



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

EHITUSTEADUSKOND

Ehitiste projekteerimise instituut

Puit-kiudbetoon komposiitkonstruktsiooni nihkeliite katse ja analüüs

Experiment and analysis of timber-concrete composite notched shear connector using fiber-reinforced concrete

EEK60LT

Üliõpilane: Silver Pikk

(allkiri)

Juhendaja: Eero Tuhkanen

(allkiri)

Tallinn, 2015.a.

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.
Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite
tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt
pärinevad andmed on viidatud.

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood:

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees (allkiri)

Lühikokkuvõte

Käesolev magistritöö käsitleb puit-betoon komposiitkonstruktsiooni kiudbetoonist tappnihkeliidet. Kasutades kiudbetooni on teoreetiliselt võimalik saavutada metallnaagliga nihkeliite sarnane purunemispilt, samas aga vähendada konstruktsiooni püstitamiseks kuluvat aega.

16 laborikatse põhjal analüüsiti nihkeliite tugevus- ja jäikusnäitajaid, purunemisviisi ning tulemusi mõjutavaid tegureid tulenevalt katsemeetodist. Kirjanduses kiudbetoonist tappnihkeliite kohta arvandmed puuduvad, mistõttu on uuringu tulemusi võrreldud metallnaaglit sisaldava nihkeliitega, ennekõike liite purunemisviisi silmas pidades.

Kirjeldatakse põhjalikult meetodeid ning katsetamise käigus ette tulnud probleeme, mida tuleks arvestada edasiste uuringute teostamisel.

Abstract

In this thesis a new type of notched shear connection for timber-concrete composite system is described. Using fiber reinforced concrete it is theoretically possible to get similar post peak behaviour as a connection using metal, but significantly decreasing time required to erect the structure.

According to the 16 samples tested connection strength and stiffness was analysed. Also the post peak behaviour and the factors affecting the results of the test were investigated. There is no data in the literature on fiber-reinforced notch shear connections and therefore test results were compared with steel reinforced notch shear connections.

The methods used and the problems encountered testing this kind of shear connection were described to be taken into account in future studies.

Sisukord

Lühikokkuvõte	1
Abstract	2
1 Sissejuhatus	5
2 Töö eesmärgid	7
3 Puit-betoon komposiitkonstruktsioon	8
3.1 Konstruktsiooni käitumine	8
3.2 Arvutuspõhimõtete tutvustus	11
3.3 γ -meetod	13
3.4 Girhammari meetod	16
4 Nihkeliide	19
4.1 Üldiselt	19
4.2 Töörelevantsed katsed	21
5 Katsematerjalid	26
5.1 Betoon	26
5.1.1 Betooni nõuded	26
5.1.2 Betooni katsed	28
5.1.3 Survekatsete tulemused	30
5.1.4 Pikkusemuudu katsete tulemused	31
5.2 Liimpuit	33
5.2.1 Nõuded puidu niiskuse määramiseks	33
5.2.2 Liimpuidu katsed	34
5.2.3 Niiskusmõõtmiste tulemus	36
6 Katsekeha ehitus ja katsetamine	38
6.1 Puit-betoon nihkeliide	38
6.2 Puit-betoon nihkeliite katse	42

7	Katsetamise analüüs	46
7.1	Probleemid konstruktsiooniga	46
7.1.1	Katsekehade valmistamine ja hoiustamine.....	46
7.1.2	Konstruktsiooni katsetamine	47
7.2	Kasutatud lahendused	47
7.2.1	Katsekehade valmistamine ja hoiustamine.....	48
7.2.2	Konstruktsiooni katsetamine	49
8	Katsetulemused ja analüüs	51
8.1	Purunemispildid ja leitud suurused.....	51
8.2	Tiheduse mõju katsetulemustele.....	54
8.3	Katsetulemused ja nende usaldusväärsus	56
8.4	Nihkeliite võrdlus analoogsete liidetega.....	59
	Kokkuvõte	61
	Summary	63
9	Kasutatud kirjandus.....	65
	Lisa 1 - purunemispildid	67
	Lisa 2 - liimpuidu tööjoonis	73
	Lisa 3 - katseraami joonis.....	74

1 Sissejuhatus

Betoon on üks tähtsamaid leiutisi ehituskonstruksioonide valdkonnas. Sellegipoolest on betooni nõrgaks küljeks madal tõmbetugevus, mistõttu konstruksiooni tõmbetsoonides kasutatakse armatuuri.

François Coignet oli esimene, kes kasutas betoonikonstruksioonis rauda. 1853. aastal ehitas ta esimese raudbetoonkonstruksiooniga neljakorruselise elamu aadressil 72 rue Charles Michels Pariisis. Coignet' raudbetooni kirjeldustest võib järeldada, et ta ei teinud seda tugevuse suurendamiseks, vaid seinte ümberlükkekindluse kasvatamiseks [3]. 1854. aastal konstrueeris inglise ehitaja William B. Wilkinson armeeritud betoonkatuse ja -põrandatega kahekorruselise maja. Wilkinsoni tehtud armeeringu asetus näitab, et erinevalt Coignet'st oli armeering paigutatud teadlikult tõmbetsooni pragude vältimiseks [4].

William E. Ward tegi esimesed katsed raudbetoonkonstruksioonidega aastatel 1871 ja 1872. Katsete peamiseks eesmärgiks oli saada teadmisi, kuidas suurendada ehitise tulekindlust. Raudtaladega sarrustatud portlandtsemendist talade katsete põhjal avastas Ward, et materjale kombineerides saavutatakse suurem efektiivsus, kui kummagi materjali eraldi kasutamisel. Katseliselt määras ta läbipained, nihketugevuse ja tulekindluse ning ühtlasi killustiktaitematerjalid optimaalse suuruse. [5]

Joseph Monier, prantsuse aednik ja üks peamisi raudbetooni arendajaid, sai patendi sarrusvõrguga betoonlillepottidele ning 1877. aastal uue patendi ristvõrgustikuna paigaldatud sarrusterasest betoonsammastele ja -taladele. Kuigi Monier kahtlemata teadis, et betooni sarrustamine tugevdab konstruksiooni, ei ole selge, kas ta teadis, kui palju parandab armeering betooni tõmbetugevust. [6]

Seoses 1930ndate majanduskriisi ja metalli vaegusega asuti otsima odavamalt alternatiivi betoonkomposiitkonstruksioonide rajamiseks. Ühe variandina leiti, et komposiitkonstruksiooni tõmbetsoonis võib asendada metalli puiduga. 1933. aastal avaldasid Baldock ja McCullough teadustöö "Loading Tests on a New Composite Type Short Span Highway Bridge Combining Concrete and Timber in Flexure". Uuring teostati Oregoni maanteeamet (Oregon State Highway) palvel leidmaks uudne tasuv lahendus lühikeseavaliste sildade valmistamiseks. Paralleelselt valmisid ka J. F. Seileri uuringud "New Type of Composite Beam" ja "Design of Composite Slab Highway Bridge Deck".

Puit-betoon komposiitkonstruktsiooni on edukalt kasutatud sildades, angaarides, muulides, hoonetes ja platvormides alates 1940ndate algusest. Paljudes Euroopa riikides kasutatakse puit-betoon komposiitkonstruktsioone nii olemasolevate hoonete ja sildade uuendamiseks ja järeltugevdamiseks kui ka uusarendustes [7]. Puit-betoon komposiitvahelael on mitmeid eeliseid nii tavaliste puitvahelagede kui ka raudbetoonvahelagede ees.

Komposiitefekti saavutamiseks on vajalik omavahel siduda puittalastik ja betoonplaat. Selleks on kasutusel lai valik mehaanilisi kinniteid ja kinnitussüsteeme, kuid nende paigaldamine on töömahukas. Samuti pikendab tööaega betoonplaadi armeerimine. Valitud nihkeliide määrab ühtlasi konstruktsiooni käitumise ja purunemise. Komposiitkonstruktsioon peab olema jäik ja tugev, kuid selle komponentide arv ja paigaldusaeg peaksid olema minimaalsed, et süsteem oleks tasuv. Kuna nii betoon kui puit purunevad rabadalt komposiitkonstruktsioonis, peaks nihkeliite projekteerima plastseks, et hoiatada kasutajaid läheneva ohu eest.

Arvestades eelnevat, võiks olla otstarbekas kasutada puit-betoon komposiitkonstruktsioonis kiudbetooni. Metallist nihketüübli asemel freesitakse puittala pealispinda pesa, millesse valgub betoon moodustab nihet vastuvõtva tapi. Sellega saavutatakse teoreetiline komposiitefekt kahe materjali vahel.

2 Töö eesmärgid

- Katse konfiguratsiooni väljatöötamine - sooviga vähendada liitsüsteemi komponentide koguarvu ja paigaldamise kiirust, töötada välja teraskiudbetoonil põhinev nihkeliide.
- Teraskiudbetoon tapi purunemise analüüs - tapi vaatlus nihkeliites.
- Tappliite katsetamine, tulemuste suurjärkude väljaselgitamine - liite katsetamiseks süsteemi tekitamine ja tappliite iseloomulike suuruste leidmine läbi katsetuste, võrdlus olemasolevate süsteemidega.

3 Puit-betoon komposiitkonstruktsioon

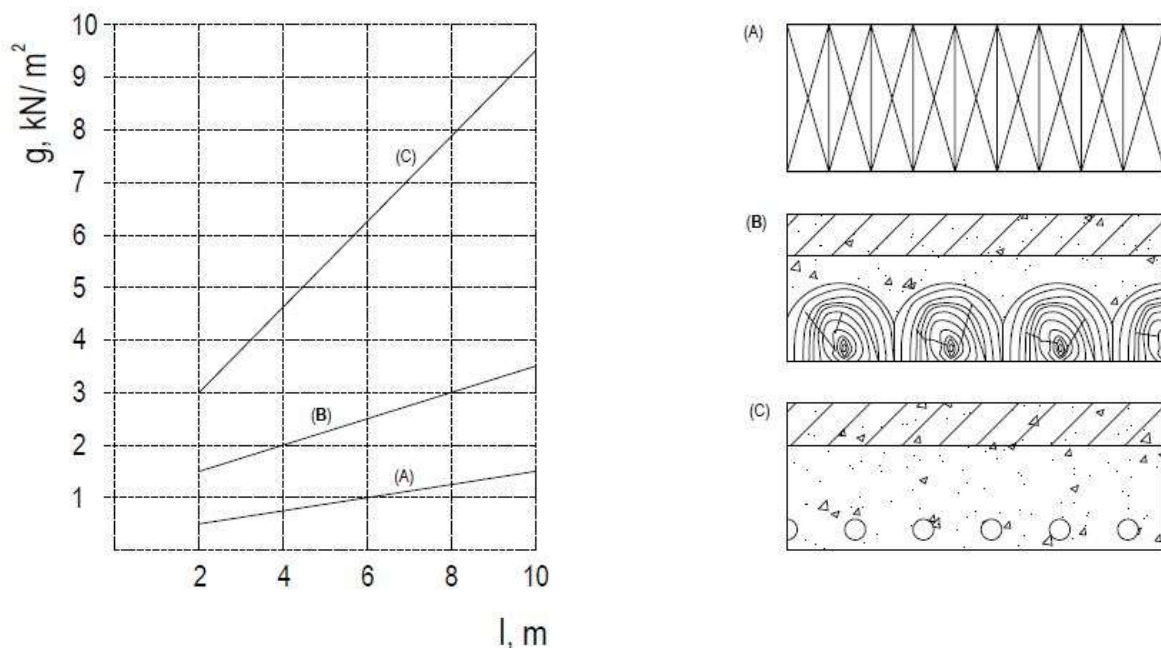
3.1 Konstruktsiooni käitumine

Puit-betoon komposiitsüsteem on tuntud lahendus nii olemasolevate puitkonstruktsioonide taastamisel ja tugevdamisel kui ka uute põrandate konstrueerimisel. Selles liitsüsteemis kasutatakse võimalikult efektiivselt ära betooni surve- ja puidu tõmbetugevus.

Võrreldes harilike puittaladel vahelagedega, saavutatakse betooni kasutamisega paremad akustilised näitajad ning suurem tulekindlus. Samuti võimaldab lahendus sillata suuremaid avasid, vähendades vahelagede läbipaindeid ja vibratsioone.

Eeliseid on ka tüüpilise raudbetoonvahelagede ees, kus tõmbetsoonis tekkivad praod võivad kiirendada niiskuse tungimist konstruktsiooni ja armatuuri roostetamist. Lisaks on alumine osa betoonplaadist (40-60% kõrgusest) ebaefektiivne, olles pragunenud ja seega mittetöötav. Asendades pragunenud osa vastupidavast täispuidust tekiga, saab vähendada üldist betoonplaadi kõrgust umbes 50% ja vähendada konstruktsiooni omakaalu. [9]

Joonis 3-1 näitab vahelae omakaalu g sõltuvust sildest l , kui kaskukoormus on $2,5 \text{ kN/m}^2$ [7].



Joonis 3-1 (A) täispuit vahelagi; (B) puit-betoon komposiit vahelagi; (C) raudbetoon vahelagi

Puittalad omavad suurt tõmbetugevust kiu pikisuunas. Puidust ja betoonist saab valmistada jäiga süsteemi, mis koosneb õhukesest ülemisest betoonplaadist ja alumisest puittalastikust.

Puittalad omavad suurt tõmbetugevust kiu pikisuunas. Puidust ja betoonist saab valmistada jäiga süsteemi, mis koosneb õhukesest ülemisest betoonplaadist ja alumisest puittalastikust. [2] Puit-betoon komposiitkonstruktsioonis töötab betoonplaat eelkõige survele, puittala paindele ja tõmbele ning nihketüübel kannab üle jõud kahe materjali vahel.

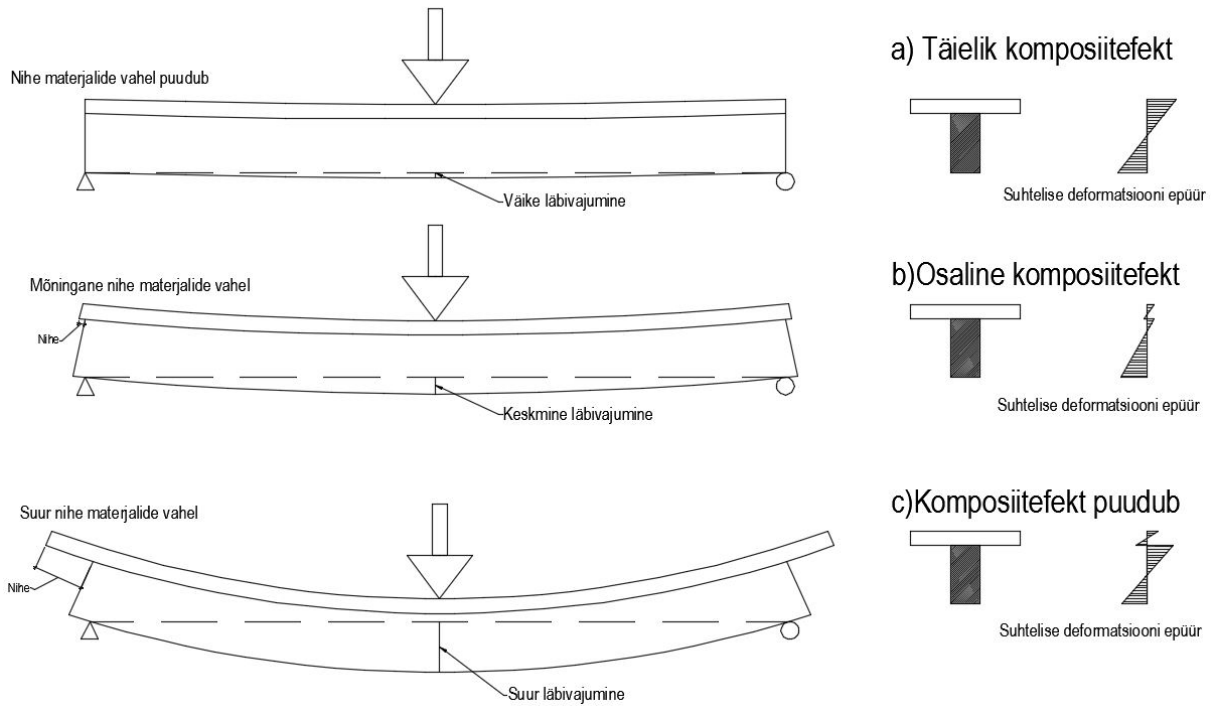
Süsteemi kõige olulisem osa on ühendus kahe materjali vahel, mille mehaanilised omadused mõjutavad kõige olulisemaid komposiitkonstruktsiooni omadusi, eelkõige kandevõimet ja jäikust. [1]

Kui betoonplaat valatakse vabalt tala peale ja eeldatakse, et hõõrdumine on tühine, siis tala ja plaat painduvad eraldiseisvalt. Nende eraldi paindumise tõttu tekib nihe plaadi ja tala vahel. Kui materjalid omavahel siduda, saab nihet oluliselt vähendada või isegi kaotada.

Puit-betoon komposiitkonstruktsiooni käitumist iseloomustab kaks jäikuse äärmust:

- Alumine piir, kus puudub horisontaalne jõuülekanne kahe kihi vahel, st täielikult mitte komposiitne käitumine. Sel juhul ristlõike kaks kihti (puit ja betoon) liiguvad sõltumatult teineteisest. Ristlõikel on kaks individuaalset neutraaltelge ja katkendlik paindekõver (joonis 3-2 c).
- Ülemine piir, kus komposiitristlõikel on üks neutraaltelg ja kihid deformeeruvad ühiselt, st täielikult komposiitne käitumine (joonis 3-2 a).

Reaalelus puit-betoon komposiitkonstruktsiooni koormates esineb konstruktsioonis erinevate materjalide vahel nihe. Nihe vähendab komposiitkonstruktsiooni efektiivsust, vähendades nii jäikust kui ka tugevust. Selline komposiitkonstruktsiooni käitumine on kahe äärmuse vahepealne ja sellist olekut nimetatakse osaliseks komposiitefektiks (joonis 3-1 b). [10]



Joonis 3-2

Nihkeliite tõhusust saab mõõta valemiga, mille esitas Gutowski (2008):

$$Efektiivsus = \frac{D_N - D_I}{D_N - D_C}$$

(valem 3.1)

kus

D_N - teoreetiline, täielikult mittekomposiitse konstruktsiooni deformatsioon (mõeldud arvutusteks, kus mitme materjaliga tala on ilma sisekihtide nihkejõu ülekandumiseta), mm;

D_C - teoreetiline, täielikult komposiitse konstruktsiooni deformatsioon (arvutatakse ekvivalent ristlõike meetodil), mm;

D_I - puit-betoon komposiitkonstruktsiooni mõõdetud deformatsioon, mm;

Efektiivsus võib varieeruda vahemikus 0-100%, kus 0% tähistab täielikult mittekomposiitset ja 100% täielikult komposiitset konstruktsiooni [23].

Nihkeliite efektiivsust on võimalik määrata ka paindejäikuse kaudu. Valemi on esitanud Piazza 1983. aastal:

$$\eta = \frac{EI_{real} - EI_0}{EI_{\infty} - EI_0}$$

kus: (valem 3.2)

η - sisekihtidevaheline efektiivsus, 0-1;

EI_{real} - tala tegelik paindejäikus, N/mm²;

EI_0 - tala paindejäikus, kui komposiit efekti ei esine, N/mm²;

EI_{∞} - tala paindejäikus teoreetiliselt täieliku komposiitse töö korral, N/mm²;

Jäiga nihkeühenduse korral $\gamma \rightarrow 1$, paindliku nihkeühenduse korral $\gamma \rightarrow 0$ [23].

Selleks, et piirata deformatsioone komposiitkonstruktsioonides, tuleks kasutada võrdlemisi jäikasad nihkeühendusi. Jäikus aga ei ole ainus soovitatav omadus puit-betoon nihkeühenduses. Selleks, et vältida komposiitkonstruktsiooni habrast purunemist, peaksid nihkeühendused olema ka piisavalt plastsed. [23]

3.2 Arvutuspõhimõtete tutvustus

Analüütilised mudelid pingete ja deformatsioonide arvutamiseks on välja töötatud pooljäikadele komposiitkonstruktsioonidele kahe kihi (teras-betoon või puit-puit) vahel ja neid saab rakendada ka puit-betoon konstruktsioonidele. Üks esimesi arvutusmudeleid arendati välja 1943. aastal T-kujuliste komposiitsüsteemide katsete põhjal. Konstruktsioon koosnes nihketüüblitega ühendatud betoonplaadist ja terasest I-talast. Mudel on rakendatav mistahes liiki talale, mis koosneb kahest omavahel seotud kihist ja rahuldab järgmisi eeldusi:

- nihkeühendust ülemise kihi ja I-tala vahel võib lugeda jätkuvaks kogu tala ulatuses;
- lubatav nihe nihketüübli kohta on proportsionaalses korrelatsioonis rakendatava koormusega;
- pingeaotus on lineaarne ülemiste ja alumiste kihtide ulatuses;

- mõlemad kihid deformeeruvad võrdselt kõikides punktides igal ajahetkel kogu tala pikkuses. [8]

Tänapäeval on mitmed autorid välja pakkunud lihtsaid lineaarseid mudeleid, mis arvestavad nihet kahe komposiitkonstruktsiooni kihi vahel. Antud mudelid tuginevad Newsmarki (1951) ja Möhleri (1956) arvutusmeetodile. Schelling (1965) pakkus välja ühe sellise arvutusmeetodi, mis on toodud Eurokood 5-s ja põhineb varem tuletatud komposiitristlõike tasakaalu diferentsiaalvõrranditel. Antud arvutusmeetodit tuntakse kui γ -meetod, mida tutvustab alapeatükk 3.3.

