



Simo Sirk

PUITKONSTRUKTSIOONIDE PAIGUTISTE KATSELINE UURIMINE

LÕPUTÖÖ

Ehitusteaduskond

Hoonete ehituse eriala

Tallinn 2014

Tõendan, et lõputöö on minu, Simo Sirk'i kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja loome- ja teadustööde seisukohad on viidatud.

Lõputöö koostamine, kaitsmine ja selles sisalduv informatsioon on *prima facie* õppeotstarbeline ja töö on kaitstud autoriõiguse seadusega, mille kohaselt on autoril töö suhtes mittevaralised õigused.

Juhul, kui seda lõputööd kasutatakse muudel põhjustel kui reprodutseerimine õppe- ja teaduslikel eesmärkidel, mis ei ole ajendatud ärilistest huvidest, siis laienevad lõputöö autorile lisaks mittevaralistele õigustele ka varalised õigused.

Lõputöö autor: Simo Sirk
(allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood e09290

Õpperühm EI-101

Lõputöö vastab ülesandele ja kehtivatele nõuetele.

Juhendajad: Jaan Rohusaar
(allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud “.....” 20....a

Ehitusteaduskonna dekaan

Martti Kiisa
(allkiri)



Ehitusteaduskond

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Diplomand:Simo Sirk..... Üliõpilase koode09290..... Õpperühm ...EI-101...

Eriala: Hoonete ehitus (kood 1827)

Lõputöö teema:

Puitkonstruktsioonide paigutiste katseline uurimine.....

.....

Lähteandmed töö koostamiseks:

1. TTK ehitusteaduskonnas läbi viidud katsete tulemused.....

2. EPN 5.1.1 Puitkonstruktsioonid- Osa 1.1.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Töö koosseis, lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Koormuse ja paigutise vahelise seose iseärasused puitkonstruktsioonides.....

2. Katsetuste projekteerimine ja katse tulemused.....

3. Katse tulemuste ja analüütiliste arvutuste võrdlus.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:

Sissejuhatus 2 A4.....
Katse korralduse tehniline lahendus 7 A4.....
Puidu mehaanilised omadused ja nende füüsiline modelleerimine 8 A4.....
Katsekehade mõõtmistulemused graafikutega 8 A4.....
Katsekehade tugevus 3 A4.....
Kokkuvõte 2 A4.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Seletuskiri peab olema trükitud kas masinkirjas või arvutil.

Joonised vormistada kas käsitsi või arvutil.

Lõputöö konsultandid:

Valdkond	Konsultandi nimi	Allkiri	Kuupäev
Katsetuste tehnoloogia	Taavi Kivistik		
Katsetuste tehnoloogia	Roald Talfeldt		

Lõputöö juhendaja: Jaan Rohusaar
(nimi) (allkiri) (kuupäev)

Diplomand: Simo Sirk
(nimi) (allkiri) (kuupäev)

Kinnitan ülesande: Martti Kiisa
Ehitusteaduskonna dekaan (allkiri) (kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 20.... a.

Lõputöö esitamise tähtaeg: ..12..mai..... 2014.. a.

SISUKORD

SISUKORD.....	6
SISSEJUHATUS.....	8
1 KATSE KORRALDUSE TEHNILISEST LAHENDUSEST	10
1.1 Koormuse, paigutiste pingete ja elastsusmooduli vahelised seosed.....	11
1.2 Katse korraldamine.....	13
1.2.1 Arvutuskoormuse määramine	13
1.2.2 Mõõtmised.....	14
1.2.3 Katsekehade seeriad	14
1.2.4 Pikaajaline koormamine	15
1.2.5 Lühiajaline koormamine	15
1.2.6 Katsete ajakava.....	16
1.3 Vajalikud seadmed ja mõõteriistad.....	16
1.3.1 Katse korraldamiseks oli vaja	16
1.3.2 Iga katse jaoks oli tarvis	16
1.3.3 Koormamisseadmete komplekti kuuluvad raskused kaaluga.....	16
2 PUIDU MEHAANILISED OMADUSED JA NENDE FÜÜSILINE MODELLEERIMINE ..	17
2.1 Roomest ja relaksatsioonist	19
2.2 Puidu arvutustugevuse arvestamine konstruktsioonide arvutamisel	20
2.3 Koormuse kestusklassid	20
2.4 Paigutiste suuruse muutus ajas	23
2.5 Katse tulemuste kokkuvõte graafikutele.....	24
2.6 Katsekehade mõõtmistulemused graafikutega	25

3	KATSEKEHADE TUGEVUS.....	33
	KOKKUVÕTE.....	36
	SUMMARY	38
	VIIDATUD ALLIKAD.....	40
	LISAD	41

SISSEJUHATUS

Hooke'i seadusele põhinevad ehitusmehaanika paigutiste arvutuse võtted on koostatud eeldusel, et materjali deformatsioon ε on võrdeline materjalis esineva normaalpingega σ ja pöördvõrdeline normaalelastsusmooduliga (deformatsioonimooduliga) E (Hooke'seadus $\varepsilon = \sigma/E$). Normaalelastsusmoodulit E loetakse materjali füüsikalismehaaniliseks omaduseks, mis on tavaliselt konstantne ja ei sõltu pinge σ suurusest ega koormuse kestvusest. See eeldus sobib hästi terasest ja mineraalsetest ehitusmaterjalidest konstruktsioonide paigutiste arvutamisel, kuid puitkonstruktsioonide arvutamisel on mõningatel juhtudel paigutiste arvutuslikud suurused tunduvalt erinevad konstruktsioonide tegelikest paigutistest. [1, p. 14]

Konstruktsioonide käitumise jälgimisest selgub, et konstantse normaalelastsusmooduliga arvutatud paigutised vastavad hästi tegelikkusele suhteliselt väikeste pingete ja lühiajalise koormuse korral.

Suuremate pingete korral lineaarne seos koormuse ja paigutise vahel kaob, mis näitab, et normaalelastsusmoodul on pinge suurusest sõltuv suurus. Tavaliselt suuremate koormuste korral tekkivad paigutised on suuremad arvutatust ja koormusest vabanemisel ilmneb jäävpaigutis, mis on seda suurem, mida kauem ja mida suurema koormusega oli konstruktsioon koormatud. Seega koormuse ja paigutise vahel esineb füüsikaline mittelineaarsus.

Puitkonstruktsioonides paigutisest suurem osa tekib koormamise käigus praktiliselt silmapilkselt, kuid teatud osa paigutisest tekib aja jooksul. Täiendava paigutise suurus on võrdeline koormusega ja koormamise ajaga. [2]

Koormuste ja paigutiste vaheline seos ei ole piisava põhjalikkusega käsitletud kehtivates normdokumentides (EPN 5.1.1.) ja arvutuseeskirjades (EPN/AM-1), mis kuuluvad samuti meie töö lähtematerjalide hulka. Võib eeldada, et jäävpaigutiste suurus on ajas logaritmiskaala järgi muutuv suurus, nagu enamus ajas kustuvaid muutuvaid funktsioone, milleks kahtlemata on puitkonstruktsiooni paigutus. Käesoleva katseteseeria lõppeesmärgiks on koostada meetodika vajalike konstantide leidmiseks selle logaritmiskaala järgi kirjeldatava protsessi määramiseks.

Oluline oleks vaja uurida, kuivõrd on puidu deformatiivsete omaduste muutus seotud puidu niiskusesisaldusga. Selgitamist vajaks ka küsimus, kuidas mõjutab deformatiivsust puidu kui materjali vanus ehk puidu raie ja koormamise vahelise aja pikkus.

Käesoleva katseteseeria eesmärk on välja selgitada projekteerimisel kasutatavad vajalikud parandustegurid olukorra jaoks, kus muutuvateks suurusteks on:

- koormuse kestvus;
- koormuse rakendamise kulg;
- koormuse (pinge) suurus.

Puitkonstruktsioonide koormamisega seotud ettevalmistustöödega tehti algust Tallinna Tehnikakõrgkoolis 2008a novembris kui loodi vajalik katsestend ja katsekehad. Samuti muretseti vajalikud mõõteseadmed (Joonis 2). Katsetega alustati mais 2009. Meeskonda kuulusid Taavi Kivistik, Roald Talfeldt ja Rudolf Rohusaar. Hiljem liitus käesoleva töö autor Simo Sirk.

1 KATSE KORRALDUSE TEHNILISEST LAHENDUSEST

Katsekehaks on männipuidust pruss ristlõikega $b \times h = 12 \times 30$ mm kasuliku pikkusega $L=600$ mm.

Ristlõike tunnussuurused on

- Pindala $A = bh,$ [1, p. 32] (1)

kus

b [mm] - katsekeha laius;

h [mm] - katsekeha kõrgus.

$$A = 30 \cdot 12 = 360 \text{ mm}^2$$

- inertsimoment $I = bh^3/12,$ [1, p. 32] (2)

kus

b [mm] - katsekeha laius;

h [mm] - katsekeha kõrgus.

$$I = 30 \cdot 12^3 / 12 = 4320 \text{ mm}^4$$

- vastupanumoment $W = bh^2/6,$ [1, p. 32] (3)

kus

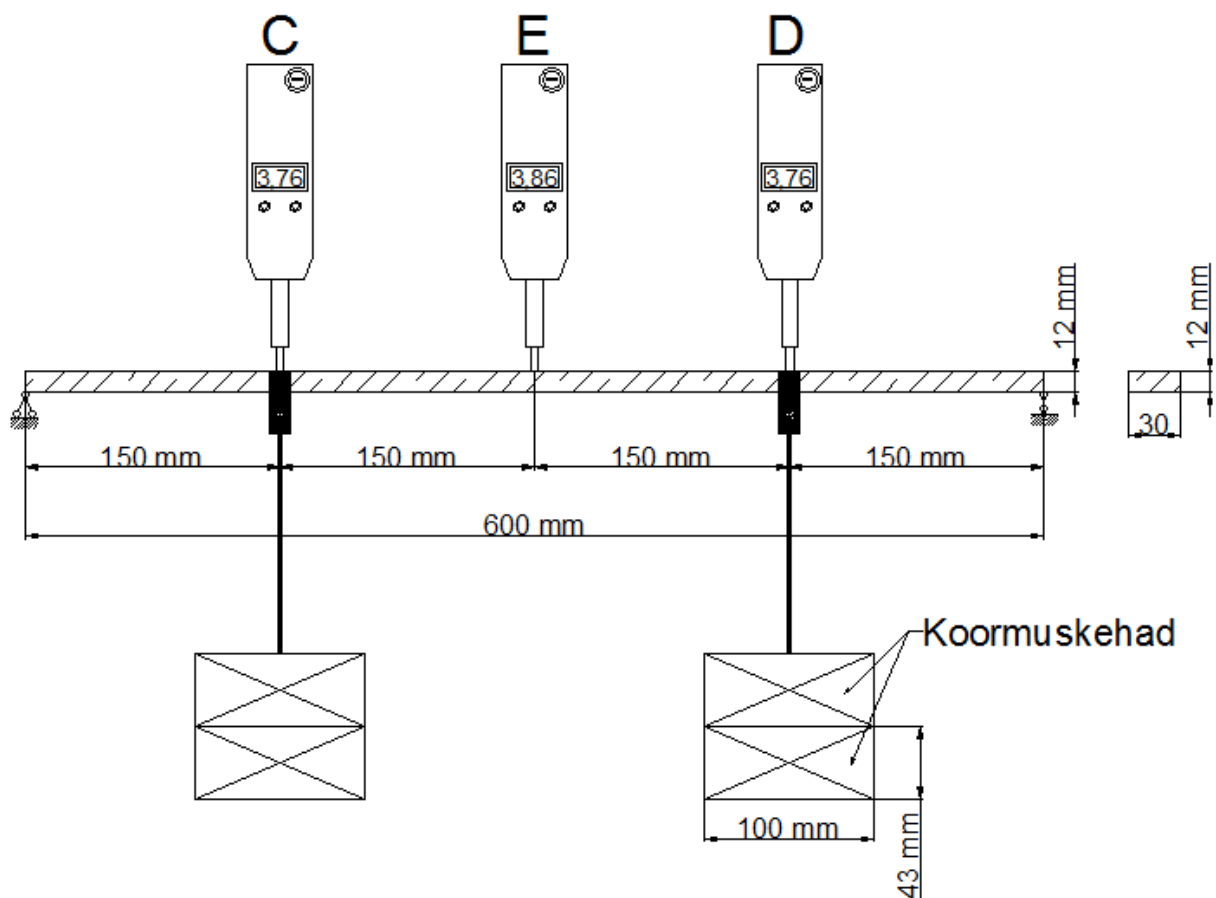
b [mm] - katsekeha laius;

h [mm] - katsekeha kõrgus.

$$W = 30 \cdot 12^2 / 6 = 720 \text{ mm}^3$$

Prussi koormatakse lihttala skeemi järgi kahe sümmeetrilise võrdse koormusega P . Koormuse kaugus toest $a = 150 \text{ mm}$ (Joonis 1). Selline koormusskeem põhjustab koormuste vahelisel alal pikkusega $c = L - 2a$ konstantse paindemomendiga ehk puhtpaindega $M = P \times a$ koormatud ala. Selles ulatuses on kõikides ristlõigetes täpselt ühesugune deformatsiooniolukord, kus deformatsioon muutub ristlõike ulatuses lineaarselt. See on vajalik pinge suuruse ja elastsusmooduli vahelise seose leidmiseks.

