaasasoleval *CD*-plaadil lisas 6.



Joonis 2.22. Katsekehade massi ja kahanemise suhe

Saadud joonisel 2.22 on näha, et kõige rohkem kaotasid massist I ja IV katseseeria, mille suurus on samas järjus. Kuna IV (betoon) katseseerias on kasutati jämedat täitematerjali, mis takistab kahanemist, on kahanemise väärtuste vahe kahekordne. II ja III katseseeria jäävad eelpool nimetatute vahele. Sellised erinevused on arvatavasti tingitud materjalides kasutatavatest erinevatest koostisosadest ja nende omavahelistest suhetest. Kahanemise alguses toimub nii vee aurustumine kui katsekeha kokkutõmbumine kõigil seerialtel võrdselt. Hiljem tekkivad erinevused on tingitud materjalide eripärast.

2.3.3. Augumeetod

Augu freesimist teostati peale eelmise meetodi tulemuste saamist, sest kasutati samu katsekehi. Augu sügavust suurendati 1,53 mm astme kaupa, sest seadmega oli kaasas vastava paksusega plaat. Freesimine viidi läbi kuni sügavuseni 7,65 mm, s.o viis astet.

Peale igat freesimist tõsteti frees august välja, oodati 100 sekundit, et näidud saaksid ühtlustuda ning märgiti need üles. Saadud tulemused kanti tabelisse, mis omakorda sisestati augumeetodi jääkpingete arvutamise arvutiprogrammi *H-Drill*, mille abil arvutati välja peapinged. Saadud pinged on kantud tabelisse 2.3, kus on neid võrreldud eelmise meetodiga saadud regressioonvalemite põhjal arvutatud pingetega.

Tabel 2.3. Erinevate meetoditega saadud kahanemispingete võrdlus

Materjal	Katsekeha vanus t , päev	Regressioonvalem	Pikkuse muudu pinge σ , MPa	Augumeetodi pinge σ , MPa
Monoshake TF	84	$\varepsilon(t)=0,592 \cdot \ln(1+t^{26,137})$	68,6	45,0
Qualitop Master	98	$\varepsilon(t)=2,587 \cdot \ln(1+t^{3,490})$	41,4	68,0
Qualidur	96	$\varepsilon(t)=0,661 \cdot \ln(1+t^{18,790})$	56,7	20,0
Betoon	90	$\varepsilon(t)=0,434 \cdot \ln(1+t^{18,504})$	36,1	9,0

Saadud tabelist on näha, et pikkuse muudu mõõtmisel ja augumeetodiga leitud pinged ei lange kokku. See võib olla tingitud sellest, et augumeetodiga mõõdeti pingeid lokaalselt katsekeha pinnal, kuid pikkuse muudu mõõtmisel mõõdeti pingeid katsekeha kogu ristlõike ulatuses. Freesimise käigus selgus, et kuni 3,06 mm sügavuseni toimus järsk pingete tõus ja pärast veidi vähem järsem langus ning siis hakkasid pinged ühtlustuma. Siit võib järeldada, et katsekeha pealispind on kuivamise käigus rohkem kahanenud kui terve katsekeha. Kuna pinnakihi ristlõike pindala on väiksem, tekivad sinna ka suuremad pinged.

Kokkuvõte

Käesoleva uurimustöö eesmärgiks oli uurida erinevate pinnakõvendite kahanemist ja arvutada kahanemispinged ning võrrelda neid tavabetoniga tehtud katsetulemustega. Betooni koostisena kasutati eelmise aasta uurimustööst võetud andmeid ja pinnakõvendite puhul kasutati kvartsibaasilistest kividest ja tsemendist koosnevat kuivsegu, millele lisati vett vastavalt tootja poolt väljaantud kasutusjuhendile. Katseid tehti kokku nelja materjaliga: Monoshake TF, Qualitop Master, Qualidur ja betoon. Pingete arvutamiseks määrati töös ka materjalide elastsusmoodulid.

Katseid teostati deformatsiooni meetodiga, kus mõõdeti katsekehade pikkuste kahanemist. Katsetulemuste analüüsis võrreldi käesoleva töö katsete tulemusi K. Kiviste ja J. E. Bolanderi poolt tavabetoniga tehtud katsetulemustega. Materjalide elastsusmoodulite määramiseks tehti katseid igast materjalist võetud ühe katsekehaga.

