

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Štupar, B. 2012. Vpliv višine notranjega valja reometra na izmerjene reološke lastnosti malt. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V.): 64 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Štupar, B. 2012. Vpliv višine notranjega valja reometra na izmerjene reološke lastnosti malt. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V.): 64 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE
OPERATIVNEGA
GRADBENIŠTVA**

Kandidat:

BLAŽ ŠTUPAR

**VPLIV VIŠINE NOTRANJEGA VALJA REOMETRA NA
IZMERJENE REOLOŠKE LASTNOSTI MALT**

Diplomska naloga št.: 24/OG-MK

**INFLUENCE OF HEIGHT OF RHEOMETER'S INNER
CYLINDER ON MEASURED RHEOLOGICAL
PROPERTIES OF MORTARS**

Graduation thesis No.: 24/OG-MK

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Član komisije:

doc. dr. Sebastjan Bratina

Ljubljana, 25. 09. 2012

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani **Blaž Štupar** izjavljam da sem avtor diplomske naloge z naslovom: "**Vpliv višine notranjega valja reometra na izmerjene reološke lastnosti malt**".

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Novo mesto, 7.9.2012

Blaž Štupar

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.53 (043.2)
Avtor:	Blaž Štupar
Mentorica:	izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov
Naslov:	Vpliv višine notranjega valja reometra na izmerjene reološke lastnosti malt
Tip dokumenta:	Diplomska naloga - VSS
Obseg in oprema:	64 str., 7 pregl., 32 graf., 36 sl.
Ključne besede:	reometer, malta, napetost na meji tečenja, viskoznost, Binghamova tekočina

Izvleček

V diplomski nalogi smo ugotavljali vpliv višine notranjega valja reometra na izmerjene reološke lastnosti svežih malt. V ta namen smo uporabili tri različne vrste malt, ki so vsebovale enak cementu, CEM II/A – M (LL-S) 42,4 R. V reometru smo tako preizkusili malto z dodatkom hiperplastifikatorja, sredstva za kontrolo viskoznosti ter malto brez dodakov. Dodatno smo reometer uporabili za preizkus na dveh različnih oljih, ki se uporablja za kalibracijo reometrov, da smo lahko primerjali rezultate malt z rezultati materiala, katerega viskozne lastnosti so znane.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDK: 691.53 (043.2)
Author: Blaž Štupar
Supervizor: Assoc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph.D
Title: Height influence of the inner cylinder of the rheometer on measured rheometric properties of mortar
Document type: Graduation thesis - Higher education professional study
Notes: 64 p., 7 tab., 32 gr., 36 fig.
Key words: rheometer, mortar, shear stress, viscosity, Bingham fluid,

Abstract

In this thesis we determined the influence of the inner cylinders height of the rheometer on the measured rheological properties of fresh mortar. For this purpose we used three different types of mortar, which were based upon the same cement CEM II/A – M (LL-S) 42,5 R. With the apparatus we tested three mortar types, each with its own admixture; with hyperplasticizer, with viscosity modifying agent and without admixtures. Additionally, we used the rheometer to test two different oils that are used to calibrate the rheometers in order to compare the results obtained on mortars with those obtained on material with known viscosity.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov za vso pomoč in vodenje med izdelavo diplomske naloge. Zahvaljujem se tudi strokovnemu sodelavcu Franciju Čeponu, dipl.inž.grad., ter študentu Vitu Gromesu* iz Univerze za tehnologijo Brno, Češka republika, za strokovno pomoč pri delu v laboratoriju.

Prav tako pa se posebej zahvaljujem svoji družini za spodbudne besede in podporo skozi celoten študij.

* Študent Vit Gromes je bil v času mojih raziskav v okviru diplomske naloge na študijskem obisku na Univerzi v Ljubljani, Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, s pomočjo finančne podpore projekta "SUPMAT - Promocija nadaljnega izobraževanja raziskovalnih delavcev iz centra naprednih gradbenih materialov". Registrska številka CZ.1.07/2.3.00/20.0111. Projekt SUPMAT je bil sofinanciran iz Evropskega socialnega sklada in državnega proračuna Republike Češke.

KAZALO

1	UVOD	1
2	OSNOVNO O MATERIALIH ZA IZDELAVO MALT	3
2.1	Splošno o materialih	3
2.2	Cement	3
2.2.1	Pridobivanje cementa	3
2.2.2	Vezanje in strjevanje cementa	5
2.2.3	Vrste cementa in označevanje	6
2.3	Voda	8
2.4	Agregat	9
2.5	Kemijski dodatki maltam	12
2.5.1	Plastifikatorji in superplastifikatorji	12
2.5.2	Sredstva za kontrolo viskoznosti	14
3	MALTA	15
3.1	Opis malte	15
3.2	Lastnosti sveže malte	15
3.2.1	Lepljivost ali adhezija	15
3.2.2	Konsistenca	16
3.2.3	Stabilnost	17
3.2.4	Izcejanje vode	19
3.3	Strjena malta	19
3.3.1	Trdnost malte	19
3.3.2	Sprijemnost malte z zidaki	20
3.3.3	Tehnološke lastnosti malt	21
4	REOLOGIJA CEMENTNIH SUSPENZIJ	23
4.1	Osnove reologije	24
4.2	Tipi strižnega toka	26
4.3	Delovanje reometra ConTec Viscometer 5	28
4.3.1	Geometrija valjev	30

4.3.2	Rotacija zunanega valja	32
4.3.3	Postopek merjenja z reometrom ConTec Viscometer 5	33
5	LASTNE PREISKAVE	35
5.1	Opis preiskave	35
5.2	Uporabljeni materiali	35
5.2.1	Voda	35
5.2.2	Agregat	36
5.2.3	Cement	37
5.2.4	Hiperplastifikator – HP	37
5.2.5	Sredstvo za kontrolo viskoznosti – VMA	38
5.3	Določanje geometrijskih vrednosti valjev	38
5.4	Efektivna višina malte v reometru	40
5.5	Priprava maltne mešanice	43
5.6	Vpliv hiperplastifikatorja	45
5.7	Vpliv dodatka za kontrolo viskoznosti	47
6	MERITVE	51
6.1	Meritve na malti A	57
6.2	Meritve na malti B	55
6.3	Meritve na malti C	57
6.4	Meritve z olji	59
7	ZAKLJUČEK	63
VIRI		71

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1	6
Preglednica 2: Trdnostni razredi cementov [MPa] po SIST EN 197-1	7
Preglednica 3: Primerjava lastnosti cementa CEM II/A - M (LL-S) 42,5 R z zahtevami SIST EN 197-1	37
Preglednica 4: Izmerjene vrednosti premerov valjev	39
Preglednica 5: Primerjava višin malte v posodi in vplivne višine malte.	42
Preglednica 6: Sestave mešanic pri preiskavah	44
Preglednica 7: Vrednosti plastične viskoznosti	48

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Vpliv v/c razmerja na sestavo cementnega kamna	9
Grafikon 2: Diagram napetost – strižna hitrost za Newtonske, Binghamove ter "eksponentne" tekočine	26
Grafikon 3: Vpliv D_{max} na potreben ro ob pogoju da je razmik med valjema $3 \times D_{max}$	30
Grafikon 4: Preračun vrednosti G in H za pridobitev parametrov τ_0 in μ	34
Grafikon 5: Vpliv hiperplastifikatorja na napetost na meji tečenja	45
Grafikon 6: Vpliv hiperplastifikatorja na plastično viskoznost	46
Grafikon 7: Primerjava T- N povprečnih sovisnosti za posamezne odstotke HP	47
Grafikon 8: Vpliv količine dodatka za kontrolo viskoznosti na plastično viskoznost	48
Grafikon 9: Vpliv količine VMA dodatka na meji tečenja	49
Grafikon 10: Primerjava T – N krivulj za posamezne odstotke VMA	50
Grafikon 11: Vpliv višine h na parameter G – Malta A	51
Grafikon 12: "Downward" krivulja za serije pri h = 79mm – Malta A	52
Grafikon 13: Popravljen graf vpliva višine na parameter G - Malta A	52
Grafikon 14: Vpliv višine h na parameter H – Malta A	53
Grafikon 15: Vpliv višine h na strižno trdnost - Malta A	53
Grafikon 16: Vpliv višine h na plastično viskoznost - Malta A	54
Grafikon 17: Primerjava "downward" krivulj za različne višine – Malta A	54
Grafikon 18: Vpliv višine h na parameter G - Malta B	55
Grafikon 19: Vpliv višine h na parameter H - Malta B	55
Grafikon 20: Vpliv višine h na napetost na meji tečenja - Malta B	56
Grafikon 21: Vpliv višine h na plastično viskoznost - Malta B	56
Grafikon 22: Vpliv višine h na G – Malta C	57
Grafikon 23: Vpliv višine h na H - Malta C	57
Grafikon 24: Vpliv višine h na strižno napetost na meji tečenja – Malta C	58
Grafikon 25: Vpliv višine h na plastično viskoznost – Malta C	58
Grafikon 26: Primerjava povprečnih vrednosti serij meritev – Olje I	59
Grafikon 27: Vpliv višine h na parameter G - Olje II	61
Grafikon 28: Vpliv višine h na parameter H - Olje II	61
Grafikon 29: Vpliv višine h na napetost na meji tečenja	62

Grafikon 30: Vplivi višine h na plastično viskoznost	62
Grafikon 31: Primerjava strižne trdnosti v odvisnosti od višine	63
Grafikon 32: Primerjava plastične viskoznosti v odvisnosti od višine	63

KAZALO SLIK

Slika 1: Opečnati zid s katranom kot malto	1
Slika 2: Shema rotacijske peči	4
Slika 3: Granule cementnega klinkerja	4
Slika 4: Grafični prikaz poteka hidratizacije	5
Slika 5: Označevanje cementa po standardu SIST EN 197-1	7
Slika 6: Portland cement z nehidratiziranimi in delno hidratiziranimi zrni	8
Slika 7: a) Drobljen agregat b) Agregat aluvialnega izvora	10
Slika 8: Prikaz sejanja agregata skozi sita	11
Slika 9: Cementna zrna brez plastifikatorja ter zrna z ovojem plastifikatorja	13
Slika 10: Preiskus z razlezom ob uporabi sredstva za kontrolo viskoznosti ter brez uporabe sredstva	14
Slika 11: Preverjanje primernosti malte s terensko metodo zabadanja	16
Slika 12: Zbijanje malte v stožcu na stresalni mizici	17
Slika 13: Prerezan betonski blok ki prikazuje segregirana zrna	18
Slika 14: Izcejanje vode na robu sveže malte na udarni mizici	19
Slika 15: Shema ekscentričnega nateznega preiskusa	20
Slika 16: Shema centričnega natega	21
Slika 17: Naraščanje hitrosti toka tekočine z oddaljevanjem od roba	24
Slika 18: Tok med ploščama	26
Slika 19: Predpostavka za tok med koaksialnima valjema	27
Slika 20: Tok skozi kapilare in cevi	27
Slika 21: Rotacijski tok med paralelnima ploščama	28
Slika 22: ConTec Viscometer 5	29
Slika 23: Tok materiala s konstantno hitrostjo vzdolž prereza	30
Slika 24: Zunanji valj (posoda) z vertikalnimi rebri	31
Slika 25: Notranji valj ter fiksni del z vetrnico	31
Slika 26: Potek meritev momenta glede na hitrost vrtenja	32
Slika 27: Nastavitev parametrov v aplikaciji FreshWin	33
Slika 28: Tehtanje agregata	36
Slika 29: Segregirana malta s frakcijo agregata 0/4 po preizkusu v reometru	36

Slika 30: Meritev premera za vsako rebro na notranjem in zunanjem valju	38
Slika 31: Shema položaja notranjega valja v posodi z malto in vplivna višina malte	40
Slika 32: Merjenje dviga višine barve zaradi potopitve notranjega valja	41
Slika 33: Shematičen prikaz planetarnega gibanja lopatice RILEM-CEN mešalca	43
Slika 34: a) vsipavanje cementa v posodo, b) dodajanje agregata med mešanjem	44
Slika 35: Zračni mehurčki v olju II po vlivanju v zunanji valj	60
Slika 36: Izcejanje olja II v posodo in nastajanje novih mehurčkov	60

1 UVOD

Malte so gradbeni materiali, ki nastanejo s strjevanjem homogene mešanice sestavljene iz veziva, agregata, vode ter dodatkov. Maltna mešanica se po pripravi začne strjevati zaradi kemičnih in fizikalnih procesov, ki na koncu privedejo do trdnega veziva.

Prvotne malte so bile različne mešanic gline in blata ali pa kar iz katrana. Maltne mešanice so se skozi čas izpopolnjevale skozi izkušnje takratnih graditeljev. Tako je prvotne mešanice počasi izrinila sestava hidratiziranega apna in finega peska. Rimljani so pri svojih maltah v mešanico dodajali še vulkanski pepel, ki je omogočal malte višjih trdnosti ter strjevanje le teh pod vodo.



Slika 1: Opečnati zid s katranom kot malto (Vir: <http://katachriston.wordpress.com>)

Uporaba malt s hidravličnimi lastnostmi je po propadu Rimskega imperija upadla in se ponovno začela uporabljati v 18. in 19. stoletju z iznajdbo Portland-cementa. Z uporabo

Portland-cementa kot veziva v maltah se je skrajšal čas gradnje, zaradi hitrega pridobivanja trdnosti cementne malte.

Danes se malte največ uporabljajo za izdelavo opečnih ali betonskih zidov ter za omete. Da malto lahko uporabljamo kot vezivni material za zidake, mora le ta imeti ustrezne lastnosti med gradnjo (plastičnost, lepljivost, obdelovalnost) in v strjenem stanju (trdnost, obstojnost, togost).

Lastnosti malt se preverjajo tako v svežem kot v strjenem stanju, da se zagotavlja ustreznost maltne mešanice. Tako se preizkušajo homogenost, trdnost, vodoneprepustnost, obstojnost in ostale lastnosti strjene malte, kot tudi kakovost osnovnih sestavin malte:

- cement - vpliva na hitrost vezanja, trdnost in obstojnost,
- agregat - vpliva na trdnost ter ekonomičnost
- voda - vpliva na plastičnost, obdelovalnost ter hidratacijo

Za preizkušanje lastnosti malt obstaja več preskusnih metod, standardnih in nestandardnih. Ena izmed metod določanja lastnosti svežih malt je tudi preizkušanje malte v reometru ali viskozimetru, kjer se na osnovi dveh meritvenih parametrov, napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti, lahko ocenijo reološke lastnosti svežih mal, predvsem vpliv različnih sestavin na te lastnosti. V okviru svojega diplomskega dela sem določal reološke lastnosti malt z opremo ConTec Viscometer 5. Ker so bile komponente preskuševalne naprave za raziskave malt zasnovane v okviru Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij in izdelane v Slovenije, je bila moja glavna naloga tako imenovana kalibracija opreme, to je ugotavljanje vpliva višine notranjega valja reometra na rezultate preiskav. Pri tem sem uporabil različne sestave malt in razpoložljiva olja.

2 OSNOVNO O MATERIALIH ZA IZDELAVO MALT

2.1 Splošno o materialih

Cementna malta je kompozitni material sestavljen iz treh osnovnih sestavin (voda, cement, agregat) ter dodatkov, ki še dodatno vplivajo na končne lastnosti maltne mešanice. Z mešanjem sestavin oz. s stikom cementnega veziva in vode se sproži proces hidratacije, s katerim tekoča ali plastična mešanica postopoma preide v trdno agregatno stanje.

2.2 Cement

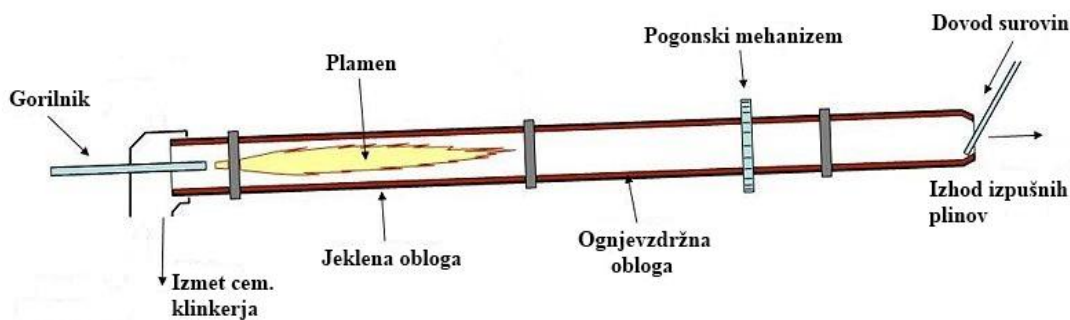
Cement je eno izmed najpogosteje uporabljenih veziv v gradnjah 20. stoletja. Je silikatno vezivo, ki reagira z vodo in za svoje delovanje ne potrebuje zraka, kar mu omogoča velik spekter možnih načinov uporabe. Z reakcijo z vodo se začne proces hidratacije, kjer se cementna pasta počasi spreminja iz plastičnega v trdno agregatno stanje. Tako cementna matrika poveže agregat v končni kompozit.

2.2.1 Pridobivanje cementa

Osnovna surovina za pridobivanje cementa so različni minerali v apnencu, glini ter laporju. Sam proces pridobivanja oz. izdelave cementa se razdeli na štiri faze, ki potekajo v naslednjem zaporedju:

1. Proizvodnja surovin (izkop osnovnih materialov; apnenec, lapor...)
2. Mletje surovin v moko
3. Žganje moke v peči
4. Mletje cementa in pakiranje

Preden se surovinsko moko žge v peči, se jo segreje z dimnimi plini v izmenjevalcih toplote. Segreta surovinska moka se nato transportira po rotacijski peči segreti na temperaturi od okrog 1000 do 1500 °C, kjer zaradi visokih temperatur izpari vsa prosta in vezana voda iz surovinske moke, prav tako pa surovine preidejo v novo zmes, cementni klinker.



Slika 2: Shema rotacijske peči (Vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_kiln)

Tako dobimo cementni klinker v obliki sivih granul do premera 3 cm, ki pa so močno porozne. Te se nato zmelje v fini prah (0,001 do 0,1 mm), kjer se cementnemu klinkerju dodajo različni dodatki (sadra, apnenec, elektro-filtrski pepel,...), ki dajo končnemu izdelku dodatne lastnosti.



Slika 3: Granule cementnega klinkerja (Vir: <http://www.joveincement.com>)

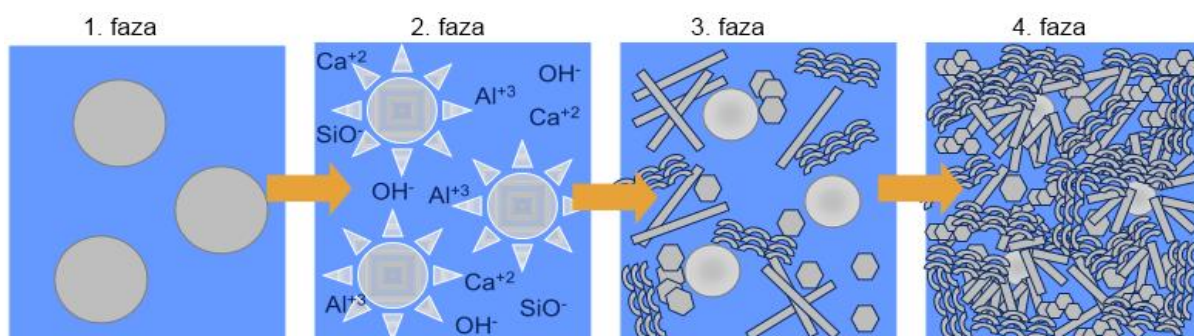
2.2.2 Vezanje in strjevanje cementa

Pri mešanju cementa in vode se začne proces hidratacije cementa. To je zaporedje reakcij med različnimi minerali iz cementa ter vodo, s katerimi začne cementna pasta (cement in voda) prehajati iz plastične v trdno obliko. Strjevanje cementa pa je večletni proces skozi katerega cementni kamen pridobiva na trdnosti.

Hitrost hidratacije oz. vezanja cementa je odvisna od več dejavnikov: vrste cementa ter vrste in števila mineralnih dodatkov v cementu, finosti zrn cementa (manjša zrna hitreje in bolj popolno reagirajo), masnega razmerja med vodo in cementom, zunanjih razmer pri procesu hidratacije (temperatura, vlaga, škodljivi vplivi...)

Proces hidratacija se razdeli na štiri faze:

1. **Pred-indukcijsko**, kjer se začnejo v mešanici cementa in vode hitro raztapljati spojine v cementu. Zaradi eksotermne reakcije to obdobje spremlja segrevanje mešanice, prav tako pa se izloča mineral etringit, ki začne obdajati cementne delce.
2. **Indukcijsko obdobje**, obdobje kjer hidratacija miruje zaradi etringita, ki preprečuje dostop vode do nezreagiranelega dela cementa.
3. **Obdobje pospešene hidratacije**, se pojavi 3 do 12 ur po začetku procesa, ko etringitni ovoj okrog cementnih zrn postane prepusten. Tu zmes cementa in vode preide v fazo cementnega gela; tekočo maso z enakomerno razporejenimi zrni.
4. **Obdobje pojemajoče hidratacije**. Hitrost reakcije se zmanjšuje, saj iz gela nastaja cementni kamen, v katerem nastajajoči kristali tvorijo mrežo, ki poveže agregat v trden material.



Slika 4: Grafični prikaz poteka hidratizacije (Vir: Dr. Kimberly Kurtis, <http://people.ce.gatech.edu>)

2.2.3 Vrste cementov in označevanje

Zaradi različnih vrst cementov in njihove možnosti uporabe, so v Sloveniji cementi razvrščeni kot določa standard SIST EN 197-1:2011. Ta jih primarno razvršča v pet različnih vrst glede na vsebnost cementnega klinkerja, nato pa še glede na vrsto dodatka v cementu:

Preglednica 1: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1

Glavne vrste	Vrsta glavne sestavine	Oznaka proizvoda		Delež klinkerja / mineralnega dodatka [%]
CEM I	klinker	Portlandski cement	CEM I	95-100 / 0
CEM II	Klinker in mineralni dodatki: granulirana plavžna žindra (S), pucolan (P, Q), EF pepel (V, W), žgani skrilavec (T), apnenec (L, LL),	Portlandski cement z dodatkom: - žindre - pucolana - EF pepela - žganega skrilavca - apnenca	CEM II/A-m ¹	80-94 / 6-20
		Portlandski mešani cement	CEM II/B-m ¹	65-79 / 21-35
	mešani mineralni dodatek (M) mikrosilika (D)	- mikrosilike	CEM II /A-D	90-94 / 6-10
CEM III	klinker, granulirana plavžna žindra (S)	Žlindrin cement	CEM III/A	35-64 / 36-65
			CEM III/B	20-34 / 66-80
			CEM III/C	5-19 / 81-95
CEM IV	klinker, mikrosilika (D), pucolan (P, Q), EF pepel (V, W)	Pucolanski cement	CEM IV/A	65-89 / 11-35
			CEM IV/B	45-64 / 36-55
CEM V	klinker, granulirana plavžna žindra (S), mikrosilika (D), pucolan (P, Q), EF pepel (V, W)	Mešani cement	CEM V/A	40-64 / 36-55
			CEM V/B	20-38 / 62-80

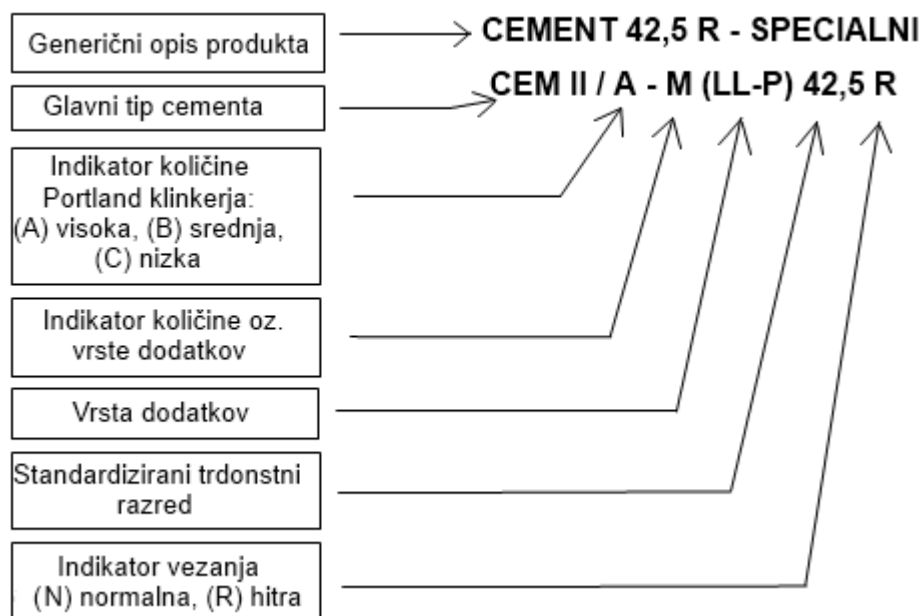
¹ Oznaka m, označuje uporabljen mineralni dodatek (S, P, Q, V, W, T, L, LL, D) ali v primeru mešanega mineralnega dodatka M

Standard definira tri trdnostne razrede cementov in pri vsakem od teh treh razredov še dva podrazreda, ki označujeta hitrost vezanja. Tisti z oznako N vežejo z normalno hitrostjo, z oznako R pa so cementi z pospešeno hitrostjo vezanja, kot je prikazano v preglednici:

Preglednica 2: Trdnostni razredi cementov [MPa] po SIST EN 197-1

Trdnostni razred	Zgodnja trdnost		Trdnost po 28 dneh	
	2. dan	7. dan	Minimalna	Maksimalna
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≥ 52,5
32,5 R	≥ 10,0	-	≥ 32,5	≥ 52,5
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≥ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	-	≥ 42,5	≥ 62,5
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	
52,5 R	≥ 39,0	-	≥ 52,5	

Končni produkt mora imeti v skladu s predpisanimi standardi jasno oznako iz katere so razvidni vrsta cementa, njegova sestava in trdnost.



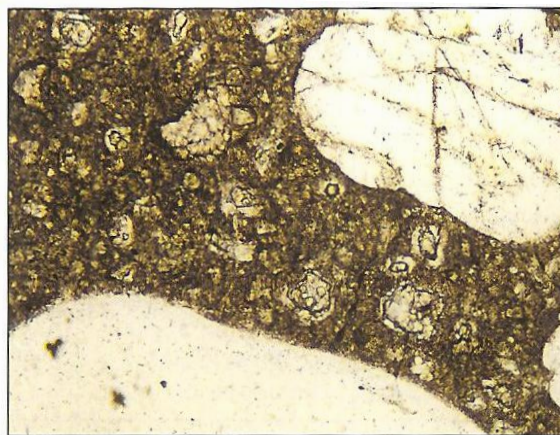
Slika 5: Označevanje cementa po standardu SIST EN 197-1 (Vir: Žarnič R., 2005)

Pri raziskavah potrebnih za to diplomsko delo, sem uporabljal cement **CEM II/A - M (LL-S) 42,5 R**. Cement tako sestavlja najmanj 80% cementnega klinkerja ter 6-20% mešanega dodatka, apnenca (LL) ter granulirane plavžne žindre (S). S takšno sestavo cementa je le ta namenjen za zahtevnejše gradnje, kjer se zahtevajo visoke začetne trdnosti. Cement po začetnih dveh dneh razvije najmanj 20 MPa trdnosti, po 28 dneh pa več kot 42,5 MPa.

2.3 Voda

Voda ima v sveži malti pomembno vlogo, čeprav jo je samo okoli 15 odstotkov prostornine mešanice. Voda med samim mešanjem omogoča da se zrna cementa in agregata enakomerno porazdelijo, med uporabo malte pa omogoča lažjo obdelovalnost ter vgradljivost same malte. Takoj ko se v mešanico cementa in agregata doda voda, steče proces hidratacije, ki se nadaljuje med vezanjem in strjevanjem malte.

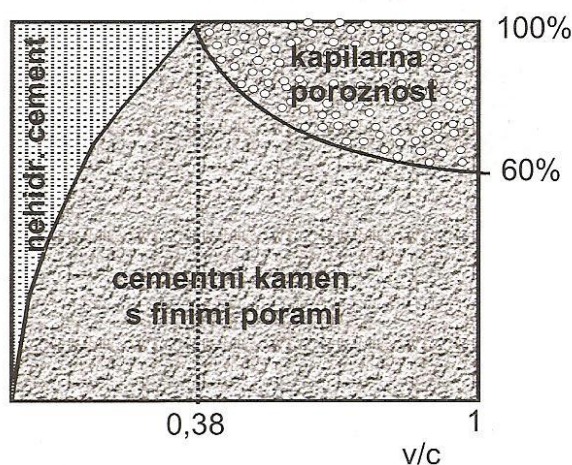
Voda lahko vsebuje različne minerale in snovi raztopljene v njej, odvisno od lokacije pridobivanja. Vendar pa velja, da je za uporabo v maltah vedno primerna pitna voda. Če uporabimo vodo iz drugih virov pa je priporočljivo preveriti, ali vsebnosti raztopljenih snovi (predvsem kloridov in soli) ne presegajo predpisanih meja. V primeru da vsebuje voda preveč škodljivih snovi (glina, organske snovi), se lahko na cementnih delcih in agregatu ustvarijo prevleke, ki oslabijo sprijemanje cementne paste z agregatom in zidaki, kar privede do nižje trdnosti malte.



Slika 6: Portland cement z nehidratiziranimi in delno hidratiziranimi zrni (z vidnimi hidratacijskimi obroči) v cementni matrici. Agregatna zrna so velika in belo obarvana. Mikroskopska slika, x150 (Vir: Ingham J., 2011)

Odstotek vode v malti mešanici je tudi pomemben zaradi vodocementnega razmerja (v/c), od katerega je odvisen proces vezanja in trdnost ter obstojnost malte. Glede na velikost vodocementnega razmerja so možni trije primeri:

- $v/c < 0,38$; premalo vode za popolno hidratacijo cementa, zato del cementa ostane nevezan
- $v/c = 0,38$; ves cement hidratizira, idealne razmere
- $v/c > 0,38$; količine vode je preveč za hidratacijo, oblikujejo se kapilarne pore



Grafikon 1: Vpliv v/c razmerja na sestavo cementnega kamna (Vir: Žarnič R., 2005)

V primeru $v/c = 0,38$ za pripravo cementne malte teoretično ne potrebujemo dodatne vode. Vendar je v praksi drugače, saj med samo pripravo malte del vode izhlapi, kar povzroči, da ne hidratizirajo vsa zrna cementa. V praksi se tako hidratizira do 90% cementna, saj debela zrna ne hidratizirajo v celoti zaradi hidratiziranega ovoja okoli njih. Posledično je potrebno cement med samo proizvodnjo zmleti na čim manjše delce.

2.4 Agregat

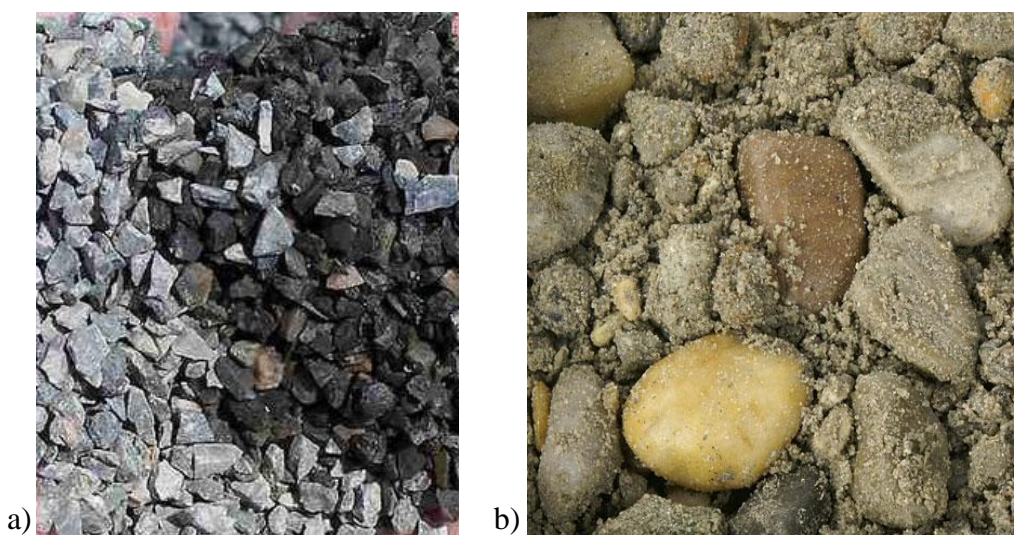
Maltno mešanico sestavlja cement (vezivo), voda (medij za hidratacijo) ter agregat ki služi kot polnilo v cementni pasti. Agregat zavzema večino prostornine malte, okoli 70%, zato je agregat najbolj zastopan sestavni del.

