



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut

**PÕRANDA SOOJUSTUSLAHENDUSTE MÕJU
SOOJUSKADUDELE JA HOONE
ENERGIATÕHUSUSELE SUURTES HALL-TÜÜPI
HOONETES**

**FLOOR INSULATION EFFECT ON HEAT LOSSES AND
BUILDING ENERGY EFFICIENCY IN LARGE HALL-TYPE
BUILDINGS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karina Voitik

Üliõpilaskood 061539EAKI

Juhendaja: Raimo Simson, teadur

Tallinn 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

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

"....." 2020.

Autor:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2020.

Juhendaja:

/ allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

".....".....2020.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ allkirjastatud digitaalselt/

TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Karina Voitik, 061539EAKI
Õppekava, peeriala: EAKI02/02 Hoonete sisekliima ja veetehnika, küte ja ventilatsioon
Juhendaja: Raimo Simson, teadur
Konsultant: Simo Ilomets, lektor

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Põranda soojustuslahenduste mõju soojuskadudele ja hoone energiatõhususele suurtes hall-tüüpi hoonetes

(inglise keeles) Floor insulation effect on heat losses and building energy efficiency in large hall-type buildings

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida põranda soojustamise lahendusi ja nende mõju suure põrandapindalaga hoonete soojuskadudele: soojustus vaid perimeetril, soojustus terve põranda ulatuses, soojustus põranda tsoonide kaupa jt.
2. Analüüsida vaadeldud põranda soojustamise lahenduste mõju kütteenergia tarbele ning hoone energiatõhususele.
3. Analüüsida vaadeldud põranda soojustamise lahenduste mõju põrandkütte süsteemi dimensioneerimisele, toimivusele ja efektiivsusele.
4. Analüüsida analüütiliselt (standardid) ja IDA ICE soojuslevi arvutusmodelite baasil meetodikate erisusi ja sobivust erinevate lahendustega soojustatud põrandate soojuslähivuse arvutamiseks ja energiaarvutuste teostamiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Sissejuhatuse ja kirjanduse ülevaate koostamine Teemakohased teadusartiklid, standardid ja raamatud: anda ülevaade sama teemaga seotud uurimistöödest ja nende tulemustest. Kirjeldada teema olulisust hoonete energiatõhususe, küttesüsteemide dimensioneerimise, efektiivsuse ja toimimise ning üldiselt liginullenergia hoonete kontekstis.	01.02.20
2.	Metoodika osa koostamine Kirjeldada teooriat ja töö etappe, tegevusi ning uuritud objekte, st erinevaid metoodikaid (standardid, IDA ICE) põranda soojuslähivuse ja soojuskadude hindamiseks, hoone simulatsioonimodeli(te) koostamist, energiaarvutuste teostamist, sh kütteenergia arvutamist, energiatõhususe hindamist, valitud hoone(te) parameetreid jne.	01.03.20
3.	Arvutuste ja simulatsioonide teostamine; tulemused Koostada hoone(te) simulatsioonimudelid IDA ICE tarkvara baasil. Koostada erinevad variandid olenevalt põranda soojustuse lahendusest ja soojustusmaterjali omadustest ning paksusest. Varieerida erinevaid küttesüsteeme. Teostada analüütilised arvutused ja hoone(te) simulatsioonid. Saadud tulemused presenteerida graafiliselt ja/või tabeli kujul ning kirjeldada tulemusi.	01.04.20
4.	Andmete analüüs ja kokkuvõte Võrrelda analüütiliste arvutuste ja simulatsioonide tulemusi. Võrrelda saadud tulemusi teiste arvutusmetoodikate ja standarditega. Analüüsi põhjal tuletada töö järeldused ja kokkuvõte.	01.05.20

Töö keel: eesti**Lõputöö esitamise tähtaeg:** 25. mai 2020. a**Üliõpilane:** Karina Voitik ".....".....2020.a

/ allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Raimo Simson ".....".....2020.a

/ allkirjastatud digitaalselt/

Konsultant: Simo Ilomets ".....".....2020.a

/ allkirjastatud digitaalselt/

Sisukord

Eessõna	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
Kirjanduse ülevaade	9
Töö eesmärgid ja ülesanded	11
SISSEJUHATUS	12
1. TEOREETILINE ÜLEVAADE	15
1.1 Kliima mõju põranda soojuskadudele	15
1.2 Pinnasevee mõju pinnase soojusjuhtivusele	17
1.3 Pinnase soojusmahtuvuse mõju põranda soojuslähivusele	18
1.4 Põranda kuju ja külmasildade mõju põranda soojuslähivusele	18
1.5 Pinnasele toetuva põranda soojustamise lahendused	19
1.6 Soojustusmaterjalid	20
2. METOODIKA	24
2.1 Uuritud objekti kirjeldus	24
2.1.1 Hoone konstruktsioonid	25
2.1.2 Hoone tehnosüsteemid	26
2.1.3 Analüüsitud variandid	26
2.2 Põranda soojuserikadude määramise meetodid	28
2.2.1 EVS-EN ISO 13370:2017 standardi arvutusmetoodika	28
2.2.2 EVS 829:2003 standardi arvutusmetoodika	33
2.2.3 Arvutamine simulatsioonitarkvara abil	35
2.2.4 Arvutusmodelite koostamine	37
2.3 Hoone soojusenergiavajaduse arvutamine	40
2.4 Hoonete energiatõhususe nõuded	42
2.5 Tasuvuse arvutus	43
2.6 Hoone energiatõhususe tõstmise lahendused	44
2.6.1 Küttesüsteemi valik	44
2.6.2 Lokaalne päikeseenergia kasutus	44
3. TULEMUSED JA ANALÜÜS	46
3.1 Põranda soojuslähivuse arvutuse tulemused	46
3.1.1 Soojustuse paiknemise mõju põranda soojuslähivusele	47
3.1.2 Soojustuskihi paksuse mõju põranda soojuslähivusele	48
3.1.3 Põranda soojuslähivuse muutumise mõju hoone soojuskaodele	49
3.2 Soojuslähivuse arvutusmetoodikate võrdlus	50
3.2.1 Põranda soojuslähivuse arvutamise meetodikate võrdlus	50
3.2.2 Hoone soojusliku käitumise modelleerimise meetodite võrdlus	51
3.3 Põranda soojustamise mõju kütteenergia tarbimisele	52
3.3.1 Põranda soojustamise mõju põrandaküttesüsteemi efektiivsusele	55
3.4 Hoone energiatõhususarvu arvutustulemused	55
3.5 Optimaalse põranda soojustamise lahenduse valik	57
3.5.1 Hoone soojusenergia tarbimine	57
3.5.2 Soojusenergia aastane maksumus	58
3.5.3 Põranda isoleerimistööde maksumus	59
3.5.4 Tasuvusarvutuse tulemused	61

3.6	Laohoone liginullenergia hooneks viimine	62
3.6.1	Energiatõhusaima küttesüsteemi määramine	62
3.6.2	Päikesepaneelid	66
	KOKKUVÕTE.....	68
	Summary	70
	Kasutatud kirjandus	72
	LISAD	75

Eessõna

Käesolevas töös on uuritud erinevate pinnasele rajatavate põrandate soojustamise lahenduste mõju suure põrandapindalaga hoonete soojuskadudele. Uurimisobjektiks oli tüüpilise konfiguratsiooniga hall-tüüpi laohoone, mistõttu saab antud töö tulemusi laiendada teistele analoogsetele hoonetele. Uuritava hoone põranda soojuskadude arvutused teostati kolme erineva meetodika kasutamisel. Põranda soojusläbivuse ja soojuskadude hindamiseks kasutati standardites EVS-EN ISO 13370:2017 ja EVS 829:2003 kirjeldatud analüütilisi meetodeid ning teostati dünaamilised simulatsioonid IDA ICE tarkvara abil.

Simulatsiooni tarkvaraga koostatud arvutusmudeli abil viidi läbi hoone soojusliku käitumise analüüs ning arutati välja hoone toimimiseks vajalikud soojus- ja elektrienergia kogused. Saadud arvutustulemuste alusel analüüsiti vaadeldavate põranda soojustamise lahenduste mõju uuritava laohoone kütteenergia tarbele ja energiatõhususele. Kõige optimaalsema põranda soojustamise lahenduse määramiseks nüüdisväärtuse meetodika järgi teostati põranda soojustamise lahenduste tasuvusanalüüs. Lähtudes saadud tulemustest analüüsiti optimaalseima põranda soojustamise lahenduse sobivust põrandkütte süsteemi toimivusele ja efektiivsusele.

Uurimistöö käigus analüüsiti uuritava hoone energiatõhusust lähtuvalt kehtivatest määrustest ning vaadeldi erinevaid võimalusi energiatõhususe parendamiseks.

Autor soovib tänada oma juhendajat Raimo Simsonit ja konsultanti Simo Ilometsa.

Võtmesõnad: põranda soojusläbivus, laohoone energiatõhusus, põranda soojustamine, IDA ICE

Lühendite ja tähiste loetelu

Lühendid

ETA	Energiatõhususe arv
KEK	Kaalutud energiaerikaitse klass
MTM	Majandus- ja taristuministri
NPV	Nüüdispuhasväärtus (ingl. k. <i>Net Present Value</i>)
SFP	Ventilaatori elektriline erivõimsus (ingl.k. <i>Spetsific Fan Power</i>)
TRY	Energiaarvutuse baasasta (ingl. k. <i>Test Reference Year</i>)

Tähised

A	piirdetarindi või selle osa pindala	[m ²]
a	aastane neto sääst	[eur]
B'	põranda tunnusmõõt	[m]
d	ekvivalentne paksus	[m]
H	soojuserukadu püsivates tingimustes	[W/K]
I	investeering	[eur]
i	korrigeeritud reaalne arvutuslik intress	[%]
n	tasuvusaeg	[a]
P	siseruumi avatud põranda perimeeter	[m]
q ₅₀	hoone välispiirde keskmine õhulekkearv	[m ³ /(h·m ²)]
R	soojustakistus	[m ² ·K/W]
U	soojusläbivus	[W/(m ² ·K)]
Φ	soojusvool	[W]
λ	soojuserijuhtivus	[W/(m·K)]
ψ	joonsoojusläbivus	[W/(m·K)]
T	temperatuur Celsiuse skaala järgi	[°C]
ρ	tihedus	[Kg/m ³]
δ	soojustuskihi paksus	[m]

Alaindeksid

ed	serv
f	põrand
fg	esimene korrus, k.a. pinnase mõju
g	pinnas
ins	isolatsioon
sog	põrand pinnasel
si	sisepind
se	välispind
w	sein

Kirjanduse ülevaade

Soojusvoog suure pörandapinnaga hoonetes pörandakonstruksiooni ja pinnase vahel sõltub mitmesugustest parameetritest. Pöranda üksikutes tsoonides võib konstruksioonialune temperatuur erineda olenevalt aluspöranda plaadi mõõtmetest, perimeetri kaugusest, kliimast, pörandakonstruksiooni soojuslikust inertsist, pinnase soojusjuhtivusest ja pöranda soojustuse kvaliteedist [9]. Soojuskadude täpse arvutamise keerukuse tõttu on loodud mitu lihtsustatud arvutamismetoodikat. Tänapäeval arvutatakse projekteerimistöös pörandate soojuslevi pinnasesse peamiselt standardi EVS-EN ISO 13370:2017 „Hoonete soojuslik toimivus. Soojuslevi pinnasesse. Arvutusmeetodid“ järgi [17], mis põhineb B. R. Andersoni töö tulemustel [14]. Selles standardis esitatud meetodid arvestavad hoonealuses pinnases kulgeva soojusvoo kolmemõõtmelist olemust; see sisaldab soojuslevi arvutust stabiilsetes tingimustes (aasta keskmine soojusvoog) ja arvestatud on ka aastaste perioodiliste temperatuurimuutustega. Pörandas tekkiva soojusvoo arvutamiseks kasutatakse valemite erinevaid parandustegureid.

Tänaseks juba kehtetus standardis EVS 829:2003 „Hoone soojuskoormuse määramine“ [16] on soovitatud arvutada pinnasel asuva pöranda soojuskadu tsoonide kaupa, kusjuures pörand jagatakse kahe meetri laiusteks ribadeks piki välisseinu. Välispiirile kõige lähemal asub esimene tsoon, järgnevad teine, kolmas ja neljas tsoon. Pinnasel asuva pörandakonstruksiooni arvutamisel võetakse arvesse, kas pörand on soojustatud või mitte.

P. Brinksi, O. Kornadi *et al.* avaldatud artiklis [9] on analüüsitud, kuidas toimub soojusülekanne pinnasel asuva pörandakonstruksiooni ja pinnase vahel. Uuriti tööstushooneid pindalaga kuni 10 000 m². Tuginedes simulatsioonidele ja tulemustele, mis on saadud standardis ISO 13370 kirjeldatud lihtsustatud meetodika järgi [17], järeldati, et see meetodika sobib rohkem sisetemperatuuriga 20 °C eluhoonete pörandate soojuskadude arvutamiseks. Samas on märgitud, et suurte tootmishoonete pörandate soojuskadude arvutamisel üldnimetatud meetodika järgi saadud tulemused on ülehinnatud, sest ei arvestata hoone pörand all pinnases akumulieritud energiat. Leiti, et simulatsiooniprogrammide kasutamine võimaldab saada täpsemaid tulemusi.

A. M. Mägureani, L. Czumbili *et al.* läbi viidud uuringu [1] eesmärgiks oli suure pörandapindalaga hoone pikaajalise soojusliku käitumise analüüsimine. Uurimistöö käigus töötati välja pinnasele toetuva pörandate soojuskadude integreeritud arvutusmeetodika, mis põhines analüütilise arvutuse meetodil ning selle rakendamisel

simulatsioonimudeli koostamisel modelleerimistarkvara baasil. Uurimuses analüüsiti hoone soojusliku käitumise muutumist kaheksa kütteperioodi jooksul ning saadud arvutustulemuste põhjal koostati arvutusmetoodika. Koostatud metoodika kasutamisel saadud tulemuste väärtusi võrreldi prognoositava tunnise soojusvoo väärtusega, keskmise vea väärtus on alla 1%. Nimetatud metoodika rakendamine võimaldab vähendada arvutuste tegemiseks vajalikku ajakulu.

Naser S. Sanoussi [10] on uurinud soojusvoo muutumist põrandakonstruktsiooni ja pinnase vahel erinevate soojustuslahenduste puhul. Töös analüüsiti kolme soojustuslahendust: horisontaalne perimeetri soojustus, vertikaalne vundamendi soojustus ja horisontaalne sokli soojustus. Läbiviidud uurimusest järeldus, et suurem osa soojusvoost läbib ala, mis asub põrandaplaadi serva lähedal. Soojusvoog põrandaplaadi keskel püsib ühtlane aasta ringi. Uurimistöö tõestas, et vundamendi vertikaalne soojustus vähendab soojuskadusid pinnasel paikneva põrandakonstruktsiooni kaudu rohkem kui horisontaalne soojusisolatsioon. Samadele järeldustele jõudsid ka P. Brinks, O. Kornadt *et al* [9].

Põranda energiatõhusus sõltub suuresti ka hoone asukoha kliimast. A. Staszczuk, M. Wojciech ja T. Kuczynski [15] uurisid soojustamata põrandate mõju ruumide soojuslähivusele suvel soojas kliimas. Katsete käigus nad tõestasid, et pinnasel oleva soojustamata põrandakonstruktsiooni kasutamine on soojas kliimas perspektiivne passiivne jahutusmeetod.

Põhjamaises kliimas toimub ruumi sobiva sisetemperatuuri tagamine küttesüsteemide abil. Põrandküttesüsteemi mõju kogu hoone soojuskadudele pinnasel asuva põranda kaudu on kirjeldatud Jukka Rantala uuringus [13]. Töö põhineb Lõuna-Soomes kahes uues ridaelamus läbi viidud katsetel. Ühes majas kasutati põrandküttesüsteemi, teises radiaatorkütet. Uuringus toodi välja, et põrandkütte abil köetavas hoones oli põranda temperatuur kõrgem kui põrandakonstruktsiooni temperatuur radiaatorküttesüsteemiga hoones. Põranda temperatuuri tõus põhjustas soojuskao suurenemist. Tööst järeldati, et põrandküttesüsteemiga hoone põrandakonstruktsiooni soojuslähivus peaks olema oluliselt väiksem võrreldes soojustuseta põranda soojuslähivusega.

Töö eesmärgid ja ülesanded

Eesmärgid

Lõputöö peamiseks eesmärgiks on analüüsida energiatõhususe aspekte pinnasel põranda soojustamisel erinevate soojustuse lahenduste korral kasutades erinevaid arvutusmetoodikaid.

Ülesanded:

Uurimistöö läbiviimisel selgitakse põrandakonstruktsiooni soojusisolatsiooni erinevate lahenduste kasutamise mõju hoone energiatõhususele. Selle teema uurimine hõlmab mitmeid tegevusi:

- tutvuda erinevate soojustusmaterjalidega ning nende ehitusfüüsikaliste omadustega, uurida halli-tüüpi hoone põranda soojustamisele sobivaid lahendusi;
- arvutada välja vastavalt standardites EVS-EN ISO 13370:2017 [17], EVS 829:2003[16] antud arvutusmetoodikatele pinnasele toetava põranda soojuslähivused erinevate soojustuse lahenduste kasutamisel;
- teostada hoone soojusliku käitumise simulatsioonid IDA ICE tarkvara abil;
- saadud arvutuste tulemuste põhjal analüüsida põranda soojustamise lahenduste mõju hoone soojuskadudele;
- määrata vaadeldava põranda soojustamise lahenduste mõju kütteenergia tarbele ning hoone energiatõhususele;
- analüüsida erinevate küttesüsteemide kasutamise mõju hoone energiatõhususe paranemisele.

Uuringu alleesmärk on arvutuste ja simulatsioonide teostamisel saadud andmete põhjal analüüsida analüütiliste ja IDA ICE soojuslevi arvutusmudelite baasil metoodikate erisusi ja sobivust erinevate lahendustega soojustatud põrandate soojuslähivuse arvutamiseks ja energiaarvutuste teostamiseks.

Antud töös ei uurita põhjavee mõju pinnasele toetava põranda soojuslähivusele.

muutusi põranda kesktsoonis ega võtta arvesse hoone põranda all oleva pinnase soojusinerti [15].

Hoone soojuskadude potentsiaaliks on sisetemperatuuri ja ümbritseva keskkonna temperatuuride erinevus. Ladude ja tootmishoonete sisetemperatuur on tavaliselt +15 °C kuni +20 °C [21], sõltuvalt nende kasutusotstarbest. Järelikult on siin õhu ja pinnase temperatuuri vaheline erinevus sageli palju väiksem kui elamute puhul. See tähendab, et madala siseõhutemperatuuriga hoone soojuskadu on väiksem võrreldes kõrgema siseõhutemperatuuriga hoone soojuskaoga.

Elu- ja administratiivhoonete puhul, kui pinnasel asuva põranda ja köetava hoone mahu suhe on väike, on soojuslevi pinnasesse üldjuhul väiksema osakaaluga võrreldes hoonekarbi teiste soojuskadudega ning seega pole arvutuste täpsuse suurendamisel olulist mõju summaarsete soojuskadude määramisele [9]. Kuid suurte lao- ja tootmishoonete puhul võib soojuskadude ebatäpne hindamine märkimisväärselt mõjutada hoone kogu energiabilanssi [9]. Selliste hoonete soojuskadude arvutamiseks tuleb kasutada integreeritud lähenemist. Käesolevas töös on soojuskadude arvutamiseks kasutatud nii arvutusmeetodeid kui ka simulatsioonitarkvara. Simulatsioonitarkvarad annavad võimaluse modelleerida hoone füüsilist käitumist ja koostoimet ümbritseva pinnasega.

On oluline, et ehitises oleks aastaringselt stabiilne sisetemperatuur. Selleks, et vähendada hoone energiatarbimist ning tagada sobivad sisekliima parameetrid, tuleb valida energiatõhusamad kliimaseadmed ja küttesüsteemid. Ruumide ülekuumenemise vältimiseks tuleb aktiivsele jahutussüsteemile eelistada passiivseid lahendusi [34]. Just energiasäästliku hoone projekteerimine aitab tagasihoidlikumate kulutustega leida küttesüsteemi optimaalse variandi, mille rakendamisel saab vähendada edaspidist soojusenergia maksumust.

Tavapärastes hoonetes, mille põrandapind ei ole liialt suur, aitab kogu pinnasel asuva põranda soojustamine vähendada mõõduka temperatuuri saavutamiseks vajalikku soojusenergia kogust [13]. Hoonetes, kus on ette nähtud põrandküttesüsteem, annab põrandaplaadi soojustamiseks vajalike soojustusmaterjalide kasutamine mitmeid vaieldamatuid eeliseid: väheneb soojusvoog pinnasel oleva põrandaplaadi ja pinnase vahel, osa soojusest peegeldub tagasi põrandakonstruktsiooni.

Suurte laoruumide kütmiseks tuleks radiaatorküttesüsteemile eelistada põrandkütet, sest see võimaldab tagada ruumis ühtlase sisetemperatuuri [13]. Oluline on märkida,

et põrandküttesüsteemi puhul põrandaplaadi temperatuur tõuseb ning sellega kaasneb pinnasel asuva põrandakonstruktsiooni ja pinnase vahelise soojusvoo suurenemine, mis mõjutab suuresti hoone energiatõhusust ja sisekliima kvaliteeti [4]. Laohoonete puhul võib põranda soojustamine terve põranda ulatuses osutada liiga suure põrandapindala tõttu võimatuks. Eelnimetatud probleemiga tegelemiseks tuleb tähelepanu pöörata põrandakonstruktsiooni soojusisolatsiooni paiknemise lahendusele. Väga oluline on teha kindlaks, kuidas muutub põrandküttesüsteemi toimivus suurtes laohoonetes põrandate erinevate soojustuslahenduste kasutamise korral.

Käesolev magistritöö koosneb kolmest osast. Esimeses osas antakse teoreetiline ülevaade põranda soojusläbivust mõjutavatest teguritest ning vaadeldakse võimalikke lahendusi pinnasele toetuva põranda soojuskadude vähendamiseks.

Uurimistöö metoodilises osas antakse ülevaade erinevatest meetoditest põranda soojusläbivuse ja soojuskadude hindamiseks, hoone simulatsioonimudelite koostamisest ja energiakulu arvutamise meetoditest.

Töö kolmas osa koosneb analüütiliste arvutuste ja simulatsioonide tulemuste analüüsist ning järeldustest, mille alusel on pakutud välja lahendusi, mis aitaksid vähendada energiakulu eesmärgiga muuta hoone energiasäästlikumaks. Lisatud jaotises on välja toodud erinevate meetodite abil arvutatud tulemuste võrdlus.

