

TARTU ÜLIKOOL

LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND

ARTUR PATA

PÕHUPAKKSEINTE SOBIVUS PASSIIVMAJA VÄLISPIIRETEKS EESTI KLIIMAS

BAKALAUREUSETÖÖ MATERJALITEADUSES (12 EAP)

Juhendaja:

SIIM HÖDEMANN, *MSc*

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

TARTU 2016

Lühikokkuvõte

PÕHUPAKKSEINTE SOBIVUS PASSIIVMAJA VÄLISPIIRETEKS EESTI KLIIMAS

Käesolevas töös uuritakse põhupakkseinte sobivust passiivmaja standarditele vastava hoone ehituseks Eesti kliimas. Võrreldakse enamlevinud põhupakkseina tüüpe ja nende kasutust olemasolevates passiivmajades. Pakutakse välja põhupakkseinte jaoks uus ehituslahendus. Leitakse uue seinatüübi soojusläbivus ($U_T = 0.113 \frac{W}{m^2K}$). Seinä tähtsamad sõlmed modelleeritakse kahedimensionaalselt soojusülekanne simulatsioonitarkvaras THERM ja leitakse külmasildade väärtused välismõõtude järgi ($\psi_{geom} = -0.081 \frac{W}{mK}$). Arvutatakse uue seinatüübiga väikeelamu primaarenergiavajadus statsionaarse kuu-põhise mudeliga tarkvarapaketi Passive House Planning Package (2007) abil. Leitakse, et see vastab passiivmajadele seatud kriteeriumitele, juhul kui avatäidete kvaliteet on olemasolevatest parim.

Märksõnad: põhupakk, põhksein, majaümbrik, energiatõhus, passiivmaja (T230: Hooneehitus)

Abstract

STRAW BALE WALLS AS PASSIVE HOUSE ENVELOPE IN THE ESTONIAN CLIMATE

This thesis examines the suitability of straw bale walls as passive house envelope in the Estonian climate. Different straw bale wall systems and their use in existing passive houses is compared. A new hybrid straw bale wall system is proposed. Thermal resistance and thermal bridging of the hybrid wall system is characterized with two dimensional thermal simulation software THERM ($U_T = 0.113 \frac{W}{m^2K}$, $\psi_{geom} = -0.081 \frac{W}{mK}$). The primary energy demand of a small residential house designed with the new wall system is calculated with the month-based method of Passive House Planning Package (2007). It is found to be compliant with passive house criteria if the quality of the windows and doors is the highest of currently available options.

Keywords: straw bale, wall system, house envelope, energy efficient, Passive House (T230: Building construction)

Sisukord

1	Sissejuhatus	2
2	Valdkonna ülevaade	3
2.1	Põhupakkehitus ajalooliselt	3
2.2	Põhu omadused	3
2.3	Tüüpiline põhupakk	4
2.4	Põhupakkseinte tüübid	4
	Kandev sein	5
	Karkass-sein	6
	Põhkpaneel	6
2.5	Energiatõhusus	7
	Euroopa Liidu direktiivid	7
	Riiklikud standardid	7
	Passiivmaja standard	7
2.6	Soojusülekanne ehitises	8
	Õhuvahetus väliskeskkonnaga	9
	Soojusjuhtivus	9
	Külmasillad	10
3	Põhupakkseintega väikeelamu analüüs	11
3.1	Põhupaki soojuslikud omadused	11
3.2	Põhupakk passiivmajade välisümbrikus	11
3.3	Hübriidsein	13
	Soojustakistuse arvutused	14
	Külmasildade arvutused	15
3.4	Hübriidseintega väikeelamu primaarenergia arvutused	17
	Simuleeritava hoone kirjeldus	18
	Kuupõhise primaarenergiaavajaduse arvutuse tulemused	19
4	Kokkuvõte	20
	Kasutatud kirjandus	21
	Lisa A: Eesti energiaarvutuste baasaasta (PHPP sisendina)	23
	Lisa B: PHPP primaarenergia arvutused (kuupõhise meetodi tööleht)	24

1 Sissejuhatus

Süsinikkiud-armeeritud komposiitide ja nanotehnoloogiliste kilede kõrval tundub kohatu materjaliteadlasena käsitleda midagi nii iidset kui põhupakksein. Ometi on see materjal sel sajandil antropogeensest kliima soojenemisest tulenenud üldise keskkonnateadlikkuse tõusuga läbinud teatud renessansi. Eestis tegeleb põhupakkehitusega või sellega seotud koolitustega vähemalt kolm ettevõtet, hooneid on ehitatud perioodil 2002-2013 üle poolesaja. (1)

Huvi põhkseinte vastu on tingitud tõenäoliselt materjali looduslikkusest (erinevalt teistest levinud soojustusmaterjalidest), odavusest (tegemist on praktiliselt põllumajanduse jääkproduktiga), valmis seina võrdlemisi madalast soojusjuhtivusest. Tehnoloogia on piisavalt lihtne isehitamiseks, kuid seda on edukalt kasutatud ka suuremamahulistest projektides, näiteks Saksamaal Sieben Lindeni ökokülas. (2)

Samuti on põhupakk-meetod pälvinud tähelepanu tänu maavärinakindlusele. (3) Arvestades, et 30-50% maailma rahvastikust elab veel muldehitistes (ingl. k. *adobe*), mis on madala vastupidavusega maavärinatele, on põhupakkehitistel potentsiaal säästa elusid ja parandada elukvaliteeti miljonitel inimestel. (4)

Käesoleva töö eesmärk on uurida põhupakkseinte sobivust tänapäevastele energiatõhususstandarditele vastavatesse hoonetesse Eesti kliimas.

Töös antakse esmalt ülevaade põhupakkehitistesse ja energiatõhususse puutuvatest teemadest ja kirjandusest. Seejärel uuritakse olemasolevaid põhupakkidest energiasäästlikke maju ning pakutakse välja uus meetod põhupakkseina ehitamiseks. Uuritakse sellise seina soojuslikke omadusi. Leitakse selliste seinadega ehitatud väikeelamu primaarenergiavajadus.

2 Valdkonna ülevaade

2.1 Põhupakkehitus ajalooliselt

Orgaaniliste kiududega (näiteks põhuga, pillirooga) segatud savi (ingl. k. *cob*) on ehitusmaterjalina umbes sama vana kui inimtsivilisatsioon ise. Põhupakkemasin leiutati aga alles 19. sajandi lõpus. Esimesed põhupakkmajad ehitati sel ajal Ameerika Ühendriikides Suurel tasandikul, tänapäeva Nebraska osariigis. Kuna selles piirkonnas oli puitu ja kivimaterjale vähe aga põhuks sobilikke kõrgeid rohhtaimi palju, hakati põhupakke kasutama seinade ladumiseks nagu suuri telliseid, mis veekindluse ja tuulekindluse tagamiseks kaeti mõlemalt poolt savikrohviga. (5)

Selles piirkonnas olid tavalised kandvad põhupakkseinad (käsitletakse peatükis 2.4), sest see võimaldas säästa puitu. Põhu asemel kasutati osades majades pilliroogu või heina. Ehitised olid enamasti ühekorruselised. Osad neist majadest Nebraskas on siiani eksploatatsioonis, mis tunnistab selle ehitusstiili vastupidavust. (6)

2.2 Põhu omadused

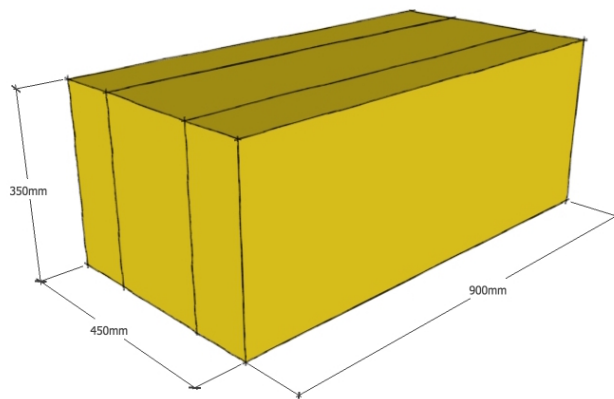
Põhk on taimevartest, teradeta viljapeadest, lehtedest ja aganatest koosnev tera- ja kaunviljakasvatuse ning seemneheinakasvatuse kõrvalsaadus. Erinevalt heinast on põhu toiteväärtus madal, seega pole see söödana eriti väärtuslik. Samal põhjusel pole see väga ahvatlev närilistele. Seda kasutatakse loomakasvatuses laudas allapanuna, soojusenergia tootmiseks katlamajades, ehitusmaterjalina. (7)

Põhk on keemiliselt koostiselt sarnane puidule, koosnedes peamiselt tselluloosist, hemitselluloosist ja ligniinist.

