

EESTI MAAÜLIKOOL
Maaehitus- ja metsandusinstituut
Maaehituse osakond

Baasfinantseeritava uurimistöö P8003

Hoonete elutsükli
keskkonnasäästlikkuse hindamine,
analüüs ja modelleerimine

Vahearuanne
2008. ja 2009. aasta kohta



Teema juht professor Jaan Miljan

TARTU 2009

Uurimistöö eesmärgid

1. Töötada välja meie kliimaatilisi tingimusi ja ehitustraditsioone arvestav hoonete elutsükli keskkonnasäästlikkuse hindamise mudel.
2. Töötada välja ja katsetada nii laboratoorsetes kui tegelikes ekspluatatsioonitingimustes kohalikel ja ökoloogilistel ehitusmaterjalidel põhinevaid piirdekonstruktsioone ning anda hinnang nende keskkonnasäästlikkusele.
3. Arendada ehitusinseneri õppekavas olevate mitmete õppeainete (loodussõbralik keskkonnasäästlik ehitamine, hoonete renoveerimine jt) temaatikat valdkonna paremaks omandamiseks.
4. Ühtlustada, lahti sõnastada ja teadvustada valdkonna terminoloogia.
5. Ühendada ehituse vastutusvaldkonnas tehtavad magistrantide ja doktorantide uurimistööd ning erinevad rakenduslikud uurimistööd ühise nimetaja alla ja saavutada sellega suurem läbilöögivõime oma tegevuse tutvustamiseks nii Eestis kui ka rahvusvahelisel tasandil.

Finantseerimine

Maaehituse osakond taotles teema rahastamiseks kokku 4,3 miljonit krooni neljaks aastaks. Eraldati 3,9 miljonit krooni: 2008. aastaks 600 000 krooni, 2009. aastaks 1 050 000 krooni, 2010. aastaks 1 100 000 krooni, 2011. aastaks 1 150 000 krooni. Seoses majanduslangusega vähendati teise aasta (2009) summat 4% s.o 960 000 kroonini.

Tabel 1. Baasfinantseerimise uurimistöö kulud 2008-2009

	2008.a tegelik	2009.a eelarve
1. Tööjõukulu kokku	79 980	340 000
2. Majandamis- ja muud tegevuskulud, sh	180 000	360 000
lähetus- ja transpordikulu	51 000	50 000
koolituskulud	39 000	160 000
muud kulud	90 000	150 000
Põhivara	340 000	260 000
Kulud kokku	599 980	960 000

Projekti täitmisest on osa võtnud:

Teema juht:

Jaan Miljan, professor tehnikateaduse kandidaat.

Vastutavad täitjad:

Riina Miljan, Dr. Sc., MS, dotsent;

Mihkel Kiviste, M. Sc., MI, lektor, doktorant;

Kaarel Sahk, MI, lektor, PK doktorant;

Kalle Pilt, MI, lektor, doktorant;

Vello Pallav, MI, lektor, doktorant;

Kristina Akermann, B. Sc., MI, lektor, doktorant.

Teised täitjad:

Veli Palge, Dr. Sc., TE, dotsent;
Martti-Jaan Miljan, M. Sc., MI, vanemspetsialist;
Matis Miljan, B. Sc., MI, spetsialist, doktorant;
Tõnis Teppand, MI, spetsialist;
Lea Täheväli Stroh, MI, spetsialist;
Küll Kell, MI, spetsialist;
viieaastase integreeritud ehitusinseneriõppe magistrandid.

Tegevused:

Baasfinantseeritava teema täitmise esimeses etapis on läbi viidud ja toimub jätkuv tegevus:

- Valdkonna terminoloogia uurimine, terminoloogia andmebaasi tegemine (eesmärk 4);
- Ülevaate saamine olemasolevatest ehitusmaterjalide energiasisalduse andmebaasidest ja kasutatavatest energiasisalduse määramise meetodikatest hoone elukaare kõikidel etappidel (eesmärk 4 ja eesmärk 1);
- Meie kliimaatilisi tingimusi ja ehitustraditsioone arvestava hoonete elutsükli keskkonnasäästlikkuse hindamise mudeli väljatöötamiseks on ehitatud katsemaja, on uuritud soojustusmaterjalide soojusjuhtivust ning välja töötatud soojuskadude simuleerimise esialgne mudel(eesmärk 1 ja 2).
- Projekti ühise raamkava väljatöötamine integreerides sinna kõik hoonete elukaare etappide uurimisvaldkonnad (eesmärk 5);
- Uuringuteks vajaliku aparatuuri soetamine (eesmärk 2);
- Seoses väljundipõhilistele õppekavadele üleminekul on muudetud ja täiustatud õppeainete ainekavasid (eesmärk 3).

Teadustöö esialgne raamkava ja alateemade täitjad:

1. Hoone elutsükkel ja selle etapid K. Sahk

2. Säästlikkuse võimalused hoone elutsükli erinevatel etappidel

2.1. Säästlikkus hoonete kavandamisel ja projekteerimisel

L.-H. Taimla, K. Akermann, K. Sahk + magistrandid

2.2. Säästlikkuse võimalused ehitamisel

J. Miljan + V. Pallav + magistrandid

2.3. Säästuvõimalused hoone kasutamisel (ekspluatatsioonis) ja hooldamisel

L. Stroh, J. Miljan

2.4. Lammutamine ja materjalide selektiivne kasutamine

V. Pallav, L. Stroh, J. Miljan, magistrandid

3. Ehitamise ja ehitusmaterjalide energiamahukus R. Miljan, magistrandid

4. Hoonete ja tarindite seisukorra hindamine ja kestvuse prognoos

4.1. Seisukorra hindamise üldine meetodika K. Sahk

- 4.2. Puitkonstruktsioonide seisukorra hindamine ja kestvuse prognoos
K. Pilt, J. Miljan, L. Stroh, M. Miljan, V. Pallav
- 4.3. Raudbetoonkonstruktsioonide kestvus ja seisukord *M. Kiviste, J. Miljan*
- 4.4. Piirete soojustuse seisukorra hindamine *K. Akermann, M. Miljan, M-J Miljan, magistrandid*
- 4.5. Vundamendid *V. Pallav, magistrandid*

5. Hoonete energiatõhususe suurendamise võimalused *J. Miljan*

- 5.1. Hoone asukoha valik
- 5.2 Hoonete piirdetarindite energiatõhusus *M-J Miljan, K. Akermann,*
 - 5.2.1. Projekteeritud hoonete energiatõhusus
 - 5.2.2. Olemasolevate hoonete energiatõhusus
 - 5.2.3. Olemasolevate hoonete piirdetarindite energiatõhususe suurendamine *J. Miljan, magistrandid*
- 5.3. Kohalikest materjalidest tarindid
 - 5.3.1. Ökoloogilised ehitusmaterjalid *T. Teppand, K. Akermann, L. Stroh, magistrandid*
 - 5.3.2 Kohalikud soojustusmaterjalid *J. Miljan, M-J Miljan, T. Teppand*
 - 5.3.3. Katsed soojustusmaterjalide omaduste määramiseks laboris *M-J Miljan*
 - 5.3.4. Katsemaja *M-J Miljan*
 - 5.3.5. Efektiivsed lahendused puidust kande- ja piirdetarinditele *K. Pilt, T. Teppand*

6. Energiatõhusa maja kontseptsioon

- 6.1 Mudel hoone energiatõhususe arvutamiseks, *katsemaja mudel - V. Palge; passiivmaja mudel - J. Miljan, M-J Miljan*

Teemaga seotud avaldatud artiklid ja ettekanded ETISe klassifikaatori järgi:

- 1.1.** Pöder, Vahur; Lepa, Jaan; **Palge, Veli**; Peets, Tõnis; Annuk, Andres (2009). The Estimation of Needed Capacity of a Storage System According to Load and Wind Parameters. Oil Shale, 26(3), 283 - 293.
- 3.1.** **Pilt, Kalle**; Pau, Kristel; Oja, Jane (2009). The wood-destroying fungi in buildings in Estonia. Brebbia C.A. (Toim.). Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XI (243 - 251). UK: WIT Press
- 3.2.** **Kiviste, Mihkel** (2009). Residual flexural strength of existing pre-stressed concrete panels. Proceedings of the 16th Baltic Building Symposium (77 - 82). Tartu: Department of Rural Building, Estonian University of Life Sciences
- 3.2.** **Kiviste, Mihkel** (2008). Residual flexural capacity of existing pre-stressed concrete panels. J. Rikala, M. Sipi (Toim.). Wood engineering - products and their utilization (5 - 10). University of Helsinki, Department of Forest Resource Management: Helsinki University
- 3.5.** **Kaarel Sahk**, Peeter Torop, The Value of Historical Properties – can the semiotic signs load the sustainability? (The Baltic experience)_Published in Eesti Maaülikool. EMÜ teadustööde kogumik nr 225. Land Surveying and Land Management, Tartu 2009.a. ISSN 1736-8375

5.2. Sahk, Kaarel; Peeter Torop & Kalev Sepp (2007) Nature and Artifact Markets of Real Estate Value: What do the Market Accept?, 14th Annual European Real Estate Society Conference in London, UK http://eres.scix.net/cgi-bin/works/Show?eres2007_158

5.2. Sahk, Kaarel (2008) The Factors Influencing the Changes in Real Estate Values, Book of Abstracts: 15th Annual European Real Estate Society Conference in Kraków, Poland http://eres.scix.net/cgi-bin/works/Show?eres2008_319

5.2. Sahk, Kaarel; Peeter Torop (2008) TRADITIONAL AND NON-TRADITIONAL TOOLS FOR THE DESCRIPTION OF SPACE AND PLACE, Book of Abstracts: 15th Annual European Real Estate Society Conference in Kraków, Poland http://eres.scix.net/cgi-bin/works/Show?eres2008_240

5.2. Sahk, Kaarel; Sepp, Kalev (2009) The Development of Compulsory Purchase – A Legislative View Point and Market Expectations, 16th Annual European Real Estate Society Conference in Stockholm, Sweden http://eres.scix.net/cgi-bin/works/Show?eres2009_169

5.2. Sahk, Kaarel; Sepp, Kalev (2009) The Fundamentals of Recreational and Leisure Property Valuation: Beyond and Unbiased, 16th Annual European Real Estate Society Conference in Stockholm, Sweden http://eres.scix.net/cgi-bin/works/Show?eres2009_352

5.2. Sahk, Kaarel; Torop, Peeter (2009) Traditional and Non-traditional Tools for the Description of Space and Place - The Contemporary Approach, 16th Annual European Real Estate Society Conference in Stockholm, Sweden http://eres.scix.net/cgi-bin/works/Show?eres2009_391

6.3. Kiviste, Mihkel (2008). Põrketugevuse ning ultraheli kaudu saab betooni hinnata : [Eesti Maaülikoolis uuriti põhjalikult pörkevasara ja ultraheli meetodit]. Ehitaja, 10, 64 - 67.

6.3. Kukka, Erki; Miljan, Jaan (2009). Eestis enim levinud välisseinatüüpide primaarenergiasisaldusest ja soojustamisest. Ehitaja, 9 (146), 64 - 67.

6.3. Miljan, Jaan; Kukka, Erki (2009). Välisseina materjali valikul arvestatakse mitme faktoriga. Ehitaja, 7/8 (145), 74 - 76.

6.3. Miljan, Jaan; Miljan, Riina (2008). Hoonete säästlik ehitamine looduslike materjale kasutades. Keskkonnatehnika, 2, 44 - 47.

6.3. Pilt, Kalle (2008). Ehitusvigade vältimine annab majavammi vastu parima kaitse. Ehitaja (1995-), 6, 68 – 70

6.3. Pilt, Kalle (2008). Põrandate rajamisel hoidu majavammi soodustavatest teguritest. Ehitaja, 9, 62 - 64.

6.3. Pilt, Kalle (2008). Ehituskultuuri tõstes ennetame hallitust. Keskkonnatehnika, 3, 20 - 23.

6.3. Pilt, Kalle (2009) Puithoonete elukaare pikkuse saladused. I ja II osa TM Kodu ja Ehitus, nr. 10 ja 11.

Avaldamisel artiklid

1.1. M. Kiviste, J. Miljan, R. Miljan, M. Kiprušėkov (2009) Condition of structures and properties of concrete of existing oil shale chemical plant“ Avaldamiseks aktsepteeritud ajakirjas Oil Shale 2009.a. detsembrikuises numbris.

Kaarel Sahk, Peeter Torop, Traditional and Non-traditional Tools for the Description of Space and Place. In print Lietuvas turto vertintoju asoociatias, Vilnius universieto Ekonomikas Fakultetas, Vilnius Gedimino technikos universitatas.

Hoone elutsükkel ja selle etapid

Hoone eluiga on aeg hoone ehitamisest kuni hoone lammutamiseni. Seda aega nimetatakse hoone elukaareks. Hoone elukaare etapid on :

1. kavandamine, projekteerimine;
2. ehitamine;
3. kasutamine, hooldamine
4. lammutamine.

Kuna hoonet ehitatakse tema kasutamiseks, siis on kasutamise etapp ajalises dimensioonis suurusjärgu võrra või enamgi pikem kui teised etapid. Mida väärtuslikum on hoone, seda pikemaks kavandatakse tema kasutusaeg.

Kasutusaja pikkuse kavandamisel on määravaks projekteerimise etapp, kus toimub hoone arhitektuurne, konstruktiivne ja tehnilise lahenduse väljatöötamine ning ehitusmaterjalide valik. Kuidas kõik kavandatu ellu viiakse ja hoone vastavus tulevase kasutaja ootustele tagatakse, sõltub ehitamise etapist.

Kui hoone on valmis ehitatud ja vastu võetud, saab hoone kasutusloa ja algab kasutusetapp. Koos hoone kasutamisega algab ka hoone ja tema tarindite, seadmete, aga eeskätt hoone viimistluse vananemine (degradeerumine) erinevate mõjurite (väliskeskkond, sisekliima, mehaanilised ning keemilised mõjud jne) toimel. Seega hakkab kuluma hoone kasutusaeg. Kasutusaega saab oluliselt pikendada hoone pideva hooldamisega.

Selleks, et hooldamist teha vastavalt valitud materjalidele ning projekteeritud ja ehitatud konstruktsioonidele ja seadmetele ettenähtavale on iga hoone projektdokumentatsiooni kohustuslikuks osaks hooldusjuhend. Hooldusjuhend on omanikule, haldajale oluline dokument ja selle pidev täitmine tagab suure tõenäosusega hoone kavandatud kestvuse ja seega ka planeeritud kasutusea.

Hoone kasutusaja jooksul tehakse seal korrapäraselt väiksemaid või suuremaid remonttöid, seega parandatakse või parendatakse tema seisundit. Remonttööde sagedus ja suurus oleneb eeskätt hooldusjuhendis ettenähtud intervallidest aga ka hoone kasutamisel ilmnevast kulumist.

Remonttööde sagedus oleneb aga ka hoone kasutamisest. Kui mingil hetkel on vaja anda hoonetele uus funktsioon, muuta tema kasutusotstarvet, siis see võib kaasa tuua vähemal või suuremal määral hoone ümberehitamist. See eeldab aga uuesti projekteerimist ja ehitamist ja uue kasutusloa saamist. Hoonel algab uus kasutusetapp. Seda võiks nimetada uueks kasutustsükliks.

Hoone kasutustsükli pikkus võib ulatuda mõnest aastast mitmetesse sajanditesse. Uute hoonete kavandamisel ja projekteerimisel tuleks seda kindlasti arvestada. Lühikese kasutustsükliga hoonetel tuleks kandetarindid ja välispiirded teha nii, et ümberehitusi saaks teha ilma hoone põhitarindust muutmata. Nende hoonete hulka kuuluvad tootmishooned, kaubandus-, büroo- ja muud hooned. Nende ümberehituste käigus ei muutu sageli hoone kasutusotstarve. Sellisel juhul jätkub sama kasutustsükkel.

Pika kasutustsükliga hoonetel tuleks hoone projekteerida ja materjalid valida nii, et kasutusaja jooksul toimuks nende kulumine aeglaselt. Selliste hoonete puhul on hooldusjuhendi järgimine eriti oluline. Paratamatult ka selliste hoonete puhul jõuavad mõned tarindid oma kulumisega staadiumisse, kus neid on vaja parandada või asendada uutega. Selliste pika kasutustsükliga

hoonete hulka kuuluvad ühiskondlikud- ja tsiviilhooned nagu teatrid, kinod, sageli ka büroohooned, elumajad jpt.

Olemasoleva hoone parandamise või parendamise otsuse langetamiseks on vaja hinnata tema tarindite seisukorda aga ka seda, kas hoonele on seatud ehituslikust või kultuuriväärtuslikust seisukohast lähtuvaid kitsendusi, milleks võivad olla:

- kaitsealune hoone,
- hoone miljööväärtuslikus piirkonnas.

Lihtsalt olemasolevate hoonete parandamise või parendamise otsuse langetamine sõltub paljudel juhtudel majanduslikest kaalutlustest.

Hoonete ehitamine, kasutamine, parandamine või parendamine ja lõpuks ka lammutamine on tegevused, mis jätavad meid ümbritsevasse keskkonda oma jälje, mille suuruse hindamisel tuleb arvestada mitte ainult rahalist väljundit vaid ka keskkonnast tarbitud ressursside mahtu ja keskkonnale tekitatud reostuskoormust. Selle ressursi tarbimise hinnangu andmise üheks näitajaks on hoonele kulutatud energia:

- ehitamisel,
- kasutamisel,
- parandamisel või parendamisel,
- lammutamisel.

Keskkonnale tekitatud kahju näitajaks on kasvuhoonegaaside, eeskätt CO₂ emissioon ümbritsevasse keskkonda.

Seoses energiakandjate hinna pideva kasvuga on hoonetele püstitatud energiatõhususe nõuded, kus taandatakse hoone sisekliima tagamiseks kulutatavale energiale 1 m² kohta ühe aasta jooksul. See näitaja ei piirdu ainult hoone kütmiseks ja soojuse taaskasutamisest tekkinud tõhususe arvutamisega, vaid arvestatakse kasutatud energiakandjat.

Hoone energiatõhususe arvutamisel peaks kindlasti arvestama hoone ehitamiseks, parandamiseks ja parendamiseks kuluvate materjalide ning tarindite tootmiseks ja transpordiks kulunud energiat ning sellest tekkinud CO₂ emissiooni.

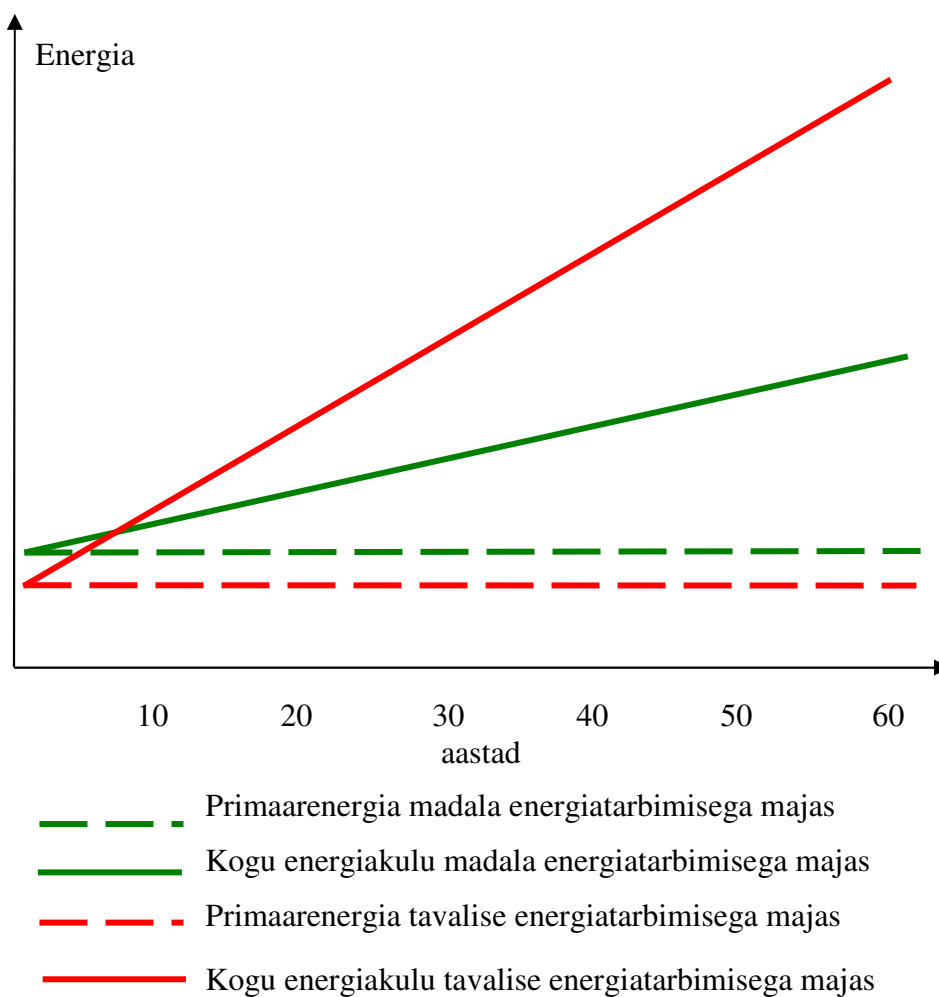
Hoonete energiatarbimise seisukohalt on määrava mõjuga hoone kasutamisel kuluv energia ja seda mõjutab oluliselt hoone elukaare pikkus.

Hoone kasutamisel kuluv energia on elutsükli plaanis ajaliselt kumuleeruv.

Energia, mis on kulunud hoone ehitamiseks ja parandamiseks nimetatakse primaarenergiaks. Selle arvutamise ja arvestamise analüüs on toodud lisas 1. Primaarenergia jaguneb aga hoone elukaarele s.o. kogu hoone eluea pikkusele.

Kuigi hoone eluiga võib olla väga pikk, peetakse otstarbekaks elukaare arvutused teha jaotatuna viiekümnele aastale (BV2-2007).

Suurema energiatõhususega hoonetes kulub ehitamiseks rohkem energiat, kuid eksploatatsiooni energia vähenemisega saavutatav efekt võib selle ehitamisele kulunud täiendava energia suhteliselt lühikese ajaperioodiga ära tasuda.



Joonis 1. Energia tarbimine tavalistes hoonetes, ja madala energiatarbega hoonetes

Ehitusmaterjalide primaarenergiasisalduse andmebaasi täiendamine on meil edasise töö üheks oluliseks osaks.

Hoone ehitamisele ja hooldusele (parandamisele) kuluva primaarenergia hulga määrab suuresti kasutatava materjali kaugus ehituskohast (lisa 1). Siin tulebki esile kohaliku materjali eelis. Kohalike materjalide ja eeskätt soojustusmaterjalide kasutamine piiretes on meie baasfinantseerimise töö teiseks oluliseks eesmärgiks

Hoonete ja tarindite seisukorra hindamine

Olemasolevate hoonete elukaare kulgemise kohta on väga oluline iga uuritava hoone ja ta tarindite seisukorra hindamine. Hoone seisukorra hindamist tuleb alustada vundamentide olukorra määramisest, mis sõltub paljudest teguritest. Hoone seisukord oleneb tema üksikute tarindite seisukorrast ning selle määramiseks on vaja teha uuringuid objektil ja sellele järgnevat kameraalset analüüsi. Seisukorra hindamine põhineb välitöödele objektil, kus uuritakse tarindite seisukorda välise vaatlusega, võetakse proove laboratoorseteks uuringuteks ja määratakse tarindite materjalide omadusi, mille põhjal saame otsustada tugevuse, kandevõime, kestvuse jne. kohta. Visuaalse vaatluse teel tehnilise seisundi hindamiseks on võimalik kasutada numbrilise hindamise meetodeid. Üheks oluliseks osaks on kõigi tehtud uuringute kaardistamine objekti plaanil. Kameraalsete tööde hulka kuuluvad objektil määratud

visuaalsete hinnangute, tehtud mõõtmiste, mittepurustavate meetoditega tehtud tugevusuuringute analüüsid ja objektilt võetud proovide laboratoorsed uuringud.

Raudbetooni kohta on maaehituse osakonnas tehtud uuringuid juba üle kolmekümne aasta. On koostatud metoodikad nii välise vaatluse teel kui ka objektil tehtavate lihtsate mõõtmiste alusel seisukorra hindamiseks ja kasutusea prognoosiks. On muretsatud seadmeid raudbetooni omaduste määramiseks objektil. Metoodikat on arendatud edasi käesoleva uurimistöö raames (lisa 2).

Oluliseks valdkonnaks objektil tehtavate mittepurustavate meetoditega materjalide omaduste määramiseks on viimastel aastatel saanud puitkonstruktsioonid. Selleks on muretsatud baasfinantseerimise vahenditega mitmeid seadmeid, mille koos kasutamisega objektil ja puidu järgneva laboratoorsete uuringutega püüame luua metoodika, mis võimaldaks mittepurustavate meetoditega määrata puidu tugevusnäitajaid ja selle alusel anda hinnanguid konstruktsioonide kandevõimele.

Nende uuringute tegemiseks on käesoleva uurimistöö käigus kujunenud doktorantide grupp ja kelle esialgsete uuringute tulemused on ette kantud ka rahvusvahelisel seminaril Hamburgis (lisa 3).

Puidu tugevuse ja sealt ka kestvuse oluliseks mõjutajaks on biokahjustused (puidu seened ja putukad), mille uurimist on tehtud väga paljudel objektidel ja mis on hetkel tipnenud Ruhnu kiriku puitkonstruktsioonide uurimisega (lisa 4). Need uuringud jätkuvad tõenäoliselt suuremas mahus koostöös Saksa, Austria ja Läti teadlastega.

Kohalikud ja ökoloogilised ehitusmaterjalid ja nende kasutamine

Baasfinantseeritava uurimistöö teiseks eesmärgiks on töötada välja ja katsetada nii laboratoorsetes kui tegelikes tingimustes kohalikel ja ökoloogilistel materjalidel põhinevaid ehituskonstruktsioone ning anda hinnang nende säästlikkusele.

Kohalikud ehitusmaterjalid on üldjuhul looduslikud ja valdavalt taastuvad materjalid, mida kasutatakse nende kaevandamis- või kasvukoha lähedal. Siia kuuluvad nii looduslikud materjalid (puit, savi, looduskivid, pilliroog jne) kui ka nende ümbertöötlemisel tekkivad jäätmed (saepuru, hõõvlilaast, linaluu, põhk jne). Looduslikud ehitusmaterjalid on taaskasutatavad ja vajadusel ka suhteliselt kergesti utiliseeritavad. Kohalikud materjalid on ka üldjuhul ökoloogilised, sest nende kasutamisel tekkiv ökoloogiline jalajälg on väike. Seega kohalike ehitusmaterjalide kasutamine on säästliku ellusuhtumise üheks väljenduseks.

Hoone ökoloogilisust ei hinnata ainult ökoloogiliste ehitusmaterjalide kasutamises vaid see saavutatakse hoone kui terviku mõju arvestamisega nii keskkonnale kui inimese tervisele kogu hoone elukaare jooksul alates hoone ehitamisest, kasutamisest, hooldamisest kuni lammutamiseni ja materjalide taaskasutamiseni või jäätmete ladustamiseni. Mida väiksem on mõju keskkonnale, seda ökoloogilisem hoone on seda säästlikum on hoone elukaar – elutsükel.

Mõjude hindamisel on üheks tähtsamaks lähtekohaks hoone energia- ja ressursimahukus. Mida rohkem energiat hoone ehitamisel, kasutamisel ja lammutamisel tarbitakse, seda suurem on ka mõju keskkonnale. Sama kehtib ka ressursi kasutuse kohta. Siin tuleb tähelepanu pöörata ka sellele, kas kasutatav ressurss on taastuv või taastumatu. Seega peetakse ökoloogilise ehituse põhitingimuseks võimalikult väikest mõju energia- ja aineringle ning loodusliku tasakaalu hoidmist, mis on võimalik saavutada õige materjali valikuga ning keskkonnasõbraliku planeerimise ja projekteerimisega.

