

TARTU ÜLIKOOLI VILJANDI KULTUURIAKADEEMIA

Rahvusliku käsitöö osakond

Rahvusliku ehituse õppekava

Markus Pau

Kanepibetoonsegude tutvustus ja katsetamine Eesti kliimas

Lõputöö

Juhendaja: Laur Pihel

Kaitsmisele lubatud:.....

Viljandi 2017

Sisukord

Sissejuhatus	3
1. Kanepibetoon ehitusmaterjalina	5
1.1. Ehitusfüüsikalised omadused.....	7
1.2. Kanepibetoonsegu	11
1.3. Kanepibetoonplokk.....	12
1.4. Mõju keskkonnale.....	14
2. Sideainete ülevaade	16
2.1. Savi	17
2.2. Õhklubi	19
2.3. Looduslikult hüdrauliline lubi	20
3. Metoodika.....	21
4. Materjalikatsed	25
4.1. Sisetingimustes kuivanud katseplokkide seire.....	27
4.2. Välingimustes kuivanud katseplokkide survetugevuskatsed.....	29
5. Tulemused ning järeldused.....	30
6. Näidisseina püstitamine.....	33
6.1. Sokkel	34
6.2. Niiskustõke	36
6.3. Sõrestik.....	37
6.4. Seinä täitmine	38
6.4.1. Savi-kanepiluu segu	39
6.4.2. Lubja-kanepiluu segu.....	40
6.5. Viimistlus.....	41
Kokkuvõte	42
Kasutatud allikad.....	43
Lisad	45
Summary	70

Sissejuhatus

Traditsioonilistel looduslikel ehitusmaterjalidel on kuluefektiivsuse vaatepunktist keeruline vastu seista tänapäevastele tööstuslikus tempos ning mahus valmivatele ehitustoodetele, kuid teisalt on loodussäästlik hoiak kasvamas trendist maailmavaateks. Jätkusuutlik areng kõlab üha sagedamini kui endastmõistetav osa igasugusest tulevikustrateegiast, olgu tegemist riigi, ettevõtte või organisatsiooniga. Eesti Vabariigi Riigikantselei defineerib jätkusuutlikku arengut järgnevalt: „Säästva ehk jätkusuutliku arengu all mõistetakse sihipärast arengut, mis parandab inimeste elukvaliteeti kooskõlas loodusvarade ja keskkonna talumisvõimega. Jätkusuutliku arengu eesmärk on saavutada tasakaal sotsiaal-, majandus- ja keskkonnavaldkonna vahel ning tagada täisväärtuslik ühiskonnaelu praeguste ja järeltulevate põlvete jaoks.“ (Riigikantselei veebileht <https://riigikantselei.ee/et/saastev-areng>)

Ehitusvaldkonna puhul väljenduvad säästva arengu eesmärgid näiteks madalama sisendenergiaga loodussõbralike materjalide kasutuselevõtmises, kestmate ehitustehniliste lahenduste projekteerimises ja teostamises, hoone tervislikumas ja mugavamas sisekliimas ning madalamates ülalpidamiskuludes. Käesolev töö tutvustab kanepibetooni kui kõigile neile kriteeriumidele vastavat uutset ehitusmaterjali, millel on tugev potentsiaal panustada märkimisväärselt jätkusuutliku arengu eesmärkidesse.

Kanepibetooni omadusi on uuritud üle maailma ning leitud, et tegemist on jätkusuutliku ehitusmaterjaliga, mis tagab hoonetes hea soojapidavuse ning mugava sisekliima. Kuigi seda on edukalt ehituses rakendatud nii Põhja-Ameerikas, Austraalias kui mitmetes Euroopa riikides, puuduvad töö kirjutamise hetkel igasugused andmed materjali kasutamise kohta Eestis. Kuigi kanepibetooni häid ehitustehnilisi omadusi on tõendatud läbi arvukate uuringute, puudub niisiis praktiline ehituskogemus siinses kliimas.

Viimase aastakümne jooksul on Eestis hoogustunud õlikanepi kultiveerimine, kuid tänapäevaseid kiukanepi tööstustehnoloogiasid pole seni kasutusele võetud. Varasemalt on taime kasutatud peamiselt tekstiilitööstuses, kuid seni on jäänud tähelepanu alt kõrvale kiukanepi potentsiaal ehitusmaterjalina.

Teoreetilistele alustele tuginev loov-praktiline osa lõputööst seisneb materjali spetsiifikaga tutvumises läbi esialgsete materjalikatsetuste ning kogutud teadmiste rakendamises näidisseina püstitamisel Tartu Ülikooli Viljandi Kultuuriakadeemia Vilma õppehoone juures. Eesmärk on seeläbi olulisemate kitsaskohtade esiletoomine ning materjali kasutusvõimaluste tutvustamine laiemale avalikkusele. Lõputöö praktilise osana püstitatakse näidissein on mõeldud tutvustama kanepibetonsegmentide kasutamise võimalusi siinses kliimas ning täitma praktilise koolitustegevuse läbi ka laiemaid kodanikuhariduse eesmärke jätkusuutliku ehituse valdkonnas. Samuti luuakse tingimused seina ehitustehnilise toimimise kaardistamiseks läbi järeelseire.

Tehtavad katsed on esmased ning ebatäpsed, mistõttu nende tulemusi ei saa võtta kindlaks aluseks edasises uurimistöös. Siiski on eesmärgiks saavutada esialgne lähtekoht, millest lähtuda nii järgnevate uurimisküsimuste formuleerimisel teoreetiliselt uurimistöös kui praktilistes materjalikatsetes. Kuna näidissein on avatud välisele õhuniiskusele ja temperatuurile mõlemast küljest, ei saa järeelseire andmeid kasutada tegelike eluhoonete piirdetarindite projekteerimiseks. Niisiis peetakse katsete juures oluliseks ka tulevikuperspektiivi, otsides sobivaid segmente ka näidisseinast erineva ülesehitusega sõrestikes kasutamiseks. Seeläbi omakorda alustatakse valmiduse loomist võimalike katsehoonete ehitamiseks, millest on võimalik koguda pädevaid andmeid otsese õhu-, niiskus- ja soojaläbivuse kohta kanepibetonist eluhoonete projekteerimiseks.

Autor soovib tänada kõiki, kes olid abiks lõputöö teoreetilise ja praktilise osa valmimise juures: Marko Kikas, Tarmo Tammekivi, Laur Pihel, Katri Smitt, Leele Välja, Martin Bristol, Madis Rennu, Karin Kirtsi, Lea Stroh, Imre Tael, Malvo Tominga, Kalev Kriis, Gert Reimets, Mihkel Kibur, Eik Erich Uibo, Arseni Bulatov, Kerttu Kruusla, Kristjan Tuuleveski, Freddy Tints, Laur Oberschneider, Mark Netsajev, Lauri Luke, Mikk Freiberg, Randar Põld, Indrek Roosi, Andre Rist, Sandra Miländer, Tormi Torop, Andres Ansper, Miina Leesment, Roland Leesment, Karin Kuusemaa, Tammejuure mahetalu.

1. Kanepibetoon ehitusmaterjalina

Kanepibetoonist rääkides on oluline juhtida tähelepanu termini enese tinglikkusele. Töö kirjutamise hetkel puudub eesti keeles sisuliselt täpne ning lühike termin kirjeldamaks kanepiluul põhinevaid biokomposiite. Inglisekeelsetest terminitest *hemp* ning *concrete* moodustatud ja laialdaselt kasutatav mõiste *hempcrete* eristub kahest eelnevast selgelt iseseisva tähendusega. Vastavate eestikeelsete mõistete ühendamine on paraku problemaatilisem. Kokku laenatud mõiste kanepibetoon viitab materjali omadustele, mis on mõnest vaatenurgast võrreldavad kergbetooniga, kuid siiski on betooni mõiste laenamine problemaatiline oma definitsiooni tõttu:

betoon (concrete) materjal, mis saadakse omavahel segatud tsemendist, jäme- ja peentäitematerjalist ja veest ning millele võib lisada keemilisi ja peenlisandeid, kusjuures betooni omadused kujunevad tsemendi hüdratatsiooni tulemusena

(Allikas: Eesti Ehitusmaterjalide Tootjate Liidu kodulehekülg.)

<http://www.eetl.ee/et/betoon/sonastik-betoon/24-betoon-emconcreteem>

Kanepibetooni puhul, erinevalt tavalisest betoonist, kasutatakse tsemendi asemel aga lupja ning harvem ka savi, mistõttu terminit võib pidada ehitustehniliselt eksitavaks. Käesolevas töös kasutatakse siiski mõistet parema puudumise tõttu selguse ning üheseltmõistetavuse eesmärgil. Sellegipoolest tuleb nentida, et vajadus teaduslikult täpsema eestikeelse termini vastu on vaieldamatu. Inglisekeelne termin *hempcrete* on kasutusel ka saksa ning vene keeles, Prantsuse keeles esineb omakeelne termin *béton de chanvre* ehk kanepibetoon. Ka Soome keeles esineb mõiste *hamppubetoni*.

Kuigi Eestis on traditsiooniliselt kasutatud mitmesuguseid võtteid puitsõrestike täitmiseks, pole teadaolevalt kanepibetoon veel nende hulka jõudnud. Seda kasutavad ehitusmaterjalina mitmed ettevõtted Prantsusmaal, Suurbritannias, Ukrainas ja mujal (vt. Lisa 1). Nende kogemus on kinnitanud kanepibetooni häid omadusi, nagu madal soojusjuhtivus, samas ka veeauru läbilaskvus, vastupidavus niiskusele, putukkahjuritele, närilistele, tulele. Materjaliga on edukaid katseid tehtud ka Uppsala Ülikoolis, mis kinnitab kanepibetoonide sobivust põhjapoolsemasse kliimasse: „Kanepibetoonil põhinev ehitussüsteem on näidanud katsetes sarnast soojapidavust passiivmajadega [Rootsi] lõunapoolsemas kliimas. Rootsi põhjaosas kulub kanepibetoonist hoonetes mugava sisetemperatuuri säilitamiseks 20% rohkem energiat kui passiivmajade puhul.

Seda erinevust on võimalik kompenseerida kanepikiusoojustusega, suurendades välistarindi soojapidavust. Lisaks ei võtnud simulatsioon arvesse materjali hügrotermilisi omadusi [niiskuse ja soojuse koostoimel ilmnevaid iseärasusi], mis arvatavasti avaldavad silmapaistvat positiivset mõju kanepikomposiidist hoonete soojapidavusele.“ (Ahlberg et al 2014, lk 2)

Rääkides vanade hoonete taastamisest või parandamisest, tuleb väga hoolikat tähelepanu pöörata materjalidele. Just sellealased katsetused sõjajärgsel perioodil Lõuna-Prantsusmaal viisidki kanepibetooni kui ehitusmaterjali avastamiseni. Ehitajad ning restauraatorid olid hädas taastatud vanade hoonetega, mille lagunevate osade parandamiseks oli kasutatud tsementsegu ja -krohvi. Tänapäevaks on need enamjaolt välja vahetatud lubjapõhiste krohvidega. Teiseks murekohaks kaasaegsete materjalidega taastatud hoonetes oli aga niiskuse kogunemine tarindisse klaasvilla ning kipsplaadi kasutamise tulemusena. Nii tehti kaasaegseid materjale kasutades sageli vanadele hoonetele rohkem kahju kui kasu. (Valkhoff 2010, lk 11)

1980. aastatel alustati nimetatud hoonetes paljude erinevate soojustusmaterjalide katsetamisega ning leiti, et lubja ning kanepiluude segu andis soovitud tulemuse. Hoonete soojapidavus oli parem kui traditsioonilisi materjale kasutades, ent samas tagas puitkonstruktsioonide säilimise. Üheks kanepibetooni heaks ehitustehniliseks omaduseks võib pidada monoliitsust – ebatiheduste ning sellest tulenevate külmasildade tekkimise oht piirdetarindites on viidud miinimumini, kuna kandvat sõrestikku ümbritsev kanepibetoon moodustab korrektse paigalduse korral katkestusteta väliskesta. Seinatarind koosneb sellisel juhul enamasti vaid puitsõrestikust, kanepibetoonist ja krohvikihist. Seega vähenevad võimalikud ettearvamatused seina soojus- ja niiskustehnilises toimimises erinevatel üleminekualadel ühelt materjalilt teisele. Kristo Anslan on põgusalt kirjeldanud erinevaid kanepibetoonil põhinevaid tarindeid oma magistritöös. (Anslan 2015, lk 30-35)

1.1. Ehitusfüüsikalised omadused

Kanepiluupõhine betoon (nimetatakse ka kanepibetooniks või kanepilubjaks) on kergsegu, mis saadakse kanepiluude (taime varre sisemine puitunud osa) segamisel sideainega. Kuna materjali tootmisprotsess tugineb looduslikule taastuvale ressursile ja tekitab suhteliselt vähe heit- ning kasvuhoonegaase, tagab hoonetele parema energiatõhususe ning siseõhu kvaliteedi, kasutatakse kanepibetooni üha enam jätkusuutliku ehitusmaterjalina, tõsiseltvõetava ning efektiivse alternatiivina traditsioonilisele ehitusele. (Arizzi et al 2015, lk 1)

Kanepibetooni koostisosade suhe segus sõltub nii sihtotstarbest hoones (põrand, seinad, lagi), sideaine tüübist kui kliimatingimustest. Seega on oluline märkida, et erinevates olukordades ei saa alati toetuda ühele kindlalt paika pandud segureseptile. Lisaks sellele on tsementseguga võrreldes kanepibetooni segamisel eksimisruum palju väiksem. Alati tuleb lähtuda sideaine täpsetest tootjapoolsetest juhistest. Praktilises käsiraamatus The Hempcrete Book toodud näite puhul on kanepiluude, sideaine ning vee suhteks segus määratud vastavalt 4:1:1 – lahtiseletatuna tähendab see, et 4 l kanepiluude kohta on lisatud 1 kg lubjapulbrit ning 1 l vett. Tuleb meeles pidada, et nimetatud suhe on üksnes ligikaudne ning seina lõplikke ehitusfüüsikalisi omadusi mõjutavad tugevasti nii sideaine valik kui kasutatud töövõtted. (Sparrow, Stanwix 2014)

Kivistunud kujul iseloomustab kanepilubjasegusid suur poorsus, madal soojusjuhtivus, kõrge akustiline summutusfaktor võrreldes betooniga ning hea tulekindlus, kasutamata selleks lisaineid. Sellest tulenevalt on kanepiluupõhiseid segusid võimalik kasutada näiteks soojustava täitematerjalina, katuse- ja seinapaneelidena, müüriplokkidena ja soojuskrohvidena. Siiski, madala surve- ja tõmbetugevuse tõttu ei soovitata kanepibetooni kasutada konstruktiivsetel eesmärkidel – kandvaks otstarbeks kasutatava segu mahukaal oleks palju kõrgem, mis suurendaks paraku ka soojusjuhtivust, tulenevalt langenud poorsusest. (Arizzi et al 2015, lk 2) Järgneval leheküljel on Eesti Vabariigi Ehitusseaduses 2015. aastal sätestatud piirmäärad hoonete piirdetarindite soojuslähivusele kõrvutatud kanepibetooni tarindite soojuslähivuse ligikaudsete väärtustega.