1. TEOREETILINE ÜLEVAADE

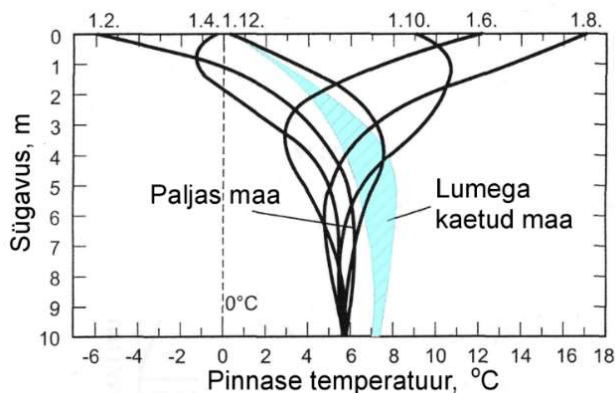
Erinevalt teistest hoone piirdetarinditest on pinnasele toetuv põrand pinnasega kontaktis. See tähendab, et põrandaplaadi ja aluspõranda vahel toimub temperatuuride erinevuste tõttu soojuslevi soojusjuhtivuse teel kõrgema temperatuuriga kehalt madalama temperatuuriga kehale. Reaalsuses on soojuse ülekandmine erinevate temperatuuritingimustel hoone ja aluspinnase vahel on keeruline kolmemõõtmeline protsess [4].

Soojuslevi intensiivsus põrandakonstruktsiooni ja pinnase vahel on tingitud paljude parameetrite mõjust [17]:

- soojusvool läbi põranda, mis sõltub põranda konstruktsioonist;
- soojusvool läbi põranda ääreala, mis sõltub põranda liitekohas asuvast külmasillast;
- aastane perioodiline soojusvool läbi põranda ääreala, mis sõltub pinnase soojuslikust inertsist.

1.1 Kliima mõju põranda soojuskadudele

Eesti asub Euroopa põhjaosas, üleminekuvööndis mereliselt kliimalt mandrilisele. Selles piirkonnas toimuv aktiivne tsükloonaalne tegevus põhjustab tugevaid tuuli, sademeid ja temperatuuri järske kõikumisi, mille tagajärjeks on pinnase suur niiskusesisaldus.



Joonis 1.1 Pinnase temperatuuri muutumise graafik [30]

Aastane välisõhu temperatuuri amplituud mõjutab pinnase temperatuuri sügavusel kuni 20 meetrit [2, 9]. Joonisel 1.1 on näidatud pinnase temperatuuri muutumine sõltuvalt välisõhu temperatuuri muutumisest. Jooniselt on näha, et ühe meetri sügavusel, kus tavaliselt asetsevad hoone maa-alused kandekonstruktsioonid, võib pinnase temperatuur varieeruda vahemikus -2 °C kuni +15 °C. Järelikult võivad aastaringised välisõhu temperatuuri muutused mõjutada ka pinnasele toetuva põranda temperatuurirežiimi.

Graafikust (joonis 1.1) selgub, et pinnase temperatuuri mõjutavad nii talvine välisõhutemperatuur kui ka lumikatte paksus. Lumega kaetud maapinna temperatuur on kõrgem kui palja maapinna temperatuur. Maapinna temperatuuri alandamisel jäätumistemperatuurini toimub pinnases vee külmumine. Pinnases sisalduva vee maht suureneb külmudes ligikaudu 9% [33]. Pinnasesse kogunenud niiskuse külmumise ja paisumise tõttu pinnas kerkib. Külmakerked pinnases võivad aga olla väga ohtlikud ehituskonstruktsioonide terviklikkusele [12].

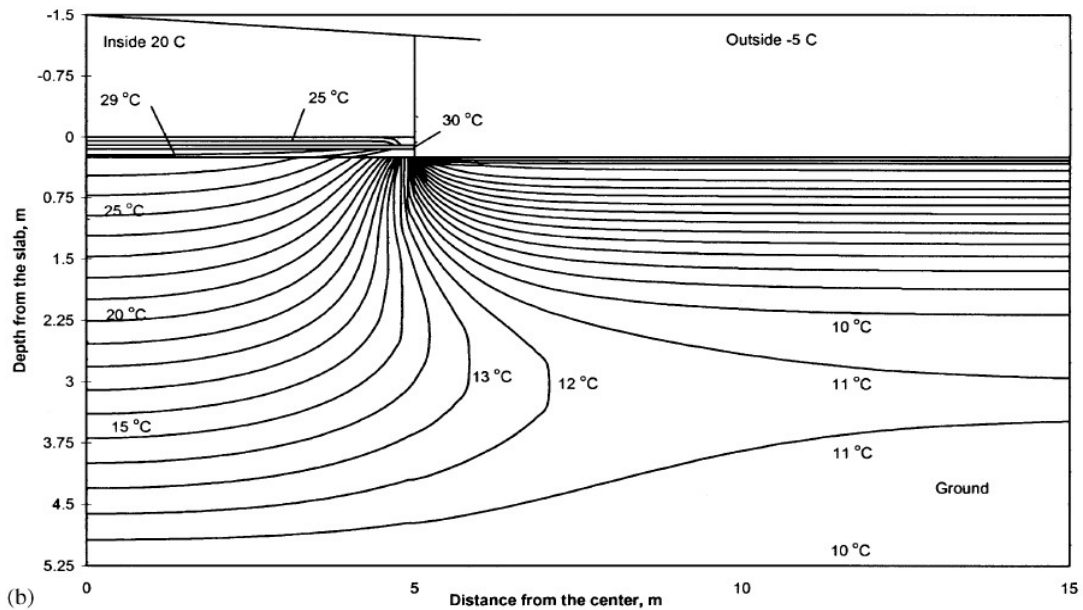
Vastavalt tabelis 1.1 esitatud andmetele võib külmumissügavus varieeruda ka sõltuvalt pinnase tüübist, nii liivapinnase puhul on külmuva pinnase piir sügavamal kui savi puhul. Külmakergete mõju vähendamiseks tuleb vundamenti soojusisolatsiooni abil kaitsta.

Tabel 1.1 Pinnase suurim külmumissügavus, mis tõenäoliselt esineb üks kord 10 ja 50 aasta jooksul (1945 – 1980) [32]

Asukoht	Pinnase tüüp	Külmumissügavus (cm)	
		10 aastat	50 aastat
Tallinn	Saviliiv	80	102
Tartu	Liivsavi	110	134
Kuusiku	Saviliiv	78	100
Tooma	Liivsavi	87	118

Hoone soojuskoormuse määramiseks kasutatakse standardis EVS 844:2016 [18] väljendatud välisõhu arvutuslike temperatuuride väärtusi. Väline õhutemperatuur ja hooajalised temperatuurid mõjutavad suuresti pinnase soojuslikku käitumist hoone perimeetris, efekt tugevneb hoone välisnurkade lähedal, kuid põrandaplaadi keskosas väheneb see kiiresti [10].

Madalamate välisõhutemperatuuride mõju soojustamata põrandaplaadile ja aluspinnasele on näidatud joonisel 1.2.



Joonis 1.2 Soojustamata põrandaplaadi ja pinnase temperatuuriprofiil (talvel) [5]

Jooniselt on näha, et põrandaplaadi perimeetris on pinnase ja põranda temperatuurid madalamad, võrreldes pinnase ja põranda temperatuuridega plaadi kesktsoonis. Talvel väheneb soojustamata põrandaplaadi temperatuur mõõdukalt põranda keskelt perimeetrini. Samal ajal toimub plaadi servades järsk temperatuuri muutus. Temperatuurigradiendi muutus näitab märkimisväärselt suurt soojusvoogu põrandaplaadi perimeetris.

1.2 Pinnasevee mõju pinnase soojusjuhtivusele

Niiskuse, s.h. vee liikumist pinnases põhjustavad eelkõige gravitatsioonijõud, kapillaarjõud ja difusioon. Pinnasevesi võib kapillaarse niiskuslevi tulemusel tungida põrandakonstruktsiooni sisse. Pinnases olev niiskus mõjutab märkimisväärselt pinnase soojusjuhtivust: maksimaalne soojusjuhtivus saavutatakse täielikult küllastunud olekus, kui pinnase poorne struktuur on täielikult veega täidetud. Pinnases sisalduva vee kapillaartõusu kõrgus oleneb pinnase poorsusest ja terastikulisest koostisest. Mida peeneteralisem on pinnas, seda suurem on kapillaartõusu kõrgus. Sealjuures suureneb veesisalduse suurenedes ka pinnase soojusmahtuvus, kuna pinnases sisalduv õhk asendatakse veega [4].

Pinnaseniiskuse tõusu vältimiseks täidetakse põrandakonstruktsiooni alune pind tavaliselt minimaalselt 200 mm paksuse tihendatud killustikalusega. Soojustuse ja

killustikaluse vahele paigaldatakse geotekstiil. Pinnasevesi võib suurendada pinnasele toetava põranda soojuskadusid 74% võrra, sõltuvalt pinnasevee taseme kõrgusest ja juurdevoolust [9]. Seetõttu on oluline märkida, et soojusülekanne põrandakonstruktsioonist pinnasesse võib oluliselt muutuda, kui põhjaveetase põrandaplaadist piisavalt kaugel, sellisel juhul võib pinnasevee mõju soojuslevile jätta arvestamata [17].

1.3 Pinnase soojusmahtuvuse mõju põranda soojuslähivusele

Põranda soojuslähivust mõjutab hoone põrandaaluse pinnase soojuslik inertts. Soojuslik inertts oleneb pinnase soojusmahtuvusest ja soojustakistusest. Suurel määral mõjutavad aluspinna soojusjuhtivust pinnase mineraalne koostis ja struktuur: pinnase tiheduse suurenemisel suureneb pinnase soojusjuhtivus [33]. Hinnangulised pinnase soojuslikud omadused on toodud tabelis 1.2.

Tabel 1.2 Pinnase soojuslikud omadused [17]

Kirjeldus	Soojuseri juhtivus λ W/(m·K)	Soojusmahtuvus ρ_c J/(m ³ ·K)
Savi või savimõll	1,5	3,0 x 10 ⁶
Liiv või kruus	2,0	2,0 x 10 ⁶
Homogeenne kivim	3,5	2,0 x 10 ⁶

Pinnase suure soojusinertsi tõttu toimub läbi pinnasega kokku puutuvate põrandate aastase sise- ja välistemperatuuride muutumise tsükliga seotud soojusvool [17].

1.4 Põranda kuju ja külmasildade mõju põranda soojuslähivusele

Pinnasele rajatava põranda soojuslähivuse puhul tuleb arvestada hoone geomeetriast ning konstruktsioonidest tingitud külmasildade mõju piirete soojuslähivusele. Olenevalt hoone kujust, kompaktsusest ja piirdetarindite liitekohtade hulgast ning mõõdetest võib külmasildade mõju olla erinevate hoonete puhul väga erinev. Kompaktse

ristkülikukujulise hoone soojapidavus on parem võrreldes L-kujulise hoone soojapidavusega [20].

Hoone parima soojapidavuse saavutamiseks peavad olema soojustatud nii pinnasele toetuv põrand kui ka hoone sokli konstruktsioon, soojuslevi põrandaplaadi perimeetris sõltub suurel määral hoone vundamendi ja põrandakonstruktsiooni soojuslähivusest ning pinnase füüsikalistest omadustest.

Põranda ja välisseinte liitekohtades tekivad külmasillad. Külmasillad on kohad piirdetarindis, kus soojuslähivus on lokaalselt suurem ümbritseva tarindi soojuslähivusest. Külmasildade negatiivne mõju seisneb ühelt poolt soojusvoolu suurenemises ja teisalt tarindi sisepinna temperatuuri alanemises. Külmasilla juures on tarindi sisepinna temperatuur madalam ja välispinna temperatuur kõrgem, mistõttu on sisepinnal suhteline niiskus kõrgem. Kõrgem suhteline niiskus võib põhjustada mikroorganismide kasvu ning moodustada sobiva keskkonna hallituse tekkeks [20].

Tarindi madalad pinnatemperatuurid võivad põhjustada intensiivsemat õhu liikumist tarindi läheduses ning madalat operatiivset temperatuuri ruumis johtuvalt kiirguslikust ebasümmeetriast, mõjudes negatiivselt hoone kasutajate soojuslikule mugavustundele. Külmasillad suurendavad hoonete energiakulu. Piirdetarindite soojuslähivuse üldise vähenemise juures kasvab külmasildade osakaal hoone soojuskadudes [20].

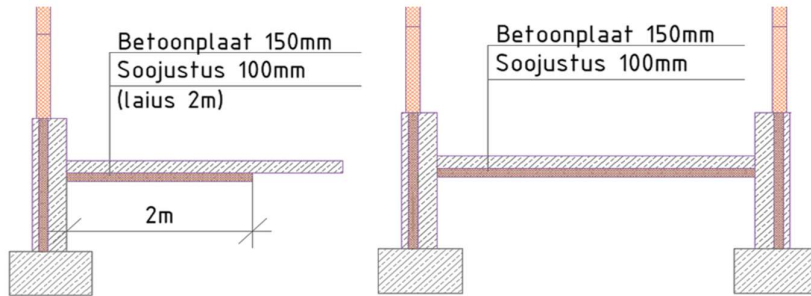
1.5 Pinnasele toetuva põranda soojustamise lahendused

Pinnasele rajatava põranda optimaalne soojustuslahendus võimaldab vähendada põranda soojuskadusid ning samal ajal aitab vältida külmakergete tekkimist.

Põranda soojustus võib olla lahendatud kas põrandaplaadi soojustamisega üksnes perimeetris või põrandaplaadi soojustamisega kogu ulatuses. Nimetatud põrandakonstruktsiooni soojustamise näited on toodud järgneval joonisel 1.3.

Osa hoone soojuskaost läbi pinnasele toetuva põrandakonstruktsiooni toimub põranda ja välisseinte liitekohtades. Põranda soojustamine perimeetris võimaldab minimeerida soojusvoolu põrandaplaadilt pinnasesse ja välisõhku külmasildade kaudu. Samuti

takistab soojustus pörandate äärealade jahtumist ning tagab pöranda pinnal ühtlasema temperatuuri. Selline pöranda soojustamise lahendus on eriti tõhus soojas kliimas asuvate hoonete puhul [12].



Joonis 1.3 Pinnasele toetuva pöranda soojustamise lahendused: soojustamine perimeetris (vasakul), soojustamine kogu pörandaplaadi ulatuses (paremal)

Tänu pinnase inertsiile salvestub soojus sooja aastaaja jooksul pinnasesse. Tänu sellele antakse külmal aastaajal juhul, kui pöranda temperatuur on pinnase temperatuurist madalam, soojus pinnaselt üle pörandakonstruktsioonile. Suvel võib pinnase ja pinnasele toetuva pöranda vahel olev soojuslevi mõjutada hoone jahutuskoormust, st kui pöranda temperatuur on kõrgem kui pinnase temperatuur, antakse soojust pörandakonstruktsioonist üle pinnasele, mis põhjustab pöranda jahtumist [12].

Pörandaplaadi soojustamine kogu ulatuses annab võimaluse piirata soojuskadusid läbi pinnasel paikneva pörandakonstruktsiooni nii pöranda servades kui ka kesktsoonis, see võimaldab suunata soojust pörandaplaadile ja tõsta pörandaplaadi temperatuuri.

Pörandakonstruktsiooni soojustamisel tuleb leida optimaalne isolatsioonimaterjali paksus – see võimaldab tasakaalustada materjali paksuse suurendamisest tulenevat mõju energiakulule ja majanduslikele aspektidele.

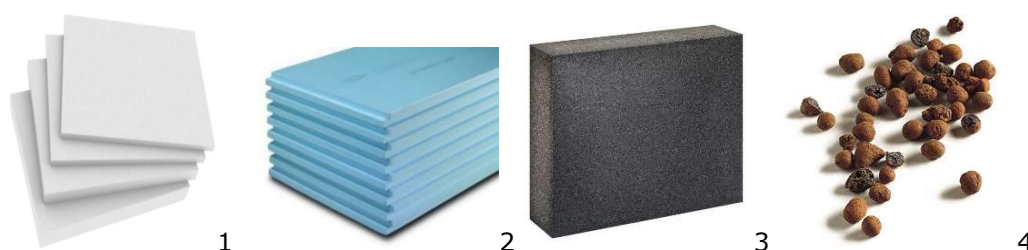
1.6 Soojustusmaterjalid

Pinnasele toetuva pöranda soojustamine võimaldab vähendada soojuskadusid pöranda kaudu ja kaitsta hoone konstruktsioone niiskuse eest [33]. Pinnases leidub niiskust alati, seda tekib nii sademetest kui ka pinnaseveest, samas toimub pinnases alaliselt ka veeauru difusioon. Sel põhjusel tuleks pöranda soojustamiseks eelistada niiskuskindlaid ja survele ning pinnase külmumis-sulamistsükklitele vastupidavaid soojustusmaterjale.

Põrandate soojustamisel tuleb lähtuda põrandapinna kasutuskoormusest. See on eriti oluline lao- ja tootmishoonete puhul, kus on raskelt koormatud põrandad.

Pinnasele toetuvate põrandate soojustamiseks kasutatakse erinevaid soojustusmaterjale:

- vahtpolüstüreen plaadid (EPS);
- ekstrudeeritud polüstüreen plaadid (XPS);
- vahtklaasist plaadid;
- kergkruus.



Joonis 1.4 Soojustusmaterjalid: 1 - EPS soojustusplaat, 2 - XPS soojustusplaat; 3 - vahtklaasist plaat; 4- kergkruus

Soojustusmaterjalide füüsikalised omadused ja hinnad on toodud tabelis 1.3. Andmed soojustusmaterjalide füüsikaliste omaduste kohta on leitud tootjate tootekatoloogidest [26, 29, 37, 38]. Soojustusmaterjalide hinnad on võetud ehitusmaterjalide hulgimüügiga tegelevate ettevõtete hinnakirjadest.

Tabel 1.3 Soojustusmaterjalide võrdlustabel (soojustuse kihipaksus 100mm) [26, 29, 37, 38]

Soojustusmaterjal	Soojuserijuhtivus λ_D , W/(m·K)	Survetugevus, kPa	Veeimavus, %vol	Hind, EUR/m ² (ilma KM)
Vahtpolüstüreen plaadid EPS 80	0,038	≥80	< 3	5,0
Vahtpolüstüreen plaadid EPS 100	0,037	≥100	< 3	5,5
Vahtpolüstüreen plaadid EPS 200	0,033	≥200	< 3	6,2
Ekstrudeeritud polüstüreen plaadid Styrofoam 250 SL-A-N	0,035	≥250	< 0,2	14,8
Vahtklaas plaadid Foamglas T3+	0,036	≥500	0	39,3
Kergkruus fraktsioon 10-20 mm	0,12	≥750	>15	8,64

EPS soojustus

EPS plastmaterjal tekib veeauru abil paisutatud polüstüreengraanulite kokkusulamisel. Suletud pooridega materjali struktuuri moodustab 98% ulatuses kinnistesse pooridesse suletud õhk. EPS plaatide hea soojapidavus on tingitud sellest, et õhul on väga head soojusisolatsiooniomadused [29].

Nagu näha tabelist 1.3, on põranda soojustamiseks sobivate EPS plaatide valik piisavalt suur, kusjuures saadaval on erineva koormustaluvusega plaate. EPS-i tiheduse suurenedes suurenevad ka materjali koormustaluvus ning soojapidavus. Materjali soojuslähivus varieerub 0,033–0,038 W/(m·K). Üks EPS soojustusmaterjali eelistest on suur koormustaluvus toote enda väikese mahukaalu juures [29]. Oluline on mainida, et vahtpolüstüroolsoojustuse hinnatase on teiste vaadeldud soojustusmaterjalide hinnatasemest madalam.

XPS soojustusplaadid

XPS soojustusplaadid valmistatakse ekstrudeeritud polüstüreenist. Materjali vähene niiskuse imamise võime võimaldab kasutada neid soojustusplaate kõrge pinnasevee tasemega kohtades. Materjal on mõeldud taluma ka talvises niiskes pinnases pidevalt toimuvaid külmumis-sulamistsükleid. Seetõttu on ekstrudeeritud polüstüreenist soojustusplaate võimalik paigaldada otse liiv-killustikalusele. Tootele pole lisatud mürgiseid tulekindlust suurendavaid broomiühendeid. Ekstrudeeritud polüstüreenplaadid kuuluvad tuletundlikkuse euroklassi F. XPS soojustusplaate kasutatakse tavaliselt paneelina, mida saab kergesti töödelda ja lõigata, ilma et materjal kaotaks oma jõudlust [29].

Vahtklaas

Vahtklaas on peaaegu 100% puhtast klaasist valmistatud isoleeriv materjal, mis saadakse keeruka tootmisprotsessi käigus. Paneeli sisemus moodustub süsihappegaasiga täidetud ja suletud kärgedest. Vahtklaasi kasutatakse tavapäraselt hoonetel, kus oluline on vastupidavus niiskusele [37].

Nagu on näha tabelist 1.3 vahtklaas on vaadeldavatest soojustusplaatidest tugevaim.

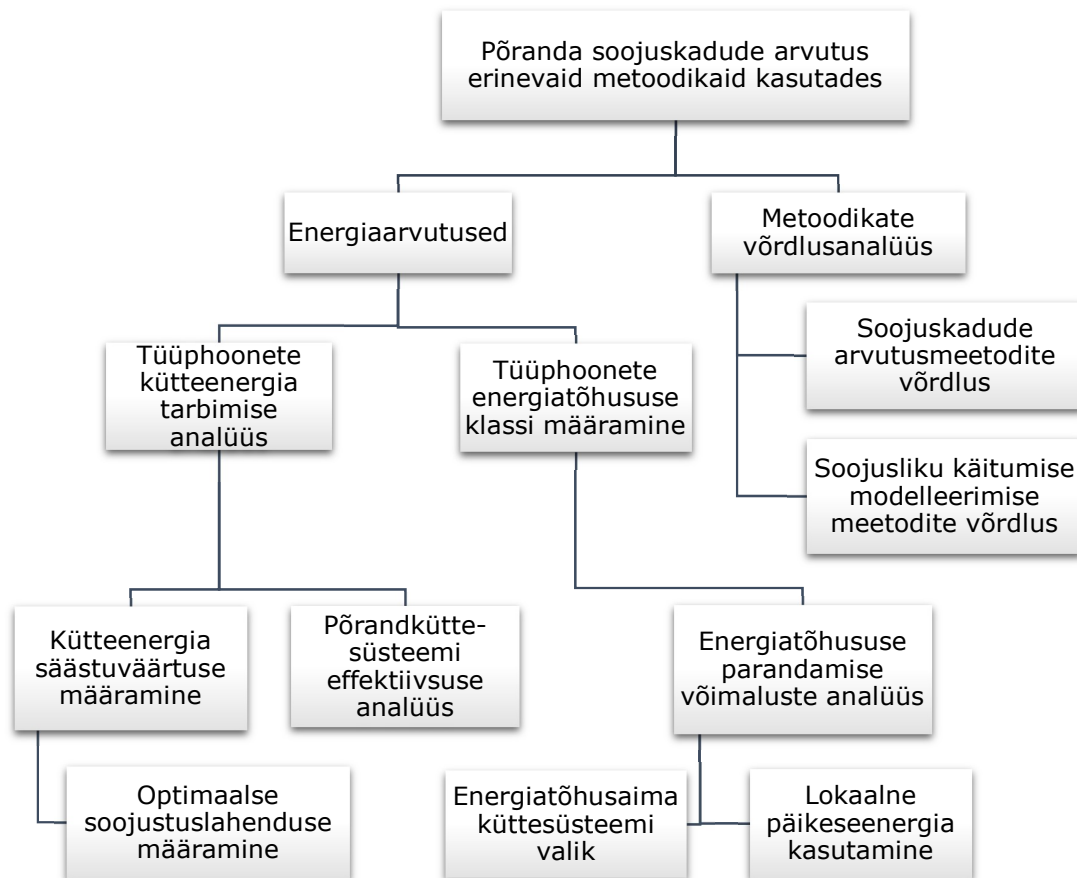
Kergkruus

Kergkruus on kerge keraamiline täite- ja soojustusmaterjal, mis saadakse savist pöördahjus põletusprotsessi tulemusel. Kergkruus kasutatakse soojustus ja täitematerjalina vundamentide, keldriseinte ja torustike ümber, põrandate ning vahe- ja katuslagede ehitusel. Samuti selle materjali võib kasutada koormuse vähendajana hoonete all, keldriseintele langeva koormuse vähendamiseks ning põrandates [38].

