

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja Maateaduste instituut
Geograafia osakond

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal

Akna soojuskadude vähendamine kõrge energiatõhususega hoones

Kristo Kalbe

Juhendaja: PhD Tõnu Muring

Tartu 2013

Sisukord

1. Sissejuhatus	4
2. Teoreetiline osa	5
2.1. Hoone kütteenergiavajaduse kujunemine	5
2.1.1. Hoone soojuskaod	5
2.1.2. Hoone vabasoojus.....	6
2.1.3. Hoone kütteenergiavajadus.....	7
3. Metoodika.....	9
3.1. Hoone energiabilansi arvutamine rakendustarkvaraga PHPP 2007.....	9
3.2. Kahemõõtmeline soojusvoogude simulatsioon rakendustarkvaraga THERM 6.3	10
3.3. Hoone kütmisel atmosfääri paisatava süsihappegaasi heite arvutamine.....	10
3.4. Infrapuna termograafia mõõdistus	11
4. Akende potentsiaal hoone energiakadude vähendamisel	12
4.1. Akende roll energiatõhusas hoones	12
4.2. Aknad – võti energiavajaduse vähendamiseks	13
4.3. Ülevaade energiatõhusate hoonete energiabilansist Eestis – akende osakaal.....	15
4.3.1. Hooned	15
4.3.2. Hoonete soojusbilansid.....	18
4.4. Arutelu	21
5. Akende tõhustamise meetodid	22
5.1. Üha madalama soojusjuhtivusega klaaspakettide kasutuselevõtt	22
5.1.1. Klaaspaketi areng ja hetkeseis	22
5.1.2. Klaaspaketi soojusjuhtivuse vähendamise võimalused	24
5.2. Üha madalama soojusjuhtivusega aknaraamide kasutuselevõtt	25
5.2.1. Aknaraamide hetkeseis	25
5.2.2. Aknaraamide arengusuunad	27
5.2.3. Aknaraami olulisus sisekliima seisukohalt.....	28
5.3. Akna optimaalne paigutus välisseinas	31
5.4. Soojustatud liikuva varjutusmehhanismi kasutamine akende ees	33
6. Akende soojuskadude vähendamine Põlva eksperimentaalhoone näitel	35
6.1. Põlva eksperimentaalhoone	35
6.2. Väikese soojusjuhtivusega kitsa aknaraami kasutamine.....	38
6.2.1. Väikese soojusjuhtivusega kitsas aknaraam	38

6.2.2.	Väikese soojusjuhtivusega kitsa aknaraami võrdlus alternatiivsete toodetega ..	41
6.2.3.	Erinevate aknaraamide võrdluse tulemused ja arutelu	42
6.3.	Aknapaigalduse optimeerimine	43
6.3.1.	Erinevate paigaldussituatsioonide võrdlus	45
6.3.2.	Erinevate paigaldussituatsioonide võrdluse tulemused ja arutelu	45
6.3.3.	Valitud lahenduste kontroll infrapuna termograafia meetodil.....	51
6.4.	Soojustatud varjutusmehhanismi kasutamine	52
6.4.1.	Sobiva lahenduse leidmine	52
6.4.2.	Soojustatud varjutusmehhanismi mõju erineva tõhususega akende puhul	56
6.4.3.	Soojustatud varjutusmehhanismi mõju hoone kütteenergiavajadusele ja CO2 emissioonile.....	58
7.	Arutelu.....	60
8.	Kokkuvõte	63
9.	Summary	64
10.	Kasutatud allikate loetelu	65

1. Sissejuhatus

Hoone kütteenergiavajaduse vähendamine on keskkonnasäästu seisukohalt oluline, kuid väga energiatõhusate hoonete levik on olnud võrdlemisi aeglane, eriti Põhja- ja Ida-Euroopas. Nimelt, mai 2013 seisuga oli Rootsis neli, Norras, Eestis ja Leedus vaid üks sertifitseeritud passiivmaja ning Lätis ja Soomes ei olnud selleks ajaks ükski hoone vastavaid nõudeid [1] täitnud [2].

Energiatõhusate hoonete levikul on määravaks aspektiks hoone asukoha kliima. Külmemas kliimas on hoone keskkonnamõju vähendamiseks vajalik kasutada tõhusamaid meetmeid, mistõttu väheneb sobilike komponentide valik ja see võib seada piirid arhitektide loovusele ja hoone orientatsioonile ehk potentsiaalsele maakrundile. Seega on vaja leida lihtsad meetmed kuidas vähendada täiendavalt hoone kütteenergiavajadust nii, et ka keerulisema arhitektuuri ja ebasoosiva hoone asukoha korral oleks selle keskkonnamõju väiksem ja seega suureneks energiatõhusate hoonete hulk, tänu millele väheneks üldine elamufondi keskkonnamõju.

Hoone energiavajaduse vähendamisel on otstarbekas tegeleda selliste hoone komponentidega, millest lähtub suurim energiakadu. Senise kogemuse põhjal usub töö autor, et nendeks on hoone aknad. Sellest tulenevalt on töö eesmärgiks leida optimaalsed meetodid akende soojuskadude vähendamiseks energiatõhusates hoonetes, eeldusel, et soojuskadu akendest on tõepoolest suurim. Kontrollimaks töö autori arvamust on eelnevalt teostatud ka varasemate uuringute ja Eestisse projekteeritud energiatõhusate hoonete energiabilansside ülevaade.

Käesoleva töö autor arvab, et võimalikud meetodid akende soojusjuhtivuse vähendamiseks on: väikesema soojusjuhtivusega toodete kasutamine, aknapaigalduse optimeerimine ja soojustatud varjutusmehhanismi kasutamine, kusjuures viimane võib olla kõige efektiivsem lahendus, kuigi näiteid sarnase süsteemi kasutamisest leidub vähe. Sellest tulenevalt oli üheks töö osaks ka sobiva varjutusmehhanismi kontseptsiooni välja töötamine.

2013. aasta kevadel valmis Põlvas eksperimentaalhoone [4,5], mille kasutamisest tulenevat keskkonnamõju on üritatud vähendada võimalikult palju. Selle hoone projekteerimis- ja ehitusprotsessi nõustamise käigus teostas käesoleva töö autor ka ülalnimetatud akende soojuskadude vähendamise meetodite tõhususe analüüsi ja hindas sellest tulenevat süsihappegaasi heite ehk negatiivse keskkonnamõju vähenemise potentsiaali.

2. Teoreetiline osa

2.1. Hoone kütteenergiavajaduse kujunemine

2.1.1. Hoone soojuskaod

Geograafilise asukoha tõttu valitseb Eestis suurema osa aastast [6] olukord, kus inimesele meeldiva [7] ja nõuetele vastava [1,8] hoone sisekeskkonna ning väliskeskkonna vahel esineb märkimisväärne erinevus. Peamiselt väljendub erinevus temperatuuride ning õhurõhu vahes. Selle erinevuse tõttu toimub energia liikumine soojemalt kehalt (keskkonnast) külmemale kehale (keskkonda) nii konduktsiooni kui konvektsiooni tõttu.

Hoone soojuskadudest rääkimisel eristatakse kahte põhilist liiki: transmissioonikaod (lähtuvad hoone välispiiretest: välisseintest, katusest, põrandast ning akendest) ja soojuskaod ventilatsiooni tõttu. Esimese puhul on valdav füüsikaline protsess konduktsioon ning teisel juhul konvektsioon.

Konduktsioon on molekulaarfüüsikaline protsess, kus omavahel pörkuvad molekulid annavad üle nii liikumishulga kui energia. Kehade temperatuur vastab nende molekulide liikumiskiirusele ning seega kandub pörgetel kõrgema temperatuuriga kiiremini liikuvatelt molekulidelt soojus üle madalama temperatuuriga aeglasemalt liikuvatele molekulidele. See nähtus esineb alati, kui on temperatuuride erinevus. Seega toimub hoone välispiiretes konduktsioon nii pea, kui sise- ja väliskeskkonna vahel on temperatuurierinevus. Igas ajaühikus läbib piirde üht pinnaühikut soojushulk, mis on võrdeline temperatuuride vahega piirde sise- ja välispinnal ning pöördvõrdeline piirde paksusega. Seosesse lisandub võrdetegurina piirde soojusjuhtivus [U-arv, $W/(m^2K)$], mis vastab soojusülekanne kiirusele (vatt, W), mis läbib ühe ruutmeetri suurust piiret, kui soojusülekanne suunaga risti olevate pindade temperatuuride vahe on 1 kelvin.

Konvektsiooni puhul kandub soojus edasi aine liikumisega ruumis ehk hoonete puhul sooja või külma õhumassi liikumisega. Sise- ja väliskeskkonna rõhuerinevuse tõttu võib õhk läbi välispiiretes asuvate pragude ja muude õhulekkekohtade liikuda mõlemas suunas ehk soe õhk välja või külm õhk sisse. Õhu liikumine läbi välispiirde on seotud energiakadudega kolmel moel [9]. Esiteks on läbi õhulekete ruumi sisenev õhk külm, see jahutab pindu ning seda on vaja soojendada. Teiseks väheneb ruumist lahkuva õhu tõttu juba soojendatud õhumassi hulk. Kolmandaks muutub õhulekete tõttu ka õhuniiskuse määr ehk toimub latentne soojusvahetus. Samalaadne soojuskadu toimub ka mehhaanilise ventilatsioonisüsteemi kasutamise korral, kus ruumi puhutakse külma välisõhku ning samas tõmmatakse sooja õhku välja. Täielikult ei

Inimeste, valgustite ja masinate eraldatav vabasoojus võetakse hoone energiabilansi koostamisel arvesse standardkasutuse alusel. Standardkasutuse kindlaksmääramisel võetakse arvesse hoone kasutamise otstarvet, välis- ja sisekliimat, hoone ja tehnosüsteemide kasutusaega, vabasoojust ning hoone õhupidavuse lähteandmeid. Eesti Vabariigi määruse kohaselt on väikeelamutes vabasoojuse määr 3,44 W/m² [8], kuid Darmstadt'i Passiivmaja Instituudi nõuete kohaselt peab energiaarvutustes kasutama vabasoojuse määranguks 2,1 W/m² [12].

Päikese vabaenergia hulk arvutatakse iga hoone energiabilansi koostamisel eraldi. Arvutustes lähtutakse alljärgnevast valemist:

$$Q_S = r \times g \times A \times G$$

Q_S = päikese vabaenergia [kWh/a]

r = vähendustegur

g = SHGC – päikeseenergia läbikandetegur

A = läbipaistva hooneelemendi pindala

G = päikese globaalne irradiatsioon

2.1.3. Hoone kütteenergiavajadus

Hoone kütteenergiavajadus tuleneb energiakaost läbi välispiirete, avatäidete ja õhuvahetuse (sh välispiirete õhulekete kaudu). Alati leidub hoones energiaallikaid ning läbipaistvate hooneelementide kaudu jõuab hoonesse päikese vabaenergia, kuid Euroopa kliimas pole see isegi väga energiatõhusate hoonete puhul piisav. Puudujäävat osa nimetatakse hoone neto kütteenergiavajaduseks, mis esitatakse valemiga:

$$Q_H = Q_T + Q_V - \eta \times (Q_S + Q_I)$$

Q_H = hoone kütteenergiavajadus

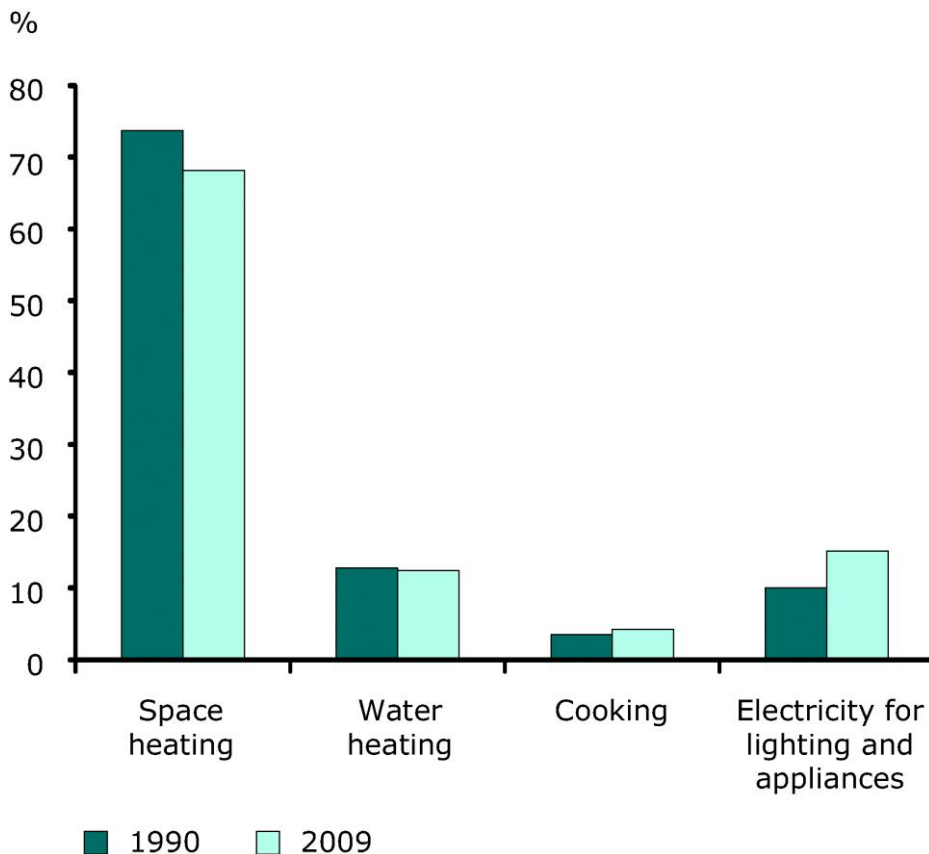
Q_I = inimestelt, elektriseadmetelt jms pärinev vabaenergia

η = vabaenergia utilisatsioonitegur

Hoone kütteenergiavajadus kaetakse küttekehade abil kasutades hoonest eemal toodetud energiat ja seega on hoone kütteenergiavajaduse katmine seotud primaarenergia kulutamisega, mis omakorda tähendab CO₂ emissiooni ning negatiivset keskkonnamõju.

On hästi dokumenteeritud fakt, et hoonete (sh kodumajapidamiste) energiakulu moodustab Euroopas kogu lõppenergia tarbimisest suurima osa [13,14]. Kodumajapidamiste osa koguenergia tarbimises on Euroopas 27% ja Eestis 35% [15]. Kogu hoonete kasutatavast lõppenergiast moodustab kodumajapidamiste osa umbes 2/3 [14].

Alloleval joonisel on toodud Euroopa Liidu 27 liikmesriigi andmete alusel koostatud energiatarve jaotumine kodumajapidamistes. Jooniselt on näha, et kuigi 1990. aasta tasemega võrreldes on ruumide kütmiseks kuluva energia osakaal kahanenud, hõlmab see siiski ligikaudu 70% kogu kodumajapidamistes tarvitatavast lõppenergiast.



Joonis 2.1. Kodumajapidamiste energiatarve Euroopa Liidu 27 liikmesriigi seas [16].

3. Metoodika

Alljärgnevalt on kirjeldatud käesoleva töö käigus kasutatud arvutuste metoodikat.

3.1. Hoone energiabilansi arvutamine rakendustarkvaraga PHPP 2007

Käesoleva töö peatükkides 4.3, 6.2, 6.3 ja 6.4 esitatud energiaarvutustes on kasutatud rakendustarkvara PHPP 2007, mis põhineb EVS-EN ISO 13790:2008 [17] standardis "Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling" kirjeldatud kuubilansi või kütteperioodi meetodil [18].

Arvutuste peamised lähteandmed on detailne info hoone kōetava pinna, välispiirete (mōōtmed ja soojustehnilised parameetrid), tehnosüsteemide, varjutustingimuste (naabermajad, puud jms), asukoha ja orientatsiooni kohta.

Käesoleva töö kõikides energiaarvutustes on kasutatud järgmisi üldiseid lähteandmeid (tabel 3.1).

Tabel 3.1 Hoone energiaarvutustes tehtud eeldused sisetemperatuuri ja vabaenergia kohta.

Hoone sisetemperatuur	20 °C	Vastavalt PHPP käsiraamatule [18]
Vabaenergia sisemistest allikatest	2,1 W/m ²	

Hoone energiakulu ja päikese vabaenergia hindamisel on aluseks võetud Darmstadt-i Passiivmaja Instituudi valideeritud Meteotest Meteonorm infol põhinev kiimaandmestik (tabel 3.2).

Tabel 3.2. Hoone energiaarvutustes kasutatud kliimaandmestik.

Kuu	Välisõhu temperatuur (° C)	Summaarne päikesekiirguse hulk pinnal (kWh/m ² *kuu)					Kastepunkti temperatuur (° C)
		Põhjasein	Idasein	Lõunasein	Läänesein	Horisontaal-pind	
jaan	-4,0	5,0	10,0	32,0	10,0	13,0	-5,9
veebr	-4,6	10,0	21,0	59,0	23,0	31,0	-7,2
märts	-1,2	19,0	51,0	98,0	51,0	74,0	-5,8
apr	6,4	32,0	69,0	95,0	72,0	107,0	-0,3
mai	11,1	51,0	103,0	103,0	94,0	155,0	3,8
juuni	15,6	58,0	112,0	101,0	101,0	169,0	9,5
juuli	18,8	55,0	104,0	102,0	97,0	161,0	13,3
aug	17,0	39,0	79,0	94,0	79,0	123,0	11,6
sept	11,8	24,0	49,0	75,0	50,0	73,0	7,5
okt	6,0	13,0	24,0	53,0	27,0	36,0	3,2
nov	0,7	5,0	9,0	25,0	10,0	13,0	-1,3
dets	-3,7	3,0	-17,8	19,0	6,0	7,0	-5,7

3.2. Kahemõõtmeline soojusvoogude simulatsioon rakendustarkvaraga THERM 6.3

Käesoleva töö peatükkides 5.2, 6.3 ja 6.4 on rakendustarkvara THERM 6.3 abil teostatud kahemõõtmelised soojusvoogude simulatsioonid vastavalt standarditele EVS-EN ISO 10211:2008 „Külmasillad hoones. Soojusvood ja pinnatemperatuurid. Üldised arvutusmeetodid.“ ja EVS-EN ISO 10077-2:2012 „Akende, uste ja luukide soojustehniline toimivus. Soojuslähivuse arvutus. Osa 2: Raamide numbriline arvutusmeetod.“ [19,20].

THERM 6.3 arvutab soojusvooge lõplike elementide meetodil kahemõõtmelise mudeli põhjal. Mudel luuakse vaatlusaluse detaili mõõtmetele tuginedes. Lisaks määratakse ka keskkonna tingimused – temperatuur ja konvektiivse soojusvahetuse koefitsient, kuna arvutus hõlmab nii konvektiivset kui kiirguslikku soojusvoogu. Kiirguslik soojusülekanne arvutatakse eraldi kiirgusmudeli põhjal. See mudel eeldab, et sisekeskkonnal on ühtlane temperatuur ja täielikult musta keha emissiivsus ($\epsilon=1,0$). Igal vaadeldava detaili materjalil on oma iseloomulik emissiivsus [21].

Kõigis käesolevas töös esitatud arvutuste puhul on kasutatud väliskeskkonna temperatuuri -10 °C ja sisetemperatuuri $+20\text{ °C}$.

3.3. Hoone kütmisel atmosfääri paisatava süsihappegaasi heite arvutamine

Käesoleva töö peatükkides 6.2, 6.3 ja 6.4 teostatud hoone kütmisel tekkiva CO₂ heite massi arvutus põhineb PHPP 2007 programmipaketiga kaasas oleval primaarenergia- ja CO₂ emissiooni tegurite andmestikul.

Kõnealused väärtused on saadud GEMIS 4.14 tarkvara mudelil. GEMIS on lühend sõnadest Global Emission Model for Integrated Systems ehk Globaalne emissiooni mudel integreeritud süsteemidele.

GEMIS võimaldab läbi viia põhjalikke elutsükli analüüse mitmesuguste emissioonide arvutamiseks ja ressursikasutuse ning rahalise maksumuse hindamiseks. GEMIS andmebaasis on olemas põhjalik info taastuvate ja taastumatute loodusvarade, transpordiprotseduuride ja ka jäätmekäitluse kohta [21].

See andmestik lubab teisendada energiabilansi arvutuse tulemusena saadud hoone lõppenergia primaarenergiaks soovitud energiaallika valiku puhul ja arvutada ka antud energiaallika kasutamise seotud süsihappegaasi emissioon [18].

3.4. Infrapuna termograafia mõõdistus

Käesoleva töö peatükis 6.3.3 on toodud aknaraami ja aknapaigalduse soojustehnilise toimivuse kontroll kasutades infrapuna termograafia meetodit.

Infrapunatermograafia on meetod temperatuuride jaotuse määramiseks ja esitamiseks hoone välispiirde erinevate osade pinnal. Selle meetodi kontekstis viiakse termografeerimine läbi kasutades infrapunakiirguse mõõtevahendeid, mis loovad pildilise info vaadeldava pinna kiirguslike temperatuuride jaotuse kohta arvestades pinna füüsikalisi omadusi, ümbritsevaid keskkonnatingimusi ning mõõteseadmes kasutatava sensori iseärasusi [23].

Termograafiline mõõdistus viidi läbi kooskõlas Euroopa standardiga EVS-EN 13187:2001 "Thermal performance of buildings - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method." [24].

Mõõdistusel kasutati alljärgnevat aparatuuri:

- termokaamera FLIR ThermaCAM B4;
- digitaalne fotokaamera Pentax K20D;
- õhutemperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse salvestaja Comet.

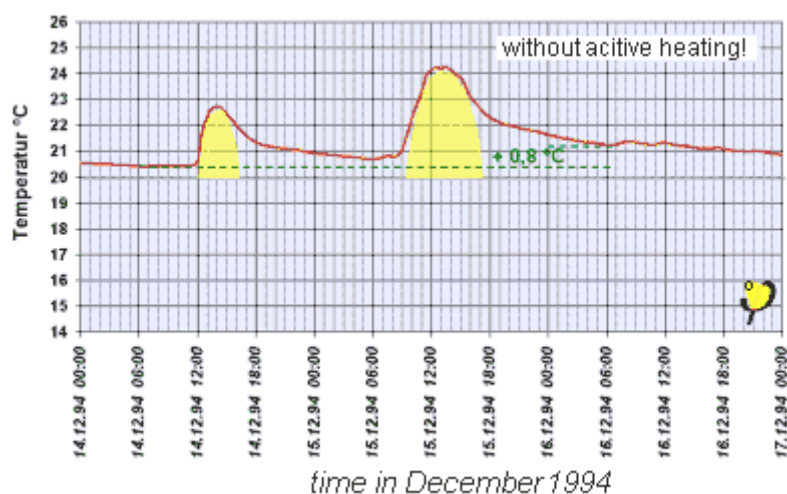
4. Akende potentsiaal hoone energiakadude vähendamisel

4.1. Akende roll energiatõhusas hoones

Akende soojusjuhtivus on ajalooliselt olnud kõrgem, kui teistel hoone välispiirde osadel [25], kuid tänu klaasi omadusele päikesekiirgust läbi lasta, on aknad olnud energiatõhusa hoone kontseptsiooni loomisest alates võtmerollis [26].

Tavapärasest hoones loetakse aknaid aukudeks soojapidavas välispiirdes, kuid väga energiatõhusas hoones võib akendest sisenev päikeseenergia ületada akendest lähtuva soojuskao [27].