1.1 Koormuse, paigutiste pingete ja elastsusmooduli vahelised seosed



Joonis 1. Katsekeha koormamine

Tähistame koormuse asukoha ja silde pikkuse vahelise seose $a/L = \xi$, seega $a = \xi L$. Kasutades klassikalise ehitusmehaanika põhiseoseid, leiame paigutised koormuste rakenduspunktides C ja D ning silde keskel punktis E (Joonis 1). Puhtpaindega koormatud ala paigutis on siis $\Delta^* = \Delta_E - \frac{\Delta_C + \Delta_D}{2}$

$$\Delta_E = \frac{PL^3 2\xi(3 - 4\xi^2)}{24EI} \quad (4)$$

Kui tähistada klassikalise ehitusmehaanika järgi arvutatud lihttala paigutise silde keskel olevast koormusest P sümboliga Δ , mille suuruseks on $\Delta = PL^3/24EI$ ja kui sümmeetrilised koormused asuvad tala veeranditel ehk $a/L = \xi = 1/4$, saame ülal avaldatud paigutised

$$\Delta_E = 0,6875\Delta$$

$$\Delta_C = 0,25\Delta$$

$$\Delta^* = 0,4375\Delta$$

Paindemomendiks puhtpainde piirkonnas on

$$M = Pa = PL\xi = \frac{PL}{4}, \quad [3] \quad (5)$$

kus

P [kN] - koormus;

L [mm] - katsekeha pikkus.

Ekstreemsed normaalpinged on

$$\sigma = \frac{PL}{4W} = \frac{3PL}{2bh^2}, \quad [3] \quad (6)$$

kus

P [kN] - koormus;

L [mm] - katsekeha pikkus;

b [mm] - katsekeha laius;

h [mm] - katsekeha kõrgus.

Elastusmoodul klassikalise ehitusmehaanika järgi

$$E = \frac{PL^3}{2bh^3\Delta}, \quad [3] \quad (7)$$

kus

P [kN] - koormus;

L [mm] - katsekeha pikkus;

b [mm] - katsekeha laius;

h [mm] - katsekeha kõrgus.

1.2 Katse korraldamine

1.2.1 Arvutuskoormuse määramine

Arvutuskoormuse P leiame tingimustest, et puhtpainde piirkonnas tekib pinge, mis on lähedane arvutustugevusele $f=20$ MPa

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{P * 150 * 6}{30 * 12^2} \leq f \quad (8)$$

$$P = \frac{20 * 30 * 12^2}{6 * 150} = 96 \text{ N} \quad (9)$$

Valin arvutuskoormuse $P=100$ N, mis vastab 10 kg massiga koormuse raskusjõule.

Määratakse koormusastmed. Katsekehasid koormatakse koormustega, mis on vastavalt veerand, pool, kolmveerand ja terve arvutuslik koormus

$$P_{D1} = \frac{P}{4} \quad (10)$$

$$P_{D2} = \frac{P}{2} \quad (11)$$

$$P_{D3} = \frac{3P}{4} \quad (12)$$

$$P_{D4} = P \quad (13)$$

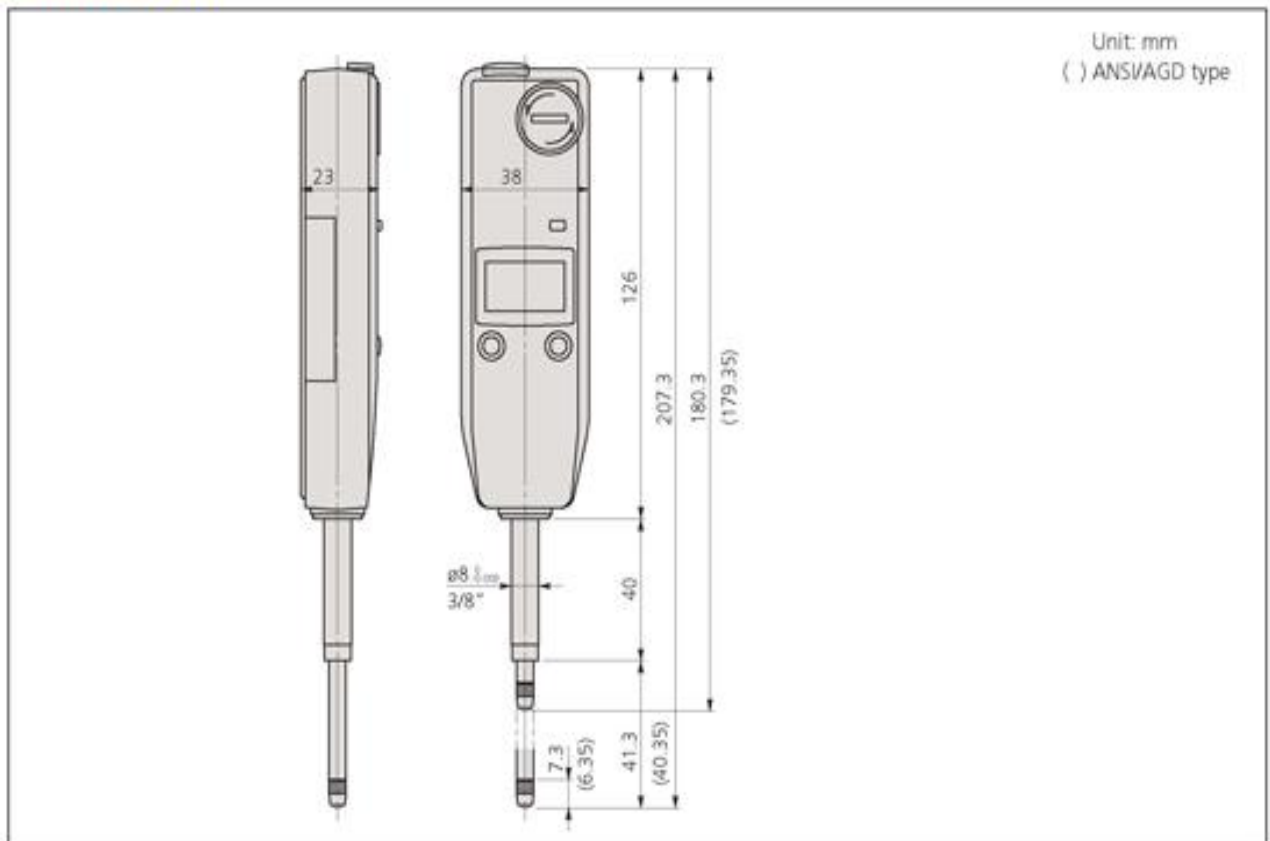
Koormused rakendatakse sümmeetriliselt punktidesse C ja D (Joonis 1) vastavalt ette antud ajakavale.

1.2.2 Mõõtmised

Igasse katsekehade seeriasse kuulub $2 \times 4 = 8$ katsekeha. Katsekehadele on asetatud paigutisandurid punktidesse C, D ja E. Andurite lugemid tehakse vastavalt ajakavale.

Andurite tüüp Mitutoyo 575-122 Absolute LCD Digimatic Indicator ID-U (Joonis 2) [4].

DIMENSIONS



Joonis 2. Mitutoyo 575-122 Absolute LCD Digimatic Indicator ID-U [4]

1.2.3 Katsekehade seeriad

Iga katse koosneb ühest seeriast. Igas seerias 8 katsekeha (Foto 1). Soovitav on katset läbi viia üheaegselt n seeriaga. Suurus n näitab korduskatsete arvu ja sõltub katse korraldamiseks võimaldatud eelarvest. Mida suurem on korduskatsete arv, seda usaldusväärsem on katse tulemus. Üks katse koosneb 4 pikaajaliselt erineva koormusega koormatud katsekehast ja 4 lühiajaliselt koormatud talast.

- Pikaajaline koormus
- Lühiaajaline korduv koormus



Foto 1. Katsekehade seeriad

1.2.4 Pikaajaline koormamine

Pikaajalise koormuse katse on antud katse juures põhikatse. Esimese seeria katsekehasid koormatakse koormustega P_{D1} ... P_{D4} ja vabastatakse koormusest vastavalt koormamise ajakavale ja jälgitakse paigutiste muutumist ajas 3 aasta jooksul.

1.2.5 Lühiajaline koormamine

Lühiajalise koormamise katsega võrreldakse paigutiste suuruse muutust etapiviisilise korduskoormuste puhul, kui koormuse lõppväärtus on võrdne pikaajalise koormusega. Koormamine ja mõõtmine toimub vastavalt koostatud ajakavale.

1.2.6 Katsete ajakava

Käesolev katse oli planeeritud kokku kestvusega 3 aastat.

Pikaajalise koormamise paigutiste muutumist jälgitakse vähemalt kaks aastat või seni, kuni 4 nädala jooksul paigutis muutub vähem kui 1/1000 eelmisest väärtusest. Seejärel vabastatakse konstruktsioon koormusest ja paigutise muutust jälgitakse üks aasta või seni, kuni 4 nädala jooksul paigutis muutub vähem kui 1/1000 eelmisest väärtusest.

Lühiajalise koormus rakendatakse etappide kaupa 4 nädala jooksul ja vabastatakse samuti 4 nädala jooksul. Ajakava täpsustatakse pärast proovikoormamist.

1.3 Vajalikud seadmed ja mõõteriistad

1.3.1 Katse korraldamiseks oli vaja

1. Konstrueerida ja valmistada mittedeformeeruv metallist stend katsekehade ja mõõteseadmete paigutamiseks
2. Konstrueerida ja valmistada koormamisseadmed
3. Konstrueerida ja valmistada katsekehade ja koormamisseadmete tugiosad

1.3.2 Iga katse jaoks oli tarvis

- Katsekehad koos tugiosadega 8 tk
- Koormamisseadmete komplektid 1 tk

1.3.3 Koormamisseadmete komplekti kuuluvad raskused kaaluga

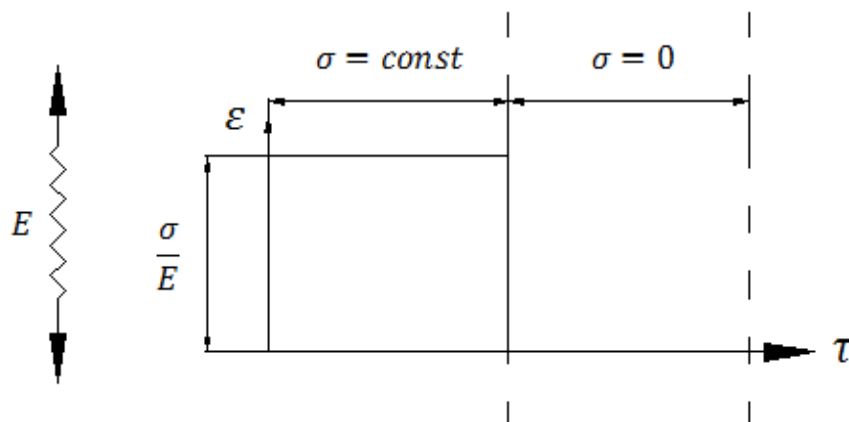
- $P_{D1} = P/4$ 22 tk
- $P_{D2} = P/2$ 2 tk
- $P_{D3} = 3P/4$ 2 tk
- $P_{D4} = P$ 2 tk
- Paigutise mõõtesead (mõõtkell) 24 tk

2 PUIDU MEHAANILISED OMADUSED JA NENDE FÜÜSILINE MODELLEERIMINE

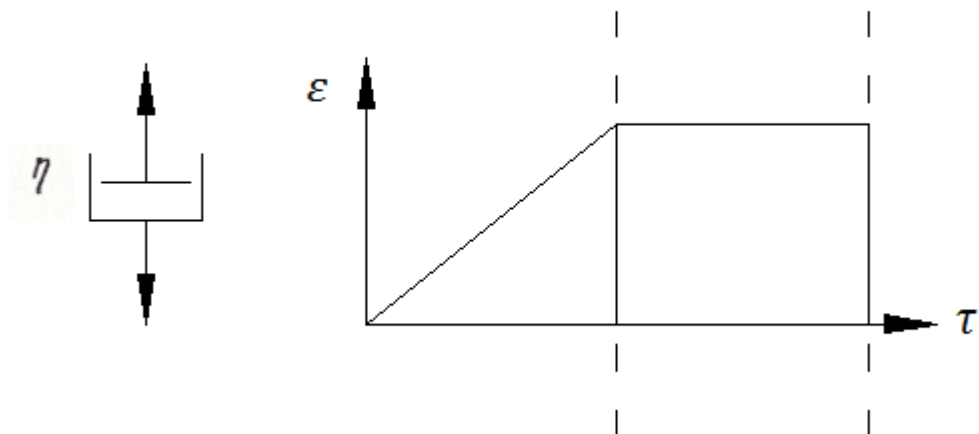
Puit kujutab endast keerulise struktuuriga looduslike polümeeride kogumit. Olenevalt puu liigist, kasvutingimustest ja puidu töötlustest ning seisundist võivad erinevate puidust detailide tugevus ja deformatsiooninäitajad suuresti erineda. [5]