Käesolevas uurimistöös võeti põranda soojuslähivuse arvutamisel arvesse asjaolu, et uuritava hoone põranda soojustamiseks kasutatakse EPS 200 soojustusplaate. Soojustusmaterjali valimisel lähtuti väikesest soojusjuhtivuse väärtusest ning materjali madalamast maksumusest.

2. METOODIKA

Selles peatükis kirjeldatakse kasutatud arvutusmetoodikaid, vaadeldud uurimisobjekti variante, uuringu läbiviimiseks vajalike andmete ja parameetrite kogumit. Järgneval skeemil (joonis 2.1) on esitatud uurimistöö peamised etapid.

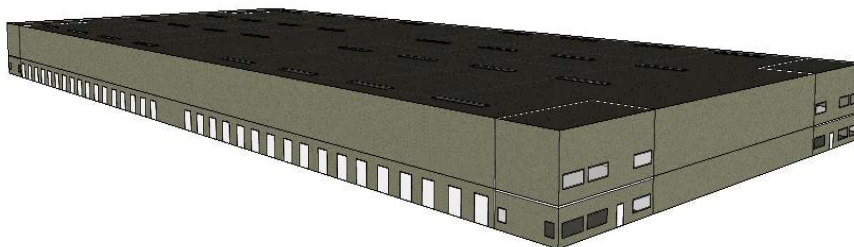


Joonis 2.1 Uurimistöö etapid

2.1 Uuritud objekti kirjeldus

Käesoleva töö uurimisobjekt on laohoone. Uurimuses on arvestatud, et vaadeldava hoone asukoht on Eestis, Harjumaal. Uuritud objektiks on 1-korruselise risttahukakujuline laohoone koos selle gabariitides olevate kahekorruseliste bürooplokkidega. Hoone on gabariitmõõtudega 240,5 x 108,5 m ja ehitusaluse pinnaga 26 094,3 m², hoone kõrgus on 11,6 m. Nelja bürooploki kogupindala on 2713,0 m², lao

hooneosa pindala on 24 906,3 m². Hoone k etav pind on 27260,0 m². Joonisel 2.2 on toodud uuritava laohoone mudel.



Joonis 2.2 Laohoone mudel

2.1.1 Hoone konstruktsioonid

K esolevas t oos on uuritud erinevad tarindikonstruktsioonide lahendusi. Katuste, v alisseinte, vundamentide ja avat aidete parameetrid on variantide anal uisis v otud konstantseteks. Laohoone vundamendid on kavandatud monoliitsete raudbetoonist postvundamentidena. Hoone p ohikandekonstruktsioonideks on monteeritavad raudbetoonist karkassipostid ja talad. V alisperimeetri sokli moodustavad monteeritavad kolmekihilised vahtpol st reeniga soojustatud raudbetoonpaneelid kogupaksusega 370 mm.

V alisseinad on projekteeritud soojustatud SP2E X-PIR Energy Sandwich-paneelidest paksusega 120 mm. V alisseinad b urooruumides soojustatakse t aidendavalt 10 cm mineraalvillaga vaheseina terasprofiilide vahel ja kaetakse kipsplaatidega. Katuslagi on kavandatud kandval profiilplekil soojustatud lamekatusena. Katused on kaetud SBS-t uupi rullkattega. Kontoriplokkide siseseinad on kavandatud betoonplokkidest paksusega 200 mm. Hoone aknad on kavandatud kolmekordse klaaspaketiga ja plastikraamidega. Katusele on projekteeritud suitsuluugid. Akende ja katuseakende osakaal hoone v alispirdetarinditest on 1,8%. Hoone v alisuksed on soojustatud metalluksed. Lao hooneosas on toodete laadimiseks ette n ahitud soojustatud paneelidest t ostv aravad. Hoonete v alispirete soojusl bivuste v aartused esitatud tabelis 2.4.

Anal uisis on varieeritud p randa konstruktsiooni. Algvariandi korral on eeldatud, et hoone p rand kavandatakse tihendatud t aitepinnasele armeeritud raudbetoonplaadina paksusega 150mm. P randa alla on kavandatud EPS 200 vahtpol st roolplaatidest soojustus. P randakonstruktsioonis muudetakse soojustuse paiknemise viis ning soojustusmaterjali kihi paksus.

2.1.2 Hoone tehnosüsteemid

Käesolevas alapeatükis on toodud uuritava hoone algvariandi tehnosüsteemide kirjeldus.

On arvestatud, et hoonesse paigaldatakse vesipõrandküttesüsteem ning soojus saadakse kaugküttevõrgust.

Hoone ventilatsioon on jaotatud erinevateks süsteemideks vastavalt ruumide otstarbele ja nende paiknemisele hoones. Ruumide õhuvahetused on leitud vastavalt Ettevõtlus- ja infotehnoloogiainistri määruse nr 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ lisa 1 [23] toodud normarvudele. Andmed ventilatsiooni õhuvahetuse kohta on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Ventilatsiooni välisõhu vooluhulgad [23]

Hoone Kasutusotstarve	Välisõhu vooluhulk, l/(s·m²)
Kontorihooned	2
Laohooned	0,35

Hoonesse on ette nähtud soojustagastusega mehaaniline sissepuhke-väljatõmbe ventilatsioonisüsteem. Uuritud laohooned energiatõhususe tagavad rootorsoojustagastiga ventilatsiooniagregaadid, soojustagasti temperatuuri suhtarv on arvestatud 0,8, ventilaatorite SFP = 1,5 kW/(m³/s). Soojusvaheti jäätumise vältimiseks võeti arvesse, et heitõhu miinimumtemperatuuri väärtus on -5 °C.

Igale bürooplokile on ette nähtud eraldi jahutussüsteem. Ruumide jahutusvajadused on määratud soojuskoormustest inimestelt, valgustusest, elektriseadmetelt ning läbi välispiirete tulevast liigsoojusest [20].

2.1.3 Analüüsitud variandid

Selleks, et määrata kindlaks kütteenergia vajaduse ja energiatarbimise muutus tulenevalt põrandate erinevatest soojustuslahendustest, on analüüsitud järgnevaid pinnasel asuva põranda soojustuslahenduste variante:

- soojustus hoone põranda perimeetril;
- soojustus kogu põranda ulatuses.

Kokku uuritakse kolme erineva soojustusmaterjali paiknemise lahendust, kusjuures iga lahenduse puhul vaadeldakse tüüphoone põranda soojustusplaadi kolme erineva paksusega varianti. Lisaks vaadeldakse soojustamata põrandakonstruktsiooniga hoone varianti. Vaadeldava hoone põranda soojustusvariantide loetelu on toodud järgnevas tabelis 2.2.

Tabel 2.2 Põranda soojustuslahendused

Tüüphoone nr.	Põranda soojustuslahendus	Soojustuskihi paksus, mm
Tüüphoone 0	-	-
Tüüphoone 1a	Soojustus perimeetris 2 m	100
Tüüphoone 1b		150
Tüüphoone 1c		200
Tüüphoone 2a	Soojustus perimeetris 6 m	100
Tüüphoone 2b		150
Tüüphoone 2c		200
Tüüphoone 2a	Soojustus terve põranda ulatuses	100
Tüüphoone 3b		150
Tüüphoone 3c		200

Uurimuses vaadeldakse erinevate küttesüsteemilahenduste mõju hoone energiatarbimisele. Energiaarvutused teostatakse käesolevas töös eeldusel, et hoonesse on kavandatud järgmised soojusjaotussüsteemi variandid:

- põrandküttesüsteem;
- radiaatorküttesüsteem;
- õhkküttesüsteem (puhurid).

Samuti selgitatakse välja erinevate soojusallikate kasutamise mõju hoone energiatõhususele, kokku vaadeldi nelja soojusallika varianti:

- maagaas;
- kaugküte;
- tõhus kaugküte;
- puidupõhine kütus.

Arvutuste tulemusena määratakse kindlaks, millise küttesüsteemi ja soojusallika kombineerimisel on võimalik parendada hoone energiatõhusust ning saavutada liginullenergiahoone tase.

Lisaks analüüsitakse päikesepaneelide kasutamise võimalust elektrienergia tootmiseks ning iga tüüppoone variandi puhul arvutatakse välja liginullenergiahoone taseme saavutamiseks vajalik päikesepaneelide hulk.

2.2 Põranda soojuserikadude määramise meetodid

Vastavalt MTM määrusele nr. 58 [23] arvutatakse hoone soojuskadu pinnasesse järgmise meetodite põhjal:

- dünaamilise ühemõõtmelise arvutusega, milles võetakse arvesse vähemalt ühemeetrine kiht soojust akumul eerivat pinnast, mille all on konstantne temperatuur 7 °C;
- dünaamilise kolmemõõtmelise arvutusega;
- kasutades vastavalt standardile EVS-EN ISO 13370 määratud väärtust või olemasolevate juhendmaterjalide tabeliväärtusi.

Käesolevas uurimistöös teostati pinnasele toetuva põranda soojuskadude arvutus kolme erineva meetodika baasil:

- EVS-EN ISO 13370:2017 standardi järgi;
- EVS 829:2003 (kehtetu) standardi järgi;
- simulatsioonitarkvara abil koostatud mudeli põhjal.

2.2.1 EVS-EN ISO 13370:2017 standardi arvutusmeetodika

Pinnasel asuva põranda soojuserikadu arvutatakse standardi EVS-EN ISO 13370 järgi. Soojuslevi pinnasesse on hoone külgedel kahesuunaline ja hoone nurkades kolmesuunaline [17]. Soojuslevi läbi põranda sõltub põranda tarindusest (soojustusmaterjal, selle paksus) ja hoone geomeetriast (plaanilahenduse kompaktsus).

Põrandas tekkiva soojusvoo kolmemõõtmelisusega arvestamiseks on arvutustes kasutatud põranda tunnusmõõtu B' , mis avaldub järgmiselt (2.1) [17]:

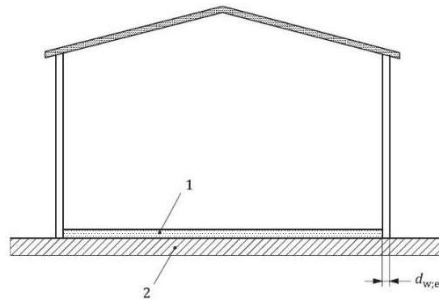
$$B' = \frac{A}{0,5 \cdot P} \quad (2.1)$$

kus B' – põranda tunnusmõõt, m;
 A – põranda pindala, m²;
 P – põranda välisperimeeter, m.

Põranda soojustakistust esindab selle ekvivalentne paksus, milleks on sama soojustakistusega maapinna paksus. Ekvivalentne kogupaksus d_f arvutatakse valemiga (2.2) [17]:

$$d_f = d_{w;e} + \lambda_g \cdot (R_{si} + R_{f;sog} + R_{se}) \quad (2.2)$$

kus d_f – põranda võrdväärne paksus, m;
 $d_{w;e}$ – välisseina kogupaksus koos seina kõikide kihtidega, m;
 λ_g – pinnase soojuserijuhtivus, W/(m·K), pinnas, millel uuritav hoone asub on kruus. Pinnase soojuslikud omadused on esitatud tabelis 1.2;
 R_{si} – sisepinna soojustakistus, (m²·K)/W;
 R_{se} – välispinna soojustakistus, (m²·K)/W;
 $R_{f;sog}$ – põrandatarindi soojustakistus, kaasa arvatud kõik soojustuskihid plaadi peal, all ja vahel ning põrandakattematerjali soojustakistus, (m²·K)/W.



Joonis 2.3 Pinnasel asuva põranda skeem (1 - põrandaplaat, 2 - pinnas, $d_{w;e}$ - välisseinte või vundamendi seina paksus) [17].

Piirde soojuslähivuse arvutamisel kasutatakse pindade soojustakistuse arvutussuursusi, mis on toodud tabelis 2.3.

Tabel 2.3 Piirde pindade keskmised soojustakistused piirdetarindi soojuslähivuse arvutamisel [20]

	Soojusvoolu suund		
	Üles (lagi)	Horisontaalne (sein)	Alla (põrand)
R_{si} , (m ² ·K)/W	0,1	0,13	0,17
R_{se} , (m ² ·K)/W	0,04	0,04	0,04

Põrandatarindi soojustakistuse väärtus leitakse põrandakonstruktsiooni materjalikihtide arvutuslikute soojustakistuste summeerimisel (2.3) [17]:

$$R_{f;soj} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2.3)$$

kus R_1, R_2, \dots, R_n – iga kihi arvutuslik soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$.

Põrandaplaadi all asuva killustiku- ja/või kruusakihi soojusjuhtivus loetakse pinnase omaga samaväärseks ning selle soojustakistust ei arvestata.

Soojuslikult homogeense materjalikihi arvutuslik soojustakistus leitakse valemiga (2.4) [28]:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.4)$$

Kus d – materjalikihi paksus, m
 λ – materjali soojusjuhtivus, $W/(m \cdot K)$.

Käesolevas uurimuses vaadeldavate põrandakonstruktsioonide soojustakistuste arvutused on toodud lisa L.1.

Soojuslähivus arvutatakse sõltuvalt põranda võrdväärsest paksusest ja põranda tunnusmõõdust. U-väärtuse arvutusvalem sõltub sellest, kas [17]:

$d_f < B'$ (soojustamata või mõõduka soojustusega)

$d_f \geq B'$ (hästi soojustatud)

Kui $d_f < B'$:

$$U_{fg;soj} = \frac{2 \cdot \lambda_g}{\pi \cdot B + d_{ft}} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B'}{d_f} + 1 \right) \quad (2.5)$$

kus $U_{fg;soj}$ – põranda soojuslähivus, $W/(m^2 \cdot K)$

Kui $d_f > B'$:

$$U_{fg;soj} = \frac{\lambda_g}{0,457 \cdot B + d_f} \quad (2.6)$$

Standardis arvutatakse pinnase soojuserikadu püsivates tingimustes vastavalt valemile (2.7) [17]:

$$H_g = A \cdot U + P \cdot \Psi_w \quad (2.7)$$

kus H_g – soojuserikadu püsivates tingimustes levi puhul pinnasesse, W/K;
 A – põranda pindala, m²;
 U – sise- ja väliskeskonna vaheline soojuslähivus, W/(m²·K);
 P – põranda välisperimeeter m;
 Ψ_w – sein/põranda liitekohta joonsoojuslähivus, W/(m·K).

Juhtudel, kui pinnasel asuva põranda soojustus paikneb horisontaalselt põranda perimeetri ulatuses, teostatakse sellise põranda soojuslähivuse arvutus allpool kirjeldatud meetodika järgi. Käesoleva meetodika valemid on kohaldatavad juhul, kui põranda serva isolatsiooni laius või sügavus on ehitise laiusega võrreldes väike. Põranda serva isolatsiooni toimet käsitletakse joonsoojuslähivusena Ψ .

Joonsoojuslähivuse arvutusel võetakse arvesse serva soojustusest tulenevat täiendavat ekvivalentset paksust d' [17]:

$$d' = R' \cdot \lambda \quad (2.8)$$

kus R' – täiendav soojustakistus, (m²·K)/W, mis serva soojustamisega kaasneb, see tähendab serva soojustuse ja seda asendava pinnase soojustakistuse erinevust [17] :

$$R' = R_n - \frac{d_n}{\lambda} \quad (2.9)$$

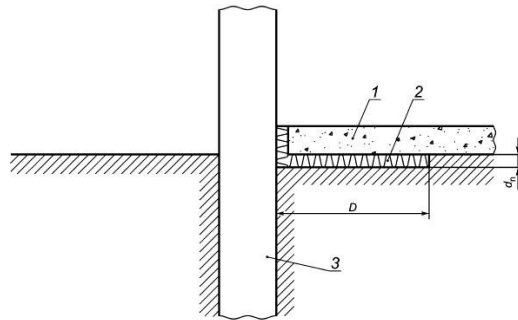
kus R_n – horisontaalse või vertikaalse serva soojustuse soojustakistus, (m²·K)/W;
 d_n – serva isolatsiooni paksus, m.

Horisontaalselt paikneva soojustuse korral kehtib valem (2.10) [17]:

$$\Psi_{g,ed} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln \left(\frac{D}{d_f} + 1 \right) - \ln \left(\frac{D}{d_f + d'} + 1 \right) \right] \quad (2.10)$$

kus $\Psi_{g,ed}$ – joonsoojuslähivus, W/(m·K);
 D – horisontaalse servasoojustuse laius, m;

d' – määratlekse valemis (2.8), m.



Joonis 2.4 Horisontaalse servasoojustuse skeem (1 - põrandaplaat; 2 - horisontaalne serva soojustus; 3 - vundamendi sein; 4 - servasoojustuse paksus; D - horisontaalse servasoojustuse laius [17].

Vertikaalselt allapoole maapinda piki põranda perimeetrit paikneva soojustuse korral kehtib valem (2.11) [17]:

$$\Psi_{g,ed} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot D}{d_f} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2 \cdot D}{d_f + d'} + 1 \right) \right] \quad (2.11)$$

Kus $\Psi_{g,ed}$ – joonsoojusläbivus, W/(m·K);

D – vertikaalne servasoojustuse sügavus maapinnast, m.

Põranda soojusläbivuse arvutamiseks valemit (2.12) kasutades võib arvestada serva isolatsiooni mõjuga [17].

$$U_{fg;sog} = U_{fg;sog;0} + \frac{2 \cdot \Psi_{g,ed}}{B} \quad (2.12)$$

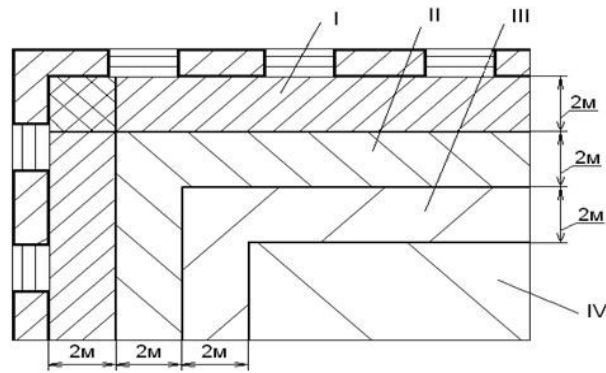
kus $U_{fg;sog;0}$ – põranda soojusläbivus ilma serva isolatsiooni arvestamata, W/(m²·K).

Sellel juhul kasutatakse valemit (2.7) pinnase soojuserikao arvutamiseks püsivates tingimustes.

Selle arvutusmetoodika kasutamisel teostatud sojuskaode arvutus esitatud lisas L.2.

2.2.2 EVS 829:2003 standardi arvutusmetoodika

Põranda soojuskaod arvutatakse tsooniliselt, kirjeldades võõsid hoone perimeetri ümber. See on tingitud asjaolust, et põranda all oleva pinnase temperatuur on hoone keskosas vundamendiosaga võrreldes kõrgem. [16]



Joonis 2.5 Pinnasel asuva põranda jagamine tsoonideks.

Standardis EVS 829:2003 kirjeldatud meetoodika järgi jagatakse põrand 2 m laiusteks ribadeks piki välisseinu. Välispiirdele kõige lähemal asub esimene tsoon, järgnevad teine, kolmas ja neljas tsoon [16]. Põrandapinna tsoonideks jagamise põhimõtte on näidatud joonisel 2.5. Hoone välisnurgas paiknevas nurgas 2 m × 2 m toimub intensiivsem soojuse äravool. Siin kandub soojus välja korruga mõlema nurga moodustava seiniosa suunas. Et seda arvestada, arvutatakse soojuserikadu läbi välisnurgas asuva 2 m × 2 m suuruse pinna kahekordselt [16].

Vastavalt nimetatud meetoodikale loetakse pinnasel asuvat põrandat mittesoojustatuks, kui põrandakihtide erisoojusjuhtivus λ on suurem kui 1 W/(m·K) [16].

Pinnasel oleva soojustamata põranda soojuserikadu on määratav valemiga (2.13) [16]:

$$H_p = \sum U_{ting} \cdot A \quad (2.13)$$

kus U_{ting} - tinglik põranda soojusläbivus, W/(m²·K);
A - vastava tsooni põranda pind, m²;

Soojustakistuse R väärtused soojustamata põranda tsoonidele võetakse:

- esimesele tsoonile $R_I = 2,1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$;
- teisele tsoonile $R_{II} = 4,3 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$;

- kolmandale tsoonile $R_{III} = 8,6 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$;
- neljandale tsoonile $R_{IV} = 14,2 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$.

Põranda esimese tsooni soojuserikadu on määratav valemiga (2.14) [16]:

$$H_{pI} = A_I \cdot U_I \quad (2.14)$$

kus H_{pI} - põranda esimese tsooni soojuserikadu, W/K

A_I - põranda esimese tsooni pindala, m²;

$U_I = 1/R_I$ - põranda esimese tsooni soojusläbivus, W/(m²·K);

Põranda teise tsooni soojuserikadu määratakse analoogselt, kasutusele tulevad suurused A_{II} , U_{II} ja R_{II} . Analoogselt määratakse soojuserikaod ka ülejäänud kolmandale ja neljandale tsoonile.

Põranda soojuserikao arvutamine toimub iga tsooni kohta eraldi ning saadud arvutustulemuste summeerimisel saadakse kogu põranda soojuserikadu.

Põranda soojuserikadu leitakse järgneva valemiga (2.15) [16]:

$$H_p = H_{pI} + H_{pII} + H_{pIII} + H_{pIV} \quad (2.15)$$

kus H_p - põranda soojuserikadu, W/K

$H_{pI}, H_{pII}, H_{pIII}, H_{pIV}$ - põranda tsoonide soojuserikadu, W/K

Kui pinnasel asuva põranda konstruktsioonis on kihte, mille materjali $\lambda < 1$, siis selline põrand loetakse soojustatud põrandaks. Soojustatud põranda soojuserikadu määratakse samuti tsoonide kaupa, kuid soojustakistus saadakse soojustuskihi soojustakistuse lisamisega vastava tsooni soojustamata põranda soojustakistusele.

