



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Peep Pihlapson**

**PUIT-METALL SÕRESTIKPOSTIDE JA PUIT-BETOON  
KOMPOSIIT SEINAPANEELIDE KATSETUSED NING ANALÜÜS**

TESTING AND ANALYSIS OF TIMBER-METAL LATTICE GIRDERS  
AND TIMBER-CONCRETE COMPOSITE WALL PANELS

Magistritöö  
Maaehituse õppekava

Juhendaja: vanemspetsialist Martti-Jaan Miljan, MSc

Tartu 2015

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Peep Pihlapson		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetused ning analüüs			
Lehekülgi: 104	Jooniseid: 46	Tabeleid: 7	Lisasid: 7
Osakond:	Maaehituse osakond		
Uurimisvaldkond:	Sõrestikpostid ja puit-betoon komposiitkonstruktsioonid		
Juhendaja(d):	Martti-Jaan Miljan		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu 2015		
<p>Viimase paarikümne aasta jooksul on märgatavalt suurenenud erinevate komposiitkonstruktsioonide tootmine. Selle põhjuseks võib pidada ehitussektori pidevat nõudlust tugevamate, aga samas kergemate ja odavamate konstruktsioonide järele.</p> <p>Antud töö eesmärgiks oli uurida puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide survekandevõimet ja sõrestikpostide ogaplaatide nihkekandevõimet ning võrrelda saadud katsetulemusi omavahel, teoreetiliste puitposti arvutustega ning arvutiprogrammiga saadutega. Lisaks oli vaatluse all puidu ja betooni omavaheliste kinnitite nihkumise leidmine, et anda hinnang konstruktsiooni komposiitkäitumisele.</p> <p>Katseid viidi läbi Eesti Maaülikooli ehituskonstruktsioonide laboris. Katsete läbiviimiseks koostati katseskeemid ja -metoodikad katsekehade staatiliseks koormamiseks ja deformatsioonide mõõtmiseks. Koormust rakendati katsekehadele survesilindriga Lukas LZM 25-200-ga.</p> <p>Magistritöö tulemusena saadi teada Kartro ja Posi sõrestikpostide ning puit-betoon komposiit seinapaneelide kandevõimed. Katse tulemustest selgus, et Posi sõrestikpostide katsekehad suutsid vastu võtta kõige suuremat survejõudu. Betoonplaadi lisamine sõrestikpostide külge andis seinapaneelile suurema jäikuse ning suurendas konstruktsiooni survekandevõimet. Sõrestikpostide ogaplaatide nihketugevuse katsetes selgus, et Posi sõrestikposti nihketugevused on umbes 2 korda suuremad, kui Kartro sõrestikpostide keskmine nihketugevus. Nihkekinnitid suutsid tagada piisavalt jäiga ühenduse puidu ja betoonpaneeli vahel, et toimuks osaline komposiitkäitumine kahe materjali vahel.</p>			
Märksõnad: puit-betoon komposiitkonstruktsioon, puit-metall sõrestikpost, survekandevõime, nihketugevus.			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Peep Pihlapson		Specialty: Civil Engineering	
Title: Testing and analysis of timber-metal lattice girders and timber-concrete composite wall panels			
Pages: 104	Figures: 46	Tables: 7	Appendixes: 7
Department:	Department of Rural Building		
Field of research:	Lattice girders and timber-concrete composite structures		
Supervisors:	Martti-Jaan Miljan		
Place and date:	Tartu 2015		
<p>A different kind of composite structures manufacturing has increased considerably over the past few decades. The reason for this may consider to be the construction sector continuous increase for stronger, but at the same time for lighter and cheaper structures.</p> <p>The aim of the thesis was to investigate timber-metal lattice girders and timber-concrete composite wall panels compressive strength and lattice girders punched metal plate fasteners shear strength and compare test results to each other, theoretically calculated timber column ones and to those obtained with computer program. In addition, shear connectors slip between timber and concrete was measured to evaluate the behaviour of composite action.</p> <p>The tests were carried out in the construction laboratory of Estonian University of Life Sciences. To conduct tests the test plans and set-up had to be done to measure static loading and deformations of the test specimens. The load was applied to test specimens with single-acting cylinder Lukas LZM 25-200.</p> <p>By the results of the master thesis, compressive strength of Kartro and Posi lattice girders and timber-concrete composite wall panels were found. The test results showed that Posi lattice girders obtain the highest value of compressive force. Adding concrete plate onto the lattice girders increased wall panel rigidity and structure load carrying capacity in compression. Lattice girders punched metal plate fasteners slip and pull-out tests showed that Posi lattice girders shear strength is closely twice as large as Kartro lattice girders average shear strength. Shear connectors were able to provide a sufficiently rigid connection between timber and concrete that partial composite action occurred between the two materials.</p>			
<p>Keywords: timber-concrete composite structure, timber-metal lattice girders, compressive strength, shear strength.</p>			

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	6
1. ÜLEVAADE PUIT-BETOON KONSTRUKTSIOONIDEST .....	8
1.1 Ajalugu.....	8
1.2 Eelnevad uurimustööd .....	10
1.3 Puit-betoon komposiitkonstruktsioonid .....	13
1.4 Sõrestikpostidega seinte lahendused.....	14
1.5 Puit-betoon komposiitkonstruktsioonide eelised ja puudused.....	15
2. ARVUTUSTEORIID.....	16
2.1 Surutud saleda varda stabiilsus .....	16
2.2 Komposiitkonstruktsioonide arvutusteooriast üldiselt.....	20
2.3 Arvutiprogrammi andmete sisestamine .....	21
2.4 Kasutatavad materjalid ja nende karakteristikud omadused.....	24
2.4.1 Puit.....	24
2.4.2 Betoon.....	25
2.4.3 Ogaplaadid.....	25
2.5 Puitposti maksimaalse nõtkekoormuse arvutusteooria .....	28
2.5.1 Kartro sõrestikpostide katsekehade samaväärse puitposti arvutusnäide..	29
2.5.2 Posi sõrestikpostide katsekehade samaväärse puitposti arvutusnäide .....	31
3. PUIT-METALL SÕRESTIKPOSTIDE JA PUIT-BETOON KOMPOSIIT SEINAPANEELIDE KATSETUSED.....	34
3.1 Katsekehade kirjeldus .....	34
3.1.1 MiTek Posi kinnititega sõrestikpostid .....	34
3.1.2 ITW Industry Kartro kinnititega sõrestikpostid .....	35
3.1.3 Puit-betoon komposiit seinapaneelid.....	37
3.2 Katsete eesmärgid .....	38
3.3 Katsetametoodikad .....	39
4. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS .....	47
4.1 Nõtkekatse tulemused ja analüüs .....	47
4.2 Nihkekatse tulemused ja analüüs .....	51
4.3 Seinapaneeli komposiitkäitumise analüüsimine puidu ja betooni omavahelise nihkumise abil .....	53
5. KATSETEGA JA TEOREETILISTE ARVUTUSTEGA SAADUD TULEMUSTE ANALÜÜS .....	56

5.1	Kartro sõrestikpostide tulemuste võrdlus .....	56
5.2	Posi sõrestikpostide tulemuste võrdlus .....	58
5.3	Puit-betoon komposiit seinapaneelide tulemuste võrdlus.....	59
	KOKKUVÕTE .....	62
	KASUTATUD KIRJANDUS .....	64
	TESTING AND ANALYSIS OF TIMBER-METAL LATTICE GIRDERS AND TIMBER-CONCRETE COMPOSITE WALL PANELS .....	67
	LISAD .....	69
	Lisa 1. Programmiga Autodesk Robot Structural Analysis Professional saadud tulemused.....	70
	Lisa 2. Sõrestikpostide puitvööde niiskussisaldused ja ristlõike mõõtmised.....	75
	Lisa 3. Puit-betoon komposiit seinapaneelide katsekehade betoonplaadi paksused.....	76
	Lisa 4. Katsekehade joonised .....	77
	Lisa 5. Katsekehade purunemispildid.....	82
	Lisa 6. Nõtkekatsete üldised graafikud.....	88
	Lisa 7. Nihkekatsete üldised graafikud.....	100

## SISSEJUHATUS

Viimase paarikümne aasta jooksul on märgatavalt suurenenud erinevate komposiitkonstruktsioonide tootmine. Selle põhjuseks võib pidada ehitussektori pidevat nõudlust tugevamate, aga samas kergemate konstruktsioonide järele. Üheks selliseks konstruktsiooniks on ettevõtte ConcreTech OÜ toodetud ainulaadne TimBet seinapaneel, kus on ühendatud puit-metall sõrestikpostid ja betoonpaneel. Seinakonstruktsiooni soojustamiseks kasutatakse kinniste pooridega PUR vahtu, mille korral saadakse soojustpidav sein, kus külmasillad on minimaliseeritud.

Komposiitkonstruktsioonis on erinevad materjalid paigutatud nii, et iga materjal töötab talle just kõige kasulikumal viisil. See tähendab, et koormust hästi taluvad materjalid asuvad enam koormatud piirkonnas ning koormust halvasti taluvad, vähem koormatud piirkonnas. Seeläbi saab komposiitkonstruktsioonide valmistamisel ja kasutamisel säästa materjale ning saavutada samade ristlõike parameetrite juures suurem kandevõime. (Õiger 2006)

Kui algselt kasutati puit-betoon komposiit seinapaneele põllumajandushoonete ehitamisel, siis viimasel ajal on tendents läinud ühiskondlike- ja eluhoonete peale. Võrreldes traditsioonilise puitkarkasselaamuga, on puit-betoon komposiit seinapaneelidega hoonel ühendatud nii puidu kui ka betooni positiivsed omadused. Puit annab konstruktsioonile kerguse ja tugevuse, samas kui siseseinas paiknev betoonplaat suurendab seina jäikust, soojusinersti, tulekindlust ja müratakistust.

Antud töö eesmärgiks on uurida puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide survekandevõimet ja sõrestikpostide ogaplaatide nihkekandevõimet, võrrelda saadud katsetulemusi omavahel, teoreetiliste arvutustega ning arvutiprogrammiga saadutega. Lisaks on vaatluse all sõrestikpostide ja betoonplaadi omavaheliste kinnitite nihkumise leidmine, et anda hinnang konstruktsiooni komposiitkäitumisele.

Esimene peatükk koosneb kirjanduse ülevaatest. Tutvustatakse puit-betoon komposiitkonstruktsioonide ajalugu ning eelnevalt tehtud uurimustöid nii Eestis kui ka välismaal. Kirjeldatakse erinevaid puit-metall sõrestikpostidega konstruktsioonide

lahendusi ja kasutatavaid materjale. Lisaks võrreldakse puit-betoon komposiit seinakonstruktsiooni traditsioonilise puitsõrestikseinaga ja raudbetoon seinapaneelidega ning tuuakse välja eelised ja puudused.

Teises peatükis tutvustatakse surutud varraste kriitilise koormuse arvutusteooriat, kirjeldatakse puitposti maksimaalse nõtkekoormuse arvutusteooriat ning tuuakse kaks näidet katsetes kasutatud sõrestikpostidega samaväärsete monoliitpuidust postide kriitilise koormuse arvutustest. Kirjeldatakse katsekehade arvutuskeemide sisestamist lõplike elementide meetodit kasutavasse arvutiprogrammi ning kasutatavat analüüsi varianti.

Töö kolmandas peatükis tutvustatakse puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetamise meetodikat ja kavasad. Kirjeldatud on katsekehasid ja nendes kasutatavaid materjale.

Neljas peatükk hõlmab endas katsetulemuste võrdlust ja analüüsi. Võrreldud on erinevate katsekehade maksimaalseid koormuseid ja koormamise käigus mõõdetud katsekehade deformatsioone. Antud peatükis uuritakse ja analüüsitakse seinapaneeli puidu ja betoonplaadi komposiitkäitumist nihkekinnitite efektiivsuse abil.

Viiendas peatükis võrreldakse omavahel katsetulemusi, teoreetilisi arvutusi ja arvutiprogrammiga Autodesk Robot Structural Analysis saadud tulemusi. Lisaks konstruktsioonide kandepiiriseisundi nõuetele antakse ülevaade, millal kasutuspiiriseisundi nõue ei ole enam tagatud.

Autor tänab lõputöö juhendajat Martti-Jaan Miljanit, kes pakkus välja antud teema ja oli suureks abiks töö valmimisel. Lisaks soovib autor tänada kõiki inimesi, kes aitasid kaasa antud magistritöö koostamisel.

# 1. ÜLEVAADE PUIT-BETOON KONSTRUKTSIOONIDEST

## 1.1 Ajalugu

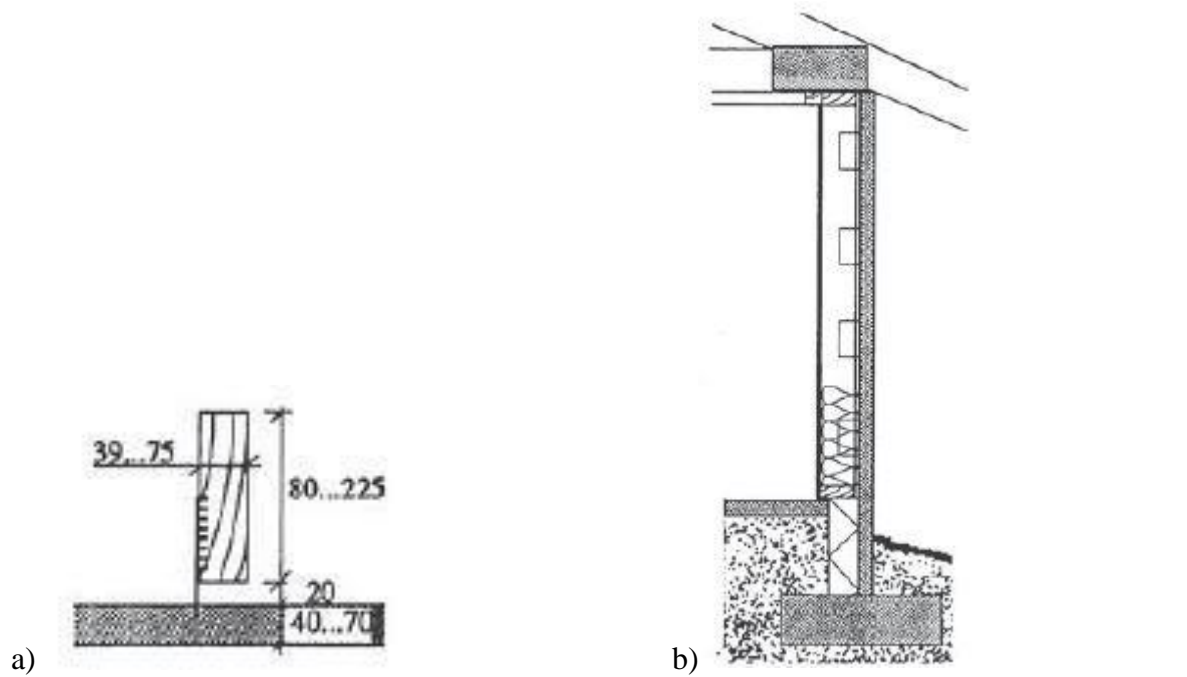
Puidust ja betoonist komposiit kandekonstruktsioone on uuritud juba umbes 80 aastat. Enamus uurimustöid puit-betoon komposiitkonstruktsioonidega on tehtud erinevat tüüpi nihkekinnititega, mis ühendavad omavahel betooni ja liimpuidust talasid. (Costa 2011: 5)

Puit-betoon komposiit seinapaneelid töötati algselt välja põllumajandushoonete seinakonstruktsioonis kasutamiseks. Siseseinas asuv betoonplaat on vastupidav loomade tekitatavate seinapinna vigastuste vastu, mis parandab hoone oodatavat eluiga. Lisaks hoiab betoonplaat ruumis ühtlasemat sisekliimat (suurendab seina soojusmahtuvust) ning suurendab seinakonstruktsiooni tulepüsivust. Välisseinas asuvad puitpostid vähendavad seina omakaalu ning vähendavad hoone ehituskulusid. Puit-betoon komposiitseinas on ühendatud mõlema materjali positiivsed omadused. (Hassan *et al.* 2012: 1)

Puit-betoon komposiit süsteemide arengule andis tõuke terase puudus peale Esimest ja Teist maailmasõda. C. Gerber (Gerber *et al.* 1993: 237) mainib naeltest ja teraslehtedest süsteemi, mis ühendas omavahel betoonplaati ja puitu. Taolise süsteemi patenteeris esmakordselt P. Müller 1922. aastal (Van der Linden 1999: 216).

Puit-betoon komposiit seinapaneeli konstruktsiooni, mida toodeti Soomes aastatel 1979-1985, kirjeldab Tuomo Poutanen oma artiklis. Antud seinapaneelis olid puit ja betoonpaneel omavahel ühendatud ogaplaatidega, mille otsad olid lühikeste ankurdusvarrastega paigaldatud betooni sisse. Sellega tagati jäigem ühendus betooni ja ogaplaadi vahel. Poutanen'i analüüsitud seinakonstruktsiooni tegi eriliseks veel asjaolu, et betoonplaat oli paigaldatud seina välisküljele ning puitpostide ja betoonpaneeli vahel oli 20 mm õhkvahe. Poutanen'i kirjeldatud puit-betoon komposiit seinapaneel on näidatud joonisel 1.1. (Poutanen 1988)





**Joonis 1.1.** Puit-betoon seinapaneeli a) horisontaalne lõige b) vertikaalne lõige (Poutanen 1988: 241)

Esimesed eluhooned Eestis, mis on ehitatud TimBet seinapaneelidest asuvad Kuru tänaval Tartus. Hooneteks on kaks kahekorruselist korterelamut, mis said valmis 2014. aasta lõpus (oktoobris ja detsembris). Mõlema korterelamu ehitusalune pind on 304 m<sup>2</sup> ja hoones on kuus 2- kuni 6-toalist korterit. Hoonetele taotletakse energiamärgist B. Joonisel 1.2 on näidatud Kuru tänava korterelamu ehitus puit-betoon komposiit seinapaneelidest.



**Joonis 1.2.** Kuru tn korterelamu ehitus TimBet seinapaneelidest (Kortermaja Kuru tn...)

## 1.2 Eelnevad uurimustööd

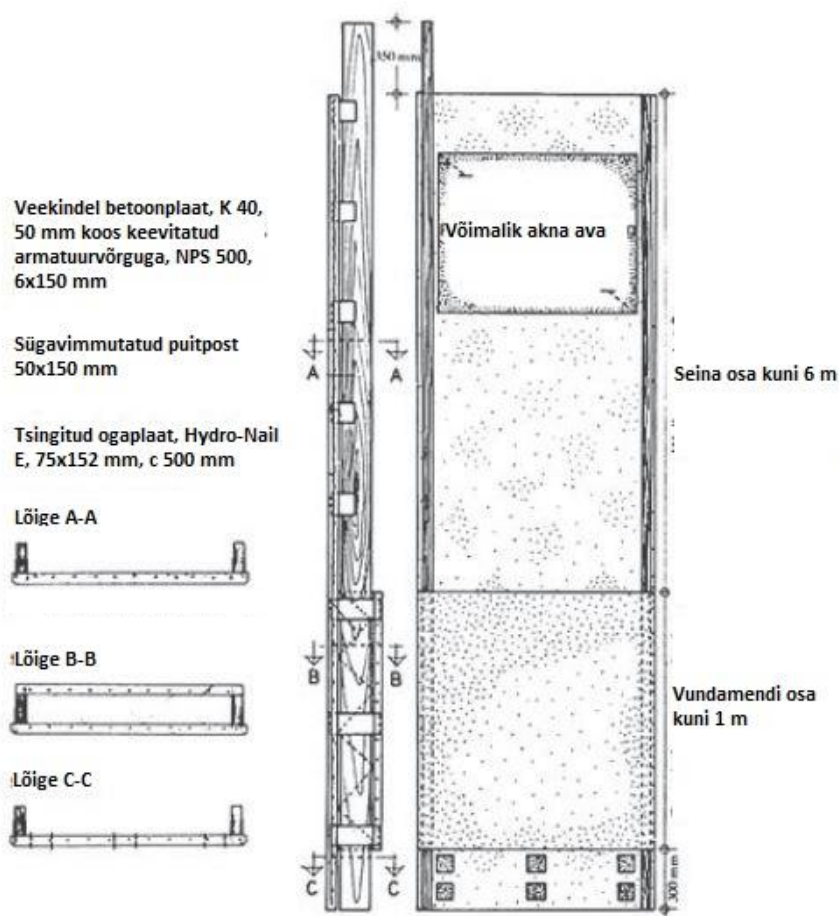
Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis uuris Oliver Mandre oma magistrیتööös ogaplaatidega ja Posi PS8 kinnititega sõrestikposti surve- ja paindekandevõimet erinevates koormuskombinatsioonides. Antud töös leiti, et Posi kinnititega sõrestikposti sisejõud jagunevad kõige võrdsemalt erinevates toesõlmedes ning antud posti kandevõime on mitmekordselt tagatud kõigis koormuskombinatsioonides. Lisaks võrreldi samas töös erinevate sõrestikpostide maksumust (ainult materjali kulust lähtuvalt) ning leiti, et puitmetall sõrestikpost on teistest sõrestikpostidest üle poole võrra odavam. (Mandre 2014: 50-75)

Eesti Maaülikoolis uuris Marko Otsus oma magistrیتööös puit-betoon komposiitpaneelide kandevõimet, võrdles deformatsioone posi-talaga sama koormuse korral ning andis arvutuseeskirjad puit-betoon komposiitpaneelide konstrueerimiseks. Antud lõputöös selgus, et puit-betoon komposiitpaneelis olid paindedeformatsioonid väiksemad kui eraldiseisva posi-tala korral. Nihkekinnititeks olevad ogaplaadid suutsid posi-tala ja betooni vahel tagada piisavalt jäiga ühenduse, et kahe elemendi (puidu ja betooni) vahel toimuks osaline komposiitkäitumine. (Otsus 2013)

2012. aastal uuris Tallinna Tehnikaülikooli tudeng Sandra Vahi oma magistrیتööös ristkülikulise sisselõike mõju tsentriliselt survele töötavatele puitpostide kandevõimele. Töö eesmärk oli erinevate mõõtmetega ja asukohtadega kohalike sisselõigete mõju hindamine survele töötavas postis. Lisaks oli eesmärk luua lihtsustatud arvutusmeetod, mis oleks rakendatav igapäevastes projekteerimistöodes ning leida lahendusi, kuidas sisselõikega posti tugevdada. Antud uurimustööst selgus, et ekstsentriline kohalik sisselõige vähendab märgatavalt puitposti kandevõimet ning selliseid nõrgestusi tuleks võimalusel vältida. Posti tugevdamise võimalusteks pakkus S. Vahi välja erinevate terasest tugevduste kasutamist kohalike sisselõigete juures. (Vahi 2012)

Ulf Arne Girhammar uuris seina elementi, mis koosnes 50 mm paksusest betoonplaadist ja kahest või enamast puitpostist mõõtmetega 50x150 mm (vt joonis 1.3). Puitpostid ja betoonplaat olid omavahel ühendatud Hydro-Nail E ogaplaatidega. Antud seinakonstruktsioonis oli projekteeritud koormuseid vastuvõtvaks osaks puitpostid. Selline seinaelement oli kasutuses peamiselt tootmis- ja põllumajandushoonete välisseina konstruktsioonis. Girhammar leidis, et ogaplaatide jäikus (nihkemoodul K) betoonplaadi ja

puitpostide vahel ning betoonplaadi käitumine (töötab kas survele või tõmbele) määrab ära terve komposiitkonstruktsiooni üldise tugevuse. Väga elastse ühenduse ( $K \rightarrow 0$ ) korral puudub kahe elemendi vahel komposiitkäitumine ning pinge tõttu tekivad raudbetoonplaati mõrad nii surve- kui ka tõmbepingetele töötavas plaadis. Jäikade nihkekinnitite ( $K \rightarrow \infty$ ) korral on elemendi käitumine sarnane täielikule komposiitkäitumisele ning sellisel juhul tekivad praod raudbetoonplaati vaid olukorras, kus plaadis mõjuvad tõmbepinged. Antud töös leiti, et seinaelemendi komposiitkäitumist saab parandada lisades rohkem ogaplaatkinnititeid nihkepungeid vastu võtma. (Girhammar 1978, 1984)



**Joonis 1.3.** Puit-betoon komposiit sein element (Girhammar 1984: 371)

Leander Bathon, Oliver Bletz ja Jens Schmidt uurisid puit-betoon komposiitkonstruktsiooni, kus betoonpaneel oli seotud puitsõrestikuga ning leidsid, et kombineerides eluhoonete ehituses puit-betoon konstruktsioonidega, väheneb puitu kasutades konstruktsiooni omakaalukoormus ning betoonplaadi kasutamine suurendab seinatulekindlust ja jäikust. (Bathon *et al.* 2006)

Enamus lähiajal tehtud uurimustöid puit-betoon komposiitkonstruktsioonidest on seotud talade ja põrandakonstruktsioonidega. Üks mahukamaid uurimustöid puit-betoon komposiit põrandatest on tehtud Luca Costa poolt. Tema töö eesmärgiks oli uurida tehases toodetud komposiit põrandapaneele, kus betoon ja liimpuittalad ühendatakse omavahel eriliste nihkekinnititega alles pärast betoonplaadi täielikku kuivamist. Selline ühendusviis on tuntud ka kui „kuiv“ meetod, kuna liimpuittalad ei saa lisaniiskust betoonplaadi valmistamise käigus. (Costa 2011)

Puit-betoon komposiitsüsteemide erinevaid kinniteid katsetasid Elzbieta Lukaszewska, Helena Johnsson ja Lars Stehn. Töö eesmärgiks oli määrata seitsme erineva tehases paigaldatud puidu ja betooni vahelise kinniti jäikus- ja tugevusomadusi. Lisaks sellele hinnati kinnitite tootmisprotsessi võimalikku potentsiaalsust. Seitsmest katsetatud nihkekinnitist oli SM tüüpi kinniti keskmine nihkemoodul ( $K_{ser}$ ) kõige suurem, vastavalt 483,8 kN/mm, mis oli teistest kinnitustüüpidest peaaegu poole suurem. SM kinniti koosnes jätkuvast terasvõrgust, mis oli epoksiidliimiga kinnitatud liimpuidus asuvasse süvendisse. SM kinniti kuju on toodud joonisel 1.4. (Lukaszewska *et al.* 2006)



**Joonis 1.4.** Betoonplaati kinnitatud SM terasvõrk (Lukaszewska *et al.* 2006)

Puit-betoon komposiitpostide ja -talade arvutusmudeli, mis põhineb Euleri-Bernoulli teoorial, töötasid välja Girhammar ja Gopu 1991. aastal. Antud arvutusmudel on kasutatav juhul, kui komposiitkonstruktsioonile mõjuvad nii pikijõud kui ka paindemoment ning arenevad teist järku sisejõud (nt koormusest põhjustatud deformatsioon, millega kaasneb ekstsentrilisus). Selline arvutusmeetod on hästi rakendatav puit-betoon komposiit seinapaneelide korral, kus seinale mõjuvad nii pikijõud, kui ka põikjõud ning lisaks peab konstruktsiooni kuju võimaldama teist järku sisejõudude teket. Antud arvutusmudelit arendasid samad autorid edasi 1993. aastal. (Costa 2011)

### **1.3 Puit-betoon komposiitkonstruktsioonid**

Komposiitkonstruktsioonide areng on olnud väga kiire just viimase paarikümne aasta jooksul. Selle põhjuseks võib pidada komposiitkonstruktsioonide eeliste rohkust võrreldes traditsiooniliste ehitusmaterjalidega. Komposiitkonstruktsioonide eelistest võib välja tuua suurema tugevuse ja kaalu ning jäikuse ja kaalu suhte, korrosioonikindluse, parema vastupidavuse ja arhitektuursete võimaluste rohkuse (Schnabl et al. 2013: 1).

Puit-betoon komposiitkonstruktsioon on tehnoloogia, mis keskendub mõlema materjali optimeerimisega, samas kasutades ära mõlema materjali positiivseid ehitustehnilisi omadusi. Konstruktsiooni struktuurne efektiivsus saavutatakse kahe materjali komposiitkäitumise tekitamises, mis sõltub suuresti nihkekinnitussüsteemi efektiivsusest. (Timber-concrete composite 2015)

Komposiitmaterjalid ühendavad tihti endas tehniliselt ja majanduslikult optimaalsemat konstruktsiooni. Puit-betoon komposiitkonstruktsioone kasutatakse sageli hoonete seinte ja põrandate ning sildade konstruktsioonides. (Girhammar 1984: 370)

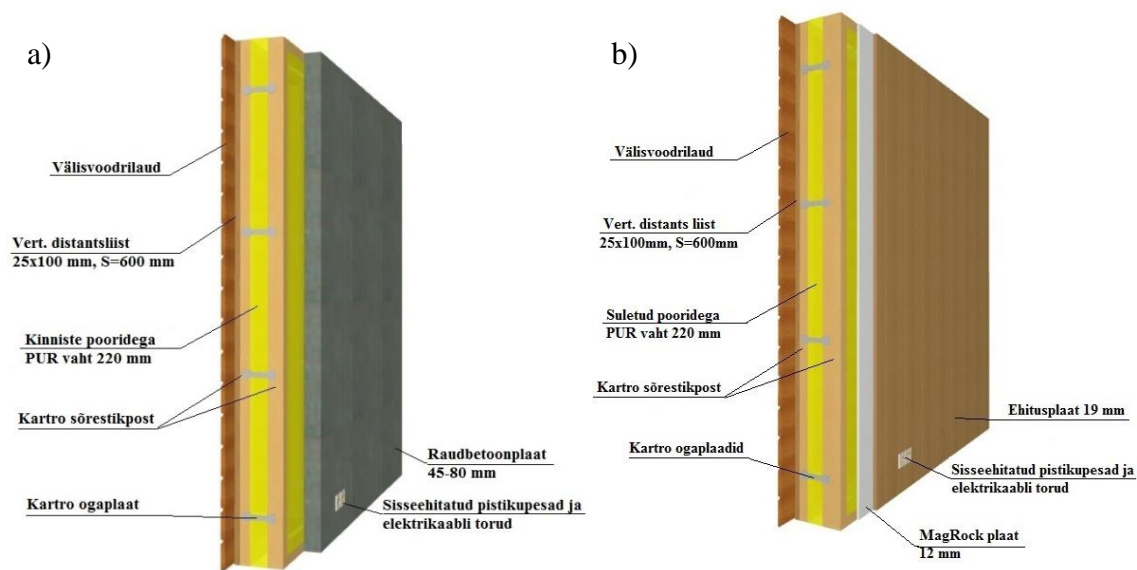
Komposiitkonstruktsioonide tähtsus on tõusnud, kuna otsitakse majanduslikult odavamaid, kaalult kergemaid, aga samas tugevamaid materjale. Komposiitkonstruktsioonides on erinevad materjalid ühendatud nii, et iga materjal töötab talle kõige otstarbekamal viisil. Koormust hästi taluvad materjalid asuvad rohkem koormatud piirkonnas ja koormust vähem taluvad asuvad vähem koormatud piirkonnas. (Õiger 2006)

## 1.4 Sõrestikpostidega seinte lahendused

Sõrestikpostidega seinakonstruktsiooni korral võib koormuseid edasi kanda vundamendile ühe või mõlema puidust vööga. Puit-metall sõrestikpost koosneb kahest vähemalt C16 tugevussorteeritud puitpostist, mis on omavahel ühendatud V-kujulise terasseinaga Posi ogaplaatidega või U-kujulise terasseinaga Kartro ogaplaatidega. Selliste sõrestikpostide kinnitused tuleb teha spetsiaalse hüdraulilise pressiga. Sõrestikpostidega seinte soojustamiseks kasutatakse enamasti kinniste pooridega PUR (polüuretaan) vahtu või mineraalvilla. Sõrestikposti laiused sõltuvad kasutatavate Kartro ja Posi ogaplaatide mõõtmetest ja puitvööde mõõtmetest. Eestis kasutatavad puitvööde ristlõiked on:

- 45x45 mm;
- 70x45 mm;
- 95x45 mm.

Kartro ogaplaatidega sõrestikposti laiused on vahemikus 145-295 mm ja Posi ogaplaatidega sõrestikpostide laiused on vahemikus 200-420 mm. Kõige enam toodetud sõrestikpost on Kartro R80 ogaplaatidega, mille laius on 195 mm. Posi ogaplaatidega sõrestikposte toodetakse märkimisväärselt vähem, kuna antud ogaplaat on tunduvalt kallim võrreldes Kartro ogaplaadiga. Joonisel 1.5 on näidatud Kartro sõrestikpostiga kahe erineva välisseina võimalikku lahendust.



**Joonis 1.5.** TimBet välisseinte tüüplõiked a) raudbetoonplaadiga välissein b) ehitusplaadiga välissein (Pildid TimBet ehituselementidest)

## 1.5 Puit-betoon komposiitkonstruktsioonide eelised ja puudused

Puit-betoon komposiit seinapaneelide eelised võrreldes tavalise puitsõrestikseintega:

- suurem seinatulekindlus;
- parem helikindlus;
- suurem seinatsoojusinerents (hoones on väiksemad temperatuuri kõikumised);
- külmasildade minimaliseeritus;
- paremad jäikus- ja tugevusomadused.

Puit-betoon komposiit seinapaneelide puudusteks võrreldes puitsõrestikseinaga on suurem omakaal, kõrgem hind ja ühenduste keerukus.

Võrreles puit-betoon komposiit seinapaneelide raudbetoonist seinaelementidega, siis põhiliseks eeliseks on konstruktsiooni väiksem omakaal.

Puit-betoon komposiit seinapaneelide puudusteks võrreldes raudbetoonist seinaelementidega:

- võimalik Eestis ehitada maksimaalselt kahekorruselisi hooneid;
- ei sobi kasutamiseks 3. kasutusklassis;
- komposiitkonstruktsioonis paiknevad sõrestikpostid on tuletundlikud;
- konstruktsioonis olevate puuosade seen- ja putukakahjustuste oht.

## 2. ARVUTUSTEORIID

### 2.1 Surutud saleda varda stabiilsus

Konstruksiooni kriitilise koormuse ( $F_{cr}$ ) ületamine võib viia selle purunemiseni või uude tasakaaluasendisse. See põhjustab sisejõudude muutuse ning võib konstruktsiooni purustada. Surutud saleda varda (posti) stabiilsuse kadu avaldub nõtkena. Nõtkete on varda läbipaine kriitilisest suurema telgkoormuse korral (Põdra 2004: 195).

Kriitiline koormus varda tsentrilisel survele sõltub mitmest tegurist:

- tugevusest ja jäikusest- puidu survetugevus, paindetugevus ja elastsusmoodul;
- varda geomeetriast - ristlõike mõõtmed ja posti pikkus;
- tugevate kinnitustingimusest- tugevate arv ja otste kinnitustingimused;
- geomeetriselised konstruktsioonihälbed- mõõtmete kõrvalekalded, varda algkõverus ja koormuse ekstsentrilisus. (Porteous, Kermani 2007: 150)

Konstantse ristlõikega varda tsentrilisel survele on Euleri kriitiline koormus (Masso et al. 2012: 96)

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2}, \quad (2.1)$$

kus  $L_0$  – varda nõtkepikkus m;

$E$  – materjali elastsusmoodul N/mm<sup>2</sup>;

$I$  – telginertsimoment mm<sup>4</sup>.

Nõtkepikkus on nõtkunud varda elastse joone (sinusoidi) ühe poolperioodi pikkus ja leitakse valemiga (Masso et al. 2012: 96)

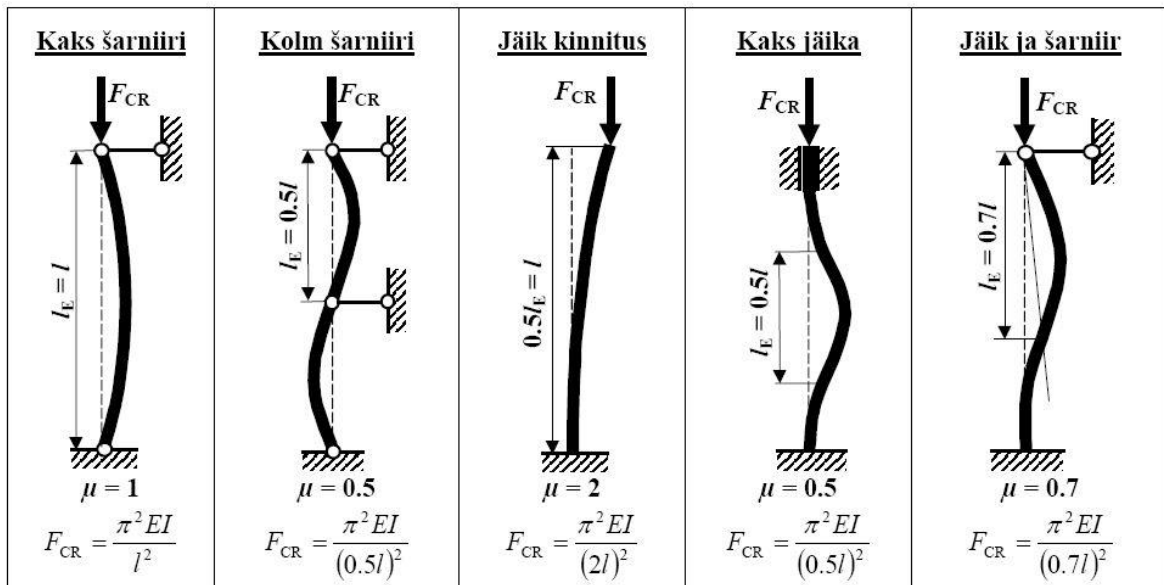
$$L_0 = \mu L, \quad (2.2)$$

kus  $\mu$  – varda pikkuse redutseerimistegur;

$L$  – varda tegelik pikkus m.



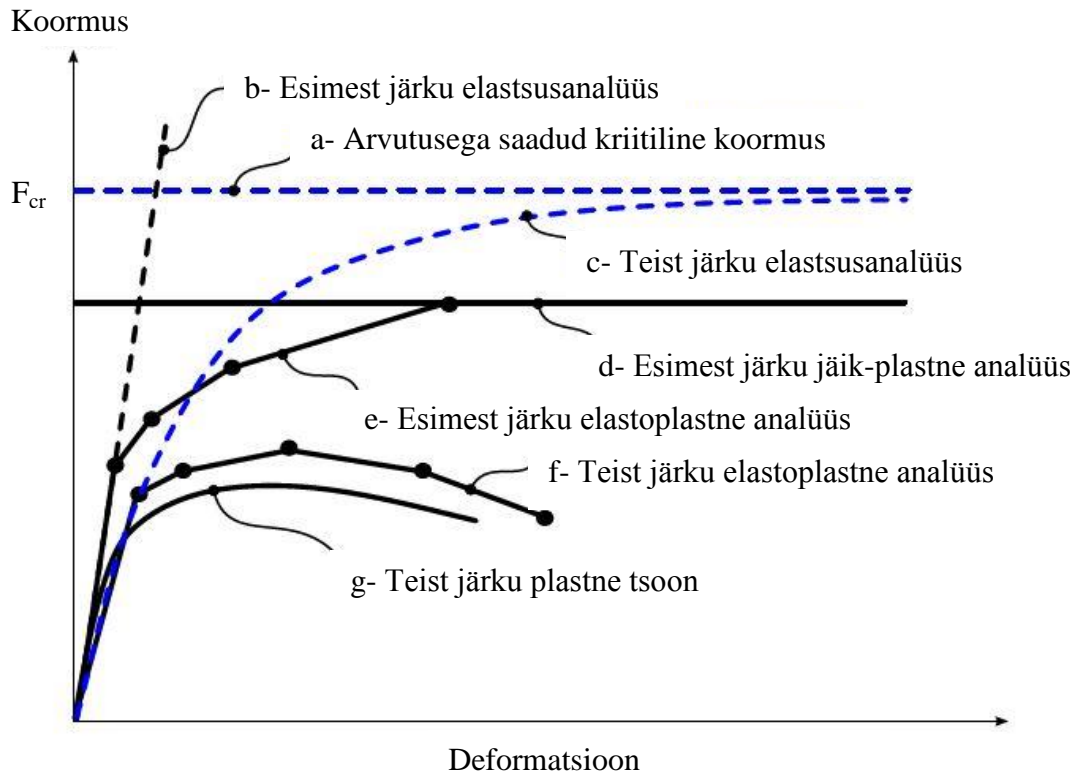
Nõtkepikkuse redutseerimistegur sõltub varda kinnitamise viisist. Selle teguri väärtused ja varda nõtkunud kuju lihtsamatel juhtudel on näidatud joonisel 2.1. Vaadates joonist 2.1 selgub, et nõtkepikkus ja posti tegelik pikkus on samasugused, kui post on mõlemast otsast kinnitatud liigendkinnitusega ja koormatud konstantse normaaljõuga. Enamus nõtkekatseid tehakse mõlemast otsast liigendkinnitusega postidega, kuna koormuse rakendamine ja nõtke kuju on kõige lihtsamad.