Puidu koormamisel võib esineda kolm erinevat tüüpi deformatiivsust:

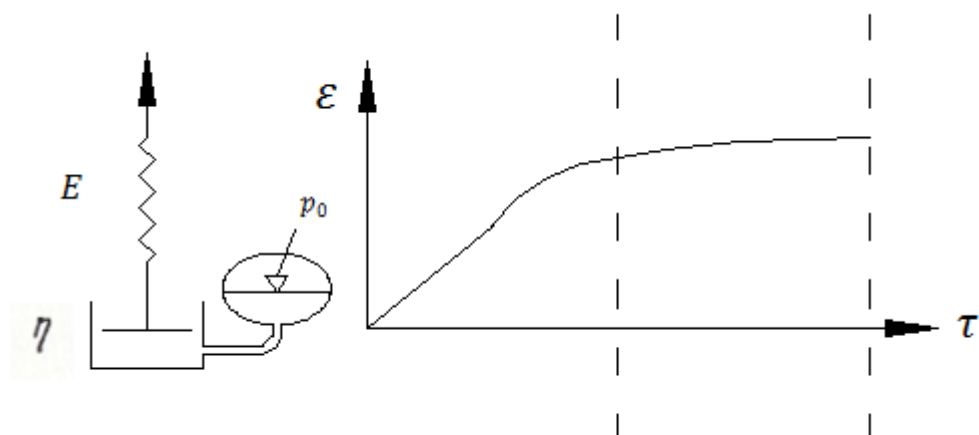
- Elastne deformatsioon vastavalt Hooke'i seadusele, kus deformatsioonid on võrdelised pingega. Deformatsioon tekib hetkeliselt ja on ajas konstantne. Modelleerida on võimalik silinder vedruga, mida on võimalik analoog mudelitega füüsikaliselt modelleerida (Joonis 3). [3]
- Elastne deformatsioon, kus deformatsioonide ja pingete vahel puudub otsene lineaarne seos. Deformatsioon tuleb teatud aja jooksul. Modelleerimine on võimalik kolviga (Joonis 4). [3]
- Maxwelli deformatsioon kus modelleerimine toimub kolvi ja vedruga, millele lisandub vedelikuga paisupaak (surve suurus p_0), mis omakorda tasakaalustab paigutise. Deformatsioon kasvab algul propotsionaalselt ajaga, hiljem deformatsioon langeb (Joonis 5). [3]



Joonis 3. Hooke'i seaduse järgi modelleerimine [6, p. 211]



Joonis 4. Njuutoni seaduse järgi modelleerimine [6, p. 211]



Joonis 5. Maxwelli seaduse järgi modelleerimine

2.1 Roomest ja relaksatsioonist

Hooke'i seadus seob lihtsa lineaarse võrdega kolm suurust

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad [1, \text{p. 14}] \quad (14)$$

kus

ε - deformatsioon;

σ [MPa] - pinge;

E [MPa] - elastsusmoodul.

Sellele seosele põhineb praktiliselt kogu klassikaline ehitusmehaanika: paigutis (deformatsioon ε) on võrdeline koormusega (pingega σ) ja pöördvõrdeline elastsusmooduliga (E). See kehtib praktiliselt piiranguteta looduslike mineraalsete materjalide korral ja on üsna hästi kasutatav ka terase ja malmi puhul. Tõsi küll, seda vaid teatud piirini, nn proportsionaalsuspiirini, kui suuremate pingete korral elastsusmoodul väheneb ja paigutis suureneb kiiremini kui koormus. [1]

Paraku sünteetiliste materjalide, komposiitmaterjalide ja ka puidu korral lineaarne seos kaob. Kujutab ju puit endast suures osas looduslikku polümeerset materjali tselluloosi, mis oma omadustelt läheneb sünteetilistele polümeeridele. Nende materjalide elastsusmoodul on seotud pingega ja koormuse kestvusega. Seega konstantse pinge korral elastsusmoodul väheneb aja jooksul nagu ka konstantse koormu korral. See nähtus on tuttavaks saanud eelkõige (raud)betoonkonstruktsioonide korral. Ka konstantse koormuse korral aja jooksul paigutis suureneb. Betoonkonstruktsioonide puhul nimetatakse seda nähtust roomeks. Tegemist on tüüpilise füüsikalise mittelineaarsusega. [2]

Sama Hooke'i seaduse mittelineaarsus esineb veel teiselgi puhul. Kui deformatsioon (ε) jääb konstantseks, siis koos aja jooksul väheneva elastsusmooduliga (E) peab vähenema ka pinge (σ). Seda nähtust tuntakse rahvusvahelise terminiga relaksatsioon ja tehnikas ta avaldub eelkõige aja jooksul lõdnevate poltühendustena, mis võib nii mõnigi kord esile kutsuda ebameeldivusi. [1]

2.2 Puidu arvutustugevuse arvestamine konstruktsioonide arvutamisel

Lisaks tavakohaste osavaruteguritele kasutatakse puitkonstruktsioonide arvutustes tagavarategureid, mis arvestavad puitkonstruktsioonide jaoks spetsiifilisi olukordi. Puidust elementide paigutiste suuruse ja tugevusvaru määramisel on oluline koormuse kestus, koormuse suurus võrreldes purustava koormusega ja konstruktsioonimaterjali niiskuse. [7, p. 117]

$$X_d = \frac{k_{mod} k_h X_k}{\gamma_M}, \quad [7, p. 117] \quad (15)$$

kus

k_{mod} - koormuse kestuse ja niiskuse mõju arvetav modifikatsioonitegur;

k_h - ristlõike mõõtmeid arvetav modifikatsioonitegur;

X_k - materjali omadust kirjeldav arvutusväärtus;

γ_M - materjali omadusi arvestav osavarutegur.

Modifikatsioonitegurite määramiseks jagatakse konstruktsioonid kasutusklassidesse vastavalt niiskusesisalduse ja koormuse kestuse järgi. Nii määratakse kasutusklassid vastavalt õhu niiskusesisaldusele. [8, p. 9]

- Kasutusklass 1. Õhuniiskus kuni 65% [8, p. 9]
- Kasutusklass 2. Õhuniiskus kuni 85% [8, p. 9]
- Kasutusklass 3. Õhuniiskus üle 85% [8, p. 9]

2.3 Koormuse kestusklassid

Koormuse kestusklass määratakse tugevus- ja jäikusarvutusteks vastavalt tabelile (Tabel 1). [8, p. 9]

Tabel 1. Koormuse kestusklassid [8, p. 9]

Koormuse kestusklass	Normkoormuse kestus
Alaline	üle 10 aasta
Pikaajaline	6 kuud ...10 aastat
Keskkestev	1 nädal ...6 kuud
Lühiajaline	vähem kui 1 nädal

Koormuse kestusklass	Normkoormuse kestus
Hetkeline	erakordne koormus

Tabel 2. Saetud puidu jaoks on modifikatsioonitegurid k_{mod} järgmised [8, p. 9]

Kasutusklass	Alaline	Pikaajaline	keskkestev	Lühiajaline	Hetkeline
1.	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
2.	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
3.	0.50	0,55	0,65	0.70	0,90

Toodud tabelist (Tabel 2) selgub, et kaasaegsete arvutuseeskirjade järgi on hetkelise koormuse puhul kandevõime alalisekoormusest pea kaks korda suurem ja paigutised on pea sama palju suuremad. Eriti kehtib see suure niiskussisaldusega konstruktsioonide kohta.

Kuna modifikatsiooniteguri väärtus on antud vaid kahe tüvenumbri täpsusega, siis loomulikult ka arvutustulemused on samast täpsusklassist. See on ilmselt praktiliste projekteerimisülesannete puhuks piisav täpsus, sest ega koormusedki nii pika aja peale ette ei ole täpsemini määratletud!

Teadusliku tunnetuse seisukohalt on asjal teine pool – alati leidub keegi, kes tahab looduses toimuvat täpsemalt teada.

Puidu arvutustugevuse ja deformatiivsuse sõltuvust koormuse kestvusest on täheldanud paljud autorid. Nii näiteks refereerib B. N. Ugolev 1965 oma raamatus „Puidu ja puitmaterjalide katseline uurimine“ N. L. Leontjevit, kes suuremahulise katsetulemuste seeria tööstlusest tuletas seosed puidu arvutustugevuse ja elastsusmooduli sõltuvusest koormuse kestvusest. Võttes aluseks puidu tugevus- ja deformatiivsed suurusi kirjeldavad σ_{ct} ja E_{ct} staatilisel hetkelisel koormamisel, võrdles ta neid tulemusi samade meetoditega pärast pikaajalist koormamist järelkontrollil mingil ajahetkel τ . Ta leidis võimaluse kirjeldada lihtsa logaritmseose abil soovitud füüsikalise-mehaaniliste näitajate suurused ja arvutada nende väärtusi soovitud ajahetkel. Seostes esinevad konstandid α ja β on arvutatavad katsetulemuste põhjal. On huvitav märkida, et autori vaatlusandmete rida hõlmas 10^4 päeva ehk enam kui 27 aastat! [6]

Veidi muudetud kujul toome N. L. Leontjevi seosed arvutustugevuse σ_τ ja elastsusmooduli E_τ määramiseks ajahetkel τ . [6]

$$\sigma_\tau = \sigma_{ct}(1 - \alpha \lg \tau), \quad [2] \quad (16)$$

$$E_\tau = E_{ct}(1 - \beta \lg \tau), \quad [2] \quad (17)$$

kus

σ_{ct} - arvutustugevus enne koormamist;

E_{ct} - elastsusmoodul enne koormamist;

α ja β - ühikuta konstandid.

Toodud seostes esinevad α ja β on ühikuta suurused, mis on katsetulemuste järgi määratavad ja sõltuvad seostes kasutatud aja τ ühikutest. On ju selge, et ühte ja sama aja pikkust on võimalik määrata tundides, päevades või ka aastates ja sellest sõltub funktsioonis kasutatava aja väärtuse logaritm. Leontjevi arvutustest lähtudes oli näiteks männipuidu arvutustugevus 10^4 päevase koormamise järel langenud 50 MPa kuni 27,5 MPa, seega 45%. Seega eeldatava arvutustugevuse valemist, kui $\sigma_{ct} = 50$ MPa, $\sigma_\tau = 27,5$ MPa ja $\tau = 10^4$ päeva, saame dimensioonita teguri α suuruseks

$$\alpha = \frac{\sigma_{ct} - \sigma_\tau}{\sigma_{ct} \lg \tau} \quad [3] \quad (18)$$

$$\alpha = (50 - 27,5) / (50 \times 4) = 0.1125$$

ja männipuidu arvutustugevused vastavalt 10, 100 ja 1000 päevase koormamise järel

- $\sigma_{10} = 50(1 - 0,1125 \times 1) = 44,4$ MPa
- $\sigma_{100} = 50(1 - 0,1125 \times 2) = 38,8$ MPa
- $\sigma_{1000} = 50(1 - 0,1125 \times 3) = 33,1$ MPa

Tulles tagasi kaasaegsete arvutuseeskirjade juurde, kus kasutatakse modifikatsioonitegurit k_{mod} , saame Leontjevi valemiga üsna samad tulemused.

Saematerjali arvutustugevus paindel $f_{m,d}$ arvutatakse modifikatsiooniteguri k_{mod} (Tabel 2) abil,

$f_{m,d} = f_{m,k} \times k_{mod}$, kus modifikatsioonitegur arvestab koormuse ajalist kestvust. Kui koormuse kestuse klassid arvutada päevadesse ja nende järgi leida kandevõime redutseerimise tegurid, saame üllatavalt hea kokkulangevuse kaasaegsete normide modifikatsiooniteguriga (Tabel 3).

Tabel 3. Normide modifikatsioonitegurid

Koormus klass	Kestus	Kestus päevades	$(1-\alpha l g \tau)$	k_{mod}
Alaline	$\tau \geq 10$ a	3650	0,60	0,6
Pikaajaline	$0.5a \leq \tau \leq 10a$	1920	0,63	0,7
Keskkestev	1 nädal $\leq \tau \leq 6$ kuud	100	0,78	0,8
Lühiajaline	$\tau \leq 1$ nädal	4	0,93	0,9

2.4 Paigutiste suuruse muutus ajas

Vastavalt ehituskonstruksioonide arvutuseeskirjadele kasutatakse paigutiste arvutamisel konstruksioonimaterjali jäikuse hindamisel elastsusmoodulit E . Nii on paindejäikuse EI , materjali omadust arvestab elastsusmoodul E ja kus varda ristlõike tunnussuuruseks on telginertsimoment I , mida tööolukorra kestuse jooksul loetakse konstandiks. Aga elastsusmoodul E puitkonstruktsioonide arvutuse ajas muutub.