Tabel 1: Nisupõhu ja ehituspuidu keemilise koostise võrdlus

	Nisupõhk (8)	Ehituspuit (9)
Aine	Sisaldus (% kuivmassist)	
Tselluloos	33.7-40	40-50
Hemitselluloos	21-26	20-30
Ligniin	11-22.9	25-35

2.3 Tüüpiline põhupakk



Joonis 1: Põhupaki tüüpilised mõõtmed

Kuna põhupakk pole olemuselt ehituspoe toode, on raske rääkida standardsetest dimensioonidest. Ometi on põllumajanduses sajandipikkuse praktikaga välja kujunenud tüüpiline põhupakk – see on risttahukas, mille mõõtmed on 350 * 450 * 900 mm, kusjuures pikim mõõde on pakkemasinal tavaliselt muudetav. Suuruse peamiseks mõjutajaks on olnud tingimus, et pakke peab olema võimalik inimjõuga käsitseda. Eksisteerivad ka oluliselt suuremad pakid (ristlõige 800 * 900 mm ... 900 * 1200 mm, pikkus kuni 2000 mm), mida liigutatakse frontaallaaduriga, kuid põhupakkehituses kasutatakse peamiselt väiksemaid pakke. Tuleb arvestada, et pakide mõõtmed fluktuueeruvad oluliselt rohkem kui ehituskividel või soojustusplaatidel, eriti pikkuses. (5) (10)

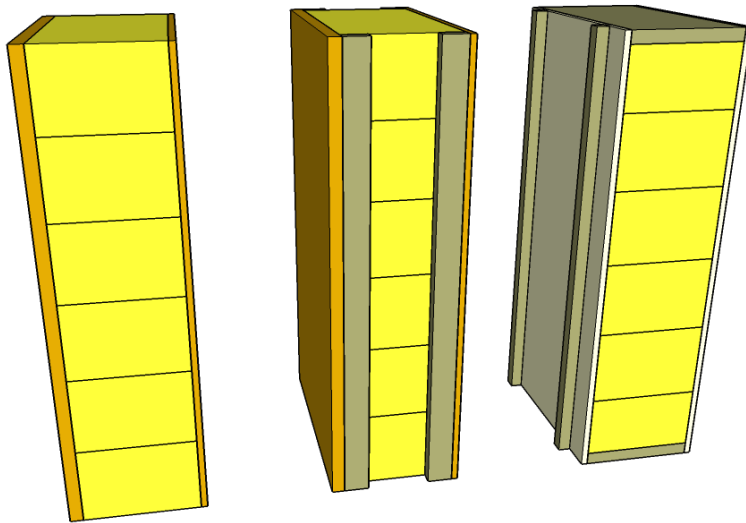
Kõrred on pooljuhuslikult orienteeritud piki 450 mm külge. Kõrte üks ots on sissevolditud, teine tasasaetud. Volditud külg (üks 350 * 900 mm tahk) võib olla tasasaetud küljest tagasipööratud kõrte tõttu tihedam, mistõttu soovitatakse neid külgi seinte ladumisel rea kaupa vaheldada. Kõrsi hoiab koos pikima küljega paralleelselt ümber paki seotud kaks või kolm nööri (polüpropüleen, sisal või sidumistraat), sidumise pinget on reguleeritav. (5)

Põhupaki tugevus- ja soojustusomadused sõltuvad tugevalt pakketihedusest – ehituseks sobilikuks peetakse Kalifornia ehituskoodeksi järgi kuivtihedust 104 kg/m³. Maksimaalne lubatud niiskusesisaldus on sarnaselt ehituspuiduga 20%. (11) Austraalia loodussäästliku ehituse teejuhise soovitatakse maksimaalset niiskusesisaldust 15%. (12)

2.4 Põhupakkseinte tüübid

Ehkki erinevaid põhupakkseinu on umbes nii palju kui sellega ehitajaid, jagunevad need laias laastus kolmeks. Kandev põhupakksein ehk Nebraska stiil on neist vanim ja erineb teistest selle poolest, et katuse raskus kantakse vundamendile otse läbi põhupakkide. Karkass-sein sarnaneb kõige rohkem tüüpilise puitsõrestikehitisega, kus katus toetub puitsõrestikule ja põhupakid

täidavad soojustuse rolli puitdetailide vahel. (10) Lisaks nendele kasutatakse ka ettevalmistatud põhkpaneele, kus põhk (või põhupakid) pressitakse kahe plaadi vahele.



Joonis 2: Põhupakkseinte läbilõiked (vasakult paremale: kandev sein, karkass-sein, põhkpaneel; siseküljed vasakul, välisküljed paremal)

Kandev sein

Nebraska stiilis ehitatud sein koosneb vundamendile toetuvast alumisest vööst, põhupakkidest laotud seinast (kahelt poolt krohvitud) ja ülemisest vööst, millele toetuvad katuse sarikad. Alumise ja ülemise vöö materjal võib olla erinev (sageli puit või metall), kuid nende ülesanne on ühene – jaotada raskus ühtlaselt kogu seina ulatuses. Isegi tihedatest põhupakkidest sein vajub raskusega kokku – seitsme paki kõrgune sein võib katuse raskuse all vajuda 25 kuni 100 mm. (10)

Seetõttu tuleb krohv, mis täidab väljas tuuletõkke ja sees niiskustõkke rolli, kanda seinale õigel ajal. Ajalooliselt lasti krohvimata seintel katuse raskuse all 6 kuni 8 nädalat vajuda ja alles siis pakid krohviti. Tänapäeval on nii pikka seisakut ehituses raske õigustada ja pakid surutakse kokku mehaaniliselt enne katusekonstruktsioonide väljaehitust. Levinud meetod selleks on paigaldada iga teatud vahemaa tagant terastraat (diameetriga 2.5 mm) ümber seina nii, et traat läheb alumise vöö alt ja ülemise vöö pealt. Traadid pingutatakse – see tõmbab ülemist vööd vundamendi poole ja surub pakid kokku.

Kandvas seinas pole krohv vaid barjäär elementidele – krohviikihtidele langeb peamine osa raskust. Sein käitub nagu võileib-komposiitstruktuur, kus põhupakid on täitva sideaine rollis. (10) Krohve on erinevat liike – savikrohv, tsementkrohv, lubikrohv – nende sobivus sõltub konkreetse ehitise vajadustest, kohalikust kliimast. Savikrohvis olevad lisandid (liiv, kõrred) vähendavad selle soojusjuhtivust. (13) On ilmselge, et peale tüüpi on seina lõppomadustes tähtis

roll krohvi paksusel. Siin on piiravateks teguriteks peale hinna ka krohvi mass – 25 mm paksune krohvi kiht ühel küljel kaalub suurusjärgus 70 kg/m^2 (põhupakkseina omakaal on ligikaudu 65 kg/m^2). (5)

Karkass-sein

Sõrestik-põhupakkseinas võib põhupakk paikneda sõrestikust väljaspool, seespool või sõrestiku vahel. Kõigil variantidel on eeliseid ja puudusi, kuid ükski neist ei erine ehitustehnoloogiliselt oluliselt soojustusvilla või polüstüreenplaadiga isoleeritud sõrestikseintest. Tüüpiline probleem on puitsõrestiku olemine külmasillaks (peatükk 2.6). Selle tõttu on energiatõhusate hoonete välisümbrikud lahendatud tihti kahekordse karkassiga, mille vahel on soojustus. Võrreldes Nebraska stiiliga, kulub puitu rohkem.

Kuna põhupakksoojustus on nii paks, siis raskendab see nurkade, avade (aknad, ukсед) planeerimist. Samuti väheneb kasutatav sisepindala, võrreldes konventsionaalselt soojustatud seinaga.

Põhupakke on raske kohandada eri mõõtmetega avade täitmiseks, mis sõrestikseinade ehitamisega jäävad. Uute kinnitusnööride sidumine, vanade eemaldamine ja siis paki poolitamine on oluliselt ajamahukam kui soojustusplaadi mõõtu lõikamine. Pakist tunduvat väiksemad avaused täidetakse "põhutaldrikutega", milleks põhupakk kinnitusnööride eemaldamisel laguneb. Nende käitumine surve all on veelgi ettearvamatum kui tervel põhupakil. (5)

Ka selle seinatüübi puhul pingutatakse põhupakid enne viimistluskihtide lisamist (sest krohvi mass suruks muidu seina ebahühtlaselt kokku), kuid see pole nii oluline kui Nebraska stiilis ehitistes.

Põhkpaneel

Struktuursed soojustatud (modulaarsed) paneelid pole ehitusmaailmas midagi uut – levinud on polüstüreen- või villsoojustusega modulaarsed betoonplokid. Väiksemas mahus valmistatakse ka erinevaid paneele, kus kahe (puit)plaadi vahe täidetakse polüstüreeni, polüuretaani või villaga. Enamasti tuuakse selle ehitusstiili eeliseks standardiseeritus, modulaarsus ja hoone välisümbriku kokkupaneku kiirus. Samas vajavad massiivsed paneelid ehitusplatsile kraanat ja veokit, mis ei pruugi olla asustuskeskustest eemal ökonoomne.

Põhkpaneel on teistest oluliselt lühema ajalooga ehitusstiil, kuid see lubab ühendada põhu looduslikkuse ja odavuse standardsemasse vormi. (14) (15) Samas ühel tootjal kolmest on paneeli liitekohas tervet seina läbiv puitdetail, mis toimib külmasillana – see on probleem ka analoogsete polüstüreensoojustusega paneelidega. (16)

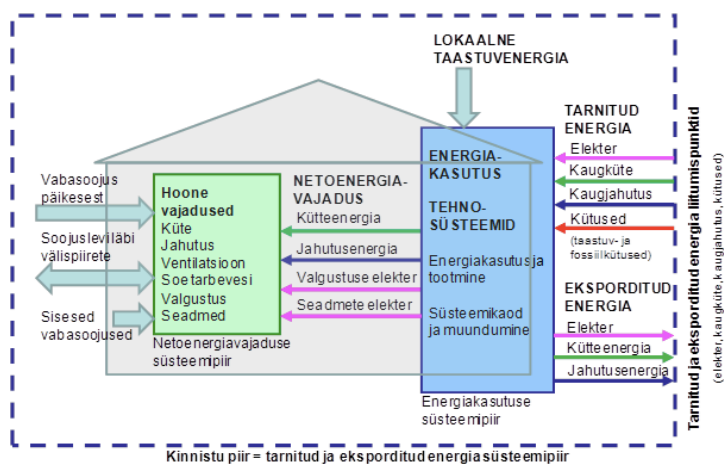
2.5 Energiatõhusus

Euroopa Liidu direktiivid

Euroopa Liidu energiatohususe direktiivi kohaselt peavad liikmesriigid vähendama 2020. aastaks oma energiakulutusi. (17) Kõige rohkem energiat tarbivad ehitised – neile kulub 40% kogu energiast (järgnevad transport osakaaluga 32%, tööstus 26% ja põllumajandus 2%). (18) Energiatarve hoonetes on EL-s keskmiselt 210 kWh/m² aastas (2012). Sellest 130 kWh/m² kulub küttele. (18)

On selge, et on tegemist valdkonnaga, kus energiatohusate lahenduste kasutusele võtmisel oleks suur potentsiaal.

Riiklikud standardid



Joonis 3: Energiatõhususarvu arvutamise skeem sisendite ja väljunditega.