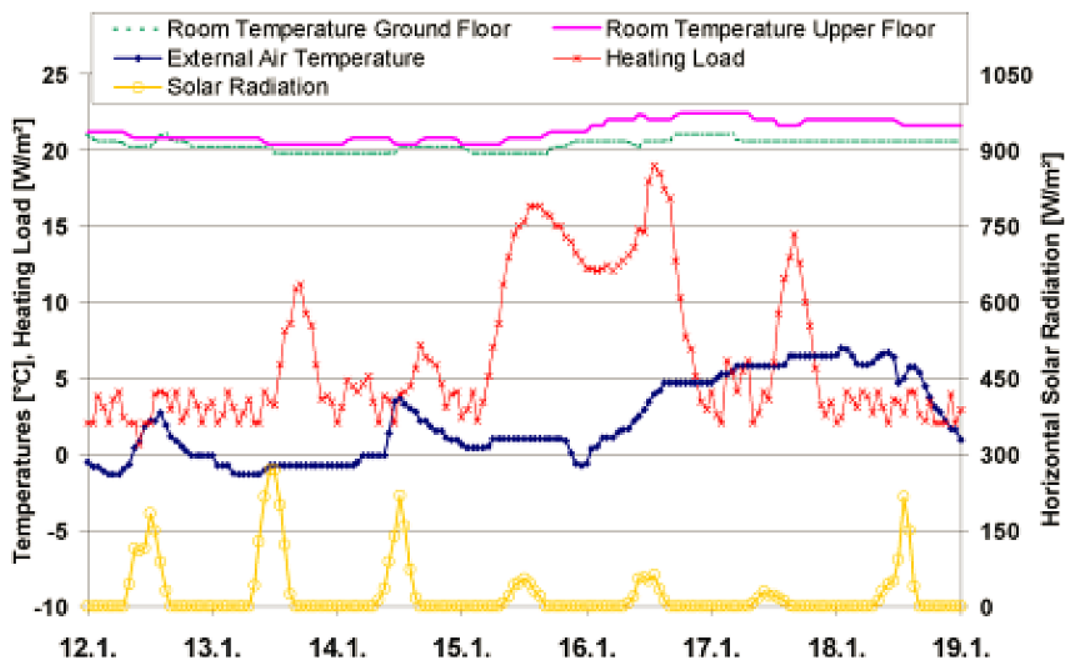
1994. aastal Darmstadtis passiivmajas teostatud seire andmete alusel on esitatud diagramm (joonis 4.1), kus on näha sisetemperatuuri kõikumine ajas. 14. ja 15. detsembril esines selge päikesepaisteline ilm ning tänu sellele tõusis hoone sisetemperatuur märkimisväärselt. Oluline on ka asjaolu, et hoone sisetemperatuuri langemine on tänu hoone väikesele energiakaale aeglane ning peale kaht päikesepaistelist päeva jäi järgnevatel pilvistel päevadel püsima ligikaudu 0,8 °C kõrgem sisetemperatuur. Kogu uuritud perioodi vältel oli hoone küttesüsteem väljalülitatud [27].



Joonis 4.1 Darmstadtis passiivmajas teostatud uuringu tulemus. Kahel päikeselisel päeval tõusis siseõhu temperatuur märgatavalt.

Aastatel 1999 ja 2000 viidi läbi põhjalik uuring Saksamaal Hannoveri linnas asuvas 32-st osast koosneva passiivmaja [1,12,28] meetodil valminud ridaelamu energeetilise toimivuse kohta. Allpool on esitatud ühe uuringuperioodi nädala küttevõimsuse, päikesekiirguse, välistemperatuuri ning esimese ja teise korruse sisetemperatuuri kõikumine ajas. Tulemustest järeldati, et päikesepaistelistel, aga külmal päeval on väga energiatõhusa hoone küttevõimsuse

vajadus madalam kui pilvise ja sooja ilma korral. Ka allolev joonis illustreerib seda järeldust: sisetemperatuuri stabiilsena hoides on päikesekiirguse vähenedes märgata suuremat küttevõimsuse vajadust [29].



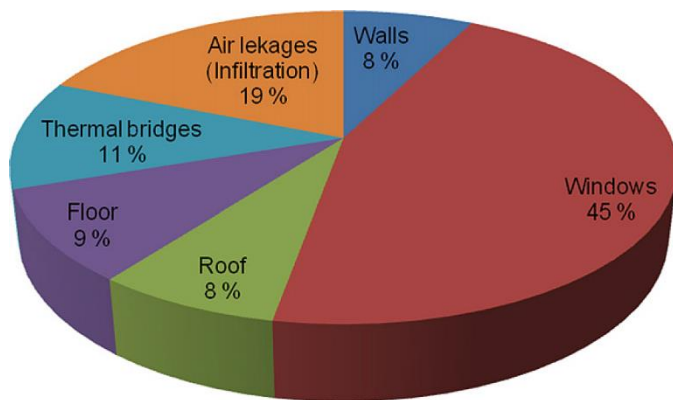
Joonis 4.2 Väljavõte CEPHEUS projekti raames teostatud uuringu tulemustest. Diagrammil on ühe uuringuperioodi nädala küttevõimsuse, päikesekiirguse, välistemperatuuri ning esimese ja teise korruse sisetemperatuuri kõikumine ajas (12.01.01 – 19.01.01). [29]

Seega on selge, et energiatõhusas hoones on akendel oluline roll eelkõige päikese vabaenergia kogumise tõttu ning kuigi akende soojusjuhtivus on tüüpiliselt kõrgem, kui ülejäänud välispiirde komponentidel, on energiatõhusas hoones siiski vajadus suurte klaaspindade järele.

Lisaks on akendel oluline osa loomuliku valgustuse tekitamisel, sest energiatõhusa hoone kontseptsiooni kuulub ka kodutehnika ja valgustuse ning muude seadmete energiakulu vähendamine [30].

4.2. Aknad – võti energiavajaduse vähendamiseks

Eelmises peatükis selgus, et energiatõhusates hoonetes on aknad olulisel kohal ning vaatamata nende kõrgemale soojusjuhtivusele on tüüpiliselt ka aknapinda sellistes hoonetes rohkem. Seega võib eeldada, et energiakadu on suurim just akendest. Samasele järeldusele on tulnud ka mitmetes varasemates uuringutes – näiteks Gyrning jt läbi viidud uuringu järgi on akende osakaal hoone energiakadudes ligikaudu 45% (joonis 4.3) [31].



Joonis 4.3. Grynning jt teostatud uuringu tulemusel leitud hoone energiakadude jaotumine komponentide kaupa [31].

On selge, et sedasorti uuringute tulemus sõltub suuresti valimis kasutatud hoonete parameetritest - aknapinna suhtest seinte pindalasse, akende ja muude komponentide omadustest jms - ning seega on mõõtemääramatus suur, kuid üldine tendents on siiski selline, et oma ajastule vastavate võrdse energiatõhususe tasemega hoone komponente võrreldes on kaod suurimad akendest [32].

2007. aastal teostati Norras uuring, kus võeti aluseks samal aastal kehtima hakanud Norra ehitusnormi piirmäärad (esitatud tabelis 4.1) ja võrreldi selle järgi ehitatud hoonete soojuskadu komponentide kaupa. Leiti, et ristkülikukujulisel kahekorruselisel ühepereelamul, mille külgede pikkused on 8 ja 10 meetrit ning korruste kõrgus 2,5 meetrit ja mille aknad moodustavad 30% välisseinte pindalast, on akendest lähtuv soojuskadu umbes 60%

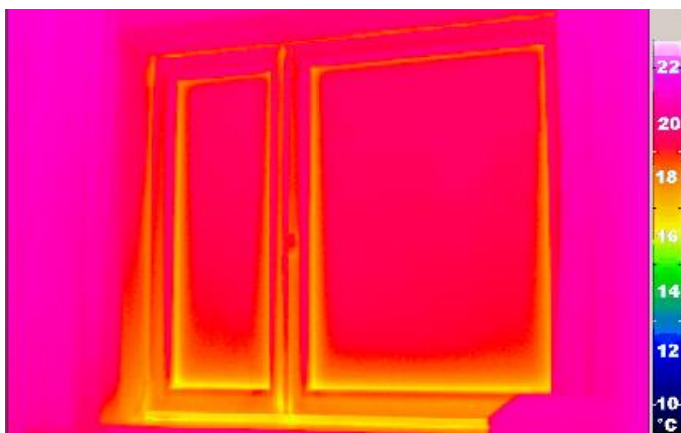
Tabel 4.1 2007 aastal kehtima hakanud Norra ehitusnormis toodud piirmäärad hoone välispiirde komponentidele

Komponent	Kõrgeim lubatud soojusjuhtivus [W/(m ² K)]
Välissein	0,18
Katus	0,13
Põrand	0,15
Aken	1,2
Uks	1,2

Darmstadt Passiivmaja Instituudi (PHI) teostatud uuringu alusel vähenes energiakadu akendest ligikaudu 50%, kui kasutati passiivmajadele sobilike tooteid [$U_{\text{aken, paigaldusega}} \leq 0,85$ W/(m²K)] tavapärase toodete asemel. Sellele vaatamata jäi energiakadu akendest domineerivaks [27].

Joonisel 4.4 on esitatud samast uuringust pärit termogramm passiivmajadele sobilikust aknast. Termogrammil on näha, et aken on jätkuvalt nõrk koht hoone välispiirdes ning on selge, et klaaspaketi ääres ning aknaraami ja lengi piirkonnas on temperatuur madalam, mis võib

külmemas kliimas viia hallituse või niiskuskahjustuste tekkeni ja see on mõjutab nii hoone sisekliimat kui konstruktsioonide eluiga [27].



Joonis 4.4 Darmstadt Passiivmaja Instituudi uuringus esitatud termogramm passiivmajale sobivast aknast. Termogrammil on näha, et akna pinnatemperatuurid on madalamad, kui seina pinnatemperatuur. Termopildi tegemise ajal oli sisetemperatuur 22 °C ja välistemperatuur 2,5 °C [27].

Käesoleva töö autor leiab, et kuigi akende soojuspidavust on viimastel aastatel parandatud [33] ja võrreldes tavapärase toodetega on saavutatud kohati märkimisväärsed tulemusi [27], peitub hoone energiakadude vähendamise potentsiaal just akendes.

4.3. Ülevaade energiatõhusate hoonete energiabilansist Eestis – akende osakaal

Ülaltoodud uuringute eeskujul on alljärgnevalt tehtud ülevaade energiatõhusate hoonete soojusbilansist Eestis. Eesmärgiks oli kontrollida, kas varasemate uuringute info akende energiakao domineerimisest peab paika ka Eesti kliimas asuvate energiatõhusate hoonete puhul.

Ülevaate koostamisel kasutati tarkvarapaketi PHPP 2007 abil leitud hoonete soojusbilansside tulemusi (metoodika kirjeldus on peatükis 3.1).

4.3.1. Hooned

Ülevaate andmiseks valiti hooned, mille projekteerimine algas mitte rohkem kui kaks aastat tagasi ning mille arvutuslik neto erikütteenergiavajadus ei ületa 25 kWh/m²a. Selline valim iseloomustab uusi energiatõhusaid hooneid, mille kütteenergiavajaduse vähendamine on käesoleva töö oluline aspekt. Tabelis 4.2 on toodud vaatluse alla võetud viie hoone informatsioon ja joonisel 4.5 vastavate hoonete põrandaplaanid.

Tabel 4.2. Analüüsis kasutatud hoonete informatsioon.

Nr	Tüüp	Asukoht	Omadused	
1		Tartumaa, Ülenurme vald	Köetav pind (m ²)	151,7
			Välispiirete (va aknad) keskmine soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,07
			Akende osakaal välisseina pindalast	17 %
			Lõunakaarte akende osakaal kogu aknapinnast	79 %
			Lõunakaarte akende asimuut	190°
			Keskmine avatäidete soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,79
			Keskmine klaaspaketi soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,69
2		Põlva linn	Köetav pind (m ²)	306,2
			Välispiirete (va aknad) keskmine soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,09
			Akende osakaal välisseina pindalast	20 %
			Lõunakaarte akende osakaal kogu aknapinnast	58 %
			Lõunakaarte akende asimuut	180°
			Keskmine avatäidete soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,67
			Keskmine klaaspaketi soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,56
3	Ühepere-elamu	Harjumaa, Saue vald	Köetav pind (m ²)	307,4
			Välispiirete (va aknad) keskmine soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,08
			Akende osakaal välisseina pindalast	19 %
			Lõunakaarte akende osakaal kogu aknapinnast	69 %
			Lõunakaarte akende asimuut	190°
			Keskmine avatäidete soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,80
			Keskmine klaaspaketi soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,69
4		Harjumaa Viimsi vald	Köetav pind (m ²)	175,2
			Välispiirete (va aknad) keskmine soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,07
			Akende osakaal välisseina pindalast	21 %
			Lõunakaarte akende osakaal kogu aknapinnast	59 %
			Lõunakaarte akende asimuut	168°
			Keskmine avatäidete soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,76
			Keskmine klaaspaketi soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,64
5		Tartu linn	Köetav pind (m ²)	287,0
			Välispiirete (va aknad) keskmine soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,11
			Akende osakaal välisseina pindalast	28 %
			Lõunakaarte akende osakaal kogu aknapinnast	39 %
			Lõunakaarte akende asimuut	218°
			Keskmine avatäidete soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,80
			Keskmine klaaspaketi soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	0,51



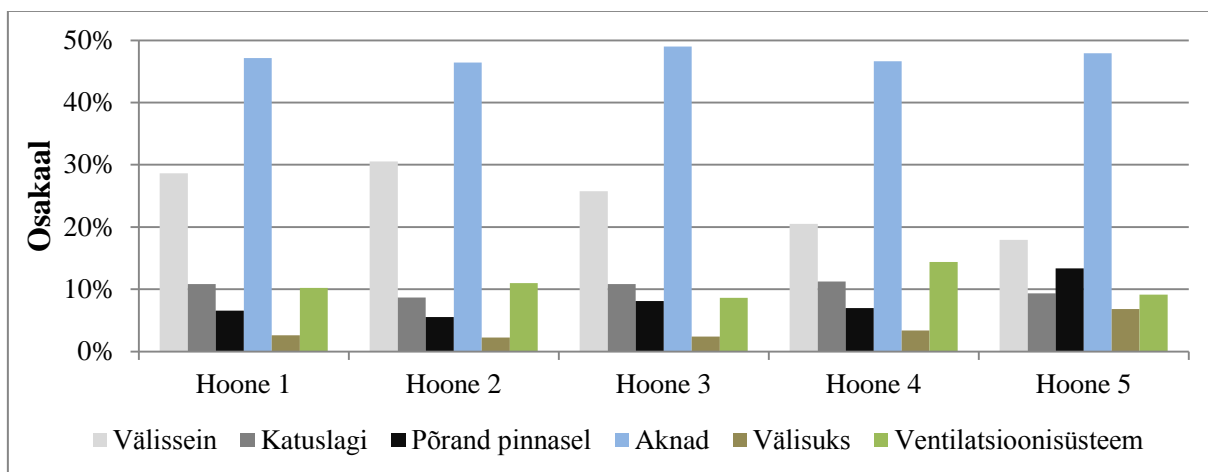
Joonis 4.5 Analüüsis kasutatud hoonete põrandaplaanid. Ült alla on toodud hooned 1 -5 ja paremalt vasakule vastavate hoonete korrused. Noolega on näidatud põhjasuund.

4.3.2. Hoonete soojusbilansid

Energiaarvutuste tulemustest (tabel 4.3, joonis 4.6) on selgelt näha, et soojuskaod vaatlusalustes hoonetes on suurimad akendest.

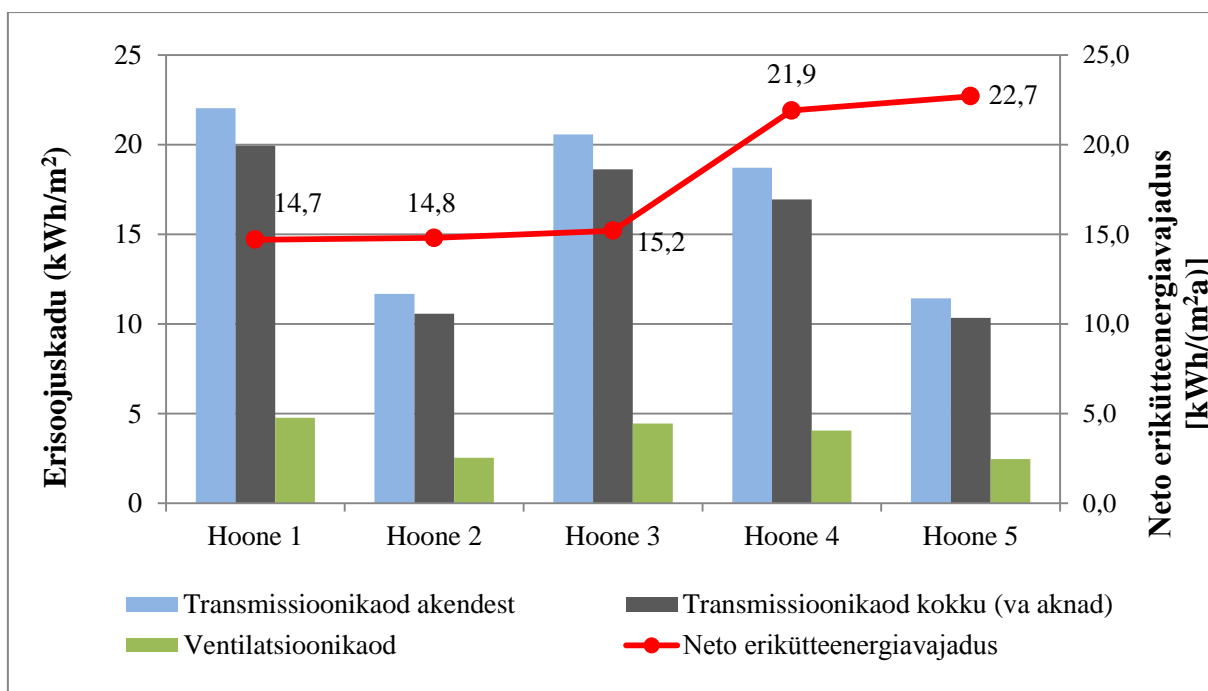
Tabel 4.3 Hoonete soojusbilansside kokkuvõtted. Külmasildade energiakadu on negatiivne, kuna arvutustes on välispiirded määratud välismõõtmete järgi, mistõttu hinnatakse soojuskadu hoone välisnurkadest tegelikkusest suuremaks.

Hoone	Komponent	Energiakadu (kWh/a)	Erienergiakadu (kWh/m ² a)	Osakaal (%)	Utiliseeritav vabasoojus	Erikütteeenergia-vajadus	
Hoone 1	Välissein	1992	13,4	28,6%	4777 kWh	32,1 kWh/m ² a	14,7 kWh/ m²a
	Katuslagi	754	5,1	10,8%			
	Põrand pinnasel	458	3,1	6,6%			
	Aknad	3279	22,0	47,1%			
	Välisuks	179	1,2	2,6%			
	Külmasillad	-416	-2,8	-6,0%			
	Ventilatsioonisüsteem	712	4,8	10,2%			
	KOKKU	6958	46,8	100,0%			
Hoone 2	Välissein	3382	12,1	27,5%	8127 kWh	29,0 kWh/m ² a	14,8 kWh/ m²a
	Välissein (vastu pinnast)	367	1,3	3,0%			
	Katuslagi	1063	3,8	8,7%			
	Põrand pinnasel	681	2,4	5,5%			
	Aknad	5703	20,3	46,4%			
	Välisuks	278	1,0	2,3%			
	Külmasillad	-545	-1,9	-4,4%			
	Ventilatsioonisüsteem	1351	4,8	11,0%			
KOKKU	12280	43,8	100,0%				
Hoone 3	Välissein	1910	12,0	25,7%	4991 kWh	31,3 kWh/m ² a	15,2 kWh/ m²a
	Katuslagi	805	5,0	10,8%			
	Põrand pinnasel	600	3,8	8,1%			
	Aknad	3637	22,8	49,0%			
	Välisuks	179	1,1	2,4%			
	Külmasillad	-349	-2,2	-4,7%			
	Ventilatsioonisüsteem	638	4,0	8,6%			
	KOKKU	7420	46,6	100,0%			
Hoone 4	Välissein	2298	13,1	20,5%	7358 kWh	42,0 kWh/m ² a	21,9 kWh/ m²a
	Katuslagi	1257	7,2	11,2%			
	Põrand pinnasel	783	4,5	7,0%			
	Aknad	5218	29,8	46,6%			
	Välisuks	378	2,2	3,4%			
	Külmasillad	-351	-2,0	-3,1%			
	Ventilatsioonisüsteem	1610	9,2	14,4%			
	KOKKU	11192	63,9	100,0%			
Hoone 5	Välissein	2197	7,7	17,9%	5972 kWh	20,8 kWh/m ² a	21,9 kWh/ m²a
	Katuslagi	1148	4,0	9,4%			
	Põrand pinnasel	1635	5,7	13,3%			
	Aknad	5874	20,5	47,9%			
	Välisuks	839	2,9	6,8%			
	Külmasillad	-551	-1,9	-4,5%			
	Ventilatsioonisüsteem	1118	3,9	9,1%			
	KOKKU	12260	42,7	100,0%			



Joonis 4.6. Tabelis 4.3 toodud andmete põhjal koostatud diagramm, kus on esitatud erinevate komponentide osakaal hoone summaarses soojuskaos.

Rõhutamaks akende olulisust vaatlusaluste hoonete soojuskadude kujunemisel on koostatud diagramm (joonis 4.7), kus on võrreldud soojuskadu akendest kogu ülejäänud komponentide transmissioonikao summa ning ventilatsioonisüsteemist lähtuva soojuskaoga. Selgub, et transmissioonikadu akendest ületab ülejäänud transmissioonikao sõltumata vähesest hoone erikütteenergiavajaduse kõikumisest.

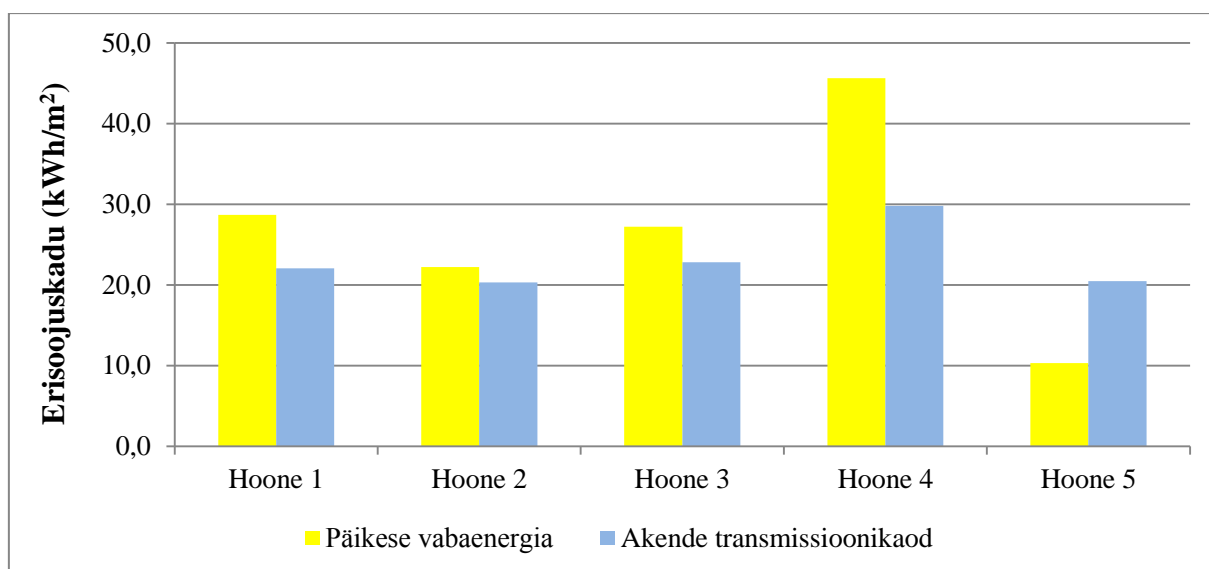


Joonis 4.7. Tabelis 4.3 toodud andmete põhjal koostatud diagramm. Akende transmissioonikao võrdlus ülejäänud komponentide transmissioonikao ja ventilatsioonisüsteemist lähtuva soojuskaoga.

Tähelepanuväärne on ka hoonete vabasoojuse hulk (tabel 4.4). On näha, et akendest sisenev päikese vabaenergia on võrdlemisi suur.

Tabel 4.4 Hoonete vabasoojus.

Hoone	Vabasoojus allikas	Erivabasoojus (kWh/m ² a)	Utilisatsioonitegur	Erivabasoojus (kWh/m ² a)
Hoone 1	Päike	28,7	82%	32,1
	Elanikud, tehnika jms	10,7		
Hoone 2	Päike	22,2	92%	29,0
	Elanikud, tehnika jms	9,2		
Hoone 3	Päike	27,2	82%	31,3
	Elanikud, tehnika jms	10,7		
Hoone 4	Päike	45,6	71%	42,0
	Elanikud, tehnika jms	13,8		
Hoone 5	Päike	10,3	99%	20,8
	Elanikud, tehnika jms	10,7		



Joonis 4.8. Tabelis 4.3 ja 4.4 toodud andmete põhjal koostatud diagramm. Akende transmissioonikao võrdlus päikese vabaenergiaga.