Vaadeldava sümmeetrilise koormuse korral uurime puhta painde piirkonnas pikkuse b ulatuses paigutise Δ muutust paindemomendist $M=Pa$. Kasutame ehitusmehaanikast tuntud avaldist puhtpainde piirkonnas paigutise Δ määramiseks, mis kehtib nii koormamise alghetkel $\tau=0$ ja $E = E_0$ aga ka ajahetkel τ suurus $\Delta_\tau = Mb^2/8E_\tau I$ ja meie poolt varem esitatud valemit elastsusmooduli ajas muutumise kohta $E_\tau = E(1- \beta l g \tau)$ ja toome sealt välja ühikuta konstandi

$$\beta = (\Delta_\tau - \Delta_{\tau=0})/\Delta_\tau l g \tau \quad [3] \quad (19)$$

Nagu selgub, on teguri β arvutuse avaldis (19) oma struktuurilt täpselt samasugune nagu teguri α arvutusvalem (18). [3]

Leiame, väärtuse keskkestva paigutise korral, IV katsekeha pikaajalise koormamise (Joonis 13) tulemuste põhjal kui koormamine kestab 22 päeva ja 16 tundi nagu oli see käesoleva katseseeria käigus.

Aja ühikuks olgu 1 tund.

Vastavalt katsetulemustele on koormusega $P = kN$ koormatud varda algpaigutis $\Delta_{\tau=0} = 4,00$ mm ja aja $\tau = 22 \cdot 24 + 16 = 544$ tunni jooksul lõpp-paigutis $\Delta_{\tau} = 3,40$ mm ehk paigutise muutus $\Delta_{\tau} - \Delta_{\tau=0} = 3,40 - 4,00 = -0,60$ mm. Saame

$$\beta = -0,60 / (3,40 \cdot \lg 544) = -0,065$$

Kontrolliks elastsusmooduli ja paigutise seos

$$E_{\tau} = E_0(1 - \beta \lg \tau) = E_0[1 - (-0,065 \lg 544)] = 1,18E_0$$

Paigutis ajahetkel $\tau=0$ $\Delta = M/E_0I = 4,00$ mm ja ajahetkel $\tau=544$ t $\Delta_{\tau} = M/\beta E_0I = 3,40$ mm

$$\text{Siis } \Delta_0/\Delta_{\tau} = ME_{\tau}I/ME_0I = E_{\tau}/E_0.$$

Leiame paigutise Δ_{τ} vaatlusrea ajahetkel $\tau = 72$. Elastsusmooduli suuruseks saame

$E_{\tau=72} = E_0[1 - (-0,065 \lg 72)] = 1,12E_0$ ja paigutise vastavalt $\Delta_{\tau} = \Delta_0/1,12 = 3,57$ mm, mis vastab meie katserea tulemusele piisava täpsusega.

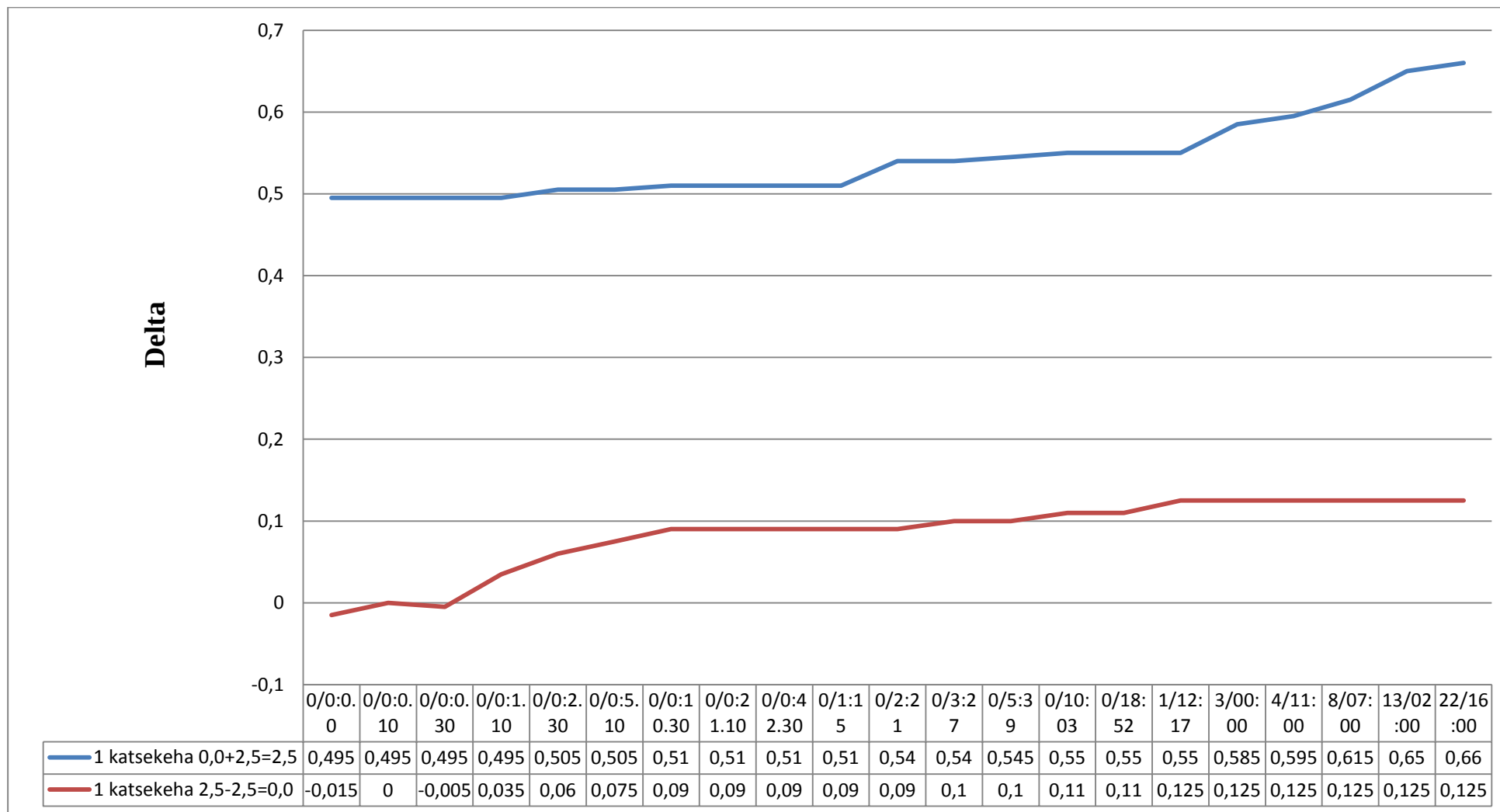
2.5 Katse tulemuste kokkuvõte graafikutele

Katsete tulemusi vaadates on deformatsiooni kasv algul propotsionaalne ajaga, hiljem deformatsioon langeb ning tasakaalustub nii katsekehade peale kui ka maha koormamisel (Joonis 6- Joonis 13). [3]

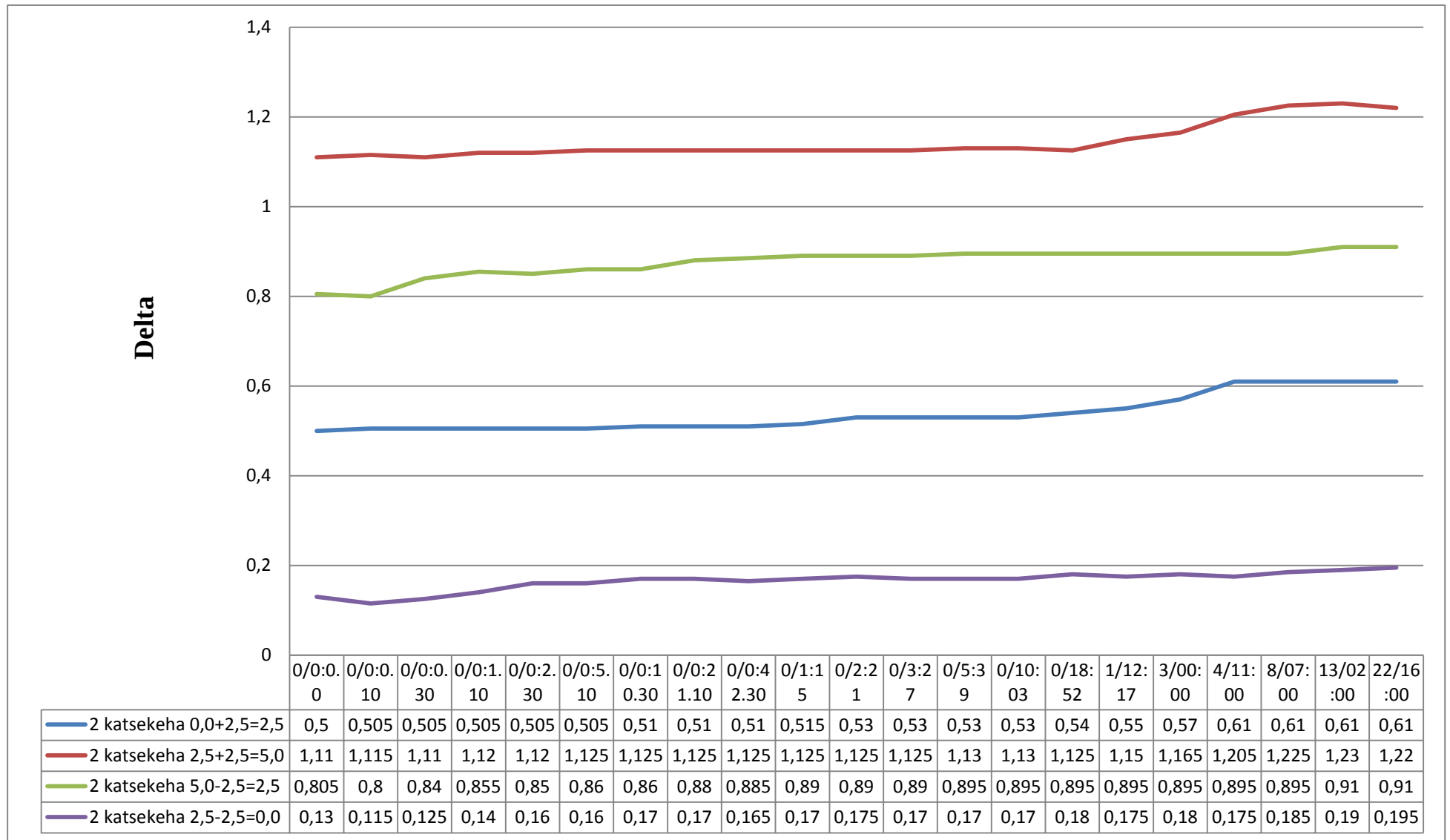
Eraldi tasuks välja tuua pikaajaliste katsekehade pealekoormamiste graafikud kus kõigil neljal katsekehal on näha peale 8 päeva ja 7 tunni möödumist, tulemustes graafiliselt väike paigutise hüppeline tõus, mis võis olla tingitud teadaolematust välisest kõrvalmõjust koormusstendile (Joonis 10- Joonis 13).