Godycki (1984) esitas lineaar elastse mudeli, et arvutada puit-betoon komposiitstruktuure, sealhulgas ka nihketüüblite nihet. Godycki arvestas ajast sõltuvaid muutusi betooni käitumises, eeldades, et betooni elastsusmoodul väheneb ajas. [8]

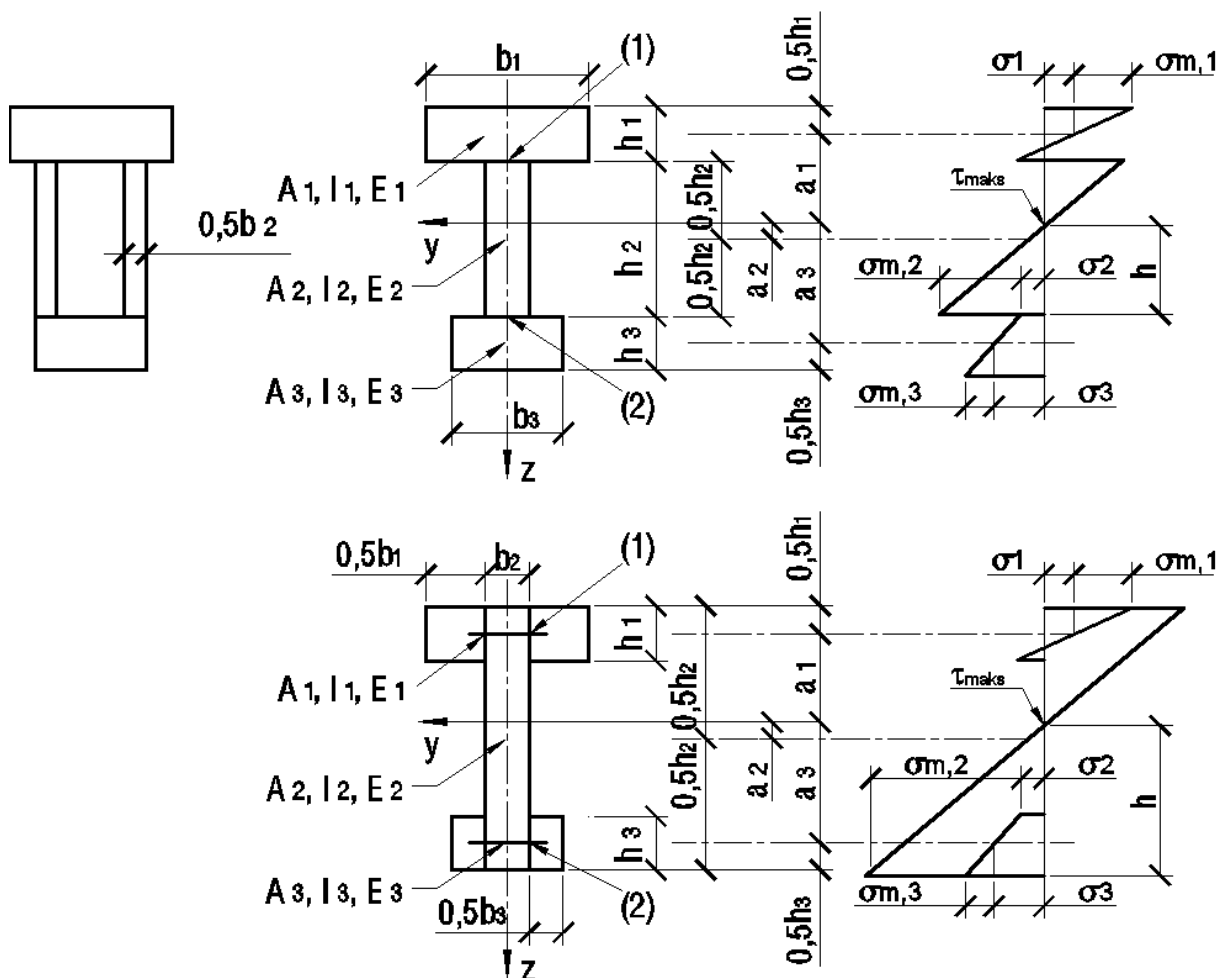
Stevanovic (1989 ja 1996) pakkus välja elastse meetodi, et arvutada pingeid puit-betoon komposiitkonstruktsioonides, millele mõjuvad põik- ja teljesuunalised koormused ning arvestab ka puit-betoon elementidevahelist nihet. Meetod, mis põhineb elastsel teorial, võimaldab arvutada läbipaindeid ja osajõude puidus ning betoonis, ühtlasi võimaldab arvutada nihkejõudu puidu ja betooni vahel. [8]

Sama saavutasid ka Girhammar ja Gopu 1991. aastal, kuid nende lähenemine erines Stevanovici omast sellega, et nende Euler-Bernoulli teorial põhinev arvutusmeetod arvestas ka teistjärku mõjusid. Girhammar ja Gopu laiendasid ja üldistasid oma tööd 2007. aastal, et saavutada täpsem arvutusmeetod Euler-Bernoulli talateooriale. 2008 aastal töötas Girhammar välja lihtsustatud arvutusmeetodi [23], mida on täpsemalt kirjeldatud alapeatükis 3.4.

3.3 γ -meetod

Dimensioneerimise meetod põhineb lineaarsel elastsusteoorial ja alljärgnevad valemid on kasutatavad järgmistel eeldustel:

- talad on lihttalad avaga l . Jätkuvtaladel võib l võtta võrdseks 0,8 ava ja konsooltaladel võrdseks kahekordse konsooli pikkusega;
- üksikosad (puidust, puidupõhistest plaatidest) on kas täispikkusega või valmistatud liimitud jätkliidetega;
- üksikosad on omavahel liidetud mehaaniliste sidemetega, mille nihkemoodul on K_s ;
- sidemete vahekaugus on konstantne või muutub vastavalt nihkejõu muutumisele vahemikus s_{\min} ja s_{\max} ühtlaselt, kus $s_{\max} \leq 4s_{\min}$;
- koormus mõjub z -telje suunas, tekitades paindemomendi $M = M(x)$, mis muutub sinusoidselt või paraboolselt ja nihkejõud $V = V(x)$.



Joonis 3-3 Ristlõige (vasakul) ja paindepingete jaotus (paremal). Kõik mõõtmed on positiivsed välja arvatud a_2 , milline võetakse positiivseks joonisel näidatud korral.

Tähised:

(1) vahekaugus: s_1 nihkemoodul: K_1 koormus: F_1

(2) vahekaugus: s_3 nihkemoodul: K_3 koormus: F_3

Kui tala vöö koosneb kahest osast (mis on ühendatud seinaga) või koosneb sein kahest osast (nagu karpprofiiliga talal), siis sidemete vahekauguse s_i määrab kahe liitepinna sidemete vajalik arv pikkusühikule. Läbipaine arvutatakse efektiivse paindejäikusega $(EI)_{ef}$, mis määratakse järgneva jaotise kohaselt.

Efektiivne paindejäikus tuleks võtta

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (\text{valem 3.3})$$

kus:

E_i - i-nda elemendi elastsusmooduli keskväärtus, N/mm^2 ;

$A_i = b_i h_i$ - i-nda elemendi ristlõikepindala, mm^2 ;

a_i - i-nda elemendi raskuskeskme kaugus komposiitse süsteemi neutraalteljest, mm ;

$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12}$ - i-nda elemendi inertsimoment, mm^4 ;

$\gamma_2 = 1$

$\gamma_i = [1 + \pi^2 E_i A_i s_i / (K_i l^2)]^{-1}$ kui $i=1$ ja $i=3$

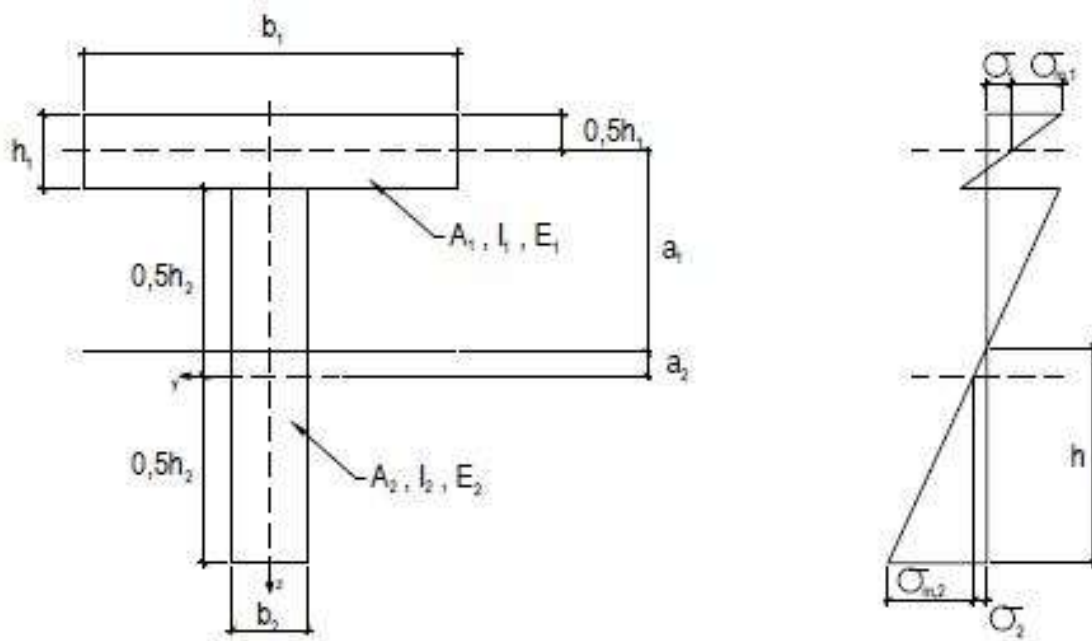
$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i}$$

kus kasutatud tähised on määratletud joonisel 3-1 ja γ_i kirjeldab komposiidi käitumist.

T-ristlõike korral on valemite kolmandat järku elemendid =0.

$K_i = K_{ser,j}$ kasutuspiirseisundi arvutustes;

$K_i = K_{u,j}$ kandepiirseisundi arvutustes.



Joonis 3-4

Normaalpinged määratakse valemiga

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(EI)_{ef}}$$

(valem 3.4)

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_i M}{(EI)_{ef}}$$

(valem 3.5)

Maksimaalsed nihkepinged toimivad kohas, kus normaalpinged on nullid. Maksimaalne nihkepinge seinaelemendis (element 2 joonisel 3-3) määratakse avaldisega:

$$\tau_{2,max} = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h_2^2}{b_2 (EI)_{ef}} V$$

(valem 3.6)

Liidete koormus määratakse avaldisega:

$$F_i = \frac{\gamma_i E_i A_i a_i s_i}{(EI)_{ef}} V$$

(valem 3.7)

kus:

$i=1$ ja 3 , asjaolule vastavalt;

$s_i = s_i(x)$ - kinnituselementide vahekaugus [EVS-EN 1995-1-1:2005]

[24]

3.4 Girhammari meetod

Girhammari lihtsustatud meetodi rakendamiseks peavad olema täidetud järgmised eeldused:

- mehaanilised nihketüübid on jaotatud võrdse sammuga ning tekitavad ühtlaselt jaotatud nihkejõude pideva nihkemooduliga K ;
- x telg asub täielikult komposiitse tööga sektsiooni tsentris.

Kui eeldused on täidetud, saab komposiitse T-tala efektiivse paindejäikuse leida järgmise valemiga:

$$EI_{eff} = \frac{\mu_{\infty}^2}{\mu^2} \left[1 + \frac{EI_{\infty}/EI_0 - 1}{1 + (\mu/\pi)^2 (\alpha L)^2} \right]^{-1} EI_{\infty}$$

(valem 3.8)

kus

μ - nõtkumispikkuse koefitsient osalise komposiitse tööga taladele, ühikuta;

μ_{∞} - nõtkumispikkuse koefitsient täielikult komposiitse tööga taladele, ühikuta;

$\alpha L = \sqrt{\frac{Kr^2}{EI_0(1-EI_0/EI_{\infty})}} L$ - dimensioonitu nihkeühenduse parameeter;

$EI_0 = E_1I_1 + E_2I_2$ - vastava mittekomposiitse süsteemi paindejäikus, Nmm^2 ;

$EI_{\infty} = EI_0 + \frac{EA_p r^2}{EA_0}$ - vastava täielikult komposiitse tööga osa paindejäikus, Nmm^2 .

r puhul on tegemist osaelementide tsentrite vahelise kaugusega, mm;

$EA_0 = E_1A_1 + E_2A_2$ - osaelementide telgjäikuste summa, N;

$EA_p = E_1A_1 * E_2A_2$ - osaelementide telgjäikuste korrutis, N^2 .

[25]

Kuna nõtkepikkuse koefitsiendid osalise komposiitefektiga taladele on praktiliselt samad Euleri nõtkumispikkuse koefitsientidega enamikul piirtingimustel, siis saab eeltoodud efektiivpaindejäikuse võrrandi lihtsustada järgnevalt:

$$EI_{eff} \approx \left[1 + \frac{EI_{\infty}/EI_0 - 1}{1 + (\mu/\pi)^2(\alpha L)^2} \right]^{-1} EI_{\infty}$$

(valem 3.9)

Kui efektiivne paindejäikus on arvatud, saab leida sisejõudude ligikaudsed väärtused järgnevatest valemitest (3.10 - 3.14). r tähistab osaelementide tsentritevahelist kaugust, r_i tähistab i -nda osaelemendi tsentri kaugust komposiitristlõike tsentrist.

$$N_{1,eff} = - \left(1 - \frac{EI_0}{EI_{eff}} \right) \frac{M}{r}$$

(valem 3.10)

$$N_{2,eff} = \left(1 - \frac{EI_0}{EI_{eff}} \right) \frac{M}{r}$$

(valem 3.11)

$$M_{i,eff} = \pm \frac{E_i I_i}{EI_{eff}} M$$

(valem 3.12)

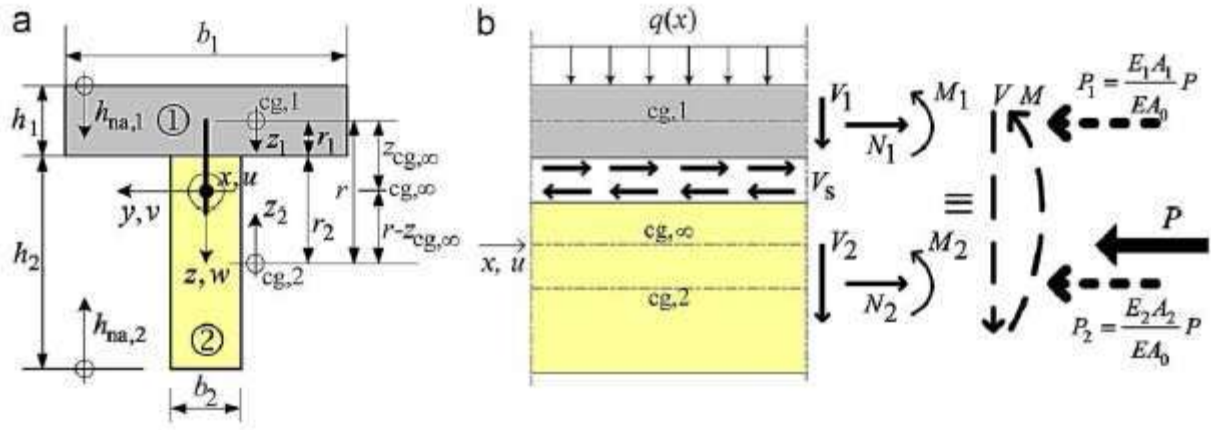
$$V_{s,eff} = \left(1 - \frac{EI_0}{EI_{eff}} \right) \frac{V}{r}$$

(valem 3.13)

$$V_{i,eff} = \frac{E_i I_i}{EI_{eff}} V + V_{s,eff} r_i$$

(valem 3.14)

$V_{s,eff}$ on nihkejõud osaelementide vahel, samas kui $V_{i,eff}$ on põikjõud, mis mõjub i -ndale osaelemendile (vt joonis 3-2).



Joonis 3-4 Osalise komposiitse tööga T-tala geomeetriselised parameetrid ristlõikes (a) ja pikilõikes (b) [25].

Maksimaalsed efektiivsed normaalpinged igas elemendis, mis tekivad sisejõududest ja momendist, saab leida järgneva valemiga:

$$\sigma_{i,eff,max} = \left[\mp \left(1 - \frac{EI_0}{EI_{eff}} \right) \frac{1}{A_i r} + \frac{E_i z_{i,max}}{EI_{eff}} \right] M \quad (\text{valem 3.15})$$

kus

$z_{i,max}$ on kaugus i-nda elemendi äärmiste kiududeni.

Maksimaalne nihkepinge avaldatakse valemiga:

$$\tau_{i,eff,max} = \frac{ES_{shear,i,max}}{EI_{eff} b_i} V \quad (\text{valem 3.16})$$

kus $ES_{shear,i}$ on i-nda elemendi staatiline moment.

Nihkeliitele mõjuva jõu saab lihtsasti kätte, korrutades nihkejõu nihkesidemete (efektiiv) sammuga (valem 3.15). Osaelementide vahelise nihke saab leida valemist 3.16.

$$F_{s,eff} = V_{s,eff} S = \left(1 - \frac{EI_0}{EI_{eff}} \right) \frac{S}{r} V \quad (\text{valem 3.17})$$

$$\Delta u = V_{s,eff} / K \quad (\text{valem 3.18})$$

[25]

4 Nihkeliide

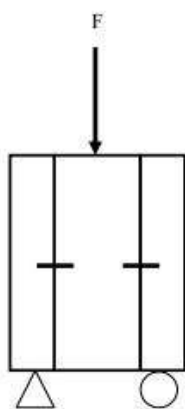
4.1 Üldiselt

Puit-betoon komposiitkonstruktsiooni kõige olulisemaks komponendiks on nihkeliide kahe materjali vahel. Ühendust nimetatakse nihkeliiteks, sest liide peab eelkõige võtma vastu nihkejõude, mis tekivad kahe kihil vahel. Lisaks jäikusele peab ühendus olema ka tugev. Nihkeliite purunemine võib kaasa tuua terve konstruktsiooni varingu, kuna üksikud kihid ei suuda eraldi koormusi vastu võtta. [2]

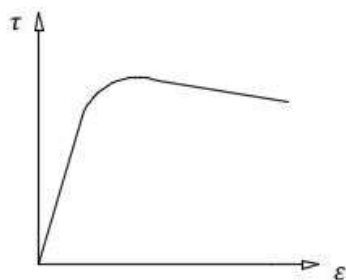
Puit-betoon komposiitkonstruktsiooni jäikus ja tugevus on otseses sõltuvuses nihkeliite jäikusest ja tugevusest. Nihkeliite väikest jäikust ja tugevust saab kompenseerida, suurendades liidete koguarvu, mis omakorda suurendab paigaldamise ajakulu. [2]

Lisaks liite jäikusele ja tugevusele on väga oluline liite purunemispilt ehk liite käitumine pärast maksimaalse koormuse saavutamist. Nii betooni purunemist survele kui ka puidu tõmbe- ja paindepurunemist võib lugeda rabedaks, seega on soovitatav projekteerida nihkeliide plastne. Plastset käitumist iseloomustab liite deformeerumine pärast maksimaalse koormuse saavutamist, mis ühtlasi hoiatab kasutajaid varinguohu eest.

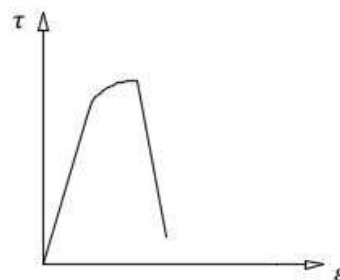
Tugevust, jäikust ja maksimum-koormuse järgset nihkeliite purunemispilti uuritakse sümmeetriliste või asümmeetriliste nihkeliite katsetega. Antud katseid nimetatakse tihti läbisurumise katseteks. Joonisel 4-1 on demonstreeritud sümmeetrilise läbisurumise katse põhimõtteid.



Joonis 4-1

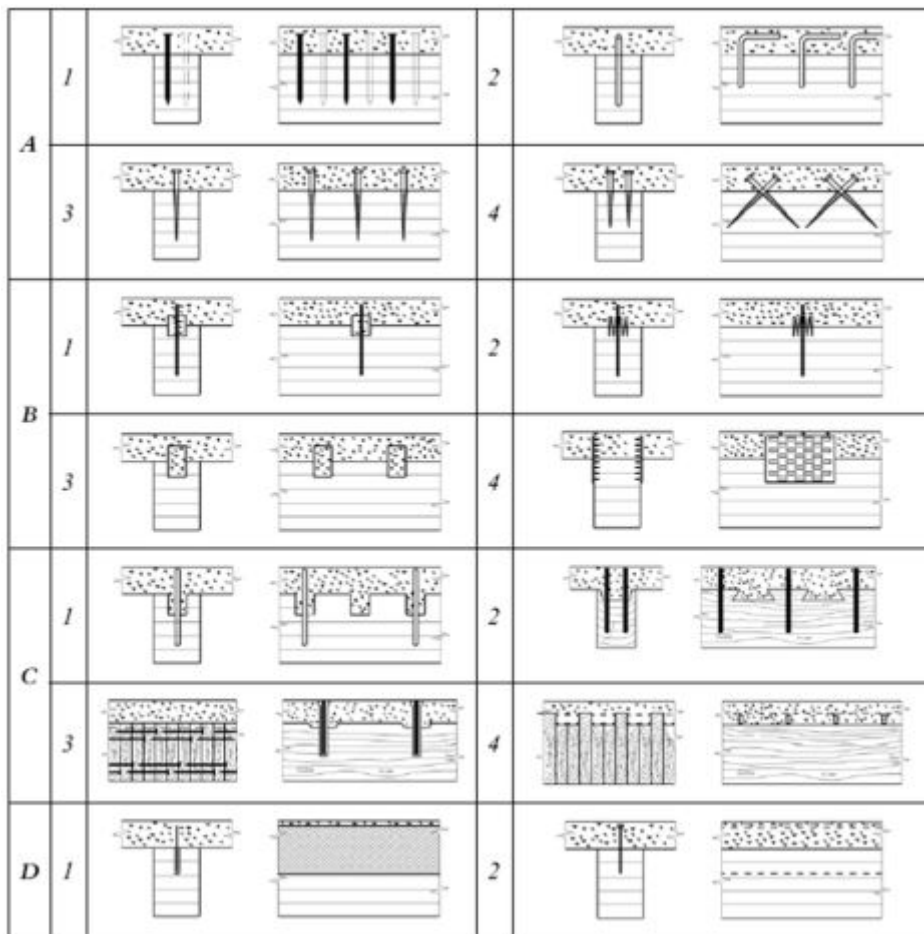


Joonis 4-2



Pärast katse läbiviimist saab hinnata nihkekõvera abil nihketugevust, jäikust ja purunemispilti. Nihketugevus on võrdne maksimumjõuga, mis katse käigus saavutati. Jäikuse hindamiseks arvutatakse nihkemoodul k . Parimat nihkeliite konstruktsioonilist käitumist iseloomustab jõu-deformatsiooni diagramm, mis on järsu esimese osaga (suur jäikus ja tugevus) ja millele järgneb enne lõplikku purunemist kerge langusega platoolik sirge. Joonisel 4-2 on vasakul näidatud soovituslik ja paremal mittesoovituslik jõu-nihke diagramm.