Z dodajanjem agregata v maltno mešanico dosegamo:

- manjšo ceno malte; agregat je relativno poceni glede na cement
- lažjo obdelovalnost
- manj krčenja ob izhlapevanju vode
- utrdijo vidno površino malte in ščitijo cementni kamen pred zunanjimi vplivi
- kontroliranje gostote malte
- kontroliranje togosti malte

Agregat je lahko definiran kot "delci kamine, izdelanega ali recikliranega materiala, ki skupaj tvorijo v vezani ali nevezani obliki, del ali celoto grajenega ali dokončanega objekta." (Ingham Jeremy, 2011, str. 61). Večina agregatov na svetu se uporablja za asfaltne zmesi, kjer so vezani z bitumnom ter kot sestavni del betonskih in maltnih mešanic.

Vrsta agregata je odvisna od vrste surovine, iz katere ga pridobimo ter od načina procesa, s katerim ga pridobivamo. Primarno je tako definiran z mineralno sestavo surovinskih kamnin, sekundarno pa ali je pridobljen z lomljenjem in drobljenjem večjih kosov kamnin na manjše (drobljenec) ali pa je aluvialnega izvora (rečni prod, gramoz, pesek). Naravni peski in gramozi so posledica nekonsolidiranih rečnih ali morskih naplavin, ki se jih da enostavno izkopati z gradbeno mehanizacijo.

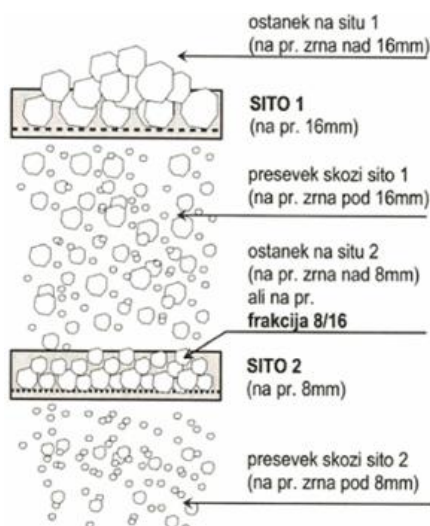


Slika 7: a) Drobljen agregat b) Agregat aluvialnega izvora
(Vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Construction_aggregate ter <http://www.nograd-gm.si>)

Pri drobljenem agregatu se iz večjih kamnitih blokov lomijo manjši, ki nato preidejo čez sisteme mlinov in drobilcev, da se velike gmote kamnin zdrobijo na manjše delce. Za drobljenje je značilno, da imajo nepravilne ostre robove in so idealno kvadrataste oblike. Zaradi te oblike, se zrna lažje zaklinjajo med seboj, kar privede do doseganja večjih trdnosti pri enakem v/c razmerju kot pri maltah z aluvialnimi agregati. S temi agregati pa zaradi njihove sferične oblike dosegamo boljšo vgradljivost.

Zaradi čim boljše ekonomičnosti malte posegamo po večji uporabi agregata v zmesi. To dosegamo s takšnim agregatom, ki vsebuje čim več delcev raznolikih velikosti, da je čim manj nezapolnjenih prostorov med večjimi agregatnimi zrn. Takšno sestavo agregata pridobimo z ustrezno granulometrijsko sestavo. Ta opisuje relativno razmerje različnih velikosti zrn med maksimalnim zrnom ter najmanjšem prisotnem delcu v sestavi agregata. Z ustrezno granulometrijo agregata dosegamo optimalno plastičnost malte med vgrajevanjem ter maksimalne mehanske zahteve strjene malte (trdnost, odpornost, trajnost).

Posamezne frakcije agregata pridobimo s sejanjem skozi sistem sit, kjer si sita sledijo od tistega z največjimi odprtini do sita z najmanjšimi odprtini. Tako se med sejanjem deli agregata vrstijo glede na velikost zrna. S takim razvrščanjem pridobimo dele agregata ločene po velikosti, ki jih kasneje kombiniramo med seboj, da pridobimo najustreznejšo zrnastostno sestavo agregata.



Slika 8: Prikaz sejanja agregata skozi sita (Vir: Žarnič R. 2005)

Za razliko od betonskih mešanic, kjer so običajne velikosti zrn do 32 mm, se v maltnih mešanicah uporabljajo frakcije od 0/2 do 0/8 mm. Razlog je v tem da se malte uporablja za relativno tanke spojnice v zidovih ali grobe in fine omete, beton pa kot končni nosilni element.

2.5 Kemijski dodatki maltam

Zaradi težko dosegljive popolne hidratacije cementa, lažje vgradljivosti, izboljšanja mehanskih lastnosti malt, itd., med pripravo malt le tem dodajamo kemijske dodatke. To so proizvodi, ki v zelo majhnih količinah (do 5% mase cementa) pomembno vplivajo na lastnosti malte. Dodatke so poznali že v antičnih časih, saj so Rimljani v malte in betone dodajali svežo kri, olja in mleko. Vsak dodatek ima svoje pozitivne in negativne lastnosti na maltno mešanico, zato je pomembno da, ima proizvajalec čim več opravljenih preizkusov, da dokaže ustreznost dodatka.

Dodatke za malte se delimo v naslednje osnovne skupine:

- **zadrževalci vode** (vežejo vodo nase in preprečujejo njeno izcejanje in izhlapevanje)
- **pospeševalci vezanja** (zmanjšajo čas vezanja in pospešijo prehajanje cementnega gela v trdno stanje)
- **pospeševalci strjevanja** (pospešijo pridobivanje začetnih trdnosti)
- **plastifikatorji** (omogočajo manjši v/c količnik ob ohranjanju iste konsistence)
- **sredstva za kontrolo viskoznosti** (povečajo viskoznost malte)
- **dodatki za zidanje pri nizkih temperaturah**

V nadaljevanju bodo opisane tiste skupine, ki so bile dodane maltam pri mojih preizkusih.

2.5.1 Plastifikatorji in superplastifikatorji

Plastifikatorji so kemijski dodatki, ki se jih lahko doda cementnim mešanicam z namenom izboljšanja vgradljivosti. Nosilnost oziroma trdnost maltne je obratno sorazmerna s količino dodane vode oziroma vodocementnim razmerjem, zato se z namenom, da se izdelata malto z večjo trdnostjo, le to izdelata z manjšo količino vode, kar privede do slabe vgradljivosti, težje

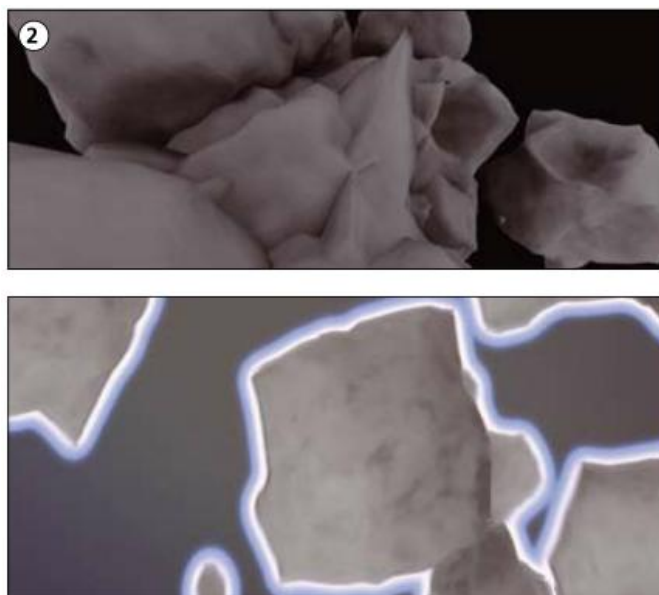
priprave (mešanje), ter do nepopolne hidratacije cementa. Takšne neželene učinke se da omiliti ali celo odpraviti z uporabo plastifikatorjev.

Na tržišču je danes mogoče dobiti tri vrste plastifikatorjev:

- **"Navadni" plastifikator** (zmanjšanje deleža vode za 5-10%)
- **Superplastifikator** (zmanjšanje do 25%)
- **Hiperplastifikator** (zmanjšanje do 40%)

Zaradi velike redukcije vode je treba plastifikatorje uporabljati skladno z navodili proizvajalca. V primeru dodane prevelike količine plastifikatorja postane malta neuporabna, saj lahko začne segregirati.

Plastifikatorji delujejo na tako, da zmanjšajo trenje med delci cementa in agregata, ter tako omogočajo lažje oblikovanje. Plastifikator se ob vnosu v maltno mešanico veže na površino cementnih zrn ter jih obda v ovoj. Zaradi svoje prisotnosti na zrnih cementa se le ta nabijejo z negativnimi nabojem, kar povzroča, da cementna zrna silijo vstran druga od druge. Drug način delovanja plastifikatorja je sterična stabilizacija, kjer se cementnim zrnom prepreči, da bi prišla toliko skupaj, da bi nanje delovale sile privlačnosti.

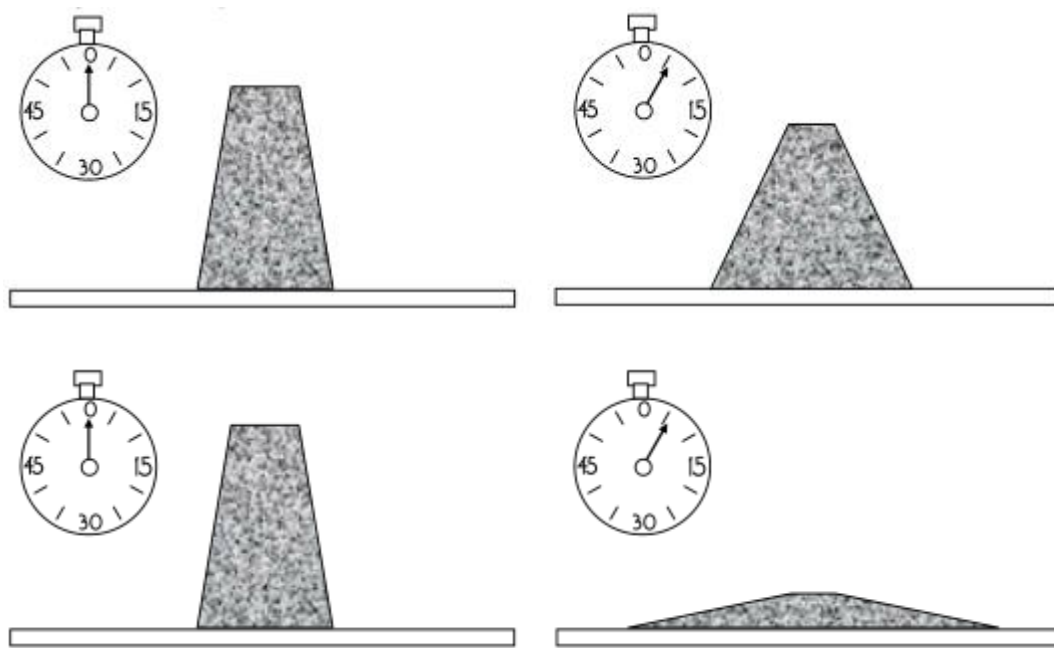


Slika 9: Cementna zrna brez plastifikatorja (zgoraj) ter zrna z ovojem plastifikatorja (spodaj)
(Vir: http://www.tkk.si/filelib/prakticni_nasveti/clanki/gr_12_2010_tkk.pdf)

2.5.2 Sredstva za kontrolo viskoznosti

Sredstva za kontrolo viskoznosti so dodatki, zmanjšajo možnost segregiranja maltne mešanice med njeno pripravo, transportom ter samo vgradnjo. Glavna funkcija sredstva za kontrolo viskoznosti je modifikacija reoloških lastnosti cementne paste. Reologijo sveže malte pa lahko opišemo z dvema parametroma; napetostjo na meji tečenja, pri kateri se začne malta deformirati ter plastično viskoznostjo, ki opisuje odziv malte na strižno deformacijo.

Doseganje pravilnega razmerja med zgornjima parametroma je ključ do ustrezne reologije maltne mešanice. Sredstva za kontrolo viskoznosti spremenijo reološke lastnosti maltne mešanice z povečanjem plastične viskoznosti. Njihovo delovanje je ravno obratno od plastifikatorjev, ki zmanjšajo viskoznost.



Slika 10: Preiskus z razlezom ob uporabi sredstva za kontrolo viskoznosti (zgoraj) ter brez uporabe sredstva (spodaj)

3 MALTA

3.1 Opis malte

Malta je, poleg betona, eden od temeljnih gradbenih materialov v današnji uporabi. Je umetni kompozitni sestav veziva, agregata ter vode. Zraven osnovnih sestavin se ji dodajajo še različni kemijski dodatki z namenom izdelave bolj specifičnih lastnosti, tako svežih kot trdnih malt. Ko zamešamo sestavine se začnejo v malti fizikalni in kemijski procesi, s katerimi začne malta spreminjati svoje lastnosti. Tako čez čas dobimo trdno malto.

3.2 Lastnosti sveže malte

Z začetkom strjevanja malte se njena struktura ne spreminja, razen v primeru zunanjih vplivov. Da se doseže čim boljše lastnosti trdne malte se maltno mešanico preverja v njenem svežem stanju.

3.2.1 Lepljivost ali adhezija

Malta se danes uporablja za zidanje, t.j. povezovanje opečnih, kamnitih ter betonskih zidakov ter za obdelavo in lepljenje oblog na talne, stropne in stenske površine. Zaradi uporabe v različnih položajih (vertikalno na steni, na stropu), in na različne načine (ročno ali strojno nanašanje) mora biti malta sposobna se "prilepiti" na površino, na katero je nanašamo. To lastnost, kako učinkovito se je sposobna malta spojiti z ostalimi gradbenimi elementi, imenujemo adhezija.

V praksi se ta lastnost preverja razmeroma enostavno. Svežo maltno mešanico se zajame z zidarsko žlico, ki se jo nato postavi v tak položaj kot bomo uporabljali malto (če jo uporabljamo na stenah, bo žlica stala navpično ipd.). Z postavitvijo žlice v izbran položaj se začne opazovati spremembe malte. V kolikor ta obmiruje na žlici, je dovolj adhezivna, če zdrsne, so pa potrebne spremembe v mešanici. Preizkus z žlico zadošča za praktično uporabo zaradi gladkosti žlice, saj so mesta nanašanja malt večinoma opečnati, kamniti ali betonski elementi z večjo hrapavostjo.

3.2.2 Konsistenca

Konsistenca je vrednost, s katero opisujemo plastičnost sveže malte. Določanje konsistence na standardiziran način je določeno s standardom SIST EN 13395 (razlez malte na stresalni mizici), v praksi pa je ta lastnost velikokrat preverjena vizualno. Preverja se v samem mešalcu, saj se jo tam lahko uravnava z dodajanjem vode ali agregata. V primeru uporabe malt za omete ali lepljenje oblog se le ta preveri z zabadanjem zidarske žlice v svežo malto. Če žlica obstoji navpično, bo malta primerna, drugače je potrebno dodati eno od sestavin. Ustreznost teh terenskih preiskav je odvisna od usposobljenosti in v večji meri od izkušenj zidarja.



Slika 11: Preverjanje primernosti malte s terensko metodo zabadanja

(Vir: [http://en.wikipedia.org/wiki/Mortar_\(masonry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Mortar_(masonry)))

V standardu SIST EN 13395 je opisan postopek za določanje konsistence sveže malte z uporabo stresalne mizice. Pri postopku so uporabljeni:

- Kalup v obliki prisekanega stožca
- Nabijalo
- Stresalna mizica
- Kljunasto merilo

V kalup, ki je na čisti in navlaženi stresalni mizici, se do polovice višine vsuje maltno mešanico. Nato se vsuti del zbije z nabijalom, da se izločijo zračni mehurčki ter da malta zapolni prostor, ki ji je na voljo (se zgosti). Po zbijanju se stožec zapolni še do vrha in postopek nabijanja ponovi. Zapolnjen stožec se nato dvigne, malta v obliki prisekanega stožca

pa izpostavi 15 padcem stresalne mizice za 1 cm s frekvenco 1 Hz. Mera konsistence je povprečje dveh med seboj pravokotnih meritev premera razlezene sveže malte.



Slika 12: Zbijanje malte v stožcu na stresalni mizici

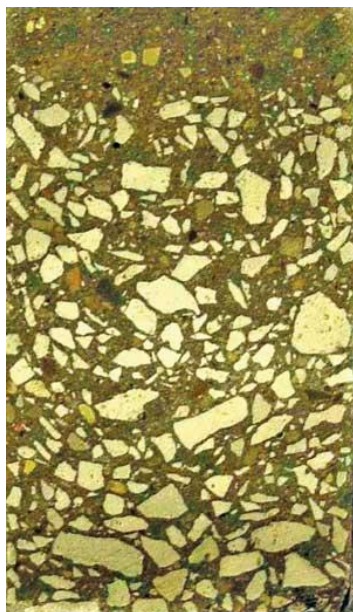
3.2.3 Stabilnost

Za učinkovito uporabo in doseganje želenih lastnosti strjene malte mora biti struktura sveže malte med mešanjem, transportom in vgradnjo nespremenjena, to pa dosežemo s homogeno razporeditvijo sestavin malte. Do nehomogenega razporeda malte pride, ko se agregatna zrna potopijo na dno, cement in voda pa izplavata na površje. Takemu pojavu pravimo segregacija. Do segregacije lahko pride ob neustreznem razmerju vhodnih sestavin, nepravilnem mešanju ali pa je sveža malta preveč plastična. Malta lahko segregira tudi med samim transportom ali med vgradnjo zaradi zunanjih vplivov (vremenski vplivi, vibracije). S segregacijo večja agregatna zrna potonejo na dno, na vrhu pa se začne nabirati cementa pasta. Zaradi

pomanjkanja zrn na vrhu, se ob hidrataciji in sušenju ta del bolj skrči, kar privede do mikrorazpok, ki potekajo pravokotno na površje.

Na pojav segregacije vplivajo:

- Količina večjih agregatnih zrn
- Granulometrijska sestava agregata
- Specifična teža večjih zrn v primerjavi z finimi delci
- Oblika agregatnih zrn
- v/c razmerje
- Prisotnost superplastifikatorja



*Slika 13: Prerezan betonski blok ki prikazuje segregirana zrna
(Vir: <http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=475>)*

3.2.4 Izcejanje vode

Izcejanje vode je pojav, ko se pri maltah na površini mešanice pojavi plast vode. Ta plast vsebuje veliko količino vode in malo cementa, zato ima zelo slabe mehanske lastnosti, kar slabo vpliva na lastnosti strjene malte. Pojav izcejanja se zmanjšuje z ustrezno izbiro zrnivosti agregatnih zrn, raznimi kemijskimi dodatki za zadrževanje vode ali z uporabo bolj fino mletih cementov ali ustreznih mineralnih dodatkov.



Slika 14: Izcejanje vode na robu sveže malte na udarni mizici

3.3 Strjena malta

Življenjska doba konstrukcij je tesno povezana z lastnostmi strjene malte, zato je potrebno pri izbiri maltne mešanice upoštevati, da bo le ta obremenjena z različnimi zunanjimi vplivi med zidanjem kot tudi med samo uporabo konstrukcije.

3.3.1 Trdnost malte

Med najpomembnejšimi lastnosti malte je njena trdnost, saj se z njo zagotavlja da so zidovi kvalitetno zgrajeni, in da malta ne oslabi trdnosti zidu (trdnost cementne malte je praviloma večja od trdnosti zidakov). Vrednost tlačne trdnosti malte pridobimo s preizkušanjem standardiziranih prizem v preši.

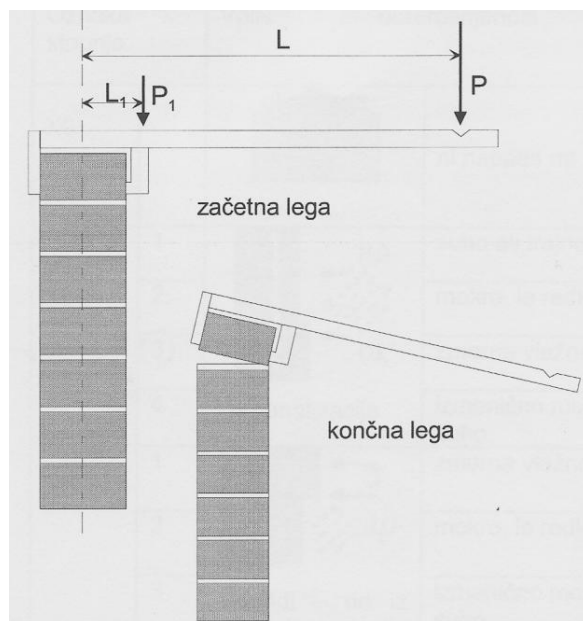
Večja kot bo trdnost malte, bolj bo ta odporna na zunanje vplive med samo gradnjo ter kasneje pri uporabi objekta. Z večjo trdnostjo se praviloma večja tudi zmrzljinska odpornost, vodoneprepustnost, temperaturna obstojnost ter odpornost na agresivne snovi iz okolja.

3.3.2 Sprijemnost malte z zidaki

Ker je malta kompozitni material, namenjen tudi za povezovanje zidakov v zidu, ki je končni konstrukcijski element, je za malto pomembna tudi sprijemnost z zidaki. Za preverjanje vrednosti sprijemnosti malte sta uveljavljena dva načina:

- **Ekscentrični natezni preskus (ASTM C1072-86)**

Preizkus je enostaven in prilagodljiv ter izvedljiv tako v laboratoriju kot na gradbišču. V principu gre za vrtenje zidaka okoli enega od daljših robov, pri čemer se izmeri vrednost potrebne sile za odlepljenje zidaka od malte.

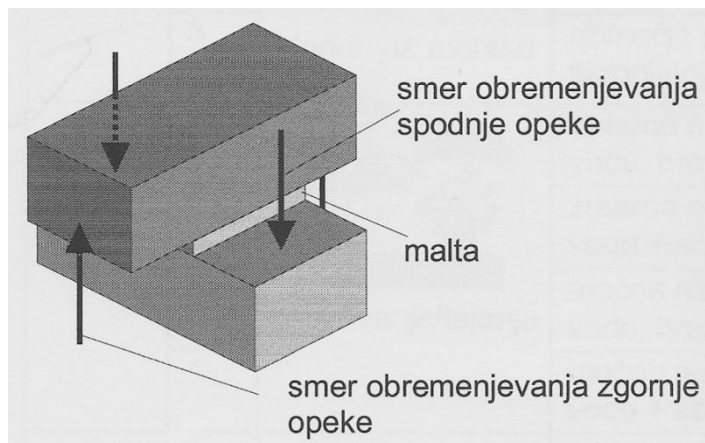


Slika 15: Shema ekscentričnega nateznega preiskusa (Vir: Žarnič R., Vaje, 2010)

- **Centrični nateg (ASTM C925-76)**

Princip tega preskusa je namenjen določanju natezne trdnosti cementne malte med dvema zidakom, ki so med seboj pravokotno zasukana. Z nasprotnim

obremenjevanjem zidakov se v malti pojavijo natezne napetosti. Ta preizkus se uporablja le v laboratoriju zaradi potrebne laboratorijske opreme (natezni stroj).



Slika 16: Shema centričnega natega (Vir: Žarnič R., Vaje, 2010)

3.3.3 Tehnološke lastnosti malt

Poleg trdnosti je za malto pomembna še zmrzljinska odpornost, vodotesnost, obrabnost ter prostorninska stabilnost (krčenje, lezenje).

- **Zmrzljinska odpornost**

Sposobnost malte, da prenaša nizke temperature, se prikaže z zmrzljinsko odpornostjo. Med izgradnjo in tudi med obratovanjem konstrukcije ali objekta so malte lahko izpostavljene nizkim temperaturam in če so cikli zmrzovanja/tajanja pogosti, lahko to ogrozi trajnost in kvaliteto malte. Da se temu izognemo se malte ustrezno modificira s kemijskimi ali mineralnimi dodatki.

Zaradi ciklov zmrzovanja in tajanja se v malti pojavijo mikrorazpoke, v katere pride vode. Ob naslednjem ciklu zmrzovanja se voda v razpoki razširi, kar povzroči razpokanja malte.

- **Vodotesnost**

Malta je sestavljena iz trdnega cementnega kamna, ki povezuje agregat, pa tudi iz drobnih zračnih mehurčkov in kapilarnih razpok. Zaradi teh razpok se voda lahko

transportira v notranjost malte. Vodotesnost je zato najbolj pomembna za tiste objekte, kjer je pričakovano, da bodo ob izgradnji podvrženi zunanjim vplivom vremena (dež, sneg) ter da bodo v kontaktu z vodo. Pri maltah za zidanje stanovanjskih objektov oz. objektov, ki so zavarovani z toplotnim in mokrotnim ovojem vodotesnost ne predstavlja večjega problema med delovanjem objekta ampak le med izgradnjo.

- **Prostorska stabilnost**

Zaradi zunanjih ali notranjih temperaturnih in vlažnostnih pogojev lahko pride do krčenja malte zaradi sušenja. Zaradi krčenja lahko malta med strjevanjem začne odstopati od zidakov, kar slabša stik med malto in zidakom in tako strukturno oslabi zidovje. Krčenje malte se določa na standardiziranih maltnih prizmah v deformetru. Deformeter je naprava s katero se ob različnih časovnih intervalih od začetka izdelave prizem merijo deformacije malte na 0,01 milimeter natančno.

4 REOLOGIJA CEMENTNIH SUSPENZIJ

Cementna pasta se lahko opiše kot matrica v malti, agregat pa kot delci, ki jih matrica povezuje v celoto. Podobno pa je tudi pri sami cementni pasti, kjer ima voda vlogo matrice cementna zrna pa so delci. Z dodajanjem sestavin v maltne mešanice te začnejo vplivati na strukturo in stopnjo dispergiraniosti cementne paste in tako tudi neposredno vplivajo na končne lastnosti malte kot kompozita. Reologija cementne paste, skupaj s prostorninskim deležem paste, igra glavno vlogo pri obdelovalnosti in izgubi obdelovalnosti cementnih malt.

Reologija je definirana kot veda ki preučuje tečenje in deformiranje snovi. Zato je uporabno orodje za karakterizacijo in opis sposobnosti tečenja, izgube obdelovalnosti, stabilnosti in celo sposobnosti zgoščevanja svežih cementnih suspenzij, kot so cementne paste, malte in betoni. Kljub temu so preiskave reoloških lastnosti suspenzij z grobimi delci, kamor spadajo malte in betoni še vedno relativno redke.

Da se reologija lahko uporablja za določanje lastnosti malt, se je potrebno odločiti, katere najpomembnejše lastnosti ali parametri bodo bili ovrednoteni. Poleg tega so danes na trgu na razpolago viskometri in reometri, katerih zasnova temelji na različnih teorijah. Posledica tega so zelo različni rezultati preiskav reoloških parametrov malt v razpoložljivi literaturi, ki niso le posledica različnih sestav malt ampak tudi posledica vrste uporabljenega viskometra ali reometra. Parametri sestave, ki vplivajo na reologijo sveže malte so med drugim:

- Granulometrijska sestava agregata
- Homogenost/stabilnost – odpornost na segregacijo
- Delež agregata v malti
- Kemijski in mineralni dodatki
- Oblika agregatnih zrn
- Vrsta cementa in velikosti zrn
- Razporejenost agregatnih zrn

Zaradi številnih problemov pri določanju reoloških parametrov, predvsem pa zaradi nesoglasja med raziskovalci, se reološke preiskave še vedno niso uveljavile. Zato danes še vedno prevladujejo bolj enostavne metode določanja obdelovalnosti malt. Taka je na primer

metoda za določanje konsistence sveže malte ali betona s posedom. To metodo je razvil Duff Abrams leta 1912 in še danes ostaja najbolj uporabljana metoda. Druga metoda, ki je uveljavljena za oceno konsistence malt pri nas, je metoda z razlezom na stresalni mizici.

Čeprav je metoda s posedom zelo enostavna in hitra metoda, ima svoje slabosti. Metoda je najbolj primerna za mešanice s srednjo do visoko obdelovalnostjo (posed 25-125 mm), ni pa primerna za preskušanje suhih (majhen v/c količnik) ter tekočih mešanicah (visok v/c) ali mešanic s superplastifikatorjem, kjer je posed večji od 210 mm. V primeru suhih mešanic se stožec ne posede, ker ni medija, ki bi zmanjšal trenje med agregatnimi zrnji, pri tekočih pa se stožec enostavno preveč posede.

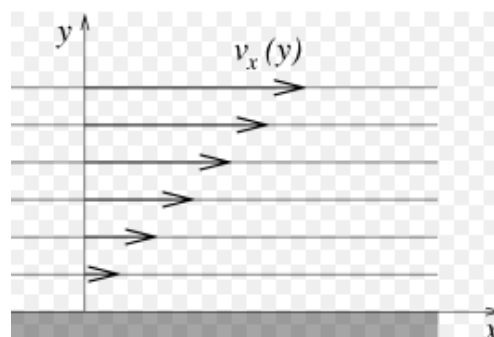
4.1 Osnove reologije

Reologija je znanost o tečenju in deformiranju snovi. Raziskuje sovisnost med silo, deformacijo in časom. Podskupina reologije je viskometrija. Viskometrija se ukvarja med napetostjo in hitrostjo deformiranja. Viskoznost pogosto opišemo kot notranje trenje v tekočini, ki je posledica medsebojnega delovanja sosednjih tekočinskih plasti, ki se med tečenjem različno hitro gibljejo. Zaradi raznolikosti sestav različnih tekočin se vse ne obnašajo enako pri isti obremenitvi.

Tekočine delimo v dve večji skupini: Newtonske tekočine in ne-Newtonske tekočine. Za Newtonske tekočine je značilno, da je sovisnost med strižno napetostjo v tekočini (τ) in strižno hitrostjo linearna. Viskoznost η , imenovana tudi Newtonska viskoznost je konstanta.

Izraz $\frac{\delta v}{\delta y} = \dot{\gamma}$ predstavlja strižno hitrost.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \dots\dots\dots (1) \text{ (Povzeto po Wallevik, 2009)}$$



Slika 17: Naraščanje hitrosti toka tekočine z oddaljevanjem od roba
(Vir:<http://sl.wikipedia.org/wiki/Viskoznost>)

Ko je viskoznost tekočine odvisna od hitrosti striženja, govorimo o časovno neodvisni Newtonski tekočini:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \dots\dots\dots (2) \text{ (Povzeto po Wallevik, 2009),}$$

kjer je $\eta(\dot{\gamma})$ funkcija viskoznosti.

Za časovno neodvisne ne-Newtonske tekočine je torej značilno da, je njihova viskoznost odvisna od strižne hitrosti, ki deluje na tekočino, kar pomeni da viskoznost ni konstanta. Glede na spreminjanje viskoznosti s strižno hitrostjo delimo ne-Newtonske tekočine na:

- Tekočine, katerim se viskoznost povečuje z hitrostjo obremenjevanja
- Tekočine, katerim se viskoznost zmanjšuje z hitrostjo obremenjevanja
- Binghamove tekočine

Binghamove tekočine imajo najenostavnejšo obliko funkcije viskoznosti med ne-Newtonskimi tekočinami. Za te tekočine je značilno, da je v materialu potrebno najprej doseči napetost na meji tečenja, preden se začne deformirati. Po prekoračitvi napetosti na meji je zveza med strižno napetostjo in strižno hitrostjo linearna, tako kot pri Newtonski tekočini. Enačba, s katero opišemo funkcijo viskoznosti $\eta(\dot{\gamma})$ za Binghamovo tekočino ima sledečo obliko:

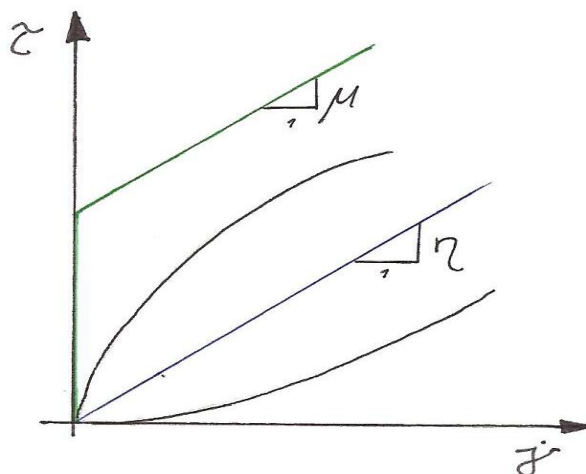
$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} + \mu \dots\dots\dots (3) \text{ (Povzeto po Wallevik, 2009),}$$

kjer je τ_o napetost na meji tečenja in μ plastična viskoznost.