Tabel 1. Soojuslähivuse piirväärtused Eestis (RT I, 05.06.2015, 15) (Allikas: Ehitusseadustik)

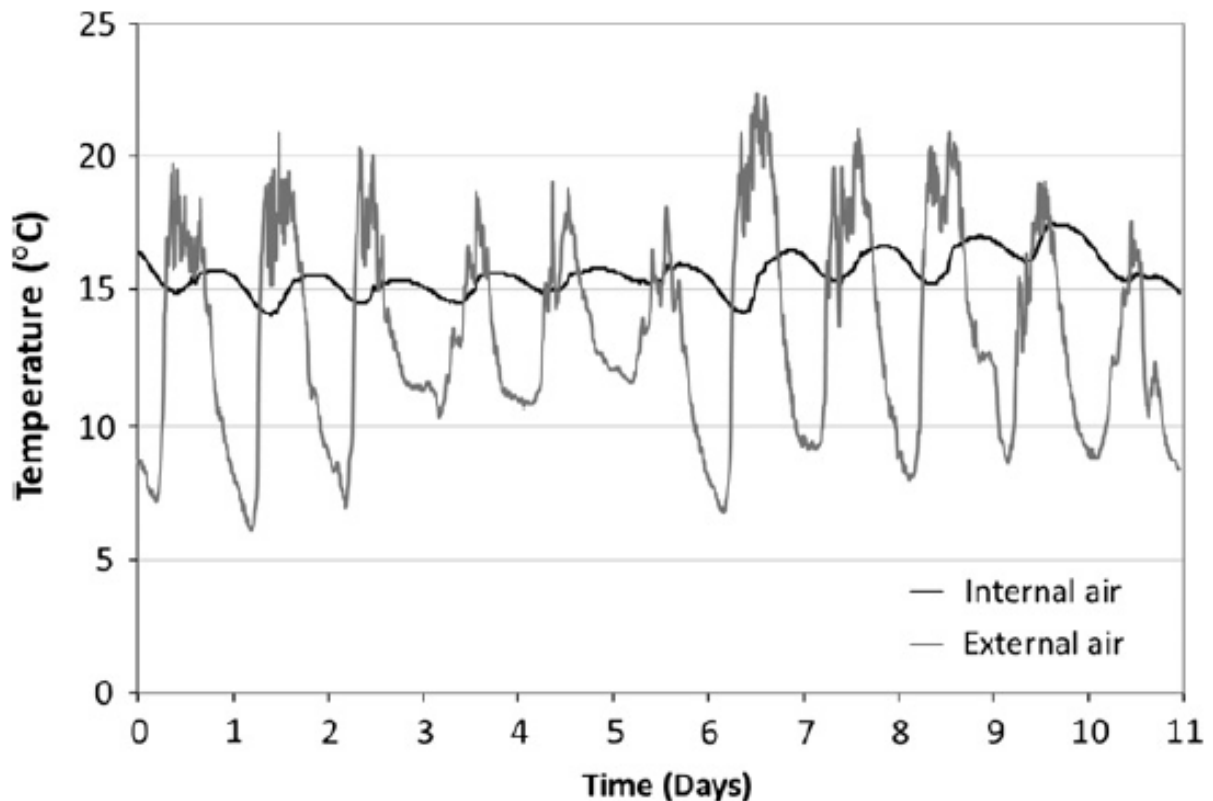
Piire	Nõutav U-väärtus (W/(m ² ·K))
Välissein	0,12 – 0,22
Katused ja põrandad	0,1 – 0,15
Aknad ja ukсед	0,6 – 1,1

Tabel 2. Lubjal põhineva kanepibetooni soojuslähivuse väärtused (Allikas: Sparrow, Stanwix 2014, lk 96)

Seinapaksus (mm)	250	300	350	400
U-väärtus (W/(m ² ·K))	0,23	0,2	0,17	0,15

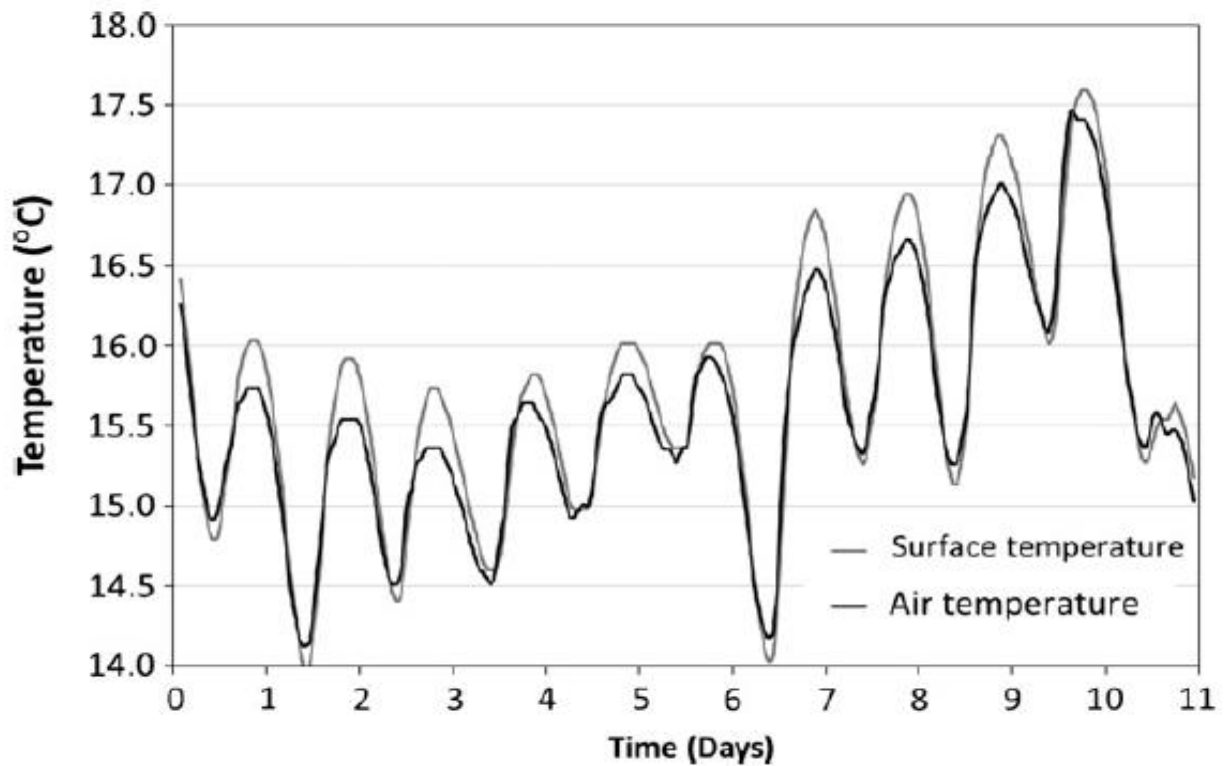
Looduslikel kiududel põhinevate soojustusmaterjalide peamine eelis seisneb selles, et need moodustavad pidevalt niiskust sidudes ja vabastades hingava seinakonstruktsiooni, reageerides suhtelise niiskuse ning aururõhu kõikumistele ümbritsevas keskkonnas. Soojavood on nende reaktsioonidega seotud – niiskuse imamise ja eraldumisega kaasneb vastavalt soojushulga eraldumine ning vastuvõtt. Läbiviidud uurimistöö on näidanud, et kanepibetooni füüsikalised omadused on heas tasakaalus väikese massi ning soojusmahutavuse vahel võrreldes levinud soojustusmaterjalidega. (Lawrence et al 2012, lk 271)

Suurbritannias Bathi Ülikoolis ehitatud katsemajalt (vt. lisa 2) võetud mõõtmistulemused on näidanud, et kanepibetonist hoone sisetemperatuuri ja -niiskuse kõikumised on märkimisväärselt väiksemad võrreldes välitingimustega. See omadus on põhjapaneva tähtsusega suvise ülekuumenemise vältimisel. Stabiilne sisekliima on mõistagi soovitatav elanike mugavustaseme säilitamise juures – olgugi, et enamasti iseloomustab see omadus pigem suurema massi ja soojusmahtuvusega hooneid. (Lawrence et al 2012, lk 273) Järgnevatel joonistel on toodud mõõtmistulemused nimetatud katsehoonest.



Graafik 1. Sise- ja välistemperatuuri mõõtmistulemused (Allikas: Lawrence et al 2012, lk 273)

Graafikul 1 on esitatud 11 päeva jooksul katsehoonest kogutud mõõtmistulemused, mis illustreerivad kanepibetooni võimet ühtlustada kõikumisi õhutemperatuuris. Välistõhu temperatuuri amplituudiks on mõõdetud ligikaudu 15-16 kraadi Celsiuse järgi, ent siseõhu puhul jääb see umbes 3 kraadi juurde. Niisiis ilmestavad saadud tulemused hästi seda, kuidas suurest õhumahutavusest tulenevana suudavad kanepibetoonist välistarandid vähendada nii liigse jahtumise kui ülekuumenemise ohtu. Ühest küljest tähendab see mugavamalt sisekliimat elanikele, ent samas kaitseb järskude kõikumiste pehmemdamine ka konstruktiivseid puitelemente, mida kanepibetoonist täide ümbritseb. Sellega väheneb niiskus- ja külmakahjustuste tekkimise oht.



Graafik 2. Siseõhu ja seina sisepinna temperatuuri kõikumised (Allikas: Lawrence et al 2012, lk 273)

Lisaks erinevustele sise- ja välistemperatuuris, kaardistati kõnealuses uurimistöös ka seda, kui suur on vahe kanepibetoonist välistarindi sisepinna ning siseõhu temperatuuri vahel. Graafik 2 näitab, et erinevused on siinkohal väikesed, jäädes alla poole kraadi Celsiuse järgi - see tähendab, et soojenenud õhu ja seina sisepinna niiskusmahutavus on samuti väga sarnane. Kuna kokkupuutel seinaga jahtub õhk keskmiselt vähem kui poole kraadi võrra, siis ei teki olulist kondenseerumise ohtu. Poole kraadi võrra jahtudes ei vähene õhu maksimaalne niiskussaldus piisavalt, et üleliigne veehulk hakkaks seinapinnale kondenseeruma ja viimistluskihti kahjustama.

1.2. Kanepibetoonsegu

Kanepibetooniga töötades seab lubi mõningad hooajalised piirangud. Ehitustegevus tuleks kindlasti planeerida piisavalt sooja aega, et lubi jõuaks karboniseeruda enne segus sisalduva vee külmumist talveperioodi lähenedes. Enne viimistlustööde alustamist peab kanepibetoon olema küllalt kuiv, et sisalduv niiskus ei tekitaks kahjustusi hallituse või külmakahjustuste näol. Üldiselt soovitatakse külmemates kliimades segutöid teha kevadel või varasuvel, et enne külmade ilmade saabumist oleks võimalik katta seinad viimistluskihiga. Vajaduse korral on võimalik jätta viimistlemata vaid hoone sisepind, mille kaudu saab toimuda kuivamine ka talveperioodil, eeldusel, et ruumid on piisavalt köetud). (Sparrow, Stanwix 2014, lk 219) Siiski tähendab see, et tellijale ei saa tööd lõplikult üle anda ilmselt enne kevadet. Ehituskulude juhtimise seisukohast pole see kindlasti otstarbekas, ent hädaolukorras võib siiski päästa suurematest probleemidest.

Seinasegu asetamiseks on tarvis valmistada raketised, mis hoiavad seina koos kuni piisava taanemiseni. Võimalik on kasutada ühekordseid puitmaterjalist või korduskasutatavaid plastikust raketisi. (Sparrow, Stanwix 2014, lk 189) Üldiselt kasutatakse enamasti esimest varianti, kuna moodulraketised on võrdlemisi kulukad ning ei pruugi sobida spetsiifiliste konstruktsioonilahenduste juures. Koostisainete suhe, nagu öeldud, peab segus peab olema täpne, et vältida hilisemaid probleeme - liialt kõrge või madala veesisalduse tõttu võib sein laguneda. Viimistlusega kiirustamine võib aeglustuva kuivamisprotsessi tõttu rikkuda kogu seinatarindi, raketised peavad olema kinnitatud korralikult ning nendesse segu asetamisel ei tohi seda liialt kinni tampida. Lisaks peab kuivamisperioodi jooksul seinatarind olema kaitstud sademete ja samuti liigse päikese eest.

Liialt peeneks purustatud kanepiluudest segu valmistamiseks kulub rohkem sideainet ning segu mahukaal on kõrgem, ent liialt suurtest tükkidest võib segu valmistamine osutuda tülikaks ning tulemus olla ebahühtlane. Arnaud ja Gourlay on kanepibetooni mehaanilisi omadusi uurides leidnud, et väikesed (3mm pikkusega) kanepiluu osakesed vähendavad segu poorsust ning sellest tulenevalt aeglustub karboniseerumine ja segu survetugevuse kasvamine. Kuigi väiksemate osadega segu survetugevus oli 4 kuulise katseperioodi lõpus suurem poorsemast segust, kaasneb sellega väiksem soojapidavus, mida nimetatud uuring täpsemalt ei käsitlenud. (Arnaud, Gourlay 2012, lk 50)

1.3. Kanepibetoonplokk

Hoopis teistsuguse iseloomuga on teine levinud kanepibetooni tootmisprotsess – soovitud suurusega plokid valmistatakse ette enne ehituse algust. Esimeseks ja ehk üheks olulisemaks erinevuseks on suurem sõltumatus hooajast, sest plokkide valmistamine toimub kontrollitud tingimustes ning seda ei mõjuta ilmastik ehitusplatsil. Ei tule ka oodata segu kuivamist ning viimistluse võib peale kanda lühikese aja möödudes.

Plokid ei nõua paigaldamiseks raketist, mis tähendab kokkuhoidu puitmaterjali soetamise ning paigaldamise arvelt. Siiski võib mört plokkide vahel toimida külmasillana, mistõttu kasutatakse ka kombineeritud varianti, kus plokkidest laotud sein välisküljele valatakse või pritsitakse kanepibetoonist õhuke kiht, mis ühtlustab sein välispinna soojusjuhtivust. Isegi nimetatud lähenemise juures on rakistele kuluv puitmaterjalikulu tunduvalt väiksem kui kanepibetoonsegu puhul. Teisalt võib plokkidest laotud sein viimistlemisel probleemiks kujuneda ka plokivaheliste vuukide kehvem nakkuvus krohvikihiga ning võimalik pragunemine ploki ja vuugi erinevatest omadustest tuleneva ebahühtlane kuivamise tõttu.

Võrreldes seinasegu valmistamise ja paigaldamisega on plokkide tootmine mõneti vähem komplitseeritud, võimaldab seega kasutada madalamalt kvalifitseeritud tööjõudu ning on suhteliselt kergesti mehhaniseeritav. Tekkivaid vigu on lihtsam jooksvalt kontrollida ning on tõenäolisem, et need ilmnevad enne seinaladumisega alustamist. Nii vähendatakse võimalikke probleeme, mis võivad olla tingitud näiteks vale koostisega segust, valedest paigaldusvõtetest või viimistlusega kiirustamisest.

Rääkides sideainetest on oluline märkida, et plokkide valmistamisel on võimalik kasutada aeglasemalt tahenevat lupja kui valatud sein puhul. Ehitusplatsile jõudes on plokid juba saavutanud oma täieliku survetugevuse, mistõttu puudub märkimisväärne laialipudenemise oht omaenese raskuse mõjul võrreldes sarnase lubja kasutamisega sein valamiseks. Nõuded sideainele on seega mõneti vähem spetsiifilised.

Nagu eelnevalt mainitud, võib kanepibetooni retsept varieeruda olenevalt selle sihtotstarbest. Kuigi enamasti soovitakse ära kasutada kanepiluude õhumahutavusest tulenevat madalat soojajuhtivust, on võimalik koostisainete proportsiooni muutes valmistada ka konstruktiivseteks lahendusteks mõeldud segu ning plokke. Lähtuvalt ehituse eripärast võib see otstarbekaks osutuda, kuid seejuures tuleb arvesse võtta muutuvaid füüsikalisi omadusi. Kanepiluude ja sideaine suhe, väljendudes ka tiheduses, on selges korrelatsioonis lõpliku survetugevuse ning soojusjuhtivusega - nende väärtuste seoseid iseloomustab Tabel 3. Kõrvutades toodud väärtusi kehtivas Ehitusseadustikus toodud soojaläbivuse piirväärtustega, võib siingi näha, et kõikide tarindisegude omadused jäävad nõuete piiresse. Kristo Anslan Erinevaid võimalikke tarindilahendusi kirjeldab Kristo Anslan lähemalt oma magistritöös. (Anslan 2014, lk 30-35)

Tabel 3. Kanepibetooni omadused sõltuvalt koostisosade vahekorra- ning segu tihedusest
(Allikas: Lawrence et al 2012, lk 271).

Sihtotstarve	Luu ja sideaine suhe (massi järgi)	Tihedus (kg/m³)	Survetugevus (N/mm²)	Soojaläbivus (W/m · K)
katuslae soojustus	1:1	220	0.05	0.06
seinatäide	1:1,5	275	0.11	0.06 – 0.09
seinatäide	1:2	330	0.22	0.09 – 0.115
seinakonstruktsioon	1:2 (kokku pressitud)	440	0.35	0.115
põrand	1:3	500	0.8	0.13
põrand	1:4	600	1.15	0.14
eelkuivanud konstruktiivne seinasegu	1:4 (kokku pressitud)	600 – 1000	2-6	0.14 – 0.27

1.4. Mõju keskkonnale

Süsinikdioksiidi ehk süsihappegaasi koguse tõusu atmosfääris peetakse üheks globaalse soojenemise peamiseks põhjuseks. Seetõttu on rahvusvaheliselt võetud vastu eesmärk viia CO₂ emissioonid 1990ndate aastate eelsele tasemele. Suurbritannias paisati 1990. aastal õhku 590 miljonit tonni süsihappegaasi, 2008. aastal aga 525 miljonit tonni. Sealhulgas 298.4 miljonit tonni (ehk umbes 56 % kõikidest emissioonidest) tekitati ehitussektori poolt. Siit ilmneb, kui suurt tähelepanu nõuab ehitus loodussäästliku ning jätkusuutliku arengu eesmärkide realiseerimise juures. (Lawrence et al 2012, lk 270) Mõistagi võib ehitussektori täpne osakaal CO₂-emissioonides olla piirkonniti varieeruv, ent arenenud ühiskondades moodustab see reeglina tervikust märkimisväärse osa. Pole põhjust arvata, et vajadus uute hoonete järele tulevikus oluliselt väheneks, pigem on trend vastupidine.