2.6 Katsekehade mõõtmistulemused graafikutega

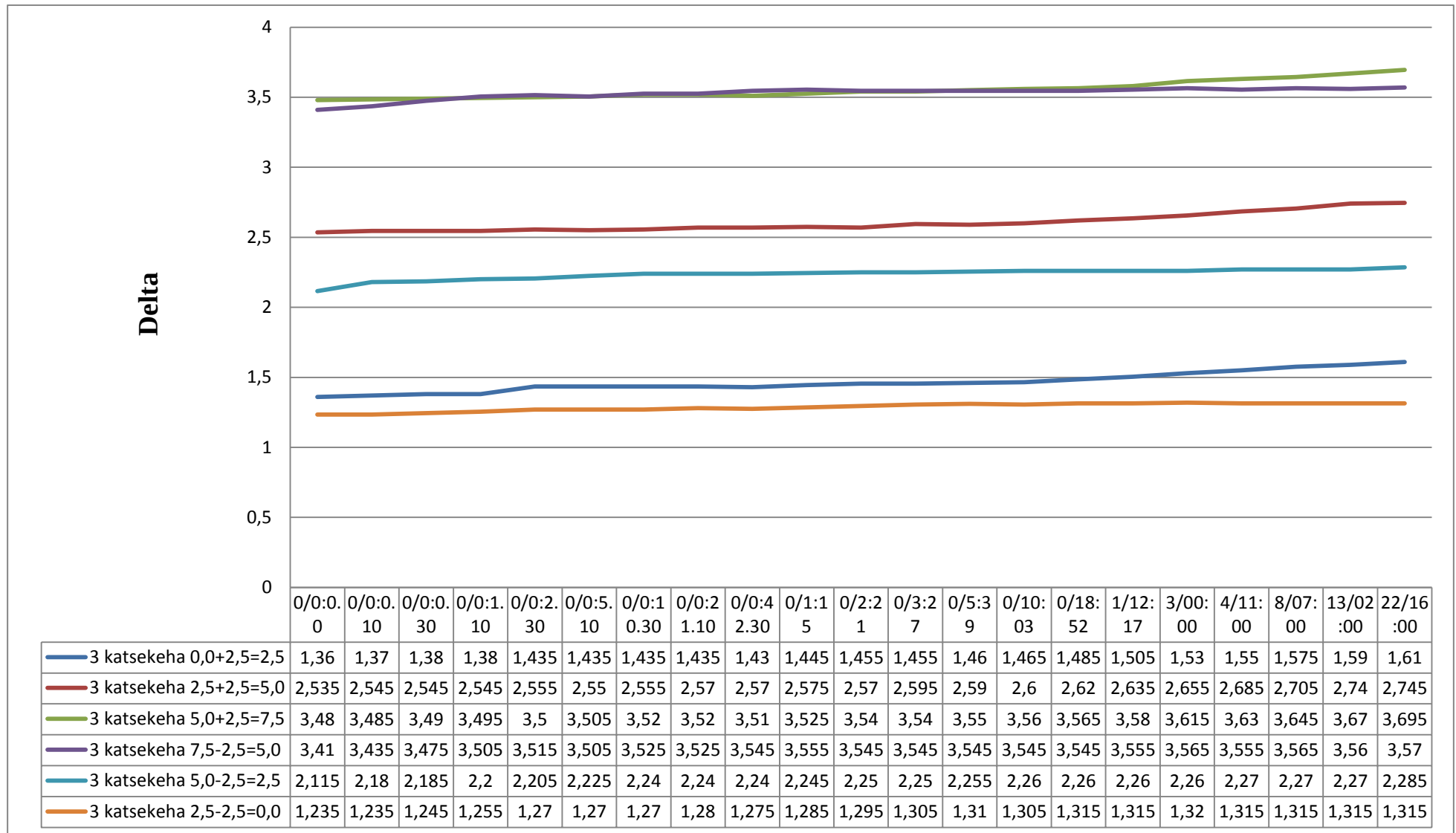
Joonis 6. I katsekeha lühiajaline koormamine



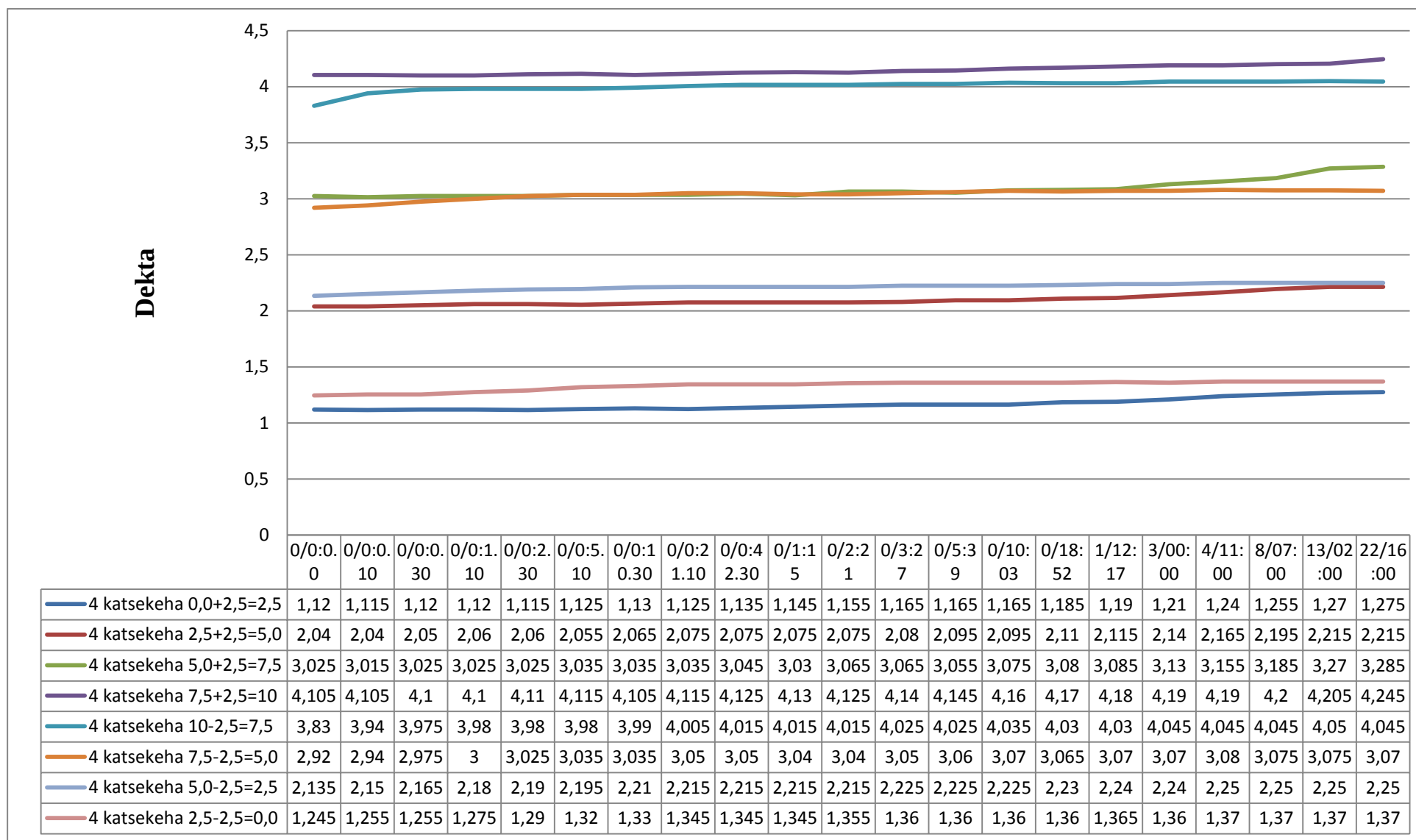
Joonis 7. II katsekeha lühiajaline koormamine



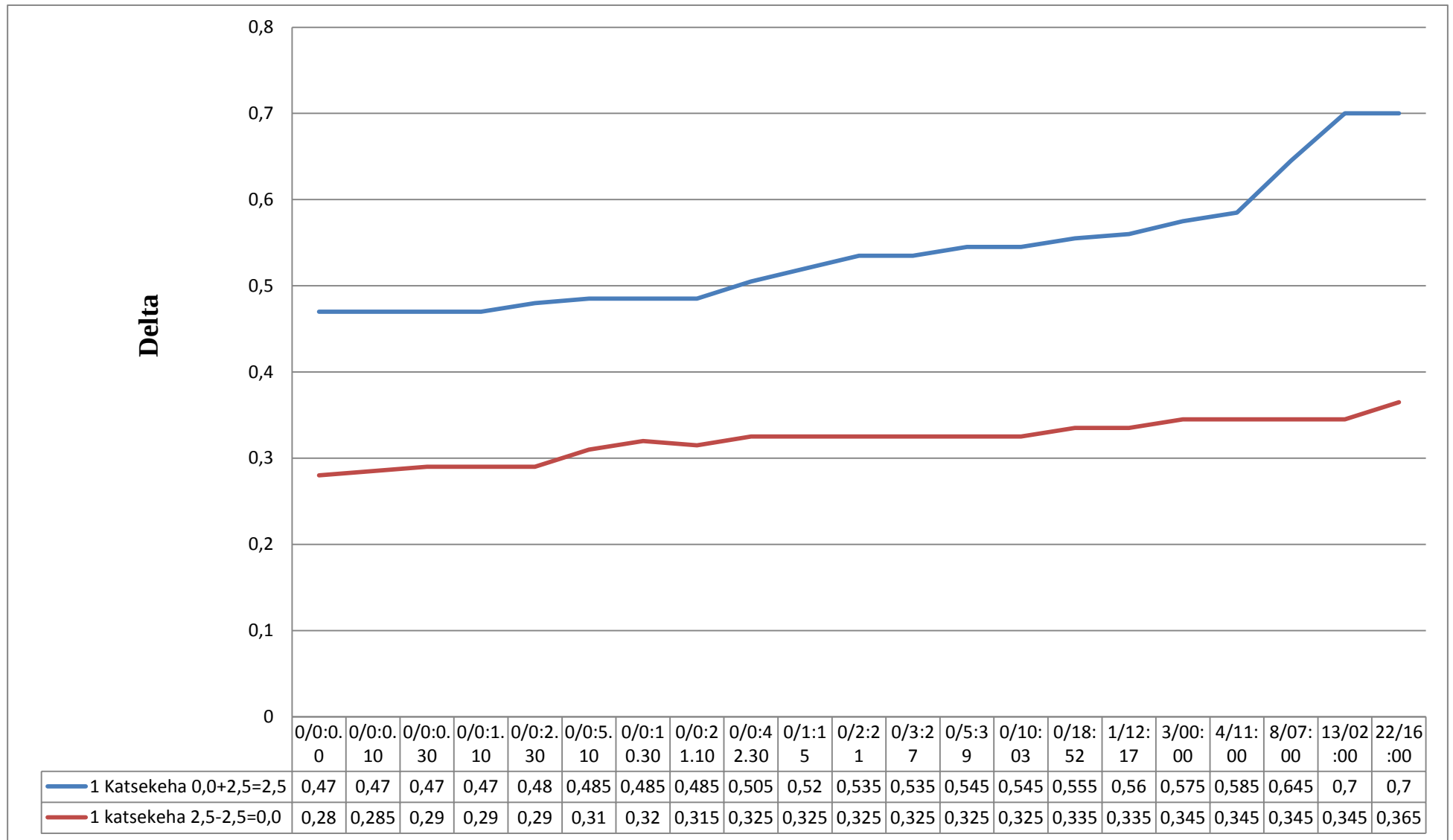
Joonis 8. III katsekeha lühiajaline koormamine



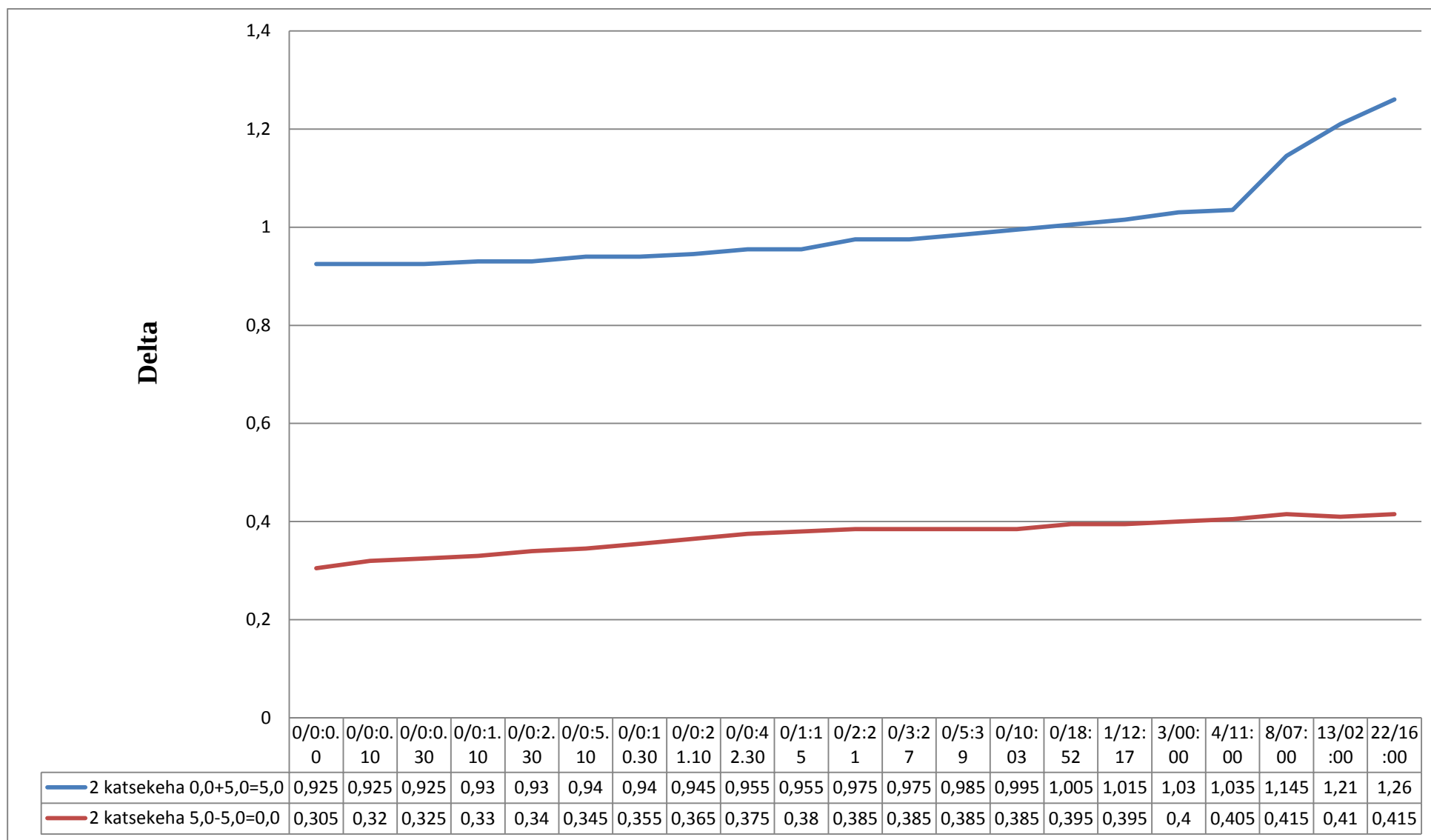
Joonis 9. IV katsekeha lühiajaline koormamine



