



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Instituudi nimetus

**PINNASELE TOETATUD PÕRANDA SOOJUSKAO
JA SERVASOOJUSTUSE MÕJU
ARVUTUSMEETODITE ANALÜÜS**

**ANALYSIS OF THE HEAT LOSS CALCULATION METHODS
OF GROUND SUPPORTED FLOORS AND THE EFFECTS OF
FLOOR EDGE INSULATION**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Guido Schilf

Üliõpilaskood 192625 EAEI

Juhendaja: Targo Kalamees, professor
Siim Lomp, nooremteadur

Tallinn 2024

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.

"19. detsember" 19.12.2024

Autor: Guido Schilf

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"19. detsember" 19.12.2024

Juhendaja: Targo Kalamees

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2024

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Guido Schilf

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Pinnasele toetatud põranda soojuskaod ja servasoojustuse mõju arvutusmeetodite analüüs“, (lõputöö pealkiri)

mille juhendajad on Targo Kalamees ja Siim Lomp,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

19.12.2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

EHITUSE JA ARHITEKTUURI INSTITUUT

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Guido Schilf 192625

Õppekava, peeriala: EAEI Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

Juhendajad: Targo Kalamees, professor

Siim Lomp, nooremteadur

Konsultant: Jaanus Hallik, teadur

Tallinna Tehnikaülikool, jaanus.hallik@taltech.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Pinnasele toetatud põranda soojuskao ja servasoojustuse mõju arvutusmeetodite analüüs.*

(inglise keeles) *Analysis of the heat loss calculation methods of ground supported floors and the effects of floor edge insulation.*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida 9 erineva põrand pinnasel soojuskao arvutusmeetodi täpsust võrrelduna nelja simulatsioonitarkvara vastu.
2. Uurida ISO 13370 servasoojustuse valemite täpsust erinevate põhisoojustuse paksuste ja hoone suuruste korral võrrelduna staatilise Therm tarkvara vastu.
3. Teha kindlaks, kas tasub uurida ka pinnaseniiskuse mõju pinnasele toetatud põranda soojuslähivuse arvutuses.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse analüüs ning arvutusmeetodite otsimine	31.01.2024
2.	Arvutuste ja simulatsioonide teostamine	30.09.2024
3.	Tulemuste analüüs ning lõputöö vormistamine	19.12.2024

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "19. detsember" 19.12.2024a

Üliõpilane: Guido Schilf " 19. detsember " 19.12.2024a
/allkiri/

Juhendaja: Targo Kalamees " 19. detsember " 19.12.2024.a
/allkiri/

Konsultant: Jaanus Hallik " 19. detsember " 19.12.2024.a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....2024a
/allkiri/

SISUKORD

SISUKORD	5
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	7
1. SISSEJUHATUS.....	10
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	12
2.1 Põranda soojuskaod	12
2.2 Põranda soojusläbivuse arvutusmeetodid.....	13
2.2.1 EVS-EN ISO 13370	13
2.2.2 SNIP	15
2.2.3 Taani standard DS 418	17
2.2.4 A. J. Wright'i meetod	18
2.2.5 C. E. Hagentoft'i meetod	19
2.2.6 K. Kissock'i meetod	22
2.2.7 O. Seppänen'i meetod.....	24
2.2.8 D. C. Spooner'i meetod	25
2.2.9 SRMK C4	26
2.3 Arvutustarkvarad	28
2.3.1 Heat3.....	28
2.3.2 Therm	30
2.3.3 Delphin	32
2.3.3.1 Tasakaaluvõrrandid	32
2.3.3.2 Arvutusmudelid	35
2.3.4 Voltra.....	36
2.4 Servasoojustus	38
2.4.1 EVS-EN ISO 13370 – Servasoojustus	39
2.4.2 Therm - Servasoojustus	40
3. MEETODID	42
3.1 Arvutuse alused	42
3.1.1 Tüüphooned.....	42
3.1.2 Kliima andmed	44
3.2 Tehtud eeldused ja lihtsustused	45
3.2.1 Eeldused A. J. Wrighti meetodis	45
3.2.2 Erinevad võimalused Spooner'i meetodis	46
4. TULEMUSED.....	47
4.1 Arvutustarkvarad	47

4.2	Lihtsustatud meetodid	50
4.3	Servasoojustus	55
4.4	Tulemuste hindamine	58
5.	JÄRELDUSED.....	61
5.1	Põhisoojustus	61
5.2	Servasoojustus	62
	KOKKUVÕTE	63
	SUMMARY	64
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	65
	LISAD	67
	Lisa 1 SRMK C4 meetodi soojustakistuste väärtused.....	68
	Lisa 2 Voltra arvutusmudeli näide	69
	Lisa 3 Põrandate soojusläbivused ja võrdlus tabeli kujul.....	70
	Lisa 4 Põrandate soojusläbivused Voltra suhtes.....	72
	Lisa 5 Põrandate joonsoojusläbivuste parandid servasoojustusest.....	76
	Lisa 6 Vajaminev põranda soojustuse paksus erinevate tarkvaradega arvutades.....	81
	Lisa 7 Vajaminev põranda soojustuse paksus arvatuna arvutusloogikate keskmisena	85

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

- A – põranda pindala [m²];
- a – pool põranda pikkust [m];
- B – põranda laius [m];
- B' – põranda tunnusmõõt [m];
- b – pool põranda laiust [m];
- C – parandustegur [-];
- c – pool seina paksust [m];
- d_f – põranda ekvivalentne kogupaksus [m];
- d_{ins} – soojustuse paksus [m];
- d_p – välisõhu perioodilise temperatuuri läbitungimissügavus [m];
- d_w – välisseina/vundamendiseina kogupaksus [m];
- ϕ_p^0 – soojuskadude faasiviivitus plaadi puhul, millel puudub soojustakistus maapinnal;
- h – põranda kõrgus maapinnast [m];
- $h_s(L/B, d/B)$ – soojuskao faktor [-];
- $|h_p^0|$ – põrandaplaadi perioodiline soojuskao faktor [-];
- k – põranda ja pinnase keskmine soojuserijuhtivus [W/(m*K)];
- L – hoone kogupikkus [m];
- λ_f – põranda soojuserijuhtivus [W/(m*K)];
- λ_g – pinnase soojuserijuhtivus [W/(m*K)];
- λ_{ins} – soojustuse soojuserijuhtivus [W/(m*K)];

- P – põranda perimeeter [m];
- Ψ – joonsoojusläbivus [W/(m*K)];
- Q – soojusvool [W];
- $Q_p(t)$ – soojuskao perioodiline komponent [W];
- Q_s – soojuskao püsioleku (*steady-state*) komponent [W];
- R_c – soojustamata põranda soojustakistus [(m²*K)/W];
- R_f – põranda soojustakistus [(m²*K)/W];
- R_{fnd} – vundamendiseina soojustakistus [(m²*K)/W];
- R_p – perimeetri soojustuse soojustakistus [(m²*K)/W];
- R_{si} – sisepinna soojustakistus [(m²*K)/W];
- R_{se} – välispinna soojustakistus [(m²*K)/W];
- R_{si} – sisepinna soojustakistus [(m²*K)/W];
- r_s – silindrilise soojusvoo teekonna siseraadius [m];
- r_u – silindrilise soojusvoo teekonna välisraadius [m];
- t_{days} – päeva nr aastas [-];
- t_0 – välisõhu perioodilise temperatuuri periood [s];
- T_0 – keskmine välisõhu temperatuur [°C];
- $T_{0,3mo}$ – viimase kolme kuu keskmine välistemperatuur [°C];
- T_1 – välisõhu perioodilise temperatuuri amplituud [°C];
- T_g – keskmine pinnase temperatuur sügavusel 1m [°C];
- $T_{g,ef}$ – pinnase efektiivne temperatuur [°C];
- $T_{g,surface}$ – maapinna temperatuur [°C];
- T_i – keskmine siseõhu temperatuur [°C];

U – pōranda soojuslābivus [$W/(m^2 \cdot K)$];

U_{ef} – pōranda efektiivne soojuslābivus [$W/(m^2 \cdot K)$].

1. SISSEJUHATUS

Väga suur osa maailmas tarbitavast energiast kulub hoonete kasutamiseks ning ülalpidamiseks. Ühe hoone mahus kaob märkimisväärne soojusenergia hulk just läbi põranda, mistõttu on energiatõhusate lahenduste väljatöötamiseks oluline nende soojuskadude täpne hindamine. Läbi pinnasele toetatud põranda toimuva soojuslevi arvutamine on seejuures väga keeruline, sest tuleb arvestada soojuslevi mitmesuunalisusega, pinnase soojusliku inertsiga ja muude sarnaste teguritega, mis muudavad selle käitsi arvutamise väga mahukaks. Selle leevendamiseks on valdavalt 1980-ndatel ja 90-ndatel välja töötatud erinevaid lihtsustusi tegevaid arvutusmeetodeid. Need meetodid töötati välja aga ajal, kui pinnasele toetatud põrandaid kas ei soojustatud üldse või teostati seda vaid vähesel määral, ehk vajab uurimist ja kinnitust nende siiani kasutusel olevate meetodite toimivus ka tänaste tingimuste ja nõuete juures.

Käesolevas lõputöös on välja otsitud 9 sellist lihtsustatud meetodit pinnasele toetatud põranda soojuslähivuse arvutamiseks ning võrreldakse nende tulemusi täpsemate simulatsioonitarkvarade tulemustega. Tarkvaradest on antud töös kasutatud: Therm (2D, staatiline), Delphin (2D, dünaamiline), Heat3 (3D, staatiline) ning Voltra (3D, dünaamiline). Töö fookuses on tõenäoliselt enim kasutatust leidev EN ISO 13370 standardis esitatud valemid pinnasele toetatud põranda soojuslähivuse arvutamiseks. Tervikliku hinnangu andmiseks ISO arvutusmetoodika kohta uuriti ka standardi lisas D esitatud valemeid põranda servasoojustuse mõju hindamiseks.

Käesoleva magistritöö eesmärgid on:

- Uurida 9 erineva põrand pinnasel soojuskao arvutusmeetodi täpsust võrrelduna nelja simulatsioonitarkvara vastu;
- Uurida ISO 13370 servasoojustuse valemite täpsust erinevate põhisoojustuse paksuste ja hoone suuruste korral võrrelduna staatilise Therm tarkvara vastu.
- Teha kindlaks, kas tasub uurida ka pinnaseniiskuse mõju pinnasele toetatud põranda soojuslähivuse arvutuses.
- Uurida, kuidas pinnasega kontaktis oleva põranda dünaamilise soojuslevi mõju arvesse võtta lihtsa arvutuse puhul. Kas on võimalik luua valem või eeskiri, et arvestada dünaamilist mõju staatilises arvutuses?

Võtmesõnad: põrand pinnasel, soojuskadu, soojusläbivus, põranda servaala soojustus, magistritöö

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

2.1 Põranda soojuskaod

Aastal 2022 kulus 25,8 % Euroopa Liidus tarbitud energiast eluruumide ülalpidamiseks (Euroopa Komisjoni Statistikaamet, 2024). Veel laiemalt 43 %, ehk peaaegu pool kogu tarbitud energiast kulus hoonete ülalpidamiseks üldiselt, olenemata nende funktsioonist (Enerdata, 2021). Selle üüratu energia hulga juures on läbi hoone põranda liikuva soojuskaod osakaal ülejäänud tarinditesse keskmiselt vahemikus 7-14 % (KredEx, 2017) ehk kuni 6 % kogu Euroopa Liidus tarbitavast energiast. Nii suure energiakulu juures on väga oluline põrandate energiasäästlikkus ning selle saavutamiseks ka soojuskadude täpne hindamine. Võrreldes õhuga kontaktis oleva piirdetarindi soojuslähivuse arvutusega tuleb pinnasega kontaktis oleva piirdetarindi soojuslähivuse arvutuse korral arvestada rohkemate ja keerukamate faktoritega: soojuslevi mitmesuunalisus, pinnase temperatuur ei võrdu välisõhu temperatuuriga, pinnasel on suur soojusmahtuvus ning suur soojuseri juhtivus. See kõik teeb pinnasele toetatud põrandate soojuslähivuse arvutuse väga keeruliseks. Ühemõõtmeline soojuslevi läbi pinnasega kontaktis oleva piirdetarindi sõltub põranda tarindusest (soojustusmaterjal, selle paksus), pinnase soojuseri juhtivusest aga ka hoone geomeetriast (plaanilahenduse kompaktsus). Soojuslevi läbi põranda ääreala sõltub liitekohtade 2D joonsoojuslähivusest, liitekohtade 3D punktsoojuslähivusest ning ka soojustuse katkestuste punktsoojuslähivusest. Samuti tuleb arvestada soojuse akumulatsiooniga pinnasesse, mis sõltub pinnase soojusmahtuvusest ning ka õhuleketest tuleneva soojuskaoga.

Kõike eelnevat suudavad arvesse võtta simulatsioonitarkvarad, mis võtavad aga arvutusteks suure täpsuse juures väga kaua aega. Seda seetõttu, et peavad teostama väga suure hulga arvutusi ning seda pikkade ja muutlike perioodide kohta. Seetõttu on ka varem uuritud pinnasega kontaktis oleva tarindi soojuslevi ning on välja pakutud erinevaid lihtsustatud arvutusmeetodeid nii soojuslevi hindamiseks, pinnase külmumise hindamiseks, pinnase niiskuse mõju hindamiseks kui ka soojuslevi dünaamika mõju hindamiseks. Kõike seda selleks, et luua inseneridele kiiremad ja lihtsamad võimalused soojuskadude hindamiseks ja arvutamiseks tarindite projekteerimisel.

Valdavalt on selliseid uuringuid tehtud aastatel 1980-2000. Ajal kui pinnasega kontaktis olevate tarindite soojustatus oli tänasega või tulevikuga võrreldes oluliselt väiksem. Varasemalt on hoonete piirdetarindite energiatõhususe nõuded olnud madalamad kui praegu. 2001. aasta Eesti Ehitusteabe juhendteatmikus (Eesti Ehitusteave, 2001) oli soovituslik põrandasoojustuse paksus 50 mm ning välisperimeetris 100 mm. Aastal 2007 täiendatud teatmikus on soovituslikud paksused vastavalt 70 mm ja 140 mm.

Tänapäeva liginullenergiahoonetel ja tuleviku nullemissioonihoonetel on soojustuse paksus lähenemas aga poolele meetrile. Seda, kas 20-30 aastat tagasi välja töötatud lihtsustatud arvutusmeetodid ka uute olukordade puhul kehtivad, ongi käesolevas töös uuritud.

Aastal 1999 koostatud uuring sellele eelnenud aastakümnetel välja töötatud lihtsustatud ning numbriliste meetodite kohta pinnasele toetatud põranda soojuskadude hindamiseks ilmestab hästi käesoleva teema täiendava uurimise vajalikkust (Rees et al., 1999). Uuringus tõdeti, et suur osa lihtsustatud meetodeid on välja töötatud just soojustamata põrandate kohta, ehk puudub laialdane võimalus arvutustes soojustusega arvestamiseks. Selliseid meetodeid, mis seda võimaldasid tõsteti vaid paar üksikut, millest üks on ka käesoleva töö fookuses olev EN ISO 13370 arvutusmeetod. Samuti tõdeti, et tehtavad suured lihtsustused põranda geomeetria, pinnase ning kliima tingimuste kohalt põhjustab suuri erinevusi võrreldes numbriliste meetoditega, mis võimaldavad nimetatud parameetritega põhjalikumalt arvestada, ehk valdavalt kasutatavate lihtsustatud meetoditega hinnati soojuskadusid suurel määral valesti. Aga ka täpsemad numbrilised meetodid ei olnud oma vigadeta. Nende puhul toodi välja vajadus põhjalikuks ning aeganõudvaks tarkvaraõppeks ning ka vajadus eraldi arvuti järele, kus pikalt kestvaid arvutusi läbi viia, ehk puudus tavakasutuses olevate arvutite jõudlus selliste suuremahuliste arvutuste kiireks teostamiseks.

2.2 Põranda soojuslähivuse arvutusmeetodid

2.2.1 EVS-EN ISO 13370

Enim täna kasutatust leidev arvutusmeetod on kindlasti standardi EVS-EN ISO 13370 (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017c) lihtsustatud meetod põranda soojuslähivuse arvutamiseks. Standardi väljundiks on pinnasel asuva põranda ja keldri soojustakistus ja soojuslähivus, koos soojuskadudega, mis lubavad arvutada kuu baasil soojusvoolu. Läbi põranda kulgevat soojuslevi pinnasesse iseloomustab põranda konstruktsioonist sõltuv soojusvool, liitekohas asuvast külmasillast sõltuv soojusvool läbi põranda ääreala ning pinnase soojuslikust inertsist sõltuv aastane perioodiline soojusvool läbi põranda ääreala. Standardi kohaselt on püsiva soojuslevi ehk aasta keskmise soojuslevi hindamiseks kolme erinevat meetodit:

1. Täismahus kolmesuunaline soojuslevi arvutus (ISO 10211);
2. Kahesuunaline soojuslevi arvutus, mille puhul võetakse aluseks lõputu pikkusega põrand, mille laiuks on põranda tunnusmõõt (valem 2.1);

3. Antud standardis esitatud valemite alusel.

Käesolevas lõputöös kasutati kolmandat meetodit, ehk standardis ISO 13370 esitatud lihtsustatud valemid põranda soojusläbivuse leidmiseks. Antud standardi kohaselt sõltub põranda soojusläbivus põranda tunnusmõõdust B' ning põranda ekvivalentsest kogupaksusest d_f . Põranda tunnusmõõt arvestab põrandas tekkiva soojusvoolu kolmemõõtmelisusega ning on määratletud kui põranda pindala ja poole perimeetri jagatis (vt valem 2.1).

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

kus B' – põranda tunnusmõõt, m,

A – põranda pindala, m²,

P – põranda perimeeter, m

Põranda ekvivalentne kogupaksus oleneb põranda soojustakistusest ning pinnase soojuserijuhtivusest ning arvutatakse valemiga 2.2.

$$d_f = d_w + \lambda_g * (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (2.2)$$

kus d_f – põranda ekvivalentne kogupaksus, m,

d_w – välisseina või vundamendiseina kogupaksus, m,

λ_g – pinnase soojuserijuhtivus, W/(m*K),

R_f – põrandakonstruktsiooni soojustakistus, (m²*K)/W,

R_{si} – sisepinna soojustakistus, (m²*K)/W,

R_{se} – välispinna soojustakistus, (m²*K)/W,

Põranda ekvivalentse kogupaksuse ning tunnusmõõdu järgi hinnatakse seejärel põranda soojustatust ning arvutatakse põranda soojusläbivus valemiga 2.3 või 2.4.

Kui $d_f < B'$ (soojustamata ja mõõdukalt soojustatud põrandad),

$$U = \frac{2 * \lambda_g}{\pi * B' + d_f} * \ln \left(\frac{\pi * B'}{d_f} + 1 \right) \quad (2.3)$$

Kui $d_f > B'$ (hästi soojustatud põrandad),

$$U = \frac{\lambda_g}{0,457 \cdot B' + d_f} \quad (2.4)$$

kus U – põranda soojusläbivus, W/(m²*K),

λ_g – pinnase soojuserijuhtivus, W/(m*K),

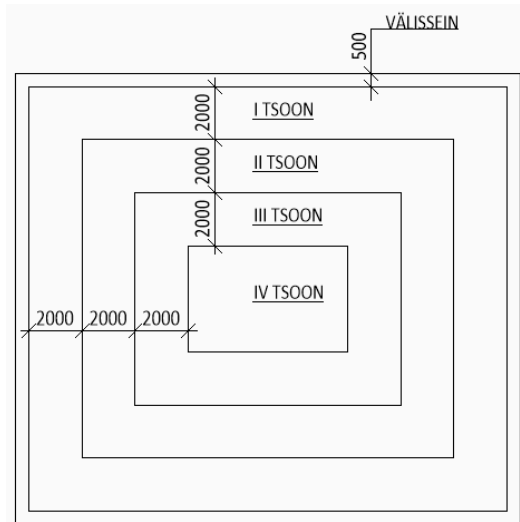
B' – põranda tunnusmõõt, m,

d_f – põranda ekvivalentne kogupaksus, m.

Standardi ISO 13370 lihtsustatud valemid tulenevad B. R. Anderson'i 1991. aasta uuringust (Anderson, 1991). Anderson võttis üle Hagentoft'i (Hagentoft, 1988) tehtud lihtsustused kolmemõõtmelise arvutuse pealt kahemõõtmeliseks ning formuleeris läbi selle eelpool esitatud valemid põranda soojusläbivuse arvutamiseks. Uuringu kohaselt on selline lähenemine rakendatav igasuguse põranda geomeetria ning soojustuse paksuse korral, sest annab eraldi valemid nii soojustamata kui ka hästi soojustatud põrandate kohta. Selle uurimiseks arvutati käesolevas töös põrandate soojusläbivused kuni 800 mm soojustuse juures ning võrreldi neid soojuslevi simuleerivate arvutusprogrammide tulemustega. Kõik standardi valemid sisestati tabelarvutusprogrammi MS Excel, et arvutusi erinevate hoonete ning soojustuse paksuste kohta automatiseerida.

2.2.2 SNIP

Teise arvutusmeetodina on uuritud Vene riikliku standardi SNIP (<http://www.snip.com/>, 2003) meetodit põranda soojusläbivuse arvutamiseks, mis on välja töötatud 1985. aastal. Antud meetodi kohaselt määratakse pinnasel asuva soojustamata põranda soojustakistus R_c 2-meetri laiuste tsoonide kaupa, mis võetakse paralleelselt välisseintega. Põrand jaotatakse kuni neljaks tsooniks, millest esimene asub välisseina ääres, teine sellest 2 m seespool jne ning neljandasse tsooni kuulub lõpuks kogu ülejäänud põrand (vt Joonis 2.1). Tsoonide soojustakistused on esitatud Tabel 2.1.