Joonisel 4-3 on esitatud enam levinud nihkeliite ühendused, mida puit-betoon konstruktsioonide puhul kasutatakse.

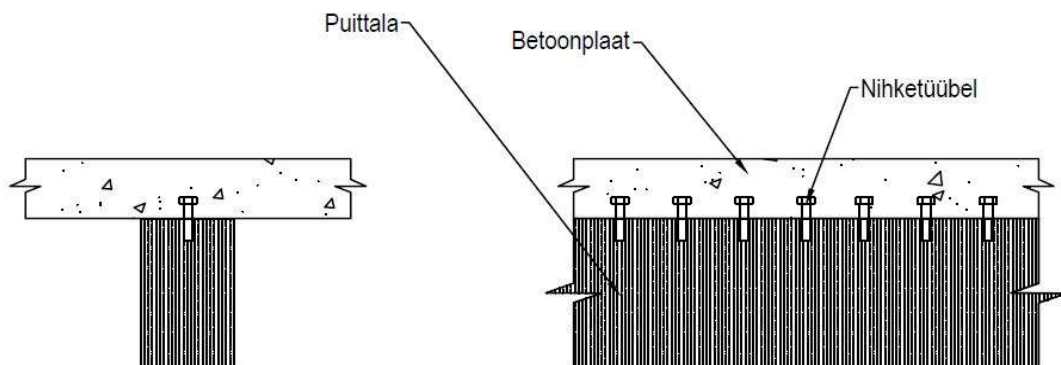


Joonis 4-3 Näited erinevate puit-betoon liitsüsteemidest: (a1) naelad; (a2) armatuurvardad; (a3/4) kruvid; (b1/2) erinevad hammas- ja rõngasühendused; (b3) terastorud; (b4) terasest stantsitud metallplaadid; (c1) puuritud aukudega puit, kus kinnitusvahendid on ülestõstmise vastu; (c2) ruudukujulised sisselõiked ja kinnitusvahendid; (c3) puidu sisselõige ja eelpingestatud teraslatid; (c4) naelutatud erimõdulised laudad ja metall plaadid, mis on süvendatud kõrgematesse laudadesse; (d1) puidu külge liimitud terasvõre; (d2) puidu külge liimitud terasplekk.

Erinevate süsteemide jäikusi võib eeldada varasemate katsete põhjal ja neid kasutada klassifitseerimisindeksina. Joonisel 4-3 toodud süsteemidest on kõige suurema deformatsiivsusega grupi A (naelad, kruvid ja tüüblid) liited ja kõige jäigemad grupi D liited. A, B ja C liiteid kasutavad süsteemid on pooljäigad, kus ristlõiked ei jää tasapindseks. Ainult D liidetega süsteemidel jäävad tasapinnad tasaseks. [7]

Puit-betoon komposiitkonstruktsioonidest on tehtud rohkelt uuringuid erinevate nihkeliidete kohta, kasutades standard-betooni koos liimpuidu või puittekiga. Mõned teadlased on uurinud võimalusi kasutada erinevaid betooniliike ja teisi puidupõhiseid ehitusmaterjale. [8]

Paljud praeguseks valminud ja veel kestvatest puit-betoon komposiitkonstruktsioonide uuringutest keskenduvad süsteemidele, kus "märj" betoon valatakse puittaladele, mille sisse on kinnitatud nihketüüblid. Näide "märjast" komposiitkatsekehast monteeritud nihketüüblitega on toodud joonisel 4-4.



Joonis 4-4

4.2 Töörelevantsete katsed

Käesolevas magistritöös katsetatavas kiudbetoonist tappliites ei ole kasutatud metallnaagleid ning kirjandusest selle kohta uuringuid ei leia. Seetõttu võrreldakse katsetulemusi erineva kujuga tappliidetega koos metallnaagliga, kuna need on tööpõhimõttelt uuritavale liitele kõige sarnasemad.

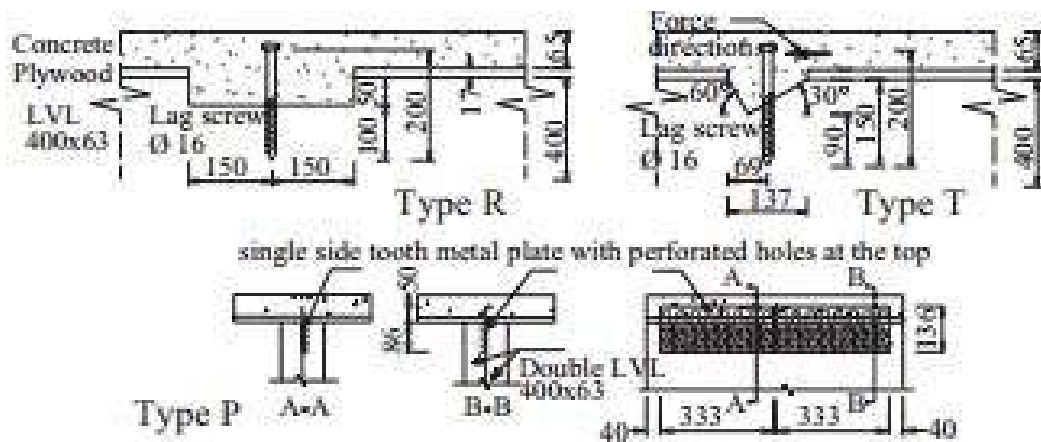
Puit-betoon komposiitkonstruktsiooni liidete katseid on tehtud alates 1943. aastast, mil uuriti erinevate metallist kinnitusvahendite ühendusi. Kolmnurksete metallpiikidega saavutati

väidetavalt täielik komposiitefekt (Richart ja Williams 1943), mille hiljem kummutas Pictus (1970). Pictus avastas, et kuigi lihtsalt mehaaniliselt kinnitatud metall-liitega pole võimalik täielikku komposiitefekti saavutada, on see võimalik metallnaaglite liimimisega puidu külge. Pillai ja Ramakrishnan (1977) tegid katseid 3 kuni 5 mm diameetriga naelliidetega ja leidsid, et 45° nurga all peaga lähima toe suunas kinnitatud naelad saavutasid suurema tugevuse ja väiksema nihke.

2011 aastal avaldati nihke katse uuring, kus testiti kolme tüüpi liiteid, et saada teada nende tugevused ja nihkemoodulid:

- 300(l) x 50(d) x 63 (w) mm risküliku kujuga tapp, mis oli tugevdatud 16 mm diameetriga puidupoldiga (vt. joonis 3-4 Type R);
- 30° ja 60° nurga all lõigatud kolmnurktapid, tugevdatult 16 mm diameetrise puidupoldiga (vt. joonis 3-4 Type T);
- kaks perforeeritud metallplaati mõõtudega 333(l) x 136(d) x 1(t) mm (vt. joonis 4-4 Type P).

l, d, w, t on vastavalt pikkus, sügavus, laius ja paksus.



Joonis 4-5 [26]

Igat liiki liitest valmistati üheksa katsekeha ja lisaks valmistati kolm katsekeha, kus kolmnurktapp oli suunatud vastupidiselt põikjõu suhtes (Type TT). Sümmeetrilisi liiteid katsetati vastavuses standardiga EN 26891 1000-kN Avery katsemasinaga. Kõik R, T ja TT tüüpi liited olid ühe liimpuitosaga, metallplaatidega liited olid aga kahe, mille vahel asusid plaadid.

Standardis EN 26891 on toodud arvutusmeetodi nihketugevusest nihkemoodulite leidmiseks 40% (eeldatav kasutuspiiriseisundi koormus), 60% (eeldatav kandepiiriseisundi koormus) ja

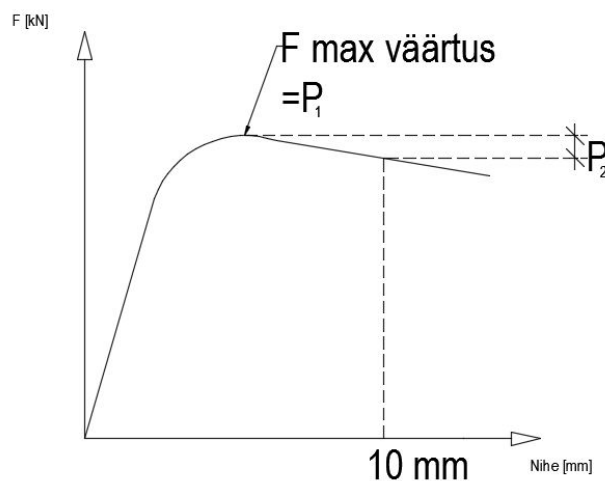
80% (murdepunkti lähedane koormus) nihketugevusest. Katsetulemustest saadud nihkejõu (F_{max}) ja nihkemooduli väärtused 40% ($K_{s,0,4}$), 60% ($K_{s,0,6}$) ja 80% ($K_{s,0,8}$) on esitatud tabelis 4-1. Ühtlasi on esitatud ka standardhälve (δ), variatsioonikoefitsient (COV) ja keskmine tugevus (R_k).

Ühenduse tüüp (P_2/P_1 %)	Suurused	Nihkemoodul			Nihketugevus F_{max} (kN)
		$K_{s,0,4}$ (kN/mm)	$K_{s,0,6}$ (kN/mm)	$K_{s,0,8}$ (kN/mm)	
Tüüp TT (1-LVL) (12,6%) plastiline	valim	107,2 - 113,5	65,3 - 89,0	44,9 - 53,7	69,2 - 77,0
	Keskmine	109,8	78,9	50,4	74,3 [61,7]
	δ (COV %)	3,3 (3,0)	12,3 (15,6)	4,8 (9,5)	4,4 (6,0)
Tüüp T (1-LVL) (49,7%) vähe plastiline	valim	128,2 - 176,7	121,7 - 168,3	94,3 - 140,4	79,0 - 89,2
	Keskmine	145,8	138,8	115,9	84,8 [70,4] {2}
	δ (COV %)	13,5 (9,3)	12,7 (9,1)	12,1 (10,4)	3,1 (3,7)
Tüüp R (1-LVL) (33,9%) üsna plastiline	valim	216,9 - 286,0	205,4 - 282,2	113,7 - 258,8	130,1 - 144,2
	Keskmine	247,2	241,4	194,2	138,9 [115,3] {1}
	δ (COV %)	27,4 (11,1)	28,0 (11,6)	51,2 (26,4)	5,2 (3,7)
Tüüp P (2-LVL) (80,7%) rabe	valim	249,3 - 589,5	239,3 - 510,6	182,3 - 362,6	129,3 - 145,4
	Keskmine	463,7	394,6	256,8	139,3 [115,6] {3}
	δ (COV %)	132,0 (28,5)	100,3 (25,4)	63,1 (24,5)	5,0 (3,6)

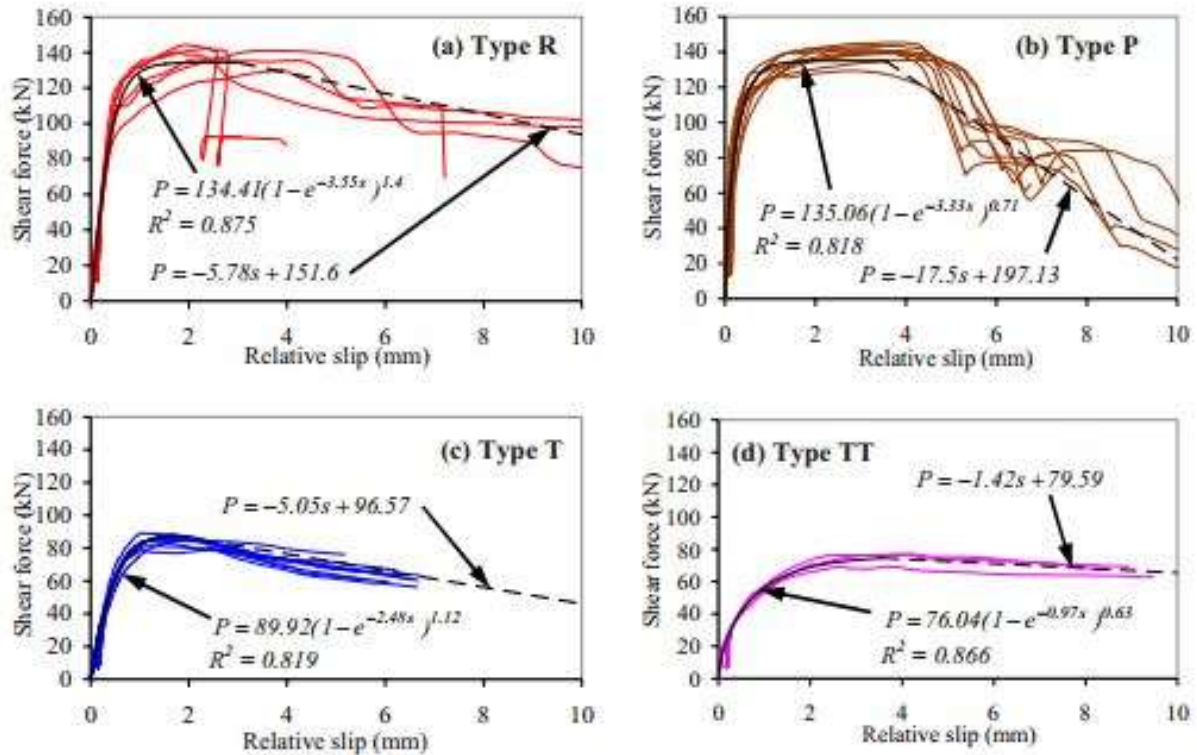
Märkused: {} kahe LVL tugevusklass; [] tugevust korrigeeritud 0,83

Tabel 4-1

P_2/P_1 suhe iseloomustab maksimumkoormuse saavutamise järgset käitumist, kus P_2 tähistab maksimumjõu ja 10 mm nihke juures oleva jõu vahet ning P_1 tähistab maksimumjõudu (vt. joonis 4-6). Mida väiksem on P_2/P_1 jagatis, seda plastsemalt liide käitub maksimumjõu saavutamise järgselt. Joonisel 4-7 on toodud erinevate nihkeliite tüüpide jõu-deformatsiooni diagrammid.



Joonis 4-6



Joonis 4-7 [26]

Nii risküliku kujuga tapp kui ka kolmnurktapp purunesid eelkõige betooni purunemise tagajärjel, samas kui perforeeritud metallplaadiga liide purunes metallplaadi purunemise tõttu. Puidupolt aitas eelkõige kaasa maksimumkoormuse järgselt, muutes liite plastsemaks.

Perforeeritud metallplaadi purunemisel saavutatud suur nihe tulenes hammaste libisemisest liimpuidus ja metallplaadi progresseeruvast purunemisest.

Ristküliktapp oli kõige jäigem ühendus, näidates ühtlasi tänu puidupoldile üpriski plastset käitumist. Kolmnurktapp oli vähem jäik ja plastne kui ristküliktapp. Kolmnurktapp, mida testiti vastupidises ehk nõrgemas suunas (tüüp TT), näitas väiksemat jäikust ja tugevust, aga plastuse kasvu. Kolmnurktapi maksimumkoormuse järgne pilt oli kõige stabiilsem, demonstreerides ühtlast jõu langust ja nihke kasvu.

Katsetulemuste võrdlemiseks tehti vajalikud parandused, mis tulenesid erineva liimpuitkihi paksusest. Kuna perforeeritud plaatliites oli kaks liimpuitelementi, kahekordistati tappliidete tugevus- ja nihkemooduli näitajaid, baseerudes varasematele ühe- ja kaheliitelistele katsetulemustele (Yeoh et al. 2009). Varasemalt tehtud katsetes, kus tapi mõõdud erinesid kahekordselt, leiti, et kaks korda suurema tapi tugevus on kahekordne, samas kui nihkemoodul $K_{s,0.4}$, $K_{s,0.6}$ ja $K_{s,0.8}$ suurenesid 2.71, 2.43 ja 1.93 korda (vt. tabel 4-2).

Tugevusi võrreldes oli kõige tugevam ristkülikuline tappliide ($115,3 \times 2 = 230,6$ kN), sellele järgnes kolmnurktappliide ($70,4 \times 2 = 140,8$ kN) ja kõige nõrgem oli metallplaatide liide (115,6 kN). Võrreldes $K_{s,0,4}$ nihkemooduli väärtusi, oli halvim kolmnurktappliide ($145,8 \times 2 = 291,6$ kN/mm), sellele järgnes plaatliide (463,7 kN/mm) ja parim oli ristküliktapp nihkeliide ($247,2 \times 2 = 494,4$ kN/mm). [26]

Ühenduse tüüp	F_{max} (kN)	$K_{s,0,4}$ (kN/mm)	$K_{s,0,6}$ (kN/mm)	$K_{s,0,8}$ (kN/mm)
Ristküliktapp 150 (l) x 50 (d) x 63 (w) mm + \varnothing 16 mm puidupolt	73,0	80,2	75,4	61,7
Ristküliktapp 150 (l) x 50 (d) x 126 (w) mm + \varnothing 16 mm puidupolt	128,2	217,9	183,1	119,1
Suhe suurem tapp/ väiksem tapp	1,76	2,72	2,43	1,93

Tabel 4-2

Uurimaks tapi mõju nihkeliitele, valmistati lisaks kaks nihkeliite katsekeha, kus oli vaid puidupolt ilma tapita. Neid katsekehi võrreldi järgnevate katsekehadega: 150 (l) x 50 (d) mm ristküliktapp ilma kruvita, sama tapp 12 mm ja 16 mm läbimõõduga puldipoltidega ja 300 (l) x 50 (d) mm ristküliktapp 16 mm diameetrise puidupoldiga. Tapita liide andis kõige kehvemad tugevuse ja jäikuse näitajad, samas kui 300 mm pikkusega ristküliktapp puidupoldiga nihkeliide oli kõige tugevam ja jäigem. 300-mm tappliide, milles oli puidupolt, oli 3 korda tugevam ja 8,5 korda jäigem kui ilma tapita puidupoldiga liide. Tappliide, kus puidupolt puudus, saavutas 80 % poldiga tappliite jäikusest, samas kui $K_{s,0,6}$ nihkemoodul oli 20% väiksem ja tugevus vähenes 40%. Puidupoldi diameetrist tulenevaid erisusi ei tähendatud. Tapi pikkuse muutusest tulenev tugevuse kasv oli lineaarne, samas kui jäikuse kasv muutus eksponentsiaalselt. Täpsemad nihkemooduli ja tugevuse näitajad on esitatud tabelis 4.3.

[26]

Ühenduse tüüp	Nihkemoodulid		Nihketugevus F_{max} (kN)
	$K_{s,0,4}$ (kN/mm)	$K_{s,0,6}$ (kN/mm)	
16 \varnothing puidupolt	29,0	6,3	46,4
150 mm pikk ristküliktapp	104,7	59,3	48,3
150 mm pikk ristküliktapp + 12 \varnothing puidupolt	88,9	74,5	66,0
150 mm pikk ristküliktapp + 16 \varnothing puidupolt	80,2	75,4	73,0
300 mm pikk ristküliktapp + 16 \varnothing puidupolt	247,2	214,4	138,9

Tabel 4-3

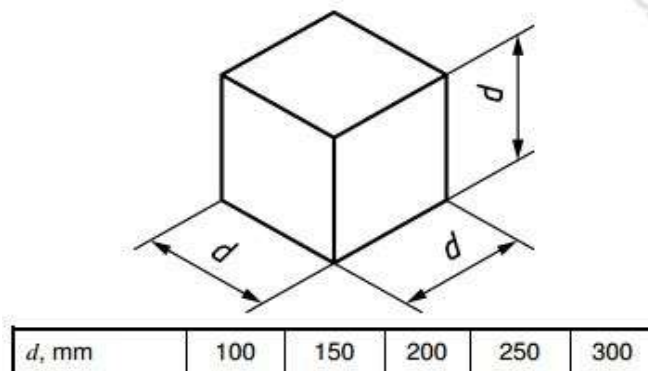
5 Katsematerjalid

Katsetatud komposiitkonstruktsioon koosneb mitmest materjalist (kiudbetoon ja liimpuit). Kuna komposiitkonstruktsiooni omadused on otseses sõltuvuses kasutatud materjalide omadustest, on antud uuringu käigus tehtud katseid määramaks materjalide kindlaid omadusi. Selle uuringu käigus määrati kasutatud betoonile survetugevus ja pikkusemuut. Liimpuidule määrati niiskussisaldus erinevate katsemeetodite abil.

5.1 Betoon

5.1.1 Betooni nõuded

EVS-EN 12390-1:2012 määrab survekatskehade kuju ja mõõtmed. Standardi kohaselt tuleb katsekeha nimimõõde d valida lähtuvalt betooni täitematerjali suuruselt. Võimalikud survekuubikute nimimõõdud on esitatud joonisel 5-1.