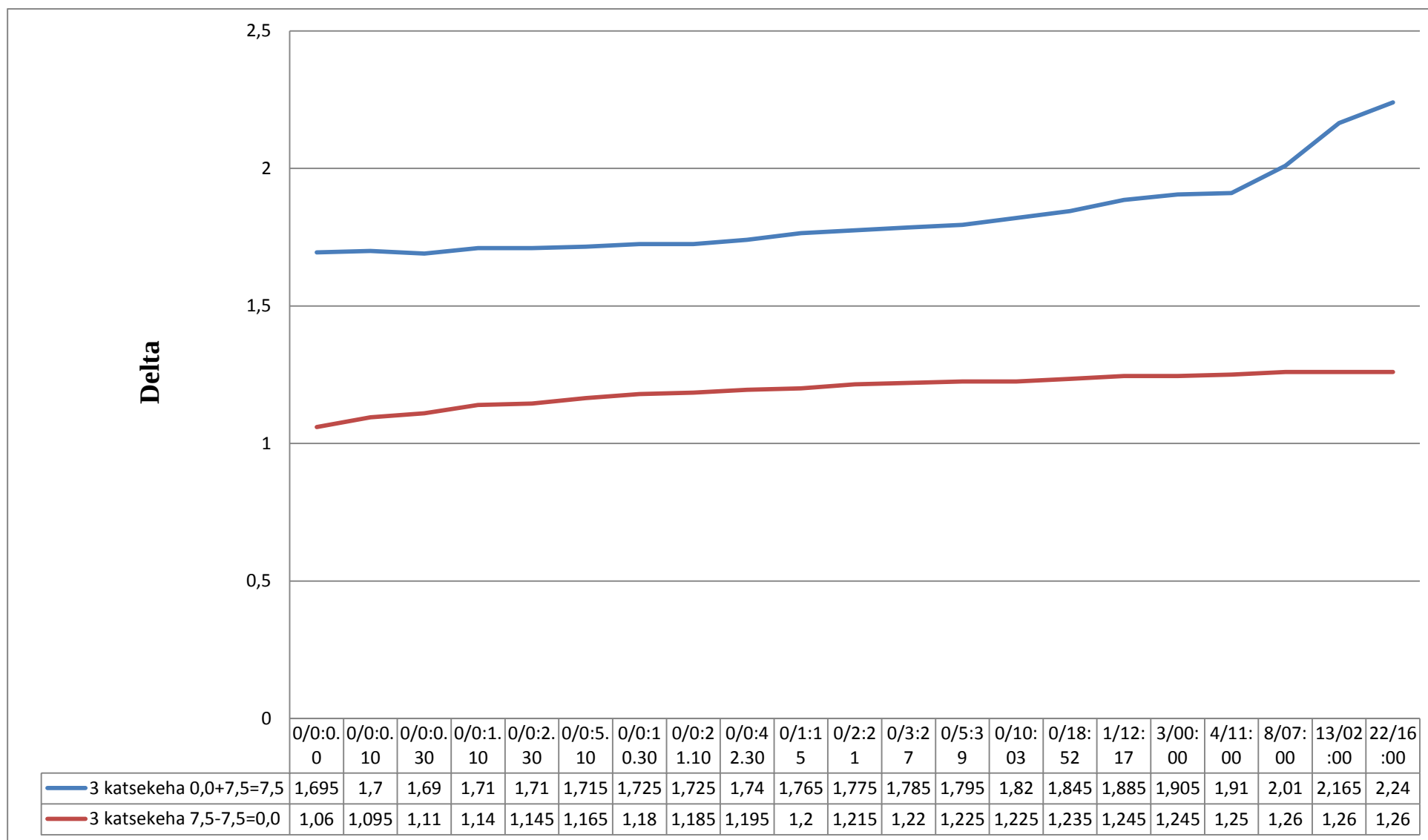
Joonis 10. I katsekeha pikaajaline koormamine



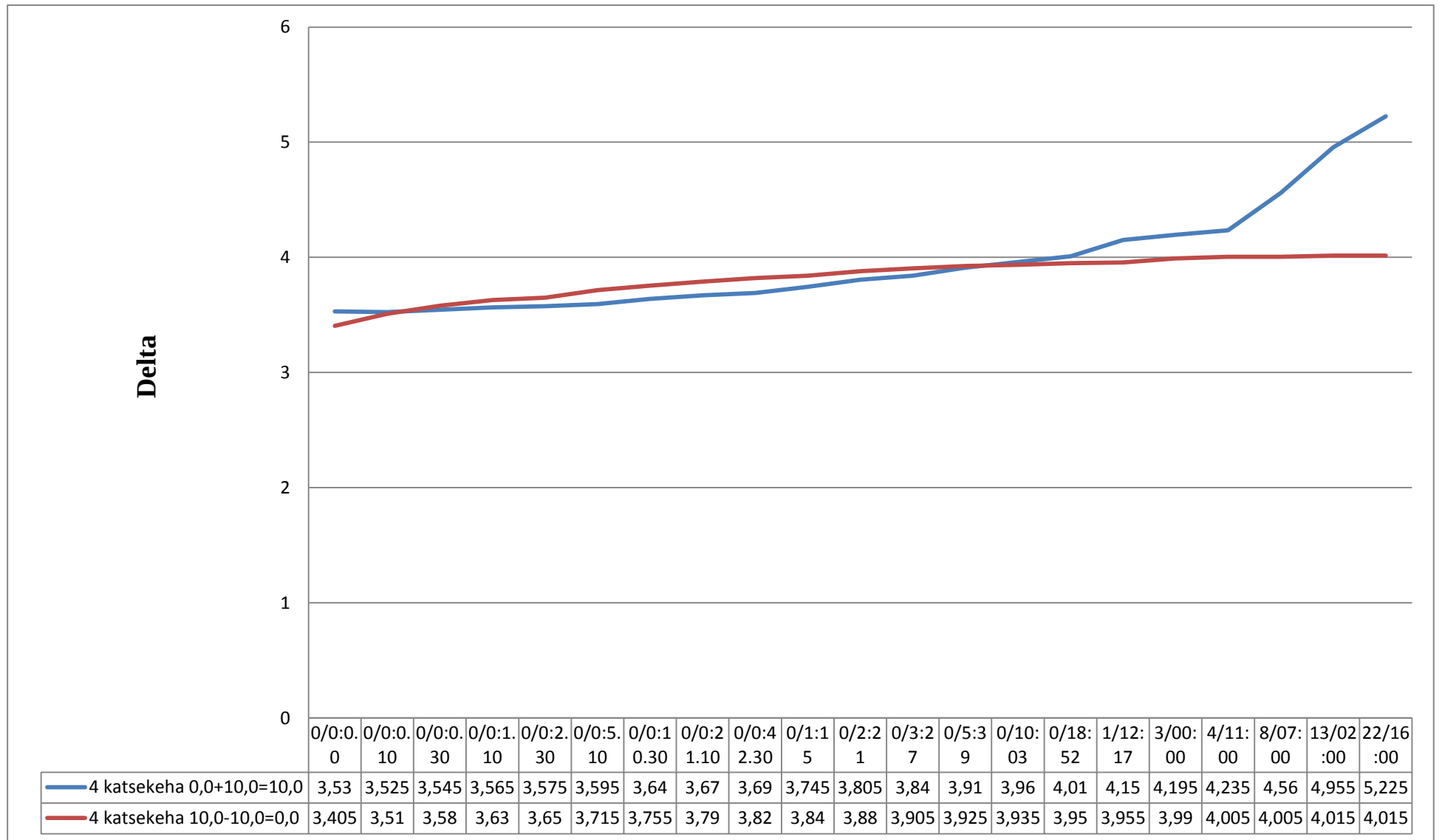
Joonis 11. II katsekeha pikaajaline koormamine



Joonis 12. III katsekeha pikaajaline koormamine



Joonis 13. IV katsekeha pikaajaline koormamine



3 KATSEKEHADE TUGEVUS



Foto 2. Katsekeha purustamine

Purustava jõu P (kN) ja maksimaalse paigutise (mm), katsekehade purustamise hetkel, leidmiseks kasutasime surveseadet (Foto 2) koos programmiga WP 300.20 (Foto 4). Koormavad jõud rakendati samadesse punktidesse (Foto 3), mis olid kasutuses katsekehade lühiajalistel ja pikaajalistel koormamistel (Joonis 1). Saadud tulemuste põhjal (Lisa 1-Lisa 8) on meil võimalik leida katsekehade purustavad pinged järgneva valemi (20) järgi

$$\sigma = \frac{P * a * 6}{4 * b h^2}, \quad (20)$$

kus

P [N] - purustav jõud (Lisa 1-Lisa 8);

a [mm] - jõu õlg (150 mm);

b [mm] - katsekeha laius (30 mm);

h [mm] - katsekeha kõrgus (12 mm).

Tabel 4. Valemi 20 abil leitud männipuidust katsekehade purustav pinge

Katsekeha nr	Purustav pinge σ (MPa)
1	48,96
2	49,43
3	73,39
4	53,44
5	58,44
6	69,43
7	53,91
8	41,46