Niisiis on selge, et kasvuhoonegaaside vähendamisest on kujunenud ehitussektori jaoks üks aktuaalsemaid probleeme: „Betoon on üks laiemalt kasutatud ehitusmaterjale maailmas. Portlandsemendi tootmisega (mis on betooni vältimatu koostisosa) paisatakse aga atmosfääri märkimisväärset hulga süsinikdioksiidi; ühe tonni portlandsemendi tootmisel eraldub umbes üks tonn süsihappegaasi, lisaks teisi kasvuhoonegaase. Nendega seotud keskkonnaprobleemid, lisaks loodusvarade piiratusele, hakkavad mängima juhtivat rolli tsemendi- ja betoonitööstuse jätkusuutlikus arengus sel sajandil.“ (Naik 2008, lk 98)

Kõrgete CO₂-emissioonidega käib paratamatult kaasas ka suur energiatarve, mille vähendamine kuulub niisiis lahutamatu probleemi juurde. Piiratud loodusressursside tõttu ei saa betoonitööstus suurendada rahvastiku kasvamise tempos. Seetõttu on tarvis leida jätkusuutlikke alternatiive, vähendades keskkonnale tekitatavat kahju. Jätkusuutliku betooni tootmine peaks kulutama väga vähe energiat, tekitama vähe jäätmeid, kasutama suurima tagavaraga looduslike ressursse, võimaldama vastupidavate hoonete ehitamist, mis omavad suurt soojusalvestavat massi, ning kasutama taaskäideldavaid materjale. (Naik 2008, lk 98)

Energiaefektiivsus on ehitusvaldkonnas muutumas üha päevakohasemaks teemaks. Euroopa Liidus moodustavad hoonete energiakulud kogutarbimisest umbes 40 % ning tegemist on kasvava sektoriga. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu 2010. aasta direktiiv seab eesmärgiks hoonete energiatõhususe suurendamise, mille juures võetakse lisaks soojuslikele omadustele arvesse ka taastuvate energiaallikate toodetud energia kasutamist, siseõhu kvaliteeti, ja hoone konstruktsiooni. Energiatõhususe arvutamise meetodika ei põhine seejuures üksnes küttehooajal, vaid peab hõlmama

hoone aastaringset energiatõhusust. Hoonete aastaringse energiakulu vähendamine koos siseõhu kvaliteedi tagamisega kujutab olulist väljakutset ehitussektorile, kuna Euroopa Parlamendi 2009. a. 3. veebruari resolutsiooniga nõutakse eesmärgi muutmist liikmesriikidele siduvaks 2020. aastaks. (Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv 2010//31/EL, 19. mai 2010, hoonete energiatõhususe kohta)

Ehitusmaterjalide olelusringi on oma magistritöös käsitlenud Tanel Esperk. Võrdlemisi vähetuntud mõiste taga peitub väga oluline probleemistik ehitussektori tuleviku jaoks. Ehitusest tulenevate peamiste keskkonda mõjutavate teguritena on nimetatud energia ning materjali raiskamist, tervist ja keskkonda kahjustavate gaaside emissioone. (Esperk 2007, lk 4)

Kanepibetooni üks märkimisväärsemaid omadusi on asjaolu, et tegemist on CO₂- negatiivse ehitusmaterjaliga. 1 m² 260 mm paksuse kanepibetooni tootmine tarvitab 370-394 MJ energiat ja seob 100 aastase eluea jooksul 14-35 kg süsihappegaasi, samas kui võrdse koguse portlandtsemendi tootmine vajab 560 MJ energiat ning protsessi käigus vabaneb 52,3 kg süsihappegaasi. (Pavia, Walker 2014, lk 270) Tehnoloogia arenedes, sobivate korrektuuridega on kanepibetoonehitusel potentsiaal jõuda enamikes kliimades passiivmajade soojuspidavuse tasemeni. Lisaks annab see panuse tervislikumasse sisekliimasse ning vähendab globaalse soojenemise mõjusid. (Ahlberg at al. 2014, lk 45)

Mugavuse tagamiseks elamute kasutamise ajal tuleb arvestada ehitusmaterjalide omadustega juba projekteerimise käigus. Loodussõbralikkuse vaatepunktist on oluliseks näitajaks materjalide madal energiasisaldus ehk primaarenergia, tootmisega kaasnevate emissioonide hulk ning materjalide taaskasutatavus. (Esperk 2007, lk 6) Looduslike ehitusmaterjalide üheks eeliseks võibki pidada nende suhteliselt madalat primaarenergiat, kuid paraku ei suuda nad ehitustehniliste omaduste poolest sageli konkureerida kaasaegsete tööstuslikult valmivate materjalidega. Kanepibetoon näib pakkuvat head tasakaalu soojapidavuse ja efektiivsuse ning teisalt madala energiasisalduse ja loodussõbralikkuse vahel.

Kasutades ehitusmaterjalina kanepibetooni, seovad süsihappegaasi esmalt kanepitaimed oma kasvuperioodi jooksul ning hiljem lubi seinatarindis karboniseerumisprotsessi käigus. Selle tulemusena ületab seotud ületab seotud CO₂ tootmisprotsessides õhkupaisatud koguse. On alust arvata, et kanepibetooni kasutamine võimaldaks tasakaalustada kasvuhoonegaaside emissioone ning panustada Kyoto protokollis seotud rahvusvahelistesse eesmärkidesse. (RT II 2002, 26, 111)

2. Sideainete ülevaade

Kanepibetooni näol on tegemist Eestis suhteliselt vähetuntud materjaliga, mille tõttu otsustasin katsetada kolme erineva sideainega, et koguda enam praktilisi alusteadmisi. Täpsete eestikeelsete terminite puudumise tõttu kasutatakse käesolevas töös kanepibetooni kui koondmõistet. Selle all peetakse silmas savil, õhkclubjal ning hüdraulilisel lubjal põhinevaid kanepiluusegusid. Inglisekeelne termin *hemcrete* tähistab seevastu üksnes lubjapõhiseid segusid, savi puhul leidub mõiste *hemp-clay* kasutamist. (Busbridge, Rhydwen 2010) Õpingute käigus omandatud teadmiste põhjal võis oletada, et lubja kasutamine segus võimaldab sarnase tugevuse juures madalama mahukaaluga seinte püstitamist kui savi-kanepiluu segu, kuid samas puudus isiklikust kogemusest tulenev võrdlusmoment savi ning lubja vahel kanepibetonsegudes.

Kuna üheks kanepibetooni kasutuselevõtmise põhjenduseks võib pidada potentsiaalselt madalat energiakulu nii ehituse kui hoone eluea jooksul, tuleb arvesse võtta ka erinevate sideainete valmistamiseks kuluvat energiahulka. Ehkki lubjapõletamisel on sisendenergia märksa suurem kui savi kaevandamise puhul, võivad sobivamad ehitustehnilised omadused tähendada kokkuvõttes tunduvalt väiksemaid ülalpidamiskulusid. Samuti olenevad sideaine valikust väga suurel määral ka teised tarindi ehitusfüüsikalised omadused, mis omakorda mõjutavad nii sisekliimat kui ka hoone vastupidavust ilmastikule.

2.1. Savi

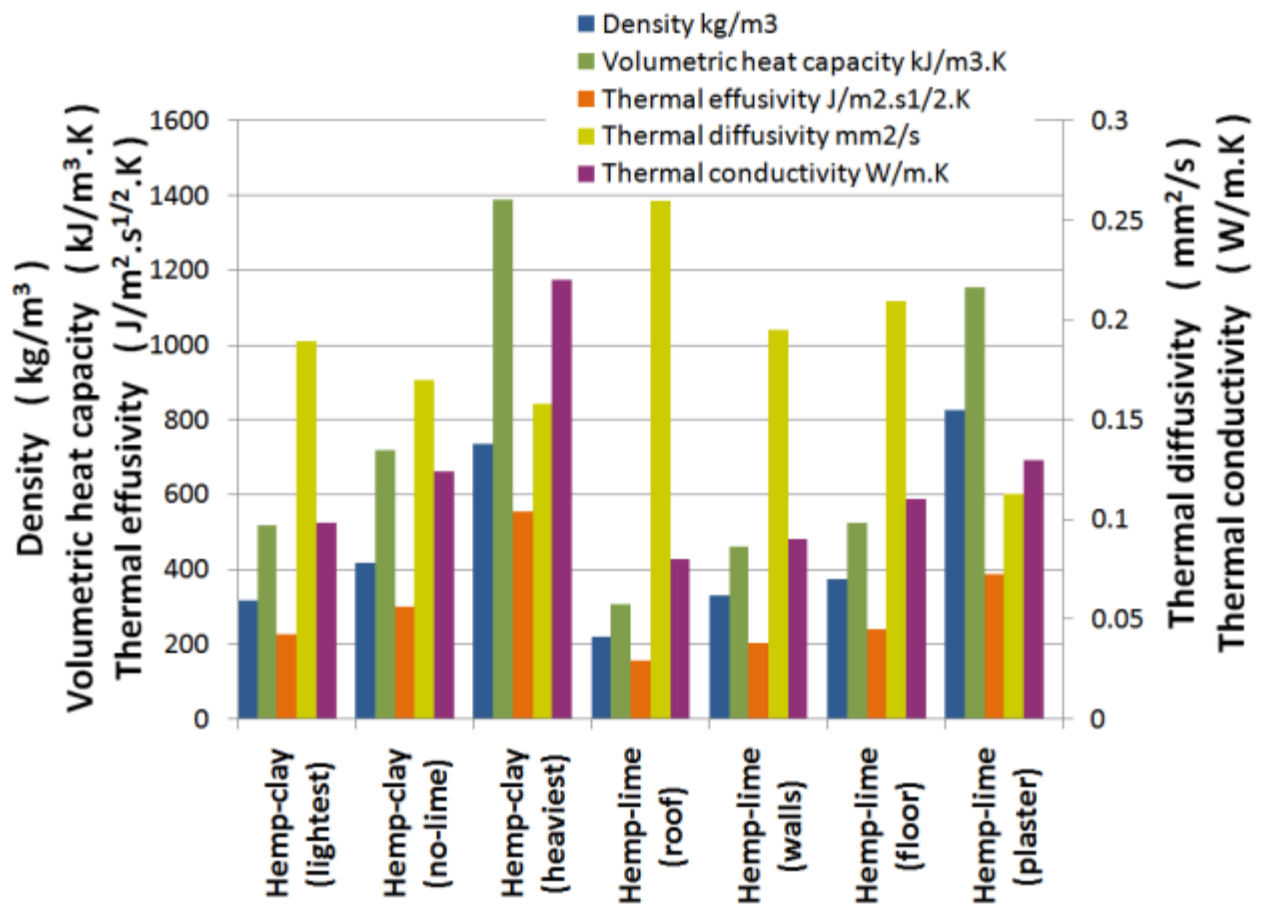
Savi on ehitusmaterjalina küll Eesti ehitustraditsioonis tuntud, ent seda on kasutatud eelkõige massiivseinte, mitte kergsegude valmistamiseks. Enamasti on Eestis selleks kasutatud punast savi, kuna see on ehituseks siinsetel aladel leiduvatest kättesaadavatest savitüüpidest kõige sobilikumate omadustega.

Savi kasutatakse kanepibetooni valmistamiseks oluliselt vähem. Üheks loogiliseks põhjuseks võib pidada asjaolu, et savi on vastuvõtlikum niiskuskahjustustele, samuti nõuab saviga töötamine hoolikamat tähelepanu ning asjassepuutuvad oskused on vähem levinud. Lisaks on sobiva kvaliteediga savi kättesaadavus kaubandusvõrgust kehvem kui lubja puhul. Erinevalt lubjast ei toimu savisegudes karboniseerumist, vaid üksnes tahenemine kuivamise läbi. See tähendab, et sama tiheduse juures on savisegu survetugevus madalam lubjasegust.

Siiski on Busbridge ja Rhydwen oletanud, et savi aitaks veelgi vähendada kanepibetooni ökoloogilist jalajälge, kuna toorsavi töötlemisega võrreldes paiskub lubjakivi põletamisel õhku märkimisväärselt suurem kogus süsihappegaasi. Oma töös viitavad autorid ka asjaolule, et savi leidub suurtes kogustes kõikjal üle maailma. (Busbridge, Rhydwen 2010, lk 164)

Kuigi väidet ei saa pidada iseenesest ekslikuks, tuleb seejuures silmas pidada, et savi esineb väga erinevates koostistes ning vähemasti Eestis on ühetaoliste omadustega savi leiukohad suhteliselt väikesed võrreldes lubjakiviga. Ühest küljest võib niisiis väita, et materjali töötlemine kanepibetoonis kasutamiseks tekitab vähem heitgaase kui lubja põletamine, ent võib sageli olla töömahukam ning suurtes mahtudes tuua kaasa suuremaid töökulusid nii töötlemisel kui paigaldamisel, sõltuvalt savitüübist ning hoone spetsiifikast.

Käesolevas töös katsetati Eesti saviehitustraditsioonis ehk levinuimat punast savi. Eesmärk oli sobitada kokku läbiproovitud sideainet seni kasutamata täiteainega, tegemaks praktiliste kogemuste põhjal järeldusi kasutus- ning paigaldusvõimaluste kohta. Seeläbi oli võimalik luua hea võrdlusmoment lubjapõhiste segudega ning selgitada mõlemalt poolelt välja nii võimalikke eeliseid kui ka nõrkusi.



Graafik 3 Savil ja lubjal põhineva kanepibetooni omadused (Allikas: Busbridge & Rhydwen 2010, lk 166)

Nagu graafikult näha, on lubjal põhineva kanepibetooni soojusjuhtivus madalam saviga valmistatud segust, millest tulenevalt on madalamad ka hoone küttekulud. Kuigi toodud näitajate põhjal ei ole võimalik üheselt väita, et lubja kasutamine sideainena oleks igakülgsest enam põhjendatud savist, on siiski oluline märkida, et lubja kasutades saavutatakse suure tõenäosusega madalamad hoone ülalpidamiskulud. Lisaks ei piirdu savi kui seguks sobiva tooraine saamine selle maast väljakaevamisega, vaid nõuab täiendavat töötlemist ning toob sellele lisaks kaasa mõningad lubjaga välditavad riskid. Lõplikult ühe või teise sideaine kasuks otsustamine nõuab väga paljude tegurite arvessevõtmist, mis sõltuvad ehitatava hoone geograafilisest asukohast, hoone ja kasutatava ehitustehnoloogia spetsiifikast ning ümbritsevast kliimast.

2.2. Õhklubi

Õhklubja kasutamist ehituses võib katsetatavatest segudest pidada kõige laialdasemaks. Nagu viitab ka nimi, taheneb õhklubi kokkupuutel õhuga ehk kuivades. Sel viisil seob materjal endasse süsihappegaasi, läbides protsessi, mida nimetatakse karboniseerumiseks. Kanepibetonist seinavalu juures võib oletada, et protsess on aeglasem kui hüdraulilise lubja puhul ning nõuab mõnevõrra hoolikamat lähenemist. Et tahenemise algus on aeglane, tuleb järgmise kihi valamisega kauem oodata, mis tähendab ehitusprotsessi pikendamist. Nimetatud erinevus kaob aga kanepibetonist plokkide valmistamisel – sellisel juhul on viimaste seinasetamise ajaks karboniseerumise tulemusena juba saavutatud piisav survetugevus. Miinuseks on sellise seinapüstitusviisi juures teisalt aga vajadus tihedama segu järele, mis tagaks nende täieliku vastupidamise transpordile ja käsitlemisele. (Sparrow, Stanwix 2014, lk 32)

Teisalt kaob sellise ehitusviisi juures vajadus oodata segu tahenemist ning väljaspool ehitushooaega valmistatud plokkidest on võimalik laduda seinad üles võrdlemisi kiiresti. Võimalik on kasutada ka kombineeritud lahendust, kus plokkidest laotud seina väliskülge valatakse ümbritsev suhteliselt õhuke kanepibetooni kiht, mis suurendab soojapidavust ning aitab ära hoida külmasildade teket. (Sparrow, Stanwix 2014, lk 35) Niisiis ei saa üheselt väita, et üht tüüpi lubi oleks igas olukorras sobivam, ent erinevate tootmis- ja ehitustehnikate juures tuleb olla teadlik kasutatava lubja omadustest ning mõjudest kuluarvestusele.

Ehkki kaubandusvõrgust on õhklubja võimalik osta ka pulbriks jahvatatud kujul, otsustasin katsetes kasutada traditsioonilist õhklubjapastat. On alust arvata, et sideainena kujutab see endast sobivamat valikut pulberlubjast, kuna veekeskkonnas hoituna säilitab lubi paremad sidumisomadused.

2.3. Looduslikult hüdrauliline lubi

Hüdraulilistel sideainetel on omadus tarduda veega segamisel hüdratatsiooniprotsesside ehk veemolekulide poolt ümbritsemise tulemusena. Selle protsessi käigus sideained kivistuvad ning moodustuv tehiskivi on püsiv ka veekeskkonnas. Looduslikuks hüdrauliliseks (mitte ainult õhu, vaid ka veega kokkupuutel tahenevaks) lubjaks nimetatakse niisugust sideainet, mis saadakse looduslike, 8 – 25 % saviühendeid sisaldavate mergellubjakivide põletamisel. Saviühendid reageerivad põletamise käigus CaOga, mille tulemusel moodustuvad dikaltsiumsilikaadid ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), kaltsiumaluminaadid ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) ja dikaltsiumferriidid ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Hüdraulilises lubja koostis on umbkaudu järgmine: 40 – 60 % CaO (kustutamata lubi), 6 % MgO (magneesiumoksiid), 6 % CO₂ (süsihappegaas). Looduslikke hüdraulilisi lubjasiid klassifitseeritakse vastavalt survetugevusele: NHL 2, NHL 3,5 ja NHL 5, kusjuures NHL 2 on nõrgalt, NHL 3,5 mõõdukalt ja NHL 5 silmapaistvalt hüdrauliliste omadustega. (Jänes 2006, lk 21) Lühendi NHL ingliskeelne tähendus seejuures on *naturally hydraulic lime* ehk eesti keelde tõlgituna looduslikult hüdrauliline lubi.