**Joonis 2.1.** Surutud varda nõtkepikkuse redutseerimistegurid erinevate kinnituste korral (Põdra 2004: 202)

Kuna ideaalselt elastseid vardaid ei ole realselt olemas, siis materjali proportsionaalsuspiiri ületades muutuvad kehad plastseks. See tähendab, et antud hetkest ei ole pinge ja deformatsioon enam omavahel võrdelises seoses ning pinge edasisel suurenemisel tekivad materjali plastsed deformatsioonid (elastoplastne materjal). Ideaalse elastse varda pinge-deformatsiooni sõltuvus on tähistatud joonisel 2.2 joonega „b“ ning tegelike varraste pinge-deformatsiooni sõltuvus joonega „f“.

Kriitiline koormus konstantse ristlõikega varda tsentrilisel surveel on näidatud joonisel 2.2 „a“-ga tähistatud joonega. Ideaalselt elastse saleda varda kriitiline (nõtke) koormus arvutatakse elastsusteoorial põhineva Euleri valemiga (valem 2.1).



**Joonis 2.2.** Pinge-deformatsioonide tunnusjooned ja surutud varraste nõtkete koormused erinevate analüüsimeetodite korral (Chen et al. 1996)

Vastavalt Eurokoodeks 5-le peab kandepiiriseisundis olema saleda varda ( $\lambda_{rel} > 0,3$ ) survel pikikiudu täidetud tingimused

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1, \quad (2.3)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1, \quad (2.4)$$

kus  $\sigma_{c,0,d}$  – arvutuslik survepinge pikikiudu,  $N/mm^2$ ;  
 $k_c$  – nõtketegur;  
 $f_{c,0,d}$  – arvutuslik survetugevus pikikiudu,  $N/mm^2$ .

Kui lisaks survele mõjub postile ka paindepinged, peavad olema rahuldatud järgmised tingimused

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1, \quad (2.5)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1, \quad (2.6)$$

- kus  $\sigma_{c,0,d}$  – arvutuslik survepinge pikikiudu, N/mm<sup>2</sup>;  
 $k_c$  – nõtketegur;  
 $f_{c,0,d}$  – arvutuslik survetugevus pikikiudu, N/mm<sup>2</sup>;  
 $\sigma_{m,y,d}, \sigma_{m,z,d}$  – arvutuslikud paindepinged y- ja z-telje suhtes, N/mm<sup>2</sup>;  
 $f_{m,y,d}, f_{m,z,d}$  – arvutuslikud paindetugevused N/mm<sup>2</sup>;  
 $k_m$  – tegur, mis on täisnurkristlõikega saepuidu, lamell-liimpuidu ja spoonliimpuidu puhul 0,7 ja muudel juhtudel 1,0.

Avaldistes kasutatav nõtketegur  $k_c$  saadakse vastavalt y- ja z- telje suhtes valemitega

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}, \quad (2.7)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}, \quad (2.8)$$

kus

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2], \quad (2.9)$$

$$k_z = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2], \quad (2.10)$$

- kus  $\lambda_{rel,y}, \lambda_{rel,z}$  – varda suhteline saledus y- ja z telje suhtes;  
 $\beta_c$  – tegur, mis on saepuidu puhul 0,2 ja spoon- ning liimpuidu puhul 0,1.

Suhteline saledus  $\lambda_{rel}$  määratakse järgnevalt

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \quad (2.11)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \quad (2.12)$$

- kus  $\lambda_y, \lambda_z$  – vastavad paindesaledused y- ja z-telje suhtes;  
 $E_{0,05}$  – elastsusmooduli 5% väärtus pikikiudu, N/mm<sup>2</sup>.

Lisaks kandepiiriseisundi nõuetele tuleks jälgida ka lubatavaid horisontaalseid läbipaindeid kasutuspiiriseisundis. Vastavalt Eurokoodeks 5 peatükis 10.2 toodud nõudele peaks sõrestikuelementidel ja postidel nende tugedevahelise osa keskkoha deformatsioon sirgus elemendist olema spoonliimpuidul  $h/500$  ja saepuidul  $h/300$  kõrgusest. Ehk antud katsekehade maksimaalne horisontaalne läbipaine kasutuspiiriseisundi järgi on  $2400/300=8$  mm. Lisaks on samas peatükis märgitud, et kõveruste piirangud, mis on materjalide tugevussorteerimise aluseks, ei ole antud elementide valikul piisavad ning sellisel juhul tuleks erilist tähelepanu pöörata nende sirgusele. (Eurokoodeks 5: 106)

## **2.2 Komposiitkonstruktsioonide arvutusteooriast üldiselt**

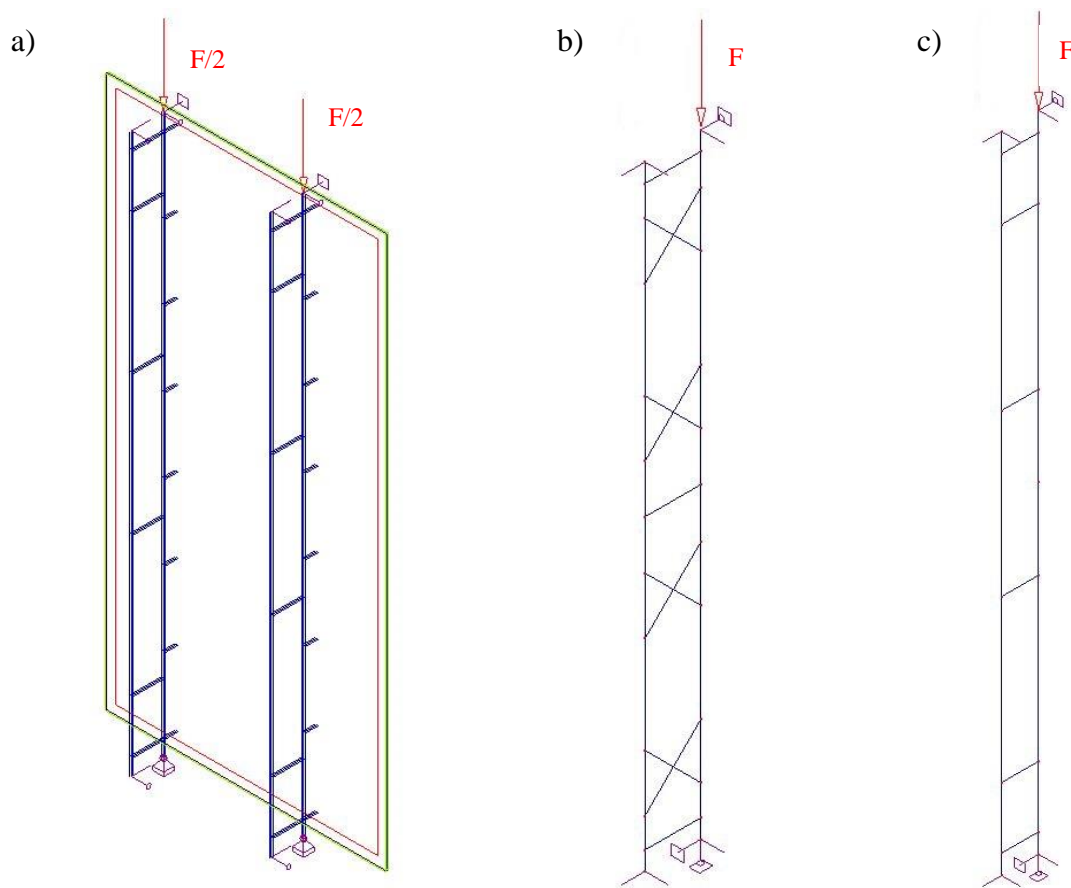
Komposiitkonstruktsioonide arvutamine on mitmes mõttes problemaatiline, sest arvesse tuleb võtta reaalses olukordades küllaltki suurtes piirides muutuvaid parameetreid, näiteks deformatiivsete sidemete nihkemoduleid ja erinevate materjalide elastsusparameetreid, millest oluliselt sõltub lõpptulemus. (Õiger 2006: 40)

Arvutusi raskendavad ka erinevatele liidetele õigete tugevus- ja jäikusomaduste andmine. Väga tihti on liiteid, mis realselt töötavad teistmoodi kui arvutiprogrammi lisades. „Tegelikes“ olukordades esineb alati ka kinnitites hõõrdejõude ja materjalides defekte, mida arvutiprogramm arvesse ei võta või mille defineerimine programmile on väga aeganõudev.

Antud töös kasutati arvutiprogrammiga Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014 (edaspidi ARSA) saadud tulemusi. Eesmärk oli ARSA-ga saadud deformatsioone võrrelda reaalsete katsekehade deformatsioonidega ning anda hinnang, kas tulemused on omavahel võrreldavad.

## 2.3 Arvutiprogrammi andmete sisestamine

Arvutiprogrammi andmete sisestamiseks tuli esmalt ära määrata sõrestikpostide ja komposiit seinapaneelide arvutuskeemid. Selleks tuli määrata elementide asetused, omavahelised kinnitused, koormuse asukoht, toekinnitused ja elementidele määrata kasutatavate materjalide rakendus. Puit-betoon komposiit seinapaneeli arvutusmudeli koostamiseks tuli eraldi defineerida plaadikontuur ja anda sellele vastavad omadused (armatuurvõrgu parameetrid, plaadi paksus, kinnitustingimused). Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide arvutuskeemid on näidatud joonisel 2.3.



**Joonis 2.3.** Arvutiprogrammi ARSA sisestatud katsekehade arvutuskeemid a) puit-betoon komposiit seinapaneel b) Posi sõrestikpost c) Kartro sõrestikpost

Koormuste rakendamisel konstruktiivsele skeemile on sõrestikpostidel vaid punktkoormus 70x45 mm puitvöö ristlõike keskohta. Puit-betoon komposiit seinapaneelile on lisaks mõlemale sõrestikpostile mõjuvatele punktkoormustele lisatud konstruktsiooni omakaal.

Ogaplaat liidete sisestamisel tuli enne arvutada nende nihkemooduli (K) väärtused. Teisendustegurit  $W_{kor}$  kasutatakse kuna ogaplaatide tootja andmetes esitatud normatiivsed nihkemooduli ( $K_{ser}$ ) väärtused on saadud teistsuguste tugevusklassidega saematerjalide korral.

Teisendustegur ogaplaadi nihkemooduli määramiseks leitakse valemiga (MiTek Industries LTD. 2008: 22)

$$W_{kor} = \left(\frac{\rho_{ref}}{\rho_k}\right)^{0,5}, \quad (2.13)$$

kus  $\rho_{ref}$  – saepuidu tihedus, kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_k$  – ogaplaadi andmetes antud saepuidu tihedus, kg/m<sup>3</sup>.

Ogaplaadi teisendatud nihkemoodul leiti valemiga

$$K = K_{ser} \cdot W_{kor}, \quad (2.14)$$

kus  $K_{ser}$  – ogaplaadi tootja poolt antud nihkemoodul;

$W_{kor}$  – ogaplaadi teisendustegur.

Arvutustes kasutatud teisendatud nihkemooduli väärtused on välja toodud tabelis 2.1. Programmi lisades pidi veel arvestama sisestatud varraste ristlõike mõõtmeid ja teisendama vastavalt sellele reaalse ogaplaadi kinnituspinna pikkused.

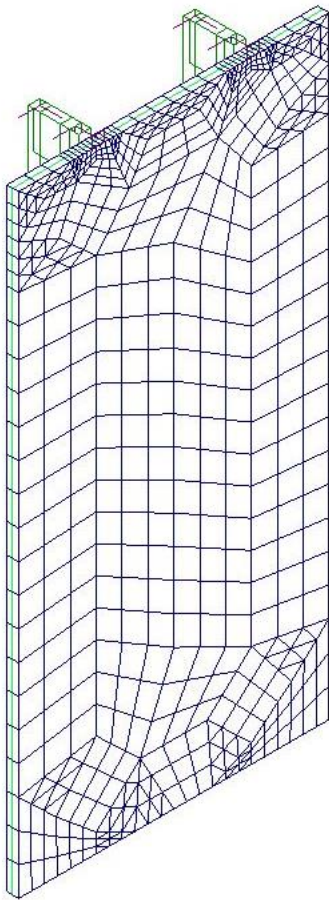
**Tabel 2.1.** Katsekehades kasutatud ogaplaatide nihkemooduli leidmine

Ogaplaadi nimetus	Antud nihkemoodul	Nihkepinna iseloomulikud mõõdud, mm	Arvutatud teisendustegur	Arvutatud nihkemoodul, kN/mm
Kartro R80	8,9 N/mm <sup>2</sup>	34	1,06	0,32
Posi PS10	32,2 kN/mm	-	1,07	34,45
GNT 100S (48x99)	11,1 N/mm <sup>3</sup>	48x49	1,01	26,37
TOP-W (96x100)	9,4 N/mm <sup>3</sup>	96x50	1	45,12
TOP-W (36x62)	9,4 N/mm <sup>3</sup>	36x31	1	10,49

Sõrestikpostide pingede-deformatsioonide arvutamisel kasutati ARSA-s esimest järku elastsusanalüüsi (staatiline lineaaranalüüs). Teist järku elastsusanalüüs (mittelineaarne analüüs) oleks andnud täpsemaid tulemusi võrreldes katseliste tulemustega, sellisel juhul oleks pidanud teadma iga materjali ja liite käitumist (deformatsioone) erinevate koormuste juures. Lisaks oleks pidanud andma materjalide vastavad koormuse-deformatsiooni

käitumist iseloomustavad väärtused ning üldise käitumise (elastsena, elastoplastsena, elastsena koos algjäikusega). Need väärtused oleksid leitavad katsetega, mida antud töö ei sisaldanud.

Varasematest uurimustööst on teada, et puit töötab surves olles elastoplastse materjalina ja tõmbes olles ortotroopse elastse materjalina. Ogaplaat kinnitused kujutavad endast elastoplastset materjali, millel on algjäikus. (Guan, Gendall 2008)



**Joonis 2.4.** Komposiitpaneeli jaotamine lõplikeks elementideks

Joonisel 2.4 on esitatud ARSA loodud raudbetoonpaneeli jaotamine ristkülik ja kolmnurga kujulisteks lõplikeks elementideks. Sõrestikposti elemendid arvutatakse samuti lõplike elementide meetodiga (LEM) aga seal on lõplikeks elementideks vardad.

Arvutiprogrammi ARSA joonised ja konstruktsioonide deformatsioonid 50 kN koormuse korral on esitatud Lisas 1.

## 2.4 Kasutatavad materjalid ja nende karakteristikud omadused

### 2.4.1 Puit

Puit on anisotroopne materjal - omab erisuundades erinevaid omadusi. Puidu tugevusomadused sõltuvad suuresti selle kiudude suunast ja niiskussisaldusest. Ehituses kasutatava puitmaterjali niiskussisaldus peab olema vahemikus 8-15%. Sõrestikpostide puitvöödel mõõdeti niiskussisaldust kolmest kohast: keskkohast ja mõlemast otsast 300 mm kauguselt. Mõõtmiseks kasutati Almemo 2590 andmesalvestajat. Katsekehade puitvööde keskmised niiskussisaldused jäid vahemikku  $10\pm 2\%$ . Keskmised puitvööde niiskussisaldused on välja toodud lisa 2. Katsekehades kasutatud puidu parameetrid on esitatud tabelis 2.2.

**Tabel 2.2.** Tugevusklassiga C24 saematerjali omadused vastavalt EVS-EN 338:2009 (Ehituspuit 2009: 8)

<b>Tugevusomadused</b>	<b>Tähis</b>	<b>Väärtus, N/mm<sup>2</sup></b>
Paindetugevus	$f_{m,k}$	24
Tõmbetugevus pikikiudu	$f_{t,0,k}$	14
Tõmbetugevus ristikiudu	$f_{t,90,k}$	0,4
Survetugevus pikikiudu	$f_{c,0,k}$	21
Survetugevus ristikiudu	$f_{c,90,k}$	2,5
Nihketugevus	$f_{v,k}$	4,0
<b>Jäikusomadused</b>	<b>Tähis</b>	<b>Väärtus, N/mm<sup>2</sup></b>
Elastsusmoodul pikikiudu	$E_{0,mean}$	11000
Elastsusmoodul 5% pikikiudu	$E_{0,05}$	7400
Elastsusmoodul ristikiudu	$E_{90,mean}$	370
Nihkemoodul	$G_{mean}$	690
<b>Tihedusomadused</b>	<b>Tähis</b>	<b>Väärtus, kg/m<sup>3</sup></b>
Tihedus	$\rho_k$	350
Keskmine tihedus	$\rho_{mean}$	420

Lisaks niiskusele mõõdeti kolmest kohast katsekehade puitvööde ristlõike mõõtmed. Ristlõike laiuse ja kõrguse mõõtmiseks kasutati nihkkaliiberit, mille mõõtmistäpsus oli 0,1 mm. Katsekehade puitvööde ristlõike mõõtmistulemused on näidatud lisa 2.



## 2.4.2 Betoon

Betoon võtab hästi vastu survepingeid aga üsna halvasti tõmbe- ja paindepingeid. Betooni tõmbetugevus on survetugevusest 10-15 korda väiksem (Valgur 2014: 2). Selle tõttu paigaldatakse betooni terast (raudbetoon), mis omakorda töötab hästi tõmbele. Puit-betoon komposiit seinapaneelides kasutatud betooni tugevusomadused on esitatud tabelis 2.3.

**Tabel 2.3.** C30/37 tugevusklassiga betooni tugevus- ja deformatsiooniomadused Ehituskonstruktori käsiraamatu järgi (Masso 2012: 263)

<b>Tugevusomadused</b>	<b>Tähis</b>	<b>Väärtus, N/mm<sup>2</sup></b>
Normsurvetugevus	$f_{ck}$	30
Keskmine survetugevus	$f_{cm}$	38
Keskmine tõmbetugevus	$f_{ctm}$	2,9
Alumine (95% tõenäosusega tagatud) normtõmbetugevus	$f_{ctk,0,005}$	2,0
Ülemine (5% tõenäosusega tagatud) normtõmbetugevus	$f_{ctk,0,95}$	3,8
Arvutustugevus	$f_{cd}$	20,0
Arvutustõmbetugevus	$f_{ctd}$	1,35
<b>Jäikusomadused</b>	<b>Tähis</b>	<b>Väärtus, kN/mm<sup>2</sup></b>
Keskmine elastsusmoodul	$E_{cm}$	33

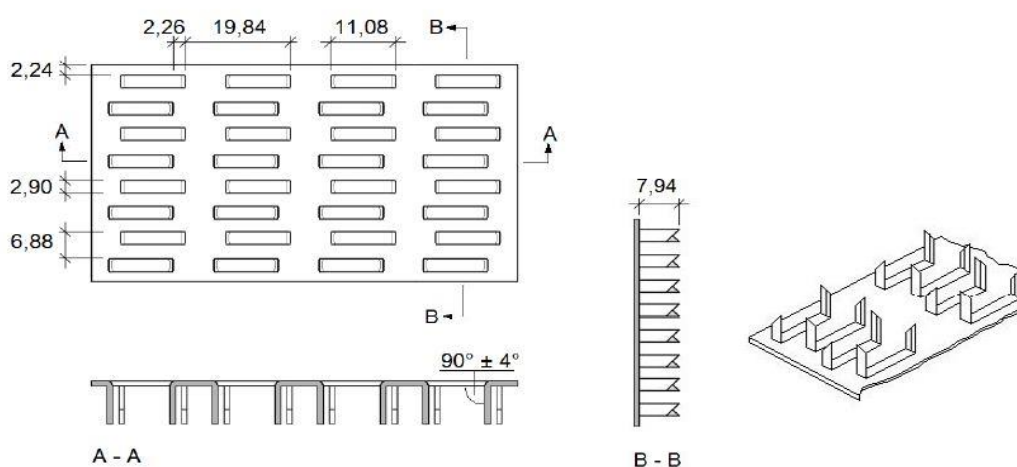
Enne katsete algust mõõdeti puit-betoon komposiit seinapaneelide raudbetoonplaadi paksused, mis on esitatud lisa 3. Paksused mõõdeti plaadi serva lähedalt 12 erinevast kohast.

## 2.4.3 Ogaplaadid

Posi sõrestikposti katsekehades kasutati Posi PS10 ja MiTek TOP-W ogaplaate ja Kartro sõrestikpostide katsekehades Kartro R80 ja GNT 100S ogaplaate (vt joonis 2.5). Komposiitpaneeli katsekehades kasutati lisaks Kartro sõrestikposti ogaplaatidele veel posti ja paneeli ühendamiseks MiTek TOP-W 36x62 mm ogaplaate (vt joonis 2.6). Ogaplaatide tugevusparameetrid on esitatud tabelites 2.4 ja 2.5.

**Tabel 2.4.** Ogaplaadi GNT 100S tugevusomadused (MiTek Industries LTD. 2010)

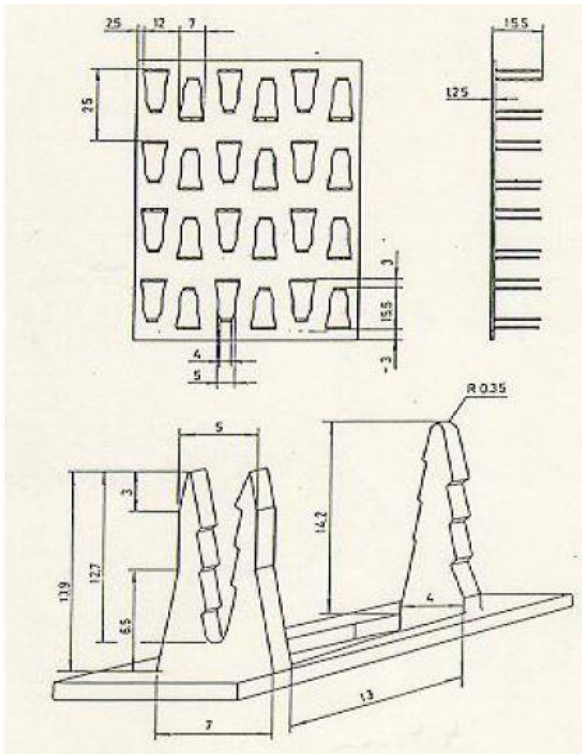
Tugevusomadused	Tähis	Väärtus
Nakketugevus kui $\alpha=0^\circ$ ja $\beta=0^\circ$	$f_{a,0,0}$	2,63 N/mm <sup>2</sup>
Nakketugevus kui $\alpha=90^\circ$ ja $\beta=90^\circ$	$f_{a,90,90}$	1,52 N/mm <sup>2</sup>
Tõmbetugevus plaadi laiusühikule, ( $\alpha=0^\circ$ )	$f_{t,0}$	211 N/mm
Tõmbetugevus plaadi laiusühikule y-telje suunas, ( $\alpha=90^\circ$ )	$f_{t,90}$	144 N/mm
Survetugevus plaadi laiusühikule, ( $\alpha=0^\circ$ )	$f_{c,0}$	77 N/mm
Survetugevus plaadi laiusühikule y-telje suunas, ( $\alpha=90^\circ$ )	$f_{c,90}$	75 N/mm
Nihketugevus plaadi laiusühikule y-telje suunas	$f_{v,0}$	75 N/mm
Lõiketugevus plaadi laiusühikule y-telje suunas	$f_{v,90}$	56 N/mm
Nihkemoodul	$k_{ser}$	11,1 N/mm <sup>3</sup>



**Joonis 2.5** MiTek GNT 100S ogaplaadi tehnilised andmed (MiTek Industries LTD. 2010)

**Tabel 2.5.** Ogaplaadi TOP-W tugevusomadused (VTT Expert Services Ltd. 2011)

Tugevusomadused	Tähis	Väärtus
Nakketugevus kui $\alpha=0^\circ$ ja $\beta=0^\circ$	$f_{a,0,0,k}$	3,55 N/mm <sup>2</sup>
Nakketugevus kui $\alpha=90^\circ$ ja $\beta=90^\circ$	$f_{a,90,90,k}$	1,97 N/mm <sup>2</sup>
Tõmbetugevus plaadi laiusühikule, ( $\alpha=0^\circ$ )	$f_{t,0,k}$	252 N/mm
Tõmbetugevus plaadi laiusühikule y-telje suunas, ( $\alpha=90^\circ$ )	$f_{t,90,k}$	181 N/mm
Survetugevus plaadi laiusühikule, ( $\alpha=0^\circ$ )	$f_{c,0,k}$	119 N/mm
Survetugevus plaadi laiusühikule y-telje suunas, ( $\alpha=90^\circ$ )	$f_{c,90,k}$	131 N/mm
Nihketugevus plaadi laiusühikule y-telje suunas	$f_{v,0,k}$	116 N/mm
Lõiketugevus plaadi laiusühikule y-telje suunas	$f_{v,90,k}$	84 N/mm
Nihkemoodul	$k_{ser}$	9,4 N/mm <sup>3</sup>



**Joonis 2.6.** MiTek TOP-W ogaplaadi ehitus (VTT Expert Services Ltd. 2011)

## 2.5 Puitposti maksimaalse nõtkekoormuse arvutusteooria

Antud arvutused on tehtud vaid katsekehadega samaväärsete puitpostide nõtkes y-telje suhtes. Postile mõjub pikijõud ekstsentriliselt, seega arvutustes tuleb arvestada sellest tekkinud paindepingeid.

Vastavalt „Ehituskonstruktori käsiraamatu“ peatükile 14.2.3. peab saledal vardal, millele mõjub nii surve kui paindemoment, olema täidetud tingimus:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1, \quad (2.15)$$

kus  $\sigma_{c,0,d}$  – arvutuslik survepinge pikikiudu, N/mm<sup>2</sup>;  
 $k_{c,y}$  – nõtketegur;  
 $f_{c,0,d}$  – arvutuslik survetugevus pikikiudu, N/mm<sup>2</sup>;  
 $\sigma_{m,y,d}$ ;  $\sigma_{m,z,d}$  – arvutuslikud paindepinged y- ja z-telje suhtes, N/mm<sup>2</sup>;  
 $f_{m,y,d}$ ;  $f_{m,z,d}$  – arvutuslikud paindetugevused, N/mm<sup>2</sup>;  
 $k_m$  – tegur, mis on täisnurkristlõikega saepuidu, lamell-liimpuidu ja spoonliimpuidu puhul 0,7 ja muudel juhtudel 1,0.

Kuna z-teljeline nõtkes on takistatud, siis võib antud valemi avaldada kujul

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (2.16)$$

Valemis 2.16 esineva survepinge saab avaldada kujul

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F}{A}, \quad (2.17)$$

kus  $F$  – postile mõjuv arvutuslik pikijõud, N;  
 $A$  – posti ristlõike pindala, mm<sup>2</sup>.

Ning samas valemis esinev paindepinge saab avaldada kujul

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z}, \quad (2.18)$$

kus  $M_{z,d}$  – koormuse ekstsentrilisusest tulev paindemoment, Nmm;

$W_z$  – vastupanumoment z-telje suhtes,  $\text{mm}^3$ .

Ning paindemomendi  $M_{z,d}$  saab avaldada kujul

$$M_{z,d} = F \cdot e, \quad (2.19)$$

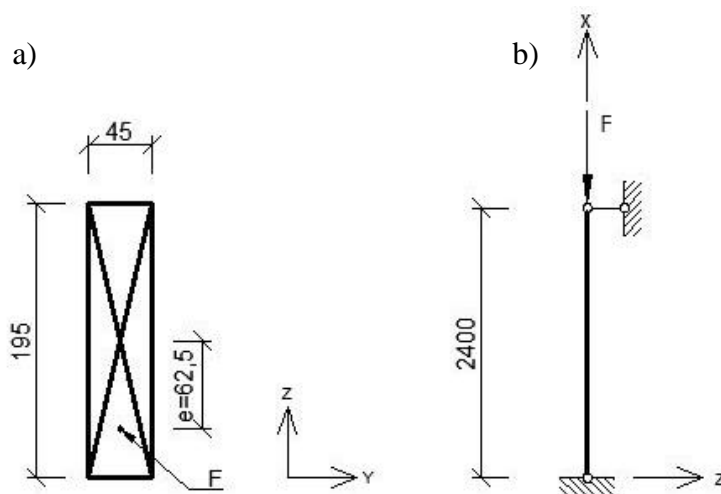
kus  $e$  – koormuse ekstsentrilisus, mm.

Kasutades eelnevaid avaldisi, saab valemist 2.16 leida postile mõjuva survejõu arvutusväärtuse valemiga:

$$F \geq \frac{1}{\frac{1}{A \cdot k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{k_m \cdot e}{W_y \cdot f_{m,0,d}}} \quad (2.20)$$

### 2.5.1 Kartro sõrestikpostide katsekehadega samaväärse puitposti arvutusnäide

Kartro sõrestikpostide katsekehade puitmaterjali tugevusklassiks oli C24, siis monoliitpuidust posti parameetriteks on võetud sama tugevusklassi näitajad (vt tabel 2.2) ning ristlõike mõõtmed. Posti ristlõike ja arvutusskeem on näidatud joonisel 2.7.



**Joonis 2.7.** Kartro sõrestikpostiga samaväärse puitposti a) ristlõike mõõtmed ja koormamise asukoht b) arvutusskeem

## Algandmed

Saepuidu tugevusklass	C24
Survetugevus pikikiudu	$f_{c,0,k}=21 \text{ N/mm}^2$
Paindetugevus	$f_{m,0,k}=24 \text{ N/mm}^2$
Elastsusmoodul 5% pikikiudu	$E_{0,05}=7400 \text{ N/mm}^2$
Posti ristlõike mõõtmed (bxh):	45x195 mm
Ristlõike paindepingete ümberjaotamist arvestav tegur:	$k_m=0,7$
Sirgsuse tegur:	$\beta_c=0,2$
Pikijõu F ekstsentrilisus keskelje suhtes:	$e=62,5 \text{ mm}$

## Puitposti arvutusliku nõtkekoormuse leidmine

Ristlõike pindala leidmine:

$$A = b \cdot h = 45 \cdot 195 = 8775 \text{ mm}^2$$

Riskülik-ristlõikega posti inertsiraadius y-telje suhtes  $i_y$  arvutatakse valemiga:

$$i_y = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{195}{\sqrt{12}} = 56,29 \text{ mm}$$

Posti paindesaleduse leidmiseks tuleb enne leida paindesaledus y-telje suhtes  $\lambda_y$ :

$$\lambda_y = \frac{l_{ef}}{i_y} = \frac{2400}{56,29} = 42,64$$

Seejärel leitakse suhteline saledus  $\lambda_{rel,y}$  (valem 2.11):

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{42,64}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,723$$

Nõtketeguri  $k_{c,y}$  leidmiseks tuleb leida suhtelist saledust  $\lambda_{rel,y}$  kasutades ebastabiilsustegur  $k_y$  (valem 2.9):

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,2 \cdot (0,723 - 0,3) + 0,723^2] = 0,801$$

Nõtketegur  $k_{c,y}$  leitakse avaldisega (valem 2.7):

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,801 + \sqrt{0,801^2 - 0,723^2}} = 0,87$$

Ristkülik-ristlõikega posti vastupanumomendi y-telje suhtes  $W_y$  leitakse:

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{45 \cdot 195^2}{6} = 285187,5 \text{ mm}^3$$

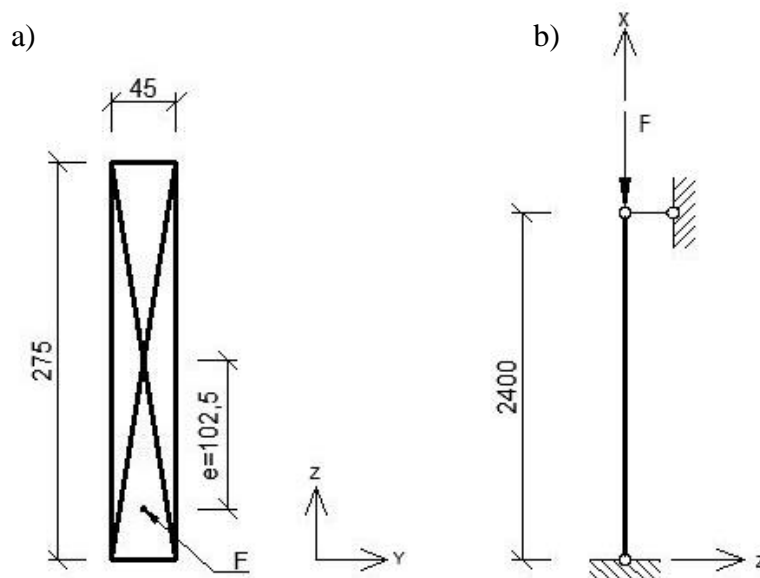
Posti arvutuslik pikijõud  $F$  leitakse valemit 2.6 kasutades:

$$F \geq \frac{1}{\frac{1}{A \cdot k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{k_m \cdot e}{W_y \cdot f_{m,0,d}}} = \frac{1}{\frac{1}{8775 \cdot 0,87 \cdot 21} + \frac{0,7 \cdot 62,5}{285187,5 \cdot 24}} = 79179 \text{ N}$$

$$\approx 79,18 \text{ kN}$$

### 2.5.2 Posi sõrestikpostide katsekehade samaväärse puitposti arvutusnäide

Posi sõrestikpostide katsekehade puitmaterjali tugevusklassiks oli C24, siis puitposti parameetriteks on võetud sama tugevusklassi näitajad (vt tabel 2.2) ning ristlõike mõõtmed. Posti arvutuskeem ja ristlõike mõõtmed on näidatud joonisel 2.8.



**Joonis 2.8.** Posi sõrestikpostiga samaväärse puitposti a) ristlõike mõõtmed ja koormamise asukoht b) arvutuskeem

## Algandmed

Saepuidu tugevusklass	C24
Survetugevus pikikiudu	$f_{c,0,k}=21 \text{ N/mm}^2$
Paindetugevus	$f_{m,0,k}=24 \text{ N/mm}^2$
Elastsusmoodul 5% pikikiudu	$E_{0,05}=7400 \text{ N/mm}^2$
Posti ristlõike mõõtmed (bxh):	45x275 mm
Ristlõike paindepingete ümberjaotamist arvestav tegur:	$k_m=0,7$
Sirgsuse tegur:	$\beta_c=0,2$
Pikijõu F ekstsentrilisus keskelje suhtes:	$e=102,5 \text{ mm}$

## Puitposti arvutusliku nõtkekoormuse leidmine

Ristlõike pindala leidmine:

$$A = 45 \cdot 275 = 12375 \text{ mm}$$

Riskülikulise ristlõikega posti inertsiraadius y-telje suhtes  $i_y$  arvutatakse valemiga:

$$i_y = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{275}{\sqrt{12}} = 79,39 \text{ mm}$$

Suhtelise saleduse  $\lambda_{rel,y}$  leidmiseks tuleb enne leida paindesaledus y-telje suhtes  $\lambda_y$ :

$$\lambda_y = \frac{l_{ef}}{i_y} = \frac{2400}{79,39} = 30,23$$

Seejärel leitakse suhteline saledus  $\lambda_{rel,y}$  (valem 2.11):

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{30,23}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,513$$

Nõtketeguri  $k_{c,y}$  leidmiseks tuleb leida suhtelist saledust  $\lambda_{rel,y}$  kasutades ebastabiilsustegur  $k_y$  (valem 2.9):

$$\begin{aligned} k_y &= 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,2 \cdot (0,513 - 0,3) + 0,513^2] \\ &= 0,653 \end{aligned}$$



Nõtketeguri  $k_{c,y}$  leitakse seejärel valemiga (valem 2.7):

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,653 + \sqrt{0,653^2 - 0,513^2}} = 0,95$$

Ristkülik-ristlõikega posti vastupanumomendi  $y$ -telje suhtes  $W_y$  leitakse:

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{45 \cdot 275^2}{6} = 567087,5 \text{ mm}^3$$

Posti arvutuslik pikijõud  $F$  leitakse valemi 2.6 põhjal:

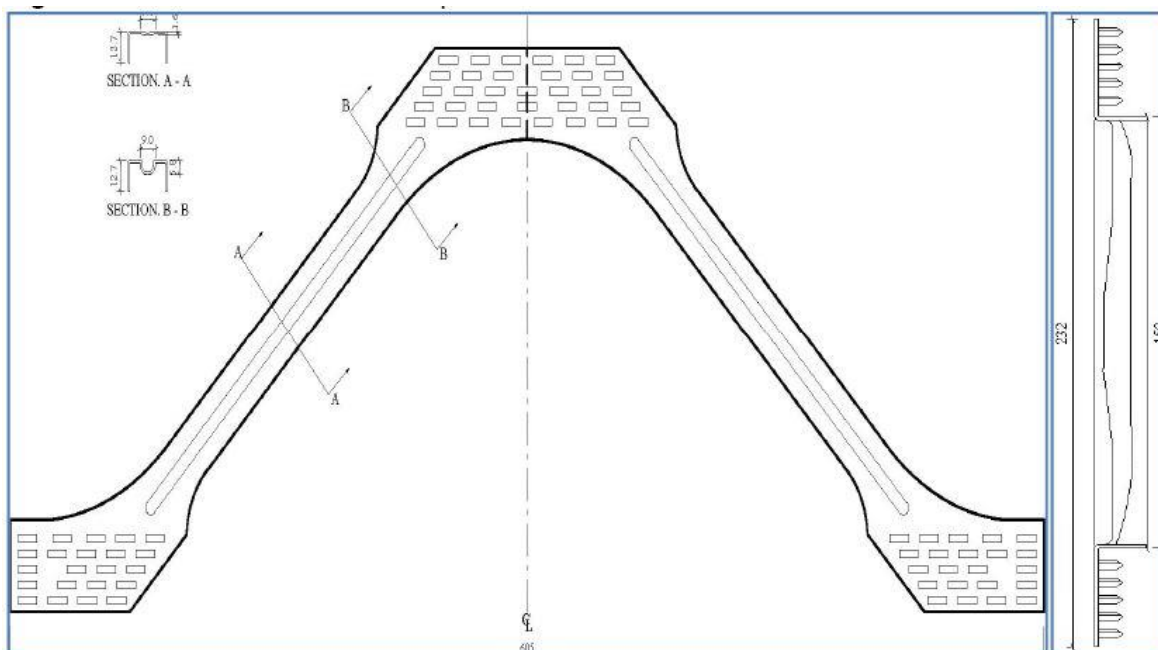
$$F \geq \frac{1}{\frac{1}{A \cdot k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{k_m \cdot e}{W_y \cdot f_{m,0,d}}} = \frac{1}{\frac{1}{12375 \cdot 0,95 \cdot 21} + \frac{0,7 \cdot 102,5}{567087,5 \cdot 24}} = 107269 \text{ N}$$
$$\approx 107,27 \text{ kN}$$

### 3. PUIT-METALL SÕRESTIKPOSTIDE JA PUIT-BETOON KOMPOSIIT SEINAPANEELIDE KATSETUSED

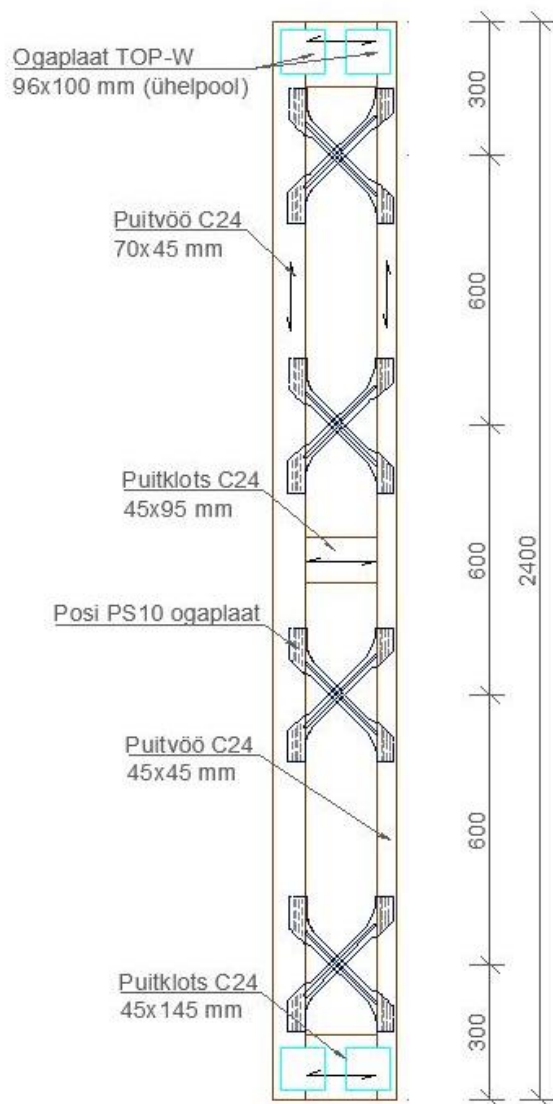
#### 3.1 Katsekehade kirjeldus

##### 3.1.1 MiTek Posi kinnititega sõrestikpostid

Posi kinnititega sõrestikpostide pikkuseks oli 2,4 m. Postid koosnesid kahest C24 tugevusklassiga puitvööst, mille mõõtmed olid 45x45 mm ja 45x70 mm. Posti keskohta olid paigaldatud horisontaalsed klotsid mõõtudega 45x95 mm ning pikkusega 160 mm. Otsad olid toetatud horisontaalsete klotsidega mõõtudega 45x145 mm, pikkusega 160 mm, mis kinnitusid mõlema puitvöö külge ogaplaatidega TOP-W 96x100. Puitvööd olid omavahel ühendatud poolikute MiTek Posi PS-10 ogaplaatidega (vt joonis 3.1). Posi kinnititega sõrestikposti kuju on esitatud joonisel 3.2.