Eestis defineeritakse hoone energiatohususe näitajana energiatohususarv (edaspidi ETA) [kWh/m²a], mis kujutab endast joonisel toodud süsteemi tarnitud energia ja eksporditud energia vahet. Kusjuures energia väärtused korrutatakse läbi sõltuvalt allika iseloomust (taastuv või mittetaastuv ressurs) kindlaks määratud koefitsientidega. Netoenergiavajaduse arvutus ETA jaoks järgib standardi ISO 13790 põhimõtteid. (19)

Eestis seatakse ETA väärtus väikeelamutele (<100 m²) maksimaalselt 184 kWh/(m²a). (20)

Passiivmaja standard

Passiivmaja standard on Saksamaal 1990. aastatel välja töötatud kriteeriumite kogum ehitistele, mille eesmärgiks on oluliselt vähendada neis küttele kuluvat energiat, pakkudes samal ajal hoone kasutajatele mugavaimat sisekliimat.

Selle standardi järgi ehitatud majade maksimaalne aastane primaarenergiatarve on 120 kWh/m², millest küttele osa on maksimaalselt 15 kWh/m² aastas – ligi 10 korda väiksem

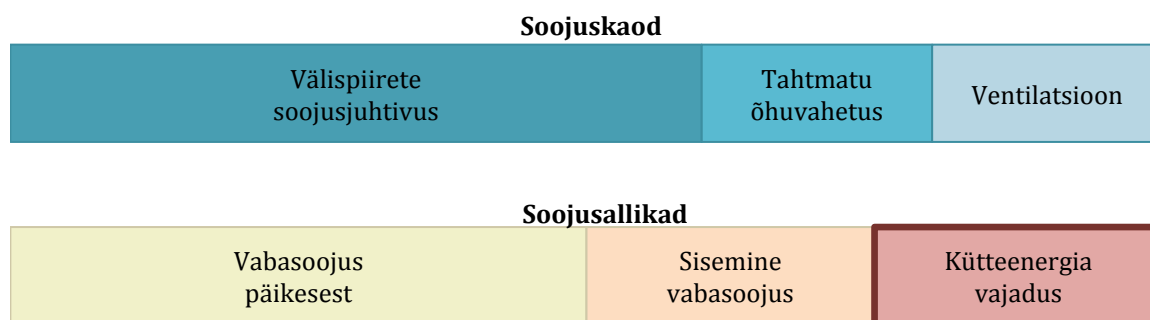
praegusest EL keskmisest. (21) Võrreldes riiklike standarditega, on passiivmaja kriteeriumite näol tegemist rangema variandiga.

Erinevus kütteenurgias tuleneb peamiselt õhutihedast ja katkemisteta soojustatud hooneümbrikust, mehaanilisest soojusvahetiga ventilatsioonisüsteemist ja suure soojustakistusega avatäidetest (aknad, ukсед).

Passiivmaja planeerimiseks kasutatav tabelarvutusprogrammide (Excel jms) tarkvarapakett Passive House Planning Package (edaspidi PHPP) on spetsiaalselt madala energiatarbega hoonete jaoks välja töötatud statsionaarne kuu-põhine arvutusmudel, mis põhineb ISO 13790 standardil. Seda kasutatakse rahvusvaheliselt nii passiivmajade planeerimisel kui ka sertifitseerimisel – seega on tegemist tervikliku simulatsioonimetoodikaga. PHPP metoodika tulemused on kooskõlas nii mõõdetud keskmistega kui ka dünaamiliste simulatsioonide tulemustega. (22)

Praeguseks on passiivmaju maailmas rohkem kui 20 000, millest umbes 3500 on registreeritud vaba ligipääsuga passiivmajade veebiandmebaasi. (23) Andmebaasis esitatakse pilt ehitisest, olulisem ehitustehnoloogiline info (näiteks piirete soojustuse liik, soojusläbivus), kasutatatud komponendid. (24)

2.6 Soojusülekanne ehitises



Joonis 4: Energiabilanss ehitises

Ehitise kasutusmugavuse seisukohast eeldatakse konstantset sisetemperatuuri, mis passiivmajades on 20 kraadi Celsiust. See tähendab, et energiabilanss (sojusallikad – sojuskaod) peab olema 0. On selge, et hoonete kütteenurgia vajadust saab vähendada kas sojuskadude vähendamise või vabasoojuse suurendamisega.

Päikese vabasoojus sõltub kohalikust kliimast, hoone geomeetriast, akende orientatsioonist, akende kvaliteedist, asukoha varjutatusest. Sisemine vabasoojus tuleneb sisetemperatuurist kõrgema temperatuuriga elektriseadmetest, inimestest. Juhul kui vabasoojus ületab küttevabal

perioodil hoone soojuskaod, on konstantse sisetemperatuuri säilitamiseks vajalik kulutada energiat hoone jahutamiseks. Mehaanilise jahutussüsteemi puudumisel leevendatakse seda õise manuaalse tuulutusega (akende avamine). Vabasoojust optimeeritakse passiivmajade planeerimisel PHPP-s.

Soojuskadu koosneb kahest põhilisest osast: soojuse hajumisest läbi hoone välispiirete ja õhuvahetusest väliskeskkonnaga.

Õhuvahetus väliskeskkonnaga

Kontrollimatu õhuvahetus toimub läbi pragude hoone välispiiretes, akende ja aknalengi vahel, muudes avaustes. See võib talvel tähendada suurt energiakadu ja kütteenergia vajaduse kasvu. Seega on tarbija huvides võimalikult õhulekktihe ehitis.

Ehitise õhulekktiheidust iseloomustatakse õhulekkearv n_{50} [1/h]. See suurus näitab, mitu korda vahetub tunni jooksul maja ruumala jagu siseõhku väliskeskkonnaga. Alaindeks 50 tähendab, et õhulekkearv mõõdetakse 50 Pa suuruse rõhuvähe korral ehitise ja väliskeskkonna vahel. Passiivmaja standard nõuab ehitistelt $n_{50} < 0.60 \frac{1}{h}$. (21)

Samuti võib õhuvahetus olla tahtlik, näiteks läbi mehaanilise ventilatsioonisüsteemi või avatud akna. Ventilatsioonisüsteemi saab muuta tõhusamaks paigutades siseneva ja väljuva õhu vahele soojusvaheti. Passiivmaja standardis järgi peab ventilatsiooni soojusvaheti efektiivsus olema vähemalt 75%. (21)

Soojusjuhtivus

Fourier seadusest teame, et soojusvoo tihedus \vec{q} [W/m²] mingis punktis on võrdeline materjali soojusjuhtivusteguriga λ [W/(mK)] ja negatiivse temperatuurigradiendiga $-\nabla T$ [K/m] selles punktis

$$\vec{q} = \lambda \cdot -\nabla T$$

Lihtsamates lähendustes (kui temperatuurierinevus ei ole suur) loetakse soojusjuhtivustegur konstantseks, kuigi see tegelikult sõltub temperatuurist.

Soojusülekanne arvutamisel läbi pinna lihtsustatakse soojusvoog $\Delta Q/\Delta t$ [W] ühedimensionaalseks. Sel juhul soojusvoog läbi homogeense pinna konstantse sise- ja välispinnatemperatuuri korral on

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

kus A on pindala [m^2], Δx on materjali paksus [m], ΔT on temperatuuride vahe sise- ja välispindadel [K].

Soojustakistus R [m^2K/W] avaldub

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

Soojuslähivus U [$W/(m^2K)$] on soojustakistuse pöördväärtus.

$$U = 1/R$$

Soojustakistus on aditiivne suurus, soojuslähivus pole seda mitte.

$$U_{sum} = \frac{1}{R_1 + R_2 + \dots + R_n}$$

Külmasillad

Külmasild on osa hooneümbrikust, kus soojustakistus oluliselt erineb ümbritsevast. See võib esineda, kui soojustuskihti läbivad osaliselt või täielikult põhimaterjalist erineva soojusjuhtivusega elemendid; kui muutub soojustuskihi paksus; kui elemendi sise- ja välispindalade vahel on erinevus (näiteks seinte nurkades, liitumispunktis lagede ja põrandatega). (25)

Kui külmasillal on mööda ühte ristkoordinaatide telge ühtlane ristlõige, lihtsustakse need joonkülmasildadeks ning kirjeldatakse suurusega ψ [$W/(mK)$]. Samuti võivad külmasillaks olla soojustuskihte läbivad kinnitusvahendid või talad. Need lihtsustatakse punktkülmasildadeks ja kirjeldatakse suurusega χ [W/K].

Kui külmasilla alas on soojustakistus ümbritsevast väiksem ($\psi > 0$), on läbi selle soojusvoo tihedus suurem kui mujal. See tähendab hoonele suuremaid soojuskadusid ja järelkult ka küttenenergia vajaduse kasvu. Külmasildade alades võib kondenseeruda vesi ja esineda probleeme hallitusega või mädanemisega.

Neil põhjustel nõuab passiivmaja standard, et külmasildade väärtused oleksid $\psi < 0.01 W/(mK)$. (21) Kui külmasillad on niivõrd väikesed, võib need hoone soojuskadude arvutamisel arvestamata jätta. Sellist ehitist nimetatakse külmasillavabaks.

Külmasild ei pruugi olla alati soovimatu nähtus: näiteks võivad olla katkematu soojustusega planeeritud ehitistel teatud piirkonnad, kus soojustakistus on ümbritsevast suurem. Seega on neid läbiv soojusvoo tihedus väiksem ja ψ on negatiivse väärtusega ehk vähendab soojuskadusid.