Lähtuvalt arvutuste tulemustest saadi käesolevas töös kahanemispingeteks: Monoshake TF (84) – 68,6 MPa, Qualitop Master (98) – 41,4 MPa, Qualidur (96) – 56,7 MPa, betoon (90) – 36,1 MPa, Kiviste (90) – 32,0 MPa ja Bolander (90) – 24,0 MPa. Tulemused on saadud regressioonavaldiste kaudu ja sulgudes olevad arvud näitavad katsekehade vanust päevades.

Katsete käigus tehti järgmised järeldused:

- Kahanemise suurust mõjutab jämeda täitematerjali olemasolu. Betooni kahanemine oli kõige väiksem, võrreldes pinnakõvenditega. Põhjuseks võibki lugeda eelpool nimetatud koostisosa mõju betoonis. Pinnakõvendite segudel puudus jäme täitematerjali osakaal.

- Kahanemispingete vahe väheneb tänu materjalide erinevatele elastsusmoodulitele. Kõige suurema kahanemisega materjali kahanemispinge teiste materjalide pingete suhtes vähenes tänu väiksemale elastsusmoodulile.
- Kahanemispingete teket on võimalik edasi lükata plastse kahanemise vähendamiseks, mis tekib esimeste tundidega, kui betoon on veel vedelas olekus. Suurema veekao puhul tekivad suuremad kahanemised ja siit tulenevalt ka suuremad kahanemispinged.
- Pinnakõvendi ja aluse vahel tekivad pingeerinevused, kuid jõud on erineva osakaaluga, sest kihtidel on erinev ristlõike pindala. Pingeerinevused vähenevad, kui pinnakõvendit kantakse kohe värsketele betoonile, sest esimestel päevadel tekkivad pinged on sarnased.
- Pinnakõvendi paigaldamisel kivistunud alusele tuleks kindlasti arvestada suurte deformatsioonide erinevustega, mis võivad põhjustada komplikatsioone pinde ja aluse sidumisel.

Lisaks teostati esialgsed katsed augumeetodiga. Arvutuste tulemusena saadud pinged on: Monoshake TF – 45,0 MPa, Qualitop Master – 68,0 MPa, Qualidur – 20,0 MPa ja betoon – 9,0 MPa. Seda meetodit võiks kindlasti edasi uurida, kuidas see sobiks kasutada selliste poorsete materjalide puhul. Antud töö käigus projekteeritud ja ehitatud katsekehade fiksaatorit on võimalik selle meetodi korral ka edaspidi kasutada.

Töös kasutatud logaritmifunktsiooni on võimalik ka edaspidi kasutada kahanemiste määramisel. Sobivate tegurite leidmiseks tuleks läbi viia rohkem katseid. Katsekehasid tuleks üle mõõta aasta möödudes ja kontrollida mõõtmisi prognoositavate väärtustega.

Täpsema tulemuse saamiseks tuleks tagada fikseeritud tingimustega hoiustamise ruum. Soovitavalt oleks selleks kliimakamber. Teine võimalus oleks katsekehad peale vormist eemaldamist katta kilega, et ei toimuks kiiret kuivamist. Ideaalsetes tingimustes tuleks selliste katsete teostamiseks koostada vastav rakis, kus iga katsekeha on statsionaarselt paigal koos selle juurde käiva siirdemõõturiga. Soovitavalt tuleks kasutada mehaanilist mõõturit, siis on vea tekkimise võimalus väiksem. Digitaalsel mõõturil on liiga palju segavaid tegureid saavutamaks parimat tulemust.

Viidatud allikad

1. Kiviste, K. 2010. Kiudbetooni kahanemise määramine. Tartu: Eesti Maaülikool. 75 lk.
2. Holt, E. E. 2001. Early-age autogeneous shrinkage of concrete. Espoo: Technical Research Centre of Finland. 197 p.
3. Mokarem, D. W. 2002. Development of concrete shrinkage performance specifications. USA: Virginia Polytechnic Institute and State University. 236 p.
4. Illston, J. M. (toim.). 1994. Construction materials: their nature and behaviour. 2nd ed. UK: E & FN Spon. 518 p.
5. Neville, A. M. 1995. Properties of concrete. 4th ed. London: Pearson Education Ltd. 844 p.
6. Kurtz, F. S. (toim.). 1998. Practitioner's guide to slabs on ground. USA: American Concrete Institute. 567 p.
7. Grasley, Z. C., Lange, D. 2004. A. Modeling drying shrinkage stress gradients in concrete. ASTM International. 13 p.
8. Tazawa, E. (toim.). 1999. Autogenous shrinkage of concrete. UK: E & FN Spon. 424 p.
9. Nawa, T., Horita, T. 2004. Autogenous shrinkage of high-performance concrete. Proceedings of the international workshop on microstructure and durability to predict service life of concrete structures. Japan. 10 p.
10. Kaevats, Ü., Varrak, T. (toim.). 1994. Eesti Entsüklopeedia 7. Tallinn: Eesti Entsüklopeediakirjastus. 704 lk.
11. Domone, P., Illston, J. (toim.). 2010. Construction materials: their nature and behaviour. 4th ed. UK: E & FN Spon. 584 p.
12. Bissonnette, B., Pierre, P., Pigeon, M. 1999. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. Cement and Concrete Research. USA: Pergamon. 1655-1662.