Joonis 5-1 [11]

Kalibreeritud vormid tuleb valmistada terasest või malmist (etalonmaterjalid). Teiste materjalide kasutamisel vormide valmistamiseks peab olema tõestatud, et kestval kasutamisel on vormid samaväärsed etalonmaterjalist vormidega. Ühtlasi peavad vormid olema veetihedad ja mitteimavad.

EVS-EN 12390-2:2009 seab tingimused tugevuskatse katsekehade valmistamiseks ja hoidmiseks. Standardi kohaselt betooni vormiga nakkumise vältimiseks tuleb vajaduse korral vormi sisepind katta enne täitmist õhukese mineraalõli või mõne teise mittereageeriva määrdetahvliga.

Täieliku tihendamise saavutamiseks tuleb vormid sõltuvalt betooni konsistentsist ja tihendusmeetodist täita kas ühe või rohkema kihina. Isetiheneva betooni puhul tuleb vorm

täita ühe operatsiooniga ja vormi täitmise ajal ning pärast vormi täitmist ei tohi rakendada mehaanilist tihendamist.

Katsekehad tuleb tihendada vähemalt kahes kihis, kusjuures ühegi kihi paksus ei tohi olla üle 100 mm.

Katsekehi hoitakse vormis löökide, vibratsiooni ja kuivamise eest kaitstult temperatuuril (20 ± 5) °C vähemalt 16 tundi, kuid mitte kauem kui kolm päeva. Pärast vormist vabastamist hoitakse katsekehi vahetult kuni katsetamiseni vees temperatuuril (20 ± 2) °C või kambris temperatuuril (20 ± 2) °C ja relatiivsel niiskusel $\geq 95\%$. [EVS-EN 12390-2:2009]

EVS-EN 12390-3:2009 on standard, mis määrab katsekehade survetugevuse määramise meetodid. Standardi kohaselt koormatakse katsekehi kuni nende purunemiseni standardi EN 12390-4 kohases survekatsemasinas. Registreeritakse suurim koormus, mida katsekeha vastu võtab, ja arvutatakse betooni survetugevus.

Puhastatud kontaktpindadega katsemasinasse paigutamise eelselt tuleb katsekeha pinnalt pühkida ära liigne vesi. Survekuubikuid surutakse risti valamise suunaga, tsentreerides katsekehad alumise plaadi suhtes täpsusega 1% kuubi valitud mõõtmetest.

Valitakse konstantne koormamiskiirus piirides $0,6\pm 0,2$ MPa/s ($\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$). Pärast algkoormuse rakendamist, mis ei ületa ligikaudu 30% purustavast koormusest, rakendatakse katsekehale koormust ilma tõuketa. Seejärel suurendatakse koormust pidevalt valitud konstantse kiirusega $\pm 10\%$, kuni suuremat koormust pole võimalik rakendada.

Katsekehade purunemispilt, mille puhul võib katse lugeda õnnestunuks, on esitatud kuupide puhul joonisel 5-2.

Survetugevus arvutatakse valemiga:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

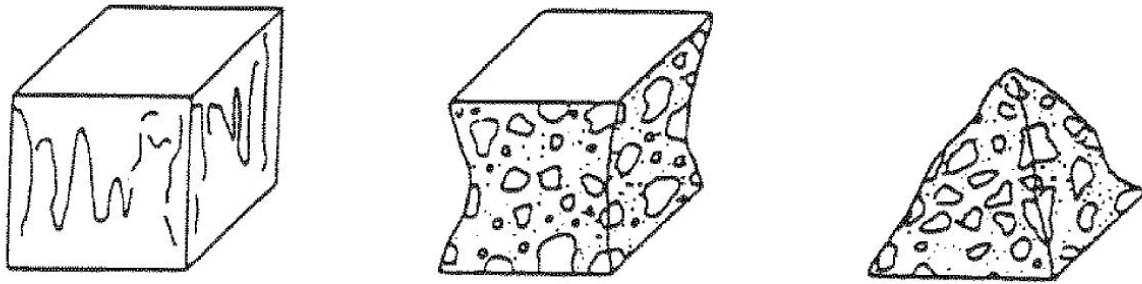
kus

f_c survetugevus megapaskalites (njuutonites ruutmillimeetri kohta)

F suurim koormus njuutonites

A_c katsekeha ristlõikepind, millele surve jõud mõjub, ruutmillimeetrites, arvutatakse katsekeha valitud mõõtme alusel (vt EN 12390-1).

Survetugevus tuleb esitada täpsusega 0,1 MPa (N/mm²). [EVS-EN 12390-3]



Joonis 5-2 [13]

5.1.2 Betooni katsed

Nihkeliite katsekehade valmistamiseks kasutati antud uuringus betooni, mis tellimisjärgselt pidi vastama tugevusklassile C30/37 ja sisaldama teraskiudu HE 75/50 70 kg/m³. Kõik nihkeliite katsekehad ja materjalide omaduste määramiseks valmistatud proovikehad võeti ühest segisti partiist, vähendamaks erisusi. Betooni iseloomustamiseks valmistati 36 survekatsekeha ja 6 mahumuutuste katsekeha. Kõik katsekehade vormid täideti kahes jaos, mille vahel koputati külgedele saavutamaks ühtlane täituvus.

Katsekehad valati ja hoiti esimesed 16 tundi laohoones, mille temperatuur kõikus 9.2 °C ja 11.9 °C vahel, olles keskmiselt 10.5 °C. Katsekehad kaeti kilega, et vältida vee väljakuivamist. Pärast 16 tundi transporditi kõik katsekehad hoolikalt ilma liigse raputamiseta niiskuskambrisse. Enne niiskuskambrisse paigutamist vabastati kõik proovikehad vormidest (18-28 tundi pärast betooni valamist). Järgnevad kuus päeva hoiti proovikehi niiskuskambris, mille temperatuur oli 20±2 °C ja suhteline õhuniiskus RH ≥ 95%.

Mahumuutuste katsekehade mõõdud olid 70 x 70 x 280 mm (kõrgus x laius x pikkus), tulenevalt ASTM C409-00a standardist. Vormidesse paigaldati tulevase proovikeha otstesse reeperid, mis kivinedes jäid betoonkeha külge ja mille abil fikseeriti katsekeha pikkus katsemasinas. Katsekehade valmistamise mõõdud, katseseadmed ja katsekehade hoiustamine olid koostöös Ehitusteaduskonna Ehitusmaterjalide Laboriga vastavuses ASTM C490 tingimustega. Katsekehad vabastati vormidest pärast 28 tunni möödumist betooni valamisest, misjärel võeti algnäit. Paralleelselt mahukatsekehade mõõtmete fikseerimisega mõõdeti etalonkatsekeha mõõtmete muutust (vt. joonis 5-4). Katsekehade pikkusemuut fikseeriti täpsusega 0,005mm.

Survekuubikute katsetamine tehti kooskõlas standarditega EVS-EN 12390-3 ja 12390-4. Survekuubikute mõõduks valiti teraskiust tulenevalt 150 x 150 x 150 mm, mis vastab standardi EVS-EN 12390-1 antud nimimõõdule. Survekatsekehad valmistati plastik- ja metallvormidesse.

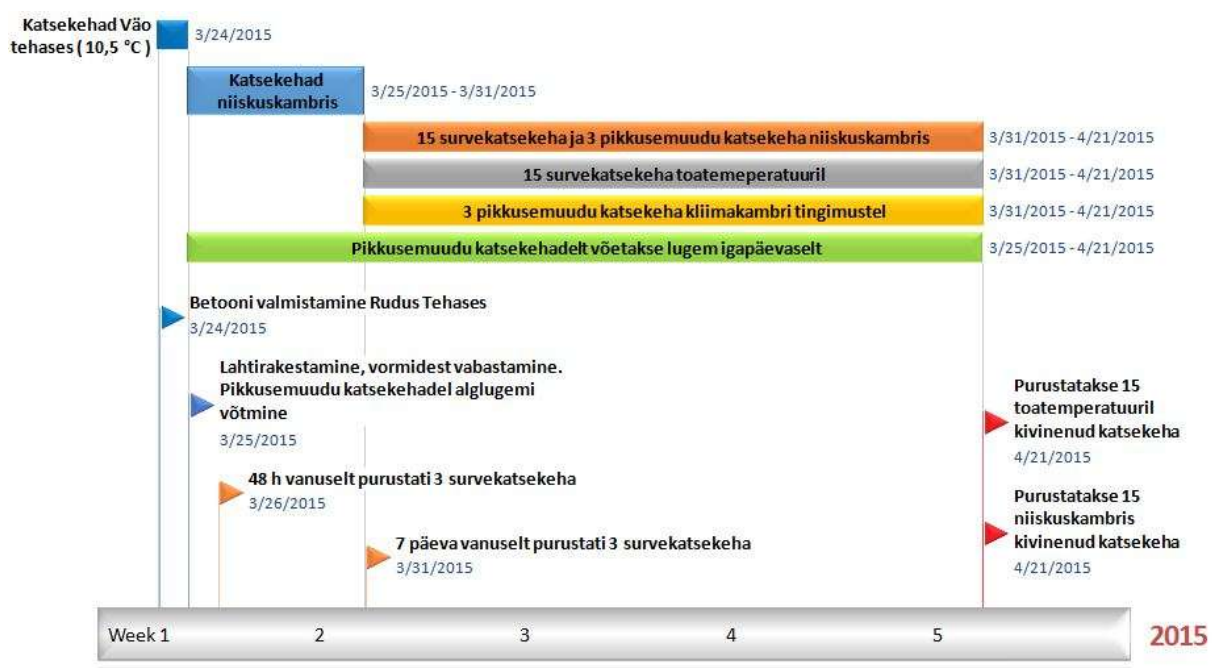
Survekuubikud suruti risti valamissuunale kiirusega 0,600 MPa/s masinaga Matest Servotronic. Masin kuulub esimesse täpsusklassi ja on täisautomaatne, koosnedes täisautomaatselt juhtpuldist ja pressist, mille maksimumvõimsus on 2000 kN.

Niiskuskambrit võetud katsekehi katsetati kaks tundi pärast niiskuskambrit eemaldamist, kui katsekehad olid pindkuivad, mis on vastavuses standardiga EVS-EN 12390. Kõigil katsekehadel oli sarnane purunemispilt, mis sarnanes joonisel 5-2 toodud teise purunemispildiga (vt. joonis 5-3).

Survekatsekehadest purustati kolm tükki 48 tunni vanuselt, kolm tükki 7 päeva vanuselt. 28 päeva vanuselt purustati 15 niiskuskambri hoitud ja 15 toatemperatuuril olnud katsekeha.

Betooni valamisest 7 päeva hiljem eemaldati pooled proovikehad (3 pikkusemuudu proovikeha ja 15 survekuubikut) niiskuskambrist. Niiskuskambrit eemaldatud proovikehi hoiti edasi toatemperatuuril katsetuste lõppemiseni.

Kiudbetooni omaduste määramiseks valmistatud proovikehasid ja nendega teostatud katseid tutvustab tabel 5-1.



Tabel 5-1

5.1.3 Survekatsete tulemused

Betooni survekatsekehaded kolm tükki purustati 48 tunni vanuselt, mis andis betooni keskmiseks survetugevuseks 19,7 MPa. Seitsme päeva vanuselt purustati järgmised kolm survekatsekeha, mis andsid betooni keskmiseks survetugevuseks 41,1 MPa.

Seitsme päeva vanuselt niiskuskambrist eemaldatud 15 katsekeha näitasid 28 päeva vanuselt keskmist survetugevust 56,3 MPa, samas kui niiskuskambris olnud katsekehade keskmine survetugevus tuli 51,9 MPa. Tabelis 5-2 on toodud kõik survekatsekehade katsetamisest saadud survetugevused.

Katsetulemuste põhjal võib öelda, et survekatsekehad vastasid standardis toodud eeldustele ja purunemispiltidele (vt joonis 5-3). Tugevuse erinevus võib tuleneda katsekehade niiskuserinevustest katsetamise hetkel. Kokkuvõttes võib järeldada, et katsekehade niisutamine pärast seitset päeva ei ole oluline, sest betoon saab suure algtugevuse esimese seitsme päeva jooksul ja sellest punktist edasi tugevuse kasvu tingimused enam väga palju ei mõjuta.



Joonis 5-3

Katsekehad/Aeg	48h	7p	28p nk*	28p t**
1	19,7	41,6	51,1	57,7
2	19,7	40,9	52,6	57,0
3	19,7	40,9	51,5	55,0
4			52,3	55,3
5			52,8	55,5
6			51,2	57,1
7			51,4	56,3
8			51,9	56,7
9			51,5	56,2
10			53,5	54,4
11			52,3	55,6
12			52,7	58,2
13			51,9	56,8
14			52,3	56,5
15			49,4	56,6
Keskmine [Mpa]	19,7	41,1	51,9	56,3
*nk - niiskuskambris hoitud katsekehad				
** t- toatemperatuuril hoitud katsekehad				

Tabel 5-2

5.1.4 Pikkusemuudu katsete tulemused

Paralleelselt mõõdetud niiskuskambris ja kliimakambris kivinevate betoonist katsekehade pikkusemuutused on näidatud tabelis 5-3.

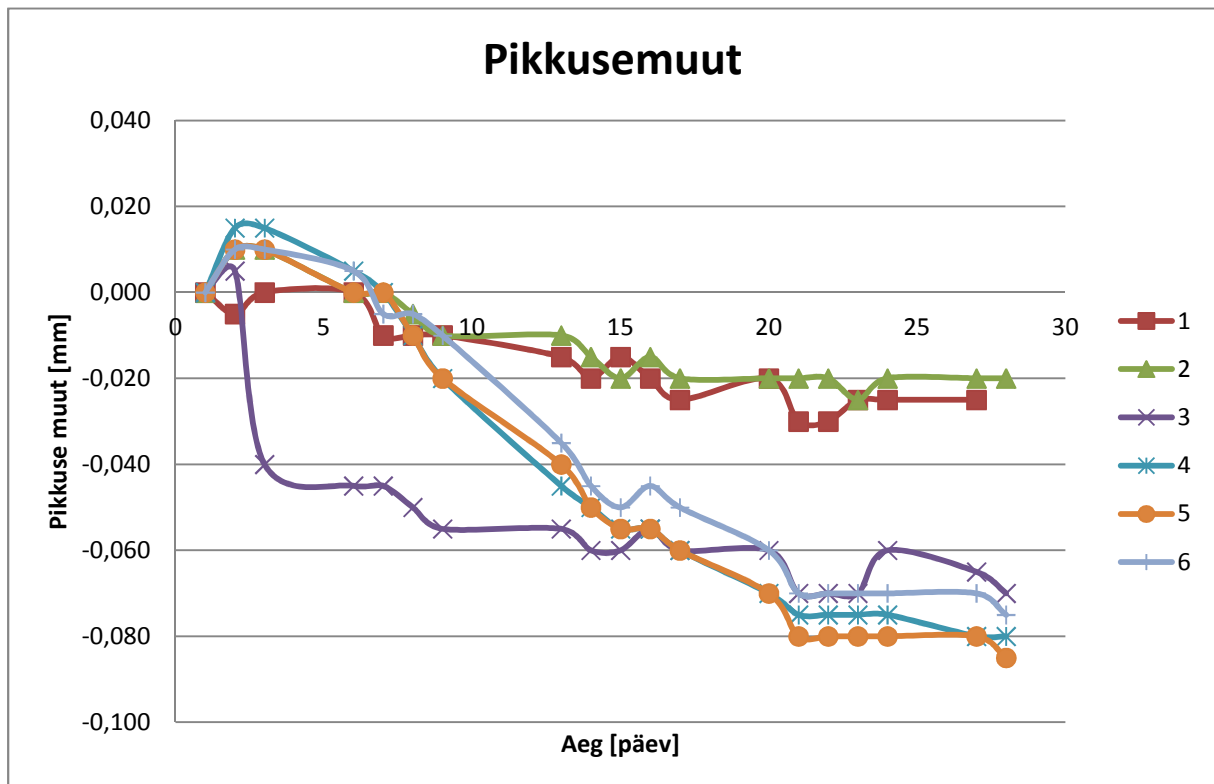
Katsekehade põhjal saab öelda, et valamise järgselt betoon paisub kivinemise algstaadiumis. Seitsme päeva vanuselt on betoon katsekehade kohaselt saavutanud algmõõdud, misjärel kahanemine jätkub kuni 15- 20 päevani, mil betoon saavutab enam-vähem lõpliku kuju.

Pikkusemuutuste mõõtmisest saab järeldada, et kuigi betooni standardijärgsel hoidmisel niiskuskambri tingimustes on katsekeha lühenemine väiksem, on üldine katsekehade mahumuutus nii väikene, et liite seisukohalt see olulist rolli ei oma.

Võrreldes saadud mõõtetulemusi teiste uuringutega kirjandusest [27], võib järeldada, et teraskiu suurem kogus betoonkatsekehades vähendab mahumuutusi. Mahumuutuste vähesus on oluline nihkeliite seisukohast seepärast, et tappliide oleks ühtlaselt tihe. Kui betoon kivinemise käigus alguses märgatavalt paisub, siis ta muljub tapi suuremaks. Paisumise järgselt betooni kahanedes jääb betoontapi ja puidu vahele õhukiht, mis koheselt mõjutab liite järeleandvust, võimaldades algnihet ja seeläbi läbivajumist konstruktsioonis.



Joonis 5-4



Tabel 5-3

5.2 Liimpuit

5.2.1 Nõuded puidu niiskuse määramiseks

Puidu niiskust saab määrata kahel viisil:

- purustav meetod - katsekehast lõigatakse puidukiht, mis kaalutakse ja kuivatatakse;
- mittepurustav meetod - elektrilise takistuse põhise niiskusemõõtjaga.

EVS-EN 13183-2:2002 on standard, mis määrab saepuidu niiskuse hindamise elektrilise takistuse meetodil. See meetod sobib puidu niiskusesisalduse mõõtmiseks vahemikus 7% kuni 30%. Katsetulemusi mõjutavad säilitusained, põlemisvastased ained, soojuslik või keemiline töötlus. Standard näeb ette elektrilise takistuse põhise niiskusemõõtja kasutamist, mis on varustatud isoleeritud elektroodidega, mõõteulatusena vähemalt 30% ja minimaalse täpsusega 1%. Niiskusemõõtja peab olema seadistatav või omama tabeleid, vastavalt puiduliigile ja temperatuurile.

Mõõtmised tuleb teostada kiusuunas, surudes elektroodid proovikeha ühest küljest sisse vähemalt 300 mm kaugusel proovikeha otstest või keskkoha, kui proovikeha on lühem kui 600 mm, sügavusele vähemalt 0,3 proovikeha paksusest. Mõõdistamise koht peab olema vaigust puhas ja ei tohi sisaldada puukoort, oksakohti ja vaigupesasid. [EVS-EN 13183-2:2002]

EVS-EN 13183-1:2002 on standard, mis käsitleb saepuidu niiskuse määramist ahjukuivatusmeetodil. Standardi kohaselt on vaja kaalu täpsusega 0,1 g, kui proovitüki kaal jääb tõenäoliselt suuremaks kui 100 g kuivatatud olekus, või kaalu täpsusega 0,01 g, kui proovitüki kaal jääb tõenäoliselt väiksemaks kui 100 g kuivatatud olekus. Lisaks on vaja seadeldist puidu kuivatamiseks, mis tagab sisemise õhuringluse ja on võimeline säilitama temperatuuri (103 ± 2) °C.

Katse läbiviimisel tuleb lõigata täisristlõikega proovikeha minimaalse mõõduga 20 mm kiusuunas, kohast, mis asub vähemalt 300 mm kummastki otsast või keskkohast, kui katsekeha on väiksem kui 600 mm. Proovikeha peab olema vaiguvaba ega tohi sisaldada puukoort, oksakohti ja vaigupesasid. Proovikeha tuleb kaaluda koheselt pärast lõikamist. Seejärel tuleb proovikeha kuivatada temperatuuril (103 ± 2) °C, kuni massierinevus kahel järjestikusel kaalumisel vahega 2 tundi on vähem kui 0,1 %.

Kui ei ole võimalik kaaluda proovikeha kohe pärast lõikamist, sulgeda proovikeha õhukindlasse anumasse, et vältida niiskuse muutust ja kaaluda 24 tunni jooksul. [EVS-EN 13183-1:2002]

Niiskussisaldus, ω , arvutatakse massiprotsendina, kasutades järgmist valemit:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

kus

m_1 on proovikeha mass enne kuivatamist, grammides;

m_0 on proovikeha mass kuivatamise järgselt, grammides;

ω on niiskussisaldus, protsentides.

Tulemus esitada täpsusega 0,1 protsendipunkti. [EVS-EN 13183-1:2002]

5.2.2 Liimpuidu katsed

Katsekehade valmistamiseks kasutati liimpuitu tugevusnäitajaga GL28h. Liimpuit valmistati harilikust kuusepuust. Liimpuidu mõõtmed olid järgnevad:

- kõrgus $h=200$ mm
- laius $b=120$ mm
- pikkus $l=500$ mm

Liimpuidust katsekehade mõõtude tolerants oli vastavuses tootmisele ettenähtud standardiga, varieerudes ± 2 mm. Antud uuringu käigus määrati katsekehade niiskus nii elektrilisel takistusel põhineva niiskusmõõtmisega kui ka ahjukuivatusmeetodil.

Puidu niiskussisaldust mõõdeti igapäevaselt alates kliimakambrisse tõstmisest, st 8 päeva pärast betooni valamist, kuni nihkeliite katsetusteni. Lugemid võeti kolmelt juhuslikult valitud katsekehalt, igalt katsekehalt kolmest küljest (kaks külge ja põhja alt). Lugem võeti võimalikult proovikehade keskelt, kus puudusid puidu iseärasused. Puidu niiskussisaldust mõõdeti Gann Hydrotest LG 3 niiskusmõõtmisega, kasutades 4 cm pikkuseid elektroode (vt joonis 5-5).