3 Põhupakkseintega väikeelamu analüüs

3.1 Põhupaki soojuslikud omadused

Selles töös pakuvad erilist huvi põhu soojuslikud omadused, sest need on määrava tähtsusega energiatõhusas seinasüsteemis. Esimesed selleteemalised arvud avaldas McCabe 1993. aastal Kanadas, kus ta määras kuuma plaadi meetodiga põhupaki soojusjuhtivuseks $\lambda = 0.46 \dots 0.61 \frac{W}{mK}$. Acton leidis 1994. aastal termoanduri meetodiga põhupaki soojusjuhtivuseks $\lambda = 0.054 \frac{W}{mK}$. Need tulemused iseloomustasid katmata põhupakki, mitte terviklikku seinasüsteemi. (26)

Tõenäoliselt nende tulemuste põhjal kasutatakse passiivmajade konstruktsioonides soojustakistuse arvutamiseks põhupakkide jaoks soojusjuhtivuse väärtust $\lambda = 0.55 \dots 0.57 \frac{W}{mK}$. (27) (28)

Seinasüsteeme uuris esimest korda Watts 1995. aastal Nova Scotias. Uurimisobjektiks oli olemasolev kahelt poolt krohvitud põhupakksein. Keskmiseks soojustakistuseks 0.47 m paksuse seinaga saadi termoandurite ja kuuma plaadi meetoditega $R = 4.7 m^2K/W$. Järgmised arvestatavad katsed toimusid Christiani juhtimisel Tennessee osariigis 1998. aastal, kus kahelt poolt krohvitud 0.48 m paksuse põhupakkseina soojustakistuseks saadi $R = 4.84 m^2K/W$. (26)

Viimast tulemust on põhjust pidada täpsemaks tulemuseks kahelt poolt krohvitud põhupakkseinade puhul, kuna sein ehitasid professionaalid, mõõtmised tehti kontrollitud tingimustes ja varasematest kogemustest õppides (sarnased katsed tehti ebaõnnestunult 1996. ja 1997. aastal). See tulemus ühtib ka 1995. aastal *in situ* tehtud mõõtmistega.

3.2 Põhupakk passiivmajade välisümbrikus

Passiivmajade veebiandmebaasis on esitatud 11 põhupakke soojustusena kasutatavat passiivmaja, millest vanim on ehitatud 2002. aastal Austrias ja uusim 2013. aastal Hispaanias. (29) 11-st kaks on ametlikult passiivmaja instituudi poolt sertifitseeritud (tabelis märgitud tärniga), teised on projekteeritud passiivmajadena.

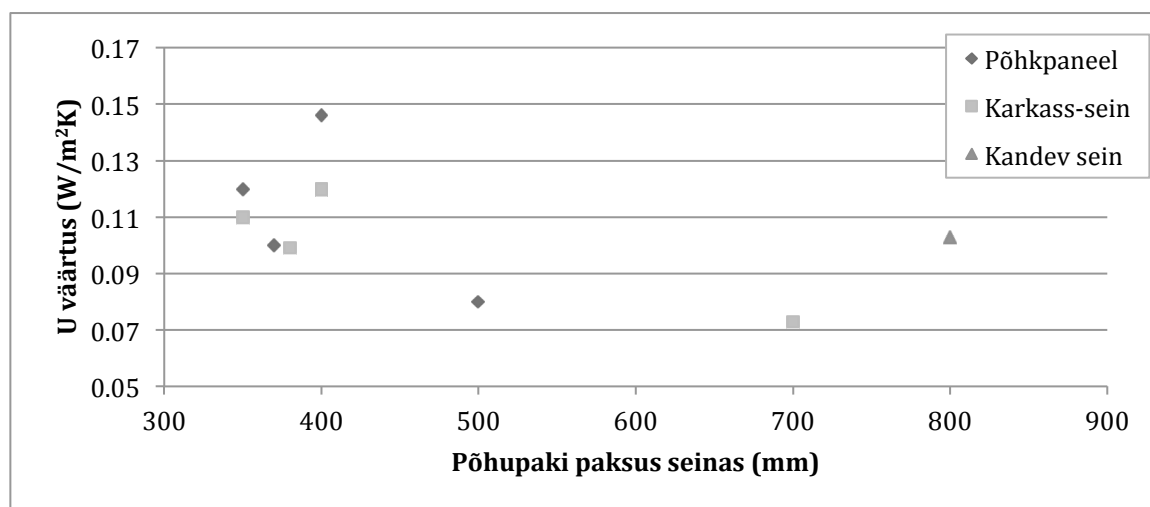
Pidades silmas käesoleva töö eesmärki, uuriti nende ehitiste välispiirdeid (põrand, seinad, lagi või katus), ehitusstiili, soojustuskihi paksust ja summaarset soojuslähivust.

Tabel 2: Põhupakksoojustusega passiivmajad

Asukoht/nimi	ID	Seinatüüp	Põhupaki paksus (mm)	U sein (W/(m ² K))	Lae/katuse soojustus	Soojustuse paksus (mm)	U lagi (W/(m ² K))
Böheimkirchen	3332	Põhkpaneel	500	0.08	Põhupakk	500	0.08
Breitenwaida	3682	Põhkpaneel	370	0.1	Põhupakk	500	0.08
Wels	3283	Põhkpaneel	350	0.12	Põhupakk	360	0.12
Larixhaus*	3874	Põhkpaneel	400	0.146	Põhupakk	400	0.147
Seeheim	1899	Karkass-sein	700	0.073	Põhupakk	700	0.073
Hard	3956	Karkass-sein	380	0.099	Põhupakk	380	0.101
Perchtoldsdorf	3087	Karkass-sein	350	0.11	<i>Teadmata</i>	<i>Teadmata</i>	0.09
Lorraine*	1199	Karkass-sein	400	0.12	Tselluloos	600	0.048
Esslingen	1379	Karkass-sein	400	0.12	Tselluloos	450	0.1
Ebergassing	2965	Kandev sein	800	0.103	Põhupakk	360	0.12
Hittisau	3697	<i>Teadmata</i>	360	0.12	Põhupakk	360	0.091

Ehitusstiilidest on domineeriv karkass-ehitus, mis on ka loogiline, sest see sarnaneb enim tavapärase ehituspraktikaga. Nebraska stiilis ehituse esindajaid on andmebaasis vaid üks. Seda ei tuleks pidada stiili ebasobivuse näitajaks – pigem võib olla põhjuseks kandva põhupakkseina tundmatus Euroopas ja sellest tingitud probleemid ehitusloa saamisel. Märkimisväärne osakaal (umbes 40%) on põhkpaneelidest ehitistel. Passiivmaja hooneümbrikule seatud ranged tingimused eeldavad tugevat kvaliteedikontrolli ja standardiseeritud komponentide kasutamist. Kumbagi võimaldavad eelvalmistatud põhkpaneelid. Seda toetab teadmine, et kaks põhkpaneelide tootjat kolmest (ModCell, Ecocon) on saavutanud enda seinasüsteemidele passiivmaja sertifikaatsiooni. (14) (16)

Võib järeldada, et põhupakkidest passiivmaja ehitamiseks sobivad kõik kolm ehitusstiili – ent kui väikese soojuslähivuse võib selliste seintega saavutada?



Joonis 5: Põhupakkseinte soojuslähivuse sõltuvus põhupakkide paksusest

Väikseim soojusläbivus ($0.073 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) oli 700 mm paksuse põhupakksoojustusega karkass-seinal. Sellest paksem 800 mm põhksoojustuskiht oli vaid Nebraska stiilis seinal, mille soojusläbivus oli suurem – $0.103 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Need paksused ja soojusläbivused on ekstreemsed. Passiivmaja hooneümbriku kriteeriumite täitmiseks külmas kliimas on seina soovituslik $U \leq 0.12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. (21) Nagu näha jooniselt, siis enamik seinu (nii karkass- kui ka paneelseinad) paigutuvad soojusläbivuse vahemikku 0.10...0.12 ja see suudetakse saavutada põhupaki paksusega 350...400 mm.

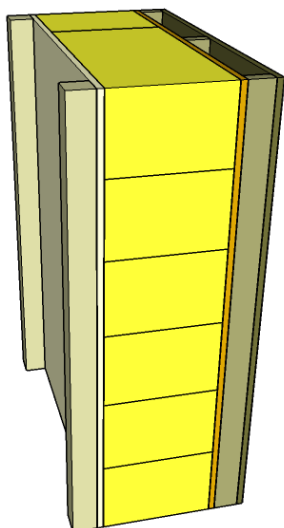
Toodud tabelis ja joonisel ei ole põhupakk ainsaks soojusläbivuse panustajaks. Sõltuvalt ehitisest ümbritsesid seda nii seest kui väljast puitkarkassid, plaadi- või krohvikihid. Nende kihtide olemasolu on kriitilise tähtsusega seina lõppomadustes, aga nende panus soojusläbivuse arvulisse väärtusse on põhupakiga võrreldes väike, lisaks sellele on need ka põhijoontes seintel sarnased. Seega võib nad võrdluse jaoks arvestamata jätta.

3.3 Hübridsein

Suuremate passiivmaja projektide puhul on juba sertifitseeritud põhkpaneelide kasutamine loogiline, kuid see pole transpordi ja püstituse hinna tõttu ökonoomne maapiirkondades, kus passiivmaja tellija, ehitaja ja tulevane omanik võib olla sama isik. Just sellise olukorra jaoks on vaja välispiirde lahendust, mis oleks samaaegselt piisavalt suure soojustakistusega, õhutihe ja külmasillavaba. Kusjuures lahendus peaks olema selline, et need omadused oleksid isehitaja poolt kergesti saavutatavad ja säiliks terve ehitise kasutusaja jooksul.

Kui põhkpaneelide vastu räägib ökonoomsus, siis karkass-seina probleemiks jäävad külmasillad sõrestikprusside näol. Nebraska stiilis kandva seina puhul on probleemiks vahelagede, vaheseinte ja avatäidete kinnitamine. Sisemiseks õhutihedaks kihiks krohvikihi kasutamisel on risk, et krohv praguneb seina ebaühtlase vajumise, liitekohtades puitdetailide paisumise või ebaprofessionaalse paigalduse tõttu. Praod võimaldavad niiskuse infiltreerumise põhukihti, mis kompromiteerib selle soojustusomadusi ja säilimist. Kõigi eeltoodute puhul on ka probleemiks maja tehnovõrgustiku (juhtmed, torud) paigaldamine ilma õhutihedat kihti kahjustamata.

Need vead on lahendatavad, kui passiivmaja printsiipe silmas pidades kombineerida kolmest ehitusstiilist üks: hübriid-põhupakksein (edaspidi hübriidsein).