13. Eriline koht epoksüvaik süsteemide kasutuseks on põrandad. [<http://www.epokate.ee/?eriline-koht-epoksuvaik-susteemide-kasutuseks-on-p%C3%B5randad,51>] (25.05.2011)
14. Cattel, D. 2005. Specialist floor finishes: design and installation. UK: Taylor and Francis Inc. 151 p.
15. Epoksüvaikkatte paigaldamine. [http://floormasters.org/images/photos_24.jpg] (25.05.2011)
16. ACIFC. 2001. Dry shake finishes for concrete industrial floors. An introductory guide. UK: Association of Concrete Industrial Flooring Contractors. 24 p.
17. Qualitop Master data sheet. [http://www.placeo.eu/en/component/docman/doc_download/101-data-sheet.html] (25.05.2011)
18. Garber, G. 2006. Design and construction of concrete floors. USA: Elsevier Ltd. 392 p.
19. Knapton, J. 1999. Single pour industrial floor slabs. UK: John Knapton and Thomas Telford Limited. 176 p.
20. ASTM C490/C490M-08. 2008. Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. ASTM International. 5 p.
21. ASTM E837-08. 2009. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM International. 17 p.
22. Kompus, V., Raukas, U. 2001. Tehnilise mehaanika ja tugevusõpetuse laboritööde juhend. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus. 46 lk.
23. Кью, Я. П. 1965. Определение собственных напряжений в деталях машин, восстановленных гальваническими покрытиями. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ленинград: Ленинградский сельскохозяйственный институт. Инженерный факультет. 229 с.
24. Jürgenson, A. 1985. Tugevusõpetus. Tallinn: Valgus. 458 lk.
25. Milling Guide for Residual Stress Measurements. [www.vishaypg.com/docs/11304/rs200.pdf] (25.05.2011)
26. Schajer, G. S. 2009. H-Drill: Hole-drilling residual stress calculation program. Version 3.11. User Guide. Canada. 75 p.

27. Вирченко, Н. А., Ляшко, И. И., Швецов, К. И. 1979. Графики функций: справочник. Киев: Наукова думка. 320 с.
28. Kiviste, A. 1999. Matemaatiline statistika MS Excel keskkonnas. Tallinn: GT Tarkvara OÜ. 86 lk.
29. Bell, S. 1999. Measurement Good Practice Guide No. 11 (Issue 2). A beginner's guide to uncertainty of measurement. UK: Crown Copyright. 39 p.
30. Bolander, J. E. 2004. Numerical modeling of fiber reinforced cement composites: linking material scales. 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes. S.l: RILEM Publications SARL. 45-60.

Lisad

Lisa 1. Betooni retsept

Kogused m³ betooni kohta:

Liiv 0 – 8 mm: 1124,0 kg,

Killustik 4 -12 mm: 482,7 kg,

Killustik 8 – 16 mm: 394,0 kg,

Tsement: CEM II A-T 42,5 R: 344,5 kg,

Külm vesi: 172,1 l.

Lisa 2. Freesi fiksaatori koostejoonis

Lisa 3. Katsekeha fiksaatori koostejoonised

Lisa 4. Tensoandurite tareerimiste tulemused (kõitega kaasas oleval *CD*-plaadil)

Lisa 5. Elastsusmooduli määramise mõõtmistulemused (kõitega kaasas oleval *CD*-plaadil)

Lisa 6. Pikkuse muudu ja massi kahanemise mõõtmistulemused (kõitega kaasas oleval *CD*-plaadil)

Lisa 7. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Renno Reitsnik,
(sünnipäev 03.12.1987)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Põrandapinnete kahanemispingete määramine, mille juhendajad on dotsent Alexander Ryabchikov ja dotsent Harri Lille,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni 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 /allkirjastatud digitaalselt/
allkiri

Tartu, 13.09.2021

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)