Kanepibetoonist seinatarindite ehitamiseks sobib looduslik hüdrauliline lubi väga hästi oma kiire tahenemise alguse poolest. Ehitusplatsil tähendab see, et seinavalu jaoks püstitatud raketised on võimalik vähema aja möödudes demonteerida ning asuda järgmise kihi valamise juurde. Õhkclubja karboniseerumine (süsihappegaasi sidumine, mille tulemusena lubi taheneb) on palju aeglasem, mistõttu raketiste eemaldamisega peab tunduvat kauem ootama. Kui sellega kiirustada, võib sein enese raskuse all kokku variseda, kuna sideainete karboniseerumisest tulenev kivistumine on toimunud vaid osaliselt. Hüdrauliliste lubjade puhul algab tahenemisprotsess märjalt ning sellele lisandub õhuga kokkupuutel toimuv aeglasem karboniseerumine. (Sparrow, Stanwix 2014, lk 44) Lisaks on uurimistulemused näidanud, et kanepiluu ja loodusliku hüdraulilise lubja segudele on teiste lubjasegudega võrreldes omane kõige kõrgem veeauru läbilaskvus ning kuivamiskiirus, samas kõige aeglasem veemavus uputamisel ja kapillaartõusu mõjul. (Arizzi et al 2015, lk 1)

3. Metoodika

Kanepibetooni füüsikalisi ning ehitustehnilisi omadusi on kirjeldatud läbi arvukate teadustööde. (Berardi et al 2016, lk 3) Materjaliga tehtud laboratoorseid katseid on puudutatud erinevatest perspektiividest, tänu millele on võrdlemisi vähetuntud materjaliga seostuv kompetents kasvamas arvestatava kiirusega. Selle taustal näis keeruline pakkuda täpsustavaid teadmisi, viimata läbi pikaajalisi uuringuid. Lähtudes niisiis asjaolust, et Eestis pole teadaolevalt veel ühtki kanepibetoonist konstruktsiooni püstitatud, paistis asjakohase eesmärgina panuse andmine praktilise materjalitundmise arengusse läbi otsese tööprotsessi kirjeldamise, kitsaskohtade ja võimalike ohtude esiletoomise. Seeläbi sooviti ühtlasi seada ka teoreetiline alus tööjärgse seire teostamiseks.

Materjalikatsetes seati esmalt eesmärgiks sobivaima koostise väljaselgitamine õhkclubjal ning savil põhinevate kanepibetoonsegude puhul. See tähendab, et püüti leida kompromissi võimalikult väikese mahukaalu ning piisavalt kõrge survetugevuse vahel. Et materjali ei kasutata reeglina kandekonstruktsioonide püstitamiseks, on piisava survetugevuse all silmas peetud materjali vastupidavust eelkõige omakaalukoormusele. See teadmine osutub möödapääsmatuks korraga valatava segukihi mahu üle otsustamise juures. Kui juba valatud seinaosale lisatav järgmine segukiht on liialt suure kaaluga, võib konstruktsioon puruneda omaenese raskuse mõjul. Lõpliku tahenemise järel võib segu survetugevus olla tunduvalt kõrgem, ent täielikult kuivamata savi või karboniseerumata lubi ei pruugi toimida piisavalt tugeva sideainena. Lisaks vajub segu suurema raskussurve mõjul tihedamaks, millega kaasneb pooride ja tühimike koguruumala ning tarindi soojapidavuse vähenemine.

Sparrow ja Stanwix on juhtinud tähelepanu liialt suurele kanepiluu tolmu sisaldusele kui võimalikule probleemi seina koospüsümise juures. Autorid toovad näite praktilisest ehituskogemusest, kus kõrge tolmusisaldusega kanepiluu kasutamine tõi kaasa tarindi lagunemise omaenese raskuse mõjul. (Sparrow, Stanwix lk 77) Käesolevas töös kasutatud kanepiluu näis sisaldavat küllaltki palju tolmu, ent varasema kogemuse puudumise tõttu oli hinnang subjektiivne. Huvitavaid küsimusi pakkus pallituna seisnud kanepiluu ning kiudude võimalikud muutused nende koostises või füüsikalistes omadustes. Olulise tähelepanekuna tuleb esile tõsta luude tavapärasest väiksemat poorsust – kokku surudes polnud see kuigi elastne. Pallis, iseäranis selle välimises osas oli materjal seisnud pikaajase surve all, mistõttu võis oletada, et selle struktuur oli vähem õhuline kui värskest koristatud kanepiluu puhul. Tegelikud muutused materjali füüsikalistes omadustes ei pruukinud olla kokkuvõttes

märkimisväärsed, kuid võib öelda, et kanepiluu ladustamistingimustel on kahtlemata silmaganähtav mõju viimase kvaliteedile.

Et Eestis on ehituseks sobiva kanepiluu hankimine suhteliselt keeruline ning välismaalt hankimine näidisseina ja katsetuste jaoks tarvilikus väikestes kogustes suhteliselt kulukas, ei jäänud lõputöö jaoks materjali hankides palju valikuid. Seetõttu viidi katsed läbi 7 aastat varem koristatud ning pallituna kütteta ruumis betoonpõrandal seisnud kanepiluuga, mida võis käsitleda jääkmaterjalina. Ühest küljest kujutas see eelmainitud tähelepaneku taustal potentsiaalset probleemi, kuna teadmata olid mõjutused hoiutingimuste ja võimalike kahjurite poolt. Seni läbiviidud teadustöodes ei leidunud tähelepanekuid tolmusisalduse mõju kohta kanepibetonsegudele ning pikaajaliselt kütmata ruumis seismist võis taimse materjali kvaliteedile pidada pigem kahjulikuks. Teisalt aga osutas aga seisnud materjali kasutamine võimalusele näha veidi laiemat pilti üksnes tellimuspõhisest ehitusmaterjalide tootmisest ning paotada ust ka jääkmaterjalina seisva kanepiluu kasutamisega seotud uurimisvaldkonda.

Katsetes kasutatud punane savi pärines Lätist ning oli haamerveskis jahvatatud. Traditsiooniliselt on väljakaevatud savi jäetud talveks hunnikusse seisma, et läbikülmumine lõhuks selle struktuuri. Mõistagi pole tänapäevasel ehitusmaastikul mõeldav sedavõrd aeglase ning ilmastikust olenevate meetodite kasutamine, mistõttu on möödapääsmatu toorsavi jahvatamine enne segus kasutamist. Liialt suurte tükide sisaldus võib muuta segu ebahütlaseks, tuues kaasa võimalikke purunemisi. Niisiis peegeldub siin üks eelmainitud töötlemisprotsessidest, mille kaasamist savisegude tootmisahelasse tuleb arvesse võtta sisendenergiasse puutuva võrdluse juures teiste sideainetega.

Teise sideainena kasutati Rakke Nordkalk õhklubjapastat. Erinevalt savist ning hüdraulilisest lubjast, mis mõlemad on pulbri kujul, paistis õhklubjast ühtlase segu valmistamine oma struktuuri tõttu tunduvalt tülikam. Oletati, et õhklubjapasta segamine kanepiluuga võib tekitada olukorra, kus kanepiluu kinnitub lubjakogumite ümber ega tungi nende sisse. Ainsa teadaolevalt ilmunud ülevaatliku kanepibetooni käsiraamatuna ei käsitle ka Sparrow ja Stanwixi *The Hempcrete Book* lubjapasta kasutamist ehituses – esineb üksnes viiteid pulberlubja kasutamisele. Niisiis oli siin savist ja hüdraulilisest lubjast mõneti selgusetum, missuguseks kujuneb segu valmistamise protsess ning kas sellega võib kaasneda tõrkeid.

Kolmandaks kasutati Prantsustmaal St. Astieri tehases valmistatud looduslikult hüdraulilist lupja margiga NHL 3.5 – segu survetugevus on niisiis 3,5 MPa ruutmeetrile. Teistel sideainetel vastav spetsifikatsioon puudub. Eeldused seinaseguks näisid hüdraulilisel lubjal põhineva kanepibetooni

juures kõige paremad, kuna eelkirjeldatud ühtlane segunevus ning kiire tahenemine kui kaasnevad omadused viitasid potentsiaalselt kiiremale ehitustempole, kui võimaldaks õhklubi või savi.

Katsete kõige otsesemaks väljundiks oli eelkõige siiski näidisseina jaoks sobivaima segu leidmine. Kuna püstitatava tarindi ülesehitus erineb soojaläbivuse seisukohast Ehitusseadustikule vastava välistarindi omast (vt. tabelid 1-2), eelkõige seinapaksuse poolest, siis oli eelmainitule täiendavaks kitsenduseks eesmärk tagada seina piisav tugevus ka väiksema läbimõõdu juures.

Eelneva uurimistöö põhjal oli teada, et hüdraulilise lubja tahenemine algab juba enne kuivamist ning selle tugevus ja vastupidavus niiskusele on märgatavalt suuremad õhklubjast. Savi vastupidavus mõlemast aspektist on veelgi madalam. Traditsiooniliselt on Eestis kasutatud erinevaid massiivsavitehnikaid, ent kergsavi kuulub kaasaegsemate ehitustehnikate valdkonda. Olulisim erisus seisneb ehitatava hoone kasutusotstarbes. Massiivsavist on traditsiooniliselt ehitatud aitasid ja lautasid, veidi harvem ka elamuid. Kergsavi soojusläbivus on oluliselt madalam kui massiivsavi puhul, mistõttu selle kasutamine on kõige põhjendatum just eluhoonetes.

Kergsaviga kaasnevad aga massiivsaviga võrreldes biomassi oluliselt suurema sisalduse tõttu hoopis teistsugused potentsiaalsed ohud kui massiivsavi puhul. Kuna kanepiluu-savisein kuivab välja märksa aeglasemalt kui kanepiluu-lubjasein, võib kuivamisperioodil tekkida oht hallitussentele soodsa elukeskkonna kujunemiseks. Massiivsaviseinas ei leidu enamasti seentele sobilikke toitaineid, mistõttu aeglane väljakuivamine ei kujuta endast sarnast probleemi. Katsetega sooviti niisiis ka näitlikustada kergsavi kui biokomposiidiga kaasnevaid võimalikke kitsaskohti võrreldes lubjasegudega.

Esialgsete katsed viidi läbi üksnes savi ja õhklubjaga, kuna eelmainitud kogutud teadmiste põhjal oli võimalik olla veendunud, et kõige väiksema sideainesisaldusega õhklubjasegu retsept toimib vähemalt sama edukalt ka hüdraulilise lubja puhul. Tõenäoliselt võiks hüdraulilisest lubjast valmistada veelgi kergemaid, ent küllalt tugevaid seinatarindeid. See kujutab endast aga omaette uurimisteemat ning detailne käsitus jäeti teadlikult kõrvale käesoleva töö fookusest.

Õhklubja ning saviga valmistati plokid mõõtmetega 150x150x150mm, vahekordades 4:1:1, 5:1:1, 6:1:1, 7:1:1 ja 8:1:1. Näidisseina väikese paksuse tõttu ei peetud põhjendatuks katsetada segu, mis sisaldaks üle 2 korra vähem sideainet kui Sparrow ja Stanwixi soovitatud - liiatigi, et viimane oli mõeldud kasutamiseks suurema läbimõõduga seinte püstitamiseks. Võrdsete mõõtmetega katseplokkide saamiseks valmistati veekindlast vineerist raketised, mis olid suletavad ning avatavad keermelattide abil. (vt. lisa 3) Katseplokkide mõõdud olid 150x150x150mm, lähtuvalt näidisseina

paksusest. Näidisseina eskiisprojektiga (vt. lisa 12) ette nähtud avade suurused puitsõrestikus jagati ühe ploki ruumalaga ning saadud arvu korrutati ühe ploki kaaluga, leidmaks seinatäite terviklikku kaalu – Kummagi seinasektsiooni maht oli seejuures ligikaudu 100 plokki.

Pärast kuivamist hinnati plokkide vastupidavust ning valiti välja sobivaim koostisosade vahekord, mida kasutati järgnevate survetestide läbiviimisel. Valitud koostisega valmistati igast segust 5 plokki, mille kaalu ja vastupidavust survele mõõdeti iga 24 tunni järel nelja ööpäeva jooksul, kusjuures iga katse jaoks kasutati uut varasemalt koormamata plokki.

Segu sobivuse esialgseks hindamiseks kasutati eelnevalt kirjeldatud meetodit, mida soovitab The Hempcrete Book. Segust vormitakse peopesa suurune ümmargune pall ning surutakse nimetissõrm sellest läbi. Kui sõrm läheb pallist viimase purunemata läbi, on tegemist liialt sideainerikka seguga – palli laialipudenemise korral on sideaine osakaal vastupidiselt liiga väike. Sobiva koostisega kanepibetoonsegu võib autorite väitel ära tunda selle järgi, kui sõrme palli sisse surudes läheb viimane keskelt pooleks. (Sparrow, Stanwix 2014, lk 200)

Kirjeldatud protsessi põhjal sooviti niisiis leida vastuseid järgnevatele küsimusele:

- Missuguse fraktsiooniga kanepiluu sobib kõige paremini kanepibetoonsegude valmistamiseks?
- Missuguse koostisega segud tagavad piisava vastupidavuse näidisseina omakaalule võimalikult madala mahukaalu juures?
- Kui palju erineb õhklubjal, hüdraulilisel lubjal ja savil põhinevate kanepibetoonide mahukaal?
- Kui palju erineb õhklubjal, hüdraulilisel lubjal ja savil põhinevate kanepibetoonide kuivamiskiirus sisetingimustes?
- Missugused on näidisseina püstitamiseks sobivaima koostisega õhklubjal, hüdraulilisel lubjal ning savil põhinevate kanepibetoonide ligikaudsed survetugevused? (24 h / 48 h / 72 h / 96 h pärast valmistamist)
- Kas savil, hüdraulilisel lubjal või õhklubjal põhineva kanepibetoonseguga kaasneb märkimisväärsed probleeme?
- Kui pikk on näidisseina sektsioonide väljakuivamisperiood?

4. Materjalikatsed

Esmased katsetused viidi läbi 1:4 kuni 1:8 sideaine ning kanepiluu vahekorras segudega. Otsuse tagamaadeks olid ühest küljest praktilised soovitusel lubjasegu kohta Sparrow ja Stanwixi poolt, kuid ka savisegu puhul näis ebaotstarbekas kasutada enam kui 25 % sideainet, kuna viimane moodustab segu kaalust valdava enamuse, iseäranis pärast väljakuivamist. Katsete eesmärgiks oli aga leida koostised, mille juures plokid oleksid võimalikult kerged, pidades samas vastu näidisseina omakaalukoormusele. Niisiis leiti, et savikoguse suurendamine segus ei annaks ilmselt näidisseina puhul tugevust juurde, vaid üksnes muudaks seda raskemaks, suurendades otstarbetult savisektsiooni omakaalukoormust. Lisaks oleks toonud kaasa segu aeglasema kuivamise, millest tulenevalt omakorda võinuks kujuneda soodsam elukeskkond hallitussentele.

Kergploki saamiseks tuli asetada segu vormi suhteliselt õhuliselt ning üksnes õrnalt kinni vajutades, aitamaks veelgi kaasa väiksema mahukaalu saavutamisele. Sellest lähtudes määrati minimaalseks sideainesisalduseks katseplokkides 12,5 % ehk 1:8. Erialase savipraktika käigus omandatud kogemustele tuginedes võis loogiliselt oletada, et sellest väiksema sideainesisaldusega segu püsib õhuliselt vormi asetatuna koos üsna kehvasti, eriti kuivamisperioodil seinale mõjuva veeraskuse tõttu. Niisiis määrati koostised sellisesse vahemikku, milles tõsiste probleemide esinemine oleks viidud miinimumini. Näidisseina puhul toimivate segude väljaselgitamise tulemusena loodeti saavutada esmane lähtepunkt, millele tuginedes oleks võimalik edasist uurimistööd efektiivsemalt piiritleda. Et tegemist on võrdlemisi vähetuntud segutüüpidega, siis tuleb võrdluspunkti olemasolu nende käsitlemisel kahtlemata kasuks.