Joonis 5-5

Nihkeliite katsetamise järgselt lõigati katsekeha ristlõikest välja tükk, mis kaaluti kohapeal ja seejärel suleti vaakumkotti. Lõike kaugus tapist oli ~50mm ja katsekeha otsast ~100 mm ning klotside suurus oli keskmiselt 120x200x50 mm (laius x kõrgus x pikkus), varieerudes ± 2 mm. Proovikehadel esines nii kergeid vaigupesasid kui ka oksakohti. Kohapeal olnud kaalu täpsus oli 5 g. Proovikehade korduskaalumine toimus kolm päeva hiljem kaaluga GWB PG8001-S, mille täpsus oli 0,1 g, mille järgselt need kuivatati Venticell BMT kuivatuskapis temperatuuril 103 °C (vt joonis 5-6).



Joonis 5-6

5.2.3 Niiskusmõõtmiste tulemus

Elektrilisel takistusel põhineva niiskusmõõtjaga mõõdetud tulemused on esitatud tabelis 5-3. Niiskusmõõtja kohaselt oli katsekehade keskmine niiskus 28 päeva vanuselt 15,0% , 15,5% ja 15,8%.

Kuivatuskapimeetodil määratud katsekehade keskmine niiskus oli 13,3 % (11,89 - 14,95%).

Mõõtetulemustest järeldub, et puidu niiskuse mõõtmine mittepurustavate meetodite kohaselt on ebatäpne ja sobilik vaid suurusjärgu hindamiseks. Kuivatuskapimeetodil saadud tulemused vastasid standardis ettenähtud piiridele, võimaldades mahukaalu taandada 12% niiskusele. Selle tulemusena saadud tiheduse keskvärtus oli 468,2 kg/m³ (vt. tabel 5-4).

Katsekeha	9				1				7			
	külg	põhi	nr pool	Kesk.	külg	põhi	nr pool	Kesk.	külg	põhi	nr pool	Kesk.
8	13,9	19,2	12,5	15,2	14,1	17,6	15,2	15,6	15,7	18,1	14,8	16,2
9	12,6	18,4	13,1	14,7	14,3	16,9	15,0	15,4	16,2	17,4	14,8	16,1
13	13,4	17,4	13,8	14,9	14,9	16,5	15,4	15,6	15,4	16,4	15,1	15,6
14	15,1	17,9	13,7	15,6	14,7	16,7	15,1	15,5	15,1	16,4	15,7	15,7
15	13,7	17,7	14,3	15,2	15,4	16,7	15,7	15,9	15,1	16,3	15,5	15,6
16	13,7	17,5	13,9	15,0	14,9	16,3	15,2	15,5	15,1	16,4	15,2	15,6
17	13,8	17,6	14,0	15,1	14,9	16,8	15,5	15,7	15,0	16,3	15,5	15,6
20	13,8	16,9	14,3	15,0	15,1	15,7	15,2	15,3	14,9	16,1	15,4	15,5
21	14,2	16,9	14,8	15,3	15,0	16,0	15,4	15,5	15,6	16,2	15,5	15,8
22	13,4	17,0	14,2	14,9	15,1	15,7	15,1	15,3	15,3	16,5	15,6	15,8
23	14,2	16,8	14,3	15,1	15,2	15,9	15,4	15,5	16,2	16,0	15,6	15,9
24	14,0	17,1	14,4	15,2	15,6	15,9	15,4	15,6	16,0	16,3	15,9	16,1
27	14,0	17,1	14,5	15,2	15,5	15,8	15,6	15,6	16,2	15,9	15,7	15,9
28	13,8	16,8	14,5	15,0	15,2	15,6	15,6	15,5	15,5	15,9	15,9	15,8

Tabel 5-3

Katsekeha nr	Proovitüki iseloomustus	tihedus	niiskus	teisendatud tihedus u=12%
1	Väike oksakoht, keskmine aastaring	430,1	13,58	426,7
2	piki oks, ühtlane keskmine aastaring	449,5	12,11	449,3
3	Ühtlane keskmine aastaring	430,9	12,08	430,7
4	4 oksakohta, keskmine aastaring	450,6	12,36	449,8
5	Üks lamell läbi säsi, tihe rõngastik	531,4	14,95	523,6
6	Rohkelt oksakohti, tihe rõngastik	520,3	14,57	513,6
7	Ühtlane pind, keskmine aastaring	430,3	13,32	427,5
8	kaks keskmist oksa, tihe rõngastik	513,3	13,64	509,1
9	kaks lamelli läbi säsi, tihe rõngastik	547,4	14,06	541,8
10	Keskmine aastaring	437	11,89	437,2
11	Väga tihedad rõngad, üks läbi säsi	517,3	14,64	510,5
12	Ühtlaselt tihe	458,5	12,89	456,5
13	ühtlaselt hõre	396,9	11,93	397,0
14	Üks lamell läbi säsi, tihe rõngastik	519,6	14,14	514,0
15	Kaks lamelli läbi säsi, tihe rõngastik	514,9	14,6	508,2
16	ühtlaselt hõre	396,1	12,21	395,7

Tabel 5-4

6 Katsekeha ehitus ja katsetamine

6.1 Puit-betoon nihkeliide

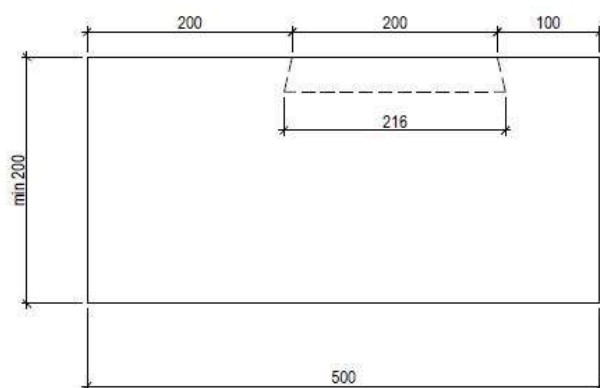
Liimpuittala teraskiudbetoonist plaadiga komposiitkonstruktsiooni katsekeha ehituse jaoks saadi materjalid Peetri Puit OÜ-lt ja RUDUS Betoon AS-lt.

Katsekehade valmistamisel kasutati liimpuittala tugevusklassiga GL28h mõõtmetega 120x200x500 mm (laius x kõrgus x pikkus). Nihkeliide oli puidu ülemisse lamelli freesitud kooniliste otstega trapetsikujulise ristlõike prisma kujuga, mis laienes sügavuses (vt. joonis 6-1 ja 6-2). Tapi mõõtmed liimpuidu pinnal olid 64 x 200 mm (laius x pikkus) ja liimpuidu sees tapi alumises tasapinnas 80 x 216 mm (laius x pikkus). Tapi sügavus oli 34 mm. Nihkeliide paiknes tala otste suhtes ebasümmeetriliselt, olles ühest äärest 100 mm, teisest äärest 200 mm kaugusel (vt. joonis 6-2). Katsekehad saadi Peetri Puit OÜ tehastest, misjärel need transporditi Tartusse lakkimiseks. Transpordi ajaks olid katsekehad pakkekilega kaetud. Katsekehadel lakiti korduvalt betoonipoolne külge, tapp ja otsa pinnad, vähendamaks betoonpiima imbumist puitu. Lakil lasti korralikult kuivada. Katsekehad transporditi pakkekiles Tallinna Tehnikakõrgkooli, kus toimus katsekehade ettevalmistus betoneerimiseks.

Puittalal kaeti kilega tapipoolne külge. Kile otsad ulatusid igast küljest üle nii palju, et oleks võimalik hiljem kile omavahel kinnitada. Seejärel kinnitati katsekeha külge raketis betooni valamiseks (vt. joonis 6-3). Kile sisse lõigati tapi suuruses auk.



Joonis 6-1

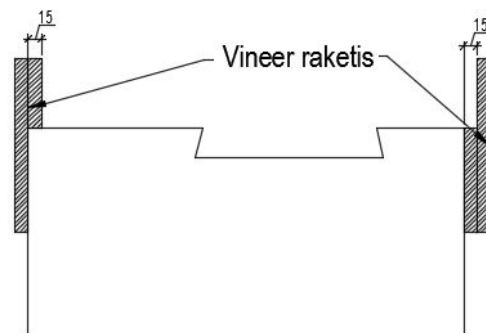


Joonis 6-2



Joonis 6-3

Raketise komponendid lõigati kahest niiskuskindlast vineertahvlist Peri Fly Maxi. Vineeriga tekitati ka "hammas" katsekehade eri otsesse, et saavutada erinev kontaktpind katsekehadel katsetamise ajal (vt. joonis 6-4). Vineertahvli lõikamised toimusid Tartu Tööstushariduskeskuses. Betooni üleulatus tekitati tapile lähemal asuvale otsale, tapist kaugemal asuval otsal ulatus puidupind betoonist kaugemale. Otste üleulatus erinevate materjalide vahel oli 15 mm.



Joonis 6-4

Betoon valmistati RUDUS Betooni Vão tehases 24.03.2015. Betoon oli tellimise järgselt tugevusklassiga C30/37 suurima fraktsiooniga 16, lisati teraskiudu HE 75/50 68.58 kg 1m³ betooni kohta. Betooni valmistamisel kasutati ühtlasi Sem Flow MC superplastifikaatorit 8.24 kg. Valmistatud betooni kogus oli 1m³, millest valmistati kõik nihkekatsekehad,

survekatskekehad ja mahumuutuste katskekehad. Betoon transporditi kopaga tehasekompleksi juurde kuuluva laohoone juurde, kus toimus vormide täitmine (vt. joonis 6-5).



Joonis 6-5

Tegemist oli isetasanduva põrandabetooniga, mistõttu eraldi vibreerimist ei toimunud. Vormid täideti kahes jaos, mille vahel koputati vormi külgedele saavutamaks ühtlane täitumus. Katskekehade vormide täitmine toimus normaalasendis, nagu oleks tegemist vahelaega, et tagada reaalelu tingimused tapi täituvuses. Betooni pealispind viimistleti metallist silutiga segu pinda vibreerivalt siludes. Katskekehad kaeti kilega, vähendamaks ohtu väljakuivamise eest ja tagamaks ühtlasem temperatuur. Katskekehad jäeti laohoonesse kivinema 16 tunniks, mille ajal keskmine mõõdetud õhutemperatuur laos oli 10,5°C.

16 tundi pärast raketiste betooniga täitmist transporditi katskekehad 10 km eemal asuvasse RUDUS Betooni Lagedi tehasesse. Katskekehad vabastati raketisest 18-27 tunni möödumisel. Nihkeliite katskehadele paigaldatud kile suleti teibiga Delta Multi Band niiskuskindlaks, lisaks kaeti kruviaugud ja põhi hermeetiliselt (vt joonis 6-6 ja 6-7). Katskekehad tõsteti seejärel niiskuskambrisse, mis vastab standardi EN 12390 reeglitele (20 ± 2 °C RH \geq 95%) (vt. joonis 6-8).



Joonis 6-6



Joonis 6-7



Joonis 6-8

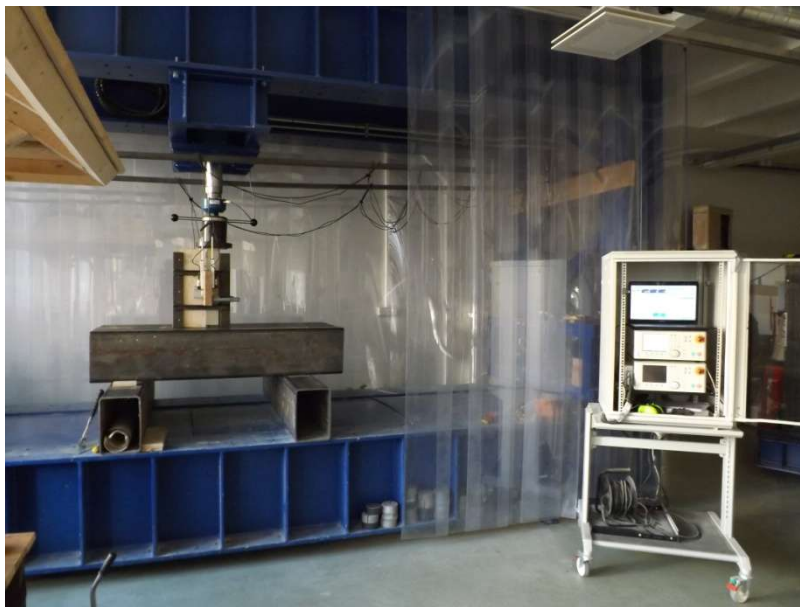
Seitsme päeva vanuselt võeti niikkeliite katsekehad niiskuskambrist välja ja transporditi TTÜ Mäepealse laboris asuvasse kliimakambrisse. Kohapeal lõigati kile liimpuidu ümbert ära ja tõsteti tagurpidi kliimakambrisse. Kliimakambris, mis on seadistatav temperatuuri vahemikus 0°C kuni +50°C ja suudab säilitada suhtelist õhuniiskust piirides 10% kuni 80%, määrati puidu tasakaaluniiskuse saavutamiseks vajalikud tingimused. Standardi EVS-EN26891:1991

kohaselt peab puit saavutama tasakaaluniiskuse 20°C RH=65% juures enne, kui tohib katsekehi katsetada.

6.2 Puit-betoon nihkeliite katse

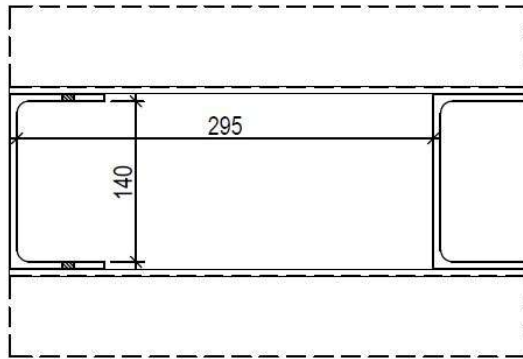
Nihkeliite katsed toimusid 22.04.2015 ja 23.04.2015 Tallina Tehnikakõrgkooli (edaspidi TTK) katselaboratooriumis. Kõiki proovikehi hoiti võimalikult kaua puidu konditsioneerimiseks ettenähtud tingimustel Tallinna Tehnikaülikooli (edaspidi TTÜ) kliimakambris ja transporditi TTK katselaborisse alles katsetamise päeval.

Katsetamine toimus TTK katselaboratooriumis asuvas jõuraamis. Jõuraam koosnes täisautomaatselt juhtpuldist ja jõupeast 1020 AF-125 KN-B (vt joonis 6-9). Jõupea oli täisautomaatselt seadistatav koormuse järgi ja ühtlasi mõõtis jõupea siiret. Siirde mõõtmiseks kasutati lisaks nelja automaatset siirdeandurit FWA-150-T. Jõupea täpsus oli 0,04% ja see suudab arvestada ekstsentrilisuse mõju. Jõupea on vähe deformeeruv, opereerimise temperatuur on -55 kuni +90 °C ja suudab temperatuuri mõju jõule arvestada vahemikus -10 kuni +45 °C. Siirdeandur on kasutatav temperatuuril -30 kuni +100 °C ja on täpsusega 0,01 mm.



Joonis 6-9

Katsekeha oli ehituselt asümmeetriline. Proovikehade toetamiseks katsetamise ajal valmistati katsekehade mõõde arvesse võttes spetsiaalne katseraam. Katseraam valmistati TTÜ laboris, see koosneb kahest U-profiilist ja neljast nurkrauast (vt jooni 6-10). Raami puuriti ka augud, millega see hilisemalt kinnitati katsekeha liimpuidu külge.



Joonis 6-10

Raam kinnitati katsetamise ajal liimpuidu külge nii, et tema alumine tasapind asus samal joonel liimpuiduga. Hõõrde vähendamiseks betooni ja metallraami vahel määrati metallraam parafiiniga kokku ning pihustati peale määrdeõli.

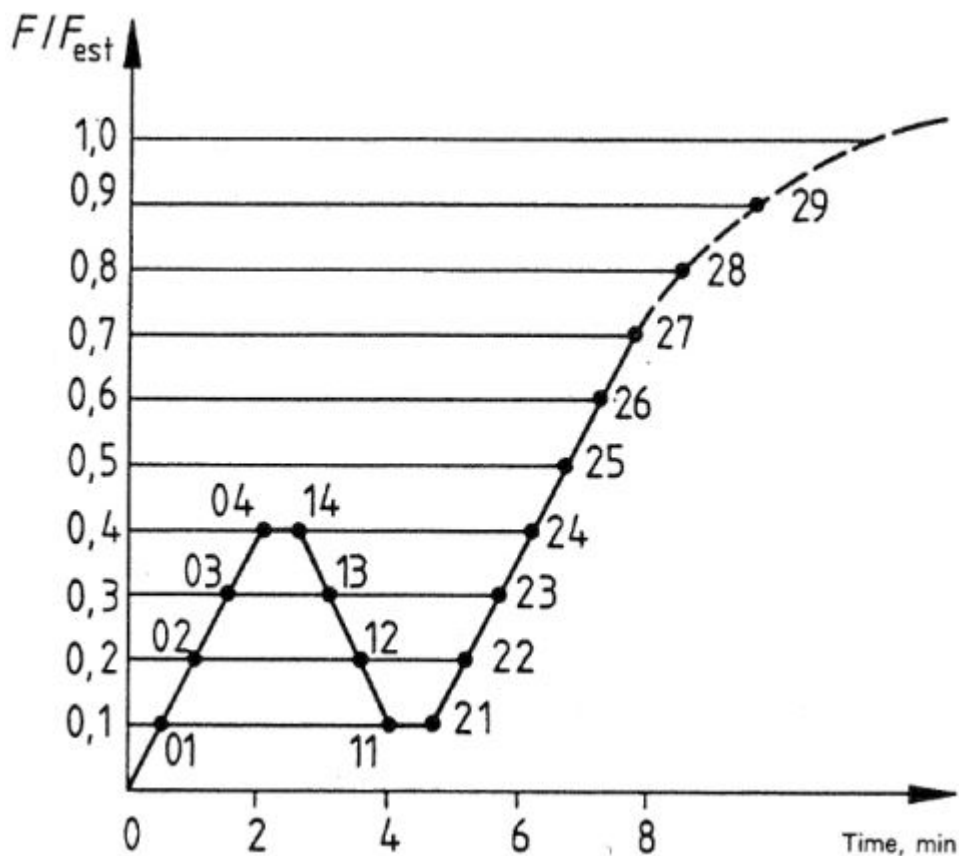
Puit-betoon nihkeliite katsekehad katsetati vastavuses standardiga EVS-EN 26891:1991 "PUITTARINDID. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused". Selles kehtestatakse põhialused mehaaniliste kinnitusdetailidega liidete tugevus- ja deformatsiooninäitajate (nihke) määramiseks ning see kehtib mehaaniliste kinnitusdetailidega liidete kohta, mida kasutatakse staatilise koormusega puittarindites.

Katsekehade liited peavad olema sellise realistliku kuju ja mõõtmetega, et vajalik info jõu ja liite deformatsioonide kohta konstruktsioonis oleks leitavad. Katsetatava liite maksimumkoormus, F_{est} , määratakse vastavalt kogemusele, arvutustele või eelnevate katsete põhjal. [18]

Katsekeha tõsteti raami ja tsentreeriti hoolikalt, et raami kesktelg ja katsekeha kesktelg oleksid samal joonel. Vajadusel õgvendati katsekeha liimpuidu alumisest äärest betoonist kaugemal asuvast küljest. Seejärel kinnitati raam liimpuidu külge nii, et nende alumised tasapinnad oleksid samal joonel. Katseraami külge kinnitatud mõõtkelladele kinnitati vasted nii betooni kui ka liimpuidu külge. Liimpuidu külge kruviti nurgikud mõõtkella tarbeks, betooni külge kinnitati puitklotsid pitskrivi kinnitusega. Mõõtkellade vastete puhul jälgiti, et need ei oleks millegi muu vastas peale materjali, mille külge need kinnitati. Katseraam tsentreeriti jõuraami jõupea all, jälgides ka jõupea ja proovikehade pindade paralleelsust. Vajadusel korrigeeriti jõupea tasapinda katsekehale vastavaks. Betooni survepind kaeti

metallplaadiga, vähendamaks kohalikku muljumist ja garanteerimaks ühtlasemat survet kogu pinnale.

Esimene katsekeha purustati F_{est} maksimumkoormuse kättesaamiseks. Survestamise kiiruseks määrati 0,016 mm/sekundis ja maksimumjõuks 50 kN. Katse lõppes maksimumjõu saavutamise. Korduskatsel, mis toimus sama survestamise kiirusega, seati ülempiiriks 100 kN. Katse lõppes betoontapi purunemisega jõul 57,6638 kN. F_{est} koormuseks määrati 60 kN, mille põhjal koostati EVS-EN 26891 survestamise skeem (vt. joonis 6-11).



Joonis 6-11

0,4 F_{est} määrati 24 kN, mille saavutamiseks pidi kuluma 2 minutit, mistõttu esimese osa kiiruseks arvutati 0,2 kN/sekundis. Koormuse jõudmisel 0,4 F_{est} hoiti ühtlast koormust 30 sekundit, misjärel koormust vähendati sama kiirusega, millega eelnevalt tõsteti. Kui koormusväärtus oli saavutanud 0,1 F_{est} ehk 6 kN, hoiti taaskord antud koormust 30 sekundit. Seejärel suruti katsekeha maksimumkoormuse saavutamiseni või 15 mm nihke tekkimiseni kiirusega 0,014mm/sek.

Teisel katsekehal testiti antud koormusskeemi ja ühtlasi jälgiti F_{max} väärtust, et vajadusel korrigeerida koormamisskeemi väärtusi. Jõuraam töötas vastavalt seadistusele, kuid kahjuks

ei toimunud jõupea andmete salvestamist. Maksimumjõud, mis katse läbiviimisel tähendati, oli 67 kN.