S kombiniranjem enačb (2) in (3) pridobimo najbolj pogost zapis Binghamove enačbe:

$$\tau = \tau_o + \dot{\gamma} \cdot \mu \dots\dots\dots (4) \text{ (Povzeto po Wallevik, 2009).}$$

Poleg Newtonskih in Binghamovih tekočin obstajajo še mnoge druge, ki jih lahko opišemo z eksponentnimi enačbami. Za te je značilno, da se strižna napetost z naraščanjem strižne hitrosti spreminja. Razlog za tovrsten odziv je v tem, da se z naraščanjem strižne hitrosti viskoznost povečuje ali zmanjšuje.



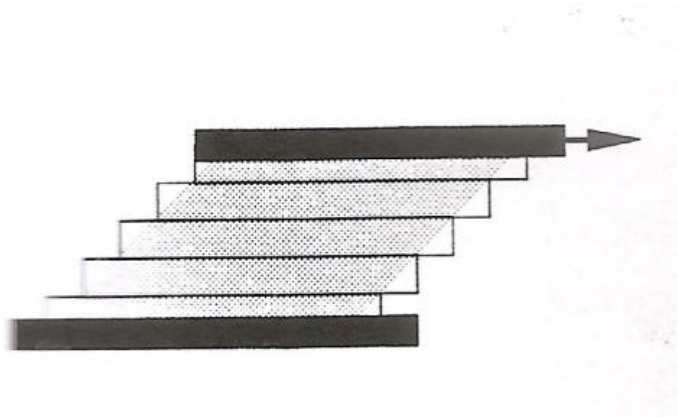
Grafikon 2: Diagram napetost – strižna hitrost za Newtonske (modro), Binghamove (zeleno) ter "eksponentne" tekočine (črno)

4.2 Modeli strižnega toka

Strižni tok v tekočini se za laboratorijske preiskave lahko ustvari na različne načine, ki so definirani glede na njihovo geometrijo:

1. Strižni tok med dvema vzporednima ploščama

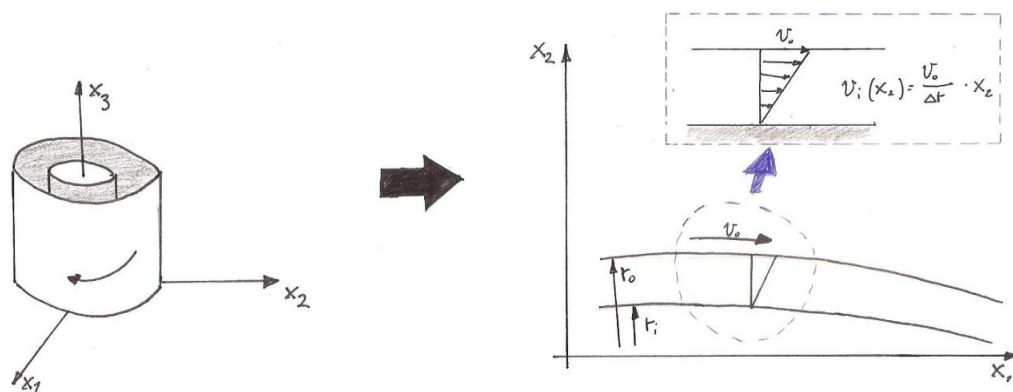
Ta oblika je prikazana na sliki 23 in prikazuje v teoretičnem smislu najbolj idealne geometrijske razmere za merjenje viskoznostnih parametrov. V praksi je težko dobiti ustrezno tehnično rešitev za ta model, zato se v viskometriji skoraj nikoli ne uporablja.



Slika 18: Tok med ploščama (Vir: Wallevik O., 2009)

2. Rotirajoči tok med dvema koaksialnima cilindroma

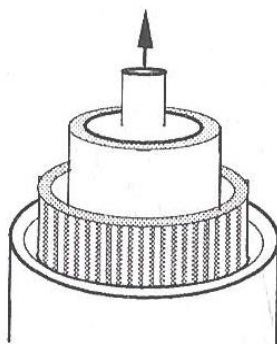
To je najpogosteje uporabljena rešitev v viskometriji, saj omogoča natančne rezultate meritev. Da bi preprečili napako meritve, je potrebno upoštevati veliko stvari, kot so: vpliv spodnje in zgornje količine vzorca (tako imenovan "top and bottom effect"), zdrs vzdolž zunanega ali notranjega valja, konstantno hitrost striženja pri vsaki hitrosti rotacije ter natančnost geometrije. Ko je razmerje med zunanjim in notranjim valjem približno enako 1, se lahko uporabijo enačbe tok med dvema vzporednima ploščama.



Slika 19: Predpostavka za tok med koaksialnima valjema (Vir: Wallevik O., 2009)

3. Tok skozi sistem kapilar in cevi

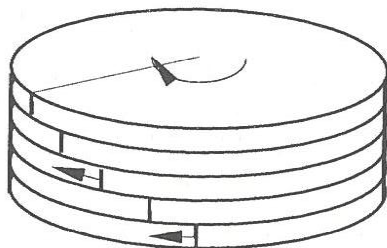
Metoda ni primerna za ne-Newtonske tekočine in s tem tudi ne za malte in druge suspenzije s trdnimi delci. S tovrstnimi viskometri ne moremo določiti napetosti na meji tečenja, tiksotropičnega obnašanja in elastičnih lastnosti.



Slika 20: Tok skozi kapilare in cevi (Vir: Wallevik O., 2009)

4. Rotacijski tok med dvema vzporednima ploščama

Z njimi lahko določamo elasto-plastično obnašanje. Metoda je primerna za sveže betone.



Slika 21: Rotacijski tok med paralelnima ploščama (Vir: Wallevik O., 2009)

Kakšen sistem bomo uporabili za določanje reoloških lastnosti malt je predvsem odvisno od vrste naprave, ki nam je na voljo. V laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, UL, je za določanje reoloških lastnosti malt in betonov na voljo reometer s strižnim tokom med dvema koaksialnima cilindroma, ki sem ga tudi uporabljal za potrebe diplomskega dela. Reometer je izdelalo podjetje ConTec in je model Viscometer 5.

4.3 Delovanje reometra ConTec Viscometer 5

V laboratoriju Katedre za preskušanje materialov in konstrukcije (KPMK) je za izvajanje reoloških preskusov na voljo reometer Viscometer 5. Reometer izrablja načela strižnega toka med dvema koaksialnima cilindroma za učinkovito merjenje reoloških parametrov materiala, ki ga preizkušamo.

Reometer je bil načrtovan in prvič izdelan na Norveškem inštitutu za tehnologijo, nadaljnji razvoj pa je potekal na islandskem Inštitutu za raziskave v gradbeništvo (Icelandic Building Research Institute). Sestavljata ga glavna enota in vgrajeni računalnik, ki omogoča definiranje poteka preskusa v odvisnosti od vrste preskušane materiala (beton ali malta ali druga vrsta suspenzije z grobimi delci) ter študij in obdelavo rezultatov meritev. Zaradi uporabe okolja Microsoft Windows na računalniku je možno meritve predstaviti na različne načine in ne

samo kot surove rezultate, prav tako pa lahko z napravo upravlja vsak, ki pozna operacijski sistem Windows.

Glavna enota reometra je sestavljena iz treh sestavnih delov:

- Merilna glava (A)
- Notranji in zunanji valj (B ter C)
- Rotacijski disk (D) s pogonskim motorjem, viden je samo zunanji del (disk)



Slika 22: ConTec Viscometer 5. (Op.: Obarvano je zaradi lažje predstave)

Testiranje z reometrom bazira na Binghamovem obnašanju sveže malte, kjer se z merjenjem momenta T na statičnem notranjem valju vsiljenega z rotiranjem zunanjega valja (posoda z malto) pri različnih hitrostih vrtenja N izračuna vrednosti G in H . S tema parametroma lahko definiramo konsistenco preizkušene sveže malte, kjer so:

G [Nm] : sila, ki je potrebna za začetek gibanja malte (odpornost proti tečenju, angl. "flow resistance")

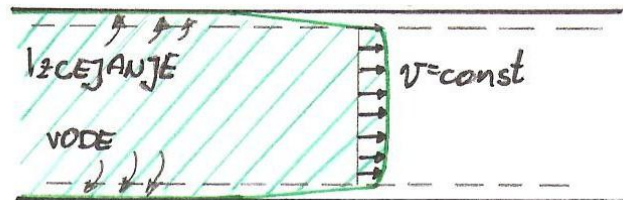
H [Nm·s] : odpor maltne mešanice proti povečanju hitrosti gibanja (faktor viskoznosti)

Enačba za izračun momenta na notranjem valju:

$$T = G + H \cdot N \dots\dots\dots (5) \text{ (Povzeto po Wallevik, 2009).}$$

4.3.1 Geometrija valjev

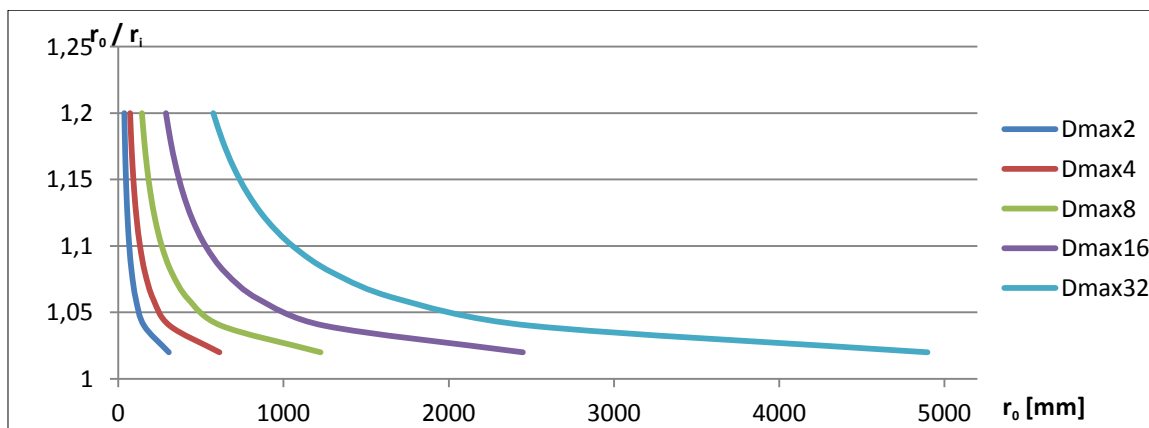
Da se nasploh lahko uporablja koaksialni viskometer za materiale z grobimi agregatnimi zrni kot sta malta in beton, je potrebno upoštevati geometrijske značilnosti zunanega in notranjega valja naprave. Razmerje med radiji notranjega in zunanega valja (r_o/r_i - razmerje) mora tako biti čim bližje številu 1 ter, če je le mogoče, manjše od 1,2 da ne pride do takšnega toka materiala kjer bi bila hitrost tečenja vzdolž prereza konstantna (angl. "plug flow").



Slika 23: Tok materiala s konstantno hitrostjo vzdolž prereza

Takšno geometrijo pa je zelo težko doseči, ker med drugim na geometrijo vpliva velikost maksimalnega zrna. Zaželeno je, da je razmik med notranjim in zunanjim valjem vsaj trikratna dimenzija največjega zrna v preskušancu. S tem se izognemo možnosti blokiranja zrn med valjema, kar bi lahko povzročilo poškodbe na merilni glavi ali na valjih.

V primeru agregata z dimenzijo maksimalnega zrna 32 mm, bi posledično potrebovali zunanji valj s premerom 1152 mm ($r_o/r_i = 1,2$).



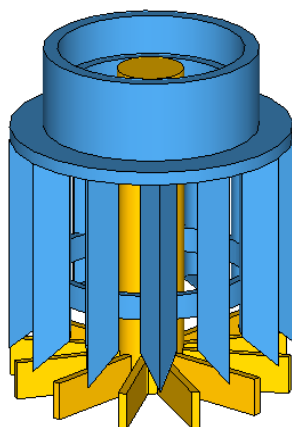
Grafikon 3: Vpliv D_{max} na potreben r_o ob pogoju da je razmik med valjema $3 \times D_{max}$

Ob preskušanju maltnih ali betonskih mešanic vedno obstaja možnost, da material začne vzdolž zunanjega ali notranjega valja drseti zaradi majhnega trenja med jeklom in materialom. Da se vpliv zdrsa zmanjša, je potrebno površino valjev ustrezno prilagoditi. To se lahko doseže tako, da se površina obdela, da postane zelo hrapava ali pa se na valje pritrdi navpična rebra.



Slika 24: Zunanji valj (posoda) z vertikalnimi rebri (Op.: v posodi je olje)

Da bi dobili čim bolj natančne rezultate preiskave, je potrebno v reometru z ustrezno geometrijo ustvariti čim bolj linearni tok med obema valjema. Tudi če nam uspe zmanjšati r_o/r_i faktor na najugodnejše razmerje, je potrebno upoštevati stik dna posode in notranjega valja z materialom, kjer lahko pride to tako imenovanega "bottom" efekta. V tem delu so možni kompleksni tri-dimenzionalni vplivi. Zaradi tega pojava je k notranjem valju dodan še fiksni, nevrteč del z vetrnico. Namen vetrnice je izničenje tri-dimenzionalnih vplivov, tako da notranji valj prevzame le vplive vzdolž višine valja.

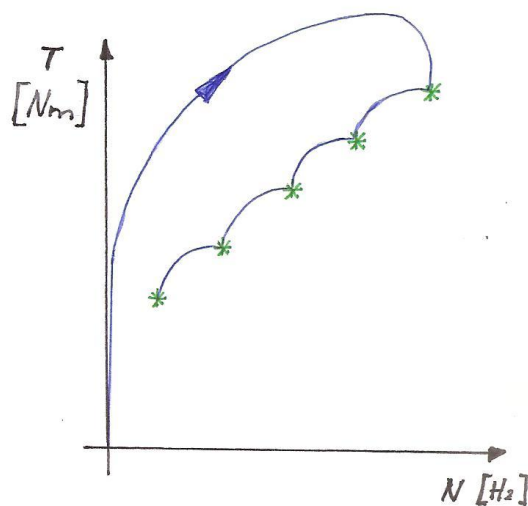


Slika 25: Notranji valj (modro) ter fiksni del z vetrnico (rumeno)

4.3.2 Rotacija zunanega valja

Za delovanje celotnega sistema in pravilno merjenje reoloških parametrov je potrebno zagotoviti rotacijo zunanega valja, v katerem je preizkušanec, sveža malta ali beton. Računalniška enota reometra je povezana s pogonskim elektromotorjem, ki skrbi za rotacijo zunanega valja preko vmesnika. Računalniška enota preko vmesnika določa hitrost in čas vrtenja elektromotorja in posledično zunanega valja. Pri poskusih so bile hitrosti vrtenja 0,01, 0,08, 0,15, 0,22, 0,29, 0,35, 0,42, in 0,49 obrata na sekundo.

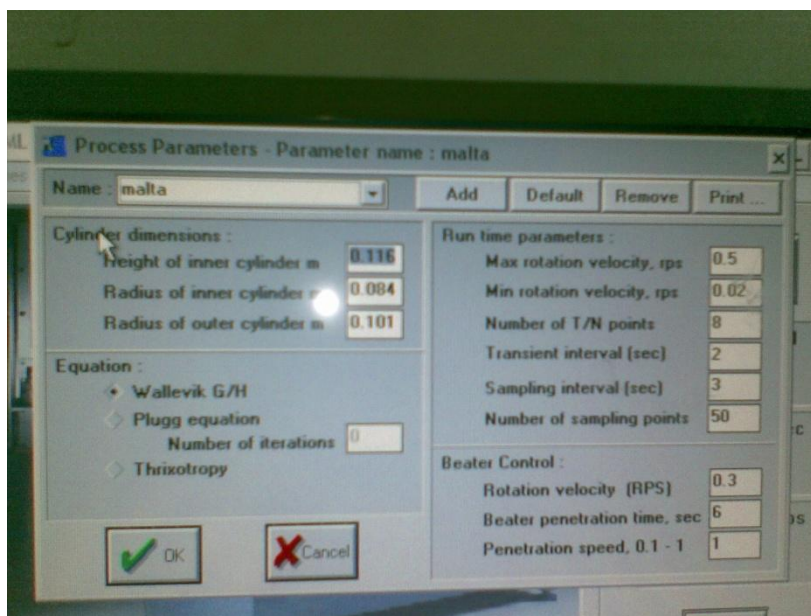
Za cementne suspenzije z grobimi delci, kot sta sveža malta in beton, kjer so reološki parametri odvisni tudi od časa (vezanje in strjevanje cementne paste), je potrebno zviševanje hitrosti izvajati v korakih in ne zvezno. Reometru tako definiramo poljubno število hitrosti vrtenja, pri katerih izvede meritve. Razlog tiči v tem, da je za vzpostavitev ravnotežja pri vsaki hitrosti striženja materiala potrebno nekaj časa. Ker je ta čas krajši, če spreminjamo hitrost striženja od večje proti manjši, se z reometrom najprej izvede meritve pri največji strižni hitrosti, ki se nato postopoma zmanjšuje. Z merjenjem od največje do najmanjše hitrosti vrtenja pridobimo tako imenovano spuščajočo se krivuljo (angl. "downward curve").



Slika 26: Potek meritev momenta glede na hitrost vrtenja (Povzeto po Wallevik, 2009)

4.3.3 Potek postopka merjenja z reometrom ConTec Viscometer 5

S prižigom naprave in vključitvijo računalniške aplikacije FreshWin (ta skrbi za prikaz podatkov in vnos merilnih parametrov) je naprava pripravljena za meritve. V aplikaciji izberemo parametre za vrsto materiala, ki ga bomo preskušali.

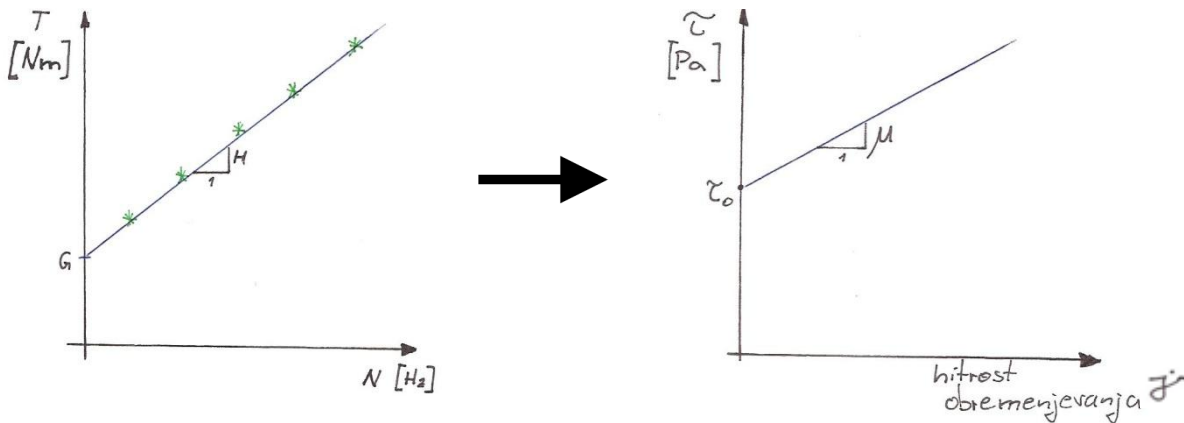


Slika 27: Nastavitev parametrov v aplikaciji FreshWin

Nato se v zunanji cilinder vlije prej pripravljeno malto do določene višine. Zunanji valj (posoda) z malto se nato postavi v reometer na rotacijski disk, kjer se ga fiksira, da se lahko vrti le z rotacijo diska. Nato se zapre varnostna vratca.

Na zaslonu v aplikaciji se klikne gumb START, ki začne avtomatiziran proces merjenja reoloških lastnosti preskušane materiala. Merilna glava z notranjim valjem se avtomatsko začne pomikati navzdol, kjer se notranji valj postopoma potopi v material. Pri različnih hitrosti rotacije se tako izmeri vrednosti momenta, ki jo material prenaša na notranji valj in preko valja na merilno glavo.

Iz vrednosti momentov pridobljenih z merjenjem pri različnih hitrosti, program poda linearno premico, ki ponazarja kako se moment povečuje z povečevanjem hitrosti (poda nam vrednosti G ter H).



Grafikon 4: Preračun vrednosti G in H za pridobitev parametrov τ_0 in μ (Povzeto po Wallevik O., 2009)

Iz dobljenih vrednosti G in H za preskušani material program izračuna parametra τ_0 in μ s pomočjo Reiner-Rivlinove enačbe (povzeto po Wallevik (2009)):

$$\Omega = \frac{T}{4\pi \cdot h \cdot \mu} \cdot \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) \dots \dots \dots (6)$$

kjer je:

- Ω : Kotna hitrost zunanlega valja (rad/s)
- T : Moment izmerjen na notranjem valju (Nm)
- h : Višina notranjega valja (m)
- r_i : Polmer notranjega valja (m)
- r_o : Polmer zunanlega valja (m)

Povezavo med hitrostjo vrtenja (N) in kotne hitrosti notranjega valja (Ω) dobimo preko enačbe:

$$\Omega = 2\pi \cdot N \dots \dots \dots (7)$$

5 LASTNE PREISKAVE

5.1 Opis preiskave

Namen praktičnega dela te diplomske naloge je preizkušanje različnih sestav sveže malte v reometru, s katerimi bi dobili zadostno število vhodnih podatkov za določanje vpliva višine notranjega valja reometra, h , na izmerjene reološke lastnosti malt. Tako smo med preiskavami pripravili in uporabili tri različne sveže malte. Za boljšo primerjavo podatkov smo v reometru preverili še olje ter silikonsko olje, katerih viskoznosti so nam bile znane.

Zaradi možnega velikega števila spremenljivk smo reološke lastnosti svežih malt preverjali na maltah z enostavno sestavo. Preverjali smo lastnosti malte s hiperplastifikatorjem, z dodatkom za zviševanje viskoznosti ter še malto brez kakršnihkoli dodatkov. Vse tri malte so imele dovolj velik v/c faktor, kar nam je omogočalo, da smo v reometru lahko preizkušali dovolj tekoče mešanice.

Pri vseh treh vrstah malte smo poskuse izvajali pri različnih višinah malte v reometru. Zaradi morebitnega časovnega vpliva na lastnosti sveže malte (izguba obdelovalnosti zaradi hidratacije cementa), je bila malta za vsako višino posebej na novo pripravljena.

Poleg preiskav v reometru smo na vsaki malti ocenili konsistenco z metodo razleza na stresalni mizici.

5.2 Uporabljeni materiali

5.2.1 Voda

Pri pripravi maltnih mešanic smo uporabili navadno pitno vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja. Za tehtanje vode smo uporabili tehtnico z merilnim območjem do 12kg ter z natančnostjo $\pm 2g$.

5.2.2 Agregat

Prvotno smo za izdelavo maltne mešanice uporabili drobljen apnenčev agregat frakcije 0/4, kar pa je privedlo do tega da je, zaradi relativno velikega v/c faktorja, mešanica začela segregirati med preskušanjem v reometru. Zaradi segregacije in izvedljivosti samega preskušanja mešanic smo zato v nadaljevanj uporabili drobljen apnenčev agregat frakcije 0/2. Agregat ima prostorninsko maso zrn $2,7 \text{ g/cm}^3$.



Slika 28: Tehtanje agregata



Slika 29: Segregirana malta s frakcijo agregata 0/4 po preizkusu v reometru

5.2.3 Cement

Pri vseh maltnih mešanicah je bil uporabljen isti cement vrste CEM II/A – M (LL-S) 42,5 R. Cement sestavlja najmanj 80% cementnega klinkerja, 6 - 20 % odstotkov mešanega dodatka apnenca (LL) in žlindre (S) ter do 5% regulatorja vezanja – sadre.

Preglednica 3: Primerjava lastnosti cementa CEM II/A - M (LL-S) 42,5 R z zahtevami SIST EN 197-1

	Zahteve standarda	Dosežene povprečne vrednosti
Kemijske zahteve		
Vsebnost sulfata	$\leq 4,8 \%$	2,8 %
Vsebnost klorida	$\leq 0,1 \%$	0,05 %
Mehanske in fizikalne zahteve		
Zgodnja trdnost, 2 dneva	$\geq 20,0 \text{ MPa}$	27,0 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	Od 42,5 do 62,5 MPa	52,0 MPa
Čas začetka vezanja	$\geq 60 \text{ min}$	180 minut
Prostorninska obstojnost	$\leq 10 \text{ mm}$	$\leq 1 \text{ mm}$

5.2.4 Hiperplastifikator - HP

Pri eni izmed malt smo uporabili superplastifikator nove generacije – hiperplastifikator. S tem dodatkom smo pri malti, kater v/c je ostal enak, dodatno povečali obdelovalnost. S tem smo dosegli večjo sposobnost tečenja sveže malte, ki smo jo nato preskusili v reometru.

Uporabljeni plastifikator je svetlo rjava tekočina, ki se je dodala k mešanici skupaj z dodajanjem vode. S tem smo dosegli enakomerno vmešanje hiperplastifikatorja v maltno mešanico. Hiperplastifikator v cementni malti pripomore k:

- lažji obdelovalnosti in hitrejši vgradnji
- manjši količini potrebne vode
- prihranku energije
- večji trdnosti strjene malte

5.2.5 Sredstvo za kontrolo viskoznosti - VMA

Da bi lahko dobili še rezultate sveže malte z višjo viskoznostjo in manjšo sposobnostjo tečenja smo uporabili dodatek za kontrolo viskoznosti (okrajšava VMA). Uporabljen VMA dodatek je bil v obliki vodotopnega belega prahu. V malto smo ga dodajali dispergirane v vodi, za boljše razmešanje med pripravo malte.

Dodatek se kot hiperplastifikator dodaja procentualno glede na maso cementa v malti. Dodatek VMA dodajamo v cementne mešanice z namenom povečanja viskoznosti mešanice za preprečitev segregacije ter zmanjšanja učinka izcejanja vode.

5.3 Določanje geometrijskih vrednosti valjev

Z uporabo Reiner-Rivlinove enačbo (6) se iz izmerjenih vrednosti G in H izračunata reološka parametra τ_o in μ . V zgoraj omenjeni enačbi pa nastopajo tudi geometrijski parametri notranjega in zunanjega valja. Ti parametri se v enačbo vnesejo preko radija zunanjega valja, radija notranjega valja ter višine notranjega valja (r_o , r_i , h). Zunanji in notranji valj za malte sta bila k reometru izdelana naknadno, zato je bilo potrebno izmeriti vrednosti parametrov.

Ker sta bila notranji in zunanji valj izdelana naknadno smo zaradi morebitne nesimetrije valjev naredili več izmer premerov valjev (D_i , D_o). Dobljene vrednosti smo nato povprečili in jih uporabili za izračun viskoznih parametrov.



Slika 30: Meritev premera za vsako rebro na notranjem in zunanjem valju

Iz izmerjenih vrednosti premerov valjev smo pridobili povprečne vrednosti, iz katerih smo izračunali končne vrednosti polmerov $r_i = 86,17\text{mm}$ ter $r_o = 101,59\text{mm}$.

Preglednica 4: Izmerjene vrednosti premerov valjev

Meritev	D_i [mm]	D_o [mm]
1	171,85	203,14
2	172,78	203,12
3	173,02	204,05
4	172,38	203,49
5	172,34	203,19
6	171,63	202,67
7	/	202,62
8	/	203,11
9	/	203,32
10	/	203,05
Povprečje	172,33	203,18

Z znanima radijema notranjega in zunanjega valja se lahko Reiner-Rivlinove enačbo (6) poenostavi v dve ločeni enačbi za izračun posameznega reološkega parametra τ_o in μ :

$$\tau_o = G \cdot \left[\frac{\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2}}{4 \cdot \pi \cdot \ln(r_o/r_i)} \cdot \frac{1}{h} \right] \dots\dots\dots (7)$$

$$\mu = H \cdot \left[\frac{\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2}}{8 \cdot \pi^2} \cdot \frac{1}{h} \right] \dots\dots\dots (8)$$

Za izračun τ_o in μ vrednosti nam tako ostane le še neznanica h , zato lahko enačbi še poenostavimo:

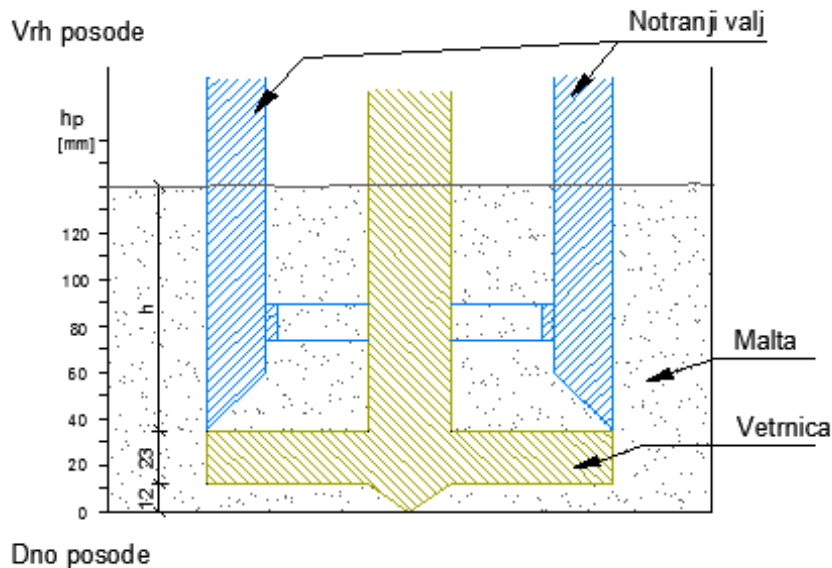
$$\tau_o = G \cdot \frac{K_{\tau_0}}{h} \dots (9) \quad \text{ter} \quad \mu = H \cdot \frac{K_{\mu}}{h} \dots (10)$$

Faktorja K_{τ_0} in K_{μ} se ne spreminjata in sta odvisna samo od polmerov notranjega in zunanjega valja ter znašata $K_{\tau_0} = 18,264 \text{ m}^{-2}$ in $K_{\mu} = 0,479 \text{ m}^{-2}$. Pri merjenju reoloških parametrov v reometru, se bo višina notranjega valja spreminjala (količina malte v posodi se

bo večala), iz pridobljenih rezultatov pa se bo pridobila najprimernejša višina za nadaljnje preiskave z reometrom.

5.4 Efektivna višina malte v reometru

Eden od parametrov za izračun napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti sveže malte je višina notranjega valja h . Višina notranjega valja je razdalja od najnižjega dela valja pa do točke vrha malte. S to dimenzijo je definirana efektivna višina rotirajoče se malte, ki deluje na notranji valj.



Slika 31: Shema položaja notranjega valja v posodi z malto in vplivna višina malte

Kot je razvidno s slike 31, se notranji valj ne dotika dna posode, ampak je njegov najnižji del 35mm nad dnom. Vplivna višina malte je torej:

$$h \text{ [mm]} = h_p - 35 \dots\dots\dots (11)$$

S potopom notranjega valja in vetrnice v posodo z malto se višina malte dvigne zaradi izpodrivanja. Prostornina malte v posodi zasede prostor do višine h_p . Da bi upoštevali ta vpliv, smo naredili poizkus, pri katerem smo notranji valj spuščali v posodo napolnjeno z barvo. V zunanji valj smo najprej natočili barvo do višine $h_p = 55\text{mm}$ ter nato potopili notranji

valj v barvo. Z dvigom notranjega valja se je na valju ustvarila barvna prevleka, ki je označevala višino h , do koder je segala barva s potopljenim notranjim valjem. V naslednjem koraku smo povečali višino barve na 65mm ter ponovili potopitev in izvlečenje notranjega valja. Postopek smo ponavljali v 5mm koraku do višine $h_p = 120\text{mm}$.



Slika 32: Merjenje dviga višine barve zaradi potopitve notranjega valja

Iz pridobljenih rezultatov smo naredili primerjalno tabelo, ki ponazarja, za koliko se poveča vplivna višina malte na notranjemu valju, če povečamo višino malte v posodi za 5mm. S tem smo si pomagali pri določanju, do katere višine moramo vliti malto v posodo, da se na notranjem valju doseže želena višina.

Preglednica 5: Primerjava višin malte v posodi in vplivne višine malte.