Ehitusmaterjalide ökoloogilisuse hindamisel tuleks arvestada järgmisi materjali omadusi:

- madal primaarenergia sisaldus;
- madalad CO₂ emissioonid;
- madal difusioonitakistus;
- võime siduda õhust niiskust;
- emissioonid materjalist
- materjali looduslikkus ja tervislikkus;
- jäätmed ei ole toksilised.

Looduslike materjalide primaarenergiasisaldus on väike (Mithara 2007)

- | | | |
|----------------------|-------------------|--------------------------------|
| ○ toorsavi | 0,07 MJ/kg | (0,020 kWh/kg); |
| ○ tambitud saviplokk | 0,42 MJ/kg | (0,117 kWh/kg); |
| ○ põhksaviplokk | 0,22 – 0,47 MJ/kg | (0,061 kWh/kg – 0,131 kWh/kg); |
| ○ põhupakk | 0,24 MJ/kg | (0,067 kWh/kg); |
| ○ kohalik looduskivi | 0,79 MJ/kg | (0,220 kWh/kg). |

Üheks kohalike ökoloogiliste materjalide heaks näiteks on soojustusmaterjalid, mille uurimist on tehtud maaehituse osakonnas üle kolmekümne aasta. Tõsisemalt hakati neid aga uurima mõned aastad tagasi.

Uurimine sai hoo sisse kui moderniseerisime olemasoleva kliimakambri ja töötasime välja meetodika sellega materjalide soojusjuhtivuse määramiseks laboratoorsetes tingimustes (lisa 5)

Nende laboratoorsete uuringute loogiliseks jätkuks on soojustusmaterjalide omaduste uurimine olemasolevates välispiiretes.

Selleks et teha täpsemaid võrdlusuuringuid, projekteerisime ja ehitasime katsemaja. See on laudadest seinte, põrandate ja laega tappühendustega hoone, mille puidust välisseinad on moodustatud laudiste ühendamiseiga vineerist sidelappidega. Hoone kõik sarikad, piki- ja põiktalad on puidust ning ühendatud tappliidetega. Kogu konstruktsioon on kohalikest materjalidest ja säästlik (lisa 6).

Nendes seinte sektsioonides, põrandas ja laes saab teha võrdlevaid katseid erinevate soojustustega. Esimese talve katsetulemuste lühikokkuvõte on toodud lisa 7. Tehtud esialgsetest analüüsist selgub, et looduslikud materjalid on piirdekonstruktsioonides oma soojuseri juhtivuselt konkurentsivõimelised tööstuslikega (klaasvill 0,041 W/m²K, tselluvill 0,049 W/m²K, pilliroo heksel 0,053 W/m²K, linaluu 0,064 W/m²K). Uudse lahendusega katsemaja konstruktsioonid vajavad veel uurimist ja täiustamist. Katsemaja võrdlevatest uuringutest nähtub ka, et ka avatäidete tootjad valmistavad väga heade soojusisolatsiooninäitajatega uksi ja aknaid.

Katsemaja energiasäästlikkuse uurimiseks on koostatud mooduli mudel (lisa 8), mille laiendamise ja suurendamisega võib hiljem simuleerida ka suuremaid hooneid. Mudeli abil saab mudeli moodulite parameetrite muutmiseiga uurida:

- katsemaja soojuskadude jaotust erinevate konstruktsioonelementide lõikes;

- katsemaja soojuskadude suurust ja jaotust sõltuvalt erinevate soojusisolatsioonimaterjalide kasutamisest;
- katsemaja soojuskadude suurust ja jaotust konstruktsioonelementide muutmisel (nii piirete konstruktsiooni muutmisel kui ka sisemiste konstruktsioonelementide muutmisel - selleks on vajalikud mudeli väikesemahulised teisendused);
- katsemaja soojuskadude dünaamikat (soojuskadude muutumist ajas) sõltuvalt välistemperatuuri muutumisest ajas;
- katsemaja soojuskadude dünaamikat (soojuskadude muutumist ajas) sõltuvalt küttevõimsuse muutumisest ajas;
- katsemaja soojusvahetuse dünaamikat (soojusvoogude muutumist ajas)
- nii piirete konstruktsiooni muutmisel kui ka sisemiste konstruktsioonelementide muutmisel - selleks on vajalikud mudeli väikesemahulised teisendused.

Paralleelselt ehitusfüüsikaliste uurimistöödega katsemajas on alustatud hoonete energiatõhususe uurimist ka erinevates ekspluatatsioonis olevates hoonetes.

Alustatud on ka savipõhiste seinakonstruktsioonide katsetamist maaehituse osakonna ehituskonstruktsioonide laboris. Katsetamiseks on valmis ehitatud konstruktsioonide labori aknaavadesse järgmised seinad:

- Kergsaviplokid (kanepihakke soojustus ja savikrohvid);
- Sõrestiksein pillirootäidisega ja savikrohvid;
- Põhupallidest sein ja savikrohvid;
- Pilliroopallidest sein ja savikrohvid.

Jätkatakse uurimistööd ehitusfüüsika laboratooriumis ja katsemajas ning puidu uurimistööd mittekahjustavate meetoditega.

Õppekavas olevate ainete arendamine

Uurimistöö üheks eesmärgiks oli arendada õppeainete temaatikat valdkonna paremaks omandamiseks. Seoses väljundipõhisele õppele üleminekuga on täiendatud keskkonnasäästlikkuse dimensiooniga järgmisi õppeaineid:

1. MI.0713 Säästev ja keskkonnasõbralik ehitamine 4 EAP
2. MI.0644 Hoonete renoveerimine 4 EAP
3. MI.0838 Hoonete renoveerimine. Ainetöö 3 EAP
4. MI.0545 Ehitiste tehnilise seisukorra hindamine 3 EAP
5. MI.0345 Ehitusmaterjalid 6 EAP
6. MI.0822 Looduslikud ehitusmaterjalid 3 EAP
7. MI.0247 Puitmajade ja -tarindite tootmise tehnoloogia 4 EAP
8. MI.0479 Erikonstruktsioonid 3 EAP
9. MI.005 Ehitiste elutsükli kavandamine ja juhtimine...18 EAP.

Ehitusvaldkonnas tehtava uurimistöö ning magistrantide ja doktorantide uurimistöödele ühise väljundi leidmine

Baasfinantseeritava uurimistöö üheks eesmärgiks on ühendada ehituse vastutusvaldkonnas tehtavad magistrantide ja doktorantide uurimistööd ning erinevad rakenduslikud uurimistööd ühise nimetaja alla ja saavutada sellega suurem läbilöögivõime oma tegevuse tutvustamiseks nii Eestis kui ka rahvusvahelisel tasandil. Baasfinantseeritava uurimistöö raames on ühendatud meie erinevate õppejõudude, doktorantide, magistrantide ja spetsialistide tehtav uurimistöö ühtseks väljundiks, mis on näha raamkavas.

On tekkinud puidu ja selle kestvuse uurimiseks doktorantide töögrupp, kuhu on kaasatud ka magistriõppe üliõpilasi. Seda võib näha ka teiste raamkavas toodud teemade osas.

Uurimistöö kandepinna laiendamise näiteks on ka osalemine erinevates võrgustikes ja rahvusvahelistes projektides.

Rahvusvahelise koostöö raames osaleb Kalle Pilt COST aktsiooni IE0601 „*Wood Science for Conservation of Cultural Heritage*” juhtivkomitees.

Maaehituse osakond teeb EAS innovatsiooniosaku finantseerimisprojekti raames ehitise tehnilise seisundi hindamise põhimõttelist mudelit ehk töötab välja ekspertiisi rakendusjuhiseid.

Alates 2009 a sügisest osaleb EMÜ maaehituse osakond Central Baltic INTERREG IVa programmi projektis “Promoting Natural Materials know-how”. Projekti eesmärgiks on uurida ja propageerida kohalike looduslike materjale. Projekti raames on kavas uurida erinevaid kohalike looduslike soojustusmaterjale, nende soojustehnilisi omadusi, töötada välja metoodika toorsavi ehituseks kõlbulikkuse määramiseks lihtsamate katsetega objektidel, uurida erinevaid savikrohve.

Koostöös Turu Ülikooli ja Tallinna Tehnikaülikooli on kirjutatud Central Baltic INTERREG IVa programmi projekt “Sustainable village economy based on landscape biomass”, mille üheks väljundiks on pilliroog kui kohalik taastuv ehitusmaterjal. Projekti raames uuritakse erinevaid võimalusi kasutada pilliroogu kui soojustusmaterjali ning savi ja pilliroogu koos ehituskonstruksioonides. Projekti raames ehitatakse ka üks näidisobjekt-hoone, mis on puidust kandva osa, pilliroost soojustuse ja savikrohvist viimistlusega. Projekt on taotlemisel.

Kavas olev Ruhnu kiriku puitkonstruktsioonide säilitamise ja restaureerimise projekt.

Varasemad baasfinantseerimise teemaga seotud magistritööd (5-aastane ehitusinseneriõpe)

Juhendaja professor J. Miljan	
Koit Kuus	Pilliroog ja selle kasutamine ehituses
Anna Klement	Kaitsevahendite mõju puidu niiskuspaisumisele Влияние защитных средств на влажностное разбухание древесины
Martti-Jaan Miljan	Kohalike soojusisolatsioonimaterjalide kasutamine piirdekonstruktsioonides The usage of local thermal-insulating materials in enclosing structures
Madis Madal Risto Klaassen	Ümbertöödeldud betooni kasutamine ehituses Use of Recycled Concrete in Construction
Juhendaja lektor M. Kiviste	
Lauri Linnus Riho Halgma	Eelpingestatud ribipaneelide sarruse ja betooni mõningate omaduste määramine Determination of some properties of concrete and reinforcement of prestressed ribbed panels

2008. a kaitstud teemaga seotud magistritööd (5-aastane ehitusinseneriõpe)

Juhendaja prof. J. Miljan	
Kokk, Meelis	Rehielamu, selle ehituskonstruktsioonid ja kasutus Barn dwelling, its construction and usage
Lappard, Ivo	Puitmaterjalidest kergseina töö erinevates koormusolukordades. The lightweight wall of timber, how it works under different loadings and outer factors
Juhendajad prof. J. Miljan, lektor K. Pilt	
Šurmin, Jegor	Puidu mehaaniliste omaduste muutused aja jooksul Temporal changes of mechanical properties of wood
Juhendajad prof. J. Miljan, T. Mäuring	
Valge, Margus	Hoone energiatõhususe parandamise meetodid: ühepereelamu renoveerimise näide. Methods for improving energy efficiency of buildings: A case study of a one-family house in Estonia
Juhendajad prof. J. Miljan, M.-J. Miljan	
Metsmägi, Andres	Puidust kergseinte soojustamine, omadused ja kestvus. Warming of the facilitated wooden walls, their properties and stability
Juhendaja lektor K. Pilt	
Ilves, Marten	Puidukaitsevahendite mõju puidu tugevus- ja kõvadusnäitajatele. Wood protector influence against wood bending, pressure and hardness strength
Juhendaja lektor M. Kiviste	
Schmidt, Vahur	Betooni survetugevuse hindamine pörkevasara ja ultraheli mittepurustaval meetodil. Estimating concrete strength non-destructively with rebound hammer and ultrasonic method

Juhendaja lektor V. Pallav	
Nurm, Uku	Tartu Oskar Lutsu nimelise Linnaraamatukogu vundamentide vajumiste põhjuste uurimine ja analüüs The investigation of reasons and analysis of these foundations of the Tartu City Library named by Oskar Luts settle
Salumets, Ivo	Tartu vanalinna puitvundamentide uurimine Nikolai Olli tööde põhjal. Research of grillage and pile foundations in downtown of Tartu, based on the works of Nikolai Oll

2009. a kaitstud teemaga seotud magistritööd (5-aastane ehitusinseneriõpe)

Üliõpilane	Töö teema
Juhendaja prof. J. Miljan	
Erki Kukka	Eestis enamlevinud välisseinatüüpide maksumuse, primaarenergiasisalduse ja eksploatatsioonikulude uurimine. Research of the cost, ratio of embodied energy and exploitation costs of types of external walls more common in Estonia
Ain Siska	Looduslike soojustusmaterjalide omaduste uurimine puidust katsemajas. The assessment of the properties of natural insulation materials in the wooden experimental house
Juhendaja J. Miljan, K. Akermann	
Dmitri Mesteläinen	Kergsavi omaduste uurimine. Quality research of lightweight clay
Juhendaja K. Pilt	
Merilin Melesk	Ruhnu uue kivist torni mardikakahjustustega puitkonstruktsioonide tugevuskontroll. Evaluation of timber structures with beetle damages of the new church tower in Ruhnu
Juhendaja M. Kams	
Tambet Tasuja	Betoon- ja savikivist katusekattematerjalid ja nende aluskatted Concrete and clay roof covering materials and their underlayers
Juhendaja lektor K. Sähk	
Arne Pikk KÕ	Ehitusmaksumuse kujunemine ehituskaare erinevatel etappidel Formation of construction costs during different stages of construction
Märt Paloots KÕ	Ehitise tehnilise seisukorra hindamine suurpaneelamutes Technical supervision of panel houses
Juhendaja lektor M. Kiviste	
Valentina Pure	Hoone energiavajaduse ja maksumuse analüüs perearstikeskuse projekteerimise näitel. Energy efficiency and cost of buildings: a case study of a primary health care centre

2009. a kaitstud teemaga seotud bakalaureusetöö

Juhendaja M.-J. Miljan	
Martin Murumägi	Kergplokkidest ja betoonist välisseinte soojustehniliste näitajate uurimine. Study on the heat technical parameters of exterior walls built from light construction blocks and concrete

2010. a kevadel 2010 kaitsmisele tulevad teemaga seotud magistritööd

Üliõpilane	Teema	Juhendaja
Pirbe, Evelin	Olemasolevate hoonete energiatõhususe suurendamise võimalused	J. Miljan
Ulst, Kadri	Lina- ja kanepitoodete ning pilliroo kasutamine ehituses	J. Miljan, K. Akermann
Müür, Mart	Hoonete selektiivne lammutamine	J.Miljan, L.Stroh
Kurotškin, Maksim	Lõuna-Eesti kirikute niiskuskahjustuste analüüs ja ettepanekud probleemide kõrvaldamiseks	J.Miljan, L.Stroh
Ovtšinnikov, Oleg	Puitfassaadide renoveerimise meetodikad	J.Miljan, L.Stroh
Mõttus, Martin	Hüdraulilise lubja tootmise ja kasutamise võimalused Eestis	J.Miljan, L.Stroh
Põvvat, Rainer	Sildade raudbetoonkonstruktsioonide korrosioonikahjustuste uurimine	M. Kiviste, J. Miljan
Teder, Marko	Puidu tugevuse uurimine ultraheliga	K. Pilt
Kruuda, Ragnar	Resistograafi mõõtetulemuste ja puitelemendi sisepinge vaheline sõltuvus	K. Pilt
Lainurm, Martti	Resistograafi mõõtetulemuste ja puitelemendi mehaaniliste omaduste vaheline sõltuvus	K. Pilt
Jürissaar, Kaarel	Muinsuskaitsega seotud hoonete vundamentide seisundi ja alusparvedes kasutatud puidu uurimine tänapäevaste meetoditega	V.Pallav
Laur, Erkki	Supilinna miljööväärtuslike hoonete vundamentide vajumine, põhjused ja rihtimise meetodid.	V.Pallav, L. Stroh
Ojaste, Taavi	Eesti tingimustesse sobiv teisenduskõver betooni tugevuse hindamiseks pörkevasara-ultraheli mittepurustaval meetodil	M. Kiviste
Hindriksoo, Kärt	Eesti kultuuriväärtuslike hoonete tehnilise seisukorra hindamise meetodikad ja vahendid	K. Sähk

Lisa 1

Ehitamise ja ehitusmaterjalide energiamahukus

Primaarenergia sisalduse määramise meetodid

Primaarenergia sisalduse kohta on tehtud maailmas palju uuringuid ja koostatud andmebaase. Nendest on ülevaate andnud E. Kukka (2009) oma magistritöös.

Kõik materjalid sisaldavad endas peidetud kujul energiat, mida on kulutatud nende toodete valmistamiseks, transpordiks ja paigalduseks. Kiire areng energiasisalduse määramises ja uurimises on aidanud aru saada, kui tähtis on energiahulga vähendamine valminud hoonetes. Juba projekteerimise faasis tuleb arvestada kasutatavate materjalide energiamahukust ja seda arvesse võtta materjalide valikul. Küsimus jääb, kui usaldusväärsed on andmed materjali primaarenergia sisalduse kohta. Andmed võivad suuresti varieeruda, sest tööstustes kasutatav tehnoloogia erineb, transpordikulud on erinevad. Materjalide energiasisalduse määramiseks on olemas kolm põhilist meetodit (Best & de Valence 2002); (Mithraratne et al. 2007):

1. Protsessi-analüüsi meetod (*Process analysis*)

Seda meetodit peetakse kõige täpsemaks ja üldisemaks, see keskendub konkreetsete protsesside energiakulule. Meetodi keerukus seisneb valikutes: mida jätta arvestamata energia arvutamisel. Näiteks, kas arvestada tehases valgusele kulunud energiat või töstuki sõitmiseks kulunud kütust. Tooraine kaevandamisel ja transpordile kulunud energia on arvesse võetud. Selle meetodiga proovitakse võimalikult täpselt kõik energiatarbijaid arvesse võtta, tänu sellele on see meetod väga keerukas, aeganõudev ja seega ka kallis. Probleemiks võib veel olla õige info kättesaamine erinevatest tehastest ja tootjatelt, kõik ei soovi oma kulutusi avaldada ärilistel kaalutlustel

2. Sisend-väljund-meetod (*Input-output analysis*)

See meetod kasutab matemaatilist lähenemist ja on palju üldisem, siin proovitakse erinevate statistikaandmete põhjal arvutada teatud sektori energiakulu, arvestades elektrienergia ja kütuste hindu, tulemus ei ole kuigi täpne, aga on see eest lihtne ning andmed on kergesti kättesaadavad. Võetakse näiteks toormaterjalide hinna ja valmistoote hindade vahe, mille järgi proovitakse hinnad ümber arvestada energiaks.

3. Kombineeritud meetod (*Hybrid analysis*)

Selle meetodi puhul kasutatakse usaldusväärsemaid andmeid mõlemast meetodist, kasutatakse protsessi-analüüsi põhjalikkust ja sisend-väljundmeetodi lihtsust.

Kanadas tehtud uuring ütleb, et energiat esineb ehitusmaterjalides kahes vormis.

Primaarenergia (*embodied energy*) – mittetaastuva energia hulk, mis on vajalik materjali tootmiseks, kaevandamiseks, turustamiseks, platsile transportimiseks ja paigaldamiseks. Primaarenergia omakorda koosneb kahest komponendist:

- Otsene energia (*inglise keeles*)– energia, mis kulub ehitusmaterjalide transpordile ja nende paigaldamisele platsil.
- Kaudne energia (*inglise keeles*) – energia, mis kulutatakse toorme hankimiseks, töötlemiseks, tootmiseks ja turustamiseks, sisaldades nende tegevuste tegemisega seotud transpordile kulunud energiat.

Ekspluatatsioonenergia (*recuirring embodied energy*) - see on energia, mis kulutatakse siis, kui toode on paigas, tema hooldamisele, kasutamisele, uuendamisele või asendamisele materjali elutsükli jooksul. (Measures of Sustainability 2000)

Bathi ülikool Inglismaal on läbi viinud mahuka uurimuse (Hammond & Jones 2008) ehitusmaterjalide energia- ja süsinikusisalduse kohta ning koostanud andmebaasi, mida pidevalt uuendatakse. Andmed on kogutud üldkasutatavatest allikatest, kaasa arvatud artiklid ajakirjades, olelusringi hindamised (LCA-d), raamatud ja muud allikad. Andmed on koondatud kõik andmebaasi, mis sisaldab üle 1700 kirje. Nad on oma töös jaganud ehitusmaterjalid 34 gruppi (alumiiniumtooted, betoon, jne) ja koondanud need tabelitesse.

Uurimus jagab primaarenergia leidmise kolmeks meetodiks:

1. Hällist-hauani (*cradle to grave*)

Siin proovitakse arvesse võtta kogu kulunud energia maavara kaevandamisest kuni tootmise, turustamise, paigaldamise ja lammutamiseni, arvestades ka tehases valgustusele ja küttele kulunud energiat. See meetod on väga täpne, kuid keeruline, töömahukas ja kallis.

2. Hällist-väravani (*gradle to gate*)

Antud meetodi korral arvestatakse materjali valmimiseks kulunud energia nagu ülalgi, arvestatakse kuni tehastest lahkumiseni kogu kulutatud energia kogus. Antud meetodiga leitud primaarenergiasisaldusi saab kasutada tehastest erineva kaugusega asetsevate objektide materjalide energiasisalduse leidmisel, saab vastavalt kaugusega tehastest arvutada juurde transpordikulud.

3. Hällist-platsile (*cradle to site*)

See meetod arvestab kõiki kulusid kuni materjali platsile jõudmiseni.

Energiasisalduse andmebaasid

Bathi Ülikooli uurimuses on primaarenergiasisaldus leitud kasutades kohalike andmeid, kirjandusallikaid, tehaste aruandeid jne. Osadel materjalidel on arvestatud ka materjali enda energiasisaldust (toormaterjali kütteväärtus), osadel mitte. Toormaterjali enda energiasisaldus (*feedstock energy*) võib olla väga suur, näiteks plastidel. Andmete kogumisel tuleb jälgida, kas seda on arvestatud või mitte, või ei ole seda teada.

Enamasti valiti Bathi Ülikoolis meetod hällist-väravani, sest selle meetodiga saab vastavalt piirkonnale hinnata transpordi osakaalu materjali energiahulgast, samuti on transpordi osakaal materjali energiasisalduse koha pealt vaadates tühine, erinevate allikate andmetel 5-10 %, muidugi on ka erandeid, näiteks väga suure tihedusega materjalid nagu liiv, killustik, kruus jne vajavad kõige enam energiat transpordiks platsile. Kasutati viit valikukriteeriumi:

1. **Vastavus heakskiidetud metoodikate, standarditega.** Eelistatud on andmed, mis on pärit allikast, kus on kasutatud heakskiidetud metoodikat, ideaalne oleks võtta andmed, mis on saadud ISO 14040/44 (Rahvusvaheline standard keskkonnast lähtuv elutsükli analüüs) nõudeid arvestades. Kuid isegi selle standardi järgi tehtud uuringute tulemused võivad olla erinevad, sest standard annab mitmeid valikuid metoodikas, näiteks kas arvestatakse metallide ümbertöötlemist või mitte. Eelistatud variant oli ümbertöödeldud variant.

2. ***Olelusringi piirideks valiti hällist hauani meetod.*** Tooraine energia arvestatakse sisse ainult siis, kui see moodustab osa mittetaastuvast energiaallikast, näiteks nafta rafineerimistehastes kasutatud nafta kemikaalide ja plastide tootmiseks. Puidu puhul aga ei arvestata puidus sisalduvat energiat, kuna ta on taastuv materjal. Selline lähenemisviis on kooskõlas enamuse uuringute ja metoodikatega.
3. Kasutatakse ***erinevate riikide andmeid.***
4. Kus võimalik, kasutati ***tänapäevaseid andmeid***, sest minevikus oli tootmistehnoloogia vähe arenenud ja energiamahukas.
5. Ideaalne oleks võtta ***andmed, mis on saadud läbi põhjaliku elutsükli analüüsi***, kuid selle puudumisel arvestatakse kohalike energiaallikate osakaalu tööstuses, see puudutab enam süsiniku sisaldust, mis sõltub energiaallikast.

Ehitusmaterjalide valikul on proovitud anda andmed kas pooltoodetele või valmis toodetele (nt puitlaastplaat, vineer, jne), mitte aga toormaterjalile nagu näiteks puuhalg, alumiiniplokk, terasleht. Seda tehti selleks, et ilma edasiste arvutusteta saaks lihtsalt kõiki andmeid kasutada. Ümbertöödeldavatest materjalidest on eriti suur osakaal metallidel, nende puhul on toodud välja erinevad andmed vastavalt ümbertöötlemise protsendile ja saab valida enda riigile vastava protsendi.

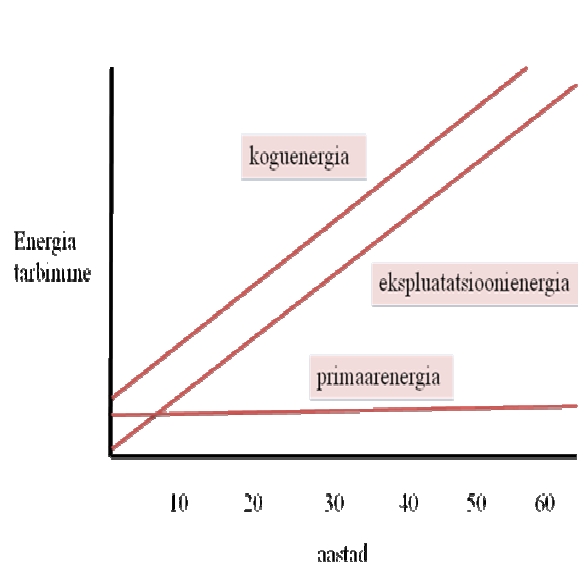
On mõned asjad, mille üle peaks veel arutlema:

- ***Möötühikud***, kas on õige võrrelda materjale üksnes massi põhjal? Tooted peaks olema võrreldavad funktsionaalse üksusena, näiteks kas sama ülesannet täitev ruutmeeter puitu kaalub vähem või rohkem kui sama ülesannet täitev alumiinium. Näiteks seinas kasutatavate plokkide mass on erinev, aga ülesanne üks.
- ***Eluiga***, kui toode A kestab 40 aastat, aga toode B 20 aastat, siis kumb on õigem?
- ***Jäätmed***, kui palju kulutatakse ressursi toote valmistamiseks ja kui palju tekib sellest jäätmeid, ka hoone lammutamisest tekkinud jäätmed, seda peaks ka kuidagi arvestama?
- ***Hooldus***, erinevad materjalid vajavad erinevat hooldust nt ülevärvimine.

Mida soojapidavam on maja, seda suurem osatähtsus on materjalide energiasisaldusel hoone elutsükli jooksul. Joonisel 1 on kujutatud energia tarbimist tüüpilises kolme magamistoaga elamus.

Joonisel 2 on kujutatud energiatarbimine madala energiatarbimisega majas.

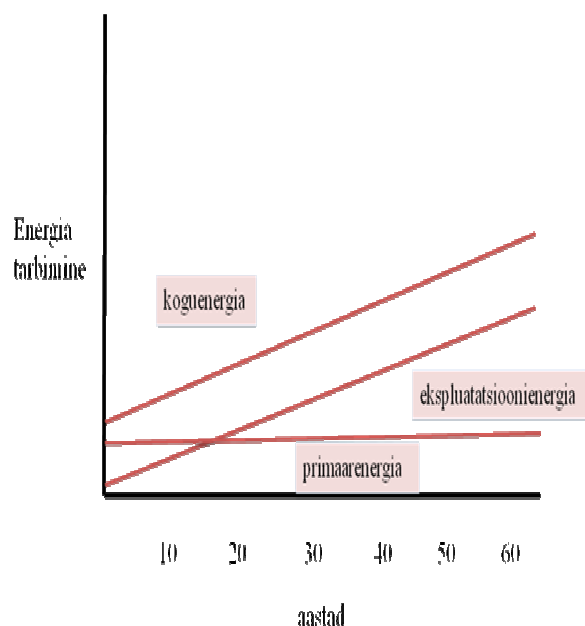
Vaadates joonist 2 on näha et madala energiatarbimisega majades on primaarenergial juba märkimisväärne osakaal kogu energiatarbimisest. Tuleviku suund ongi energiatõhusad majad ja seega tuleb üha enam arvestada ka ehitusmaterjalide energiasisaldusega.



Joonis 1. Energia tarbimine tüüpilises kolme magamistoaga elamus

Allikas: (Sustainable homes 1999)

Jooniselt 1 selgub, et kehvasti soojustatud hoonetel kulub kütteks nii palju energiat, et materjalide enda primaarenergiasisaldus on üpris tühine.