Näidisseina omakaalukoormuse leidmiseks korrutati ühe ploki kaal sektsioonile vastavas mahus plokkide arvuga, mis oli omakorda saadud eskiisprojekti põhjal arvestatud sektsiooni mahu jagamisel ühe ploki mahuga. Kusjuures lubjasektsioonis tuli eraldi arvestada alumine hüdraulilisest lubjast ning ülemine õhkclubjast osa. Kasutatavate segude mahukaalu leidmiseks tuli hinnata vahemikus 4:1:1 kuni 8:1:1 plokkide üldist koospüsivust ning vastupidavust survele. Plokke kaaluti iga 24 tunni järel, eesmärgiga kaardistada segude kuivamiskiirust toatemperatuuril. Katseplokkide kuivatamine köetud ruumi suhteliselt stabiilsetes tingimustes paistis algatuseks kõige tõepärasemaid võrdlusmomente pakkuv lähenemine, kuna välitingimuste kõikumiste arvesse võtmine erinevate kanepilusegude kuivamisel kujutanuks endast jällegi hoopis detailsemat tähelepanu nõudvat uurimistööd. Pädev dokumenteerimine eeldanuks täpseid tulemusi võimaldavate mõõteriistade ning meetoodika kasutamist, mille eelduseks võib aga omakorda pidada käesoleva töö põhifookuseks olevat esmast materjalitundmist.

Kuivamisaja mõõtmise ning erinevate koostiste hindamisele järgnes sobivaimas vahekorras segu survetugevuse katsetamine iga 24 tunni järel 96-tunnise perioodi jooksul. Valmistati 5 saviplokki, 5 õhklubjaplokki ning 5 hüdraulilise lubja plokki (vt. Lisa 4). Kuivanud plokkide ligikaudse survetugevuse määramiseks kasutati käepärast meetodikat – ploki peale asetatud ämbrisse valati liiva, kuni plokk hakkas silmnähtavalt deformeeruma või lagunema (vt. lisa 5). Seejärel kaaluti ämber koos liivaga ning saadud tulemus näitas materjali ligikaudset taluvuspiiri survele. Oluline oli asetada ämbri alla plaat, mis ühtlustas sellest tulenevat survet kogu ploki pindalale (vt. lisa 10). Suurema surve avaldamiseks oli tarvis kasutada kahveltõstukit, mis võimaldas ühtlaselt plokkidele avaldada kuni 250 kg suurust survet (vt. lisa 11).

4.1 Sisetingimustes kuivanud katseplokkide seire

Erinevate sideaine-täiteaine suhetega segudest valmistatud plokkide kaaluti nädala jooksul iga 24 tunni järel, selgitamaks välja ligikaudseid erinevusi ajas, mis kulub kogu niiskuse plokkidest väljakuivamiseks erineva koostisainete osakaaluga õhklubja- ning savisegude puhul. Saadud andmete põhjal oli eesmärgiks teha esmased järeldused segude suhteliste erinevuste kohta selles osas, mis puudutab nende lõpliku tugevuse saavutamist seina valatuna.

Erinevused kuivamiskiiruses kaalu vähenemise perspektiivist olid märkimisväärsed. Suurema täiteaine ja väiksema sideainesisaldusega plokkid kuivasid kiiremini, kuna ka veesisaldus oli neis protsentuaalselt veidi madalam. Näiteks 8:1:0,3 lubjasegu oli täielikult kuivanud 4 ööpäeva möödudes, samas kui 4:1:0,3 õhklubjaseguga kuluks selleks 6 ööpäeva.

Sarnaseks kujunes olukord ka savisegude puhul – 8:1:1 vahekorras seguga valmistatud plokk oli kuivanud 7 ööpäevaga, samas kui 4:1:1 segul kuluks selleks 10 ööpäeva. Niisiis selgus, et savi üldine kuivamiskiirus on madalam kui lubja puhul. Tulemus oli võrdlemisi ootuspärane, ent suurema sideainesisaldusega saviplokkide juures täheldati probleemi, mida ei tekkinud ühegi lubjasegu puhul. 4:1:1, 5:1:1 ja 6:1:1 plokkide alumistel pindadel, mille kuivamine oli õhu väiksema ligipääsu tõttu pärsitud, võis näha hallitust (vt. Lisa 6-7). See erinevus võis tuleneda ka ebaühtlustest käsitsivalmistatud plokkides, mistõttu olnuks ennatlik teha lõplikke järeldusi lahjemate segude kohta kirjeldatud tulemuste põhjal.

Ehkki plokkide ümberpööramise ajal kadus hallitus paari ööpäeva jooksul, viitas tulemus selgele kitsaskohale savi-kanepiluusegude kasutamise juures Eesti võrdlemisi niiskes kliimas. Kuigi savi aeglasema kuivamise tõttu võis taolist probleemi ette näha, polnud ootuspärane, et see võib esineda isegi sisetingimustes suhteliselt väikese mahuga plokkide puhul. Välingimustega võrreldes oli ruumi õhuniiskus suhteliselt madal ning temperatuur kõrgem. Siiski kuivasid plokkide aluspinnad takistatud õhu juurdepääsu tõttu sedavõrd aeglaselt, et kujunes sobilik keskkond hallituse kasvuks. Oluline on meeles pidada probleemi ka seetõttu, et savi-kanepiluusegust tarindites võib välise niiskussurve tõttu äärmuslikel juhtudel kujuneda sarnane olukord, mis kujutaks endast ohtu nii tarindile kui ka elanike tervisele.

Kuigi õhklubjaplokkide juures ei täheldatud ühegi segu puhul hallituse teket, kaasnes nende valmistamisega teistsugune problemaatika. Lubjapasta sisaldab vett, kuid kasutatud Rakke Nordkalk pasta puhul oli selle täpne kogus teadmata. Oli selge, et lisades kilogrammile lubjapastale liitri vett, oleks tulemus teistsugune kilogrammile pulberlubjale liitri vee lisamisest. Niisiis valmistati esimene katseplokk valmistati siiski praktilise lähtepunkti ja võrdlusmomendi saavutamiseks 4:1:1 retseptiga. Katsekuuli vormimisel ilmnes, et segu on liialt vedel ning kuul ei püsinud hästi koos. Veekogust segus vähendati 1 liitrit 0,3 liitrile, ning kuulikatset korrates paistis, et segu on sobiv näidisseinas kasutamiseks. Sellest oli märgatavalt mõjutatud ka plokkide mahukaal.

Lubjasegust plokkide kuivamisel oli ilmne, et nende välispind (vt. lisa 8) on tunduvalt tugevama struktuuriga saviplokkidest (vt. lisa 6). Mõneti oli ka lubjasegu valmistamine lihtsam, kuna selle kaalule vastavalt kolmandiku mahus vee lisamisel oli võimalik valmistada suhteliselt paks, ent siiski voolav lubjapiim. Seguvispliga põhjalikult segamisest hoolimata kippus savisegus tekkima üksikuid saviklompe, mis ei segunenud algul kuigi ühtlaselt. Õhklubjapiimaga segunes kanepiluu aga lühema segamisaja järel ning ebaühtlusi näis esinevat vähem. Samas toimus katseplokkide jaoks segu valmistamine käsitsi – kasutades segumasinat oleks tõenäoliselt olnud lihtsam taolisi ebaühtlusi vältida.

Õhklubjaplokkid, nagu ennist mainitud, kuivasid kiiremini ning lõpptulemus oli mehaanilistele kahjustusele ning ühtlasele raskussurvele vastupidavam kui samas vahekorras seguga valmistatud saviplokkid. Kuna jahvatatud savi mahukaal on suurem pulberlubja omast, kaalusid ka saviplokkid samas vahekorras lubjaplokkidest märgatavalt rohkem. 4:1:1 saviplokk (vt. lisa 7) kaalus vahetult pärast vormimist 2764 g, samaväärne õhklubjaplokk aga 1733 g (vt. lisa 8). 8:1:1 segude puhul oli erinevus märgatavalt väiksem – lubjaplokk kaalus märjalt 1758 g (vt. lisa 9) ja saviplokk 2097 g (vt. lisa 6).

4.2. Välitingimustes kuivanud katseplokkide survetugevuskatsed

Saviplokkide märgkaalud: 2764 g, 2865 g, 2791 g, 2837 g, 2891 g

Saviplokkide kaalud pärast kuivamist: 1701 g, 1827 g, 2759 g, 1797 g, 1850 g

Tabel 4. Saviga 4:1:1 vahekorras katseplokkide ligikaudse survetugevuste muutumine

4 ööpäeva jooksul

kuivamisaeg	0 h	24 h	48 h	72 h	96 h
Survetugevus	15 kg	49 kg	68 kg	75 kg	98 kg

Õhklubjaplokkide märgkaalud: 1733 , 1780 , 1809 , 1756 , 1824

Õhklubjaplokkide kaalud pärast kuivamist: 876 g, 947 g, 993 g, 912 g, 1015 g

Tabel 5. Õhklubjaga 4:1:1 vahekorras katseplokkide ligikaudse survetugevuse muutumine

4 ööpäeva jooksul

kuivamisaeg	0 h	24 h	48 h	72 h	96 h
Survetugevus	25 kg	62 kg	98 kg	121 kg	156 kg

Hüdrauliliste lubjaplokkide märgkaalud: 2729 g, 2816 g, 2783 g, 2805 g, 2931 g

Hüdrauliliste lubjaplokkide kaalud pärast kuivamist: 1589 g, 1673 g, 1729 g, 1750g, 1787 g

Tabel 6. Looduslikult hüdraulilise lubjaga 4:1:1 vahekorras katseplokkide survetugevuse muutumine

4 ööpäeva jooksul

kuivamisaeg	0 h	24 h	48 h	72 h	96 h
Survetugevus	63 kg	177 kg	234 kg	-	-

5. Tulemused ning järeldused

Kanepiluu purustamine toimus käsitsi, mistõttu oli keeruline saavutada ühtlast fraktsiooni. Üldiselt võib siiski katsetustele tuginevalt öelda, et suuremate kanepiluutükkide kõrge sisaldus segus muudab selle valmistamise ning paigaldamise keerulisemaks, samuti võib sellega arvatavasti kaasneda väikseid ebaühtlusi segu tugevuses. Siiski ei paistnud kuni 5cm pikkuste tükkide sisaldus käsitsi segu valmistamisel probleeme tekitavat – segumasina puhul võivad pikemad tükid tuua kaasa segu kuhjumise ja takerdumise segamistruumlis, mis omakorda välistab ühtlase segunemise.

Õhkclubjaplokid osutusid sama koostisainete vahekorra juures tugevamateks ning kergemateks saviplokkidest. Üllatav oli aga asjaolu, et vahetult pärast valamisvormi eemaldamist näis 8:1:1 savisegu veidi tugevam sama koostisega lubjasegust. Kuigi viiepäevase kuivamisperioodi järel oli lubjasegust plocki tugevus kujunenud saviplokkist märkimisväärselt tugevamaks, jättis värskelt valmistatud segu pigem vastupidise mulje. Oluline on ka märkida, et kuigi savi oli värskena paremini koospüsiv, kulus lõplikuks kuivamiseks kauem aega kui lubja puhul. Lisaks täheldati kiusisalduse märgatavat positiivset mõju plokkide koospüsivusele. Segule andis see veidi väiksema poorsuse ning sellest tulenevalt ka madalama soojapidavuse. Koostisosade segamine oli kiusisalduse tõttuveidi tülikam ning aeganõudvam kui puhta kanepiluu puhul, kuid teisalt tähendas see kiu täielikuks eraldamiseks vajaliku ajakulu vältimist.

Kergseina ehitamiseks näisid põhimõtteliselt sobivat kõik katsetatud segud. 8:1:1 koostisega segust plokid püsisid koos, kuid pindmine struktuur oli iseäranis saviplokkide puhul suhteliselt kergesti pudenev. Õhkclubjaplokkide puhul püsis üldine struktuur küll paremini, kuid siiski näis õhukese näidisseina ehitamine niisugusest segust küllaltki riskantne. Suhteliselt nõrgalt seotud välispinnale osutub ka krohvikihi kandmine kahtlemata problemaatilisemaks. 7:1:1 ning 6:1:1 segude puhul olid plokid küll veidi tugevamad, ent varasema kogemuse puudumise tõttu ei paistnud nende kasutamine küllalt usaldusväärse variandina. Valida jäi veel 5:1:1 ning 4:1:1 segude vahel ning otsus langetati viimase kasuks. Kuna tegemist on kõige levinuma segukoostisega kanepibetoonehituses, peeti kokkuvõttes kõige otstarbekamaks kasutada kindlamat lahendust. Hinnanguliselt kaalus suurema sideainesisaldusega saavutatav tugevus üles madalama soojapidavuse, mida polnud seatud näidisseina puhul otseseks eesmärgiks.

4:1:1 koostisega segust plokkide märgkaalud olid järgnevatel vahemikes: savi 2764 g – 2891 g, õhklubi 1733 g – 1824 g, 7 kg, hüdrauliline lubi 2729 g – 2831 g. Täieliku kuivamise järel olid samad vahemikud vastavalt 1701 g – 1850 g, 876 g – 1015 g ja 1589 g – 1787 g. Niisiis osutus lõplikult kuivanud õhklubjaplokkide mahukaal oluliselt väiksemaks savi ning looduslikult hüdraulilise lubjaga valmistatud plokkidest. Lõplik kuivamiskiirus sisetingimustes oli seejuures 8:1:0,3 õhklubjaplokil 4 ööpäeva, 4:1:0,3 õhklubjaplokil aga 6 ööpäeva. 8:1:1 savisegust plokil kulus täielikuks kuivamiseks seevastu 7 ning 4:1:1 saviplakil 10 ööpäeva.

Survetugevuskatsed näitasid, et kõige madalama vastupidavusega olid saviplakid – värskest segust plakk hakkas deformeeruma 15 kilogrammise raskuse juures. Õhklubjaploki esimesed märgatavad deformatsioonid ilmnesid 25 kg ning looduslikult hüdraulilise lubjaploki puhul 63 kg juures. Oluline on märkida, et selline tugevus saavutati alles paari tunni möödudes segu valmistamisest. Värskest valmistatud segul puudus koospüsivus – sõrmega väikese surve avaldamine tõi kaasa katsekuuli täieliku purunemise. Lastes segul veidi seista ning aeg-ajalt segades aidati kaasa kanepiluude küllastumisele vee ja lubja seguga (vt. lisa 32). Seeläbi paranes märkimisväärselt segu koospüsivus, mida kontrolliti taas kuulitesti abil.

24 tundi kuivanud plokkide puhul olid tõsiseid deformatsioone põhjustavad surved savisegu puhul 49 kg, õhklubjasegul 62 kg ning looduslikult hüdraulilise lubja segul 177 kg, 48 tunni järel vastavalt 68 kg, 98 kg ja 234 kg. Selgelt ilmnes niisiis looduslikult hüdraulilise lubja eelis teiste segude ees. 72 tunni järel pidas saviplakk vastu 75 kg ning õhklubjaplokk 121 kg suurusele raskussurvele, 96 tunni järel olid väärtused vastavalt 98 kg ning 156 kg. Seejuures polnud olemasolevate vahenditega võimalik avaldada plokkidele suuremat survet kui 250 kg, mistõttu polnud ka võimalik mõõta looduslikult hüdraulilisest lubjast plokkide maksimaalset survetugevust 72 ning 96 tunni järel segu valmistamisest. Näidisseina lubjasektsiooni alumine pool plaaniti valmistada hüdraulilise lubjaga ning ülemine pool õhklubjasegust, mistõttu maksimaalne omakaalusurve seina kõige alumisele osale oluks märja segu puhul arvutuslikult ligikaudu 220 kg. Savisektsiooni arvutuslikuks kogukaaluks saadi aga ligikaudu 280kg. Niisugune kaal tähendanuks kogu seinasektsiooni pikkusele jaotatuna, et mahuliselt ühele katseplokile vastav osa seinast peab kandma 35 kilogrammist raskust.

Ehkki survekatsed saviplokkidega näitasid, et 24 tundi kuivanud segu purunes ligikaudu 49 kg juures, eelnes sellele märgatav kokkuvajumine. Tulles tagasi savi suhteliselt aeglase väljakuivamise juurde, kujutaks niisugune seinasektsiooni tihenemine endast veelgi soodustavat tegurit hallitusele sobivate tingimuste kujunemiseks: seinas olevate õhuvahede kogupindala vähenemisega langeks ka seinasektsiooni niiskustlõõgatus, mis võib enesega kaasa tuua katastroofilisi tagajärgi (Sparrow & Stanwix 2014, lk 75) Niisiis näis savisegu puhul täiteraketiste kasutamine riskantsena, kuna sooviti vältida hallituste kasvu seinatarindis. Savisektsiooni püstitamiseks kasutatud tehnoloogiat on täpsemalt kirjeldatud peatükis 6.4.1.

Survekatsetele tuginevalt võis olla üsna kindel, et omakaalusurvest tulenevad probleemid on 4:1:1 hüdraulilise ja 4:1:0,3 õhkclubjasegu juures välistatud. Katsete tulemused lubasid arvata, et tegeliku eluhoone välistarindis oleks tõenäoliselt võimalik ka väiksema savi- ja veesisaldusega segu kasutamine, kuid näidisseina 150 millimeetrise läbimõõdu juures oli tugevus soojapidavusest olulisem mõõde.

Kõige märkimisväärsimaks esinenud probleemiks katsetatud kanepibetonsegude puhul võib pidada hallituste levikut saviplokkidel, eelkõige aluspinnal. 8:1:1 ploki puhul näis hallituse levik üksnes pindmine (vt. lisa 7), kuid 4:1:1 ploki puhul oli see tunduvalt suurem, kattes kohati ligi poolt kogu ploki pindalast (vt. lisa 8).