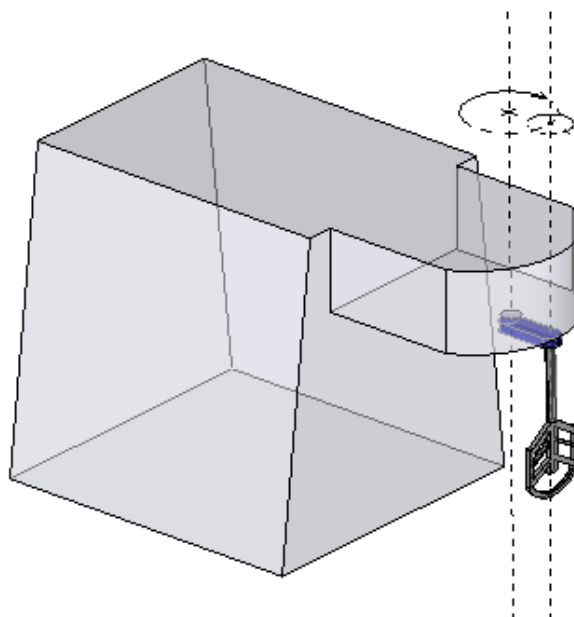
h_p [mm]	h [mm]	Δh [mm]	$h_p - h$ [mm]
57	30,5		26,5
65	40	9,5	25
70	46	6	24
75	51	5	24
80	57	6	23
85	63	6	22
90	69	6	21
95	79	10	16
100	82	3	18
105	86	4	19
110	92	6	18
115	97	5	18
120	109	12	11

Osenčena polja v tabeli so tiste višine, ki smo jih izločili iz preiskav z malto. Pri območju pod $h = 69\text{mm}$ se geometrija reber notranjega valja spreminja (obroč za ohranitev geometrije reber, zmanjšanje preseka reber), kar vpliva na samo merjenje reoloških lastnosti sveže malte.

Iz rezultatov za razliko posameznih višin na notranjem valju, Δh , se vidi nelienarnost. Razlog tiči v tem, da se je geometrija reber z višino spreminjala, obroč je z višino bolj izpodrival barvo, prav tako pa se je z vsakim dvigom notranjega valja iz posode na valju nabralo kar nekaj barve. S ponovnim spustom je ta barva nekoliko spet dvignila višino v posodi, možne pa so tudi manjše napake pri merjenju.

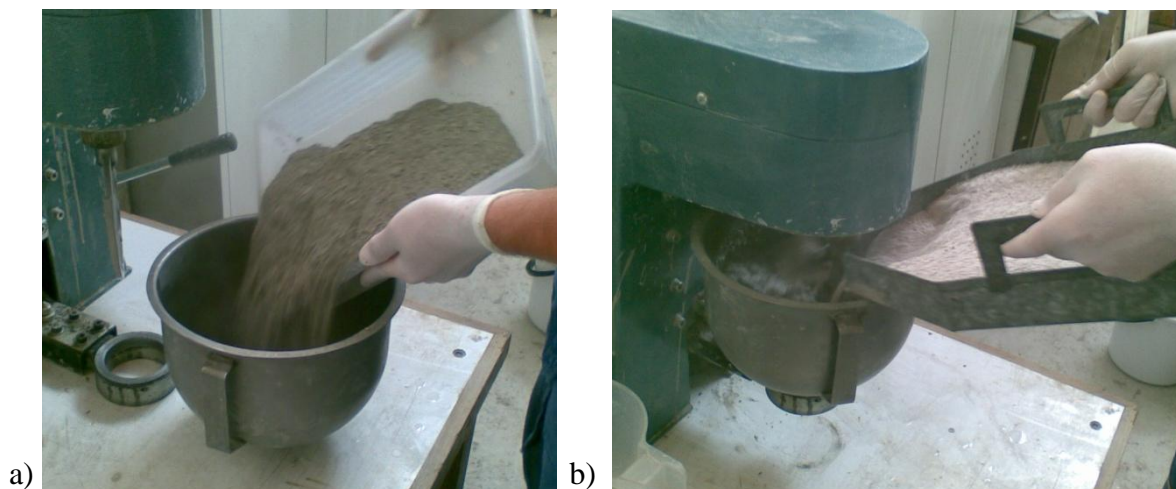
5.5 Priprava maltne mešanice

Malte smo pripravljali s pomočjo modificiranega mešalca RILEM-CEN, pri katerem so uporabili večjo posodo in posledično večjo mešalno lopatico, kot to določajo relevantni standardi. Pri mešalcu se mešalna lopata obrača okrog svoje lastne osi in nato še planetarno okoli pogonske osi. Z mešalcem mešamo pri dveh različnih hitrosti mešanja.



Slika 33: Shematičen prikaz planetarnega gibanja lopatice RILEM-CEN mešalca

Pred samim začetkom mešanja smo pripravili stehtane osnovne sestavine malte ter navlažili posodo mešalca in lopatico za mešanje. Nato smo v posodo dodali vodo in dodatke ter z dodajanjem cementa začeli 30 sekundno mešanje na prvi hitrosti. Po preteku teh 30 sekund se je pričela druga faza mešanja, kjer smo naslednjih 30 sekund dodajali agregat v posodo. Po drugi fazi sledi 90 sekundni premor. V tem času postrgamo malto, ki se je nabrala na mešalni lopatici in na stenah posode ter jo potisnemo proti sredini posode. Po premoru še nadaljujemo z mešanjem na drugi stopnji naslednjih 60 sekund.



Slika 34: a) vsipavanje cementa v posodo, b) dodajanje agregata med mešanjem

Za potrebe preiskav smo naredili več vrst malt. Vsaka malta je bila zamešana, nato preizkušena v reometru, do določene višine, v večih zaporednih meritvah (serijah). Zamešane so bile vse skupaj tri različne malte. Ena z dodatkom hiperplastifikatorja, ena z dodatkom sredstva za kontrolo viskoznosti ter malta brez dodatkov. Sestave malt in količine sestavin, ki so bile uporabljene za posamezno malto so v preglednici:

Preglednica 6: Sestave mešanic pri preiskavah

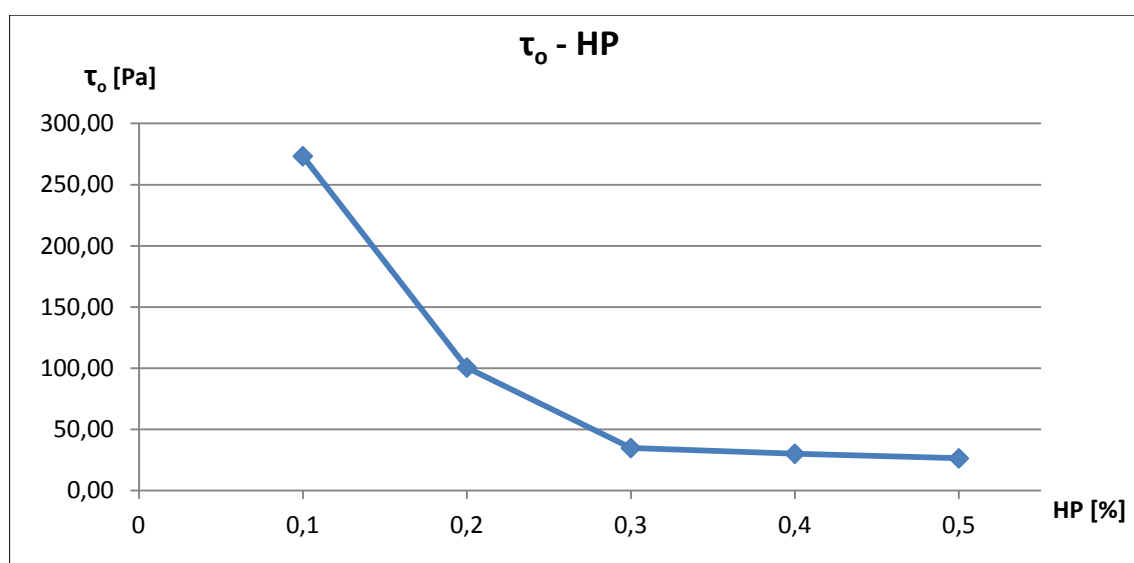
Vrsta malte	Malta A	Malta B (s HP)	Malta C (z VMA)
Agregat [g]	6050	6045	6045
Cement [g]	2600	2600	2600
Voda [g]	1362	1360	1460
Dodatek [g]	/	7,8 (0,3%)	26 (1,0 %)
v/c	0,52	0,52	0,56
Volumen [dm ³]	3,40	3,39	3,48

Volumni malt, ki so bili zamešani, so določeni z maksimalno prostornino posode v mešalcu. Pri preiskavah so bile vedno zamešane iste količine za posamezno malto, le v zunanji valj reometra se je malto vgrajevalo v različnih višinah.

5.6 Vpliv hiperplastifikatorja

Hiperplastifikator, ki se dodaja v maltno mešanico, se odmerja procentualno glede na maso cementa (od 0,1 % do 5%). Ker nismo vedeli kako bo dodatek vplival na meritve malte, smo naredili 5 mešanic z različnim odstotkom dodanega hiperplastifikatorja (od 0,1 do 0,5% po 0,1% koraku) pri višini notranjega valja 69 mm. Vsaka mešanica se je v reometru testirala trikrat; 5 mešanic, vsaka mešanica po 3 meritve. Za osnovne sestavine smo uporabili:

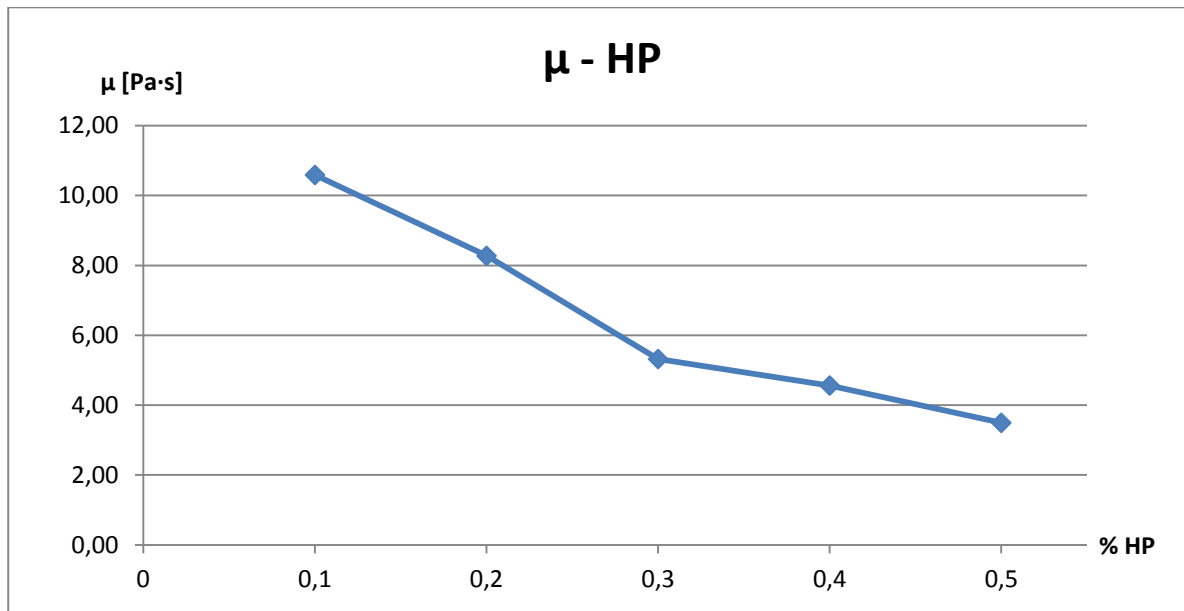
- 6045 g agregata
- 2600 g cementa
- 1360 g vode
- 0,1-0,5% hiperplastifikatorja



Grafikon 5: Vpliv hiperplastifikatorja na napetost na meji tečenja

Iz grafikona 5 je razvidno, da z večanjem odstotka HP v mešanici, le tej pada napetost na meji tečenja. Pri 0,1% dodatka ta znaša 273,3Pa (razlez 219mm) pri 0,3% pa samo 35Pa (razlez 355mm). Z večjo količino plastifikatorja postane mešanica zelo tekoča, vendar se napetost na meji tečenja ne spremeni bistveno zato smo se za nadaljnje preiskave odločili za 0,3% HP na maso cementa, kar znaša 7,8g hiperplastifikatorja.

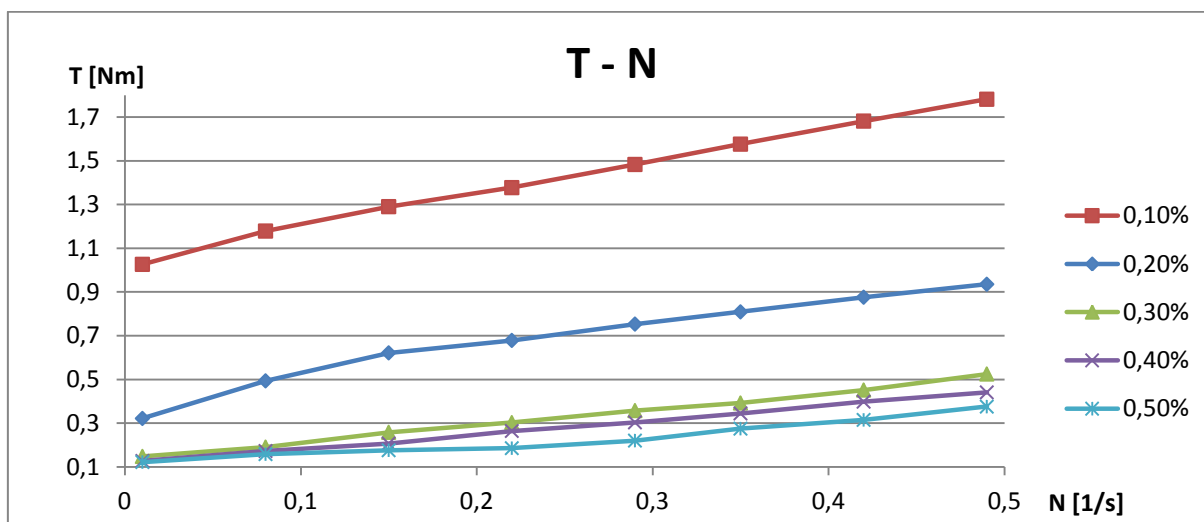
Kot predvideno, se z uporabo superplastifikatorjev svežim maltnim mešanici zmanjša plastična viskoznost. Plastifikator s svojim delovanjem omogoča manjšo količino vode v mešanici ter lažjo obdelovalnost in večjo sposobnost tečenja mešanice, kar praviloma izboljša vgradljivost.



Grafikon 6: Vpliv hiperplastifikatorja na plastično viskoznost

Eden od razlogov za uporabo 0,3% HP v nadaljnjih preiskavah je tudi ujemanje posameznih krivulj serij preiskav na grafu T-N ("downard curve"). Pri 0,3% dodatka so se rezultati serij najbolj ujemali izmed vseh petih mešanic (priloga F).

Pridobljene vrednosti iz treh ponovitev za vsako mešanico so bile nato povprečene, da smo dobili sovisnost med momentov in hitrostjo. Tista maltna mešanica ki bi imela najbolj linearno sovisnost, bi bila najustreznejša. Pri naših poskusih sta bili to mešanici z 0,1 in 0,3% dodatka hiperplastifikatorja.



Grafikon 7: Primerjava T- N povprečnih sovisnosti za posamezne odstotke HP

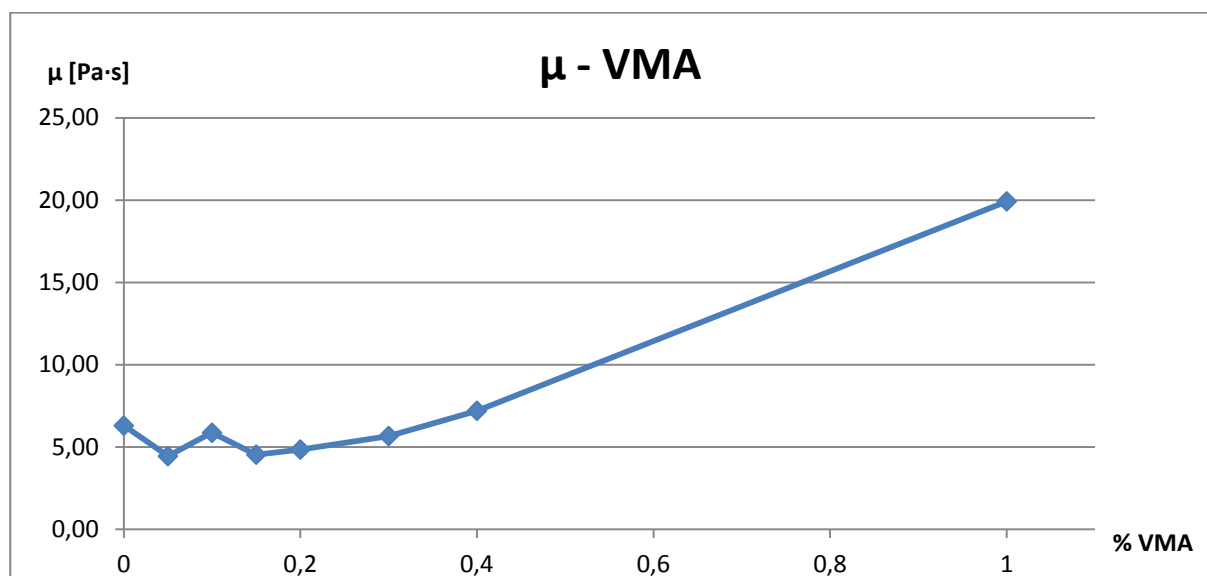
Mešanico z 0,1% HP smo izločili že na začetku, saj je imela visoko napetost na meji tečenja. Mešanica z 0,3% HP izkazala za najustreznejšo za nadaljnje preiskave.

5.7 Vpliv dodatka za kontrolo viskoznosti

S spreminjanjem plastične viskoznosti sveže maltne mešanice neposredno vplivamo na njene reološke lastnosti. Če povečamo viskoznost malte v njenem sveže stanju je za njeno tečenje potrebno več sile oziroma dela, kar lahko oteži vgradljivost. Po drugi strani pa z večjo viskoznostjo preprečimo izcejanje vode iz mešanice ter zagotovimo boljše povezanost osnovnih sestavin. Viskozne mešanice uporabljajo predvsem pri podvodnih sanacijah in pri gradnjah, kjer mora biti sveža mešanica sposobna preprečiti vdor okoliške vode v njeno notranjost.

Za izvedbo meritev vpliva VMA dodatka smo za osnovne sestavine uporabili 6045g agregata, 2600g cementa ter 1460g vode. Večjo količino vode smo uporabili zato, da sama mešanica nebi postala preveč viskozna že pri manjših količinah dodatka. Vplivna višina malte v reometru je bila 86mm. V prvo mešanico smo najprej dodali 0,05% VMA in nato delež postopoma večali po 0,05%, do 0,20% VMA dodatka. V tem območju se rezultati niso veliko

razlikovali med seboj, prišlo pa je tudi do manjših odstopanj od pričakovane linearne sovisnosti na grafu, zato smo povečali korak na 0,10%. S tem korakom smo nadaljevali do 0,40% dodatka.



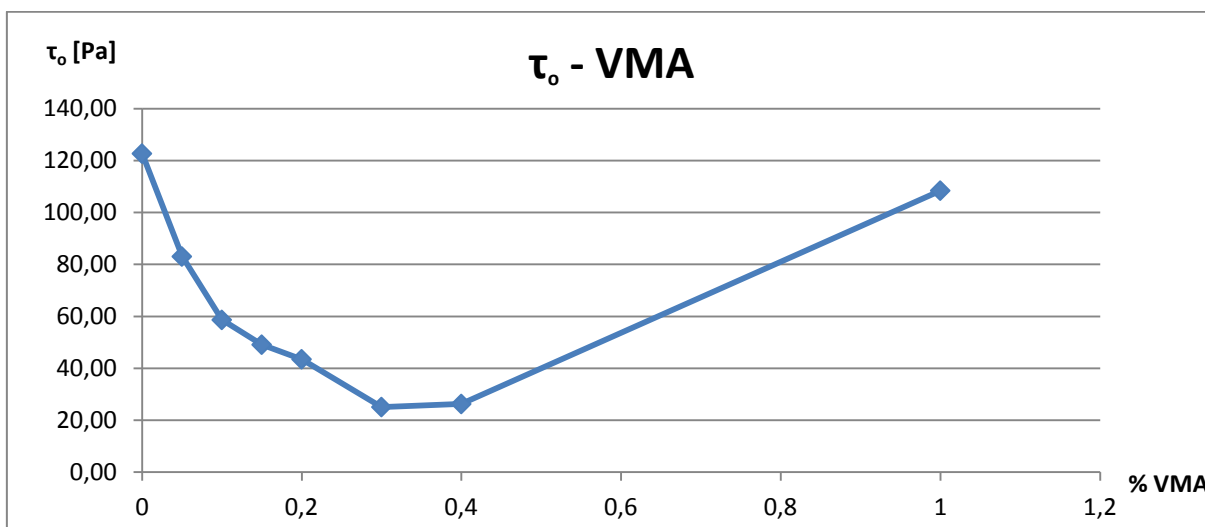
Grafikon 8: Vpliv količine dodatka za kontrolo viskoznosti na plastično viskoznost

Zaradi relativno majhnega povečanja plastične viskoznosti glede na malto z 0,0% VMA, smo količino dodatka podvojili na 28g (1,0%). Z dodanim 1,0% VMA dodatka se je plastična viskoznost maltne mešanice bistveno povečala.

Preglednica 7: Vrednosti plastične viskoznosti

% VMA	0,0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	1,0
VMA [g]	/	1,3	2,6	3,9	5,2	7,8	10,4	26
μ [Pas]	6,3	4,45	5,87	4,54	4,85	5,67	7,20	19,92

Za nadaljnje meritve smo izbrali mešanico z 1,0% dodatka za kontrolo viskoznosti. Viskoznosti pri tem dodatku je bila zadostno velika, prav tako pa se strižna napetost na meji tečenja maltne mešanice ni spremenila veliko.

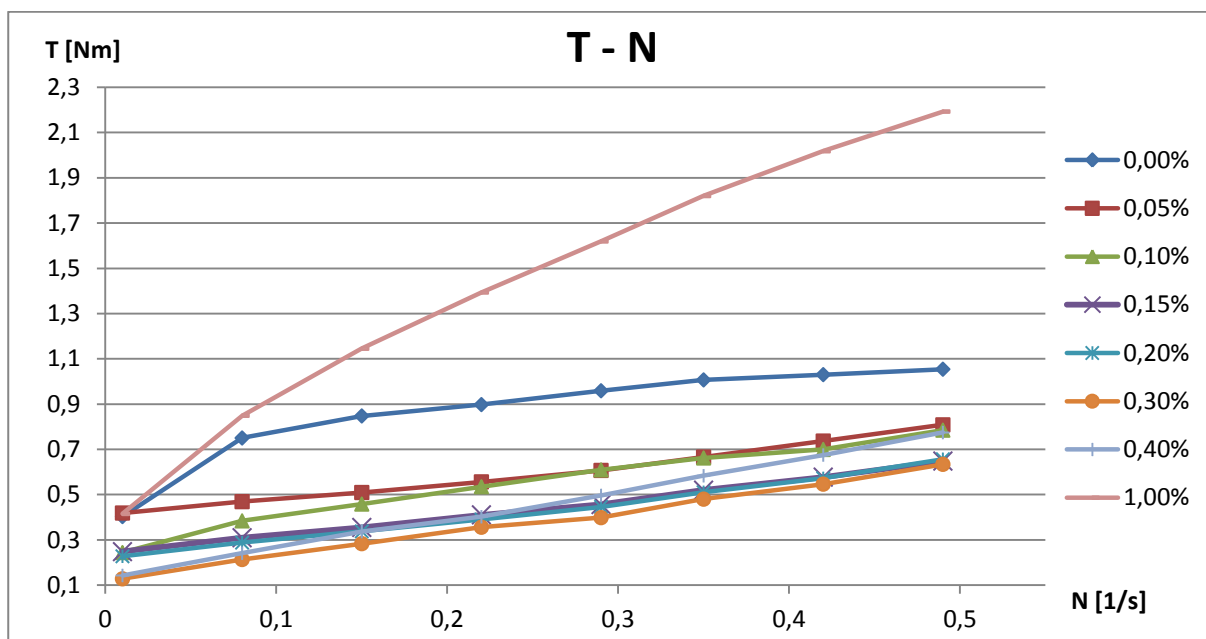


Grafikon 9: Vpliv količine VMA dodatka na meji tečenja

Pri diagramu strižne napetosti na meji tečenja se je pojavil zanimiv pojav. Z večanjem količine VMA dodatka v mešanice je strižna napetost na meji tečenja mešanice upadala, pri 0,30% VMA pa se je začela zviševati, dokler ni pri 1,0% skoraj dosegla vrednost strižne napetosti pred dodajanjem dodatka.

Pri "downward" krivuljah se je pokazalo, da so padci in skoki krivulje na grafu $\mu - VMA$ (Grafikon 8) posledica neujemanj rezultatov posameznih serij mešanic. Pri mešanicah do 0,2% dodatka se serije posamezne mešanice ne ujemajo in prihaja do večjih odstopanj (priloga G). Možen razlog za takšno odstopanje je v segregaciji mešanice. Med samim zamešanjem ni prihajalo do segregacije, možno pa je, da je zaradi velikega v/c količnika med merjenjem v reometru prišlo do posedanja delcev na dno posode.

Z večanjem dodatka z kontrolo viskoznosti se je vpliv segregacije zmanjševal, naraščala je strižna napetost na meji tečenja in mešanica je postajala bolj merljiva/stabilna. Iz povprečnih vrednosti rezultatov meritev za različno količino VMA dodatka smo dobili približne "downward" krivulje.



Grafikon 10: Primerjava $T - N$ krivulj za posamezne odstotke VMA

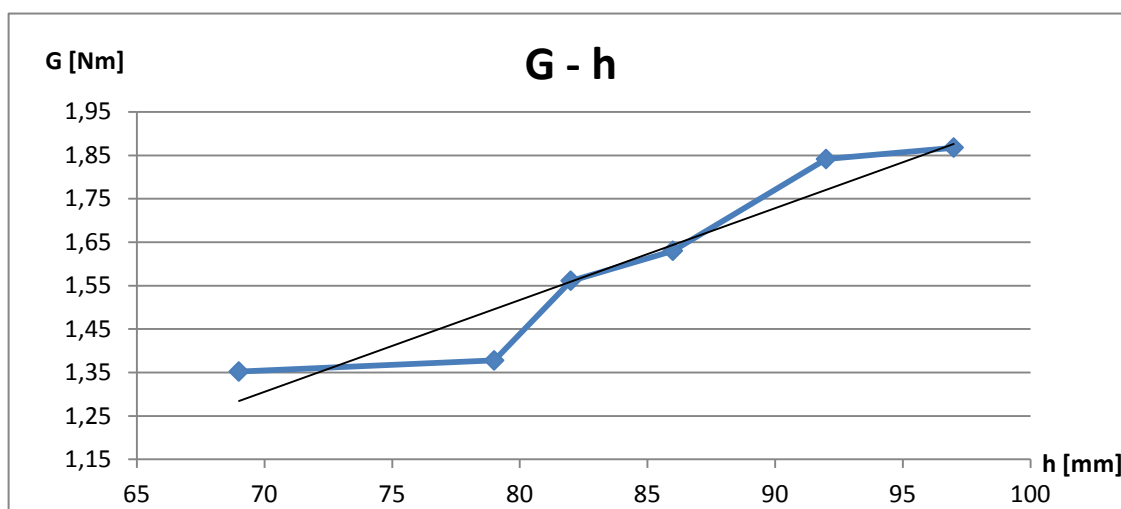
Iz grafikona 10 se lahko razbere da se viskoznost mešanic z večanjem dodatka do vrednosti 0,4% ne poveča veliko, le za malenkost.

6 MERITVE

6.1 Meritve na malti A

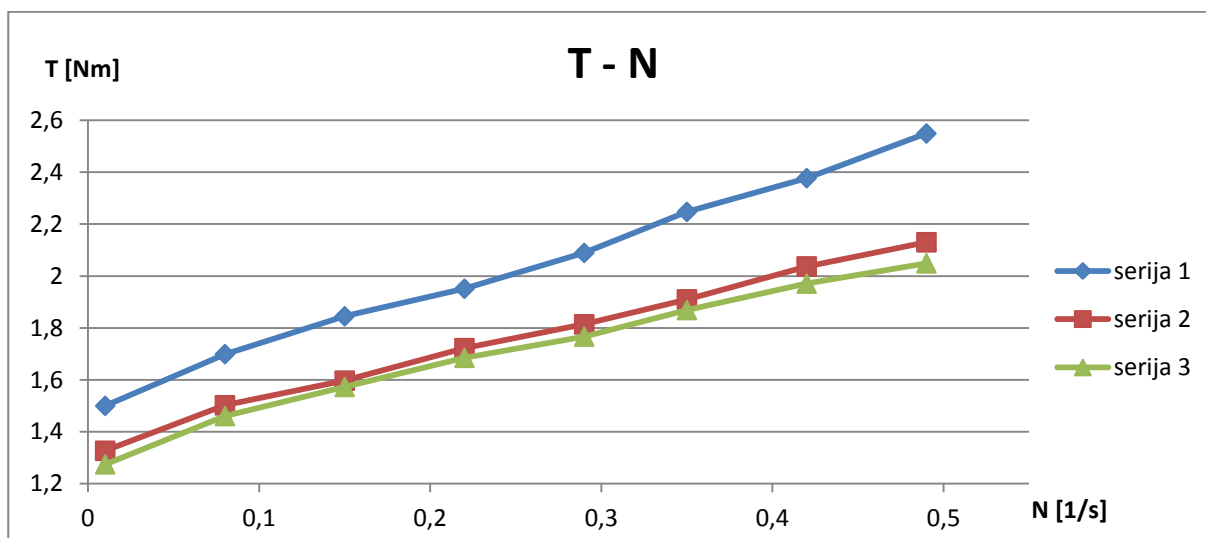
Malta A je navadna cementna malta, brez kakršnihkoli dodatkov, ki bi vplivali na njene lastnosti v svežem ali strjenem stanju. Njen v/c je 0,52 z namenom da je malta že v osnovi dovolj tekoča, kar omogoča, da se v reometru lažje preverja njene lastnosti. Malta je bila pripravljena v RILEM-CEN mešalcu. Po zamešanju, se je malta vlila v zunanji valj reometra do določene višine, preostanek malte pa se je uporabil za oceno konsistence z razlezom na stresalni mizici.

Z večanjem vplivne višine malte na notranji valj, se je povečeval tudi moment potreben za premik malte v posodi reometra, kar je seveda pričakovano. Več kot je materiala, večja je potrebna sila za pričetek deformiranja materiala.



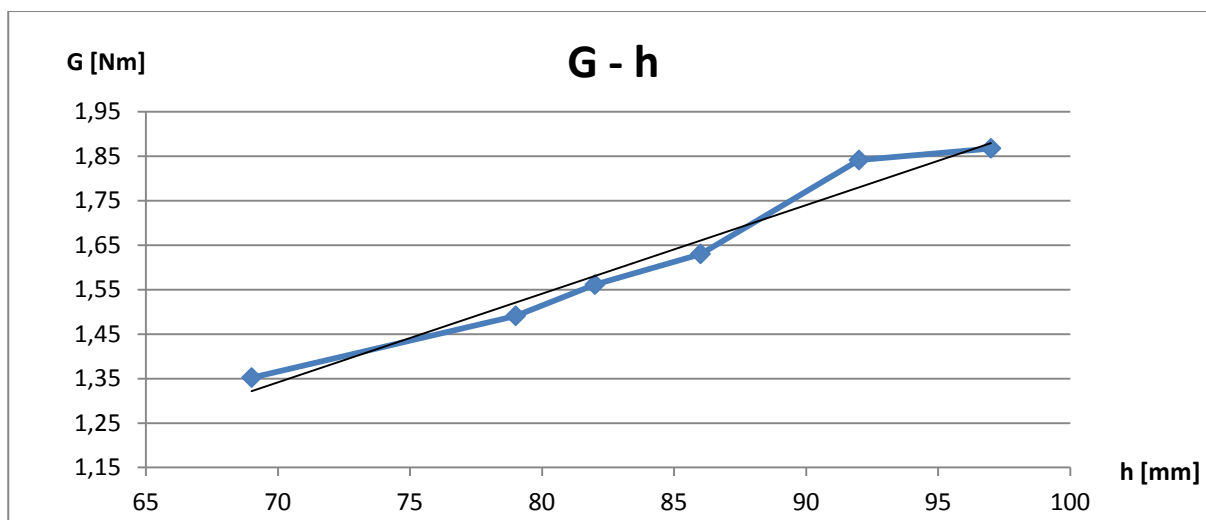
Grafikon 11: Vpliv višine h na parameter G – Malta A

Sicer krivulja ni čisto ravna, kot bi morala biti, vendar posamezna odstopanja pri meritvah niso večja od 0,1 Nm. Najbolj odstopa vrednost pri višini notranjega valja 79mm. Razlog odstopanja se prikaže v posameznih serijah meritev pri tej višini.