Joonisel 4.8 toodud diagrammil on näha, et vaatluse alla võetud neljal hoonel viiest on akendest sisenev päikeseenergia suurem, kui akendest lähtuv transmissioonikadu. Hoone nr 5 on valimi kõige energiakulukam ja see väljendub ka akende soojuskadude ning päikese vabaenergia suhtes. Energiakulukuse põhjuseks on hoone ebasoodsam paigutus ilmakaarte järgi ja kõrgema soojusjuhtivusega välispiirete kasutamine võrreldes esimese nelja hoonega.

4.4. Arutelu

Ülaltoodu kokkuvõttena võib väita, et akende osakaal on hoone energiakadude moodustumisel suur ning see kehtib ka Eestis asuvate energiatõhusate hoonete puhul.

Selgub, et energiatõhusates hoonetes on akendel oluline roll nii päevavalguse kui piisava päikese vabaenergia pakkumisel. Võrreldes tavapäraste majadega on energiatõhusatel hoonetel senisest enam aknaid ning vaatamata nende arengule, on energiakoad avatäidetest suured.

Suur energiakadu akendest on problemaatiline, ja seda mitte ainult hoone kütteenergia võtmes, vaid ka sisekliima mugavuse ja hoone ning selle komponentide eluea vähenemise tõttu. Energiakadu toob kaasa pindade jahenemise, mis tekitab hallituse või niiskuskahjustuste ohu (eriti akna raami ja lengi piirkonnas) ning temperatuurierinevus ruumis põhjustab ebamugavust.

Seega on vajalik vähendada energiakadusid nendest komponentidest, kus need on suurimad ehk energiatõhusate hoonete kontekstis akendest. Samas on aga oluline säilitada passiivse päikeseenergia kasutus, mis tähendab, et klaaspinna vähendamine ei ole valikuvõimalus.

5. Akende tõhustamise meetodid

Käesoleva töö autor pakub välja kolm peamist akende tõhustamise meetodit ning üritab leida võimalikult optimaalse variandi, mis sobiks rakendamiseks Eesti tingimustes:

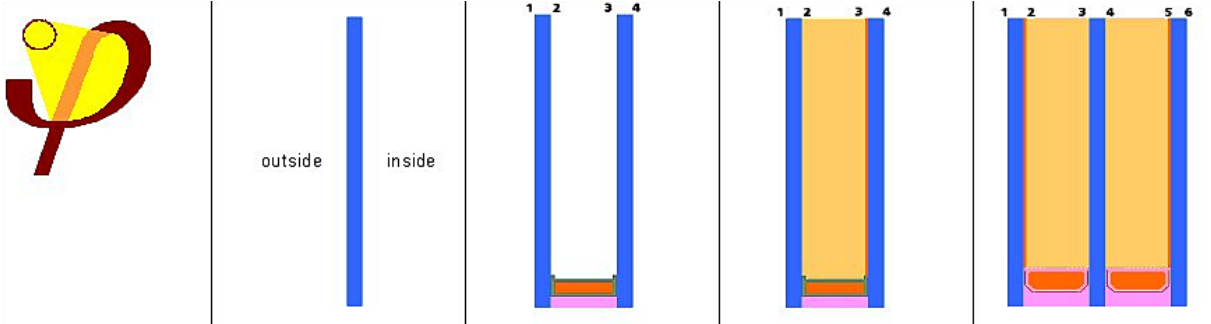
1. üha madalama soojusjuhtivusega aknaraamide ja klaaspakettide kasutuselevõtt;
2. akna optimaalne paigutus välisseinas;
3. soojustatud liikuva varjutusmehhanismi kasutamine akende ees.

5.1. Üha madalama soojusjuhtivusega klaaspakettide kasutuselevõtt

5.1.1. Klaaspaketi areng ja hetkeseis

Aja möödudes on toimunud akna komponentide pidev areng ja eriti silmapaistvalt on arenenud läbipaistev element: klaas ning klaaspakett. Viimase 40 aasta jooksul on aknaklaasi soojusjuhtivus vähenenud umbes kaheksa korda (joonis 5.1) [34].

Veel 1970ndatel oli enamikel Saksamaa hoonete akendel ühekordne klaas keskmise soojusjuhtivusega $5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. 1980ndatel hakati kasutama kahest klaasist koosnevat õhkvahega klaaspaketti. Sellise klaaspaketi soojusjuhtivus oli ühekordse klaasiga võrreldes ligikaudu poole väiksem – umbes $2,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Kahekordse klaaspaketi soojusjuhtivust alandati veelgi, kasutades klaaside vahelises ruumis õhu asemel madalama soojusjuhtivusega gaase – näiteks argooni – ja klaaside sisepindadel selektiivkatet (väga õhuke metalne kiht, mis peegeldab pikalainelist soojuskiirgust ruumi tagasi). Tänu sellele saavuti klaaspaketi soojusjuhtivuseks keskmiselt $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Tänapäevane lahendus on kolmekordne klaaspakett, milles on kombineeritud madala soojusjuhtivusega täitegaas ja selektiivkatted. Tulemuseks on klaaspakett, mille soojusjuhtivus on umbes $0,5 - 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Sellise klaaspaketi lahutamatuks osaks on madala soojusjuhtivusega komposiitmaterjalist klaaspaketi vaheliist [34].



glazing	single glazing	double glazing with air filling and aluminum spacers	double low-E glazing with noble gas filling and aluminum spacers	triple low-E glazing with noble gas filling and plastic spacers
glazing U-value U_g (W/(m ² K))	5,6	2,8	1,0 ... 1,6	0,5 ... 0,8
surface temperature at: outside -10 °C inside: 20 °C	-1,8 °C	9,1 °C	15,3 °C	17,5 °C
total solar transmittance, g-value	0,85	0,76	0,5 ... 0,68	0,4 ... 0,6

Joonis 5.1 Klaasi ja klaaspaketi arengusammud [34].

Kasutades mitmekordseid klaaspakette väheneb päikesekiirguse läbilaskvustegur (g) [35], kuid üha madalam soojusjuhtivus tasakaalustab seda teatud piirini. Selleks, et kontrollida klaaspaketi soojusjuhtivuse ja päikesekiirguse läbilaskvusteguri sobivust suurima energiasäästu tarbeks, on välja töötatud järgmine valem [33]:

$$U_g - S \times g < 0$$

U_g = klaaspaketi soojusjuhtivus;

S = kiirguslisa tegur, Kesk-Euroopas 1,6 W/(m²K), Eestis mõnevõrra väiksem;

g = klaaspaketi päikesekiirguse läbilaskvustegur.

Sellisel klaaspaketil, mille soojusjuhtivus- ja päikesekiirguse läbilaskvusteguri kombinatsioon annab toodud võrrandi vasakpoolne osa tulemuseks negatiivse arvu, on potentsiaal lasta ruumi rohkem päikeseenergiat, kui soojust kaotada. Näiteks tüüpilise selektiivkatte ja argoontäitega kahekordse klaaspaketi puhul on vastav näitaja Kesk-Euroopas ligikaudu 0,2, mis tähendab, et see pole sobilik energiatõhusasse hoonesse. Moodsal kolmekordsel klaaspaketil on vastav näitaja ligikaudu -0,3 ning sellisel juhul on oodata, et akna kaudu siseneb ruumi rohkem energiat kui kaob.

Ka Eestis on toimunud ülaltoodule sarnane areng – viimastel aastatel on üha enam hakatud kasutama kolmekordset argoontäite ja selektiivkatetega klaaspakette.

Saint-Gobain Glass Estonia (SGGE) enimtoodetud soojapidavam klaaspakett omab U-väärtust $0,53 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ning g-väärtust $0,51$ (4-18-4-18-4, Planitherm Ultra N, 90% argoon). SGGE tootmistehnoloogia võimaldab kasutada ka selliseid selektiivkatteid, millega saavutatakse klaaspaketi U-väärtuseks $0,48 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, kuid samas langeb g-väärtus $0,37$ juurde [36]. Sisestades andmed eelmisel leheküljel esitatud valemisse, selgub, et esimesel klaaspaketil on suurem potentsiaal energiat säästa ning teine klaaspakett osutub sobivaks vaid siis, kui seda kasutatakse näiteks põhjapoolsetes akendes, kus kütteperioodil puudub päikese otsekiirgus ning seega ei ole päikesekiirguse läbilaskvustegur oluline.

Klaaspaketi soojusjuhtivust on vähendatud ka argooni asemel krüptooni kasutamise, mis on mõnevõrra madalama soojusjuhtivusega gaas. Tänu sellele saavutatakse ülaltoodud SGGE enimtoodetud klaaspaketiga sarnase konfiguratsiooni puhul klaaspaketi U-väärtuseks $0,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ning g-väärtuseks $0,51$. Kuna krüptoon on aga oluliselt kallim [37] kui argoon, on selle kasutamisest üldjuhul loobutud.

5.1.2. Klaaspaketi soojusjuhtivuse vähendamise võimalused

Energiaühikutes hoonetes kasutatakse juba tänapäeval väga madala soojusjuhtivusega kolmekordseid klaaspakette. Käesoleva töö peatükis 4.3 toodud viie energiaühikuse hoone klaaspakettide omadused on esitatud tabelis 4.2. Võrreldes vaatluse alla võetud hoonete klaaspakettide omadusi eelmise peatüki informatsiooniga, selgub, et tegu on tänapäeval Eestis saadaval olevate moodsaimate lahendustega. Erinevates uuringutes on leitud, et sellistel kolmekordsetel klaaspakettidel on vähe arenguruumi [38,39]. Üheks võimaluseks on kasutada neljakordseid klaaspakette, kuid siis väheneb märgatavalt päikesekiirguse läbilaskvus ja suureneb klaaspaketi mass [40]. Klaasitootjad on teinud arendustööd kergemate ja elastsemate klaaside tootmises, mis leevendaks nimetatud probleeme, kuid hetkel puudub selline tootevalik [41].

2012. aasta rahvusvahelisel passiivmajakonverentsil pakuti välja väga õhukestest, $2 \mu\text{m}$ paksustest klaasidest koosnev 12-kordne klaaspakett, mis on küll paljulubav, ent tehnoloogiliste takistuste tõttu pole siiski ajas püsiva lahenduseni jõutud [42].

Lisaks on välja pakutud klaaspakette, mille klaaside vahelisest alast on gaasid eemaldatud ehk valmistatud on vaakumpaneelid. Selliste klaaspakettide puhul on teoreetiliselt võimalik

saavutada väga madalaid soojusjuhtivuse väärtusi [ligikaudu $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$] [40], kuid nende tootmisprotsess on keeruline ja kulukas [38,40].

Kõrgtehnoloogia valdkonnast pärineb nn *aerogel* - geel, mille vedel komponent on asendatud gaasiga - ja seetõttu on tekkinud tänini teadaolevalt madalaima tihedusega tahkis, mille ruumalast moodustab kuni 99,8% õhk [30,43]. Sellise materjali soojusjuhtivus on väga väike ning on leitud, et potentsiaal akendes kasutamiseks on suur. Paraku on tehnoloogia veel arenemisjärgus ja piisava läbipaistvusega elementide tootmine on väga kallis [42] ning lähitulevikus ei ole laiatarbe tootmist ette näha [39, 44].

Ülaltoodu põhjal väidab käesoleva töö autor, et kuigi potentsiaalseid arengusuundi klaaspaketi soojusjuhtivuse parandamiseks on mitmeid, ei ole lähitulevikus märkimisväärset hüpet oodata ning ebaselge on võimalike uute tehnoloogiate kättesaadavus ja hind.

Kuna hetkel on energiatõhusates hoonetes kasutusel kaasaegsed tooted, ei pea töö autor oluliseks teostada võrdlust varasemate vähemtõhusate toodega ning kuna kõrgtehnoloogiliste toodete parameetrid ja kättesaadavus on ebaselge, ei võeta edaspidi arvesse ka neid.

5.2. Üha madalama soojusjuhtivusega aknaraamide kasutuselevõtt

Aknaraamidel on oluline ülesanne ühendada omavahel aknaklaas ja hoone sein – aknaraam peab muutma akna stabiilseks ning jäigaks. Samas peab aknaraam olema ka soojustehniliselt samal tasemel kui kogu ülejäänud hoone välispiire.

5.2.1. Aknaraamide hetkeseis

Peatükist 5.1 selgus, et klaaspakettide puhul on energiatõhusates hoonetes tänapäeval tavaks kasutada tooteid U -väärtusega $0,5-0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Aknaraamide puhul on aga tüüpilised tooteid U -väärtusega mõnevõrra üle $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nagu selgub 2007 aastal Norra SINTEF-i teostatud uurimustööst [45].

2007. aastal koostatud SINTEF-i uuringu eesmärk oli anda ülevaade sellel hetkel saadaval olnud parimatest aknaraamidest. Leiti, et enamikel juhtudel omasid parimad tooted Darmstadt-i Passiivmaja Instituudi (PHI) sertifikaati, mis kinnitab nende sobivust passiivmajadele [$U_{\text{aken}} \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, kui klaaspaketi $U = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$] ning seega keskenduti peamiselt nendele. Uuringu hetkel oli passiivmajale sobilike aknaraamide tüüpiline U -väärtus $0,7 - 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ning parima aknaraami soojusjuhtivus $0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Märgiti, et kuna klaaspaketi soojusjuhtivus on üha enam ligikaudu $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, võiks ka

aknaraami soojusjuhtivus vähemalt samaväärne olla. Aknaraami läbipaistmatuse tõttu võiks aga selle soojusjuhtivus pigem läheneda välisseina soojusjuhtivusele [45].

Kuus aastat hiljem - aastal 2013 - on PHI¹ sertifikaadiga aknaraamide arv ligikaudu kahekordistunud, kuid keskmine raami soojusjuhtivus on jätkuvalt ligikaudu 0,77 W/(m²K) [46]. Sellest võib järeldada, et kuigi madalama soojusjuhtivusega aknaraamide toomine on suurenenud, pole erilist arenguhüpet siiski toimunud.

SINTEF-i uuringus toodi välja ka asjaolu, et tihtipeale ei märgi aknatootjad raami soojusjuhtivust eraldi, vaid akna kui terviku oma. Sellisel juhul jääb raami soojustehniline suutlikkus ebaselgeks. Seda on aga vajalik teada nii energiatõhususe kui hoone sisekliima seisukohalt, sest aknaraam on piirkond, kus on õhu liikumine aknapõskede tõttu raskendatud ja juhul, kui valitakse näivalt tõhus aken, mille raam on siiski suure soojusjuhtivusega, võib tekkida olukord, kus pole arvestatud aknaraami piirkonnas tekkiva temperatuurilangusega, mis võib omakorda kaasa tuua soodsad tingimused hallituse arenguks või niiskuskahjustuste tekkeks.

Sama probleemi kohtas käesoleva töö autor ka Eesti aknaturul: suurimad aknaraamide tootjad ning edasimüüjad (näiteks AS Lasita Aken, Aknatehas OÜ, Vikin Window AS) [47,48,49] ei märgi oma tootespetsifikatsioonis eraldi raami U-väärtust ning akna kui terviku soojusjuhtivus on tihti arvatud erinevate klaaspakettidega, mis raskendab toodete võrdlust ja eksitab ostjat. Üksikutel, litsentsi alusel Saksamaa ning Šveitsi päritolu aknaprofiilide (näiteks Rehau ja Schüco) tootjatel on avaldatud info ka raami soojusjuhtivuse kohta.[50,51] Enamasti kipub see jääma umbes 1,0 W/(m²K) juurde.

¹ Darmstadt-i Passiivmaja Instituut



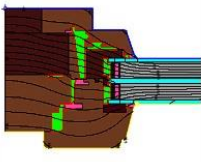
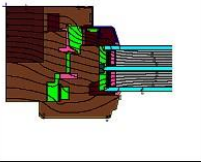
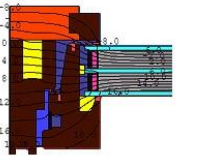
5.2.2. Aknaraamide arengusuunad

SINTEF-i uuringus toodi välja kaks põhilist aknaraamide tõhustamise meetodit:

1. vähendada raami soojusjuhtivust nii palju kui võimalik, kasutades:
 - a. uudseid (arendusjärgus olevaid) väga madala soojusjuhtivusega materjale;
 - b. uudseid raami konstruktsiooni lahendusi (erineva kuju ja suurusega suletud kambrid, kiirguslike protsesside mõjutamine jne);
 - c. tänapäeval teadaolevaid väga madala soojusjuhtivuega materjale;
2. vähendada raami laiust, et suurendada ruumi siseneva päikese kiirguse hulka ning samaaegselt hoida raami soojusjuhtivus madal.

Leiti, et variant 1-b ehk teadaolevate madala soojusjuhtivusega materjalide kasutamine aknaraamides on levinum lahendus. Ka Freundorfer jt [52] on samale järeldusele tulnud, öeldes, et enamikele sertifitseeritud passiivmajale sobilike akende raami laius on 130-169 mm. Samas lisades, et selliste aknaraamide tootmine ei ole majanduslikult tõhus, need pole arhitektuuriliselt esteetilised ja kuigi raami soojusjuhtivus võib madal olla, ei pruugi energiasääst vähenenud klaaspinna tõttu märkimisväärne olla.

Joonisel 5.2 on toodud Freundorferi näide, kuidas kahe erineva hoone puhul nende kütteenergiavajadus väheneb, kasutades kitsa raamiga aknaid. Selgub, et kuigi kitsal raamil on soojusjuhtivus isegi kõrgem kui laiemal, väheneb selle kasutamise tagajärel hoone kütteenergiavajadus märkimisväärselt [52]. Erinevatel hoonetel, mille akende jaotus ilmakaarte suhtes ja varjutustingimused on erinevad, on kirjeldatud efekt varieeruv, kuid nagu varasemates peatükkides selgitatud, on energiatõhusates hoonetes päikeseenergia kasutamine prioriteetne ning esitatud tulemusi võib sellistele hoonetele üldistada.

Kütteenergiavajadus Q_H [kWh/(m ² a)]							
		Q_H	Q_S	Q_{TAKEN}	Q_H	Q_S	Q_{TAKEN}
	$U_f=0,72$	14,2	3749	3170	14,6	3693	3289
	$U_f=0,97$	14,4	4034	3452	14,8	3885	3547
	$U_f=0,85$	11,5	4171	3066	12,2	4010	3166

Joonis 5.2. Freundorferi teostatud võrdlus erinevate aknaraamide vahel. Joonisel alla liikudes muutub aknaraam järjest kitsamaks. Q_S = ruumi sisenev päikese vabaenergia, Q_{TAKEN} = akende transmissioonikadu. [52]

5.2.3. Aknaraami olulisus sisekliima seisukohalt

Eelnevate kirjelduste kohaselt on aknaraami piirkond ka hoone sisekliima ning niiskustehniliste küsimuste aspektist oluline. Alljärgnevalt on teostatud tavalise ja soojustatud kitsa aknaraami kahemõõtmeline soojusvoogude analüüs (metoodika on kirjeldatud peatükis 3.2), mille alusel saab kahe lahenduse riski hallituse tekkeks võrrelda.

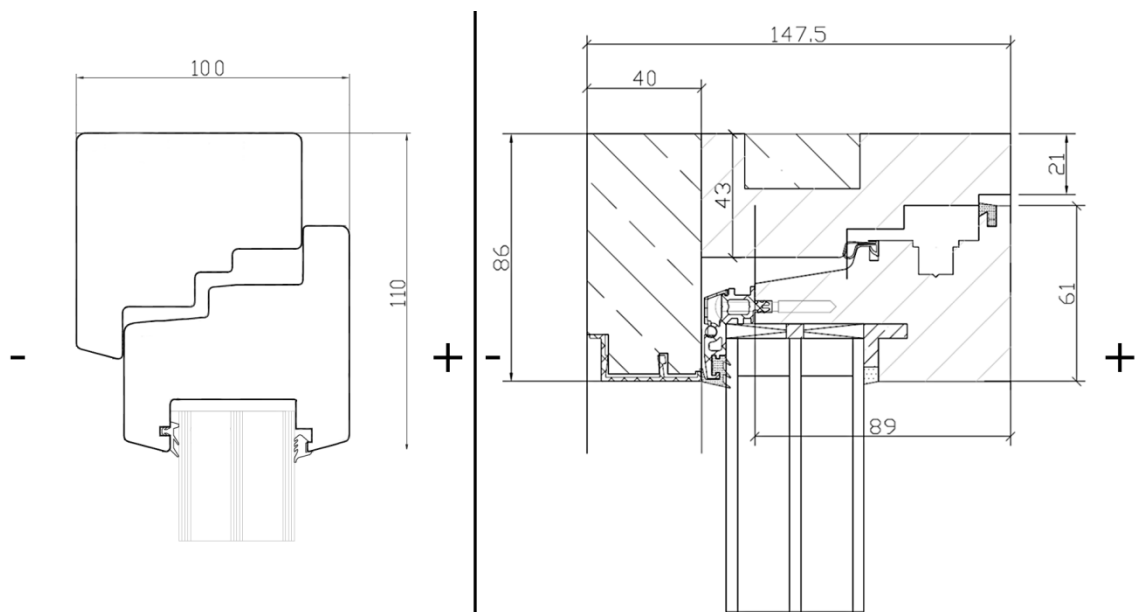
Lähteandmed

Mõlemal juhul on kasutatud sama klaaspaketti ja seinakonstruktsiooni ning aknapaigaldust – muudetud on vaid aknaraami.

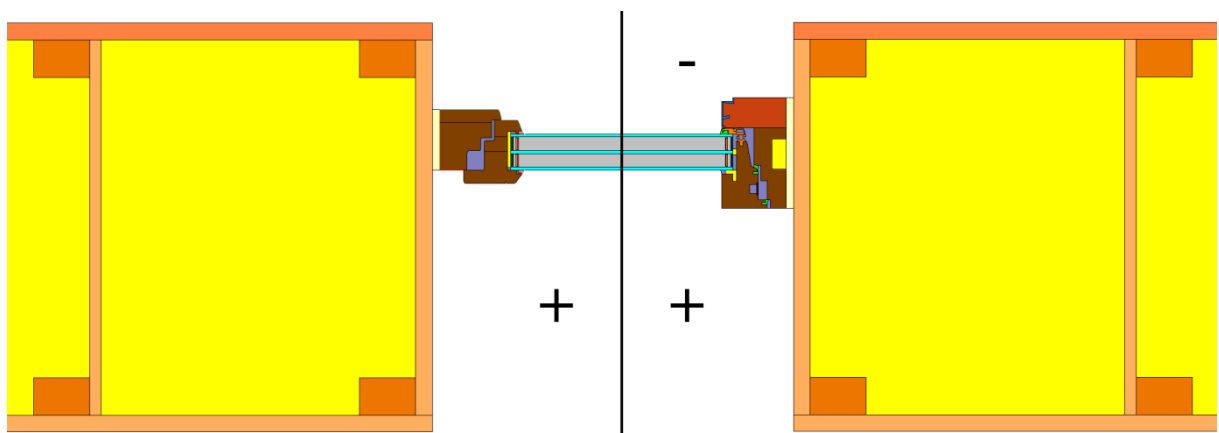
- Klaaspakett: hüpoteetiline kolmekordne argoontäitega klaaspakett, mille soojusjuhtivus on $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Seinakonstruktsioon: puitprussidest ja OSB plaadist komplekteeritud *C-taladel* (C-tähe kujulise ristlõikega kandevkonstruktsioon) põhinev välissein, soojustusmaterjalina tselluvill; välisseina keskmine soojusjuhtivus on $0,085 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

- Sisetemperatuur: +20 °C
- Välistemperatuur -10 °C

Joonisel 5.3 on kuvatud hüpoteetilise tavalise puitakna raami küljeosa ristlõige ning soojustatud aknaraami vastav ristlõige. Mõlemad raamid koosnevad põhiosas puidust, teisel variandil on lisaks kasutatud puitkiudsoojustusmaterjali. Joonisel 5.4 on esitatud mõlema variandi arvutusmudelid. Tegu on lihtsustatud konservatiivsete mudelitega, kus puuduvad soojusvoogu vähesel määral mõjutavad elemendid nagu aknapõskede ja välisfassaadi viimistluselemendid.