Näidisseina järelseire puhul oli mitmetest teguritest tulenevalt keeruline formuleerida asjakohaseid ja sisukaid uurimisküsimusi, millele õnnestuks anda ka sisukaid ja tõepäraseid vastuseid, langes otsus peamiselt seinasektsioonide täielikuks kuivamiseks kuluva aja jälgimise kasuks. Mõistagi on tarvilik ka võimalike probleemide kaardistamine, kuid konkreetseid uurimisküsimusi oli nende puhul veidi keerulisem ette näha. Ehitusprotsessi kirjeldamise seisukohast on aga möödapääsmatult oluline omada ettekujutust erinevatele etappidele kuluvaks ajaks. Valamisjärgse kuivamisperioodi pikkusest sõltub viimistluskihi seinakandmise aeg, mistõttu selle kogemustepõhine ning pädev hindamine on eelduseks ehitusprojektide täpsele eelarvestamisele ja edukale elluviimisele.

6. Näidisseina püstitamine

Kanepibetooni, nagu ka teiste segudega tegelemise juures on väga oluline roll ilmastikul, eelkõige õhutemperatuuril. Tehes valamistõid 5° C juures võib kaasneda külmumisoht enne segu täielikku tahenemist. See rikub valatud osa terviklikkuse ning võib isegi põhjustada lagunemist. Niisiis oli võimalik valamistöödega alustada alles kevade hakul. Vajalikud eeltööd viisin läbi aegsasti, et olla kevade hakul juba aegsasti valmis näidisseina püstitamiseks (vt. lisa 13).

3D eskiisi põhjal oli võimalik arvestada vajamineva materjali hulka (vt. lisa 12). Oluline oli sõrestiku mõõtmetele vastavalt välja arvutada ka valatava segu hulk. Toetudes läbiviidud materjalikatsetele olid teada lubja- ning savisegu ligikaudsed mahukaalud, mis võimaldas välja arvutada kummagi seiniosa umbkaudse kaalu. Läbitud katsete põhjal oli jõutud esmaste järelduste ning arvestusteni, kui suure hulga segu valamisega võib hakata sein omaenese raskuse all deformeeruma. Seega oli võimalik paika panna seinavalu edenemise maksimaalne tempo, mille juures pole karta kahjustusi juba valatud kanepibetoonile. Lubja puhul oli see arvestuslikult suurem kogu sektsiooni märgkaalust ning põhimõtteliselt võinuks kogu sektsiooni valada ühekorraga. See tähendanuks aga lisaraketiste valmistamist, mis ei paistnud väikesemahulise projekti jaoks otstarbekas. Veendumaks täielikult kanepibetooni piisavas tugevuses, iseäranis sõrestikuga siduvate hammaste juures, jäeti 500 mm kõrgused raketised niisiis pärast täitmist 24 tunniks paika.

6.1. Sokkel

Sõrestik oli projekteeritud toetuma *rullaadile* ehk serviti laotud tellisereale. Termin esineb eestikeelses kirjanduses teadaolevalt üksnes Udo Tiirmaa aruandes Tartu Toomkiriku väliuurimisest, kusjuures kirjepilt antud kirjutises on *rulaad* (Tiirmaa 1971). Konsulteerides eriala spetsialisti Lea Strohiga selgus aga, et mõiste korrektne eestikeelne kirjepilt oleks pigem *rullaad*. Võimalikku algupära võib näha rootsikeelses terminis *rullskift*, mis võiks otsetõlkes tähendada *rullkihti*. Jan Torsten Ahlstrand defineerib oma teoses Arkitektuurtermer mõistet kui horisontaalset rida (kihti) servale asetatud teliskividest müüritisest. Saksa keeles esineb mõiste *rollschrift*, inglise keeles *brick-on-edge course* ning prantsuse keeles *assise de champ* või *assise de chant*. (Ahlstrand 2009).

Telliserea peamiseks funktsiooniks oli näidisseina sidumine ümbritseva hoovi arhitektuurse ilme ja tonaalsusega. Selleks, et vältida sadevee kogunemist rullaadi vastu ning hoida ära sellest tulenevaid kahjustusi, valati talvise tsementseguga 3cm kõrgune lint kogu rullaadi ulatuses (vt. lisad 14-15).

Betoonpõrandasse puuriti 8mm läbimõõduga augud, millesse asetatud keermelattide otsa hiljem fikseerida samuti ettepuuritud pesadega alumine vööjala. Puurimisaugud seati rullaadi kummagi otsa juurest kolmanda ja neljanda telliskivi vahele (vt. lisad 16-17). Nii oli võimalik vältida kivide lõhkumist keermelattide kinnitamiseks. Kui tellised olid prooviks maha laotud, jäi nende vuugivaheks läbivalt 9 mm, keermelati diameeter aga 8 mm (vt. lisad 18-19).

Algselt oli rullaadis plaanitud kasutada lubitsemementmörti, otsimaks kompromissi küllalt kiire tahtenemise ning madalama difusioonitakistuse piirimail. Renoveerimise ja restaureerimise õppeaine raames käsitleti rullaadi kui traditsioonilisel ehitusmaterjalil põhinevat niiskuspuhvrit sokli ning alumise seinapalgi vahel - väide tugines põhimõttele, et lubimördist vuukide veeauru läbilaskvus on suurem maakivi ja tsemendi omast. Seetõttu väljub suurem osa kapilaarniiskusest enne palgini jõudmist, lisaks tekib palgi alumise külje ja lubimördi vahel vähem umbseid niiskust hoidvaid kohti kui otse suurema difusioonitakistusega soklimaterjali kasutades. Ehitusfüüsika seisukohast on oluline märkida, et teadaolevalt pole nimetatud faktid leidnud otsest teaduslikku kinnitamist ega ümberlukkamist.

Lubimördi kasutamine lõputöö rullaadis kujunes aga raskendatuks, kuna tahenemist tulnuks oodata liialt kaua lõputöö ajakavas püsimiseks. Ootamatult külmade ilmade tõttu märtsikuu lõpus langes otsus Sakret ZF talvise tsementmördi kasuks, mille madalaim kasutustemperatuur on $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja tahenemisaeg märkimisväärselt lühem lubimördist. See võimaldas alustada kiiremini sõrestiku püstitamiseega – täielikult tahenemata seguga tellistele alumise vöötala sobitamine võinuks tuua kaasa kivide lahtituleku rullaadist. Tsementsegu kasutamise tõttu ei pretendeeri lõputöö ülalmainitud väidete kinnitamisele või ümberlükkamisele, ent need küsimused väärivad kindlasti lähemat ehitustehnilist ja teaduslikku käsitlemist.

Lähtudes Eesti ehitustraditsioonist oli kohane rullaadi keskele paigutada ka mälukivi, millele jäädvustati ehitamise aasta ning ehitusmeistri nimi (vt. lisa 20). See tähendas rullaadi ladumisel liikumist äärtest keskele, mis tähendas ühtlasi ka võimalike ebatäpsuste paremat ühtlustamisvõimalust (vt. lisa 21).

6.2. Niiskustõke

Kuna näidissein kujutas endast katsetuslikku konstruktsiooni, siis näis kohane olevat näitlikustada lisaks kanepibetonile ka traditsiooniliselt niiskustõkkena kasutatud kasetohu kui loodusliku ehitusmaterjali ehitustehnilist toimivust. Leidsin, et tavaliselt ehituses soklipealseks niiskustõkkeks kasutatavad materjalid poleks loonud sõrestiku ja tellisrullaadiga samavõrd loomulikku visuaalset kooslust. Rullaadi ja alumise vöötala vahele paigutati niiskusisolatsiooniks kahes kihis kasetoht. Lähtudes kogunud pärandehitaja Andres Ansperi nõuannetest, asetati alumises kihis tohutükid sokliga pikisuunas, pealmise kihi puhul risti (vt lisa 22). Selliselt asetatuna kohandub meistri sõnul kasetoht paremini võimalike ebatasasustega soklis ning vähendab tühimikke tekkimise ohtu. Vältimaks sadevee kogunemist vöötala alla, lõigati hiljem kasetoht selle välispinnaga tasaseks.

6.3. Sõrestik

Puitsõrestik valmistati 200 x 200 mm haavaprussidest. Tavapäraselt kasutatakse kanepibetonseinte jaoks sõrestikku ehitades tunduvalt väiksemate mõõtmetega puitmaterjali, enamasti 50 x 150 mm mis on ka laiemalt ehituses levinud. Soovides pakkuda visuaalselt huvitavamad ning enam traditsioonilisele ehitusele lähedast lahendust, tundus aga jämedamatest prussidest tapitud sõrestik parema lahendusena. Kuna savil ning lubjal põhinevat kanepibetooni sooviti näitlikustada eraldi sektsioonides, siis mõjunuks liialt väikese läbimõõduga puit nende eraldamiseks kohatuna. 200 x 200 mm sõrestik moodustas seevastu tervikliku ning visuaalselt jõulise raami, mille vormikeel on lähedasem ka traditsioonilisele vahvärksõrestikule. Prussid oli esmalt tarvis hõõveldada sirgeks, kuna sisepingete tõttu olid need väändunud. Pärast ebaühtluste väljahõõveldamist oli prusside jämeduseks 180 x 180 mm

Keermelattide asukoha järgi puuriti 12 cm sügavused augud vöötalasse ning detail asetati keermelattide otsa. Nii jäi puidu pealispind terveks ning vähem vastuvõtlikuks võimalikule tarindisse sattuvale niiskusele kui läbipuuritud keermelati korral. Alusvööga sidumiseks tehti äärmiste postide alumistele otstele 60 x 60 mm mõõduga keeltapid, mis ulatusid alumisse vööjala pesadesse 3 cm võrra (vt. lisa 23). Keskmise posti puhul olid alumisel otsal keele mõõtmed 60 x 180 mm (vt. lisad 23, 27).

Postide ülemised otsad tapiti ülemisse vöösse üksnes selle alumisse serva süvistatud pesaga, mis ulatus 6 cm sügavusele tala telje mõlemas ristsuunas (vt. lisad 24, 28, 29). Nii oli võimalik tõsta post piisavalt püstasendi lähedale, et alumine keeltapp saaks hakata alumises vöös olevasse pesa vajuma. Sellega langes post piisavalt allapoole, et ka ülavöö tapp saaks paika liikuda. Sõrestiku kindlamaks fikseerimiseks suruti tungraudade ning kahveltõstuki abiga ülavöö vastu olemasolevat terastala (vt. lisa 25) ning alles seejärel tehti märked tappide jaoks. Ülemise ja alumise vöö otsad kaeti mesilasvahaga, et vähendada otpuidu vastuvõtlikkust niiskuskahjustustele (vt. lisa 26) Sellega oli sõrestik valmis ning sai alustada ettevalmistustega segutöödeks (vt. lisa 30)

Lubjasektsioonis kinnitati 18mm paksusest puitlaastplaadist tahvlid sõrestiku tühimikesse tugilattide abil, mis toetusid postide välispinnale ja olid kokku pingutatud pitskruvide ning 4x150mm puidukruvide abil (vt. lisa 31). Tahvlid omakorda olid kruvidega kinnitatud tugilattide külge. Kuna sõrestik jäi mõlemalt poolt avatuks, oli kohane kaaluda valatud massi paremat sidumist sõrestikuga. Selleks kinnitati kruvide abil sõrestiku postide külge kanepikiust punutud nõör (vt. lisad 33, 37).

6.4. Seinä täitmine

Üheks olulisemaks küsimuseks näidisseina valamise puhul oli edasiliikumise kiirus erinevate segude puhul. Katsete põhjal selgus, et värskena pidasid seguplokid 150 millimeetrise läbimõõdu juures vastu võrdlemisi väiksele survele. 150 x 150 mm pindalaga 4:1:1 vahekorras saviplokk hakkas deformeeruma juba 15 kg suuruse raskuse all, õhkclubja puhul oli piirsurve 25 kg ning looduslikult hüdraulilise lubjaga plokil 63 kg.

Kuigi katsed näitasid, et kuivanult talunuks ka lahjema koostisega plokid (6:1:1, 8:1:1) arvutuslikult näidisseina seinä survet, otsustasin kasutada siiski Stanwixi ja Sparrow soovitatud 4:1:1 vahekorras segu. Peamiseks põhjenduseks on seinä suhteliselt väike läbimõõt, mistõttu näis olulisem veenduda seinä paremas koospüsivuses. Lisaks ei kujuta näidissein endast soojapidavat tarindit, olles mõlemast küljest avatud nii välisele õhutemperatuurile kui -niiskusele. Niisiis polnuks maksimaalse soojapidavuse poole püüdlemisel antud juhul veenvat põhjendust.

Katsetest saadud tulemused annavad alust oletada, et veidi suurema seinäpaksuse korral võiksid ka väiksema sideainesisaldusega segud olla ehitustehniliselt toimivad. Paksem seinä annab kestvama tarindi ka seetõttu, et kandev sõrestik on võimalik täielikult ümbritseda kanepibetoniga, mis tagab selle parema säilimise temperatuurikõikumiste vähenemise tõttu. Kaalutlust toetab ka Sparrow ja Stanwixi esitatud tabel kanepibetonist seinte soojapidavuse kohta vastavalt nende paksusele. Eesti ehitusseadustiku järgi võib hoone projekteerimisel esmase lähenemisena lähtuda välisseina soojusläbivuse väärtustest 0,12 – 0,22 W/(m²·K). (RT I, 05.06.2015, 15) Sparrow ja Stanwixi arvutustele tuginedes peaks sellistele nõuetele vastav kanepibetonist seinä olema ligikaudu 270 mm paksune.

6.4.1. Savi-kanepiluu segu

Nagu kinnitasid materjalikatsed, on savi ning kanepiluu oma suhteliselt aeglase väljakuivamise tõttu potentsiaalselt soodne elukeskkond hallitusseentele (vt. Lisa 7). Sisetingimustes kuivanud plokkide maht oli väike võrreldes näidisseina savisektsiooniga, mistõttu võis nimetatud probleem seinas kujuneda märkimisväärselt suuremaks.

Üheks võimalikuks lahenduseks oli vaskvitrioli lisamine segule, ent survekatsetest ilmnis teinegi kitsaskoht savi aeglase kuivamise juures – valatud kihi kuivamist tuleb oodata kauem kui lubja puhul, kuna materjali vastupidavus omakaalukoormusele võib suure välja kuivamata veekoguse tõttu liialt madal. Segutöödega polnud võimalik alustada enne maikuu algust, kuna kohatised õised miinuskraadid oleks võinud tuua kaasa seinaga purunemise selles külmuva vee kaudu. Teisalt oli aprillikuu väga sademeterohke, mis kujutanuks samuti selget ohtu, iseäranis saviseguga töötades.

Niisiis tuli leida meetod savi paigaldamiseks korraga väiksemas mahus, jõudes seejuures siiski soovitud tähtajaks seinaga püstitamise lõpule. Ühe võimalusena kaaluti plokkide valmistamist, kuid suhteliselt ebaühtlase segu ning käsitsi valmistamise tõttu oluks keeruline saavutada ühtlast ning valatud seguga võrdselt vastupidavat tulemust. Pealegi demonstreerimise seesugune lähenemine ehitustehniliselt ekslikku lahendust, kuna plokkide vahele vajalik mört moodustaks hoone välistarindis külmasilla ning tooks kaasa soojakadusid ning potentsiaalselt ka külma- ja niiskuskahjustusi. (Sparrow, Stanwix 2014)

Eesmärk oli niisiis moodustada seinaga sise-välissuunaliste katkestusteta seinasektsioon – iseenesest polnud see oluline just näidisseina juures, ent eesmärgiks oli siiski näitlikustada lahendusi, mis oleksid paremini põhjendatavad hoonete ehitusfüüsika vaatenurgast. Püstiste katkestuste korral kujunenuks aga olukord juba hoopis teiseks, kuna viimased ei soodusta väljast tuleva külma õhu liikumist läbi tarindi eluruumidesse. Valmistades töökoja sisetingimustes ette 5cm paksusega seinaplaadi (vt. Lisad 34-36), otsustati see kuivanuna asetada savisektsiooni, seinaga siseküljelt vastu liistudest moodustuvat hammast toetades (vt. Lisa 38). Plaadi mõõdud seati ettevaatavalt veidi väiksemaks sõrestiku savisektsiooni sisemõõdust, kuna suhteliselt rabadavõitu segu täpsesse avasse surudes oleks see võinud kergesti puruneda. Postide ja saviplaadi vahele jäävad tühimikud täideti hiljem samal koostisel põhineva lahtise saviseguga. Paigaldatud savisegust plaadi pinnale oli võimalik kihtide kaupa hakata kinnitama lahtist savisegu. Nii võis olla kindel, et niiskussisaldus savisektsioonis on üsna madal ning ei teki hallitusseentele sobivat keskkonda. Et segu hakati lisama vähehaaval, suudeti ära hoida ka olukord, kus kuivamata segu omakaalukoormus ületaks seinaga koospüsivuse piiri. Ootamatult külmade ilmade tõttu polnud siiski võimalik jõuda savisektsiooniga lõpule ettenähtud tähtajaks.