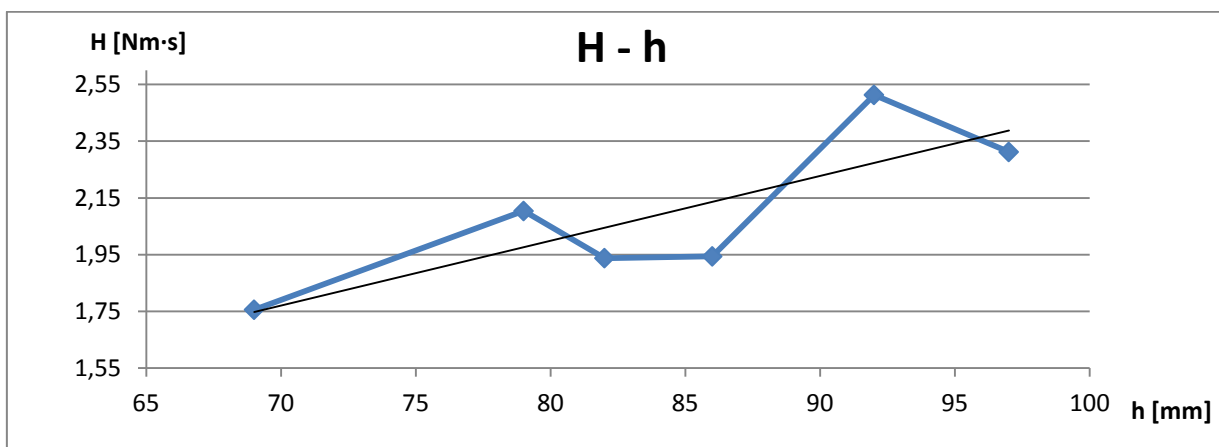
Grafikon 12: "Downward" krivulja za serije pri $h = 79\text{mm}$ – Malta A

Seriji 2 in 3 pri višini 79mm odstopata od pričakovanih vrednosti, zato jih izvzamemo iz računa. S tem smo dobili popravljen graf vpliva višine na izmerjene vrednosti.



Grafikon 13: Popravljen graf vpliva višine na parameter G - Malta A

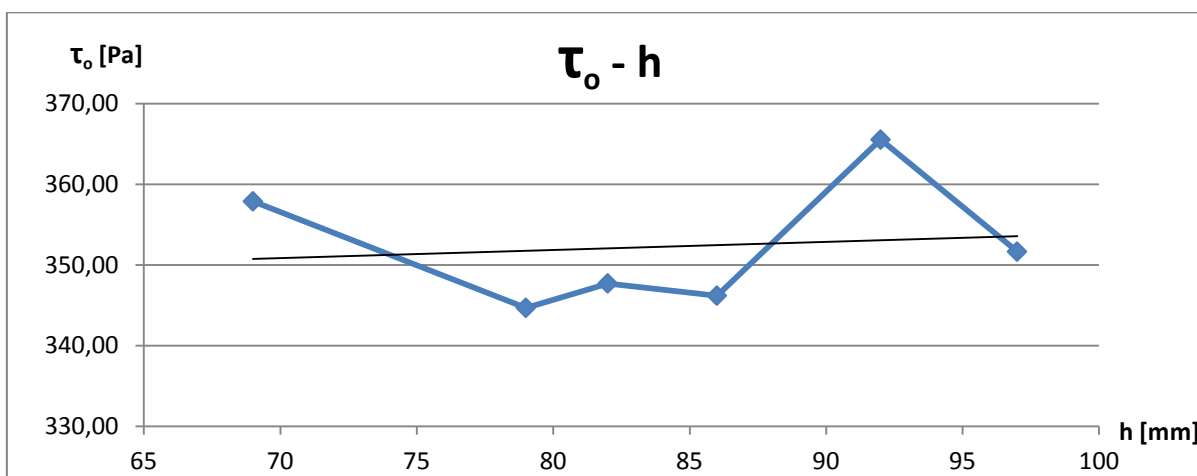
Popravljen graf prikazuje skoraj idealno sovisnost med višino malte in parametrom G . Še vedno so majhna odstopanja, a so za praktično uporabo zanemarljiva.



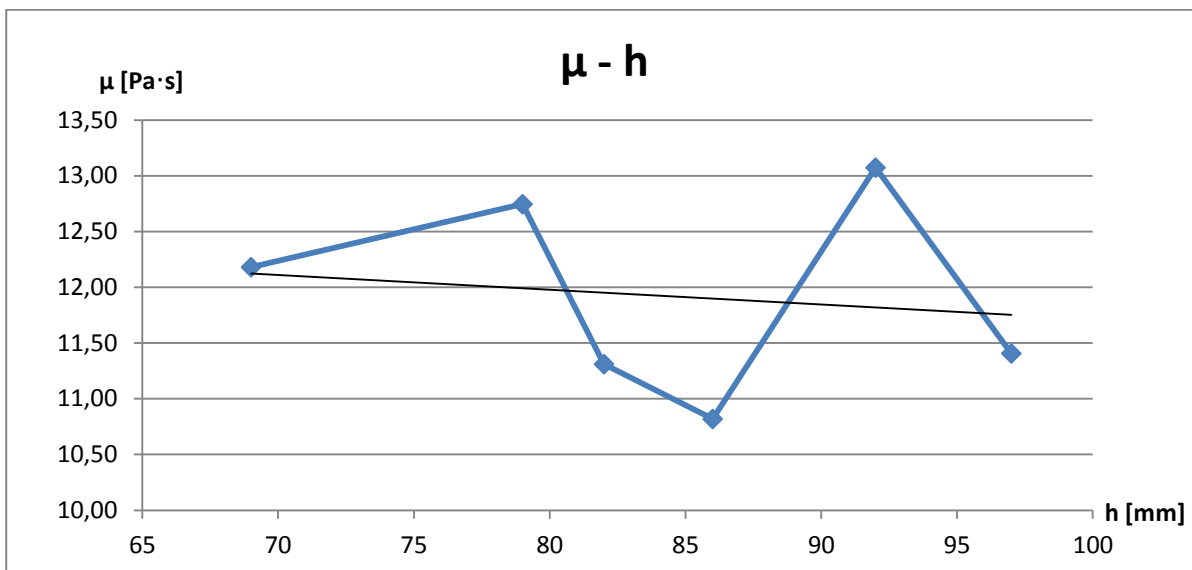
Grafikon 14: Vpliv višine h na parameter H – Malta A

Krivulja na grafu na prvi pogled močno odstopa od idealne premice, vendar pa so posamezna odstopanja v velikosti do 0,2 Nm·s, kar je glede na merilni razpon reometra relativno malo. Podobna odstopanja so tudi pri rezultatih za napetost na meji tečenja in plastično viskoznost. Reometer omogoča merjenje tudi do desetkrat večjih obremenitev notranjega valja, zato so ta odstopanja zanemarljivo majhna.

Vpliv višine na izmerjeno napetost na meji tečenja sveže malte je izrazito majhen. Zaradi prvotnih odstopanj pri merjenju vhodnih parametrov G in H , pride tudi na grafu vpliva višine na napetost τ_o in viskoznost μ do manjših odstopanj, ki pa so tudi zanemarljiva (odstopanje meritev za maksimalno $\pm 3\%$). Najpomembnejša ugotovitev je, da rezultati podajo skoraj vodoravno premico.

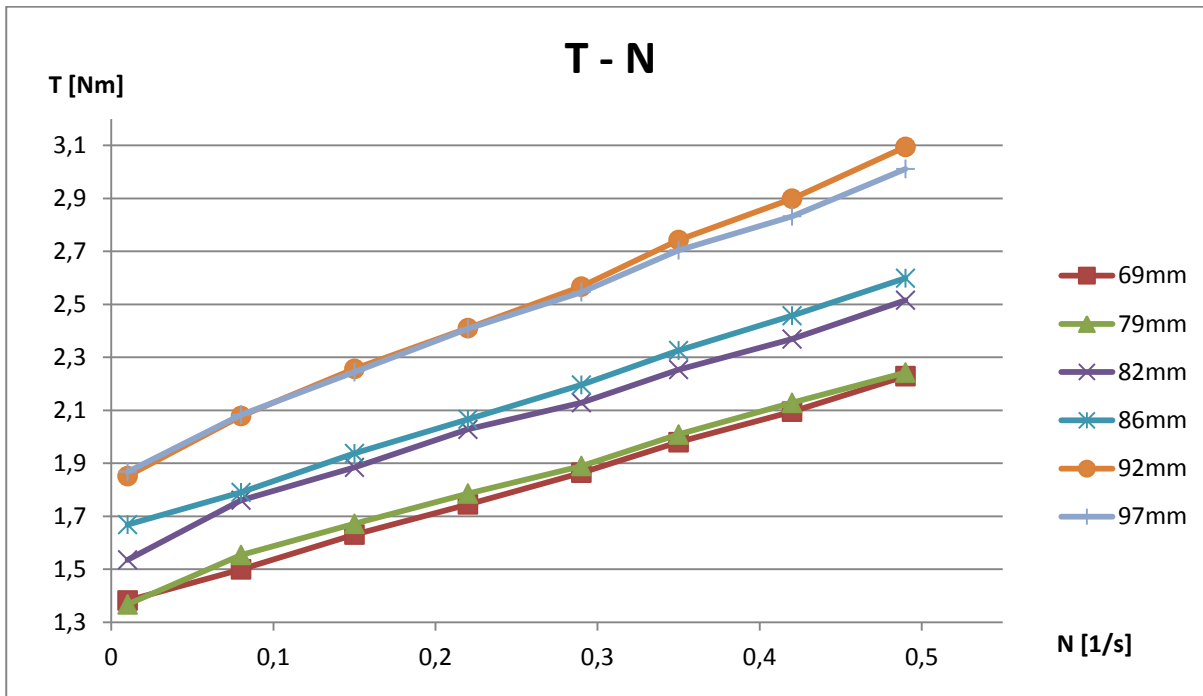


Grafikon 15: Vpliv višine h na strižno trdnost - Malta A



Grafikon 16: Vpliv višine h na plastično viskoznost - Malta A

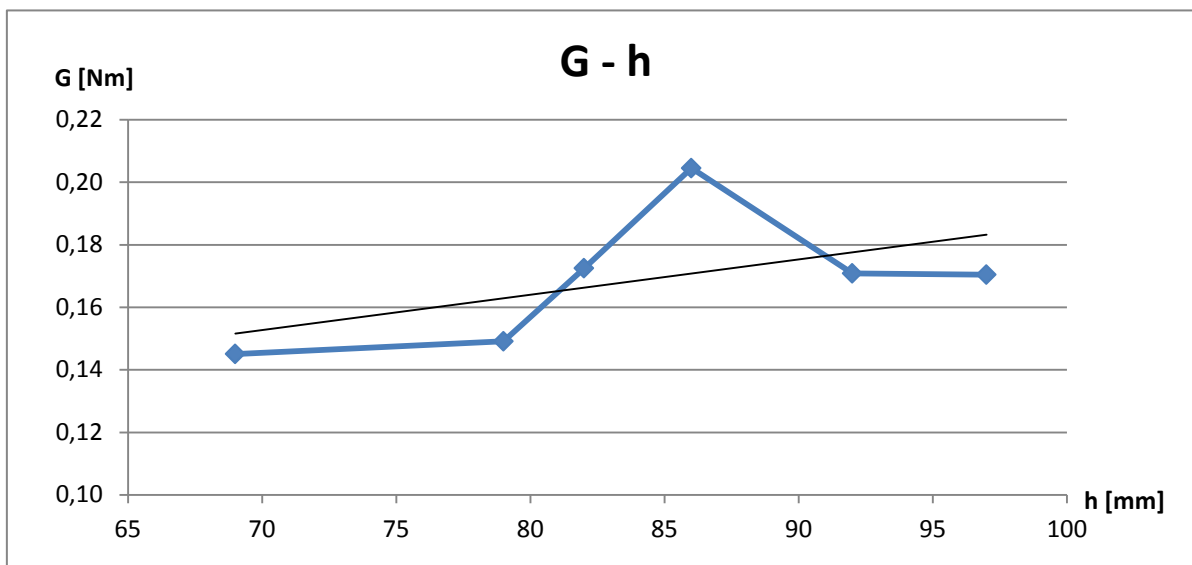
Pri rezultatih v obliki "downward" krivulj smo dobili velikokrat neujemanje posameznih ponovitev meritev, vendar pa so bile same krivulje enakomerno razmaknjene druga od druge, tako da so podale pravilen rezultat (priloga A).



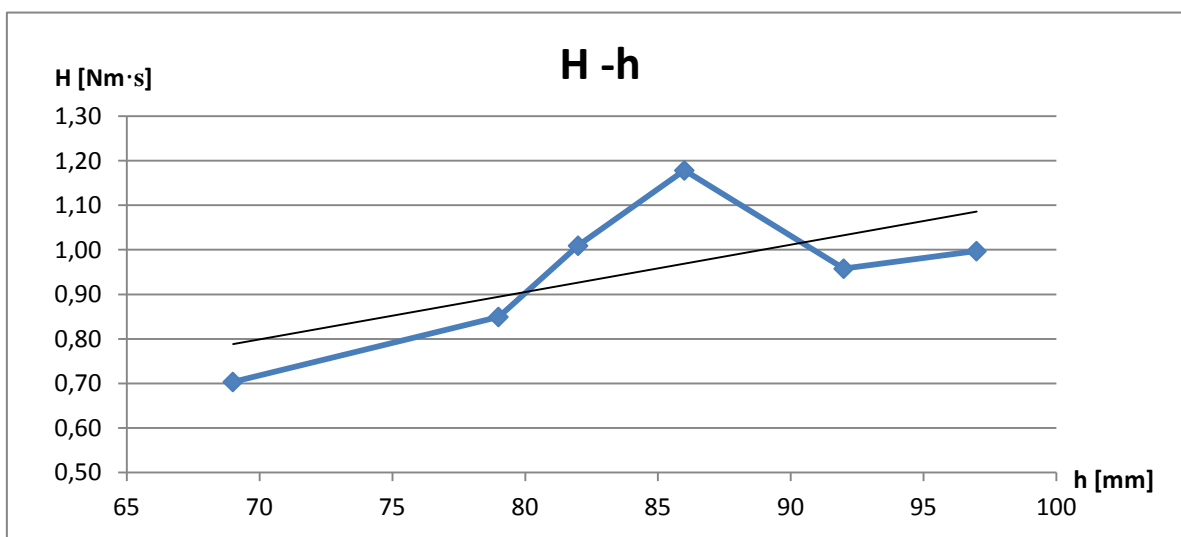
Grafikon 17: Primerjava "downward" krivulj za različne višine – Malta A

6.2 Meritve na malti B

Pri preskušanju z bolj tekočo mešanico bi morala biti merjena parametra G in H manjša kot pri malti A, a se z višino kljub temu višati kar rezultati tudi potrjujejo.



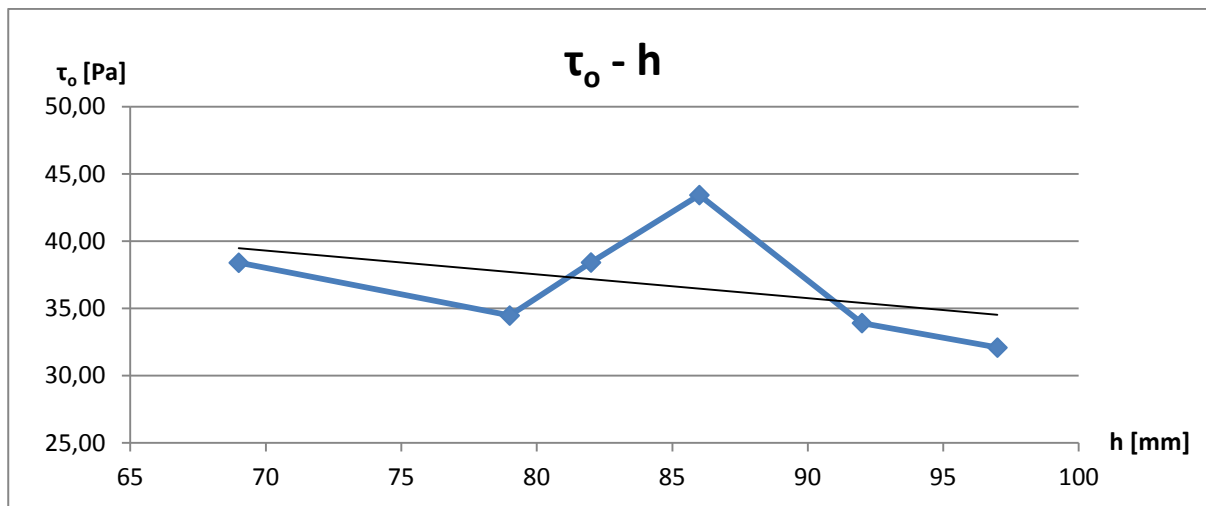
Grafikon 18: Vpliv višine h na parameter G - Malta B



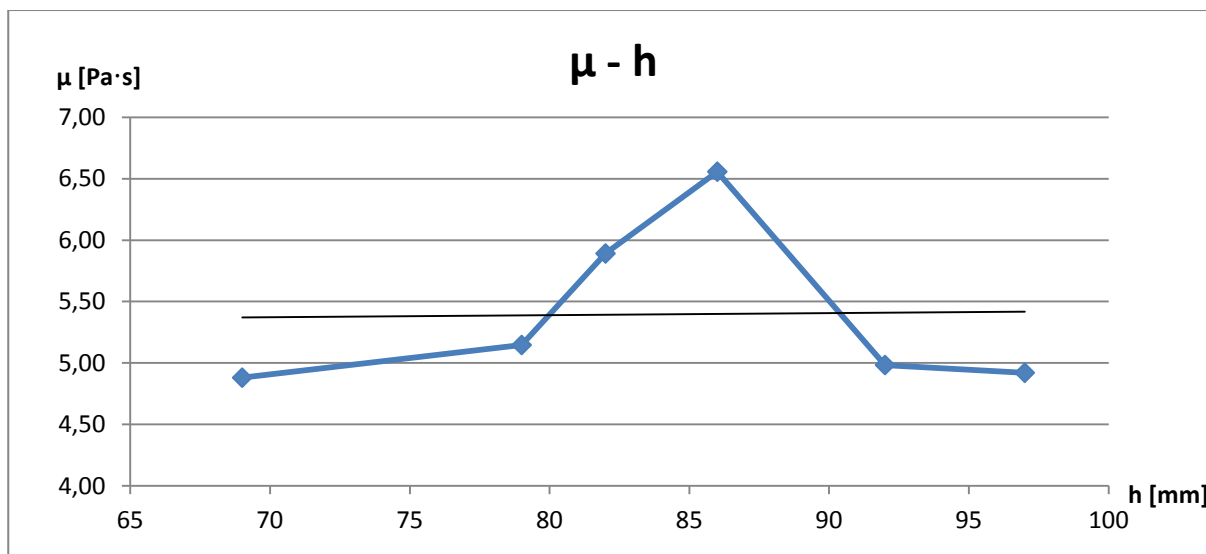
Grafikon 19: Vpliv višine h na parameter H - Malta B

Kot pri meritvah na malti A, so tudi tukaj odstopanja od idealne linije. Vzrok za to je večja sposobnost tečenja malte (manjša viskoznost), kar povzroči, da se same serije meritev pri določeni višini ne ujemajo zaradi manjšega upora malte pri kroženju okrog notranjega valja.

Posledice manjših odstopanj se še bolj pokažejo pri izračunu za napetost na meji tečenja in plastično viskoznost.



Grafikon 20: Vpliv višine h na napetost na meji tečenja - Malta B

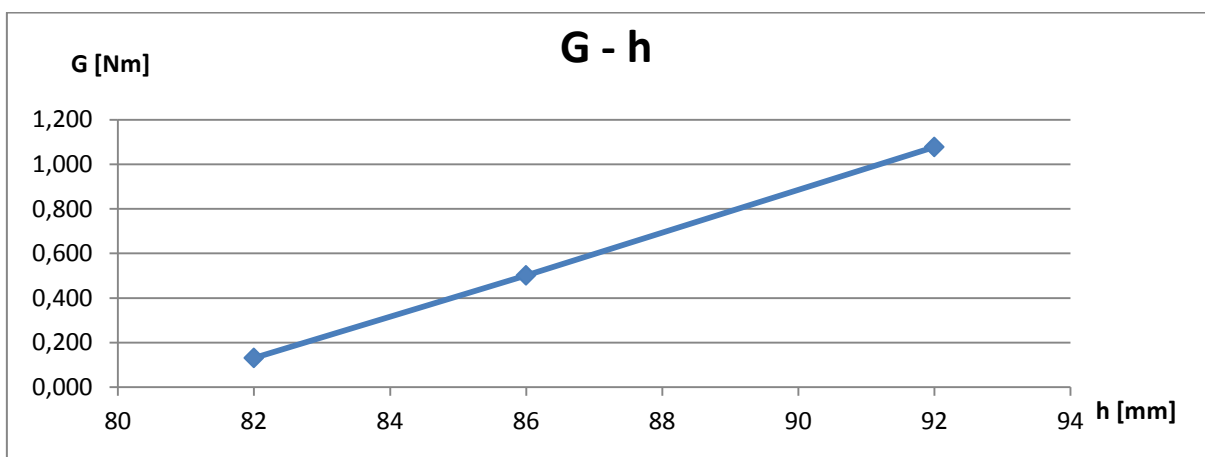


Grafikon 21: Vpliv višine h na plastično viskoznost - Malta B

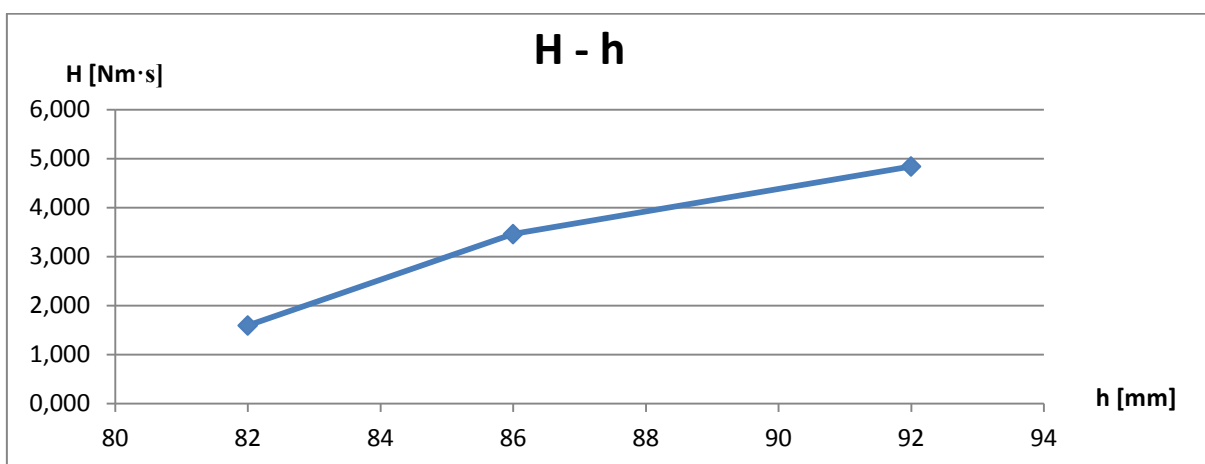
Kot prikazujeta trendni črti na zgornjih dveh grafih, se plastična viskoznost z višino spreminja minimalno. Večji odklon je pri napetosti na meji tečenja, kjer skozi celoten razpon višine h pade za 5 Pa. Pri "downard" krivuljah, za meritve pri posameznih višinah, je prihajalo do manjših odstopanj, prav tako pa krivulje posameznih serij (ponovitev) niso popolnoma ravne (priloga B). Razlog je lahko majhna viskoznost mešanice in/ali občutljivost samega reometra.

6.3 Meritve na malti C

Malta C je bila izbrana z namenom, da se preizkusi mešanica z večjo viskoznostjo. Zaradi predhodnih rezultatov pri malti A in B sem se tukaj odločil da bom naredil preiskave le na višini 82, 86 ter 92 mm. Na diagramu $G - h$ in $H - h$ bi tako morali biti krivulji z večjim naklonom, na diagramu $\tau_o - h$ in $\mu - h$ pa bi morala krivulja biti čim bolj vodoravna.



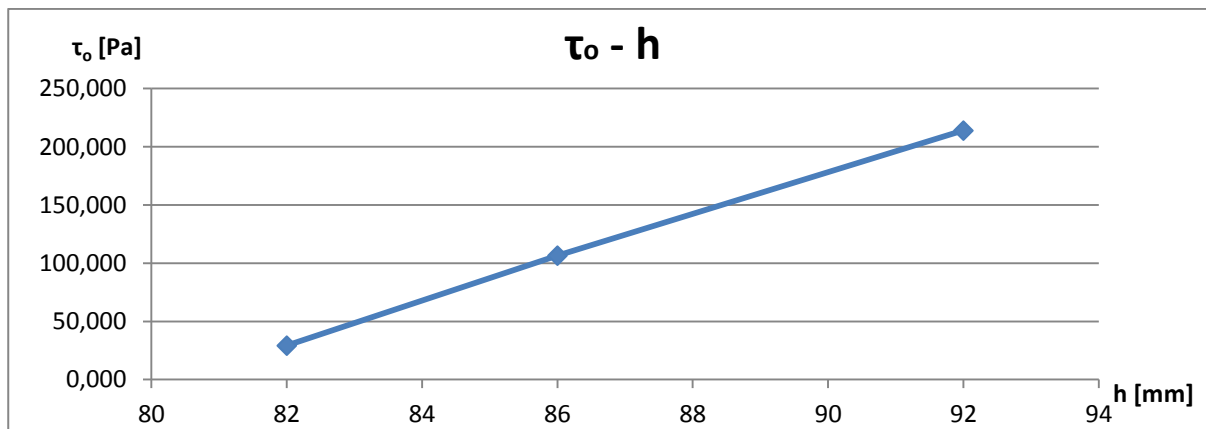
Grafikon 22: Vpliv višine h na G – Malta C



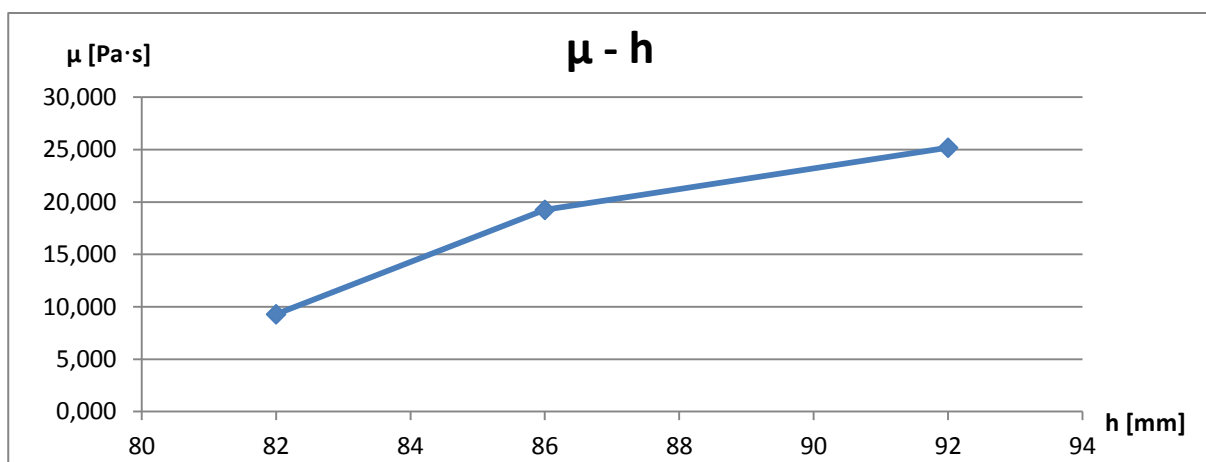
Grafikon 23: Vpliv višine h na H - Malta C

Krivulji na grafu potekata kot pričakovano, a je pri grafu $G - h$ sprememba med prvo in zadnjo točko merjenja zelo velika. Pri 82mm višine notranjega valja je G enak 0,13 Nm, pri višini 97mm pa 1,10Nm. Potreben moment za pričetek rotacije malte, G , se je z zvečanjem višine notranjega valja za 15mm povečal za 850% kar je ogromen skok glede na 118% pri malti A in 112% pri malti B za isto spremembo višine.

Podobne velike spremembe so tudi pri rezultatih za $\tau_o - h$ in $\mu - h$ diagramih, kjer pa premica ne poteka niti približno vodoravno.



Grafikon 24: Vpliv višine h na strižno napetost na meji tečenja – Malta C



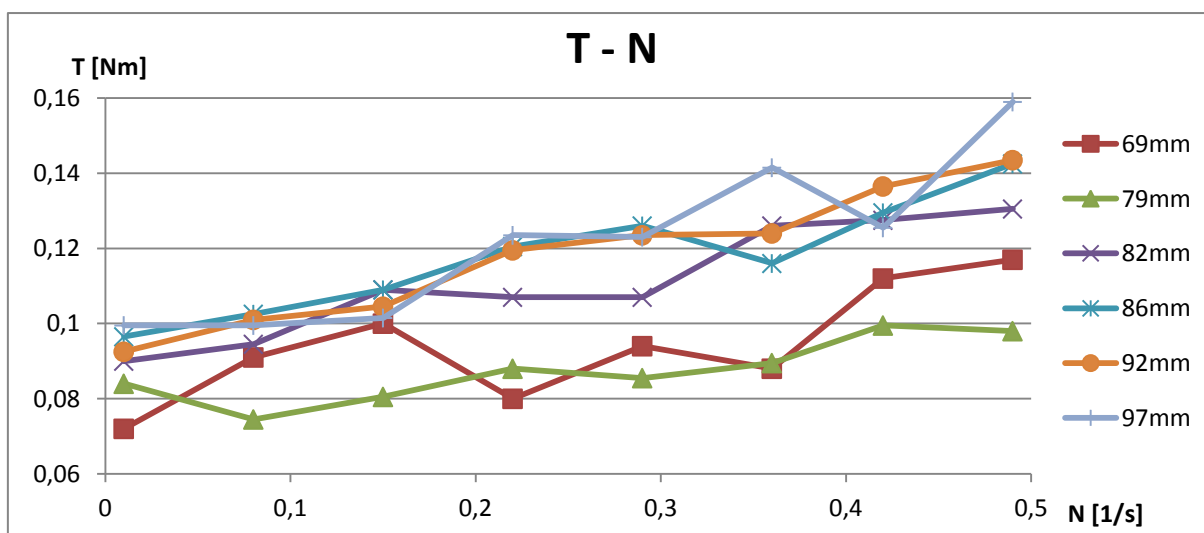
Grafikon 25: Vpliv višine h na plastično viskoznost – Malta C

Vzrokov za takšno odstopanje krivulj od idealne vodoravne lege je lahko več, najbolj pa zagotovo vpliva to, da sem uporabil le tri višine za merjenje v reometru, velik vpliv ima tudi dodatnih 100g vode v maltni mešanici (poglavji 6.5 in 6.7), ki je lahko botrovala k možnemu nastanku t.i. "plug flow" toka materiala. Zaradi teh odstopanj so rezultati pridobljeni z malto C neustrezni, ter jih pri končnem določanju najbolj primerne višine h ne morem uporabiti.

6.4 Meritve z olji

Malte in betoni so po sestavi mešanice vode, cementa in agregata ter dodatkov. Zaradi vseh teh različnih sestavin se agregat v sami mešanici razporedi različno. Na raspored agregata tako vpliva vrsta cementa, dodatki v malti, način in čas mešanja, kasnejša uporaba naprav za lažje vgrajevanje (vibratorji) ter sam agregat (oblika zrn, granulometrijska sestava). Ker je točen raspored agregata po volumnu sveže malte težko določljiv, je za kalibracijo reometrov njihova uporaba vprašljiva. Za namen kalibracij je potreben torej nek material s homogeno strukturo in ki to strukturo obdrži tekom celotnega postopka merjenja v reometru (ni nevarnosti segregacije, izcejanja vode). Kalibracija reometra se tako lahko izvede najenostavneje z olji, katerih viskozne lastnosti so znane. Na podlagi meritev z oljem se določi ali ima reometer pravilno nastavljene vse parametre. Eno izmed uporabljenih olj je bilo navadno olje za industrijsko uporabo (Olje I), drugo pa je bilo silikonsko olje (Olje II).

Olje I je bilo v primerjavi z oljem II zelo tekoče, z majhno viskoznostjo, ter je tako predstavljalo bolj tekočo mešanico malte, medtem ko je olje II predstavljalo bolj viskozno mešanico. Olje I smo testirali na istih višinah kot malto, a z dvema serijama ponovitev. Po evalvaciji rezultatov je bilo potrebno rezultate olja I izvesti, saj so "downward" krivulje za to olje neustrezne, serije krivulj se pri vsaki višini med seboj razlikujejo za prevelika odstopanja (priloga D). Posledično so tudi rezultati za parametra G in H ter τ_o in μ napačni ter neustrezni.