Joonis 6: Hübriidseina läbilõige (vasakult paremale: sisekarkass 100 mm, OSB 22 mm, põhupakk 450 mm, savikrohv 25 mm, väliskarkass 100 mm, laudvooder 25 mm)

Selleks püstitatakse plaatvundamendile esmalt tugev sisemine (puit)sõrestik, kaasa-arvatud sarikad või fermid. Sisesõrestiku välimisele küljele nii seintele kui katusele kinnitatakse õhutiheda kihina suunatud lameda laastuga plaadi (OSB) kiht. OSB-st moodustatakse ka soojustust läbivate avauste põsed. Kõik liitekohad teibitakse. See on tüüpiline lahendus olemasolevates passiivmajades kuid mitte põhumajades. Juba selles faasis on võimalik kontrollida rõhutestiga ehitise õhutihedust ning vead varakult parandada.

Seejärel laotakse põhupakid tihedalt OSB väliskülje vastu ning nende välimine külg krohvatakse tuuletõkkeks savikrohviga. Tööaja vähendamiseks ja krohvi nakkuvuse parandamiseks võib pakid vahetult enne seina asetamist kasta välisküljega savipiima sisse (väga vedel savikrohv). (5) Selles faasis kasutatakse ära põhupakkide kandvaid omadusi ja savikrohvi odavust, lokaalsust ning looduslikkust. Savikrohvi kiht toimib hingava tuuletõkkena – isegi kui põhupakid niiskuvad, laseb see neil kuivada. (30) Lubi- ja tsementkrohvid omavad võrreldes savikrohviga oluliselt väiksemat auruläbivust, mistõttu sobib põhupakkseinale külmas ja märjas kliimas kõige paremini savikrohv. (30) (31)

Välimiseks kihiks hübriidseinas ehitatakse ventileeritud puitkarkass, millele kinnitatakse voodrilauad või muu meelepärane viimistlusmaterjal. See kaitseb savikrohvitud põhkseina otsese vihma eest.

Soojustakistuse arvutused

Hübriidseina soojustakistus arvutatakse ISO 6946:2007 standardi järgi. Sisemise karkassi soojustakistuse võib jätta arvestamata, sest see ei ulatu üheski sõlmes soojustuse sisse. Välimine karkass on hästi ventileeritud ja selle soojustakistus loetakse standardi punkti 5.3.4 järgi 0-ks, kusjuures sel juhul kasutatakse välimise õhukihi soojustakistuse asemel vastavat sisemise

õhukihi soojustakistuse väärtust. Seega totaalsesse soojustakistusse panustavad 5 kihti: sisemine õhukiht, OSB, põhupakk, savikrohv, välimine õhukiht. Sisemise ja välimise õhukihi soojustakistused on tabuleeritud standardi punktis 5.2. (32) Käesolevate arvutuste jaoks vajalikud väärtused on esitatud järgnevas tabelis.

Kihi soojustakistus leitakse valemist: $R = d/\lambda$.

Summaarne soojustakistus avaldub: $R_T = \sum R_i$.

Edasiste arvutuste jaoks teisendame selle summaarseks soojusläbivuseks: $U_T = \frac{1}{R_T}$.

Tabel 3: Hübriidseina soojustakistuse arvutused

Kiht	Soojusjuhtivus λ [W/(mK)]	Paksus d [m]	Soojustakistus R [m ² K/W]
Sisemine õhukiht	-	-	0.13
OSB	0.130	0.022	0.17
Põhupakk	0.055	0.450	8.18
Savikrohv	0.100	0.025	0.25
Välimine õhukiht	-	-	0.13
U_T [W/(m ² K)]	0.113	R_T [m ² K/W]	8.86

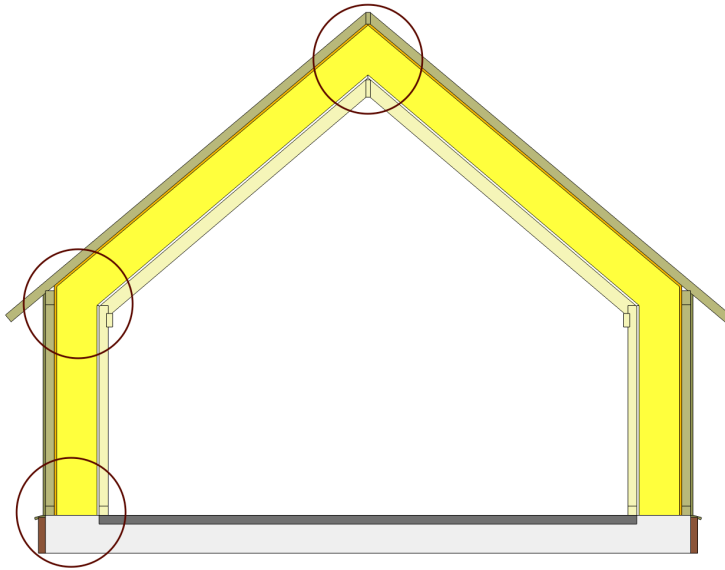
Külmasildade väärtuste arvutamiseks on vaja leida ka vundamendi soojusläbivus. Hübriidseinte vundamendiks võetakse selles töös polüstüreensoojustusega plaatvundament. Arvutus on teostatud järgnevas tabelis.

Tabel 4: Plaatvundamendi soojustakistuse arvutused

Kiht	Soojusjuhtivus λ [W/(mK)]	Paksus d [m]	Soojustakistus R [m ² K/W]
Sisemine õhukiht	-	-	0.17
Armeeritud betoonplaat	0.533	0.100	0.19
Polüstüreenplaat (EPS 200)	0.034	0.400	11.76
Välimine õhukiht	-	-	0
U_T [W/(m ² K)]	0.083	R_T [m ² K/W]	12.12

Külmasildade arvutused

Külmasildade arvestamine on kriitilise tähtsusega täpsusele pretendeerivas energiatõhususarvutuses. Sellega seotud standard ISO 10211:2007 kirjeldab külmasildade arvutusmetoodikat. (25) Standardis esitatakse ka testjuhtum, millega on võimalik valideerida erinevate simulatsiooniprogrammide võimekust arvutada standardidele vastavaid külmasilla väärtusi. Testjuhtumiga on valideeritud vabavaraline kahedimensionaalse soojusülekanne simulatsiooniprogramm THERM. (33) Seda programmi kasutatakse ka selles töös külmasildade väärtuste leidmisel.



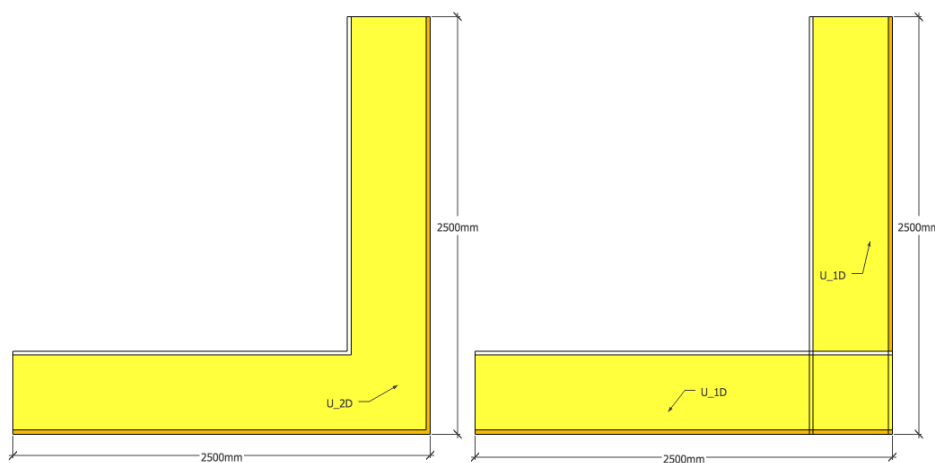
Joonis 7: Geomeetrised külmasillad hübriidseintega ehitises

THERMi sisendiks on kahedimensionaalne joonis sõlmest, kusjuures eri materjalid eristatakse piirjoontega. Materjali omadustest defineeritakse soojusjuhtivus. Analüüsiks märgitakse joonise piirjoontele ääritingimused. Sisepiirile märgitakse sisetemperatuur 20 kraadi Celsiust, sisemise õhukihi soojustakistus; välispiirile temperatuur 0 kraadi, välimise õhukihi soojustakistus. THERM väljastab modelleeritud kahedimensionaalse sõlme soojuslähivuse U_{2D} ja arvutuse suhtelise vea. Sellest saadakse külmasilla soojuslähivus ψ [W/(mK)] järgmise valemiga:

$$\psi = \frac{U_{2D} \cdot L_{2D} \cdot \Delta T - \sum (U_{1D} \cdot L_{1D} \cdot \Delta T)}{\Delta T}$$

Antud juhul oli ΔT kõigi simulatsioonide jaoks konstantne (20 kraadi) ja võrrand lihtsustus:

$$\psi = U_{2D} \cdot L_{2D} - \sum (U_{1D} \cdot L_{1D})$$



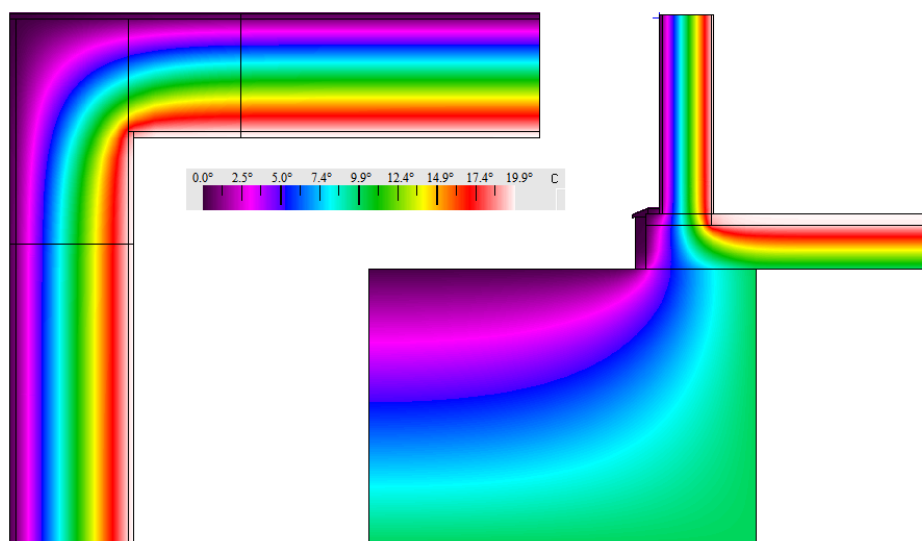
Joonis 8: Külmasilla arvutuskeem välismõõtude järgi ($L_{2D} = 5\text{m}$, $L_{1D} = 2.5\text{m}$)

Käesoleva töö jaoks modelleeriti THERMis kaks tähtsat sõlme: seinte välisnurk ja vundamendi-seina ühendus. Seina-katuse sõlm ja katusehari on geomeetriselt välisnurgaga praktiliselt identsed, neid eraldi ei modelleeritud. Tüüpilises seinalahenduses peaks uurima ka vaheseinte ja vahelagede sõlmi välisseintega, kuid hübriidseina puhul kinnituvad need sisemise karkassi külge ja soojustust ei mõjuta. Samuti polnud vaja modelleerida terrasside ja rõdude sõlmi välisseinaga, sest need kinnituvad soojustust mõjutamata väliskarkassi külge.