Joonis 2. Energia tarbimine madala energiatarbimisega majas

Transpordile kuluv energia

Iga materjali turustamiseks kulutatakse hulk energiat transpordile. Antud töös pole arvestatud transpordikulu tehasest platsile, sest teekond sõltub suuresti objekti asukohast, kauba kogustest jne. Vajadusel saab konkreetse objekti korral selle juurde liita. Transpordi osakaal materjali primaarenergia sisalduses varieerub väga suuresti, Berge & Henley (2001) väidab, et see võib moodustada kuni 20 protsenti kogu energiast, mis on kulutatud hoone ehitamiseks ja toob välja erinevate transpordivahentite energiakulu materjali vedamiseks Norras, ühikuks on MJ/t km.

Tabel 1. Energiakulu transpordile liikide kaupa (Berge & Henley 2001).

Transpordiliik	Energiakulu	
	MJ/t km	kW h/t km
Maanteetransport (diisel)	1,6	0,444
Meretransport (diisel)	0,6	0,167
Raudteetransport (diisel)	0,6	0,167
Raudteetransport (elekter)	0,2	0,056

K. Adalberth (1997) kirjutab oma artiklis, et ehitusmaterjalide transpordiks platsile kulunud energiahulk on ligikaudu 5-10 % materjali enegiamahukusest. Ta toob välja ka osade transporiliikide energiakulu, mis kulub massiühiku materjali transpordiks. Tema poolt antud ühikud on teisendatud kWh/t km – MJ/t km, arvestades et 1 kWh on 3,6 MJ.

Tabel 2. Energiakulu transpordiliikide kaupa (Adalberth 1997).

Transpordiliik	Energiakulu	
	MJ/t km	kW h/t km
Maantee (pikk vahemaa, > 50 km)	1	0,278
Maantee (lühike vahemaa, < 50 km)	2,7	0,750
Rannikulaevad (väiksemad alused)	0,47	0,131
Süvamere transport (suured alused)	0,22	0,056

Raporti (Shepresa *et al.* 2003) andmetel on transpordi energiakulu keskmised väärtused erinevate riikide lõikes, mis on koondatud tabelisse 3.

Tabel 3. Energiakulu transpordiliikide kaupa riikide lõikes (Shepresa *et al.* 2003).

Riik	Energiakulu	
	MJ/t km	kW h/t km
Kanada	1,18	0,328
Taani	1,44	0,400
Rootsi (pikk vahemaa)	1	0,278
Rootsi (lühike vahemaa)	2,7	0,750
Inglismaa	4,5	1,250
USA	2,13	0,592

Nagu erinevate allikate andmetest näha, on tulemused üpris erinevad, erinevused võivad olla põhjustatud järgnevatest aspektidest:

- sõiduki tüüp;
- kütusekulu, ökonoomsus;
- liiklustihedus;
- liikluspiirangud;
- teekonna pikkus;
- laadimine.

Ehitusmaterjalide primaarenergia sisaldus

Lisaks Bathi Ülikooli andmebaasile on uuritud ka teiste ettevõtete ja allikate andmeid ehitusmaterjalide energiasisalduse kohta:

1. Rockwooli tehases Inglismaal viidi 2003. aastal läbi toote elutsüklianalüüs ISO 14040 standardi põhjal ja *kivivilla* energiasisalduseks saadi 17,3 MJ/kg = 4,81 kWh/kg (Environmental LCI... 2003).
2. Saint Gobain gruppi kuuluv Isover viis läbi *klaasvilla* kohta elutsüklianalüüsi, kus saadi energiasisalduseks 10180 MJ/FU (FU-funktsionaalühiku kohta, st 100 ruutmeetrit 150 mm paksust villa), mis teeb ümberarvutades ligikaudu 43 MJ/kg = 11,94 kWh/kg kohta, nad arvestasid oma uuringus ka transpordi keskmiselt 223 km kaugusele, kust see jõuab tarbijani (Reydellet 2003).
3. Saint Gobain gruppi kuulub Gyproc tellis uuringu *kipsplaatide* kohta, see uuring on tehtud Soomes ning on tuginetud ISO 14020, ISO14040 standarditele ja ISO CD 21930

eel nõule. Kipsplaadi energiakuluks saadi 6,7 MJ/kg, see teeb ühe ruutmeetri kohta plaadi *GN13* korral 60,3 MJ/m² ja plaadi *GEK13* ja *GEKE13* korral 78,4 MJ/kg. Arvutustes pole arvestatud transpordile tehasest platsile kulunud energiat (Gyproc...).

4. **Betooni** kohta on elutsükli hinnang tehtud kolme soome betoonifirma põhjal (Lohja Rudus Oy Ab, Lujabetoni Oy ja Betset Oy), uuringu viis läbi Ehitus Info Fond RTS (soome keeles *Rakennustietosäätiö RTS*), tulemuseks saadi 0,85 MJ/kg, see on kulutatud energia kogus toorme kaevandamisest kuni tehase väravani. Betooni on K35 Soome standardi järgi, mis on euronormi järgi enam-vähem võrdne betooniklassiga C30/37. Betooni K80 energiasisaldus on 1,3 MJ/kg (Valmisbetoni K35...).
5. Soome Ehitus Info Fond RTS uuringu põhjal on autoklaavitud **poorbetonplokkide**, mis on toodetud H+H Siporex OY poolt, energiamahukus 3,46 MJ/kg, arvestatud kaevandamisest kuni väravani, need plokkid on analoogsed Aeroci poolt toodetavatega, tehnilised näitajad ja koostisosad on praktilised samad (Autoclaved aerated...).
6. Soome Ehitus Info Fond RTS uuringu põhjal on Paroc **kivivilla** energiasisaldus 14,4 MJ/kg, arvestatud kulutused energiale toorme kaevandamisest kuni tehase väravani (Paroc vuorivilla...).
7. Soome Ehitus Info Fond RTS uuringu põhjal on **ehituspuidu** niiskusesisaldusega 18%, kuusk ja mänd, energiasisaldus 4,3 MJ/kg, arvestatud kulutused energiale toorme kaevandamisest kuni tehase väravani. Kasutatud on umbes 15 saeveski andmeid (Sahatavara Puuinfo...).
8. Rootsi ettevõtte ThermiSol tehtud uuringust selgus **vahtpolüstüreeni** energiasisaldus, mis on 85,7 MJ/kg, sisaldab toormaterjali energiat ja tootmisenergiat (Thermisol...).
9. Austria Interneti andmebaasist (Baubook...), mis on valminud koostöös mitmete ülikoolide erinevate instituutide poolt, oli leida infot mõningate toodete kohta, näiteks Šveitsis tegutseva Maxit Grupi **krohvisegude** energiasisalduse kohta. *Röfix Unistar Light* krohvisegu on samaväärne toode, kui Eestis Maxit grupi poolt turustatavad segud *Serpo 405* ja *Serpo 410*, mida kasutatakse soojustuse liimimiseks seinale ja seina krohvimiseks koos armeerimisvõrguga, energiasisaldus on uuringu põhjal 4,43 MJ/kg. Dekoratiivkrohv *Synthesa Deko Putz 20* (Austria) on samaväärne Maxit Grupi poolt Eestis müüdava toote *Serpo Rillen 436* dekoratiivkrohviga ning energiasisaldus on 11,4 MJ/kg (27). Sisepahtlitest on *Röfix 610* pahtel samaväärne Eestis turustatava pahtliga *Vetonit L*, *Vetonit LR+* ja *Vetonit fine*, pahtli energiasisaldus on 1,56 MJ/kg. Kõigi toodete energiasisalduse arvutamisel on arvestatud energiakulu kuni tehase ukseni st tehasest väljumiseni valmistootena.

Materjalide energiasisaldus on erinevate allikate lõikes kohati erinev, tabelis 4 on välja toodud mõnede levinumate ehitusmaterjalide energiamahukus.

Tabelist 4 on selgelt näha, et kivivilla energiamahukus on allikate lõikes sama, nagu ka kipsplaadil ja poorbetonplokilgi. Klaasvilla korral on ülikoolide uuring sama aga isoveri poolt läbiviidud uuringu tulemus on suurem, mis võib tuleneda sellest, et nad on arvestanud ka valmistootete transporti tehasest keskmiselt 200 km kaugusele. Puidu erinevused tulenevad puidu erinevast töötlemisest, kuivatamisest, puidu liigist, saekaatrist jne. Eestile on kõige sobivamad Soome saeveskite andmed. Vahtpolüstüreeni korral pole Victoria ülikool arvestanud toormaterjali enda energiasisaldust (*feedstock energy*).

Tabel 4. Enamlevinud ehitusmaterjalide energiasisaldused erinevate allikate põhjal.

Materjal	Energiasisaldus, MJ/kg			
	ülikoolide uuring		tootjate andmed	
	Bath	Victoria		allikas
klaasvill	28	32,1	43	Isover
kivivill	16,8	-	14,4/17,3	Paroc/Rockwool
betoon C30/37	0,82	1,5	0,85	Soome tootjad
poorbetoonplokid	3,5	-	3,46	Siporex
kipsplaat	6,75	7,4	6,7	Gyproc
ehituspuut	7,4	3	4,3	Soome saeveskid
vahtpolüstüreen	88,6	44,3	85,7	ThermiSol Rootsi
värv	68	-	-	

Bath - Bath'i Ülikooli poolt läbi viidud uuringu andmed (Hammond 2008).

Inglismaa

Victoria - Victoria Ülikooli uuringu andmed (Embodied energy ...), Uus-Meremaa

Kõige ülevaatlikum on Bathi Ülikoolis koostatud primaarenergia andmebaas ICE, millest on meid huvitavatest materjalidest tehtud väljavõte tabelis 5.

Tabel 5. Ehitusmaterjalide primaarenergiasisaldus ja CO₂ emissioon

Materjal	Primaarenergia sisaldus		Süsihappegaasi emissioon
	MJ/kg	kWh/kg	kgCO ₂ /kg
Aken, alumiinium-puitraamiga, argooniga	1205,00	334,72	62,50
Aken, alumiiniumraamiga, argooniga	5470,00	1519,44	279,00
Aken, puitraamiga, argooniga	360,00	100,00	18,50
Aken, puitraamiga, ühekordne	286,00	79,44	14,60
Aken, PVC-raamiga, argooniga	2310,00	641,67	118,00
Alumiinium maagist	218,00	60,56	11,46
Alumiinium taaskasutatud	28,80	8,00	1,69
Asfalt	2,60	0,72	0,05
Asfalt, tee ja kõnnitee	2,41	0,67	0,14
Betoon, 1:1:2 (tsement:liiv:killustik)	1,39	0,39	0,21
Betoon, 1:2:4 (tsement:liiv:killustik)	0,95	0,26	0,13
Betoon, 1:4:8 (tsement:liiv:killustik)	0,69	0,19	0,08
Betoonplokid, fiiber	7,75	2,15	0,45
Betoonplokid, monteeritavad	2,00	0,56	0,22
Betoonplokid, poorsed autoklaavitud	3,50	0,97	0,32
Betoonplokid, survetugevus 10 Mpa	0,67	0,19	0,07
Betoonplokid, survetugevus 13 Mpa	0,81	0,23	0,10
Betoonplokid, survetugevus 8 Mpa	0,60	0,17	0,06
Bituumen	47,00	13,06	0,48
Isolatsioon, kivivill	16,80	4,67	1,05
Isolatsioon, klaasvill	28,00	7,78	1,53
Isolatsioon, kork	4,00	1,11	0,19
Isolatsioon, linaplaat	39,50	10,97	1,70
Isolatsioon, tselluloos	2,12	0,59	

Tabel 5 järg. Ehitusmaterjalide primaarenergiasisaldus ja CO₂ emissioon

Materjal	Primaarenergia sisaldus		Süsihappegaasi emissioon
	MJ/kg	kWh/kg	kgCO ₂ /kg
Keraamika, plaadid	9,00	2,50	0,58
Keraamika, sanitaar	29,00	8,06	1,48
Keraamika, seadmed	20,00	5,56	1,05
Keraamika, üldiselt	10,00	2,78	0,65
Kipsplaat	6,75	1,88	0,38
Kivi, killustik	0,30	0,08	0,02
Kivi, lubjakivi	0,30	0,08	0,02
Kivi, marmor	2,00	0,56	0,12
Kivi, marmorplaat	3,33	0,93	0,19
Kivi, üldiselt	1,00	0,28	0,06
Klaas	15,00	4,17	0,85
Krohv, kips-	1,80	0,50	0,12
Kummi, naturaalne	67,60	18,78	1,63
Kummi, sünteetiline	120,00	33,33	4,02
Kummi, üldiselt	101,70	28,25	3,18
Liim, epoksiid	139,30	38,69	5,91
Liim, fenoolformaldehüüd	88,10	24,47	
Liiv	0,10	0,03	0,01
Linoleum	25,00	6,94	1,21
Lubi	5,30	1,47	0,74
Messing, maagist	80,00	22,22	4,39
Paber, ehitus-	24,80	6,89	1,32
Paber, tapeet	36,40	10,11	1,93
Plastik, kile	69,40	19,28	2,50
Plastik, nailon	120,50	33,47	5,50
Plastik, polükarbonaat	112,90	31,36	6,00
Plastik, polüpropüleen kile	99,20	27,56	2,70
Plastik, polüstüreen	86,40	24,00	2,70
Plastik, polüstüreen, kuumvormitud	109,20	30,33	3,40
Plastik, polüüretaan	72,10	20,03	3,00
Plastik, PVC, toru	67,50	18,75	2,50
Plastik, PVC, valu	95,10	26,42	2,20
Plastik, PVC, üldine	77,20	21,44	2,41
Plastik, üldiselt	80,50	22,36	2,53
Polüetüleen, HDPE	76,70	21,31	1,60
Polüetüleen, HDPE torud	84,40	23,44	2,00
Polüetüleen, LDPE	78,10	21,69	1,70
Polüetüleen, üldiselt	83,10	23,08	1,94
Pronks	77,41	21,50	4,10
Puit, liimpuit	12,00	3,33	0,65
Puit, MDF	11,00	3,06	0,59
Puit, pressplaat	9,50	2,64	0,51
Puit, saematerjal	7,40	2,06	0,45
Puit, saepuruplaad	16,00	4,44	0,86

Tabel 5 järg. Ehitusmaterjalide primaarenergiasisaldus ja CO₂ emissioon

Materjal	Primaarenergia sisaldus		Süsihappegaasi emissioon
	MJ/kg	kWh/kg	kgCO ₂ /kg
Puit, spoon	9,50	2,64	0,51
Puit, vineer	15,00	4,17	0,81
Puit, üldiselt	8,50	2,36	0,46
Puupeits/värnits	50,00	13,89	5,35
Põhk	0,24	0,07	0,01
Savi, plaadid	6,50	1,81	0,46
Savitorud	7,03	1,95	0,49
Silikoon	2355,00	654,17	
Tellis	3,00	0,83	0,22
Tellis, glasuuritud	8,20	2,28	0,52
Tellis, lubjakivist	0,85	0,24	
Teras, leht, maagist	31,50	8,75	2,51
Teras, leht, maagist, galvaniseeritud	39,00	10,83	2,82
Teras, maagist	35,30	9,81	2,75
Teras, plaat, maagist	48,40	13,44	3,19
Teras, profiil, taaskasutatud	13,10	3,64	0,68
Teras, roostevaba	56,70	15,75	6,15
Teras, torud, maagist	34,44	9,57	2,70
Teras, traat, maagist	36,00	10,00	2,83
Teras, vardad, maagist	36,40	10,11	2,68
Teras, vardad, taaskasutatud	8,80	2,44	0,42
Teras, vardad, üldiselt	24,60	6,83	1,71
Teras, üldiselt	24,40	6,78	1,77
Terazzo plaadid	1,40	0,39	0,12
Tsement	4,60	1,28	0,83
Tsement, fiibriga	4,90	1,36	2,11
Tsement-lubimört	1,18	0,33	0,16
Tsementmört	1,40	0,39	0,21
Vaha	52,00	14,44	
Vaip, looduslikust materjalist	18,60	5,17	0,96
Vaip, nailonist	109,00	30,28	5,43
Vaip, polüetüleenist	106,50	29,58	5,55
Vaip, polüpropüleenist	95,40	26,50	5,03
Vaip, villane	106,00	29,44	5,48
Vask, maagist	70,00	19,44	3,83
Vask, taaskasutatud	17,50	4,86	0,96
Vesi	0,20	0,06	
Vinüülpõrandakate	65,64	18,23	2,29
Värv	68,00	18,89	3,56

Viidatud allikad

1. Adalberth, K.1997. Energy use during the life cycle of buildings: a method. – Building and Environment, 32(4), 317-320.

2. Autoclaved aerated concrete block. RT-Ympäristöselosteet.
[http://www.rts.fi/ymparistoseloste/ys026pdf_eng.pdf] (26.02.2009)
3. Baubook. Die Datenbank für ökologisches Bauen & Sanieren.
[<http://www.baubook.at/zentrale/>] (17.03.2009)
4. Berge, B., Henley, F. 2001. The ecology of building materials. Boston: Architectural Press. 435 pp
5. Best, R., & De Valence, G. 2002. Design and Construction. Building in value. Oxford: Butterworth-Heinemann. 504 pp
6. Embodied energy coefficients. [<http://www.victoria.ac.nz/cbpr/documents/pdfs/ee-coefficients.pdf>] (25.02.2009)
7. Environmental LCI data for Rockwool rollbatt. 2003.
[<http://www.wilhams.com.my/images/LCI.pdf>] (25.02.2009)
8. Esperk, T. 2007. Eesti väike-elamute tarindite olemusringi hindamine. Tartu Ülikool. (magistritöö). Tartu.
9. Esperk, T. 2004. Ehitusmaterjalide energiamahukusest Eesti tüüpmajade näitel – Keskkonna ja elutsükli hinnangud ehituses. Tartu: Guttenberg, 35-38
10. Gyproc. RT-Ympäristöselosteet.
http://www.rts.fi/ymparistoseloste/Gyproc_ymparistoseloste_nro25.pdf (26.02.2009)
11. Hammond, G & Jones, C. 2008. Inventory of carbon & energy (ICE), Version 1.6a. Bath: University of Bath.
12. Kukka, E. 2009. Eestis enamlevinud välisseinatüüpide maksumuse, primaar-energiasisalduse ja eksploatatsioonikulude uurimine. Tartu. Eesti Maaülikool. Magistritöö.
13. Measures of Sustainability. Canadian Architect.
[http://www.canadianarchitect.com/asf/perspectives_sustainability/measures_of_sustainability/measures_of_sustainability_embodied.htm] (03.02.2009)
14. Mithraratne, N & Vale, B & Vale, R. 2007. Sustainable living, The role of whole life costs and values. Oxford: Elsevier Ltd.
15. Paroc vuorivilla. RT-Ympäristöselosteet. [<http://www.rts.fi/ymparistoseloste/ys008.htm>] (26.02.2009)
16. Reydellet, A., Charbonnier-Loup, S., Médard, M. 2003. Glass fiber LCA & Environmental and health data sheet. <http://www.lcacenter.org/InLCA-LCM03/Dereydellet-presentation.pdf> (26.02.2009)
17. Sahatavara Puuinfo Oy. RT-Ympäristöselosteet.
[<http://www.rts.fi/ymparistoseloste/ys006.htm>] (26.02.2009)
18. Shepresa, K., Schuurmans, A., Edwards, S. 2003. Life-cycle assessment in building and construction: A state-of-the-art report. Brighton, UK
[http://books.google.com/books?id=_EFDCDmI7qWC&pg=PA59&dq=building+material+s+transport+energy&lr=#PPA76,M1] (27.02.2009)
19. Sustainable homes. 1999. Embodied energy in residential property development, Hastoe Housing Association
[<http://www.sustainablehomes.co.uk/upload/publication/Embodied%20Energy.pdf>] (27.01.2009)
20. Thermisol. Byggvarudeklaration, yttre och inre miljö -Termisk isolering.
[<http://www.thermisol.se/pdf/byggvarudek.pdf>] (27.02.2009)
21. Valmisbetoni K35. RT-Ympäristöselosteet.
[<http://www.rts.fi/ymparistoseloste/ys013.htm>] (26.02.2009)

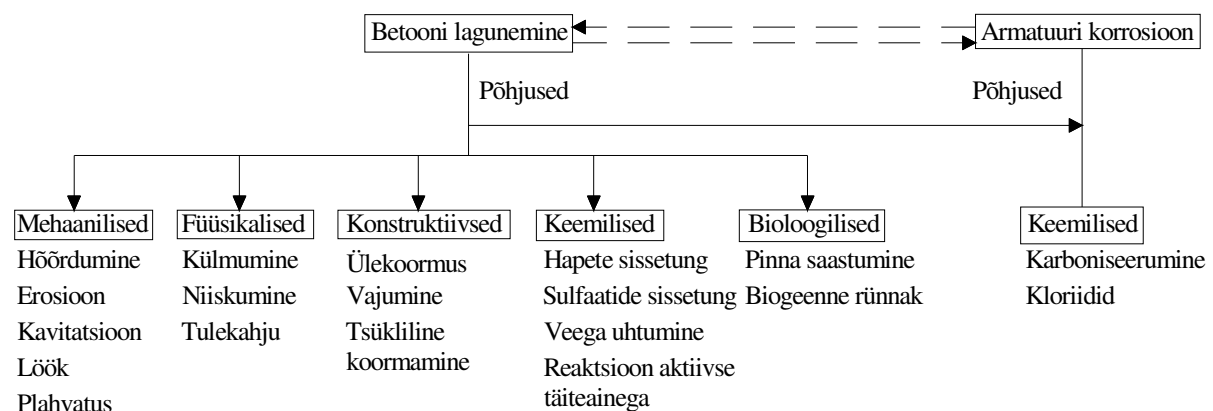
Lisa 2

Raudbetoontarindite kestvus, kandevõime ning nende mudelid

Üldine taust

Raudbetoontarindid peavad olema projekteeritud ja ehitatud selliselt, et nad oleksid võimelised vastu seisma tema kasutuskohas toimivatele keskkonna- ja eksploatatsioonitingimustele ning projektikohastele koormustele kogu kavandatud kasutusea.

Raudbetooni kestvust vähendavad lagunemisprotsessid jagunevad betooni puhul (joonis 1): füüsikalisteks (mis omakorda jagunevad looduslikeks nagu külmatsükliid, niiskumine-kuivamine ja kunstlikeks nagu näiteks tulekahju), mehaanilisteks (kulumine, erosioon, löök, plahvatus), keemilisteks (hapete, sulfaatide, ammoonium ja magneesiumioonide rünnak, puhta veega uhtumine või betoonkivi reaktsioon agressiivse täiteainega), bioloogilisteks (pinna saastumine, biogeenne rünnak) ja konstruktiivseteks (ülekoormus, vajumine, tsükliline koormamine). Praktikas võivad need protsessid ilmned samaaegselt, omades tihti sünergilist koostoimet. Betooniga toimuvaid muudatusi, nagu plastne vajumine, plastne mahukahanemine, roome ja soojuspaisumine ei loeta traditsiooniliselt lagunemisprotsessideks, kuigi nad on samamoodi olulised tarindi kestvusele (Bertolini, 2004).

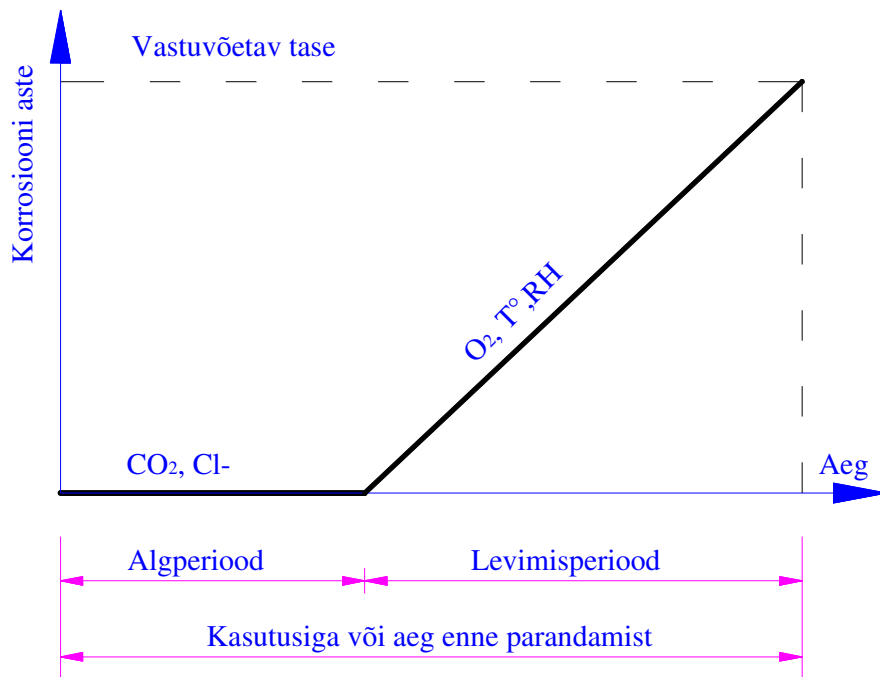


Joonis 1. Raudbetooni lagunemise põhjused (Bertolini, 2004)

Betooni lagunemisprotsess (mõnikord nimetatud ka kui betooni korrosioon) ja armatuurterase korrosioon on väga lähedalt seotud, seega raudbetoonkonstruktsioonide lagunemispõhjuste uurimise juures tuleb arvesse võtta mõlemat.

Betoonis oleva terasarmatuuri korrosiooni peamised põhjused on kloriidid või betooni karboniseerumine. Selliste protsesside eripäraks on see, et nad ei kahjusta betooni vaid liiguvad läbi selle pooride teraseni või muudavad betooni keskkonda ja loovad tingimused armatuuri roostetamiseks. Teised happelised ja agressiivsed ioonid nagu näiteks sulfaadid reageerivad betooniga, mistõttu ei saa neid lugeda mitte armatuuri vaid betooni korrosiooniprobleemide hulka (Aleksjev, Rosenthal, 1976; Broomfield, 1997).

1982. aastal võttis Rootsi teadlane K. Tuutti raudbetoonkonstruktsioonide kestvuse uuringutes kasutusele mõisted algperiood ja levimisperiood. Tema mudeli graafiline kujutis on näidatud joonisel 2.



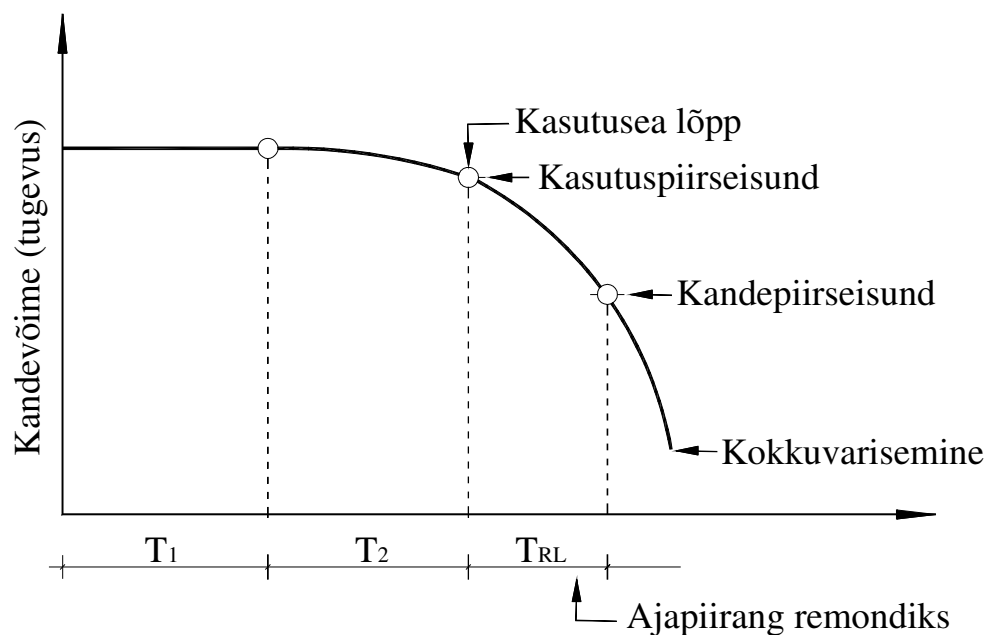
Joonis 2. Raudbetootarindi kasutusiga Tuutti mudeli järgi (1982).