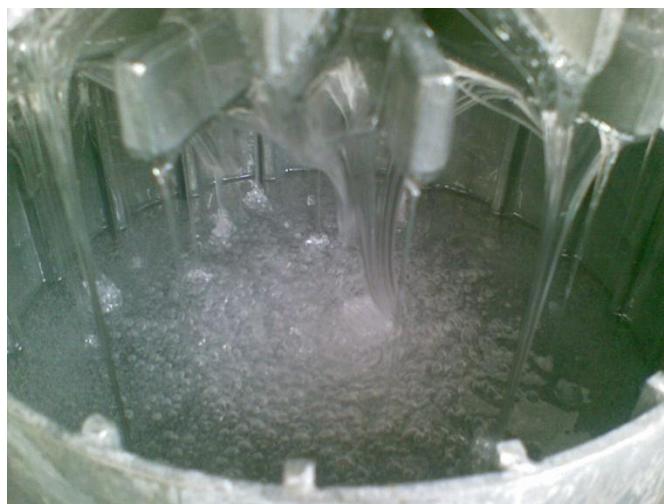
Grafikon 26: Primerjava povprečnih vrednosti serij meritev – Olje I

Olje smo uporabili, ker je homogen material, ki ne bo spreminjal svoje strukture med preizkušanjem v reometru, a se je že med samim vlivanjem olja v posodo (zunanji valj) v samem olju pojavilo mnogo zračnih mehurčkov. Pri olju I teh mehurčkov ni bilo oziroma če se je pojavil kak, je hitro priplaval na površje in tam počil.



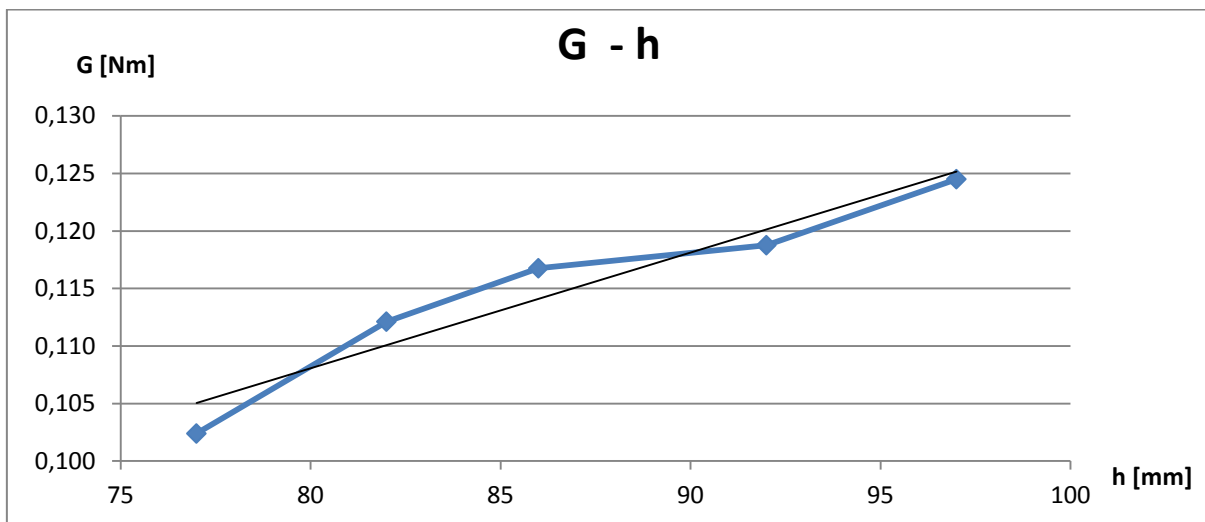
Slika 35: Zračni mehurčki v olju II po vlivanju v zunanji valj

Zaradi večje viskoznosti olja II so mehurčki postali ujeti v samem olju in jih nismo mogli izločiti. Poskusili smo z ročnim mešanjem olja in tresenjem na vibracijski mizici a so mehurčki ostali. Mehurčki so sicer potovali počasi proti površju, a da bi se vsi mehurčki izločili bi potrebovali okrog 24 ur. Prav tako pa so mehurčki vedno znova nastali pri posameznemu dodajanju olja v posodo za izmero viskoznih parametrov pri večji višini, ter ko se je notranji valj dvignil.

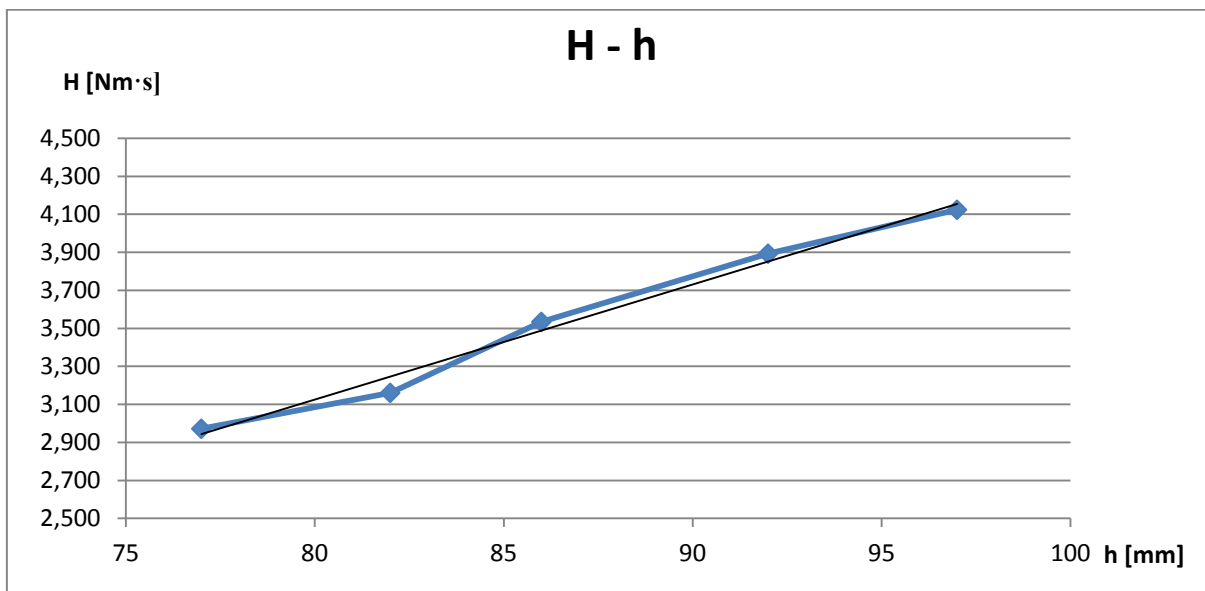


Slika 36: Izcejanje olja II v posodo in nastajanje novih mehurčkov

Ker bi bilo čakanje, da se mehurčki izločijo iz olja med posameznim merjenjem preveč časovno potratno, smo naredili predpostavko, da so mehurčki homogeno razporejeni po celotnem olju in zaradi dovolj velike viskoznosti olja nimajo bistvenega vpliva na samo konsistenco. Da bi čim bolj natančno izmerili viskozne parametre smo pri posamezni višini h naredili po pet serij meritev.

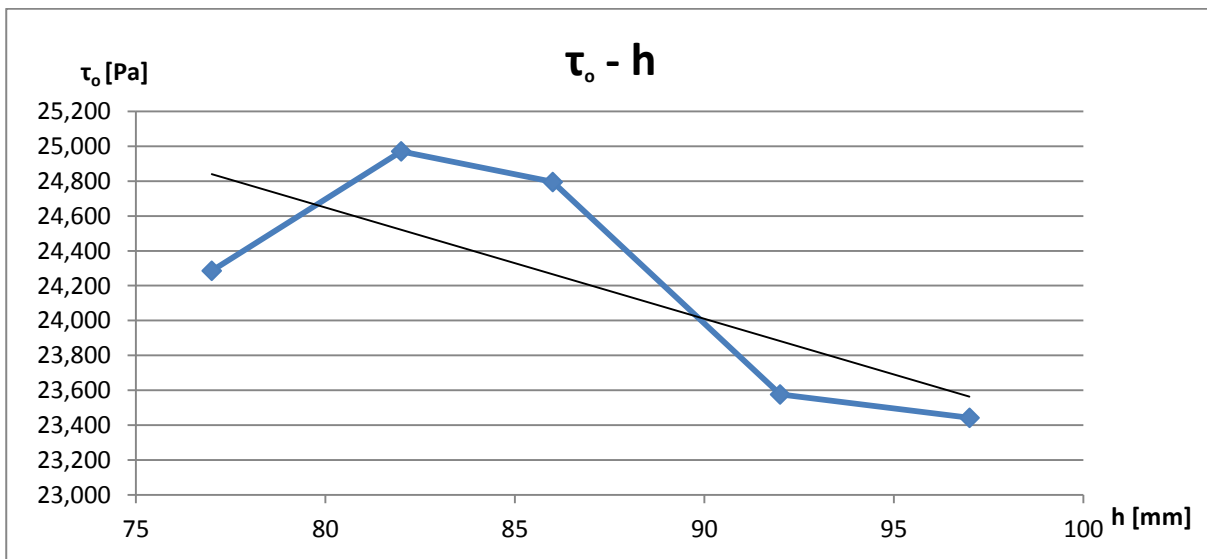


Grafikon 27: Vpliv višine h na parameter G - Olje II

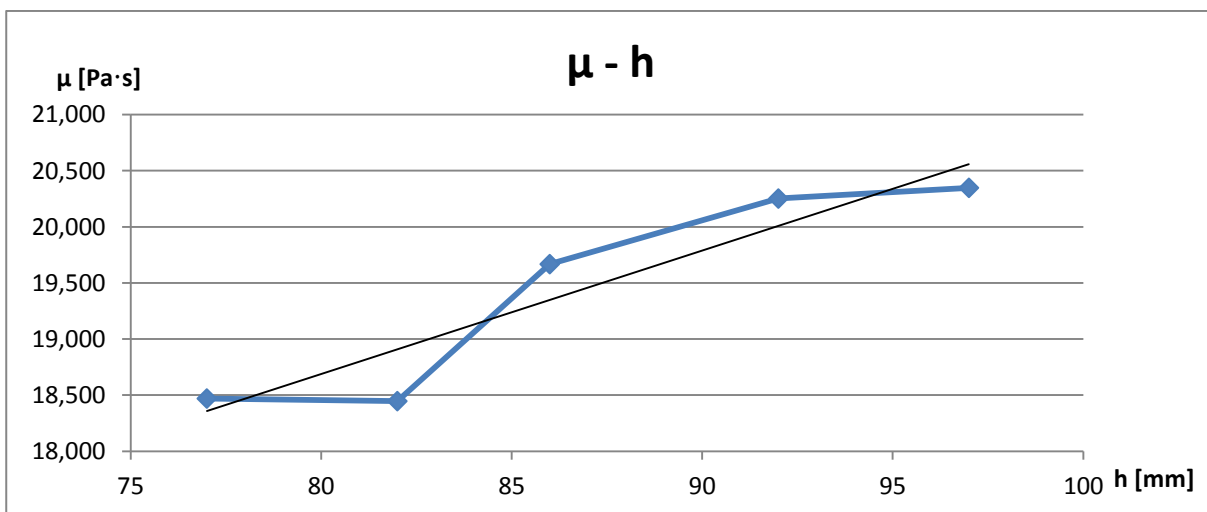


Grafikon 28: Vpliv višine h na parameter H - Olje II

Moment potreben za pričetek gibanja in moment potreben za povečanje hitrosti gibanja se pri olju II povečujeta z višino notranjega valja h , linearno enakomerno. Posamezna odstopanja so minimalna in zanemarljiva, kar potrjuje, da naša predpostavka o vplivu mehurčkov v olju drži, saj se serije ponovljenih meritev za vsako višino (priloga E) med seboj praktično popolnoma prekrivajo, kar poda tudi najbolj natančne rezultate za parametra G in H in posledično τ_o in μ .



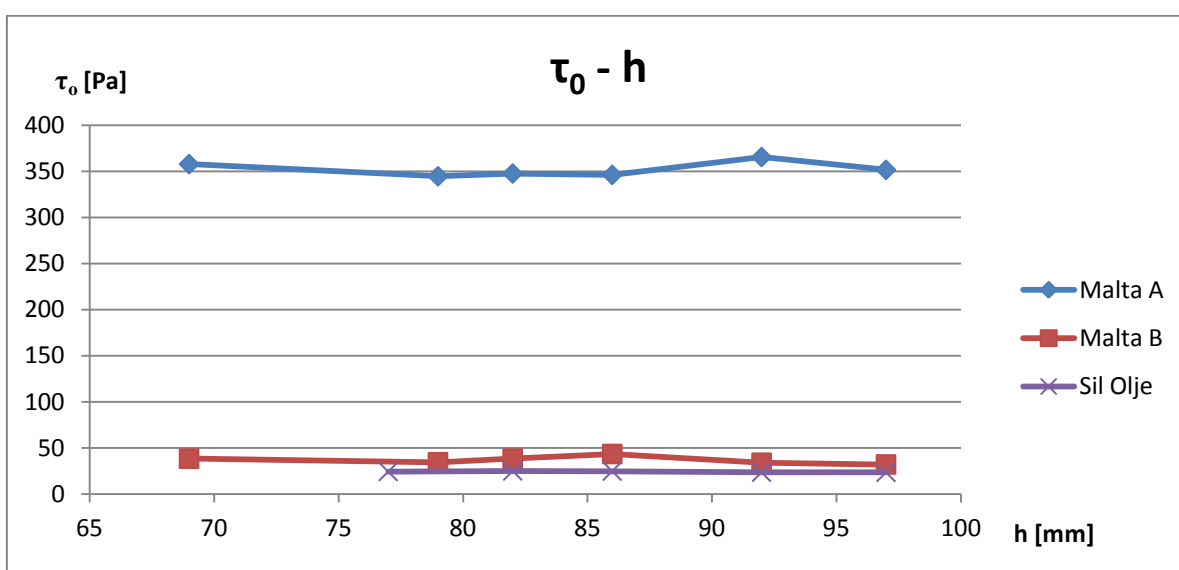
Grafikon 29: Vpliv višine h na napetost na meji tečenja



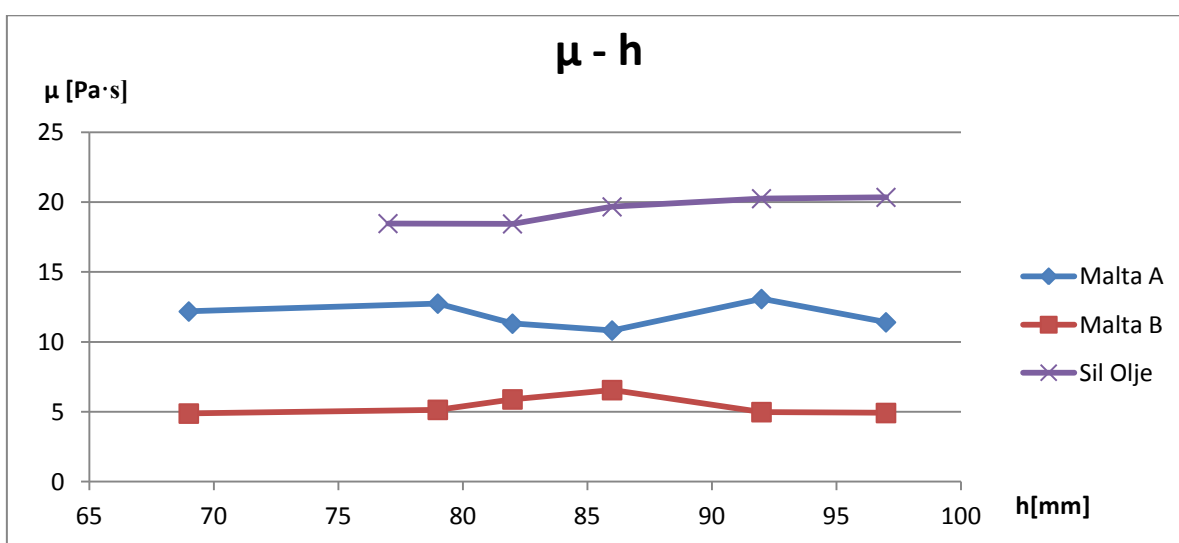
Grafikon 30: Vplivi višine h na plastično viskoznost

7 ZAKLJUČEK

Na podlagi opravljenih raziskav z uporabo reometra smo prišli do rezultatov, ki smo jih lahko primerjali med seboj. Vodoravnost krivulj na grafih, ki prikazujejo vpliv višine na strižno napetost na meji tečenja in plastično viskoznost se najbolje prikaže s primerjavo rezultatov malt in olj, ki smo jih preskusili z reometrom v okviru te diplomske naloge. Vodoravnost krivulje dokazuje, da reološka parametra nista odvisna od višine notranjega valja.



Grafikon 31: Primerjava strižne trdnosti v odvisnosti od višine



Grafikon 32: Primerjava plastične viskoznosti v odvisnosti od višine

Da je omogočena sledljivost rezultatov preiskav z reometrom ter da se lažje primerja rezultate različnih meritev, je najboljšo, da se vse raziskave dela pri isti višini notranjega valja. Na grafikonih vpliva višine na parametra G in H se vidi, da se pri višini 80 oziroma 90 mm krivulje malt in olja najbolj ujemajo z idealno linijo (trendna črta) ter da so tudi serije na diagramih $T - N$ najbolj linearne in imajo med seboj malo odstopanja. Najprimernejša višina notranjega valja za uporabo v nadaljnje raziskave bi tako bila **$h = 80 \text{ mm}$** .

VIRI

Beltram, L. 2007. Učinek različnih polimernih dodatkov na lastnosti sanacijskih malt. Diplomaska naloga. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo: 62 str.

Golob, D. 2007. Vpliv vrste polimerne disperzije na mehanske in fizikalne lastnosti sanacijskih malt in betonov. Diplomaska naloga. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Komunalna smer: 71 str.

Mešiček, K. 2011. Ocena stabilnosti svežih malt z metodo električne prevodnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana. Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 82 str.

Ingham, J. 2011. Geomaterials under the microscope. London, Manson Publishing: 192 str.

Wallevik, O. 2009. Introduction to Rheology of Fresh Concrete. Reykyavik, Innovation center of Iceland: 181 str.

Žarnič, R., Bosiljkov V., Bokan-Bosiljkov V. 2010. Građiva vaje. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.

Žarnič, R. 2005. Lastnosti građiv. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preiskušanje materialov in konstrukcij: 351 str.

Bosiljkov, V., Žarnič, R. Vpliv modificiranih malt na obnašanje tlačno obremenjenih zidkov. V: Saje F., Lopatič, J. (ur.). Zbornik 19. zborovanja građbenih konstrukterjev Slovenije. Bled, 16. – 17. oktober 1997. Ljubljana, Slovensko društvo građbenih konstrukterjev: str: 341–349.

Bokan-Bosiljkov, V., Bosiljkov, V., Žarnič, R. Trdnost stika med malto in zidakom – študij vplivnih parametrov. V: Saje F., Lopatič, J. (ur.). Zbornik 19. zborovanja građbenih konstrukterjev Slovenije. Bled, 16. – 17. oktober 1997. Ljubljana, Slovensko društvo građbenih konstrukterjev: str: 333–341.

Hočevar, A., Bokan-Bosiljkov, V., Kavčič, F. Uporabna vrednosti meritev reoloških lastnosti svežega betona. Zbornik referatov / Konferenca beton 21. stoletja. Lipica, marec 2010. Ljubljana, Svet strokovnjakov Združenja za beton Slovenije: str: 95-104

Škerget, L. 1994. Mehanika tekočin. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 337 str.

Darrigol, O. 2005. Worlds of flow: A history of hydrodynamics from the Bernoullis do Prandtl. New York, Oxford University Press: 328 str.

Middleman, S. 1968. The Flow of High Polymers. New York, University of Rochester, Chemical Engineering Department: 237 str.

Gradbeni materiali. Delovni zvezek. 2. del.

SIST EN 197-1: 2001. Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente: 24 str.

SIST EN 13395-2: 2002. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Določevanje obdelavnosti – 2.del: Preskus tečenja zalivne mase ali malte.

SIST EN 206-1:2003. Beton – 1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

SIST EN 196-1:2005. Metode preskušanja cementa - 1. del: Določanje trdnosti

Spletni viri

Antična malta

<http://katachriston.wordpress.com/2011/09/16/was-the-tower-of-babel-a-ziggurat/> (10.7.2012)

Černilogar, L. dec. 2010. Dodatki za beton, Gradbenik, str. 100-104.

http://www.tkk.si/filelib/prakticni_nasveti/clanki/gr_12_2010_tkk.pdf (10.7.2012)

PRILOGE

Priloga A - "Downward" krivulje za različne višine z malto A

Priloga B - "Downward" krivulje za različne višine z malto B

Priloga C - "Downward" krivulje za različne višine z malto C

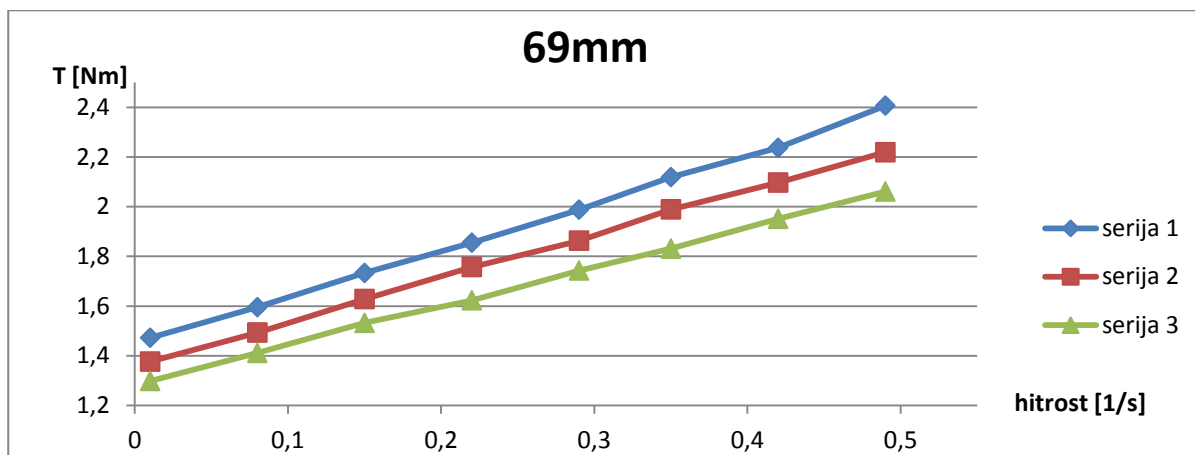
Priloga D - "Downward" krivulje za različne višine z oljem I

Priloga E - "Downward" krivulje za različne višine z oljem II

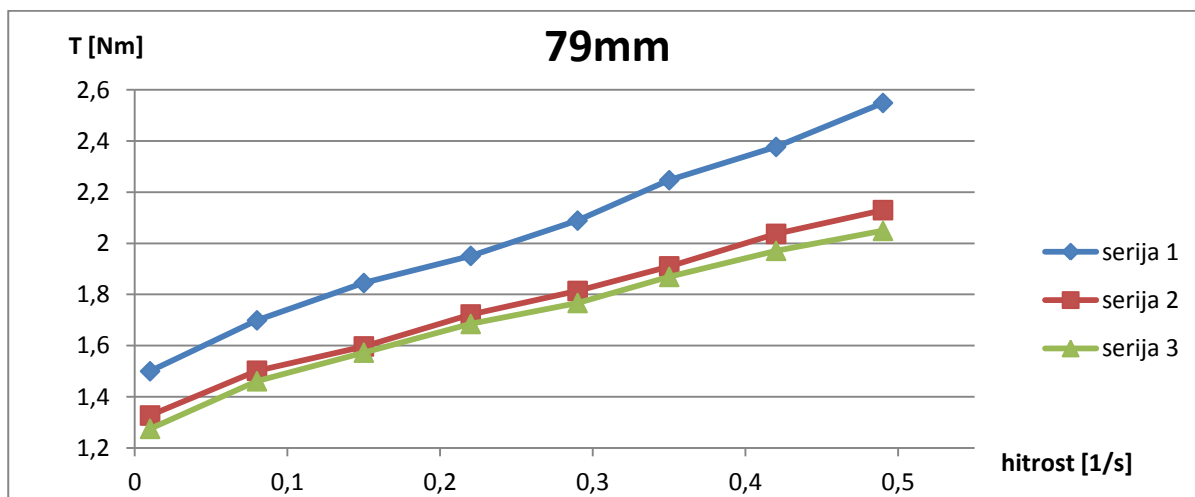
Priloga F - "Downward" krivulje za različno količino dodatka HP

Priloga G - "Downward" krivulje za različno količino dodatka VMA

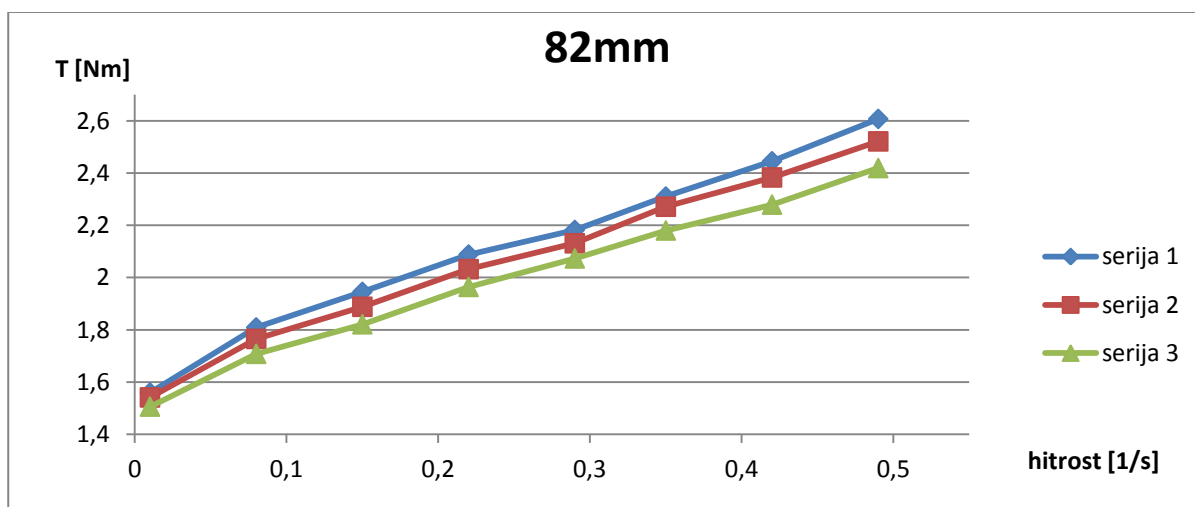
PRILOGA A – "Downward" krivulje za različne višine z malto A



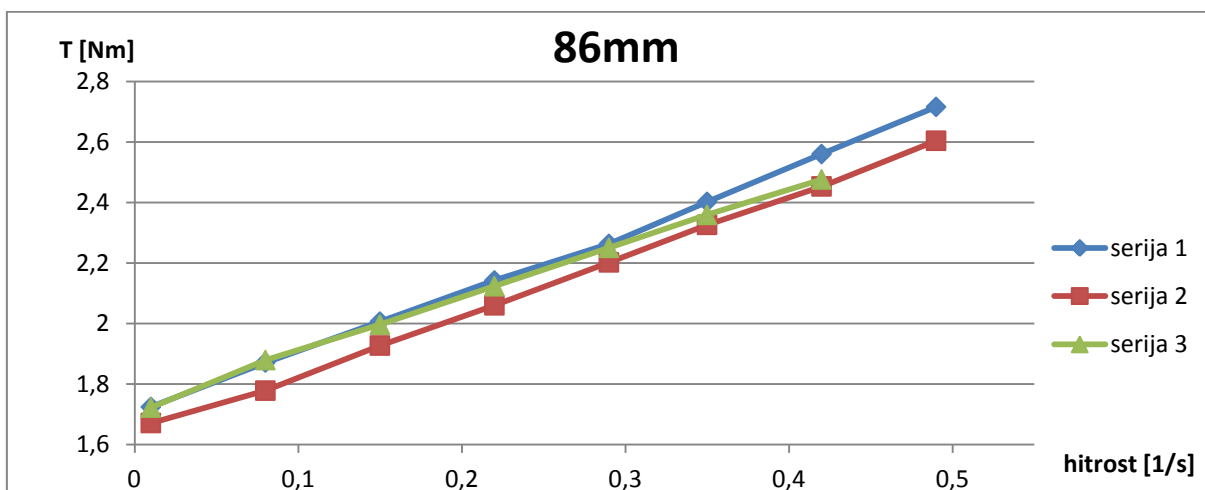
a) "Downward" krivulja za serije pri $h = 69\text{mm}$ - Malta A



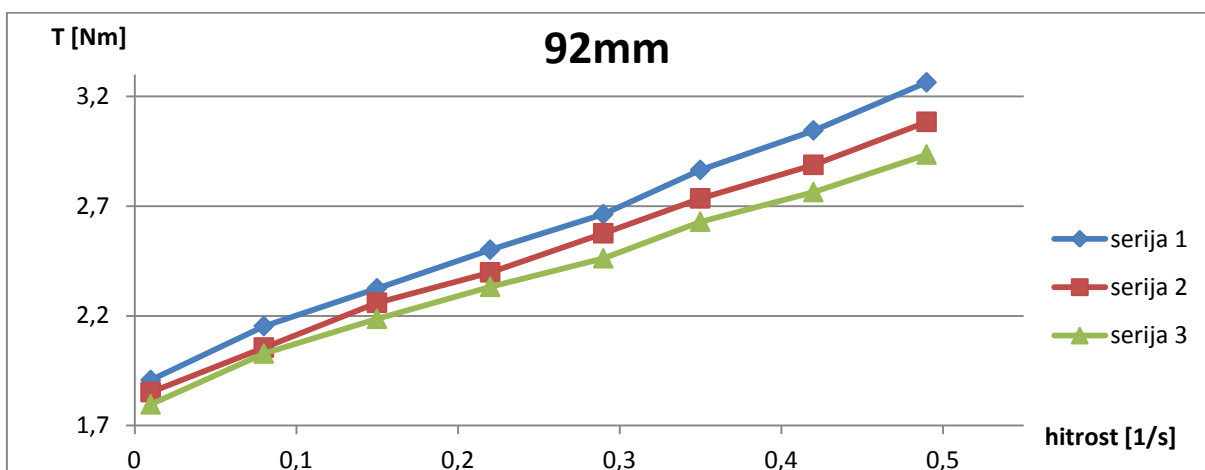
b) "Downward" krivulja za serije pri $h = 79\text{mm}$ - Malta A