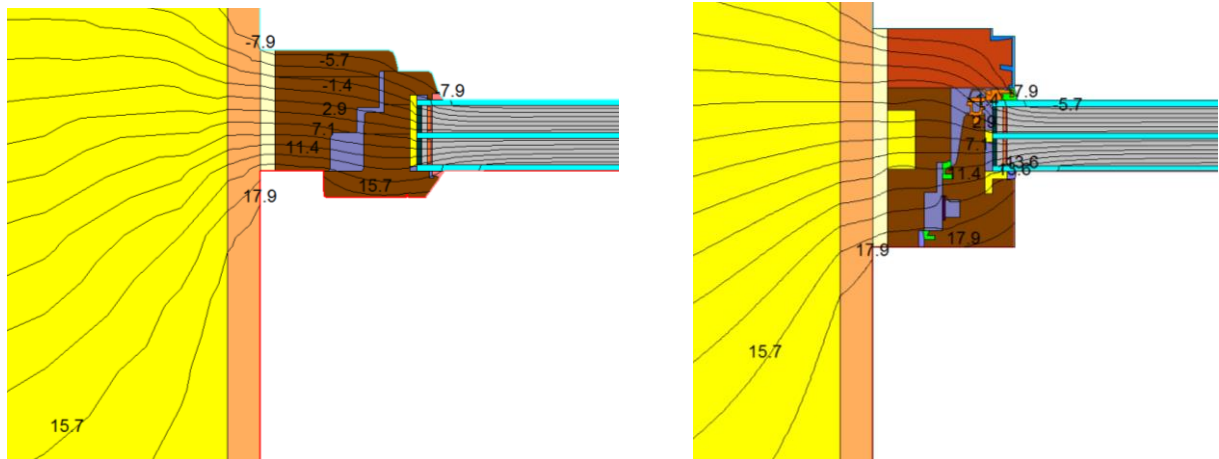
Joonis 5.3. Hüpoteetilise tavalise puitakna (vasakul) ja soojustatud puitakna (paremal) raamide ristlõiked. Soojustatud puitakna skeem pärineb peatükis 6.2.1 kirjeldatud akna tootespetsifikatsioonist.



Joonis 5.4. Vaatluse alla võetud aknaraamide parameetrite alusel koostatud kahemõõtmelise soojusvoo modelleerimise mudelid. Vasakpoolne mudel on tavalise puitaknaga ning parempoolne soojustatud puitaknaga.

Tulemused

Simulatsioonide tulemusena on joonisel 5.5 esitatud isoterpildid mõlema variandi kohta. Mõlemas mudelis aknaraami pinnatemperatuure lähemalt uurides selgub, et ilma soojustuseta aknaraami puhul on madalaim raami pinnatemperatuur 13,7 °C ja soojustatud aknaraami puhul 17,5 °C.



Joonis 5.5. Soojusvoogude modelleerimise tulemusena saadud isoterpildid kahe erineva aknaraami kohta. Vasakul on tavaline puitaken ja paremal soojustatud puitaken.

Kiire meetod liigniiskuse ja hallituse riski hindamiseks on pinnatemperatuurindeksi (f_{Rsi}) arvutamine. Pinnatemperatuurindeks arvutatakse etteantud sise- ja väliskeskonna tingimuste juures ning mida madalam see on, seda suurem on kondensaadi ning hallituse tekke risk. Ohutuks piiriks loetakse $f_{Rsi} > 0,7$ [53].

$$f_{Rsi} = \frac{(T_{min} - T_{välis})}{(T_{sise} - T_{välis})}$$

T_{min} = sisepinna madalaim temperatuur

$T_{välis}$ = välisõhu temperatuur

T_{sise} = siseõhu temperatuur

Rakendades ülaltoodud valemit, on võimalik esitada järgmised tulemused:

- tavaline puitaken $f_{Rsi} = 0,79$;
- soojustatud kitsas puitaken $f_{Rsi} = 0,91$;

Selgub, et pinnatemperatuuriteguri alusel hinnates puudub hallituse tekke risk mõlema variandi puhul. See tuleneb osaliselt hästi soojustatud seinaga kasutamisest, kuna seetõttu on soojusvoog raamiga kokkupuutes oleva seinaga piirkonnas väiksem kui kehvalt soojustatud seinaga puhul. Sellegipoolest on näha, et soojustatud aknaraamil on temperatuurindeks väiksem ning soojustamata aknaraam on hallituse tekke piirile võrdlemisi lähedal.

Tasub märkida, et kondenseerumine välispiirde pinnal on otseselt sõltuv ka ruumi niiskussisaldusest ning näiteks 20 °C olev õhk suudab oluliselt rohkem veeauru kanda, kui 13,7 °C olev õhk ehk et 20 °C juures võib õhu suhteline niiskus olla ligikaudu 50%, kuid 13,7 °C juures tõuseb see ligikaudu 75%-ni ning see on ohtlikult lähedal hallituse arenguks sobivatele tingimustele [53].

Igal juhul on soovituslik kasutada madalama soojusjuhtivusega aknaraame, kuna nii on sisekliima mugavus ning konstruktsioonide pikaajalisus paremini tagatud. Samas, nagu eelnevalt selgus, ei ole parimate toodete kasutamine levinud ning ka madala soojusjuhtivusega aknaraamide seas on enamasti jämeda profiiliga, vähendades päikeseenergia kasutust.

Sellest tulenevalt leiab käesoleva töö autor, et kuna praeguse seisuga ei ole tänapäeva tippklassi aknaraamide kasutamine veel küllalt levinud, on selles valdkonnas arenguruumi ning vajalik oleks määrata, milline on selliste toodete kasutamise potentsiaal vähendada hoonete energiakulu ja seeläbi negatiivset mõju keskkonnale.

5.3. Akna optimaalne paigutus välisseinas

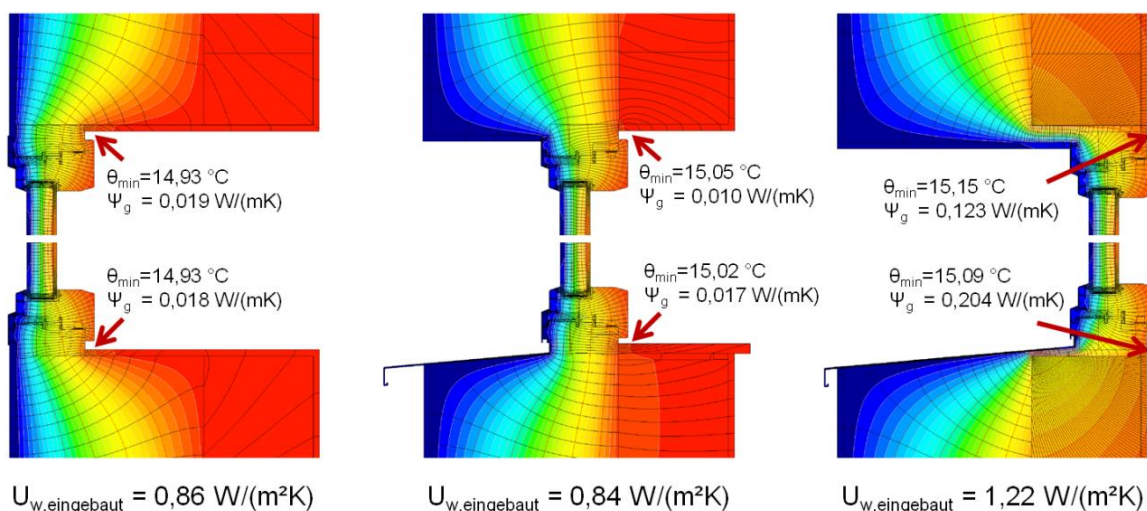
Energiakaod läbi akna ei olene ainult selle soojustehnilistest omadustest, vaid ka paigaldusest, täpsemalt akna ja seinaga ühenduskohas tekkivast külmasillast [54].

Akna paigutuse puhul on oluline nii kasutatud meetod kui akna asend seinaga välispinna suhtes ehk paigaldussügavus välispinnast.

Aastal 2010 Itaalias läbi viidud uuringus modelleeriti aknaraami soojustamise ja paigutuse mõju akna energiakadudele soojustatud tellismüüri näitel. Leiti, et akna paigaldussügavuse vähendamine alandas aknakinnituse külmasilda kuni 75% ja soojustuse lisamine kuni 70%. Mõlema lahenduse koostoimel vähenes aknakinnituse külmasild ligikaudu 90% [54]. Paraku oli nimetatud uuring mõnevõrra piiratud – käsitleti ainult akna paigaldust kandva tellismüüri

peal ning ei uuritud, kuidas mõjutab soojuskadusid akna edasine liigutamine soojustuskihi sisse.

Paigalduse tähtsust rõhutavad ka PHI² spetsialistid, tuues välja, et korrektne paigaldus võib isegi kompenseerida muidu kehvade soojustehniliste omadustega aknaraami. Erinevalt itaallaste uuringust on PHI spetsialistid uurinud akna paigutamist ka soojustuskihis ning on leidnud, et tüüpiline kompromiss on akna paigutamine soojustuskihi keskele. Sellisel juhul on optimaalne nii aknast sisenev päikese vabaenergia (seda suurem, mida väiksem on akna paigaldussügavus) kui aknast lähtuvad soojuskaod. Täpne optimum sõltub hoone asukoha kliimatingimustest ja teatud määral ka konkreetsest seinakonstruktsioonist. Joonisel 5.6 on PHI spetsialistide teostatud külmasillaarvutuste tulemused graafiliselt esitatud ning on näha, et akna paigaldus soojustuskihi sisse, vastu kandevkonstruktsiooni, on soojapidavam, kui paigutada aken kandevkonstruktsiooni peale või võimalikult soojustuse välispinna lähedale. Joonisel on toodud ka iga variandi akende soojusjuhtivused, kus on arvesse võetud paigalduse külmasilda. Selgub, et aknapaigutuse optimeerimisega väheneb selle summaarne soojusjuhtivus enam kui 30% võrra [55].



Joonis 5.6. Aknapaigaldus soojustatud välisseinas ja selle mõju soojuskadudele aknast. $U_{w, eingebaut}$ = akna soojusjuhtivus koos paigaldusest tekkinud külmasillaga [55].

Lisaks energeetilisele aspektile on aknapaigalduse külmasilla vähendamine oluline ka hoone sisekliima seisukohalt. Peatükis 5.2.3 toodud selgitus aknaraami soojapidavuse olulisusest niiskustehniliste probleemide vaatenurgast lähtuvalt on ülekantav ka akna paigaldusele.

² Darmstadt-i Passiivmaja Instituut

Soojustatud ja tavalise aknaraami vaheline võrdlus on samaväärne optimeeritud ning optimeerimata aknapaigaldusega.

Aknapaigalduse optimeerimine on oluline ja see võib olla märkimisväärse efektiga akende soojuskadude vähendamisel. Tänu võimalusele akna paigust optimeerida, sõltumata valitud aknaraami või klaaspaketi konkreetsest tootest ja tüübist, on tegu kahtlemata väga universaalse meetodiga akende soojuskadude vähendamiseks. Kuna akende paigutuse mõju pole sellistes piirkondades uuritud, kus on Kesk- ja Lõuna-Euroopaga võrreldes vähem talvist päikest ja külmem kliima, on kahtlemata oluline kontrollida selle strateegia toimuvust Eesti tingimustes.

5.4. Soojustatud liikuva varjutusmehhanismi kasutamine akende ees

Energiakadu akendest on suur ka siis, kui kasutada keskmisest paremaid tooteid (nagu peatükis 4.3 toodud hoonete puhul). Võttes kasutusele parimad saadavalolevad tooted, on võimalik energiakadu vähendada, kuid tõenäoliselt mitte hüppeliselt. Kuigi aknapaigutuse mõju energiakadude vähendamisel võib olla märkimisväärne, ei pruugi see olla piisav soovitud tulemuseni jõudmiseks. Seega tuleb otsida võimalikke alternatiivseid lahendusi, kuidas veelgi vähendada energiakadu akendest, sest nii väheneb kogu hoone energiavajadus märkimisväärselt.

Üheks võimalikuks variandiks on kasutada liigutatavaid soojustatud paneele, mida on võimalik asetada väliskeskkonnas aknaavavuse ette.

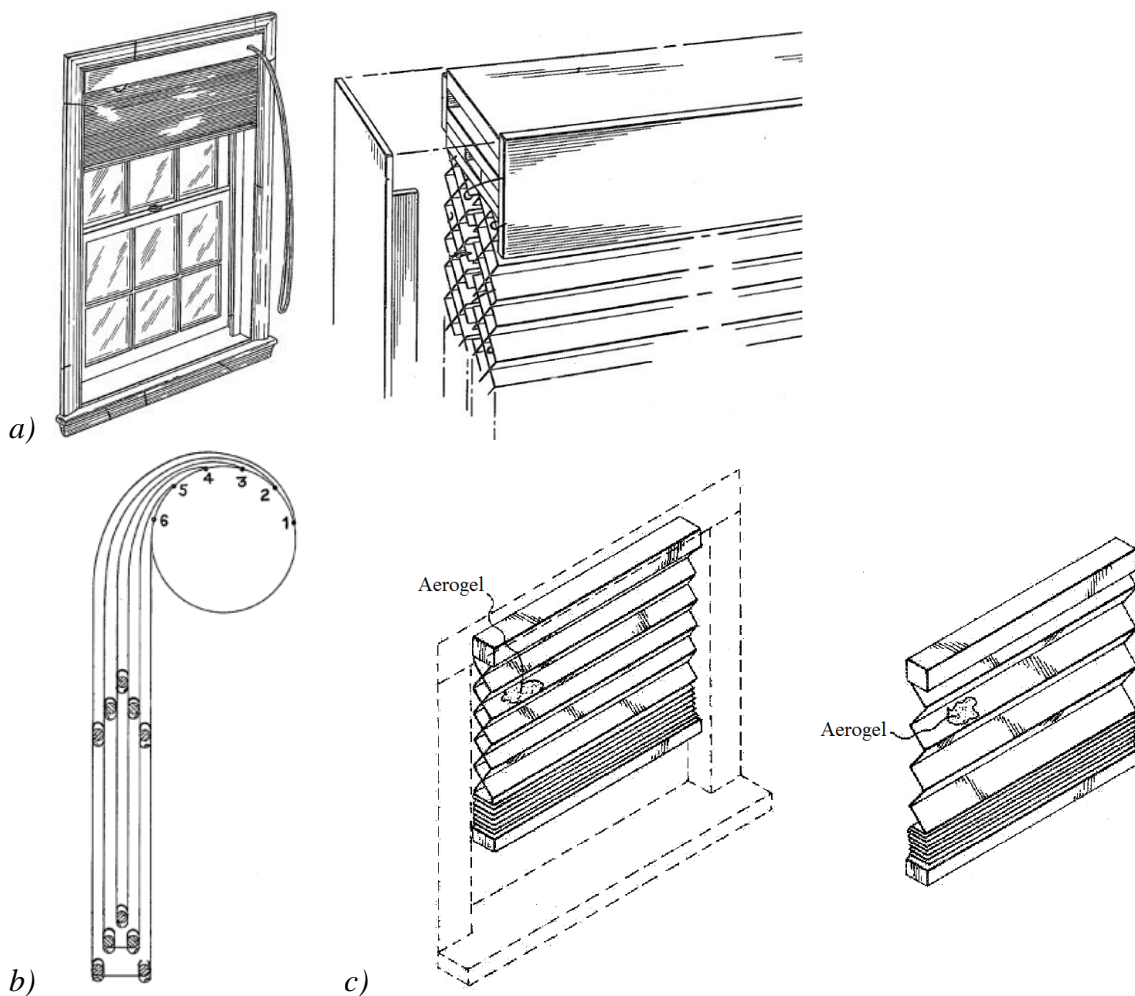
Teadustöid, mis käsitlevad sellisel meetodil akende soojuskadude vähendamist, leidub väga vähe ja seega on raske prognoosida sellise lahenduse toimivust.

Samas on sarnasele mõttele tulnud ka varem ning leidub hulganisti juba 1980ndatest pärit Ameerika Ühendriikide patente, mis käsitlevad erinevaid varjutusmehhanismide lahendusi, mille põhieesmärgiks on soojuskadude vähendamine.

Enamik nimetatud patentidest sisaldab lahendusi, kus on kasutusel erinevat tüüpi kokkuvolditav või -rullitav süsteem, mis paikneb välisseina soojustuskihis akna kohal. Näited nendest lahendustest on toodud joonisel 5.7. Varasematel ideedel [joonis 5.7 a), b)] on püütud vähendada soojuskadusid mitmes suletud kambris paikneva liikumatu õhu abil, kuid moodsamatel lahendustel on välja pakutud ka väga soojapidavate materjalide, nagu näiteks *aerogel*'i kasutamist [joonis 5.7 c)].

Selliste lahenduste puudusteks võib lugeda nende keerukust ja samas küsitavat tõhusust. Seda enam, et akna kohale kokkuvolditav või -rullitav süsteem hõivab muidu soojustusmaterjali poolt täidetud ruumi, tänu millele suureneb soojusvoog akna ülalengi piirkonnas. *Aerogel*'i kasutamisel on tõhusus suurem, kuid nagu käesoleva töö varasemates peatükkides selgus, on tegu hetkel veel kalli materjaliga ning seetõttu langeb ebasobivasse kategooriasse.

Käesoleva töö autor pakub välja ristkülikukujulise akna külgedele liigutatava soojustatud varjutusmehhanismi, mille potentsiaali energiakadude vähendamiseks on kontrollitud peatükis 6.4.



Joonis 5.7. Väljavõtted erinevate USA patendidokumentidest, kus käsitletakse akende varjutusmehhanismi kasutamist energiakao vähendamise eesmärgil: a) ribiline kokkuvolditav mehhanism, mille avamisel tekivad suletud õhukambrid [56]; b) rullil kokkukeritav mehhanism, mille avamisel tekivad suletud õhukambrid [57]; c) aerogel-i täitega ribiline mehhanism [58].

6. Akende soojuskadude vähendamine Põlva eksperimentaalhoone näitel

Järgnevalt on käsitletud peatükis 5. kirjeldatud kolme erineva akende soojuskaod vähendamise meetodi mõju hoone kütteenergiale ning sellest tulenevalt süsihappegaasi emissioonidele.

6.1. Põlva eksperimentaalhoone

Arvutuste näidisobjektiks on võetud 2013. aasta kevadel valminud eksperimentaalhoone Põlvas, mille puhul seati eesmärgiks saavutada võimalikult väike hoone kasutamisest tingitud keskkonnamõju. Sellest tulenevalt oli määrava tähtsusega hoone kütteenergiavajaduse vähendamine. Käesoleva töö autor oli seotud nimetatud objekti akendest lähtuva energiakaod vähendamisega.

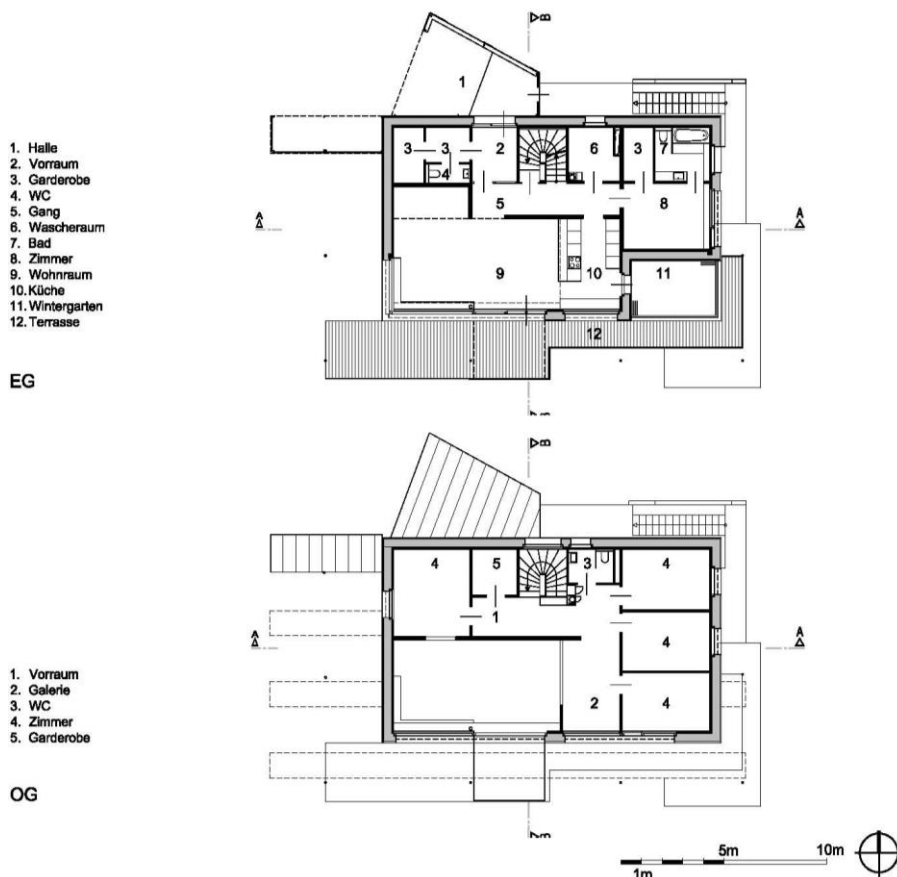
Hoone disainist, valmimisprotsessist ja energiaarvutustest on pikemalt räägitud artiklites "First Certified Passive House in Estonia" ja "A prototype architecture for passive and plus energy building in Estonia", kus aitas samuti kaasa käesoleva töö autor [4,5].

Kuna kütteenergia vähendamisel lähtuti passiivmaja meetodikast ja sealjuures saavutati ka ettenähtud tase [12], siis väljastati hoonele Eesti esimene passiivmaja sertifikaat [3].

Vaatlusalune maja on kahekorruselise ühepereelamu, millele lisandub soojustatud ning köetava pinna hulka kuuluv kelder. Hoone on risttahukakujuline ja on paigutatud ilmakaarte suhtes selliselt, et suurimad aknapinnad oleks suunatud lõunasse (asimuut 180°). Keldri põrand ja välisseinad on valmistatud raudbetoonist ning soojustatud vastavalt ekstrudeeritud ja paisutatud polüstüreeniga (paksusega 300 ja 500 mm). Esimese ja teise korruse välisseinte ning katuslae kandva osa moodustab ristkihtliimpuit. Välissein on soojustatud 400 mm tselluvillaga, katuslagi 380-550 mm vahtpolüstüreeniga. Kasutusel on kolmekordsed krüptoontäitega klaaspaketid, aknaraamid on valmistatud puidust.

Tabelis 6.1 on näidisobjekti olulisemad energiatõhususega seotud omadused, joonisel 6.1 esimese ja teise korruse põrandaplaan ja joonisel 6.2 töö autori fotod vaatlusalusest hoonest.

Valitud hoone sobib järgnevate võrdluste aluseks, kuna on oma vormilt ja parameetritelt (soojustatuse määr, akende osakaal ilmakaarte kaupa jms) tüüpiline energiatõhus ehitis ja sobib seega üldistamiseks.



Joonis 6.1. Vaatlusaluse hoone esimese ja teise korruse põrandaplaan [4].

Tabel 6.1. Arvutustes kasutatud hoone olulisemad energiatõhususega seotud omadused.

Hoone aadress	Metsa 5a, Põlva, Eesti			
Tubade arv	6			
Hoone köetav pind	280,6 m ²			
Hoone siseruumala	882,3 m ³			
Ventilatsioonisüsteemi soojustagastuse määr	93 %			
Hoone õhuvahetuskordsus rõhutestil (iseloomustab välispiirete õhupidavust)	0,36 1/h			
Välisseinte kaalutud keskmine soojusjuhtivus (keldri seintel on erinev)	0,095 W/(m ² K)			
Põranda soojusjuhtivus	0,086 W/(m ² K)			
Katuslae soojusjuhtivus	0,071 W/(m ² K)			
Avatäidede keskmine soojusjuhtivus (hõlmab klaaspaketti ja raami)	0,67 W/(m ² K)	Keskmine klaaspaketi U = 0,56 W/(m ² K)		
Aknapind kokku	91,2 m ²			
Aknapinna osakaal välisseinte kogupindalast	19,7 %			
Aknapinna osakaal ilmakaarte kaupa	Põhi	Ida	Lõuna	Lääs
	13,7 %	21,5 %	57,7 %	7,1 %



Joonis 6.2. Töö autori fotod arvutustes kasutatud hoonest: a) ristkihtliimpuitkilpidest valminud välisseinte kandev osa; b) vaade teise korruse lõunapoolsest magamistoast, näha ka ristkihtliimpuitkilpide sisekülg; c) välisseina soojustuse karkass; d) aknaavaus, näha ka soojustuse karkassi moodustatud akna välimine põsk; e) paigaldatud viimistlemata puitaken vaadatuna ruumist sees; f) lõplikult viimistletud puitaken ja aknapõsk; g) valminud hoone elutuba; h) hoone lõunafassaad.