Joonis 2.1 Põranda jaotamine erinevate soojustakistustega aladeks SNIP arvutusmetoodika kohaselt. Mõõdud millimeetrites.

Tabel 2.1 Soojustamata põranda soojustakistused SNIP arvutusmetoodikas kasutamiseks.

Tsoon	R_c [$m^2 \cdot K/W$]
I	2.1
II	4.3
III	8.6
IV	14.2

Soojustatud põranda korral arvutatakse põranda soojustakistus valemiga 2.5.

$$R_f = R_c + d_{ins}/\lambda_{ins} \quad (2.5)$$

kus R_f – põranda soojustakistus, ($m^2 \cdot K$)/W,

R_c – soojustamata põranda soojustakistus, ($m^2 \cdot K$)/W,

d_{ins} – soojustuse paksus, m,

λ_{ins} – soojustuse soojuseriiktivus, W/($m \cdot K$).

Ning seejärel saab arvutada põranda iga tsooni soojuslähivuse valemiga 2.6.

$$U = \frac{1}{R_f} \quad (2.6)$$

kus U – põranda soojuslähivus, W/($m^2 \cdot K$),

R_f – pörandakonstruktsiooni soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$.

Meetod kasutab pöranda jaotamist eri tsoonidesse, sest soojuslevi läbi pöranda on suurem läbi pöranda äärealade ning väiksem pöranda keskosas.

2.2.3 Taani standard DS 418

DS 418 (Dans Standard, 2011) on osa Taani ehituseeskirjadest, mis on välja töötatud 1986. aastal ja ületab seal Euroopa ja rahvusvahelisi standardeid kui selliseid, välja arvatud juhtudel, kus on viidatud nendele standarditele. Taani standardi arvutusreeglite eesmärk on ühtlustada ning viia omavahel kooskõlla hoonete soojuskadude määramine Taani kliimatiliste tingimustega. Samuti ka täpsemaks hinnangu andmiseks, et paremini täita hoonetele määratud energiatõhususe nõudeid. Selleks annavad standardi eeskirjad juhised hoone tarindite soojuslähivuste arvutamiseks. Standardi puhul on tegemist lihtsustatud staatilise arvutusega. Käesolevas töös kasutati tulemuste võrreldavuse saavutamiseks ka Taani standardiga arvutades Eesti kliima andmeid, nii nagu kirjeldatud kliimaandmete peatükis 3.1.2.

Taani standard kasutab soojuslähivuse arvutuses paranditest tulenevat täienevat soojuslähivust. Parandi väärtus sõltub soojustuse paigaldamise korrektsusest, soojustust lähivatest kinnitussidemetest ning sellest, kas konstruktsiooni puhul on tegemist pööratud katusega. Pöranda soojuslähivus arvutatakse valemiga 2.7.

$$U = U' + \Delta U \quad (2.7)$$

kus U – pöranda soojuslähivus, $W/(m^2 \cdot K)$,

U' – pöranda soojuslähivuse põhiosa, $W/(m^2 \cdot K)$,

ΔU – soojuslähivuse parand, $W/(m^2 \cdot K)$.

Soojuslähivuse põhiosa ehk pörandakonstruktsiooni soojuslähivus U' arvutatakse valemiga 2.8.

$$\frac{1}{U'} = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i \quad (2.8)$$

kus U' – pöranda soojuslähivuse põhiosa, $W/(m^2 \cdot K)$,

R_{si} – sisepinna soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$,

R_i – pörandakonstruktsiooni kihi soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$.

Põranda soojusläbivuse parand koosneb kolmest komponendist ning arvutatakse valemiga 2.9.

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (2.9)$$

kus ΔU_g – parand õhuvahedest soojustuse kihis, $W/(m^2 \cdot K)$,

ΔU_f – parand soojustust läbivatest kinnitites/ankrutest, $W/(m^2 \cdot K)$,

ΔU_r – parand pööratud katusest, $W/(m^2 \cdot K)$.

Õhuvahedest tulenev parand arvutatakse valemiga 2.10 ning antud valemi liikme $\Delta U''$ väärtused on esitatud Tabel 2.2. Liikme väärtus oleneb soojustuse paigaldamise kvaliteedist.

$$\Delta U_g = \Delta U'' \left(\frac{R_{ins}}{R_f} \right) \quad (2.10)$$

kus $\Delta U''$ – soojustuse paigaldamise korrektsust arvestav parand, $W/(m^2 \cdot K)$,

R_{ins} – soojustuse soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$,

R_f – põrandakonstruktsiooni soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$.

Tabel 2.2 Soojustuse paigaldamise korrektsusest tulenev parand.

Tase	$\Delta U''$ [W/m ² *K]	Kirjeldus
0	0	Õhuvahed soojustuse kihis puuduvad
1	0.01	Võimalikud õhuvahed soojustuse kihis. Puudub õhutsirkulatsioon soojustuse soojemal küljel
2	0.04	Võimalikud õhuvahed soojustuse kihis. Võimalik õhutsirkulatsioon soojustuse soojemal küljel

Pinnasele toetatud põranda puhul soojustust läbivaid kinniteid ei kasutata ning tegu ei ole pööratud katusega, mistõttu paranditest ΔU_f ja ΔU_r võib loobuda. Käesolevas töös kasutati arvutustes soojustuse paigaldamise taset 0, ehk ka parand ΔU_g on võrdne nulliga.

2.2.4 A. J. Wright'i meetod

1980-ndatel aastatel, kui isiklike arvuteid oli liikvel oluliselt vähem kui tänapäeval ning mille arvutusvõimsus oli oluliselt kehvem, siis oli vajadus lihtsustatud arvutusmeetodite järele oluliselt suurem kui täna. Sellest tulenevalt pakkus aastal 1988 A. J. Wright välja

lihtsustatud arvutusmeetodi pinnasele toetatud põranda soojuslähivuse arvutamiseks (Andrew Wright, 1988). Sarnaselt täna kehtivale standardimeetodile ISO 13370 arvestab ka see meetod põranda geomeetriaga, kasutades arvutustes põranda tunnusmõõtu, mis arvutatakse aga erinevalt standardimeetodile valemiga 2.11.

$$B' = e^{(b/2a)} \quad (2.11)$$

kus B' – põranda tunnusmõõt,

b – pool põranda laiust, m,

a – pool põranda pikkust, m.

Põranda tunnusmõõt taandab kolmemõõtmelise arvutuse kahemõõtmeliseks, lõpmata pikaks ning tunnusmõõdu laiuseks põrandaks. Põranda soojuslähivuse arvutamiseks tuletas Wright valemi 2.12.

$$U = \frac{kB'}{\pi b} \ln \frac{2b+c}{c} \quad (2.12)$$

kus U – põranda soojuslähivus, W/(m²*K),

k – põranda ja pinnase keskmine soojuserijuhtivus, W/(m*K),

B' – põranda tunnusmõõt, m,

b – pool põranda laiust, m,

c – pool seina paksust, m.

2.2.5 C. E. Hagentoft'i meetod

Hagentoft'i meetodi (Hagentoft, 1988) kohaselt jaguneb soojusvoolstaatiliselt komponendiks Q_s ning perioodiliseks komponendiks $Q_p(t)$. Selline jaotus arvestab aastaajast tulenevat soojusvoolu muutust. Kogu soojusvool läbi põranda on seega antud komponentide summa ning arvutatakse valemiga 2.14.

$$Q = Q_s + Q_p(t) \quad (2.14)$$

kus Q – soojusvool, W,

Q_s – soojusvoolu staatiline komponent, W,

$Q_p(t)$ – soojusvoolu perioodiline komponent, W.

Soojusvoolu staatilise komponendi arvutamiseks tuletas Hagentoft valemi 2.15, milles kasutab hoone geometriast tulenevat tegurit $h_s(L/B, d/B)$. Tegur võimaldab sarnaselt teistes meetodites kasutatud põranda tunnusmõõdu jms teguritega arvestada põranda nurkades tekkiva täiendava soojuskaoga kahemõõtmelise staatilise arvutuse korral.

$$Q_s = \lambda_g(T_i - T_0)L * h_s(L/B, d/B) \quad (2.15)$$

kus λ_g – pinnase soojuserijuhtivus, W/(m*K),

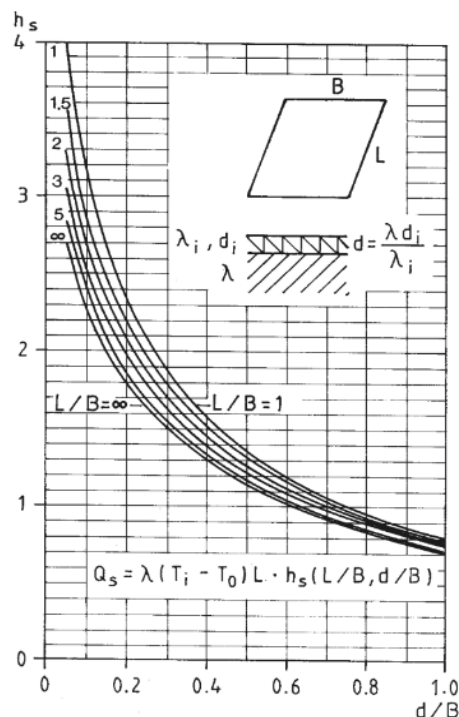
T_i – keskmine siseõhu temperatuur, °C,

T_0 – keskmine välisõhu temperatuur, °C,

L – hoone kogupikkus, m,

$h_s(L/B, d/B)$ – soojuskaotus faktor, -.

Soojuskaotus faktor oleneb nii hoone pikkuse ja laiuse suhtest kui ka põranda ekvivalentse kogupaksuse d_i ja hoone laiuse suhtest. Vastavalt suhete väärtustele saadakse soojuskaotus faktori väärtus Joonis 2.2.



Joonis 2.2 Soojuskaotus faktori määramine Hagentofti meetodi kohaselt. (Hagentoft, 1988).

Soojuskaotus perioodiline komponent arvutatakse valemiga 2.16. Antud magistritöös arvutati soojuskaotus perioodiline komponent iga kuu kohta aastas, vastavalt iga kuu

kliimaandmete piirkonnas Tallinn-Harku (1991-2020). Lõplikuks perioodiliseks komponendiks võeti seejärel kõigi kuude aritmeetiline keskmine.

$$Q_p(t) = -\lambda_g T_1 * (2 * L + 2 * 2b) * |h_p^0| * \sin(2\pi((t_{days} - 113.5)/365 - \phi_p^0)) \quad (2.16)$$

kus λ_g – pinnase soojuserijuhtivus, W/(m*K),

T_1 – välisõhu temperatuuri amplituud arvutusperioodil, °C,

L – hoone kogupikkus, m,

$2b$ – hoone kogulaius, m,

$|h_p^0|$ – põrandaplaadi perioodiline soojuskaotusfaktor, -,

t_{days} – päeva nr aastas, (1-365),

ϕ_p^0 – soojuskadude faasiviivitus, -.

Tegurid $|h_p^0|$ ja ϕ_p^0 on funktsioonid (vt Joonis 2.3), mille väärtused sõltuvad põranda ekvivalentse kogupaksuse ja välisõhu perioodilise temperatuuri läbitungimissügavuse suhtest d_f/d_p , mille liikmed arvutatakse valemitega 2.17 ja 2.18.

$$d_f = d_{ins} \lambda_g / \lambda_{ins} \quad (2.17)$$

kus d_f – põranda ekvivalentne kogupaksus, m,

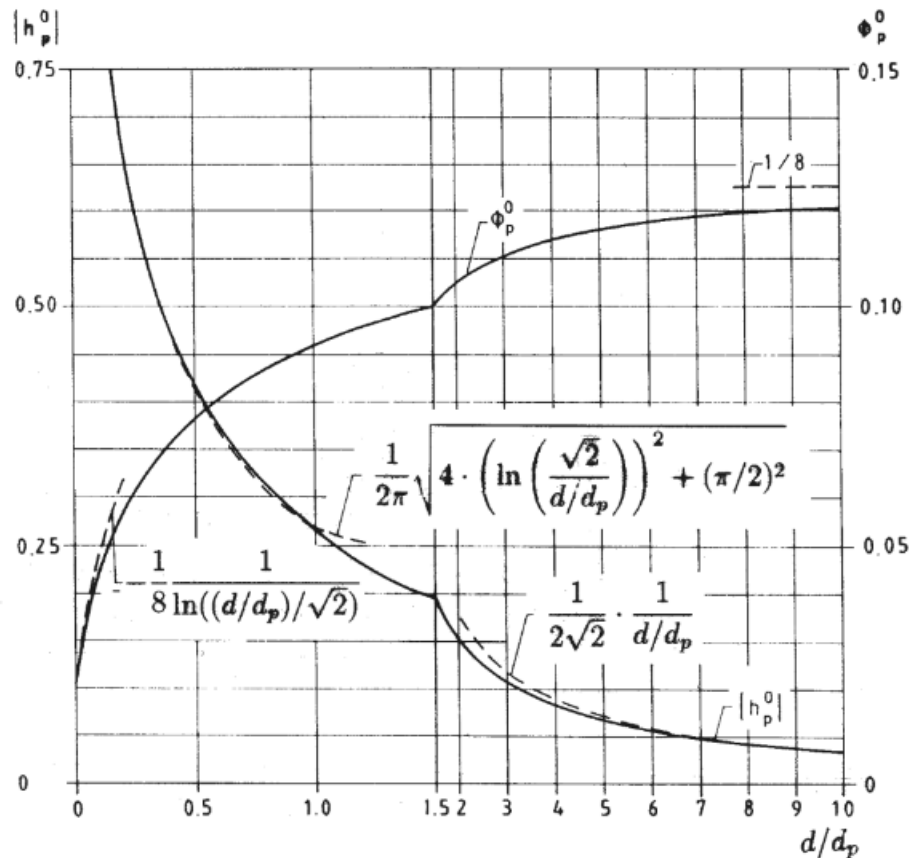
λ_g – pinnase soojuserijuhtivus, W/(m*K),

λ_{ins} – soojustuse soojuserijuhtivus, W/(m*K).

$$d_p = \sqrt{a_{dif} t_0 / \pi} \quad (2.18)$$

kus a_{dif} – pinnase difusioonitegur, m²/s,

t_0 – välisõhu perioodilise temperatuuri kestus, s.



Joonis 2.3 Põranda soojuskao faktori ning soojuskadude faasiviivituse määramine. (Hagetoft, 1988).

2.2.6 K. Kissock'i meetod

Antud arvutusmeetod (Kissock et al., 2013), mis välja töötatud aastal 1992 paneb rõhku pinnase soojusmahtuvusele ning arvestab sellest tingitud soojuskao viivisega sise- ja välistemperatuuride vahe suhtes. Selleks kasutab meetod pinnase efektiivset temperatuuri ning soojusvool läbi põranda arvutatakse valemiga 2.19.

$$Q = U_{ef} * A * (T_i - T_{g,ef}) \quad (2.19)$$

kus Q – soojusvool, W,

U_{ef} – põranda efektiivne soojusläbivus, W/(m²*K),

A – põranda pindala, m²,

T_i – keskmine siseõhu temperatuur, °C,

$T_{g,ef}$ – pinnase efektiivne temperatuur, °C,

Pinnase efektiivse temperatuuri arvutamiseks formuleeriti valem 2.20, mis võtab arvesse pinnase soojusmahtuvust, kasutades arvutuses lisaks aasta keskmisele temperatuurile ka viimase kolme kuu keskmist temperatuuri.

$$T_{g,ef} = \frac{1.7 \cdot T_0 + T_{0,3mo}}{2.7} \quad (2.20)$$

kus T_0 – aasta keskmine välisõhu temperatuur, °C,

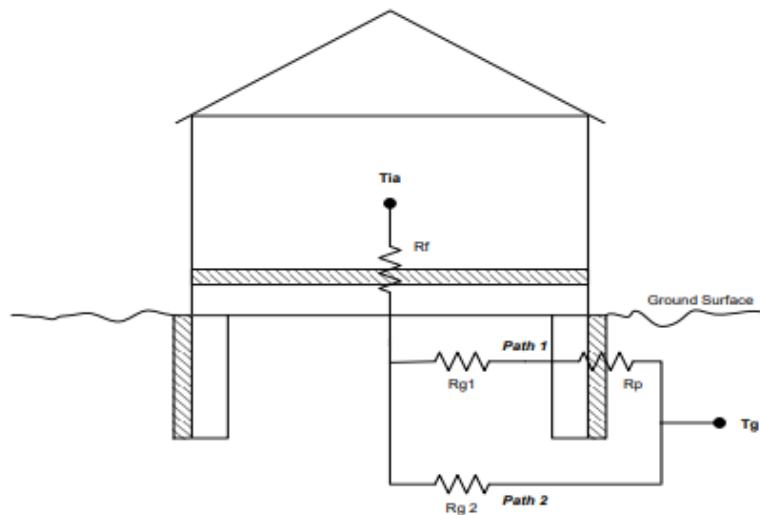
$T_{0,3mo}$ – viimase kolme kuu keskmine välisõhu temperatuur, °C,

Kissock'i meetodi kohaselt koosneb põranda soojusläbivus kahest osast, ehk kahest soojusvoolu teekonnast, mida mööda energia liigub (vt Joonis 2.4) ning arvutatakse valemiga 2.21. Tegu on empiirilise valemiga, mis tuletati 48 erineva põranda ja perimeetri soojustusega hoone simulatsiooniarvutuse tulemustest.

$$U_{ef} = \frac{0.1140}{0.7044 + R_f + R_p} + \frac{0.8768}{2.818 + R_f} \quad (2.21)$$

kus R_f – põrandakonstruktsiooni soojustakistus, (m²*K)/W,

R_p – põranda perimeetrisoojustuse soojustakistus, (m²*K)/W,



Joonis 2.4 Läbi põranda kulgeva soojusvoo teekonnad. (Kissock et al., 2013).

Meetod annab ka parandusteguri C põranda geometriast tuleneva soojusvoolu mitmesuunalisusega arvestamiseks. Parandustegur arvutatakse valemiga 2.22.

$$C = (L + B)/L \quad (2.22)$$

kus C – parandustegur, -,

L – hoone pikkus, m,

B – hoone laius, m,

Pinnasele toetatud põranda soojuskao lihtsustatud valem pinnaühiku kohta on seega arvutatav valemiga 2.23.

$$\frac{Q}{A} = U_{ef} * C * (T_i - T_{g,ef}) \quad (2.23)$$

kus Q – soojusvool, W,

A – põranda pindala, m²,

U_{ef} – põranda efektiivne soojuslähivus, W/(m²*K),

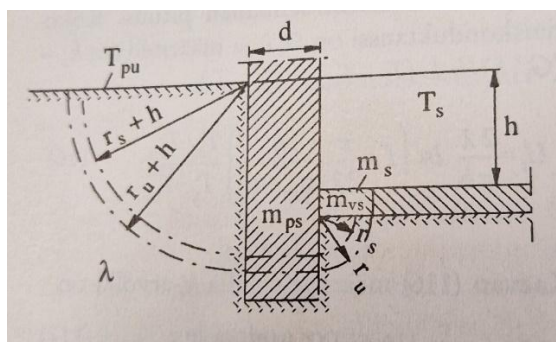
C – parandustegur, -,

T_i – keskmine siseõhu temperatuur, °C,

$T_{g,ef}$ – pinnase efektiivne temperatuur, °C,

2.2.7 O. Seppänen'i meetod

Olli Seppänen'i arvutusjuhendi (Seppänen, 2001) kohaselt toimub põranda servaalalt suurem soojuskadu, võrreldes põranda keskosaga. Seetõttu kasutab Seppänen põranda soojuslähivuse arvutuses põranda jagamist ääre- ja sisealaks ning on tuletanud valemid vastavate alade soojuslähivuse arvutamiseks. Soojusvool läbi põranda toimub mööda silindrilist teekonda. Erineva raadiusega teekonnad jagavadki põranda ääre- ja sisealaks (vt Joonis 2.5).



Joonis 2.5 Seppänen'i arvutusmetoodika arvutuskeem. (Seppänen, 2001).

Kui $h + r < 2m$, ehk pöranda servaalal arvutatakse pöranda soojuslähivus järgmiselt:

$$U = \frac{\lambda_g}{(r_u - r_s)\pi} * \ln \frac{r_u + \frac{h}{2} + \frac{\lambda_g}{\pi}(R_{si} + R_f + R_{fnd})}{r_s + \frac{h}{2} + \frac{\lambda_g}{\pi}(R_{si} + R_f + R_{fnd})} * \frac{T_i - T_{g,surface}}{T_i - T_0} \quad (2.24)$$

Kus λ_g pinnase soojuseri juhtivus, W/(m*K),

r_u silindrilise soojusvoo teekonna välisraadius, m,

r_s silindrilise soojusvoo teekonna siseraadius, m,

h pöranda kõrgus maapinna suhtes, m,

R_{si} sisepinna soojustakistus, m²*K/W,

R_f pörandakonstruktsiooni soojustakistus, m²*K/W,

R_{fnd} vundamendiseina soojustakistus, m²*K/W,

T_i siseõhu temperatuur, °C,

$T_{g,surface}$ maapinna temperatuur, °C,

T_0 välisõhu keskmine temperatuur, °C.