Vastavalt joonisel 2 kujutatud mudelile on alperiood aeg raudbetootarindi ehitamisest kuni terassarruse korrosiooni alguseni. Levimisperioodil toimub korrosiooni areng kuni teatava vastuvõetava tasemeni raudbetootarindi seisundis (prao teke, kaitsekihi mahakukkumine, suured läbipained vms.).

Valdav enamus raudbetooni kestvust uurivaid teadlasi on selliseid perioode aktsepteerinud ning raudbetootarindite kasutusea mudelit edasi arendanud, sest korrosioonireaktsioonid ei hakka momentaalselt ja nende kiirus ajas muutub. Olulisemad muudatused kasutusea mudelites on välja pakkunud, Aleksejev (1990), Weyers jt. (1994), Broomfield (1997), Bamforth (1997), Murakami jt. (2002), Li jt. (2008).

Mitmed uurijad on märkinud, et enamus raudbetooni kestvuse uuringuid keskendub ainult alperioodile. Levimisperioodi käsitleb palju vähem uuringuid. Suhteliselt harva on uuritud seda, mis juhtub raudbetooniga peale levimisperioodi lõppu ja kuidas muutub raudbetootarindi kandevõime erinevatel ajaperioodidel.

2007.a. võtsid Mehhiko teadlased (Torres-Acosta jt.) kokku mitmete uurijate ning enda paindekatsed raudbetootarinditega (postid, talad, plaadid) katsetulemused ja pakkusid sellest lähtuvalt välja raudbetootarindi kandevõimel baseeruva kestvuse mudeli (joonis 3).



Joonis 3. Raudbetootarindi kestvus Torres-Acosta jt. (2007) mudeli järgi

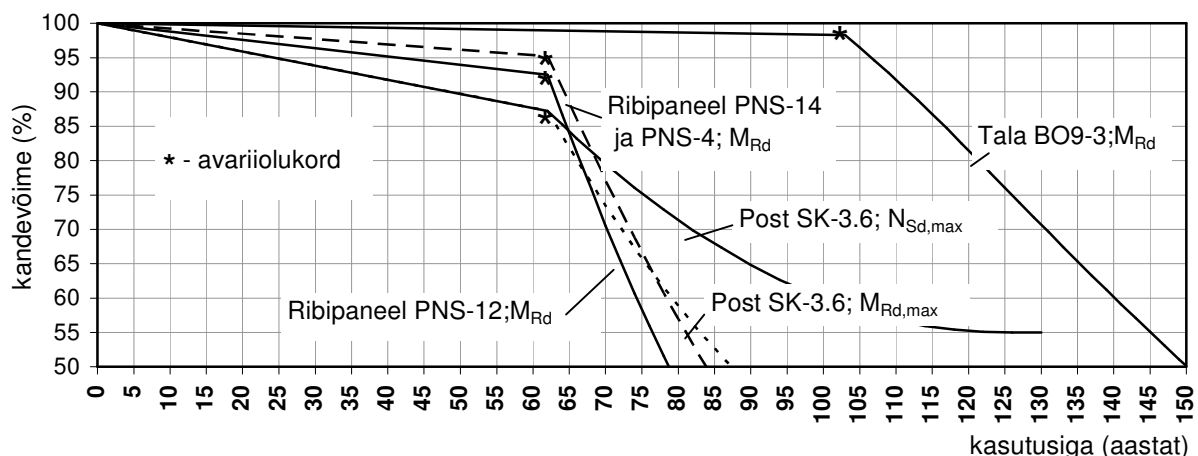
Torres-Acosta jt. (2007) mudeli järgi koosneb raudbetootarindi eluiga (T) kolmest faasist ehk siis $T = T_1 + T_2 + T_{RL}$. T_1 on esimene faas (või korrosiooni algperiood) ning T_2 on teine faas (või korrosiooni levimisperiood), mille sisu käsitlevad ühtivad Tuutti mudeliga. Raudbetootarindi kasutusega on Torres-Acosta jt. (2007) mudeli jägi defineeritud kui korrosiooni algperioodi ja levimisperioodi summa. Kolmas faas, T_{RL} (või jääkeluiga) saab alguse välisest visuaalsest korrosioonikahjustusest kuni selliste kahjustuste tasemeni, kus tarindi projekteerimisel ette nähtud osavarutegurid on ammendunud. Sellele omakorda järgneb teatud ajaperioodi pärast tarindi kokkuvarisemine. Jooniselt 3 on näha, et tarindi kandevõime on esimeses kahes faasis peaaegu sama. Peale tarindi jõudmist jääkeluea faasi hakkab tarindi kandevõime kiiremini vähenema.

Tuleb võtta arvestada et Torres-Acosta jt. (2007) ja teiste uurijate joonisel 3 kujutatud katsed on tehtud laboratoorses tingimustes, kus võrreldes tarindi tegeliku elueaga on tegemist väga lühiajaliste katsetega. Tarinditesse lisati kloriide, et korrosiooni kiirelt esile kutsuda ning korrosiooni kiirust suurendati välise vooluallika ühendamisega. Torres-Acosta jt. (2007) on samuti tõdenud, et kiirendatud korrosiooniga on keeruline simuleerida tegelikku olukorda, mis ei anna alati võrreldavaid tulemusi looduslikes tingimustes toimunud korrosiooniga.

Tehtud tööd ja tulemused

Raudbetootarindite kestvust ja kandevõimet on Eesti Maaülikooli maaehituse osakonnas uuritud alates 1970-ndatest. Tolleaegses EPA Ehitusmehaanika kateedris töötati välja meetodika raudbetootarindite visuaalseks hindamiseks 6-pallisel skaalal (Miljan, Keskküla 1975).

Välise vaatluse teel on aastatel 1974 kuni 1997 põllumajandushoonetes hinnatud 1198 raudbetoonposti, 2601 raudbetoonjala ja 23336 ribipaneeli. Arvestades hindamistulemuste põhjal koostatud regressioonisirget ja konstantset korrosiooni kiirust on koostatud graafik põllumajandushoonete raudbetootarindite kandevõime vähenemise kohta kasutusajas (joonis 4)



Joonis 4. Põllumajandushoonete raudbetoonkonstruktsioonide kandevõime vähenemine kasutuses (Laiakask, Miljan 2002).

Lisaks analüütilisele tööle on raudbetoonist ja eelpingestatud raudbetoonist ribipaneelide kandevõimet uuritud ka eksperimentaalselt. Ajavahemikus 1974-2006 on katsetatud on 18 raudbetoonist ribipaneeli (mark PKZH-2) ja 32 eelpingestatud raudbetoonist ribipaneeli (mark PNS-3, PNS-12 ja PNS-14).

Käesoleva projekti toimumisaja jooksul on koostatud kahe artikli käsikirjad, mis käsitlevad ribipaneelide katsetamist. Eelpingestatud ribipaneelide katsetulemusi käsitletakse artiklis a), „Flexural capacity of corrosion damaged prestressed concrete panels“ ning kõikide ribipaneelide katsetulemusi artiklis b), „Residual flexural strength and behavior of corroded precast ribbed panels“ (mõlema artikli autorid M. Kiviste ja J. Miljan).

Artikli b) käsikirjas on välja pakutud täiendus eelnevate uurijate katsetulemustele (joonisel 3), kuna hinnatud ja katsetatud on ribipaneele, mis on korrodeerunud aastakümneid looduslikes tingimustes.

Mõlema artikli käsikirjad on esitatud ajakirjale ACI Structural Journal (1.1. ajakiri ETIS klassifikatsiooni järgi) ning artiklite kohta on saabunud retsensentide küsimused/kommentaariid. Hetkel toimub retsensentide küsimustele vastamine ja paranduste/täiendustega käsikirjade ettevalmistamine.

Lisaks eelnevale on aastatel 2006-2009 uuritud Põhja-Eestis asuva põlevkivi keemiatehase raudbetoonarandite (monoliitset raudbetoonist postid ja talad) ja betooni seisundit karmis põlevkivi töötlemise keskkonnas. Selle uuringu kohta tehtud artikkel c), „Condition of structures and properties of concrete of existing oil shale chemical plant“ (autorid M. Kiviste, J. Miljan, R. Miljan, M. Kiprušenkov) on avaldamiseks aktsepteeritud ajakirjas Oil Shale (1.1 ajakiri ETIS klassifikatsiooni järgi). Artikkel avaldatakse Oil Shale 2009.a. detsembrikuises numbris.

Kasutatud kirjandus:

Aleksejev S. N. Jt. Dolgovetšnost železobetona v agressivnõh sredah. Moskva, Stroiizdat, 1990, 312 lk.

Aleksejev S.N., Rosenthal N.K. Korroziionnaja stoikost železobetonnoh konstruksii v agressivnoi promõšlennoi srede. Moskva, Stroiizdat, 1976, lk. 205.

Bamforth P. Probabilistic performance based durability design of concrete structures. Management of Concrete Structures for long term serviceability. Ed. Byars & McNulty. Telford, London, 1997, p. 33-44.

Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R. Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis, Repair. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, 2004. pp. 392

Broomfield, John P. Corrosion of Steel in Concrete Understanding, investigation and Repair. E & FN Spon, London, 1997, pp. 240.

Laiakask, E., Miljan J.. Influence of the steel reinforcement corrosion on the agricultural building reinforced concrete structure bearing capacity. Concrete for a Sustainable Agriculture: Agro-, Aqua and Community Applications, Ghent, 2002, pp. 157.

Miljan, J., Keskküla, T., Prognozirovaniye dolgovetšnosti železnobetonnoh konstruksij v životnovodtšeskih zdaniyah. V sb.: Voprosõ nadjožnosti železnobetonnoh konstruksij. Kuibõšev, 1975, lk. 120 – 122.

Murakami, K., Kondo, K., Ishikawa, S., Yamashida, M. Repair and Reinforcement of the Oyakawa Bridge and Two Other Bridges. Proceedings of the first fib Congress, Osaka, Japan, October 13-19, 2002

Torres-Acosta, A., Navarro-Gutierrez, Teran-Guillen, J. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams. Engineering Structures Vol. 29, 2007, p. 1145–1152

Tuutti, K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI-research 4:82, 1982, pp. 305.

Weyers, R.E., Fitch, M.G., Larsen, E.P., Al-Qadi, I.L., Chamberlin, W.P. & Hoffman, P. C. Concrete Bridge Protection and Rehabilitation: Chemical and Physical Techniques. SHRP-S-668, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 1994.

Lisa 3

Vana puidu tugevusomaduste uurimine

See lisa on maaehituse osakonna puidu kestvuse uurimise grupi (doktorandid Kalle Pilt, Vello Pallav, Matis Miljan ja prof. Jaan Miljan) esimene väljund puidu tugevusomaduste määramiseks mittepurustavate meetoditega, mis on ette kantud Hamburgis 7.-10. oktoobril toimunud konverentsil COST Action IE0601: Wood Science for Conservation of Cultural Heritage. International Conference on Wooden Cultural Heritage: Evaluation of Deterioration and Management of Change.

Hoonete puitkonstruktsioonide seisundi hindamine on olnud probleemiks alates puidu kasutamisest tänapäevani. Laboratoorsete katsete tegemiseks tuleks kontrollitav detail hoonest teisaldada ja laborisse toimetada, kuid selline lähenemine on tihti võimatu, eriti kultuuriväärtuslikel hoonetel. Puitdetailide kontrollimisel tuleks lisaks puidu mehaanilistele omadustele (paindetugevus, survetugevus j.t) leida ka detaili jääkristlõige ehk biokahjustustest nõrgestamata ristlõige [1].

Biokahjustused on puitdetailide pikaajalisust mõjutavatest teguritest kõige olulisem, seega on puitkonstruktsioonide pikaajalisediagnoosimisel biokahjustuste ja nende kahjustusulatusle leidmine määrava tähtsusega [2]. Põhilisteks biokahjustajateks põhjamaades (Läänemere piirkonna maades) on puitu lagundavad seened – harilik majavamm, keldrivamm ja antrodia liigid, kuid oluliseks võib pidada ka mardikate poolt tekitatud kahjustusi [3].

Ulatuslikke uuringuid vana puidu säilimise osas on teinud Eesti Maaülikooli teadlased dotsent Nikolai Olli aastatel 1935- 1990 ja puitkonstruktsioonide osas prof. Tõnu Keskküla aastatest 1969 kuni tänaseni. Nikolai Olli põhjalikud uurimused andsid ülevaate Tartu vanalinna nõrkadele alustele rajatud vundamentide konstruktsioonidest, puittaluste kasutamise eeldatavast ulatusest ning kasutatud puidu seisundist. Tehtud uurimused kinnitavad ajalooliselt puidu laialdast kasutust ka nõrkade pinnaste alusvundamentidena ning piisavale sügavusele paigaldatud ja soodsa veetaseme korral püsivad puitvundamendid sajandeid.

Käesolevas töös üheks vaadeldavaks objektiks oli Tartu Vanalinnas Raekoja plats 8 asuv hoone, kus puittaluste uurimist on alustanud N. Olli [4, 9]. See hoone on sellisena olnud juba enne 18.ndat sajandit. Hoone Raekoja plats 8 on praegu muinsuskaitse all ja selle arhitektuurilist ja kultuuriväärtusliku väärtust on põhjalikult kirjeldanud H. Üprus [5].

Tõnu Keskküla oma puitkonstruktsioonide pikaajalisuse uuringutes on välja töötanud visuaalsel vaatlusel teostatava puitkonstruktsioonide seisukorra hindamise meetoodika ja välja toonud esmased arvutused puitkonstruktsioonide kasutusea leidmiseks. Tänapäeval on laborivälistel töödel (fieldwork) võimalik kasutada vähemriskantseid uurimismeetodeid: akustilised meetodid, termotomograafia ja mehaanilised mõõteseaded (pilodin ja resistograaf) [6, 7, 8].

Maaülikoolis on viimastel aastatel tehtud mitmeid katseseeriaid pilodini ja resistograafia ja selle tulemusena on leitud, et Pilodini mõõtmistulemused on osaliselt kasutatavad – puitdetaili pealmise kihi tugevusomaduste määramiseks. Resistograafia tehti esimesed ehituskonstruktsioonide uuringud mudeliga IML-RESI F400, kus puudus andmete digitaalne kuvamine. Käesolevad uurimistööd jätkuvad resistograafia SIBERT Digital microProbe (joonis 1).

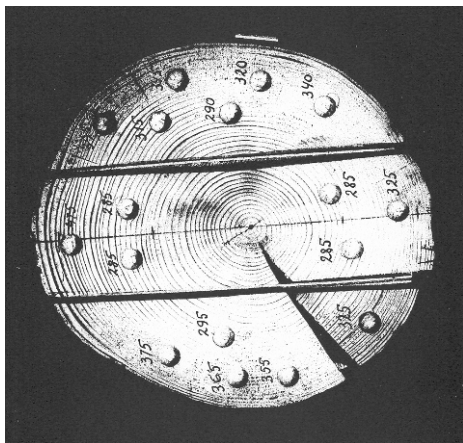


Joonis 2. Resistograaf - mudel SIBERT Digital microprobe.

Material ja meetodid

Katsekehadeks vana puidu uurimisel on kasutatud dotsent Nikolai Olli poolt aastakümnete jooksul kogutud vundamentides kasutusel olnud puidu proovikehi, millel katseid sooritati 1949-1975 ja ladudes säilinud proovikehadest valiti katsetusteks need, mida oli võimalik N.Olli varasemate uurimistulemustega otseselt siduda [4].

1972 aastal on N. Olli poolt proovikehad võetud Raekoja plats 8 (Nõukogude väljak 8) [4]. “Tõmmati välja kolm vaia (10A-4, 10A-5, 10A-6). Ühest rostvärgipalgist (10A-1) lõigati suurem (pikkus 1,2 m) proovitükk, teise rostvärgipalgi (1B-3) otsast lõigati väiksem tükk (pikkus 0,2 m). Kahe vaia (1B-2 ja 13-2) ülemisest otsast lõigati 20....26 cm pikkused tükid.”[4]



Joonis 2. N. Olli katsekeha 1972. [4]



Joonis 3. N. Olli katsekeha 2009

Nimetatud väljatõmmatud vaiadest on säilinud proovikettaid vaiadest 1B-2, 10A-1, 10A-4, 10A-5, 10A-6. N. Olli poolt on 1972 aastal määratud puidu füüsikalise- mehhaanilised omadused (mahukaal, niiskus, survetugevus, painde tugevus, otspinna kõvadus jne), aastarõnga laius ning sügis- kevadpuidu osakaal. Saadud tulemused on redutseeritud puidu 15% niiskusesisalduseni valem 1. Nimetatud valem on valitud põhjusel, et selle valemi põhjal redutseeris tulemusi ka N. Oll ja parema võrreldavuse saavutamiseks kasutatakse sama meetodit. Tulemuste võrreldavuse saavutamiseks ka EL tehtud katsetega redutseeritakse andmed tulevikus 12%-lisele niiskusele ja EN standarditele vastava valemi põhjal [10].

$$f_{15} = f_w [1 + \alpha(w - 15)] \quad (1)$$

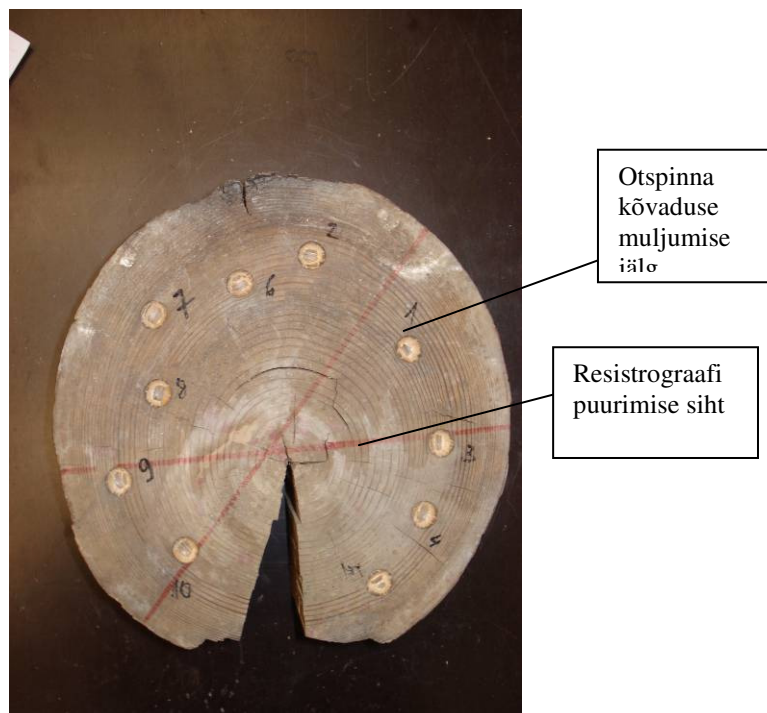
kus $\alpha = 0,04$ ja W on puidu niiskusprotsent katsetamise hetkel. Tulemustest on toodud väljalõige tabelisse 1 [4].

Tabel 1. Puidu survetugevus kg/cm^2 – väljavõte N. Olli tabelist [4]

Vaia nr.	Paku nr	Rist-lõike piirkond	Puiduliik	Teimide arv	Puidu survetugevus			Aastaringide arv cm kohta
					keskmine	maksimum	minimum	
10A4	2	1	kuusk	10	393	425	365	7,7
		2		9	326	358	309	5
10A4	4	1	kuusk	16	423	465	340	6,8
		2		16	357	390	325	5,1
10A5	2	1	kuusk	10	392	425	355	6,6
		2		9	392	415	355	7,2
10A5	4	1	kuusk	12	391	425	355	5,5
		2						
10A6	2	1	kuusk	7	486	515	470	4,9
		2		6	382	395	365	4,5
10A6	4	1	kuusk	12	393	445	320	6,3
		2						
10A1	-	I	sanglepp	39	426	520	120	
		II		16	417	455	385	

Vana puidu kasutamisel seoste määramiseks resistograafia väärtuse (RM) ja laboratoorsetel katsetel puidu füüsikaliste omaduste määramise vahel oli otstarbekas hinnata puidu füüsikaliste omaduste muutusi pikemaajalisel säilitamisel (ca 40 aastat), puidule sobivates tingimustes. Säilinud prooviketastel puuriti südamiku sihis resistograafia (joonis 4) kolm puurimist saamaks (RM) valem 2.

$$RM = \frac{\int_0^l Area}{l} \quad (2)$$



Joonis 4. Katsekeha 10A 1

Peale RM teadasaamist määrati prooviketastel pressiga Instron 3369 (joonis 5) otspinna kõvadus. Normijärgseks survetugevuse katseks valmistati ketastest katsekehad suurusega 20X20X30mm. Enne survetugevuse katseid võeti valikuliselt igast proovikettast viis katsekeha ja konstruktsiooni koormuse modelleerimiseks resistograafia RM määramisel koormati katseseadme Amsler (joonis 6) abil koormustega vastavalt 0kN, 5kN, 10kN. Survetugevuse katsed viidi läbi samuti pressiga Instron 3369 [11].



Joonis 5. Instron 3369



Joonis 6. Universaalne katseseade Amsler

Katsekehad resistograafia katseteks ja standardiseeritud paindekatseteks on saetud 15-nest erineva vanusega palgist. Katsekehade absoluutne niiskusesisaldus määrati proovikehadel hügromeetriga ja standartsel kuivatamismeetodil. Katsekehad olid kuuse- ja männipuidust. Palkide (beams) vanuse määramiseks saeti kettad, vastavalt Tartu Ülikooli teaduri dr. Alar

Läänelaiu metoodikale ja kasutati binokulaarmikroskoopi Leica ja töölauda Lintab. Mõõtmistulemuste võrdluseks kasutati Eesti Puuliikide andmebaasi (viide) Cantras arvutiprogrammis.

Katsekehade valmistamisel järgiti aastaringide suunda ja paindekatsekehad valmistati kõik ette nii, et katse oleks võimalik teha radiaalsuunas. Katsekehade looduslikud vead määratleti, mõõdeti ja kanti katsekehade tabelisse, looduslike vigade põhjal teostati katsekehade visuaalne tugevussorteerimine. Statistilisel andmetöötlusel leitakse seosed vanadest puittaladest võetud katsekehade (50x50x1000) standartsel paindekatsel saadud tulemuste ja resistograafi mõõtmistulemuste vahel (hetkel töös).

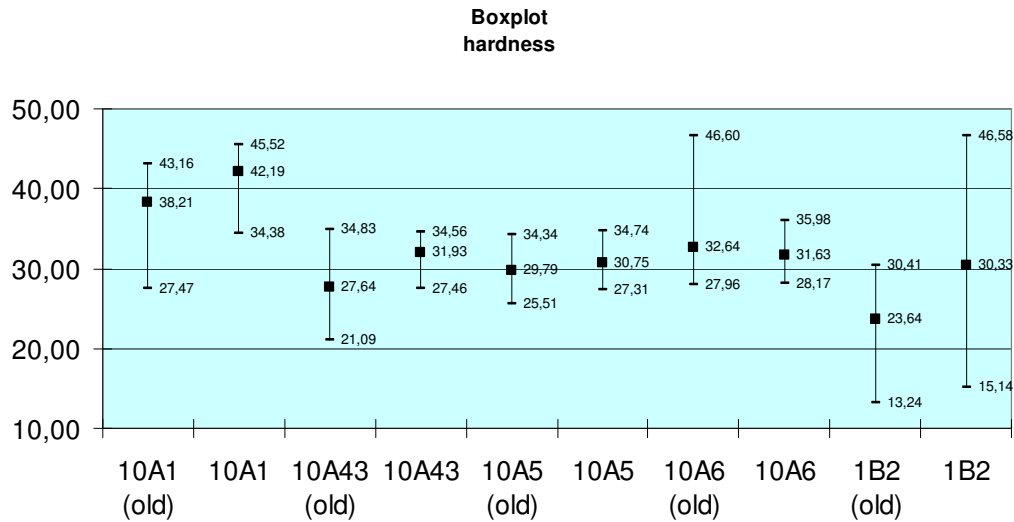
Samuti uuriti katsekehasid ultraheli aparaadiga TICO saamaks seoseid puidu tugevusomaduste (survetugevus, paindetugevus) ja ultraheli levimise kiirusega puidul otsesel mõõtmisel ning pinnapealt mõõtes pikikiudu ja radiaalsuunas (joonis7).



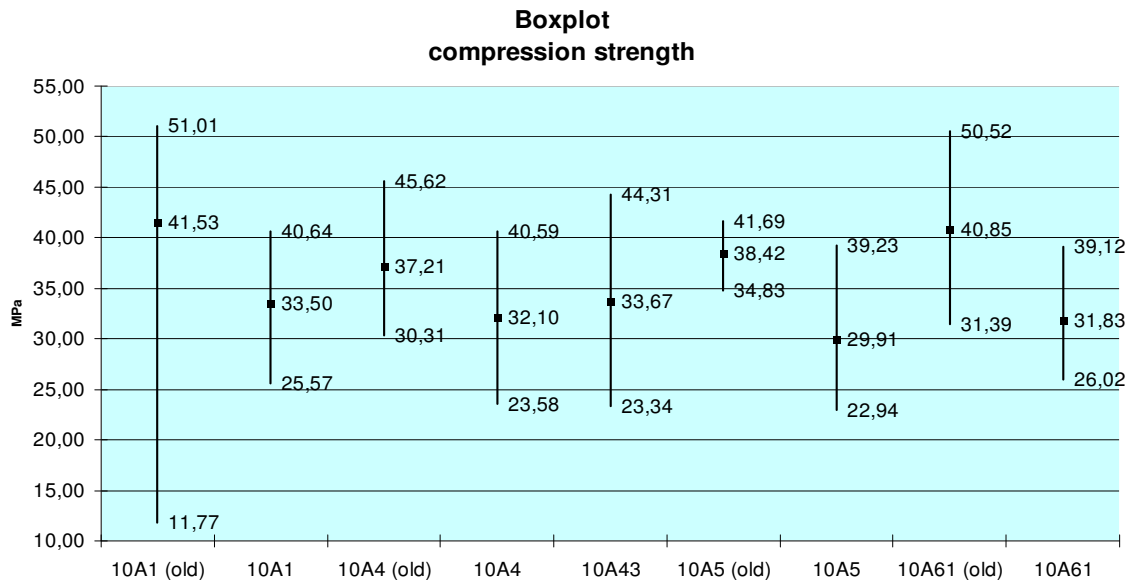
Joonis 7. Ultraheli mõõtmisaparaadiga mõõtmine pikikiudu ja ristikiudu

Tulemused

Hetkel on võrreldavad tulemused saavutatud vana puidu katsetulemuste ja 37 aastat tagasi N.Olli poolt tehtud katsetulemuste vahel. Saadud mehaaniliste tugevuste näitajad olid 7- 9 % puidu niiskuse juures. Tulemused redutseeriti 15 % niiskuse juurde valem 1-ga, et need oleks võrreldavad N. Olli andmetega. Varasemate ja praeguste puidu mehaaniliste omaduste katsete võrdlused on esitatud joonistel 9 ja 10. Puidu otspinna kõvadus on pikaajalise seismisega suurenenud 10,87%, kuid survetugevus on sama ajaga vähenenud 15,45%.