6.2. Väikese soojusjuhtivusega kitsa aknaraami kasutamine

Antud hoone puhul valiti käesoleva töö peatükis 5.2 väljatoodud põhimõtetele vastavad aknaraamid ehk sellised, mis oleks kitsad, ent võimalikult väikese soojusjuhtivusega. Valitud toote nimi on Pro Passivhausfenster SmartWin.

6.2.1. Väikese soojusjuhtivusega kitsas aknaraam

Pro Passivhausfenster SmartWin on kitsas väikese soojusjuhtivusega aknaraam. Sellel on Darmstadt'i Passiivmaja Instituudi (PHI) sertifikaat [59,60], mis kinnitab sobivust passiivmajadele [nõue, et $U_{\text{aken}} \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, kui klaaspaketi $U = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$].

Tabelis 6.2 on toodud valitud aknaraami soojustehnilised omadused avaneva ning mitteavaneva raami puhul ning seda nii alumise kui ülemise ja külgmise osa kohta (alumise osa on erineva soojusjuhtivusega, kuna selle konstruktsioon erineb vihmavee ärajuhtimiseks vajaliku metallkonstruktsiooni tõttu). Tabelis on esitatud ka standardmõõtudega akna keskmine raami soojusjuhtivus ja kogu akna soojusjuhtivus kasutades klaaspaketti, mille soojusjuhtivus on $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Viimased andmed on vajalikud selleks, et antud aknaraam oleks hõlpsamalt võrreldav ka selliste toodetega, mille kohta täpsem info puudub. Käesolevas töös võrreldakse edaspidi kaalutud keskmisi väärtusi.

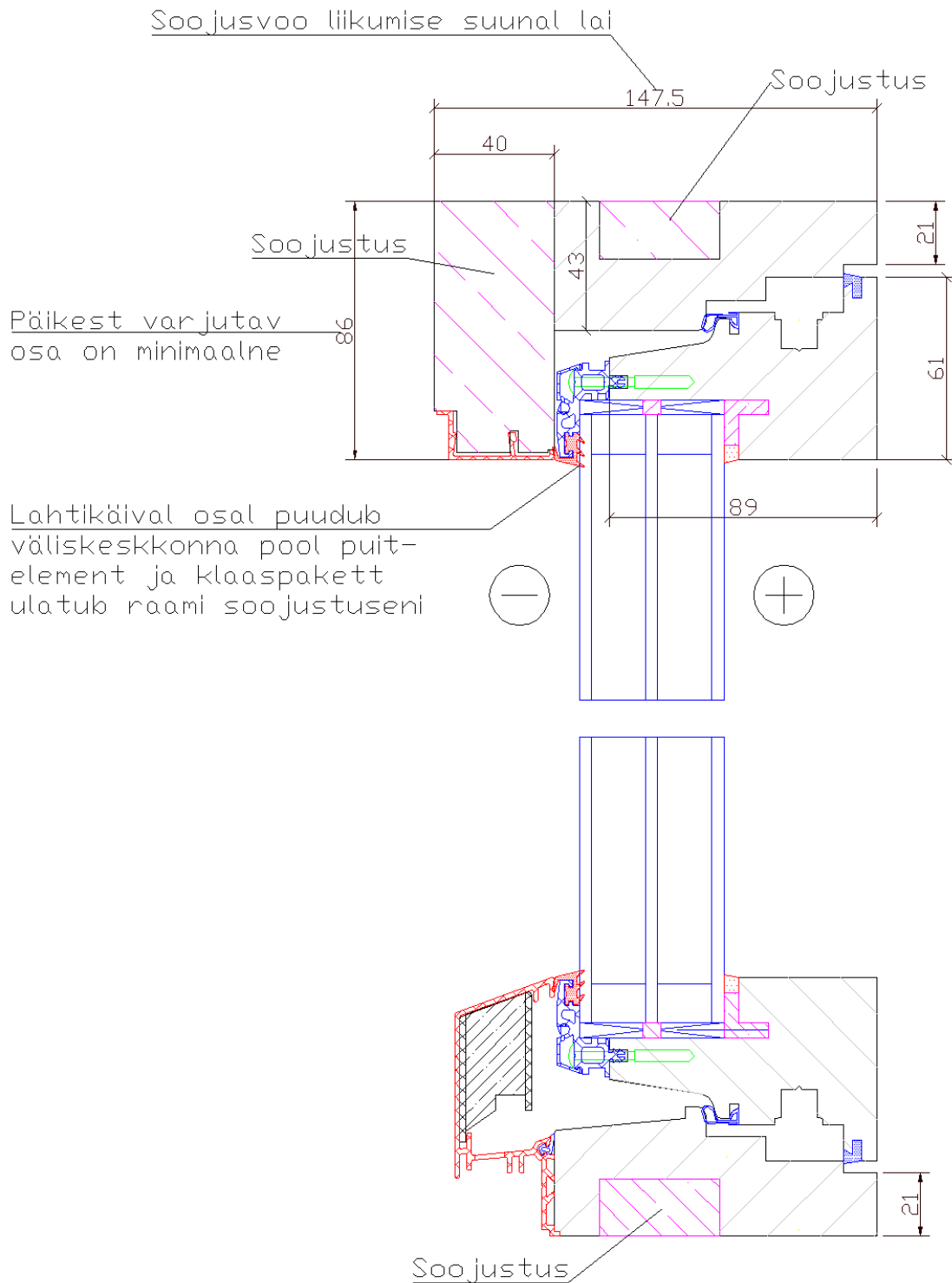
Tabel 6.2. Pro Passivhausfenster SmartWin soojustehnilised omadused. [59,60]

Tüüp	Raami soojusjuhtivus [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]		Standardmõõtudega (1,48 x 1,23 m) akna omadused	
	Alumine osa	Ülemine ja külgmise osa	Kaalutud keskmine raami soojusjuhtivus [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]	Kogu akna soojusjuhtivus $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ soojusjuhtivusega klaaspaketi puhul [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
Avanev	1,0	0,71	0,78	0,79
Mitteavanev	0,72	0,52	0,57	0,74

Selgub, et valitud aknaraami kaalutud keskmine soojusjuhtivus on $0,78 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ avaneva ning $0,57 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ mitteavaneva variandi puhul. Tuginedes peatükis 5.2 toodud informatsioonile, võib väita, et tegu on väga madalate väärtustega.

Joonis 6.3 kinnitab, et tegu on kitsa aknaraamiga. Samas on see soojusjuhtivuse vähendamise eesmärgil soojusvoo liikumise suunal ehk klaaspaketiga ristisuunas lai. Lisaks on joonisel näha väikese soojusjuhtivuse peamine põhjus – puitosal väliskeskkonna pool paikneb raami koosseisu kuuluv puitkiust soojustusmaterjal ja ka puitosas on süvistus, mis on täidetud sama soojustusmaterjaliga. Oluline on märkida asjaolu, et akna lahtikäival osal puudub väliskeskkonna poolel puitosa ja klaaspakett ulatub servani. Selline ehitus võimaldab välisseina soojustusega katta peaaegu kogu raami ehk osa, mis kaotab soojust ega võimalda -

erinevalt klaaspaketist - päikeseenergial ruumi siseneda. Joonisel 6.4 on toodud ka fotod vaatlusalusest aknaraamist, mis illustreerivad veelgi nimetatud aspekte.



Joonis 6.3. Pro Passivhausfenster SmartWin avaneva aknaraami ülemise ja alumise osa ristlõige. Joonise autor on Pro Passivhausfenster, täiendused käesoleva töö autori poolt. Lilla värviga on tähistatud soojustusmaterjal ja punasega väliskeskkonnas aknaraami kattev alumiiniumprofiil, hall viirutus tähistab puitu.



Joonis 6.4. Töö autori fotod Pro Passivhausfenster SmartWin aknaraamist: a) raami puitosa peal paiknev soojustusmaterjal on hallikasvalge ja puitosa sisse süvistatud soojustusmaterjal tumepruuni värvusega; b) lisaks puidule ning soojustusmaterjalidele on näha raami alumist osa kattev alumiiniumkonstruktsioon, mis on vajalik vihmavee suunamiseks; c) lõplikult viimistletud aken vahtpolüstüreeniga soojustatud seinas: väliselt on näha vaid väga väikest osa aknaraamist, klaaspakett lõpeb sisuliselt soojustuse ääres; d) lähem võtte aknaraami äärest puitlaudisega välisseina puhul – puitlaudis lõpeb avaneva akna raami ääres; e) avatud aken, on näha, et klaaspaketi äär jõuab avaneva osa välisserva; f) lõplikult viimistletud akna ümbrus sisekeskkonnas.

6.2.2. Väikese soojusjuhtivusega kitsa aknaraami võrdlus alternatiivsete toodetega

Kontrollimaks, milline on vaatlusaluse hoone puhul erinevate omadustega aknaraamide mõju kogu hoone energiavajadusele, teostati energiaarvutused, kasutades kolme erineva aknaraami andmeid (tabel 6.3). Esimene neist oli vaatlusaluses hoones kasutatav kitsas väikese soojusjuhtivusega aknaraam (1), teine samuti PHI³ sertifikaadi nõudeid täitev, ent lai aknaraam (2) ja kolmas tavapärase puitraam (3). Lisaks aknaraami soojustehnilistele omadustele on erinevate variantide puhul muudetud ka akna kinnituse külmasilla määra, kuna tavaliste ja võrdluses kasutatud väikese soojusjuhtivusega laia aknaraami puhul ei ole võimalik raami piisavalt suures ulatuses (oluline on soojustusega kaetud raami osakaal) välisseina soojustusmaterjaliga katta. Seda peamiselt seetõttu, et märkimisväärne osa raamist on liikuv ehk kuulub lahtikäivasse ossa. Sellegipoolest on võrdluses andmetele lähenetud konservatiivselt ning määratud teise ja kolmanda variandi paigalduse joonkülmasilla lisakonduktantsiks energiatõhusate hoonete soovituslik tüüpväärts [18]. Tegelikuses võib nende variantide puhul oodata oluliselt suuremaid numbreid.

Tabel 6.3. Energiaarvutuses kasutatud erinevate aknaraamide soojustehnilised omadused ja mõõdud.

Variandid	Tüüp	Standardmõõtudega (1,48 x 1,23 m) akna omadused		Keskmine akna paigalduse joonkülmasilla lisakonduktants
		Kaalutud keskmine raami soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	Raami laius (cm)	
1	Avanev	0,78	8,6	0,020 W/mK
	Mitteavanev	0,57	8,6	
2	Avanev	0,75	15,0	0,040 W/mK
	Mitteavanev		15,0	
3	Avanev	1,60	15,0	0,040 W/mK
	Mitteavanev		15,0	

Kõik ülejäänud hoone parameetrid on võrdluses jäetud muutumatuks, sh ka klaaspaketi soojustehnilised näitajad. Selline lähendus on tegelikus elus mõnevõrra ebareaalne, kuna on selge, et krüptoniga täidetud kolmekordne klaaspakett ei ole tüüpiline valik tavalise puitakna puhul, kuid eesmärgiks on aknaraami võrdlus ja seega võib teha mõõnduse ning nimetatud ebareaalset lahendusi kasutada, sest ainult siis on võimalik kindlalt väita, et arvutustulemuste erinevus tuleneb vaid aknaraami muutmisest.

³ Darmstadt-i Passiivmaja Instituut

6.2.3. Erinevate aknaraamide võrdluse tulemused ja arutelu

Ülalnimetatud kolme erineva aknaraami andmetega koostati tarkvarapaketi PHPP2007 abil vaatlusaluse hoone energiabilansid ja arvutati hoone süsihappegaasi emissioon. Energiaarvutuses kasutatud olulisemad lähteandmed hoone kohta on toodud peatükis 6.1 ja arvutusmetoodika on kirjeldatud peatükis 3.1 ja 3.2.

Tabel 6.4. Energiaarvutuste tulemused – hoone neto kütteenergiavajadus ja hoonesse sisenev päikese vabaenergia erinevate variantide puhul. Tulemused on taandatud hoone kōetava pinna kohta.

Variandid	Hoone neto kütteenergiavajadus		Hoonesse sisenev päikese vabasoojus*	
	kWh/a	kWh/m ² a	kWh/a	kWh/m ² a
1	4153	14,8	7566	27,0
2	5192	18,5	6401	22,8
3	7365	26,2	6401	22,8

* Erinevalt neto kütteenergiavajadusest on tabelis toodud hoonesse sisenev päikese vabasoojus arvatud fikseeritud kütteperioodi kohta, kuna EVS EN 13790 [17] standardi kuubilansi meetodikas muutub erineva kütteenergiavajadusega hoonete kütteperiood ja vastavalt sellele ka kütteperioodil hoonesse sisenev päikeseenergia – mida rohkem sügise alguse ja kevade lõpu poole kütteperiood ulatub, seda rohkem siseneb majja päikesekiirgust ja seega on raske võrrelda erinevaid variante; seega ei oleks kuubilansi meetodil toodud andmetega võimalik adekvaatselt võrrelda erinevate variantide mõju.

Tulemustest (tabel 6.4) selgub, et aknaraami soojusjuhtivusel ja selle mõõtmel ning ülesehitusel on Eesti kliimas märkimisväärne mõju kogu hoone energiavajadusele. Isegi kahe passiivmajale sobiliku aknaraami nõudeid täitva variandi erinevus on 20%. Uurides hoonesse siseneva päikese vabasoojuse hulka, selgub, et sama perioodi jooksul siseneb kitsama aknaraami puhul hoonesse ligikaudu 15% enam päikesekiirgust. Teise ja kolmanda variandi puhul on sisenev päikesekiirgus muidugi mõista sama, kuna lähteandmetes kasutatud mõõtmel olid mõlemal juhul identsed. Erines raami soojusjuhtivus ning seetõttu on nende variantide puhul hoone kütteenergiavajaduse erinevus ligikaudu 29%. Esimese ja kolmanda variandi puhul on vastav erinevus 44%.

Kasutades GEMIS [21] mudeli andmestikku on tarkvarapaketi PHPP2007 abil arvatud ka hoone kütisel tekkiv süsihappegaasi emissioon erinevate variantide puhul. Vaatlusaluses hoones on kasutusel maa-vesi soojuspump (arvesse on võetud kasutegur 3,0) ja seega on CO₂ emissioonifaktor 0,68 kg/(kWh_{lõppenergia}), mis vastab Euroopa keskmisele elektrienergia tootmisel tekkivale süsihappegaasi emissioonile [18]. Ootuspäraselt korreleerub erinevate variantide süsihappegaasi emissioon kütteenergiavajaduse erinevusega (tabel 6.5).

Tabel 6.5. Hoone kütmisel tekkiv CO₂ emissioon erinevate variantide puhul, kasutades soojuspumba kasutegurit 3,0 ja CO₂ emissioonifaktorit 0,68 kg/(kWh_{lõppenergia}). Tulemused on taandatud hoone kõetava pinna kohta.

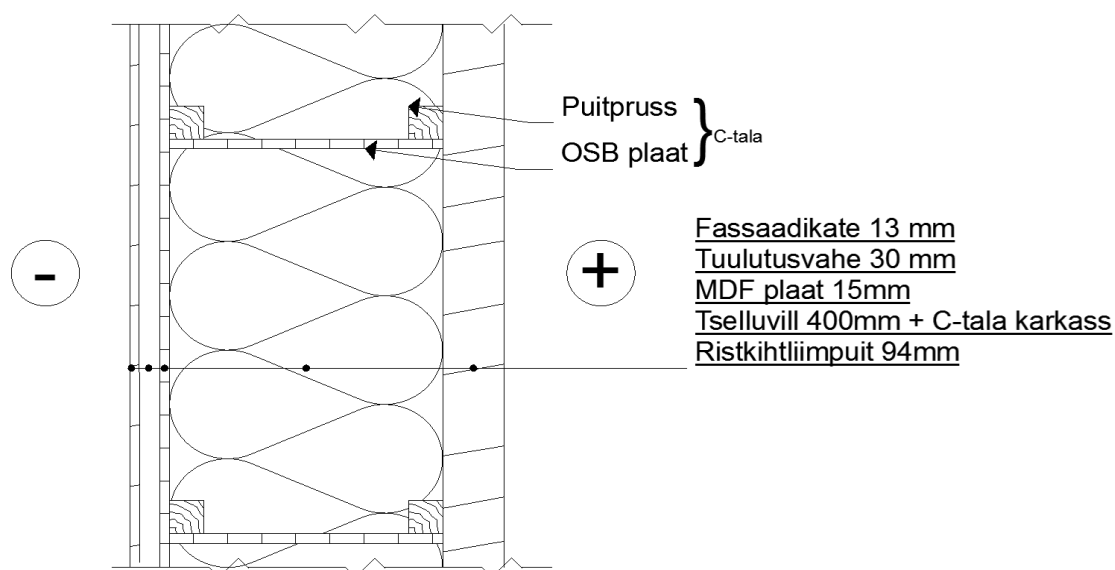
Variandid	Hoone kütmiseks vajaminev lõppenergia		Hoone kütmisel tekkiv CO ₂ emissioon aastas	
	kWh/a	kWh/m ² a	kg	kg/m ²
1	1431	5,1	973	3,5
2	1768	6,3	1202	4,3
3	2469	8,8	1679	6,0

6.3. Aknapaigalduse optimeerimine

Peatükis 4.3 selgus, et ka akna paigaldussügavusel ja konkreetsel konstruktsioonisolmel võib olla arvestatav mõju hoone kütteenergiavajadusele.

Käesoleva töö raames seati ülesandeks leida valitud heade omadustega aknaraamile optimaalseim asukoht, mille puhul oleks tagatud suurim energiasääst ja ka konstruktiivne lihtsus ning töökindlus. Selleks loodi esmalt võimaliku konstruktsioonisolme ettepanek, mille alusel koostati 13 erinevat varianti, kus aknaraam paigutati 3 cm sammuga eri sügavusele välisseinas. Ühtlasi täitsid need arvutused eesmärki kontrollida aknapaigalduse optimeerimise mõju väga energiatõhusa hoone puhul Eesti kliimas.

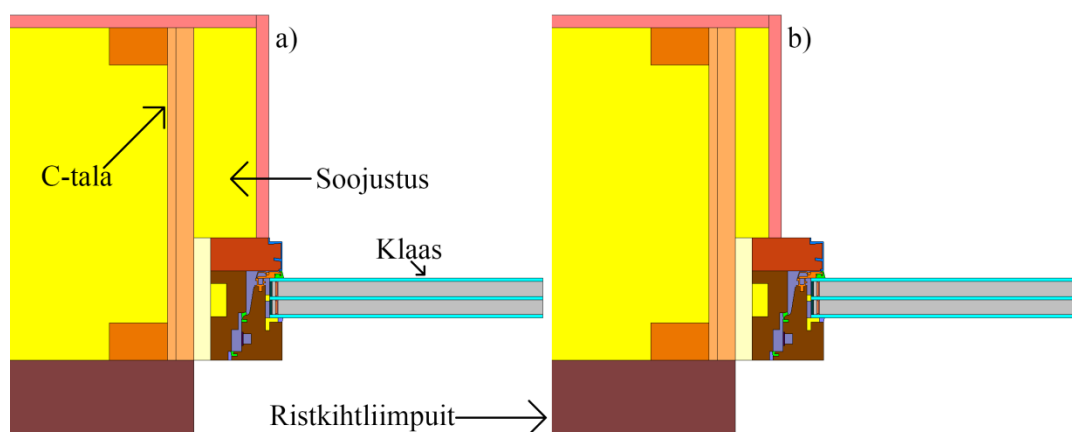
Lähteandmeteks oli valitud aknaraami (vt peatükk 6.2) tehnilised joonised ja parameetrid ning välisseina konstruktsioon (joonis 6.5). Aknapaigalduse konstruktsiooni ettepaneku aluseks võeti varasemate uuringute alusel (vt peatükk 5.3) kinnitust leidnud põhimõtted, et aknaraam võiks paikneda soojustuskihis ning olla võimalikult suures ulatuses välisseina soojustusega kaetud. Konstruktiivse lahenduse ehituslikku toimivust hindas vaatlusaluse hoone üldehitust teostanud ettevõtte spetsialist Valter Kõrgekuhi.



Joonis 6.5. Vaatlusaluse hoone välisseina horisontaalne lõige.

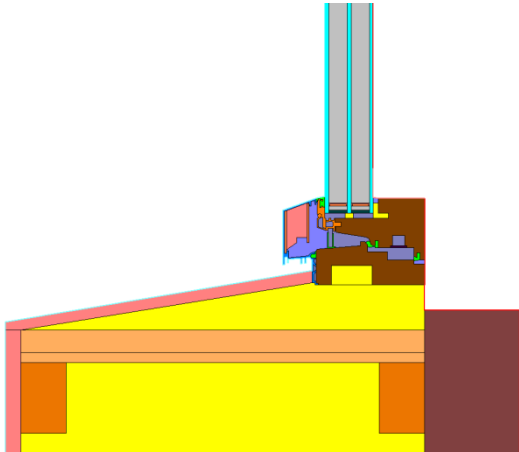
Esmase ettepaneku loomisel oli olulisim konstruktiivne lihtsus ja seega asetati aknaraam vahetult välisseina kandevkonstruktsiooni kõrvale ning lepiti kokku, et juhul kui arvutustulemustest kerkib esile mõni muu oluliselt parem aknaraami asend, siis teostatakse paigaldus vastavalt sellele.

Järgmise sammuna optimeeriti aknaraami katva soojustuskihi paksust. Esimeses lähenduses eeldati, et kogu aknaraam on välisseina soojustusega kaetud [joonis 6.6 a)], kuid sellel juhul osutus probleemiks asjaolu, et kuna välisseina oli plaanitud tagant tuulutatav krohvitud fassaadisüsteem, mis pidi katma ka aknapõski, ei olnud võimalik piisavalt suurel määral aknaraami välisseina soojustusmaterjaliga katta ning seega joonestati uus lahendus [joonis 6.6 b)], kus aknaraami katab 40 mm paksune soojustuskiht (esialgsega võrreldes 35 mm õhem). Siinkohal võib arutleda, et tekkinud probleemi tõttu pole tavalisel ning soojustusega katmiseks ettenähtud aknaraamil vahet, kuna kumbagi ei saa piisaval määral soojustada. Siiski on erinevus olemas – oluline on soojustusega kaetud raami osakaal, mitte absoluutarv ning seega jääb igal juhul tavaline aknaraam kehvemasse seisule.



Joonis 6.6. Käesoleva töö autori ettepanekud aknaraami paigutamiseks: a) esialgne variant - soojustusega on kaetud maksimaalne osa aknaraamist - toimiv lahendus siis, kui välisseina fassaadikiht asub vahetult tuuletõkkeplaadi peal; b) vähendatud soojustuse ülekattega variant tuulutatava fassaadilahenduse tarbeks.

Joonisel 6.6 (b) esitatud akna külgmisele kinnitusele vastab joonisel 6.7 toodud aknaraami alumise osa konstruktsioon. Aknaraami ülemise kinnituse konstruktsioon on külgmisega identne.



Joonis 6.7. Käesoleva töö autori ettepanek aknaraami alumise osa konstruktsioonile.