6.4.2. Lubja-kanepiluu segu

Lubjasegu valamiseks oli võimalik kasutada raketisi (vt. lisa 31), kuna materjalikatsetele tuginedes polnud karta hallituse levikut ega seinu purunemist ega deformeerumist omakaalu mõjul. Seinu alumises osas otsustati kasutada looduslikult hüdraulilist lubja, kuna ühest küljest võimaldas see valamisraketiste edasi liigutamist lühema aja möödudes pärast seguga täitmist. Teiseks põhjenduseks oli hüdraulilise lubja parem vastupidavus niiskuskahjustustele – võis arvata, et külgevihmade korral langeb seinu alumisele osale võrreldes ülemisega tunduvalt suurem niiskussurve. Raketiste edasiliigutamine ning uue segukihiga täitmine toimus iga 24 tunni järel. Erinevalt savisektsioonist kujunes sõrestiku täitmine lubjaga niisiis tunduvalt lihtsamaks ning märkimisväärseid ootamatusi ei esinenud.

Segu vajutati kinni käega, kuna fikseeriva liistu ümber oli tarvis segu nurkadest tihedalt kokku vajutada – seda oluks nuiaga tampides keeruline teha. Seinu lõpuosa täideti seestpoolt – selleks oli sektsiooni ülemisse ossa jäetud piisav vahe, kuhu kinnitati pärast seguga täitmist sobiva suurusega puitlaastplaadi tükk, mis surus juba paikaasetatud segu tihedaks. Raketised eemaldati 48 tunni järel. (vt. lisa 39)

6.5. Viimistlus

Kanepibetooni viimistlemiseks kasutatakse enamasti lubikrohvi, kuna see nakkub suhteliselt hästi lubjapõhise seinaseguga, lisaks soovitakse säilitada seinatarindi õhu- ja niiskuselaskvust. Eeldusel, et segu on seinas täielikult kuivanud ning karboniseerunud, ei tohiks see aga olla ehitustehnilisest vaatenurgast vältimatult vajalik. Kanepibetoon toimib seinas eelkõige soojusisolaatorina, mille juures märgumine kujutab endast väga olulist faktorit ning enamasti ka potentsiaalset ohtu tarindi ehitustehnilisele toimimisele. Seejuures on aga oluline märkida, et tänu sideainetele hoiab kanepibetoon märgudes oma struktuuri ega vaju lisanduva vee raskuse mõjul märkimisväärselt kokku. Seetõttu kujutab niiskuselaskvust siin endast hoopis teistsugust olukorda, kui näiteks soojustusvilla kasutamise puhul, kus igasugune vee sattumine soojustusmaterjali peaks olema head ehitustava järgides täielikult välistatud.

Ehkki kanepibetooni puhul ei peaks lugema omaette taotluseks seinatarindi suurt niiskussiduvust, puutub senisele teadustööle tuginedes ka otsene vajadus niiskuskindla kihi paigaldamiseks sise- või välispinnale. Suhteliselt kõrge niiskussiduvus kui kanepibetoonseinale iseloomulik omadus ning selle mõjud hoone sisekliimale ja terviklikule toimimisele väärivad kindlasti Eesti kontekstis lähemat uurimist siinse suhteliselt kõrge aastase keskmise õhuniiskuse tõttu. (Kalamees, Kurnitski 2005, lk 48) Ühest küljest võib niisugune tarind küll positiivsest küljest ajutiselt siduda liigset niiskust eluruumidest, kuid teisalt on see ühtse monoliitse seguna valatuna väljast samavõrd vastuvõtlik veeauru difusioonile. Viimistluskihtide koostis ning paksus mängib seega kanepibetoonsegude ehitustehnilise toimimise juures kriitilist rolli, väärides omaette uurimisteemana lähemat käsitlemist.

Näidisseina viimistlemine ning jääb antud töö uurimisalast välja ühest küljest eelmainitust lähtuvalt. Teisalt aga on näidisseina funktsioon eelkõige hariduslik, mistõttu enne seinatarindi täielikku sulgemist soovitakse demonstreerida viimistlemata kanepibetooni ilmet ning näitlikustada võimalikke viimistlusviise edasise praktilise koolitustegevuse käigus. Lähtudes Sparrow ja Stanwixi soovitudest on seeläbi võimalik veenduda ka seinatäidete täielikus väljakuivamises enne viimistlemist ning vältida võimalikke kahjustusi. (Sparrow & Stanwix 2014 lk 74)

Kokkuvõte

Kanepibetooni kui ehitusmaterjali kasutamine Eesti kliimas kujutab endast vähekaardistatud uurimisvaldkonda, millele valguse heitmine oli käesoleva töö üks peamistest eesmärkidest. Materjali sisendenergia väljaselgitamine lähtuvalt kohaliku tootmise spetsiifikast, hoonete sisekliima ja ülalpidamiskulude kaardistamine Eesti tingimustes ning ehitustehniline toimimine kuuluvad olulisemate ning edasist pikaajalisemat uurimist vajavate teemade hulka.

Käesolevat tööd võib käsitleda kui sissejuhatust kanepibetooni kasutamise võimalustesse. Juba töö algfaasis oli selge, et teaduslikult täpsete ja põhjanevate andmete kogumine kujutab endast liialt ambitsioonikat eesmärki lõputöös realiseerimiseks. Seevastu suudeti läbi esmaste praktiliste katsetuste, võrdluste ja otsese kasutamise välja tuua mitmeid võimalikke probleeme, osutada spetsiifilistele uurimist vajavatele teemadele ning tutvustada kanepibetooni kui võrdlemisi uutset ja loodussõbralikku ehitusmaterjali.

Näidiseina järelseireks ning praktiliste katsetuste jätkamiseks erinevate segude ja ehitustehnikatega suudeti luua vajalikud alused. Täpsemat katsetamist väärivad kindlasti kõik lõputöös kasutatud sideained, kuna igäühe parimad kasutusvõimalused pole seni täpselt kaardistatud. Sideainete käsitlemine seostub seejuures lahutamatuult kanepibetooni viimistlusvõimalustega, mis on Eesti tingimustes samuti sisuliselt käsitlemata valdkond.

Jätkusuutlikkuse perspektiivist on oluliseks uurimisteemaks ka kanepikiu kasutusvõimalused nii ehitussektoris, kui sellest väljaspool. Käesolevas töös omandati esmased kogemused, millest lähtuvalt seada eeltingimusi tulevases töös kasutatavale materjalile teadvustades kogu ehitusprotsessi laiemalt.

Kanepibetooni loodussõbralikkus kujutab endast aga ehk kõike eelnevat kokkuvõtvat uurimisteemat. Materjali laiema kasutuselevõtmise eelduseks võib pidada eelkõige selle tasuvust – ilma ökonoomsust saavutamata jääb ka ökoloogilisus tõenäoliselt üksnes saavutamatuks ideaaliks. Alustades kanepi kui põllukultuuri viljelemise spetsiifikast ning lõpetades kanepibetooni täieliku elutsüklianalüüsiga on tegemist väga kompleksse ning paljude aspektide koosmõju arvestamist nõudva küsimusega. Senine teadustöö näib aga viitavat kanepibetooni märkimisväärsele potentsiaalile kvaliteetse ning jätkusuutliku ehitusmaterjalina.

Kasutatud allikad

Anslan, K. 2015. Tööstuskanepi omaduste uurimine ja kasutusvõimalused ehituses. Tartu Eesti Maaülikool. [Magistritöö]. Tartu.

Ahlberg, J. , Georges, E. , Norlén. 2014. The potential of hemp buildings in different climates. A comparison between a common passive house and the hempcrete building system. Uppsala: Uppsala Universitetet. [Bakalaureusetöö]. Uppsala.

Ahlstrand, J. T. 2009. Arkitektuur Termer. Lund: Studentlitteratur.

Arnaud, L. , Gourlay, E. 2012. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. Construction and Building Materials 28, lk 50-56.

Arizzi, A. , Brümmer, M. , Cultrone, G. , Martín-Sanchez, I. , Viles, H. 2015. The Influence of the Type of Lime on the Hygric Behaviour and Bio-Receptivity of Hemp Lime Composites Used for Rendering Applications in Sustainable New Construction and Repair Works.

<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0125520> (28.09.2016)

Berardi, U. , Dhakal, U. , Gorgolewski, M. , Richman, R. 2016. Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings. Journal of Cleaner Production 142, lk 1-10.

Black, D., Sutton, A. , Walker, P. 2011. Hemp Lime: an introduction to low impact building materials. BRE information paper 14/11.

Busbridge, R. , Rhydwen, R. 2010. An investigation of the thermal properties of hemp and clay monolithic walls Proceedings of Advances in Computing and Technology, (AC&T) The School of Computing and Technology 5th Annual Conference, University of East London, lk.163-170.

Esperk, T. 2007. Eesti väike-elamute tarindite olelusringi hindamine. Tartu: Tartu Ülikool [Magistritöö]. Tartu.

Jänes, T. 2006. Saaremaa Mõisaküla lubjakivikarjääri savikate lubjakivide potentsiaal loodusliku hüdraulilise lubja toorainena. Tartu: Tartu Ülikool. [Magistritöö]. Tartu.

Kalamees, T. , Kurnitski, J. 2005. Estonian test reference year for energy calculations. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Engineering 12, lk 40-58

Lawrence, M., Shea, A., Walker, P. 2012. Hygrothermal performance of an experimental hemp–lime building. *Construction and Building Materials* 36, lk 270 – 275.

Naik, T. R. 2008. Sustainability of Concrete Construction. - Practice periodical on structural design and construction, May 2008, lk 98-103

Sparrow, A. , Stanwix, W. 2014. The hempcrete book. Designing and building with hemp-lime. London: Green Books.

Pavia, S. , Walker, R. 2014. Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes. *Construction and Building Materials* 64, lk 270–276

Tiirmaa, U. 1971. Tartu Toomkiriku lõunatorni ülaosa väliuurimine V horisondist kuni I horisondini. Vabariiklik Restaureerimisvalitsus. Tallinn.

Valkhoff, H. 2010 The renovation of period timber-frame buildings in Southwest France. An environmental assessment of insulation materials and techniques for exterior timber-frame walls. London: University of East London. [Magistritöö]. London.

Ehitusseadus. RT I 2002, 47, 297; RT I, 25.05. 2012, 5.
<https://www.riigiteataja.ee/akt/104072013008> (5.10.2016)

Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv. 2010//31/EL

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX:32010L0031> (2.01.2016)

Maaelu ja põllumajandusturu korraldamise seadus. RT I 2004, 32, 227; RT I 2005, 37, 284.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/914853> (20.04.2015)

Säästva arengu lehekülg Riigikantselei veebilehel

<https://riigikantselei.ee/et/saastev-areng> (28.04.2017)

Ühinenud Rahvaste Organisatsiooni kliimamuutuste raamkonventsiooni Kyoto protokoll
ratifitseerimise seadus; RT II 2002, 26, 111.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/760682> 38.04.2017

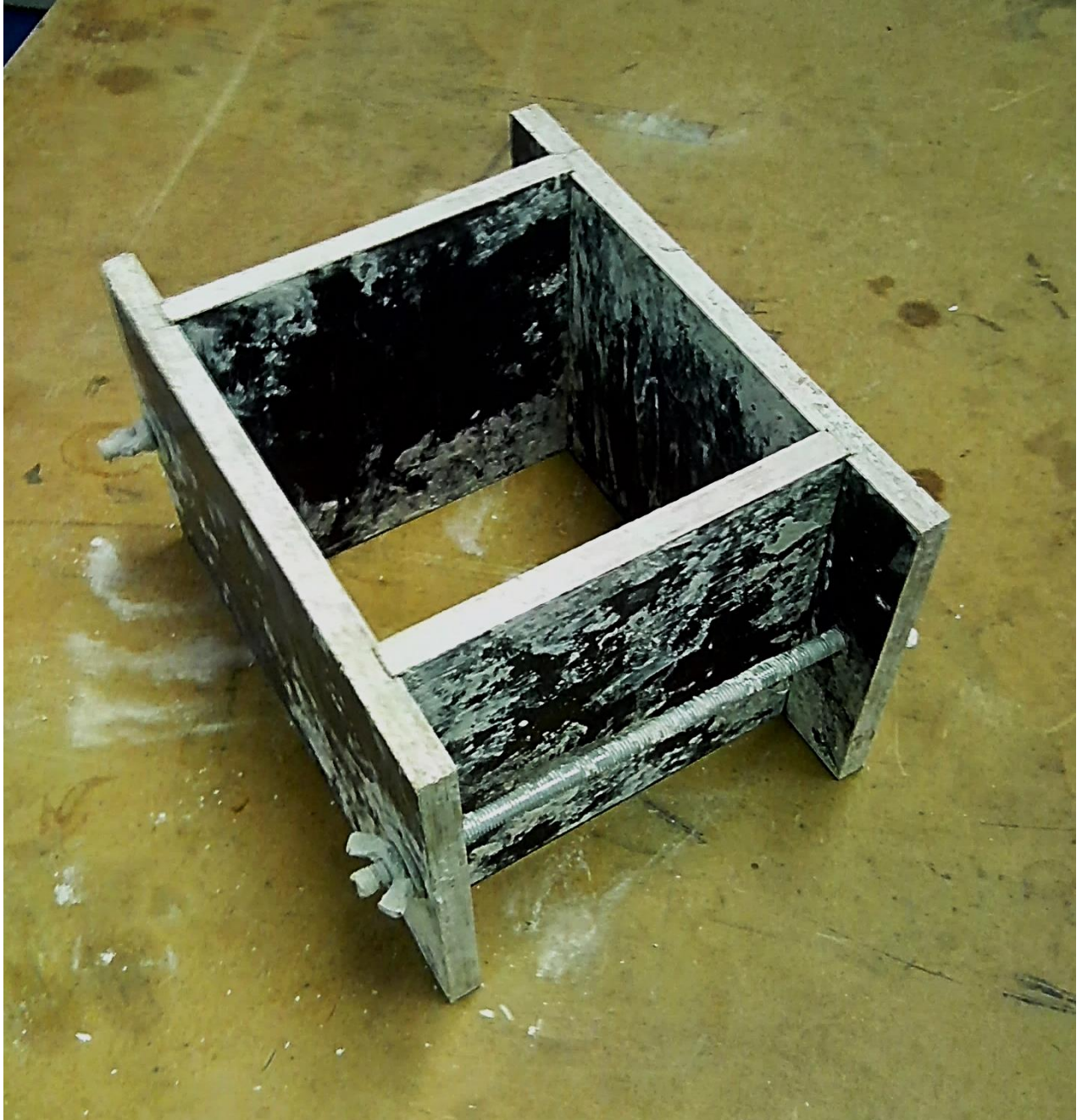
Lisad



Lisa 1 Kanepibetoonist hoone Watfordi lähistel Suurbritannias (allikas: Black et al 2011, lk 1)



Lisa 2 Kanepibetoonist katsehoone Bathi Ülikooli juures (allikas: Lawrence et al 2012, lk 272)



Lisa 3 Raketis katseplokkide valmistamiseks (autori foto)



Lisa 4 Vasakult: õhklubja, hüdraulilise lubja ning saviga valmistatud katseplokid (autori foto)



Lisa 5 8:1:1 saviploki deformeerumine liivaämbri raskuse mõjul (autori foto)



Lisa 6 Vähene hallitusseene levik 8:1:1 saviploki pinnal (Kerttu Kruusla foto)



Lisa 7 Ulatuslik hallitusseene levik 4:1:1 saviplokis (autori foto)



Lisa 8 4:1:0,3 lubjaplokk (autori foto)