Foto 3. Koormuse rakendamine

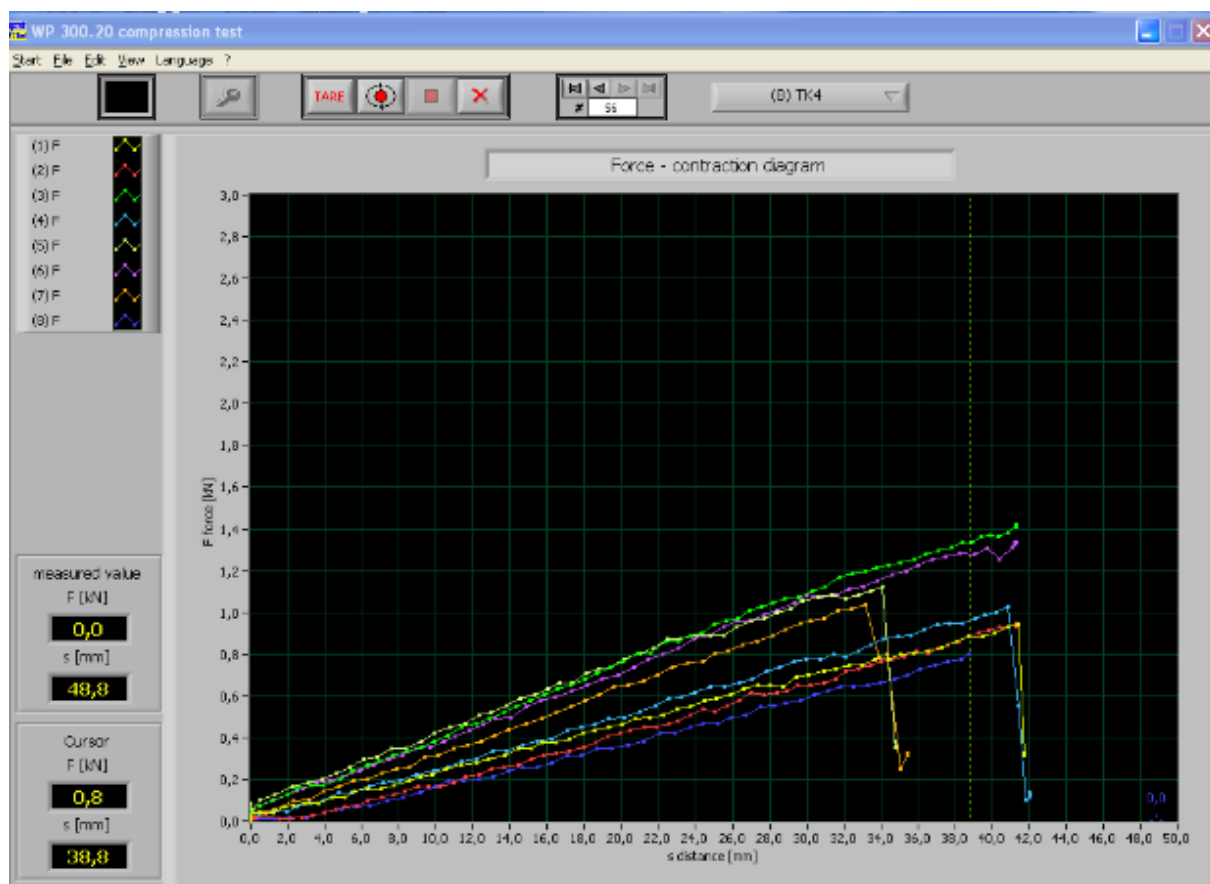


Foto 4. Koormatud katsekehade tulemuste graafik

KOKKUVÕTE

Käesolevas lõputöös käsitletakse puitkonstruktsioonide paigutiste katselist uurimist. Klassikalise ehitusmehaanika ja tugevusõpetuse teooria põhineb Hooke'i seadusel, mis sätestab lineaarse seose koormuse ja selle poolt põhjustatud paigutise vahel. Paraku see seadus, mis sobib küllaltki väikeste mööndustega kasutamiseks mineraalsete materjalide ja terase puhul, on piiratud paljude lisatingimustega, kui koormatavaks materjalideks on polümeerid. Selgub, et ka puit ja puidupõhised materjalid, mille oluliseks koostisosaks on looduslik polümeer tselluloos, deformeerub pikaajalisel koormamisel purustava koormuse lähedase jõuga mittelineaarselt. Lineaarne seos koormuse ja paigutise vahel kehtib vaid suhteliselt väikeste koormuste lühiajalisel rakendamisel.

Vaadeldavas lõputöös tehti esimene kokkuvõte TTK ehitusteaduskonna ehitiste õppetoolis tehtud pikaajalisest eksperimentaalsest tööst puitvarraste deformatiivsete omaduste uurimisest. Vaadeldi olukordi, kui muutuvateks suurusteks olid koormuse kestvus, koormuse rakendamise viis ja suurus. Kehtivates normdokumentides on puidu füüsikalis-mehaaniliste omaduste muutust ajas reglementeeritud vaid ligikaudsete arvutusvõtetega, kasutades selleks modifikatsioonitegurit, mille abil teatud olukordades muudetakse arvutustugevuse ja elastsusmooduli väärtusi. Samas on teada, et puittarindite paigutised aja jooksul suurenevad, kusjuures paigutise muutus on ajas sumbuva protsess, mis teatud aja möödudes kustub. On üldiselt teada, et ajas sumbuvate deformatsiooniprotsesside kirjeldamiseks on sobiv kasutada võrrandeid, kus ajateljel on kasutusel logaritmskaala. Nii oli TTK ehitusteaduskonnas plaanitud korraldada pikaajaline eksperiment, et leida puidu füüsikalis-mehaaniliste näitajate muutusi kirjeldatavatesse võrranditesse vajalikke parameetreid.

Katsekehadeks olid männipuidust 600 mm arvutusliku pikkusega vardad ristlõikega 12×30 mm. Katsetuste läbiviimiseks oli projekteeritud ja ehitatud spetsiaalne stend, kus sai korraga koormata 8 proovikeha. Koormamiseks olid tarreeritud raskused, mida paigutati selliselt, et varda 300 mm pikkusel keskmisel lõigul tekkis puhtpaine olukord. Paindemomendi poolt põhjustatud varda läbivajumisipaigutist mõõdeti mehaaniliste paigutisanduritega vastavalt ajagraafikule kogu katseperioodi jooksul. Katseperioodi summaarne pikkus kestis neli aastat.

Katseandmete töötlemiseks koostati Excel-programmis algoritm, mille tulemusena saadi paigutise graafikud, kus ajateljeks oli logaritmiskaala. Vastavalt eeldusele, et paigutise juurdekasv ajas väheneb, saime logaritmiskaalal paigutise graafiku, mis oli lähedane sirgjoonele.

Pikaajalisest katsest võime teha mõned olulised järeldused:

- 37

SUMMARY

This thesis deals with experimental research of timber structural displacements. The classical theory of structural mechanics and mechanics of materials is based on Hooke's law, which provides for the linear relationship between the load and the induced displacement. Unfortunately, the above-mentioned law, suitable for use in the case of relatively small deviations of mineral materials and steel, is limited by an array of additional conditions if the loaded materials are polymers. It also turns out that timber and wood-based materials, an important component of which is natural polymer cellulose, deforms under long-term load with a force similar to destructive load in a non-linear manner. The linear relationship between the load and the displacement applies only in the case of a short-term implementation of relatively small loads.

The given thesis for the first time summarises a long-term experimental research of the study of the deformation properties of timber poles carried out by the Engineering Faculty (Chair of Construction) of Tallinn University of Applied Sciences (TTK). Such cases have been looked into, where load duration as well as the loading method and size represented the alternant. The existing normative documents have regulated the changes in the physico-mechanical properties of timber solely applying approximate computational techniques, using a modification factor that enables to amend the values of strength calculation and elastic modulus in some cases. However, it is also known that timber structural displacements tend to increase over time, whereas the change in displacements pertaining to time is a fading process, which goes off after a certain period time. It is generally known that to describe the fading deformation processes the equations where the time axis uses the logarithmic scale are suitable for use. Thus, the Engineering Faculty of TTK intended to carry out a long-term experiment to find the changes in the physico-mechanical characteristics of timber in the required parameters of the equations.

The specimens were pinewood bars with the approximate length of 600 mm and the cross-section of 12×30 mm. To conduct the experiments, a special stand has been designed and built to bear a simultaneous load of 8 samples. Tarred loads have been placed in such a way

that in the middle section of the pole's length (300 mm) a pure bending condition occurred. The dip displacement of the pole caused by the bending moment was measured with a mechanic displacement sensor in accordance with the time schedule throughout the entire experimental period. The total length of the experimental period amounted to four years. It is known that in similar conditions mechanical sensors are more reliable than the electrical and electronic ones. Electrical sensors have been used occasionally.

To process experimental data, an algorithm has been developed in Microsoft Excel; as a result, displacement graphs have been obtained with the logarithmic scale acting as the timeline. Under the assumption that the increment of displacements decreases over time, we got a displacement graph on the logarithmic scale, which was close to a straight line.

Our equations for the reduction of calculation strength and elastic modulus in accordance with load duration and extent of displacement contain dimensionless parameters α (to find the value of calculation strength) and β (to find the value of elastic modulus). Applying the experimental results obtained using the dimensionless parameters, we developed an algorithm containing extents of displacement at the moment of loading and at a random point in time. Once α and β were found, the expected pinewood strength and displacement could be found at a predictable random point in time using the algorithms developed by us. The algorithm for calculation developed by us complies with the experimental results.

The long-term experiment allows us to make some important conclusions:

1. The modification factors provided for by the normative documents and advisable for use in strength and displacement calculations are broadly correct, but the accuracy class (only one significant digit!) in the case of more accurate calculations is insufficient.
2. In our opinion, the calculation rules for timber constructions with long-term constant load in the strength and displacement calculations provided for by the normative documents are too strict. According to our experimental results, pinewood strength and stiffness properties are significantly better than the ones with the corresponding likelihood criterion recommended by the normative documents.
3. For technical reasons, the series of experiments using wood in a humid environment remained unfinished. The experiments on timber featuring durable load with different moisture regimes could be initiated anew.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Rohusaar. J, Tugevusõpetus ehitajale, Tallinn, 2008.
- [2] Rohusaar. J, Käsikirjalised materjalid, Tallinn, 2014.
- [3] Rohusaar. J, Ehitusstaatika (käsikiri), Tallinn, 2014.
- [4] „Mõõteseade Mitutoyo,“ [Võrgumaterjal]. Available:
<http://ecatalog.mitutoyo.com/ABSOLUTE-Digimatic-Indicator-ID-U-Series-575-with-Slim-and-Simple-Design-C1203.aspx>. [Kasutatud 12. aprill, 2014].
- [5] Allikas, L, Puit ja plastmasskonstruktsioonid, Tallinn: Valgus, 1972.
- [6] В. Н. Уголев, Испытания древесины и древесных материалов, Москва, 1965.
- [7] Peipmann, T, Ehituskonstruktori käsiraamat. 3. osa, Tallinn: Ehitame, 2003.
- [8] EHITUSTEAVE, EESTI, EPN 5.1.1, PUITKONSTRUKTSIOONID, Osa 1.1: Üldised juhendid ja hoonete juhendid, 2001.

LISAD

Lisa 1. I lühiajalise katsekeha purustava jõu leidmine

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:22:20	0,024	0
12:22:21	0,024	0,01
12:22:25	0,146	0,038
12:22:26	0,61	0,038
12:22:27	1,245	0,038
12:22:28	1,782	0,067
12:22:29	2,319	0,077
12:22:30	2,93	0,086
12:22:31	3,687	0,086
12:22:32	4,37	0,115
12:22:33	5,078	0,115
12:22:34	5,615	0,144
12:22:35	6,299	0,153
12:22:36	7,031	0,153
12:22:37	7,764	0,173
12:22:38	8,545	0,192
12:22:39	9,18	0,211
12:22:40	9,814	0,221
12:22:41	10,571	0,249
12:22:42	11,328	0,268
12:22:43	12,158	0,278
12:22:44	12,817	0,297
12:22:45	13,696	0,316
12:22:46	14,429	0,345
12:22:47	15,112	0,345
12:22:48	15,723	0,374
12:22:49	16,479	0,374
12:22:50	17,187	0,393
12:22:51	17,896	0,422
12:22:52	18,579	0,431
12:22:53	19,36	0,451
12:22:54	20,044	0,46
12:22:55	20,776	0,489
12:22:56	21,509	0,499

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:22:57	22,29	0,508
12:22:58	23,022	0,537
12:22:59	23,73	0,546
12:23:00	24,512	0,575
12:23:01	25,122	0,585
12:23:02	25,879	0,604
12:23:03	26,611	0,633
12:23:04	27,368	0,652
12:23:05	28,027	0,652
12:23:06	28,76	0,642
12:23:07	29,443	0,69
12:23:08	30,103	0,7
12:23:09	30,908	0,719
12:23:10	31,592	0,729
12:23:11	32,275	0,748
12:23:12	33,008	0,748
12:23:13	33,667	0,777
12:23:14	34,375	0,777
12:23:15	35,034	0,796
12:23:16	35,791	0,805
12:23:17	36,597	0,815
12:23:18	37,329	0,834
12:23:19	38,086	0,863
12:23:20	38,745	0,882
12:23:21	39,502	0,882
12:23:22	40,161	0,901
12:23:23	40,845	0,93
12:23:24	41,382	0,94
12:23:26	41,406	0,94
12:23:27	41,406	0,94
12:23:25	41,431	0,94

Lisa 2. II lühiajalise katsekeha purustava jõu leidmine

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:27:06	0,024	0,01
12:27:05	0,049	0,01
12:27:07	0,049	0,01
12:27:08	0,049	0,019
12:27:09	0,244	0,019
12:27:10	0,854	0,029

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:27:11	1,562	0,01
12:27:12	2,124	0,01
12:27:13	2,759	0,019
12:27:14	3,32	0,029
12:27:15	3,979	0,038
12:27:16	4,565	0,058
12:27:17	5,103	0,067
12:27:18	5,737	0,077
12:27:19	6,323	0,096
12:27:20	7,08	0,115
12:27:21	7,715	0,125
12:27:22	8,301	0,144
12:27:23	9,009	0,163
12:27:24	9,595	0,163
12:27:25	10,254	0,163
12:27:26	10,937	0,182
12:27:27	11,572	0,211
12:27:28	12,305	0,221
12:27:29	12,988	0,249
12:27:30	13,647	0,259
12:27:31	14,404	0,268
12:27:32	15,137	0,297
12:27:33	15,796	0,316
12:27:34	16,479	0,326
12:27:35	17,212	0,336
12:27:36	17,969	0,355
12:27:37	18,604	0,374
12:27:38	19,263	0,403
12:27:39	19,922	0,422
12:27:40	20,508	0,431
12:27:41	21,24	0,451
12:27:42	21,924	0,451
12:27:43	22,534	0,47
12:27:44	23,071	0,479
12:27:45	23,706	0,508
12:27:46	24,39	0,537
12:27:47	25,049	0,527
12:27:48	25,708	0,556
12:27:49	26,343	0,575
12:27:50	27,002	0,614
12:27:51	27,71	0,604
12:27:52	28,394	0,614
12:27:53	28,955	0,623