6.3.1. Erinevate paigaldussituatsioonide võrdlus

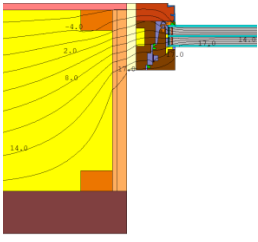
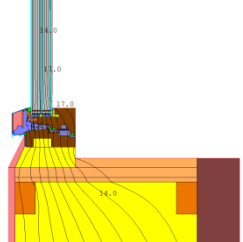
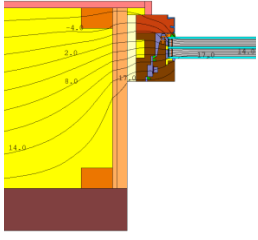
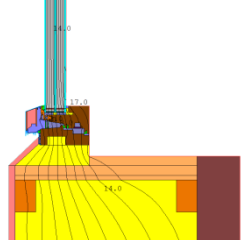
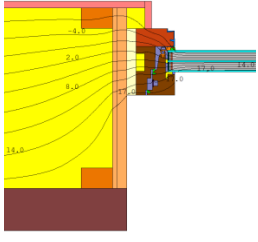
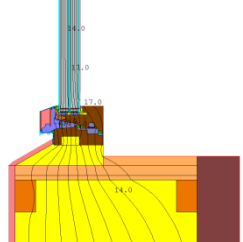
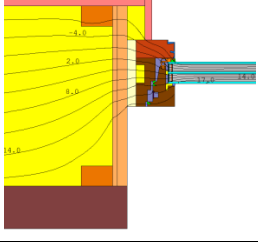
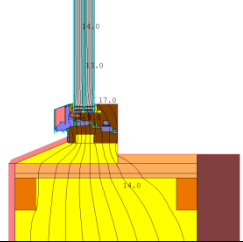
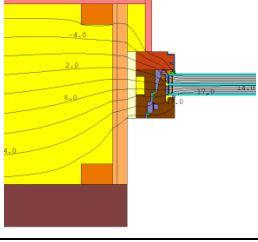
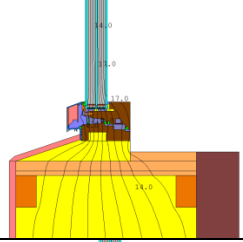
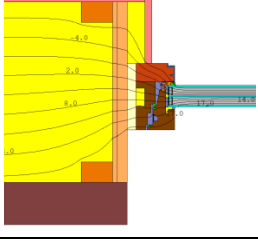
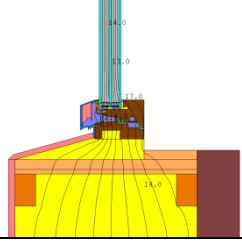
Ülalkirjeldatud variant (b) hinnati sobivaks ning järgmise sammuna oli vajalik leida optimaalseim paigaldussügavus. Selleks koostati nii külgmise (identne ülemisega) kui alumise konstruktsioonisõlme 13 erinevat varianti, mille kohta arvatati rakendustarkvara THERM 6.3 abil (metoodika on kirjeldatud peatükis 3.2) vastavad joonkülmasilla lisasoojusjuhtivuse väärtused.

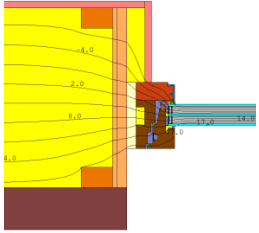
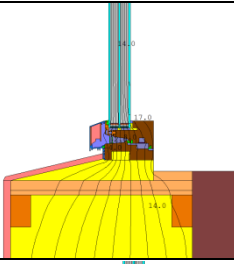
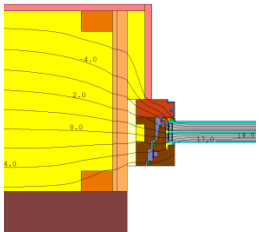
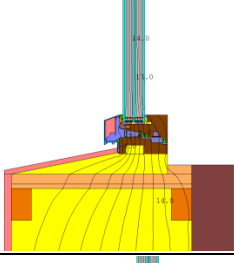
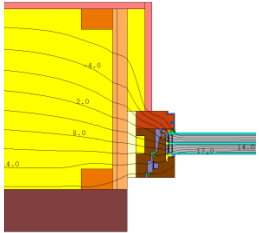
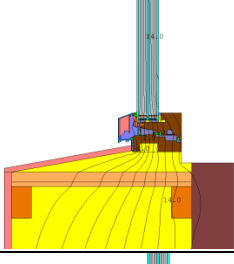
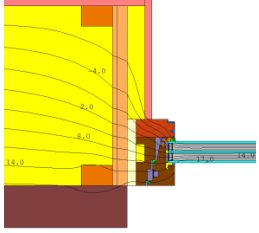
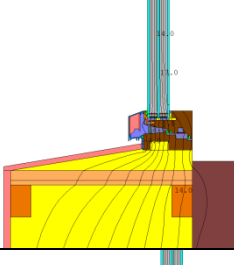
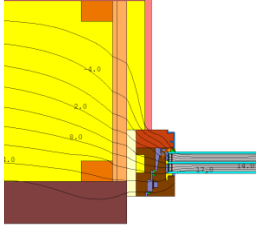
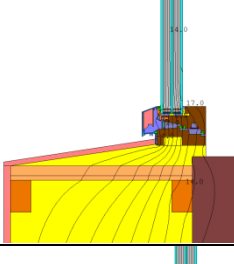
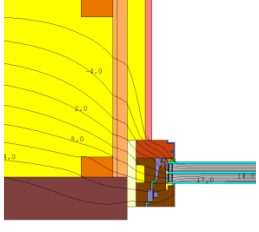
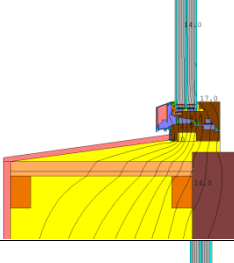
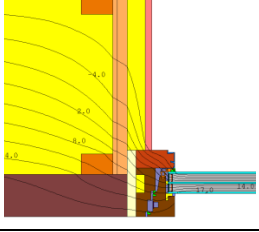
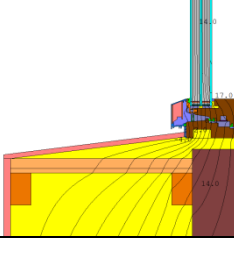
Kasutades leitud väärtusi, koostati rakendustarkvara PHPP2007 abil vaatlusaluse hoone energiabilansid igale variandile, kusjuures energiaarvutustes võeti arvesse ka aknapõse varjutavat mõju. See tähendab, et tulemuste kujundamisel oli määravaks kaks tegurit: energiakadu aknapaigalduse külmasildadest ning ruumi sisenev päikese vabaenergia.

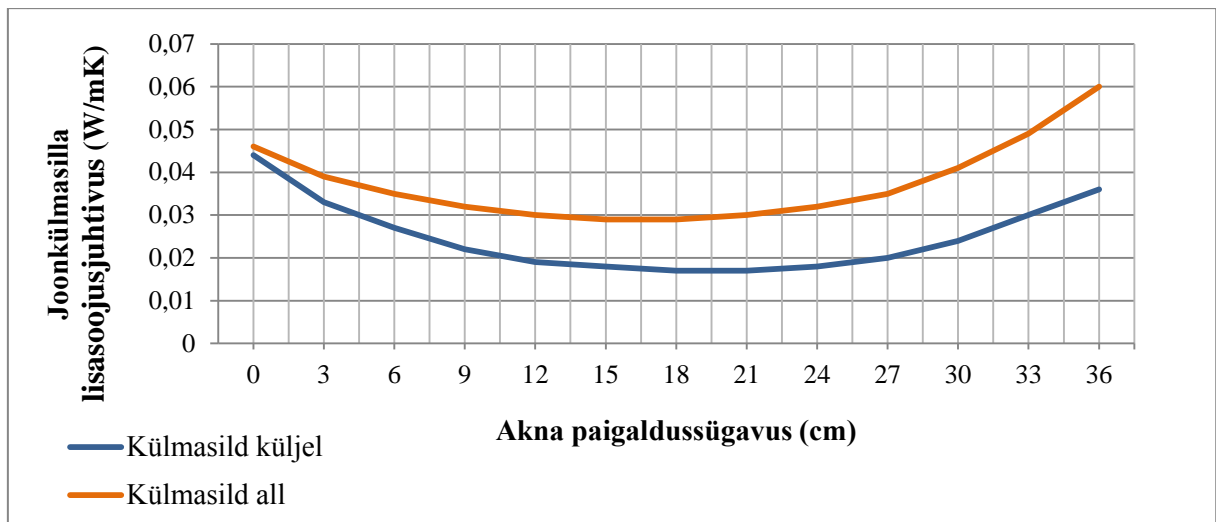
6.3.2. Erinevate paigaldussituatsioonide võrdluse tulemused ja arutelu

Tabelis 6.6 on toodud töö käigus koostatud soojusvoo simulatsioonide tulemusena saadud isothermpiltide kujutised.

Tabel 6.6 Rakendustarkvara Therm 6.3 abil teostatud soojusvoosimulatsioonide tulemused: isotermipildid ja joonkülmasilla lisasoojusjuhtivused numbrilise väärtusega.

Aknaraami kaugus väliseina äärest (cm)	Simulatsiooni tulemusena saadud isotermipilt ja joonkülmasilla lisasoojusjuhtivus [Ψ , (W/mK)]			
	Küljel		All	
0		$\Psi = 0,044$		$\Psi = 0,046$
3		$\Psi = 0,033$		$\Psi = 0,039$
6		$\Psi = 0,027$		$\Psi = 0,035$
9		$\Psi = 0,022$		$\Psi = 0,032$
12		$\Psi = 0,019$		$\Psi = 0,030$
15		$\Psi = 0,018$		$\Psi = 0,029$

18		$\Psi = 0,017$		$\Psi = 0,029$
21		$\Psi = 0,017$		$\Psi = 0,030$
24		$\Psi = 0,018$		$\Psi = 0,032$
27		$\Psi = 0,020$		$\Psi = 0,035$
30		$\Psi = 0,024$		$\Psi = 0,041$
33		$\Psi = 0,030$		$\Psi = 0,049$
36		$\Psi = 0,036$		$\Psi = 0,060$



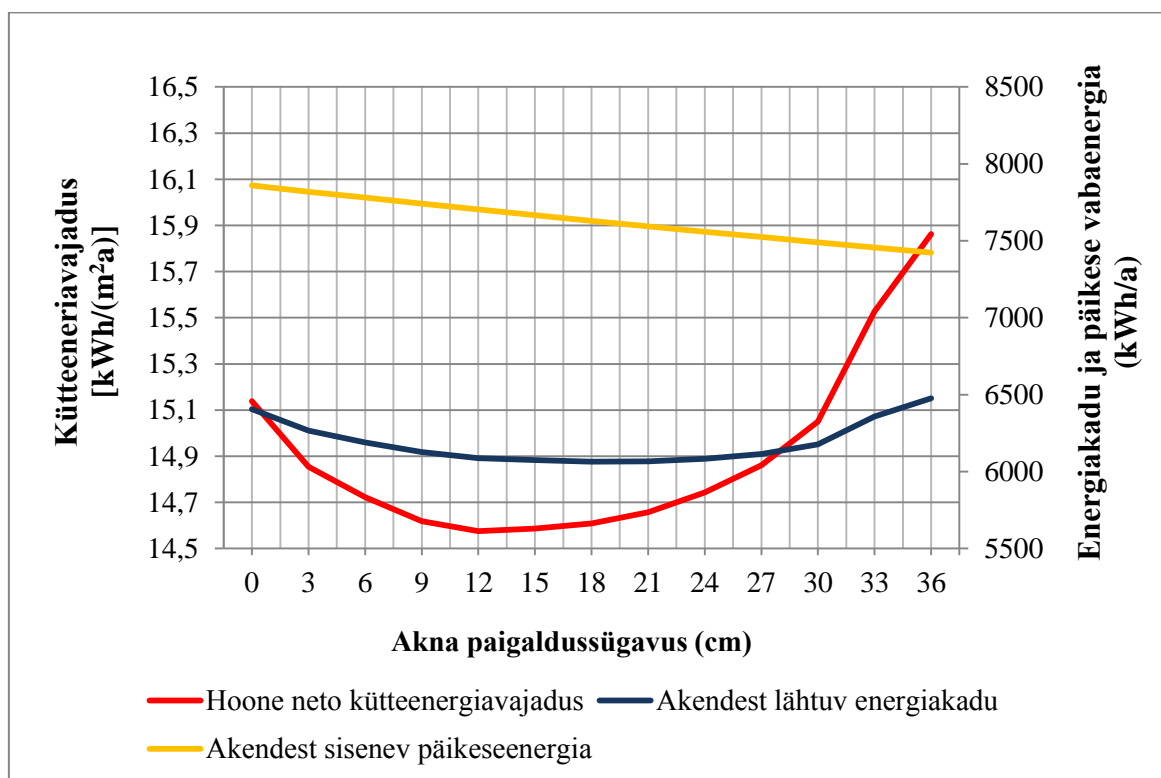
Joonis 6.8. Akna seinakinnituse joonkülmasililla lisasoojusjuhtivus ehk külmasilla ulatuse sõltuvus akna paigaldusügavusest.

Joonise 6.8 abil on võimalik analüüsida mitut aspekti. Esiteks kerkib esile asjaolu, et alumise seinakinnituse külmasilla ulatus on märgatavalt suurem kui külgmisel seinakinnitusel. Põhjus peitub eelkõige selles, et alumisel aknaraamil puudub kattev soojustus. Seega on aknapaigaldus seda olulisem, mida vähem on soojustuse ülekate ning tavaline aken on veelgi tundlikum. Teiseks on näha, et mida sügavamale sisekeskkonna suunas aken liigub, seda suuremaks kasvab erinevus alumise ja külgmise seinakinnituse külmasilla ulatuse vahel. Ka sellisel juhul on põhjuseks soojustuse ülekate – mida sügavamal on aken, seda paksem on soojustuse ülekate ning märgatavam selle efekt. Samas suureneb akent sügavamale liigutades ka väliste aknapõskede jahtuv pind, mistõttu on väikseim aknapaigalduse külmasilla ulatus antud juhul ligikaudu 12-24 cm sügavusel. Eeldatavasti on optimum nimetatud vahemikus, kuid kindla vastuse andmiseks on vajalik kontrollida ka aknapõskede varjutavat mõju ja hoone kui terviku kütteenergiavajaduse muutumist. Tabelis 6.7 on toodud PHPP2007 rakendustarkvara abil teostatud arvutuste tulemused ning joonisel 6.9 vastav diagramm.

Tabel 6.7. Energiaarvutuste tulemused: akendest lähtuv energiakadu, hoonesse sisenev päikese vabaenergia ja kütteenergiavajadus erinevate variantide puhul.

Aknaraami paigaldussügavus	Akendest lähtuv energiakadu*		Hoonesse sisenev päikese vabaenergia*		Hoone neto kütteenergiavajadus	
	kWh/a	kWh/m ² a	kWh/a	kWh/m ² a	kWh/a	kWh/m ² a
0	6405	22,8	7859	28,0	4248	15,1
3	6266	22,3	7819	27,9	4168	14,9
6	6189	22,1	7780	27,7	4131	14,7
9	6127	21,8	7742	27,6	4102	14,6
12	6088	21,7	7704	27,5	4090	14,6
15	6074	21,6	7667	27,3	4093	14,6
18	6064	21,6	7630	27,2	4099	14,6
21	6067	21,6	7594	27,1	4113	14,7
24	6084	21,7	7559	26,9	4137	14,7
27	6115	21,8	7566	27,0	4153	14,8
30	6176	22,0	7490	26,7	4223	15,0
33	6357	22,7	7457	26,6	4357	15,5
36	6477	23,1	7424	26,5	4451	15,9

* Erinevalt neto kütteenergiavajadusest on tabelis toodud akende energiakadu ja hoonesse sisenev päikese vabasoojus arvatud fikseeritud kütteperioodi kohta, kuna EVS EN 13790 [17] standardi kuubilansi meetodikas muutub erineva kütteenergiavajadusega hoonete kütteperiood ja vastavalt sellele ka kütteperioodil hoonesse sisenev päikeseenergia: mida rohkem sügise alguse ja kevade lõpu poole kütteperiood ulatub, seda rohkem siseneb majja päikesekiirgust ja nii on raske võrrelda erinevaid variante; seega ei oleks kuubilansi meetodil toodud andmetega võimalik adekvaatselt võrrelda erineva paigutuse mõju.



Joonis 6.9. Akendest lähtuva energiakao, hoonesse siseneva päikese vabaenergia ja kütteenergiavajaduse sõltuvus akna paigaldussügavusest.

Tulemustest selgub, et optimaalseim paigaldussügavus on 12 cm – sellel sügavusel on hoone kütteenergiavajadus madalaim. Joonist 6.9 analüüsid on näha, et kuigi energiakadu akendest muutub paigaldussügavuse vahemikus 12-24 cm väga vähe, on selle madalaim väärtus ligikaudu 20 cm (± 2 cm) paigaldussügavuse juures. Hoone kütteenergiavajaduse optimum ei lange aga sellega kokku, kuna sõltub lisaks ka akendest siseneva päikeseenergia hulgast ja viimane on väiksema paigaldussügavuse puhul suurem. Lisaks torkab silma järsk akende energiakao ja hoone kütteenergiavajaduse tõus ligikaudu 30 cm paigaldussügavuse juures. See on tingitud asjaolust, et alatest nimetatud sügavusest satub aknaraam kohakuti välisseina kandevkonstruktsiooniga (vt tabelis 5.6 toodud piktogramme).

Jättes välja selgelt ebasoodsad paigaldussügavused, on allesjäänud vahemiku (3-27 cm) soodsaima ning vähemsoodsamate situatsioonide puhul hoone kütteenergiavajaduse erinevuseks kõigest ligikaudu 2%. Sellest tulenevalt otsustati vaatlusaluse hoone akende paigaldusel kasutada esialgu väljapakutud varianti, kus aknaraam asetseb vahetult ristkihtliimpuitkilbi kõrval, kuna selline lahendus on kõige töökindlam. Joonisel 6.10 on toodud fotod teostatud aknapaigaldusest.



a) Joonis 6.10. Töö autori fotod aknapaigaldusest tööde käigus: a) avatud väline aknapõsk: soojustus ja katteplaat on lisamata, näha on C-tala OSB plaat; b) osaliselt avatud väline aknapõsk: küljel on näha katteplaat, ülemises osas soojustus.

Algselt arvati, et akna paigalduse optimeerimisel võib olla märkimisväärne mõju Eesti energiatõhusate hoonete puhul, kuid vähemalt vaatlusaluse maja näitel see nii ei ole. Põhjus peitub eelkõige selles (nagu ka jooniselt 6.8 näha võis), et soojustatud aknaraami puhul on paigaldussügavuse mõju väiksem. Kindlasti on vajalik vältida aknapaigaldusest lähtuvaid külmasildu, millel on arvestatav mõju hoone kütteenergiavajadusele (näiteks antud juhul akna liiga välja või liiga sisse paigutamisel), kuid edasine optimeerimine ei too oodatud kasu.

Tabelis 6.8 on toodud valitud variandi optimaalseima ning kõige ebasoodsama lahenduse puhul hoone kütmise tõttu tekkiv süsihappegaasi emissioon. Arvutused teostati tarkvarapaketi PHPP2007 abil kasutades peatükis 3.3 kirjeldatud meetodikat.

Tabel 6.8. Hoone kütmisel tekkiv CO₂ emissioon valitud akna paigaldussituatsioon ja optimaalseima lahenduse puhul, kasutades soojuspumba kasutegurit 3,0 ja CO₂ emissioonifaktorit 0,68 kg/(kWh_{lõppenergia}). Tulemused on taandatud hoone kõetava pinna kohta.

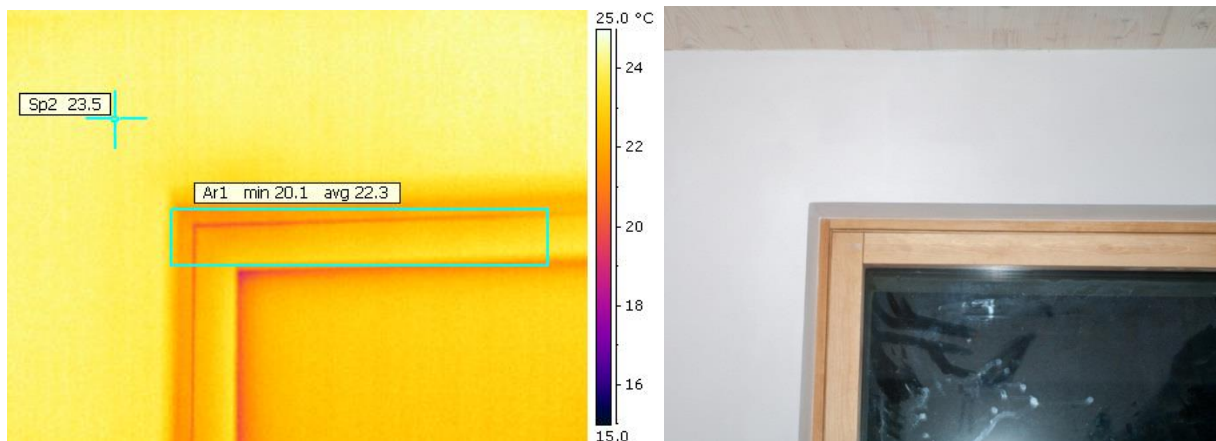
Variandid	Hoone kütmiseks vajaminev lõppenergia		Hoone kütmisel tekkiv CO ₂ emissioon aastas	
	kWh/a	kWh/m ² a	kg	kg/m ²
	1515	5,4	1030	3,7
Teostatud lahendus	1431	5,1	973	3,5
Optimaalseim lahendus	1403	5,0	954	3,4

Selgub, et optimaalseima lahendusega oleks teostatud paigaldusega võrreldes hoidnud igal aastal kokku 19 kg CO₂-heidet. Eestis oli 2009. aastal müüdnud uute sõiduautode keskmine CO₂-heite tase 170 g/km [61]. Seega antud juhul kokku hoitud 19 kg CO₂-heidet on ligilähedane 112 km läbimisel keskmise 2009. aastal soetatud autoga. Tegu on väga väikese kokkuhoiuga, mis aga võib näiteks liginullenergiahoonete [8] projekteerimisel siiski oluline olla, kuid ajamahukas optimeerimistöö osutub otstarbekaks alles juhul, kui muud energiakao vähendamise meetodid on juba kasutusel või pole neid võimalik rakendada.

6.3.3. Valitud lahenduste kontroll infrapuna termograafia meetodil

Valitud aknaraami ja paigaldussituatsiooni soojustehniline toimivuse kontrollimiseks teostas käesoleva töö autor 8. jaanuaril 2013 infrapuna termograafia mõõdistuse (meetodika on kirjeldatud peatükis 3.4).

Mõõdistuse käigus leiti, et valitud kombinatsioon toimib suurepäraselt: välistemperatuuri -6 °C ja sisetemperatuuri +24 °C juures oli keskmine aknaraami pinnatemperatuur ligikaudu 22 °C ja madalaimad leitud temperatuurid jäid ligikaudu +20 °C juurde. Peatükis 5.2.3 kirjeldatud temperatuuriindeks f_{Rsi} on selliste tingimuste juures 0,87 ehk hallituse risk puudub täielikult ning kuna ruumi sise- ja aknaraami keskmise pinnatemperatuuri erinevus on vaid ligikaudu 2 °C, on ka soojuslik mugavus tagatud. Joonisel 6.11 on toodud mõõdistuse käigus salvestatud termogramm ja samast kohast salvestatud tavafoto.



Joonis 6.11. Infrapuna termograafia mõõdistuse käigus salvestatud termogramm ja tavafoto ühest vaatlusaluse hoone tüüpilisest aknast.

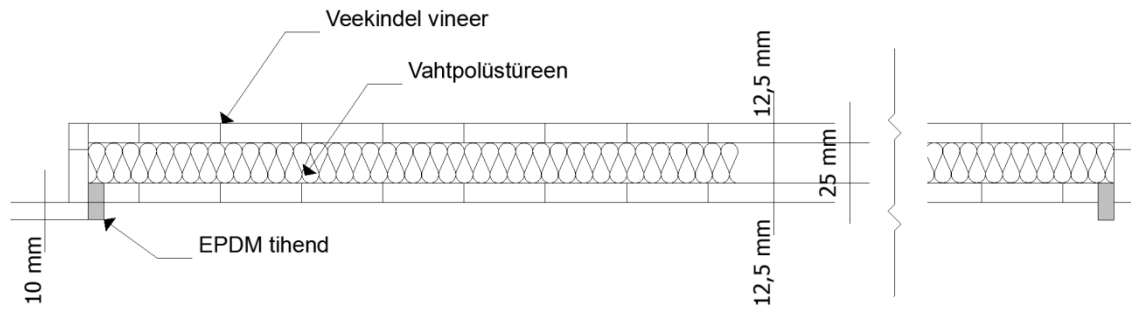
6.4. Soojustatud varjatusmehhanismi kasutamine

Eelnevalt on selgunud, et võrreldes passiivmajale sobiliku, ent keskpäraste omadustega aknaraamiga, on kitsa soojustatud aknaraami kasutamisega võimalik vähendada hoone kütteenergiavajadust 20% võrra. See on üllatavalt suur erinevus, kuid ei pruugi olla piisav, et näiteks vähemkompaktse ja keerulise arhitektuuriga hoone puhul saavutada soovitud energiatõhususe tase. Lahendusena on käesoleva töö autor välja pakkunud varjatusmehhanismi kasutamise, kus soojustatud paneel liigutatakse külmal ja pimedal ajal aknale ette.