Tabel 5: Külmasildade arvutused hübriidseinas

Sõlme nimetus	U_{2D} [W/(m ² K)]	L_{2D} [m]	RE (%)	U_1 [W/(m ² K)]	L_1 [m]	U_2 [W/(m ² K)]	L_2 [m]	ψ [W/(mK)]
Välisnurk	0.094	4.250	2.97	0.113	2.125	0.113	2.125	-0.081
Vundament	0.081	4.900	4.10	0.113	2.300	0.082	2.600	-0.079

Hübriidseinas on välismõõtmete järgi arvatud geomeetriseliste külmasildade väärtused negatiivsed, mis seega vähendavad kütteenergia kulu. See on taotluslik: hübriidsein on planeeritud täies paksuses katkestamata põhupakksoojustusega, mis on selle tugev eelis konkureerivate seinatüüpide ees.



Joonis 9: Hübriidseina sõlmede arvutuslikud termopildid (THERM)

3.4 Hübriidseintega väikeelamu primaarenergia arvutused

Olemasolevad põhupakk-passiivmajad (peatükk 3.2) paiknevad Kesk- ja Lõuna-Euroopa kliimas. (29) Et hinnata põhupakkseinte sobivust passiivmaja välispiirdeks Eesti kliimas, on mõistlik kasutada spetsiaalselt energiatõhusate ehitiste planeerimiseks ja sertifitseerimiseks mõeldud passiivmajade planeerimispaketti (PHPP). Tegemist on mitmekümnelehelise Exceli arvutustabeliga, mis vajab sisendeid hoone geometriast, varjutatusest, välispiirete soojuslikest omadustest, avatäidetest, planeeritud kütte-, ventilatsiooni- ja elektrilahendusest, kliimast.

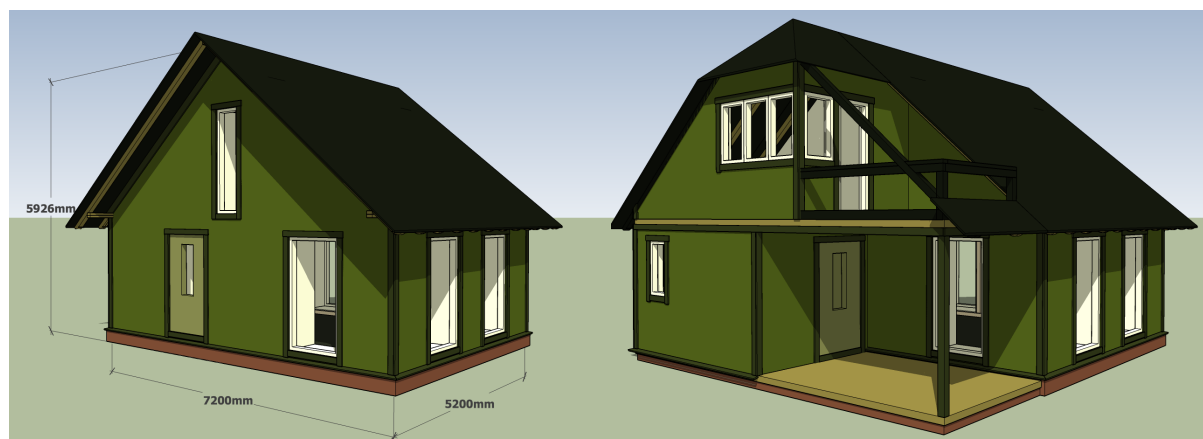
Väljundiks on primaarenergia vajadus kütteks [kWh/m²a] ja summaarne primaarenergia vajadus. On näidatud PHPP simulatsiooni tulemuste kokkulangevust nii dünaamiliste simulatsioonidega kui ka reaalseste mõõtmistulemustega. (34) (22) Kokkulangevus on parem elumajade kui kontorihoonete puhul.

Energiatõhususarvu (Eesti ametlik standard energiatõhususes) leidmiseks on defineeritud Eesti energiaarvutuste baasaasta. (19) (35) Samadest lähteandmetest on PHPP jaoks tuletatud Eesti kliimamudel, mida kasutatakse ka selles simulatsioonis. (36) Kliimaandmed on esitatud lisan A.

Eelmises peatükis kirjeldatud hübriid-põhupakkseinad täidavad passiivmajade katkematu soojustuse, õhutiheduse, külmasillavabaduse kriteeriumid. Seinasüsteem pole ehitustehnoloogiliselt keeruline, mis võimaldab energiatõhusa hoone välisümbriku püstitamise ka ise-ehitajale. Seetõttu viiakse simulatsioon läbi just hübriidseintega ehitisega.

Simuleeritava hoone kirjeldus

Ehitise tüübiks valitakse elamu, kuna selle puhul on simulatsioon täpsem. Ökonoomsem on ehitada väiksem kõiki vajadusi rahuldav hoone, seega on ka simuleeritud ehitise mõõtmed minimaalsed. Tegemist on 40 kraadise kaldega viilkatusega pooleteistkordse (harja kõrgus maapinnast ligikaudu 6 m) ühepereelamuga, mille põhja pindala on 5.2 * 7.2 m. Alumisel korrusel on köök-elutuba, tualett ja duširuum, katusekorrusel magamistuba. Kasutatav sisepindala on 42.8 m², hooneümbriku suletud ruumala on 128.6 m³.



Joonis 10: Hübriidseintega väikeelamu perspektiivvaade edelast peamiste mõõtmetega (vasakul ehitise põhiümbrik, paremal koos mittepassiivse esiku ja verandaga)

Seinasüsteemi kirjeldavad soojuslähivuse väärtused U_T ja ψ_{geom} saadakse eelmisest peatükist. Hoone lõunaküljele on planeeritud suur aknapind (8.2 m²). Samuti on aknapinnad läände (3.1 m²) ja itta (3.1 m²), põhjaseinas aknaid ei ole. Uks (2 m²) asub lääneseinas. Räästa pikkus (horisontaalne ulatus: 1 m) on valitud nii, et tubadesse paistaks talvine päike, kuid mitte kesksuve päike. Kuna PHPP arvutab primaarenergia vajadused pärast iga muudatust, oli hoone

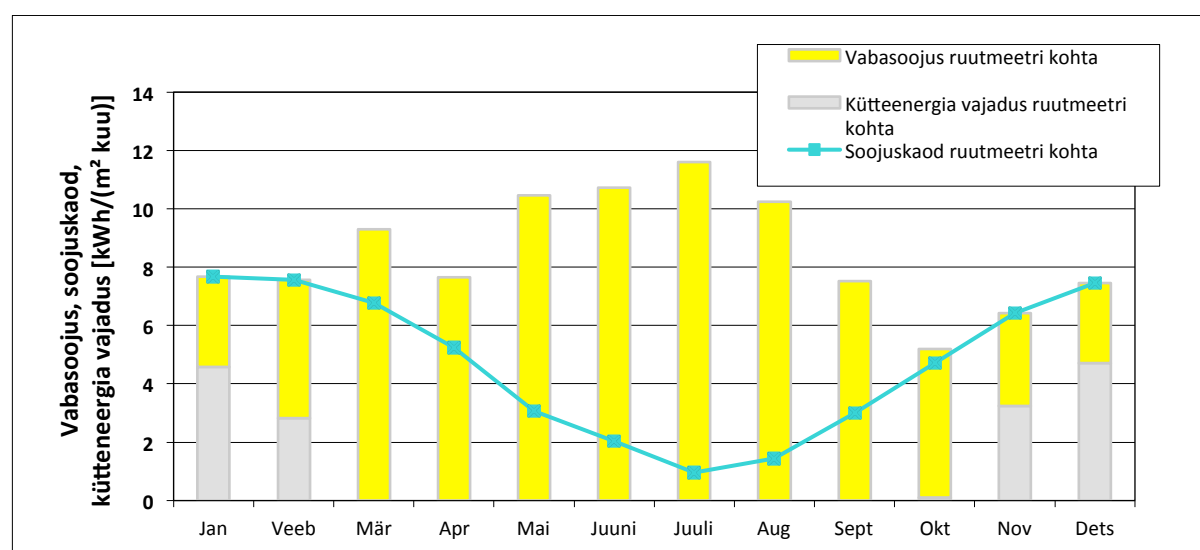
geomeetria võimalik optimeerida väikeste muutuste abil. Ventilatsioonisüsteemiks valitakse 95% soojustagastusega Ventive S+. (37) Soe tarbevesi saadakse ligikaudu 80% ulatuses (PHPP töölehe “Solar Domestic Hot Water” arvutustulemus) päikesekollektoritelt hoone katusel. Ülejäänud sooja vee vajadus täidetakse ahiküttega. Sellega kaetakse ka küttevajadus talvekuudel.