Põranda esimese tsooni soojustakistus leitakse valemiga (2.16) [16]:

$$R_{spI} = R_I + \sum \frac{\delta}{\lambda} \quad (2.16)$$

kus R_{spI} - põranda esimese tsooni soojustakistus, (m²·K)/W;

R_I - põranda esimese tsooni soojustamata osa soojustakistus, (m²·K)/W;

δ - soojustuskihi paksus, m;

λ - soojustuskihi materjali soojuserijuhtivus, W/(m·K).

Analoogselt määratakse ka teiste pörandatsoonide soojustakistused.

Selle arvutusmetoodika kasutamisel teostatud soojuskaode arvutus esitatud lisas L.3.

2.2.3 Arvutamine simulatsioonitarkvara abil

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) on dünaamilist simulatsioonitarkvara hoone üksikute tsoonide sisekliima ning kogu hoone energiakulu uurimiseks. Energiatarbe- ja sisekliima simulatsiooni programmi IDA ICE abil sisestatakse analüüsitava hoone andmed simulatsioonimudelisse. Sisestatud parameetrite alusel on võimalik arvutada vaadeldava hoone soojuskadusid läbi piirdetarindite, leida hoone energiavajadus kütteks, ventilatsiooniks, jahutuseks ja teostada variantarvutusi optimaalseima tulemuse saavutamiseks. Hoone energiavajaduse arvutusel IDA-ICE tarkvara abil kasutatakse Eesti energiaarvutuste baasaastat, mis sisaldab tunnipõhiseid väliskliima andmeid [22].

Simuleerimistarkvara võimaldab eraldi määrata soojuskadu läbi pöranda-, seina- ja katusekonstruktsioonide. Simulatsioonimudeli koostamisel võetakse arvesse pinnase füüsikalisi omadusi ja hoonealuse pinnase temperatuuri.

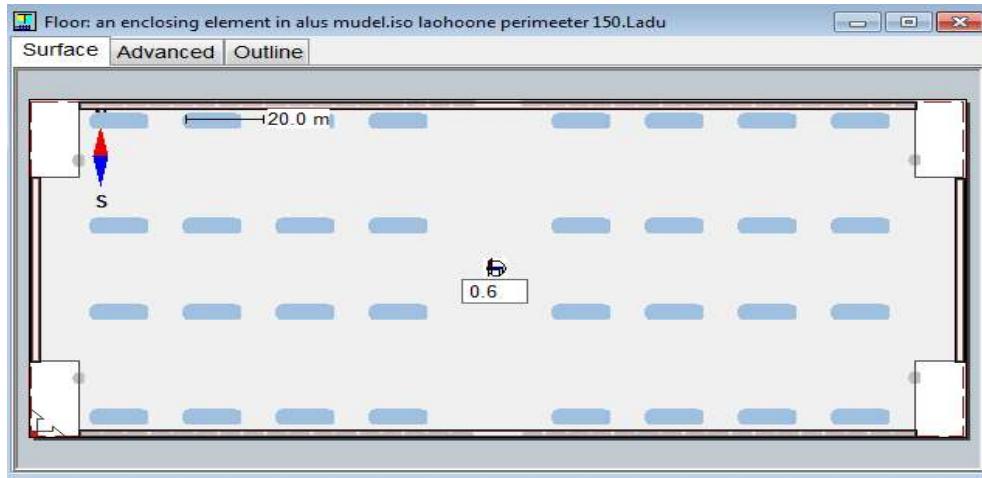
Pinnase ja pinnasel oleva pörandaplaadi vahelise soojusvahetuse arvutuse saavutamiseks võib kasutada erinevaid arvutusmeetodeid:

- ISO 13370 metoodika;
- lihtsustatud ICE 3 metoodika.

ISO 13370 metoodika

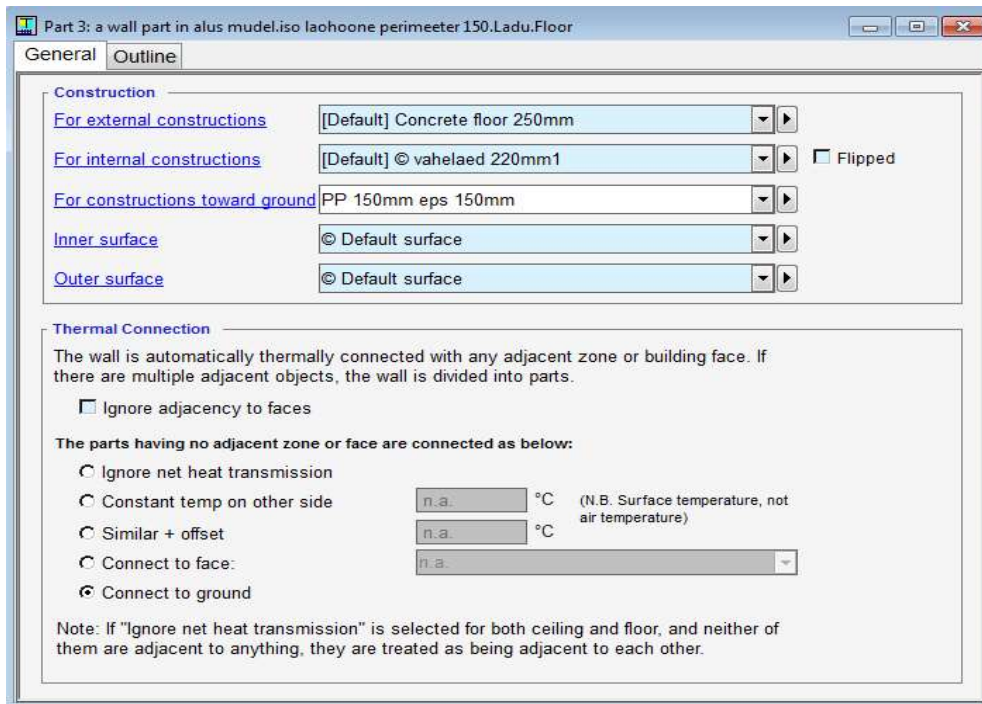
Metoodika põhineb standardis EVS-EN ISO 13370:2017 [17] kirjeldatud arvutusmeetodil. ISO mudel on rakendatud pinnasel asuvate pörandaplaatide jaoks. Metoodika kasutamisel arvestatakse modelleeritud pinnase temperatuuriga sügavusel 0,5 m hoone all. Pinnase temperatuur piki hoone vundamendi perimeetrit arvutatakse sarnaselt [3].

Perimeetris soojustatud põrandakonstruktsiooni modelleerimiseks kasutatakse käsku „wall-part“. Nagu näidatud joonisel 2.6 on nimetatud käsku kasutades võimalik muuta põranda konstruktsiooni ning lisada soojustust nõutud põranda tsoonidele.



Joonis 2.6 IDA ICE „wall-part“ käsu rakendamine

Tarkvarasse sisestatakse andmed muudetava konstruktsiooni osa kohta ning määratakse konstruktsiooniga kokkupuutes oleva keskkonna soojustehnilised parameetrid. Pinnasele toetuva põrandakonstruktsiooni puhul joonisel 2.7 näidatud variantidest tuleb valida positsioon „Connect to ground“.



Joonis 2.7 „Wall-part“ parameetrite valik

ICE 3 metoodika

Antud meetodi kasutamisel eeldatakse, et hoonealuse pinnase temperatuur on konstantne. Pinnase temperatuur arvutatakse valitud kliimafaili keskmise õhutemperatuurina. Pinnase temperatuur piki hoone vundamendi perimeetrit võrdub välisõhu temperatuuriga. Metoodika ei võimalda teostada 2D ja 3D modelleerimist [3].

Lähtudes sellest, et ICE 3 metoodika ei arvuta põranda soojuslähivust vastavalt standardis EVS-EN ISO 13370:2017 [17] kirjeldatud metoodikale, pinnasele toetuva põranda soojuskadude täpsemaks arvutamiseks tuleb sisestada tarkvarasse standardi EVS-EN ISO 13370:2017 [17] järgi arvutatud põranda soojuslähivuse väärtused.

Olukorras, kui Kliimafaili info puudub ettenähtud võimalus käsitsi sisestada mudelisse pinnase temperatuuri parameetrid [3]. Vastavalt seadusele tuleb Eesti kliima piirkonnas asuva hoone pinnasesse minevate soojuskadude arvutamisel arvesse võtta ühemeetrine kiht soojust akumuleerivat pinnast, mille all on konstantne temperatuur +7 °C [23].

2.2.4 Arvutusmudelite koostamine

Käesolevas töös on kasutatud simulatsioonitarkvara IDA-ICE 4.8. Simulatsioonimudeli koostamisel kirjeldatakse võimalikult täpselt hoone parameetreid. Arvestades sellega, et põranda soojusliku käitumise uurimiseks käesolevas töös kasutakse mõlemat põranda soojuskadude simuleerimise meetodit, koostati tüüphoonete mudelite versioonid ISO 13370 ja ICE 3 metoodikatega modelleerimiseks.

Tabel 2.4 Tüüphoonete välispiirete soojuslähivused

Välispiire	Soojuslähivus, W/(m ² K)
Välissein (ladu)	0,18
Välissein (kontor)	0,12
Katus	0,09
Aken (klaaspakett koos raamiga)	0,77
Katuseaken	0,85
Uksed/värvavad	1,09

Simulatsioonimudelitesse sisestati hoone plaanid ja avatäited. Hoone mudeli lihtsustamiseks on kontoriplakkide ruumid defineeritud ühe tsoonina, samamoodi on ühendatud ka mõlemad lao osad. Määrati kindlaks, milliseid piirdetarindite konstruktsioone hoones kasutatakse. Tarkvarasse sisestati andmed tüüphoonete

piirdetarindite konstruktsioonide kihtide paksustest ja materjalide soojustehnilistest omadustest. Laohoone välispiirete arvutuslikud soojuslähivused on toodud tabelis 2.4.

Konstruktsioonide liitekohas esinevate joonkülmasildade soojuserikadu saab kindlaks määrata standardites kirjeldatud arvutuslikul meetodil, kasutades selleks loodud programmi, näiteks THERM, ning kasutades külmasildade katalooge. Täpse konstruktsioonide ühendussõlmede info puudumise tõttu käesolevas töös kasutatakse Kredex-i kataloogis [12] esitatud joonkülmasildade väärtuseid (tabel 2.5). Põranda ja välisseina liitekoha joonsoojuslähivus on arvatud tarkvara THERM 7.6 abil, arvatud joonsoojuslähivuse väärtus erinevate põranda soojustamise lahenduste korral ja sõltuvalt ruumide siseõhutemperatuuri parameetritest varieerub see 0,11-0,16 W/(m·K). Lisas L.4 on esitatud põranda ja välisseina liitekoha joonsoojuslähivuse arvutus tüüppoone 3b näitel.

Tabel 2.5 Piirdetarindite liitekohtade joonsoojuslähivused [12]

Tarindite liitekoht	Tarindi liitekoha joonsoojuslähivus ψ, W/(m·K)
Välisseina välisnurk	0.1
Välisseina ja vahelae liitekoht	0.1
Katuse ja välisseina liitekoht	0.2
Akna liitumine välisseinaga	0.1

ICE 3 meetodikaga arvutamiseks sisestati tarkvarasse standardi EVS-EN ISO 13370:2017 [17] järgi arvatud U-arvu väärtused (tabel 2.6).

Tabel 2.6 Tüüphoonete põrandakonstruktsioonide soojuslähivused

Tüüppoone nr.	Põranda soojuslähivus, W/(m²·K)
Tüüppoone 0	0,093
Tüüppoone 1a	0,078
Tüüppoone 1b	0,077
Tüüppoone 1c	0,076
Tüüppoone 2a	0,070
Tüüppoone 2b	0,067
Tüüppoone 2c	0,066
Tüüppoone 3a	0,058
Tüüppoone 3b	0,052
Tüüppoone 3c	0,047

Hoone parameetrite sisestamisel võeti arvesse hoone kasutusotstarve, nõutavad ruumide sisetemperatuurid ja ruumidesse inimestest, seadmetest ja valgustusest

eralduv liigsoojus. Simuleerimiseks vajalikud kliimaandmed võeti kliimafailist „Estonia TRY“ [36].

Simulatsiooni mudeli koostamisel arvestati, et hoones on erineva kasutusotstarbega ruumid: kontoriplokid ja ladu. Nende ruumide kasutamise parameetrid on toodud tabelis 2.7.

Tabel 2.7 Hoone kasutusajad ja vabasoojus [23]

Hoone	Kasutusaeg			Kasutu- aste	Valgustus W/m ²	Seade W/m ²	Inimene m ² /in
	Kellaaeg	H/24h	d/7d				
Kontorid	07:00– 18:00	11	5	0.55	10	12	17
Laohoone	00:00– 00:00	24	7	0.2	10	0	0

Hoone arvutuslik sisetemperatuur sõltub hooneosa kasutusotstarbest. Kütte- ja jahutussüsteemi dimensioneerimiseks sisestati tarkvarasse tabelis 2.8 toodud kütmise ja jahutuse seadeväärtused.

Tabel 2.8 Ruumitemperatuuride seadeväärtustele kehtivad nõuded [23]

Hoone kasutusotstarve	Kütmise seadeväärtus, °C	Jahutuse seadeväärtus, °C
Kontorihoone	21	25
Laohoone	15	27

Välisõhu soojendamise seotud soojuskadude arvutuste täpsete tulemuste saamiseks sisestati simulatsioonimudelisse info ventilatsiooni ja infiltratsiooni õhuvooluhulkade kohta.

Ventilatsiooni välisõhu vooluhulgad on valitud vastavalt Ettevõtlus- ja infotehnoloogiainistri määruse nr. 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ lisas 1 [23] toodud väärtustele. Andmed ventilatsiooni õhuvahetuse kohta on toodud tabelis 2.1.

Määruse nr. 63 [23] järgi arvestatakse väljaspool mitteelamu kasutusaega ventilatsiooni kasutusajavälise režiimi õhuvooluhulgaks 0,15 l/(s·m²). Selline tingimus võimaldab minimeerida hoone energiakulusid. Samuti sisestati simulatsioonimudelisse andmed ventilaatorite elektrilisest erivõimsusest ning ventilatsiooniseadmete soojustagastite parameetritest.

Vastavalt määrusele arvutatakse aasta keskmine infiltratsiooni õhuvooluhulk q_i (l/s) valemiga (2.17) [23]:

$$q_i = \frac{q_{50}}{3,6 \cdot x} \cdot A \quad (2.17)$$

Kus: q_{50} - hoone välispiirde keskmine õhulekkearv $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$;

A - hoone välispiirde (sealhulgas põranda) sisepindala m^2 ;

x - tegur, mis on ühekorruselisele hoonele 35, kahekorruselisele hoonele 24;

3,6 - teisendab m^3/h tulemuse l/s.

Välispiirde keskmine õhulekkearv q_{50} on määruses [23] antud uue mitteelamu hoone puhul $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ välispiirde pinna m^2 kohta. Teoreetiliselt on võimalik teostada arvutused ka madalama õhulekkearvuga ($1,5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) ja eeldada, et teostatakse õhulekke mõõtmise ehituse käigus, kuid tüüpiliste laohoonete korral võib selle saavutamine osutuda problemaatiliseks ning seetõttu on lähtutud konservatiivsemast väärtusest [23].

2.3 Hoone soojusenergiavajaduse arvutamine

Energiakasutuse arvutamisel lähtutakse uuritava hoone netoenergiavajadusest. Soojusenergia- ja elektrienergiakasutust ei summeerita, vaid neid käsitletakse eraldiseisvalt. Küttesüsteemi elektri- ja soojusenergiakasutus arvutatakse vastavalt küttesüsteemi kasutegurile ja abiseadmete elektritarbimisele [23].

Tõhususarvutustes kasutatakse Majandus- ja taristuministri määruses nr. 58 „Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika“ [23] ja Ettevõtlus- ja infotehnoloogiainistri määruses nr.63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ [21] avaldatud kasutegureid ja kaalumistegureid. Küttesüsteemi kasuteguriga võetakse arvesse ka kaod soojusallikas, samuti soojuse jaotamisel ja väljastamisel ning ruumitemperatuuri reguleerimise ebatäpsusest tulenevad kaod. Küttesüsteemi energiakasutus saadakse netoenergiavajaduse jagamisel küttesüsteemi kasuteguriga. Küttesüsteemide kasutegur saadakse soojusallika kasuteguri ja soojuse jaotamise ja väljastamise kasuteguri korrutisena. Soojusallika kasutegur arvutatakse tootja andmete põhjal või kasutatakse tabelis 2.9 toodud andmeid [23].

Tabel 2.9 Soojusallika kasutegur kütuse tarbimisaine alumise kütteväärtuse alusel [23]

Soojusallikas	Kasutegur
Kaugküte	0,9
Õli- või gaasikatel	0,85
Õli, kondensatsioonikatel	0,9
Gaas, kondensatsioonikatel	0,95
Pelletikatel	0,85
Muu tahkekütuse katel	0,75

Soojuse jaotamise ja väljastamise kasutegur ja abiseadmete elektritarbimine arvutatakse simulatsioonarvutusega või kasutatakse tabelis 2.10 toodud andmeid. Tabelis on välja toodud soojusallika kasutegurid kütuse tarbimisaine alumise kütteväärtuse alusel [23].

Tabel 2.10 Soojuse jaotamise ja väljastamise kasutegurid ning abiseadmete elektritarbimine [23]

Kütteviis	Kasutegur	Veeküttesüsteemi ringluspumba elektritarbimine, kWh/(m ² ·a)
Radiaator	0,97	0,5
Põrandküte, plaat pinnasel või alt tuulutatav põrand	0,85	1
Põrandküte vahelaes	1,0	1

Kütusest saadav tarnitud energia hulk määratakse kütuse koguse ja kütuse kütteväärtuse korrutisena. Tabelis 2.11 on esitatud energiakandjate kaalumistegurid. Kütteväärtusena kasutatakse tarnija antud alumist kütteväärtust või hoone energiatõhususe arvutamise meetodikas sätestatud kütteväärtust [21].

Kaalutud energiaerikasutus on energiakandjate kaalumisteguritega korrutatud aastane energiakasutus kilovatt-tundides hoone köetava pinna ruutmeetri kohta [24].

Tabel 2.11 Energiakandjate kaalumistegurid [21]

Energiakandja	Kaalumistegur
Taastuvtoormel põhinev kütus, puit ja puidupõhine kütus ning muu biokütus, välja arvatud turvas ja turbabrikett	0,65
Kaugküte	0,9
Tõhus kaugküte	0,65
Vedelkütus, kütteõli ja vedelgaas	1,0
Maagaas	1,0
Tahke fossiilkütus	1,0
Turvas ja turbabrikett	1,0
Elekter	2,0

2.4 Hoonete energiatõhususe nõuded

Hoonete energiatõhusust väljendatakse energiatõhususarvuga (ETA). Energiatõhususarv kajastab hoone kompleksset energiakasutust nii sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks kui ka olme- ja muude elektriseadmete kasutamiseks ning see arvutatakse hoone köetava pinna ruutmeetri kohta hoone tüüpilisel kasutamisel [21].

Ehitatav hoone peab vastama energiatõhususe miinimumnõuetele. Kehtivad hoonete energiatõhususe miinimumnõuded on esitatud Ettevõtlus- ja infotehnoloogiainistri määruses nr 63. Nõuded esitatakse hoone kasutusotstarbe järgi. Energiatõhususe nõuded kehtestatakse hoonele tervikuna. Hoone koosseisu arvatakse energiatõhususarvu arvutamisel lisaks piiretele ja tehnosüsteemidele hoonesse või kinnistule paigaldatud hoonet teenindav lokaalse energiatootmise süsteem [21].

Hoone energiatõhususarvu (ETA) või kaalutud energiaerikasutuse (KEK) klassi skaala valitakse hoone kasutamise otstarbe alusel. Laohoone energiatõhususarvu või kaalutud energiaerikasutuse klassi skaala on esitatud tabelis 2.12. Hoone energiatõhususarv või kaalutud energiaerikasutuse klass määratakse kindlaks lähtuvalt energiatõhususarvust. Energiatõhususarv sõltub olulisel määral tarnitavast energiakandjast ja kasutatavate tehnosüsteemide kasutegurist [24].

Tabel 2.12 Laohoone energiatõhususarvu (ETA) või kaalutud energiaerikasutuse (KEK) klassi skaala [24]

ETA või KEK, kWh/(m²·a)	Klass
ETA või KEK ≤ 65	A
66 ≤ ETA või KEK ≤ 80	B
81 ≤ ETA või KEK ≤ 100	C
101 ≤ ETA või KEK ≤ 130	D
131 ≤ ETA või KEK ≤ 160	E
161 ≤ ETA või KEK ≤ 210	F
211 ≤ ETA või KEK ≤ 260	G
ETA või KEK ≥ 261	H

Energiatõhususe klass B, ehk madalenergiahoone tase on parima võimaliku ehituspraktika kohaselt energiatõhusus- ja taastuenergiatehnoloogiate lahendusi kasutades tehniliselt mõistlikult ehitatud hoone, mille puhul ei eeldata lokaalset elektritootmist taastuenergiaallikast [31]. Madalenergiahoone energiatõhususarv laohoone puhul on väiksem või võrdne 80 kWh/(m²·a) [21].

Hoone energiatõhususe klassiga A vastab liginullenergiahoone nõudele. Liginullenergiahoone on parima võimaliku ehituspraktika kohaselt energiatõhusus- ja taastuvenergiatehnoloogiate lahendusi kasutades tehniliselt mõistlikult ehitatud hoone, mille energiatõhususarv on suurem kui 0 kWh/(m²·a), kuid mitte suurem kui määruses sätestatud [31]. Liginullenergiahoone energiatõhususarv laohoone puhul on väiksem või võrdne 65 kWh/(m²·a) [21].

2.5 Tasuvuse arvutus

Optimaalse põranda soojustamise lahenduse määramiseks võib kasutada nüüdisväärtuse arvutusmeetodit.

Nüüdisväärtuse meetod (net present value – NPV) peetakse korrektsemaks ja üldiselt enamkasutatavaks investeeringu tasuvuse hindamise meetodiks. Tulu nüüdisväärtus võrdub vaadeldava projekti kuluefektiivsuse arvutusperioodi iga-aastaste maksujärgse nüüdisväärtuste summaga, millest on lahutatud esialgne investeeringu kogusumma [35]. Lähtuvalt hoone kasutusotstarvetest on kuluefektiivsuse arvutusperioodiks valitud 20 aastat.

Tulu nüüdisväärtus arvutatakse järgmise valemi põhjal (2.18) [35]:

$$NVP = -I_0 + a \cdot \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} \quad (2.18)$$

Kus NPV – tulu nüüdisväärtus, eur;

I_0 – investeeringu algmaksumus, eur;

a – aastane neto sääst, eur;

i – korrigeeritud reaalne arvutuslik intress, %;

n – tasuvusaeg, a.

Tasuvuse kriteerium on, et investeeringu tasuvusaja vältel saadud ja diskonteeritud sääst peab olema suurem kui investeeringu algmaksumus [35]:

$NPV \geq 0$ - projekt on tasustav;

$NPV \leq 0$ - projekt on kahjumlik.

2.6 Hoone energiatõhususe tõstmise lahendused

Energiatõhususe tõstmiseks laohoones on erinevaid variante. Käesolevas töös vaadeldakse kahte lahendust hoone energiatarbimise vähendamiseks:

- energiatõhusaima küttesüsteemi valik;
- päikesepaneelide paigaldamine.