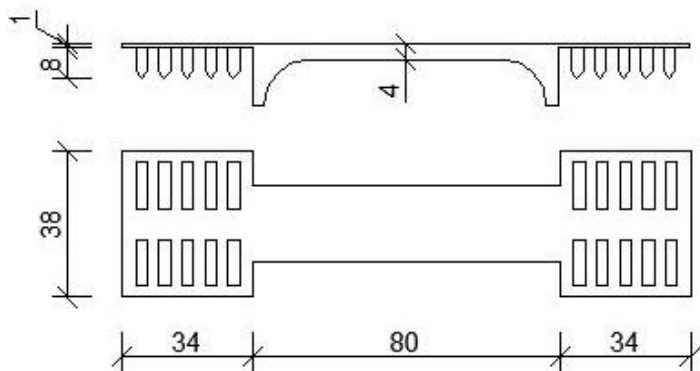
**Joonis 3.1.** MiTek Posi PS10 ogaplaat (MiTek Industries LTD. 2008: 34)



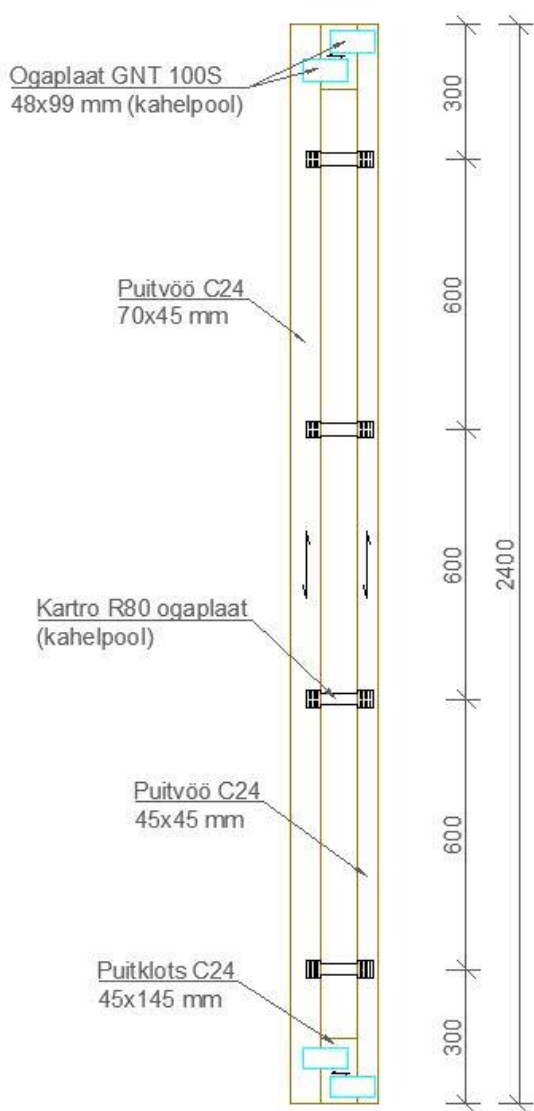
**Joonis 3.2.** MiTek Posi kinnititega sõrestikpost

### 3.1.2 ITW Industry Kartro kinnititega sõrestikpostid

Kartro kinnititega sõrestikpostide pikkuseks oli 2,4 m. Postid koosnesid kahest C24 tugevusklassiga puitvööst, mille mõõtmed olid 45x45 mm ja 45x70 mm. Posti otsad olid toetatud horisontaalsete klotsidega, mõõtudega 45x145 mm, pikkusega 80 mm, mis kinnitusid mõlema puitvöö külge GNT 100S 48x99 mm ogaplaatidega. Puitvööd olid omavahel ühendatud nelja paaris Kartro R80 ogaplaadiga (vt joonis 3.3). Kartro kinnititega sõrestikposti kuju on esitatud joonisel 3.4.



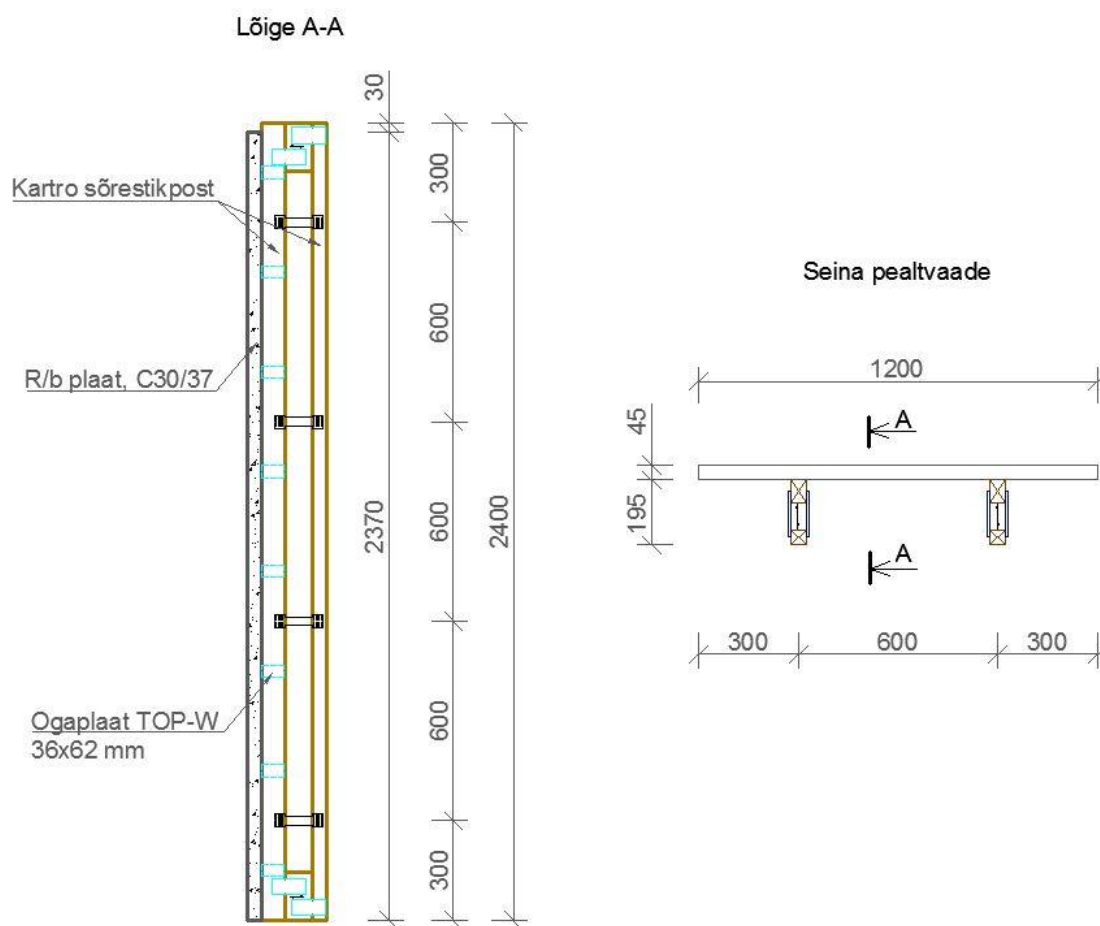
**Joonis 3.3.** ITW Industry Kartro R80 ogaplaat (Nordisk Kartro AB. 2006)



**Joonis 3.4.** ITW Industry Kartro kinnititega sõrestikpost

### 3.1.3 Puit-betoon komposiit seinapaneelid

Käesolevas töös kasutati firma ConcreTech OÜ välja töötatud välisseina konstruktsiooni elemente. Antud elemendid koosnesid 45 mm paksusest raudbetoonplaadist (mõõtudega 2,4x1,2 m), mis kinnitus MiTek TOP-W 36x62 ogaplaatidega kahe Kartro sõrestikposti külge. Katsekehade raudbetoonplaadis kasutati C30/37 tugevusklassiga betooni ja 6/150/150 mm armatuurvõrku. TOP-W ogaplaadid ja betoonplaadis paiknev armatuurvõrk olid seotud omavahel armatuuri sidumistraadiga (vt joonis 3.6). Kartro sõrestikpostide omavaheline samm oli 600 mm ja asusid raudbetoonplaadi servast 300 mm kaugusel. Puit-betoon komposiit seinapaneeli kuju on esitatud joonisel 3.5.



Joonis 3.5. Puit-betoon komposiit seinapaneelide katsekehad

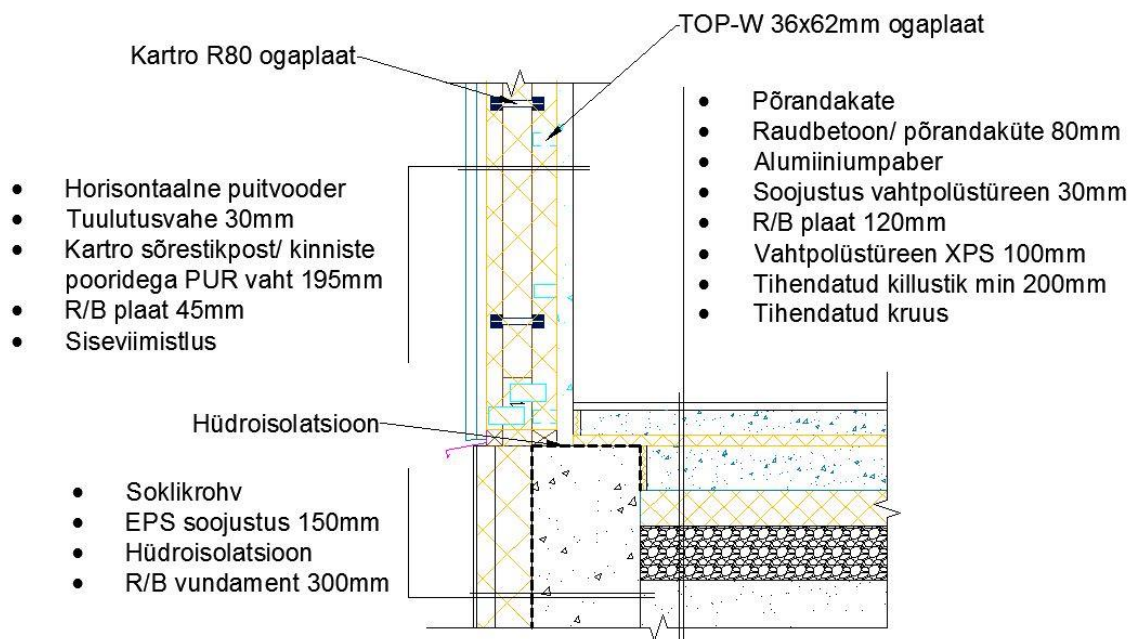


**Joonis 3.6.** MiTek TOP-W 36x62 mm ogaplaadi kinnitus armatuurvõrgu külge (foto: Priit Kirotar)

Katsekehad ei olnud omavahel täiesti identsed. Puit-betoon komposiit seinapaneelidel esines vähemal määral nihkekinnititeks olevate ogaplaatide asetuse erinevusi. Kartro kinnititega sõrestikpostid erinesid GNT 100S ogaplaatide paiknemise osas. Katsekehad olid puidu kuivamisest tingituna mingil määral kiiva tõmmanud. Reaalsete katsekehade ogaplaatide paiknemised on näidatud lisas 2 esitatud joonistel.

### **3.2 Katsete eesmärgid**

Antud magistritöö eesmärk oli uurida ettevõtte ConcreTech OÜ toodetud puit-metall sõrestikposte ja puit-betoon komposiit seinapaneele olukorras, kus sisemine sõrestikposti puitvöö (70x45 mm) võtab vastu vertikaalseid koormuseid ning välimine puitvöö (45x45 mm) võtab vastu hoone fassaadi materjalidest ja soojustusest tulenevaid koormuseid. Näidis sõlmelahendus sõrestikposti toetamisest vundamendile, mille põhjal katseid planeeriti, on toodud joonisel 3.7. Antud töös ei arvestatud postile mõjuvaid horisontaalseid jõude (tuulekoormus) ja sellest tulenevaid lisadeformatsioone.



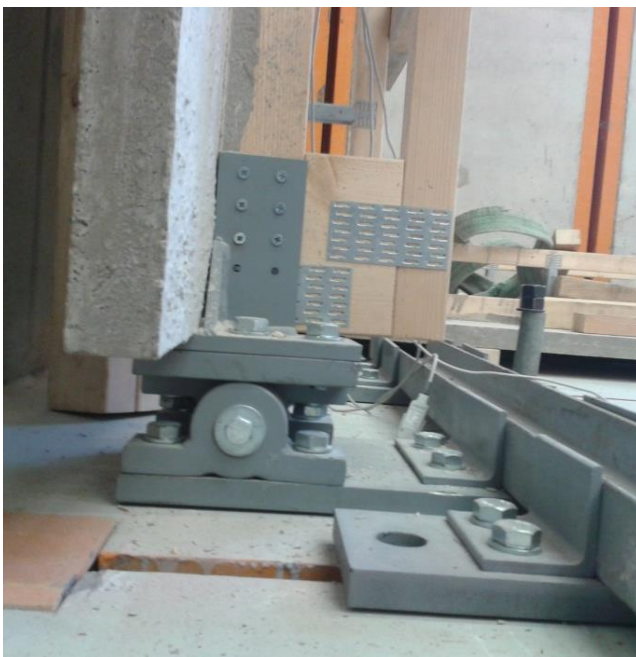
**Joonis 3.7.** TimBet seinaelemendi toetamine vundamendile

Katsete tegemisel arvestati, et koormuse mõjul nõtkuvad sõrestikpostid ja seinapaneelid välja kandva puitvöö ristlõike pikema külje suunas. Reaalsetes hoone seinakonstruktsioonides on ristlõike lühema külje (seina sihis) nõtku üldiselt piisavalt takistatud (seina roovitus, voodrilaudis, sõrestikpostidele kinnitatud plaadid jne), seega määravaks saab seinaga risti (seinast välja) nõtkumine. Seinaga risti nõtkumisele aitab reaalsetes olukordades kaasa seinale/postile mõjuv tuulekoormus. Katsete eesmärgiks oli teada saada maksimaalsed koormused ( $F_{cr}$ ), mida vaadeldavad konstruktsioonid suudavad vastu võtta.

### 3.3 Katsete meetodid

Katsete eesmärgiks oli määrata puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide survetugevus nõtkele, võrrelda saadud tulemusi omavahel ning teoreetiliste arvutustega saadutega. Lisaks uuriti katseliselt sõrestikpostide ogaplaatide nihketugevust. Katseid viidi läbi Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruktsioonide laboris. Katsete läbiviimiseks kasutati laboris asetsevat jõuseina ja selle küljes paiknevat konsooli. Katsete läbiviimise ajal oli laboris ruumi õhutemperatuur 19,7°C ja õhu suhteline niiskus 32,3%.

Katsekehade nõtkekatses oli posti alumine ots kinnitatud liigendtoele (joonis 3.8) ja ülemine ots liikuv-liigendtoele (joonis 3.9). Nihkekatses oli posti alumine ots kinnitatud kinnistoele ja ülemine liikuv-liigendtoele. Kinnistugi saadi liigendtoe pöördumise fikseerimisega. Fikseerimiseks kasutati erinevas mõõdus terasplaate. Konstrueeritud kinnistugi on toodud joonisel 3.10. Sõrestikpostide külgedele ehitati ajutine konstruktsioon, et katsekehad ei saaks ristlõike lühema külje (y-telje) suunas välja nõtkuda. Ajutine konstruktsioon on näidatud joonisel 3.12 ja toed, mis takistavad sõrestikposti y-telje suunalist nõtkumist joonisel 3.11. Sõrestikposti y-teljelist nõtkumist takistavad toed ehitati mööblirullikutest. Kuna sõrestikpostidel ei olnud piisavalt horisontaalset pinda, mida mööda saaksid mööblirullikud liikuda, oli vaja 70x45 mm puitposti külge kruvida vineerplaat. Paralleelselt paiknevate vineerplaatide vahele paigaldati mutritega keermelatt, mis reguleeriti mutritega nii, et ei teki 45x45 puitposti ja vineerplaatide kokkupuudet. Hõõrde vähendamiseks antud toes paigaldati vineeri ja mööblirullikute vahele alumiiniumist metallplaat. Enne igat katset määrati õliga rullikute ja metallplaadi vahelist kontaktpind.



**Joonis 3.8.** Alumine liigendtugi



**Joonis 3.9.** Ülemine liikuv-liigendtugi





**Joonis 3.10.** Alumine kinnistugi



**Joonis 3.11.** Toed y-telje suunalise nõtkete vältimiseks



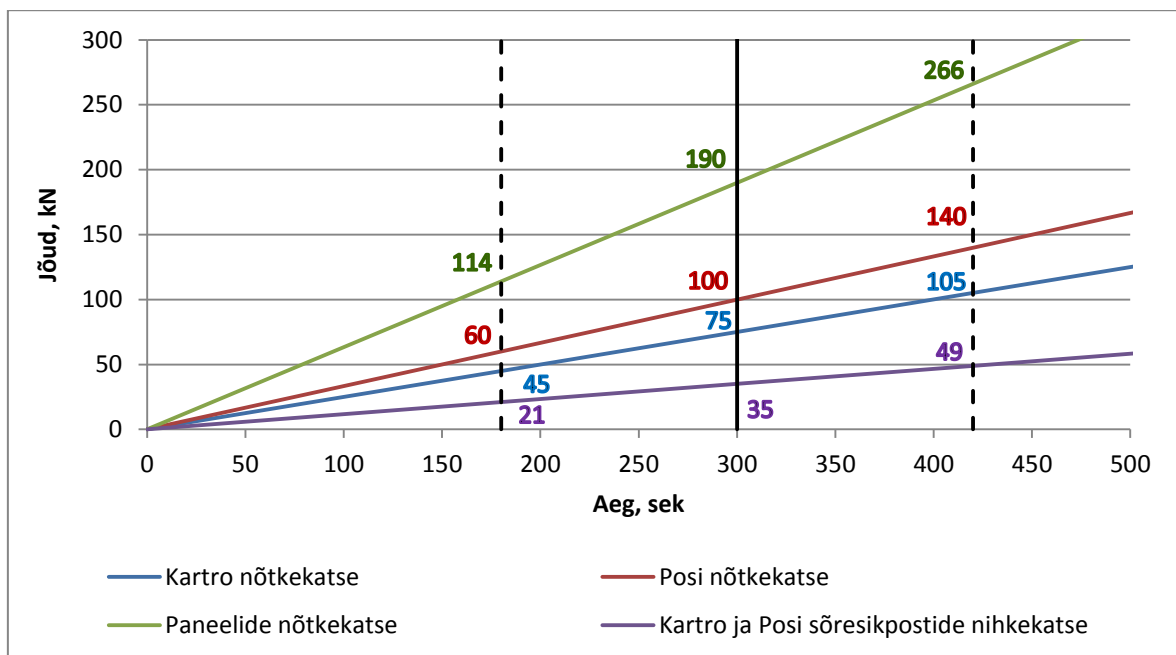
**Joonis 3.12.** Ajutine konstruktsioon, et vältida sõrestikposti y-telje suunalist nõtkumist.

Koormust rakendati katsekehadele survesilindriga Lukas LZM 25-200, mille poolt rakendatav maksimaalne koormus on 250 kN. Lukas LZM 25-200 survesilinder on

näidatud joonisel 3.14. Rõhku silindris mõõdab digitaalne rõhuandur (Type FD821421U) täpsusega 0,1 bar. Vastavalt LUKAS LZM 25-200 kalibreerimistunnistusele ATLF-10/0053 teisendati seadme näit (bar) jõuühikuks (kN) omavahelise suhtega 0,4914. Koormust rakendati katsekehadele lineaarselt, et katsekeha kaotaks kandevõime 300±120 sekundi jooksul. Maksimaalne koormus leiti monoliitpuidust posti arvutusi kasutades ja varem katsetatud katsekehade saadud tugevusi arvestades. Maksimaalseks jõuks katsekehadele oli arvestatud:

- nõtkekatses
  - Kartro sõrestikpostidel  $F= 75\pm 30$  kN;
  - Posi sõrestikpostidel  $F= 100\pm 40$  kN;
  - puit-betoon komposiit seinapaneelidel  $F= 190\pm 76$  kN.
- nihkekatses
  - Kartro sõrestikpostidel  $F= 35\pm 14$  kN;
  - Posi sõrestikpostidel  $F= 35\pm 14$  kN.

Katsekehade koormamise skeemid on toodud joonisel 3.13.



**Joonis 3.13.** Katsekehade koormamise skeemid

Sõrestikpostide nõtkekatses rakendati koormus 70x45 mm puitvöö ristlõike keskkoha ja nihkekatses 45x45 mm puitvöö ristlõike keskkoha. Katsekehade deformatsioone mõõdeti 150 mm (Almemo type FWA150T) ja 50 mm (Almemo type FWA050T) nihkeanduritega,

mille täpsus on 0,01 mm. Nihkeandurite lugemid saadi kätte Almemo 5690-2 andmesalvestajalt (vt. joonis 3.15).

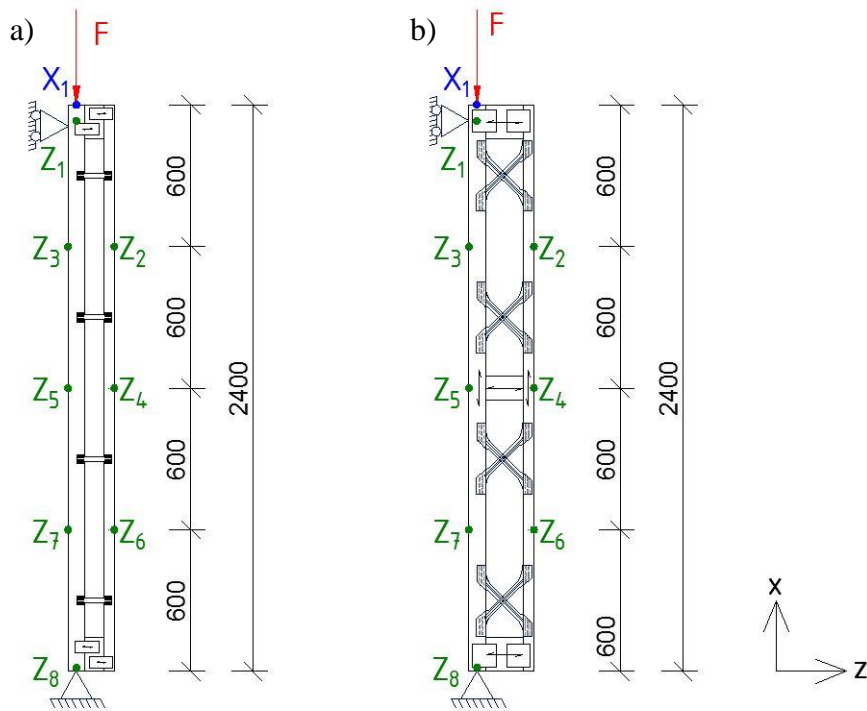


**Joonis 3.14.** Lukas LZM 25-200 survesilinder

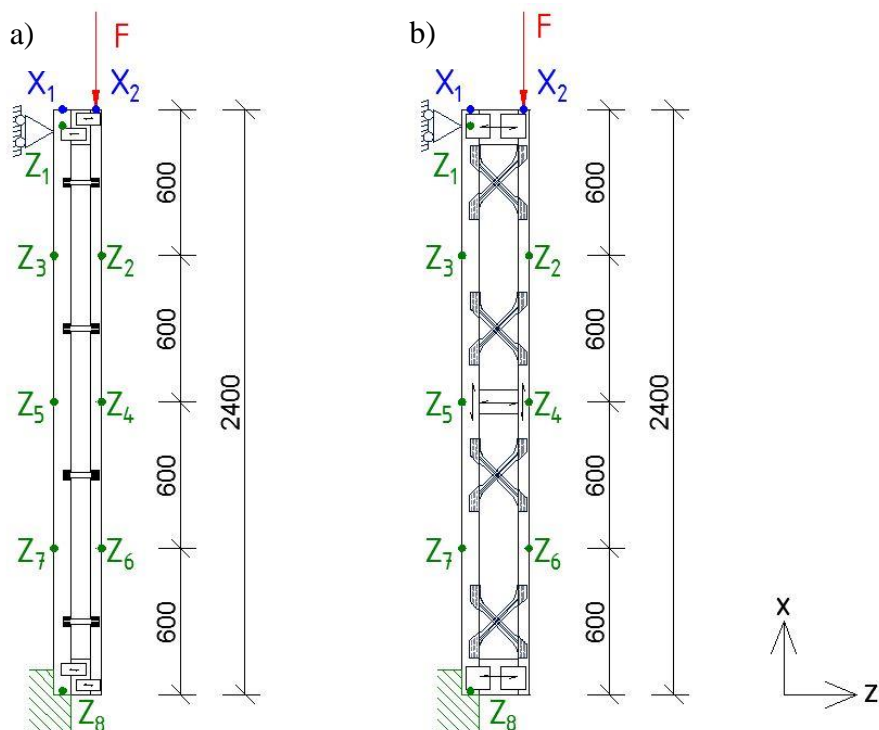


**Joonis 3.15.** Almemo 5690-2 andmesalvestaja

Sõrestikpostide nõttekatsetes kasutati deformatsioonide mõõtmiseks üheksat nihkeandurit, millest üks mõõtis surutud puitvöö vertikaalseid deformatsioone ja kaheksa mõõtsid horisontaalseid deformatsioone. Sõrestikpostide nihkekatses kasutati siirete mõõtmiseks kümmet andurit, millest kaks mõõtsid mõlema puitvöö vertikaalseid deformatsioone ja kaheksa mõõtsid horisontaalseid deformatsioone. Horisontaalsed nihkeandurid mõõtsid 70x45 mm mõõtmetega puitvöö ülemise ja alumise otsa ning posti mõlema puitvöö  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  ja  $\frac{3}{4}$  kõrgusel esinenud deformatsioone. Andurid kinnitati eraldiseivatele puidust stendidele. See oli vajalik, et andurid ei liiguks survesilindri koormusest põhjustatud deformatsioonide mõjul ning oleks tagatud nihkeandurite mõõtmistäpsus. Nihkeandurite arv ja mõõtmiskohad sõrestikpostide nõttekatsetes on näidatud joonisel 3.16 ja nihkekatses joonisel 3.17.



**Joonis 3.16.** Nõtkekatse skeemid a) Kartro sõrestikpost b) Posi sõrestikpost (Z- nihkeandurid horisontaalsete siirete mõõtmiseks; X- nihkeandurid vertikaalse siirde mõõtmiseks)



**Joonis 3.17.** Nihkekatse skeemid a) Kartro sõrestikpost b) Posi sõrestikpost (Z- nihkeandurid horisontaalsete siirete mõõtmiseks; X- nihkeandurid vertikaalsete siirete mõõtmiseks)

Puit-betoon komposiit seinapaneele koormati mõlema sõrestikposti 70x45 mm vöö pealt. Survesilindri rakendatud koormus jaotati mõlemale sõrestikposti puitvööle HE120A talaga. HE120A ja silindri vahele asetati 100x100x20 mm mõõtmetega terasplaat. Koormuse rakendamiseks ainult sõrestikposti 70x45 mm puitvööle lõigati ära betoonpaneeli ülemisest servast 30 mm riba (vt joonis 3.5).

Seinapaneeli mõlemad sõrestikpostid ühendati 45x70 mm mõõtmetega ja 300 mm sammuga prussidega, et postid ei saaks koormuse mõjul välja kiivuda (vt joonis 3.18). See oli vajalik, kuna reaalses seinakonstruktsioonis on sõrestikpostide hoone välimised küljed samuti fikseeritud.

Puit-betoon komposiit seinapaneelide deformatsioone mõõdeti 12 nihkeanduriga, millest kuus mõõtsid ühe sõrestikposti deformatsioone ja kuus andurit teise sõrestikposti deformatsioone. Nihkeandurid  $Z_1$ - $Z_6$  mõõtsid horisontaalseid deformatsioone,  $X_1$  ja  $X_2$  mõõtsid vertikaalseid deformatsioone ning  $T_1$ - $T_4$  mõõtsid betoonplaadi ja sõrestikposti 70x45 mm puitvöö nihkumist üksteise suhtes (vt joonis 3.19). Nihkeandurite ligikaudne arv ja asukohad olid saadud varasemalt tehtud uurimustöödest, kus puitkarkass-seina koormati vertikaalse survejõuga (Mukherjee 2012). Katseskeem ja andurite mõõtmiskohad on näidatud joonisel 3.20.

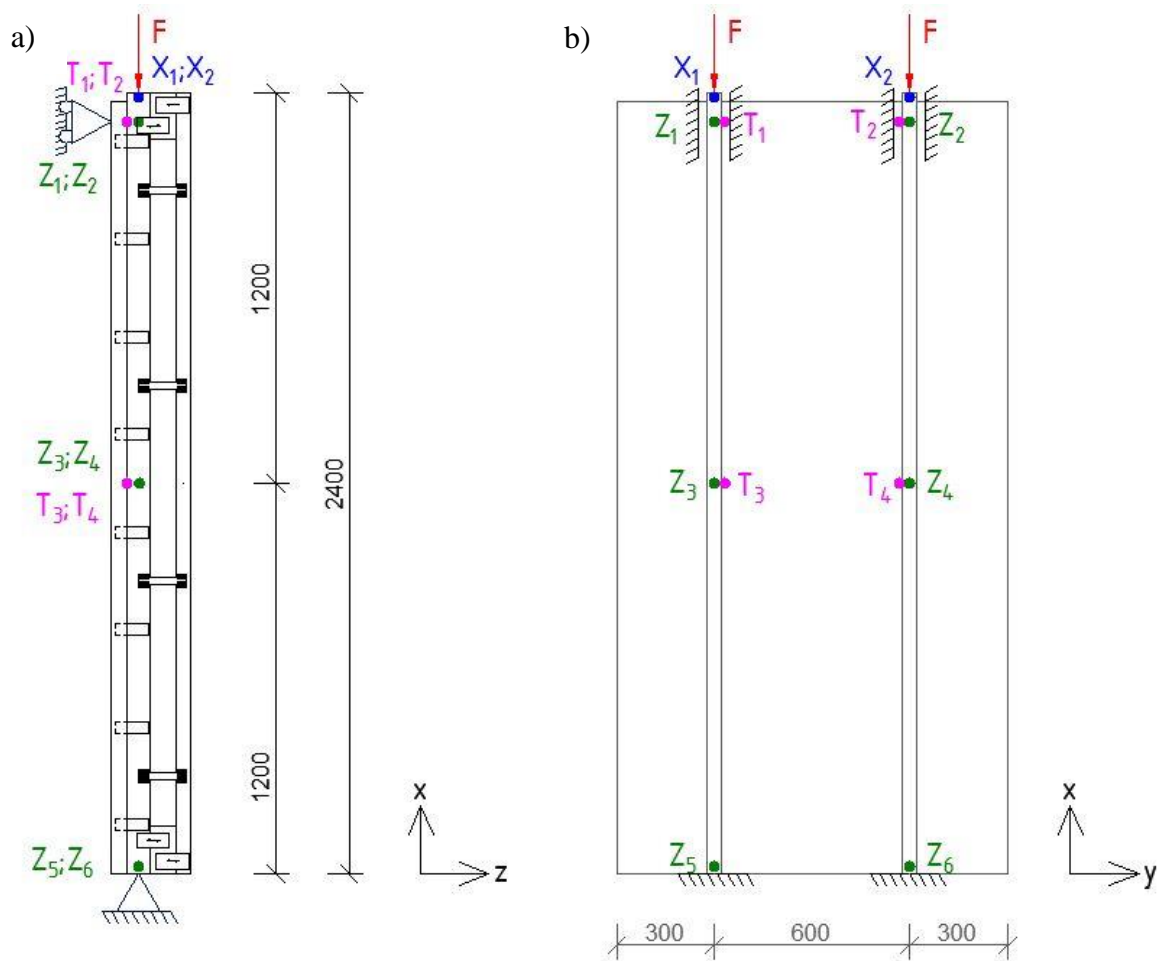


**Joonis 3.18.** Puit-betoon paneeli katsekeha



**Joonis 3.19.** Andur puidu ja betooni nihkumise mõõtmiseks





**Joonis 3.20.** Paneelide katseskeemid a) paneeli külgsaade b) paneeli eestvaade (Z-nihkeandurid horisontaalsete siirete mõõtmiseks; X- nihkeandurid vertikaalsete siirete mõõtmiseks; T- andurid betoonplaadi ja puitvöö omavahelise nihkumise mõõtmiseks)

## 4. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

### 4.1 Nõtkekatse tulemused ja analüüs

Katsekehasid koormati staatiliselt kuni purustava jõuni. Katsekehade maksimaalsed koormused on näidatud tabelis 4.1. Katsekehade täpsed purunemisskeemid on toodud lisas 4 ja purunemispildid lisas 5.

**Tabel 4.1.** Nõtkekatses esinenud maksimaalsed koormused

Katsekeha	Katsetamise kuupäev	Maksimaalne koormus, kN	Märkused
Kartro 1	19.02.2015	90,22	Sõrestikposti 70x45 mm vöö keskkohas toimus puidu kiudude kokkusurumine, samas kohas toimus paaris Kartro ogaplaatide välja nõtkumine.
Kartro 2	19.02.2015	88,85	Sõrestikposti 70x45 mm vöös toimus puidu kiudude kokkusurumine, 45x45 mm vöö lõhestus jõudude mõjul oksa kohalt.
Kartro 3	19.02.2015	65,75	Sõrestikposti 70x45 mm vöö keskkohas toimus puidu kiudude kokkusurumine ja lõhestumine, samas kohas toimus paaris Kartro ogaplaatide välja nõtkumine.
Posi 1	19.02.2015	138,72	Sõrestikposti 70x45 mm vöö purunes puidu kiudude kokkusurumisest. Toimus sõrestikposti nõtkumine y-telje suunas.
Posi 2	19.02.2015	118,97	Sõrestikposti 70x45 mm vöö purunes puidu kiudude kokkusurumisest oksakohalt. Sõrestikpost nõtkus y-telje suunas.
Posi 3	19.02.2015	95,53	Sõrestikposti 70x45 mm vöö purunes puidu kiudude kokkusurumisest oksakohalt. Toimus sõrestikposti nõtkumine y-telje suunas.
Paneel 1	05.03.2015	206,24	70x45 mm posti vööd purunesid puidu kiudude pikipaindest alumise toe juurest, alumised ogaplaadid tulid 45x45 mm puitvöö küljest lahti.
Paneel 2	05.03.2015	196,42	Toimus paneeli nõtkumine betoonplaadi suunas, sellega tekkisid praod betoonplaati. Sõrestikposti alumised ogaplaadid tulid 45x45 mm puitvööst lahti.
Paneel 3	06.03.2015	173,46	Toimus paneeli nõtkumine betoonplaadi suunas, sellega tekkisid praod betoonplaati. Sõrestikposti alumised ogaplaadid tulid 45x45 mm puit vööst lahti, 70x45 mm vöö keskkohal toimus puidukiudude kokkusurumine.

Arvestatud aeg koormuse rakendumisest kuni katsekehade kandevõime kaotuseni jäi kõigil katsetel lubatud  $300 \pm 120$  sekundi piiridesse. Kartro sõrestikpostid kaotasid kandevõime keskmiselt 338. sekundil, Posi sõrestikpostid 353. sekundil ja komposiitpaneelid 309. sekundil. Iga katsekeha koormamine ajas on näidatud lisas 6 paiknevatel joonistel.