Kuupõhise primaarenergiavajaduse arvutuse tulemused

Üleval toodud andmed sisestati PHPP-sse (PHPP2007 versioon 1.1). Kus oli vaja veel sisend-detaile, kui üleval on antud, kasutati väärtusi erinevate planeeritud süsteemide dokumentatsioonidest või standardväärtusi paketi töölehtedelt. Kõikide PHPP sisendite ja väljundite täielik kirjeldamine ületaks käesoleva töö mahu ja pole püstitatud eesmärgi täitmiseks vajalik.

Simulatsiooni tulemusel passiivmajade kütte primaarenergia kriteerium $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ õnnestus täita, kui valiti avatäited (aknad, ukSED) parimad võimalikest. See on külmas kliimas tüüpiline, sest akende soojusläbivus on 5...10 korda halvem kui ümbritseval seinal. (34)

Kuupõhine passiivmaja arvutusmeetod andis kütteeenergia vajaduseks $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Järgneval joonisel on näidatud selle kujunemine kuude lõikes. On näha, et valitud geomeetria puhul on kütteperiood novembrist kuni veebruarini. See on väga hea tulemus, võrreldes analoogsete PHPP-ga teostatud simulatsioonidega, kus nelja kuune kütteperiood oli vaid disainilt ja kvaliteedilt parimal hoonel. Teistel analüüsitud hoonetel (milleks olid tüüpilised Tartu Tähtvere, Tammelinna ja suburbia hoonegeomeetriad) oli kütteperiood 6...11 kuud. (38) Täpsemad simulatsioonitulemused on esitatud lisa B.



Joonis 11: Hübriidseintega väikeelamu kuupõhine energiabilanss (PHPP2007)

4 Kokkuvõte

Arvestades, et 40% Euroopas Liidu energiatarbest moodustavad ehitised ja et energiahinnad on pidevalt tõusnud, on huvi energiatõhusate ehituslahenduste vastu igati õigustatud. Energiatõhususe iseloomustamiseks ja võrreldavuse tagamiseks on võimalik teostada energiatõhususarvutused riikliku meetodikaga või passiivmaja standardi järgi. Viimane on rahvusvaheline, rangemate kriteeriumitega ja võimaldab kasutada spetsiaalselt energiatõhusate hoonete planeerimiseks välja töötatud tarkvarapaketti (PHPP), mille tulemuste ühtivus reaalseste mõõtmistega on tõestatud.

Energiatõhusad hooned põhinevad suure soojustakistusega õhutihedal külmasildadeta välisümbrikul, mis peab vähendama soojuskadusid sel määral, et suurem osa konstantse sisetemperatuuri hoidmiseks vajalikust energiast oleks võimalik saada päikesekiirgusest. Passiivmaja standardile vastavas hoones kulub kütteks 10 korda vähem energiat ($\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) kui praeguses Euroopa Liidu keskmises hoones.

Kõrge soojustakistuse saavutamiseks peab suurendama soojustuskihi paksust või kasutama väiksema soojusjuhtivusega materjale. Viimased on tänapäeval tihtipeale kõrgelt töödeldud keemiatööstuse saadused (näiteks polüstüreenid, polüuretaanid, klaas- ja kivivillad), mille tootmise mõju keskkonnale vähendab energiatõhususe tõstmise kasu keskkonnale.

Alternatiivina on taasavastatud teraviljakasvatuse jääkprodukti – põhu – kasutused ehitusmaterjalina risttahukakujuliste põhupakkidena. Uuriti põhupakkehitusega seotud kirjandust, et kirjeldada erinevaid võimalikke põhkseinasüsteeme. Need jagunevad kolmeks: kandvad põhkseinas, karkass-põhkseinas ja põhkpaneelid. Passiivmajade veebiandmebaasist leiti, et Kesk- ja Lõuna-Euroopas on ehitatud passiivmaju kõigi kolme seinasüsteemiga.

Pidades silmas passiivmajade rangeid standardeid, pakuti välja spetsiaalselt põhupakk-passiivmajade ehituseks uus seinasüsteem. Hübriid-põhupakkseinas ühendati elemente olemasolevatest põhkseinasüsteemist, likvideerimaks nende puudused. Leiti hübriidseina soojusläbivus $U_T = 0.113 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. THERM tarkvara abil arvutati sõlmede külmasildade väärtused $\psi_{geom} = -0.081 \text{ W}/(\text{mK})$. Viimane näitab süsteemi külmasillavabadust.

Neid väärtusi kasutati hübriidseintega väikeelamu energiatõhususe simulatsioonis (Eesti kliimaandmetega) PHPP tarkvaras. Saavutati vastavus passiivmajade kriteeriumidele, kui kasutada elamus parimaid olemasolevaid avatäiteid (aknad, ukсед), mis on tüüpiline tingimus külmas kliimas. Sellega tõestati hübriid-põhkseinte sobivus passiivmaja välisümbrikusse ja et põhul on koht tuleviku energiatõhusas ehitustööstuses.

Kasutatud kirjandus

1. Kalberg S. Põhumaja säästab kütet ja on samal ajal mõnusa sisekliimaga. Eesti Päevaleht. 2013. URL: <http://epl.delfi.ee/news/melu/pohumaja-saastab-kutet-ja-on-samal-ajal-monusa-sisekliimaga?id=66582347> [31.05.2016].
2. World Habitat Awards Finalists: Straw-bale Housing in the Sieben Linden Ecovillage. 2007. URL: <http://www.worldhabitatawards.org/winners-and-finalists/project-details.cfm?lang=00&theProjectID=740B4CEF-15C5-F4C0-99FC9EA83F00FB5C> [31.05.2016].
3. University of Nevada, Reno. Straw Bale House Survives Violent Shaking At Earthquake Lab. 2009. URL: www.sciencedaily.com/releases/2009/04/090403104229.htm [31.05.2016].
4. Earthquake Engineering Research Institute. World Housing Encyclopedia. 2007. URL: <http://www.world-housing.net/major-construction-types/adobe-introduction> [31.05.2016].
5. Murray H. Practical Straw Bale Building. Collingwood: Landlinks Press; 2005.
6. Henry M. The Original Nebraska Straw Bale Buildings. 2012. URL: <http://thesustainablehome.net/?p=173> [31.05.2016].
7. Tõlp S. Eesti maaeluentsüklopeedia. Tallinn: Eesti Entsüklopeediakirjastus; 2008.
8. Khan TS, Mubeen U. Wheat straw: A pragmatic overview. Current Research Journal of Biological Sciences. 2012; 4(6): p. 673-675.
9. Khatib J. Sustainability of construction materials. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2009.
10. Magwood C, Mack P, Therrien T. More Straw Bale Building. Vancouver: New Society Publishers; 2005.
11. Hammer M. Straw Bale Residential Building Code. 2015. URL: http://www.strawbale.com/wp-content/uploads/IRC_StrawbaleConstructionAppendix_Approved_10.4.13r2.pdf [31.05.2016].
12. Downton P. Your Home: Australia's guide to environmentally sustainable homes, 5th edition. 2013. URL: [http://www.yourhome.gov.au/sites/prod.yourhome.gov.au/files/pdf/YOURHOME-3-Materials-13-StrawBale-\(4Dec13\).pdf](http://www.yourhome.gov.au/sites/prod.yourhome.gov.au/files/pdf/YOURHOME-3-Materials-13-StrawBale-(4Dec13).pdf) [31.05.2016].
13. Ashour T, Wieland H, Heinz G, Bockisch FJ, Wu W. The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. Materials & Design. 2010 December; 31(10).
14. Ecocon, Ltd. Ecocon Panel Declaration of Performance. 2014. URL: <http://www.ecococon.lt/english/official-documents-certificates/declaration-of-performance/> [31.05.2016].
15. Agriboard Industries. Agriboard Structural Straw Panel Properties. URL: http://www.agriboard.com/panels_from_agriboard.htm [31.05.2016].
16. ModCell. ModCell Structural Panel Technical Data. URL: <http://www.modcell.com/technical/>.
17. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency. URL: <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj> [31.05.2016].
18. European Union ODYSSEUS-MURE project. Review of energy efficiency trends and policies in the Household and Tertiary Sectors in the EU. 2015. URL: <http://www.odyssee-mure.eu/publications/br/energy-efficiency-trends-policies-buildings.pdf> [31.05.2016].
19. Riigi Teataja. Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika. 2012. URL: <https://www.riigiteataja.ee/akt/118102012001> [31.05.2016].
20. Riigi Teataja. Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. 2015. URL:

- <https://www.riigiteataja.ee/akt/105062015015> [31.05.2016].
21. Passive House Institute. Passive House building criteria. 2015. URL:
http://passiv.de/downloads/03_building_criteria_en.pdf [31.05.2016].
 22. Passive House Institute. Energy efficiency of the Passive House Standard. 2015. URL:
http://www.passipedia.org/operation/operation_and_experience/measurement_results/energy_use_measurement_results [31.05.2016].
 23. Zeller TJ. Can We Build in a Brighter Shade of Green? The New York Times. 2010 Sep 26: p. BU1.
 24. Passive House Database. 2014. URL:
<http://www.passivhausprojekte.de/index.php#information> [31.05.2016].
 25. ISO 10211:2007. Thermal bridges in building construction. 2007.
 26. Commins T, Stone N. Tested R-value for straw bale walls and performance modeling for straw bale homes. Sacramento: California Energy Commission; 1998.
 27. Passive House Institute. Thermal insulation. 2015. URL:
http://www.passipedia.org/planning/thermal_protection/integrated_thermal_protection [31.05.2016].
 28. Passive House Database. Larixhaus: pre-fabricated straw bale passive house. 2013. URL:
http://www.passivhausprojekte.de/index.php?lang=en#d_3874 [31.05.2016].
 29. Passive House Database otsing: põhupakk (saksa keeles). 2016. URL:
http://www.passivhausprojekte.de/index.php?lang=de#k_strohballen [31.05.2016].
 30. Wihan J. Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London, School of Computing and Technology; 2007.
 31. Straube J. Moisture properties of plaster and stucco for strawbale buildings. Ottawa: Canada Mortgage and Housing Corporation; 2000.
 32. ISO 6946:2007. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. 2007.
 33. Passiefhuise-Platform vzw. Therm validation according to EN ISO 10211:2007. 2011. URL:
http://www.bouwdetails.be/THERM_Validatie/Therm6.3_10211_Validation.pdf [31.05.2016].
 34. Hallik J. Passive house design tools and calculation methods. PHPP overview and examples. 2011. URL:
http://www.activethroughpassive.eu/userfiles/files/Valga_jaanus_handouts_ENG.pdf [31.05.2016].
 35. Kalamees T, Kurnitski J. Estonian test reference year for energy calculations. 2006. URL:
http://www.kirj.ee/public/va_te/eng-2006-1-4.pdf [31.05.2016].
 36. Mauring T, Hallik J, Siiner A, Valge M. Passiivmajatehnoloogia. Kvaliteedi tagamine kõrge energiatõhususega hoone ehitamisel. Aruanne. Euroopa Liit, Intelligent Energy Europe; 2009.
 37. Ventive Ltd. Ventive S+ Passive Ventilation with Heat Recovery. URL: <http://www.ventive.co.uk/wp-content/uploads/Ventive-S-Datasheet-v1.3.pdf> [31.05.2016].
 38. Kull TM. Päikeseenergia passiivse kasutamise potentsiaal erineva geomeetria ja komponentidega hoonetel Eesti kliimas. Tartu: Tartu Ülikool, Tehnoloogiainstituut; 2013.