2.6.1 Küttesüsteemi valik

Kõige efektiivsem küttesüsteemi lahendus määratakse erinevate küttesüsteemide ja soojusallikate kombineerimise teel. Arvutamisel võetakse arvesse soojuse jaotamise ja väljastamise kasutegurite, soojusallika kasutegurite ning energiakandjate kaalumistegurite väärtusi. Käesolevas uurimuses selgitakse, millise küttesüsteemi korral on uuritud hoone energiatõhusus suurem. Energiatõhusamaks loetakse küttesüsteemi, mille korral küttesüsteemi kasuteguri ja energiakandja jagatis 1 kWh soojusenergia kohta on väiksem.

2.6.2 Lokaalne päikeseenergia kasutus

Hoone energiatõhusust on võimalik tõsta ka lokaalse taastuvenergia abil, kasutades päikeseenergiat elektrienergia tootmiseks. Elekter toodetakse eri päikesepaneelidega, mida sageli nimetatakse PV-paneelideks.

Päikesepaneeli pinnale tulev aastane päikeseenergia arvutatakse järgneva valemi abil (2.19) [23]:

$$Q_{päike} = 945 \cdot k_{suund} \quad (2.19)$$

kus $Q_{päike}$ - päikesepaneeli pinnale, millele ei teki varje, tulev aastane päikesenergia kWh/a;

945 - horisontaalpinnale tulev aastane päikesekiirgus kWh/(m²·a);

k_{suund} - suunategur, mis arvestab päikesepaneeli suunatust ilmakaare ja horisondi suhtes, (arvestatud, et päikesepaneelid suunatud lõuna poole ja paigaldatud 30 kraadise nurga all.)

Päikesepaneeliga toodetud aastane elektrienergia arvutatakse valemiga (2.20) [23]:

$$E_{pan} = \frac{Q_{päike} \cdot P_{max} \cdot k_{kas}}{I_{ref}} \quad (2.20)$$

- kus E_{pan} - päikesepaneeliga toodetud aastane elektrienergia kWh/a;
 P_{max} - päikesepaneeli maksimaalne võimsus standardtingimustel kW ($I_{ref}= 1$ kW/m², temperatuur 25 °C);
 k_{kas} - n tegur, mis arvestab päikesepaneeli kasutustingimusi;
 I_{ref} - standardkiirgus 1 kW/m².

Päikesepaneeli maksimaalne võimsus standardtingimustel P_{max} sõltub paneeli tüübist ja see saadakse lähtudes tootja andmetest. Kasutustingimuste tegur k_{kas} võtab arvesse päikesepaneeli ümbritseva keskkonna iseärasusi (temperatuur, paneeli paigaldus) ja kadusid vahelduvvooluks muundamisel. Täpsemate andmete puudumisel võib kasutada tabelis 2.13 toodud väärtusi [23].

Tabel 2.13 Päikesepaneeli kasutustegur, k_{kas} [23]

Paneeli paigaldusviis	k_{kas}
Tuulutuseteta	0,7
Mõõduka tuulutusega	0,75
Intensiivse tuulutusega	0,8

Autor on arvutustes kasutanud kaubamärgi VSUN SOLAR päikesepaneele VSUN 315-60M mille paneeli mõõdud on 1665 x 999 mm ja maksimaalne võimsus P_{max} on 315 W.

Vaid osa päikesepaneelidega toodetud energia kogusest kasutatakse hoone toimimiseks. Laohoone elektrienergia omatarbe osakaal on 40% [23]. Ülejäänud päikesepaneelidega toodetud energia osa müüakse elektri üldvõrku.

3. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Käesolevas peatükis on esitatud pinnasele toetuva põranda soojuslähivuse arvutuse tulemused. Nimetatud arvutuste tulemuste põhjal uuriti erinevate põrandasoojustuslahenduste mõju hoone soojuslikule käitumisele ning analüüsiti vaadeldud põranda soojustuslahenduste mõju kütteenergia kulule ja hoone energiatõhususele.

3.1 Põranda soojuslähivuse arvutuse tulemused

Uuringu käigus teostati kolme erineva soojustuse paiknemise lahendusega tüüphoonete soojuskadude arvutused. Lisaks arvutati ka soojuskaod läbi soojustamata põrandakonstruktsiooni. Soojustatud põrandate osakaal hoone üldpõrandapindalas vastavalt tüüphoonete põrandate soojustuslahendustele on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1 Soojustatud põrandapindala

Tüüphoon nr.	Põranda pindala, m²	Soojustusega kaetud põranda pindala, m²	Soojustatud põranda osakaal
Tüüphoon 0	26 094,3	-	-
Tüüphoon 1	26 094,3	1 380,0	5%
Tüüphoon 2	26 094,3	4 004,3	15%
Tüüphoon 3	26 094,3	26 094,3	100%

Pinnasele toetuva põranda soojuslähivuse arvutamise tulemused on esitatud järgmises tabelis (tabel 3.2). Arvutused viidi läbi standardis EN ISO 13370 [17] kirjeldatud meetodikat kasutades.

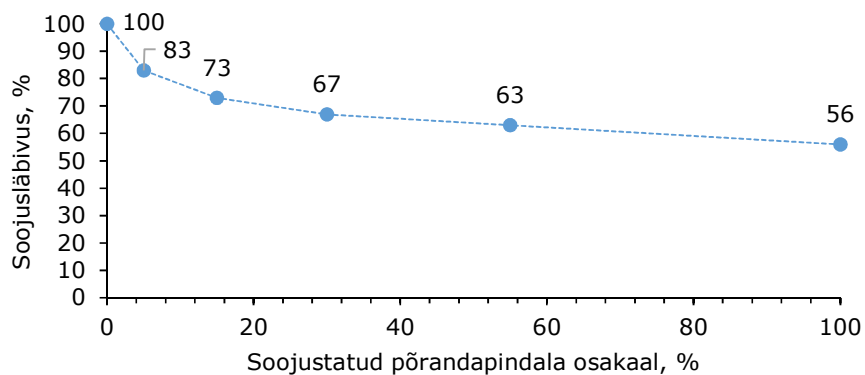
Saadud arvutustulemuste põhjal selgus, et hoone soojuslähivust mõjutavad nii soojustuse paiknemine kui ka soojustuskihi paksus. Tabelis 3.2 näidatud, et põrandaplaadi aluse soojustuse pindala suurenemisega väheneb pinnasele toetuva põrandaplaadi soojuslähivus, järelikult põranda soojuskaod ka vähenevad.

Tabel 3.2 Tüüphoonete põranda soojustuse variandid

Tüüphoon nr.	Soojustuse paksus, mm	Põranda arvutuslik soojusläbivus, W/(m ² ·K)
Tüüphoon 0 Soojustamata põrand	-	0,093
Tüüphoon 1 soojustus perimeetris 2 m	a) 100	0,078
	b) 150	0,077
	c) 200	0,076
Tüüphoon 2 soojustus perimeetris 6 m	a) 100	0,070
	b) 150	0,067
	c) 200	0,066
Tüüphoon 3 soojustus terve põranda ulatuses	a) 100	0,059
	b) 150	0,052
	c) 200	0,048

3.1.1 Soojustuse paiknemise mõju põranda soojusläbivusele

Soojustuse paiknemise koht ning soojustatud põranda osakaal avaldavad põrandakonstruktsiooni soojusläbivusele suurt mõju. Põrandaplaadi soojusläbivuse vähenemine sõltuvalt soojustatud põrandapindala osakaalust on esitatud järgneval graafikul (joonis 3.1).



Joonis 3.1 Põranda soojusläbivuse vähenemine sõltuvalt soojustatud põrandapindala osakaalust

Selleks, et hinnata põranda soojustuslahenduste mõju põranda soojusläbivusele, võrreldi teiste tüüphoonete soojustatud põrandate soojusläbivusi Tüüphoon 0 soojustamata põranda soojusläbivusega.

Põrandakonstruktsiooni servade soojustamisel perimeetril, kui soojustusriba laius on 2 m ja soojustatud põranda osakaal on ainult 5% kogu põrandapindalast, väheneb

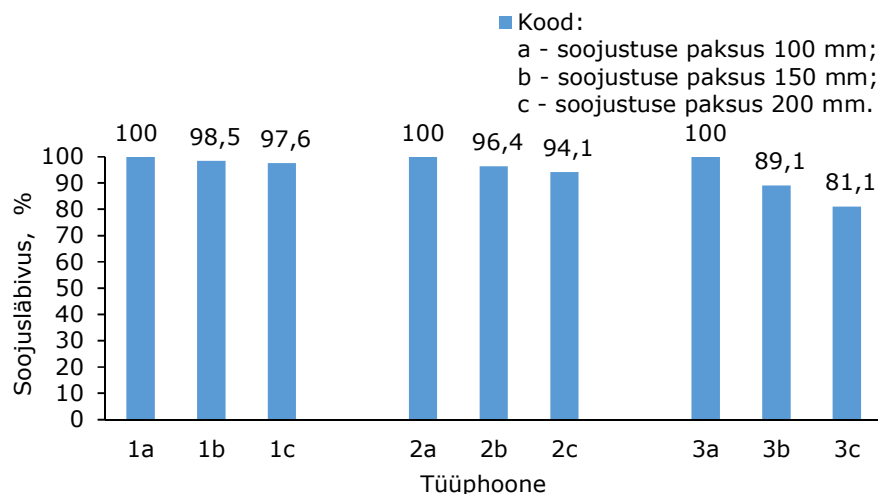
põranda soojuslähivus 17% võrra. Põranda perimeetri soojustuse laiendamisel 6 meetrini väheneb soojuslähivus veelgi rohkem: Tüüphoone 2 põranda soojuslähivus väheneb 27% võrra, võrreldes Tüüphoone 0 põranda soojuslähivusega. Uuritud tüüphoonetest kõige soojapidavam põrandakonstruktsiooni variant on Tüüphoone 3 puhul: põrandaplaadi soojustamisel terve põranda ulatuses väheneb konstruktsiooni soojuslähivus 44% võrra.

Oluline on märkida, et põranda soojuslähivuse muutumine soojustatud põrandapindala osakaalu suurenemisel toimub mittelineaarselt. Selleks, et põhjalikumalt hinnata, kuidas muutub põranda soojuslähivus sõltuvalt soojustatud põrandapindala osakaalu suurendamisest, teostati täiendavad soojuslähivuse arvutused põrandakonstruktsioonidele soojustuse laiusega 12 m ning 24 m.

Graafiku (joonis 3.1) trendijoon näitab, et soojustatud põrandapindala osakaalu suurenemisel konstruktsiooni soojapidavuse kasv aeglustub. Sellest järeldub, et peamine mõju põranda kaudu tekkiva soojuskao piiramisele on põranda servade soojustamisel.

3.1.2 Soojustuskihi paksuse mõju põranda soojuslähivusele

Soojustuskihi paksuse muutumine mõjutab samuti konstruktsiooni soojuslähivust. Graafik (joonis 3.2) näitab põranda soojuslähivuse muutumise seost soojustuskihi paksuse muutumisega soojustuse erinevate paiknemislahenduste korral.



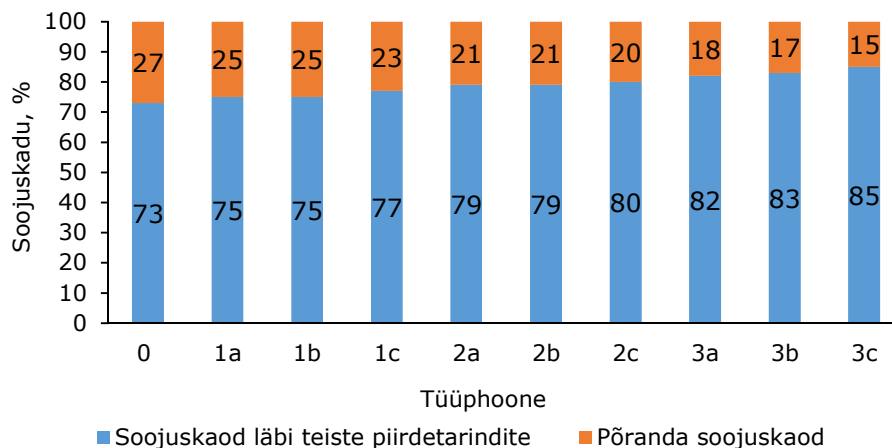
Joonis 3.2 Põrandakonstruktsiooni soojapidavuse muutumine sõltuvalt soojustuskihi paksuse muutumisest

Soojustusmaterjali paksuse suurenemisel pörandakonstruktsiooni soojuslähivus väheneb. Isolatsioonikihi paksuse suurenemisel 50 mm võrra, ehk kui soojustuskihi paksus on 150 mm, väheneb pörandakonstruktsiooni soojuslähivus Tüüphoone 1 puhul 1,5%, Tüüphoone 2 puhul 3,6% ning Tüüphoone 3 puhul 10,9% võrra.

Suurimat mõju konstruktsiooni soojuslähivusele avaldab soojustuskihi paksuse suurenemine Tüüphoone 3 puhul, kus soojusisolatsioon paikneb terve pörandi ulatuses.

3.1.3 Pörandi soojuslähivuse muutumise mõju hoone soojuskaodele

Pörandakonstruktsiooni soojuslähivuse vähenedes teiste piirdekonstruktsioonide soojuskadude osakaal kasvab. IDA ICE programmiga loodud simulatsioonide abil saadud andmete põhjal uuriti pörandi soojuskaod muutumise mõju kogu hoone soojuskadudele.



Joonis 3.3 Hoone piirdetarindite soojuserikaod

Graafikust (joonis 3.3) järeldub, et mida paksem on soojusisolatsioonikiht ja mida suurem on soojusisolatsiooniga kaetud pörandapindala, seda väiksem on soojuskadu läbi pörandakonstruktsiooni. Samas kasvab soojuskadude osakaal hoone teiste piirdetarindite kaudu, kuna pörandi kaudu tekkiva soojuskao vähenemisel jäävad uuritava hoone teiste piirdetarindite soojuskaod siiski muutumatuks.

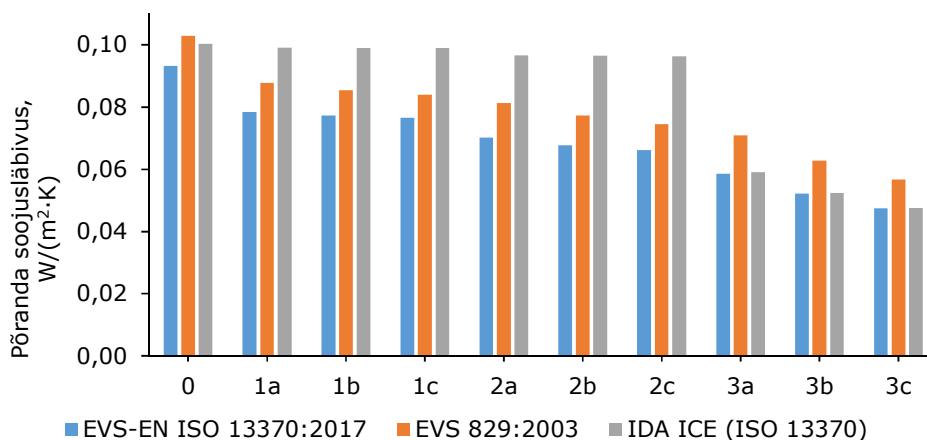
3.2 Soojuslähivuse arvutusmetoodikate võrdlus

3.2.1 Põranda soojuslähivuse arvutamise meetodikate võrdlus

Uurimistöös võrreldi EVS-EN ISO 13370:2017 [17] ja EVS 829:2003 [16] standardite ning IDA ICE soojuslevi arvutusmodelite baasil meetodikate kasutamisel saadud arvutustulemusi.

IDA ICE tarkvaraga teostatakse pinnasel asuva põranda soojuskadude arvutus standardis EVS-EN ISO 13370:2017 [17] kirjeldatud valemite põhjal. Graafikult (joonis 3.4) on näha, et kogu ulatuses soojustatud põrandate soojuskadude väärtus on ligilähedaselt sama nii arvutuste teostamisel standardi EVS-EN ISO 13370:2017 [17] meetodika järgi kui ka IDA ICE simuleerimistarkvara abil. Olenevalt põranda soojustuslahendusest varieerub nimetatud meetodikate järgi teostatud arvutuste tulemuste erinevus 0,3–0,8%.

IDA ICE tarkvara puudus seisneb siiski selles, et see tarkvara ei võimalda teostada soojustatud servadega põrandate soojuskadude arvutusi standardi EVS-EN ISO 13370:2017 [17] meetodika järgi, nagu näidatud graafikul (joonis 3.4) IDA ICE simuleerimistarkvara abil arvutatud soojuslähivuse väärtus on oluliselt suurem ning selle alusel arvutatud soojuskaod ülehinnatud.



Joonis 3.4 Põrandaplaadi soojuslähivus, arvutatud erinevate meetodikate järgi

EVS 829:2003 [17] meetodika alusel arvutatud soojuskaod ülehinnatud, analüütiliste meetodite järgi saadud tulemuste erinevus varieerub vahemikus 9–17%. Osaliselt kompenseeritakse arvutustulemuste erinevus sellega, et standardi EVS-EN ISO

13370:2017 [17] metoodika järgi lisandub pörandaplaadi soojuskadudele soojuskadu läbi välisseina ja pöranda liitekoha. Kehtetu standardi EVS 829:2003 [16] metoodikas soojuskadudega läbi külmasilla ei arvestata.

3.2.2 Hoone soojusliku käitumise modelleerimise meetodite võrdlus

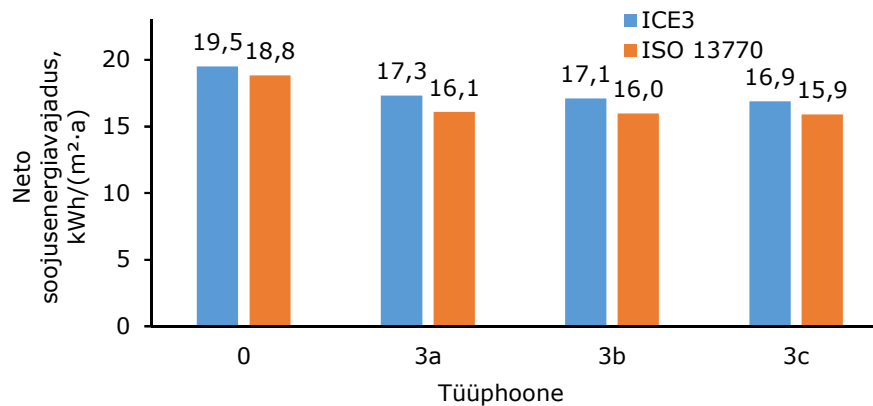
Uuringu käigus viidi läbi simulatsioonid IDA ICE programmi abil, kasutades pöranda soojuskao määramiseks kaht erinevat meetodit: standardil EVS-EN ISO 13370:2017 [17] põhinev meetod ning lihtsustatud meetod ICE3.

Tabel 3.3 IDA ICE mudelleerimistarkvara pöranda soojusläbivuse arvutusmetoodikate võrdlus

Tüüphotoone nr.	Kasutatud metoodika	
	IDA ICE (ISO 13370)	IDA ICE (ICE3)
	Soojusläbivus, $W/(m^2 \cdot K)$	Soojusläbivus, $W/(m^2 \cdot K)$
3a	0,059	0,305
3b	0,052	0,209
3c	0,048	0,159

Nagu tabelis 3.3 näidatud, ICE3 metoodika kasutamisel saadud pöranda soojusläbivuse väärtused on oluliselt suurem võrreldes IDA ICE (ISO 13370) meetodi kasutamisel saadud soojusläbivuse väärtustega. Arvutuste tulemustest järeldub, et ICE3 metoodika ei võimalda teostada pöranda soojusläbivuse arvutusi. Kuid tuleb märkida, et ICE3 meetodi kasutamisel on ettenähtud võimalus sisestada arvutusmudelisse eelnevalt arvutatud soojusläbivuse väärtused, mis omakorda võimaldab teostada hoone soojusliku käitumise modelleerimist.

Metoodikate erinevus on ka selles, et lihtsustatud ICE3 meetodi kasutamisel läbi pinnasel asuva pöranda toimuvate soojuskadude kindlaksmääramisel loetakse pinnase temperatuur hoone pöranda all võrdseks aasta keskmise välisõhutemperatuuriga, hoone mudeli simuleerimisel ISO 13770 meetodit kasutades modelleeritakse pinnase temperatuur kliimafaili andmete alusel; modelleeritud pinnasetemperatuur muutub aastaringelt ning erineb aasta keskmisest välisõhutemperatuurist.



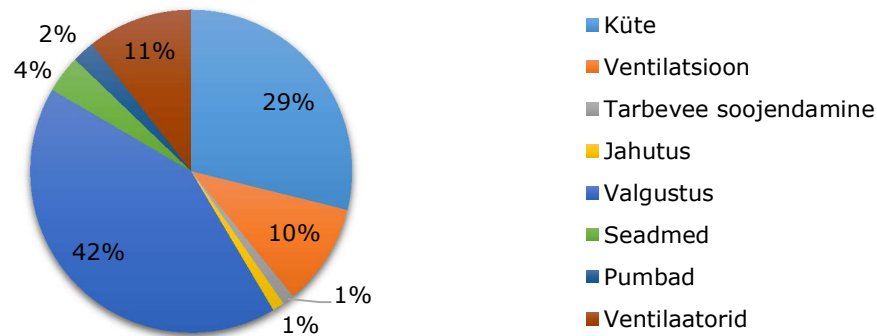
Joonis 3.5 Tüüphoonete neto soojusenergiavajadus

Graafikult (joonis 3.5) on näha, et eespool nimetatud meetodeid kasutades leitud hoone neto soojusenergiavajadus ei ole sama. ICE3 lihtsustatud meetodi abil arvatud neto soojusenergiavajaduse näitajad on märkimisväärselt kõrgemad võrreldes ISO 13770 meetodi kasutamisel saadud näitajatega, saadud neto soojusenergiavajaduse väärtuste erinevus varieerub vahemikus 3–6%. Tulemuste erinevused tulenevad asjaolust, et põranda kaudu tekkiva soojuskao arvutamisel kasutatakse hoonealuse pinnase temperatuuri arvutamiseks erinevaid meetodeid.

3.3 Põranda soojustamise mõju kütteenergia tarbimisele

Uuritud laohoonete netoenergiavajadused määrati kindlaks IDA ICE programmi abil, millega loodi energiakasutuse simulatsioonid kõikidele tüüphoonetele, varieerides põrandakonstruktsioonide soojuslähivusi, mis tekkisid põrandakonstruktsioonide soojustuslahenduste ning materjalikihi paksuse erinevate kombinatsioonide puhul.