Joonis 9. Puidu pinnakõvaduse võrdlus vanadel ja uutel katsetel



Joonis 10. Puidu survetugevuse võrdlus vanadel ja uutel katsetel

Samuti on analüüsitud resistograafi RM andmeid kogu ristlõike läbimisel ja väikestel proovikehadel ning õrreldud mahukaalu ja survetugevuse katsete tulemustega. Seosed resistograafi väärtuse, mahukaalu ja tegeliku survetugevuse vahel on toodud korelatsiooni maatriksis. Regressioonvõrrand resistograafi väärtuse ja mahukaalu vahel leitakse valemiga 3.

$$\rho = 317,78 + 13,61RM \quad (3)$$

Seos tegeliku survetugevuse ja resistograafi RM väärtuse vahel avaldub järgneva võrrandiga valem 4.

$$f_{15} = 30,76 + 1,14RM \quad (4)$$

Tabel 2. Survetugevuse(f_{15}), resistograafi väärtuse (RM) ja tiheduse(ρ) korelatsiooni maatriks

	f_{15}	RM	ρ
f_{15}	1		
RM	0,4609	1	
ρ	0,5805	0,7161	1

Korelatsiooni kordajate põhjal, mis on esitatud tabelis 2, võime väita, et seosed kasutatud vana puidu mahukaalu ja resistograafi väärtuse RM vahel on tugevad. Seos survetugevuse ja resistograafi väärtuse RM vahel on olemas, kuid nõrk selleks, et otsesid järeldusi teha. Vähenenud seos võib olla tingitud liiga väiksest valimist. Seetõttu katsed jätkuvad, et saavutada suurem usaldatavus meie tulemustele.

Kokkuvõte

Tehtud uuringud annavad kinnitust resistograafi kasutamise võimalustele hoonete konstruktiivse ja puidu seisundi hindamisel. Puidu tiheduse ja resistograafi väärtuse vaheline seos võimaldab resistograafi kasutada objektidel puidu tiheduse määramiseks. Jätkuvate uuringute eesmärgiks on leida täiendavaid seoseid ja kaasata teisi mittepurustavaid uurimismeetodeid (ultraheli), sest resistograafi väärtuse ja puidu surve tugevuse vahel on seos olemas, kuid tulemuse suurema usaldatavuse saamiseks tuleb uurimist, jätkata arvestades asjaolu, et puidu mehaaniliste omaduste muutus ca 40 aasta jooksul oli märkimisväärne (kõvadus suurenes 10,9 % ja survetugevus vähenes 15,5 %). N. Olli mahukad uuringud (1973, 1984) kinnitavad, et alusvundamentides on puidu lagunemisprotsess suhteliselt aeglane kui need asuvad allpool põhjavee minimaalset taset. Alusvundamentide ja konstruktsioonipuidu töötingimused on väga erinevad ja edasiste uurimiste käigus tuleb modelleerida need erinevused (niiskus, koormused, jne) et saavutada võrreldavaid seoseid.

Kirjandus

- [1] European Standard EVS-EN 338:2005 “Structural timber - Strength classes”, European Committee for Standardization: Brussels, 2005.
- [2] European Standard EN 335-1:1992 “Durability of wood and wood-based products - Definition of hazard classes of biological attack – Part 1: General”, European Committee for Standardization: Brussels, 1992.
- [3] Pilt, Kalle ; Pau, Kristel ; Oja, Jane The wood-destroying fungi in buildings in Estonia. “Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XI” (243 - 251). UK: WIT Press 2009.
- [4] Oll, N. ”Puitluse puidu säilivuse uurimine hoonel Nõukogude väljak 8 Tartus” (*Investigation of timber foundations preservation of building. Nõukogude square 8, Tartu*). Tartu. Estonian Agricultural Academy Press. 1973.
- [5] Üprus, H. ”Ehitismälestis Tartus, Nõukogude väljak 8.” (*Culture heritages in Tartu. Nõukogude square 8, Tartu*) TRT archive. Tallinn Estonia 1964
- [6] Niemz, P. “Methods of non-destructive wood testing.” ETH Zurich. Institute for Building Materials (Wood Physics). Zurich 2008

- [7] Paulo, B.; Lourenc,O ; Artur, O ; Feio, A; Jose, S.; Machado, B. "Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood" *Construction and Building Materials* 21 (2007) pp. 1617–1627
- [8] Calderonia, De Matteisb, G. De; Giubileoa. C.; Mazzolania F.M.; Flexural and shear behaviour of ancient wooden beams: Experimental and theoretical evaluation. *Engineering Structures* 28 (2006) pp. 729–744
- [9] Oll, N. Puidu säilivuse uurimine Tartu vanalinna hoonete parvalustes ja vaivundamentides Uurimused ajavahemikus 1935...1975.a. Köited I – IV. (*Investigation of tiber foundations and pales of Tartu old buildings. Researches 1935 until 1975. Tome I - IV*). Tartu. Estonian Agricultural Academy Press 1984
- [10] European Standard EVS-EN 408:2005 "Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties", European Committee for Standardization: Brussels, 2005.
- [11] ISO Standard 13912 "Structural timber - Machine strength grading - Basic principles" 2005.

Puitkonstruktsioonide seisukorra hindamine ja kestvuse prognoos

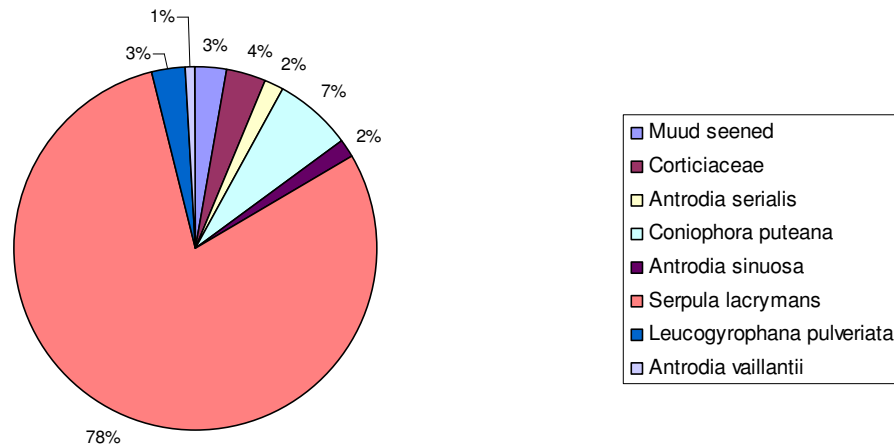
Puidu kestvust mõjutavad vastavalt EL standardiseerimise tehnilise komitee CEN/TC 38 poolt välja töötatud standarditele puitu lagundavad kandseened ning puitu kahjustavad mardikad.

Kandseente mõjul tekkinud kahjustusi on Eestis uuritud: 2007. aastal 132 objektil, 2008. aastal 152 ning 2009. aastal kuni 28. novembrini 127 objektil. Kõik nimetatud objektid on dokumenteeritud ning kontrollimise hetkeseis on jäädvustatud. Nende objektide ja varasema töö põhjal koostati konverentsile STREMAH 2009 „International Conference on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture” artikkel ja ettekanne, mis avaldati ka vastava publikatsioonina (ETISE klassifikaatori järgi 3.1. artikkel).

Uuringute tulemusena on leitud enimlevinud puitkonstruktsioonide kestvust vähendavad seened Eestis. Lisaks sellele on määratletud puitu lagundavate kandseente tekkepõhjused hoonetes. Järgneb loetelu enimlevinud tekkepõhjustest:

- Torustiku lekked
- Katuste lekked
- Hoonete ehitamine veesoontele ja kõrge põhjavee tasemega aladele
- Maapinna tõstmine hoonete ümbruses
- Üleujutused ja tormikahjustused. Ilmastikutingimused
- Ebakvaliteetsete ehitusmaterjalide kasutamine
- Hoonete ebapiisav ja ebaõige hooldus
- Keldrite kasutamise lõpetamine
- Ebapiisav ruumide ja konstruktsioonide ventilatsioon
- Ebapiisav soojustus (kondensaatvee teke)
- Torude isolatsiooni puudulikkus (kondensaatvee teke)
- Katuste konstruktsiooniliste lahenduste
- Katusekatte paigaldusvead
- Katustelt tuleva vihmavee ärajuhtimise süsteemi puudumine või puudulikkus.

Seeneliikide analüüsist selgus, et kõige kiiremate ja ulatuslikemate kahjustuste põhjustajaks Eestis on *Serpula lacrymans* (harilik majavamm) järgnevad *Corticaceae spp.* (koorikulised sugukond), *Coniophora puteana* (majamädik) *Leucogyrophana pinastri* (männimädiknahkis) ja *Antrodia sinuosa* (näätskorgik). Nimetatud seente esinemissagedus on toodud alljärgneval joonisel 1.



Joonis 1. Eesti hoonetes levivate puitu lagundavate kandseente jaotus liigiti

Lisaks seenkahjustustele on alustatud pikaajalise uuringuga mardikakahjustuste osas. Suurematest projektidest on käsil 2008. aastal alustatud Ruhnu saarel asuvate kultuuriväärtuslike kirikute puitosade mardikakahjustuste uurimine. Sellega seoses on korduvalt Eestit ja Ruhnu saart külastanud mardikakahjustuste spetsialist Saksamaalt dr. Uwe Noldt, kes luges vastavasisulise loengu Eesti Maaülikoolis 09. aprillil 2009. a. Ruhnu saare kivikiriku torni mardikakahjustustest tegi oma magistritöö Merilin Melesk „Ruhnu kivikiriku mardikakahjustusega torni puitkonstruktsiooni seisukorra hinnang”.

Puidu kahjustuste uurimine tõi kaasa vajaduse leida võimalusi mittepurustavate meetodite kasutamiseks puidu jääkristlõike ja mehhaaniliste omaduste määramisel. 2008. aastal osteti resistograaf ja alustati vastavasisulisi uuringuid nimetatud seadmega. 2009/2010 õppeaastal on valmimas kolm magistritööd: Ragnar Kruuda, Martti Lainurm ja Marko Teder.

Rahvusvahelise koostöö raames osaleb Kalle Pilt COST aktsiooni IE0601 „*Wood Science for Conservation of Cultural Heritage*” juhtivkomitees. Nimetatud aktsiooni konverentsidel 5.-7. November 2008 Braga (Portugal) ja 7.-9. Oktoober 2009 Hamburg (Saksamaa) esineti ettekannetega (ettekandja esimesel Kalle Pilt ja teisel Vello Pallav) ning esimesest konverentsist on avaldamisel ka vastavasisuline artikkel.

Edaspidistest tegevustest on plaanis luua Maaülikooli hoone Kreuzwaldi 5 keldris labor puitkonstruktsioonide biokahjustuste (põhiliselt puitu lagundavate kandseente) uurimiseks. Analooiline labor on Läti Puidukeemia Instituudis, millega tehakse ka tihedat koostööd, kuid seal puudub võimalus teha katseid hariliku majavammiga, mis vastavalt uuringutele on suurimate kahjustustega seen Eestis. Labori loomiseks on koostatud eelprojekt.

Teema kohta on kirjutatud kohalikes erialajakirjades mitmeid artikleid:

- Pilt, Kalle (2008). Ehitusvigade vältimine annab majavammide vastu parima kaitse. Ehitaja (1995-), 6, 68 – 70
- Pilt, Kalle (2008). Põrandate rajamisel hoidu majavammide soodustavatest teguritest. Ehitaja, 9, 62 - 64.
- Pilt, Kalle (2008). Ehituskultuuri tõstes ennetame hallitust. Keskkonnatehnika, 3, 20 - 23.
- Pilt, Kalle (2009) Puithoonete elukaare pikkuse saladused. I ja II osa TM Kodu ja Ehitus, nr. 10 ja 11.

Lisa 5

Katsed soojustusmaterjalide omaduste määramiseks ehitusfüüsika laboris

Katsetametoodika

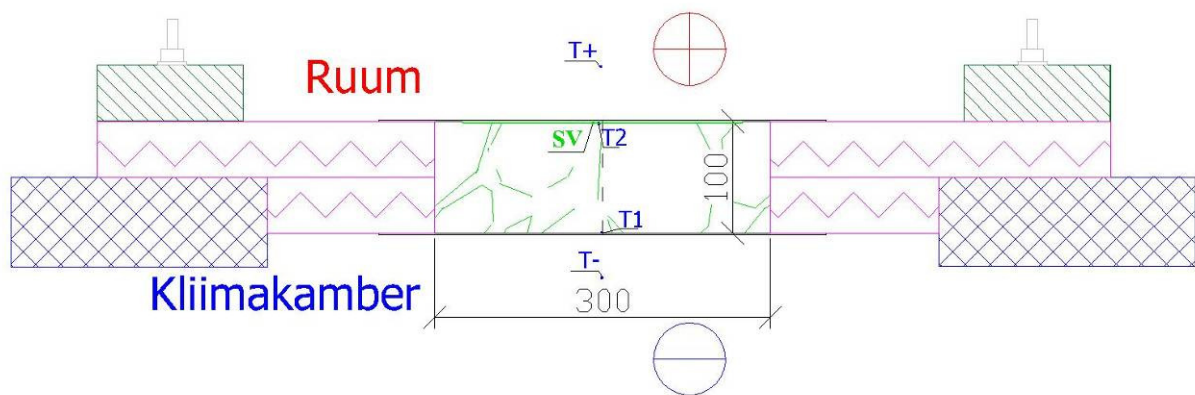
Kohalike soojusisolatsioonimaterjalide soojustehniliste näitajate kohta on kirjandusallikates väga erinevaid arvandmeid. Selleks, et saada täpsemaid näitajaid kohalike materjalide kohta ja võrrelda neid tööstuslike näitajatega, tehti terve rida katseid, mille eesmärgiks oli erinevate soojustusmaterjalide soojus-erijuhtivuse λ määramine.

Mõõtmise tegemiseks kasutati kliimaseadet, katseseina elementi, andmesalvestajat, soojusvoo plaate ja kuute termopaari ning erinevaid mõõdetavaid soojusisolatsioonimaterjale. Mõõtmised viidi läbi 2008/2009 aasta talvel Tartus Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehitusfüüsika laboris ruumis 0C16.

Soojus-erijuhtivuse λ määramiseks mõõdeti järgmisi näitajaid:

- soojusvoogu q läbi termiliselt homogeense katsekeha (SV) [W/m^2];
- kliimakambri temperatuuri (T_-) [$^{\circ}\text{C}$];
- soojusisolatsioonimaterjali välispinna temperatuuri (T_1) [$^{\circ}\text{C}$];
- soojusisolatsioonimaterjali sisepinna temperatuuri (T_2) [$^{\circ}\text{C}$];
- ruumi temperatuuri (T_+) [$^{\circ}\text{C}$].

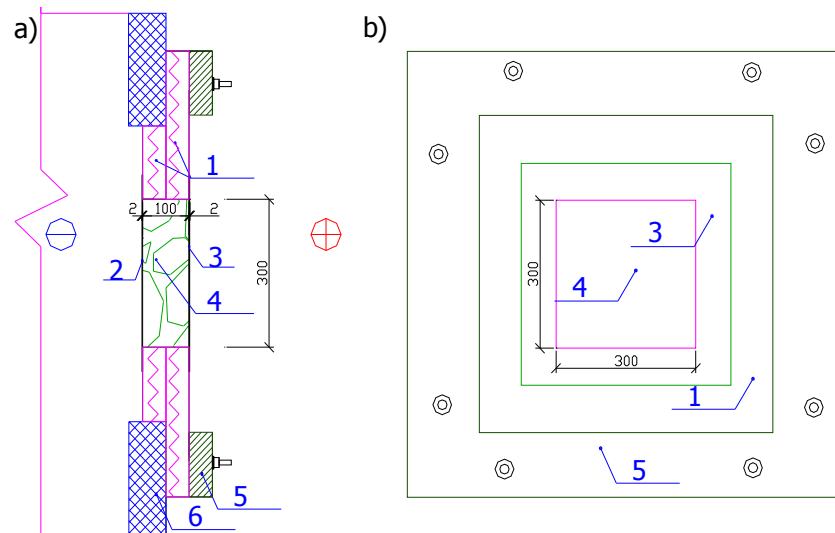
Kõik eelpool mainitud teise katseseeria mõõtmisnäitajate asukohad on näidatud joonisel 1.



Joonis 1. Katseseeria (100mm) seina mõõteseadmete paigutus soojusisolatsioonimaterjali tsentri suhtes horisontaalristlõikes

Soojusisolatsioonimaterjali soojus-erijuhtivuse λ määramiseks kasutatakse soojusvooplaadi SV ja termopaaride T_1 ja T_2 tulemusi. Soojusvoogplaadi ja termopaaride andmed salvestatakse andmesalvestajasse regulaarselt ühe minuti tagant katse lõpuni.

Katseseina element koosneb kahest kokkuliimitud 50 mm vahtpolüstüreeni plaadist (joonis 2.5), millega suletakse kliimakambri ukseava. Katseseina elementi on lõigatud avaus suurusega 300x300 mm. Kliimakambri poolne avaus on suletud jäiga 2mm paksuse plaadiga silikooni ja veekindla teibiga. Avausse paigaldatakse mõõdetav soojusisolatsioonimaterjal. Ruumi poolne jääk 2 mm plaat paigaldatakse veekindla teibiga ja toetatakse lisaks kahe punkttoega. Kliimakambri ukseava katseseinaelement on näha joonisel 2 ja katseseadme üldvaade joonisel 3.



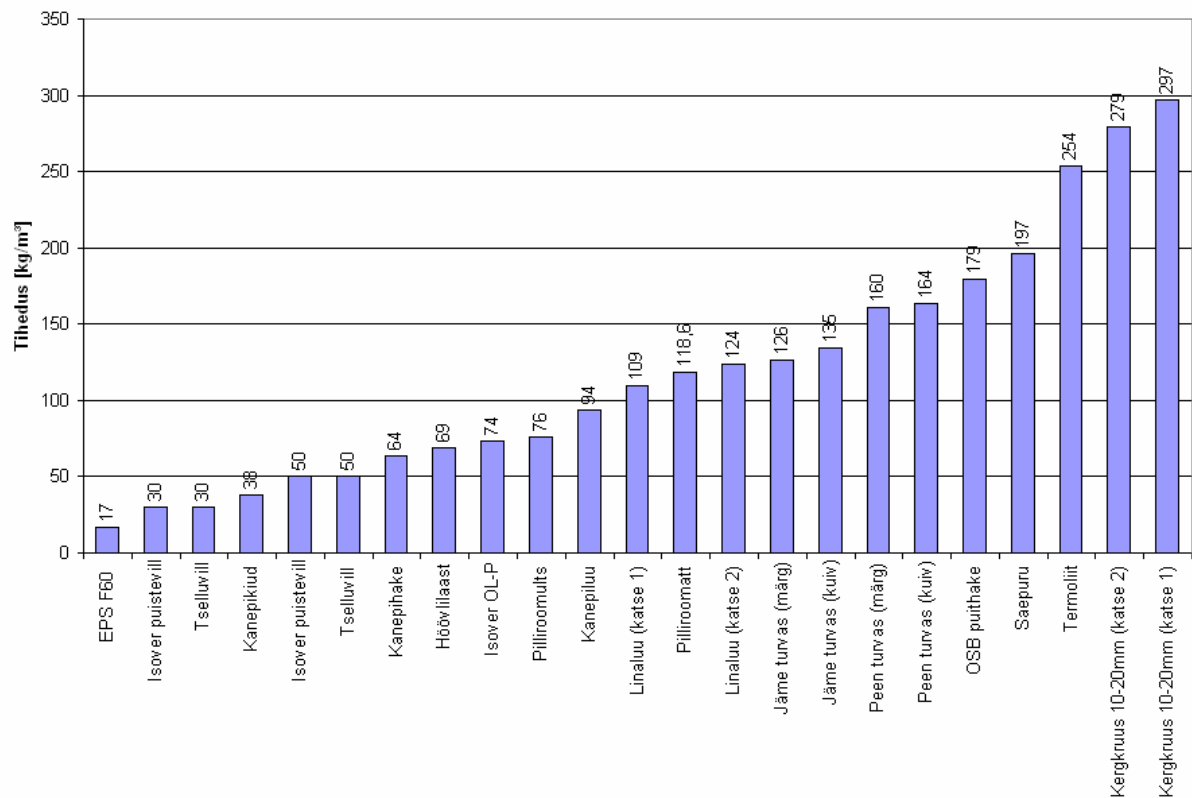
Joonis 2. Katseseina element: a) lõige, b) vaade ruumi poolt; 1) vahtpolüstüreen 2 x 50mm 2) kliimakambri poolne jäik seinaplaat, 3) lahtivõetav ruumipoolne jäik seinaplaat, 4) uuritav soojusisolatsioonimaterjal avas 300x300x100 mm, 5) katseseina elemendi kinnitusraam ja 6) kliimakambri sein



Joonis 3. Kliimaseade **Feutron 3007-5** koos katseseinaelemendiga, mis on mõeldud soojuseri juhtivuse määramiseks koos vastavate mõõteanduritega

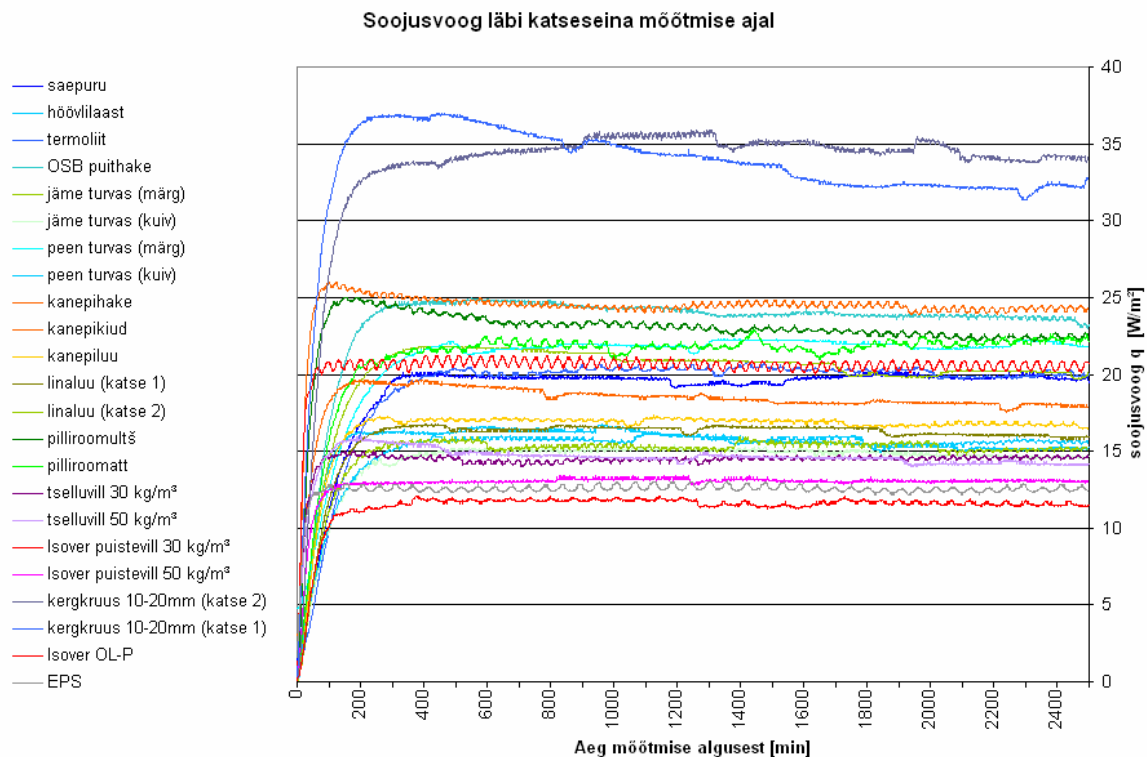
Mõõtmistulemuste analüüs

Mõõtmisseriesas uuriti erinevate soojusisolatsiooni materjalide soojus-erijuhtivust. Kuna soojusjuhtivuse üheks olulisemaks mõjuriks on materjali tihedus, siis määrati kõigepealt materjali tihedused Eesti standardi järgi (EVS-EN 1602: 1999). Tulemused on esitatud joonisel 4.

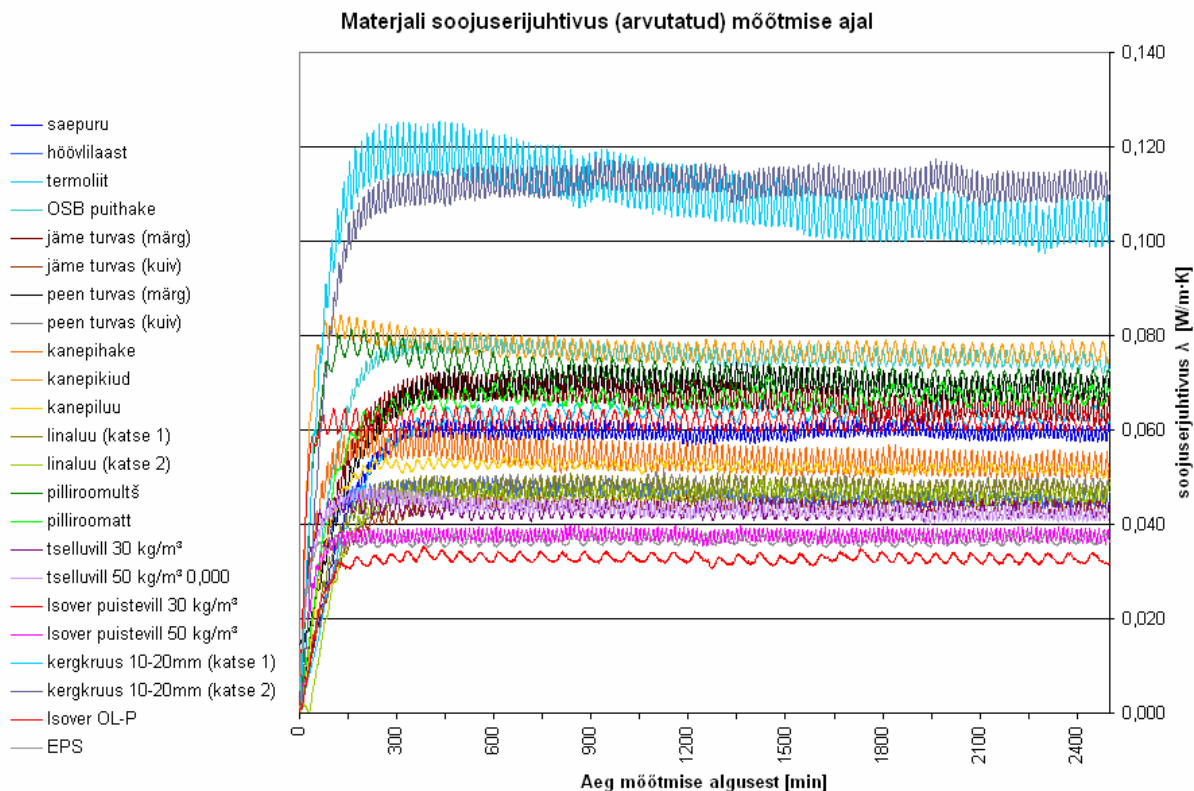


Joonis 4. Katseseina elemendis katsetatud materjalide tihedused

Edasi järgnes soojusisolatsioonimaterjalide uurimine katseseina elemendiga (joonis 2). Materjali ja ruumi temperatuurid mõõdeti vastavalt joonisele 1 esitatud skeemile ning samaaegselt mõõdeti ka soojusvoogu. Mõõtmise esimese 2500 minuti lugemid on esitatud graafiliselt joonisel 5. Mõõdetud andmete põhjal arvutati kõigi materjalide soojus-erijuhtivused kogu katse jooksul (2500 minutit). Saadud tulemused on esitatud joonisel 6.