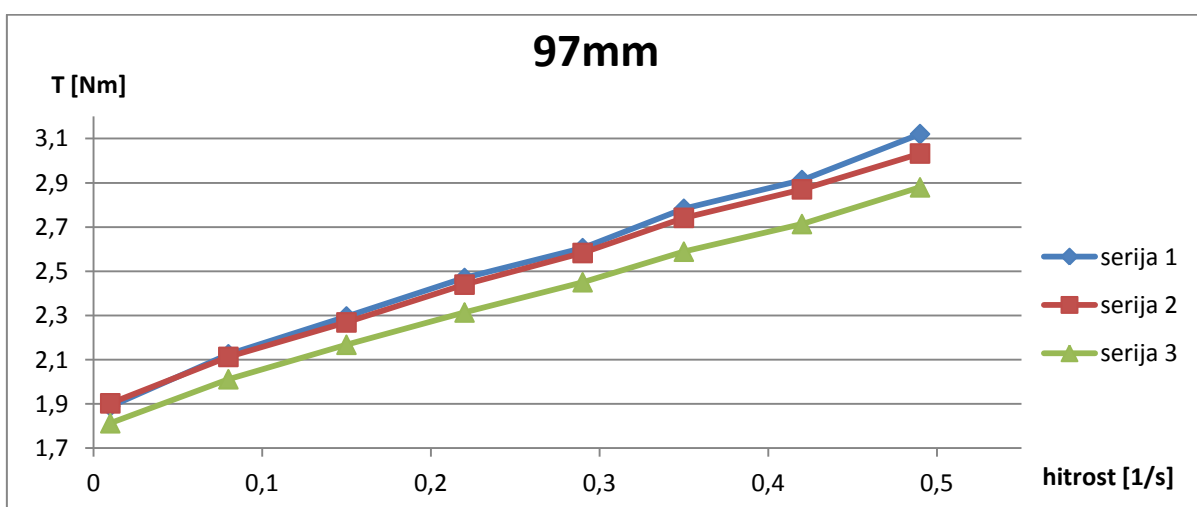
c) "Downward" krivulja za serije pri $h = 82\text{mm}$ - Malta A



d) "Downward" krivulja za serije pri $h = 86\text{mm}$ - Malta A

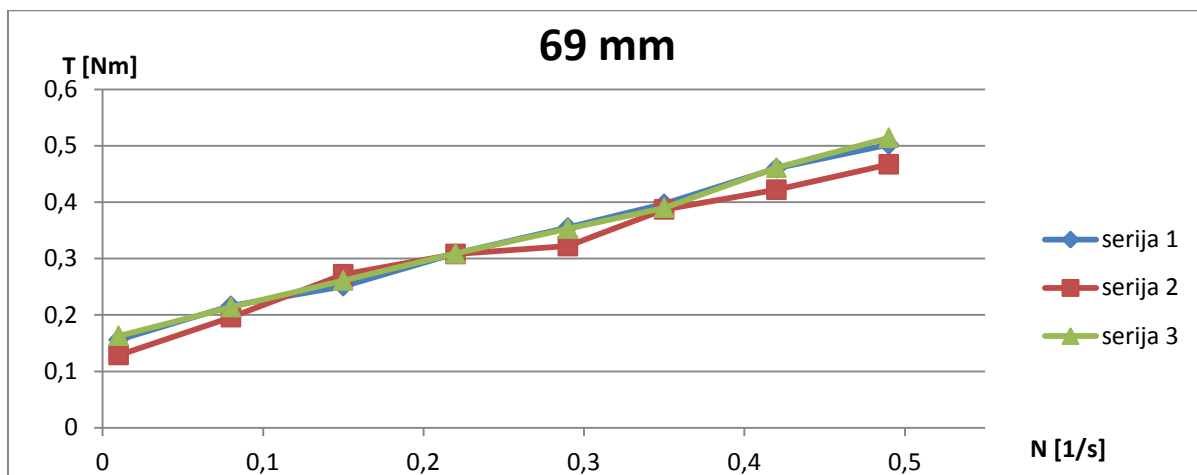


e) "Downward" krivulja za serije pri $h = 92\text{mm}$ - Malta A

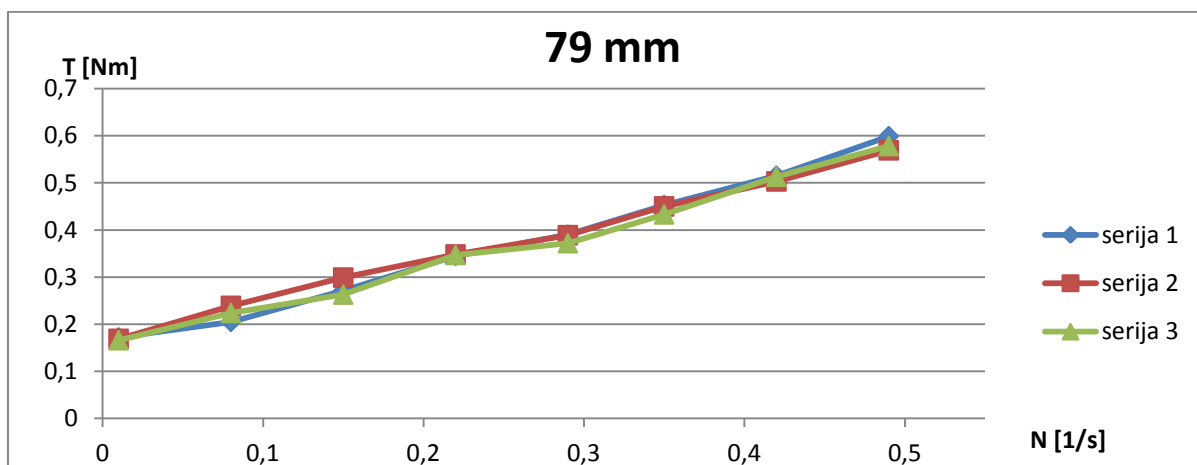


f) "Downward" krivulja za serije pri $h = 82\text{mm}$ - Malta A

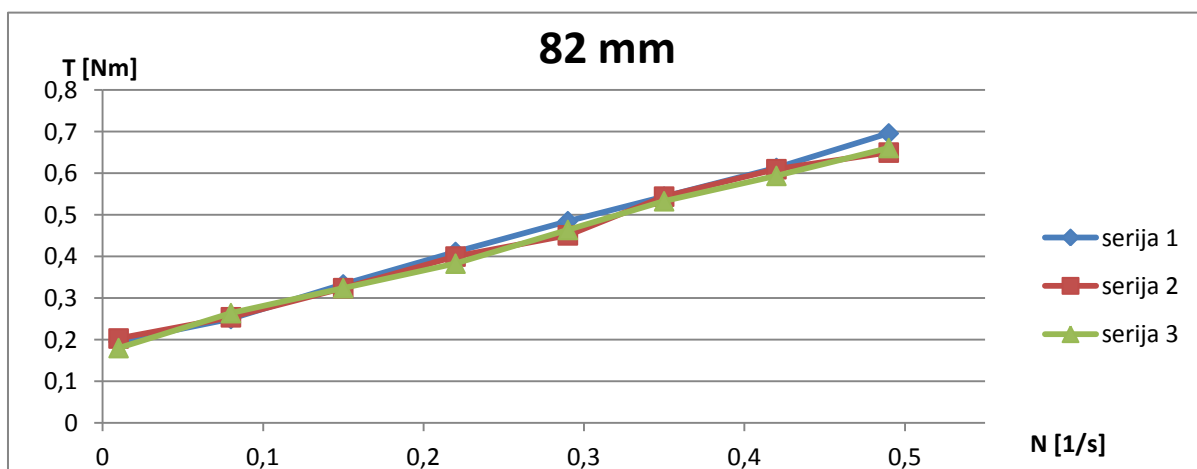
PRILOGA B – "Downward" krivulje za različne višine z malto B



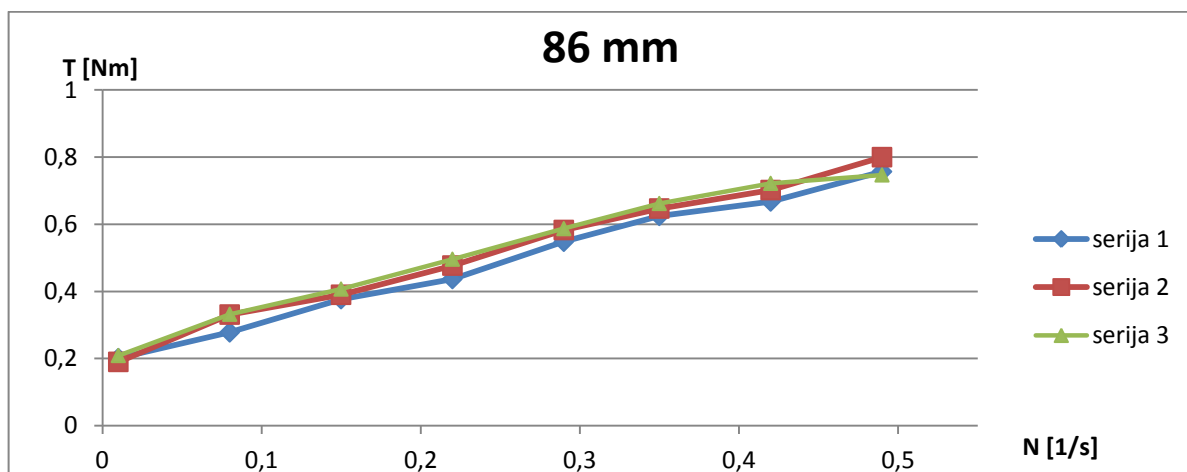
a) "Downward" krivulja za serije pri $h = 69\text{mm}$ - Malta B



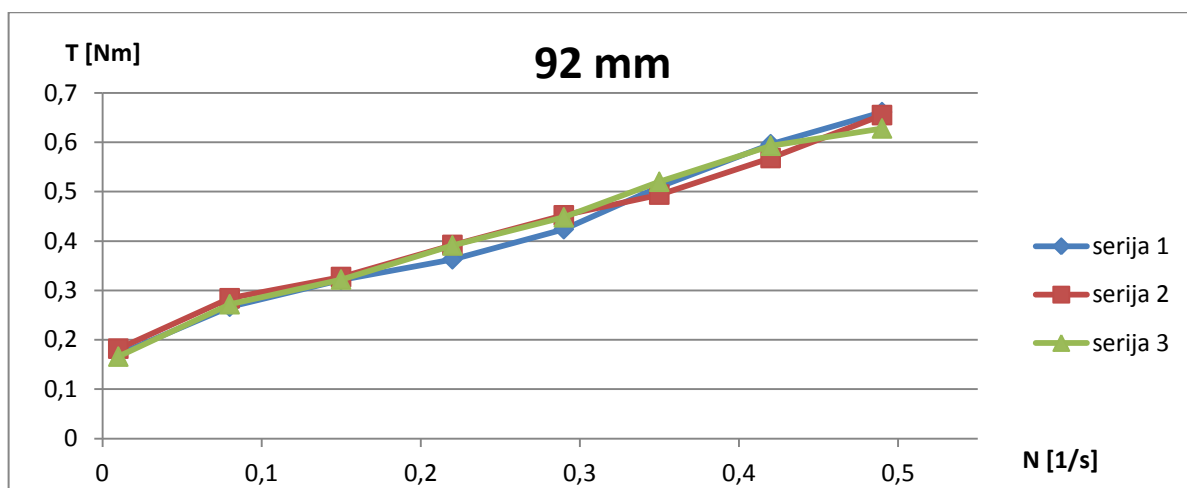
b) "Downward" krivulja za serije pri $h = 79\text{mm}$ - Malta B



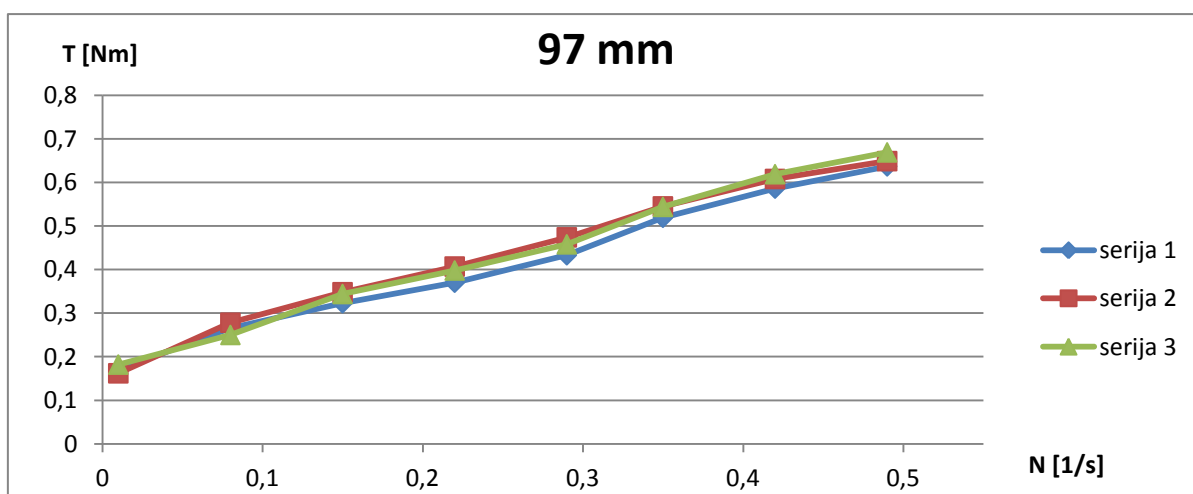
c) "Downward" krivulja za serije pri $h = 82\text{mm}$ - Malta B



d) "Downward" krivulja za serije pri $h = 86\text{mm}$ - Malta B

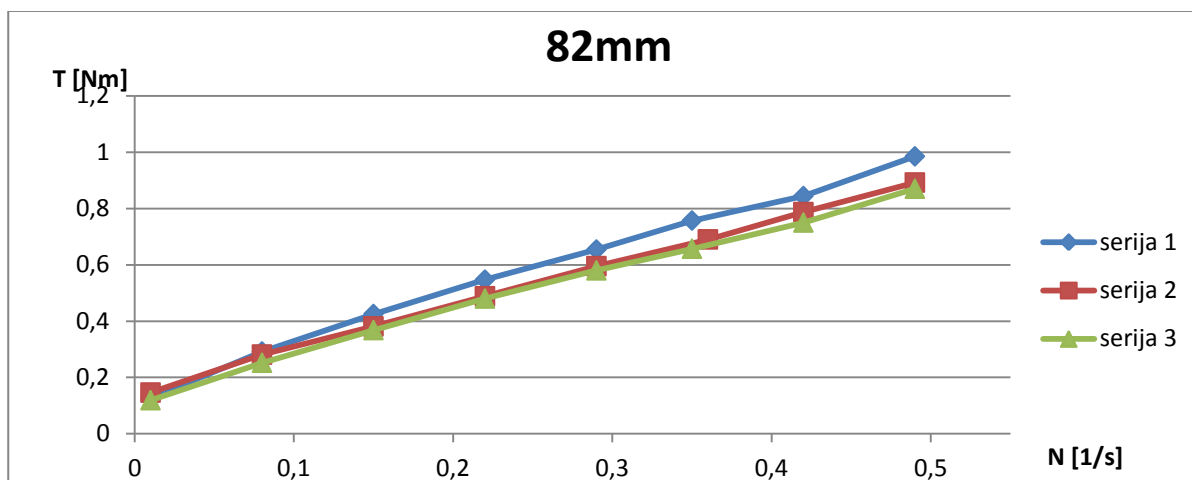


e) "Downward" krivulja za serije pri $h = 92\text{mm}$ - Malta B

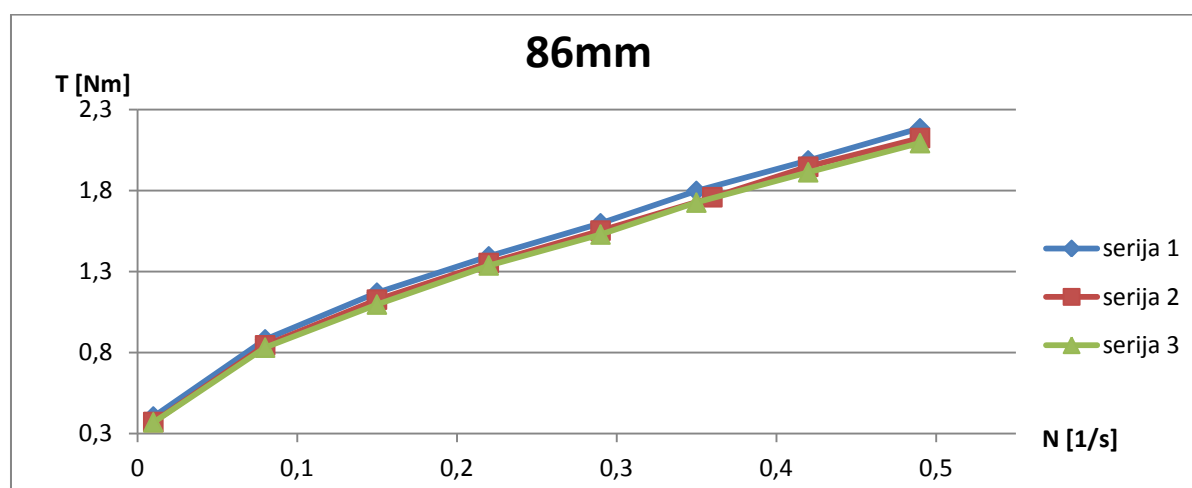


f) "Downward" krivulja za serije pri $h = 97\text{mm}$ - Malta B

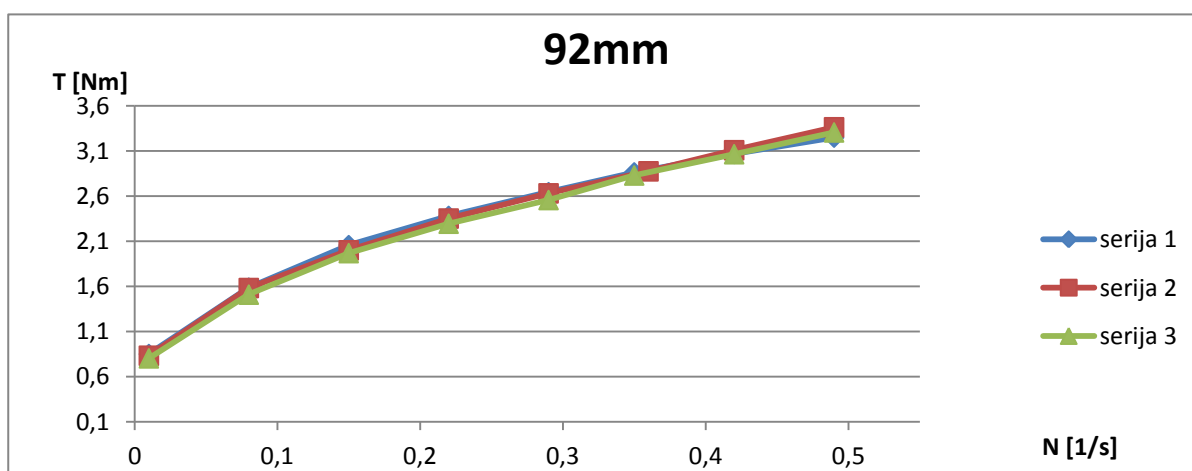
PRILOGA C - "Downward" krivulje za različne višine z malto C



a) "Downward" krivulja za serije pri $h = 82\text{mm}$ - Malta C

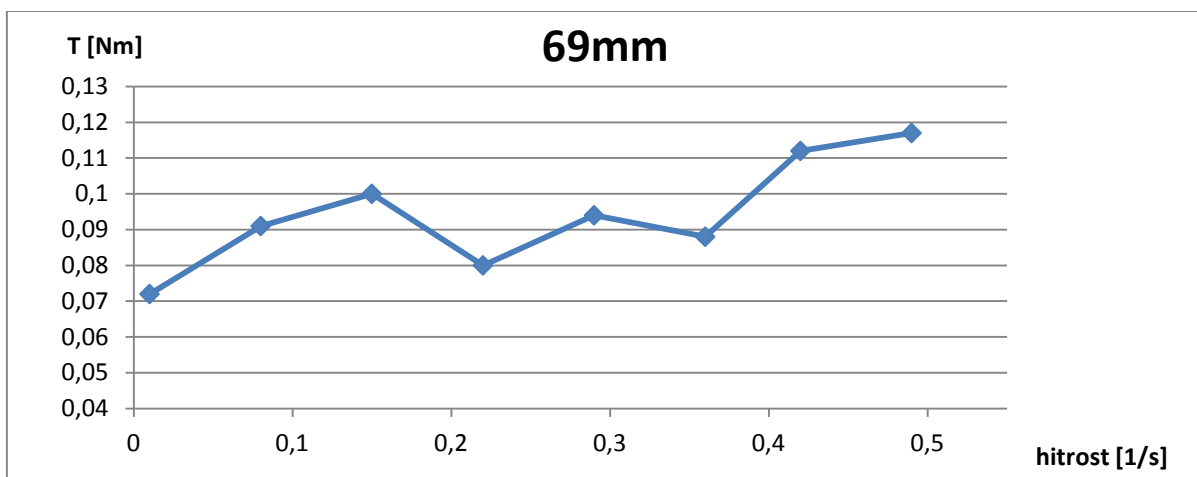


b) "Downward" krivulja za serije pri $h = 86\text{mm}$ - Malta B

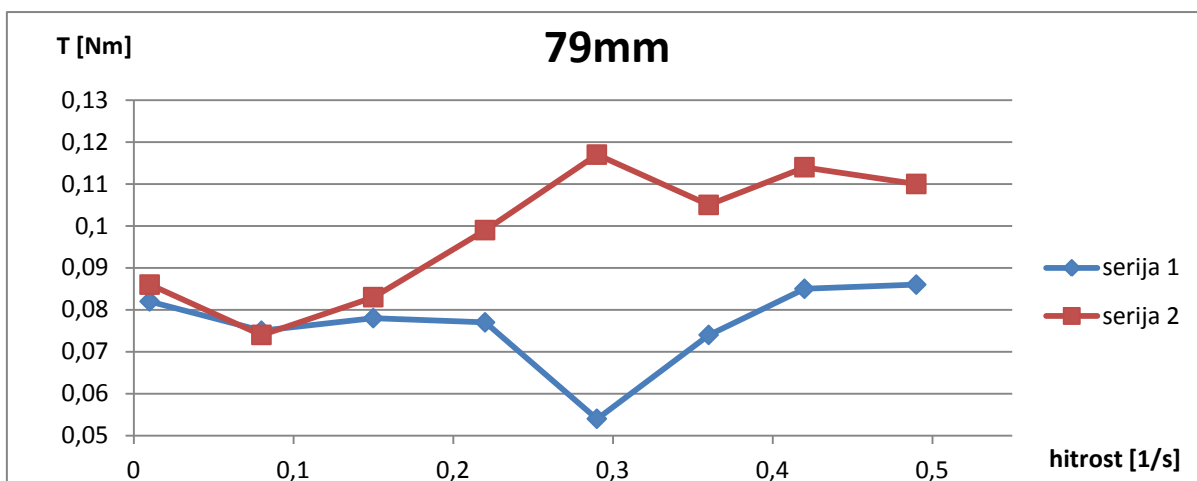


c) "Downward" krivulja za serije pri $h = 92\text{mm}$ - Malta C

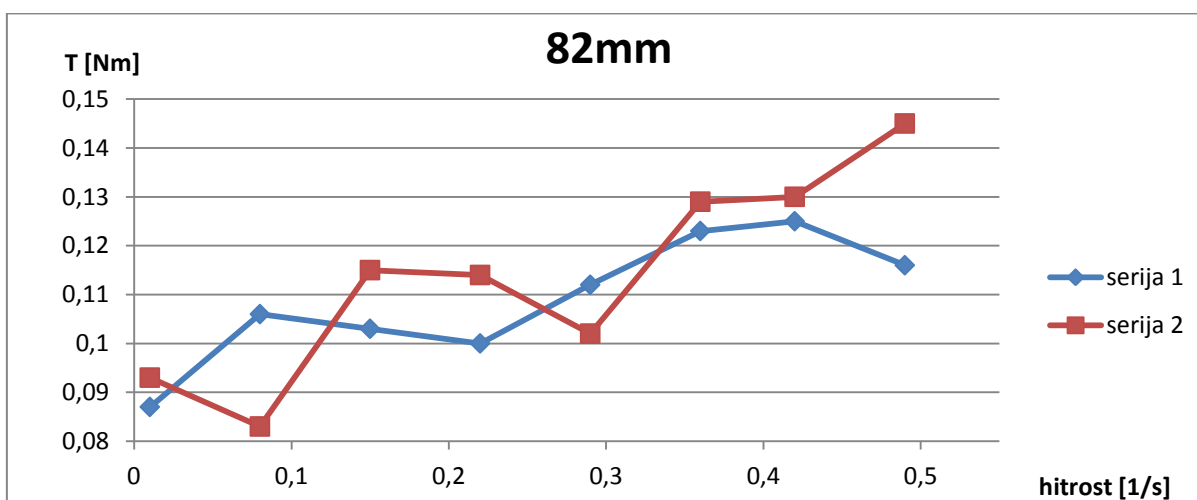
PRILOGA D - "Downward" krivulje za različne višine z oljem I



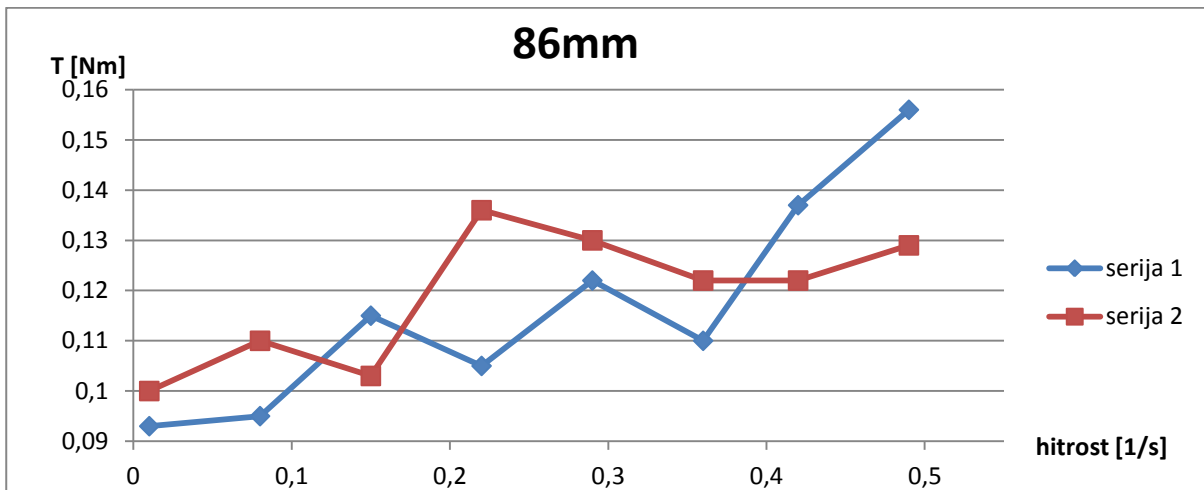
a) "Downward" krivulja za serijo pri $h = 69\text{mm}$ – Olje I



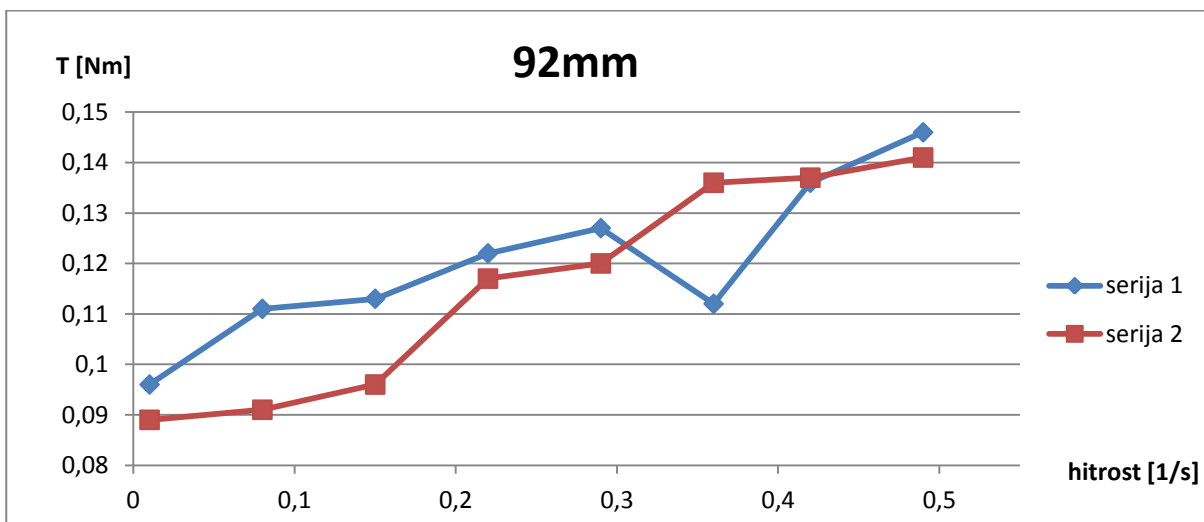
b) "Downward" krivulja za seriji pri $h = 79\text{mm}$ – Olje I



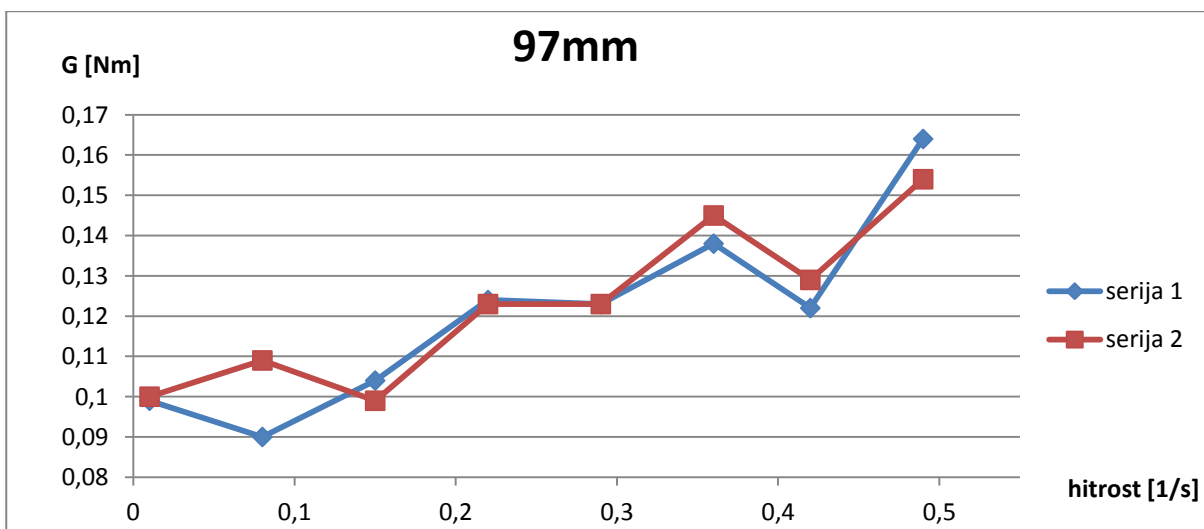
c) "Downward" krivulja za seriji pri $h = 82\text{mm}$ – Olje I



d) "Downward" krivulja za seriji pri $h = 86\text{mm}$ – Olje I

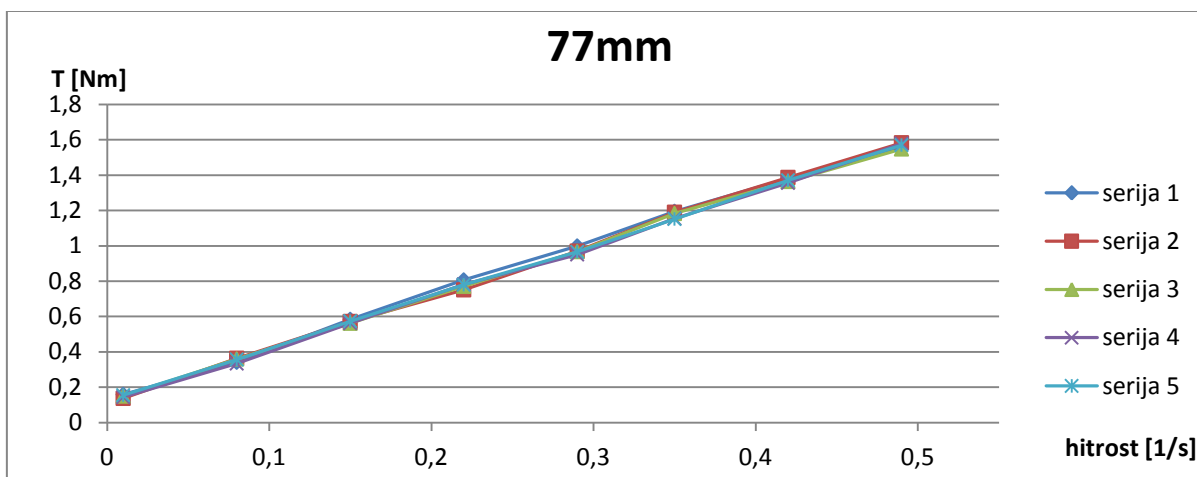


e) "Downward" krivulja za seriji pri $h = 92\text{mm}$ – Olje I

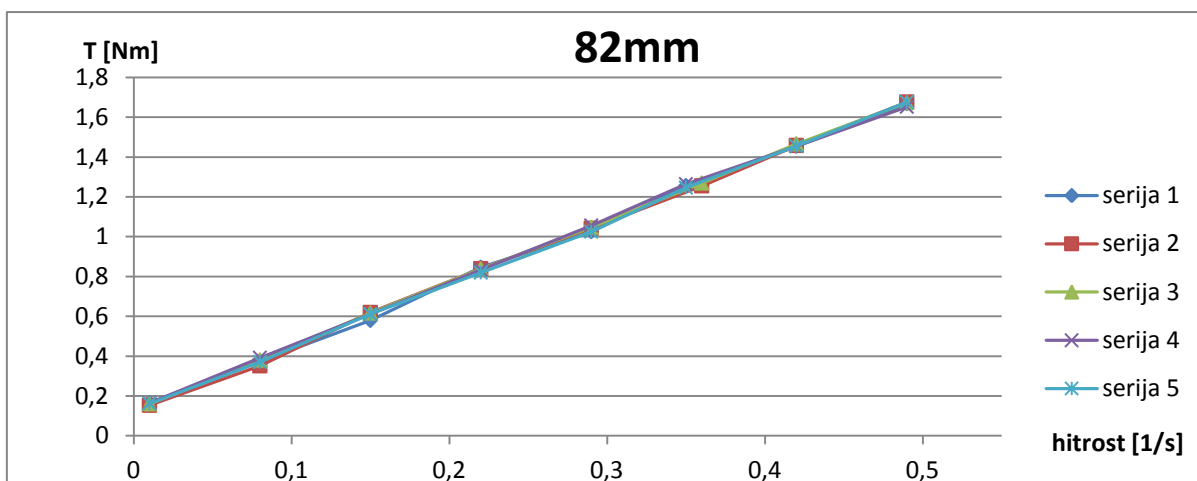


f) "Downward" krivulja za seriji pri $h = 97\text{mm}$ – Olje I

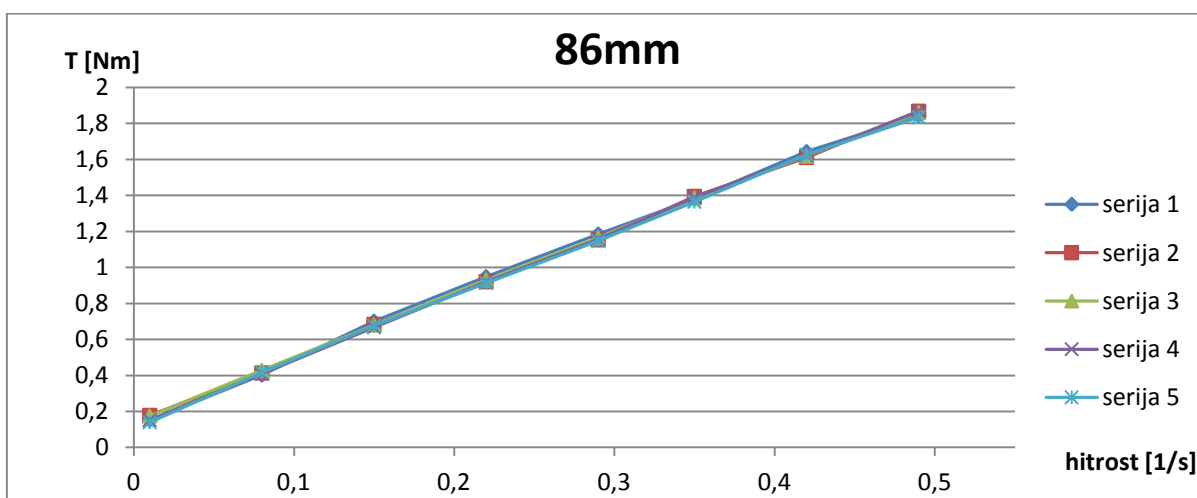
PRILOGA E - "Downward" krivulje za različne višine z oljem II