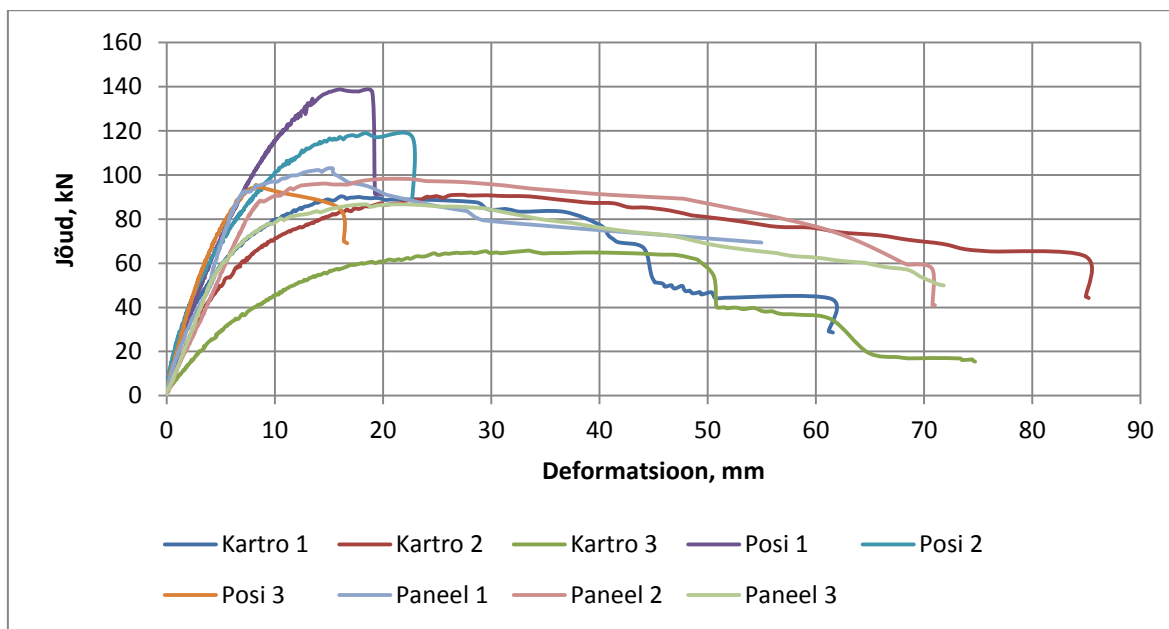
Komposiitpaneelidele rakendatud survesilindri maksimaalne jõud jagati pooleks, kuna seinapaneel koosnes kahest Kartro sõrestikpostist ning seeläbi on paneelide ja sõrestikpostide tulemused omavahel võrreldavad.

Kõige suuremat koormust võtsid vastu Posi sõrestikpostid, mille kolme katsekeha keskmine maksimaalne koormus oli 117,74 kN. Kõige väiksemat koormust suutsid vastu võtta Kartro sõrestikpostid, mille keskmine maksimaalne koormus oli 81,61 kN. Puit-betoon komposiit seinapaneelide kolme katsekeha keskmine purustavkoormus oli 96,02 kN, mis on ~1,2 korda suurem kui Kartro sõrestikpostide keskmine maksimaalne vastuvõetud koormus. Tabelist 4.1 on näha tendents katsekehade maksimaalsete koormuste langusest, lähtuvalt katsekehade katsetamise järjekorrast. Selle põhjuseks võib pidada esmasel vaatlusel hinnatud tugevamate ja väiksemate defektidega (keerduvuse, kõverdused, oksakohad, ogaplaatliidete kvaliteet) katsekehade katsetamine eelisjärjekorras.

Sarnaste katsekehade purunemispildid olid küllaltki sarnased. Kõikidel Kartro sõrestikpostidel toimus 70x45 mm puitvöö keskkohas puidukiudude kokkusurumine. Kokkusurumise all mõeldakse puidu kiudude paindumist ja kõrvale nihkumist. Lisaks kokkusurumisele toimusid esimesel ja teisel katsekehal altpoolt teise paaris Kartro ogaplaadi välja nõtkumine ning Kartro 2 katsekehal lõhestus oksakohalt 45x45 mm puitvöö. Posi ogaplaatidega katsekehadel toimus samuti kõikide katsekehade 70x45 mm puitvöö kiudude kokkusurumine. Purunemised toimusid enamasti puitvööde nõrgestuskohtadest (oksakohtadest). Posi sõrestikpostidel toimus katse lõpufaasis lisaks z-telje suunalisele nõtkumisele veel nõtkumine y-telje suunas, mille tagajärjel purunesid esimese ja teise katsekeha katsete käigus y-telje suunalist nõtkumist vältivad toed (mööblirullikud). Arvatavasti oleksid maksimaalsed koormused olnud suuremad, kui ei oleks y-suunalist nõtkumist toimunud. Paneelide nõtkekatsetes erines esimese puit-betoon komposiit seinapaneeli purunemispilt kahest ülejäänust. Kui teisel ja kolmandal katsekehal toimusid konstruktsiooni purunemised komposiitpaneeli keskkohas, siis esimesel paneelil toimus purunemine alumise toekinnituse juurest.



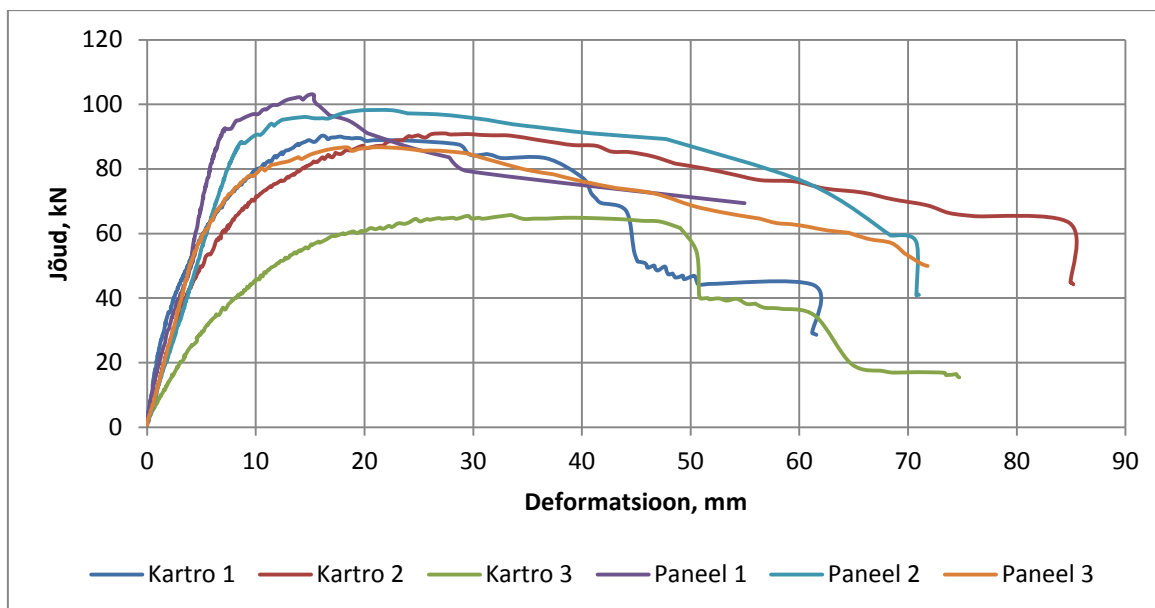
Joonisel 4.1 on näha, et Kartro sõrestikpostide ja komposiitpaneelide maksimaalsed deformatsioonid on võrreldes Posi sõrestikpostidega märgatavalt suuremad. Posi sõrestikpostid võtsid vastu suuremat maksimaalset koormust aga katsekehad purunemine toimus järsku. See oli tingitud tugevde purunemisest nagu eelnevalt mainitud.



**Joonis 4.1.** Katsekehade horisontaalsed deformatsioonid staatilisel koormamisel

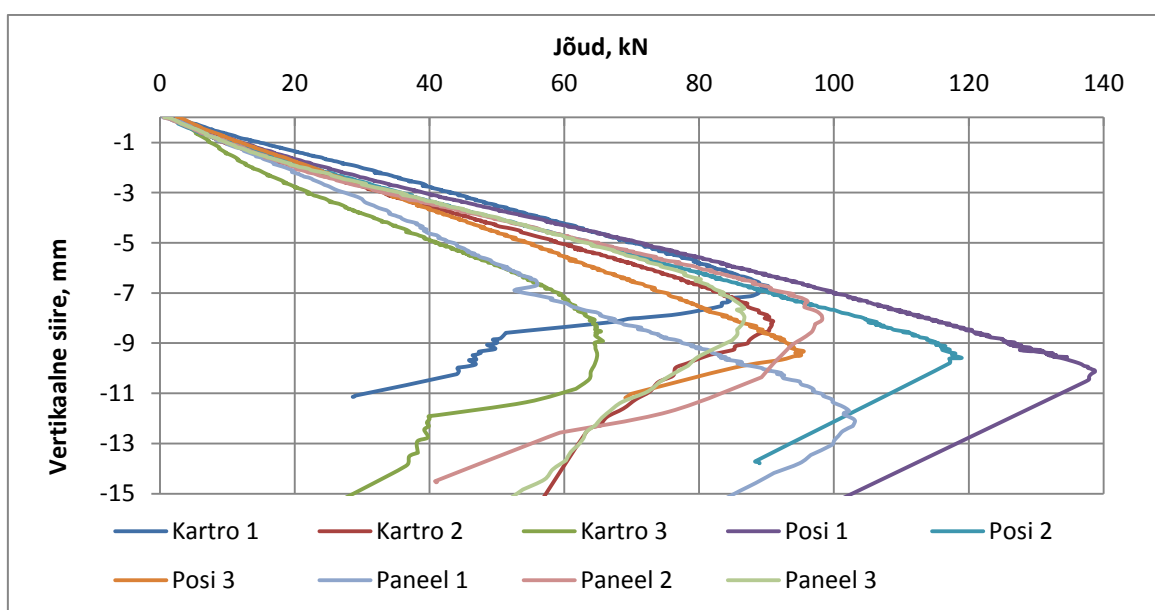
Kartro sõrestikpostid ja komposiitpaneelide katsekehad purunesid sarnasemalt plastsele materjalile. Enamuste katsekehade maksimaalsed koormused saavutati kui horisontaalne deformatsioon katsekeha keskkohalt mõõdetuna saavutas 15-25 mm, peale seda ei suutnud katsekehad suuremat koormust vastu võtta ning hakkas deformatsioonide järsk suurenemine.

Joonisel 4.2 on eraldi välja toodud Kartro sõrestikpostide ja komposiit seinapaneelide horisontaalsed deformatsioonid, mõõdetuna sein või posti keskkohast. Kuna komposiitpaneelide katsekehades oli kasutatud Kartro sõrestikposte, siis antud võrdlus on sobiv. Antud jooniselt on näha, et Kartro sõrestikpostide deformatsioonid on suuremad kui komposiit seinapaneelidel sama koormuse juures. Seinapaneelide deformatsioonid on väiksemad, kuna betoonpaneeli lisamine sõrestikpostide külge muutis konstruktsiooni jäigemaks ning betoonpaneelis paiknev armatuurvõrk aitas vastu võtta sõrestikpostide nõtkest tekkivaid paindepingeid.



**Joonis 4.2.** Kartro sõrestikpostide ja komposiitpaneelide horisontaalsed deformatsioonid

Katsekehade vertikaalsete deformatsioonide muutumine staatilisel koormamisel on näidatud joonisel 4.3. Koormamise algfaasis suurenes vertikaalne deformatsioon enam-vähem lineaarselt koormuse kasvuga kuni katsekehade maksimaalse kandevõime saavutamiseni. Peale seda deformatsioonid jätkasid suurenemist, aga konstruktsiooni vastuvõttev jõud vähenes. Võrdlusena võib öelda, et Posi sõrestikpostidel olid väiksemad vertikaalsed deformatsioonid sama koormuse juures, kui Kartro sõrestikpostidel ja puit-betoon komposiit seinapaneelidel.



**Joonis 4.3.** Sõrestikpostide ja komposiitpaneelide vertikaalsed siirded

## 4.2 Nihkekatse tulemused ja analüüs

Katsekehasid koormati staatiliselt kuni nende purunemiseni. Nihkekatses esinenud maksimaalsed koormused ja kirjeldus, kuidas katsekehade purunemine toimus, on välja toodud tabelis 4.2. Katsekehade täpsed purunemiskohad ja –pildid on näidatud lisas 4 ja lisas 5. Arvestatud aeg koormuse rakendumisest kuni katsekehade kandevõime kaotuseni jäid lubatud  $300\pm 120$  sekundi piiridesse vaid Posi sõrestikpostide katsete korral, Kartro sõrestikpostid purunesid nihkejõududele palju varem kui lubatud  $300\pm 120$  sekundit. Kartro sõrestikpostid kaotasid kandevõime keskmiselt 142 sekundi möödudes peale koormuse rakendamist. Koormuse rakendumisest kuni maksimaalse kandevõimeni kulunud aeg oli Posi sõrestikpostidel keskmiselt 276 sekundit. Iga katsekeha koormamine ajas on näidatud lisas 7 asuvatel joonistel.

**Tabel 4.2.** Nihkekatsetes esinenud maksimaalsed koormused

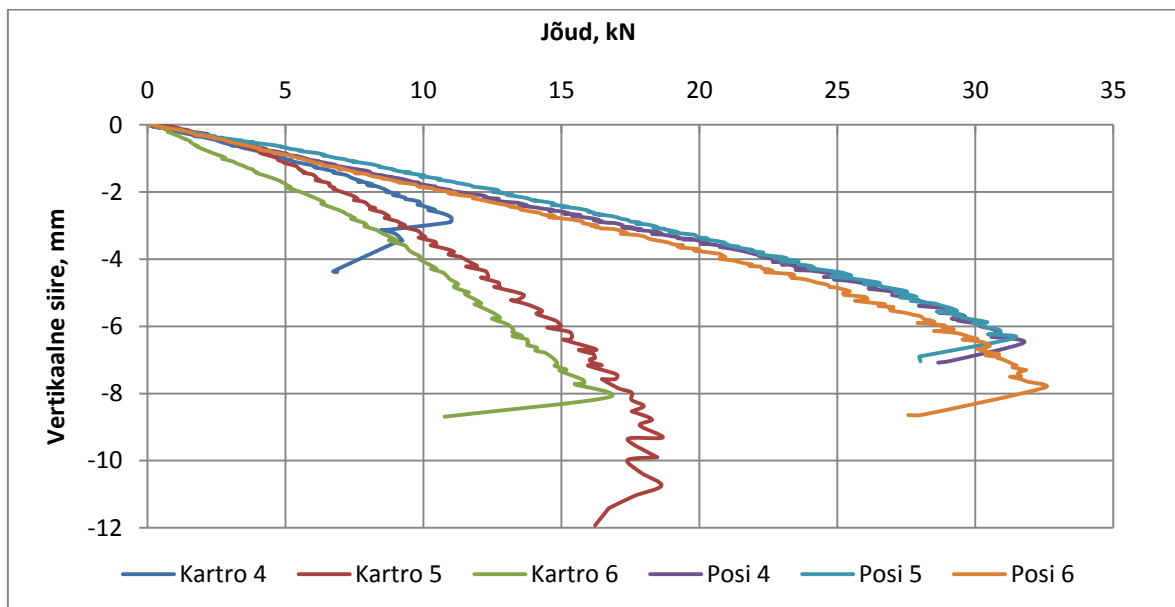
Katsekeha	Katsetamise kuupäev	Maksimaalne koormus postile, kN	Märkused
Kartro 4	20.02.2015	11,99	Sõrestikpost purunes alumise ja ülemise otsa puidust vaheklotside pikikiulisusest lõhestumisest.
Kartro 5	20.02.2015	15,83	Alumise ja ülemise otsa ogaplaadid tulid 45x45 mm posti vöö küljest lahti.
Kartro 6	20.02.2015	17,69	Sõrestikposti ülemise otsa ogaplaadid tulid 45x45 mm vöö küljest lahti, alumine ots purunes puidust vaheklotsi pikikiulisusest lõhestumisest.
Posi 4	20.02.2015	31,75	Sõrestikposti 45x45 mm puitvöö lõhenes pikikiudu Posi ogaplaatide juurest.
Posi 5	20.02.2015	31,40	Sõrestikposti 45x45 mm vöö lõhenes pikikiudu tõmmatud Posi ogaplaatide juurest.
Posi 6	20.02.2015	32,53	Tõmmatud Posi ogaplaadid tulid 45x45 mm puitvööst lahti.

Sarnaste katsekehade purunemispildid olid küllaltki identsed. Kartro sõrestikpostide purunemised toimusid ülemise ja alumise otsa juurest ning sõltusid seal asuvate ogaplaatide paigutusest. Posi sõrestikpostide katsekehad purunesid Posi ogaplaatide juurest, kas ogaplaadid tulid 45x45 mm puitvööst välja või ogaplaat lõhestas 45x45 mm puitvöö pikikiudu.

Katsekehade 45x45 mm puitvööde vertikaalsed siirded staatilisel koormamisel on näidatud joonisel 4.4. Sõrestikpostide 45x45 mm puitvöö vertikaalse siirete graafikul on maha arvestatud

katse käigus koormuse mõjul kaasa liikunud 70x45 puitvöö siire. Selle läbi on tulemused võrreldavad ja arvestatud vaid ogaplaatide nihkumisega. Erandiks on Kartro 6 katse tulemused, kus 70x45 mm puitvöö vertikaalseid siirdeid mõõtev andur ei andnud tõepäraseid näite ja selle tulemusi ei ole arvestatud antud analüüsis. Sõrestikposti puitvööde vertikaalsed siirded on esitatud lisas 7.

Jooniselt 4.4 on näha, et Posi sõrestikpostide keskmine nihketugevus oli märgatavalt suurem kui Kartro sõrestikpostidel. Selle põhjuseks oli Posi ogaplaatide diagonaalne asetus kahe puitvöö vahel ja nihkepindade suurem pindala, mis võimaldas konstruktsioonil vastu võtta suuremaid nihkepingeid. Kartro sõrestikpostil võtsid suurema osa koormusest tekkinud nihkepingeid vastu puitvööid ja vaheklotse ühendavad GN100S ogaplaadid.



**Joonis 4.4.** Kartro ja Posi sõrestikpostide vertikaalsed siirded

Kartro sõrestikpostide nihketugevused erinesid väga suures ulatuses. Võrdluseks, kui Kartro 4 katsekeha maksimaalne koormus oli 11,99 kN, siis Kartro 5 katsekeha maksimaalseks koormuseks oli 17,69 kN, mis on peaaegu 1,5 kordne tulemuste vahe. Nii suure katsekehade nihketugevuse erinevuse põhjuseks olid ülemise ja alumise otsa ogaplaatide asetuse erinevused. Antud sõrestikpostide nihketugevus sõltus sellest, kas 45x45 mm puitvööd ja vaheklotsi ühendav ogaplaat oli paigaldatud allapoole või ülespoole võrreldes 45x70 mm puitvööd ja vaheklotsi ühendavat GN100S ogaplaati. Posi sõrestikpostide katsekehade keskmiseks maksimaalseks nihketugevused jäid 31,75 kN kuni 32,53 kN vahele ning vertikaalsed siirded purunemise hetkel 6,8-8 mm vahele.

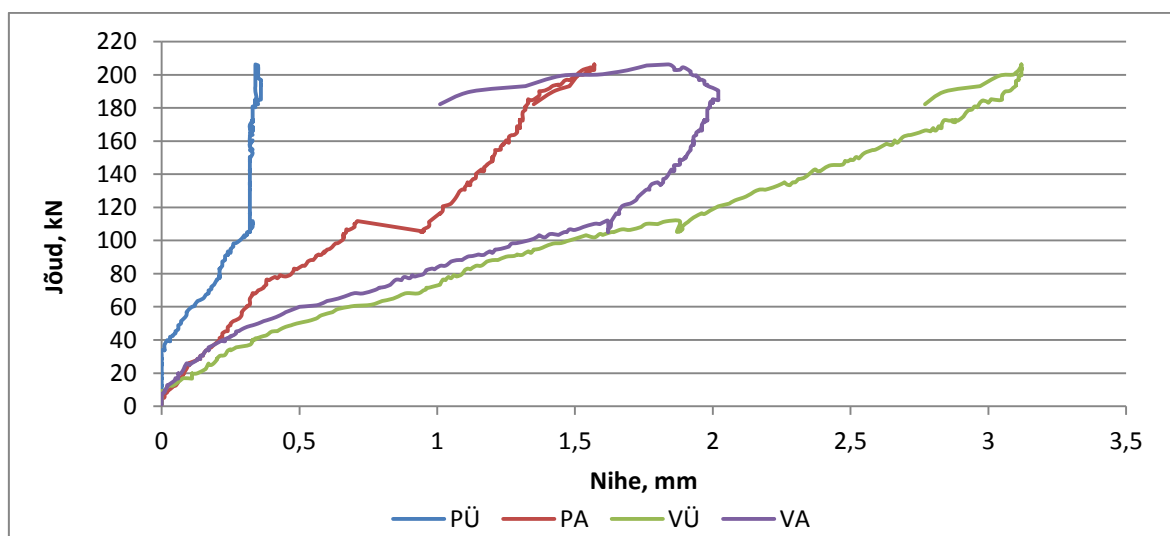
### 4.3 Seinapaneeli komposiitkäitumise analüüsimine puidu ja betooni omavahelise nihkumise abil

Konstruksiooni komposiitkäitumine sõltub suuresti kahte materjali ühendavate nihkekinnitite efektiivsusest. Mida jäigemad kinnitused suudavad nihkekinnitid luua, seda täielikum on konstruksiooni komposiitkäitumine. Nihkekinnitite jäikust saab hinnata, mõõtes puidu ja betooni omavahelist nihkumist.

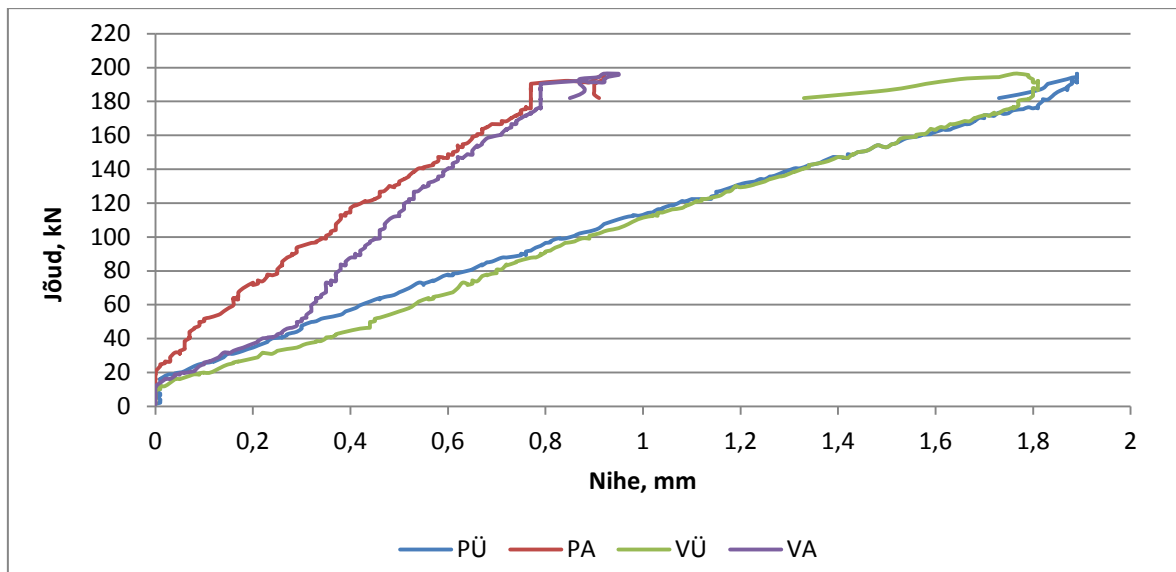
Sõrestikposti puitvöö ja betoonplaadi omavahelise nihkumise mõõtmiseks paigaldati katsekehadele neli nihkeandurit: kaks parempoolse sõrestikposti külge ja kaks vasakpoolse sõrestikposti külge. Nihet puidu ja betoonplaadi vahel mõõtvad andurid märgistati vastavalt:

- PÜ on parempoolse sõrestikposti ülemine andur;
- PA on parempoolse sõrestikposti alumine andur;
- VÜ on vasakpoolse sõrestikposti ülemine andur;
- VA on vasakpoolse sõrestikposti alumine andur.

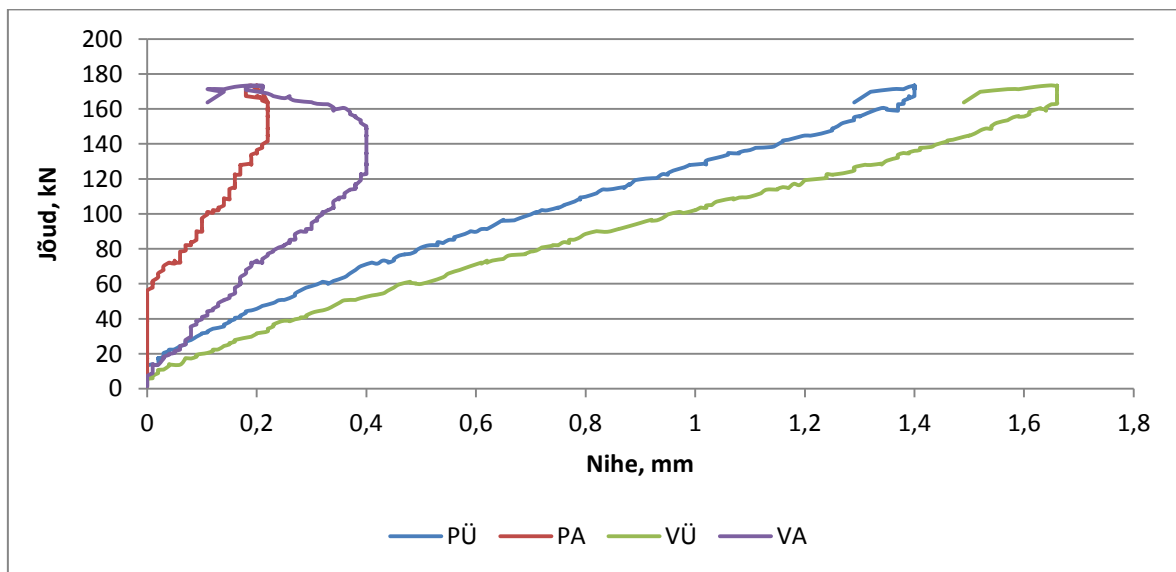
Alumised andurid paigaldati 1/2 komposiitpaneeli kõrgusele ja ülemised nihkeandurid komposiitpaneeli ülemise toe juurde. Nihkeandurite mõõtepiirkonna kõrgused võisid natuke erineda, mis sõltusid nihkekinnititeks olevate ogaplaatide asetusest.



**Joonis 4.5.** Paneel 1 sõrestikpostide ja betoonplaadi vaheline nihkumine neljast kohast mõõdetuna



**Joonis 4.6.** Paneel 2 sõrestikpostide ja betoonplaadi vaheline nihkumine neljast kohast mõõdetuna



**Joonis 4.7.** Paneel 3 sõrestikpostide ja betoonplaadi vaheline nihkumine neljast kohast mõõdetuna

Joonistelt 4.5, 4.6 ja 4.7 on näha, et üldiselt olid paneeli keskpaigas nihkumised väiksemad kui paneeli ülemise ääre lähedal. See on tingitud seinapaneeli nõtkunud kujust, mille tõttu omavahel ühendatud painutatud elementide omavahelised nihked suurenevad konstruktsiooni keskkohast ülemise ja alumise ääre poole liikudes.

Nagu purunemispiltidelt, erines ka siin esimese puit-betoon komposiit seinapaneeli katsekeha nihkedeformatsioonid kahest ülejäänust. Kui teise ja kolmanda katsekeha

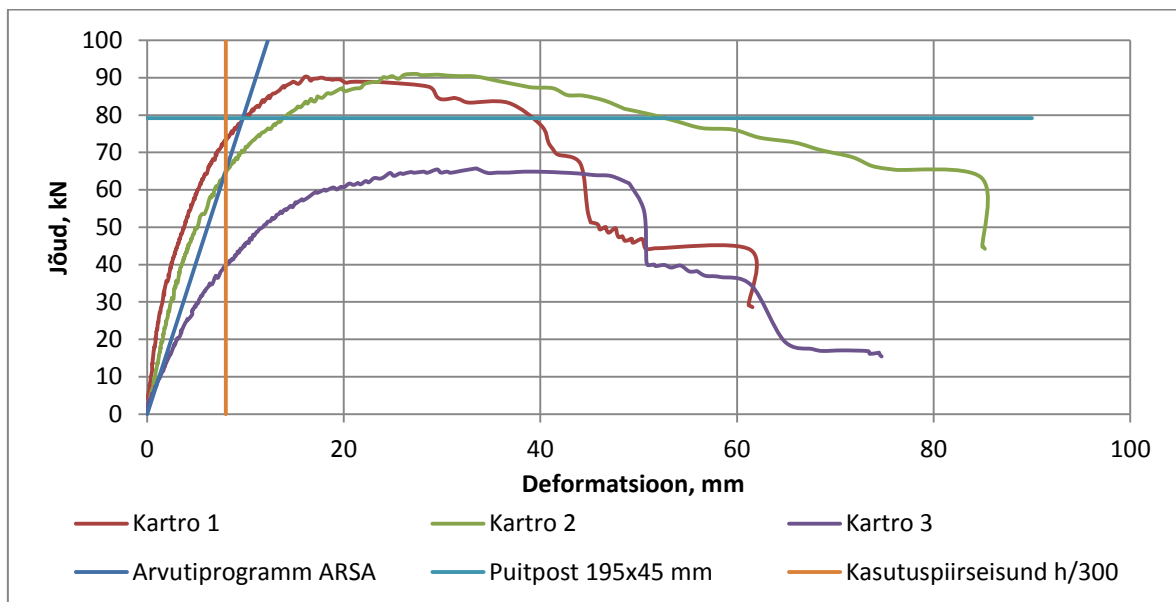
maksimaalsed nihkumised jäid alla 2 mm, siis esimesel näitas vasakpoolse sõrestikposti alumine andur puidu ja betoonplaadi omavaheliseks maksimaalseks nihkumiseks 3,12 mm ja parempoolse sõrestikposti ülemises mõõtepiirkonnas oli nihkumine vaid 0,36 mm. Võrreldes teiste ülemises piirkonnas olnud nihkeandurite tulemustega on see märkimisväärselt väiksem. Selle põhjuseks võib pidada esimese katsekeha betoonplaadi ja sõrestikpostide omavahelise nihkumise takistatust (kinni kiilumine) parempoolse ülemise toekinnituse juurest.

Üldiselt võib öelda, et nihkekinnititeks olevad ogaplaadid suutsid tagada piisavalt jäiga kinnituse betooni ja puidu vahel, et toimuks kahe materjali koostöötamine. Kuna eksisteerisid väiksemad nihkumised kahe kihi vahel, siis toimus osaline komposiitkäitumine puidu ja betooni vahel. Osalisest komposiitkäitumisest annab ka märku puit-betoon komposiit seinapaneelide tunduvalt suurem kandevõime võrreldes Kartro sõrestikpostidega.

## 5. KATSETEGA JA TEOREETILISTE ARVUTUSTEGA SAADUD TULEMUSTE ANALÜÜS

### 5.1 Kartro sõrestikpostide tulemuste võrdlus

Katsetulemuste võrdlemiseks sisestati katsekehade arvutuskeemid arvutiprogrammi Autodesk Robot Structural Analysis (ARSA). Selleks koostati katsekehade arvutuskeemid ning sisestati materjalide tugevusnäitajad ja ristlõike parameetrid.

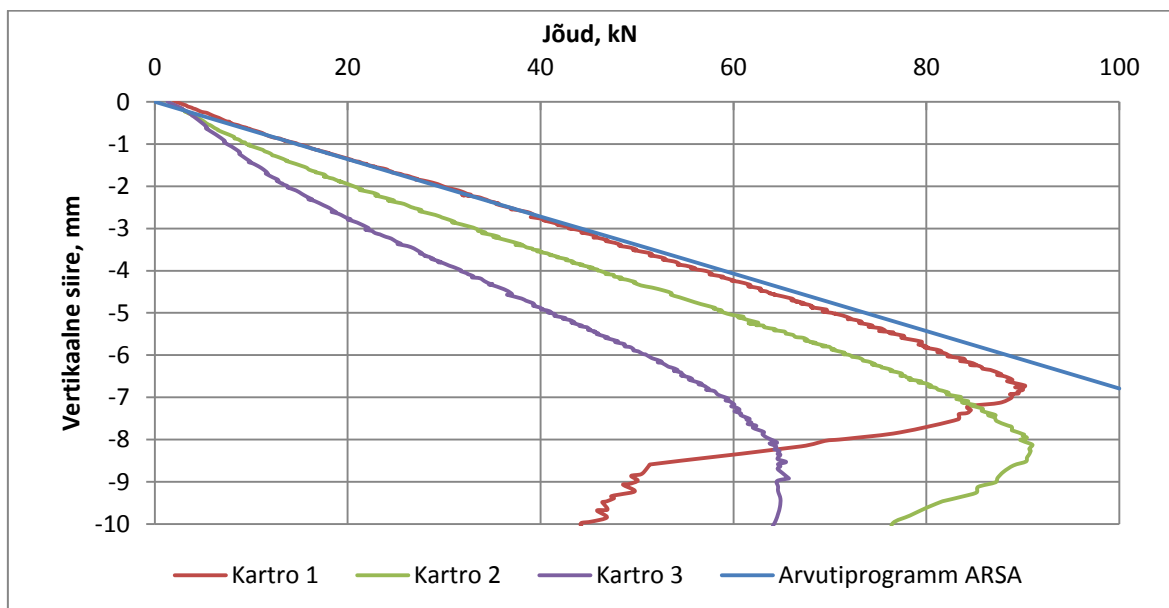


**Joonis 5.1.** Arvutiprogrammiga, teoreetiliste arvutustega samaväärse puitposti ja Kartro sõrestikpostide katsetega saadud tulemused

Joonisel 5.1 on näha, et ARSA-ga saadud tulemused on sarnased nii kaua kuni lähenetakse konstruktsiooni kandevõimele. Arvutiprogramm arvutab koormuse ja sellest tekkivaid deformatsioone lineaarsetena ehk ei arvesta nõtkest tekkinud konstruktsiooni stabiilsuse kaoga. Samaväärse puitposti teoreetiliste arvutustega saadud maksimaalne koormus on ligilähedane katsekehade keskmisele maksimaalsele koormusele. Võrdluseks teoreetiliste arvutustega saadud Kartro sõrestikpostile samaväärse puitposti maksimaalne survetugevus oli 79,18 kN ja katsekehade keskmine maksimaalne koormus oli 82,33 kN.



Jälgides kasutuspiirseisundi nõuet, mis lubab maksimaalseks horisontaalseks deformatsiooniks 1/300 sõrestikposti kõrgusest, siis sellele vastavad Kartro katsekehade kandevõimed on 73 kN, 64,5 kN ja 39,8 kN. Peale vastavate koormuste saavutamist ei olnud katsekehadel kasutuspiirseisundi nõuded enam tagatud. ARSA-ga saadud tulemuste korral ei ole konstruktsiooni kasutuspiirseisundi nõue tagatud peale 62,2 kN koormuse ületamist.

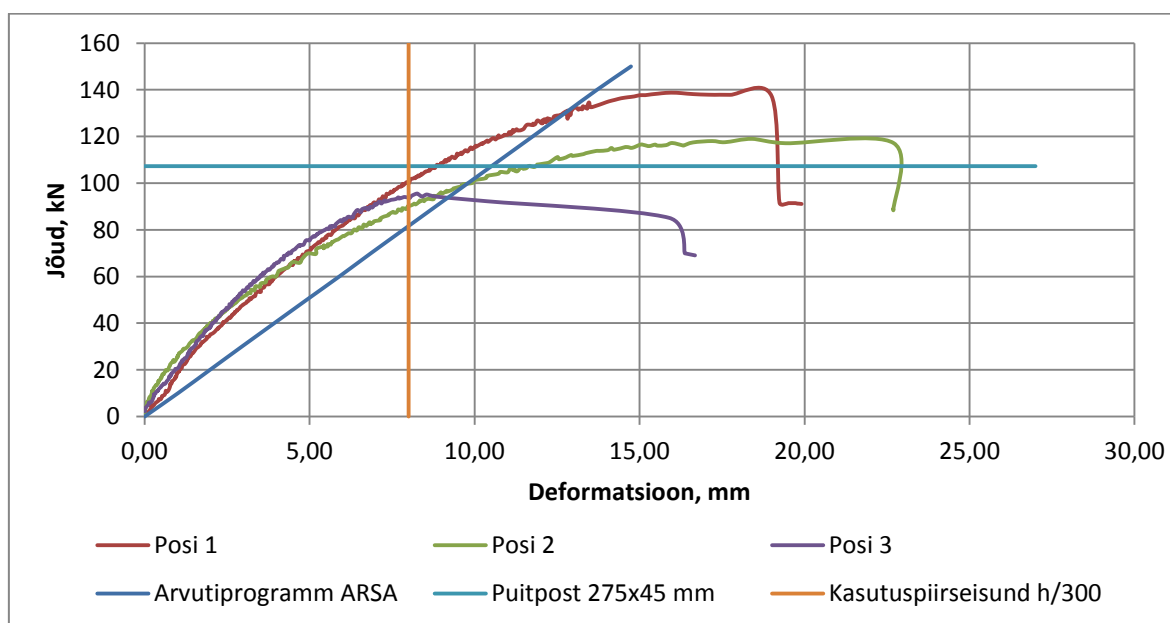


**Joonis 5.2.** Arvutiprogrammiga ja Kartro sõrestikpostide katsetega saadud vertikaalsed deformatsioonid erinevate koormuste korral

Võrreldes arvutiprogrammiga ARSA saadud vertikaalseid deformatsioone reaalsete katsetulemustega, on näha, et programm annab väiksemaid deformatsioone sama koormuse juures (vt joonis 5.2). See on arvatavasti tingitud sellest, et arvutiprogramm ei arvesta konstruktsiooni algkõveruste, kiivumiste ja defektidega. Kartro 1 katsekeha vertikaalsed siirded on kuni 40 kN saavutamiseni sarnased ARSA-ga saadud tulemustele. Peale 40 kN hakkasid Kartro 1 vertikaalsed siirded kiiremini kasvama ning enne purunemiskoormust on vahe arvutiprogrammiga ~0,5 mm 90,07 kN juures. Peale 40 kN -it tekkinud erinevus on arvatavasti tekkinud katsekeha nõtkesse minekuga, mille korral suurenesid ka vertikaalsed siirded.

## 5.2 Posi sõrestikpostide tulemuste võrdlus

Posi sõrestikpostide katsetulemuste, teoreetiliste arvutustega ja arvutiprogrammiga saadud tulemused on näidatud joonisel 5.3. Lisaks on antud joonisel märgitud kasutuspiiriseisundi nõue, mis lubab antud sõrestikposti siirdeks keskkohast mõõdetuna  $h/300$  ehk 8 mm.

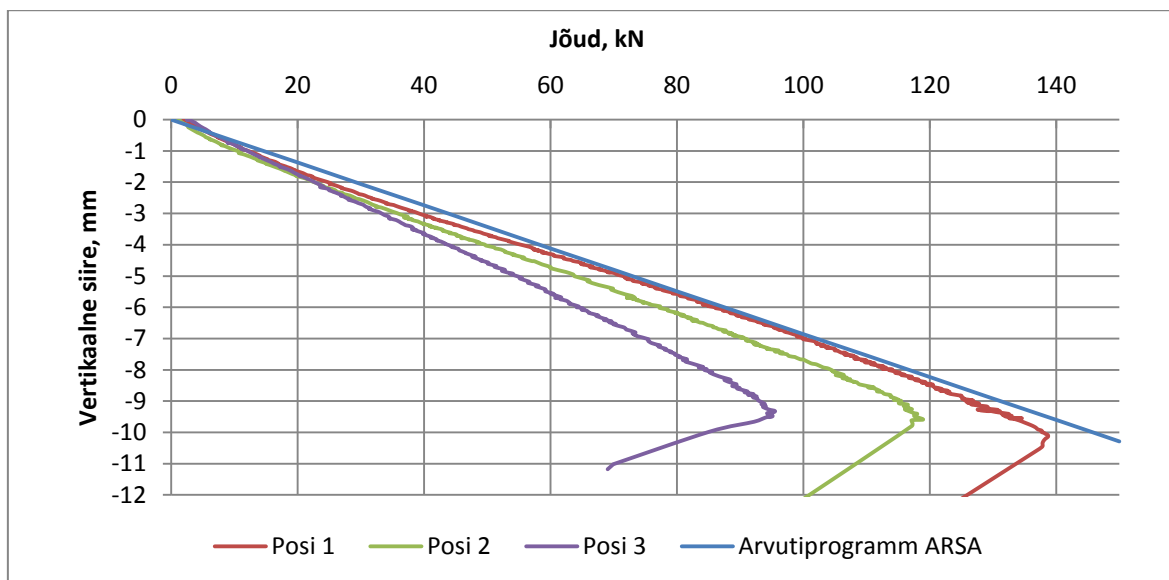


**Joonis 5.3.** Arvutiprogrammiga, teoreetiliste arvutustega samaväärse puitposti ja Posi sõrestikpostide katsetega saadud tulemused

Joonisel 5.3 on näha, et ARSA-ga saadud Posi sõrestikposti horisontaalne deformatsioon on märgatavalt suurem sama koormuse juures kui katseliselt saadud tulemused. Selle põhjuseks on suure tõenäosusega ogaplaatide ja puidu vastastikmõju vale hindamine. Laboratoorsetes katsetes kaotasid ogaplaatliited oma jäikuse puidu või ogaplaadi kohaliku purunemise/nõtkumise läbi. Katsete käigus hakkasid ogaplaadi ogad pingete kasvades lõhestama puitu pikikiudu, mille tõttu muutus puidu ja ogaplaat ühendus elastsemaks, lubades omakorda suuremaid sõlme deformatsioone.