Järgnevad katsekehad pressiti juba toodud surveskeemi alusel, lisaks jälgiti ajakulu, mis kulus maksimumkoormus saavutamiseks. Kogu katsekäik pidi aega võtma 10 kuni 15 minutit.

Kuuenda katse eel muudeti koormusskeemi teise osa koormamise kiirust, tõstes seda 0,014 mm/sek juurest 0,016 mm/sek juurde.

Kui katsekeha oli saavutanud maksimumjõu või siirde, siis katse lõpetati. Katsekeha vabastati koormusest ja võeti katseraamist välja. Katsekehale märgiti liimpuidu peale mõõdud, kust tehti väljalõige niiskuse määramiseks vajaliku proovikeha jaoks. Proovikeha lõigati katsekeha otsast 100 mm kauguselt, tapist 50 mm kauguselt. Väljalõigatud proovikeha mõõdud fikseeriti nihikuga, mõõtes kolm külge, iga külge kolmest kohast. Seejärel proovikeha kaaluti kohapeal, misjärel see suleti kilekoti sisse.

Uurimise eesmärgil lõigati enamus katsekehi tapi tsentrist pooleks vesilõikuriga, misjärel oli võimalik betoontapp liimpuidust eraldada ilma alles jäänud sidemete purustamiseta.

7 Katsetamise analüüs

7.1 Probleemid konstruktsiooniga

Puit-betoon nihkeliite katsetamiseks ei ole ette nähtud eraldi standardit. Konstruktsiooni katsetamiseks mõeldud standardi puudumisest tulenevalt on tekkinud olukord, kus katsekehade valmistamise, hoiustamise ja katsetamisega seotud probleemid ei ole lahendatud, mistõttu tuleb kõigil katse läbiviimisel need iseseisvalt lahendada. Katsemeetod, mida enamasti liite katsetamiseks kasutatakse, on EVS-EN 26891:1991 "PUITTARINDID. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused".

Nihkeliite katsetamiseks on soovituslik kasutada üht kuni kaht liidet, et tulemuste analüüsimine ja ümber arvutamine rohkemate liidete jaoks oleks võimalikult lihtne. Katsekehad võivad olla nii sümmeetrilise kui ka asümmeetrilise kujuga ning nende valmistamisel tuleb jälgida, et testitav katsekeha sarnaneks praktikas kasutatavaga (nt betoontapp täita normaalsuunal ehk betoonplaat valada liimpuidu peale nagu põranda valamisel).

7.1.1 Katsekehade valmistamine ja hoiustamine

Puit-betoon komposiitkonstruktsiooni katsetamisel on suur väljakutse materjalidele nende standardijärgne hoidmine. Nii puidule kui ka betoonile on standardis määratud, mis tingimustel tuleb katsekehi hoida valmistamise ajal ja selle järgselt (vt. peatükk 5.1.1 ja 5.2.1).

Materjalide valmistamiseks esitatavad nõuded ja töö spetsiifika on erinevad, keskendudes kohati vastupidistele alustele. Kui puit ja liimpuit peavad olema kindla niiskusega ($65\pm 5\%$) ja keskendutakse puidu kuivana hoidmisele, siis betooni valmistamisel on vastupidiselt fookuses materjali niisutamine ($RH \geq 95\%$) ja oht väljakuivamise ees.

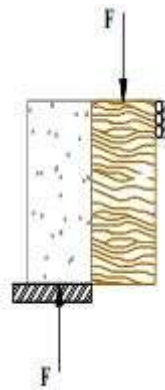
Puidu niiskumisel puidukiud punduvad ja katsekeha paisub, mis kuivamise ajal tõmbub jällegi kokku. Materjalide käitumine erinevas niiskuselukorras on äärmiselt erinev, mis mõjutab ühtlasi ka nihkeliidet. Seetõttu on probleemi käsitlemisel tulemuste objektiivsuse määramisel väga olulise tähtsusega.

Katsetulemuste analüüsi juures on oluline, et liites kasutatud materjalidel oleks võimalikult täpselt määratletud omadused (tugevus, niiskus, tihedus jne). Betoon peaks olema valmistatud

samast segupartiist. Puidu erinevate omaduste määramiseks tuleks võimalikult liite lähedalt lõigata proovikehad (niiskuse määramine nihkeliite katsekehast liite lähedalt).

7.1.2 Konstruktsiooni katsetamine

Ühekordse liite katsetamisel on tegemist üldjuhul asümmeetrilise katsega, kus survestatakse üht materjali ja toetatakse teist. Sellise katse ülesehituse puhul on tegu ekstsentrilise survega, mille tulemusel katsekeha pöörduv katsemasina all. Pöördumise tagajärjel ei kajasta mõõdetav suurus vaid liite nihketugevust, mistõttu tuleks pöördumist vältida. Asümmeetrilise katse ülesehitust iseloomustab joonis 7-1.



Joonis 7-1

Asümmeetrilise katse korral on vaja tekitada lisaks talle toele tugi ka surutava pinna kõrvale. Külgtugi võiks ideaalis olla tekitatud rullikutega, mis toetavad katsekeha, samas kui hõõre on minimaalne. Külgtoe asukoht peab olema seadistatav vastavalt katsekehale, et katsekehade koormamisel oleks üks materjalidest täpselt tsentreeritud jõupea alla. Samas ei tohi külgtugi koormamise korral katsekehast eemale nihkuda. Katsekehale külgtoe tekitamise võimalikkust tuleb iga katsemasina korral eraldi hinnata, arvestades nii masina ülesehitust kui ka katse läbiviimise kiirust ja objektiivsust.

7.2 Kasutatud lahendused

Katseandmete võrdlemiseks peab konstruktsiooni katsetus olema korratav. Puidu ja betooni liitmisel ja katsekehade valmistamisel on vajalik kõik eelpool nimetatud probleemid hoolikalt läbi mõelda ja lahendada. Katsekehade erisusi arvestamata võivad katsetulemused suurtes piirides varieeruda, mistõttu on oluline kasutatavad lahendused fikseerida ja nende toimivust hinnata.

7.2.1 Katsekehade valmistamine ja hoiustamine

Liimpuit ja sellesse freesitud tühimik valmistati tehasingimustes tootmisliinil, mis vastab liimpuidu valmistamisele seatud standardi nõuetele. Betoon valmistati samuti tehases, kus kvaliteedikontroll on põhjalik ja tagatud. Betooni valmistamise täpsus ja kõigi komponentide ühtlane hajuvus segumis on hilisemate tugevusnäitajate võrdlemisel olulise tähtsusega.

Nihkeliite katsetamiseks tuli valada betoon otse liimpuidule ja lasta sel kivineda betooni standardijärgsete nõuete alusel. Liimpuidu niiskumise vältimiseks on antud uuringus kasutatud puidulakki ja kilet. Kile eesmärk materjalide vahel oli lisaniiskustõke betooni kivinemise ajal ning betooni ja puidu omavahelise nakke vähendamine väljaspool tappliidet. Liimpuidu külge niiskuskindlast vineerist ehitatud raketisega tagati betooniosa pinnasiledus ja säilitati betooni kivinemise algaasis väljakuivamise oht läbi raketise.

Läbiviidud uuringus hoiti katsekehi esimesed seitse päeva betooni standardijärgsetes tingimustes, alates katsekehade erinevate materjalide ühendamisest (betooni valamise järgselt). Betooni valmistajatehase poolt nõutakse betooni kastmist esimese nädala jooksul, ühtlasi saavutab betoon antud perioodil ~70% kogutugevusest. Betooni lõpptugevust mõjutavadki enim kivinemise algperioodil olevad tingimused.

Betooni niiskuskambris on õhuniiskus $\geq 95\%$, mille tulemusel puit niiskub. Niiskuskambris hoidmise ajaks kaeti katsekehade liimpuit osa kilega. Kasutati tavalist 0,2 mm paksust PE-kilet, mis kinnitati Delta Multi Band kileteibiga (vt joonis 7-2).



Joonis 7-2

Niiskuskambri võttes oli mitmel katsekehal kile sisse kondenseerunud vesi, mis ulatus liimpuidu alumise lamelli poole kõrguseni. Ülejäänud liimpuidu osa ja eelkõige betooni vastas oleva lamelli puhul niiskumist ei tähendatud. Kiletamise lahendus töötas osaliselt, tõkestades liitelähedase tsoonis niiskumist, kuid kogu liimpuitu siiski niiskumise eest ei kaitsnud. Kiletamise lahenduse mureks on paigaldamine niiskuskambrisse, kus katsekehade libistamisel riiulil võib kile või teibitud ühendus saada kannatada. Ühtlasi ei ole leida tootjapoolseid andmeid kasutatud teibi sobivuse kohta antud niiskustingimustesse.

Niiskuskambri järgselt teisaldati katsekehad kliimakambrisse, kus teostati niiskumõõtmised elektrilisel takistusel põhinevate mõõteriistadega. Katsekehade pidev kaalumise määramaks kaalu erinevusi vajab vastavalt katsekehadele väga eriliste parameetritega kaalu, mistõttu ei pruugi antud meetod kõige otstarbekam olla. Kliimakambri tuleks katsekehi hoida puidu tasakaalu niiskuse saavutamiseni, kuid antud uuringu käigus otsustati liite katsed teha betooni valmistamisest 28 päeva möödumisel, vastavalt betooni standardi järgsetele nõuetele. Ühtlasi on puitmaterjalile antud ümberarvutamiseks koefitsiendid, mis on otseses sõltuvuses puidu niiskusest. Seepärast ei ole otstarbekas lähtuda vaid puidu tasakaalu niiskuse saavutamisest. Lisaks ei pruugi erinevates katsekehades oleva puidu tasakaaluniiskus olla täpselt sama, mistõttu on otstarbekas jälgida vaid seda, et puidu niiskus oleks standardis antud niiskuvahemikus, et suuruste teisendamine 12%-lisele niiskuse sisaldusele oleks võimalik.

Kokkuvõttes tagas kiletamine koos tapi lakkimisega puidu niiskumise nihkeliites. Samas niiskus osadel katsekehadel alumine lamell, mis võis mõjutada kogu liimpuitristlõikele määratud niiskussisaldust. Oluline on katsekehad paigaldada niiskuskambrisse normaalasendis, kus betoonipind on pealpool (vt joonis 6-8). Paigaldamise asend on oluline seepärast, et kui niiskus kile sisse pääseb ja seal veeldub, ei mõjuta see nihkeliite tsooni.

Katsete läbiviimine tuleks võimalusel teostada betooni vanusest lähtuvalt, sest puidul on antud ümberarvutamise tegurid vastavalt niiskusesisaldusele, kui puidu niiskus on standardi järgses vahemikus. Puidu niiskuse määramiseks katsetamise eelselt on elektrilisel takistusel põhinev mõõteriist piisavalt täpne, mistõttu võib katsekehade kaalumise ära jätta.

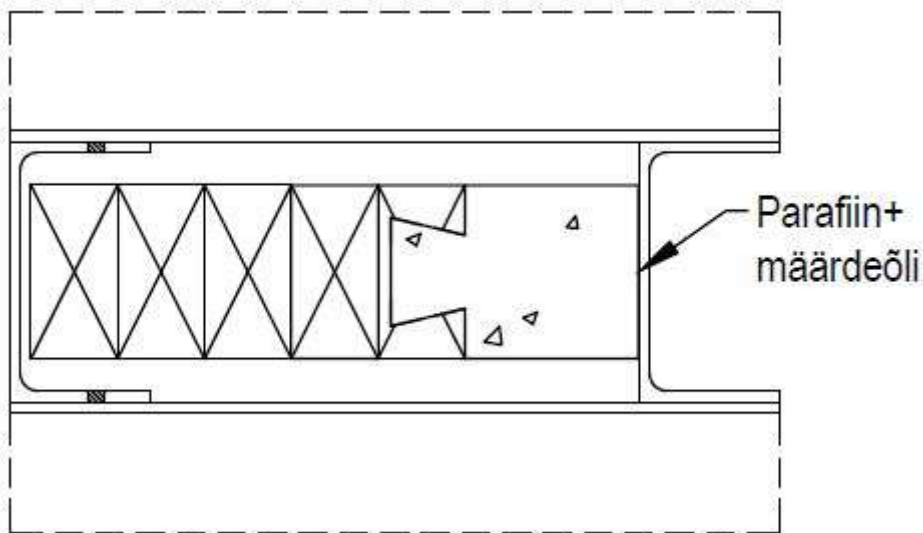
7.2.2 Konstruktsiooni katsetamine

Asümmeetrilise nihkekatse teostamisel on probleemiks katsekeha külgtõu tekitamine. Selle töö käigus tehtud nihkeliite uuringute teostamiseks valmistati spetsiaalne raam, mis pakkus külgtõu katsekehale. Metallraami kasutamise vajadus tulenes katsemasina iseärasustest, mis ei võimaldanud muud moodi külgtõu pakkuda. Katseraami ja katsekeha betoonpinna hõõrde

vähendamiseks külgtõe piirkonnas määrati raam parafiini ja määrdeõliga. Katsekeha paiknemist katseraami vahel iseloomustab joonis 7-3.

Raam täitis ettenähtud funktsiooni ja võimaldas asümmeetrilist katset teostada, ilma et katsekeha oleks katsemasinas tugevalt pöördunud. Hõõrde vähendamiseks kasutatud vahendid vähendasid materjalide vahelist hõõret, kuid täielikult seda ei likvideerinud. Katseraami kasutamine lihtsustas oluliselt mõõteandurite kinnitamist, mis omakorda kiirendas oluliselt töö efektiivsust. Katsekehade suhtes fikseeritud kõrgusel asuvad mõõteandurid tagavad parema deformatsioonide võrdluse kui igakordselt mõõteandurite paigaldamisel. Edasistel katsetel oleks parimaks lahendiks katseraami täiustamine rullikutega külgtõe lähedases piirkonnas.

Katse läbiviimisel lähtuti standardis EVS-EN 26891 määratud tingimustest. Standardi kohaselt võib katse lõpetada, kui saavutatakse maksimumkoormuse väärtus või kui nihe on 15 mm. Katsetustel kasutatud tehnika luges automaatselt nii jõupea siiret kui ka materjalide siirdeid. Kahjuks sai seadistada vaid jõupea siirdest lähtuvalt, mistõttu katse lõpu määras **jõupea 15 mm siire**, mitte materjalide omavahelise siirde suurus.

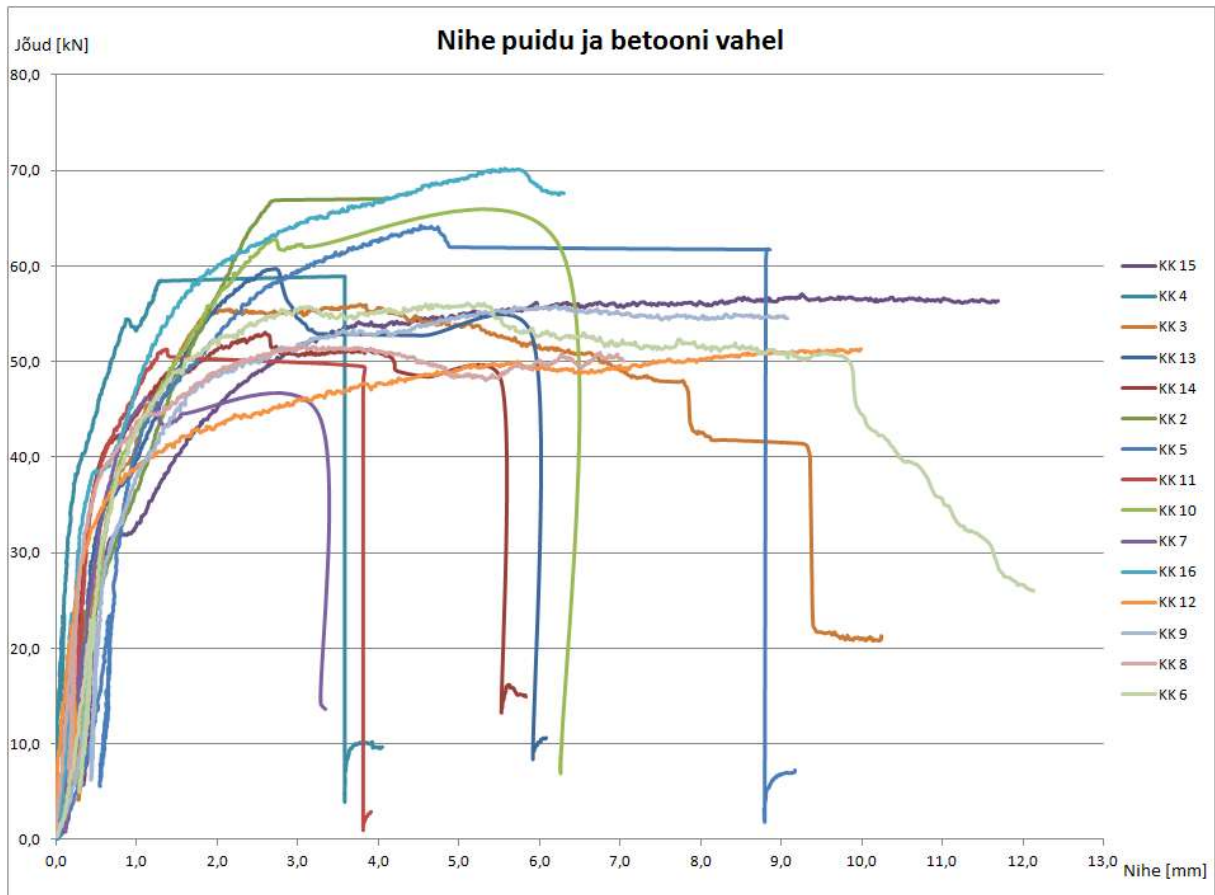


Joonis 7-3

8 Katsetulemused ja analüüs

8.1 Purunemispildid ja leitud suurused

Katsetamise käigus mõõdetud jõu-deformatsiooni diagrammid on esitatud joonisel 8-1.

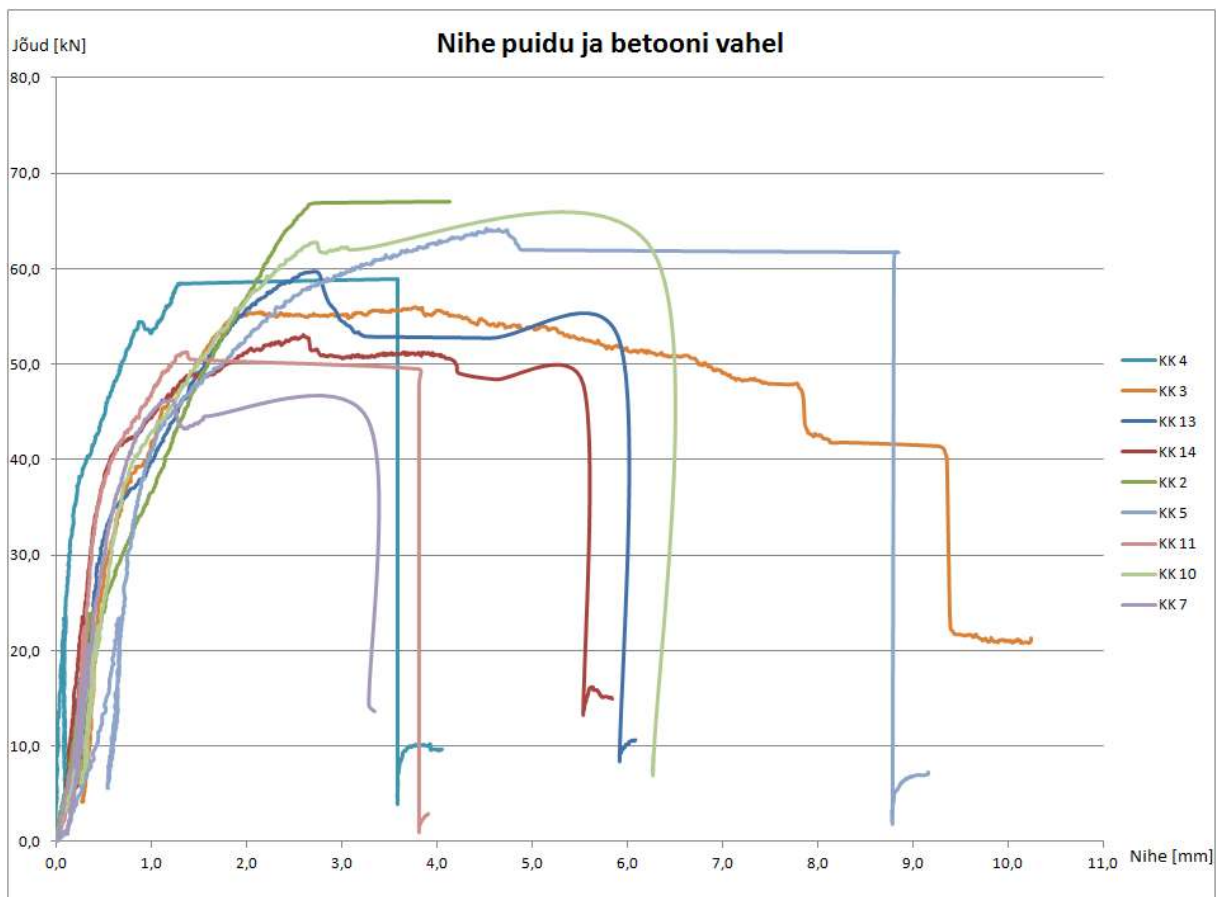


Joonis 8-1

Katse lõpu määras kaks juhtumit:

1. Betoontapi rabe purunemine, misjärel võis tähendada jõu märgatavat langust.
2. Jõupea saavutas siirde 15 mm (liide käitus plastselt).