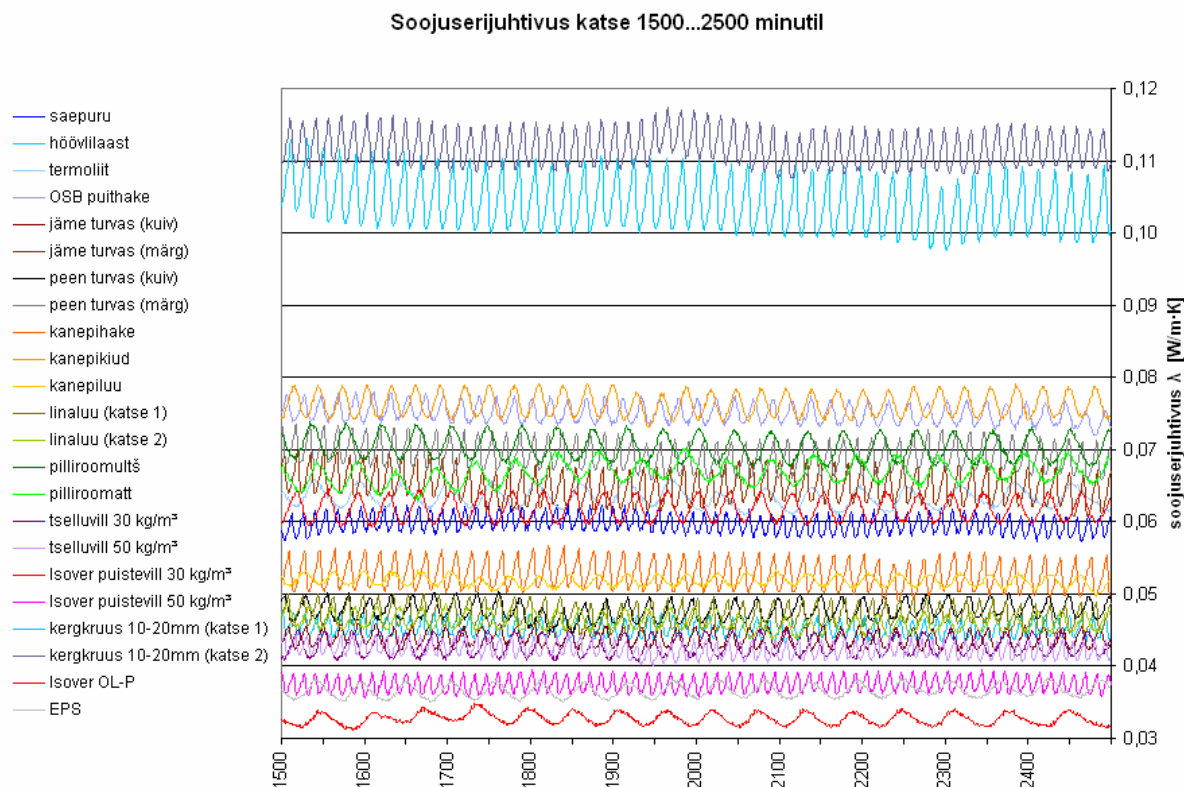


Joonis 5. Erinevate materjalide soojusvoogude graafikud katseseina elemendis laborikatsel



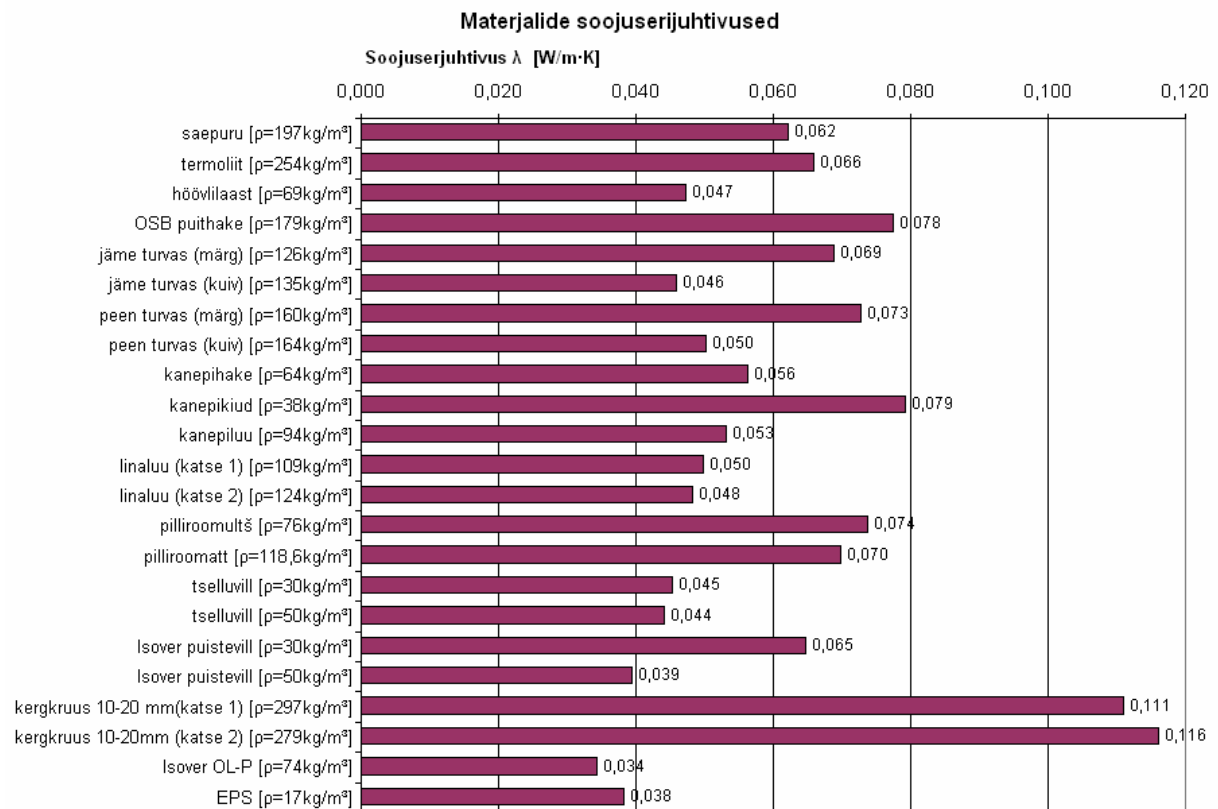
Joonis 6. Erinevate materjalide soojuseriijuhtivuse graafikud katseseina elemendis laborikatsel

Joonisel 6 on näha, et erinevatel materjalidel kulub stabiilse olukorra saavutamiseks erinev ajavahemik. Antud mõõtmistel on stabiilne vahemik 1500-2500 minutil mõõtmise algusest. Materjalide soojus-erijuhtivuse määramiseks võeti soojus-erijuhtivuse graafikutelt (joonis 6) 1000 minuti pikkused stabiilsed piirkonnad. Stabiilsete piirkondade soojus-erijuhtivuste graafikud on toodud joonisel 7.



Joonis 7. Erinevate materjalide soojus-erijuhtivus stabiilses olukorras 100 mm paksuses katseseina elemendis

Stabiilse piirkonna näitajate põhjal on arvatud materjalide soojus-erijuhtivuse näitajad, mis on toodud tabelis 5.3 ja esitatud graafiliselt joonisel 8, kus on toodud ka uuritud materjalide tihedused ρ .



Joonis 8. Erinevate materjalide soojus-erijuhtivus stabiilses olukorras

ooniselt 8 selgub, et tööstuslikud soojustusmaterjalid ($\lambda = 0,034\text{--}0,045$ W/mk) on paremad kui looduslikud v.a kergkruus (λ 0 0,111-0,116 W/mK). Parimatel looduslikel materjalidel on $\lambda = 0,46\text{--}0,56$ W/mK (linaluu, turvas, kanepihake, kanepiluu, hõõvlilaast) Seega ei jää looduslikud orgaanilised soojustusmaterjalid kaugemale maha tööstuslikest soojustusmaterjalidest. Vahe on kõigest 20-30%.

Uuritud materjalide soojus-erijuhtivuse paremaks iseloomustamiseks on tabelis 1 toodud materjalide aritmeetilise keskmised soojus-erijuhtivused (λ_{mean}). Katsetatud soojustusmaterjalide tehnilised näitajad ja λ deklareeritud suurused on toodud tabelis 2.

Tabel 1. Erinevate materjalide soojusvoo mõõtmise katsete stabiilsete lõikude keskmised (katse 1500-2500 minutil)

Katse nr	Katsematerjal	Katse aeg	Katse kestvus	Katse- elemendis oleva materjali kaal	Stabiilse lõigu keskmised ($\pm$ reaalne hälve)					
					T-	T ₁	T ₂	T+	S _V	λ
			min	kg/m ³	°C	°C	°C	°C	Wm ²	W/m·K
1	Kanepihake	15.12.08-17.12.08	2639	64	-16,4 ($\pm$ 3,41)	-15,5 ($\pm$ 2,29)	18,9 ($\pm$ 0,22)	22,4 ($\pm$ 0,27)	18,1 ($\pm$ 0,26)	0,053 ($\pm$ 0,0037)
2	Kergkruus 10-20mm (katse 1)	17.12.08-23.12.08	2500	297	-16,7 ($\pm$ 3,43)	-15,3 ($\pm$ 1,89)	15,8 ($\pm$ 0,30)	22,2 ($\pm$ 0,39)	32,3 ($\pm$ 0,75)	0,104 ($\pm$ 0,0069)
3	Jäme turvas (märg)	21.12.08-23.12.08	2583	126	-16,3 ($\pm$ 3,08)	-15,0 ($\pm$ 1,75)	16,2 ($\pm$ 0,29)	22,5 ($\pm$ 0,53)	20,2 ($\pm$ 0,60)	0,065 ($\pm$ 0,0041)
4	Peen turvas (märg)	23.12.08-25.12.08	2862	160	-16,3 ($\pm$ 2,98)	-14,9 ($\pm$ 1,53)	16,9 ($\pm$ 0,21)	23,2 ($\pm$ 0,25)	21,9 ($\pm$ 0,40)	0,069 ($\pm$ 0,0037)
5	Linaluu (katse 1)	25.12.08-27.12.08	2858	109	-16,2 ($\pm$ 2,93)	-15,2 ($\pm$ 1,92)	19,2 ($\pm$ 0,46)	22,7 ($\pm$ 0,49)	16,2 ($\pm$ 0,48)	0,047 ($\pm$ 0,0028)
6	Tselluvill 50 kg/m ³	27.12.08-1.01.09	4253	50	-16,0 ($\pm$ 2,64)	-14,8 ($\pm$ 1,44)	19,2 ($\pm$ 0,38)	22,7 ($\pm$ 0,46)	14,3 ($\pm$ 0,38)	0,042 ($\pm$ 0,0020)
7	Isover puistevill 50 kg/m ³	1.01.09-3.01.09	3003	50	-15,8 ($\pm$ 2,63)	-14,8 ($\pm$ 1,70)	20,1 ($\pm$ 0,14)	23,4 ($\pm$ 0,18)	13,1 ($\pm$ 0,14)	0,037 ($\pm$ 0,0020)
8	Saepuru	3.01.09-5.01.09	2550	197	-15,8 ($\pm$ 2,54)	-14,4 ($\pm$ 1,19)	18,9 ($\pm$ 0,49)	23,3 ($\pm$ 0,45)	19,8 ($\pm$ 0,33)	0,060 ($\pm$ 0,0024)
9	Höövliilaast	5.01.09-7.01.09	2885	69	-15,8 ($\pm$ 2,36)	-14,7 ($\pm$ 1,45)	19,3 ($\pm$ 0,40)	22,9 ($\pm$ 0,45)	15,3 ($\pm$ 0,33)	0,045 ($\pm$ 0,0021)
10	Kergkruus 10-20mm (katse 2)	7.01.09-9.01.09	2969	279	-15,6 ($\pm$ 2,16)	-13,9 ($\pm$ 1,16)	17,1 ($\pm$ 0,49)	23,2 ($\pm$ 0,60)	34,5 ($\pm$ 0,88)	0,112 ($\pm$ 0,0045)
11	Jäme turvas (kuiv)	9.01.09-11.01.09	2768	135	-15,8 ($\pm$ 2,29)	-14,7 ($\pm$ 1,53)	19,1 ($\pm$ 0,42)	22,5 ($\pm$ 0,50)	14,8 ($\pm$ 0,30)	0,044 ($\pm$ 0,0020)
12	Peen turvas (kuiv)	11.01.09-13.01.09	2587	164	-15,9 ($\pm$ 2,25)	-14,9 ($\pm$ 1,52)	17,8 ($\pm$ 0,36)	21,3 ($\pm$ 0,46)	15,6 ($\pm$ 0,41)	0,048 ($\pm$ 0,0024)
13	Linaluu (katse 2)	13.01.09-15.01.09	2950	124	-15,6 ($\pm$ 2,07)	-14,6 ($\pm$ 1,50)	18,6 ($\pm$ 0,34)	22,2 ($\pm$ 0,50)	15,3 ($\pm$ 0,46)	0,046 ($\pm$ 0,0022)
14	Tselluvill 30 kg/m ³	15.01.09-17.01.09	2944	30	-15,5 ($\pm$ 2,00)	-14,6 ($\pm$ 1,68)	19,5 ($\pm$ 0,16)	22,8 ($\pm$ 0,25)	14,6 ($\pm$ 0,22)	0,043 ($\pm$ 0,0025)
15	Isover puistevill 30 kg/m ³	17.01.09-19.01.09	2686	30	-15,2 ($\pm$ 1,82)	-14,5 ($\pm$ 1,63)	18,8 ($\pm$ 0,24)	23,1 ($\pm$ 0,27)	20,5 ($\pm$ 0,48)	0,062 ($\pm$ 0,0030)
16	Pilliroomults	19.01.09-21.01.09	2849	76	-15,0 ($\pm$ 1,71)	-13,3 ($\pm$ 1,37)	18,8 ($\pm$ 0,22)	23,0 ($\pm$ 0,33)	22,6 ($\pm$ 0,46)	0,070 ($\pm$ 0,0033)
17	Termoliit	21.01.09-23.01.09	2979	254	-14,9 ($\pm$ 1,59)	-13,8 ($\pm$ 1,22)	18,0 ($\pm$ 0,34)	22,3 ($\pm$ 0,49)	20,1 ($\pm$ 0,44)	0,063 ($\pm$ 0,0025)
18	OSB puitake	23.01.09-25.01.09	2532	179	-15,3 ($\pm$ 1,58)	-13,9 ($\pm$ 1,00)	17,8 ($\pm$ 0,11)	22,3 ($\pm$ 0,22)	23,8 ($\pm$ 0,37)	0,075 ($\pm$ 0,0025)
19	Kanepikiud	25.01.09-27.01.09	3047	38	-15,0 ($\pm$ 1,31)	-13,9 ($\pm$ 1,11)	18,0 ($\pm$ 0,24)	22,4 ($\pm$ 0,38)	24,4 ($\pm$ 0,41)	0,076 ($\pm$ 0,0030)
20	Kanepiluu	27.01.09-29.01.09	2842	94	-14,9 ($\pm$ 1,27)	-13,5 ($\pm$ 0,90)	18,8 ($\pm$ 0,20)	22,5 ($\pm$ 0,26)	16,8 ($\pm$ 0,26)	0,052 ($\pm$ 0,0014)
21	Pilliroomatt	29.01.09-31.01.09	2687	118,6	-15,0 ($\pm$ 1,52)	-14,0 ($\pm$ 1,27)	18,8 ($\pm$ 0,35)	22,9 ($\pm$ 0,44)	21,9 ($\pm$ 0,63)	0,067 ($\pm$ 0,0030)
22	Isover OL-P	31.01.09-2.02.09	2648	74	-15,0 ($\pm$ 1,49)	-14,4 ($\pm$ 1,36)	21,0 ($\pm$ 0,29)	23,9 ($\pm$ 0,40)	11,6 ($\pm$ 0,27)	0,033 ($\pm$ 0,0015)
23	EPS F60	2.02.09-4.02.09	4828	17	-15,0 ($\pm$ 1,57)	-14,4 ($\pm$ 1,48)	19,8 ($\pm$ 0,4)	22,7 ($\pm$ 0,46)	12,5 ($\pm$ 0,31)	0,037 ($\pm$ 0,0017)

Tabel 2. Katsetatud soojustusmaterjalide tehnilised näitajad

Katse nr	Katsematerjal	Katse aeg	Katsetatava materjali mahukaal	Kuiva materjali mahukaal	Materjali veesisaldus	Katsetatava materjali mahukaal ruumi pool 20mm	Kuiva materjali mahukaal ruumi pool 20mm	Materjali vee sisaldus ruumi pool 20mm	Katsetatava materjali mahukaal kambri pool 20mm	Kuiva materjali mahukaal kambri pool 20mm	Materjali vee sisaldus kambri pool 20mm	λ
			kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	kg/m ³	%	W/m·K
1	Kanepihake	15.12.2008-17.12.2008	70	64	8,5	67	63	6,6	71	62	14,2	0,0621
2	Kergkruus 10-20mm (katse 1)	17.12.2008-23.12.2008	267	265	0,7	280	278	0,6	302	287	5,2	0,0658
3	Jäme turvas (märg)	21.12.2008-23.12.2008	129	91	41,8	130	96	35,3	143	109	31,1	0,0472
4	Peen turvas (märg)	23.12.2008-25.12.2008	172	110	56,4	169	127	32,6	192	127	51,4	0,0775
5	Linaluu (katse 1)	25.12.2008-27.12.2008	108	100	8,4	107	100	7,4	102	92	11,0	0,0689
6	Tselluvill 50 kg/m ³	27.12.2008-1.01.2009	58	53	9,1	46	43	8,4	49	43	14,0	0,0459
7	Isover puistevill 50 kg/m ³	1.01.2009-3.01.2009	57	57	0,6	70	70	0,6	68	68	1,0	0,0728
8	Saepuru	3.01.2009-5.01.2009	194	178	9,5	185	171	8,0	211	193	9,2	0,0502
9	Höövlilaast	5.01.2009-7.01.2009	72	66	8,7	89	85,03	4,9	84	76	10,2	0,0563
10	Kergkruus 10-20mm (katse 2)	7.01.2009-9.01.2009	245	245	0,1	288	288	0,0	281	281	0,0	0,0793
11	Jäme turvas (kuiv)	9.01.2009-11.01.2009	145	138	5,5	143	134	6,7	158	147	7,1	0,0532
12	Peen turvas (kuiv)	11.01.2009-13.01.2009	165	151	9,1	178	164	8,7	179	162	10,0	0,0498
13	Linaluu (katse 2)	13.01.2009-15.01.2009	127	118	7,5	114	108	5,8	124	115	7,9	0,0483
14	Tselluvill 30 kg/m ³	15.01.2009-17.01.2009	39	36	7,6	38	36	6,6	42	38	10,2	0,0736
15	Isover puiste 30 kg/m ³	17.01.2009-19.01.2009	53	53	0,3	55	55	0,2	54	54	0,0	0,0698
16	Pilliroomults	19.01.2009-21.01.2009	87	81	7,8	80	76	5,5	75	69	9,3	0,0453
17	Termoliit	21.01.2009-23.01.2009	240	227	5,7	248	236	5,1	242	227	6,6	0,0442
18	OSB puithake	23.01.2009-25.01.2009	149	145	3,3	167	163	2,8	170	161	5,7	0,0647
19	Kanepikiud	25.01.2009-27.01.2009	47	44	7,2	46	44	4,9	57	52	9,4	0,0394
20	Kanepiluu	27.01.2009-29.01.2009	73	68	8,2	75	71	6,0	79	77	10,8	0,1109
21	Pilliroomatt	29.01.2009-31.01.2009			5,4							0,1161
21	Isover OL-P	31.01.2009-2.02.2009										0,0343
22	EPS F60	2.02.2009-4.02.2009										0,0383

Kasutatud kirjandus

1. **Almemo® Manual.** For all Almemo® measuring instruments up to version 6 5th revised editions. Holzkirchen, 2009.
2. **EVS 724:1996** Ehitusmaterjalide ja -toodete soojuserijuhtivuse määramine, kontroll, kaitsemeetodid ja -seadmed : Eesti standard :: [kinnitatud ja kasutusele võetud 29.08.96]. Eesti Standardiamet, 1996
3. **EVS-EN 1602:1999.** Ehituses kasutatavad soojustusmaterjalid. Näivtiheduse määramine. Eesti Standardikeskus, Tallinn, 1999
4. **EVS-EN 12667:2001.** Thermal performance of building materials and products- Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods- Products of high and medium thermal resistance. Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2001
5. **EVS- EN 13163:2003.** Ehituslikud soojusisolatsioonitooted. Tehases toodetud vahtpolüstüreen. Soojustakistus ja soojuserijuhtivus. Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2003
6. **Feutron.** Климатическая камера., Тип 3003-01...06 до 3007 – 01 ...06. Инструкция по техническому обслуживанию Ra 1, 1978
7. Product Catalog, Measuring instruments and sensors, (AHLBORN) issue 2007/2008 Holzkirchen, 2007
8. **SS 02 42 11** Svensk Standard

Lisa 6

Puidust katsemaja ja selle konstruktsioonid

Taust

Eesti asub piirkonnas, kus on väga erinevad ning pidevalt muutuvad temperatuurid ja niiskustingimused. See asjaolu seab ehitusinseneriteadusele kõrged nõuded võrreldes ühtlase kliimaga piirkondadega maailmas. Seda eelkõige ehitusfüüsikaliste ja –tehniliste probleemide lahendamisele hoonete piirdekonstruktsioonides.

Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi maaehituse osakonna tegevus ehitusinseneriõppe läbiviija ja uurimisüksusena lausa vajas ehituse energiatõhususega seotud probleemide uurimisel ja lahendamisel, nii otseselt kui ka hoone primaarenergia kontekstis, selle kogu elutsükli vältel, minekut laboratoorsetes tingimustes olukordade simuleerimiselt reaalsele katsetele kogu aastaringi nelja aastaaja vältel. Selleks projekteeriti ja ehitati 2008.aastal katsemaja.

Katsemaja näol ongi tegemist püüdega kontrollida nii looduslike kui ka tööstuslike soojustusmaterjalide käitumist hoone piirdekonstruktsioonides.

Koos ehitusfüüsikaliste katsetega soovisime kontrollida tööstuslikult toodetavate, ehitusmontaažilt lihtsa ja kiire ning minimaalses mahus kinnitusvahendite kasutamisega täpitud puitkonstruktsiooni terviklahendust.

Sarnaste kahekihiliste piirdekonstruktsioonide variante on välja töötatud erinevaid. Enamasti on keskendutud mingi ühe probleemi lahendamisele, jättes käsitlemata piirdekonstruktsiooni kui terviku, selle üksikutest elementide sõlmedest kuni tootmise ja koostamise tehnoloogiani ja sellest tingitud tasuvuse arvutusteni. Katsemaja puhul soovisime hinnata ka konstruktsiooni koostamise kiirust ja minimaalse tööjõu vajadust.

Katsemaja tehniliste lahenduste väljatöötamisel juhinduti Eesti tingimustes sobivate väikemajade arhitektuursest lahendusest ja soovist mitte sõltuda konkreetsetest ehitusgeoloogilistest tingimustest, e. võimalusest kasutada erinevaid vundamenditüüpe.

Katusekatte profiilpleki osas läks testimisele nii traditsiooniline, aluskatuse kilega kui ka kondensaadi vastase aluskihiga variant, millega soovisime kontrollida nende käitumist pööninguga ja puistevill-soojustusega vahelae korral.

Konstruktsioonilahendus

Hoone kandetarindid on projekteeritud vastavalt Eesti Vabariigi territooriumil kehtivatele tehnilistele normidele ja standarditele, v.a. seinakonstruktsioonid, milliste tüüp on uudne ja mille kohta puuduvad arvutuseeskirjad.

Vundamendid

Antud lahenduses lähtusime Katsemaja ajutisest iseloomust ja Tartu Linnavalitsuse poolt väljastatud ajutise ehituse püstitamise loast.



Sobivaks osutus postvundamentide kasutamine. Algselt soovisime paigaldada kruvivaiad, kuid aluspinnases paiknevate kivide rohkuse tõttu saime neid sisse puurida/paigalda vaid 4 tk. Katsemaja puhul piisas arvutuslikult 12 vundamendipostist.

Kruvivaiadele on kinnitatud talakingadega 3 pikivööd (70x220mm), millele omakorda toetuvad tapitult põrandatalad.

Põrandad

Katsemaja põrandad on koostatud kalibreeritud puitmaterjalist (32x195mm) ujuva põrandana põrandataladel. Põrandalaudade omavaheline ühendamine on tehtud puittüüblitega Ø16mm.

Põrandatalad (45x220mm) on paigaldatud tapituna, sammuga 600mm piki hoonet kulgevatele 3-le pikivööle.



Seinad



Vertikaalsuunas on kihid omavahel ühendatud veedritega, mis on paigutatud välimiste ja sisemiste piirdeelementide, nii alumistesse kui ülemistesse veedrisoontesse.

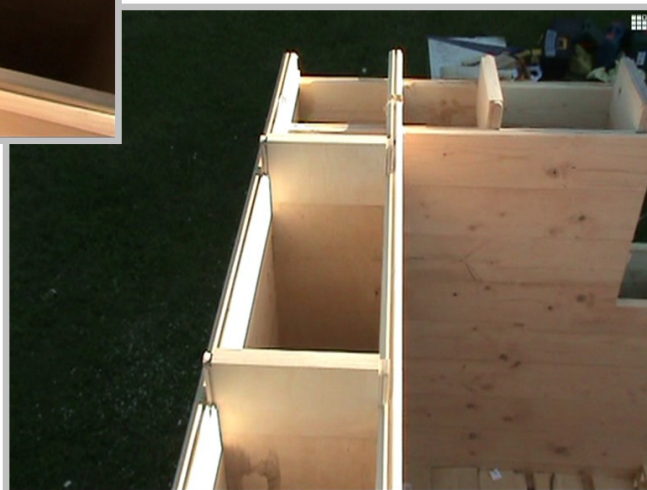
Horisontaalsuunas on välimised ja sisemised piirdeelemendid omavahel ühendatud mitmekihilisest vineerist sideelementide abil, läbi kalasabatappide. Vineer tagab minimaalse joonpaisumise vertikaalsuunas.

Katsemaja seinad on koostatud üksteise peal paiknevate, veedritega (*ühendusliist*) vertikaalsuunas ühendatud ja veedrisoontega varustatud välimiste ja sisemiste elementide paigutamise teel, x-ning y-telje suunal vertikaalselt üksteise suhtes $\frac{1}{2}$ võrra nihutatud, kahte paralleelselt paiknevasse vertikaalsesse kihti.



Sisemised ristuvad piirdeelemendid on omavahel horisontaalsuunas ühendatud risttappidega. Välimised piirdeelemendid omavahel välisnurdades on ühendatud pool-poolega seotisena veedri pikendusest "luku" abil, ilma täiendavate kinnitusvahenditeta.

Piirdekonstruktsiooni vertikaalsete kihtide vahele jäävad tühimikud on täidetud erinevate, soojustusmaterjalidega.



Laed

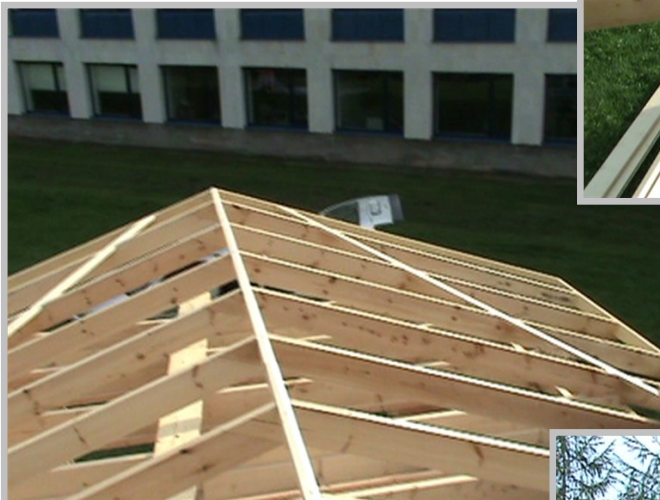


Katsemaja laed on ehitatud nn. “musta laena” OSB-plaatidest fermi alumise vöö külge kinnitatud kandepuussidel (45x95mm).

Lagi on soojustatud erinevate materjalidega.

Katus

Katsemaja katusekonstruktsiooni fermid, koos laetaladega on koostatud eeltapitud detailidest. Kinnitusvahenditena on kasutatud tsingitud polte/seibe/mutreid M12.



Katusekatteks $\frac{1}{2}$ katuse ulatuses ühel tahul on kasutatud tavalist trapetsprofiilplekki koos ventileeritava vahega #25mm ja aluskatuse kilet.