Teoreetiliselt arvutatud samaväärse puitposti maksimaalseks survetugevuseks oli 107,27 kN, mis on ligilähedane katsekehade keskmisele maksimaalsele survetugevusele, milleks oli 117,74 kN. Muidugi tuleb arvestada, et kolmas katsekeha oli märgatavalt väiksema maksimaalse koormusega (95,53 kN).

Kasutuspiiriseisundi nõudest lähtuvalt ei oleks tohtinud Posi sõrestikpostide katsekehade maksimaalsed koormuse ületada vastavalt 99,9 kN, 90,5 kN ja 93,8 kN, kuna pärast nende koormuse saavutamist ei olnud vastavate katsekehade kasutuspiiriseisundi nõuded enam tagatud.



**Joonis 5.4.** Arvutiprogrammiga ja Posi sõrestikpostide katsetega saadud vertikaalsed deformatsioonid erinevate koormuste korral

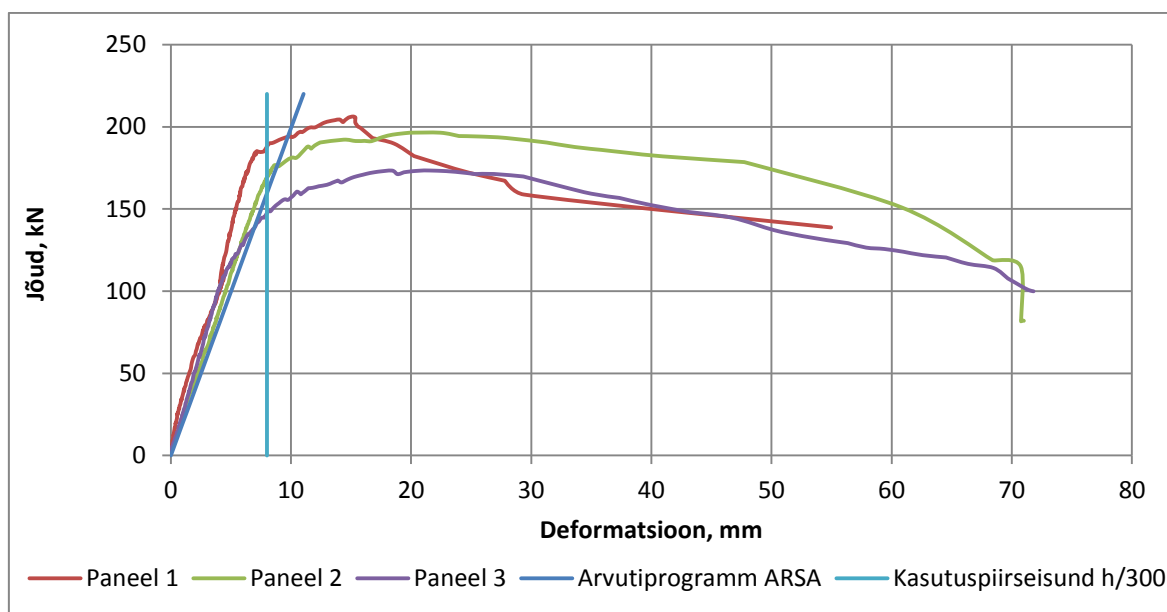
Posi sõrestikpostide katsekehade ja Robotiga arvutatud vertikaalsed deformatsioonid on näidatud joonisel 5.4. Nagu Kartro sõrestikpostide võrdluses on ka siin näha, et arvutiprogramm ARSA annab väiksemaid vertikaalseid siirdeid sama koormuse korral, kui katseliselt saadutega. Samuti on ARSA ja Posi 1 sõrestikposti katsekehade vertikaalsed siirded peaaegu identsed kuni kandepiiriseisundi saavutamiseni.

### 5.3 Puit-betoon komposiit seinapaneelide tulemuste võrdlus

Puit-betoon komposiit seinapaneelide katse ja arvutiprogrammiga ARSA saadud horisontaalsete deformatsioonide tulemused on esitatud joonisel 5.5 ja vertikaalsed siirded näidatud joonisel 5.6. Koormamise algfaasis, kui konstruktsioonis toimusid elastsed deformatsioonid, on arvutiprogrammiga saadud tulemused ja katsetega saadud tulemused väga heas sõltuvuses. Kuna arvutiprogrammis kasutati staatilist lineaaranalüüsi, siis koormuse kasv on võrdelises seoses siirde kasvuga. Ehk konstruktsioon töötas elastse

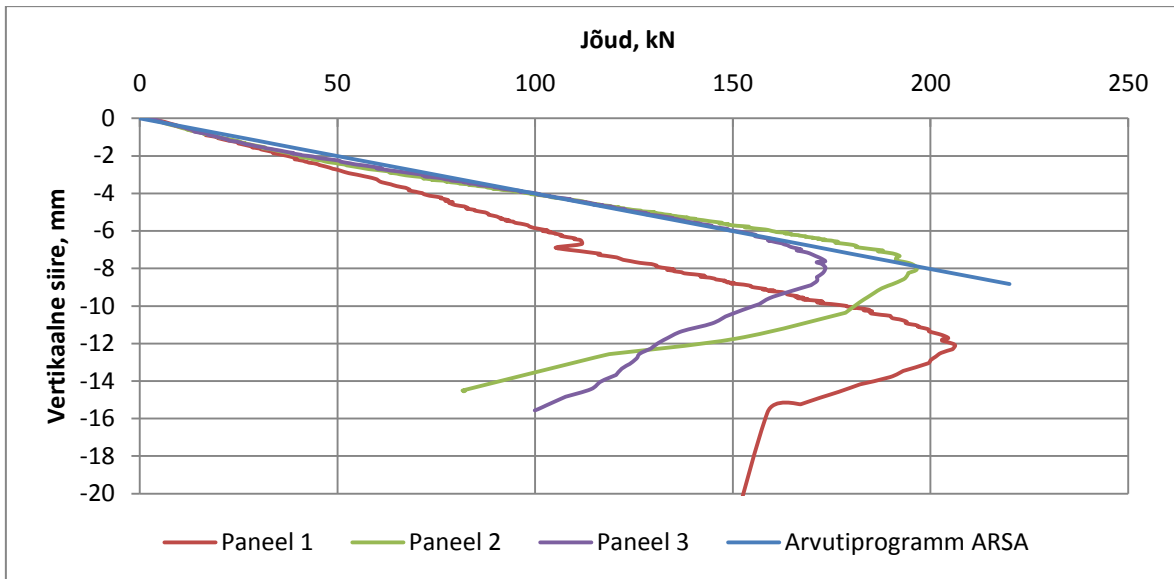
materjalina. Peale proportsionaalsuspiiri ületamist ei ole katsetulemused ja arvutiprogrammiga saadud tulemused enam võrreldavad kuna reaalselt hakkas deformatsioonide järsk suurenemine.

Katsekehade kasutuspiirseisundi nõuded ei olnud tagatud vastavalt peale 187,8 kN, 169,1 kN ja 147,4 kN saavutamist. Arvutiprogrammiga saadud deformatsioonid ületasid kasutuspiirseisundi nõuet ( $h/300$ , mis oli antud katsekehade puhul 8 mm) 159,6 kN koormuse saavutamisel (vt joonis 5.5).



**Joonis 5.5.** Katsetega ja arvutiprogrammiga saadud komposiitpaneeli horisontaalsed deformatsioonid erinevate koormuste juures

Puit-betoon komposiit seinapaneeli vertikaalsete siirete võrdluses on näha, et teise ja kolmanda katsekeha tulemused on kuni proportsionaalsuspiirini ligilähedased arvutiprogrammiga ARSA saadud tulemusele (vt joonis 5.6). Esimese komposiitpaneeli katsekeha vertikaalsed siirded suurenevad koormuse kasvades kiiremini, kui ülejäänud kahe katsekeha ja ARSA tulemused.



**Joonis 5.6.** Arvutiprogrammiga ja katsetega saadud komposiitpaneeli vertikaalsed siirded erinevatel koormusel

## KOKKUVÕTE

Antud töö eesmärgiks oli uurida puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide survekandevõimet ja sõrestikpostide ogaplaatide nihkekandevõimet, võrreldi saadud katsetulemusi omavahel, teoreetiliste arvutustega ning arvutiprogrammiga saadutega. Lisaks oli vaatluse all sõrestikpostide ja betoonplaadi omavaheliste kinnitite nihkumise leidmine, et anda hinnang konstruktsiooni komposiitkäitumisele.

Nimetatud eesmärkide täitmiseks koostati katsete meetodid katsekehade staatiliseks koormamiseks ja deformatsioonide mõõtmiseks. Katseid viidi läbi Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruktsioonide laboris. Katsete läbiviimiseks kasutati laboris asetsevat jõuseina ja selle küljes paiknevat konsooli. Kokku teostati 15 katset, millest üheksa oli konstruktsioonide survekandevõimete leidmiseks ning kuus sõrestikpostide ogaplaatide nihketugevuste leidmiseks. Nii survekandevõime kui ka nihketugevuse katsetes kasutati igas katseseerias kolme samasugust katsekeha. Katsekehasid koormati staatilise koormusega, et purunemine toimuks  $300 \pm 120$  sekundi jooksul peale katsekeha koormamise algust.

Kuna katsekehad kujutasid pikka ja piisavalt saledat varrast, siis survejõu kasvades hakkasid konstruktsioonid välja nõtkuma. Katsekehade survekandevõime kadu toimus Kartro sõrestikpostidel vastavalt 90,22 kN, 88,85 kN ja 65,75 kN, Posi sõrestikpostidel 138,72 kN, 118,97 kN ja 95,53 kN ning puit-betoon komposiit seinapaneelidel 206,24 kN, 196,42 kN, ja 173,46 kN koormuse juures. Puit-betoon komposiitkonstruktsiooni rakendatud koormused jagati sõrestikpostidega võrdluses kahe seinapaneelis paiknenud Kartro sõrestikpostile, seeläbi olid erinevate katsekehade tulemused omavahel võrreldavad. Maksimaalsete koormuste võrdluses selgus, et Posi sõrestikpostid suutsid vastu võtta märgatavalt suuremaid koormuseid kui Kartro sõrestikpostid ja komposiitpaneelid. See erinevus on tingitud Posi sõrestikposti ristlõike suuremast mõõdust just posti nõtkunud külje suunas. Seinapaneelide ja Kartro sõrestikpostide võrdluses olid suurema kandevõimega komposiitpaneelid. Raudbetoonpaneeli lisamine Kartro sõrestikpostidele suurendas seinakonstruktsiooni survekandevõimet  $\sim 1,2$  kordselt.

Sõrestikpostide ogaplaatide nihketugevuse katsetes selgus, et Posi sõrestikpostide nihketugevused on ligi 2 korda suuremad, kui Kartro sõrestikpostidel. Posi sõrestikpostide kolme katsekeha ogaplaatide keskmine nihketugevus oli 31,89 kN, siis Kartro sõrestikpostide katsekehadel oli vastav tugevus 15,14 kN. Antud tulemused ei võimalda teha lõplikke järeldusi antud andmete põhjal, kuna Kartro sõrestikpostide katsekehade ogaplaatide nihketugevused kõikusid väga suurtes piirides.

Katsekehade deformatsioonide võrdlusest võib öelda, et nii Posi sõrestikpostide katsekehade vertikaalsed, kui ka horisontaalsed deformatsioonid, olid sama koormuse juures Kartro sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsekehade deformatsioonidest väiksemad. Selle põhjuseks võib suure tõenäosusega lugeda Posi kinnitite diagonaalset asetust kahe puitvöö vahel, mis muutis sõrestikposti jäigemaks. Nihkekinnititeks olnud ogaplaadid suutsid tagada piisavalt jäiga ühenduse puidu ja betooni vahel, et toimuks osaline komposiitkäitumine. Lisaks toodi antud töös välja, millal katsekehad ületasid kasutuspiiriseisundi nõude, mis lubab konstruktsiooni maksimaalseks horisontaalseks läbipaindeks keskkohas  $h/300$  puitelemendi kõrgusest.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- Bathon, L. A., Bletz, O., Schmidt, J.** (2006). Hurricane proof buildings-An innovative solution using prefabricated modular woodconcrete- composite elements. Conference Proceeding. 9th World Conf. on Timber Engineering. WCTE. Portland.
- Chen, W. F., Goto, Y., Richard, J. Y.**(1996). Stability Design of Semi-Rigid Frames. John Wiley & sons, Inc. New York. 488 pp.
- Costa, L.** (2011). Timber concrete composite floors with prefabricated Fiber Reinforced Concrete. Lund: Lund Institute of Technology. Sweden.
- Ehituspuit. Tugevusklassid. (2009). Eesti standard EVS-EN 338:2009. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. (2009). Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. Eesti Standard EVS-EN 1995-1-1:2005+NA:2007+A1:2008+NA:2009. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- Gerber, C., Quast, U., Steffens, R.** (1993). Balkenschuhe als Verbundmittel für Holzbalkendecken mit mittragender Stahlbetondecke. Beton- und Stahlbetonbau 88, Heft 9.
- Girhammar, U.A.** (1978). Rabo Foundation and Wall Element (in Swedish). University of Luleå, Div of Struct Eng. Report 78:12. 16 pp.
- Girhammar, U.A.** (1984). Composite timber and concrete components for walls. IABSE 12 Congress. Vancouver. Article. 371 pp.
- Guan, Z., Gendall, J.** (2008). Finite element modelling of buckling behaviour of steel webbed timber joists. Liverpool: The University of Liverpool. 8 pp.
- Hassan, O. A. B., Schedin, S., Girhammar, U. A.** (2012). Experimental analysis of composite timber-concrete wall elements. Luleå University of Technology.
- Korteremaja Kuru tn. Tartu. [WWW] <http://www.timbet.eu/toosolev-objekt-kuru-tn-tartus/> (10.05.2015)



- Lukaszewska, E., Johnsson, H., Sthen, L.** (2006). Connections for Prefabricated Timber-Concrete Composite Systems. Div. of Timber Structures, Luleå University of Technology.
- Mandre, O.** (2014). Mehaaniliste liidetega surutud ja painutatud sõrestikpostide tugevusarvutused (magistritöö). Tallinna Tehnikaülikool Tartu kolledži säästva tehnoloogia õppetool. Tartu. Lk 50-76.
- Masso, T., Rohusaar, J., Mägi, R., Talvik, I., Jaaniso, V., Otsmaa, V., Voltri, V., Loorits, K., Peipman, T., Pukk, O., Õiger, K., Just, E., Just, A., Hartšuk, V.** (2012). Ehituskonstruktori käsiraamat. (3. tr.). Tallinn: Autorid ja EHITAME kirjastus, 577 lk.
- MiTek Industries LTD. (2008). Metal web joists for structural purposes. European Technical Approval ETA-07/0161. UK: BM TRADA Certification.
- MiTek Industries LTD. (2010). Punched Metal Plate Fasteners for Structural Timber Products. GNT 100 S. Form No. DV100S.
- Mukherjee, A.** (2012). Structural benefits of hempcrete infill in timber stud walls. Kingston: Queen`s University.
- Nordisk Kartro AB. (2006). Kartro Lättregel. Projekteringsanvisningar [WWW] <http://www.cobuilder.com/coBuilderDocuments/getfile?&dokid=181856&code=MTAwNDA3JTJGUHJvamVrdGFudi5LTGF0dHJlZy5wZGY=&ext=.pdf> (26.11.2014).
- Otsus, M.** (2013). Posi-talade ja puit-betoon komposiitpaneelide katsetused ja analüüs (magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehituse instituut. Tartu.
- Pildid TimBet ehituselementidest. [WWW] <http://www.timbet.eu/pildid-timbet-ehituselementidest/> (10.05.2015).
- Porteous, J., Kermani, A.** (2007). Structural Timber Design to Eurocode 5. Oxford: Blackwell publishing. 638 pp.
- Poutanen, T.** (1988). Timber-concrete composite structures- IABSE congress report. Tampere, Finland, pp. 239-241.
- Põdra, P.** (2004). Surutud varraste stabiilsus. Tugevusanalüüsi alused konspekt. [WWW] [http://www.mh.ttu.ee/priitp/Tugevusopetus/Tugevusanaluuksi\\_alused/13\\_Surutud\\_varraste\\_stabiilsus.pdf](http://www.mh.ttu.ee/priitp/Tugevusopetus/Tugevusanaluuksi_alused/13_Surutud_varraste_stabiilsus.pdf) (14.01.15).

- Schnabl, S., Planinc, I., Turk, G.** (2013). Buckling Loads of Two-Layer Composite Columns with Interlayer Slip and Stochastic Material Properties. *Journal of Engineering Mechanics*. August 2013. 6 pp.
- Timber-concrete composite. (2015). [WWW] <http://www.structurecraft.com/materials/mass-timber/timber-concrete-composite> (07.04.2015).
- Vahi, S.** (2012). Sisselõigete mõju hindamine surutud puitposti kandevõimele (magistritöö). Tallinna Tehnikaülikooli ehitiste projekteerimise instituut. Tallinn.
- Valgur, J.** (2014). Raudbetoonkonstruktsioonid I. Eesti Maaülikool. Loengukonspekt.
- Van der Linden, M. L. R.** (1999). Timber-concrete composite beams. Delft University of Technology. *HERON*, Vol. 44. No.3.
- VTT Expert Services Ltd. (2011). Statement for nail plate Top-W. STATEMENT NO VTT-S-02160-11. Espoo.
- Õiger, K.** (2006) Puidust, puidupõhised ja teistest materjalidest komposiitkonstruktsioonid. *Puuinfo* 2/2006. 41 lk.

# **TESTING AND ANALYSIS OF TIMBER-METAL LATTICE GIRDERS AND TIMBER-CONCRETE COMPOSITE WALL PANELS**

## **SUMMARY**

A different kind of composite structures manufacturing has increased considerably over the past few decades. The reason for this may consider to be the construction sector continuous increase for stronger, but at the same time for lighter structures. One structure that meets those criteria's is TimBet wall element produced by the company ConcreTech OÜ. The wall elements consist of timber-metal lattice girders detached to a thin concrete slab.

The aim of the thesis was to investigate timber-metal lattice girders and timber-concrete composite wall panels compressive strength and lattice girders punched metal plate fasteners shear strength and compare the test results to each other, theoretically calculated timber column ones and to those obtained with FEM program. In addition, displacements between the timber stud and concrete slab was measured during tests to analyse composite action between the two layers.

The tests were carried out in the construction laboratory of Estonian University of Life Sciences. To conduct tests the test plans and set-up had to be done to measure static loading and deformations of the test specimens. Buckling tests were performed in 3 series and shear strength test in 2 series. A grand total of 15 specimens (3 samples in each test batch) were tested. The load was applied to test specimens with single-acting cylinder Lukas LZM 25-200 that maximum load would achieve in  $300 \pm 120$  second after first burdening. The maximum load for tests were calculated by using simple timber columns parameters.

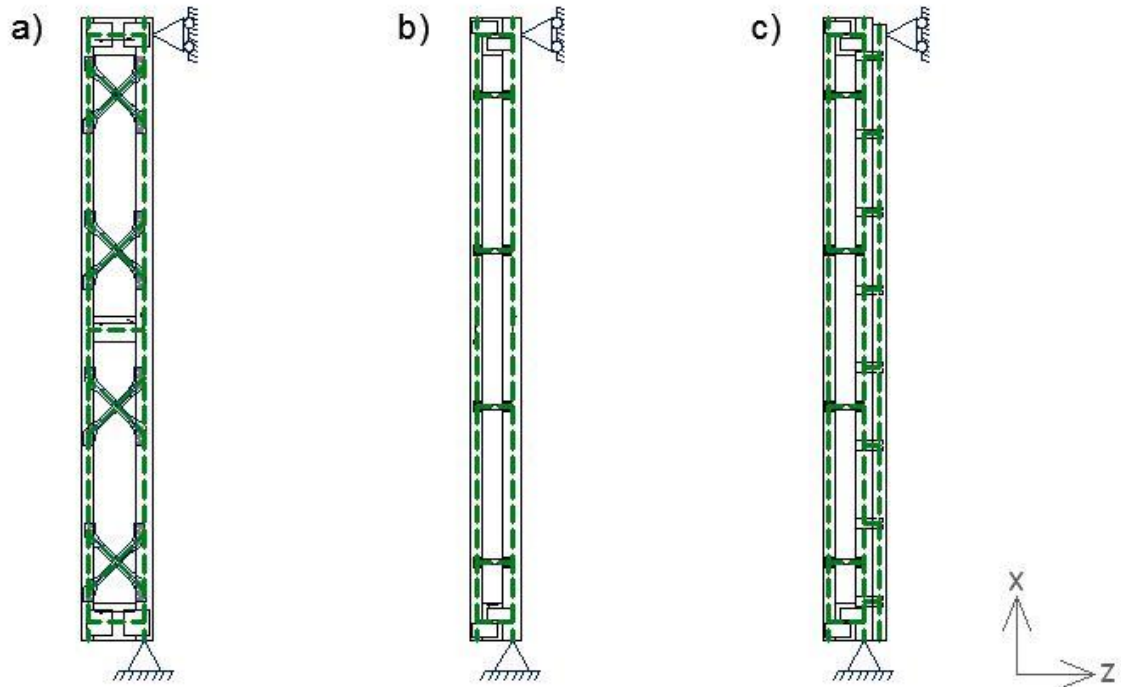
The buckling test results showed that Posi lattice girders obtained the highest value of compressive force. Posi lattice girders average compressive strength was 117,74 kN, Kartro lattice girders 81,61 kN and timber-concrete composite panels 96,02 kN. Adding

concrete plate onto the lattice girders increased wall panel rigidity and structure load carrying capacity in compression. Lattice girders punched metal plate fasteners slip and pull-out tests showed that Posi lattice girders shear strength is closely twice as large as Kartro lattice girders average shear strength. The reason for this lies in Posi joist webbed position between the two parallel timber studs and larger area of nail plate contact surfaces.

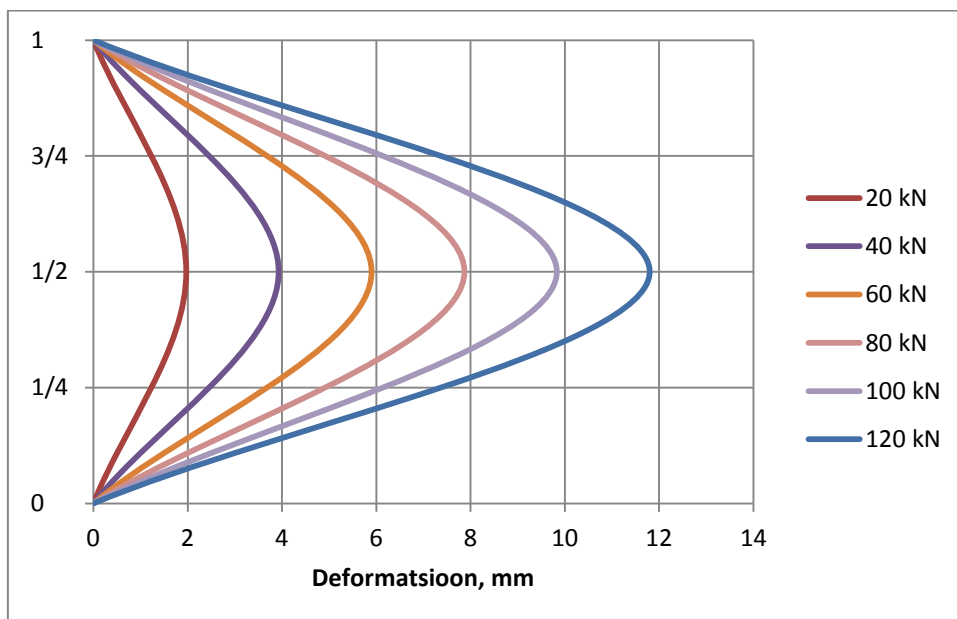
Stress-strain results between the laboratory tests, theoretically calculated and the FEM were analysed. FEM results showed to have a good overall match over the laboratory tests. Generally, a slight underestimation of the vertical deflection and overvaluation of the horizontal deformation was noted by using the FEM. Also in analysis serviceability limit state (SLS) criteria was taken into account, which permits maximum out of plane deflection of a stud  $h/300$ .

**LISAD**

## Lisa 1. Programmiga Autodesk Robot Structural Analysis Professional saadud tulemused

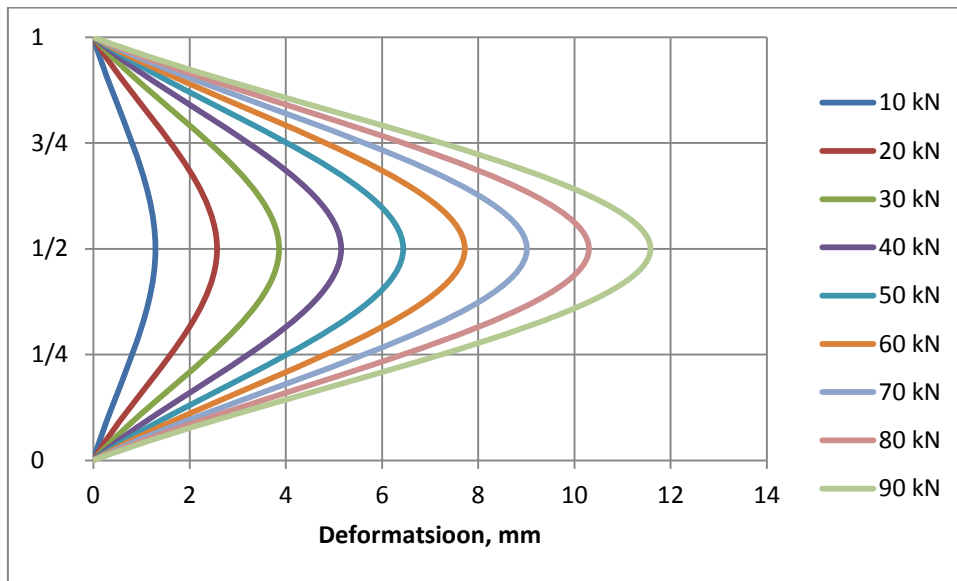


**Joonis L1.1.** Katsekehadest moodustatud arvutuskeemid a) Posi sõrestikpost b) Karto sõrestikpost c) puit-betoon komposiit seinapaneel

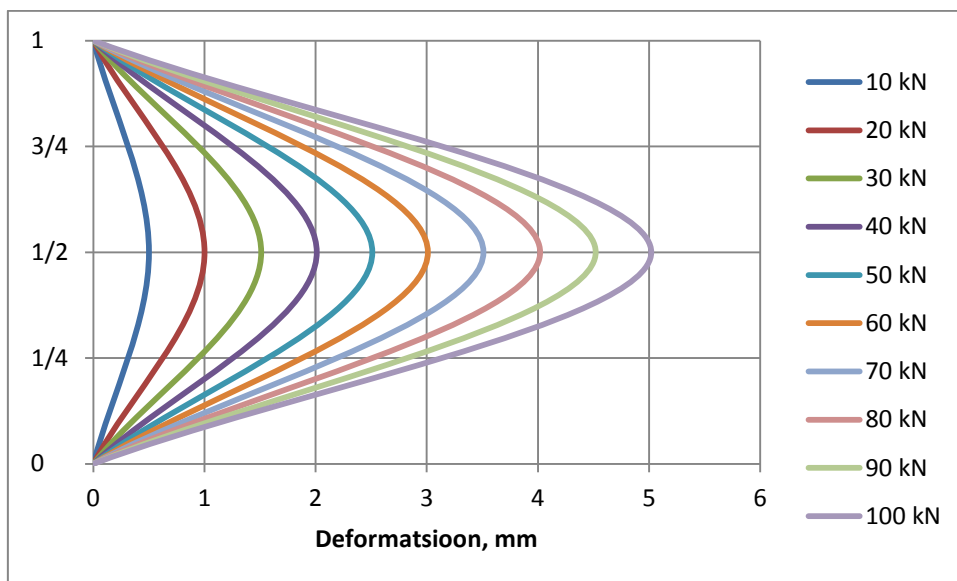


**Joonis L1.2.** Arvutiprogramm Robot saadud Posi sõrestikposti nõtkunud kujud erinevatel koormustel

## Lisa 1 järg

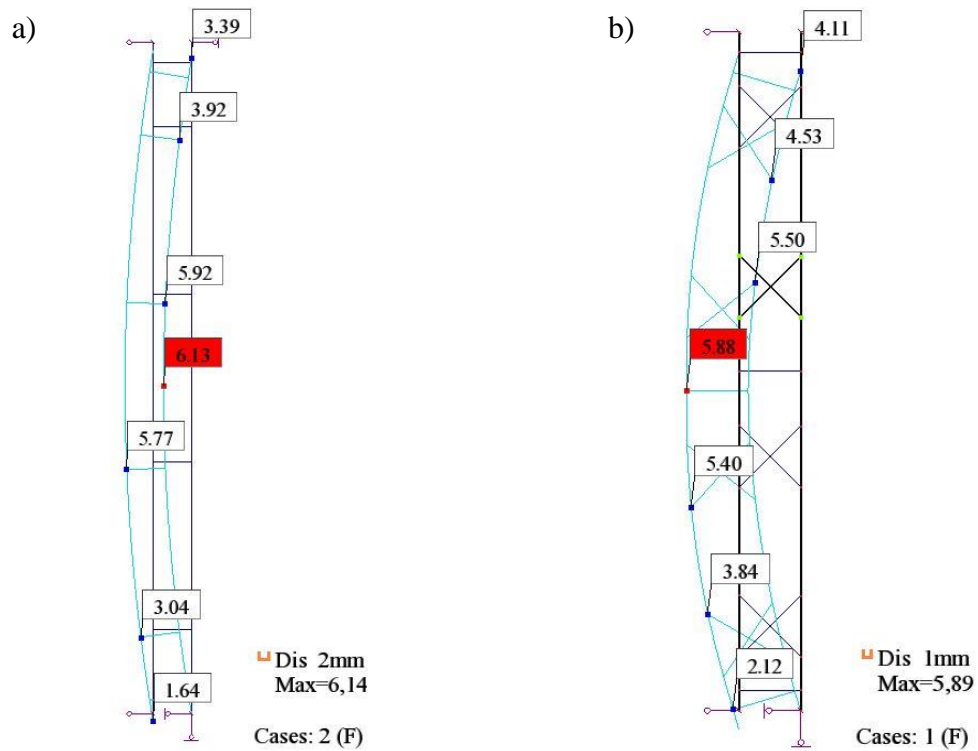


**Joonis L1.3.** Arvutiprogrammiga Robot saadud Kartro sõrestikposti nõtkunud kujud erinevatel koormustel

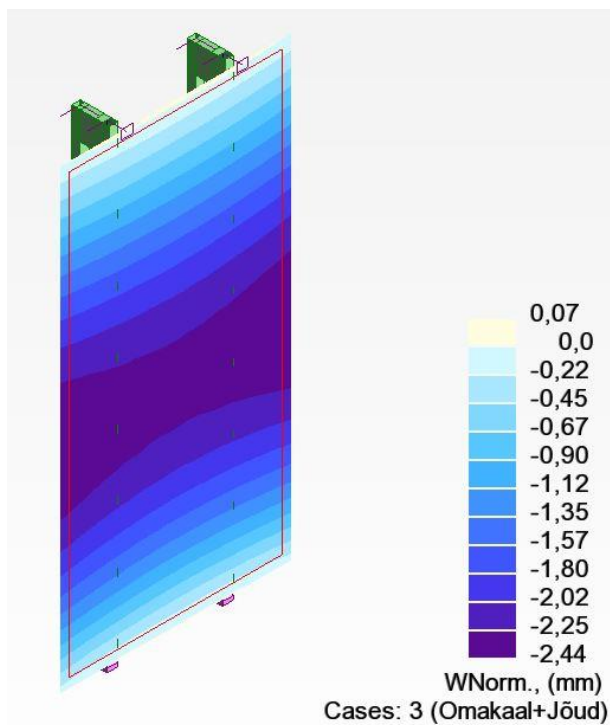


**Joonis L1.4.** Arvutiprogrammiga Robot saadud puit-betoon komposiit seinapaneeli nõtkunud kujud erinevatel koormustel

## Lisa 1 järg



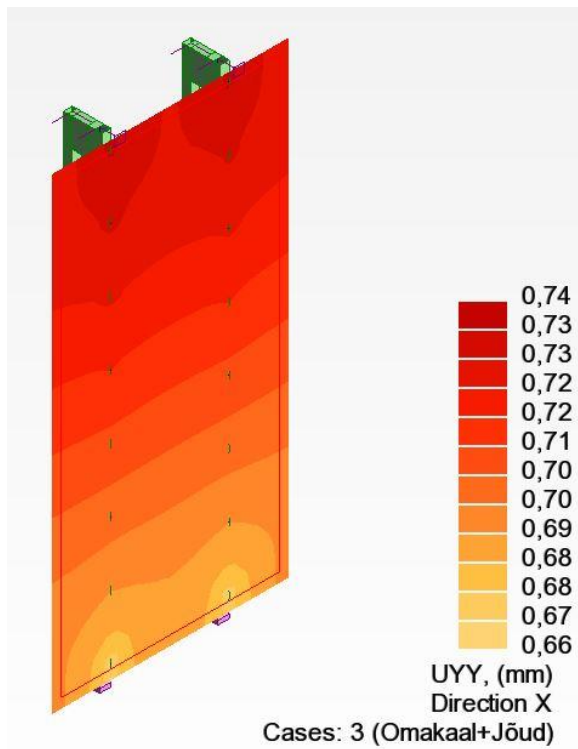
**Joonis L1.5.** Arvutiprogrammiga saadud a) Kartro sõrestikposti b) Posi sõrestikposti nõtkunud kujud 50 kN koormuse juures



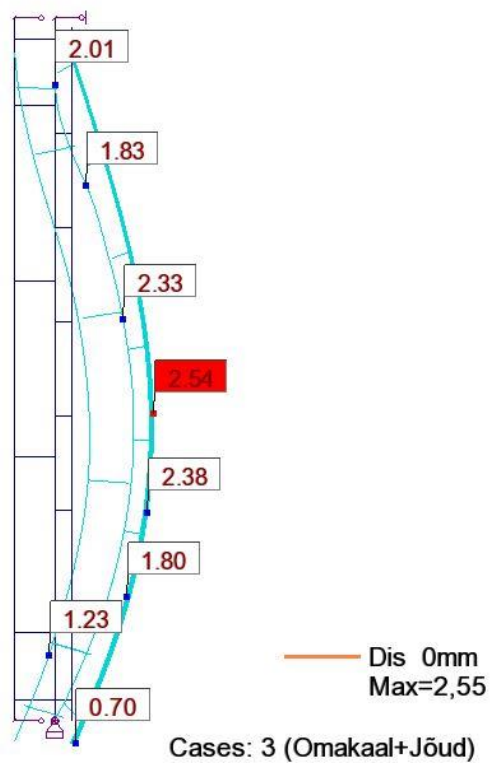
**Joonis L1.6.** Paneeli horisontaalsed deformatsioonid 50 kN koormuse juures



## Lisa 1 järg

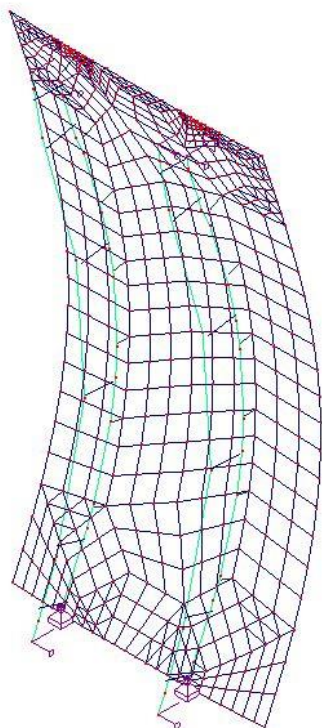


Joonis L1.7. Paneeli vertikaalsed siirded 50 kN koormuse juures



Joonis L1.8. Puit-betoon komposiit seinapaneeli nõtkunud kuju 50 kN koormuse juures külgvaates

## Lisa 1 järg



**Joonis L1.9.** Puit-betoon komposiit seinapaneeli deformeernud kuju 3D-s

## Lisa 2. Sõrestikpostide puitvööde niiskussisaldused ja ristlõike mõõtmed

Tabel L4.1. Sõrestikpostide puitvööde niiskussisaldused

Sõrestikpost	K1	K2	K3	K4	K5	K6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
70x45mm vöö niiskussisaldus, %	10,1	10,2	8,9	9,7	9,8	8,9	11,2	9,9	8,4	9,1	9,8	9,7
	9,6	10,4	9,4	10,4	9,6	10,1	11,4	10,5	9,7	9,5	9,5	10,3
	9,4	10,5	8,6	10,8	9,6	10,7	11,7	10,5	11,8	9,9	9,9	10,6
<b>Keskmine</b>	<b>9,7</b>	<b>10,4</b>	<b>9,0</b>	<b>10,3</b>	<b>9,7</b>	<b>9,9</b>	<b>11,4</b>	<b>10,3</b>	<b>10,0</b>	<b>9,5</b>	<b>9,7</b>	<b>10,2</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>0,36</b>	<b>0,15</b>	<b>0,40</b>	<b>0,56</b>	<b>0,12</b>	<b>0,92</b>	<b>0,25</b>	<b>0,35</b>	<b>1,72</b>	<b>0,40</b>	<b>0,21</b>	<b>0,46</b>
45x45mm vöö niiskussisaldus, %	8,4	9,0	10,9	9,3	8,6	8,8	10,9	10,1	10,1	8,7	10,0	10,0
	8,6	9,2	11,0	8,6	9,2	10,1	11,9	10,9	13,5	10,5	10,9	11,8
	8,7	9,5	9,9	9,3	8,8	9,8	10,9	10,8	12,1	10,5	11,2	9,5
<b>Keskmine</b>	<b>8,6</b>	<b>9,2</b>	<b>10,6</b>	<b>9,1</b>	<b>8,9</b>	<b>9,6</b>	<b>11,2</b>	<b>10,6</b>	<b>11,9</b>	<b>9,9</b>	<b>10,7</b>	<b>10,4</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>0,15</b>	<b>0,25</b>	<b>0,61</b>	<b>0,40</b>	<b>0,31</b>	<b>0,68</b>	<b>0,58</b>	<b>0,44</b>	<b>1,71</b>	<b>1,04</b>	<b>0,62</b>	<b>1,21</b>