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:27:54	29,541	0,652
12:27:55	30,225	0,652
12:27:56	30,933	0,662
12:27:57	31,567	0,681
12:27:58	32,104	0,719
12:27:59	32,788	0,729
12:28:00	33,447	0,748
12:28:01	34,009	0,767
12:28:02	34,619	0,777
12:28:03	35,229	0,786
12:28:04	35,864	0,815
12:28:05	36,523	0,805
12:28:06	37,134	0,825
12:28:07	37,598	0,844
12:28:08	38,232	0,863
12:28:09	38,77	0,892
12:28:10	39,307	0,901
12:28:11	39,844	0,911
12:28:12	40,381	0,93
12:28:13	40,869	0,93
12:28:14	41,284	0,94
12:28:19	41,309	0,949
12:28:20	41,309	0,94
12:28:21	41,333	0,93
12:28:15	41,357	0,949

Lisa 3. III lühiajalise katsekeha purustava jõu leidmine

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:33:02	0,024	0
12:33:04	0,024	0
12:33:06	0,024	0,038
12:33:08	0,024	0,048
12:33:09	0,537	0,077
12:33:10	1,172	0,096
12:33:11	1,978	0,125
12:33:12	2,539	0,153
12:33:13	3,271	0,173
12:33:14	3,955	0,173
12:33:15	4,81	0,201
12:33:16	5,493	0,24

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:33:17	6,299	0,268
12:33:18	6,909	0,288
12:33:19	7,69	0,316
12:33:20	8,447	0,336
12:33:21	9,229	0,355
12:33:22	9,912	0,383
12:33:23	10,645	0,412
12:33:24	11,377	0,451
12:33:25	12,158	0,47
12:33:26	12,866	0,489
12:33:27	13,647	0,518
12:33:28	14,282	0,546
12:33:29	15,063	0,575
12:33:30	15,82	0,604
12:33:31	16,528	0,633
12:33:32	17,261	0,652
12:33:33	18,018	0,681
12:33:34	18,701	0,709
12:33:35	19,385	0,738
12:33:36	20,093	0,767
12:33:37	20,874	0,805
12:33:38	21,558	0,805
12:33:39	22,339	0,863
12:33:40	23,096	0,863
12:33:41	23,706	0,892
12:33:42	24,341	0,901
12:33:43	25,024	0,94
12:33:44	25,635	0,959
12:33:45	26,27	0,968
12:33:46	26,929	1,007
12:33:47	27,563	1,026
12:33:48	28,174	1,045
12:33:49	28,833	1,064
12:33:50	29,59	1,074
12:33:51	30,298	1,103
12:33:52	30,981	1,122
12:33:53	31,738	1,17
12:33:54	32,495	1,189
12:33:55	33,179	1,198
12:33:56	33,789	1,218
12:33:57	34,375	1,227
12:33:58	35,083	1,237
12:33:59	35,815	1,256

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:34:00	36,426	1,275
12:34:01	37,134	1,294
12:34:02	37,793	1,313
12:34:03	38,379	1,333
12:34:04	38,892	1,333
12:34:05	39,453	1,361
12:34:06	39,868	1,371
12:34:07	40,332	1,361
12:34:08	40,869	1,381
12:34:09	41,284	1,419
12:34:10	41,284	1,419
12:34:11	41,284	1,419
12:34:12	41,284	1,409
12:34:13	41,284	1,419
12:34:14	41,284	1,409

Lisa 4. IV lühiajalise katsekeha purustava jõu leidmine

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:36:37	0,024	0
12:36:38	0,024	0,01
12:36:40	0,464	0,029
12:36:41	1,196	0,048
12:36:42	1,904	0,048
12:36:43	2,49	0,067
12:36:44	3,223	0,086
12:36:45	3,931	0,096
12:36:46	4,736	0,134
12:36:47	5,469	0,134
12:36:48	6,348	0,163
12:36:49	7,178	0,182
12:36:50	8,081	0,192
12:36:51	8,984	0,221
12:36:52	9,839	0,24
12:36:53	10,62	0,259
12:36:54	11,401	0,288
12:36:55	12,207	0,297
12:36:56	13,062	0,336
12:36:57	13,818	0,336
12:36:58	14,673	0,364
12:36:59	15,479	0,383

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:37:00	16,235	0,393
12:37:01	17,065	0,431
12:37:02	17,822	0,451
12:37:03	18,53	0,46
12:37:04	19,336	0,489
12:37:05	20,166	0,499
12:37:06	20,996	0,527
12:37:07	21,826	0,556
12:37:08	22,583	0,585
12:37:09	23,291	0,594
12:37:10	23,999	0,614
12:37:11	24,805	0,642
12:37:12	25,586	0,642
12:37:13	26,367	0,662
12:37:14	27,051	0,681
12:37:15	27,832	0,719
12:37:16	28,54	0,738
12:37:17	29,297	0,767
12:37:18	29,98	0,777
12:37:19	30,713	0,777
12:37:20	31,445	0,796
12:37:21	32,104	0,786
12:37:22	32,812	0,815
12:37:23	33,472	0,844
12:37:24	34,155	0,872
12:37:25	34,912	0,882
12:37:26	35,62	0,892
12:37:27	36,328	0,92
12:37:28	37,061	0,94
12:37:29	37,695	0,949
12:37:30	38,379	0,949
12:37:31	39,087	0,968
12:37:32	39,648	0,988
12:37:33	40,186	0,997
12:37:34	40,845	1,026

Lisa 5. I pikaajalise katsekeha purustava jõu leidmine

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:39:39	0,024	0
12:39:43	0,024	0,038

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:39:44	0,024	0,048
12:39:46	0,513	0,105
12:39:47	1,294	0,125
12:39:48	2,246	0,163
12:39:49	3,101	0,182
12:39:50	3,857	0,201
12:39:51	4,639	0,23
12:39:52	5,347	0,259
12:39:53	6,104	0,297
12:39:54	6,836	0,307
12:39:55	7,617	0,345
12:39:56	8,35	0,345
12:39:57	9,204	0,383
12:39:58	9,937	0,422
12:39:59	10,791	0,451
12:40:00	11,572	0,47
12:40:01	12,28	0,508
12:40:02	12,964	0,518
12:40:03	13,794	0,556
12:40:04	14,551	0,585
12:40:05	15,332	0,604
12:40:06	16,064	0,633
12:40:07	16,699	0,662
12:40:08	17,334	0,662
12:40:09	18,115	0,709
12:40:10	18,774	0,729
12:40:11	19,409	0,738
12:40:12	20,142	0,777
12:40:13	21,021	0,805
12:40:14	21,704	0,825
12:40:15	22,485	0,872
12:40:16	23,218	0,872
12:40:17	24,048	0,892
12:40:18	24,829	0,892
12:40:19	25,537	0,892
12:40:20	26,245	0,93
12:40:21	26,978	0,959
12:40:22	27,734	0,968
12:40:23	28,394	0,997
12:40:24	29,126	1,016
12:40:25	29,785	1,055
12:40:26	30,615	1,074
12:40:27	31,348	1,083

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:40:28	32,104	1,064
12:40:29	32,812	1,083
12:40:30	33,423	1,103
12:40:31	34,082	1,122

Lisa 6. II pikaajalise katsekeha purustava jõu leidmine

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:42:19	0,024	0
12:42:20	0,024	0
12:42:22	0,024	0
12:42:23	0,024	0,038
12:42:26	0,439	0,077
12:42:27	1,245	0,105
12:42:28	2,026	0,125
12:42:29	2,808	0,153
12:42:30	3,54	0,182
12:42:31	4,224	0,192
12:42:32	4,98	0,211
12:42:33	5,884	0,24
12:42:34	6,665	0,268
12:42:35	7,446	0,297
12:42:36	8,203	0,316
12:42:37	8,911	0,345
12:42:38	9,692	0,355
12:42:39	10,425	0,383
12:42:40	10,986	0,403
12:42:41	11,792	0,431
12:42:42	12,549	0,46
12:42:43	13,232	0,489
12:42:44	14,038	0,499
12:42:45	14,868	0,546
12:42:46	15,674	0,575
12:42:47	16,455	0,594
12:42:48	17,31	0,623
12:42:49	18,164	0,652
12:42:50	18,97	0,681
12:42:51	19,849	0,7
12:42:52	20,654	0,738
12:42:53	21,484	0,777
12:42:54	22,241	0,796
12:42:55	23,096	0,825
12:42:56	23,877	0,872

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:42:57	24,731	0,892
12:42:58	25,488	0,93
12:42:59	26,245	0,959
12:43:00	26,953	0,959
12:43:01	27,686	0,988
12:43:02	28,442	1,007
12:43:03	29,321	1,045
12:43:04	30,054	1,083
12:43:05	30,811	1,074
12:43:06	31,567	1,083
12:43:07	32,275	1,112
12:43:08	33,081	1,122
12:43:09	33,813	1,15
12:43:10	34,57	1,179
12:43:11	35,352	1,198
12:43:12	36,011	1,227
12:43:13	36,792	1,256
12:43:14	37,524	1,266
12:43:15	38,257	1,285
12:43:16	39,062	1,275
12:43:17	39,746	1,304
12:43:18	40,405	1,256
12:43:19	41,113	1,313
12:43:22	41,235	1,323
12:43:23	41,235	1,323
12:43:24	41,235	1,323
12:43:21	41,26	1,333
12:43:20	41,284	1,333

Lisa 7. III pikaajalise katsekeha purustava jõu leidmine

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:45:11	0,024	0
12:45:13	0,024	0
12:45:15	0,439	0,048
12:45:16	1,343	0,058
12:45:17	2,344	0,096
12:45:18	3,125	0,105
12:45:19	3,931	0,144
12:45:20	4,785	0,163
12:45:21	5,542	0,192

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:45:22	6,323	0,201
12:45:23	7,104	0,23
12:45:24	7,861	0,249
12:45:25	8,594	0,259
12:45:26	9,375	0,307
12:45:27	10,132	0,316
12:45:28	10,962	0,345
12:45:29	11,719	0,364
12:45:30	12,451	0,383
12:45:31	13,135	0,412
12:45:32	13,916	0,441
12:45:33	14,868	0,47
12:45:34	15,698	0,489
12:45:35	16,479	0,518
12:45:36	17,236	0,546
12:45:37	18,042	0,575
12:45:38	18,823	0,604
12:45:39	19,604	0,642
12:45:40	20,361	0,652
12:45:41	21,191	0,671
12:45:42	21,948	0,7
12:45:43	22,754	0,738
12:45:44	23,584	0,757
12:45:45	24,39	0,767
12:45:46	25,049	0,805
12:45:47	25,781	0,815
12:45:48	26,562	0,844
12:45:49	27,319	0,863
12:45:50	28,125	0,892
12:45:51	28,882	0,92
12:45:52	29,639	0,949
12:45:53	30,2	0,959
12:45:54	30,933	0,968
12:45:55	31,714	1,007
12:45:56	32,422	1,016
12:45:57	33,203	1,035

Lisa 8. IV pikaajalise katsekeha purustava jõu leidmine

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:47:56	0,366	0,01

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:47:57	1,27	0,01
12:47:58	2,1	0,019
12:47:59	3,052	0,019
12:48:00	3,931	0,038
12:48:01	4,883	0,058
12:48:02	5,664	0,067
12:48:03	6,445	0,077
12:48:04	7,349	0,096
12:48:05	8,252	0,115
12:48:06	9,131	0,134
12:48:07	9,961	0,163
12:48:08	10,718	0,192
12:48:09	11,475	0,192
12:48:10	12,305	0,201
12:48:11	13,11	0,211
12:48:12	13,892	0,24
12:48:13	14,697	0,259
12:48:14	15,454	0,259
12:48:15	16,235	0,278
12:48:16	17,065	0,316
12:48:17	17,847	0,316
12:48:18	18,677	0,345
12:48:19	19,434	0,345
12:48:20	20,337	0,364
12:48:21	21,216	0,383
12:48:22	22,07	0,422
12:48:23	22,876	0,422
12:48:24	23,682	0,451
12:48:25	24,438	0,47
12:48:26	25,22	0,47
12:48:27	25,903	0,499
12:48:28	26,709	0,508
12:48:29	27,49	0,546
12:48:30	28,198	0,556
12:48:31	28,857	0,566
12:48:32	29,614	0,575
12:48:33	30,42	0,604
12:48:34	31,152	0,623
12:48:35	31,812	0,642
12:48:36	32,568	0,642
12:48:37	33,301	0,652
12:48:38	33,984	0,662
12:48:39	34,717	0,681

Aeg	Paigutis	Jõud
h:min:s	mm	KN
12:48:40	35,425	0,7
12:48:41	36,157	0,729
12:48:42	36,914	0,748
12:48:43	37,622	0,767
12:48:44	38,354	0,777
12:48:49	38,745	0,796
12:48:46	38,77	0,796
12:48:47	38,77	0,796
12:48:48	38,77	0,796
12:48:45	38,794	0,796