6.4.1. Sobiva lahenduse leidmine

Käesolevas peatükis kirjeldatud töö eesmärgiks oli leida mõistliku paksuse ja vastupidava konstruktsiooniga, kuid piisava soojusthoidva efektiga soojustusplaadi põhimõtteline ülesehitus. Oluline oli leida kontseptuaalne lahendus ja kontrollida selle toimivust akende energiakao vähendamisel.

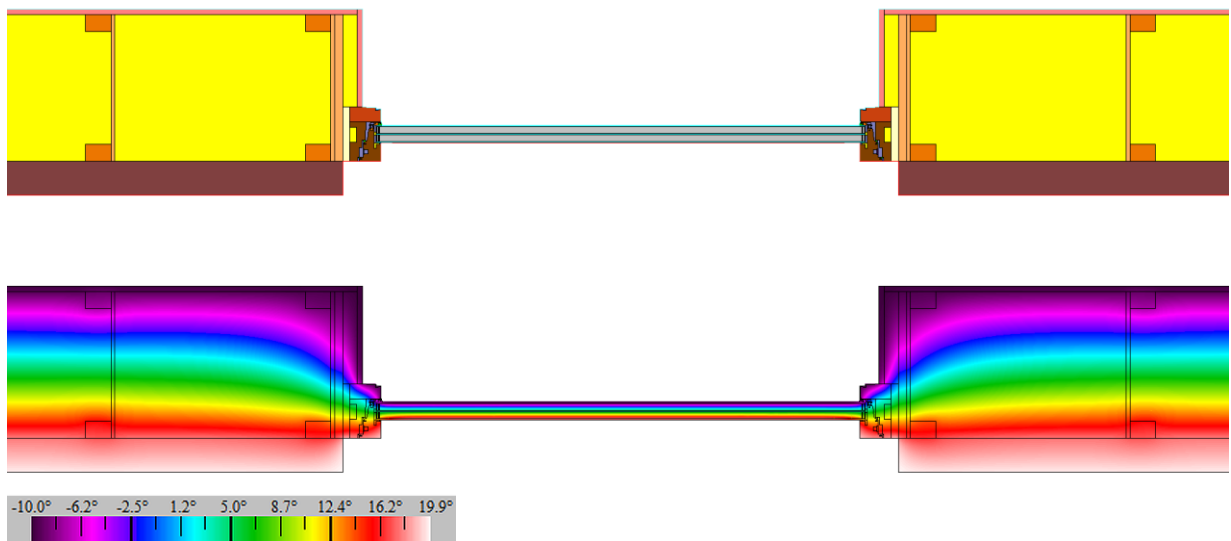
Esimese lahendusena pakkus töö autor välja vahtpolüstüreenkihist ja veekindlast vineerist koosneva soojustusplaadi. Tööst jäi välja spetsiifiline tootearendus, kuid võimalikult täpsete arvutustulemuste eesmärgil koostati hüpoteetilise toote põhimõtteskeem (joonis 6.12), kus on näha soojustusmaterjal, seda kaitsev vineer ja äärtes olevad tihendid, mis takistavad välisõhu liikumist plaadi taha.



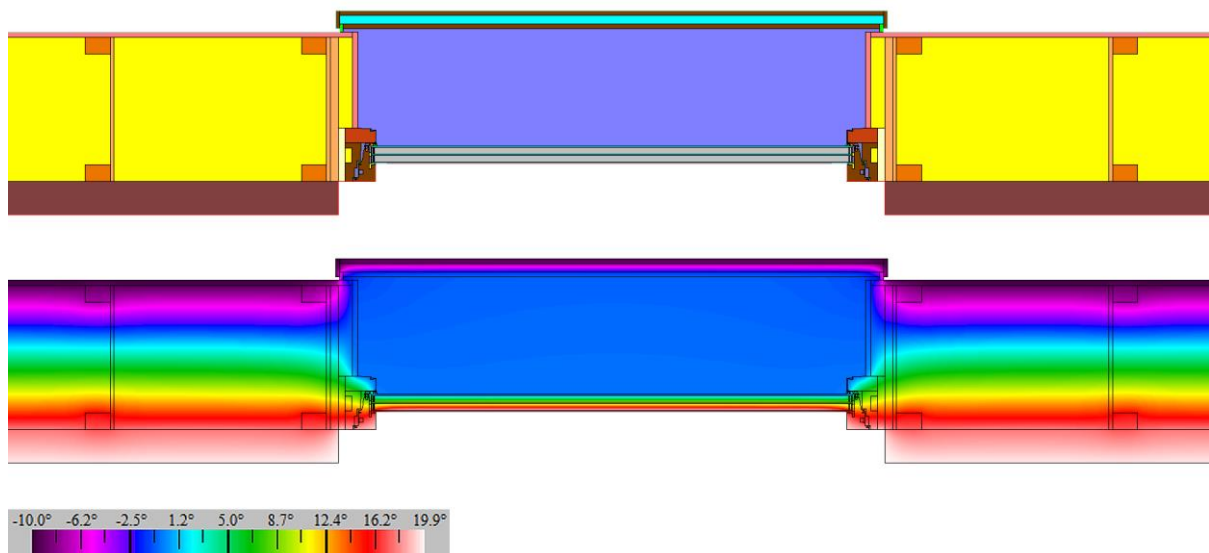
Joonis 6.12. Hüpeteetiline joonis soojustatud varjutusmehhanismist.

Joonisel 6.12 toodud plaadi soojusjuhtivus on $0,89 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ehk mõnevõrra kõrgem kui kolmekordsel klaaspaketil, kuid madalam kahekordsest argoontäite ja selektiivkattega klaaspaketi soojusjuhtivusest.

Hindamaks, kuidas ülal esitatud varjutusmehhanismi kasutamisega väheneks hoone kütteenergiavajadus, koostati esmalt kahemõõtmelised soojusvoo simuleerimise mudelid nii näidisobjektil teostatud seina ja akna konstruktsiooni (joonis 6.13) kui varjutusmehhanismiga täiendatud konstruktsiooni kohta (joonis 6.14).



Joonis 6.13. Standardmõõtmega akna ja seda ümbritseva seinakonstruktsiooni soojusvoo simuleerimise mudel näidisobjektil teostatud situatsiooni kohta koos simulatsiooni tulemusena saadud temperatuuriväljade visulatsiooniga.



Joonis 6.14. Standardmõõtmega akna ja seda ümbritseva seinakonstruktsiooni soojusvoo simuleerimise mudel soojustatud varjutusmehhanismiga koos simulatsiooni tulemusena saadud temperatuuriväljade visulatsiooniga.

Arvutusmodelites kasutati näidisobjektil realiseeritud sein ja aknakinnituse konstruktsiooni ning klaaspaketti, mille soojusjuhtivuse väärtus vastab vaatlusaluse hoone akende keskmisele [0,56 W/(m²K)]. Varjutusmehhanismiga mudelis on eeldatud, et soojustusplaadi ja klaaspaketi vahele jääv ala on väheventileeritav õhk (vastavalt EVS EN ISO 10077-2 [20] standardile defineeritakse väheventileeritavaks kõik ruumid, mis on 2 - 10 mm laiuse avavuse kaudu väliskeskkonnaga ühenduses), sest võib eeldada, et plaadi tihendid ei ole täielikult õhupidavad, kuna tegu on igapäevaselt liikuva mehhanismiga.

Seejärel leiti akna osast lähtuv soojuse erikadu (soojusvool sise- ja väliskeskkonna temperatuurierinevuse kohta, mis läbib neid kahte keskkonda ühendavat tarindit), st lahutati tervikliku simulatsioonimudeli soojuse erikaost sein osa ja võrreldi mõlema variandi tulemusi (tabel 6.9).

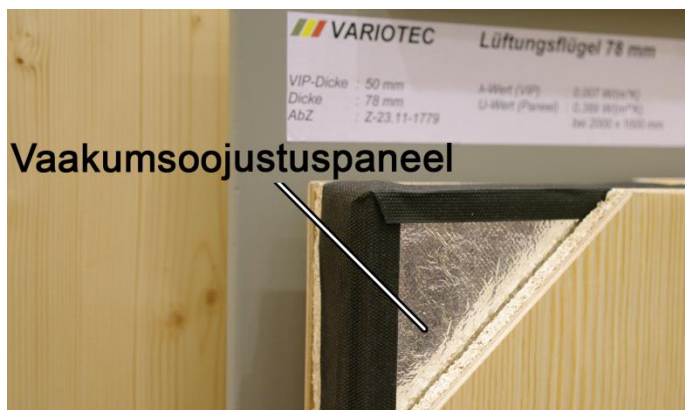
Tabel 6.9. Vaatlusalusel näidisobjektil teostatud olukorra ja liigutatava soojustatud varjutusmehhanismiga lahenduse soojuse erikaod.

Variandid	Simulatsiooni tulemusena saadud tervikmudeli soojuse erikadu [W/(mK)]	Seina osa soojuse erikadu [W/(mK)]	Akna osa (paigalduse külmasild, raam, klaas) soojuse erikadu [W/(mK)]
Esialgne	1,128	0,184	0,944
Varjutusmehhanismiga	0,832		0,648

Arvutustulemustest selgub, et soojuse erikadu akna osast on varjutusmehhanismiga ligikaudu 31% väiksem. Arvestades, et soojustatud plaati kasutatakse aknaava ees vaid piiratud aja jooksul, ei anna see tõenäoliselt märkimisväärset efekti.

Kuigi vahtpolüstüreen on madala soojusjuhtivusega materjal, on seda sellises varjutusmehhanismis võimalik kasutada vaid vähese (antud juhul 25 mm) paksusega. Suurema efekti tarbeks oleks vaja kasutada materjale või tooteid, mille soojuseri juhtivus on väiksem – näiteks vaakumsoojustuspaneel.

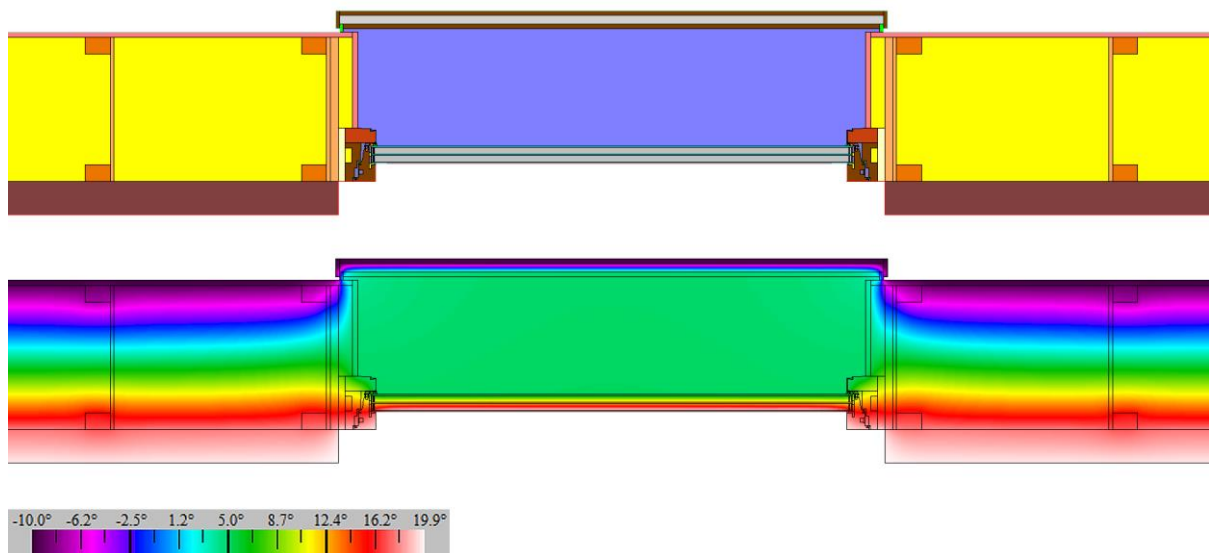
Vaakumsoojustuspaneel kasutatakse peamiselt sellistes seinakonstruktsioonides, kus pole arhitektuursete piirangute tõttu võimalik kasutada soovitud seinasoojusjuhtivuse saavutamiseks piisavalt paksu mineraalvilla, vahtpolüstüreeni või muid materjale. Joonisel 6.15 foto vaakumsoojustuspaneeli kasutamise näidist välisseinas. Käesoleva töö autor arvab, et see võiks kasutust leida ka soojustatud varjutusmehhanismis.



Joonis 6.15. Töö autori foto vaakumsoojustuspaneeli kasutamise näitest. Foto võetud 2012. aastal Saksamaal Hannoveris peetud 16. Rahvusvahelisel Passiivmajakonverentsil.

Vaakumpaneeliga soojustatud plaadi soojusjuhtivus on $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ehk ligi kaks korda madalam kui vaatlusaluse näidishoone kolmekordse krüptoontäite ja selektiivkatetega klaaspaketil ja ligikaudu 3,6 korda madalam kui vahtpolüstüreeniga soojustuspaneelil.

Sellest tulenevalt teostati soojusvoogude simulatsioon (joonis 6.16), kus vahtpolüstüreeni asemel on kasutusel vaakumsoojustuspaneel (erisoojusjuhtivus $0,007 \text{ W}/(\text{mK})$, paksus 25 mm [62]). Võrreldes joonist 6.16 joonisega 6.14, on näha selget temperatuuriväljade jaotuse erinevust.



Joonis 6.16. Standardmõõtmega akna ja seda ümbritseva seinakonstruktsiooni soojusvoo simuleerimise mudel vaakumpaneeliga soojustatud varjutusmehhanismiga koos simulatsiooni tulemusena saadud temperatuuriväljade visulatsiooniga.

Vaakumpaneeli puhul on soojuse erikadu akendest ligikaudu 50% väiksem kui ilma igasuguse lisasoojustuseta lahendusel (tabel 6.10) ja seega võib arvata, et tegu on edasiseks arendamiseks sobiva kontseptsiooniga.

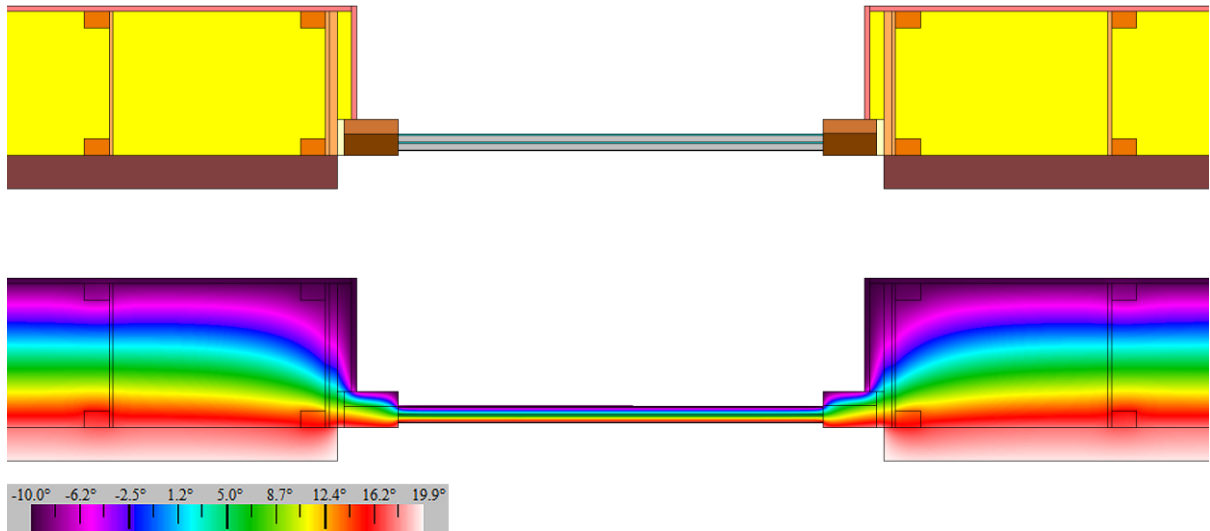
Tabel 6.10. Vaatlusel näidisobjektidel teostatud olukorra ja liigutatava soojustatud varjutusmehhanismiga lahenduse (vaakumpaneeliga variant) soojuse erikaod.

Variandid	Simulatsiooni tulemusena saadud tervikmudeli soojuse erikadu [W/mK]	Seina osa soojuse erikadu [W/(mK)]	Akna osa (paigalduse külmasild, raam, klaas) soojuse erikadu [W/(mK)]
Esialgne	1,128	0,184	0,944
Varjutusmehhanism vaakumpaneeliga	0,661		0,477

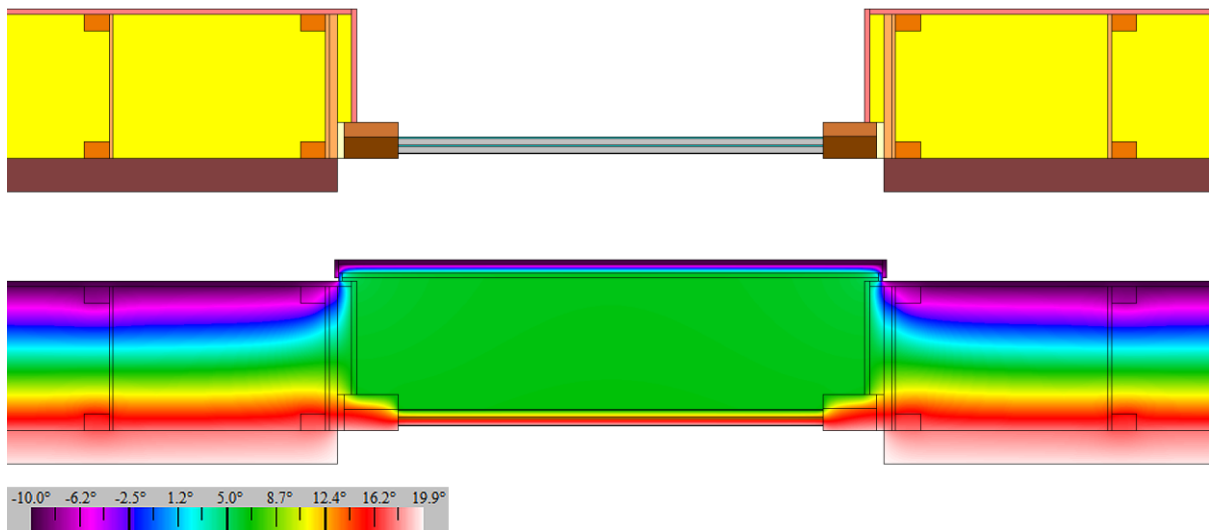
6.4.2. Soojustatud varjutusmehhanismi mõju erineva tõhususega akende puhul

Kuna erineva tõhususega akende puhul võib soojustatud varjutusmehhanismi mõju olla erinev, teostati selle võimaluse kontrolliks täiendav soojusvoogude simulatsioon, kus on kasutusel vaakumsoojustuspaneel, kuid aknaraam vastab peatükis 6.2.2 toodud 2. variandile.

Selleks konstrueeriti esmalt hüpoteetiline akna mudel vastavalt lähteandmetele [15 cm lai soojustatud raam U-arvuga 0,75 W/(m²K)] ning seejärel vastavad simulatsioonimudelid ilma varjutusmehhanismita (joonis 6.17) ja koos varjutusmehhanismiga (joonis 6.18).



Joonis 6.17. Standardmõõtmega kehvema tõhususega akna ja seda ümbritseva seinakonstruktsiooni soojusvoo simuleerimise mudel koos simulatsiooni tulemusena saadud temperatuuriväljade visulatsiooniga.



Joonis 6.18. Standardmõõtmega kehvema tõhususega akna ja seda ümbritseva seinakonstruktsiooni soojusvoo simuleerimise mudel vaakumpaneeliga soojustatud varjutusmehhanismiga koos simulatsiooni tulemusena saadud temperatuuriväljade visulatsiooniga.

Simulatsioonide tulemuste alusel on koostatud tabel 6.11, kust selgub, et vaakumpaneeliga soojustatud variandil on madalama tõhususega akna korral ligikaudu 50% väiksem aknast lähtuv soojuse erikadu ehk erinevus kõrgema tõhususega akendega puudub. Seega eeldatakse edaspidi, et passiivmajale sobilike akende kasutamise puhul on, olenemata nende tõhususest, vaakumpaneeliga soojustatud varjutusmehhanismi kasutamisega saadav soojuse erikao kokkuhoid 50%.

Tabel 6.11. Akna soojuse erikadu madalama tõhususega akna kasutamise korral ilma ja koos liigutatava soojustatud varjutusmehhanismiga (vaakumpaneeliga variant).

Variandid	Simulatsiooni tulemusena saadud tervikmudeli soojuse erikadu [W/mK]	Seina osa soojuse erikadu [W/(mK)]	Akna osa (paigalduse külmasild, raam, klaas) soojuse erikadu [W/(mK)]
Ilma varjutusmehhanismita	1,164	0,184	0,980
Vaakumpaneeliga varjutusmehhanismiga	0,670		0,486

6.4.3. Soojustatud varjutusmehhanismi mõju hoone kütteenergiavajadusele ja CO₂ emissioonile

Kuna soojustatud varjutusmehhanismi kasutamisega väheneb akendest lähtuv energiakadu, võib teha lähenduse, et see on samaväärne akna (raami, klaaspakketi ja külmasildu arvestava) soojusjuhtivuse vähendamisega.

Seega, kui akendest lähtuv soojuse erikadu vähenes vaakumpaneeliga soojustatud varjutusmehhanismi kasutamisega ligikaudu 50%, on see kogu hoone seisukohalt samaväärne 50% madalama kaalutud keskmise akende soojusjuhtivusega. Seda eeldusel, et varjutusmehhanism on paigaldatud kõikidele akendele ja on kasutuses 100% ajast. Arvestades, et varjutust kasutatakse perioodil, mil akendest välja vaadata ei soovita ehk öhtusel ja öisel ajal, on reaalne kasutusaeg ligikaudu 40% (kütteperioodil). Sellele vastab ligikaudu 20%-line akna soojusjuhtivuse vähenemine.

Järgmisena leiti rakendustarkvara PHPP2007 abil, milline on vaatlusaluse hoone kütteenergiavajadus (tabel 6.12) ja CO₂ emissioon (tabel 6.13), kui kaalutud keskmine akende soojusjuhtivus muutub esialgselt tasemelt 20% väiksemaks ja sama ka juhul, kui oleks kasutatud kehvema tõhususega (kirjeldatud peatükis 6.2.2) aknaid.

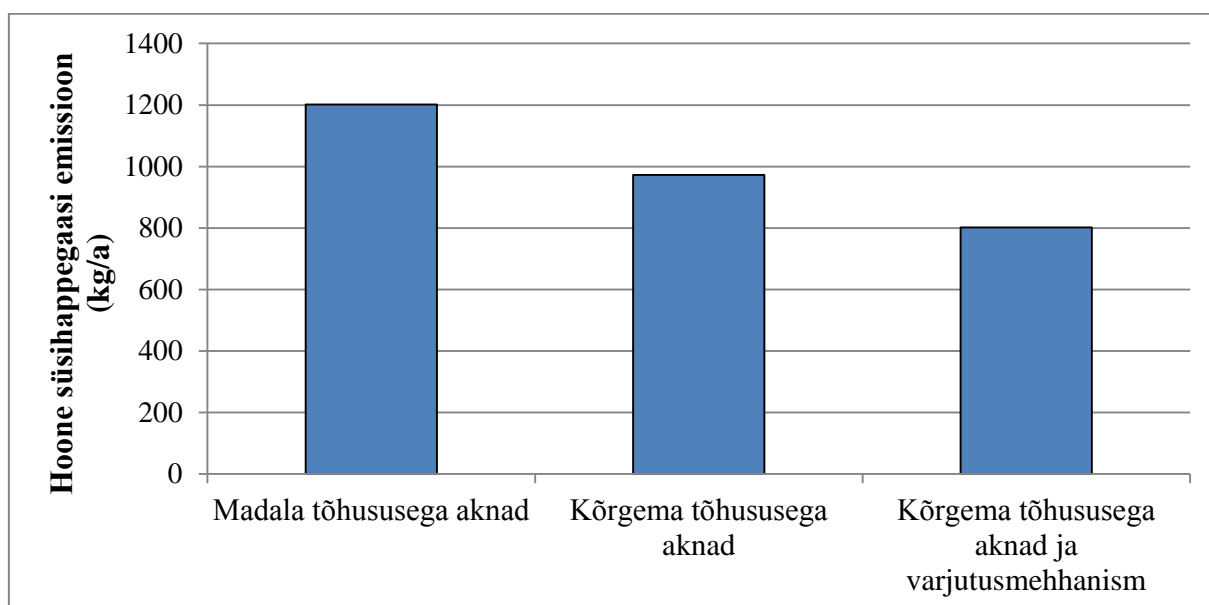
Tabel 6.12. Energiaarvutuste tulemused: hoone neto kütteenergiavajadus erinevate variantide puhul. Tulemused on taandatud hoone köetava pinna kohta.