Tabel L4.2. Sõrestikpostide puitvööde ristlõike laiused

Sõrestikpost	K1	K2	K3	K4	K5	K6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
70x45mm vöö ristlõike laiused, mm	44,2	43,1	43,7	42,3	46,2	40,2	46,6	47,8	45,8	40,7	39,8	46,5
	45,3	41,7	43,2	41,5	44,6	41,1	47,2	44,5	45,1	43,2	41,1	47,2
	44,6	42,5	43,5	40,3	45,2	41,8	45,8	46,3	44,4	42,8	42,3	45,6
<b>Keskmine</b>	<b>44,7</b>	<b>42,4</b>	<b>43,5</b>	<b>41,4</b>	<b>45,3</b>	<b>41,0</b>	<b>46,5</b>	<b>46,2</b>	<b>45,1</b>	<b>42,2</b>	<b>41,1</b>	<b>46,4</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>0,56</b>	<b>0,70</b>	<b>0,25</b>	<b>1,01</b>	<b>0,81</b>	<b>0,80</b>	<b>0,70</b>	<b>1,65</b>	<b>0,70</b>	<b>1,34</b>	<b>1,25</b>	<b>0,80</b>
45x45mm vöö ristlõike laiused, mm	43,4	43,4	41,8	39,0	47,8	46,3	41,1	46,8	46,1	46,0	46,0	45,0
	47,4	39,9	43,4	45,5	42,8	46,7	47,2	40,3	42,3	45,4	40,5	44,5
	43,0	44,5	44,3	41,1	45,1	43,6	40,5	46,8	47,1	43,9	39,2	39,9
<b>Keskmine</b>	<b>44,6</b>	<b>42,6</b>	<b>43,2</b>	<b>41,9</b>	<b>45,2</b>	<b>45,5</b>	<b>42,9</b>	<b>44,6</b>	<b>45,2</b>	<b>45,1</b>	<b>41,9</b>	<b>43,1</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>2,43</b>	<b>2,40</b>	<b>1,27</b>	<b>3,32</b>	<b>2,50</b>	<b>1,69</b>	<b>3,71</b>	<b>3,75</b>	<b>2,53</b>	<b>1,08</b>	<b>3,61</b>	<b>2,81</b>

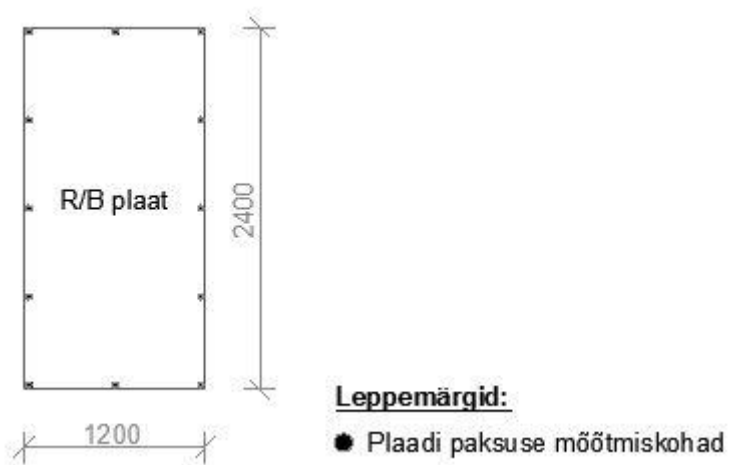
Tabel L4.3. Sõrestikpostide puitvööde ristlõike kõrgused

Sõrestikpost	K1	K2	K3	K4	K5	K6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
70x45mm vöö ristlõike kõrgused, mm	68,0	65,1	65,2	71,8	69,4	68,5	71,9	67,7	65,3	72,0	67,8	65,8
	70,0	67,2	70,0	67,6	70,2	70,6	69,9	69,2	66,3	67,5	69,5	67,3
	69,5	72,7	69,7	67,2	70,9	68,5	72,7	68,1	67,0	69,3	65,2	68,5
<b>Keskmine</b>	<b>69,2</b>	<b>68,3</b>	<b>68,3</b>	<b>68,9</b>	<b>70,2</b>	<b>69,2</b>	<b>71,5</b>	<b>68,3</b>	<b>66,2</b>	<b>69,6</b>	<b>67,5</b>	<b>67,2</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>1,04</b>	<b>3,92</b>	<b>2,69</b>	<b>2,55</b>	<b>0,75</b>	<b>1,21</b>	<b>1,44</b>	<b>0,78</b>	<b>0,85</b>	<b>2,26</b>	<b>2,17</b>	<b>1,35</b>
45x45mm vöö ristlõike kõrgused, mm	40,7	46,7	41,1	39,9	42,3	47,7	40,2	45,8	43,4	47,5	46,5	41,3
	41,2	45,2	41,8	47,2	45,7	45,4	45,7	44,0	42,3	43,1	44,2	44,4
	41,6	44,7	47,4	41,8	40,8	40,0	43,9	46,9	45,2	46,7	40,7	41,0
<b>Keskmine</b>	<b>41,2</b>	<b>45,5</b>	<b>43,4</b>	<b>43,0</b>	<b>42,9</b>	<b>44,4</b>	<b>43,3</b>	<b>45,6</b>	<b>43,6</b>	<b>45,8</b>	<b>43,8</b>	<b>42,2</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>0,45</b>	<b>1,04</b>	<b>3,45</b>	<b>3,79</b>	<b>2,51</b>	<b>3,95</b>	<b>2,80</b>	<b>1,46</b>	<b>1,46</b>	<b>2,34</b>	<b>2,92</b>	<b>1,88</b>

### Lisa 3. Puit-betoon komposiit seinapaneelide katsekehade betoonplaadi paksused

Tabel 5.1. Katsekehade raudbetoonplaatide paksused

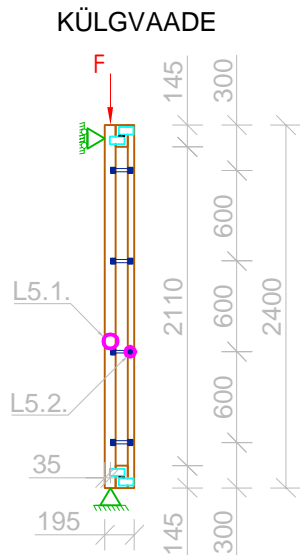
Mõõtmine	Paneel 1, mm	Paneel 2, mm	Paneel 3, mm
1	47,6	44,3	45,8
2	47,3	45,7	45,5
3	48,2	45,0	44,4
4	47,9	46,2	44,6
5	46,5	46,9	46,4
6	46,3	44,6	45,2
7	47,3	45,0	47,1
8	47,7	43,6	46,1
9	47,3	44,6	46,6
10	48,0	45,3	46,6
11	47,5	46,0	45,4
12	47,5	44,4	44,4
<b>Keskmine</b>	<b>47,4</b>	<b>45,1</b>	<b>45,7</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>0,56</b>	<b>0,93</b>	<b>0,91</b>



Joonis L5.1. Raudbetoonplaadi paksuste mõõtmiskohad

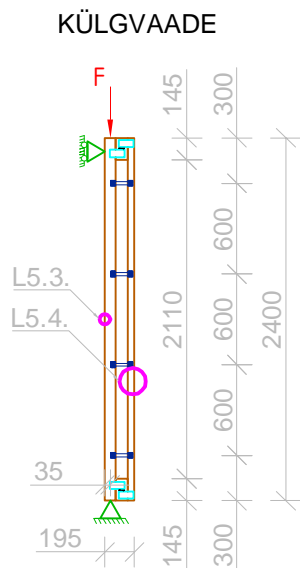
# Lisa 4. Katsekehade joonised

KARTRO POST 1 (K1)



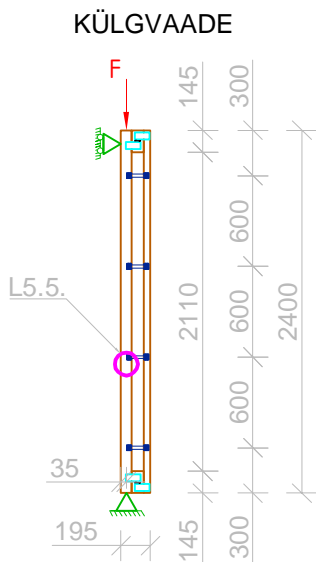
EESTVAADE (Front view) of KARTRO POST 1 (K1). The diagram shows a vertical post with a total height of 2400 mm. It is supported by a base with a height of 45 mm. The post has several horizontal sections: a top section of 22,5 mm, a section of 600 mm, a section of 600 mm, a section of 600 mm, and a bottom section of 600 mm. A force F is applied at the top. A failure point is marked with a pink square in the second 600 mm section from the top.

KARTRO POST 2 (K2)



EESTVAADE (Front view) of KARTRO POST 2 (K2). The diagram shows a vertical post with a total height of 2400 mm. It is supported by a base with a height of 45 mm. The post has several horizontal sections: a top section of 22,5 mm, a section of 600 mm, a section of 600 mm, a section of 600 mm, and a bottom section of 600 mm. A force F is applied at the top. A failure point is marked with a pink square in the second 600 mm section from the top.

KARTRO POST 3 (K3)



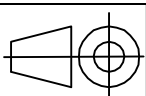
EESTVAADE (Front view) of KARTRO POST 3 (K3). The diagram shows a vertical post with a total height of 2400 mm. It is supported by a base with a height of 45 mm. The post has several horizontal sections: a top section of 22,5 mm, a section of 600 mm, a section of 600 mm, a section of 600 mm, and a bottom section of 600 mm. A force F is applied at the top. A failure point is marked with a pink square in the second 600 mm section from the top.

Märkused: L5.xx. viitab antud töö lisan 5 paiknevatele purunemispiltide joonistele

**Leppemärgid:**

○ Purunemiskoht külgsaates

□ Purunemiskoht otsevaates



Töö nimetus:

Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetused ja analüüs

Mõõt:

1:50

Joonestab

PEEP PIHLAPSON

31.05.2015

Objekti nimetus:

Lisa 4. Katsekehade joonised

Juhendas

MARTTI-JAAN MILJAN



**Eesti Maaülikool**

Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut  
Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

Joonise nimetus:

Kartro posti purunemiskohad nõtkekatsetes

Leht 1

Õpinguraamatu nr:

Lehti 5

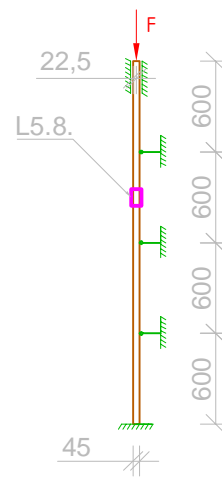
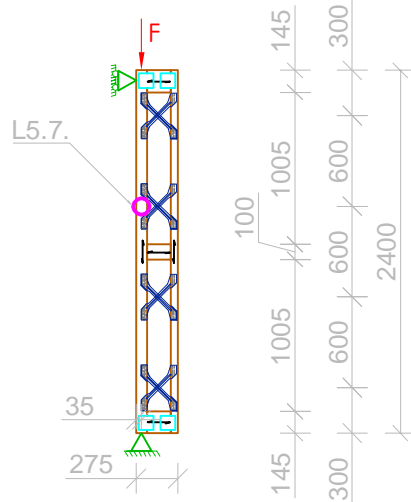
MI-090164

**Lisa 4 järg**

**KÜLGVAADE**

**EESTVAADE**

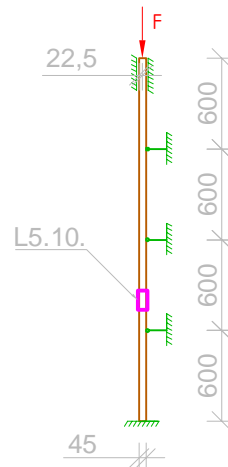
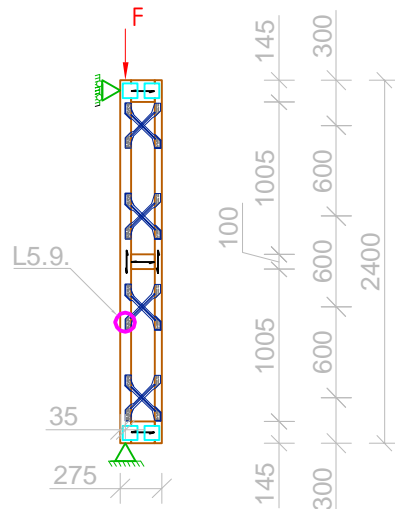
POSI POST 1 (P1)



**KÜLGVAADE**

**EESTVAADE**

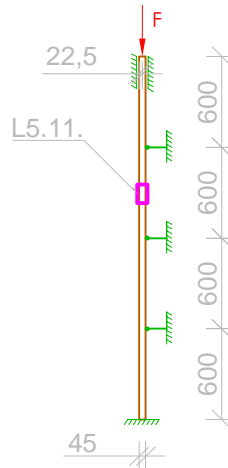
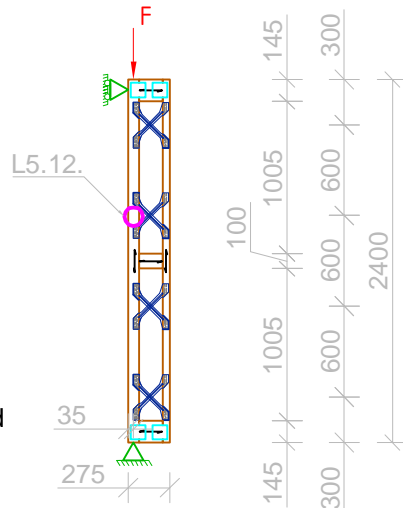
POSI POST 2 (P2)



**KÜLGVAADE**

**EESTVAADE**

POSI POST 3 (P3)

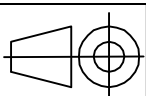


Märkused: L5.xx. viitab antud töö lisa 5 paiknevatele purunemispiltide joonistele

Leppemärgid:

○ Purunemiskoht külgvaates

□ Purunemiskoht otsevaates



Töö nimetus:

Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetused ja analüüs

Mõõt:

1:50

Joonestab

PEEP PIHLAPSON

31.05.2015

Objekti nimetus:

Lisa 4. Katsekehade joonised

Juhendas

MARTTI-JAAN MILJAN

Joonise nimetus:

Posi posti purunemiskohad nõtkekatses

Leht 2

Õpinguraamatu nr:

Lehti 5

MI-090164



**Eesti Maaülikool**

Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut  
Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

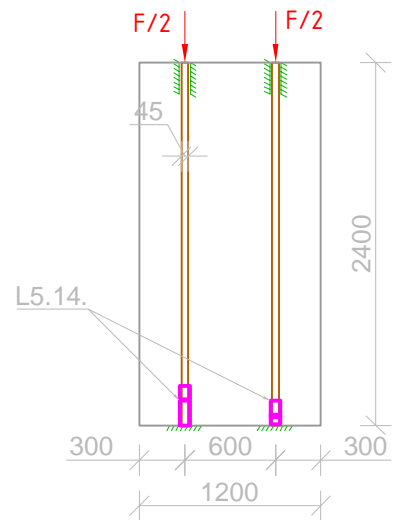
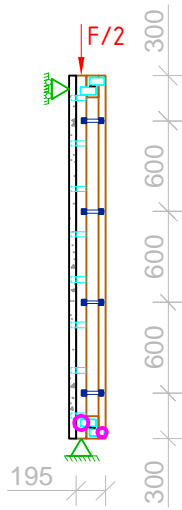
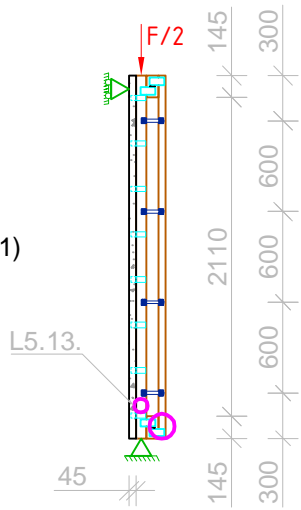
**Lisa 4 järg**

**VASAKPOOLNE POST**

**PAREMPOOLNE POST**

**EESTVAADE**

**PANEEL 1 (BP1)**

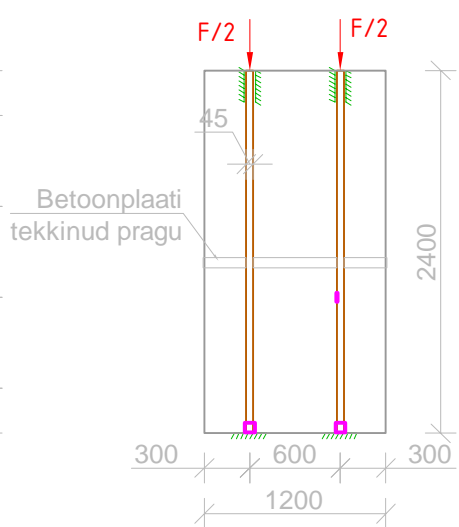
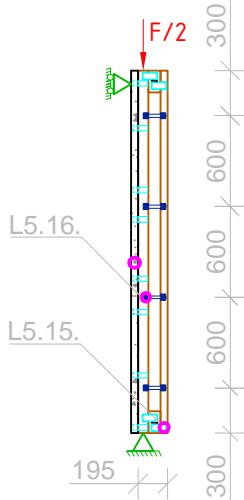
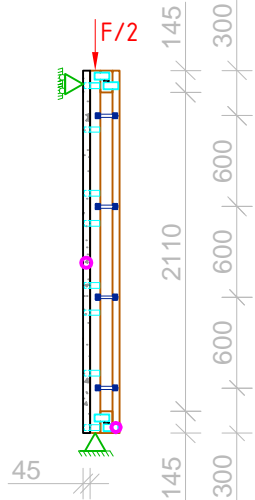


**VASAKPOOLNE POST**

**PAREMPOOLNE POST**

**EESTVAADE**

**PANEEL 2 (BP2)**

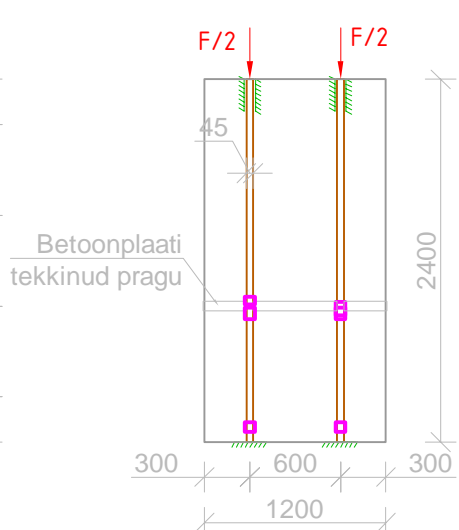
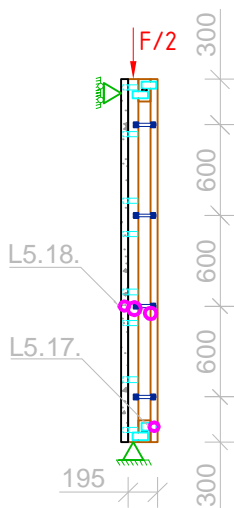
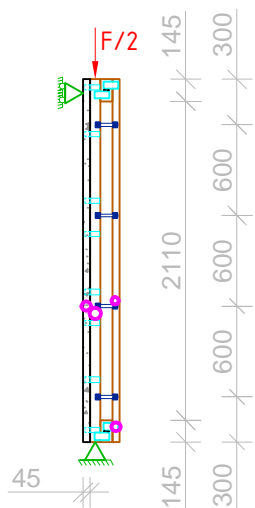


**VASAKPOOLNE POST**

**PAREMPOOLNE POST**

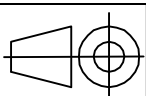
**EESTVAADE**

**PANEEL 3 (BP3)**



**Leppemärgid:**

- Purunemiskoht külgvaates/lõikes
- ◻ Purunemiskoht otsevaates



Töö nimetus:

Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetused ja analüüs

Mõõt:

1:50

Joonestas

PEEP PIHLAPSON

31.05.2015

Objekti nimetus:

Lisa 4. Katsekehade joonised

Juhendas

MARTTI-JAAN MILJAN



**Eesti Maaülikool**

Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut  
Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

Joonise nimetus:

Paneeli purunemiskohad nõtkekatses

Leht 3

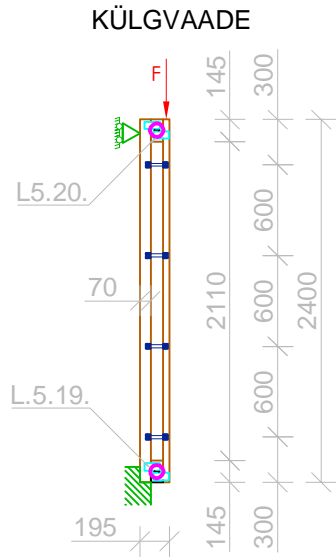
Õpinguraamatu nr:

Lehti 5

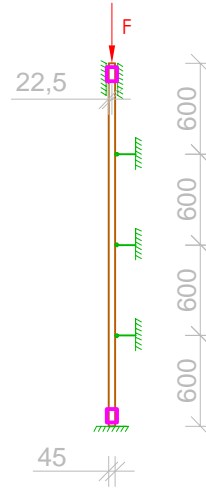
MI-090164

**Lisa 4 järg**

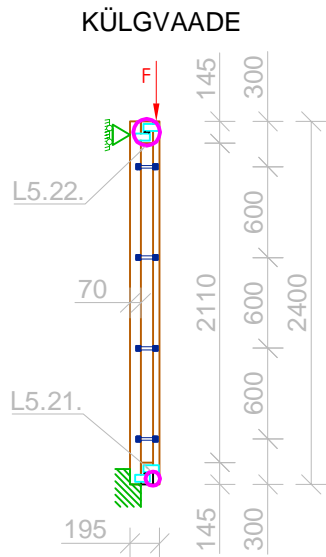
**KARTRO POST 4 (K4)**



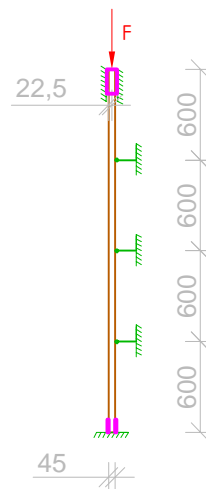
**EESTVAADE**



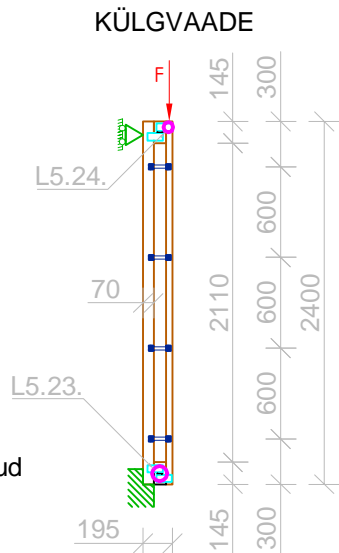
**KARTRO POST 5 (K5)**



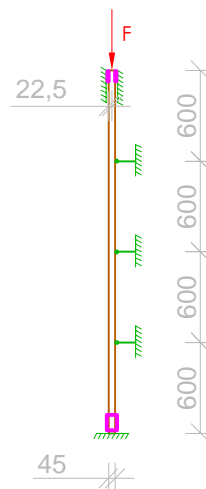
**EESTVAADE**



**KARTRO POST 6 (K6)**



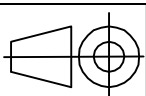
**EESTVAADE**



Märkused: L5.xx. viitab antud töö lisa 5 paiknevatele purunemispiltide joonistele

**Leppemärgid:**

- Purunemiskoht külgvaates
- Purunemiskoht otsevaates



Töö nimetus: Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetused ja analüüs

Mõõt: 1:50

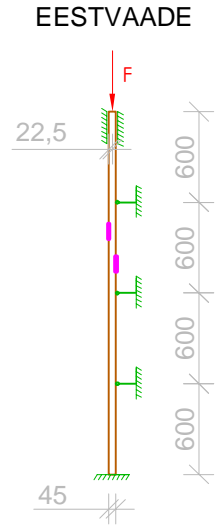
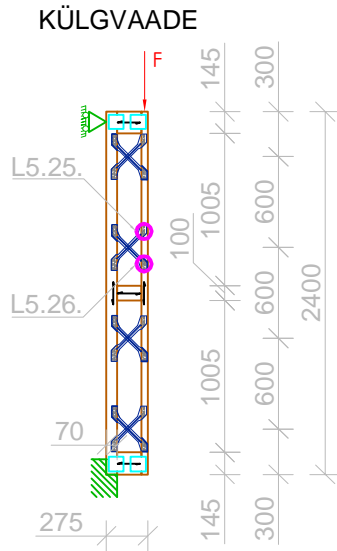
Joonestab	PEEP PIHLAPSON	31.05.2015
Juhendas	MARTTI-JAAN MILJAN	

Objekti nimetus: Lisa 4. Katsekehade joonised

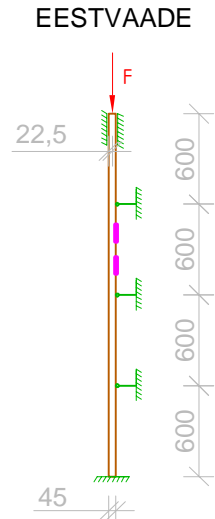
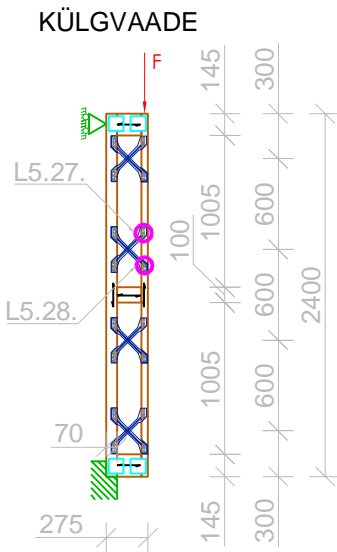


**Lisa 4 järg**

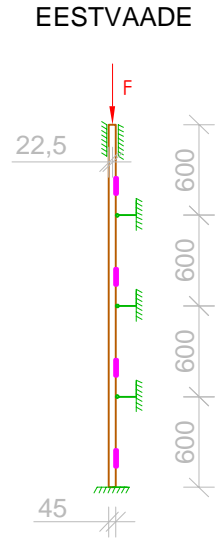
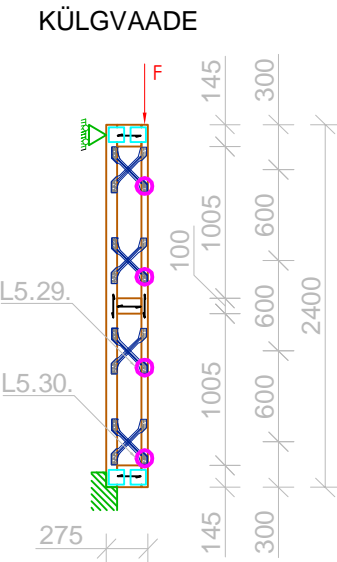
POSI POST 4 (P4)



POSI POST 5 (P5)



POSI POST 6 (P6)

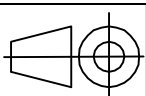


Märkused: L5.xx. viitab antud töö lisa 5 paiknevatele purunemispiltide joonistele

**Leppemärgid:**

○ Purunemiskoht külgvaates

□ Purunemiskoht otsevaates



Töö nimetus:

Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetused ja analüüs

Mõõt:

1:50

Joonestab	PEEP PIHLAPSON	31.05.2015
Juhendas	MARTTI-JAAN MILJAN	

Objekti nimetus:	Lisa 4. Katsekehade joonised
------------------	------------------------------

www.emu.ee

**Eesti Maaülikool**  
Estonian University of Life Sciences  
Metsandus- ja maaehitusinstituut  
Institute of Forestry and Rural Engineering

Joonise nimetus:	Posi posti purunemiskohad nihkekatses
Leht 5	Õpinguraamatu nr:  MI-090164
Lehti 5	

## Lisa 5. Katsekehade purunemispildid



**Joonis L5.1.** Kartro post 1 purunemispilt 1



**Joonis L5.2.** Kartro post 1 purunemispilt 2



**Joonis L5.3.** Kartro post 2 purunemispilt 1



**Joonis L5.4.** Kartro post 2 purunemispilt 2



**Joonis L5.5.** Kartro post 3 purunemispilt 1



**Joonis L5.6.** Kartro post 3 purunemispilt 2

## Lisa 5 järg



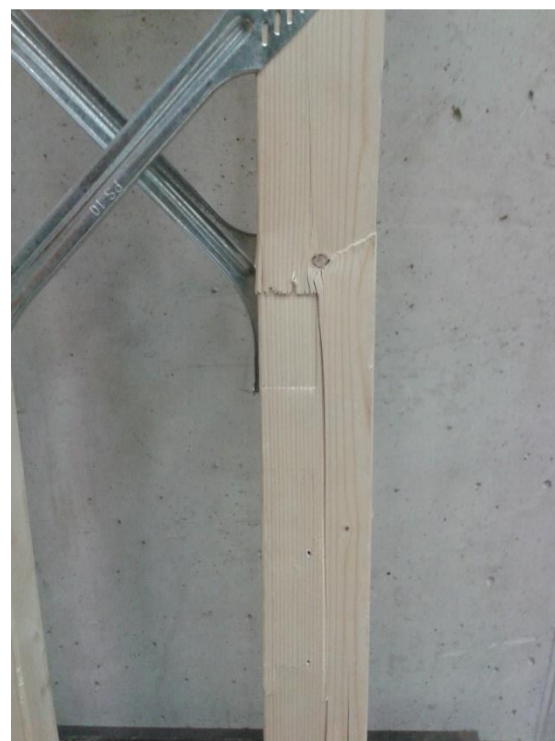
**Joonis L5.7.** Posi post 1 purunemispilt 1



**Joonis L5.8.** Posi post 1 purunemispilt 2



**Joonis L5.9.** Posi post 2 purunemispilt 1



**Joonis L5.10.** Posi post 2 purunemispilt 2



**Joonis L5.11.** Posi post 3 purunemispilt 1



**Joonis L5.12.** Posi post 3 purunemispilt 2



## Lisa 5 järg



**Joonis L5.13.** Paneel 1 purunemispilt 1



**Joonis L5.14.** Paneel 1 purunemispilt 2



**Joonis L5.15.** Paneel 2 purunemispilt 1



**Joonis L5.16.** Paneel 2 purunemispilt 2



**Joonis L5.17.** Paneel 3 purunemispilt 1

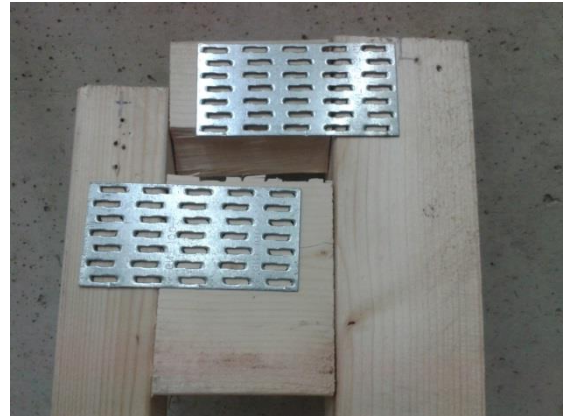


**Joonis L5.18.** Paneel 3 purunemispilt 2

## Lisa 5 järg



**Joonis L5.19.** Kartro post 4 purunemispilt 1



**Joonis L5.20.** Kartro post 4 purunemispilt 2



**Joonis L5.21.** Kartro post 5 purunemispilt 1



**Joonis L5.22.** Kartro post 5 purunemispilt 2



**Joonis L5.23.** Kartro post 6 purunemispilt



**Joonis L5.24.** Kartro post 5 purunemispilt 2



## Lisa 5 järg



**Joonis L5.25.** Posi post 4 purunemispilt 1



**Joonis L5.26.** Posi post 4 purunemispilt 2



**Joonis L5.27.** Posi post 5 purunemispilt 1



**Joonis L5.28.** Posi post 5 purunemispilt 2

## Lisa 5 järg

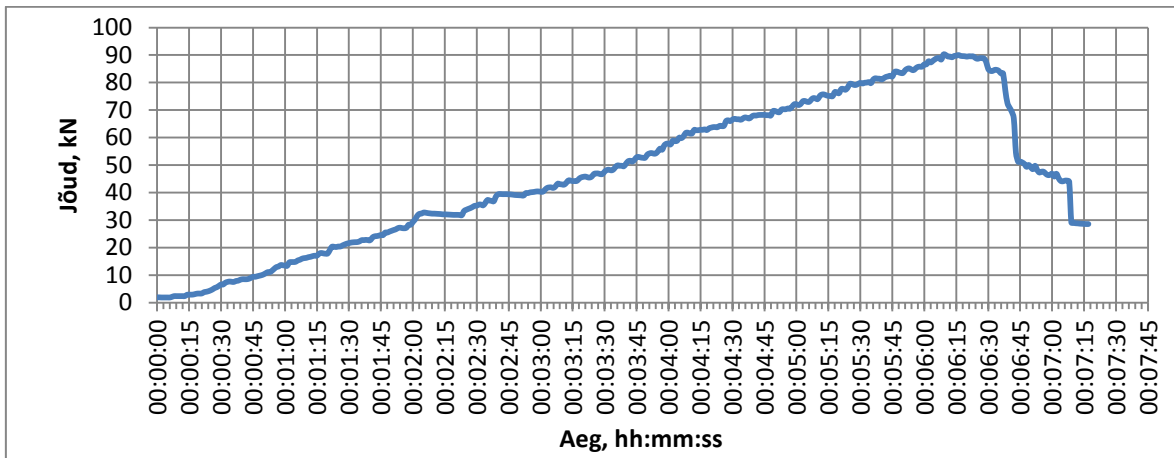


**Joonis L5.29.** Posi post 6 purunemispilt 1

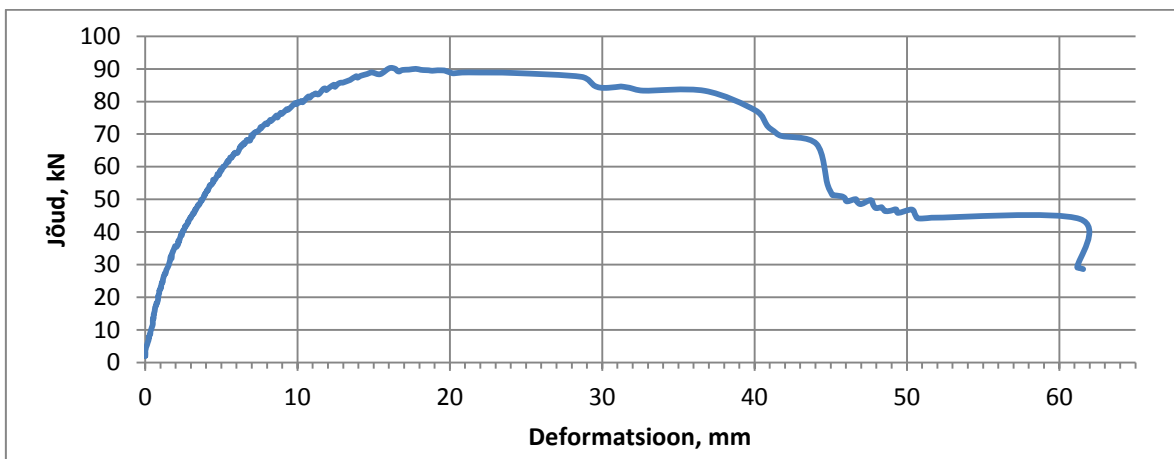


**Joonis L5.30.** Posi post 6 purunemispilt 2

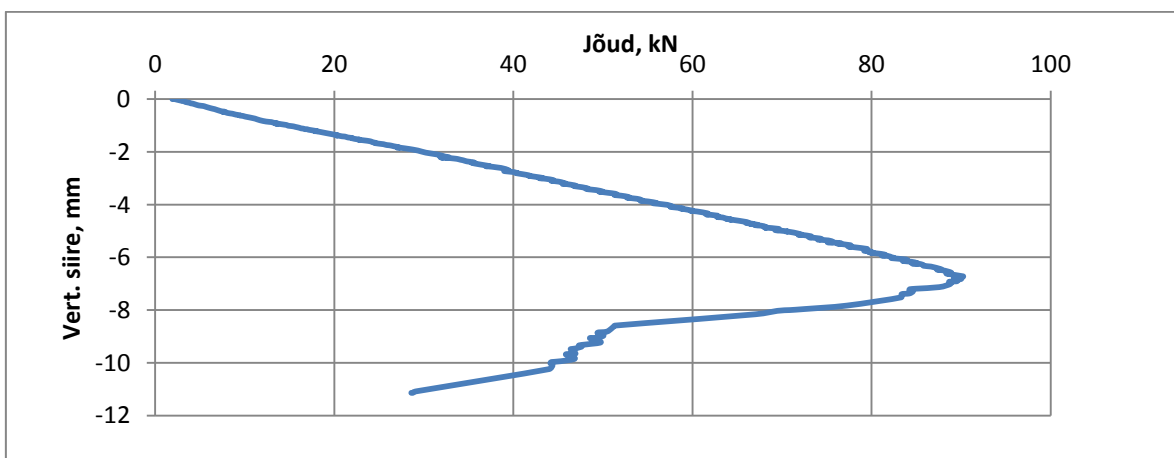
## Lisa 6. Nõtkekatsete üldised graafikud



Joonis L6.1. Kartro post 1 koormus ajas



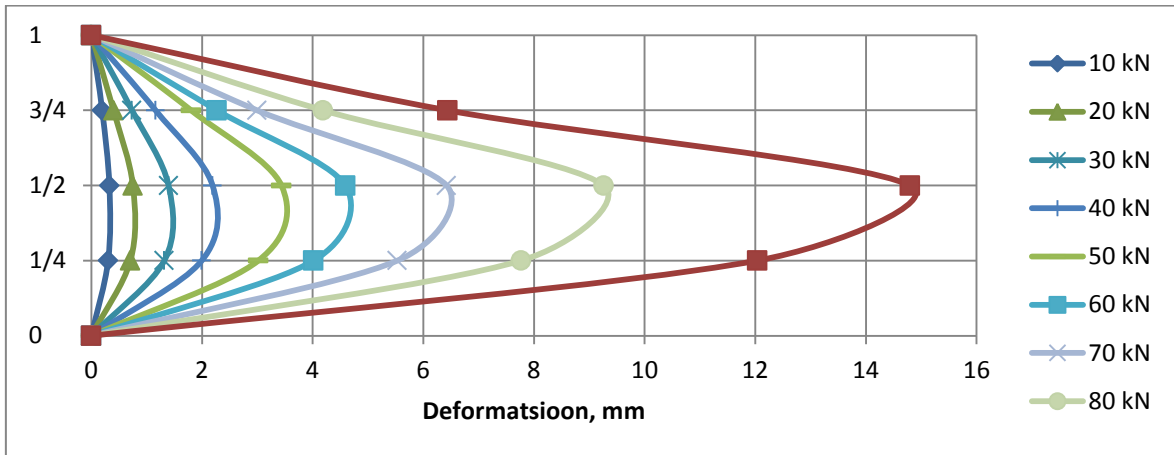
Joonis L6.2. Kartro post 1 horisontaalne deformatsioon