Lisa A: Eesti energiaarvutuste baasaasta (PHPP sisendina)

Kuu	Jaan	Veeb	Mär	Apr	Mai	Juun	Juul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dets
Välisõhu temp. [°C]	-3.0	-5.2	-0.2	4.0	11.2	14.1	17.3	15.7	10.9	5.8	-0.1	-2.5
Päikeskiirgus												
[kWh/(m ² kuus)]												
...põhjaseinal	9	20	35	37	59	71	70	49	31	15	7	4
...idaseinal	11	25	58	58	96	104	111	84	51	24	10	6
...lõunaseinal	19	41	95	71	98	99	109	99	72	45	22	16
...lääneseinal	11	27	61	55	89	98	105	82	49	24	10	6
...horisontaalpinnal	12	29	74	88	152	167	175	131	75	35	13	7
Kastepunkti temp. [°C]	-4.5	-6.7	-3.9	0.3	5.8	9.3	13.3	12.4	7.9	3.7	-1.4	-4.5

Lisa B: PHPP primaarenergia arvutused (kuupõhise meetodi tööleht)

Passive House Planning MONTHLY METHOD

(This page displays the sums of the monthly method over the heating period)

Climate:	Estonian test reference year	Interior Temperature:	20 °C
Building:	Straw bale passive house	Building Type/Use:	Single family house
Location:	Haapsalu	Treated Floor Area A _{TFA} :	42.8 m ²
Spec. Capacity:	132 Wh/(m ² K) (Enter in "Summer" worksheet.)		

Building Element	Temperature Zone	Area m ²	U-Value W/(m ² K)	Month. Red. Fac.	G _i kWh/a	per m ² Treated Floor Area kWh/(m ² a)
1. Exterior Wall - Ambient	A	110.8	0.113	1.00	93	1164
2. Exterior Wall - Ground	B			1.00		
3. Roof/Ceiling - Ambient	A	37.4	0.082	1.00	93	286
4. Floor Slab	B			1.00		
5.	A			1.00		
6.	A			1.00		
7.	X			0.75		
8. Windows	A	14.4	0.456	1.00	93	610
9. Exterior Door	A	2.0	0.400	1.00	93	76
10. Exterior TB (length/m)	A	69.6	-0.074	1.00	93	-479
11. Perimeter TB (length/m)	P			1.00		
12. Ground TB (length/m)	B			1.00		
					Total	1657
						38.7

Déperditions conductives Q_T

Effective Air Volume V _{RAK} m ³	A _{TFA} m ²	Clear Room Height m	
43	43	2.00	86

Effective Air Change Rate Ambient n _{RA} 1/h	η _{SHX}	η _{HR}	n _{RA,rate} 1/h	n _{RA,eff} 1/h
0.898	93%	0.94	0.010	0.014
Effective Air Change Rate Ground n _{RA,g}	93%	0.94		0.053

V _{RAK} m ³	n _{RA,eff} 1/h	C _{air} Wh/(m ² K)	G _i kWh/a	kWh/(m ² a)
86	0.014	0.33	93	0.8
Ventilation Losses Ambient Q _V				
86	0.053	0.33	32	1.1
Ventilation Losses Ground Q _{V,g}				
				Total
				83
				1.9

Ventilation Heat Losses Q_V

Total Heat Losses Q _L kWh/a	Q _T kWh/a	Q _V kWh/a	Reduction Factor Night/Weekend Saving	kWh/a	kWh/(m ² a)
1741	1657	83	1.0	1741	40.6

Orientation of the Area	Reduction Factor See Windows worksheet	g-Value (perp. radiation)	Area m ²	Global Radiation kWh/(m ² a)	kWh/a
1. North	0.40	0.00	0.0	90	0
2. East	0.39	0.53	3.1	134	86
3. South	0.62	0.53	8.2	238	639
4. West	0.39	0.53	3.1	139	89
5. Horizontal	0.40	0.00	0.0	170	0
6. Sum Opaque Areas					0
					Total
					813
					19.0

Available Solar Heat Gains Q_S

Internal Heat Gains Q _I kWh/a	Length Heat. Period dia	Spec. Power q W/m ²	A _{TFA} m ²	kWh/a	kWh/(m ² a)
393	0.024	182	42.8	393	9.2

Free Heat Q _F kWh/a	Q _S + Q _I kWh/a	kWh/(m ² a)
1206	1206	28.2

Ratio Free Heat to Losses Q _F / Q _L	0.69
---	------

Utilisation Factor Heat Gains η _G	89%
--	-----

Heat Gains Q _G kWh/a	η _G * Q _F kWh/a	kWh/(m ² a)
1078	1078	25.2

Annual Heat Demand Q _H kWh/a	Q _L - Q _G kWh/a	kWh/(m ² a)
663	663	15

Limiting Value kWh/(m ² a)	15
---------------------------------------	----

Requirement met?	Yes
------------------	-----

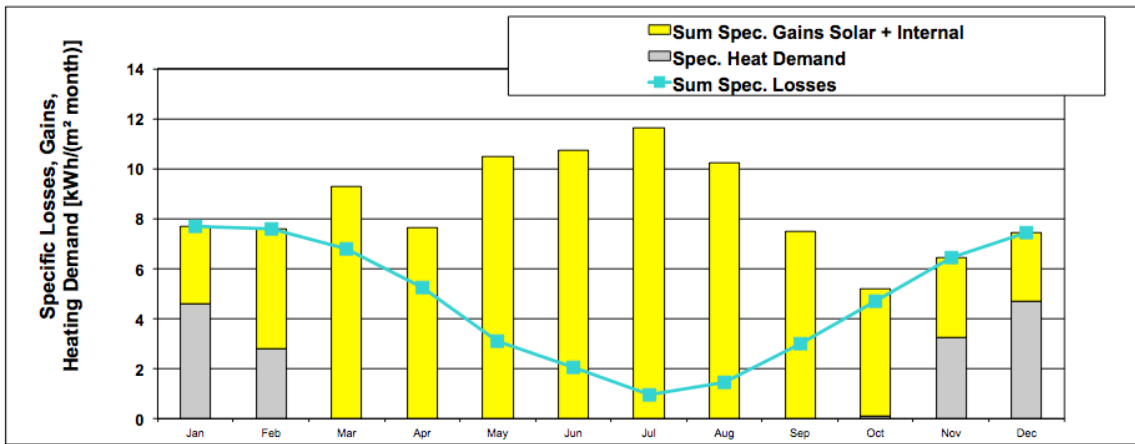
Passive House Planning

MONTHLY METHOD

Climate: Estonian test reference year
 Building: Straw bale passive house
 Location: Haapsalu

Interior Temperature: 20 °C
 Building Type/Use: Single family house
 Treated Floor Area A_{TFA}: 43 m²

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year	
Heating Degree Hours - Ext	17.4	17.2	15.3	11.8	6.9	4.6	2.3	3.5	6.9	10.9	14.8	17.1	129	kKh
Heating Degree Hours - Gro	6.8	6.6	6.9	5.6	4.2	2.5	-1.0	-1.5	1.0	2.2	3.7	5.5	42	kKh
Losses - Exterior	318	315	280	216	125	83	43	64	127	199	270	312	2351	kWh
Losses - Ground	10	10	10	8	6	4	-1	-2	2	3	5	8	63	kWh
Sum Spec. Losses	7.7	7.6	6.8	5.2	3.1	2.0	1.0	1.4	3.0	4.7	6.4	7.5	56.4	kWh/m ²
Solar Gains - North	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Solar Gains - East	7	16	37	37	61	66	71	54	33	15	6	4	407	kWh
Solar Gains - South	51	110	255	191	263	266	293	266	193	121	59	43	2109	kWh
Solar Gains - West	7	17	39	35	57	63	67	52	31	15	6	4	394	kWh
Solar Gains - Horiz.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Solar Gains - Opaque	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Internal Heat Gains	67	60	67	65	67	65	67	67	65	67	65	67	788	kWh
Sum Spec. Gains Solar + In	3.1	4.8	9.3	7.6	10.5	10.7	11.6	10.2	7.5	5.1	3.2	2.7	86.3	kWh/m ²
Utilisation Factor	100%	100%	73%	69%	29%	19%	8%	14%	40%	90%	100%	100%	47%	
Annual Heat Demand	196	121	0	0	0	0	0	0	0	4	139	202	663	kWh
Spec. Heat Demand	4.6	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3.2	4.7	15.5	kWh/m ²



Annual Heat Demand: Comparison

EN 13790 Monthly Method

PHPP, Heating Period Method

663 kWh/a

15.5 kWh/(m²a)

637 kWh/a

14.9 kWh/(m²a)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, *Artur Pata*,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

PÕHUPAKKSEINTE SOBIVUS PASSIIVMAJA VÄLISPIIRETEKS EESTI KLIIMAS,

mille juhendaja on *Siim Hödemann*

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartu, *31.05.2016*