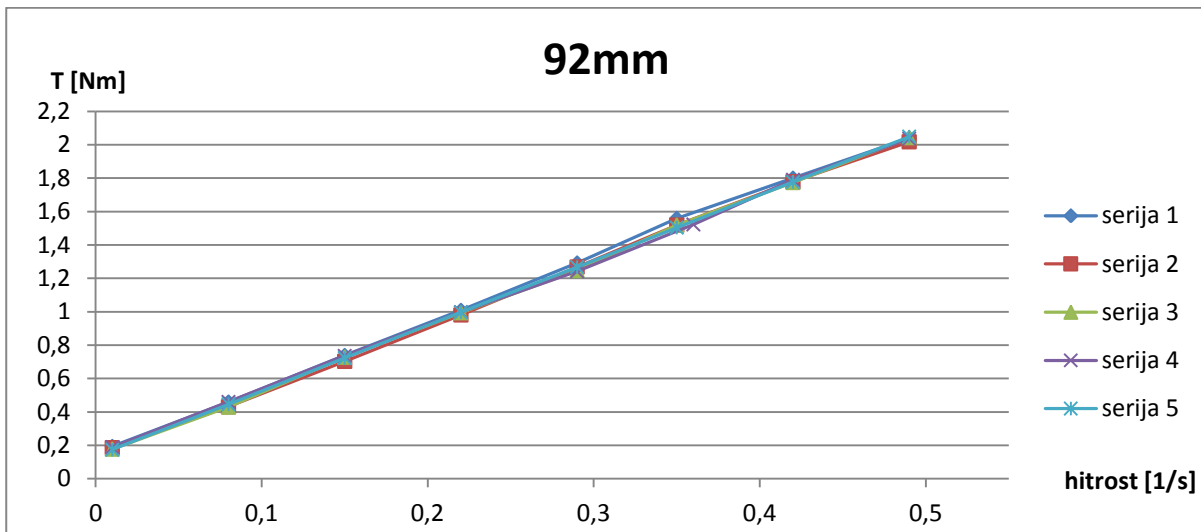
a) "Downward" krivulja za serijo pri $h = 77\text{mm}$ – Olje II



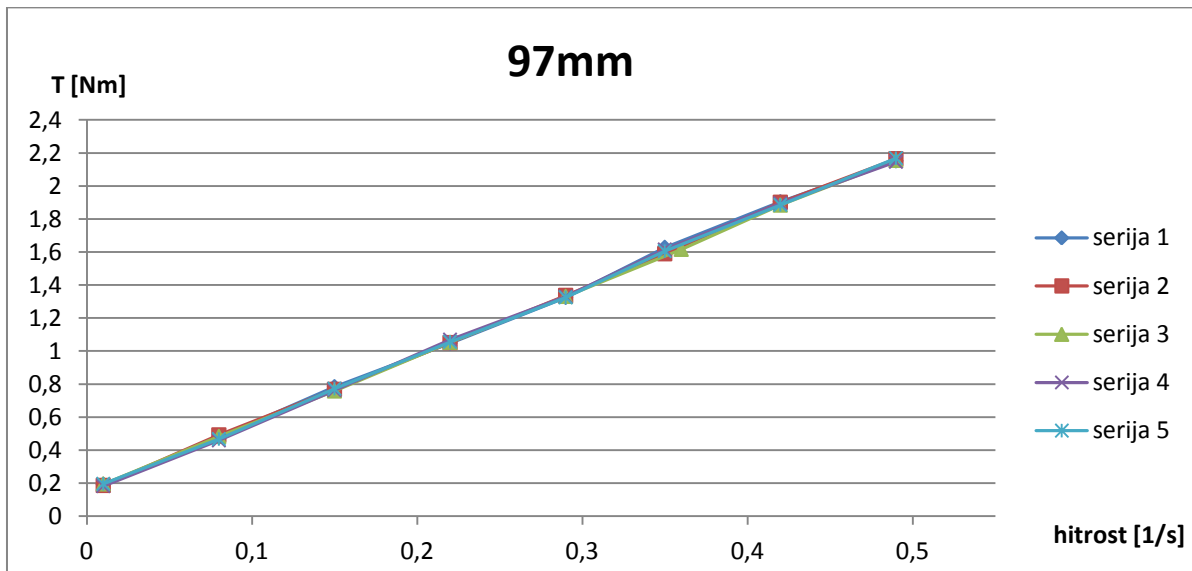
b) "Downward" krivulja za seriji pri $h = 82\text{mm}$ – Olje II



c) "Downward" krivulja za seriji pri $h = 86\text{mm}$ – Olje II

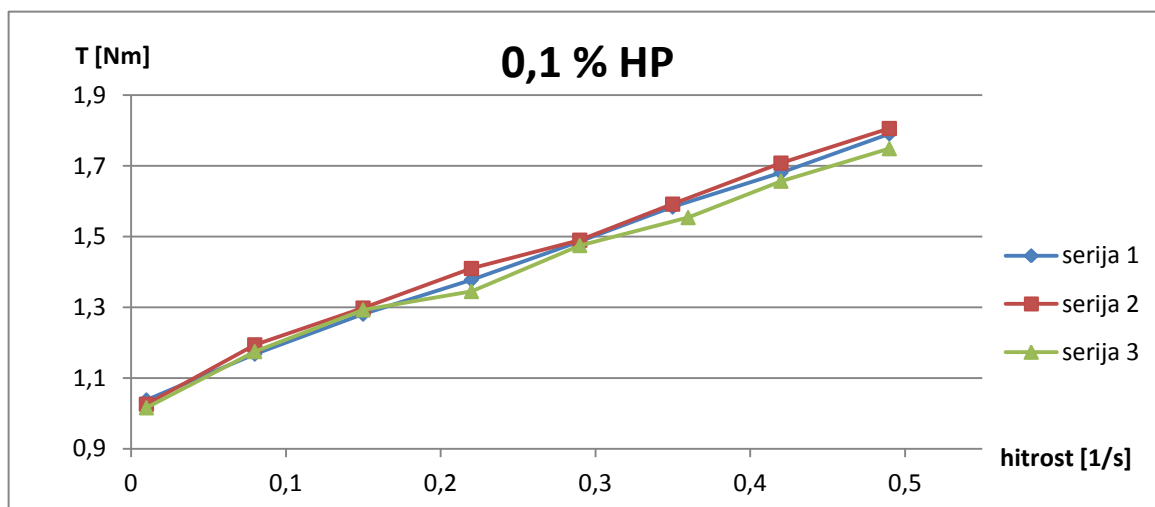


d) "Downward" krivulja za seriji pri $h = 92\text{mm}$ – Olje II

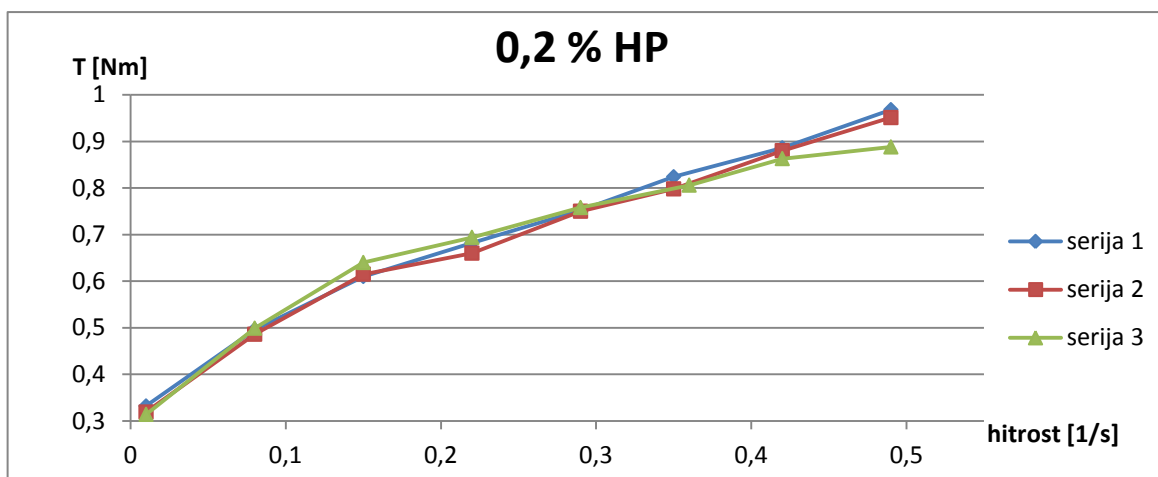


e) "Downward" krivulja za seriji pri $h = 97\text{mm}$ – Olje II

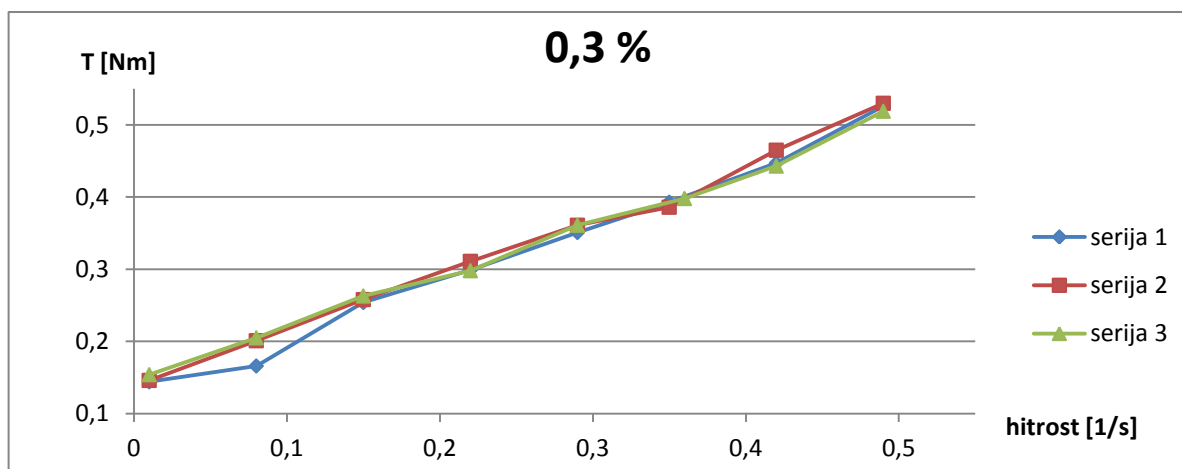
PRILOGA F – "Downward" krivulje za različno količino dodatka HP



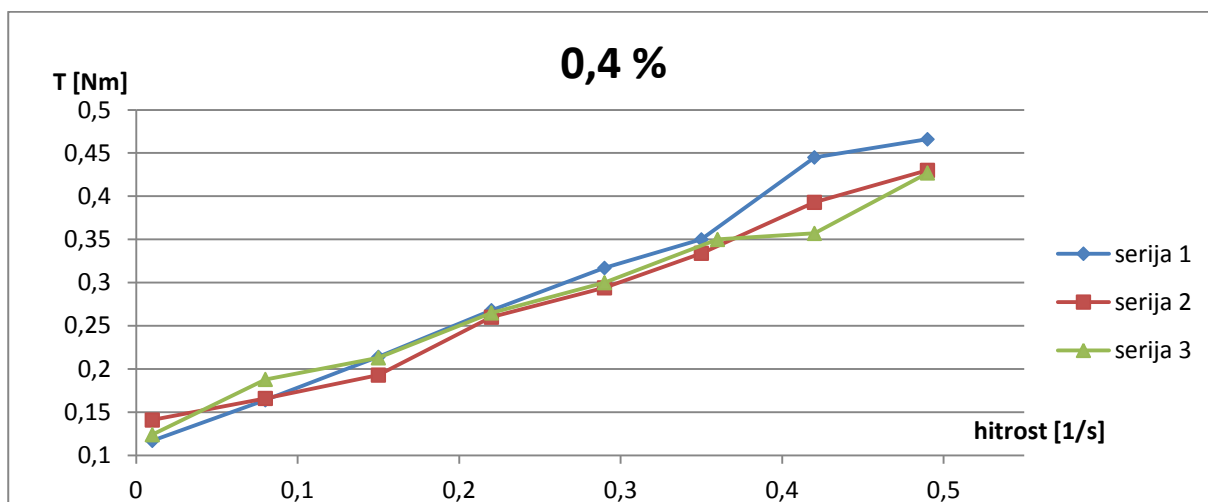
a) "Downward" krivulja za serije mešanice z 0,1% HP



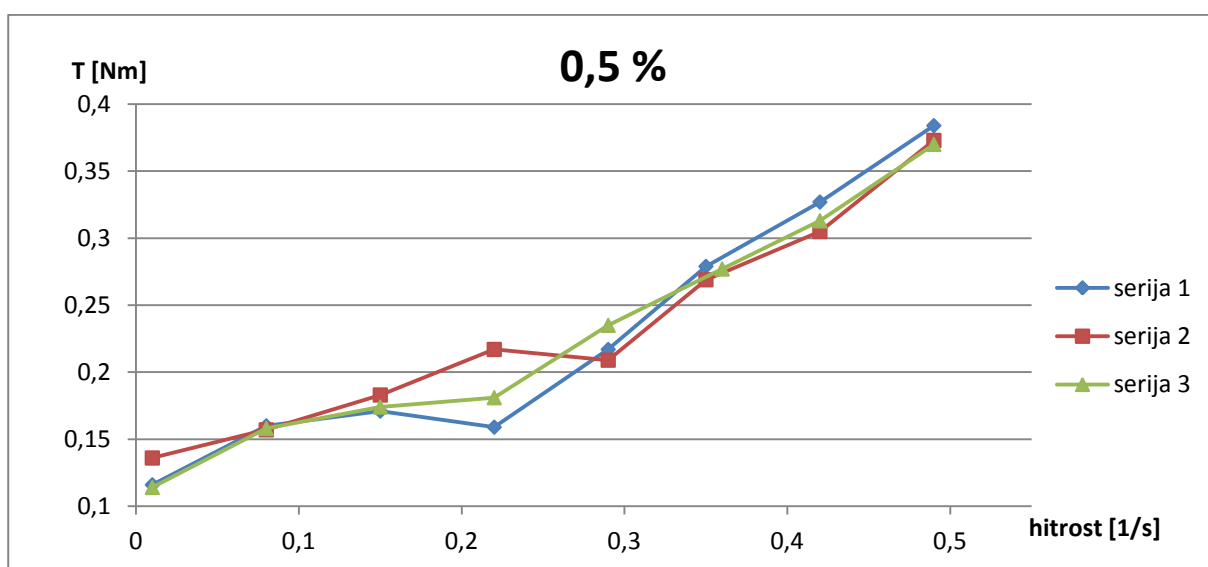
b) "Downward" krivulja za serije mešanice z 0,2% HP



c) "Downward" krivulja za serije mešanice z 0,3% HP

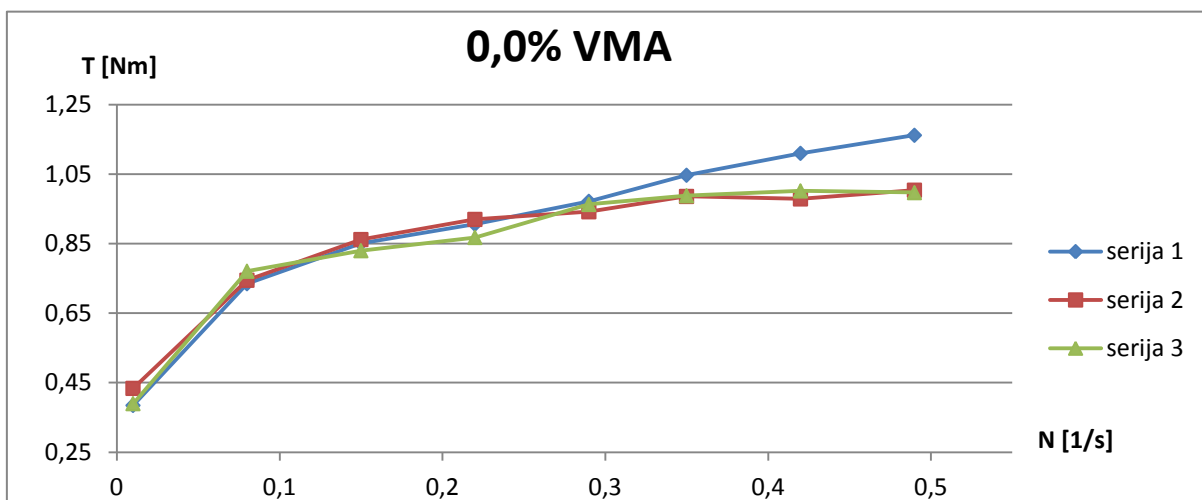


d) "Downward" krivulja za serije mešanice z 0,4 % HP

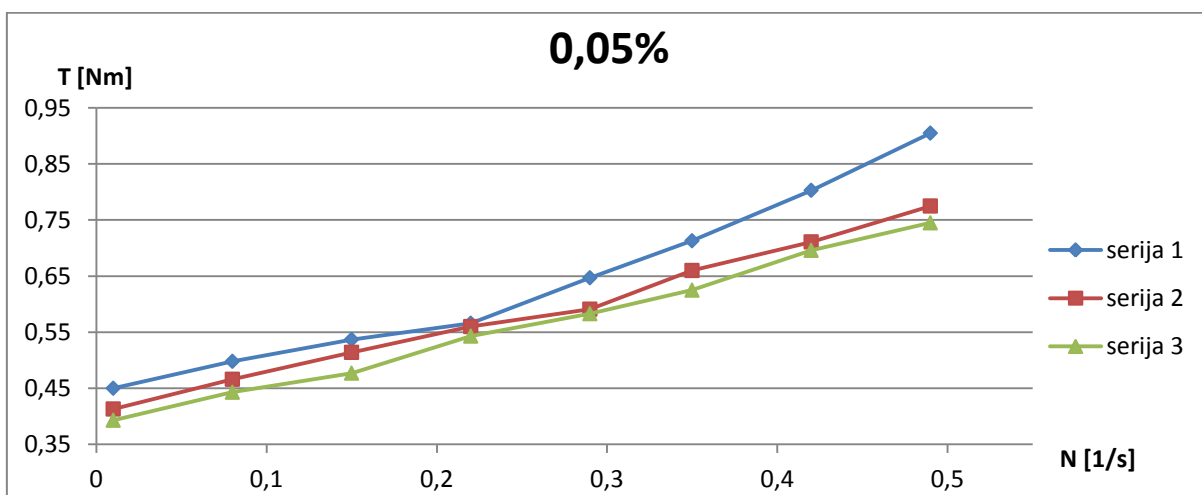


e) "Downward" krivulja za serije mešanice z 0,5 % HP

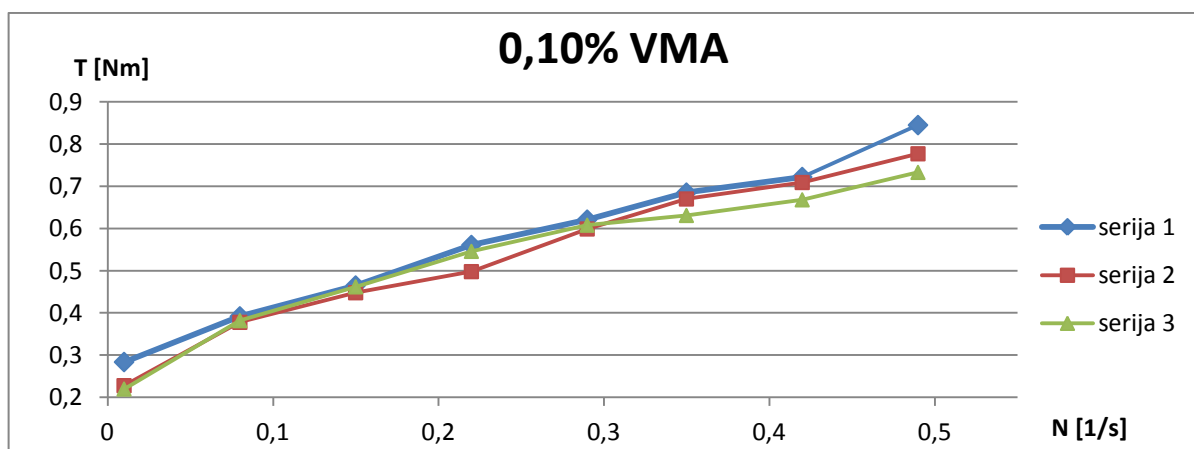
PRILOGA G – "Downward" krivulje za različno količino dodatka VMA



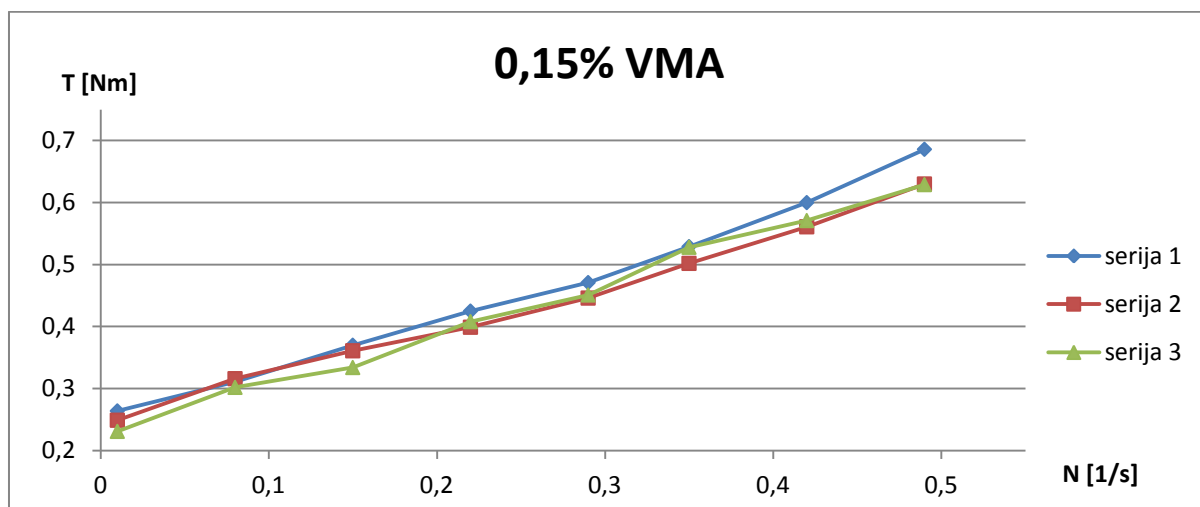
a) "Downward" krivulja za serije mešanice z 0,0 % VMA



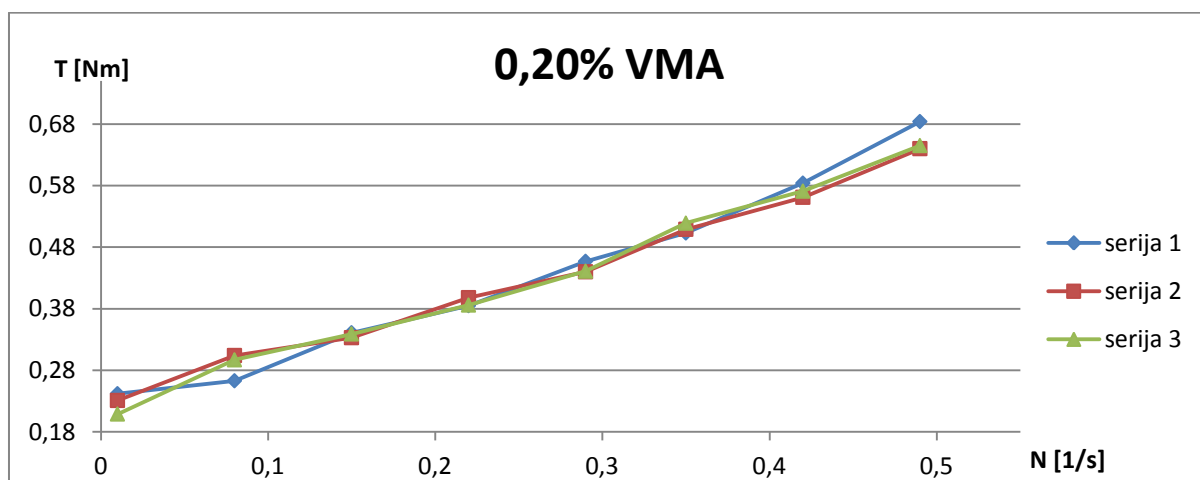
b) "Downward" krivulja za serije mešanice z 0,05 % VMA



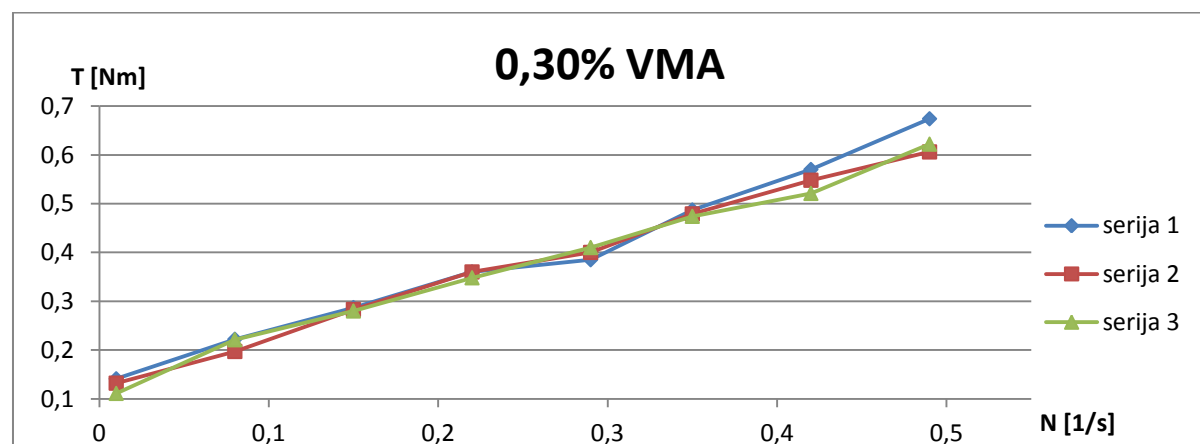
c) "Downward" krivulja za serije mešanice z 0,10 % VMA



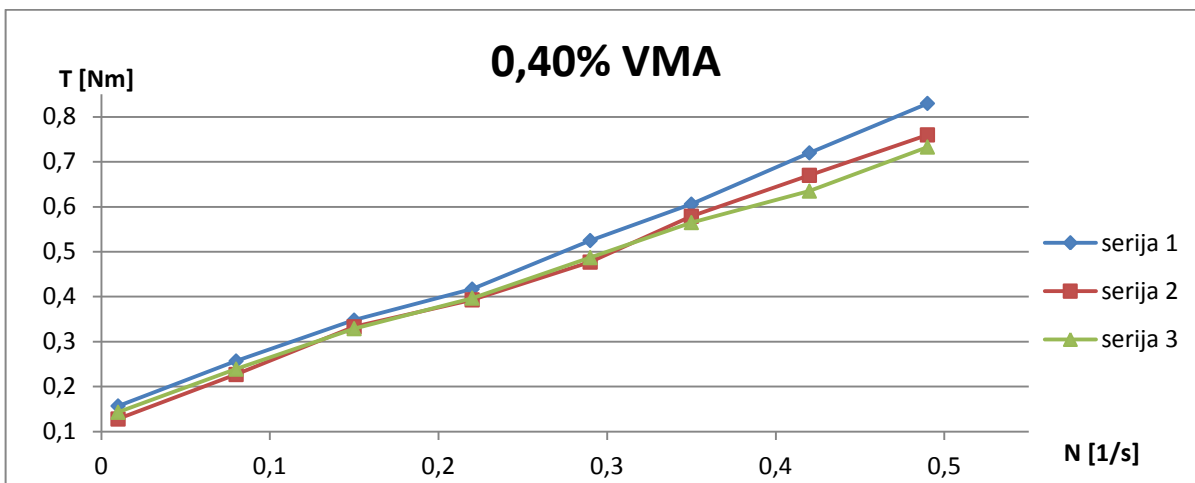
d) "Downward " krivulja za serije mešanice z 0,15 % VMA



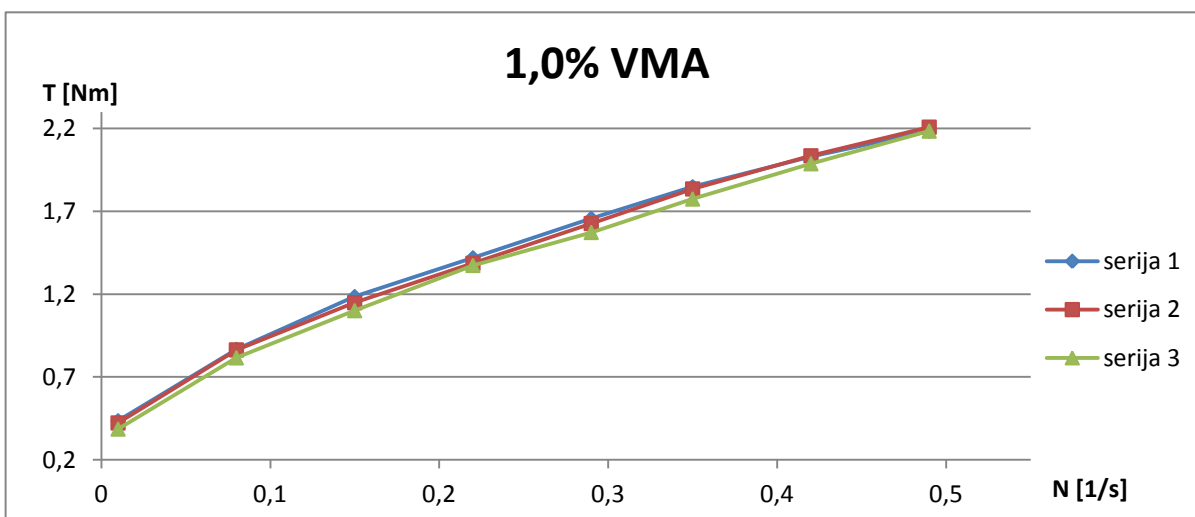
e) "Downward " krivulja za serije mešanice z 0,20 % VMA



f) "Downward " krivulja za serije mešanice z 0,30 % VMA



g) "Downward " krivulja za serije mešanice z 0,40 % VMA



h) "Downward " krivulja za serije mešanice z 1,0 % VMA