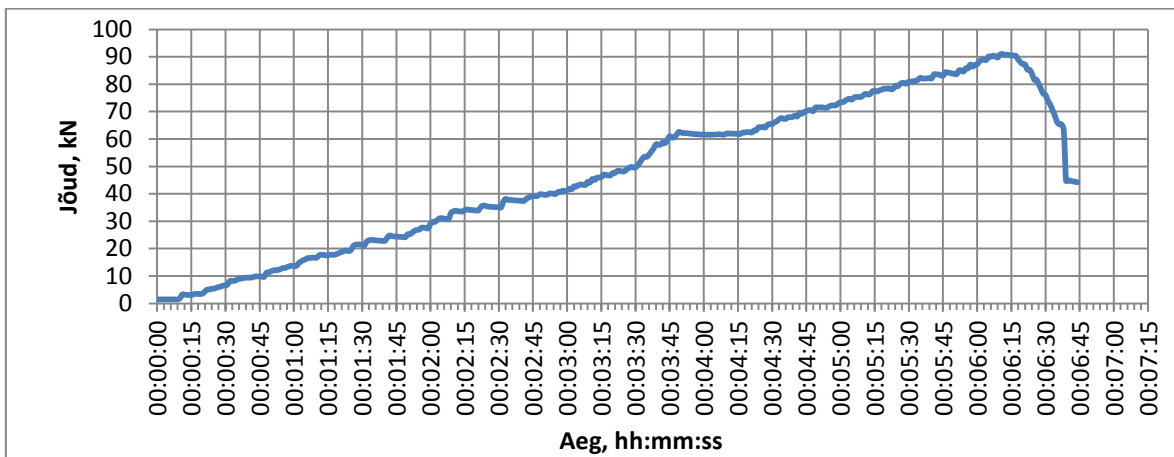
Joonis L6.3. Kartro post 1 vertikaalne siire



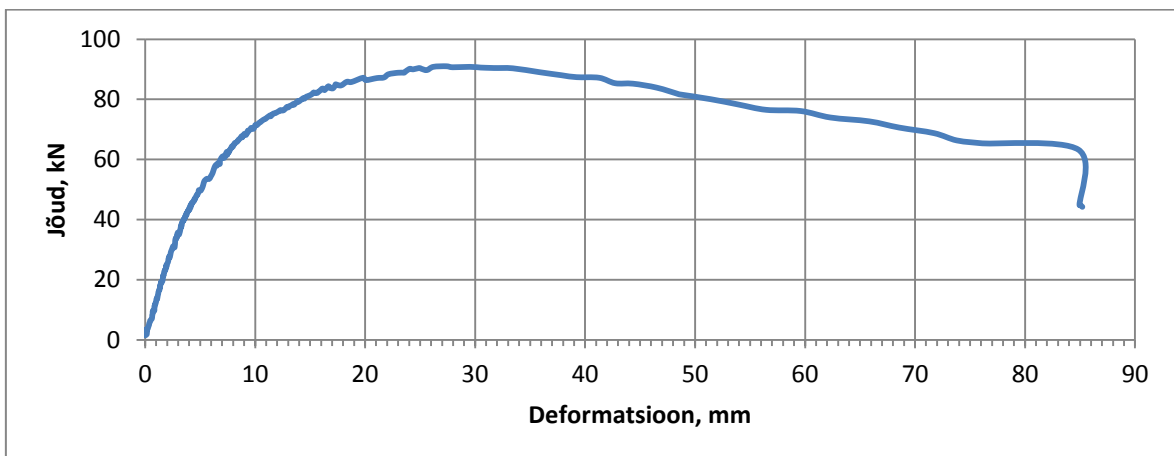
## Lisa 6 järg



Joonis L6.4. Kartro post 1 nõtkunud kuju erinevatel koormustel

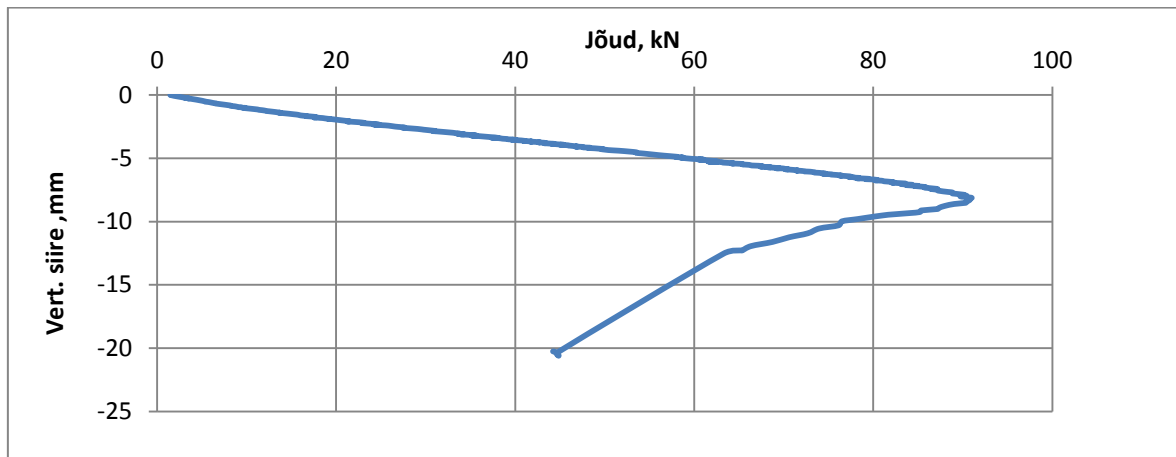


Joonis L6.5. Kartro post 2 koormus ajas

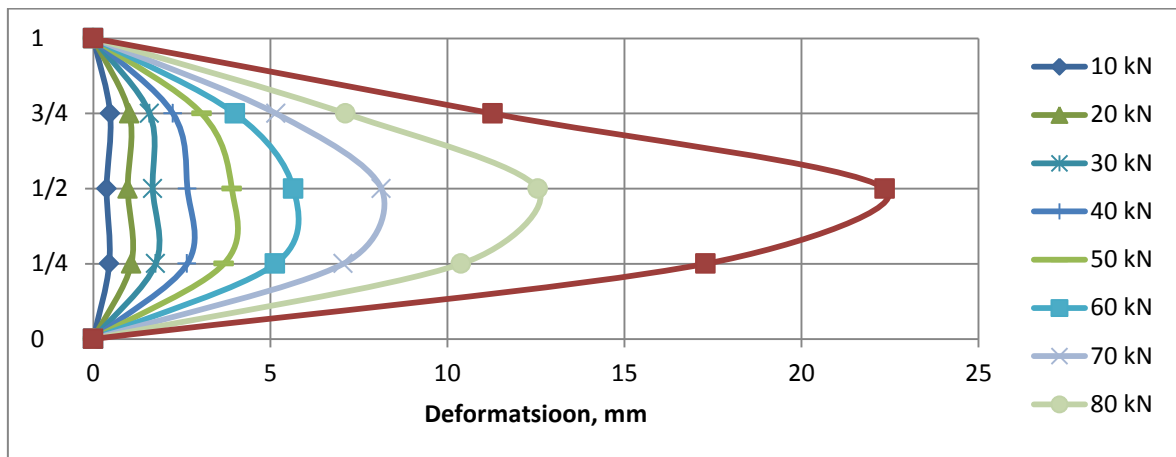


Joonis L6.6. Kartro post 2 horisontaalne deformatsioon

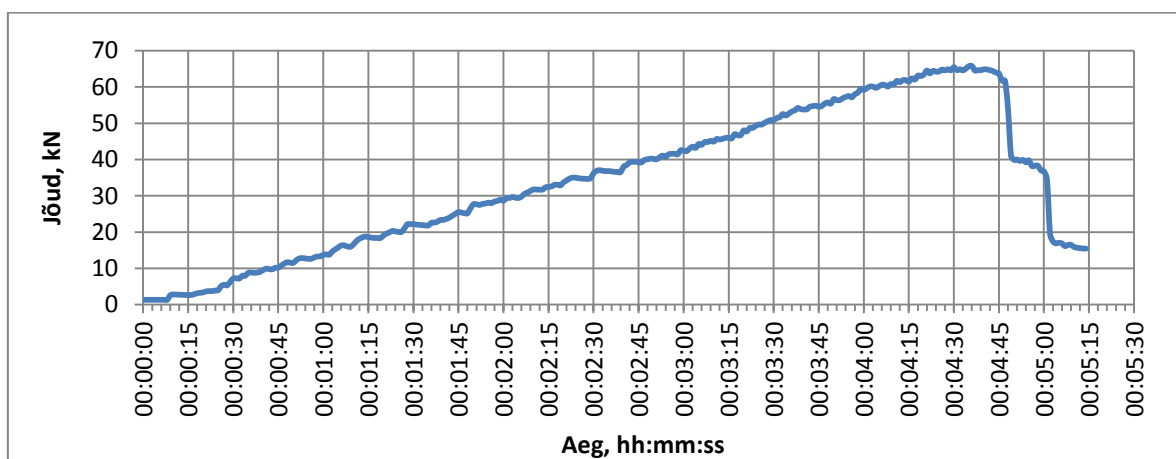
## Lisa 6 järg



Joonis L6.7. Kartro post 2 vertikaalne siire

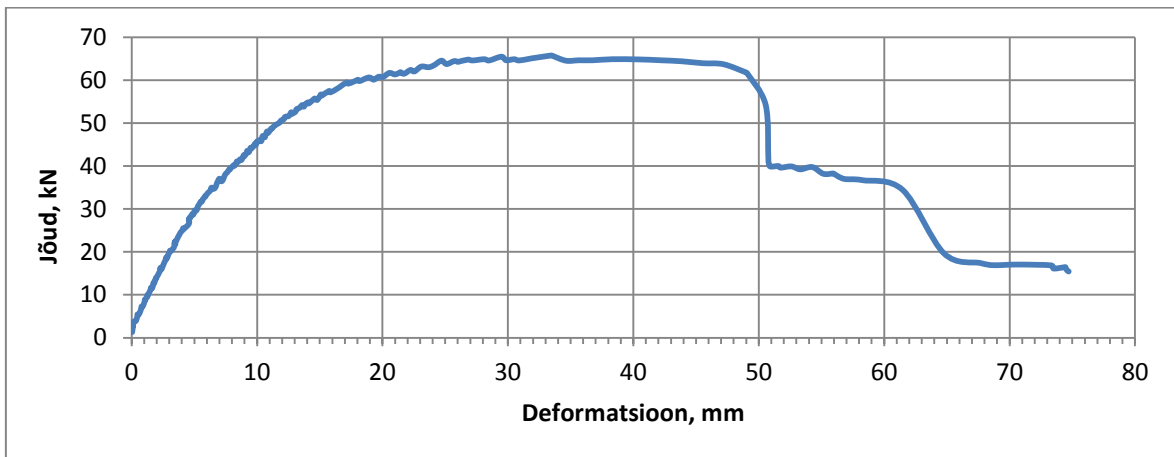


Joonis L6.8. Kartro post 2 nõtkunud kuju erinevatel koormustel

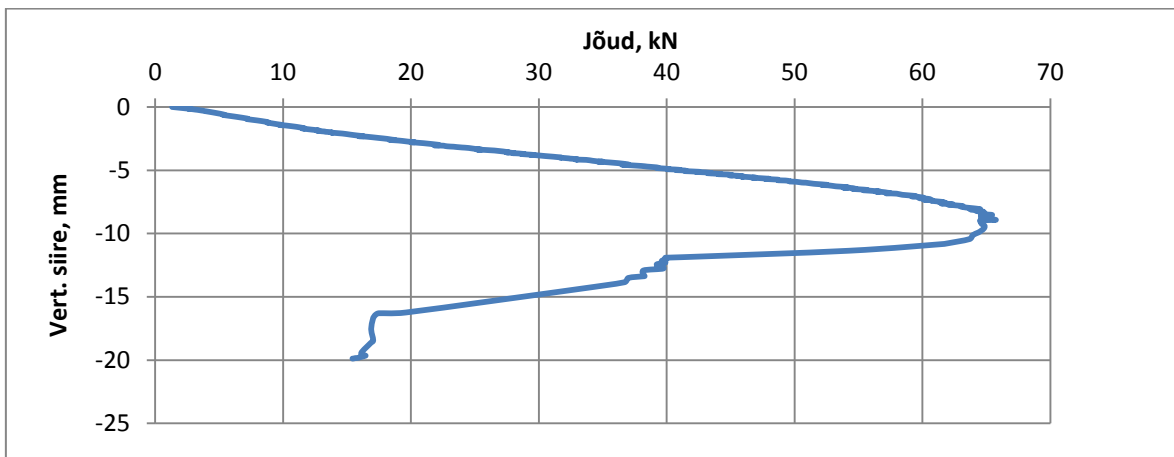


Joonis L6.9. Kartro post 3 koormus ajas

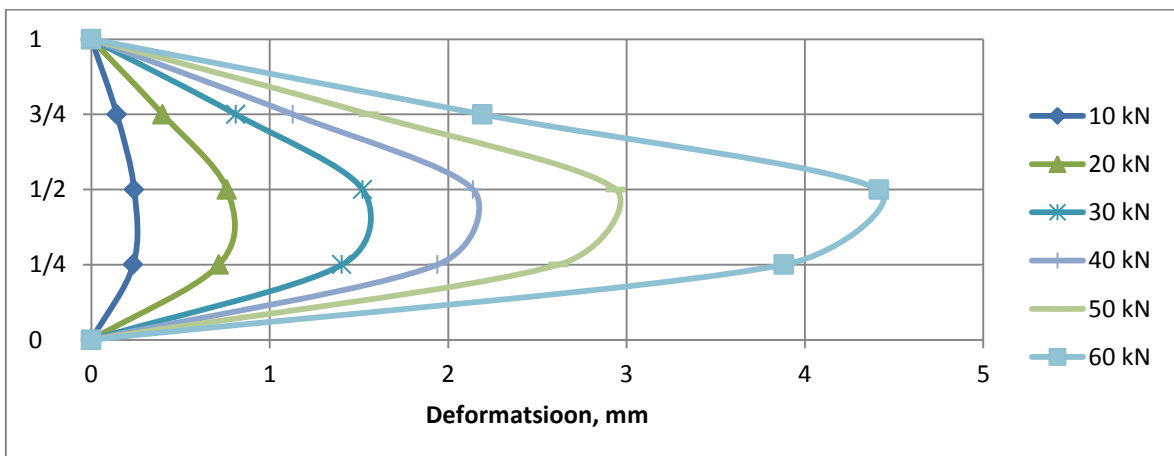
## Lisa 6 järg



Joonis L6.10. Kartro post 3 horisontaalne deformatsioon

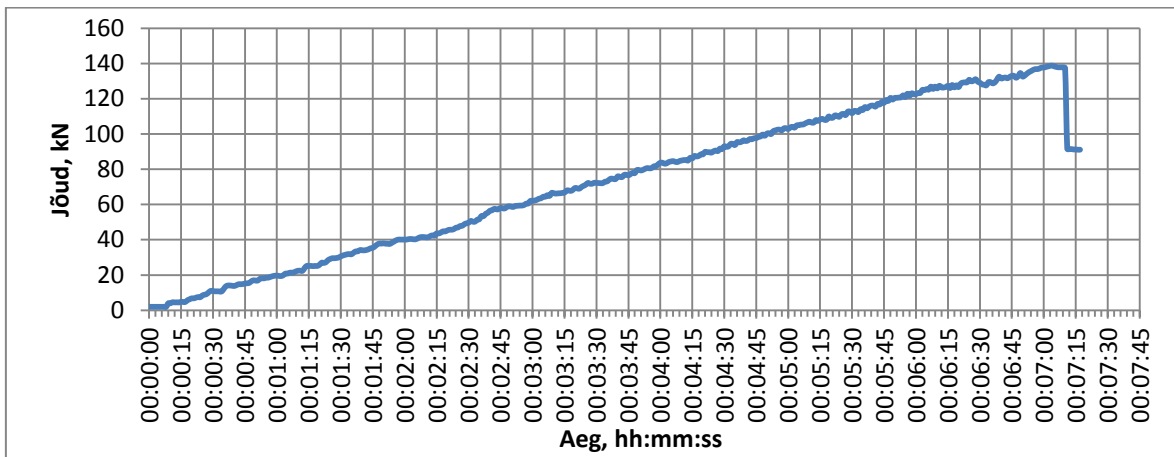


Joonis L6.11. Kartro post 3 vertikaalne siire

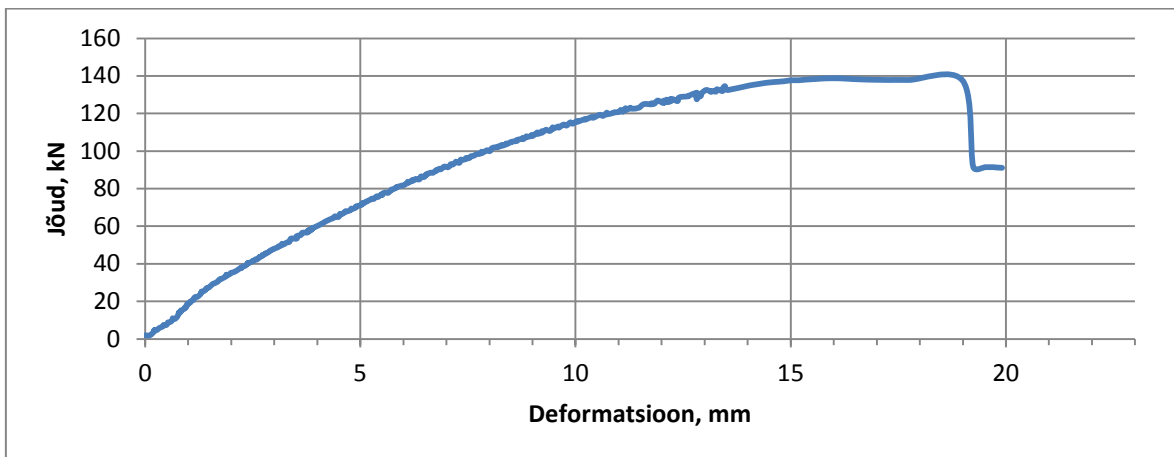


Joonis L6.12. Kartro post 3 nõtkunud kuju erinevatel koormustel

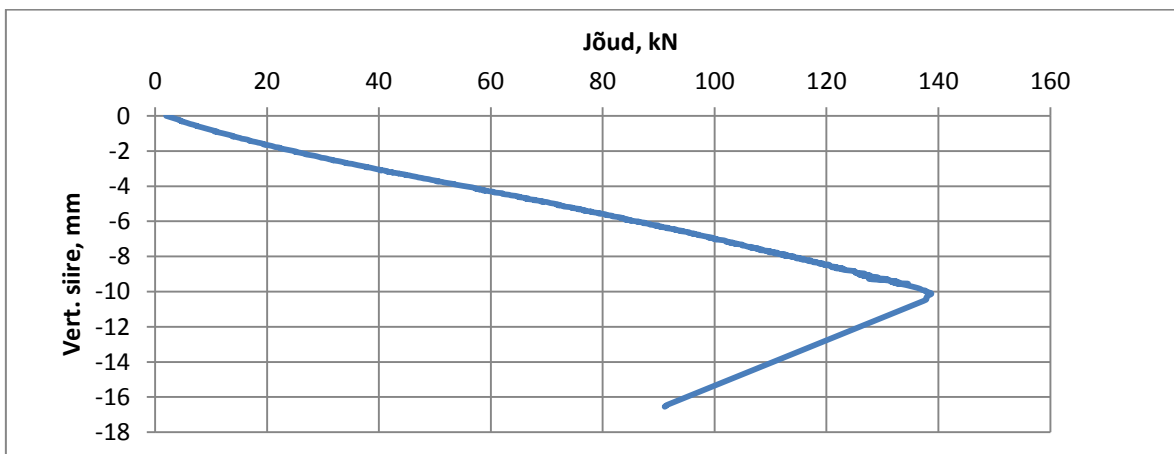
## Lisa 6 järg



Joonis L6.13. Posi post 1 koormus ajas

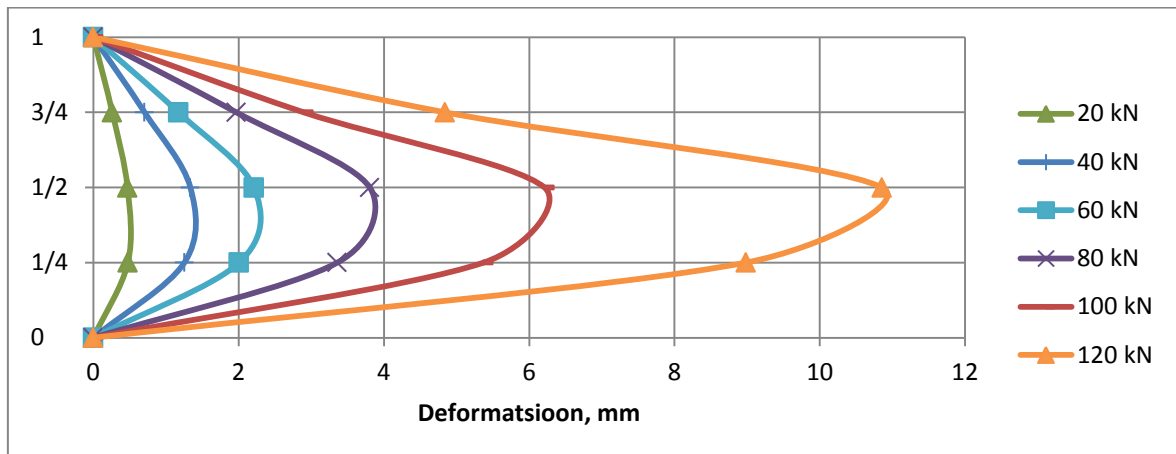


Joonis L6.14. Posi post 1 horisontaalne deformatsioon

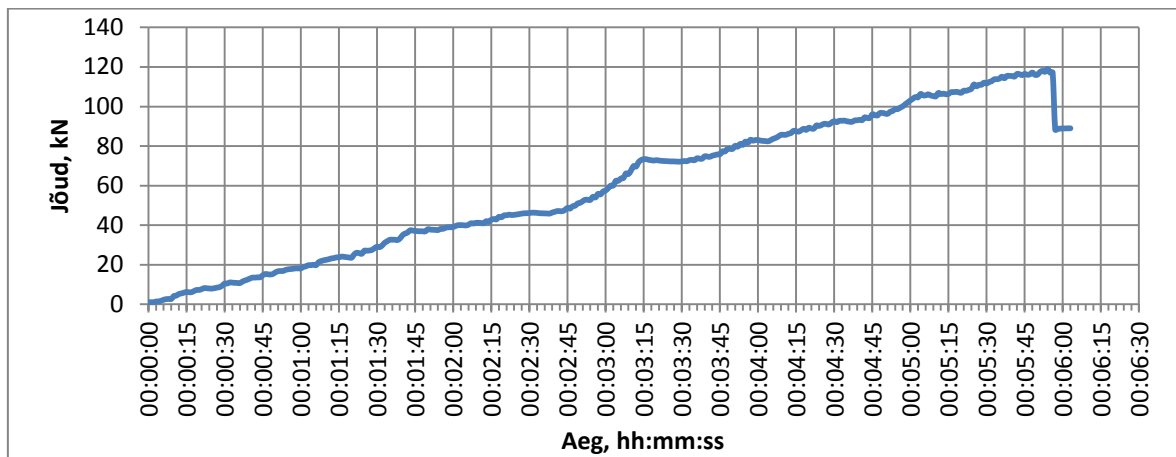


Joonis L6.15. Posi post 1 vertikaalne siire

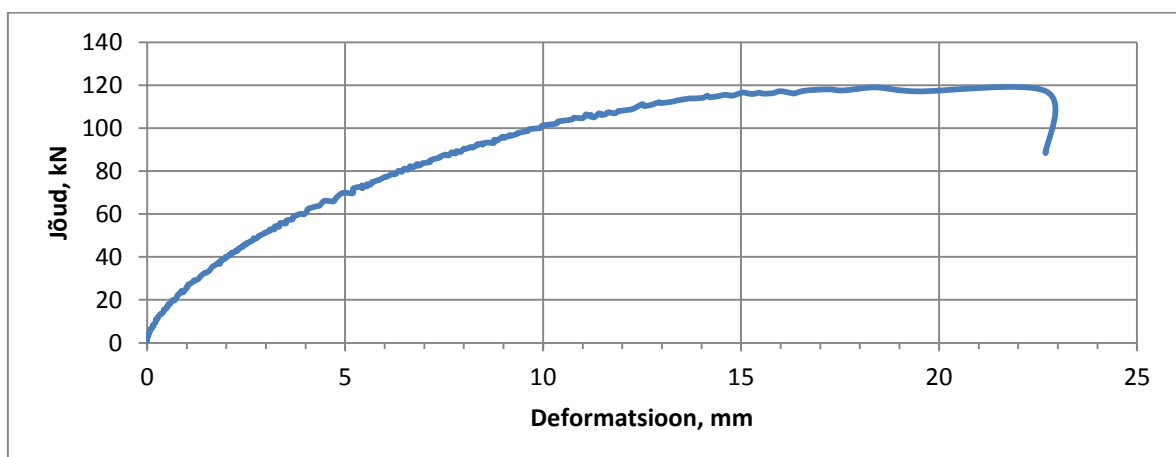
## Lisa 6 järg



Joonis L6.16. Posi post 1 nõtkunud kuju erinevatel koormustel

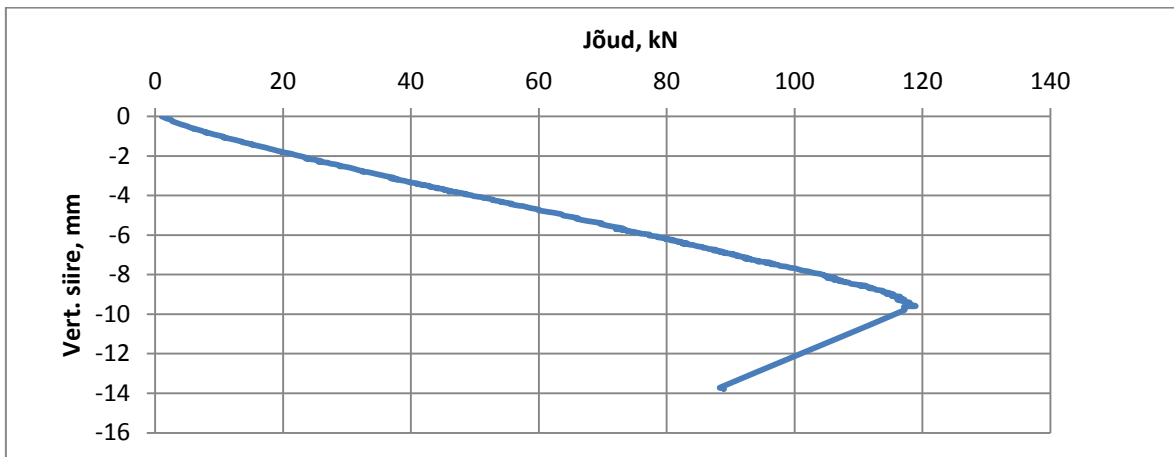


Joonis L6.17. Posi post 2 koormus ajas

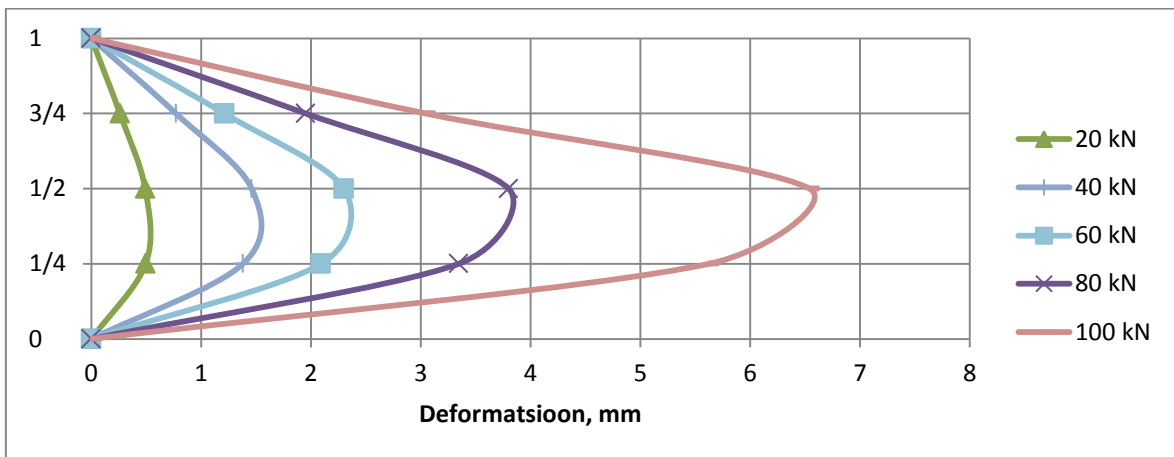


Joonis L6.18. Posi post 2 horisontaalne deformatsioon

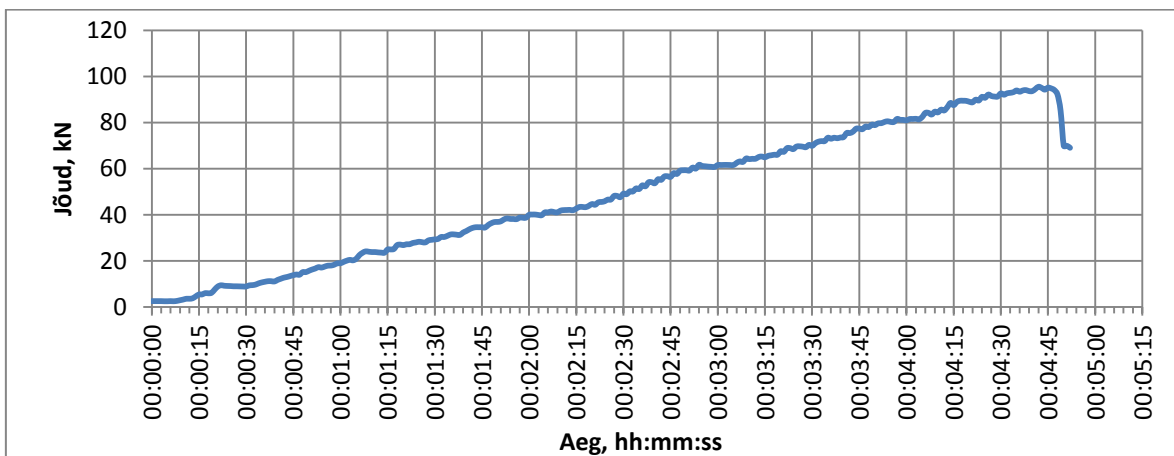
## Lisa 6 järg



Joonis L6.19. Posi post 2 vertikaalne siire

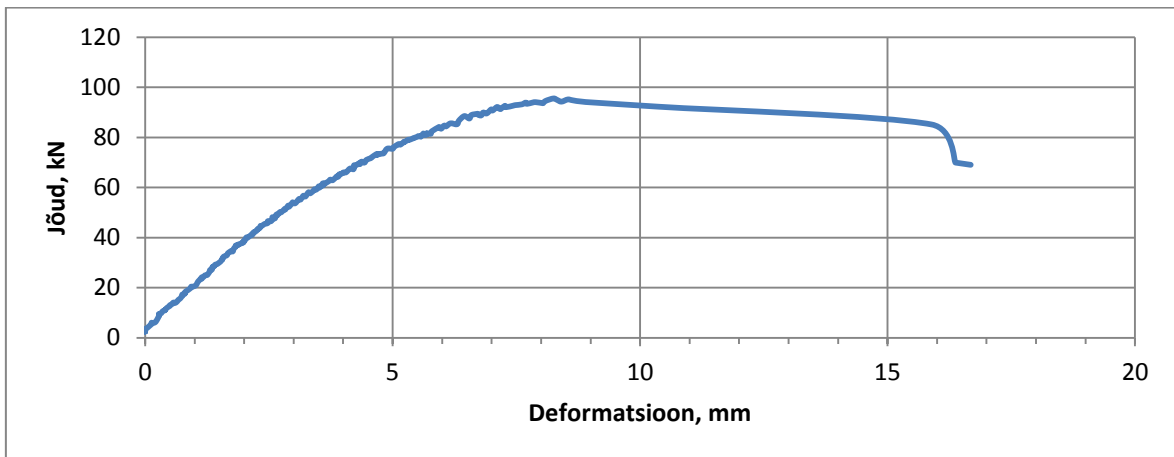


Joonis L6.20. Posi post 2 nõtkunud kuju erinevatel koormustel

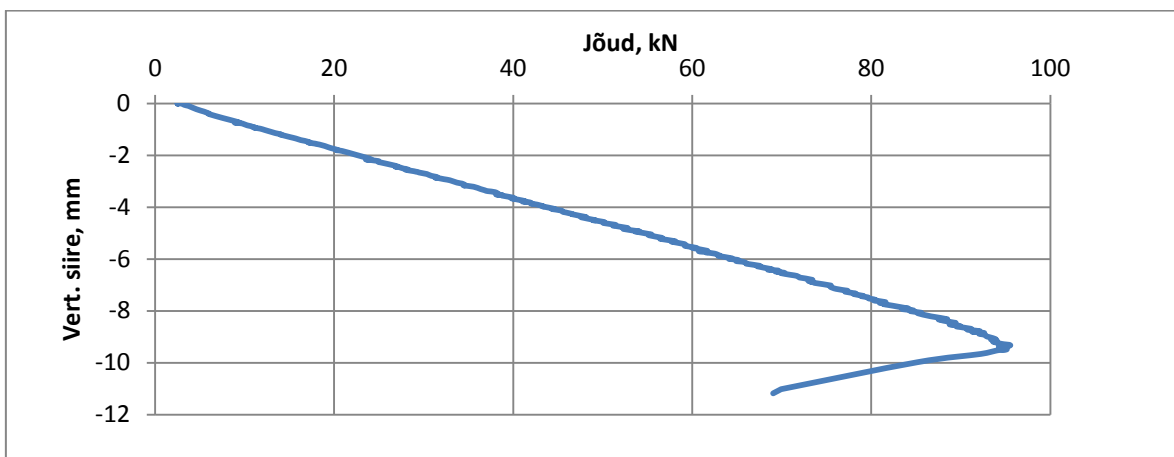


Joonis L6.21. Posi post 3 koormus ajas

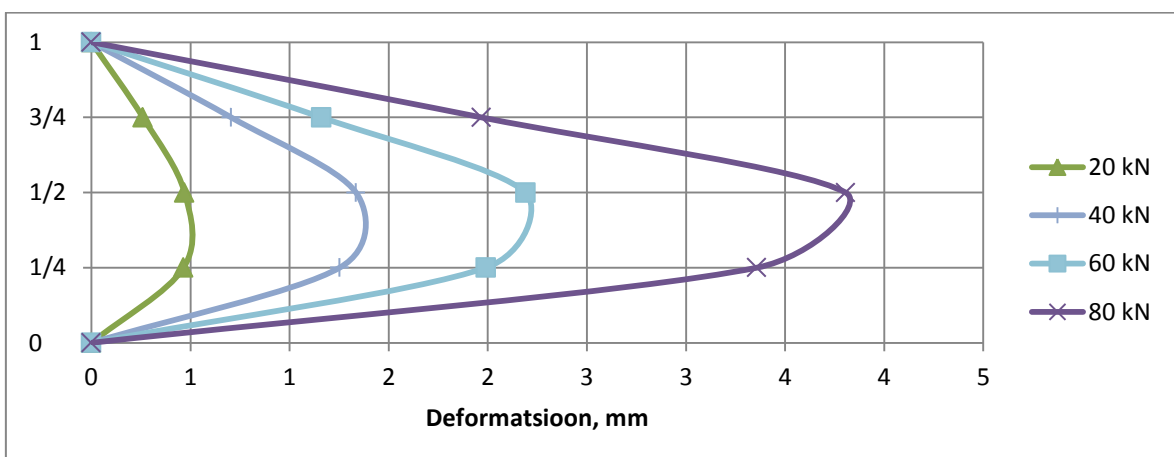
## Lisa 6 järg



Joonis L6.22. Posi post 3 horisontaalne deformatsioon

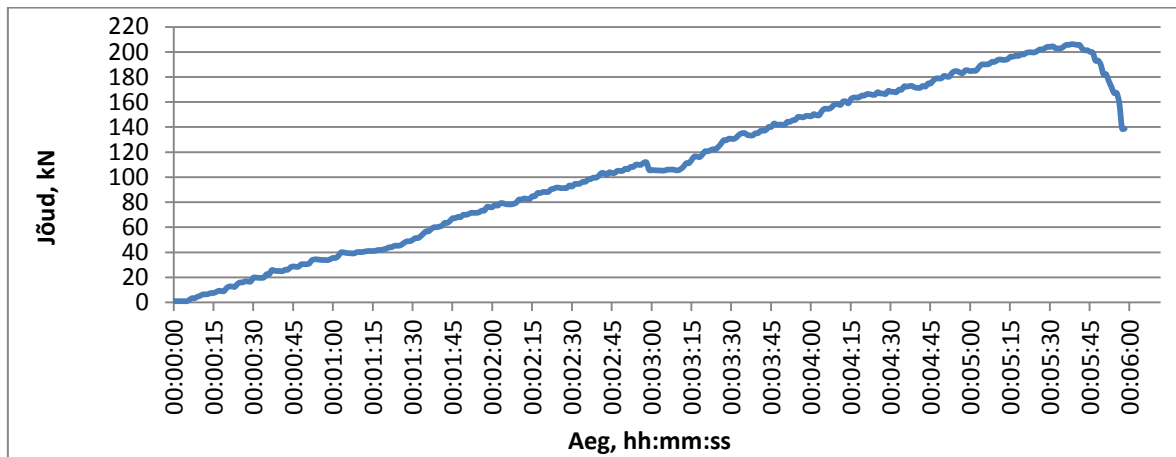


Joonis L6.23. Posi post 3 vertikaalne siire

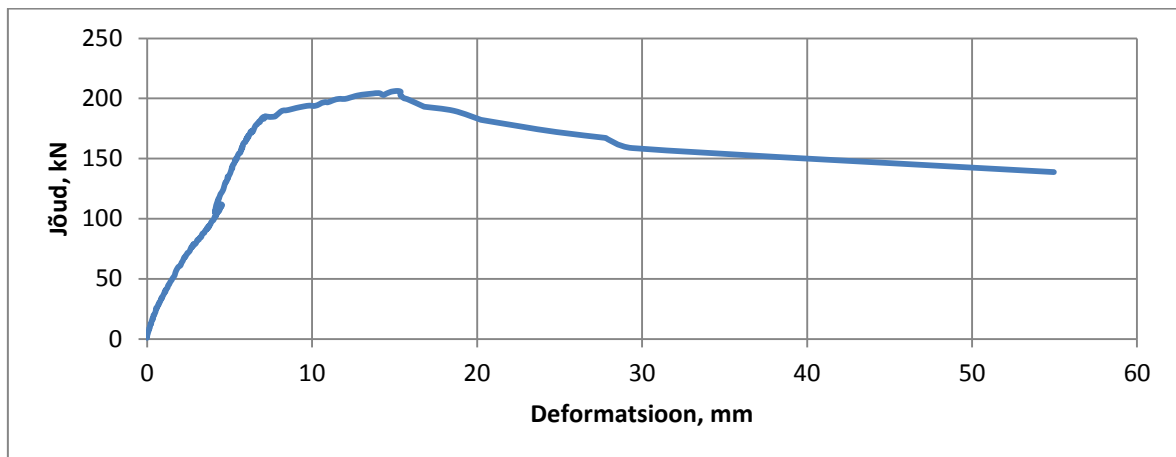


Joonis L6.24. Posi post 3 nõtkunud kuju erinevatel koormustel

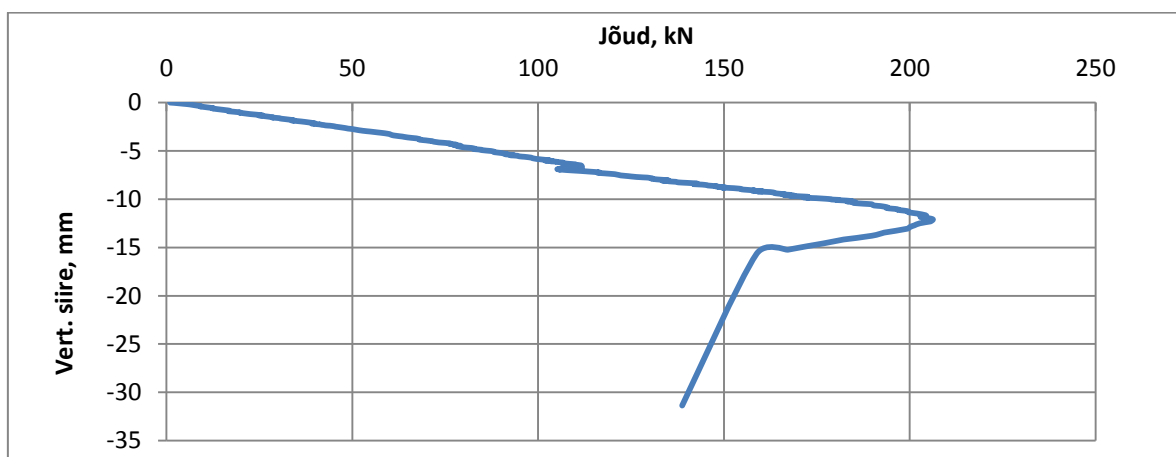
## Lisa 6 järg



Joonis L6.25. Paneel 1 koormus ajas



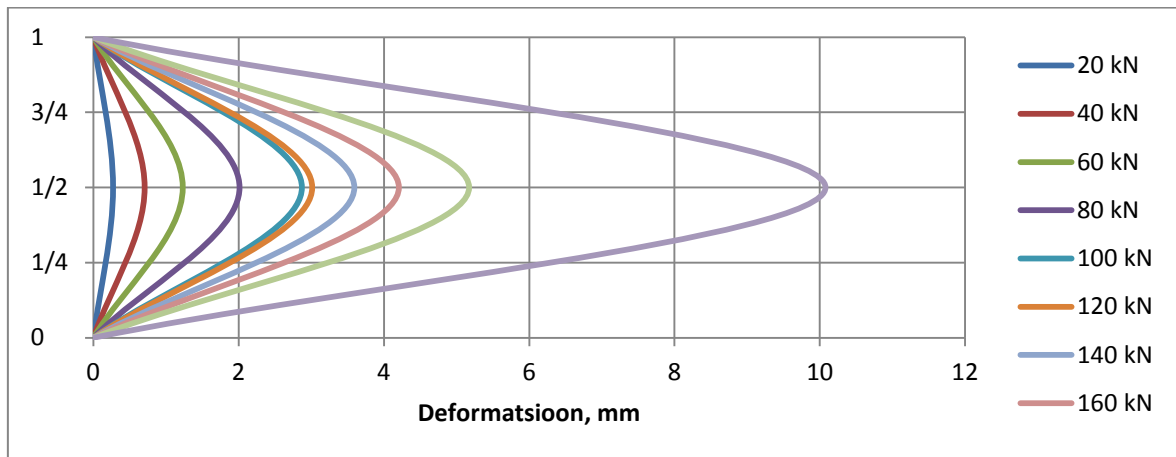
Joonis L6.26. Paneel 1 horisontaalne deformatsioon