Katusekatteks $\frac{1}{2}$ katuse ulatuses on kasutatud kondensaadi teket takistava aluskihiga trapetsprofiilplekki, ilma aluskatusekileta.



Avatäited

Katsemaja aknad on Viking Window poolt partnerluse korras tarnitud 3-kihilise klaas-

paketiga puitraamidega ja välisuks on uudse lahendusega üks samalt firmalt.

Kokkuvõte

Katsemaja näol on tegemist püüdega kontrollida nii looduslike kui ka tööstuslike soojustusmaterjalide käitumist hoone puidust piirdekonstruktsioonides.

Ühtlasi katsetasime tööstuslikult toodetavat, ehituslikult montaažilt lihtsat ja kiiret ning minimaalses mahus kinnitusvahendeid vajavat tapitud puitkonstruktsiooni terviklahenduse esmavarianti.

Katsemaja juures kasutatud seinakonstruktsioon võimaldab minimiseerida piirdekonstruktsiooni materjali kulu, kuna selle elemendid on dimensioneeritud vaid selle paiknemise asukohas tekkivatele sisejõududele ja tagab sisuliselt jääkideta tootmise, võrreldes traditsiooniliste lahendustega, sest ülejäägid kasutatakse ära sideelementide valmistamiseks.

Puudub kinnitusvahenditest tulenev metallikulu, täiendavate kinnitusvahendite kasutamata jätmise arvelt. See omakorda suurendab piirdekonstruktsioonide (näit. puit, vineer) pikaalisust, kuna väldib tavaliselt metallist kinnitusvahendite pinnal tekkivast kondensaadist tingitud puidu pehastumist.

Seinte konstruktsioonilahendus võimaldab välispiirde konstruktsioonides kasutada väga erinevaid ja ka suurema soojaerijuhtivusega [λ], ehk ebaefektiivsemaid soojustusmaterjale, suurendades piirdekonstruktsiooni ristlõike paksust, samas piirdekonstruktsiooni põhimaterjali mahtu oluliselt suurendamata.

Seinte konstruktsioonilahenduse kasutuselevõtuga väheneb, piirdekonstruktsiooni elementide materjalimahukuse ja kaalu vähenemise tõttu, transpordikulu, võrreldes sama mahuga objektide/rajatiste seni kasutusel olevate piirdekonstruktsioonide elementidega.

Seinte elementide viimistlust ja/või näiteks puidukaitset on võimalik teha täielikult, kogu elemendi pinna ulatuses, kaasa arvatud tapid/sooned ja täielikult automatiseeritult, tagades sellega elementide esteetilise välimuse ja vastupidavuse pika aja vältel.

Hoone ehitamine platsil on kiire, sest ei vaja spetsiaalseid tõsteseadmeid ega -abinõusid. Elementide käsitsemisega ja hoone püstitamiseega saab hakkama kaks inimest.

Hoone eeltapitud detailide tootmistehnoloogia on lihtne, ega vaja suuri ja kalleid seadmeid ning tootmishooneid, kuid tehnoloogiline süsteem vajab veel väljatöötamist. Vajadusel on võimalik täistehnoloogiline seadmekomplekt paigutada poolhaagistele ja muuta seega “mobiilseks tehaseks”, vähendades veelgi tootmise ja ehitamisega seotud transpordikulusid.

Peale kõige muu aitab eeltapitud puitkonstruktsioon vältida masstootmisega kaasnevat tüpiseerimist, kuna võimaldab joonmõõtudes kasutatava mooduli/ühiku viimise minimaalsele tasemele, säilitades samas piirdekonstruktsiooni elementide tootmise kõrge industrialiseerituse.

Seoses Eesti Maaülikooli laborites kasutatavate, katsete ettevalmistamiseks sobivate, seadmete ning riist- ja tarkvara ebapiisavuse tõttu olime sunnitud tegema allhanget eeltapitud puitkonstruktsioonide osas. Olemasolevad ja Eesti ehitusturul Katsemaja alustamise hetkel pakutava sobiva hinnaga teenuse tehnilised võimalused (*Hundegger Speed Cut*) ei võimaldanud meil realiseerida täielikult püstitatud ülesannete lahendamiseks väljatöötatud ideed. Siit ka mõned soovimatud tulemused.

Ühe aasta kestnud katsete käigus saavutatud tulemused aitasid siiski hinnata tapitud puitkonstruktsiooni tervikuna ning selle detailide käitumist ajas, erinevate kliimatingimuste/ -muutuste kombinatsioonide tingimustes.

Tulemuste põhjal tuleb tõdeda, et Katsemaja käesoleva variandi selline lahendus seinakonstruktsioonide osas ei ole aktsepteeritav.

Vaja on piirdekonstruktsiooni muudatusi/ -parandusi, mis väldiks seinadetailide summaarset nihkumist niiskusest tingitud mahumuutuste mõjul, e. nende vertikaalset sidumist, ilma täiendavate, metallist kinnitusvahenditeta.

Täiendavat uurimist vajavad sõlmed

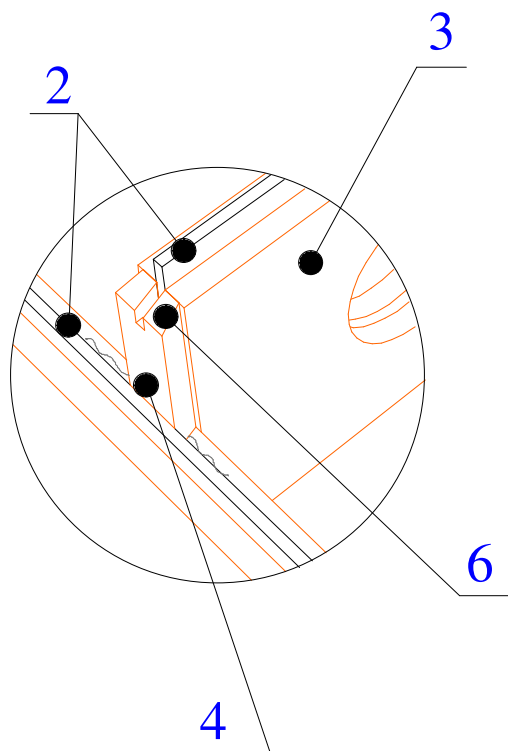
Leida kalasabatapis FIG 2 tekkivate pingete piirväärtused FIG 3 mõjul, milliste puhul vastavad puiduliigid veel ei lõhene.

Koostada maatriks erinevate puiduliikide ja erinevate niiskusrežiimide (sise-/ välispind) kohta, et oleks tagatud punktis 1 leitud piirväärtused (tugevusvaruga).

Kontrollida punktides 1 ja 2 leitud tingimusi kalasabatapi erinevate kaldenurkade puhul.

Leida punktis 2 toodud maatriksi alusel optimaalsed lõtkud ja tolerantsid tappide freesimiseks, et oleks tagatud konstruktsiooni kerge koostamine (ilma suurt jõudu/lööke rakendamata).

Leida (modelleerida) punktis 2 leitud näitajate muutumistegurid niiskusrežiimi (sise-/ välispind) muutumisel pärast konstruktsiooni koostamist, et oleks tagatud detailide „lukustumine“.



Märkus:

Erinevate materjalide (puit, vineer) erineva väärtusega joonpaisumisest (puit piki- ja ristikiudu) tingitud pingete tõttu tekkivate võimalike lõhenemiste asukohad näidatud lainelise joonega.

Sidedetailide vertikaalset sidumist võimaldava sõlme lahenduse väljatöötamine ja katsetamine niiskuspaisumisest tingitud sisejõududele.

Välis- ja sisevoodri elementide muutmine vertikaalselt üksteisest sõltumatuks, et leevendada ja ühtlustada kuivamisest tingitud mahukahenemisest tekkivate pragude parameetreid.

Nn. „libiseva“, e. joonpaisumisest mittesõltuva nurgasõlme uue lahenduse väljatöötamine.

Infotehnoloogia baasil meetodiliselt efektiivse, kiire ja paindliku tehnoloogilise süsteemi loomine, ehitise/rajatise raalprojekteerimise, kuluarvestuse, piirdekonstruktsiooni elementide automatiseeritud tootmise, töötlemise kaitse- ja viimistlusmaterjalidega, sorteerimise, pakendamise, laoarvestuse ja ehitamise/paigaldamisega.

Katsemaja esimese variandi näol on tegemist esimese täismahus hoonega, milline pretendeerib probleemipüstitusega seatud ülesannete lahendamisele.

Katse käigus saadud tulemused võimaldasid püstitada uued ülesanded ja tekitasid uued küsimused, mis vajaksid täiendavat uurimist ja vastuseid. Mõningad konstruktsiooni probleemse käitumise põhjused on teada ja teoreetilised lahendused olemas.

Probleemsete sõlmede sobiva konstruktiivse lahenduse leidmisega tegeletakse jätkuvalt.

Lisa 7

Uuringud puidust katsemajas

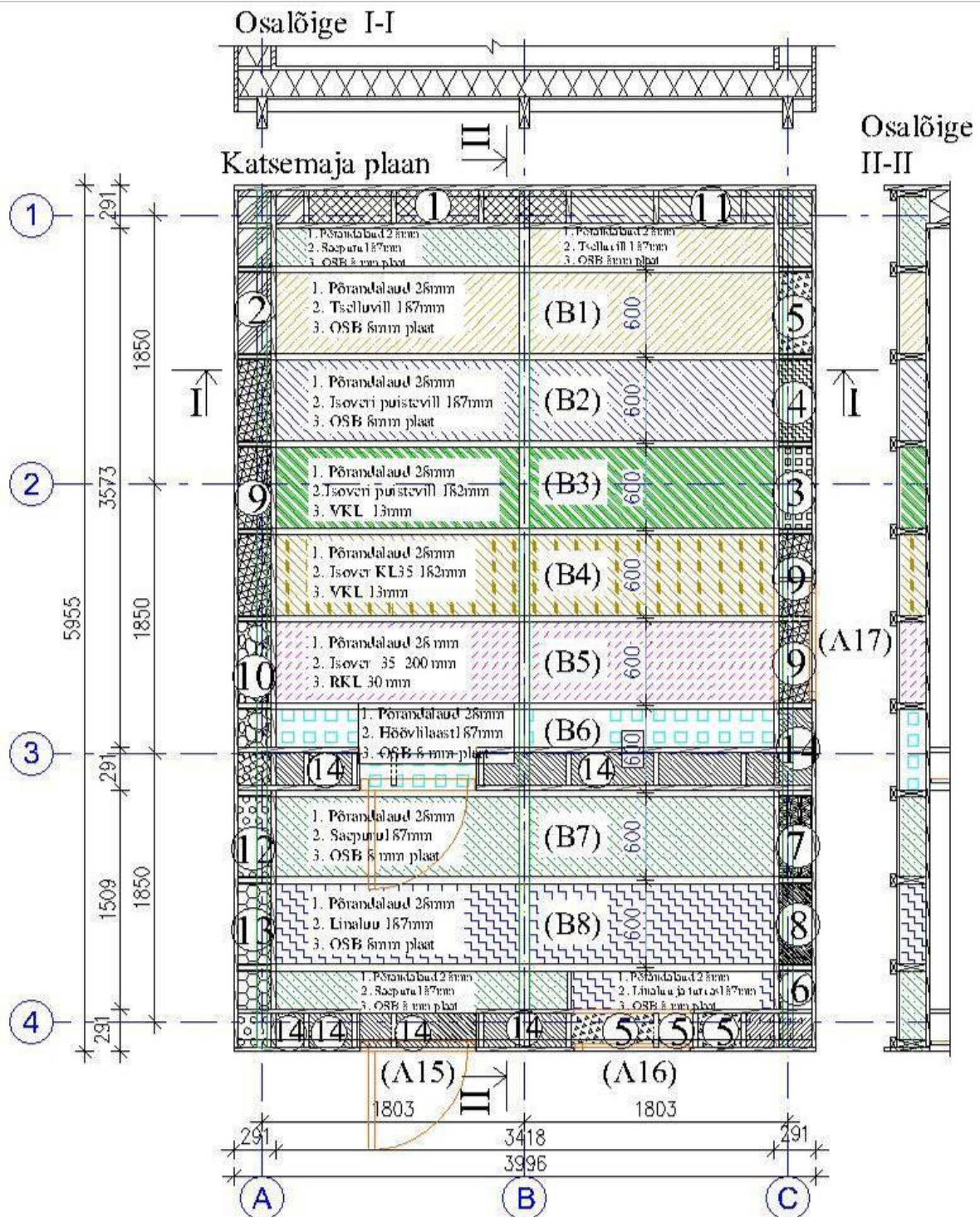
Hoone tarindid ja uuritavad materjalid

Selleks, et teha erinevate soojustusmaterjalidega piirdetarindite ehitus-füüsikalisi uuringuid *in situ*, ehitati 2008. a augustis katsemaja, mis on konstrueeritud Tõnis Teppandi poolt. Katsemaja uudne tarindilahendus on patenteeritud. Katsemaja detailid tehti robot-puidupingil Aegviidus. Hoone püstitati ajutise ehitisena dendroparki Emajõe ürgoru nõlvale Kreutzwaldi 5 õppehoone taha (joonisel 1).



Joonis 1. Puidust katsemaja erinevate ehitusmaterjalide soojustehniliste omaduste uurimiseks

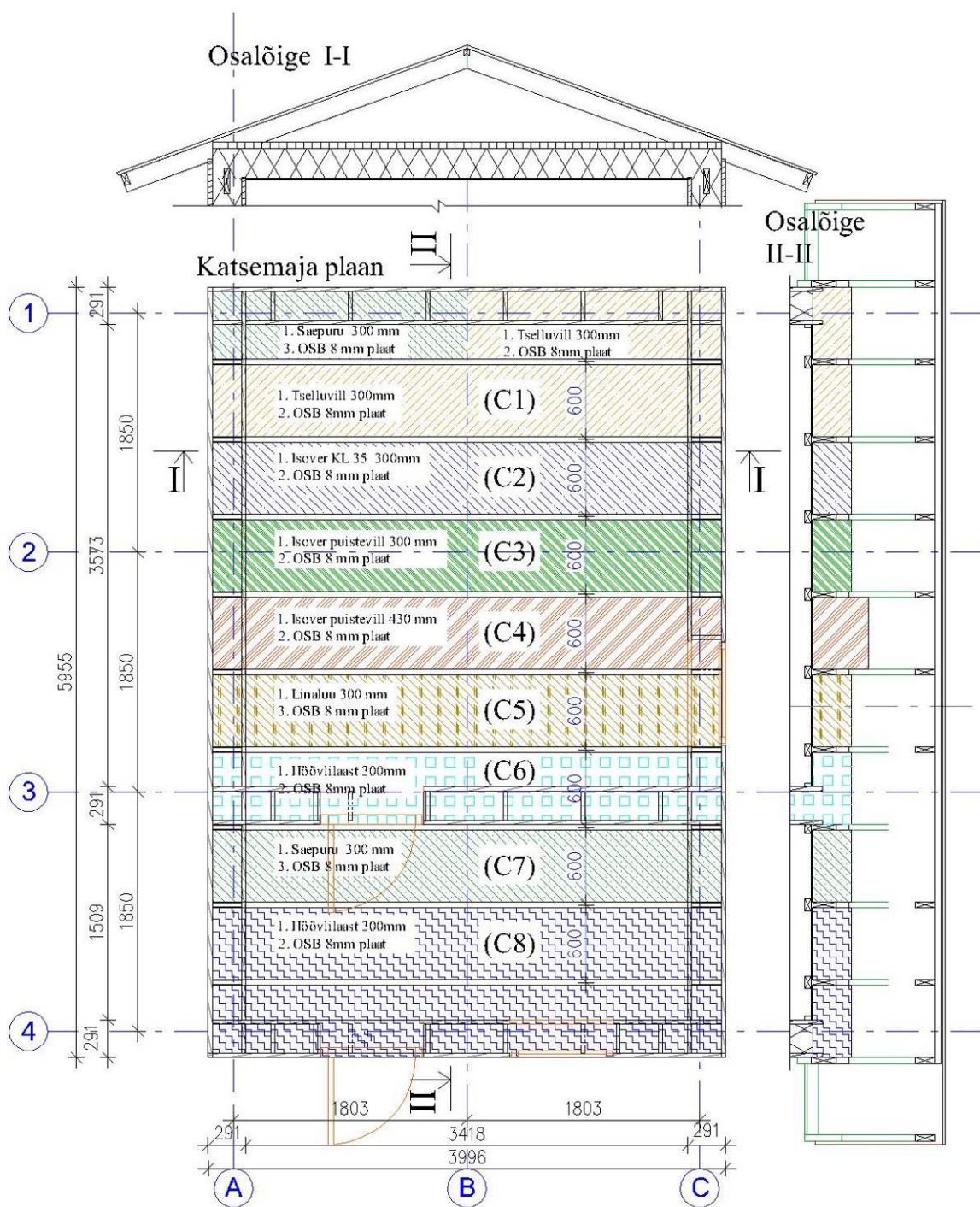
Puidust katsemaja on tapp-ühendustega 32mm sise- ja välislaudisega hoone, mille telgmõõtmed on 3660x5550 mm. Lauad on ühendatud omavahel feedritega, mis moodustavad koos laudisega tuuletõkke. Sise- ja välislaudist ühendavad tapp-ühendustega vineerist vahesidemed. Hoone on toetatud kolme puidust pikitalaga 12-le vundamendipostile. Pikitaladele toetuvad põiktalad sammuga 600 mm (joonis 2). Sein koosneb 600 mm sektsioonidest, mis on täidetud erinevate soojustusmaterjalidega vastavalt hoone plaanil esitatule. Soojustuskihi paksus seinas on kõigil materjalidel 227 mm. Katsemaja põrandaks on 28 mm paksune laudis düübelühendustel. Põrandatarindi alumiseks kihiks on OSB-plaat v.a ühes sektsioonis, kus tuuletõkkeks on VKL-plaat terasvõrgul. Põranda erinevad sektsioonid on soojustatud vastavalt plaanile (joonis 2).



Joonis 2 Katsemaja põrandate ja seinte soojustustuste plaan

Seintes olevad soojustusmaterjalid: 1. saepuru (A1); 2. termoliit (A2); 3. pilliroo heksel (A3); 4. kanepihake (A4); 5. linaluu (A5); 6. freesturvas (A6); 7. jäme turvas (A7); 8. peenturvas (A8); 9. klaasvill (puiste) (A9); 10. kergkruus 10-20mm (A10); 11. tselluvill (kuiv) (A11); 12. termovaht 1 (A12); 13. termovaht 2 (A13); 14. hõõvlilaast (A14); **seintes olevad avatäited:** aknad (A16 ja A17) ja uks (A15)

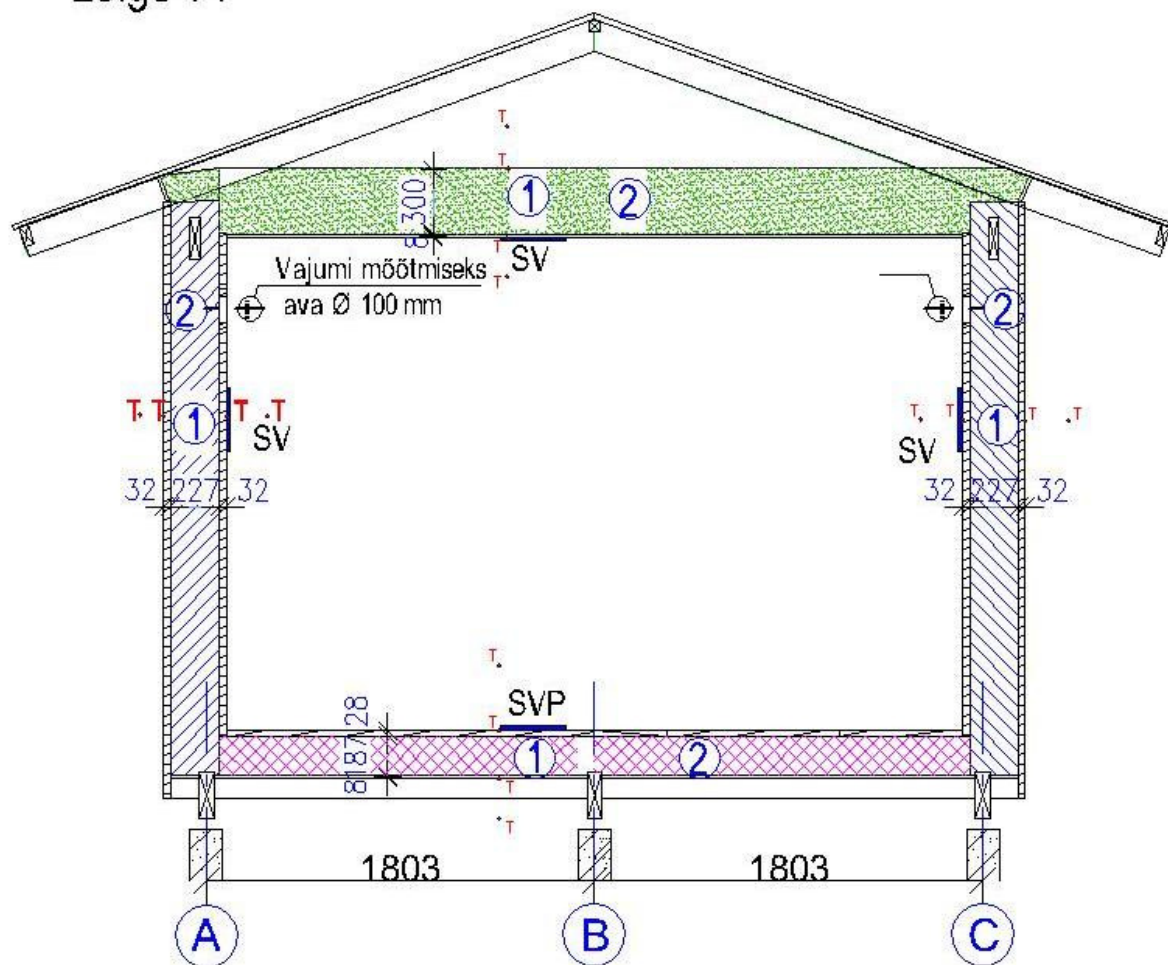
Katsemaja laekonstruktsiooniks on puittalade vahel olev OSB-plaat, millel on erinevates vahedes erinevad soojustusmaterjalid vastavalt lae plaanile joonisel 3.



Joonis 3. Katsemaja lae soojustuste plaan

Katsemaja ristlõige koos soojusjuhtivuse, temperatuuri ja niiskuse mõõteaparaatide andurite asukohtadega on toodud joonisel 4.

Lõige I-I



Joonis4. Katsemajas toimunud mõõtmised märgituna katsemaja lõikel I-I.

Mõõtmised seinas: 1. Soojusvoog + neljas kohas temperatuur; 2. Materjali vajum (mõõtmine üks kord kuus). **Mõõtmised laes:** 1. soojusvoog + neljas kohas temperatuur; 2. Materjali vajum. **Mõõtmised põrandas:** 1. Soojusvoog + neljas kohas temperatuur; 2. Materjali vajum

Katsetamiseks kasutatud kohalikud soojustusmaterjalid on toodud Tartu lähiümbrusest või Lõuna-Eestist. Saepuru ja hoovlilaast on saetööstuse jäätmed, mis pärinevad Tartumaalt. Pilliroog on toodud Võrtsjärve äärest ja see hekseldati paarisentimeetristeks tükkideks ning paigaldas tihendatult katsemaja seina. Linaluu on saadud taaskasutatava materjalina vana puithoone lammutamiselt.

Kanepihakkeks kasutatud materjali pärineb Moostes asuvatelt Jõgeva Sordiareture Instituudi katsepõldudelt. Tööstuslik kanep koristati 2007. aasta sügisel ning seejärel seisis kanepi varred kuhjatuna aasta aega välistingimustes. Kanepi varte hakkimiseks kasutati Võrumaalt pärit OÜ H-Central-i oksapurustajat. Ligikaudu kahe kantmeetri kanepi purustamiseks kulus võimsa masinaga tund, sest tugevad taimekiud ummistasid masina sõelad ja trumli.

Katsemaja seinte soojustusena kasutatud turvas on pärit Võrumaalt Põdra turbasoost, kus tegutseb AS Kagu-Eesti Turvas. Uuritud turvas oli kahe erineva fraktsiooniga. Peenema

turba osakeste suurus on 10-20 mm ning jämedamal turbal 20-40 mm. Lisaks neile kahele fraktsioonile toodetakse ka peenikest (osakestega kuni 10 mm) ja sorteerimata turvast.

Tööstuslikud soojustusmaterjalid pärinevad erinevatelt tootjatelt. Tselluvill on toodetud ja paigaldatud OÜ Walsekto poolt. Soojustusmaterjal paigaldati objektile kuivmeetodil. Osaihing on tegutsenud juba 14 aastat, ostes kokku vanapaberit ning seda töödeldes pakkunud hoonete soojustamiseks keskkonna säästliku materjali.

Klaasvilla erinevad tooted töid ja paigaldasid katsemajja firma Isover esindajad. Kergkruus fraktsiooniga 10-20 mm on pärit firmalt Maxit, termovahu paigaldas katsemaja seinatarinditesse OÜ Termovaht.

Katsemaja kolmeklaasilise paketi puitaknad ja uudse lahendusega välisuks on toodud Viking Windows firma poolt. Plekk-katus on firmalt Rannila: üks pool sellest on kondentsi-imava aluskihiga plekist ja teine pool on kondentsi-tõkke aluskattega.

Katsete eesmärk ja metoodika

Katsete eesmärgiks oli erinevate soojustusmaterjalide soojusjuhtivuse uurimine puidust katsemajas. Katsed jagati statsionaarseteks ja mittestatsionaarseteks.

Statsionaarse katse eesmärgiks oli määrata 32 mm paksuse sise- ja välislaudise ning nende vahel oleva 227 mm paksuse soojustusmaterjali soojuslikud näitajad mõõtes temperatuuri ja õue suhtelist niiskust materjali erinevates kihtides ja pindadel.

Selle katsega uuriti kahte soojustusmaterjali: saepuru ja tselluvill. Mõõtmisi tehti terve aasta: alates 2008. aasta sügisest kuni sügiseni 2009 ja mõõtmised jätkuvad edasi. Soojustuse ääreefekti vähendamiseks täideti kõrvalolevad sektsioonid sama materjaliga.

Mittestatsionaarse katsetega mõõdeti erinevate looduslike materjalidega täidetud seinte, põrandate ja lagede ning avatäidete soojusjuhtivust. Mõõtmisi tehti lühemate perioodide (umbes kaks nädalat) jooksul kuue kuni kaheksa komplekti anduritega.

Statsionaarse katsega mõõdeti katsemaja seina temperatuurid erinevates punktides piirdes ja nende muutused. Temperatuuri mõõtmisi tehti seina ristlõikes piki soojavoogu viies kohas (T1, T2, T6, T7) ning mõõdeti välis- ja sisetemperatuur (T-, T+) (vt joonis 5). Soojavoogude määramiseks kasutati soojavoo mõõtmise plaate, mis asetati uuritava soojustusmaterjali keskele ja temperatuuriandurite lähedale. Soojavooplaadi alumine pind kaeti spetsiaalse silikooniga ja paigaldati tihedalt vastu seina. Plaadi servad teibiti õhutihedalt veekindla teibiga, et ei tekiks konvektsiooni ja oleks välistatud soojavoolude pääsemine ümber plaadi servade. Vältimaks soojavoo plaatidele mõjuvaid kiirgusallikaid (aknast tulevad päikesevalgus, elektrilambi valgus ja inimeselt tulev soojuskiirgus jne), seati varjestuseks katted (500x500 mm), mille kaugus seinapinnast 120 mm. Ristlõige seinast statsionaarse katse puhul on näha joonisel 5 ja mõõtmiseks ülesseatud katseseadmed joonisel 6.