Kui $h + r > 2m$, ehk pöranda keskosas arvutatakse pöranda soojuslähivus valemiga:

$$U = \frac{\lambda_g}{(r_u - r_s)\pi} * \ln \frac{r_u + \frac{h}{2} + \frac{\lambda_g}{\pi}(R_{si} + R_f + R_{fnd})}{r_s + \frac{h}{2} + \frac{\lambda_g}{\pi}(R_{si} + R_f + R_{fnd})} * \frac{T_i - T_g}{T_i - T_0} \quad (2.25)$$

Kus T_g pinnase temperatuur ($T_g = T_0 + 2$), °C.

2.2.8 D. C. Spooner'i meetod

D. C. Spooner võrdles oma uuringus (Spooners, 1982) pöranda soojuskadude mõõtmistulemusi CIBSE (*Chartered Institution of Building Services Engineers*) välja töötatud lihtsustatud arvutusjuhistega. Oma töös märkas ta, et CIBSE juhised oluliselt ülehindavad pöranda soojuskadusid, sest arvestab arvutustes välisõhu temperatuuriga, mitte pöranda all asuva pinnase temperatuuriga, mis talveperioodil on hoone all oluliselt kõrgem kui välisõhu temperatuur. Sellepeale pakkuski Spooner omapoolse CIBSE arvutusjuhendi täpsustuse, kus asendas arvutustes välisõhu temperatuuri keskmise pinnase temperatuuriga 1 m sügavusel. Soojusvool läbi pöranda arvutatakse meetodi kohaselt valemiga 2.26.

$$Q = U * A * (T_i - T_g) \quad (2.26)$$

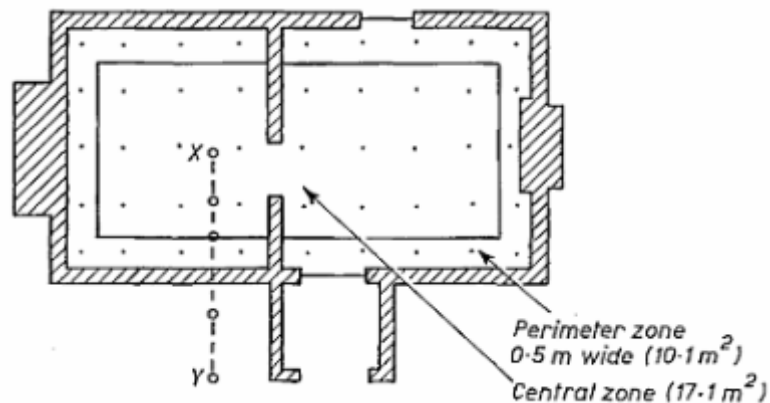
kus U põrandakonstruktsiooni soojuslähivus (valem 2.6), $(m^2 \cdot K)/W$,

A põranda pindala, m^2 ,

T_i aasta keskmine siseõhu temperatuur, $^{\circ}C$,

T_g aasta keskmine pinnase temperatuur sügavusel 1 m, $^{\circ}C$.

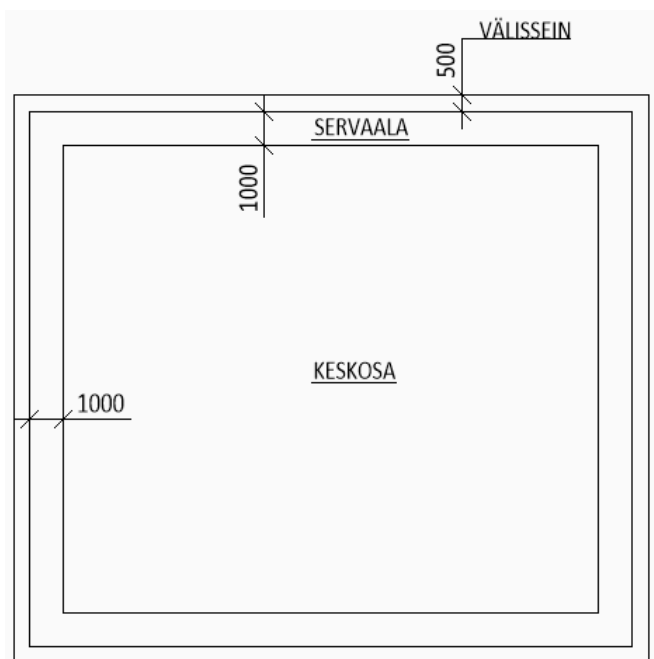
Meetodi kohaselt jagatakse põrand servaalaks, laiusega 0,5 m ning keskosaks, mille moodustab ülejäänud põrand (vt Joonis 2.6) ning soojusvool põranda osale arvutatakse vastavalt serva ning keskosa all 1 m sügavusel oleva pinnase temperatuuriga. Need sojusvoolud liidetakse seejärel kokku ning jagatakse põranda pindala ning sise- ja välisõhu temperatuuride erinevusega, saades seeläbi põranda soojuslähivus U .



Joonis 2.6 Põranda aladeks jaotamine Spooneri meetodi kohaselt ning temperatuuripunktide paiknemine. (Spoonner, 1982).

2.2.9 SRMK C4

Sarnaselt Seppäneni arvutusjuhiste, kasutab ka Soome Ehituseeskirjade kogu ehk SRMK (Soome keskkonnaministeerium, 2003) põranda soojuslähivuse arvutusjuhend põranda jagamist ääre- ja sisealaks, kasutades erisusena vaid kahte ala: meetrilaiune servaala ning ülejäänud põrand moodustab keskala (vt Joonis 2.7).



Joonis 2.7 Põranda jaotamine erinevate soojustakistustega aladeks SRMK C4 arvutusmetoodika kohaselt. Mõõdud millimeetrites.

Antud meetodi lihtsus seisneb tabuleeritud soojustakistuste väärtustes. Arvutustes tuleks kasutada ette antud õhkvahe, pinnase (ääre- ja siseala) ning õhukese konstruktsioonikihi soojustakistusi. Antud väärtuste tabel on esitatud Lisas 1. Kasutades põrandakonstruktsiooni materjalide ja ette antud soojustakistusi, arvutatakse põranda kogusoojustakistus valemiga:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_m + R_g + R_b + R_{q1} + R_{q2} + \dots + R_{qn} + R_{se} \quad (2.27)$$

kus R_T Põranda kogusoojustakistus, $m^2 \cdot K/W$,

R_{si} sisepinna soojustakistus, $m^2 \cdot K/W$,

R_1, R_2, R_m põranda materjalikihtide soojustakistused, $m^2 \cdot K/W$,

R_g õhkvahe soojustakistus, $m^2 \cdot K/W$,

R_b pinnase soojustakistus, $m^2 \cdot K/W$,

R_{q1}, R_{q2}, R_{qn} õhukeste tarindikihtide soojustakistused, $m^2 \cdot K/W$,

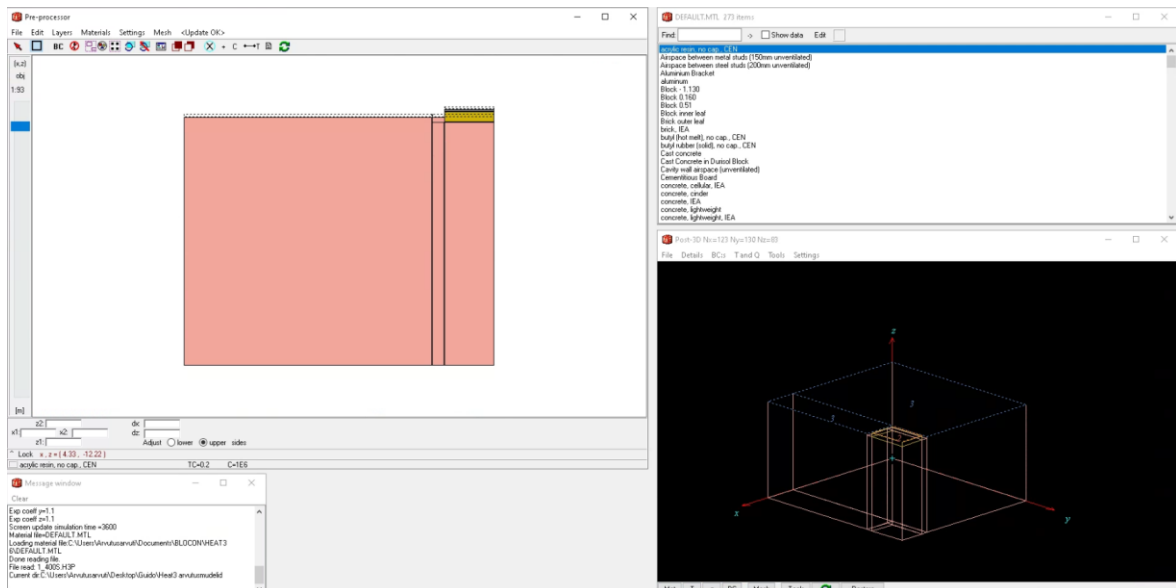
R_{se} välispinna soojustakistus, $m^2 \cdot K/W$.

Pinnase soojustakistus R_b leitakse protsentuaalselt vastavalt põranda ääre- ja siseala pindaladele. Kasutades leitud põranda kogusoojustakistust, arvutatakse põranda soojuslähivus valemiga 2.6.

2.3 Arvutustarkvarad

2.3.1 Heat3

Ühe arvutusprogrammina kasutati antud uuringus arvutustarkvara Heat3. Tegu on arvutusprogrammiga, mis võimaldab teostada kolmemõõtmelist staatilist soojuslevi arvutust. Programmi on võimalik sisestada soovitud geomeetria ja määrata sellele vastavad ääre- ja pinnatingimused, ehk sise- ja välispindadele vastavad temperatuurid ja pinnatakistused, mille kohta arvutust teostatakse. Joonis 2.8 on esitatud ühe tüüppoone arvutusmudel Heat3 programmis. Arvutuseks jaotatakse sisestatud geomeetria materjali lõplikeks elementideks ning arvutust teostatakse seejärel igale elemendile (ehk mida suurem elementide arv, seda täpsem tulemus saadakse). Arvutustihedus on suurem materjalikihtide pindade läheduses ning nurkades.



Joonis 2.8 Heat3 arvutusmudeli näide.

Programm kasutab arvutusteks valemeid, mis on esitatud Thomas Blombergi mitmesuunalist soojuslevi ja selle rakendamist arvutustarkvarades uurinud töös (Blomberg, 1996), mille kohaselt kirjeldab kolmemõõtmelist soojuslevi ajas ja ruumis soojusjuhtivuse osatuletistega diferentsiaalvõrrand 2.28:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + I(x, y, z, t) = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.28)$$

kus I – sisemise soojuse maht, W/m^3 ,

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – materjali soojuseri juhtivus eri suundades, W/mK ,

C – materjali soojusmahtuvus, J/m^3K .

Käesolevas uuringus teostatud Heat3 arvutusmudelites kasutati pinnatingimusi, mis määravad pinnale vastava keskkonna temperatuuri ning pinna soojustakistuse. Seda kirjeldab valem 2.29:

$$T_{b.s.(t)} - T|_{surf} = R * (-\lambda) \frac{\partial T}{\partial n} |_{surf} \quad (2.29)$$

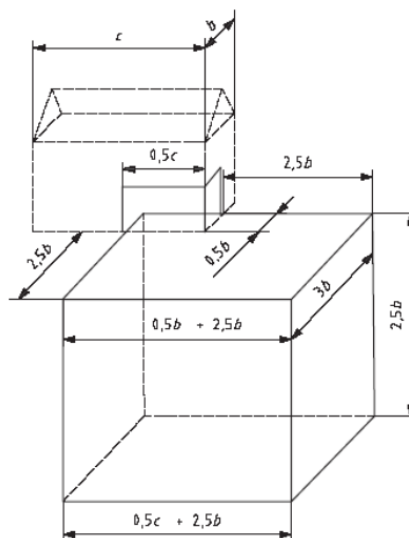
kus $T_{b.s.(t)}$ – ümbritseva keskkonna temperatuur, °C,

R – pinna soojustakistus, m^2K/W ,

λ – materjali soojuseriivitus, W/mK ,

T – temperatuur, °C.

Nii Heat3 kui ka Voltra arvutusmudelites modelleeriti programmi ¼ põranda mahust ning seda ümbritsev pinnas vastavalt standardis EVS-EN ISO 10211 (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017d) joonisel 9 esitatud juhistele (vt Joonis 2.9), kus tähised b ja c tähistavad põranda mõõte. Põranda ja pinnase pealmistele pindadele määrati vastavad ääritingimused ning ülejäänud pinnad mudelis jäeti adiabaatilisteks, ehk soojuslevi läbi nende pindade ei toimu. Kuna tegu on staatilise arvutusega, määrati sise- ja välispinnale konstantsed temperatuurid, ehk vastavalt 21°C ning 6.4°C. Sise- ja välispinnale määrati ka soojustakistused vastavalt $R_{si} = 0,17 m^2K/W$ ning $R_{se} = 0,04 m^2K/W$ lähtudes standardist EVS-EN ISO 6946 (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017b).



Joonis 2.9 Põranda geomeetria modelleerimise juhis energiaarvutuseks standardist EVS-EN ISO 10211. (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017d).

Vastavalt eeltoodud reeglitele ja meetoditele loodi arvutusmodelid iga tüüppoone kohta iga soojustuse paksuse juures.

2.3.2 Therm

Teise programmina kasutati käesolevas uuringus arvutustarkvara Therm versiooni 7.6. Therm võimaldab teostada kahemõõtmelist staatilist soojuslevi arvutust. Therm kasutab lõplike elementide meetodil põhinevat kahemõõtmelist soojusjuhtivuse ja kiirgusliku soojusülekanne analüüsi, milles on võimalik modelleerida piirdetarindite ja muude ehituselementide geomeetriaid. Meetodi kohaselt jaotatakse ristlõige/element tihedaks arvutusvõrguks, mille kohta teostab Therm soojusülekanne analüüsi, teostab veahinnangu ning täpsustab vajadusel arvutusvõrku ja tagastab lõpliku lahenduse.

Tarkvara kasutab arvutusteks standardis ISO 15099 esitatud algoritme. Arvutusi juhtivad valemid on esitatud Lawrence Berkeley Rahvusliku Laboratooriumi juhenddokumentatsioonis (Lawrence Berkeley Rahvuslik Laboratoorium, 2006). Staatilise arvutuse korral kirjeldab tasapinnalise soojuslevi tasakaalu valem 2.30:

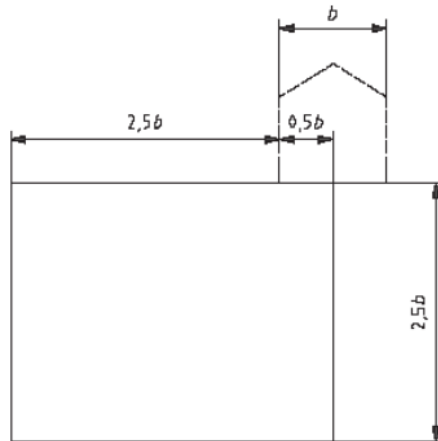
$$\left(k_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + Q(x, y) = 0 \quad (2.30)$$

kus k_{11}, k_{22} – soojuserijuhtivused vastavalt x ja y suunas, W/mK,

$Q(x, y)$ – teadaolev soojuse maht mahuühiku kohta, W/m³,

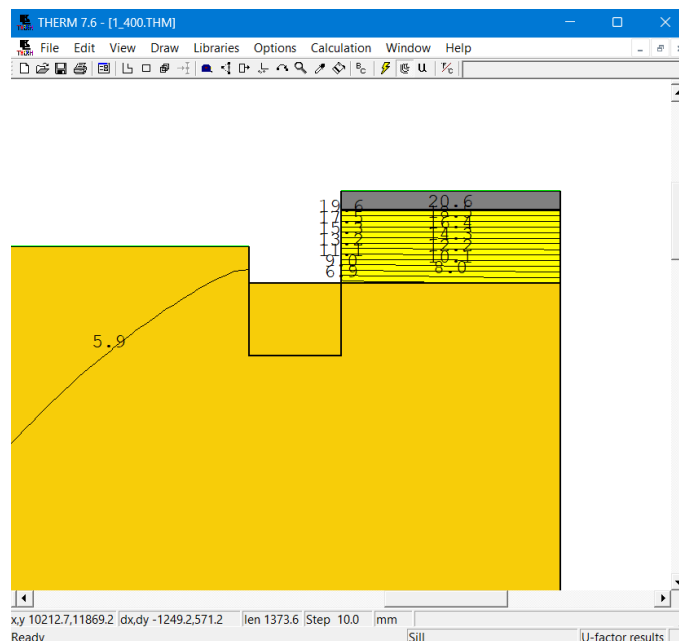
T – temperatuur, °C.

Programmi sisestati uuritavate pörandate geomeetria vastavalt standardis EVS-EN ISO 10211 joonisel 10 esitatud juhiste, mille kohaselt võib arvutusmodeli koostada poole sümmeetrilise pörandi kohta, sest soojuslevi pörandi ülejäänud pooles on vastavalt sümmeetriline sisestatud poolega (vt Joonis 2.10). Kuid poole pörandi laiuse asemel kasutati poolt pörandi tunnismõõdust (valem 2.1), seda seetõttu, et kahemõõtmeline arvutus eeldab pörandat, mis on lõpmata pikk.



Joonis 2.10 Põranda geomeetria konstrueerimine kahemõõtmeliseks arvutuseks vastavalt standardile EVS-EN ISO 10211. (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017d).

Vastavalt eeltoodud juhiste loodi arvutusmodel iga tüüphoone kohta iga soojustuse paksuse juures. Põranda ja pinnase pealmistele kihtidele määrati ääritingimused, samade väärtustega ning reeglite kohaselt nagu Heat3 arvutusmodelis ning ülejäänud pinnad jäeti adiabaatilisteks. Näide ühest käesoleva uuringu arvutusmodelitest Thermis on esitatud Joonis 2.11.



Joonis 2.11 Therm-i arvutusmodeli näide ainult põhisoojustusega.

2.3.3 Delphin

Kolmanda programmina pörandate soojusläbivuste arvutamiseks kasutati arvutustarkvara Delphin versiooni 6.1. Tarkvara on loonud Dresdeni Tehnikaülikooli teadlased Andreas Nicolai, John Grunewald ning Heiko Fechner (Nicolai et al., 2015). Tegu on kahemõõtmelise arvutusprogrammiga, mis võimaldab lisaks staatilisele arvutusele ka dünaamiliste ääritingimuste rakendamist. Programm jagab modelleeritud geomeetria lõplikeks elementideks, millele rakendatakse arvutusmudelit CHAMPS (*coupled heat, air, moisture, pollutant simulation*), ehk seotud soojuse, õhu, niiskuse, saasteaine simulatsiooni. Tarkvara kasutab simulatsiooniks osatuletistega tasakaaluvõrrandeid, mis vastavad niiskuse, soojuse ja õhu liikumisele lõplike elementide vahel sõltuvalt ajast. Käesolevas töös vaatleme niiskumassi ja soojusenergia liikumist, õhu ja saasteainete liikumist ei käsitleta. Vastavad tasakaaluvõrrandid on esitatud peatükis 2.3.3.1.

2.3.3.1 Tasakaaluvõrrandid

Niiskumassi tasakaal:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_{w+v}} = \frac{\partial}{\partial x} [j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_v}] + \sigma_{REV}^{m_{w+v}} \quad (2.31)$$

kus $\rho_{REV}^{m_{w+v}}$ – niiskuse (vedel + gaas) tihedus referentsmahuks, kg/m³,

$j_{conv}^{m_w}$ – konvektiivne vedela vee (kapillaarne) voog, kg/m²s,

$j_{conv}^{m_v}$ – konvektiivne veeauru voog, kg/m²s,

$j_{diff}^{m_v}$ – difusiivne veeauru voog, kg/m²s,

$\sigma_{REV}^{m_{w+v}}$ – niiskuslisa/niiskuskadu referentsmahuks, kg/m³s.

Eeldused:

- puudub jää;
- kehtib Kelvini võrrand poorirõhu ja suhtelise niiskuse kohta;
- vedela vee difusioon, jaotuva vee ja auru mass hüljatav;
- faaside vahel rõhutasakaal;
- tahkete materjalide deformatsioonid hüljatavad.

Konvektiivne vedela vee (kapillaarne) voog:

$$j_{conv}^{m_w} = c_l^{m_w} j_{conv}^{m_l} \quad (2.32)$$

kus $c_l^{m_w} = 1 - c_l^{m_{voc}}$ – vee massi kontsentratsioon vedelas olekus, kg/kg, (2.33)

$c_l^{m_{voc}}$ – lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon vedelas olekus, kg/kg,

$$j_{conv}^{m_l} = -K_l \left[\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l g \right] - \text{vedela oleku konvektiivne voog, kg/m}^2\text{s,} \quad (2.34)$$

K_l – veejuhtivus, s,

p_l – veerõhk, Pa,

ρ_l – vedela faasi sisemine tihedus, kg/m³

g – gravitatsioonikonstant, m/s².

Konvektiivne veeauru voog:

$$j_{conv}^{m_v} = c_g^{m_v} j_{conv}^{m_g} \quad (2.35)$$

Kus $c_g^{m_v} = \frac{p_v}{p_a + p_v} * \frac{R_a}{R_v}$ – veeauru massi kontsentratsioon gaasilises olekus, kg/kg,

p_v – veeauru rõhk gaasilises olekus, Pa,

p_a – õhurõhk gaasilises olekus (atmosfäärirõhk), Pa,

R_a – universaalne gaasikonstant, J/kgK,

R_v – veeauru gaasikonstant, J/kgK,

$j_{conv}^{m_g}$ – konvektiivne gaasivoog, kg/m²s.