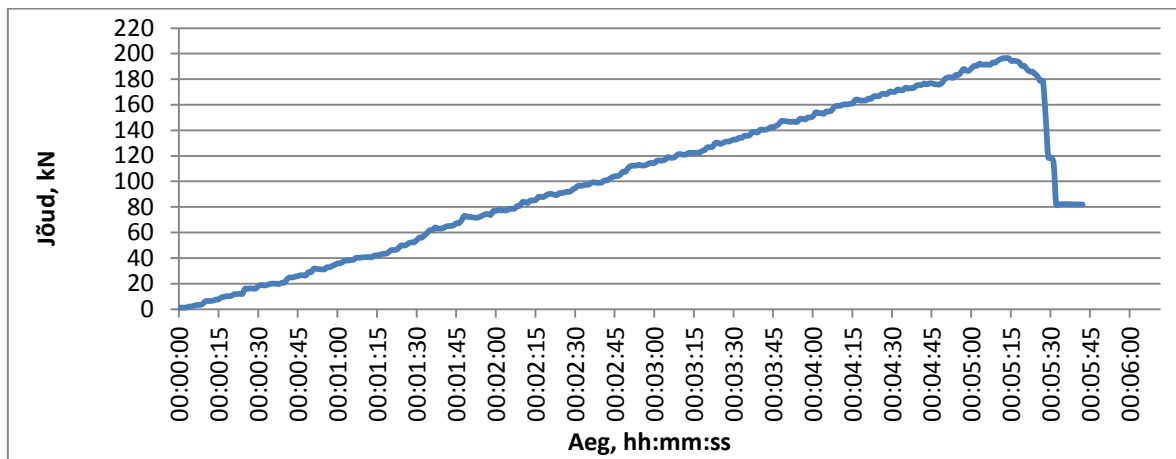
Joonis L6.27. Paneel 1 vertikaalne siire



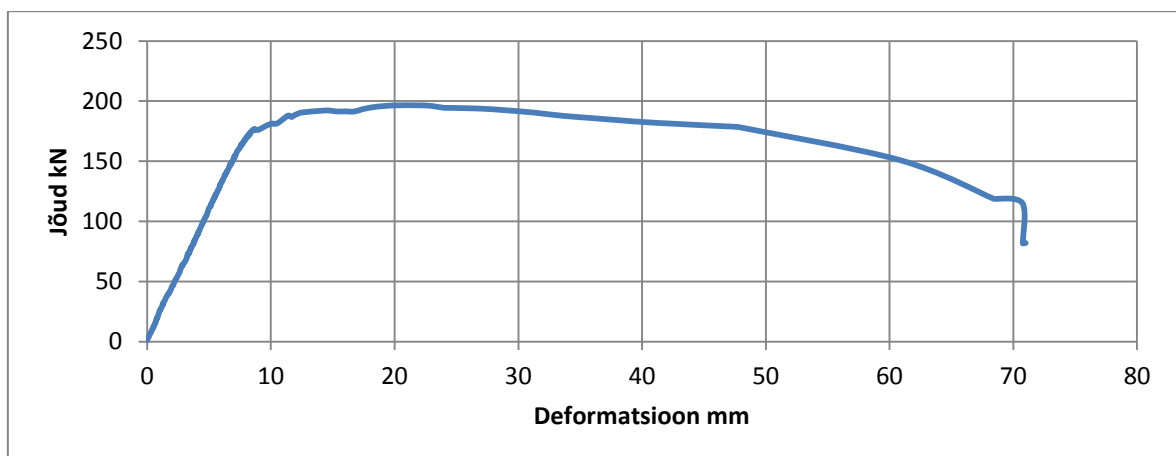
## Lisa 6 järg



Joonis L6.28. Paneel 1 nõtkunud kuju erinevatel koormustel

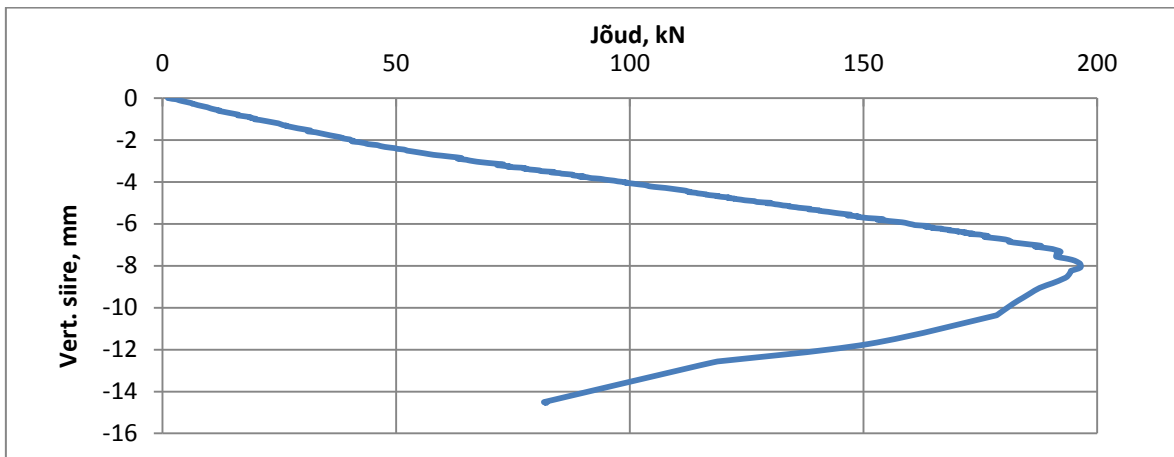


Joonis L6.29. Paneel 2 koormus ajas

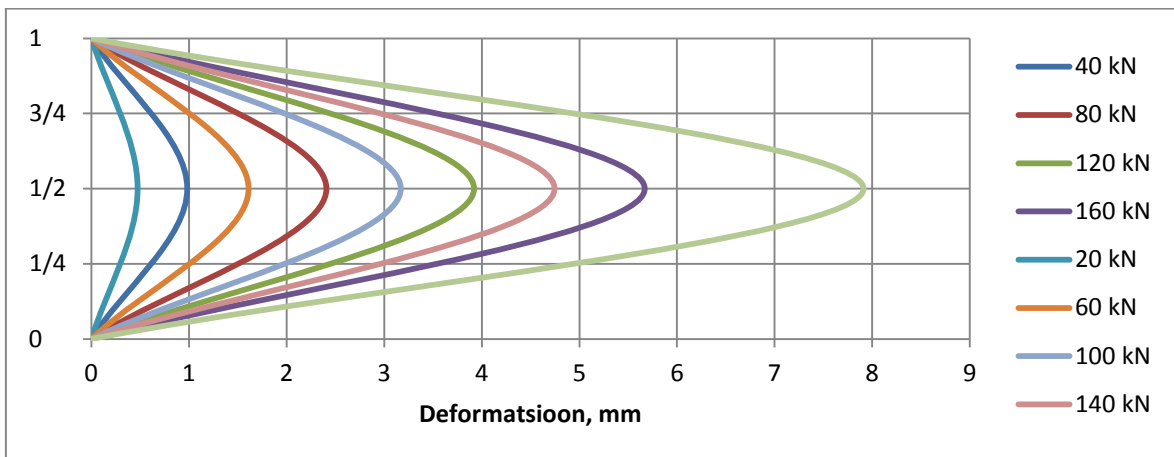


Joonis L6.30. Paneel 2 horisontaalne deformatsioon

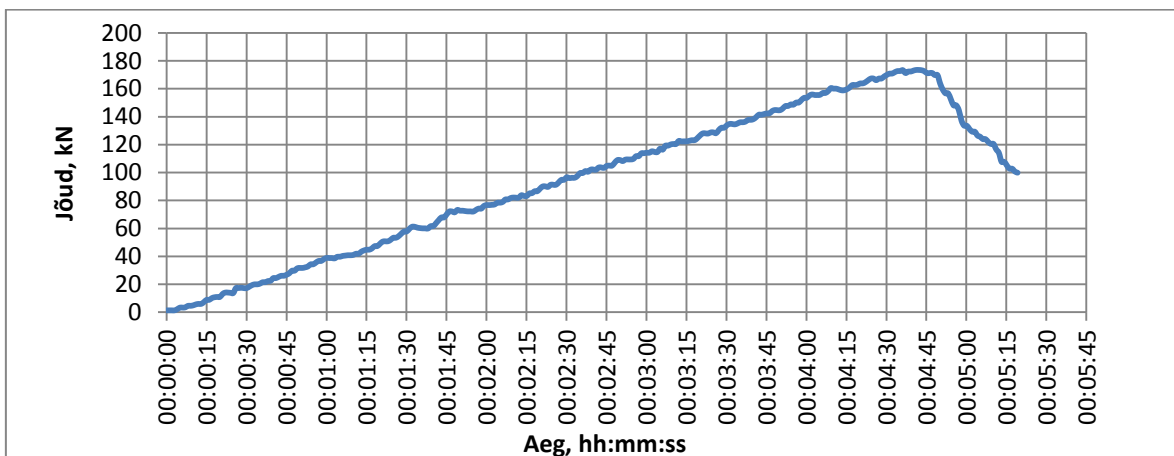
## Lisa 6 järg



Joonis L6.31. Paneel 2 vertikaalne siire

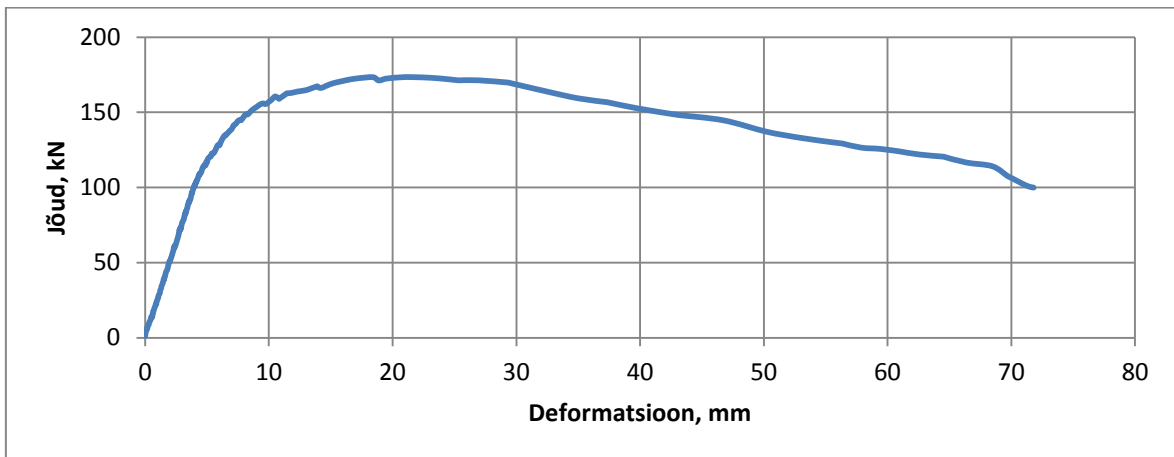


Joonis L6.32. Paneel 2 nõtkunud kuju erinevatel koormustel

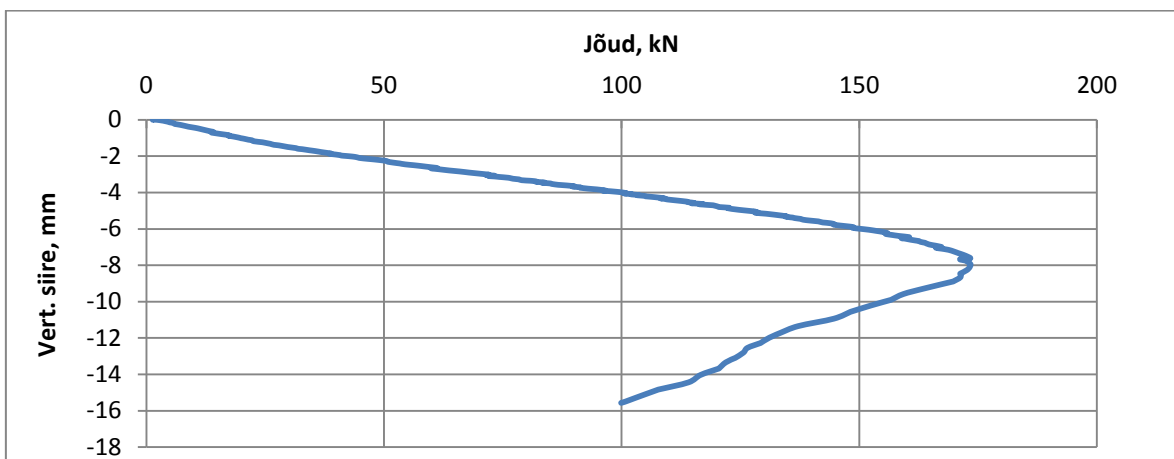


Joonis L6.33. Paneel 3 koormus ajas

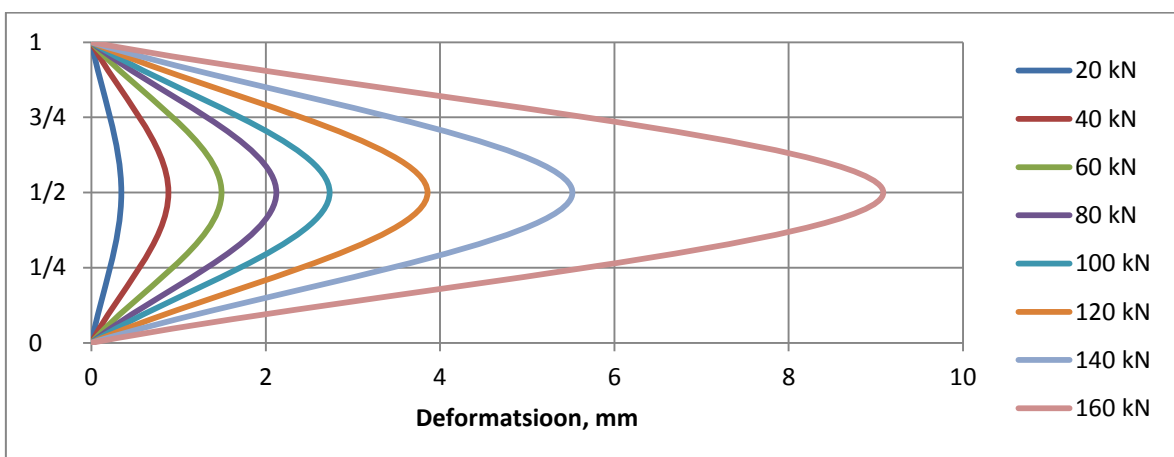
## Lisa 6 järg



Joonis L6.34. Paneel 3 horisontaalne deformatsioon

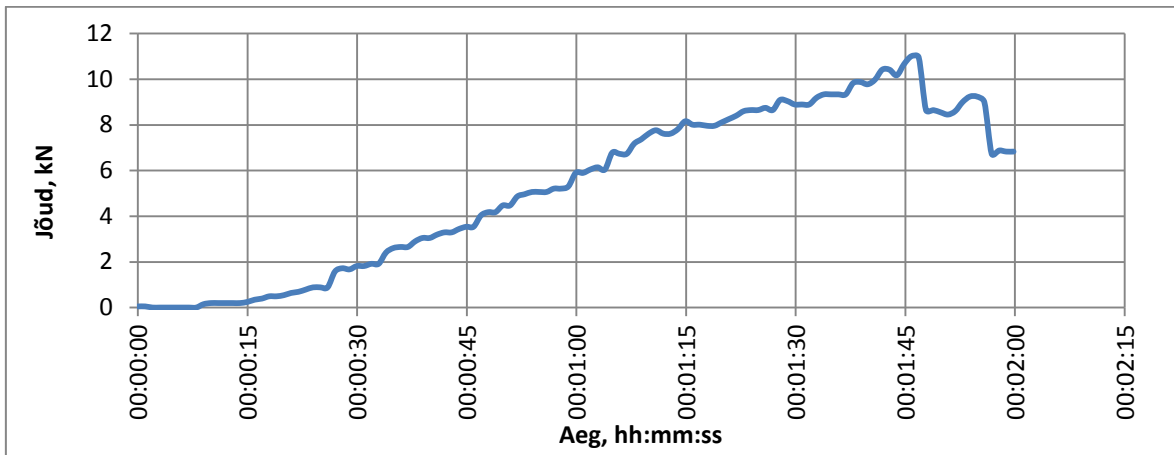


Joonis L6.35. Paneel 3 vertikaalne siire

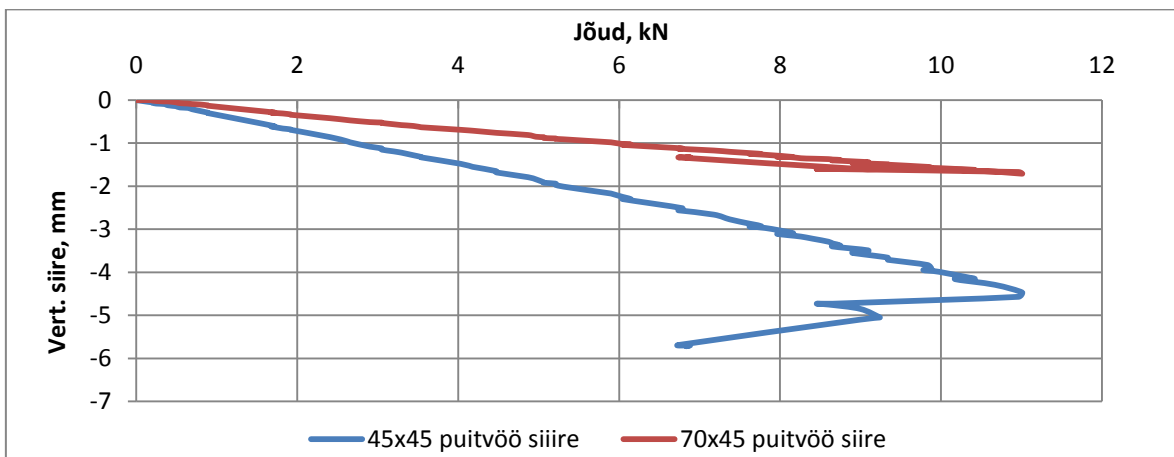


Joonis L6.36. Paneel 3 nõtkunud kuju erinevatel koormustel

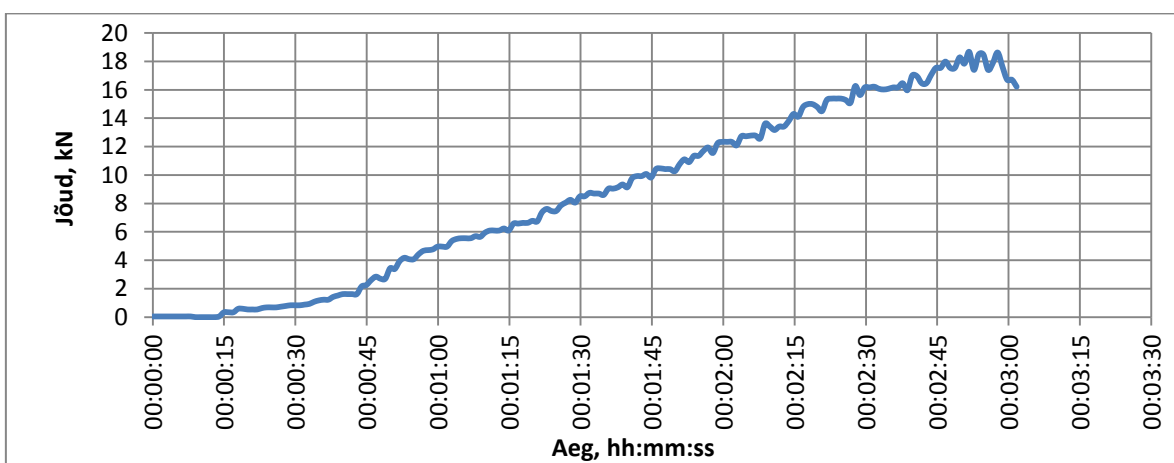
## Lisa 7. Nihkekatsete üldised graafikud



Joonis L7.1. Kartro post 4 koormus ajas

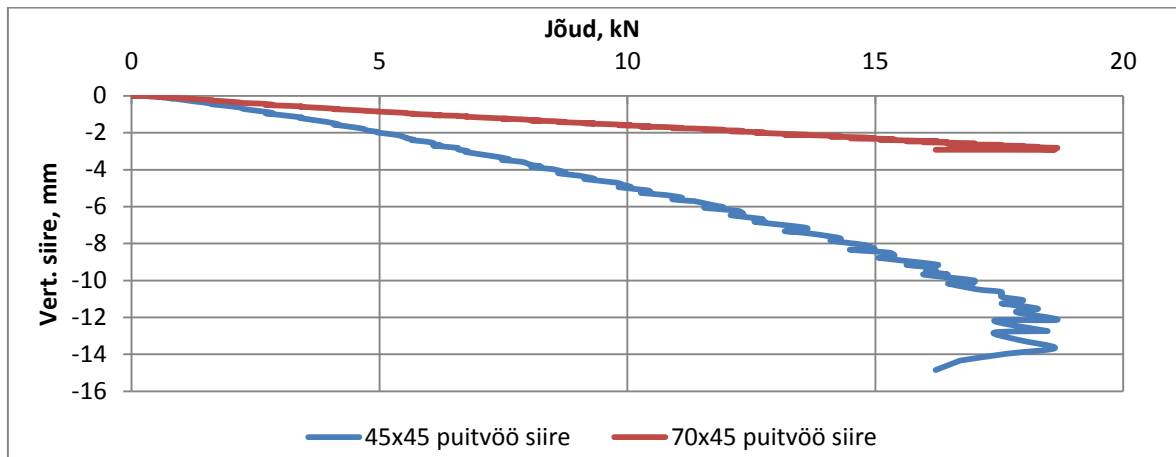


Joonis L7.2. Kartro post 4 puitvööde vertikaalsed siirded

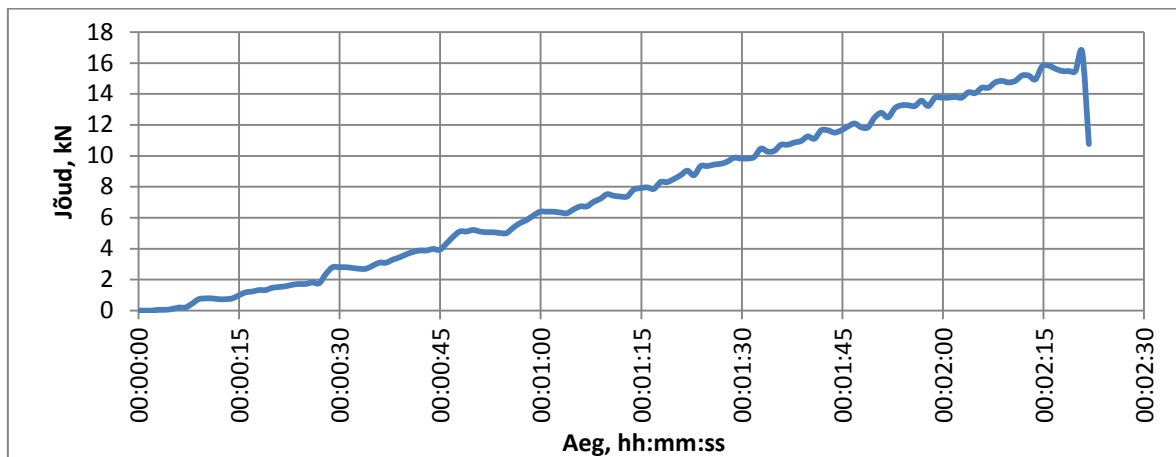


Joonis L7.3. Kartro post 5 koormus ajas

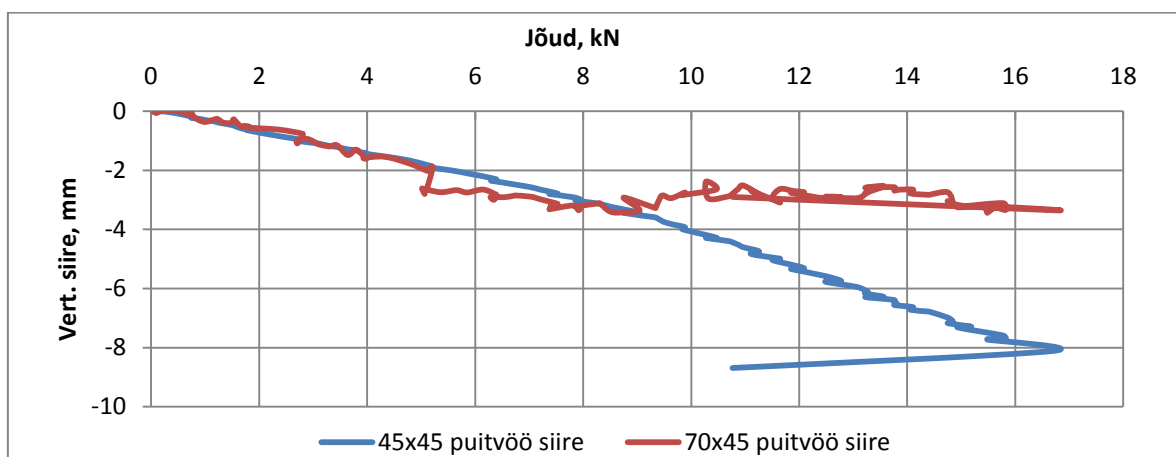
## Lisa 7 järg



Joonis L7.4. Kartro post 5 puitvööde vertikaalsed siirded



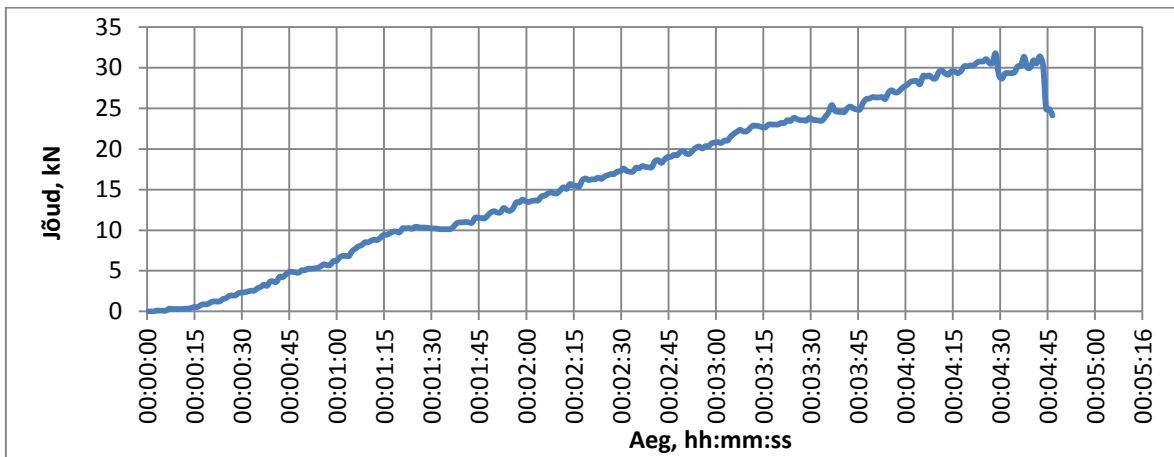
Joonis L7.5. Kartro post 6 koormus ajas



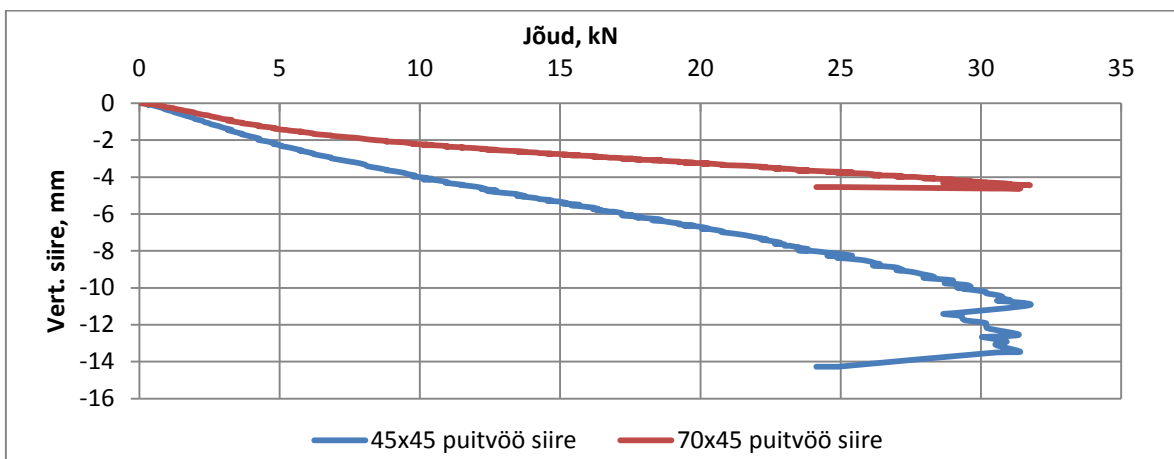
Joonis L7.6. Kartro post 6 puitvööde vertikaalsed siirded

**Märkus:** 70x45 mm puitvöö vertikaalset deformatsiooni mõõtnud anduri andmed ei ole tõepärased.

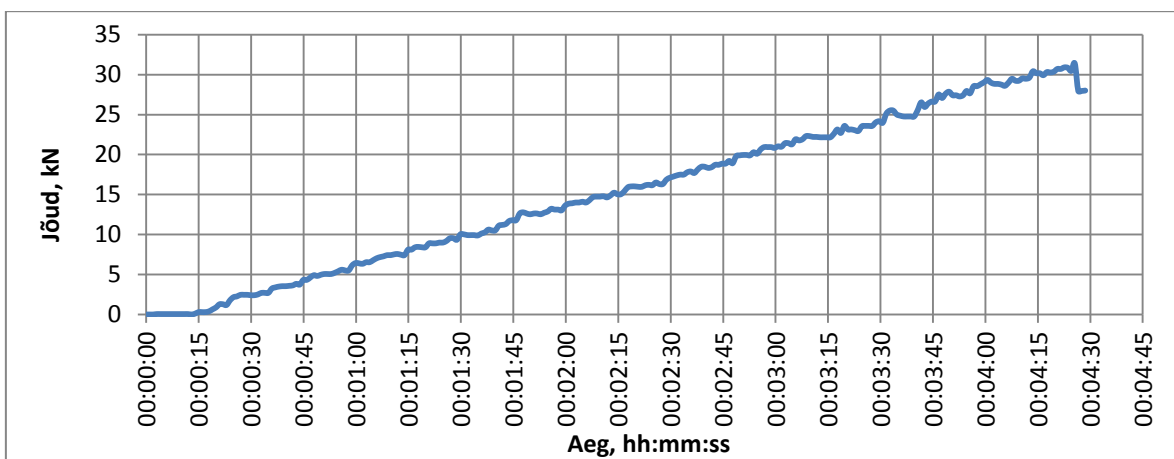
## Lisa 7 järg



Joonis L7.7. Posi post 4 koormus ajas

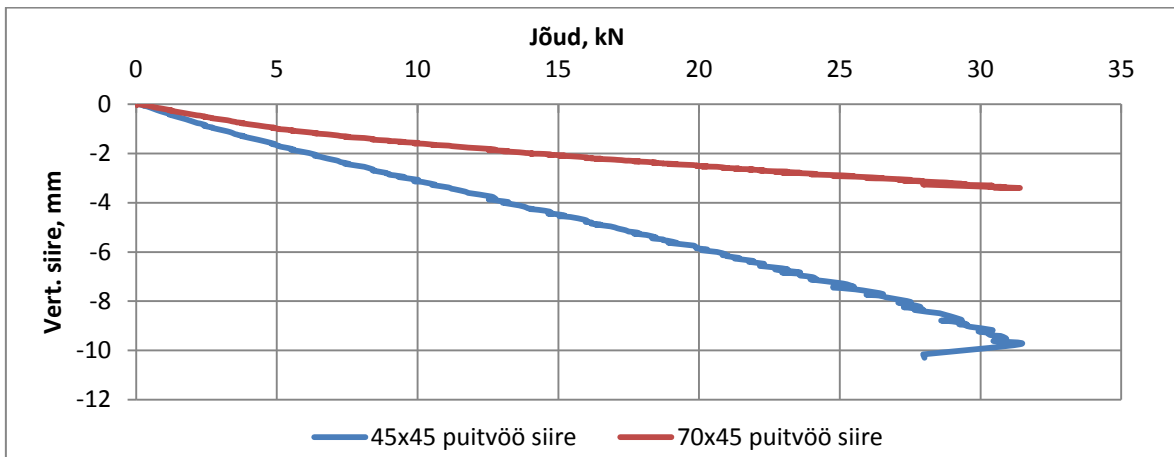


Joonis L7.8. Posi post 4 puitvööde vertikaalsed siirded

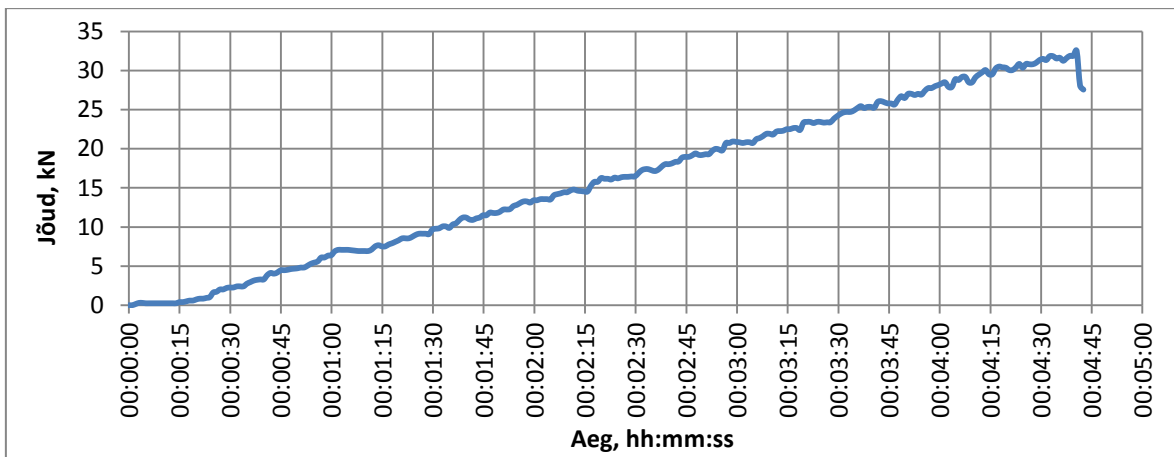


Joonis L7.9. Posi post 5 koormus ajas

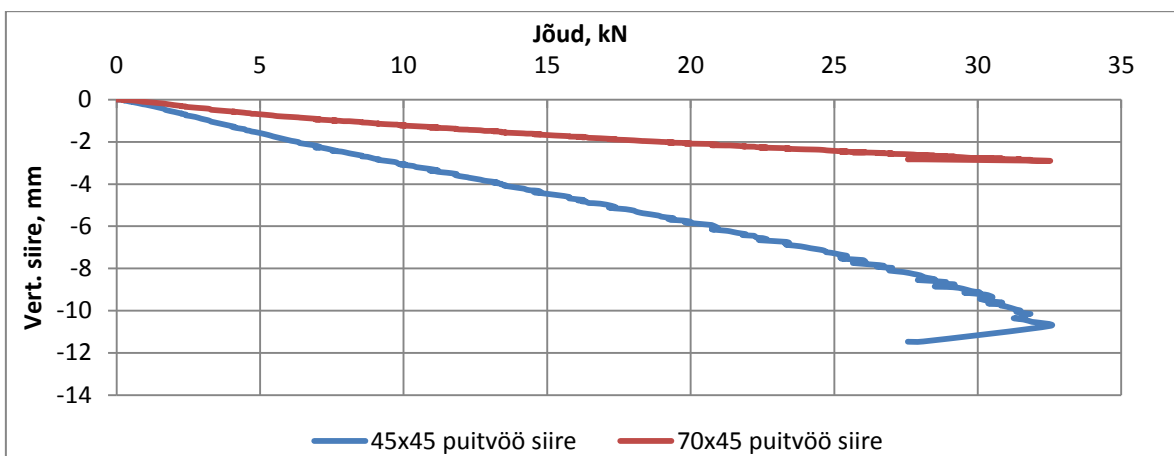
## Lisa 7 järg



Joonis L7.10. Posi post 5 puitvööde vertikaalsed siirded



Joonis L7.11. Posi post 6 koormus ajas



Joonis L7.12. Posi post 6 puitvööde vertikaalsed deformatsioonid

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

Mina, Peep Pihlapson,  
(sünniaeg 23.07.1990)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetused ja analüüs, mille juhendaja on Martti-Jaan Miljan,
  - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
  - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
  - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 1.06.2015

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

*(juhendaja nimi ja allkiri)*

\_\_\_\_\_

*(kuupäev)*

\_\_\_\_\_

*(juhendaja nimi ja allkiri)*

\_\_\_\_\_

*(kuupäev)*