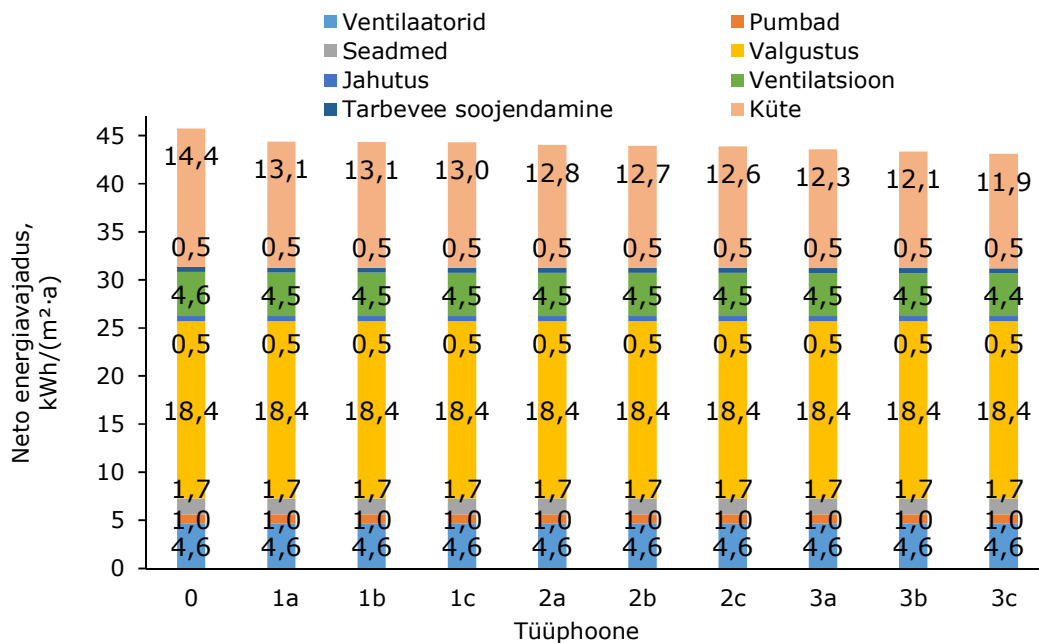
Põrandakonstruktsiooni soojuskao määramiseks kasutati hoone modelleerimisel ICE3 meetodikat. Nimetatud meetodika valimisel lähtuti asjaolust, et see võimaldab sisestada hoone mudelisse arvutuslikud soojuslähivuse väärtused ning arvutada välja hoone soojuskad ja nõutav energiakulu põrandate erinevate konstruktsioonitüüpide soojuskadude kompenseerimiseks.



Joonis 3.6 Tüüphoone 2 netoenergiavajaduse jaotus

Hoone netoenergiavajadus jaguneb netoenergiavajaduseks ruumide kütteks, ruumide jahutamiseks, ventilatsiooniõhu soojendamiseks, ventilatsiooniõhu jahutamiseks, tarbevee soojendamiseks, valgustamiseks ja seadmete kasutamiseks [23]. Graafikul (joonis 3.6) on Tüüphoone 2 näitel esitatud netoenergiatarbimise jaotus. Suurem osa netoenergia hulgast ehk 42% kulub uuritava hoone valgustusele. Neto soojusenergiavajadus on 41%, millest 29% moodustab neto soojusenergiavajadus hoone kütmiseks, 11% soojusest kulub ventilatsiooniõhu soojendamisele ja 1% tarbevee soojendamisele.

Käesoleva töö eesmärgiks oli selgitada välja erinevate pinnasel asuvate põrandate soojustuslahenduste mõju hoone soojusenergia tarbimisele. Hoone energiatarbimise uuringud viidi läbi IDA ICE tarkvaraga modelleerimisel saadud andmete põhjal.



Joonis 3.7 Netoenergiavajaduse muutumine sõltuvalt põranda soojustuslahenduse valikust

Põrandakonstruktsiooni soojuslähivuse vähenedes väheneb hoone soojusenergia vajadus. Graafikust (joonis 3.7) selgub, et soojusenergia tarbimine varieerub olenevalt põranda soojustuse paiknemise lahenduse ning soojustuse kihi paksuse valikust.

Vastavalt tabelis 3.4 toodud tüüphoonete neto soojusenergiavajaduse arvutuste tulemustele tekib kõige suurem neto soojusenergiavajadus Tüüphoon 1 puhul, kus põrand on soojustatud vaid perimeetris ning soojustuse laius on 2 m. Tüüphoon 1 puhul väheneb hoone neto soojusenergiavajadus 7,2% võrra, võrreldes soojustamata põrandakonstruktsiooniga hoone neto soojusenergiavajadusega.

Tabel 3.4 Neto soojusenergia sääst põranda erinevate soojustuslahenduste korral

Tüüphoon nr.	Neto soojusenergiavajadus, kWh/(m²·a)	Neto soojusenergia sääst võrreldes Tüüphooniga 0, kWh/(m²·a)
Tüüphoon 0 (soojustamata põrand)	19,5	-
Tüüphoon 1b (soojustus perimeetris 2m)	18,1	7,2%
Tüüphoon 2b (soojustus perimeetris 6m)	17,7	9,2%
Tüüphoon 3b (soojustus põranda ulatuses)	17,1	12,3%

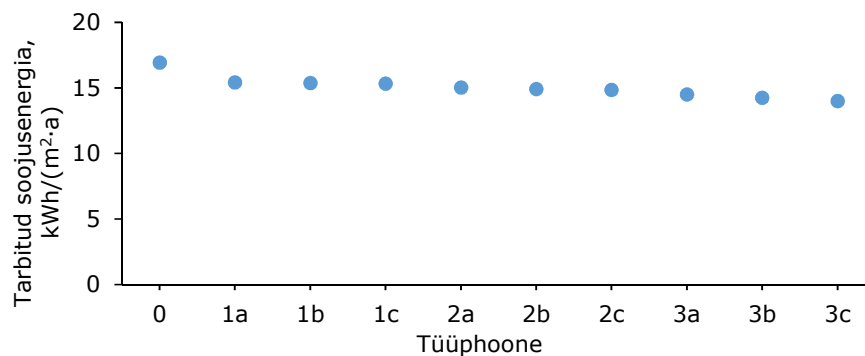
Põrandaaluse soojustuse osakaalu suurendamisel väheneb netoenergiavajadus hoone kütmiseks. Tüüphoon 2 puhul, kus põrand on soojustatud hoone perimeetris laiusel 6 m, väheneb neto soojusenergiavajadus veel 2% võrra. Efektivseim soojustuslahendus on Tüüphoon 3 puhul, kus põrand on soojustatud terves ulatuses. Selle hoone põranda soojustuslahenduse puhul väheneb neto soojusenergiavajadus veel 3% võrra, ehk võrreldes Tüüphoon 0 neto soojusenergiatarbimisega on energiasääst 12,3%. Tuleb märkida, et Tüüphoon 3 põranda soojustuslahenduse tõhusust mõjutab asjaolu, et põrandakonstruktsioon on isoleeritud nii põrandaplaadi perimeetris kui ka kesktsoonis.

Tabelist 3.3 selgub, et suurel määral mõjutab hoone soojusenergiavajadust põranda perimeetri soojustamine. Kui hoones on soojustusega kaetud põranda osakaal vaid 5%, saadakse hoone neto soojusenergia sääst 1,4 kWh/(m²·a) võrreldes soojustamata põrandaga hoone netoenergiavajadusega. Terves ulatuses soojustatud põrandakonstruktsiooniga hoone neto energiasääst on 2,4 kWh/(m²·a). Sellest järeldub, et põranda kesktsooni soojustamise mõju soojusenergiatarbele on märgatavalt väiksem.

3.3.1 Põranda soojustamise mõju põrandküttesüsteemi efektiivsusele

Põrandakonstruktsiooni soojustamine mõjutab olulisel määral põrandküttesüsteemi dimensioneerimist, toimivust ja efektiivsust. Põrandküttesüsteemi efektiivsus on suurem juhul, kui konstruktsiooni soojuslähivus põrandküttetorustiku all on väiksem kui torustiku peal. Vastasel juhul põrandküttesüsteemi efektiivsus väheneb ning osa küttekontuurist eralduvast soojusest suunatakse hoonealuse pinnase soojendamiseks.

Uuritava hoone ruumide kütteks vajaliku soojusenergiakulu muutumine sõltuvalt põranda soojustuslahenduse valikust esitatakse järgneval graafikul (joonis 3.8).



Joonis 3.8 Soojusenergia kulu ruumide kütteks põrandküttesüsteemi korral

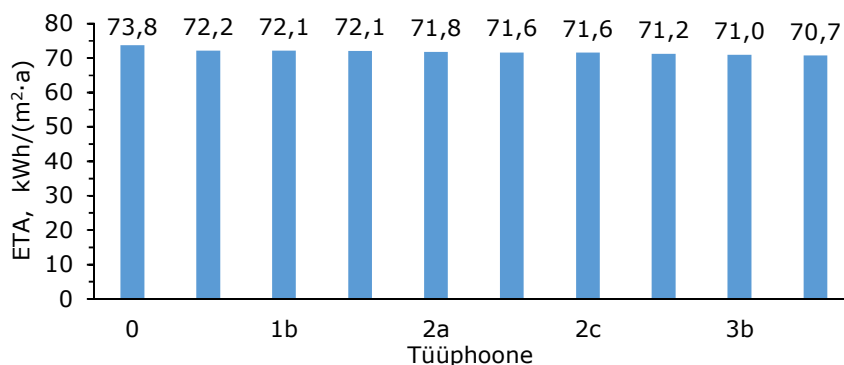
Põranda täiendav soojustamine võimaldab vähendada konstruktsiooni soojuslähivust, mis omakorda viib põranda soojuskao vähenemiseni. Järelikult: konstruktsioonide soojuslähivuse paranemisel kogu hoone soojuskoormus väheneb. See võimaldab kasutada väiksemaid ja tõhusamaid soojusallikaid, väiksema läbimõõduga torusid.

Eelnenust selgub, et põrandküttesüsteemi efektiivsuse suurendamiseks tuleb minimeerida soojuse kandumist põrandakonstruktsioonist pinnasesse – selleks tuleb põrandakonstruktsioon soojustada kogu ulatuses.

3.4 Hoone energiatõhususarvu arvutustulemused

Selles alapunktis käsitletakse pinnasele toetuva põranda soojusisolatsiooni erinevate paiknemislahenduste mõju hoone energiatõhususele.

Energiatõhususarvu (ETA) leidmiseks koostati arvutustabel, milles on kajastatud soojusallika kasutegurid, energiakandjate kaalumistegurid ning abiseadmete elektritarbimine. Arvestati asjaolu, et uuritud laohoone soojusenergiaallikaks on kaugküte ja kasutatav küttesüsteem on põrandküte.



Joonis 3.9 Tüüphoonete energiatõhususe arvud

Graafikul (joonis 3.9) on esitatud uuritava hoone energiatõhususe arvutamise tulemused. Soojustamata põrandakonstruktsiooniga Tüüphoon 0 energiatõhususarv on 73,8 kWh/(m²·a). Soojustatud põrandakonstruktsiooniga tüüphoonetest on energiatarbimine kõige suurem kõige kehvema põrandasoojustusega Tüüphoon 1a puhul, mille ETA on 72,2 kWh/(m²·a).

Kõige energiatõhusam hoonevariant on Tüüphoon 3c, milles põrandakonstruktsioon on soojustatud terves ulatuses ja soojustuse paksus on 200 mm. Tüüphoon 3c ETA on 70,7 kWh/(m²·a). Järelikult: kui võrrelda soojustatud põrandakonstruktsiooniga tüüphoonete variante, on uuritud tüüphoonete kõige energiatõhusama variandi puhul energiatarbimine 1,5 kWh/(m²·a) võrra väiksem kui kõige kehvema energiatõhususarvuga tüüphoon energiatarbimine.

Nii väike energiatõhususarvu väärtuste erinevuse põhjuseks on asjaolu, et uuritava hoone puhul on soojuskadu läbi põrandakonstruktsiooni vaid 15–25% kogu hoone soojuskadudest, olenevalt põranda soojustuslahenduse valikust. See tähendab, et vaid väike osa soojusenergiast kulub põranda soojuskao kompenseerimiseks.

Hoone energiatõhususe arvutamisel saadud tulemustest selgus, et kõigi uuritavate laohoonevariantide energiatõhususarvu väärtused jäävad vahemikku 65–80 kWh/(m²·a), järelikult on tegemist madalenergiahoonega.

3.5 Optimaalse põranda soojustamise lahenduse valik

Selles alapunktis analüüsitakse, millise põranda soojustuslahenduse kasutamine tagab suurema soojusenergia ja raha kokkuhoiu. Selleks arvutatakse välja põranda soojustamiseks vajaliku investeringu suurus ning tehakse tasuvusarvutused optimaalse põrandasoojustuslahenduse leidmiseks.

3.5.1 Hoone soojusenergia tarbimine

Käesolevas uurimistöös analüüsiti erinevate põrandasoojustuslahenduste mõju soojusenergia tarbimisele. Allolevas tabelis (tabel 3.4) on toodud arvutuslikud soojusenergia kulu väärtused 10 uuritava hoonevariandi puhul. Energiasäästu arvutamiseks võrreldi soojustatud põrandakonstruktsiooniga tüüphoonete soojusenergiatarbimise näitajaid soojustamata põrandakonstruktsiooniga Tüüphoon 0 soojusenergiatarbimisega.

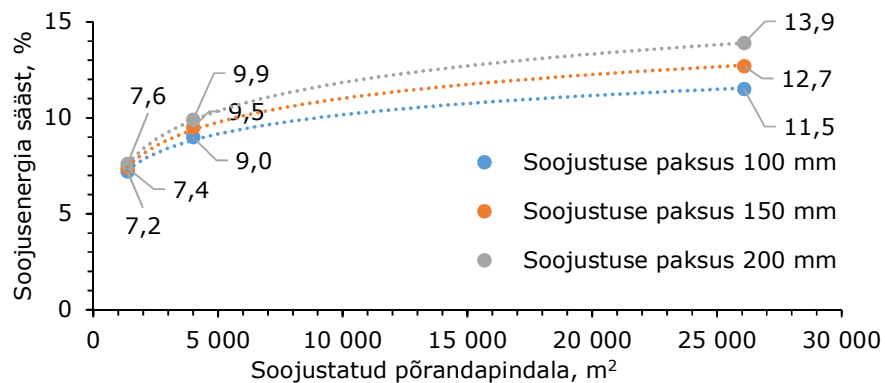
Tabel 3.5 Soojusenergia kulu

Tüüphoon	Soojusenergia kulu, MWh/a	Tüüphoon 0 soojusenergia kulu, MWh	Soojusenergia sääst, MWh/a
Tüüphoon 1a	557,32	600,70	43,38
Tüüphoon 1b	555,95		44,74
Tüüphoon 1c	554,81		45,88
Tüüphoon 2a	546,46		54,24
Tüüphoon 2b	543,36		57,34
Tüüphoon 2c	541,30		59,40
Tüüphoon 3a	531,52		69,17
Tüüphoon 3b	524,45		76,25
Tüüphoon 3c	517,21		83,49

Tabelist 3.5 on näha, et kõige kehvema põrandasoojustusega Tüüphoon 1a, kus soojustuskiht paksusega 100 mm paikneb vaid perimeetris ja laiusega 2 m, on soojusenergia kulu 557,32 MWh/a. See tähendab, et juba vähesegi soojustuse lisamisel põranda servadesse väheneb hoone soojusenergiatarbimine 43,38 MWh/a võrra.

Tüüphoon 1 puhul (vt. joonis 3.10), kus soojustatud põranda osakaal on 5% kogu põrandapindalast, väheneb hoone soojusenergiatarve 7,2% – 7,6%, olenevalt soojustuskihi paksusest. Soojustatud põrandapindala suurendamisega kuni 15% (Tüüphoon 2) on soojusenergia sääst 54,24–59,40 MWh/a ehk 9,0% – 9,9%. Põranda

soojustamine kogu pörandaplaadi ulatuses võimaldab säästa soojusenergiat 11,5% – 13,9%.

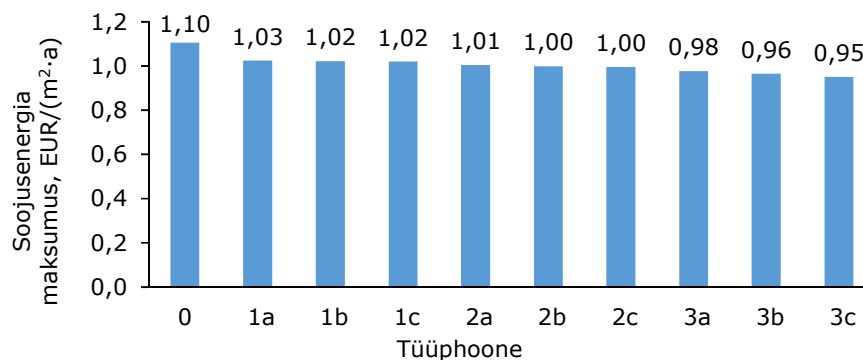


Joonis 3.10 Soojusenergia tarbimise muutumine sõltuvalt soojustusega kaetud pörandapindalast

Oluline on märkida, et soojustatud pörandapindala osakaalu suurenemisel 15%-lt 100%-ni väheneb soojusenergia tarve ainult 2,5% – 4% võrra. Järelikult annab suurimat energiasäästu pöranda servade soojustamine.

3.5.2 Soojusenergia aastane maksumus

Aastase soojusenergia maksumuse leidmiseks korrutatakse tarbitud soojuse kogus soojuse hinnaga. Eestis reguleerib kaugkütte hinda Konkurentsiamet. Vastavalt energiakontserni AS Utilitas Eesti kodulehel esitatud andmetele on Tallinna võrgupiirkonna soojuse piirhind 50,14 eur/MWh +km.

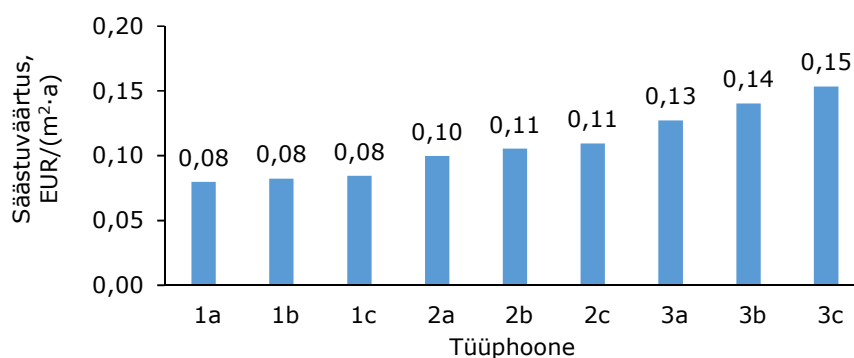


Joonis 3.11 Aastane soojusenergia maksumus

Graafikul (joonis 3.11) on esitatud aastase soojusenergia maksumuse arvutuse tulemused. Graafikult on näha, et soojusenergia aastane maksumus väheneb juba Tüüppoone 1a puhul. Edasine aastase tarbitud soojusenergia maksumuse langus toimub

ühtlasemalt. Järelikult on uuritava laohoone puhul põranda soojustuskihi paksuse muutumisel vaid väike mõju soojusenergia aastasele maksumusele. Tüüphoonete 1a ja 1c aasta jooksul tarbitud soojusenergia maksumuste vahe on 0,01 eur/(m²·a), Tüüphoonete 2a ja 2c puhul 0,01 eur/(m²·a) ning Tüüphoonete 3a ja 3c puhul 0,03 eur/(m²·a).

Suurem soojustatud põrandapindala mõjutab soojusenergia aastast maksumust märgatavalt rohkem. Võrreldes Tüüphoonega 1b on Tüüphoon 2b puhul aastane kokkuhoid 0,02 eur/m². Tüüphoon 3b soojusenergia sääst on aastas 0,04 eur/m² suurem, võrreldes Tüüphoonega 2b.



Joonis 3.12 Soojusenergia säästuväärtus

Soojusenergia tarbimise vähendamisest saadav võimalik rahasääst numbrites on esitatud eespool toodud graafikul (joonis 3.12). Juba minimaalsegi soojustuskoguse lisamisel põranda servadesse saadakse kokkuhoid 0,08 eur/(m²·a). Soojustuskoguse suurenedes kasvab ka aastane soojusenergia säästuväärtus. Kuid, kui arvestada uuritava laohoone põrandapindala suurust, siis terve põrandaplaadi soojustamise korral märkimisväärset soojusenergia ning raha kokkuhoiu ei teki.

3.5.3 Põranda isoleerimistööde maksumus

Pinnasele toetava põranda soojustamiseks kasutatakse uuritavas laohoones EPS 200 vahtpolüstüroolplaate. Vastavalt tootekataloogis [26] toodud andmetele on EPS 200 soojustusplaadi suurim paksus 100 mm. Juhul, kui põranda soojustuskihi nõutav paksus on suurem kui 100 mm, tuleb soojustusisolatsioon kanda sellele kahe kihina.

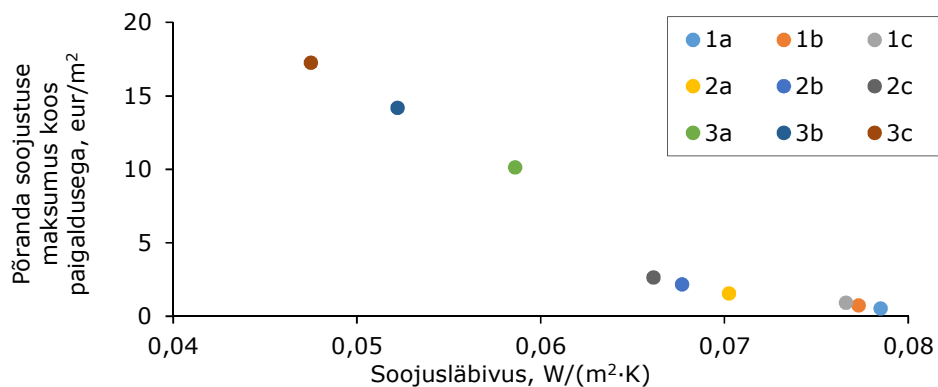
Põranda soojustamise maksumuse teadasaamiseks pöördui ehitusmaterjalide müügiga tegelevate ettevõtete poole. Üldehitustöödega tegelevatest ettevõtetest saadud info

põhjal on kuni 100 mm paksusega põrandasoojustuse paigaldushind 4 eur/m²; 150–200 mm paksusega soojustusplaatide paigaldushind on 5 eur/m². Tüüphoonete põrandate soojustamise maksumused on toodud tabelis (tabel 3.6). Hinnad ei sisalda käibemaksu.

Tabel 3.6 Põranda soojustamise variantide maksumused

Hoone variant	Kogus, m ²	Soojustuse hind, EUR/m ²	Paigaldushind, EUR/m ²	Soojustamistöõde maksumus, EUR	Hoone põranda soojustamise maksumus, EUR/m ²
1a	1 380,0	6,13	4,00	13 984	0,51
1b	1 380,0	9,20	5,00	19 596	0,72
1c	1 380,0	12,27	5,00	24 104	0,87
2a	4 004,0	6,13	4,00	40 574	1,49
2b	4 004,0	9,20	5,00	56 857	2,09
2c	4 004,0	12,27	5,00	69 136	2,45
3a	26 094,3	6,13	4,00	264 422	9,70
3b	26 094,3	9,20	5,00	370 538	13,59
3c	26 094,3	12,27	5,00	450 561	16,53

Järgneval graafikul (joonis 3.13) on välja toodud üheksa tüüphoonete põrandate soojuslähivused ja valitud soojustuslahenduste maksumused.