Difusiivne veeauru voog:

$$j_{diff}^{m_v} = -\frac{D_{v,air}(T)}{\mu R_v T} f(\theta_g) \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2.36)$$

kus $D_{v,air}(T)$ – seisva õhu veeaurerijuhtivus, m^2/s ,

μ – auru difusioonitakistustegur, -,

$f(\theta_g)$ – funktsioon gaasi mahust, -,

$\theta_g = \theta_{por} - \theta_l$ – gaasi maht ruumalaühikus, m^3/m^3 , (2.37)

θ_{por} – materjali poorsus, m^3/m^3 ,

θ_l – vee maht ruumalaühikus, m^3/m^3 .

Siseenergia tasakaal:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = \frac{\partial}{\partial x} \left[j_{diff}^Q + u_l j_{conv}^{m_l} + u_g j_{conv}^{m_g} + h_v j_{diff}^{m_v} + h_{voc,g} j_{diff}^{m_{voc,g}} \right] + \sigma_{REV}^U \quad (2.38)$$

kus ρ_{REV}^U – siseenergia tihedus referentsmahus, J/m^3 ,

$$j_{diff}^Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - \text{soojusvoog, } W/m^2, \quad (2.39)$$

λ – materjali soojuserijuhtivus, W/mK

T – temperatuur, K ,

u_l – vedela vee erisiseenergia, J/kg ,

$j_{conv}^{m_l}$ – konvektiivne vedela vee voog, W/m^2 ,

u_g – gaasifaasi erisiseenergia, J/kg ,

$j_{conv}^{m_g}$ – konvektiivne gaasivoog, kg/m^2s ,

h_v – veeauru entalpia, J/kg ,

$j_{diff}^{m_v}$ – difusiivne veeauru voog, kg/m^2s ,

$h_{voc,g}$ – lenduvate orgaaniliste ühendite entalpia, J/kg ,

$j_{diff}^{m_{voc,g}}$ – difusiivne lenduvate orgaaniliste osakeste voog, W/m^2 ,

σ_{REV}^U – energia lisa/kadu referentsmahus, W/m^3 .

Eeldused:

- faaside vahel temperatuuri tasakaal;
- siseenergia U ja entalpia H erinevus hüljatav.

2.3.3.2 Arvutusmudelid

Tarkvaras Delphin loodi arvutusmudelid iga tüüphoone kohta iga soojustuse paksuse juures. Kuna tegu on kahemõõtmelise arvutusolukorraga, loodi põrandate geomeetria programmis samade reeglite kohaselt nagu arvutustarkvaraga Therm (ptk 2.3.2). Pinnasele määrati samad soojuslikud omadused ning lisaks tuleb dünaamilises arvutuses ka pinnase soojusmahtuvus sisse. Põranda ja pinnase pealmistele pindadele määrati vastavad ääretingimused, ehk temperatuur ning ka pinna soojustakistus, samuti vastavalt standardis EVS-EN ISO 6946 esitatud väärtustele (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017b). Sise- ja välistemperatuurina võimaldab Delphin kasutada dünaamilisi andmeid, nii nagu kirjeldatud peatükis 3.1.2.

Arvutusmudeleid loodi nelja eri tüüpi. Esimesena lihtsustatud tüüpolukord, kus temperatuuridena kasutati dünaamilisi väärtusi ning pinnase puhul täielikult kuiva pinnast [nim. „Delphin(kuiv)“], ehk kogu simulatsiooni vältel oli hoonealune pinnas kuiv ning selle soojuserijuhtivus vastas kuiva pinnase väärtusele ($\lambda_g=2,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), määratletud peatükis 3.1.1). Teise variandina simuleeriti sama olukord, kuid hoone sitemperatuurina kasutati konstantset väärtust 21°C [nim. „Delphin (const)“], et simuleerida olukorda, kus hoone küttesüsteem hoiab hoones kindlat temperatuuri. Kolmanda variandina simuleeriti olukorda, kus sise- ja välistemperatuur olid dünaamiliste väärtustega ning pinnasele määrati niiskussisaldus $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (nim. „Delphin“). Simulatsiooni arvutusseaded sisestati selliselt, et programm arvestaks pinnase niiskusest tuleneva suurenenud soojuserijuhtivusega kuni väärtuseni $3,0 \text{ w/(m}\cdot\text{K)}$, arvestati ka niiskuse ümberjaotumisega ning ka pinnase külmumisega, et võrrelda, kui palju erinevad tegeliku olukorra tulemused lihtsustatud mudelist. Neljanda variandina oli dünaamilise sise- ja välistemperatuuriga mudel, milles pinnase esmane niiskussisaldus määrati alates ühe meetri sügavuselt allapoole [nim. „Delphin(RH1m)“], nägemaks kui palju mõjutab arvutustulemusi selline päriselulise tingimuse sisestamine. Dünaamiliste arvutuste korral määrati põranda soojuslähivus aastaste ühetunnise sammuga soojusvoogude summa ja ühetunnise sammuga sise- ja välistemperatuuri vahe jagatisega, ehk saadi aasta peale keskmistatud väärtus. Pinnase soojusliku inertsi arvestamiseks teostati simulatsiooniarvutus kokku 6 aasta peale, 5 aastat arvutust ette, et temperatuurid ja niiskus jõuaksid pinnases tasakaalustuda ning saavutada päriselulise olukorra ning tulemused võeti seejärel 6. aasta andmetest.

Erandiks siinkohal tüüppoone 4 (100x200 m). Delphin määrab arvutuse algul kogu pinnasele ühesuguse etteantud temperatuuri, mis käesolevas töös oli testaasta keskmine, ehk 5,74°C. Nii massiivse põranda korral võtab temperatuuride ühtlustumine kordades kauem aega. Märja pinnasega arvutusmudel isegi enam, sest lisaks pinnasele on vaja üles soojendada ka pinnases olev vesi, mille erisoojus on pinnase omast mitu korda suurem. Väiksemate hoonete puhul piisab selle toimumiseks 5-aastest eelarvutusest, 4. hoone korral tuli arvutust teostada aga vähemalt 50 aastat.

2.3.4 Voltra

Neljanda programmina kasutati käesolevas uuringus arvutustarkvara Voltra. Voltra on 1989. aastal Belgia teadlaste Dr. Piet Standaert'i ja Dr. Piet Houthuys'i asutatud ettevõtte Physibel arendatud tarkvara (Physibel, 2020), mis võimaldab simuleerida kahe- ja kolmemõõtmelist dünaamilist soojuslevi hoonetes.

Tarkvara arvutusmeetodid põhinevad standardis EN ISO 13786 (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017a) esitatud arvutusreeglitele. Standardis on määratud ehituskomponendi dünaamilise soojuskäitumisega seotud karakteristikud ning annab meetodid nende arvutamiseks. Samuti täpsustatakse teave ehituskomponendi kasutamiseks vajalike ehitusmaterjalide kohta. Kuna omadused sõltuvad materjalide kombineerimise viisist ehitusdetailide moodustamiseks, ei kehti see standard ehitusmaterjalide ega lõpetamata ehitusdetailide suhtes. Tsoonidevahelist, ehk sise- ja väliskeskkonna vahelist soojusvoogu kirjeldab valem 2.40.

$$\Phi_n(t) = \bar{\Phi}_n + |\hat{\Phi}_n| \cos(\omega t + \varphi) = \bar{\Phi}_n + \frac{1}{2} [\hat{\Phi}_{+n} e^{j\omega t} + \hat{\Phi}_{-n} e^{-j\omega t}] \quad (2.40)$$

kus $\Phi_n(t)$ – soojusvoog, W,

$\bar{\Phi}_n$ – soojusvoo keskmine väärtus, W,

$|\hat{\Phi}_n|$ – soojusvoo varieerumise amplituud, W,

$\hat{\Phi}_{\pm n}$ – soojusvoo kompleksamplituud (valem 2.20), W,

ω – variatsioonide nurksagedus, s⁻¹,

t – aeg, s.

$$\hat{\Phi}_{\pm n} = |\hat{\Phi}_n| e^{\pm j\varphi} \quad (2.41)$$

Sarnaselt Heat3 arvutusmodelitele, koostati ka Voltra mudelid vastavalt standardis EVS-EN ISO 10211 (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017d) esitatud reeglitele (Joonis 2.9). Arvutusmodelid koostati iga tüüphoone kohta iga soojustuse paksuse juures. Loodud geomeetria määrati pinnase ja põranda pealmisele pinnale ääritingimused. Need ääritingimused sisaldasid vastavaid dünaamilisi sise- ja välistemperatuure, nii nagu kirjeldatud kliimaandmete peatükis 3.1.2. Samuti määrati pindadele soojustakistused vastavalt standardis EVS-EN ISO 6946 esitatud väärtustele (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017b). Arvutusmudeleid koostati erinevate tingimuste ning seadistuste juures, et hinnata kui suurt mõju arvutustulemustele omab erinevate seadistuste kasutamine. Arvutustäpsuse hindamisel võrreldi mudelisse siseneva ning mudelist väljuva energia hulka. Kui see erinevus oli väiksem kui 1 %, siis loetleti arvutustihedus piisavaks. Simuleeriti läbi kõik tüüphooned tingimustel, kus mudel arvestas pinnast täielikult kuivana [„Voltra(kuiv)“], ehk kasutas läbi terve arvutuse kuiva pinnase soojuserijuhtivust (määratletud peatükis 3.1.1). Temperatuurid olid seejuures nii sees kui väljas dünaamilised. Teise variandina loodi samasugune mudel nagu eelnevalt kirjeldatud, kuid erines sellepolest, et sisetemperatuurina kasutati konstantset väärtust 21°C [„Voltra(const)“], et simuleerida olukorda, kus hoone küttesüsteem hoiab hoones kindlat temperatuuri, ehk et näha kui palju suurem või väiksem on sellistel tingimustel energiakulu. Kolmanda variandina kasutati taaskord nii sees kui väljas dünaamilist temperatuuri, kuid määrati pinnasele külmumispiiri temperatuuride juures, vahemikus -0,5 kuni -1,5°C erisoojus („Voltra“), vastavalt pinnase veesisaldusele (0,25 m³/m³), nii nagu määratletud Delphini niiske pinnasega mudelis, ehk energia hulk, mis on vajalik ületada selleks, et pinnas külmuks. Vee sulamise/külmumise latentne soojus on 334 kJ/kg. See annab erisoojuseks valitud pinnase veesisalduse juures 41750 J/kg, mis rakendati eelnevalt mainitud külmumispiiri temperatuuridel arvutusmodeli pinnasele.

Näide ühe tüüphoone põranda arvutusmodelist on esitatud lisa 2. Dünaamiliste arvutuste korral määrati põranda soojuslähivus aastaste ühetunnise sammuga soojusvoogude summa ja ühetunnise sammuga sise- ja välistemperatuuri vahe jagatisena. Pinnase soojusliku inertsiga arvestamiseks teostati simulatsiooniarvutus kokku 6 aasta peale, 5 aastat arvutust ette, et temperatuurid ja niiskus jõuaksid pinnases tasakaalustuda ning saavutada päriselulise olukorra ning tulemused võeti seejärel 6. aasta andmetest. Arvutusmodeli baas- ehk arvutuse algtemperatuuriks määrati aasta keskmise temperatuur (vt ptk 3.1.2). Erinevalt Delphin'ist ei määra Voltra algtemperatuuri otse põranda all olevale pinnasele, vaid arvestab mingil määral selle kohal paikneva sooja põrandaga, luues koheselt ühtlaselt muutuva temperatuurivälja.

2.4 Servasoojustus

Selleks, et anda terviklik hinnang käesoleva uuringu põhifookuses oleva EVS-EN ISO 13370 lihtsustatud meetoditele põranda soojuslähivuse arvutamiseks, uuriti ka antud standardi lisas D (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017c) esitatud meetodeid servaala soojustuse mõju arvutamiseks. Võrdluseks teostati samad arvutused ka tarkvaraga Therm, hindamaks kui palju erinevad lihtsustatud meetodi ning tarkvara poolt arvutatud servaala soojuskadude muudud servasoojustuse lisamisest.

Tüüphoonetena kasutati samu peatükis 3.1.1 kirjeldatud hooneid 1-4 ning lisati nende põrandakonstruktsioonile servasoojustused nii horisontaalselt kui ka vertikaalselt pikkusega:

- 600 mm
- 1200 mm

ning paksusega:

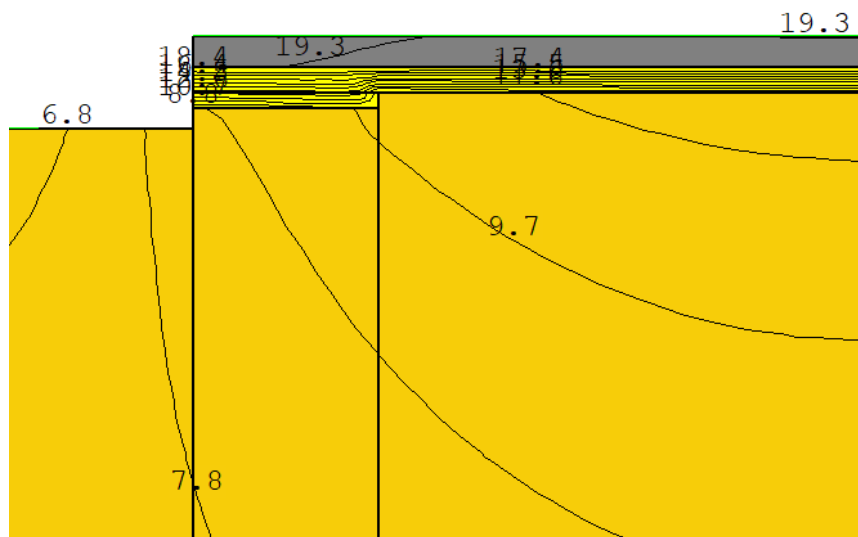
- 50 mm
- 100 mm
- 200 mm

põhisoojustuse paksuste juures:

- 0 mm
- 50 mm
- 80 mm
- 100 mm
- 200 mm
- 400 mm.

Sellisel saadi 288 arvutusmudelit erinevate hoonete ning põhisoojustuse ja servasoojustuse paksuste ning suundade juures. Muud arvutusandmed, nagu

materjalide soojuserijuhtivused ning kliimaandmed jäeti samaks. Servasoojustusega põranda Therm'i arvutusmodeli näide on esitatud Joonis 2.12.



Joonis 2.12 Servasoojustusega põranda Therm'i arvutusmodeli näide.

2.4.1 EVS-EN ISO 13370 – Servasoojustus

Standardi kohaselt käsitletakse põranda serva isolatsiooni toimet joonsoojusläbivuse parandustegurina $\Psi_{g,ed}$, mis leitakse erineva valemiga vastavalt horisontaalsele ning vertikaalsele servaisolatsioonile.

Standardis antud valemid servasoojustusega pinnasele toetatud põranda soojusläbivuse arvutamiseks võtavad arvesse ka serva soojustusest tulenevat täiendavat põranda ekvivalentset paksust d' , mis arvutatakse valemiga:

$$d' = R'\lambda \quad (2.42)$$

milles R' on täiendav soojustakistus, mis põranda serva soojustamisega kaasneb. Sisuliselt on see põranda servasoojustuse ja seda asendava pinnase soojustakistuste erinevus ning arvutatakse valemiga:

$$R' = R_n - \frac{d_n}{\lambda} \quad (2.43)$$

kus R_n – horisontaalse/vertikaalse serva soojustuse soojustakistus, $m^2 \cdot K/W$

d_n – serva isolatsiooni paksus, m.

Servasoojustuse mõju põranda soojuslähivusele arvestatakse joonsoojuslähivusena, mis horisontaalse serva isolatsiooni korral arvutatakse valemiga:

$$\Psi_{g;ed} = -\frac{\lambda_g}{\pi} * \left[\ln\left(\frac{D}{d_f} + 1\right) - \ln\left(\frac{D}{d_f+d'} + 1\right) \right] \quad (2.44)$$

kus D – horisontaalse servasoojustuse laius, m,

d' – määratletud valemis (1.47),

d_f – määratletud valemis (1.2).

λ_g – pinnase soojuseri juhtivus, W/m*K.

Vertikaalse servasoojustuse mõju arvutatakse valemiga (2.45) ning kehtib see vertikaalselt allapoole põhisoostust paigaldatud soojustuse korral. Pinnasesse tehakse lõige põhisoostuse ning servasoojustuse lõikepunktini, juhul kui see on maapinnast allpool. Ülemine osa jääb põrand-seina külmasilda, mis tuleb eraldi arvutada tarkvaraga ega sisaldu standardi ISO 13370 valemities. Servasoojustusega arvutusmudeli näide on esitatud joonisel 2.12.

$$\Psi_{w;f} = -\frac{\lambda_g}{\pi} * \left[\ln\left(\frac{2*D}{d_f} + 1\right) - \ln\left(\frac{2*D}{d_f+d'} + 1\right) \right] \quad (2.45)$$

Arvutatud servaala joonsoojuslähivused on miinusmärgiga, ehk kirjeldavad põranda U-arvu vähenemist. Põranda lõplik soojuslähivus arvutatakse nendest valemiga:

$$U_{fg;sog} = U_{fg;sog;0} + \frac{2*\Psi}{B} \quad (2.46)$$

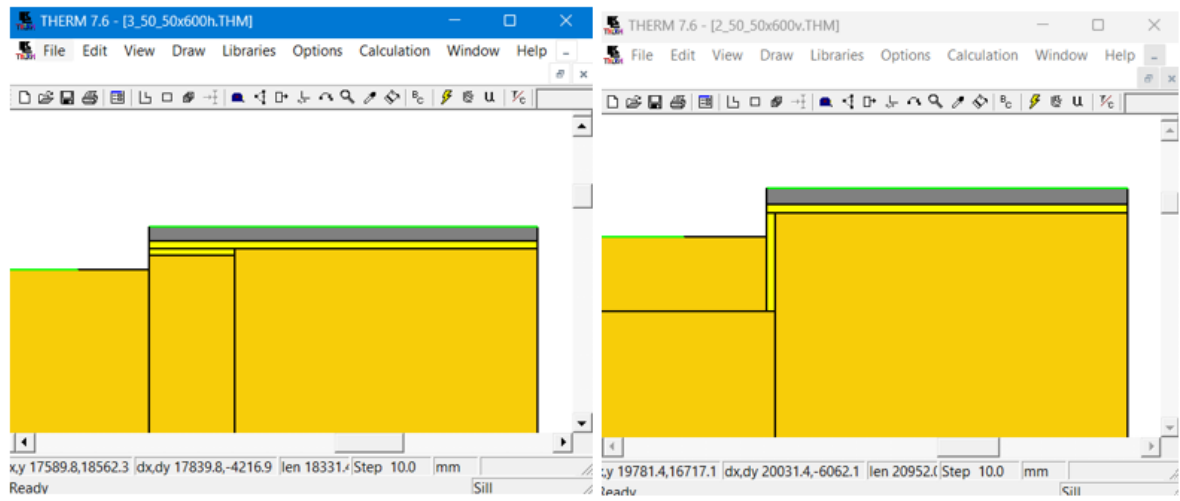
kus $U_{fg;sog;0}$ – põranda soojuslähivus ilma servasoojustust arvestamata,

B – määratletud valemiga (1.1).

2.4.2 Therm - Servasoojustus

Samad servasoojustusega arvutused teostati ka Thermis (programmi arvutusloogika vt ptk 2.3.2), lisades olemasolevatele põhisoostusega arvutusmudelitele ka täiendav servasoojustus erineva suuna, pikkuse ja paksusega, nagu kirjeldatud peatükis 2.4. Saadud põrandate soojuslähivused sisestati Excelisse ning neist arvutati servasoojustusest tekkinud soojuslähivuse vähenemine, lahutades servasoojustusega arvutusmudelist vaid põhisoostusega arvutusmudeli tulemuse. Saadud ΔU [W/m²*K] korrutati läbi poole põranda tunnusmõõduga, ehk arvutusmudelis oleva põrandaosa laiusoga, saades seeläbi servasoojustusest tekkiva vähenenud joonsoojuslähivuse Ψ

[W/m*K], mida võrreldi ISO 13370 standardi valemitega arvutatud joonsoojuislabivustega. Thermis koostatud servasoojustusega arvutusmodelite näited on esitatud Joonis 2.13.



Joonis 2.13 Horisontaalse ning vertikaalse servasoojustusega Thermi arvutusmodeli näited.

3. MEETODID

Soojuslevi läbi põranda on ka varasemalt uuritud ning tuletatud valemeid ja meetodeid selleks on mitmeid. Meetodid arvestavad erinevaid parameetreid soojuskaomääramiseks, kuid mitte iga meetod ei kasuta kõiki tulemust mõjutavaid tegureid. Käesolevas magistritöös uuriti lähemalt üheksat lihtsustatud arvutusmeetodit ning nelja simuleerimistarkvara. Lihtsustatud meetoditest on põhifookus standardi EVS-EN ISO 13370 meetodil, kui enim kasutataval lihtsustatud soojuslevi arvutusmeetodil. Selleks, et anda sellele terviklik hinnang, uuriti ka standardi lisas D esitatud meetodeid horisontaalse ja vertikaalse servaala soojustuse parandusteguri määramiseks. Ülejäänuid kirjandusest leitud meetodeid võrreldi standardimeetodi ning tarkvara tulemustega, et näha, kas leidub mõni täpsem meetod soojuskadude hindamiseks pinnasele toetatud põrandate puhul. Arvutiga teostati arvutused järgmiste tarkvaradega: Therm, Heat3, Delphin ja Voltra, et võrrelda lihtsustatud arvutuste tulemusi täpsemate arvutusmasinate tulemustega ning anda seeläbi hinnang nende täpsusele. Kasutatud meetodid ning nende arvutusloogikaline jaotus on esitatud Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Käesolevas töös uuritud arvutusmeetodite arvutusloogikaline jaotus.