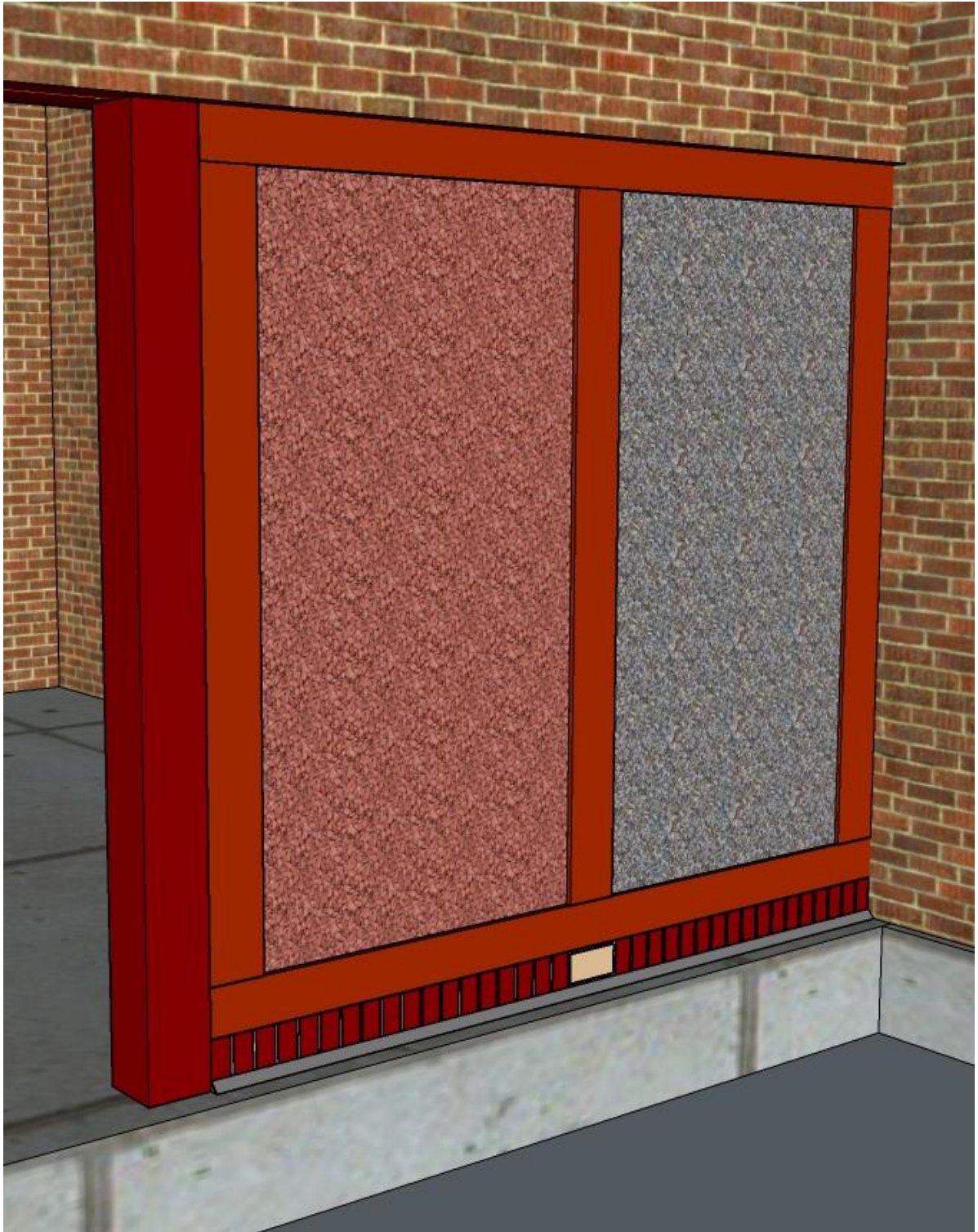
Lisa 9 8:1:0,3 lubjaplokk (autori foto)



Lisa 10 Katseplokile surve avaldamine liivanõu abil (autori foto)



Lisa 11 Katseplokile surve avaldamine kahveltõstuki abil (autori foto)



Lisa 12 Nädisseina eskiisprojekt (autori joonis)



Lisa 13 Ehitustöödeks ettevalmistatud plats (autori foto)



Lisa 14 Raketise asendi paikaseadmine tsemendist taldmiku valamiseks (autori foto)



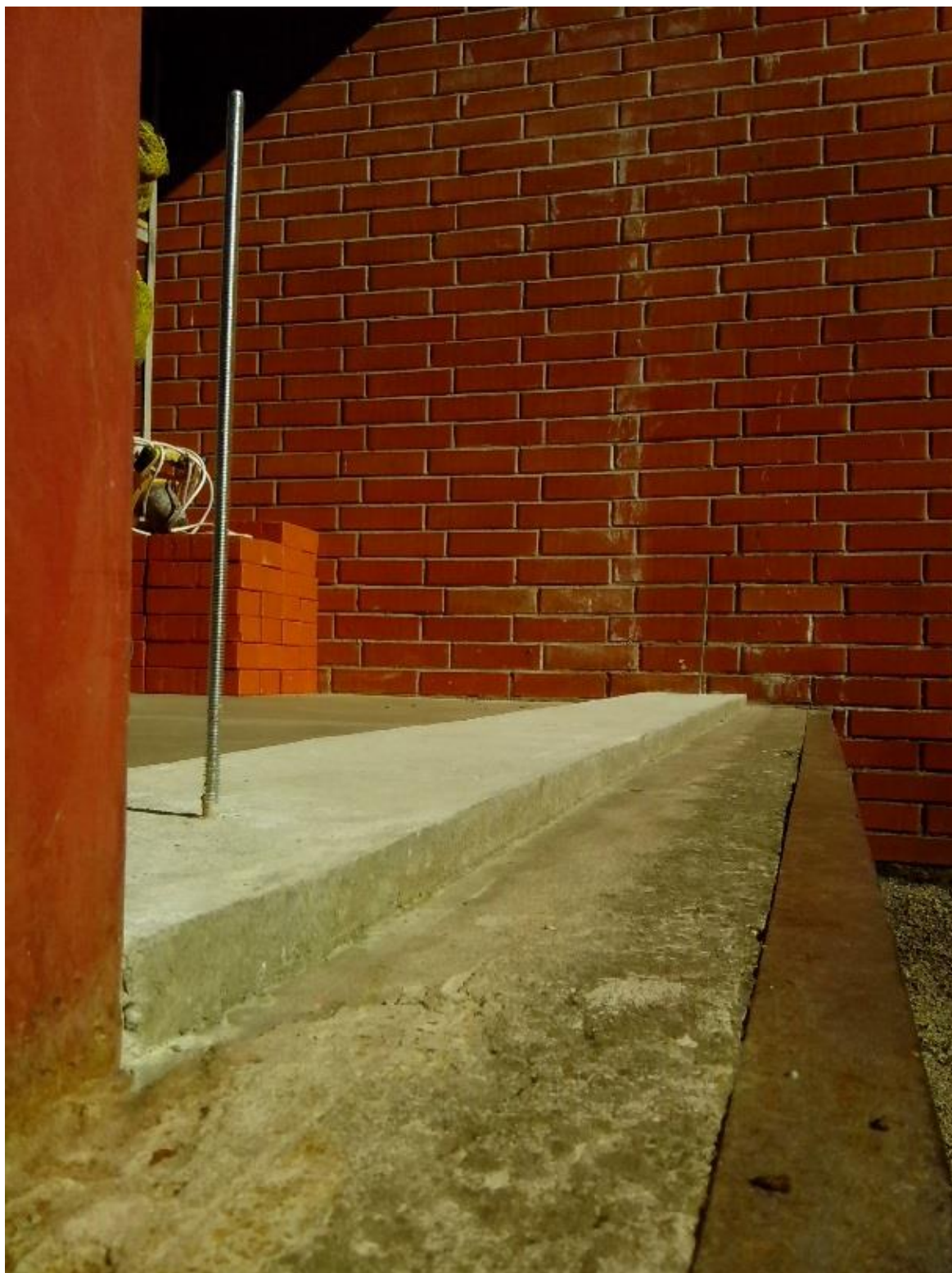
Lisa 15 Raketise fikseerimine telliste abil (autori foto)



Lisa 16 Puurimisaugu asukoha seadmine (autori foto)



Lisa 17 Alumise vöötala tsentri ning kolmanda vuugi ristumiskohta puuritud auk (autori foto)



Lisa 18 Valatud taldmik keermelattidega (autori foto)



Lisa 19 vuukide laiuse määramine ühtlaste vahedega ritta laotud telliste abil (autori foto)



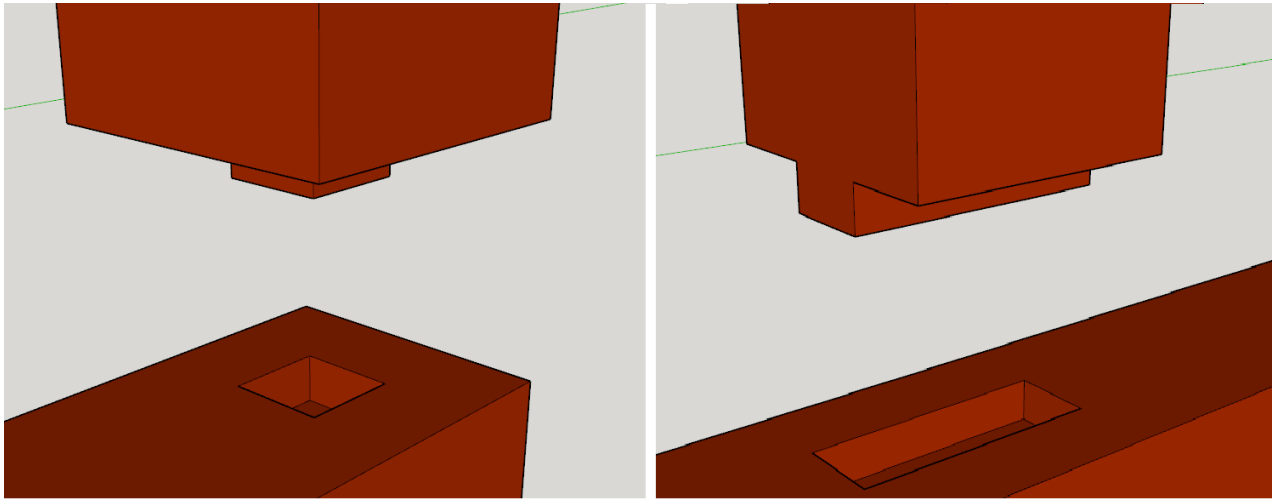
Lisa 20 Mälukivi (autori foto)



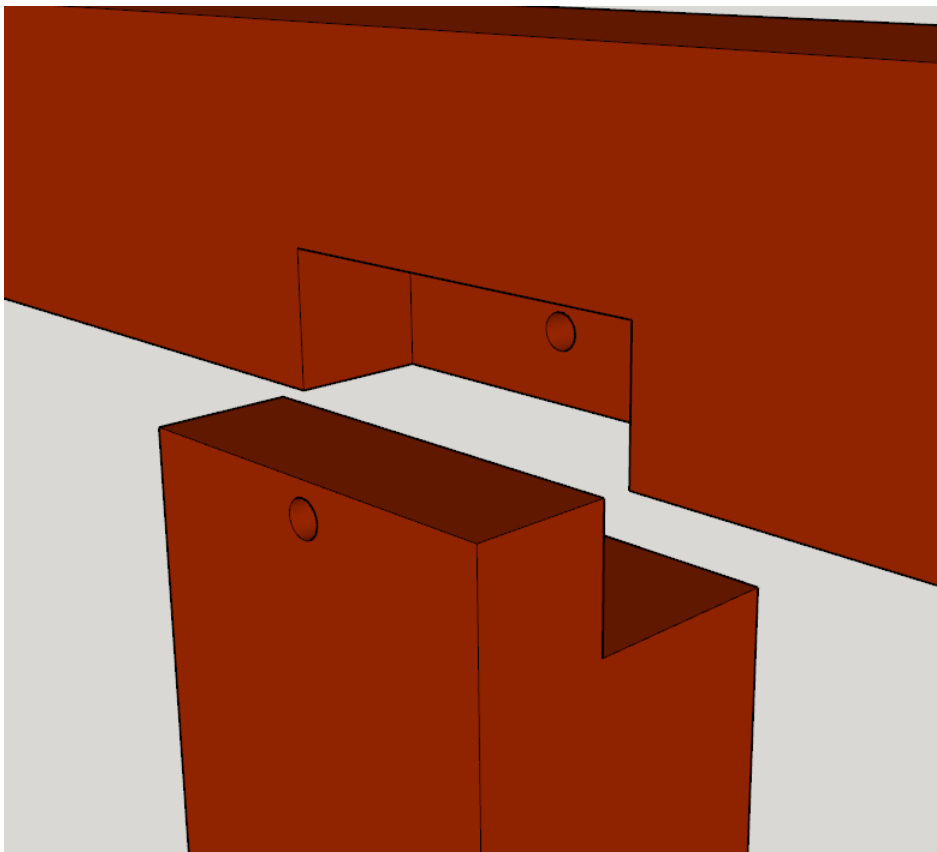
Lisa 21 Rullaadikivid on laotud, mälukiviga keskosa ootab paigaldamist (autori foto)



Lisa 22 rullaadile laotud kasetoht ning selle peale asetatud alumine vöötala (autori foto)



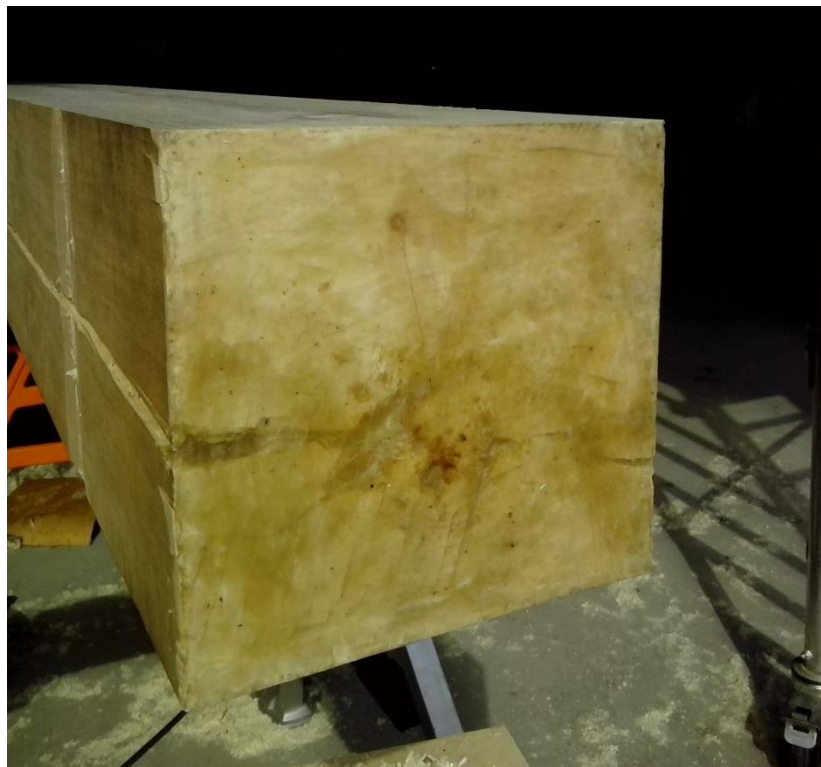
Lisa 23 Keeltapid postide ning alumise vöö sidumiseks (autori joonis)



Lisa 24 Avatud keeltapp posti ning ülemise vöö sidumiseks (autori joonis)



Lisa 25 Ülemise vöötala fikseerimine tõstuki ning tungraudade abil (autori foto)



Lisa 26 Mesilasvahaga kaetud vöötala ots (autori foto)



Lisa 27 Postide alumised keeltapid (autori foto)



Lisa 28 Postide ülemised avatud keeltapid (autori foto)



Lisa 29 Avatud keeltapi pesa ülemises vöötalas (autori foto)



Lisa 30 Valminud puitsõrestik (autori foto)



Lisa 31 paika asetatud valamisraketis (autori foto)



Lisa 32 Värskest valmistatud hüdraulilise lubja segu vasakul ning tõmmanud segu paremal (autori foto)



Lisa 33 Alumine osa lubjaseksioonist on valminud ja raketis tõstetud edasi (Kerttu Kruusla foto)



Lisa 34 Puitraam saviplaadi valmistamiseks (autori foto)



Lisa 35 Poolenisti täidetud raam ning selle külge kinnitatud kanepinööri armatuur (autori foto)



Lisa 36 Saviplaat enne lõplikku täitmist (autori foto)



Lisa 37 Saviplaadi ja seinavalu armatuuriks kasutatud kanepinöör (autori foto)



Lisa 38 Saviplaadi paksuse järgi seati paika liistu kaugus alumise vöö sisemisest servast (autori foto)



Lisa 39 Lubjasektsioon on valmis ning savisektsiooni siseküljelt plaat paika asetatud (autori foto)

Summary

In the paper „Introduction of hempcrete mixes and testing in Estonian climate“ a brief introduction was made into the use of hempcrete as a sustainable and feasible building material in Estonia. Worldwide research has demonstrated the potential of hempcrete to reduce the carbon footprint of the building sector while also helping to lower heating costs. However, in Estonian context, research into hempcrete has so far been minimal. One aim therefore was the presentation of relevant questions to be further discussed in future work – most importantly the indoor climate, longevity and heating costs of hempcrete buildings in Estonian climate should be thoroughly assessed.

An overview was given about the properties of the material, pertaining to the quality of indoor climate, thermal efficiency and resistance to pests. The main goal, however, was the gathering of first-hand experience with different hempcrete mixes to gain a basic understanding of possible applications as well as potential problems. Preliminary tests were conducted using different mixes to better understand their qualities and to provide a basis for obtaining sufficient knowledge for building a test wall.

The properties of clay, air lime and hydraulic lime mixes should be studied in further detail to obtain reliable data for construction of test houses in Estonia. Different suitable finishes for hempcrete in Estonian climate also pose an important field of research for the future. This also closely relates to the utilisation possibilities for hemp fibre, which can be seen as a byproduct of hemp shiv processing for construction purposes.

In conclusion, the ecological and economical aspects of the use of hempcrete as a building material undoubtedly warrant extensive research, as the main arguments for its potential mainstream emergence as a sustainable building material. As experience with the material in Estonia is limited, future practical tests are also seen as major potential contributions in this field.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Markus Pau,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Kanepibetonsegude tutvustus ja katsetamine Eesti kliimas, mille juhendaja on Laur Pihel,

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Viljandis, **18.05.2017**