Joonis 3.13 Põranda soojustuslahenduste lisamaksumused koos paigaldusega ning soojustatud tarindi soojuslähivus

Eespool toodud graafikul on esitatud põranda erinevate soojustuslahenduste maksumuste jaotus. Perimeetris soojustusega Tüüphoonete 1 ja 2 põrandate soojustamise maksumuste erinevused on 0,21–1,91 eur/m² sõltuvalt soojustuskihi paksusest ja soojustuse laiuselt.

Tüüphoone 3 põranda soojustamise maksumus on märgatavalt kõrgem, kuna soojustusega kaetud põrandapindala on palju suurem. Sõltuvalt soojustuskihi paksusest on põranda soojustamise hind vahemikus 9,7–16,53 eur/m².

3.5.4 Tasuvusarvutuse tulemused

Uuritava laohoone optimaalseima põranda soojustuslahenduse valimiseks tehti tasuvusearvutused 9 soojustatud põrandakonstruktsiooniga tüüphoone kohta. Uuriti, millise soojustuslahenduse puhul alginvesteering end ära tasub.

Investeeringu analüüsimiseks kasutati nüüdispuhasväärtuse meetodit (NPV, net present value). Alginvesteeringu mahu arvutamiseks alushoone variandina valiti soojustamata põrandakonstruktsiooniga Tüüphoone 0; sel juhul võrdub iga tüüphoone alginvesteering vastava hoone põranda soojustusvariandi maksumusega.

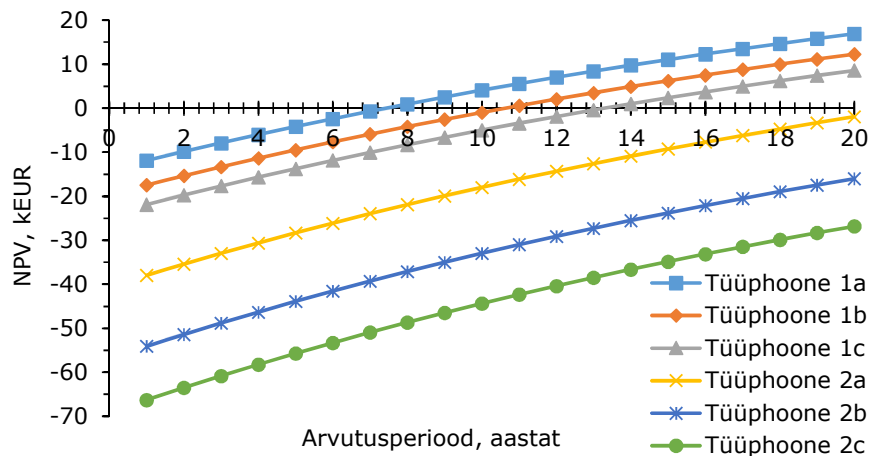
Tabel 3.7 Lähteandmed tasuvusarvutuse teostamiseks

Tüüphoone nr.	Säästuväärtus, EUR/a	Investeering põranda soojustamise, EUR
Tüüphoone 0	-	-
Tüüphoone 1a	2 174	13 984
Tüüphoone 1b	2 243	19 596
Tüüphoone 1c	2 300	24 104
Tüüphoone 2a	2 719	40 574
Tüüphoone 2b	2 875	56 857
Tüüphoone 2c	2 978	69 136
Tüüphoone 3a	3 468	264 422
Tüüphoone 3b	3 823	370 538
Tüüphoone 3c	4 185	450 561

Tabelist 3.7 on näha, et tüüphoonete säästu- ja investeeringuväärtused muutuvad ebaproportsionaalselt – soojustatud põrandapindala suurenemisel kasvab investeeringu maksumus palju rohkem võrreldes säästuväärtuse kasvuga.

Tasuvusarvutuse tegemisel võeti tasuvuse kriteeriumiks 20 aastat. Diskonteerimisel kasutati arvutuslikku intressimäära ja suhtelist hinnatõusu arvutusperioodi pikkuse aja jooksul. Diskonteerimisel on lähtutud reaaltressist 2,5%, mis vastab tulumäärale 3,5%, kui inflatsioon on 1%. Arvutusperioodi energiahindade reaaleskalatsiooniks on arvestatud 1% aastas [11].

Graafikust (joonis 3.14) on näha, et etteantud perioodi jooksul saavad tasuvaks vaid 3 põranda soojustuslahendust. Parima soojustusvariandi leidmisel lähtuti põhimõttest, et mida lühem on tasuvusaeg, seda parem investeerimisprojekt.



Joonis 3.14 Tüüphoonete põrandate soojustuslahenduste tasuvusajad

Kõige lühem tasuvusperiood on Tüüphoone 1a põranda soojustuslahenduse korral, kus soojustus paksusega 100 mm paikneb põranda perimeetri laiusel 2 m. Selle lahenduse tasuvusaeg on 7,5 aastat. Sama lahenduse korral juhul, kui soojustuskihi paksust suurendada kuni 150 mm, pikeneb projekti tasuvuse periood 11 aastani; ja kui kasutada 200 mm paksusega soojustust, pikeneb tasuvusaeg veel 3 aasta võrra.

Tüüphoonete 2a, 2b, 2c, 3a, 3b ning 3c nüüdispuhasväärtused $NPV < 0$. Sellest järeldub, et need põranda soojustuslahendused on kahjumlikud.

3.6 Laohoone liginullenergia hooneks viimine

Liginullenergiahoonete puhul on põhitähelepanu pööratud hoone energiatarbimise minimeerimisele. Käesolevas uurimistöös osas analüüsitakse erinevaid võimalusi uuritava laohoone energiatõhususe suurendamiseks.

3.6.1 Energiatõhusaima küttesüsteemi määramine

Käesolevas alapeatükis analüüsitakse hoone energiatarbimise vähendamise võimalusi erinevate küttesüsteemilahenduste kasutamisel. Selles töös osas uuriti välja, milliste

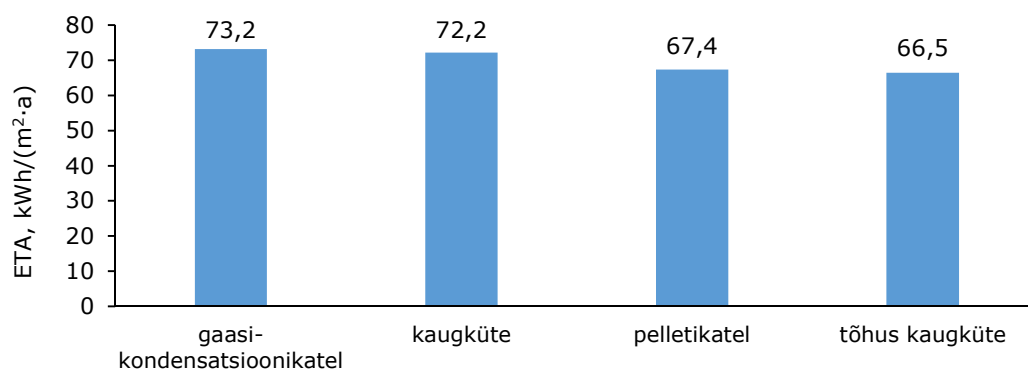
küttesüsteemide ja soojusallikate kombineerimisel saavutatakse liginullenergiahoone tase.

Erinevate soojusallikate mõju energiatõhususele

Käesolevas töös analüüsiti erinevate soojusallikate kasutamise mõju hoone soojusenergia tarbimisele. Vaadeldi selliseid soojusallikaid nagu maagaas, kaugküte, tõhus kaugküte ja puidupõhine kütus.

Energiatõhususe arvutamisel on võetud arvesse kaalumis- ja kasutegureid, mis võib muuta energiatõhususe arvutamisel hoone energiaklassi üles või alla. Arvutuste tegemisel kasutati tabelites 2.9 ja 2.11 toodud soojusallika kaalumis- ja kasutegureid. Soojusallikas on seda tõhusam, mida suurem on tema kasutegur. Tabelist 2.9 on näha, et kõige suurem soojusallika kasutegur on gaasi kondensatsioonikatlal ning kõige madalam pelletikatlal.

Energiakandja valik ka suuresti mõjutab hoone energiatõhusust. Uuritud soojusallikate variantidest on väiksemad kaalumistegurid puidupõhisel kütusel ja tõhusal kaugkütel. Võrreldes kaugküttega, on tõhusa kaugkütte soojusallika kaalumistegur nii madal seetõttu, et soojusenergia tootmiseks kasutatakse vähemalt 50 protsenti taastuvenergiat, 50 protsenti heitsoojust, 75 protsenti koostoodetud soojust või 50 protsenti sellise energia ja soojuse kombinatsiooni [21].



Joonis 3.15 Hoone algvariandi 1a energiatõhususarvu (ETA) sõltuvus soojusallikast pörandkütte korral

Energiatõhususe arvutuste tulemuste põhjal uuriti, kuidas toimub uuritava hoone energiatarbimise muutumine erinevate soojusallikate kasutamisel. Graafikust (joonis 3.15) on näha, et kõige suurem energiatõhususarv 73,2 kWh/(m²·a) on gaasi-

kondensatsioonikatlaga hoone puhul. Kui hoones on kütteallikaks kaugküte, siis hoone energiatõhususe arv väheneb 1,0 kWh/(m²·a), ehk ligikaudu 1% võrra. Pelletikatla kasutamine võimaldab vähendada ETA kuni 67,4 kWh/(m²·a). Energiatõhususarv on kõige väiksem tõhusa kaugküte puhul, selle soojuskandja kasutamise korral hoone energiatõhususe arv võrdub 66,5 kWh/(m²·a).

Sellest selgub, et kõige energiatõhusam soojusallikas on tõhus kaugküte. Kuid selle soojusallika kasutamise korral ületab hoone energiatõhususarv 65 kWh/(m²·a), mis on liginullenergia laohoone piirväärtus.

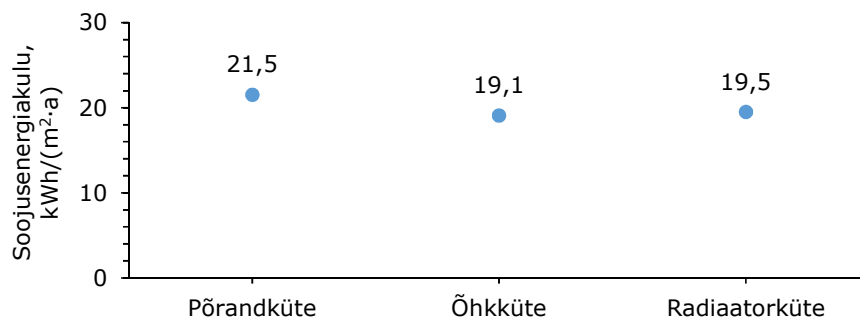
Soojuse jaotussüsteemi mõju energiatõhususele

Veel üks mõjuritest, millest sõltub hoone energiatarbimine, on küttesüsteemi valik. Käesolevas alapeatükis analüüsitakse põrand-, õhk- ja radiaatorküttesüsteemide mõju hoone energiatarbimisele. Küttesüsteemide võrdlemisel on arvestatud tabelis 3.8 esitatud soojuse jaotamise ja väljastamise kasutegurite väärtusi.

Tabel 3.8 Soojuse jaotamise ja väljastamise kasutegurid [20, 23]

Kütteviis	Kasutegur
Radiaator	0,97
Põrandküte	0,85
Õhkküte (puhur)	1,00

Tabelist on näha, et kõige madalam kasutegur on põrandküttesüsteemi puhul. Põrandküte puhul sõltub soojuse jaotamise ja väljastamise kasutegur sellest, kui suur on torustiku peale ja alla jäävate tarindite soojustakistus [20].



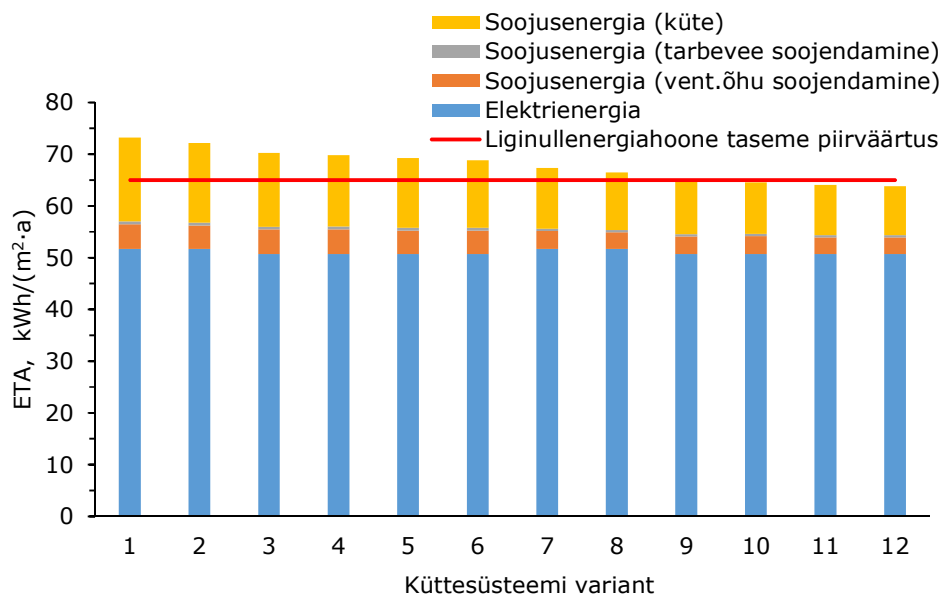
Joonis 3.16 Hoone soojusenergia kulu muutumine erinevate soojusjaotussüsteemide puhul (soojusallikas: kaugküte)

Võrreldes põrandküttega on radiaator- ja õhkküttesüsteemide kasutegurid märkimisväärselt kõrgemad. Graafikul (joonis 3.16) on näidatud, kuidas muutub hoone energiatõhusus ja soojusenergia tarbimine vaadeldud küttesüsteemide kasutamisel. Kõige rohkem soojusenergiat tarbitakse, kui hoones on põrandküttesüsteem. Õhkkütte ja radiaatorkütte kasutamisel on soojusenergia kulu erinevus 0,4 kWh/(m²·a). Järelikult: uuritud hoone jaoks on kõige energiatõhusam lahendus õhkküte.

Soojusallika ja küttesüsteemi koostoimimise mõju hoone energiatõhususele

Käesolevas uurimistöös tehti ETA arvutused mitmetele variantidele, kombineerides erinevaid soojusallikate ja küttesüsteemide lahendusi.

Graafikul (joonis 3.17) on esitatud Tüüphoone 1a 12 küttesüsteemide lahenduste energiatõhususarvutuste tulemused. Saadud arvutuste tulemuste põhjal analüüsiti erinevate küttesüsteemilahenduste mõju hoone energiatarbimisele.



Joonis 3.17 Tüüphoone ETA erinevate küttesüsteemide kasutamise korral. Kood: 1- gaas, põrandküte; 2 - kaugküte, põrandküte; 3 - gaas, radiaatorküte; 4 - gaas, õhkküte; 5- kaugküte, radiaatorküte; 6 - kaugküte, õhkküte; 7 - pelletikatel, põrandküte; 8- tõhus kaugküte, põrandküte; 9- pelletikatel, radiaatorküte; 10- pelletikatel, õhkküte; 11 - tõhus kaugküte, radiaatorküte; 12- tõhus kaugküte, õhkküte

Graafikust on näha, et kõige rohkem primaarenergiat tarbitakse hoonetes, kus soojusallikaks on valitud gaas või kaugküte ning kütmiseks kasutatakse põranda- või

radiaatorküttesüsteemi. Selliste lahenduste puhul varieerub energiatõhususarv 69,3–73,2 kWh/(m²·a).

Kui hoones on gaasi-kondensatsioonikatel või kaugküte, on võimalik energiatarbimist vähendada, kasutades õhu soojendamiseks puhureid. Sellise lahenduse rakendamisel energiatarbimine väheneb kuni 68,9–69,8 kWh/(m²·a) olenevalt soojusallika valikust.

Põrandküttesüsteemiga hoone energiatõhusust võib suurendada taastuvate soojusallikate kasutamise; kui soojusallikaks on tõhus kaugküte või pelletikatel, varieerub hoone energiatõhususarv 66,5–67,4 kWh/(m²·a).

Graafikust selgub, et kõige efektiivsem küttesüsteemilahendus uuritava hoone energiatarbimise minimeerimiseks on paigaldada hoonesse puhuritega õhkküttesüsteem ja kasutada soojusallikana tõhusat kaugkütet. Sellise küttesüsteemilahenduse valiku puhul on hoone energiatõhususarv 63,8 kWh/(m²·a).

Kehtivate nõuete kohaselt on liginullenergiahoone taseme piirväärtuseks laohoonete puhul $ETA = 65 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Energiatõhususarvutuste tulemused näitavad, et uuritava hoone ETA kuluoptimaalsed tasemed ei ületa kehtivat liginullenergia piirväärtust. See tähendab, et hoone energiatõhususe tase on „Liginullenergiahoone“.

3.6.2 Päikesepaneelid

Hoonete energiatõhusust parandades on võimalik vähendada hoone energiakasutust. Energiatõhususe miinimumnõuetega on sätestatud, et hoone piirdetarindite ja tehnosüsteemide lahendused peavad tagama energiatõhususe klassi B ehk madalenergia hoone taseme. Hoone aastase energiabilansi liginullenergiahoone tasemele viimiseks on eelduseks lokaalse taastuvenergia tootmine.

Laohoone kaalutud energiakasutus varieerub 70,7–72,2 kWh/(m²·a) olenevalt tüüphoone põranda soojustuslahendusest. Järelikult: laohoone tõhususe liginullenergiahoone tasemele viimiseks peab päikesepaneelide ETA komponendi väärtus olema piisavalt suur, et kompenseerida tüüphoonete energiakulusid, mis ületavad liginullenergiahoone taseme piirnõuet.

Liginullenergiahoone taseme saavutamiseks peab kõige suurema energiatarbimisega Tüüphoone 1a puhul olema päikesepaneelidega toodetud energia hulk suurem kui 9

kWh/(m²·a). Oluline on märkida, et laohoone korral on hoone toimimiseks ette nähtud vaid 40% päikesepaneelidega toodetud energiast [23]. Päikesepaneelide ETA komponendi väärtus saadakse elektrienergia kaalumisteguri ja energia omatarbe väärtuse korrutisena.

Tabel 3.9 Hoone energiatõhususe muutus pärast PV süsteemide paigaldamist

Nr.	Toodetud energia	Energia omatarve	PV kogus	ETA (Ilma PV)	ETA (PV)	ETA (koos PV)
	kWh/(m ² ·a)	kWh/(m ² ·a)	tk	kWh/(m ² ·a)	kWh/(m ² ·a)	kWh/(m ² ·a)
1a	9,0	3,6	900	72,2	-7,2	65,0
1b	8,9	3,6	892	72,1	-7,1	65,0
1c	8,9	3,6	890	72,1	-7,1	65,0
2a	8,5	3,4	850	71,8	-6,8	65,0
2b	8,4	3,4	840	71,6	-6,7	64,9
2c	8,3	3,3	830	71,6	-6,6	64,9
3a	7,8	3,1	785	71,2	-6,3	64,9
3b	7,5	3,0	750	71,0	-6,0	65,0
3c	7,2	2,9	720	70,7	-5,8	64,9

Tabelist 3.9 selgub, et kõige kehvema pörandasoojustuslahendusega tüüphoone energiatõhususe liginullenergiahoone tasemele tõstmiseks tuleb lisada vähemalt 900 päikesepaneeli. Hoone puhul, mille ETA on väiksem, on väiksem ka liginullenergia taseme saavutamiseks nõutav PV paneelide hulk.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti erinevate pörandasoojustuslahenduste mõju suure pörandapindalaga hoonete soojuskadudele. Uurimistöös vaadeldi pörandate selliseid soojustuslahendusi nagu soojustamine pöranda perimeetris soojustuse laiusega 2 m ja 6 m ning terve pöranda ulatuses. Samuti analüüsiti pörandakonstruktsiooni soojuslähivuse muutumist erineva paksusega soojustuskihtide kasutamisel.

Soojuslähivuse arvutustulemustest selgus, et pöranda soojuslähivust mõjutavad nii soojustuse paiknemine kui ka soojustuskihi paksus. Pörandaplaadi aluse soojustuse pindala suurenedes väheneb pinnasele toetuva pörandaplaadi soojuslähivus, mis põhjustab hoone soojuskaotuse vähenemist. Võrreldes soojustamata pöranda soojuskaotuse pörandakonstruktsiooni soojustamisel vaid perimeetris laiusel 2 m väheneb pöranda soojuskadu keskmiselt 17% võrra. Pöranda servade soojustuse laiendamisel 6 meetrini väheneb soojuskadu veel 10% võrra. Kõige soojapidavam lahendus on pöranda soojustamine kogu pöranda ulatuses. Terve pörandaplaadi soojustamine võimaldab vähendada soojuskadu läbi pörandakonstruktsiooni veel 16% võrra. Soojustuskihi paksuse muutumine mõjutab samamoodi konstruktsiooni soojuslähivust: paksema soojustuskihi puhul soojuskadu läbi pörandakonstruktsiooni väheneb, kuid pörandakonstruktsiooni soojuslähivus muutub suhteliselt vähe.

Pöranda soojuslähivuse arvutused teostati kehtiva EVS-EN ISO 13370:2017 standardi meetodika järgi ning IDA ICE simuleerimistarkvara abil. Uurimistöös analüüsiti standardite EVS-EN ISO 13370:2017 ja EVS 829:2003 ning IDA ICE soojuslevi arvutusmodelite baasil meetodikate erisusi ja sobivust erinevate lahendustega soojustatud pörandate soojuslähivuse arvutamiseks. Kogu ulatuses soojustatud pöranda soojuslähivuse väärtused, mis saadi arvutades vastavalt standardi EVS-EN ISO 13370:2017 meetodikale ning kasutades tarkvara IDA ICE arvutusmeetodeid, on samaväärsed, kuid tuleb märkida, et IDA ICE ei võimalda soojustatud servadega pöranda soojuslähivuse arvutusi vastavalt kehtiva standardi nõuetele. Standardis EVS 829:2003 kirjeldatud meetodika järgi arvutatud soojuslähivuse väärtus on oluliselt suurem ning selle alusel arvutatud soojuskaotused ülehinnatud. Sellest saab järeldada, et hoonete puhul, milliste kogu pörand on soojustatud, on optimaalsete lahenduste saavutamiseks (energia arvutuse täpsemad tulemused) soovituslik kasutada modelleerimis tarkvara IDA-ICE vastavuses standardiga ISO 13370. Hoonete puhul, kus soojustus paikneb vaid pöranda perimeetris, tuleb kasutada integreeritud arvutusmeetodikat, teostades esmaselt pöranda soojuslähivuse arvutused analüütilise arvutuse meetodika järgi. Seejärel sisestada arvutatud soojuslähivuse väärtused

arvutusmudelisse. Lõpuks teostada ICE 3 metoodika järgne lihtsustatud modelleerimine.