	Valemiga arvutus									Modelleerimine			
	Hoone kui terviku geomeetria arvestamine						Põranda tsoneerimine			2D		3D	
Nimi/ viide	ISO 13370	DS 418	Wright	Hagentoft	Kissock	Spooner	SNIP	Seppänen	SRMK C4	Therm	Delphin	Heat3	Voltra
Staatiline kliima	x	x	x	x	x	*	x	x	x	x	x	x	x
Dünaamiline kliima						*					x		x
Geomeetria/ kujutegur	x		x	x	x							x	x
Parandite kasutamine		x			x								
Empiiriline tuletus					x	x							
Analüütiline tuletus	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x

* Põhimõtteid staatiline arvutus, kuid võimaldab dünaamiliselt määratud parameetrite kasutamist

3.1 Arvutuse alused

Selleks, et erinevate meetoditega teostatud arvutused oleks omavahel võrreldavad, tuli luua võrdsed arvutuse alused, ehk arvutusi teostati ühesuguste hoonete ning tingimuste juures.

3.1.1 Tüüphooned

Arvutusteks loodi 4 tüüphoonet. Antud tüüphooned valiti selliselt, et oleks esindatud erineva mahu ja pikkuse/laiuse suhtega põrandad. Varieeruv põranda geomeetria

testhoonete lõikes võimaldab hinnata meetodite täpsust erineva suurusega põrandate puhul. Hoonete mõõtmeteks valiti:

- Hoone 1 – 4 x 6 m (esindab kuuri/väikest abihoonet);
- Hoone 2 – 6 x 16 m (esindab väikest üksikelamut);
- Hoone 3 – 6 x 60 m (esindab ridaelamu tüüpi hoonet);
- Hoone 4 – 100 x 200 m (esindab suurt toidupoodi/lao- või tootmishoonet).

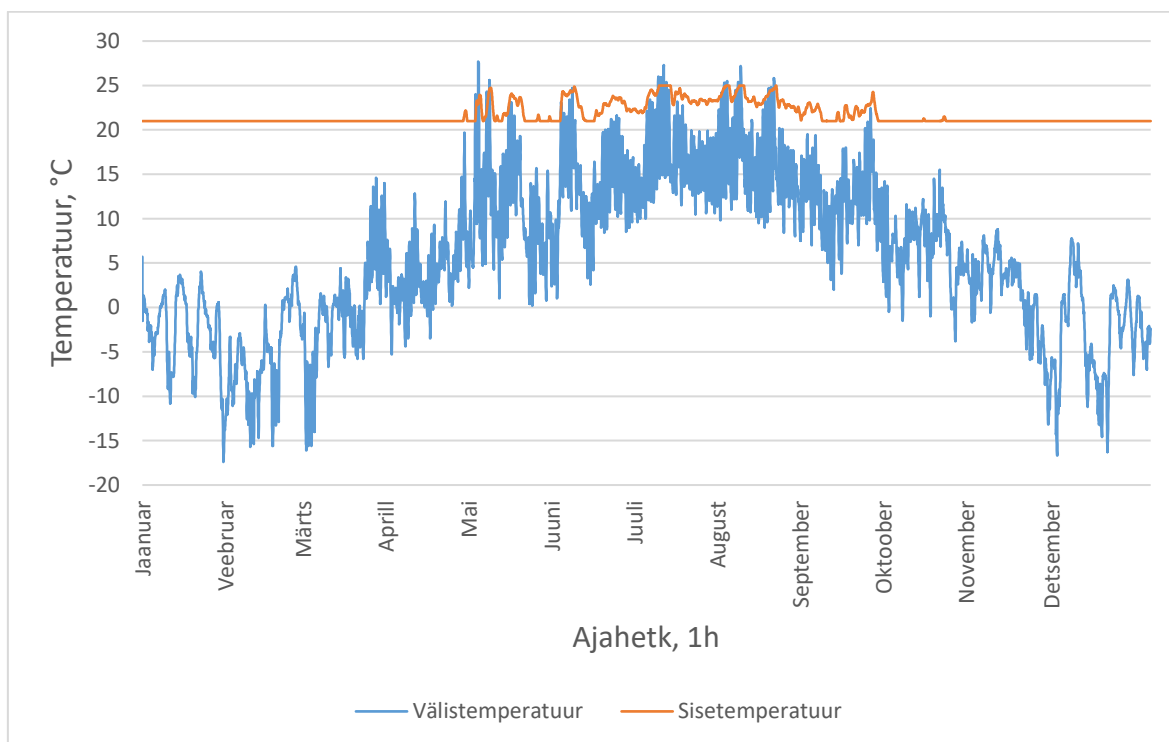
Kõikidel hoonetel eeldati ühesugust põranda konstruktsiooni:

- Põranda kõrgus maapinnast 0.3 m;
- Sein ja soklimüüri paksus 0.5 m;
- Soklimüüri sügavus maapinnast kuni soojustuse alumise pinnani, õhema soojustuse korral asub soklimüür otse maapinnal (pinnases asuva müüriosa soojuserijuhtivus võetakse sel juhul võrdseks pinnase omaga);
- Põrandaplaadiks r/b plaat paksusega 0.1 m ($\lambda = 2.30 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$);
- Soojustuse paksus 0/10/50/80/100/200/400/800 mm ($\lambda_{\text{ins}} = 0.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$);
- Aluspinnaseks liivpinnas ($\lambda_g = 2.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$).

Tarkvaradega teostatud arvutustes nängivad olulist rolli ka täpsemad pinnase ning tarindi materjalide parameetrid. Tulemuste täpseks võrdluseks määrati ka need arvutusmudelites läbivalt võrdväärset. Raudbetoonplaadi tiheduseks valiti $2500 \text{ kg}/\text{m}^3$ erisoojusega $900 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ning soojustusel vastavalt $35 \text{ kg}/\text{m}^3$ ja $1300 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Kuiva liivpinnase tiheduseks valiti $1750 \text{ kg}/\text{m}^3$ erisoojusega $910 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Tulenevalt programmide erinevast töötamise loogikast tuli niiske pinnase parameetrid Voltras ja Delphin'is sisestada erinevalt. Pinnase niiskussisalduseks valiti $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Delphin'is on sisestamine lihtsam, sest ei ole tarvis midagi ise täiendavalt juurde arvutada, ehk sisestada tulebki lihtsalt eelnevalt kirjeldatud kuiva pinnase parameetrid ning niiskussisaldus ja Delphin teostab pinnase lõplike parameetrite arvutuse ise. Voltras on aga tarvis niiske pinnas kohe lõplike parameetritena sisestada, ehk eelnevalt on vaja need kuivast pinnasest ja niiskussisaldusest arvutada. Märja pinnase tihedus on seega $1750 + 0,25 \cdot 1000 = 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$. Sellele pinnasele vastav erisoojus on $\frac{1750 \cdot 910 + 250 \cdot 4180}{1750 + 250} = 1320 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ (Vee erisoojus on $4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$).

3.1.2 Kliima andmed

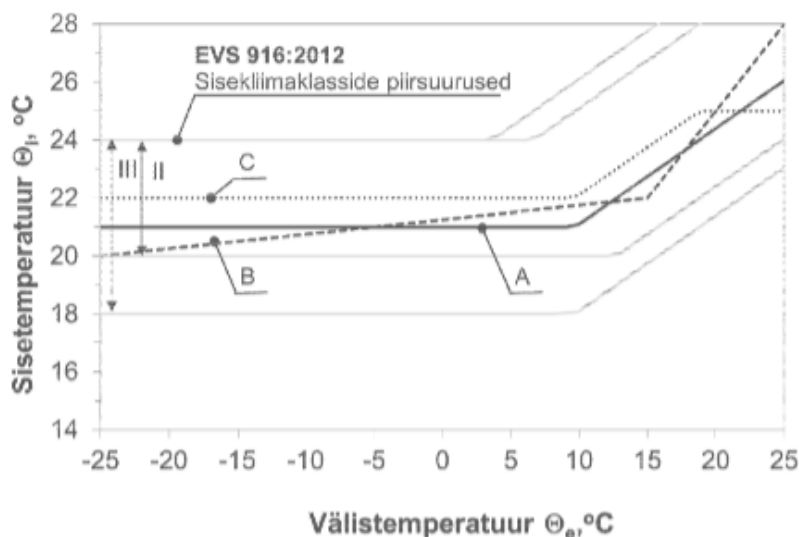
Kõigis arvutustes võeti hoonete siseõhu temperatuuriks 21°C. Dünaamilistes arvutustes (Voltra, Delphin) kasutati välisõhu temperatuurina Kalamehe ja Kurnitski (Kalamees & Kurnitski, 2006) Eesti kliimaandmete (kliimaandmed aastatest 1970-2000) põhjal loodud Eesti energiaarvutuste testaastat. Eesti energiaarvutuste testaasta loodi põhinedes ISO 15927 standardis esitatud meetodile. Uuringus valiti kliimaandmed selliselt, et need esindaksid võimalikult täpselt üht keskmist kliimaatilist olukorda Eestis ühe aasta jooksul. Keskmistest temperatuuridest loodi tunni kaupa andmed, mis moodustavad ka käesolevas uuringus kasutatava ühe aasta temperatuurigraafiku (vt Joonis 3.1). Staatilistes arvutustes kasutati välisõhu temperatuurina antud testaasta temperatuuride keskmist, milleks on 5,74°C.



Joonis 3.1 Välis- ja sisetemperatuuride graafik, mida kasutati dünaamilistes simulatsioonides välis- ja siseõhuga kontaktis olevate pindade ääritingimustena.

Dünaamilistes arvutustes eeldati, et suveperioodil, kui välistemperatuur võib tõusta kõrgemaks kui hoone sisetemperatuur, on väga tõenäoline, et ka sisetemperatuur nendel päevadel kasvab kõrgemale kui staatilisteks arvutusteks valitud baastemperatuur 21°C. Sellise välistemperatuurist sõltuva sisetemperatuuride graafiku loomiseks kasutati standardi EVS-EN ISO 13788 (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2013) lisas NA joonisel NA.2 (Joonis 3.2) esitatud tüüpolukorda C (Välistemperatuuri abil juhitud elamu keskküttesüsteem uuemates, nt 2000. a või

hiljem ehitatud elamutes + jahutus) hoone sisetemperatuuride määramiseks. Graafiku kohaselt välisõhu viimase 24 tunni keskmise temperatuuri tõustes üle $+10^{\circ}\text{C}$ hakkab hoone sisetemperatuur lineaarselt kasvama, kuni piirväärtuseni $+25^{\circ}\text{C}$, kui välistemperatuur tõuseb $+20^{\circ}\text{C}$ -ni. Eesti energiaarvutuste testaastale vastav sisetemperatuur tüüpolukord C kohaselt tunni ajase sammuga on esitatud Joonis 3.1.



Joonis 3.2 Dünaamiliste mudelite ääritingimusena kasutatud sisetemperatuuri sõltuvus välistemperatuurist. (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2013).

3.2 Tehtud eeldused ja lihtsustused

Mõne teadustöö puhul ei ole üheselt määratud mõne teguri määramine või on mitmeid võimalusi arvutusmeetodi erinevalt rakendamiseks, luues võimalusi täiendavaks võrdluseks. Järgnevalt on esitatud sellised eeldused või lähenemised, mis käesolevas töös on rakendatud.

3.2.1 Eeldused A. J. Wrighti meetodis

Wright'i töös (Andrew Wright, 1988) ei ole üheselt välja toodud, kuidas tuleks määrata valemi tegur k (vt valem 2.12). Töös on tegurit mainitud mitmel korral erinevas kontekstis: kord selliselt, et tegu on mingi kindla materjali soojuseri juhtivusega, teine kord, et tegu on põranda ja pinnase keskmise soojuseri juhtivusega. Samuti ei ole töös välja toodud, kuidas antud tegurit määrata tuleks, nimelt milline peaks olema pinnase paksus, millega selle määramisel peaks arvestama. Selleks sai käesolevas töös tuletatud valem 3.1, mis kasutab keskmise soojuseri juhtivuse määramisel pinnase paksusena soojusenergia teekonna pikkust põranda sisepinnalt maapinna välispinnani. Aluseks võeti EN ISO 13370 standardis esitatud valemid ja suurused (Eesti

standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017c). Kui kahemõõtmelise arvutuse korral on arvutuses põranda laiuseks pool tunnusmõõtu, siis lühim tee soojuse liikumiseks soojustuse alt välispinnani on ca 0,25B'. Soojusvool kulgeb aga mööda kaart, ehk õigustatum oleks valida teekonna pikkuseks ca 0,5B'. Selliselt arvutades saadi ka sarnased tulemused standardimeetodiga EN ISO 13370. Põranda konstruktsioonis arvestati k määramisel vaid soojustuse kihiga.

$$k = \frac{0,5B' + d_{ins}}{\frac{0,5B'}{\lambda_g} + \frac{d_{ins}}{\lambda_{ins}}} \quad (3.1)$$

kus k – põranda ja pinnase keskmine soojuseri juhtivus, W/(m*K),

B' – põranda tunnusmõõt (valem 2.1), m,

λ_g – pinnase soojuseri juhtivus, W/(m*K),

λ_{ins} – soojustuse soojuseri juhtivus, W/(m*K),

d_{ins} – soojustuse paksus, m.

3.2.2 Erinevad võimalused Spooner'i meetodis

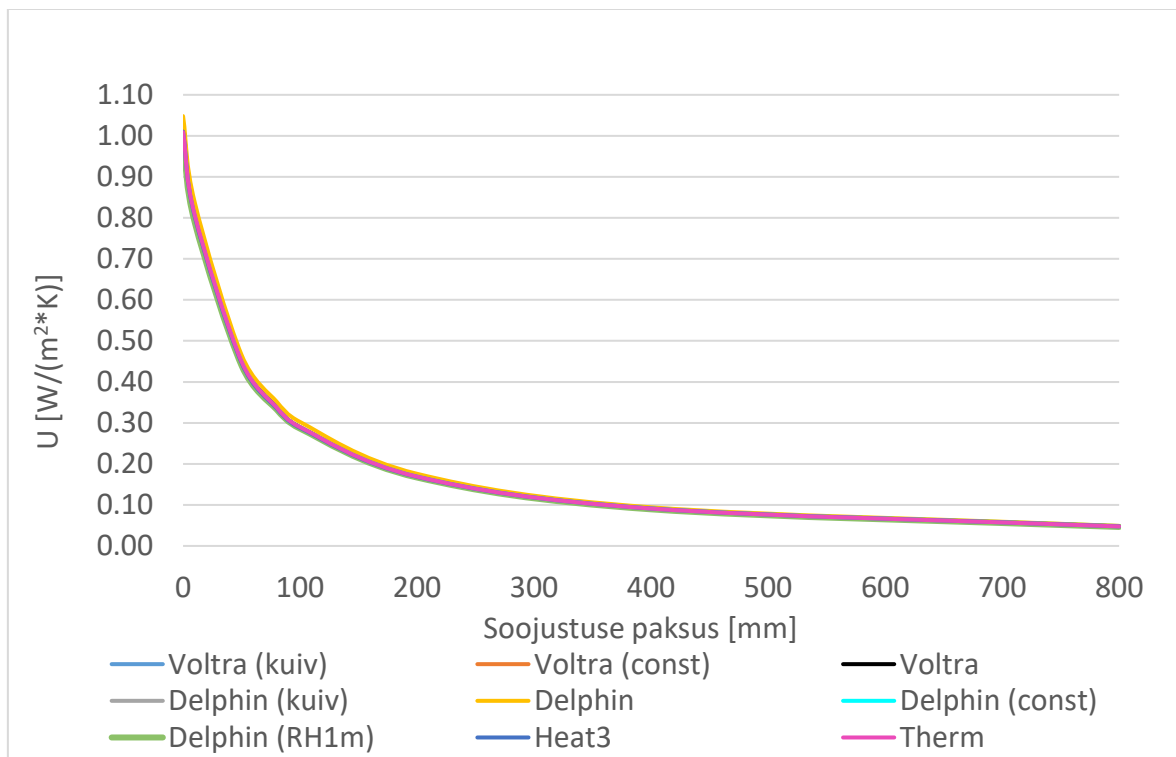
Mõõteandmed Tartust ja Võrust näitavad, et 1m sügavusel hoonest eemal, on nii-öelda häirimata pinnas ehk *undisturbed soil* olnud ca 20 aasta jooksul keskmise temperatuuriga 8,2°C (Eesti Keskkonnaagentuur, 2024). Köetud hoone põranda all on pinnase temperatuur aga kõrgem. Selle määramiseks on mitu võimalust: otsene mõõtmine põranda all pinnases, simulatsiooniarvutusega erinevates punktides temperatuuri määramine või kasutada tagavara kasuks keskmist pinnase temperatuuri 8,2°C. Käesolevas töös arvutati põranda soojusläbivused võrdluseks kahel viisil: kasutades pinnase temperatuurina läbivalt keskmist 8,2°C („Spooners_us”) ning kasutades Voltra arvutusmudelitest saadud temperatuure põranda serva- ning keskosa all („Spooners_sim”). Temperatuurid määrati põranda servaala all ning põranda keskel maapinnast 1 m sügavusel. Põranda erineva mõjuga aladeks jaotamine on esitatud peatükis 2.2.8.

4. TULEMUSED

Käesolevas töös valiti referentsiks, ehk võrdluse aluseks arvutustarkvara Voltra tulemus dünaamilistes tingimustes (nim. „Voltra“), sest antud programmi puhul on tegemist Tallinna Tehnikaülikoolis saadaval oleva tarkvaraga, mis võimaldab teostada kolmemõõmelise soojuslevi arvutust, ehk ei ole tarvis teha lihtsustusi põranda geometrias, vaid on võimalik modelleerida kogu vajaminev põranda osa arvutusmudelisse. Samuti võimaldab programm arvestada ka täiendavate päriseluliste teguritega, nagu muutlik temperatuur (vt ptk 3.1.2) ja pinnase soojusmahtuvus ja külmumine. Lihtsustatud meetoditele hinnangu andmiseks võrreldi nende tulemusi seeläbi Voltra dünaamilise arvutuse tulemustega. Kõigi tüüphoonete kõigi meetoditega arvutatud põrandate soojuslähivused ning nende tulemuste võrdlus Voltraga on esitatud Lisa 3 Põrandate soojuslähivused ja võrdlus tabeli kujul.

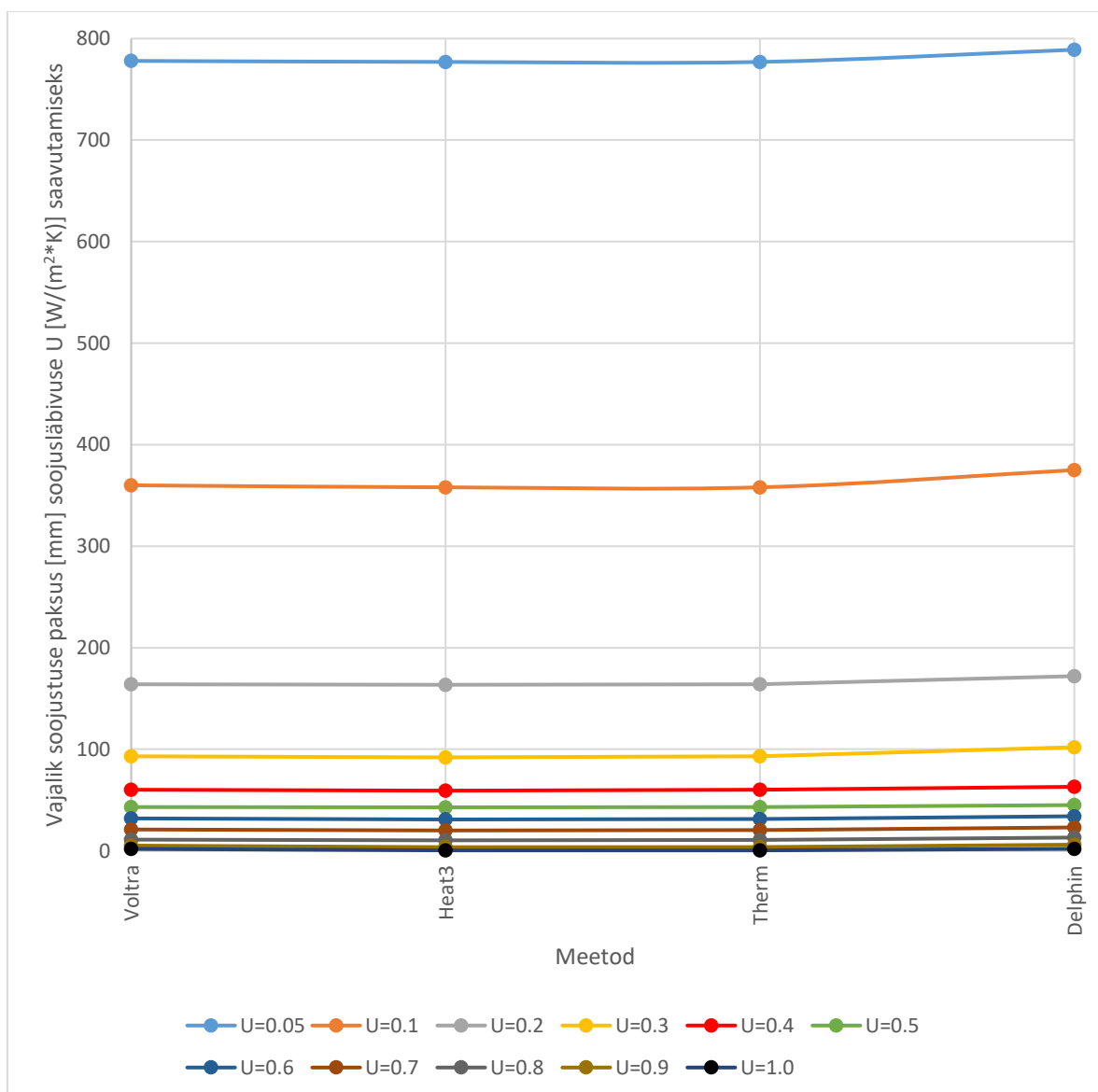
4.1 Arvutustarkvarad

Tüüphoonete pinnasele toetatud põrandate soojuslähivuse arvutused teostati nelja arvutustarkvaraga: Therm, Heat3, Delphin ja Voltra. Tarkvaradega arvutatud soojuslähivused hoone 1 põrandate kohta erinevate põhisoojustuse paksuste juures on esitatud Joonis 4.1.