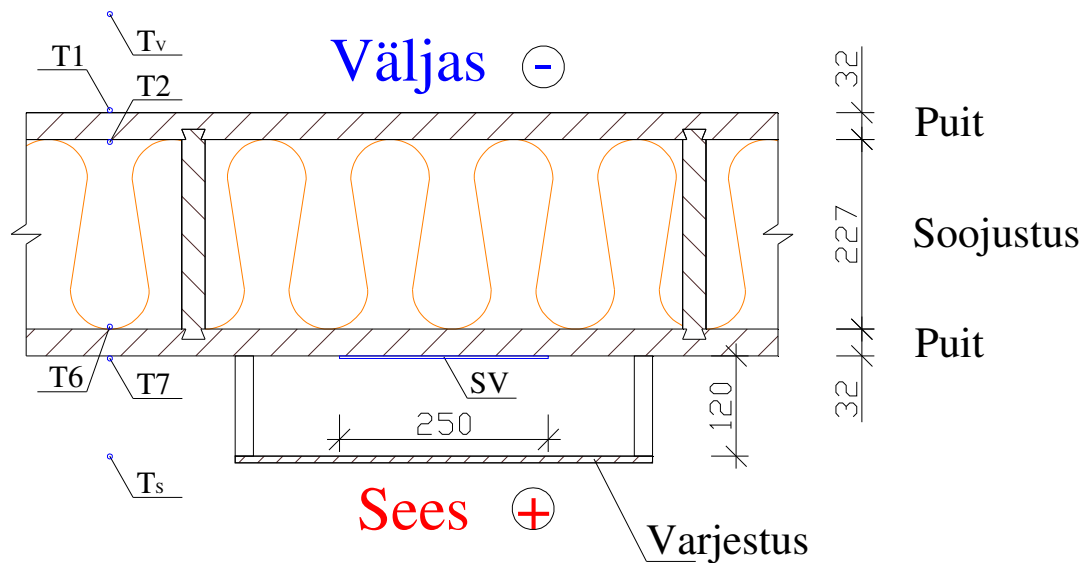
Uuritud kahe täitematerjaliga (saepuru ja tselluvill) seina temperatuurid erinevatel kihtides ja pindadel ning soojavoo läbi piirde salvestati 10 minutilise intervalliga Almemo andmesalvestajasse.

Kogus seina soojusjuhtivuse ja seina materjalide soojus-erijuhtivuse määramiseks mõõdeti järgmise suuruseid:

- soojusvoog q läbi katsemaja seina (SV) [W/m^2];
- välisõhu temperatuur (T-) [$^{\circ}C$];

- seina välispinna temperatuur (T_1) [$^{\circ}\text{C}$];
- soojus-isolatsioonimaterjali välispinna temperatuur (T_2) [$^{\circ}\text{C}$];
- soojusisolatsioonimaterjali sisepinna temperatuur (T_6) [$^{\circ}\text{C}$];
- seina sisepinna temperatuur (T_7) [$^{\circ}\text{C}$];
- ruumi temperatuur (T_+) [$^{\circ}\text{C}$].

Statsionaarsel katsel mõõdeti ka seina soojustuses oleva õhu suhtelist niiskust. Õhu suhtelise niiskuse mõõtmist käsitletakse eraldi.



Joonis 5. Seina ristlõige statsionaarsel katsel, kus soojavoogu mõõtev plaat on varjestatud katteplaadiga

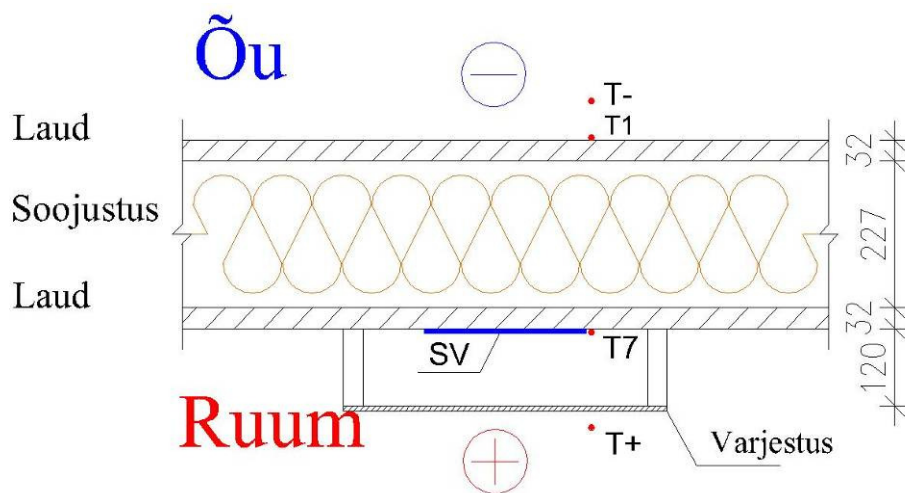


Joonis 6. Statsionaarse katse mõõtmise komplekt saepuru ja tselluvilla soojusjuhtivuse uurimiseks

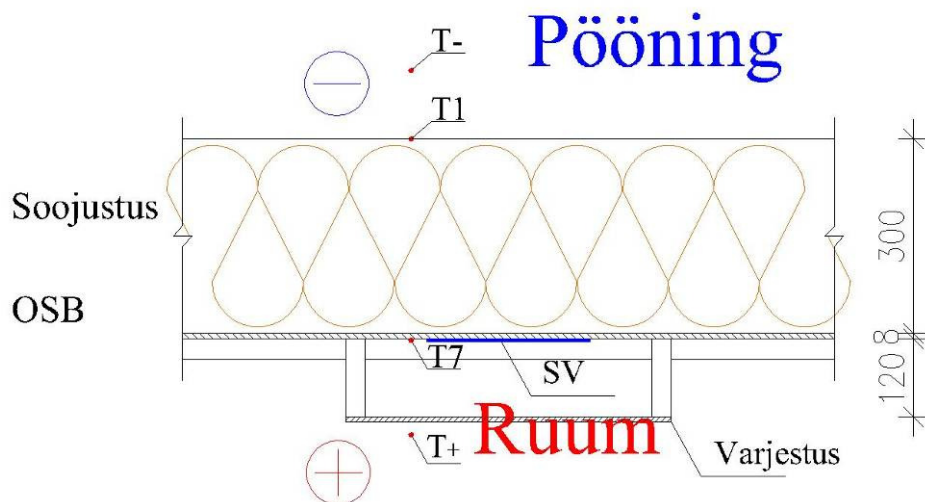
Mittestatsionaarse katsega mõõdeti soojusvoogusid läbi erinevate soojustusmaterjalidega täidetud katsemaja tarindite ning temperatuure sees ja väljas. Soojusvoogude määramiseks asetati soojusvoo plaadid uuritava materjalil puhul võimalikult sektsiooni keskele. Plaadid seati üles ja varjestati samamoodi kui statsionaarse katse puhul. Lagede mõõtmisel kinnitati plaat lisaks teibile ka puitliistudega. Katsemaja piirete sisepinna ja ruumi temperatuuri mõõtmiseks oli soojavoo plaatide vahetus lähedusse paigaldatud temperatuuriandurid. Soojavood ja sisetemperatuurid salvestas Almemo andmesalvestaja. Välisõhu ja -pinna temperatuuri salvestati logeriga HOB0 U12-006. Seina mittestatsionaarse katse mõõtmise ristlõige on näha joonisel 7. Lae mittestatsionaarne katse mõõtmise ristlõige on näha joonisel 8. Põranda soojusvoo mõõtmise skeem on toodud joonisel 9.

Kogu seina soojusjuhtivuse ja soojustusmaterjali soojus-erijuhtivuse määramiseks mõõdeti järgmised näitajad:

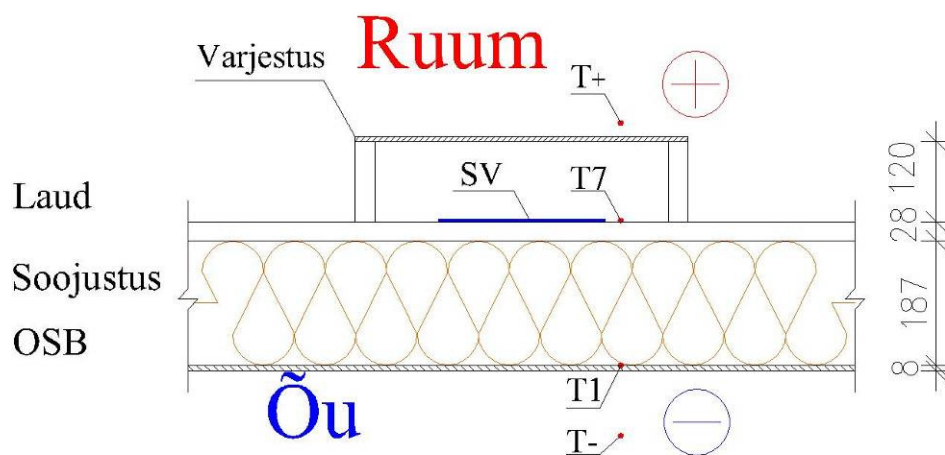
- soojusvoog q läbi katsemaja seina (SV) [W/m^2];
- välisõhu temperatuur (T_-) [$^{\circ}\text{C}$];
- seina välispinna temperatuur (T_1) [$^{\circ}\text{C}$];
- seina sisepinna temperatuur (T_7) [$^{\circ}\text{C}$];
- ruumi temperatuur (T_+) [$^{\circ}\text{C}$].



Joonis 7. Seina ristlõige soojusjuhtivuse mõõtmisel mittestatsionaarsel katsel



Joonis 8. Lae ristlõige soojusjuhtivuse mõõtmisel mittestatsionaarsel katsel



Joonis 9. Põranda ristlõige soojusjuhtivuse mõõtmisel mittestatsionaarsel katsel

Mõõtmisseadmetest saadud lugemite alusel arvutatakse piirde soojusjuhtivus vastavalt valemile 1 (Product catalog 2009).

$$U = \frac{q}{T_s - T_v}, \quad (1)$$

kus U on kihi soojusjuhtivus [$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$];
 q - soojusvoog läbi piirde [W/m^2];
 T_s -seina pinna temperatuur ruumis [$^{\circ}\text{C}$];
 T_v -seina pinna temperatuur väljas [$^{\circ}\text{C}$].

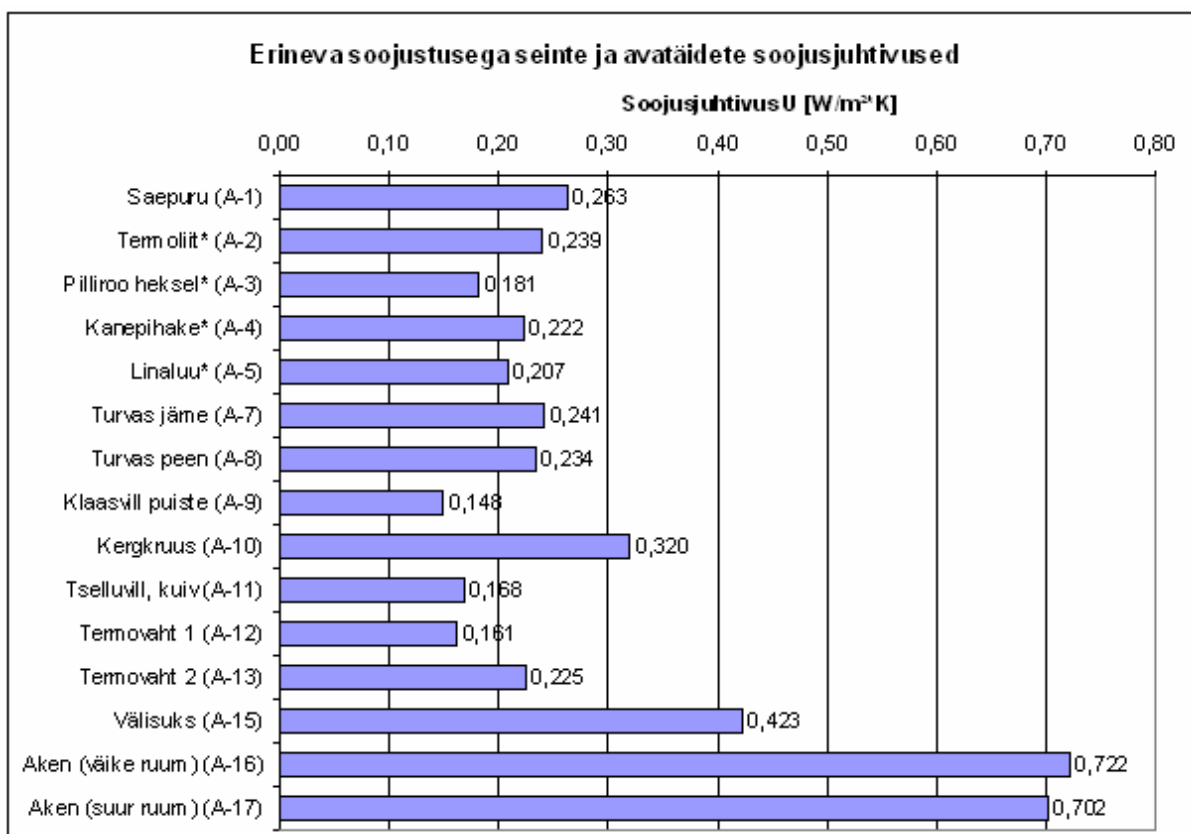
Katsemaja piirete soojusjuhtivused

Standardi EVS829-2003 järgi on välisseinte nõutav maksimaalne soojusjuhtivus 0,25 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ning katsemaja lae ja põranda soojusjuhtivus peaks olema 0,20 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (vt tabel 4.4).

Tabel 1. Piiredtarindite soovitatav soojusjuhtivus EVS 829-2003 järgi

Piirdetarind	Max U ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
Välissien	0,25
Aken, välisukse klaas	2,00
Põrand pinnase kohal	0,20
Katuslagi	0,20
Mitteköetava pööningu põrand	0,20

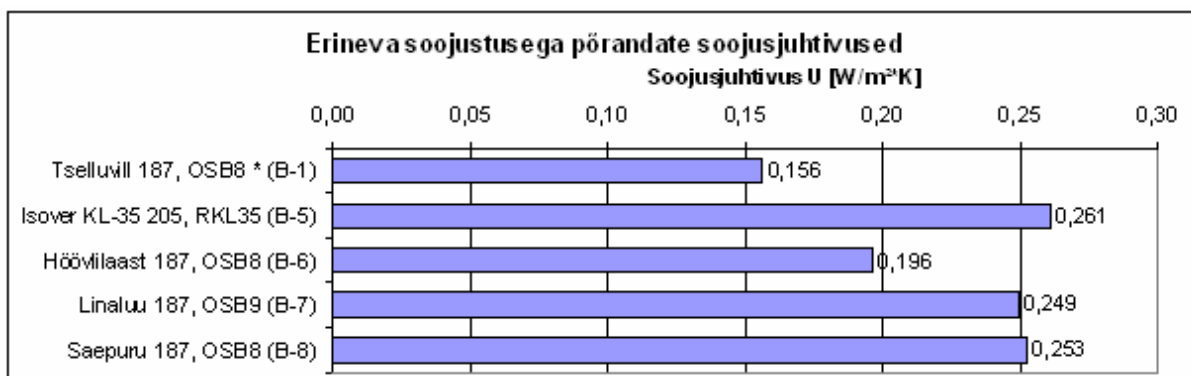
Piirete soojusjuhtivused U arvutatakse valemiga 1, kus kõik valemis kasutatavad arvnäitajad on saadud vastavates piiretes tehtud soojusvoo kompleksse mõõtmise tulemusena. Mõõtmistulemuste põhjal arvutatud erineva soojustusega välisseinte ukse ja akende soojusjuhtivused on toodud joonisel 10.



Joonis 10. Katsemaja erinevate 227 mm paksuste soojustustega seinte, välisukse ja akende soojusjuhtivused (möödetud 2009. a talvel)

Jooniselt 10 on näha, et 227 mm soojustusega seinte U väärtused ei vasta standardi EVS829 soovitudele ($U=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$) ainult kergkruusaga ($U=0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$) ja saepuruga ($U=0,263 \text{ W/m}^2\text{K}$) soojustamise korral. Tööstuslikest soojustusmaterjalidest on parimad puiste-klaasvill ($U=0,148$), termovaht ($U=0,16$) ja tselluvill ($U=0,168$). Looduslike materjalidega soojustatud seintet on parimad pilliroo heksel ($U=0,181$), linaluu ($U=0,207$) ja kanepihake ($U=0,222$).

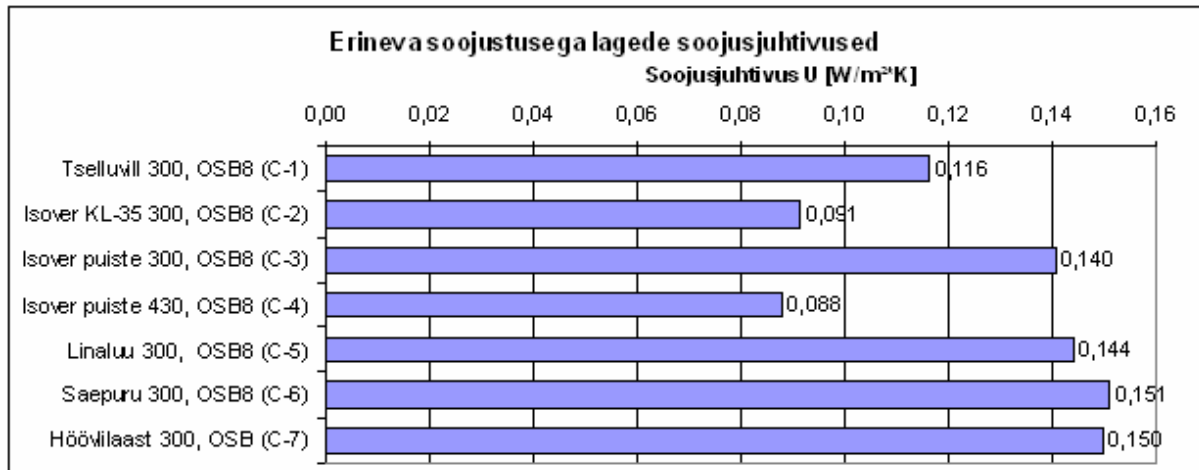
Viking Windowsi uuemat tüüpi akende ($U=0,722$) ja välisukse ($U=0,423$) soojusjuhtivused on oluliselt väiksemad kui standardiga soovitatud $U=2,00 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Joonis 11. Katsemaja erinevate soojustustega põrandate soojusjuhtivused (möödetud 2009.a talvel)

Jooniselt 11 on näha, et 187 mm paksuse soojustusmaterjaliga isoleeritud põrandate soojusjuhtivused on standardi EVS829 soovitudest ($U=0,20$) väiksemad ainult tselluvilla ja hõõvlilaastudega soojustamise korral. Teiste materjalide puhul tuleb kasutada suurema paksusega soojustusmaterjali kihti.

Katsemaja erinevate soojustustega lagede mõõtmistulemuste järgi arvutatud soojusjuhtivused on toodud joonisel 12.

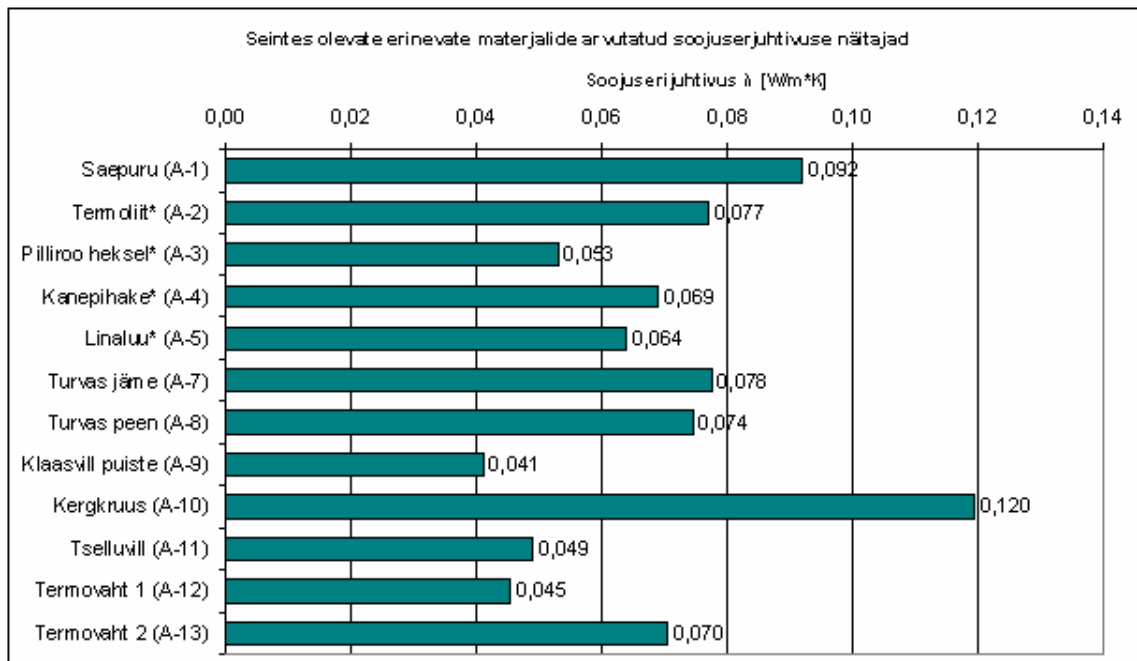


Joonis 12. Katsemaja erinevate soojustustega lagede soojusjuhtivused (mõõdetud 2009.a talvel)

Jooniselt L5.3 on näha, et 300 mm paksuse soojustusmaterjaliga lagede soojusjuhtivused on kõik väiksemad kui standardis soovitud ($U=0,20$). Tööstuslikest soojustusmaterjalidest on parim Isover KL.35 ($U=0,091$) ja looduslikest linaluu ($U=0,144$).

Katsemaja seinte soojusjuhtivuse uurimisel määrati statsionaarsel katsel sise- ja välislaudise puidu soojuseri juhtivused ning seina sise- ja välispindade soojustakistused vastavalt mõõteperioodile. Kasutades mõõdetud tulemusi valemis 1 leiame mittestatsionaarsete mõõtmistulemuste põhjal uuritavate soojustusmaterjalide soojuseri juhtivused. Mittestatsionaarsed katsed toimusid joonisel 7 esitatud skeemi järgi. Siin puudusid temperatuuriandurid soojustusmaterjalide väliskihtidel. Seinte mõõtmised toimusid perioodil 20.02 kuni 8.03 aastal 2009. Selle perioodi arvestatava seina sise- ja välispinna soojustakistuse summa (R_{SE}) väärtus oli $0,554 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Katsemajas olevate seinte soojustusmaterjalide soojuseri juhtivuste väärtused on toodud joonisel 13.



Joonis 13. Soojustusmaterjalide soojuseri juhtivused katsemaja seinas

Lisa 8

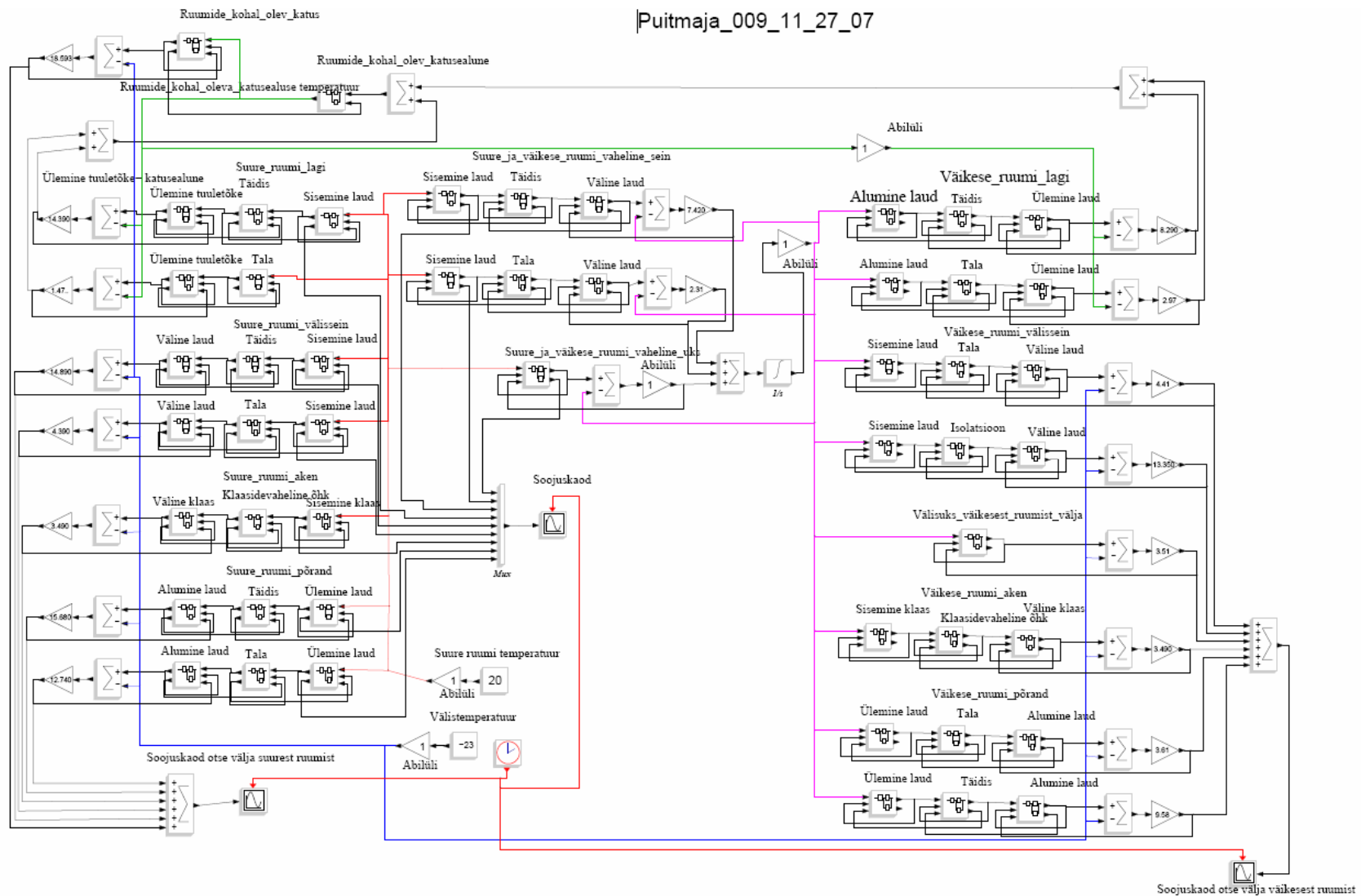
Katsemaja energiasäästlikkuse simuleerimise mudel

Selleks et uurida, kuidas katsemajas uurimistulemusi saaks kasutada tulevaste hoonete energiasäästlikkuse simuleerimisel, on koostatud dots Veli Palge poolt ühe mooduli mudel (joonis 1).

Mudeli abil saab mudeli moodulite parameetrite muutmisega uurida:

- katsemaja soojuskadude jaotust erinevate konstruktsioonielementide lõikes;
- katsemaja soojuskadude suurust ja jaotust sõltuvalt erinevate soojusisolatsioonimaterjalide kasutamisest;
- katsemaja soojuskadude suurust ja jaotust konstruktsioonielementide muutmisel (nii piirete konstruktsiooni muutmisel kui ka sisemiste konstruktsioonielementide muutmisel - selleks on vajalikud mudeli väikesemahulised teisendused);
- katsemaja soojuskadude dünaamikat (soojuskadude muutumist ajas) sõltuvalt välistemperatuuri muutumisest ajas;
- katsemaja soojuskadude dünaamikat (soojuskadude muutumist ajas) sõltuvalt küttevõimsuse muutumisest ajas;
- katsemaja soojusvahetuse dünaamikat (soojusvoogude muutumist ajas)
- nii piirete konstruktsiooni muutmisel kui ka sisemiste konstruktsioonielementide muutmisel - selleks on vajalikud mudeli väikesemahulised teisendused.

Selle mudeli laiendamise ja suurendamisega võib hiljem simuleerida suuremate hoonete energiatõhusust.



Joonis 1. Katsemajas toimuvate soojuskadude suuruse, jaotuse ja dünaamika simuleerimise mudel