Esimesel juhul võib graafikutelt (vt. joonis 8-2) näha, et alguses on suur jõu kasv väikese deformatsiooni arenguga. Sellele järgnevas alas hakkab tekkima nihkeliite tasapinnas deformatsioon. Deformatsiooni eeldatav põhjus on betooni pragunemine nihkeliite tasapinnas tapi ja plaadi vahelises alas. Pragunemisega hakkab lõikes tööle teraskiud, mis hoiab betoontappi ülejäänud plaadi küljes. Kõigi katsekehade graafiku viimases osas on täheldada järsku koormuse langust, mis tähistabki betoontapi lõplikku purunemist nihketasapinnas.



Joonis 8-2

Katsejärgselt puruks lõigatud proovikehadelt on näha, kuidas betoontapp on nihketasapinnas tapi ülemises tsoonis betoonplaadi kinnituse juures läbinisti pragunenud (vt. joonis 8-4). Tapp on ülejäänud konstruktsiooni küljes kinni metallkiududega, kuid suuri jõude liide enam vastu võtta ei suuda. Liimpuit antud nihkeliites on vähesel määral deformeerunud vaid tapi ülemisest teravast tipust (vt. joonis 8-3).

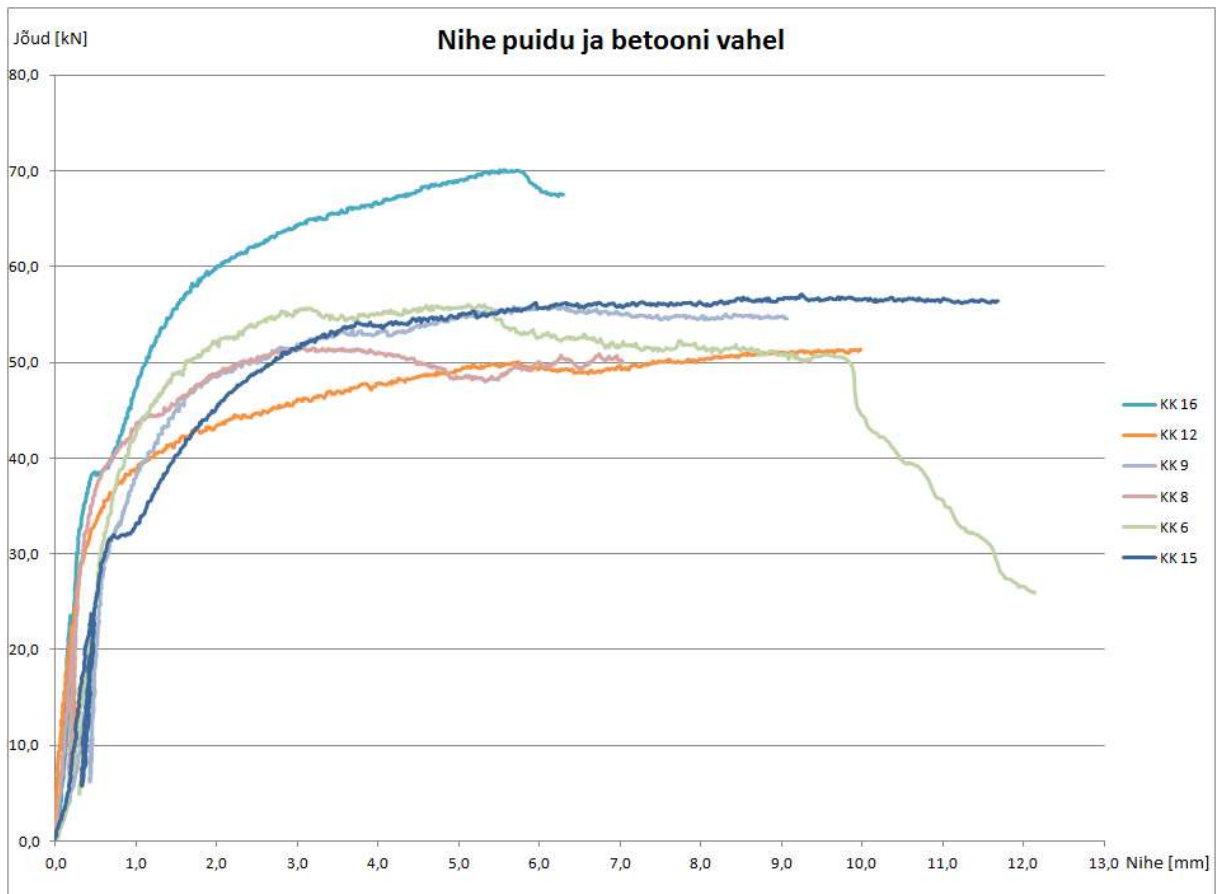


Joonis 8-3



Joonis 8-4

Kui katse lõppes sellega, et jõupea saavutas siirde 15 mm, on jõu-deformatsioonigraafikud eelnevast betoontapi purunemise graafikutest erinevad (vt. joonis 8-5). Graafiku algus sarnanes eelneva graafikuga, kuid edasine kuju on teistsugune. Graafiku järsule algusele järgneb rahulikum koormuse kasv ning graafik lõpeb platooliku sirgega, mis iseloomustab liite plastset käitumist - koormuse väärtus on suurtele deformatsioonidele vaatamata maksimaalse lähedal.



Joonis 8-5

Katsetamise järgselt proovikehi analüüsidest näeb, et betoontapp on nihketasapinnas vähesel määral pragunenud (vt. joonis 8-7), kuid puit nihkeliite järgses tsoonis tugevalt muljutud. Esineb ka plokkpurunemise märke (vt joonis 8-6). Katse toetingimustest lähtuvalt, kus kogu puidupind oli raudplaadile toetatud, ei saanud katsekehad plokkpuruneda, mistõttu ei saa täieliku veendumusega väita, kas plokkpurunemisele iseloomulikud praod oleksid ka reaalse plokkpurunemise kaasa toonud või mitte.



Joonis 8-6



Joonis 8-7

Kokkuvõtvalt näeb purunemisgraafikult betoonnikeliitele iseloomulikku suurt jäikust liite töö esimeses faasis, millele järgneb plastne faas. Katsekehade purunemispildid on kahes äärmuses, kus ühel juhul liide käitus rabedalt ja teisel juhul plastselt.

8.2 Tiheduse mõju katsetulemustele

Kõigilt katsekehadelt lõigati tapi lähedasest tsoonist proovitükk, mille alusel määrati liimpuidu niiskussisaldus ja tihedus. Tiheduste võrdlemiseks taandati kõik saadud väärtused 12%-lise niiskuse peale.

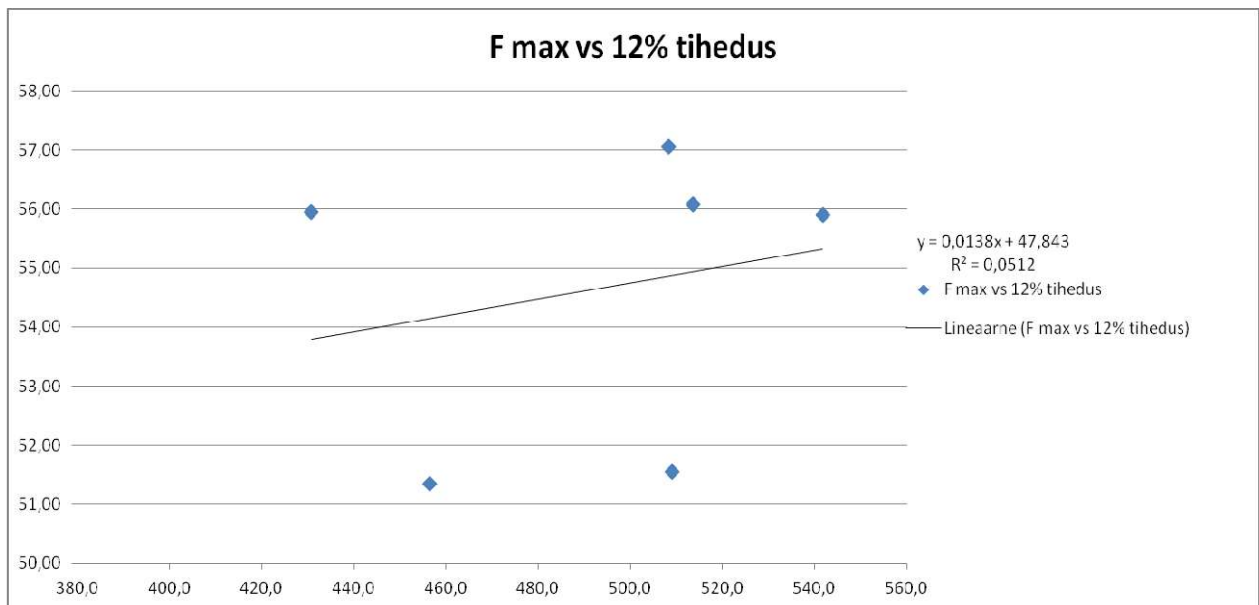
Proovikehade põhjal määratud puidutiheduse erinevus on väga suur. Tiheduse mõõtmine sõltub puitmaterjali iseärasustest, mida tuleks arvestada algsel katsekehade valmistamisel ja puidu sorteerimisel.

Uurides tiheduse mõju tugevuse väärtusele võib näha, et katsetulemuste põhjal on korrelatsioonkordaja joon kerge tõusuga (vt. joonis 8-8). Joone tõus on väga väikene, seega võib seda lugeda enam-vähem horisontaalseks. Järelduste tegemisel tuleb arvestada, et katsekehade arv on väike ja üksiktulemus mõjutab väga suurel määral graafikut. Lisaks sellele võis tiheduse korrelatsiooni hindamist mõjutada asjaolu, et tihedus määrati kogu liimpuidu ristlõike alusel, samas nihkeliites töötas vaid liimpuidu pealmine lamell. Vaatamata sellele on tulemus loogiline, st liite kandevõime kasvab tiheduse suurenedes.

Uurides lähemalt nihkeliites töötavat liimpuidu kihti, saab lugeda kokku vastavas tsoonis olevad aastaringid. 3 cm ulatuses olnud aastaringid ja taandatud väärtus 1 cm kohta on esitatud tabelis 8-1. Katsekehad, milles purunes betoontapp, olid tihedamate aastaringidega kui need, kus tekkis puidu muljumine. Mõningal määral esines puidu muljumist ka katsekehadel, kus oli rohkem aastaringe ja seega tihedam puit liitetsoonis. Samamoodi oli

vähemate aastaringidega lamelle betooni purunemisega lõppenud katsekehadel. Betooni purunemisega lõppenud katsekehadel oli keskmiselt ühe cm ulatuses 4,3 aastaringi, samas kui jõupeatusega lõppenud katsekehadel oli vastav suurus 3,4.

Kokkuvõttes võib täheldada mõningast seaduspära puidu tiheduse ja katsekeha nihkeliite tugevuse vahel, kuid seda eelkõige vaatlustulemuste põhjal. Seoses tiheduse määramisega kogu ristlõikest ei saa numbriliselt korrelatsiooni näidata. Katsekehade piiratud tingituna on kindlasti vajalikud täpsemad mõõtmised ja seose laialdasem uurimine.



Joonis 8-8

Katsekeha nr	Aastaringid		Purunemine	nihe materjalide vahel
	3 cm ulatuses	1 cm ulatuses		
1	14	5	betooni purunemine	3,47
2	15	5	betooni purunemine	7,43
3	13	4	betooni purunemine	10,24
4	13	4	betooni purunemine	4,06
5	16	5	betooni purunemine	9,17
7	12	4	betooni purunemine	3,35
10	12	4	betooni purunemine	6,28
11	13	4	betooni purunemine	3,91
13	7	2	betooni purunemine	6,08
14	13	4	betooni purunemine	5,84
6	12	4	jõupea siire	12,21
8	10	3	jõupea siire	7,12
9	14	5	jõupea siire	9,29
12	6	2	jõupea siire	9,99
15	11	4	jõupea siire	11,87
16	9	3	jõupea siire	6,30

Tabel 8-1

8.3 Katsetulemused ja nende usaldusväärsus

Katse käigus mõõdeti nihkeliite poolt vastu võetava koormuse suurust ja nihet erinevate materjalide vahel. Katsetatud tappliite poolt vastu võetava koormuse maksimumväärtus varieerus vahemikus 46,218 kuni 70,157 kN. Katsetulemuste põhjal arvatud aritmeetiline keskmine väärtus (μ) oli 57,4 kN ning mediaanväärtus 56,6 kN.

Võrreldes mediaanväärtust ja arvatud keskväärtust on tulemused lähestikku, mistõttu võib järeldada, et katsetulemustest saadud valim on ühtlaselt jaotunud.

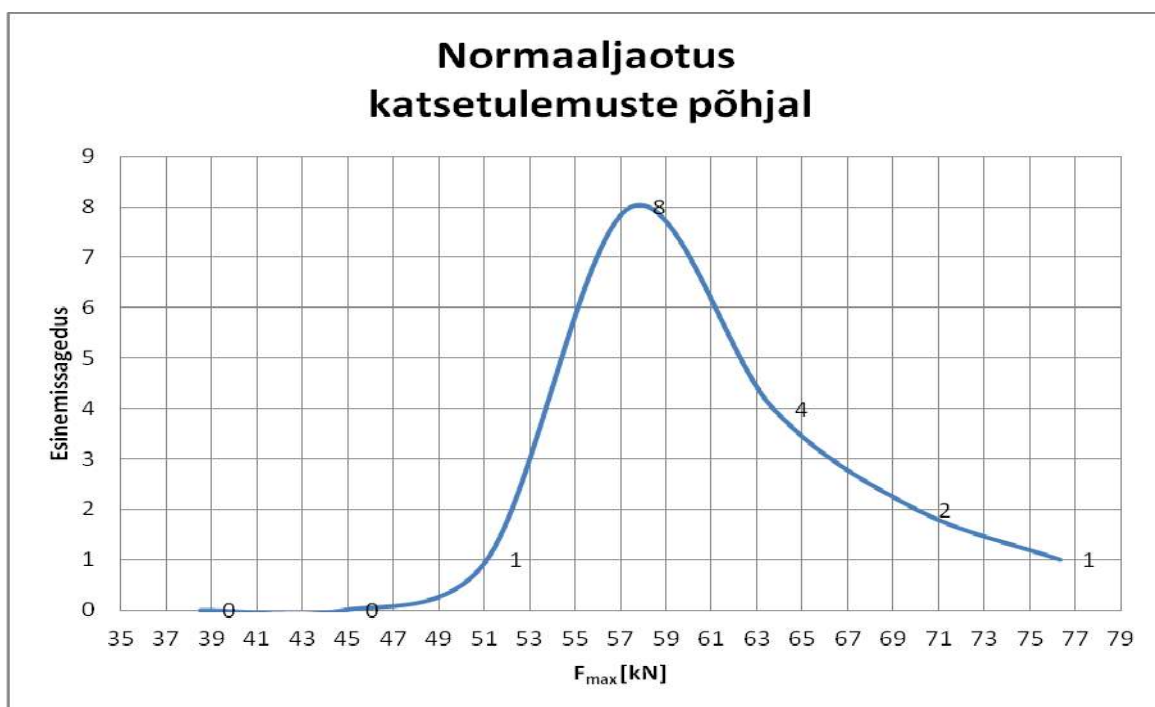
Standard EVS-EN 268981 määrab arvutusmeetodi nihkemoodulite määramiseks (vt. joonis 8-10). Standardi järgi on võimalik arvutada $K_{s, 0.4}$, $K_{s, 0.6}$ ja $K_{s, 0.8}$. $K_{s, 0.4}$ keskmine väärtus katsekehade põhjal tuli 96,8 kN/mm. Üksiktulemused varieerusid piirides 48,6 kuni 200 kN/mm, mis näitab, et erinevate katsekehade nihe elastses staadiumis oli väga erinev. $K_{s, 0.6}$ arvatud keskväärtus katsetulemuste põhjal tuli 74,8 kN/mm, kusjuures üksiktulemused varieerusid piirides 34 kN/mm kuni 158,5 kN/mm. $K_{s, 0.8}$ arvatud keskväärtus tuli 34,2 kN/mm, üksiktulemuste variatsioonil piirides 17,8 kN/mm kuni 61 kN/mm.

Katsetulemuste põhjal arvutati lisaks veel standardhälve $\delta = 6,31$. Variatsioonikoeffitsient $CoV \approx 10\%$, mis näitab, et üksikud väärtused ei erine oluliselt keskvaärtusest. Katsetulemusi graafikule tõstes näeb, et antud jaotust iseloomustab kõige paremini normaaljaotuskõver. Tinglik normaaljaotuskõver katsetulemustest on esitatud joonisel 8-9.

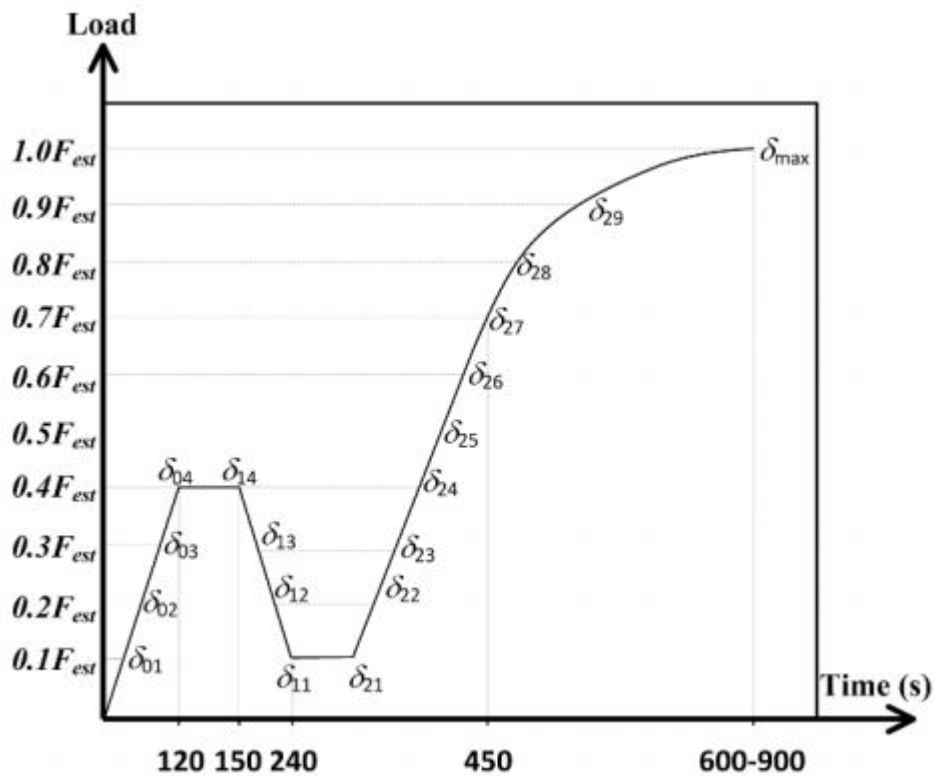
Matemaatiliselt loetakse valimi ühtsust heaks sellisel juhul, kui 68 % katsetulemustest on piirides $\mu \pm \delta$ (keskväärtus \pm standardhälve). Antud katsetulemustest jääb sellistesse piiridesse 12 tükki, mis moodustab protsentuaalselt 75 % valimist.

Siiski tasub antud valimisse kriitiliselt suhtuda, sest katsekehade arv oli ajalise ja rahalise ressursi tõttu piiratud. Katsetuste eesmärk hinnata sellise liite purunemise iseloomu ja saada esialgne info liite kandevõime ja deformatsivsuse kohta sai sellegipoolest täidetud.

Katsekehade täpsemad väärtused: F_{max} , nihe puidu ja betooni vahel ning nihkemooduli väärtused on esitatud tabelis 8-2. Tabelis 8-3 on esitatud betooni purunemisega lõppenud katsekehade andmed. Tabelis 8-4 on esitatud jõu-vahe siirde tõttu lõppenud katsekehade andmed.



Joonis 8-9



Joonis 8-10

Katsekeha nr	F _{max} [kN]	K _{s, 0.4}	K _{s, 0.6}	K _{s, 0.8}	nihe materjalide vahel
1	57,66				3,47
2	67,00	80,00	38,09	23,43	7,43
3	55,95	73,47	59,77	32,70	10,24
4	58,91	200,00	158,50	59,61	4,06
5	64,19	48,65	52,52	23,09	9,17
6	56,08	66,67	65,98	34,51	12,21
7	46,22	76,60	62,55	44,14	3,35
8	51,56	112,50	103,01	40,69	7,12
9	55,91	78,26	56,22	27,02	9,29
10	62,77	70,59	63,83	28,00	6,28
11	51,18	128,57	129,75	61,46	3,91
12	51,35	102,86	76,39	22,27	9,99
13	59,62	78,26	57,54	26,96	6,08
14	53,08	105,88	103,85	42,48	5,84
15	57,05	66,67	34,75	17,83	11,87
16	70,16	163,64	59,57	29,30	6,30
Keskmine	57,42	96,84	74,82	34,23	7,29

Tabel 8-2

Katsekeha nr	F _{max}	K _{s, 0.4}	K _{s, 0.6}	K _{s, 0.8}	nihe materjalide vahel
1	57,66				3,47
2	67,00	80,00	38,09	23,43	7,43
3	55,95	73,47	59,77	32,70	10,24
4	58,91	200,00	158,50	59,61	4,06
5	64,19	48,65	52,52	23,09	9,17
7	46,22	76,60	62,55	44,14	3,35
10	62,77	70,59	63,83	28,00	6,28
11	51,18	128,57	129,75	61,46	3,91
13	59,62	78,26	57,54	26,96	6,08
14	53,08	105,88	103,85	42,48	5,84
Keskmine	57,66	95,78	80,71	37,98	5,98

Tabel 8-3

Katsekeha nr	F _{max}	K _{s, 0.4}	K _{s, 0.6}	K _{s, 0.8}	nihe materjalide vahel
6	56,08	66,67	65,98	34,51	12,21
8	51,56	112,50	103,01	40,69	7,12
9	55,91	78,26	56,22	27,02	9,29
12	51,35	102,86	76,39	22,27	9,99
15	57,05	66,67	34,75	17,83	11,87
16	70,16	163,64	59,57	29,30	6,30
Keskmine	57,02	98,43	65,99	28,60	9,46

Tabel 8-4

8.4 Nihkeliite võrdlus analoogsete liidetega

Teostatud nihkeliite katsekehade põhjal on sellise liite keskmine kandevõime ~57 kN. Nihkemoodulite $K_{s, 0.4}$, $K_{s, 0.6}$ ja $K_{s, 0.8}$ keskvaartused katsetulemuste põhjal on 97, 75 ja 34 kN/mm. Samasugust nihkeliidet pole kirjandusest leida olnud, mistõttu on katsetulemusi võrreldud sarnaste katsetega, mida on kirjeldatud eelnevalt peatükis 4.2.