Joonis 4.1 Hoone 1 (4x6 m) põranda soojuslähivused eri arvutustarkvaradega arvutades. Mudelite kirjeldused vt ptk 2.3.

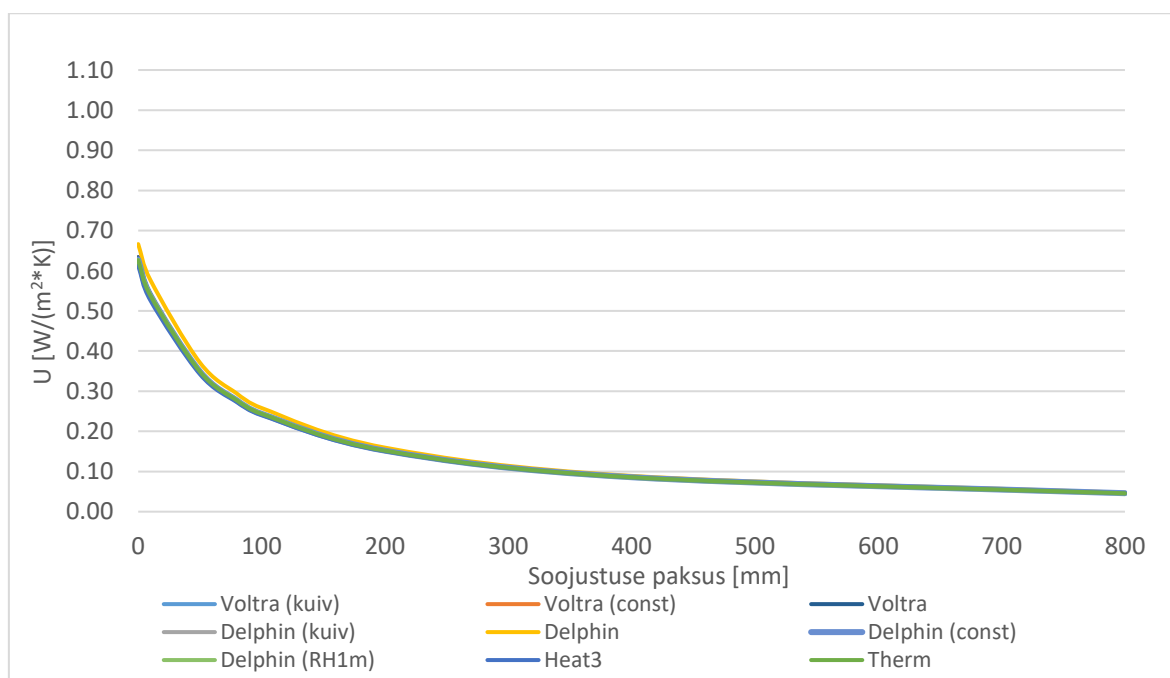
Kõigi tüüphoonete põrandate soojuslähivuste graafikud, mis arvatud nii lihtsustatud meetoditega kui ka arvutustarkvaradega on esitatud Lisa 4 Põrandate soojuslähivused. Arvutustarkvarade tulemuste võrdlusest järeldus, et tarkvara valikust soojuslähivus ei sõltu, saades võrdsed tulemused väga väikseste erinevustega. Kuid nende väikeste erinevuste juures, eriti paksemate soojustuste korral võib vajaminev soojustuse paksus mingi kindla soojuslähivuse väärtuse saavutamiseks erineda väga palju. Joonis 4.2 nähtub, et sellist erinevust siiski ei teki. Suurim erinevus esineb tarkvaraga Delphin arvutades, kuid vajamineva soojustuse erinevus seejuures võrreldes teiste tarkvaradega on vähem kui 20 mm. Sama tulemus joonistus välja ka ülejäänud tüüphoonete korral. Sarnased graafikud kõigi uuritud meetodite kohta on esitatud lisa 6.



Joonis 4.2 Hoone 1 (4x6 m) soojustuse vajalik paksus erinevate tarkvaradega arvutades kindla põranda soojuslähivuse saavutamiseks.

Arvväärtustelt erinevad tarkvaradega arvatatud põranda soojusläbivused väga vähe. Tulemuste suhteline viga dünaamilise Voltra arvutuse suhtes jääb vahemikku -8 kuni +6 %. Suurimad erinevused esinevad just staatiliste arvutustingimustega arvutusmodelites vastavalt Heat3's ja Delphin'i kuiva pinnasega arvutuses.

Voltra erinevate variantide võrdlusest ilmnes, et pinnase külmumisega arvestamine [„Voltra“ vs „Voltra(kuiv)“] märgilist tulemuste erinevust esile ei toonud, kuiva pinnasega mudel erines vaid massiivpõranda korral (hoone 4 100x200 m) kuni 0.5 %. Veidi suurem erinevus tõusis esile konstantse sisetemperatuuriga Voltra arvutusmudeli puhul, mis samuti just hoone 4 korral andis suurema erinevuse, kuni 2.7 % tagavara kahjuks. Sama tulemus saadi ka Delphin'i konstantse sisetemperatuuriga mudelist [nim. „Delphin(const)“], erinedes enamikel tingimustel Voltra tulemustest vähem kui 1 %. Delphin'i pinnase niiskusega arvestav mudel (nim. „Delphin“) andis läbivalt kõigi tüüphoonete korral tulemused tagavara kasuks väiksemate hoonete korral kuni 6 % ning massiivpõranda korral vahemikus 11-18 %, ehk hindas pinnase niiskussisaldusest tulenevalt soojuskadusid suuremaks. Tüüphoon 4 (100x200 m) korral andis pinnase niiskusega arvestavatest Delphin'i mudelitest väiksema tagavaraga, ehk täpsema tulemuse aga mudel, milles pinnase veesisaldus määrati alates 1 m sügavuselt sügavamale [nim. Delphin(RH1m)“]. Delphin'i kuiva pinnasega arvutusmudel, andis Voltraga võrdsed tulemused, erinedes Voltrast vaid massiivpõranda korral kuni 6 %. Hoone 3 arvutustarkvaradega arvatatud põranda soojusläbivused on esitatud Joonis 4.3.

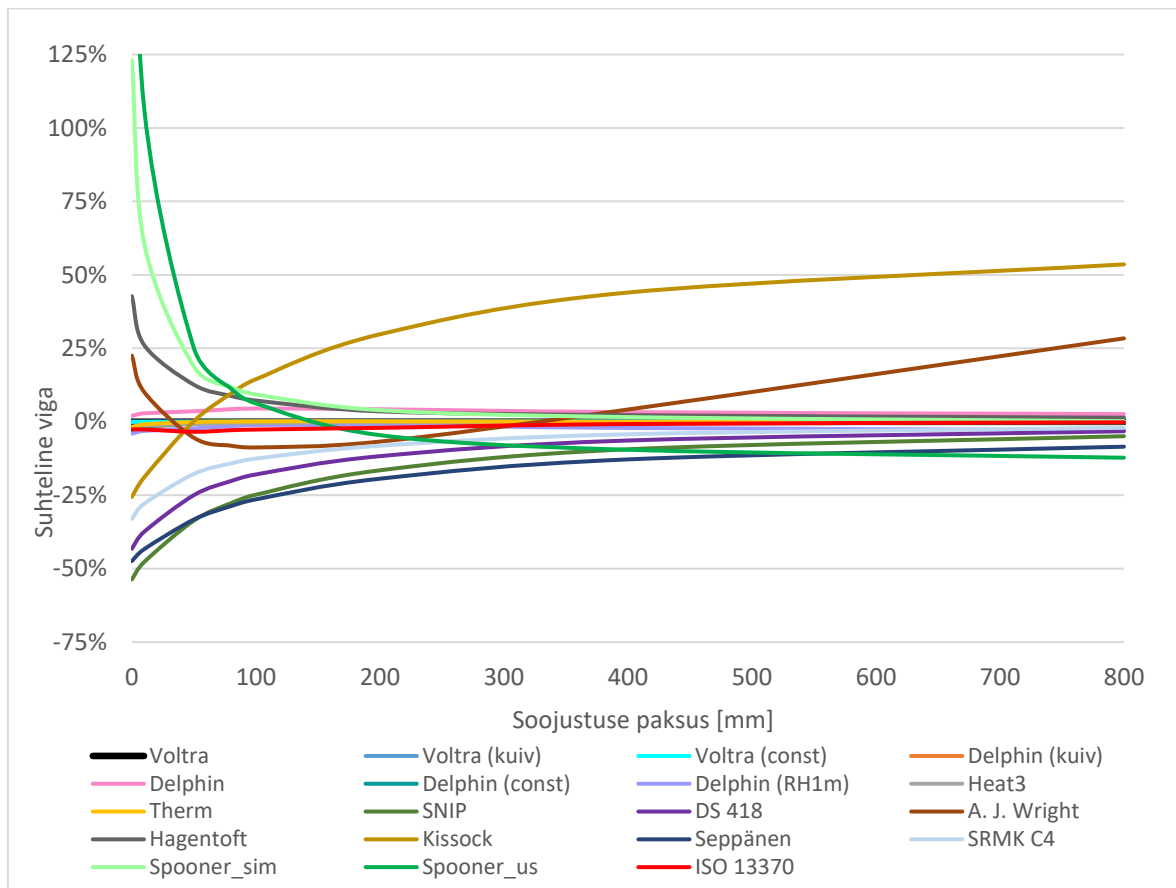


Joonis 4.3 Hoone 3 (6x60 m) arvutustarkvaradega arvatatud põranda soojusläbivused. Mudelite kirjeldused vt ptk 2.3.

4.2 Lihtsustatud meetodid

Nagu peatüki alguses kirjeldatud, valiti käesolevas töös referentstulemuseks Voltra dünaamiline arvutus (nim. „Voltra“) ning lihtsustatud arvutusmeetodite põranda soojuslähivuse tulemusi võrreldi just sellega.

Lihtsustatud meetodite ning tarkvaredega arvatud põranda soojuslähivuste erinevus Voltra suhtes hoones 1 on esitatud Joonis 4.4.



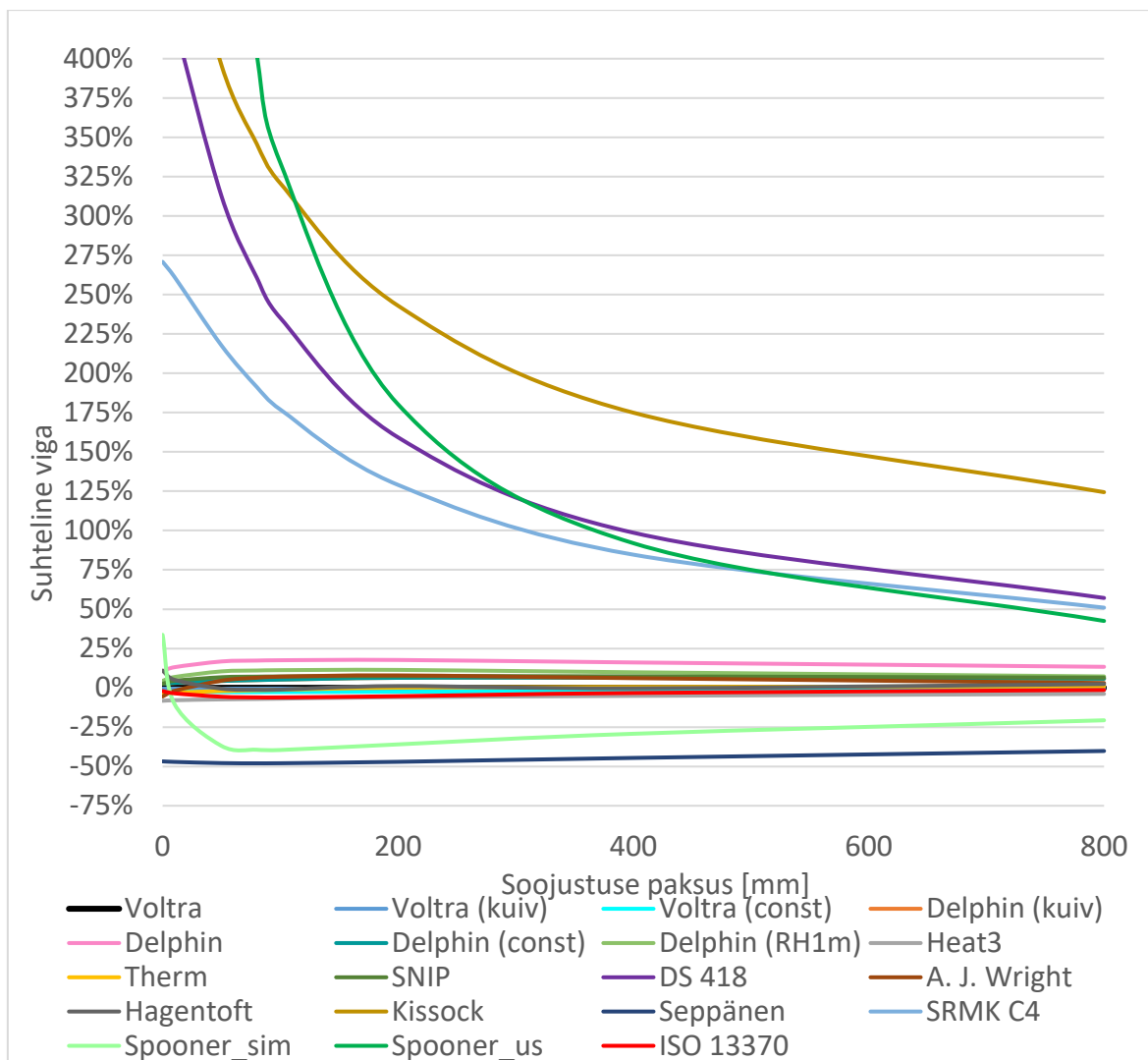
Joonis 4.4 Hoone 1 (4x6 m) põranda soojuslähivused Voltra tulemuste suhtes. Arvutusmodelite parameetrid vt pkt 3.1-3.3.

Tüüphoonete 1 kuni 3 korral (4x6 kuni 6x60 m) alahindasid mitmed meetodid (Dans Standard, 2011; <http://www.snip.com/>, 2003; Seppänen, 2001; Soome keskkonnaministeerium, 2003) suuresti soojuskadusid läbi põranda kohati kuni 54 % ulatuses. Ülejäänud lihtsustatud meetodid käitusid antud tüüphoonete korral kõik eriilmeliselt: (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017c) andis läbivald täpseid tulemusi, erinedes Voltrast vaid paari protsendi võrra, (Andrew Wright, 1988) tulemusi iseloomustab aga paraboolne seos, andes üsna täpseid tulemusi mõõduka soojustuse korral, kuid ebatäpsemaid vähesel ja vastupidi rohke soojustuse korral. (Hagentoft,

1988) annab täpseid tulemusi aga just paksu soojustuse korral, alates 100 mm-st. (Kissock et al., 2013) empiirilisel tuletatud valemid annavad eeldatult täpseid tulemusi piiratud vahemikus, milleks on väiksemad pörandad, nagu tüüphooned 1 ja 2 (4x6 ja 6x16 m) mõõduka soojustuse korral vahemikus 50-100 mm. (Spooner, 1982) puhul on olemas tulemus suuresti kasutatavast pinnase temperatuurist. Tõenäoliselt kasutatakse sellise lihtsustatud meetodi korral saadavalolevaid kliimaandmeid, ehk pörandad all läbivalt pinnase keskmist temperatuuri 1 m sügavusel (mudel „Spooner_us”). Sellisel aga meetod ülehindab soojustamata ja vähese soojustuse korral mitmekordselt tegelikke soojuskadusid ning annab ühesugused soojusläbivused olenemata pörandad mahust või geomeetriast. Täpseid tulemusi saadakse vaid väiksemate pörandad ja paksema soojustuse korral vahemikus 200-400 mm. Kui aga see pinnase temperatuur asendada simulatsiooniarvutusest saadud temperatuuridega pörandad serva- ja keskosa all, saadakse oluliselt täpsemad tulemused (mudel „Spooner_sim”). Sellisel saab paksemate soojustuste korral, alates 100 mm-st erinevuse Voltraga kõigest kuni 10 %, kuid sellisel antud meetodi rakendamist tõenäoliselt ei esineks.

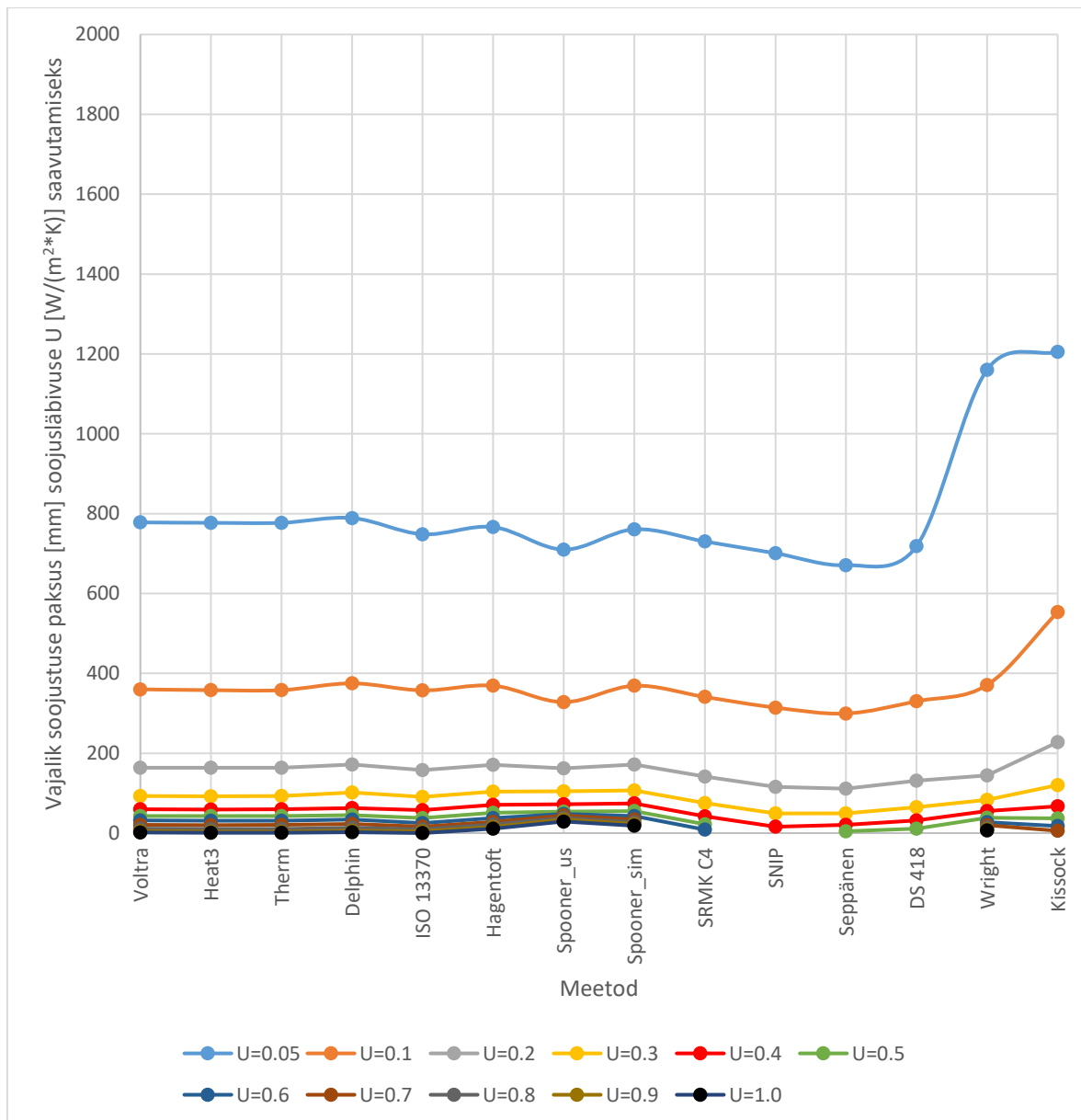
Erandliku massiivse pörandad ehk hoone 4 (100x200 m) puhul andis lihtsustatud meetoditest Seppänen vea samas suurusjärgus ja suunas nagu esimese kolme hoone puhul. Taani standard, Soome rakendusmäärus SRMK C4 ning teistest meetoditest ka Kissock ja Spooner suure pörandad korral aga suuresti ülehindasid soojuskadusid, mitme- või lausa mitmekümnekordselt. Ülejäänud lihtsustatud meetodid annavad suure pörandad korral üsna täpseid tulemusi, erinedes Voltrast vähem kui 10 %: ISO 13370 ning Hagentoft annavad erisuse pigem tagavara kahjuks, kuni 6 %, SNIP ja Wright aga samaväärselt kuni 8 % tagavara kasuks.