Variandid	Selgitus	Kaalitud keskmine akna soojusjuhtivus [W/(m ² K)]	Hoone neto kütteenergiavajadus	
			kWh/a	kWh/m ² a
1	Näidishoones teostatud lahendus	0,67	4153	14,8
2	Näidishoones teostatud lahendus koos varjutusmehhanismiga	0,54	3397	12,1
3	Madalama tõhususega akende kasutamine	0,74	5192	18,5
4	Madalama tõhususega akende kasutamine koos varjutusmehhanismiga	0,59	4146	14,8

Tabel 6.13. Hoone kütisel tekkiv CO₂ emissioon erinevate variantide puhul, kasutades soojuspumba kasutegurit 3,0 ja CO₂ emissioonifaktorit 0,68 kg/(kWh_{lõppenergia}). Tulemused on taandatud hoone köetava pinna kohta.

Variandid	Hoone kütiseks vajaminev lõppenergia		Hoone kütisel tekkiv CO ₂ emissioon aastas	
	kWh/a	kWh/m ² a	kg	kg/m ²
1	1431	5,1	973	3,5
2	1179	4,2	802	2,9
3	1768	6,3	1202	4,3
4	1426	5,1	970	3,5

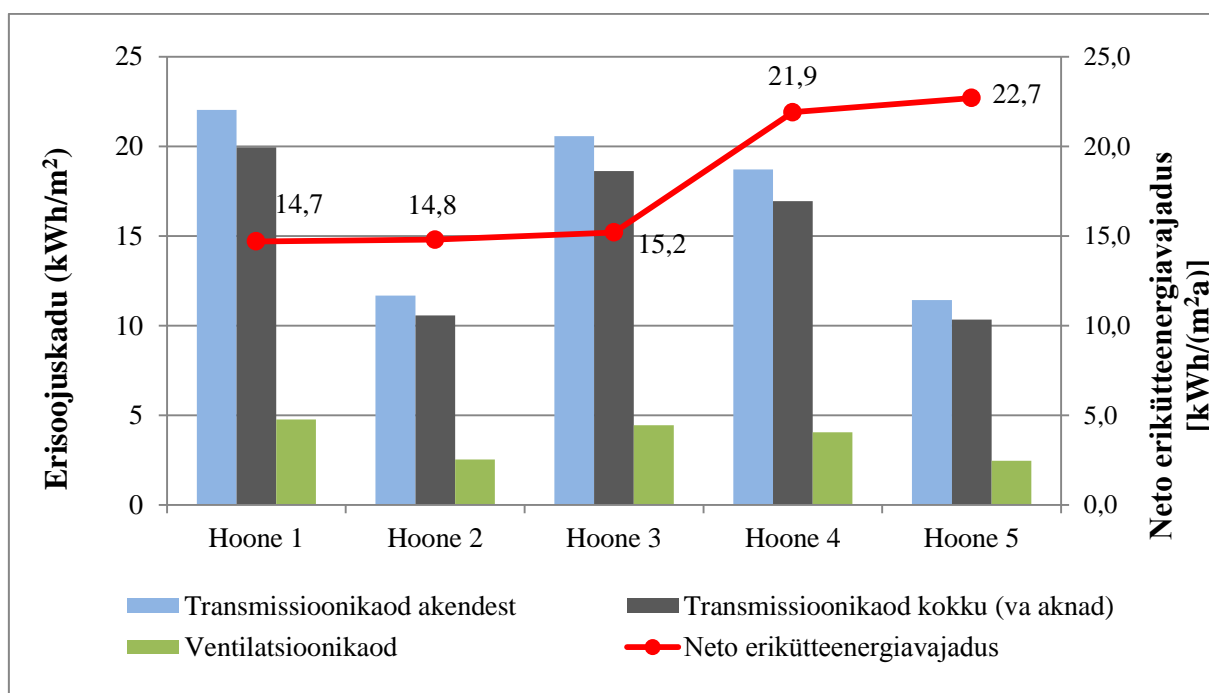
Vaakumpaneeliga soojustatud varjutusmehhanismi kasutamisel saadav süsihappegaasi heite vähenemine on samaväärne väiksema soojusjuhtivusega kitsa aknaraami kasutamisega, kuid see annab võimaluse hoone kütteenergiavajadust veelgi vähendada (joonis 6.19).



Joonis 6.19. Hoone CO₂ heide erineva tõhususega akende ja varjutusmehhanismi kasutamisega.

7. Arutelu

Energiatõhusate hoonete puhul on suurte akende kasutamine elementaarne, kuna nende kaudu siseneb ruumi väga vajalik päikese vabaenergia, tänu millele väheneb hoone kütteenergiavajadus. Samas on akende soojusjuhtivus energiatõhusates hoonetes muude välispiiretega võrreldes märgatavalt kõrgem ja seetõttu on ka energiakaod akendest suurimad. Seda kinnitab ka käesoleva töö raames teostatud ülevaade viie Eesti energiatõhusa hoone energiabilanssidest (joonis 7.1).

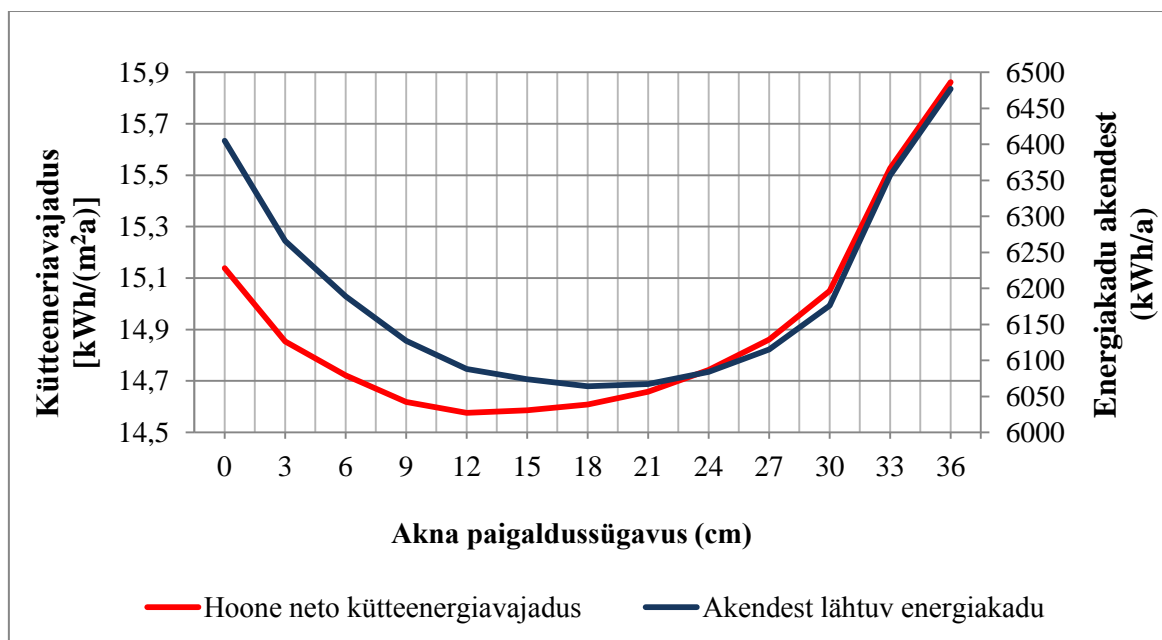


Joonis 7.1. Akende transmissioonikao võrdlus ülejäänud komponentide transmissioonikao ja ventilatsioonisüsteemist lähtuva soojuskaoga viie Eesti energiatõhusa hoone näitel.

Tuginedes varasematele uuringutele ja isiklikule kogemusele, pakkus käesoleva töö autor välja kolm akende tõhustamise meetodit: väikese soojusjuhtivusega kitsa aknaraami kasutamine, aknapaigalduse optimeerimine ja soojustatud varjutusmehhanismi kasutamine. Kuna viimase meetodi kohta puudusid hästitoimivad näited, töötas autor välja ka sobiva kontseptuaalse lahenduse, mille keskmes on vineerplaatidega kaetud vaakumsoojustuspaneel. Esitatud idee alusel on võimalik teostada edasine spetsiifiline tootearendus.

Töö käigus kontrolliti iga meetodi toimivust Põlvas valminud eksperimentaalhoone näitel. Üllatuslikult oli kitsa väikese soojusjuhtivusega aknaraami kasutamisel saadud kokkuhoid suurim. Tavalise puitaknaga võrreldes oli kokkuhoid ligikaudu 44% ja soojustatud, ent laia aknaraamiga võrreldes umbes 20%.

Aknaraami paigaldussügavuse optimeerimisel tuli selgelt välja, et selle protsessi juures on kaks määravat tegurit: aknapale varjutav ja aknapaigalduse külmasilla mõju. Joonisel 7.2 on näha, et akendest lähtuva energiakao (sõltub aknapaigalduse külmasillast) madalaim väärtus ei lange kokku hoone neto kütteenergiavajaduse madalaima väärtusega.

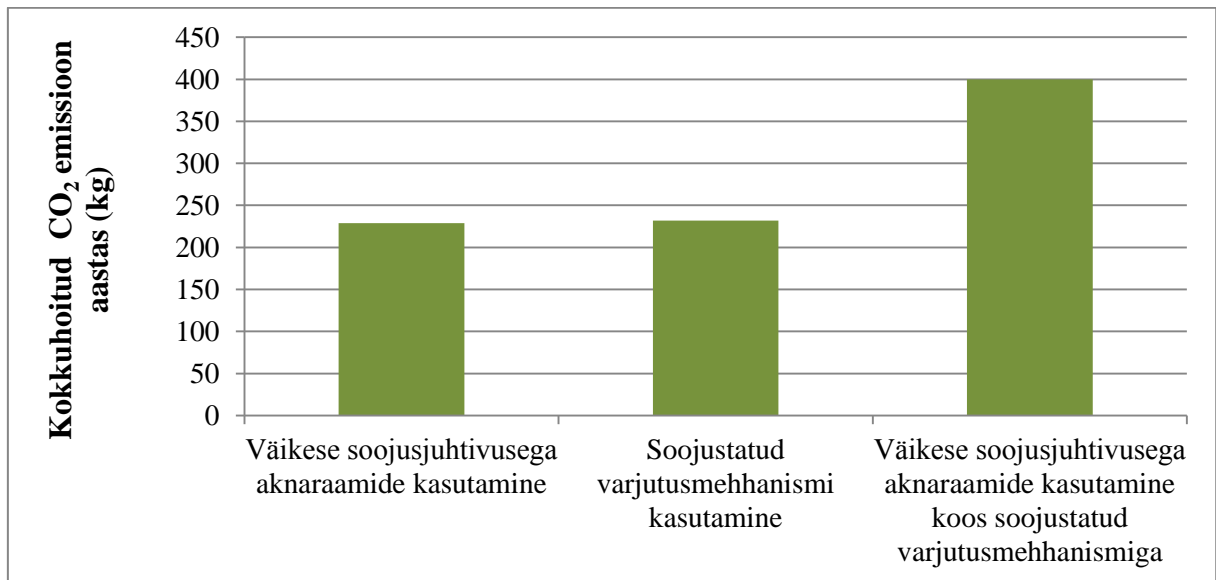


Joonis 7.2. Akendest lähtuva energiakao ja kütteenergiavajaduse sõltuvus akna paigaldussügavusest.

Olenemata ootustest, ei ole akna paigaldussügavuse täpne optimeerimine soojustatud aknaraami puhul märkimisväärse efektiga. Vältides äärmusi (aknaraami seina välis- või sisepinna lähedale paigutamise) jääb erineva paigaldussügavuse mõju energiatõhusa hoone kütteenergiavajadusele ligikaudu 0,3 kWh/(m²·a) ehk 2% piiresse. Edasine optimeerimistöö võib aga vajalikuks osutuda liginullenergiahoone kontekstis, kus on määruste täitmiseks vajalik väga energiatõhusa hoone loomine ja iga kokkuhoitud kilovatttund on oluline.

Soojustatud varjutusmehhanismi kasutamine andis ootuspäraselt märkimisväärse efekti, jäädes ligikaudu 20% juurde. Oluline on märkida, et aknaraamide vahetamise ja soojustatud varjutusmehhanismi kasutamisest saadud efekti on õiglane võrrelda samaväärsete variantide puhul. See tähendab, et võrreldavad on keskpärase tõhususega soojustatud aknaraami vahetamine väikese soojusjuhtivusega kitsa aknaraami vastu ja keskpärase tõhususega soojustatud aknaraamile varjutusmehhanismi lisamine. Selgub, et mõlemal juhul on hoone kütteenergiavajaduse kokkuhoid 3,7 kWh/(m²·a). Mõlemad meetodid on võrdväärselt efektiivsed.

Samas on soovustatud varjutusmehhanismi võimalik kasutada ka väga tõhusate akende ees ning sellisel juhul on saadav efekt veelgi suurem, mis väljendub otseselt süsihappegaasi heite vähenemises (joonis 7.3).



Joonis 7.3. Aknaraami muutmise ja soovustatud varjutusmehhanismi kasutamisega saadav kokkuhoid süsihappegaasi emissioonidelt.

8. Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärk oli leida optimaalsed meetodid akende soojuskadude vähendamiseks energiatõhusates hoonetes, kuna efektiivsemad meetodid hoone kütteenergiavajaduse vähendamisel aitavad kaasa selliste hoonete levikule ning seega väheneb üleüldine elamufondi keskkonnamõju.

Töö autor pakkus välja kolm akende tõhustamise meetodit: vähese soojusjuhtivusega kitsa aknaraami kasutamine, aknapaigalduse optimeerimine ja soojustatud varjutusmehhanismi kasutamine. Nimetatud meetodite toimivust kontrolliti Eesti esimese passiivmaja näitel, mis vastab tüüpilise energiatõhusa hoone omadustele ja seega sobib üldistamiseks.

Teostatud töö tulemusena selgus, et optimaalseimad meetodid akende soojuskadude vähendamiseks on vähese soojusjuhtivusega kitsa aknaraami ja soojustatud varjutusmehhanismi kasutamine. Tõestust ei leidnud töö autori esialgne arvamus, et soojustatud varjutusmehhanismi puhul on efekt suurim. Küll aga kinnitasid arvutused, et soojustatud varjutusmehhanism toimib efektiivselt ka tõhusate akende puhul ja seega sobib täiendavaks meetmeks väga energiatõhusa hoone keskkonnamõjude edasisel vähendamisel.

9. Summary

Reducing heat loss from the windows of energy efficient buildings

The aim of this thesis was to find optimal methods for reducing heat loss from the windows of energy efficient buildings, since making the reduction of the heat demand easier will contribute to the spread of energy efficient buildings, thus reducing the overall environmental impact of the building sector.

The author of this thesis suggested three methods how to reduce the heat loss through the windows: the use of narrow window frames with low thermal conductance, the optimisation of window frame installation and the use of insulated window shade. The effectiveness of the three possibilities listed above was analysed on the example of the first passive house in Estonia which represents all the typical features of an energy efficient building and thus is suitable for generalisation.

The results of the analysis showed that the most optimal methods for reducing heat loss from the windows are the use of narrow window frames with low thermal conductance and using the insulated window shade. If these two are combined, the effect will be even more noticeable.

The author's expectations that the effect of the insulated window shade would be the greatest found no proof. Nevertheless, the calculations confirmed that the insulated window shade is effective even with efficient windows and thus is suitable to further reduce the heat demand of very energy efficient buildings and therefore helps to reduce the CO₂ emissions.

10. Kasutatud allikate loetelu

Allpool on esitatud käesolevas töös kasutatud infoallikate nimekiri:

1. www.passiivmajaliit.ee/passiivmaja 20.05.2013;
2. www.passivhausprojekte.de 20.05.2013;
3. <http://www.passiivmajaliit.ee/et/polva> 20.05.2013;
4. T. Muring, G.W. Reinberg, J. Hallik, M. Valge, K. Kalbe; A prototype architecture for passive and plus energy building in Estonia; Proceedings of 6th Passive House Conference in the Nordic Countries, 2013;
5. G.W. Reinberg, T. Muring, J. Hallik, M. Valge, K. Kalbe; First Certified Passive House in Estonia; Proceedings of 17th International Passive House Conference, 2013;
6. T. Kalamees, J. Kurnitski; Estonian test reference year for energy calculations; Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering, 12, 2006, 40 – 58;
7. Eesti Vabariigi standard EVS-EN 15251:2007, Sisekeskkonna alandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast;
8. Eesti Vabariigi Valitsuse määrus Energiatõhususe miinimumnõuded; RT I, 05.09.2012, 4;
9. M.K. Urbikain, J.M. Sala; Analysis of different models to estimate energy savings related to windows in residential buildings; Energy and Buildings, 41, 2009, 687–695;
10. E. Abel, H. Voll; Hoonete energiatarve ja sisekliima, Tallinn, 2007;
11. G. Oliveti, N. Arcuri, R. Bruno, M. De Simone; An accurate calculation model of solar heat gain through glazed surfaces; Energy and Buildings, 43, 2011, 269–274;
12. Darmstadt Passive House Institute; Certification criteria for residential Passive House Buildings, www.passiv.de 20.05.2013;
13. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv hoonete energiatõhususe kohta, 2010/31/EL, 19. mai 2010;
14. French Environment and Energy Management Agency; Energy Efficiency Trends in Buildings in the EU, Pariis, 2012;
15. Statistikaamet; Eesti Statistika Kvartalikirj, Tallinn, 1/2013;
16. Euroopa keskkonnaagentuur; Energy efficiency and energy consumption in the household sector, 2012;
17. Eesti Vabariigi standard EVS-EN ISO 13790:2008, Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling;

18. W. Feist, R. Pfluger, B. Kaufmann, J. Schnieders, O. Kah; PHPP 2007 User Guide, Darmstadt, 2007;
19. Eesti Vabariigi standard EVS-EN ISO 10211:2008, Külmasillad hoones. Soojusvood ja pinnatemperatuurid. Üldised arvutusmeetodid;
20. Eesti Vabariigi standard EVS-EN ISO 10077-2:2012, Akende, uste ja luukide soojustehniline toimivus. Soojuslähivuse arvutus. Osa 2: Raamide numbriline arvutusmeetod;
21. Lawrence Berkeley National Laboratory; THERM 6.3/ WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual, 2011;
22. www.iinas.org/gemis.html 20.05.2013;
23. J. Hallik; Hoone välispiirde pinnatemperatuuride määramine infrapuna meetodil; Tartu Ülikooli Katsekoda, 2009;
24. Eesti Vabariigi standard EVS-EN 13187:2001, Thermal performance of buildings - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method;
25. Passipedia; Basic principles for windows - research on energy efficient modernisation, www.passipedia.org/passipedia_en/planning/refurbishment_with_passive_house_%20components/thermal_envelope/windows 20.05.2013;
26. W. Feist; Fenster: Schlüsselfunktion für das Passivhaus-Konzept; Darmstadt Passivhaus Institut Protokollband, 14 , 1998;
27. Passipedia; Passive House windows – requirements, www.passipedia.org/passipedia_en/planning/thermal_protection/windows/requirements_for_windows 20.05.2013;
28. www.passiivmajaliit.ee/et/passiivmaja--moisted 20.05.2013;
29. W. Feist, S. Peper, O. Kah, M. von Oesen; Climate Neutral Passive House Estate in Hannover-Kronsberg: Construction and Measurement Results, 2005;
30. S. B. Sadineni, S. Madala, R. F. Boehm; Passive building energy savings: A review of building envelope components, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 2011, 3617–3631;
31. S Grynning, A. Gustavsen, B. Time, B. P. Jelle; Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers? Energy and Buildings, 61, 2013, 185-192;
32. Passipedia; Passive House windows, www.passipedia.org/passipedia_en/%20planning/refurbishment_with_passive_house_components/prospects_for_the_modernisation_of_existing_buildings_using_highly_efficient_components/passive_house_windows?s 20.05.2013;
33. F. Freundorfer; Certified Passive House Designer Course – Passive House windows, 2009;

34. Passipedia; Types of glazing and their specific values,
www.passipedia.org/passipedia_en/planning/thermal_protection/windows/types_of_glazing_and_their_specific_values 20.05.2013;
35. Eesti Vabariigi standard EVS-EN 410:2011, Klaas ehitusmaterjalina. Klaasingu valgus- ja päikesekiirguse karakteristikute määramine;
36. Richard Viidalepp, Saint-Gobain Glass Estonia SE, suuline info;
37. AGA SIA hinnapakumine Põlva eksperimentaalhoone klaaspakettide täitegaasile;
38. H. Manz, S. Brunner, L. Wullschleger; Triple vacuum glazing: Heat transfer and basic mechanical design constraints, *Solar Energy*, 80, 2006, 1632–1642;
39. B. P. Jelle, A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey, R. Hart; Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 96, 2012, 1-28;
40. P. C. Eames; Vacuum glazing: Current performance and future prospects, *Vacuum*, 82, 2008, 717-722;
41. F. Freundorfer, suuline info;
42. M. Paszkowski, A. Kostka; New generation of windows: Linear thermal bridge reduced frames and convection-free insulated glazing, *Proceedings of 16th International Passive House Conference*, 2012;
43. Wikipedia; Aerogel,
en.wikipedia.org/wiki/Aerogel 20.05.2013;
44. C. Buratti, E. Moretti; Glazing systems with silica aerogel for energy savings in buildings, *Applied Energy*, 98, 2012, 396-403;
45. A. Gustavsen, B. P. Jelle, D. Arasteh, C. Kohler; State-of-the-Art Highly Insulating Window Frames – Research and Market Review, 2007;
46. www.passiv.de/komponentendatenbank/fensterrahmen 20.05.2013;
47. www.lasita.ee 20.05.2013;
48. www.kalesy.ee 20.05.2013;
49. www.viking.ee 20.05.2013;
50. www.rehpol.ee 20.05.2013;
51. www.metus.ee 20.05.2013;
52. F. Freundorfer, B. Kaufmann, M. John; Passive House windows completely redesigned, Passipedia
www.passipedia.org/passipedia_en/planning/thermal_protection/windows/passive_house_windows_completely_redesigned 20.05.2013;

53. W. Feist, E. Baffia, G. Horn, J. Schnieders; Wärmebrückenfreies Konstruieren, Darmstadt Passivhaus Institut Protokollband, 16, 1999;
54. F. Cappelletti, A. Gasparella, P. Romagnoni, P. Baggio; Analysis of the influence of installation thermal bridges on windows performance: The case of clay block walls, Energy and Buildings, 43, 2011, 1435–1442;
55. Passipedia; Installation-based thermal bridges Ψ_{install} , www.passipedia.org/passipedia_en/planning/thermal_protection/windows/window_installation 20.05.2013;
56. J. J. Anderson, Energy conserving insulative window shade, US Patent US4307768, 1980;
57. J. Berman, Insulated shade, US Patent US4344474, 1979;
58. M. J. Augustyniak, Insulated window shade, US Patent 2012/0168095, 2012;
59. Certified Passive House component
www.propassivhausfenster.net/fileadmin/download/smartwin/zd_propassivhausfenster_smartwin_en.pdf 20.05.2013;
60. Certified Passive House component
www.propassivhausfenster.net/fileadmin/download/smartwin/zd_propassivhausfenster_smartwinfix_en.pdf 20.05.2013;
61. Säästva arengu komisjon; Säästva transpordi raport, Tallinn 2010;
62. Vacupor NT-B2-S andmeleht:
www.porextherm.com/images/anhaenge/db_ntb2s_en.pdf 20.05.2013;

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kristo Kalbe, (sünnikuupäev: 15.10.1989)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Akna soojuskadude vähendamine kõrge energiatõhususega hoones", mille juhendaja on

Tõnu Muring,

- 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.

Tartus, 20.05.2013