Peatükis 4.2 kirjeldatud katsetustest on antud pindalaga sarnase suurusega 150 x 63 mm ristküliku kujuga tapp, milles puudus puidupolt. Lisaks on võrreldud saadud suurust puidupoldiga ja puidupoldi+betoontapiga nihkeliite tulemustega. Antud uuringus saadud suuruste võrdlus selle töö raames teostatud nihkeuuringus saadud väärtustega on toodud tabelis 8-5.

Ühenduse tüüp	Nihkemoodulid		Nihketugevus
	$K_{s, 0.4}$ (kN/mm)	$K_{s, 0.6}$ (kN/mm)	F_{max} (kN)
Ø16 mm puidupolt	29,0	6,3	46,4
150 x 63 mm ristküliktapp	104,7	59,3	48,3
150 x 63 mm ristküliktapp + Ø16mm puidupolt	88,9	74,5	66,0
KATSETATUD TAPP KIUDBETOONIGA	96,8	74,8	57,4

Tabel 8-5

Katsetatud nihkeliites langesid antud hetkel betoontapi nihketugevus ja nihkemooduli väärtused samasse piirkonda puidupoldi+betoontapiga nihkeliitega.

Katsetes esines nii betoontapi purunemist nihketasapinnas kui ka puidu muljumist pikikiudu ja plokkpurunemist. Teraskiudbetooni purunemine on plastsem kui tavabetoonil, kuid siiski on plastne tsoon purunemisdiagrammil liialt lühike ja ettearvamatu, mistõttu pigem võiks vältida antud purunemisviisi. Puidu muljumine toob kaasa märgatavat deformatsiooni kasvu, mistõttu sellist liiki plastne nihkeliide oleks parim võimalik purunemisviis, hoiatades kasutajaid ohu eest. Toodud põhjustel tuleks nihkeliite tapi pikkust suurendada ja ühtlasi ka suurendada tappliite järgset puitosa pikkust. Betoontapi pikendamiseega vähendatakse ohtu, et betoontapp nihketasapinnas annab esimesena järgi ja puidu osa pikendamiseega väheneks plokkpurunemise risk, mis kõik muudab liite alimaks puidu muljumisele liitetsoonis.

Katsetulemusi mõjutab eeldatavasti enim teraskiu sattumine nihkeliite tsooni. Purunenud liidete põhjal ei ole võimalik kindlaks määrata kiudude arvu antud tasapinnas, mistõttu antud suuruse väljaselgitamiseks tuleb teostada täpsemad uuringud.

Kokkuvõttes saab katsetatud nihkeliite kohta järeldada, et uuringu tulemused sarnanevad pigem metallnaagliga betoontappliitele, olles plastsemad kui tavabetoonil.

Kokkuvõte

Käesolevas magistritöös on uuritud metallnaaglit kiudbetoonist tappnihkeliidet.

Töö esimeses osas anti lühiülevaade puit-betoon komposiitkonstruktsioonist, tutvustati konstruktsiooni põhimõtteid ja käitumist ning lihtsustatud arvutusmeetodeid. Lisaks toodi välja enam levinud nihkeliited, sh töörelevantsed katsed ja nende analüüs.

Teises osas kirjeldati katsematerjale ning nende omaduste määramist. Betooni puhul määrati survetugevus ja mahumuutused nii nendel katsekehadel, mis olid 28 päeva niiskuskambris, kui ka neil, mis pärast seitsmendat päeva niiskuskambrist eemaldati simuleerimaks praktikas toimuvat. Liimpuidul määrati lisaks tihedusele katsetatava puidu niiskus kahel standardmeetodil.

Katsemeetodite ja katsetamise peatükkides kirjeldati katsete teostamist ja sellega kaasnevaid probleeme. Tehtavad järeldused on abiks edasiste uuringute läbiviimisel.

Katsetulemuse analüüsil selgus, et nihkeliite katsed lõppesid kahel viisil.

1. Betoontapi rabe purunemine nihketasapinnas.
2. Jõupea saavutas siirde 15 mm, puidu tugev muljumine.

Kõigi teostatud katsekehade keskmine nihketugevus oli 57,4 kN ja nihkemooduli väärtus 96,8 kN/mm. Purunemispildi kohaselt käitus liide plastsemalt kui tavabetooniga liide. Suurused sarnanevad tappliitele, kus on lisaks kasutatud metallnaaglit. Tulemustest järeldub, et taolisel nihketapil on kiudbetooni kasutades potentsiaali saavutada sarnased omadused metallnaaglit sisaldava tappliitega, kuid väiksema resurssikuluga. Lõppeesmärk oleks liide ehitada nii, et betoontapp ei puruneks, vaid toimuks muljumine ja nihkeliide käituks igal korral samamoodi nagu teisel viisil lõppenud katsekehadel, kus betoontapp jäi terveks. Selleks tuleks betoontapi pikkust suurendada vähendamaks betooni purunemise võimalust nihketasapinnas. Lisaks tuleks liimpuidu sammu liite järgselt suurendada vähendamaks plokkpurunemise ohtu.

Soovitused edaspidisteks uurimusteks:

- Katsematerjalide omaduste mõju nihkeliitele - uurida betooni ja puidu erinevate tugevusomaduste mõju liitele.
- Katseraami mõju nihkeliite katsele - uurida erinevate katsetamiseks kasutatavate tugevuste ja katseraamide mõju katsetulemustele.
- Teraskiuu sattumine nihkeliitesse - uurida ja katseliselt määrata teraskiudude sattumist nihketasapinda.
- Kiu koguse mõju liite käitumisele - uurida erinevate kiukogustega valmistatud nihkeliiteid, määramaks optimaalset kogust konstruktsioonis.
- Erinevate kiutüüpide kasutamine, sobivus nihkeliites - uurida erinevaid betoonis kasutatavaid kiude antud nihketapis. Kiu tüübi mõju nihkeliitele, milline kiutüüp seguneb kõige ühtlasemalt betooniga ja tagab liites väikesed variatsioonid.
- Puidu plokkpurunemine - uurida nihkeliite järgset puidu pindala, mis etapist alates tekib plokkpurunemine ja kuidas see mõjutab liidet tervikuna.
- Suuremahulised katsed liite käitumise hindamiseks konstruktsioonis - teostada põrandaplaadi katsed, kus on kindla pikkusega nihkeliide kindla sammuga. Uurida nihkeliite käitumist ja mõju tervikkonstruktsioonile.
- Akustikauuring puit-betoon komposiitkonstruktsioonile antud nihkeliite kasutamisel.
- Vibratsiooni uuring - teostada vibratsiooni uuring, kasutades antud nihkeliidet.
- Tuleuuring antud nihkeliitega, määramaks konstruktsiooni kestvust avarii olukorras.

Summary

In this thesis a fiber-reinforced notch shear connection is analysed.

In the first part a brief overview of timber-concrete composite structure is given. Main principals and behaviour of the structure is described and simplified calculation methods are given. Also, more common types of shear connections are shown, including work related connections.

The second part describes the materials used and properties that were determined for them. For concrete compression strength and the change in volume were determined for the test pieces that were kept according to the standards and also for the test pieces that simulated real life situation. For the laminated wood density was determined and moisture was tested according to the two methods given in standards.

In the chapter describing testing and test methods also problems related to the method used are pointed out. Finding of the tests carried out provide helpful tips for the future studies.

Test result analysis showed that the shear connection tests ended in two ways:

1. Brittle shear fracture in concrete
2. Test apparatus reached 15 mm slip, wood extensively crushed.

The average shear capacity determined by test specimens was 57,4 kN and slip modulus 96,8 kN/mm. According to the post peak behaviour diagram this type of connection is ductile. Values that were determined resemble more to the values of notched connections that use metal reinforcement than standard concrete notched shear connections. The results suggest that using fiber-reinforced concrete in a notched connection similar post peak behaviour and strength values can be achieved to a regular metal reinforced concrete notch but with significantly less work. The ultimate goal is to design the notched shear connector in such a way that brittle concrete fracture is excluded and timber embedment strength is always reached. To achieve this the length of the concrete notch must be extended and also the length of timber after the connection should be increased to rule out block shear failure.

Suggestions for further research:

- Impact of the properties of materials used to the shear connector - investigate the effect of different strength properties of wood and concrete to the shear connector.
- Determine the effect of the test frame on the outcome of the push out test - determine if different test frames and supports have any effect on the test results.
- Determine how consistently and how many fibers end up in the shear connector.
- The effect of fiber to the shear connection - conduct and analyse connections with different quantity of fiber used in the concrete.
- Study the effect of different fibers in concrete, how does it change shear capacity and slip modulus. How consistently different fibers mix in concrete and how they effect the outcome of the shear connection.
- Determine the area needed to avoid block shear failure in wood and analyse the effect of block shear failure to the connection in general.
- Full scale composite deck tests to assess the behaviour of the connection in construction. Analyse the effect of the connection to the structure.
- Acoustics study with this kind of shear connection in timber-concrete composite structure.
- Vibration study with this kind of shear connection in timber-concrete composite structure.
- Fire resistance study for this kind of shear connection, to determine the durability of the structure in case of emergency.

9 Kasutatud kirjandus

- [1] The effect of ductile connectors on the behaviour of timber-concrete composite beams.
A.M.P.G Dias; L.F.C. Jorge 22.06.2011
- [2] Evaluation of timberconcrete composite floors A.Manaridis 2010
- [3] Encyclopædia Britannica - François Coignet
- [4] The history of concrete R. W. Steiger 1995
- [5] Concrete: The Vision of a New Architecture P. Collins 2004
- [6] Concrete-steel Construction: (Der Eisenbetonbau) E. Mörch 1910
- [7] Timber engineering Step 2 E13 A. Ceccotti
- [8] Timber concrete composite floors with prefabricated Fiber Reinforced Concrete
L.Costa 2011
- [9] Laboratory tests of composite wood-concrete beam and floor specimens R.Gutowski
- [10] Timber-concrete composite structures with prefabricated FRC slab R. Crocetti 2010
- [11] EVS-EN 12390-1:2012 KIVISTUNUD BETOONI KATSETAMINE Osa 1: Kuju, mõõtmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded
- [12] EVS-EN 12390-2:2009 KIVISTUNUD BETOONI KATSETAMINE Osa 2: Tugevuskatse katsekahade valmistamine ja hoidmine
- [13] EVS-EN 12390-3:2009 KIVISTUNUD BETOONI KATSETAMINE Osa 3: Katsekehade survetugevus
- [14] EVS-EN 12390-4:2002 KIVISTUNUD BETOONI KATSETAMINE Osa 4: Survetugevus Katsemasinadele esitatavad nõuded
- [15] EVS-EN 338:2009 EHITUSPUIT Tugevusklassid
- [16] EVS-EN 384:2010 Structural timber- Determination of characteristic values of mechanical properties and density
- [17] EVS-EN 408:2010 PUITKONSTRUKTSIOONID Ehituspuit ja liimpuit Mõnede füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste määramine

- [18] EVS-EN 26891 PUITTARINDID. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused
- [19] ASTM C490-00a Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete
- [20] EVS-EN 13183-1:2002 Moisture content of a piece of sawn timber- Part 1: Determination by oven dry method
- [21] EVS-EN 13183-2:2002 Moisture content of a piece of sawn timber- Part 2: Estimation by electrical resistance method
- [22] EVS-EN 386:2002 Liimpuit. Teostusnõuded ja põhilised tootmisnõuded
- [23] Development of prefabricated timber-concrete composite floor systems
E.Lukaszewska 2009
- [24] EVS-EN 1995-1-1:2005+NA:2007+A1:2008+NA:2009 EUROKOODEKS 5: PUITKONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMINE Osa 1-1: Üldist Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks24]
- [25] A simplified analysis method for composite beams with interlayer slip
U.A.Girhammar 2009
- [26] Experimental Tests of notched and plate connectors for LVL-Concrete composite beams
D. Yeoh et al. 2011
- [27] Basaltfiibri mõju normaalbetoonile
M. Trossek 2015

Lisa 1 - purunemispildid



Katsekeha 1 - betoontapi rabe purunemine



Katsekeha 2 - betoontapi rabe purunemine



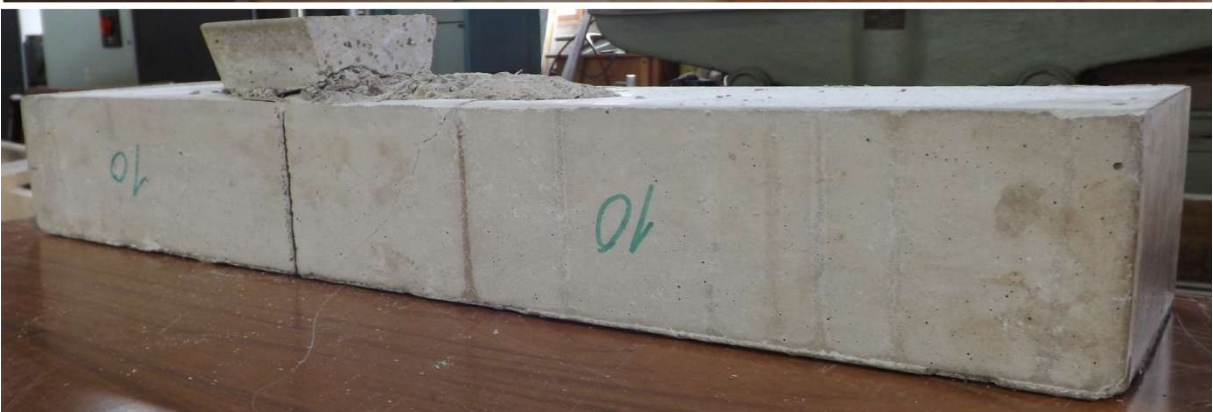
Katsekeha 3- betoontapi rabe purunemine, lisaks tugevalt muljutud puit ja plokkpurunemise märgi



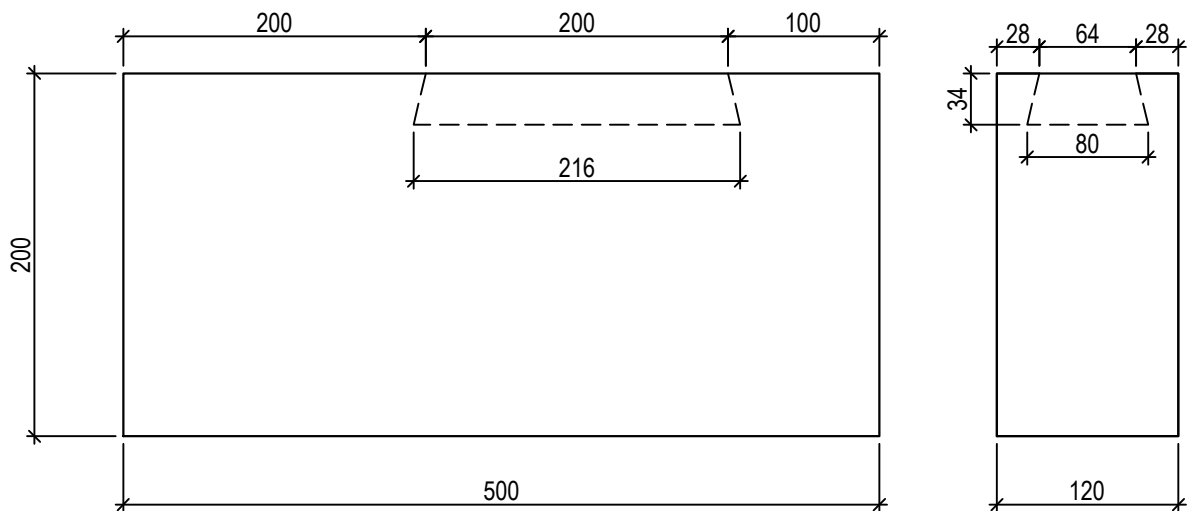
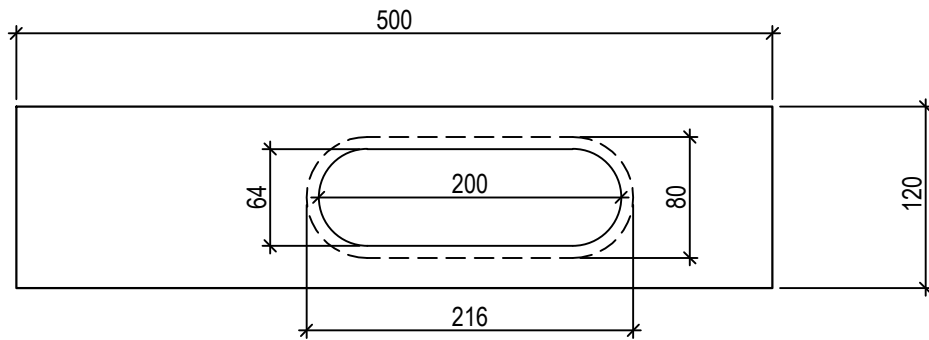
Katsekeha 8 - puidu tugev muljumine ja plokkpurunemise märgid. Betoonis paindepragu, tapp nihkeliites tugevalt kinni



Katsekeha 9 - puidu tugev muljumine, plokkpurunemise märgid. Betoonis paindepragu, nihketasapinnas terve.



Katsekeha 10- betoonitapi rabe purunemine, puit terve.



Lisa 2 - Liimpuidu tööjoonis

Mööd:
1:5

Koostaja:

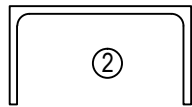
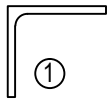
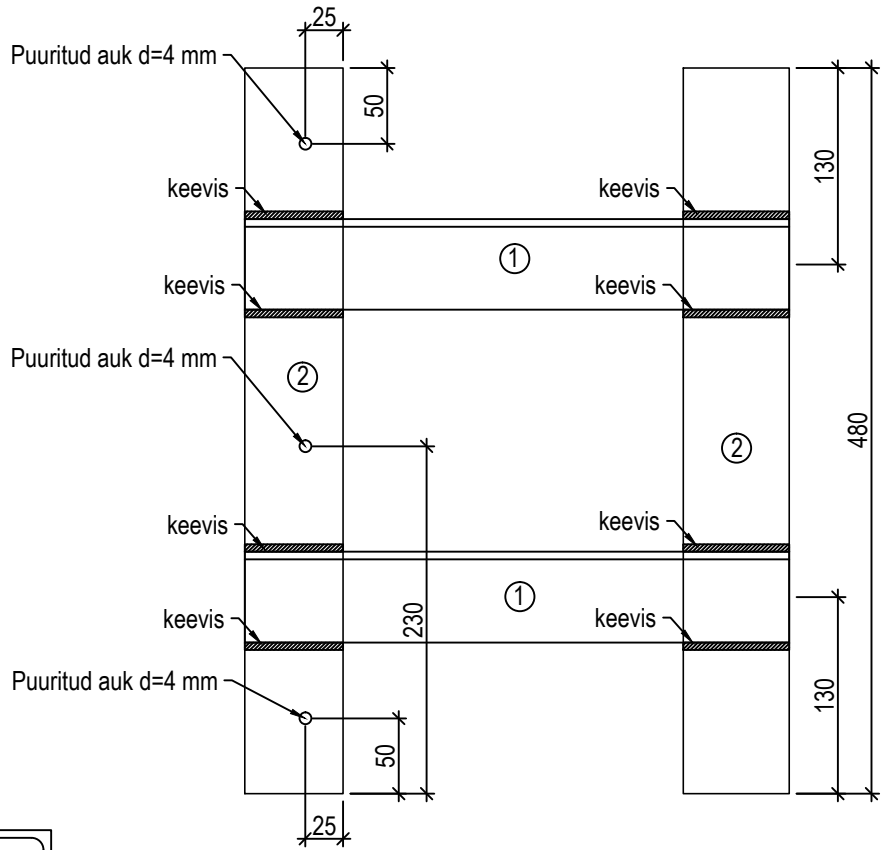
Silver Pikk

09.03.2015

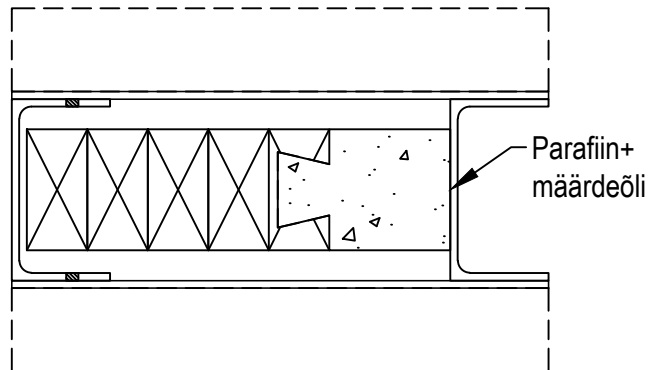
Juhendaja:

Eero Tuhkanen

Leht:
1/1



- 1) Nurkraud 60x5 4 tk pikkus 360 mm
2) Karpraud ehk U-profiil U16 2tk pikkus 480 mm



Lisa 3 - Katseraami tööjoonis

Mööd: 1:5

Koostaja:

Silver Pikk

15.04.2015

Juhendaja:

Eero Tuhkanen

Leht:

1/1