Hoonete 1 kuni 3 (4x6 kuni 6x60 m) soojusläbivuste graafikud Voltra tulemuste suhtes joonistused seega väga sarnased. Erandliku hoone 4 (100x200 m) tulemused on esitatud Joonis 4.5. Kõigi hoonete tulemusi on võimalik näha Lisa 4 Pörandad soojusläbivused Voltra suhtes.



Joonis 4.5 Hoone 4 põranda soojusläbivused Voltra tulemuste suhtes. Arvutusmudelite parameetrid vt ptk 2.1-2.3.

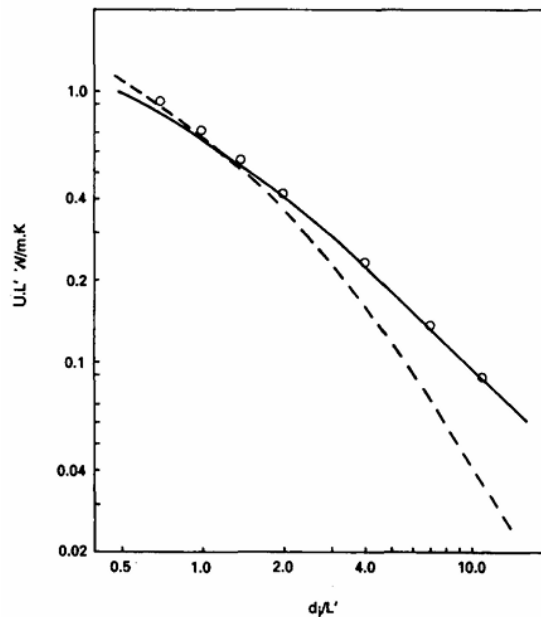
Kui vaadata vajamineva soojustuse paksust sarnaselt tarkvaradega ka lihtsustatud meetodite korral, siis nõutava soojustuse paksus suuremate soojusläbivuste korral erineb vähe, kuni 50 mm. Hoone 1 (4x6 m) tulemused on esitatud Joonis 4.6. Suuremad erinevused esinevad väikeste soojusläbivuste korral, mille puhul (Andrew Wright, 1988) ja (Kissock et al., 2013) meetodite nõutav soojustuse paksus erineb teistest lausa mitmesaja millimeetri võrra.



Joonis 4.6 Hoone 1 vajaminev põranda soojustuse paksus erinevate meetoditega arvutades kindla soojusläbivuse saavutamiseks.

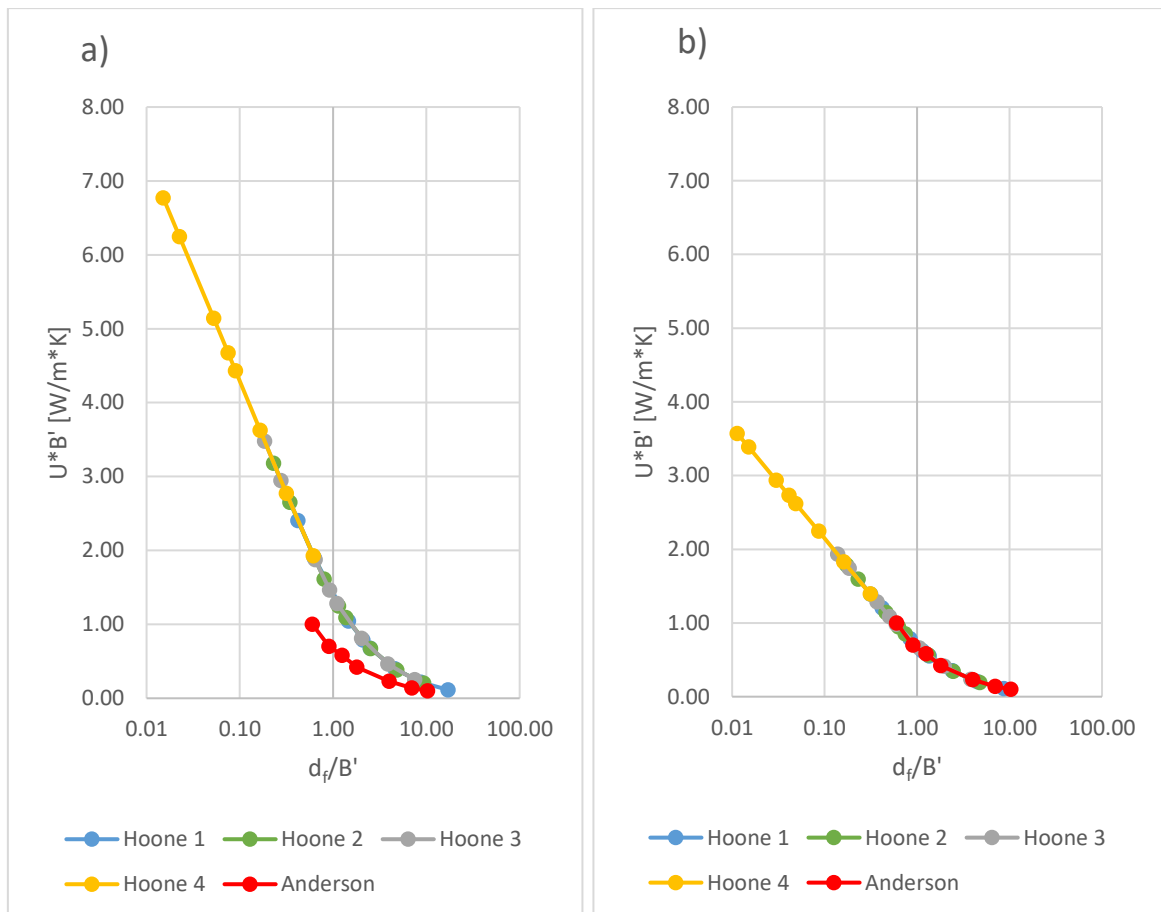
Vaadeldes eraldi, kui täpseid tulemusi andis käesoleva töö põhifookuses olev ISO 13370 meetod, siis saab öelda, et läbivalt on olenemata põranda mahust täpsus hea. Tulemus erineb veidi rohkem vaid hoone 4 (100x200 m) korral, kuid ka siis erineb kõige rohkem vaid 6 %, olenemata sellest, et EN ISO 13370 arvutusreeglite kohaselt kuulub ka kõige paksema ehk 800 mm soojustusega 4. hoone põrand „soojustamata ja mõõdukalt soojustatud“ põrandate hulka (vt ptk 4.4). Antud standardis esitatud valemite esialgse kuju pakkus välja Hagentoft (Hagentoft, 1988) läbi numbrilise määramise, kuid mille täpsustas 1991. aasta töös B. R. Anderson (Anderson, 1991), kaotades vajaduse graafikult soojuskao teguri määramiseks ning võttes arvesse ka

seina paksuse mõju. Töös tuletas ta vastavad valemid, mida ISO 13370 standardimeetod tänaseni kasutab, küll veidi modifitseeritud kujul. Anderson valideeris väljatöötatud valemite toimivust numbriliste meetoditega. Joonis 4.7 on x-teljel põranda ekvivalentse paksuse ja tunnusmõõdu suhe, y-teljel soojuslähivuse ja tunnusmõõdu korrutis. Punktiirjoonega on kujutatud Andersoni pakutud valem soojustamata ja vähesoojustatud põranda soojuslähivuse arvutamiseks ning pidevjoonega valem hästi soojustatud põrandate kohta. Punktidega on märgitud numbriliste meetoditega teostatud kontrollarvutused erinevate põranda geomeetria korral, mis näitab tulemuste omavahelist kattuvust.



Joonis 4.7 Andersoni pakutud valemite valideering numbriliste meetoditega. (Anderson, 1991)

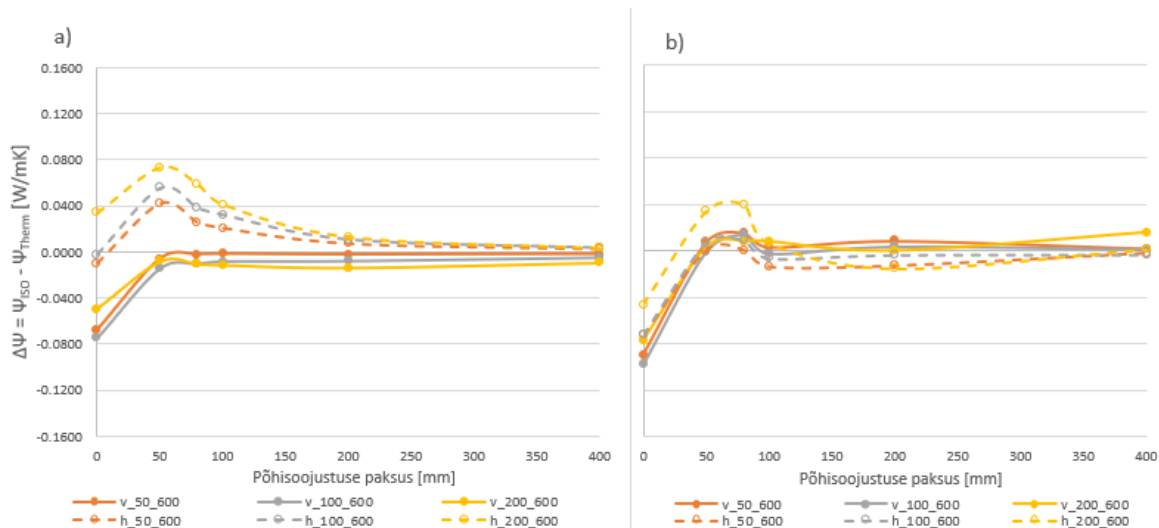
Kui samale valideeritud punktidega graafikule tõsta käesolevas töös ISO 13370 meetodiga arvatud tulemused, siis on graafiku jooned omavahel nihkes (vt Joonis 4.8a). Erinevus tuleneb tõenäoliselt pinnase soojuseri juhtivusest, sest kui selleks valida 2,0 asemel 1,0 W/(m*K), mis iseloomustab näiteks mudast või möllist liivpinnast, siis asuvad tulemused kõik ühel joonel (vt Joonis 4.8b), ehk Andersoni tuletatud valemid on ilmselt valideeritud just selle pinnase soojuseri juhtivuse juures ning graafikul esitatud teljeväärtuste piires põranda geomeetria ja soojustatuse suhtes. Jooniselt nähtub veel ka seda, et paljud käesoleva töö tulemused asuvad väljaspool Andersoni poolt valideeritud piirkonda, kuid järgivad seejuures valideeritud tulemustega sama joont ning nagu standardimeetodi tulemustest selgub, kehtivad.



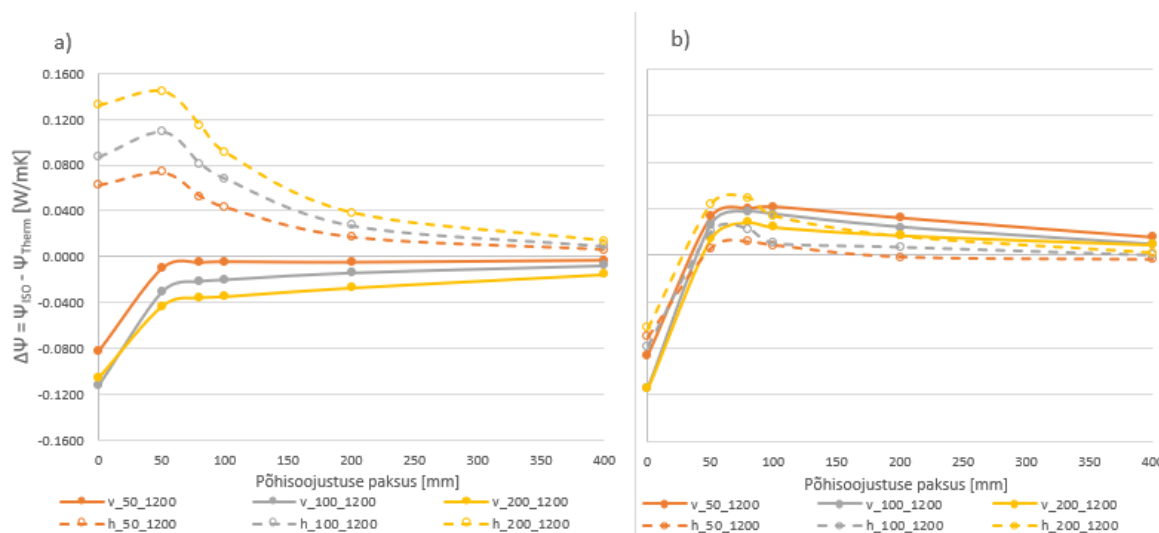
Joonis 4.8 EN ISO 13370 tulemuste valideerimine pinnase soojuseri juhtivuse a) $\lambda_g = 2,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ b) $\lambda_g = 1,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ korral.

4.3 Servasoojustus

Servasoojustuse mõju uurimisel analüüsiti EN ISO 13370 standardi lisas D esitatud meetoditega arvatatud joonsooju läbivuse vähenemist põranda servas võrreldes Therm'i samade tulemustega. Selle eesmärk oli hinnata standardimeetodi täpsust erinevate põranda geomeetria korral ja uurida täpsuse muutumist põhisoostuse paksuse suurenedes. See ISO 13370 joonsooju läbivuse muudu erinevus Thermi suhtes on hoonete 2 (6x16 m) ja 4 (100x200 m) kohta esitatud Joonis 4.9 ja Joonis 4.10.



Joonis 4.9 a) Hoone 2 6x16m b) hoone 4 100x200m – EN ISO 13370 joonsoojuslähivuse muut servasoojustusest võrreldes Therm'iga. Servasoojustuse pikkus 600 mm.

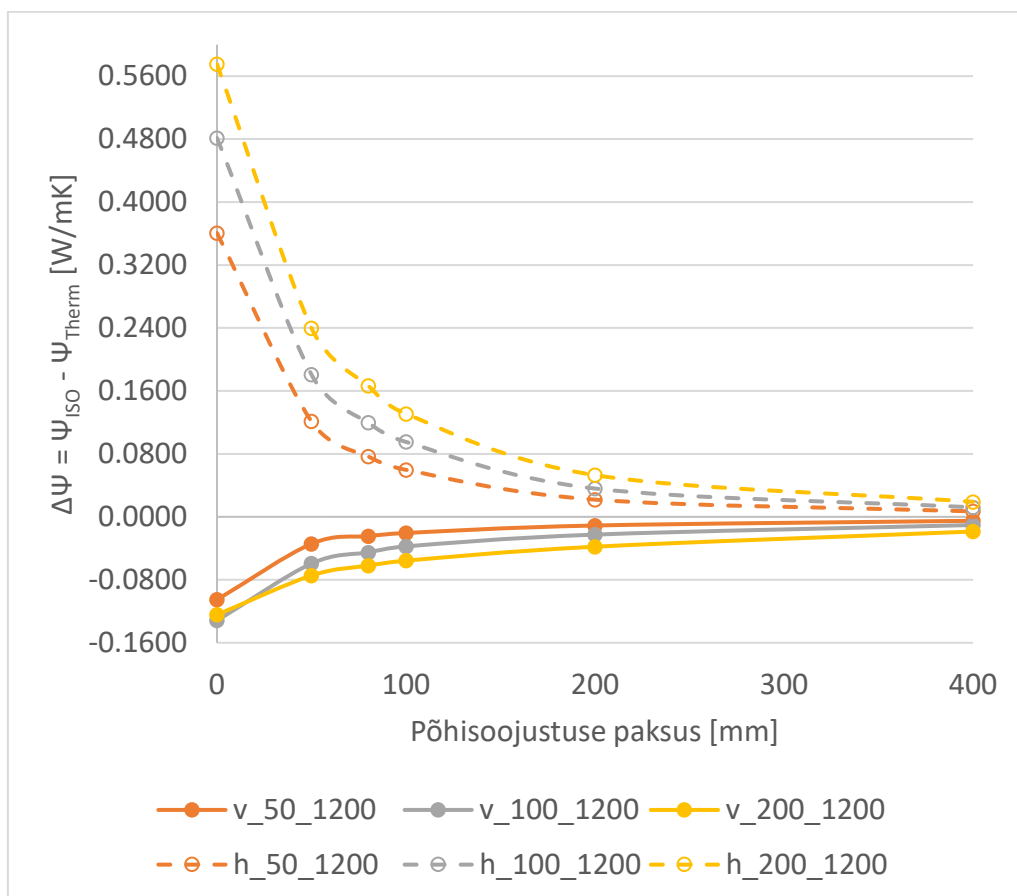


Joonis 4.10 a) Hoone 2 6x16m b) hoone 4 100x200m - ISO 13370 joonsoojuslähivuse muut servasoojustusest võrreldes Therm'iga. Servasoojustuse pikkus 1200 mm.

Graafikutel on vertikaalse põranda servasoojustuse tulemused esitatud pidevjoonega ning punktiirjoonega on kujutatud sama paksu ja laia horisontaalse servasoojustuse tulemused. Kõigi tüüphoonete vastavad graafikud on esitatud lisan 5. Lähivalt olid kõikide hoonete tulemustest koostatud graafikud sama servasoojustuse suuna korral ühesuguse kujuga. Erinevused esinesid hooneti, ehk erineva põranda geomeetria korral.

Horisontaalse servasoojustuse korral annab ISO 13370 väiksema joonsoojuslähivuse parandi servasoojustusest, ehk põranda soojuslähivus tuleb tagavara kasuks. Standardimeetodite joonsoojuslähivuse parandite erinevused Thermi suhtes jäävad

vahemikku $-0,02$ kuni $+0,58$ $W/(m^*K)$. Erandiks selle juures on hoone 4 massiivpõrand, mille korral annab standardimeetod lühema servasoojustusega olukorras soojustamata ja hästi soojustatud põrandale suurema joonsoojuslähivuse parandi kui Therm, ehk alahindab antud arvutusolukorras soojuslevi läbi põranda servaala. Parandite erinevus on seejuures vahemikus $-0,07$ kuni $+0,04$ W/m^*K . Pikema servasoojustuse korral on pilt sarnane, kuid graafik asub kõrgemal, ehk sama olukord soojustamata põrandate korral, kuid ülejäänud põhisoojustuse paksuste juures on ISO 13370 tulemus pigem tagavara kasuks ning täpsus põhisoojustuse paksuse kasvades isegi suureneb. Põhisoojustusega põrandate korral on parandite erinevus vahemikus 0 kuni $+0,05$ $W/(m^*K)$. Horisontaalse servasoojustuse korral on erandiks veel ka hoone 1 pikema servasoojustusega arvutusolukorras, mille tulemused soojustamata põrandate korral annavad võrreldes teiste tüüphoonetega mitu korda suurema tulemuse tagavara kasuks (vt Joonis 4.11). Siinkohal peitub põhjus tõenäoliselt selles, et servasoojustuse laius $L=1200$ mm kattub hoone poole tunnismõõduga (valem 3.1) ehk Thermi arvutuses kasutatava põrandaosa laiusel. See teeb sellest põhisoojustuse arvutusolukorra ning servasoojustuse valemid sellisel juhul ei kehti ning tulemused ei ole võrreldavad teiste hoonetega.



Joonis 4.11 Hoone 1 (4x6m) ISO 13370 joonsoojuslähivuse muut servasoojustusest võrreldes Therm'iga. Servasoojustuse pikkus 1200 mm.

Vertikaalse servasoojustuse korral on pilt üldjoontes vastupidine horisontaalse servasoojustuse tulemustele. Läbivalt annab ISO 13370 väiksemate hoonete korral (tüüphooned 1-3) suurema joonsoojuslähivuse parandi kui Therm, seda eriti ilma põhisoojustusega pörandate korral, ehk meetod nendes tingimustes alahindab tegelikke soojuskadusid läbi pörandate servaala. Kuid arvvaärtustelt on ISO 13370 ning Thermi joonsoojuslähivuse parandite erinevused põhisoojustusega pörandates väiksed, jäädes vahemikku $-0,07$ kuni $0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Erandiks on ka vertikaalse servasoojustuse korral massiivpörand, ehk hoone 4, mille korral annab standardimeetod tulemused soojustamata pörandate korral tagavara kasuks, kuid teistel juhtudel põhisoojustusega pörandate korral pikema servasoojustusega olukorras tagavara kahjuks, ehk alahindab soojuskadusid, kuid lühema servasoojustuse korral, nii tagavara kasuks kui ka kahjuks. Kasulikemaid tulemusi, ehk tagavara kasuks annab standardimeetod põhisoojustuse paksuste 50-200 mm juures. Ka selle hoone puhul jäävad need parandite erinevused põhisoojustusega pörandate korral arviliselt väikseks, olles vahemikus $-0,002$ kuni $+0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$.