Põrandakonstruktsiooni soojusläbivuse vähenemisega väheneb hoone soojusenergiavajadus. Põranda soojustamine vaid perimeetris 2 m laiuselt võimaldab vähendada uuritava hoone neto soojusenergiavajadust 7% võrra. Terve põrandakonstruktsiooni soojustamisel on netosoojusenergia sääst ainult 12%. Sellest järeldub, et suurimat mõju energiatarbimisele avaldab põranda servade soojustamine; põranda kesktsooni soojustamise mõju soojusenergia tarbimisele on märkimisväärselt väiksem.

Vastavalt hoone energiatõhususe ning põranda soojustamise tasuvusarvutuse tulemustele on kõige optimaalsem soojustuslahendus suure põrandapindalaga laohoone puhul põranda servade soojustamine nii, et soojustuse laius on 2 m ning paksus 100 mm.

Uurimistöö käigus vaadeldi erinevaid võimalusi energia tarbimise vähendamiseks ning hoone energiatõhususe parendamiseks. Energiaarvutustest lähtuvalt on üheks võimalikuks variandiks antud hoone analüüsist järelduvalt saavutada liginullenergiahoone tase, kui kasutada hoone kütteks puhuritega õhkküttesüsteemi tõhusa kaugkütte baasil. Liginullenergiahoone tase on võimalik saavutada ka kasutades päikeseenergiat elektrienergia tootmiseks.

Summary

This paper studied the impact of different floor heat solutions on heat losses in buildings with large floor area. The research considered floor insulation solutions such as 2-meter-wide and 6-meter-wide insulation within the perimeter of the floor as well as within the entire floor. The change in thermal transmittance of the floor structure was also analysed when using insulation layers of different thickness.

Calculations of floor thermal transmittance were performed according to the methodology of the valid EVS-EN ISO 13370:2017 standard and using IDA ICE simulation software. Based on the EVS-EN ISO 13370:2017 and EVS 829:2003 standards and the IDA ICE heating loads calculation models, the research analysed the differences and suitability of the methodologies for calculating the thermal transmittance of insulated floors depending on different solutions. The thermal insulation values of the fully insulated floor, obtained through calculations in accordance with the methodology of EVS-EN ISO 13370:2017 and using the calculation methods of the IDA ICE software, appeared to be equivalent, but it should be noted that IDA ICE does not allow for the calculation of the thermal transmittance of insulated edged floors. The value of heat transmittance calculated according to the methodology of EVS 829:2003 is significantly higher and the heat losses calculated on its basis are overestimated.

The results of the thermal transmittance calculations showed that the thermal transmittance of the floor is affected by both the location of insulation and the thickness of insulation layer. As the insulation area of the slab base increases, the thermal transmittance of the floor slab resting on the ground decreases, which causes a reduction in the heat loss of a building. Compared to the heat loss of uninsulated floor when insulating a floor structure only at a perimeter width of 2 m, the heat loss of the floor is reduced by 17% on average. By extending the insulation of the floor edges to 6 meters, the heat loss is reduced by another 10%. The most heat-resistant solution is to install insulation throughout the floor. Insulation of the entire floor slab allows to reduce heat loss through the floor structure by another 16%. A change in the thickness of the insulation layer affects the thermal transmittance of the structure in the same way: in the case of a thicker insulation layer, the heat loss through the floor structure decreases, however, the thermal transmittance of the floor structure will change relatively little.

The thermal transmittance of the floor structure decreases the heat energy demand of the building. 2-meter-wide insulation of the floor in the perimeter only allows you to

reduce the net heat energy demand of the investigated building by 7%. When insulating the entire floor structure, the total net heat energy savings make 12% only. It shows that the greatest impact on energy consumption is caused by the insulation of the floor edges: the effect of floor insulation in the central zone on heat energy consumption is significantly smaller.

The results of the calculation of the energy efficiency of the building and the cost-effectiveness of the floor insulation demonstrated that the most optimal insulation solution for a warehouse with a large floor area is to insulate the floor edges using insulation which is 2 m wide and 100 mm thick.

The research studied different ways to reduce energy consumption and improve the energy efficiency of a building. Supported by energy calculations, the level of a nearly zero energy building can be achieved if a blown air heating system based on efficient district heating is used to heat the building. Another opportunity for achieving the level of a near-zero energy building is by using solar energy to generate electricity.

Kasutatud kirjandus

- [1] Măgurean A. M., Czumbil L., Manea D. L., Micu D.D. *Artificial intelligence based prediction model for the long-term heat flux losses through ground applied to large non-residential buildings*. Procedia Manufacturing 32 (2019) 434–441.
- [2] Zhong Z., Braun J. E. *A simple method for estimating transient heat transfer in slab-on-ground floors*. Building and Environment 42 (2007) 1071–1080.
- [3] EQUA Simulation AB, *IDA ICE Getting Started*. Manual version: 4.8, jaanuar 2018
- [4] Rantla J. *Thermal Interaction between Slab-on-Ground Structures and Subsoil in Finland*. Tampere University of Technology. Publication 542. 2005.
- [5] Chuangchid P., Krarti M. *Foundation heat loss from heated concrete slab-on-grade floors*. Building and Environment 36 (2001) 637–655.
- [6] Chen D. *Heat Loss via Concrete Slab Floors in Australian Houses*. Procedia Engineering 205 (2017) 108–115.
- [7] Baglivo C., Congedo P. M. *Optimization of high efficiency slab-on-ground floor by multi-objective analysis for zero energy buildings in mediterranean climate*. Journal of Building Engineering 24 (2019), 100733.
- [8] Hamburg A., *Eluhoonete lihtsustatud energiatõhususe tõestamine ka kütte netoenergiakulu leidmine kraadpäevade järgi*. Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool. Õppematerjal.
- [9] Brinks P., Kornadt O., R. Oly. *Thermal Losses via Large Slabs on Grade*. Asim 2014, IBPSA Asia Conference, Nagoya, Japan, 28-29 november 2014.
- [10] Naser S. Sanoussi. *Reduction in Heat Flow through the Building Floor at Various Insulation Layout Arrangements*. 2nd Intl' Conference on Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics (ICAESAM'2014), Istanbul (Turkey), 4-5 May, 2014.
- [11] Tallinna Tehnikaülikool, *Liginullenergia eluhooned, rida -ja korterelamud*, Sihtasutus Kredex, Tallinn, november 2017.
- [12] Tallinna Tehnikaülikool, *Liginullenergia eluhooned, piirdetarindite liitekohtade joonsoojuslääbivuste kataloog*, Sihtasutus Kredex, Tallinn, Oktoober 2017.
- [13] Rantla J., Leivo V. *Heat losses from a slab-on-ground structure with a low temperature floor heating system in Nordic climate*. The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokyo, 27-29 september 2005.
- [14] Anderson B. R. *The Effect of Edge Insulation on the Steady-State Heat Loss Through a Slab-on-Ground Floor*. Building and Environment, Volume 28, Issue 3, july 1993, Pages 361-367.
- [15] Staszczuk A., Wojciech M., Kuczynski T. *The effect of floor insulation on indoor air temperature and energy consumption of residential buildings in moderate climates*. Journal Energy 138, 2017, 139-146.

- [16] EVS 829:2003. *Hoone soojuskoormuse maaramine*. Eesti Standardikeskus, 2003.
- [17] EVS-EN ISO 13370:2017. *Hoonete soojuslik toimivus. Soojuslevi pinnasesse. Arvutusmeetodid*. Eesti Standardikeskus, 2017.
- [18] EVS 844:2016. *Hoonete kütte projekteerimine*. Eesti Standardikeskus, 2016.
- [19] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi ametlik veebisait. *Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030 (REKK 2030)*. Kättesaadav: https://www.mkm.ee/sites/default/files/teatis_eeesti_riiklik_energia_ja_kliimakava_aastani_2030.pdf. 19.12.2019.
- [20] Kalamees T., Tark T. *Madalenergia- ja liginullenergiahoone kavandamine Juhend väikeelamute projekteerijale, ehitajale ja tellijale*. Tallinn, 2012.
- [21] Ettevõtlus- ja infotehnoloogiaminister. *Hoone energiatõhususe miinimumnõuded*. Riigiteataja, RT I, 22.08.2019, 2
- [22] Tallinna Tehnikaülikool. *Liginullenergia eluhooned. Suur eramu, energiatõhusus*. Sihtasutus Kredex.
- [23] Majandus- ja taristuminister. *Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika*. Riigiteataja, RT I, 22.08.2019, 5.
- [24] Majandus- ja taristuminister. *Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele*. Riigiteataja, RT I, 22.08.2019, 4.
- [25] Tallinna Tehnikaülikool. *Liginullenergia eluhooned. Piirdetarindite liitekohtade joonsoojuslähivuse arvutus*. Sihtasutus Kredex. Tallinn, 2017.
- [26] *Reideni EPS Plaat tootekataloog*. Kättesaadav: <https://reideniplaat.ee/tooted/>.
- [27] EVS-EN ISO 10456:2008 *Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid*. Eesti Standardikeskus, 2008.
- [28] EVS-EN ISO 6946:2017 *Hoonete piirdetarindid ja komponendid. Soojustakistus ja soojuslähivus. Arvutusmeetodid*. Eesti Standardikeskus, 2017.
- [29] ISOVER tootekataloog. Kättesaadav: <https://www.isover.ee/tooted/styrofoam-250-sl-n>.
- [30] Kalamees, T., *Ehitusfüüsika loengukonspekt*. Tallinna Tehnikaülikool, 2018.
- [31] Kurnitski J., Thalfeldt M., Kalamees T., Voll H., Uutar A., Rosin A. *Madal-ja liginullenergiahooned, Büroohoonete põhilahendused eskiis- ja eelprojektis*. Riigi Kinnisvara AS ja Tallinna Tehnikaülikool.
- [32] *Eesti kliima teatmik ehitajatele. Eesti Ehitusteave*, ET-2 0102-0329, mai 2000.
- [33] Jaaniso V. *Pinnasemehaanika*. Tallinna Tehnikaülikool. Tallinn, 2011.
- [34] Tallinna Tehnikaülikool, *Liginullenergia eluhooned. Suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutuse juhend*. Sihtasutus Kredex.
- [35] Abel E. *Tasuvus arvutus*, 2012.

- [36] Kalamees, T.; Kurnitski, J. *Estonian test reference year for energy calculations*. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng. 2006, 12, 40–58.
- [37] Foamglas tootekataloog. Kättesaadav: <https://bestor.ee/foamglas-s3-seeria-1200x600-mm/>.
- [38] Weber tootekataloog. Kättesaadav: <https://www.ee.weber/leca-kergekruus-soojustus-ja-taitematerjalina/leca-kergekruus-1020-mm>.

LISAD

L.1 Põrandakonstruktsiooni soojustakistus

L.2 Soojuserikao arvutus (EVS-EN ISO 13370:2017 meetoodika)

L.3 Soojuserikao arvutus (EVS 829:2003 meetoodika)

L.4 Joonsoojuslähivuse arvutus

L.1 Põrandakonstruktsiooni soojustakistus

Tabel 0.1 Põrandakonstruktsiooni soojustakistuse arvutustabel

Soojustamata põrand	d	λ	R
Tarind	m	$W/(m \cdot K)$	$m^2 \cdot K/W$
Raudbetoonplaat	0,15	1,70	0,09
Rsi			0,17
Rse			0,04
Kogu paksus ja R	0,15		0,30

Põrand soojustusega 100 mm	d	λ	R
Tarind	m	$W/(m \cdot K)$	$m^2 \cdot K/W$
Raudbetoonplaat	0,15	2,00	0,08
Soojustus EPS200 100mm	0,10	0,033	3,03
Rsi			0,17
Rse			0,04
Kogu paksus ja R	0,25		3,32

Põrand soojustusega 150 mm	d	λ	R
Tarind	m	$W/(m \cdot K)$	$m^2 \cdot K/W$
Raudbetoonplaat	0,15	2,00	0,08
Soojustus EPS200 150mm	0,15	0,033	4,55
Rsi			0,17
Rse			0,04
Kogu paksus ja R	0,30		4,83

Põrand soojustusega 200mm	d	λ	R
Tarind	m	$W/(m \cdot K)$	$m^2 \cdot K/W$
Raudbetoonplaat	0,15	2,00	0,08
Soojustus EPS200 200mm	0,20	0,033	6,06
Rsi			0,17
Rse			0,04
Kogu paksus ja R	0,35		6,35

L.2 Soojuserikao arvutus (EVS-EN ISO 13370:2017 meetodika)

Tabel 0.2 Soojuserikao arvutustabel

Tüüphoone nr.	Põranda pindala A	Välisperimeetri pikkus	Põranda soojustakistus, $R_{si} + R_f; \text{sog} + R_{se}$	Põranda tunnusmõõt, B	Põranda ekvivalentne paksus, d_f	Serva isolatsioonipaksus, d_n	Serva soojustuse soojustakistus, R_n	Täiendav soojustakistus, R'	Täiendav ekvivalentne paksus, d'	Joonsoojusläbivus, $\psi_{g;ed}$	Soojusläbivus, $U_{fg; \text{sog}; 0}$	Soojusläbivus, $U_{fg; \text{sog}}$	Soojuserikadu*, H_g
	m ²	m	m ² ·K/W	m	m	m	m ² ·K/W	m ² ·K/W	m	W/(m·K)	W/(m ² ·K)	W/(m ² ·K)	W/K
Tüüphoone 0	26094,25	698	0,30	74,77	0,97						0,093		2433,80
Tüüphoone 1a	26094,25	698	0,30	74,77	0,97	0,10	3,03	2,98	5,96	-0,55	0,093	0,0785	2047,97
Tüüphoone 1b	26094,25	698	0,30	74,77	0,97	0,15	4,55	4,47	8,94	-0,60	0,093	0,0773	2016,95
Tüüphoone 1c	26094,25	698	0,30	74,77	0,97	0,20	6,06	5,96	11,92	-0,62	0,093	0,0766	1999,34
Tüüphoone 2a	26094,25	698	0,30	74,77	0,97	0,10	3,03	2,98	5,96	-0,86	0,093	0,0702	1833,02
Tüüphoone 2b	26094,25	698	0,30	74,77	0,97	0,15	4,55	4,47	8,94	-0,96	0,093	0,0677	1766,16
Tüüphoone 2c	26094,25	698	0,30	74,77	0,97	0,20	6,06	5,96	11,92	-1,01	0,093	0,0661	1725,58
Tüüphoone 3a	26094,25	698	3,32	74,77	7,00						0,059		1529,13
Tüüphoone 3b	26094,25	698	4,83	74,77	10,03						0,052		1362,16
Tüüphoone 3c	26094,25	698	6,35	74,77	13,06						0,048		1239,51

*Põranda soojuserikao arvutuses ei ole arvestatud soojuskaoga läbi põranda ja välisseina liitekoha.

L.3 Soojuserikao arvutus (EVS 829:2003 meetodika)

Tabel 0.3 Soojuserikao arvutustabel

Tüüphoone 0	Tsooni pindala	Tsooni soojustakistus	U- arv	Soojuserikadu, Hg,
	m ²	m ² ·K/W	W/m ² ·K	W/K
P-I tsoon (ladu)	1396	2,10	0,48	664,76
P-II tsoon (ladu)	1348	4,30	0,23	313,49
P-III tsoon (ladu)	1316	8,60	0,12	153,02
P-IV tsoon (ladu)	22050,4	14,20	0,07	1552,85
Põranda soojuserikadu				2684,12

Tüüphoone 1a	Tsooni pindala	Tsooni soojustakistus	U- arv	Soojuserikadu, Hg,
	m ²	m ² ·K/W	W/m ² ·K	W/K
P-I tsoon (ladu)	1396	5,13	0,19	272,11
P-II tsoon (ladu)	1348	4,30	0,23	313,49
P-III tsoon (ladu)	1316	8,60	0,12	153,02
P-IV tsoon (ladu)	22050,4	14,20	0,07	1552,85
Põranda soojuserikadu				2291,47

Tüüphoone 1b	Tsooni pindala	Tsooni soojustakistus	U- arv	Soojuserikadu, Hg,
	m ²	m ² ·K/W	W/m ² ·K	W/K
P-I tsoon (ladu)	1396	6,65	0,15	210,07
P-II tsoon (ladu)	1348	4,30	0,23	313,49
P-III tsoon (ladu)	1316	8,60	0,12	153,02
P-IV tsoon (ladu)	22050,4	14,20	0,07	1552,85
Põranda soojuserikadu				2229,43

Tüüphoone 1c	Tsooni pindala	Tsooni soojustakistus	U- arv	Soojuserikadu, Hg,
	m ²	m ² ·K/W	W/m ² ·K	W/K
P-I tsoon	1396	8,16	0,12	171,07
P-II tsoon	1348	4,30	0,23	313,49
P-III tsoon	1316	8,60	0,12	153,02
P-IV tsoon	22050,4	14,20	0,07	1552,85
Põranda soojuserikadu				2190,42

Tüüphoone 2a	Tsooni pindala	Tsooni soojustakistus	U- arv	Soojuserikadu, Hg,
	m ²	m ² ·K/W	W/m ² ·K	W/K
P-I tsoon	1396	5,13	0,19	272,11
P-II tsoon	1348	7,33	0,14	183,89
P-III tsoon	1316	11,63	0,09	113,15
P-IV tsoon	22050,4	14,20	0,07	1552,85
Põranda soojuserikadu				2122,00

Tüüphone 2b	Tsooni pindala	Tsooni soojustakistus	U- arv	Soojuserikadu, Hg,
	m ²	m ² ·K/W	W/m ² ·K	W/K
P-I tsoon	1396	6,65	0,15	210,07
P-II tsoon	1348	8,85	0,11	152,39
P-III tsoon	1316	13,15	0,08	100,11
P-IV tsoon	22050,4	14,20	0,07	1552,85
Põranda soojuserikadu				2015,42

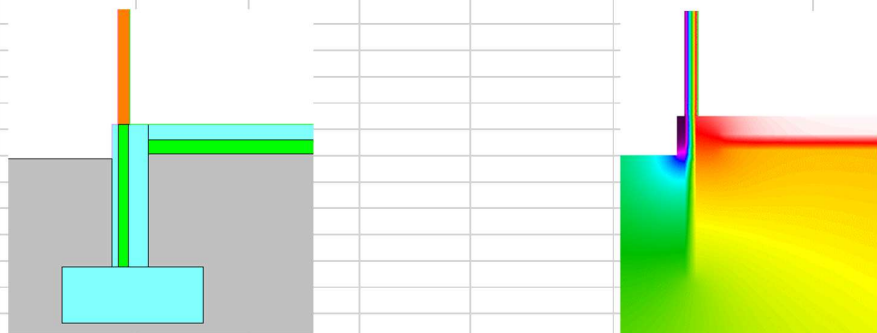
Tüüphone 2c	Tsooni pindala	Tsooni soojustakistus	U- arv	Soojuserikadu, Hg,
	m ²	m ² ·K/W	W/m ² ·K	W/K
P-I tsoon	1396	8,16	0,12	171,07
P-II tsoon	1348	10,36	0,10	130,11
P-III tsoon	1316	14,66	0,07	89,76
P-IV tsoon	22050,4	14,20	0,07	1552,85
Põranda soojuserikadu				1943,78

Tüüphone 3a	Tsooni pindala	Tsooni soojustakistus	U- arv	Soojuserikadu, Hg,
	m ²	m ² ·K/W	W/m ² ·K	W/K
P-I tsoon	1396	5,13	0,19	272,11
P-II tsoon	1348	7,33	0,14	183,89
P-III tsoon	1316	11,63	0,09	113,15
P-IV tsoon	22050,4	17,23	0,06	1279,75
Põranda soojuserikadu				1848,90

Tüüphone 3b	Tsooni pindala	Tsooni soojustakistus	U- arv	Soojuserikadu, Hg,
	m ²	m ² ·K/W	W/m ² ·K	W/K
P-I tsoon	1396	6,65	0,15	210,07
P-II tsoon	1348	8,85	0,11	152,39
P-III tsoon	1316	13,15	0,08	100,11
P-IV tsoon	22050,4	18,75	0,05	1176,31
Põranda soojuserikadu				1638,88

Tüüphone 3c	Tsooni pindala	Tsooni soojustakistus	U- arv	Soojuserikadu, Hg,
	m ²	m ² ·K/W	W/m ² ·K	W/K
P-I tsoon	1396	8,16	0,12	171,07
P-II tsoon	1348	10,36	0,10	130,11
P-III tsoon	1316	14,66	0,07	89,76
P-IV tsoon	22050,4	20,26	0,05	1088,34
Põranda soojuserikadu				1479,28

L.4 Joonsoojuslähivuse arvutus

Tarkvara:	THERM 7.6		
Kuupäev:	02.04.2020		
Autor:	Karina Voitik		
Välissein / Põrand			
Lähteandmed	R_{sr} , m ² ·K/W	h_{sr} , W/(m ² ·K)	Q, °C
Välispind (välisõhk)	0,04	25,0	-21,0
Välispind (pinnas)	0	1000	-21,0
Sisepind. Joonsoojuslähivuse arvutuseks			
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0,13	7,7	15,0
- Soojusvoog üles (lagi)	0,1	10,0	15,0
- Soojusvoog alla (põrand)	0,17	5,9	15,0
Sisepind. Külmasilla kriitilisuse hindamiseks			
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0,25	4,0	15,0
- Soojusvoog üles (lagi)	0,1	10,0	15,0
Sise- ja väliskesk. temperatuuride vahe, $\theta_i - \theta_e$			36,0 K
Liituvate tarindite soojuslähivused			
1. liituv tarindi soojuslähivus, U_1			0,180 W/m ² K
2. liituv tarindi soojuslähivus, U_2			0,052 W/m ² K
Liituvate tarindite arvutusulatus (arvutusmudelid)			
1. liituv tarindi arvutusulatus, l_{i1} (sisemõõdud)			1200 mm
2. liituv tarindi arvutusulatus, l_{i2} (sisemõõdud)			4000 mm
Kogu arvutusulatuse üldmõõt l_{ig} (üldised sisemõõdud)			5200 mm
Tarindite liitekohta arvutusulatust läbiv soojusvool, Φ			22,80 W
Liituvate tarindite arvutusulatuse keskmine soojuslähivus, U			0,12 W/m ² K
Madalaim sisepinna temperatuur			11,80 °C
Tarindite liitekohta arvutusulatuse soojuserikadu ja joonsoojuslähivus			
Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (2D arvutusest), L_{2D}			0,633 W/(m·K)
$U_1 * l_{i1} + L_{2D,a}$			0,505 W/(m·K)
Tarindite liitekohta joonsoojuslähivus Y_i (sisemõõdud)			0,13 W/(m·K)
$\psi_i = L_{2D} - U_1 * l_{i1} - L_{2D,a}$			
Tarindite liitekohta sisepinna minimaalne temperatuurindeks f_{Rsi}			0,91
Eestis on elamute tarindite liitekohtade temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,80$.			
Eestis on elamute akende temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,70$.			
			

Joonis 0.1 Joonsoojuslähivuse arvutus Tüüpoone 3b näitel