4.4 Tulemuste hindamine

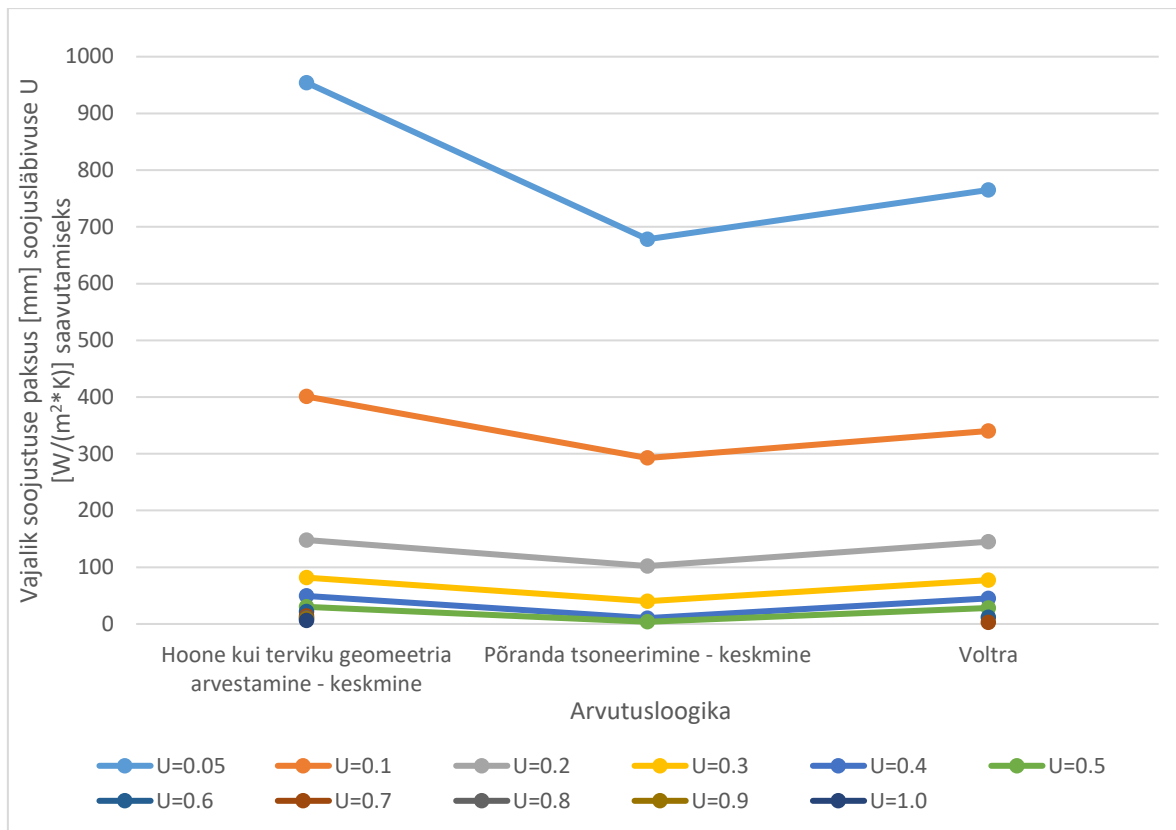
EN ISO 13370 pinnasele toetatud pörandate soojuslähivuste tulemustes esineb erandlikke juhtumeid, mis ülejäänud tulemuste loogikat eiravad. Standardimeetod hindab erinevate pörandate geomeetriate korral väga erinevalt pörandate soojustatust. Väiksemate hoonete korral on pörand „hästi soojustatud“ juba 50 mm soojustuse korral. Suure pörandate korral (hoone 4) on aga ka 800 mm soojustuse korral tegu „soojustamata või mõõdukalt soojustatud“ pörandaga. Selleks, et hoone 4 kategoriseeruks hästi soojustatud pörandate alla peaks soojustuse paksus pörandate all olema $u \geq 1350 \text{ mm}$, ehk standardimeetodis puudub tunnuste „soojustamata ja hästi soojustatud“ taga loogikaline seos soojustatuse hindamiseks soojustuse mahu poolest. Soojustamata pörandate valem aga selle tegelikult väga hästi soojustatud pörandate korral kehtib ning kui võrdluseks arvutada antud pörandate soojuslähivus reeglitevastaselt hästi soojustatud pörandate valemiga, saab tulemused, mis erinevad oluliselt kuni 39%, ehk nii-öelda loogikavastast soojustamata pörandate valemi kasutamine on siiski tulemuste poolest õigustatud, kuid vajaks sellisel kujul standardis paremat sõnastust või kirjeldust segaduse vältimiseks.

Väga suurte pörandate korral võivad ka tähtsusetult väiksed tunduvad tulemuste ebatäpsused omada väga suuri tagajärgi tegelikule energia tarbimisele. Olgugi et arviliselt on paksu soojustuse korral tegu väga väikeste soojuslähivuste väärtustega ($0,03-0,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$), siis niivõrd suure pörandate, nagu käesolevas töös uuritud 100×200

m pöranda korral hindab juba 5 % erinevus soojuskadusid väga suures mahus valesti. Võrdluseks näiteks käesolevas töös saadud Voltra ja (Soome keskkonnaministeerium, 2003) tulemused 4. hoone ning soojustuse paksuse 400 mm korral. SRMK C4 hindab selles olukorras soojusläbivust läbi pöranda $0,036 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ võrra väiksemaks. Selline erinevus tagavara kahjuks tähendab aga soojuskadude mahtu $0,036 \times 100 \times 200 = 720 \text{ W/K}$. Võrdluseks (Palanen & Pedassaar, 2023) lõputöös uuritud renoveerimata korterelamu aadressil Liiva 19, Võru köetava pinnaga ligi 270 m^2 , mille kogu hoone tarindite soojuskadu on 604.2 W/K . See näitab kui oluline on selliste suurte pörandate korral ka niivõrd väikeste soojusläbivuste juures tegeliku soojuskao täpne hindamine.

1999. aasta uuring (Rees et al., 1999) leidis, et toona uuritud meetoditest ongi just ISO 13370 standardimeetod kõige täpsem ning paindlikum viis erinevate pörandate soojusläbivuste arvutamiseks. Antud standardimeetodiga sarnase arvutusloogika on pakkunud ka (Andrew Wright, 1988) ja (Kissock et al., 2013), kelle valemid kasutavad samuti mingil kujul tegurit, mis tuleneb pöranda geomeetriast. Wright'i väga lihtsustatud meetod koos käesolevas töös tehtud eeldustega (vt ptk 3.2.1) osutus väga heaks arvutusmeetodiks massiivse pöranda pinnasele toetatud pöranda soojusläbivuse hindamiseks. Suhteline viga oli küll EN ISO 13370 meetodiga võrdne, kuid seda tagavara kasuks, ehk annaks pöranda projekteerimisel eelistatuma tulemuse energiatõhususe seisukohalt. Kissock'i empiirilistelt tuletatud valemite tulemused ilmestavad hästi tuletuse aluseks olnud pöranda geomeetriaid. Valemid on tuletatud ette arvutatud tulemuste põhjal viie hoone peal, mille pöranda mõõtmed on $12 \times 12 \text{ m}$ kuni $12 \times 36 \text{ m}$ ning seejärel on tulemuste peal rakendatud regressiooni, leitud teguritele vastavad konstandid ning antud valem. Seetõttu on hästi põhjendatav Kissock'i tulemuste erinemine sellega, et käesolevas töös uuritud pörandate mõõtmed on regressioonimudeli treeningandmete piirist väljast ja seetõttu ei olegi oodata tulemuste head kokkulangevust.

Vaadeldes lihtsustatud arvutusmeetodeid üldisemalt, grupeeritult lähtuvalt arvutusloogikast (vt Tabel 3.1), siis nähtub, et keskmiselt annavad täpsemaid tulemusi pöranda geomeetria tervikuna vaatlevad arvutusmeetodid võrreldes pörandatsoonereimist rakendavate meetoditega (Joonis 4.12). Isegi kui mõnedel juhtudel on tsoneerimist rakendanud tulemused Voltrale lähemad, siis on need üldjuhul tagavara kahjuks. Ainsaks erandiks käesoleva töö andmetest on siinjuures väga väike pörand, ehk hoone 1 ($4 \times 6 \text{ m}$) väga väikeste soojusläbivuste korral, mille puhul pörandatsoonereimine annab Voltrale lähedasemaid tulemusi. Erinevus võib tuleneda sellest, et näiteks SNIP'i puhul kuulub kogu pörand, tulenevalt väiksest laiuselt ühte alasse, ehk tsoneerimist tegelikult ei toimu. Kõigi tüüphoonete vastavad graafikud on esitatud lisas 7.



Joonis 4.12 Hoone 2 (6x16 m) vajalik soojustuse paksus konkreetse soojuslähivuse saavutamiseks, arvatuna arvutusloogikate keskmisena.

Käesoleva töö servasoojustuse mõju tulemused näitavad aga üheselt, et väikeste kuni mõõdukate põrandate korral on standardis (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017c) esitatud meetodid kaldu eelistamaks põranda perimeetril verikaalselt paigaldatud servasoojustuse kasutamist, andes nendel juhtudel põranda servale suurema joonsoojuslähivuse parandi. Võrdlus Therm'i tulemustega näitab aga, et arvutuste õigsuse seisukohalt tuleks pigem kasutada horisontaalset servasoojustust, saades seeläbi tulemus mõnevõrra tagavara kasuks, hinnates seläbi täpsemini hoone tegelikku energiatõhusust.

5. JÄRELDUSED

5.1 Põhisoojustus

Arvutustarkvaradega, eriti just dünaamilisteks arvutusteks mõeldud tarkvaradega on võimalik arvutusmudeleid erinevatel viisidel seadistada, et arvestada erinevate täiendavate teguritega, mis päris elus esineda võivad ning millega staatilised ning lihtsustatud arvutusmeetodid ei võimalda arvestada. Selliste programmide kasutamine eeldab aga nende hästi tundmist ning erinevate seadistuste mõjust aru saamist, mis ka käesoleva töö puhul oli kõige keerulisemaks ning aeganõudvamaks osaks, arvestades, et arvutusmudeleid, mille jaoks oli vaja joonestada või modelleerida geomeetria ning mille simulatsiooniarvutused võtsid ühe mudeli jaoks tihtipeale mitmeid tunde aega, oli käesolevas töös ligi 700 tükki. Sellise töömahu ning ajakulu juures on igati õigustatud ning lausa hädavajalik lihtsustatud meetodite olemasolu. Tulemustest selgub, et ka nendega on võimalik väga täpseid tulemusi saada ning seda erinevate põranda mahtude juures. Kindlasti vajaks see teema aga ka täiendavat uurimist ning kinnitamist keerukamate põranda eomeetria korral ning erinevate pinnasele toetatud põrandate soojustamise lahenduste juures, mis samuti laialt levinud on, nagu näiteks põranda perimeetri väline soojustamine või täiendava nurgasoojustuse kasutamine.

Programmidega teostatud simulatsiooniarvutuste omavaheline võrdlus erinevate seadistuste korral näitab, et mõningad dünaamilised parameetrid taanduvad aastases tsüklis arvutusest välja, nagu näiteks Voltra arvutusmudelis määratud jää faasimuutuse soojus. Märk pinnas annab talveperioodil väiksema soojusvoolu kui kuiv pinnas, sest jää faasimuutus ei luba pinnase temperatuuril nii madalale langeda, kui see kuivas pinnases langeb. Samas suveperioodil on märjas pinnases soojusvool suurem, sest pinnas ei soojene nii kiiresti üles, kui kuiva pinnasega arvutusmudelil. Selliselt sai Voltraga arvutades kuiva ja märja pinnasega tulemuste erinevuse kõigest 0,1 %. Sellest järeldub, et mõningaid dünaamilisi parameetreid on võimalik eirata, lihtsustades ja kiirendades seeläbi simulatsiooniarvutust.

Käesoleva töö fookuses olev standardimeetod (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2017c) pinnasele toetatud põranda soojuslähivuse arvutamiseks annab lihtsustatud meetoditest kõige täpsemaid tulemusi väiksemate kuni mõõdukate põrandate korral. Väga suurte põrandate korral võiks aga eelistada (Andrew Wright, 1988)'i, põranda tsoneerimist rakendava (<http://www.snip.com/>, 2003)'i või numbrilist (Hagentoft, 1988)'i meetodit, kuid tuleks siinkohal tähele panna ka käesolevas töös tehtud eeldusi Wright'i meetodiga seoses (vt ptk 3.2.1). Antud meetodid andsid

standardimeetodiga võrdväärset või ka isegi täpsemad tulemused, kuid mis veel olulisem, seda erinevalt EN ISO 13370 meetodist mõnevõrra tagavara kasuks.

(Kissock et al., 2013)´i empiirilistelt tuletatud meetodi tulemused peegeldavad hästi, millised põrandad olid valemi välja töötamisel uurimise all ning milliste soojusjärete korral, kehtides vaid väga kindlates piirides. Empiirilistelt tuletatud valemid vajavad seega laiemat kontrolli muudel tingimustel ning seeläbi väga selgelt piiritletud kehtivuse ja kasutuspiirkonna määramist.

Erinevaid põranda soojuslähivuse parandeid kasutav Taani standard (Dans Standard, 2011) kehtib hästi ridaelamu tüüpi hoone korral ning ka väikeelamu puhul paksema soojusjärete korral. Sellest saab järeldada, et Taani kliima järgi määratud parameetrid vajaksid Eestis kasutamisel mõningast täpsustamist.

Ülejäänud lihtsustatud meetodid (Seppänen, 2001; Soome keskkonnaministeerium, 2003; Spooner, 1982) pinnasele toetatud põranda soojuslähivuse arvutamiseks oluliselt ala- või ülehindavad soojuskadusid läbi põranda, olles täpsed vaid väga piiritletud vahemikes, ehk meetodid teevad liigseid tulemusi suurelt mõjutavaid lihtsustusi.

5.2 Servasoojustus

Servasoojustuse mõju korral joonistub tulemustest välja väiksemate kuni mõõdukate põrandate puhul (tüüphooned 1 kuni 3) ühesugune pilt. EN ISO 13370 valemite kohaselt vähendab põranda servaala joonsoojuslähivust paremini just vertikaalse servasoojustuse paigaldamine, kuid võrdlus Therm´i tulemustega ütleb, et standardimeetod hindab selle suurusjärku valesti ning seda tagavara kahjuks. See tekitab aga olukorra, kus tõenäeliselt paigaldatakse seeläbi põranda servaala soojustust rohkem vertikaalselt, kuid hinnates seejuures valesti soojuskadude mahtu ning ka hoone kui terviku energiatõhusust. Sellest tulenevalt tuleks arvutuslikust seisukohast eelistada horisontaalse servasoojustuse paigaldamist, sest selliselt on võimalik tulemust täpsemini hinnata ning seda pigem tagavara kasuks.

Massiivpõranda korral pole aga vahet, millise suunaga põranda servaala soojustus paigaldada, kas horisontaalselt või vertikaalselt, sest joonsoojuslähivuse parandi muudud saadakse mõlema variandi puhul praktiliselt ühesugused, ehk erinevalt väiksematest põrandatest ei teki olukorda, kus üks variant hindaks soojuskadusid valesti. Tulemuste põhjal tuleks aga kriitiline olla ilma põhisoojuseta põrandate korral, sest standardimeetod hindab selles olukorras servasoojustuse mõju liiga suurelt.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö raames on uuritud üheksat lihtsustatud meetodit pinnasele toetatud põranda soojusläbivuse arvutamiseks. Samuti teostati arvutused nelja tarkvaraga, mis võimaldasid arvutusi teostada nii kahe- kui kolmemõõtmeliselt ning nii staatiliste kui ka dünaamiliste ääritingimustega. Võrdluseks loodi 4 tüüphoonet põrandate mahuga vahemikus 4x6 kuni 100x200 m põrandaaluse põhisoojustuse paksustega kuni 800 mm. Lihtsustatud meetodite tulemusi võrreldi referentsiks valitud dünaamilist kolmemõõtmelist soojuslevi arvutust teostava Voltra tarkvara tulemustega. Töö põhifookuses olevale lihtsustatud meetodile EN ISO 13370 tervikliku hinnangu andmiseks uuriti ka põranda servasoojustuse mõju, võrreldes standardimeetodi tulemusi tarkvaraga Therm erineva paksuse, pikkuse ja suunaga paigaldatud servasoojustuste korral. Erinevate soojuslevi arvutust teostavate tarkvarade keerukus ning simulatsiooniarvutuste ajakulu näitasid, kui oluline on täpsete lihtsustatud arvutusmeetodite olemasolu. Võrreldud arvutustarkvarade mudelid oli käesolevas töös ligi 700.

Uuritud lihtsustatud meetoditest osutus põranda mahu kuni 6x60 m korral kõige täpsemaks standardimeetod EN ISO 13370, erinedes dünaamilisest Voltra simulatsiooniarvutusest kuni 3 % tagavara kahjuks. Seega tuleks antud meetodiga arvutades tulemusi mõningase tagavara saamiseks pigem veidi suuremaks ümardada, ehk kasutada saadud tulemusest mõnevõrra paksemat põranda soojustust. Väga suure põranda korral, nagu käesolevas töös uuritud 100x200 m põrand, võiks aga eelistada meetodeid autoritelt Wright või Hagentoft või ka Vene standardit SNIP, sest antud olukorras annavad just need meetodid eelistatud mõneprotsendilise tulemuse erinevuse tagavara kasuks võrreldes samuti dünaamilise simulatsiooniarvutusega. Nende leitud seoste kehtivust tuleks aga kindlasti ka täiendavalt uurida erinevate keerukamate põranda geomeetria ning põranda soojustamise lahenduste korral.

Servasoojustuse mõju uurimise tulemustest selgus EN ISO 13370 standardimeetodi kalduvus eelistada põranda servas põranda mahu kuni 6x60 m korral vertikaalselt paigaldatud servasoojustuse paigaldamist. Võrdlus tarkvara Therm tulemustega näitab aga, et standardimeetod annab põranda servale liiga suure joonsoojusläbivuse parandi ning et lõpliku tulemuse õigsuse seisukohalt tuleks pigem eelistada horisontaalset servasoojustust, mille korral annab standardimeetod tulemuse mõningase varuga tagavara kasuks

Käesoleva lõputöö teema on osa ka laiemast uuringust ning töö tulemused väljastatakse „*Journal of Building Physics*“ eriväljaandes. Väljastajaks on *Sage Journals*.

SUMMARY

This master's thesis studies nine simplified methods for calculating the heat transfer through a ground supported floor. Additionally, calculations were carried out using four software programs, which allowed for both 2D and 3D heat transfer calculations, as well as defining static and dynamic boundary conditions. For comparison, four reference buildings were created with floor areas ranging from 4x6 to 100x200 m and with subfloor insulation thickness up to 800 mm. The results of the simplified methods were compared with those obtained from the dynamic 3D heat transfer calculation performed using the Voltra software, which was selected as the reference. To provide a comprehensive evaluation of the simplified method of EN ISO 13370, the impact of floor edge insulation was also studied by comparing the standard method's results with those from the Therm software for various thicknesses, lengths, and orientations of edge insulation. The complexity of the different heat transfer calculation softwares and the time required for simulations highlighted the importance of having accurate simplified calculation methods. In this study, nearly 700 models of the compared calculation programs were used.

Among the simplified methods investigated, the most accurate for floor areas up to 6x60 m was the standard method of EN ISO 13370, differing from the dynamic Voltra simulation calculation by up to 3% against the reserve. Therefore, when using this method, the results should be rounded slightly higher to provide some margin, meaning a slightly thicker floor insulation should be used. For very large floors, such as the 100x200 m floor studied in this work, methods by authors like Wright or Hagentoft, or the Russian standard SNIP, should be preferred, as these methods yield a small percentage difference in favor of the reserve compared to the dynamic simulation. However, the validity of these findings should be further investigated and confirmed in the context of more complex floor geometries and insulation solutions.

The investigation of edge insulation effects revealed the tendency of the EN ISO 13370 standard method to favor vertical edge insulation for floors up to 6x60 m. However, a comparison with Therm software results shows that the standard method provides too large a correction for heat transfer at the floor edge, and from the perspective of result accuracy, horizontal edge insulation should be preferred, as the standard method in this case gives a result with a small margin in favor of the reserve.

The topic of this thesis is also part of a broader study, and the results will be published in a special issue of the "Journal of Building Physics", published by Sage Journals.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Anderson, B. R. (1991). Calculation of the Steady-State Heat Transfer Through a Slab-on-Ground Floor. *ScienceDirect*, 26(4).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/036013239190067L>
2. Andrew Wright. (1988). Heat flows from solid ground floors in buildings: Simple calculation model. *Sage Journals*, 9(4).
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/014362448800900405>
3. Blomberg, T. (1996). Heat conduction in two and three dimensions: Computer modelling of building physics applications. *Research Portal*.
<https://portal.research.lu.se/en/publications/heat-conduction-in-two-and-three-dimensions-computer-modelling-of>
4. Dans Standard. (2011). *Calculation of heat loss from buildings* (No. DS 418; Version 2011). Dans Standard. <https://webshop.ds.dk/standard/M337200/ds-418-2011-till-1-2020>
5. Eesti Ehitusteave. (2001). *ET-2 0505-PP12 PP 1 PÕRANDAD PINNASEL*. Eesti Ehitusteave. https://www.ehitusteave.ee/Tooted_ET_2.php
6. Eesti Keskkonnaagentuur. (2024). *Ajaloolised ilmaandmed* [Dataset].
<https://www.ilmateenistus.ee/kliima/ajaloolised-ilmaandmed/>
7. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus. (2013). *Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisise kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid* (No. EVS-EN ISO 13788; Version 2012). <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13788-2012>
8. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus. (2017a). *Thermal performance of building components—Dynamic thermal characteristics—Calculation methods* (No. EVS-EN ISO 13786; Version 2017). Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13786-2017>
9. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus. (2017b). *Hoonete piirdetarindid ja komponendid. Soojustakistus ja soojusläbivus. Arvutusmeetodid* (No. EVS-EN ISO 6946; Version 2017). <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-6946-2017>
10. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus. (2017c). *Hoonete soojuslik toimivus. Soojuslevi pinnasesse. Arvutusmeetodid* (No. EVS-EN ISO 13370; Version 2017). Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13370-2017>
11. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus. (2017d). *Külmasillad hoones. Soojusvoolud ja pinnatemperatuurid. Detailsed arvutused* (No. EVS-EN ISO 10211; Version 2017). <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-10211-2017>
12. Enerdata. (2021). *Energy efficiency trends in buildings in the EU*.
<https://www.odyssee-mure.eu/publications/policy-brief/buildings-energy-efficiency-trends.html>
13. Euroopa Komisjoni Statistikaamet. (2024). *Energy consumption in households*. Euroopa Komisjoni Statistikaamet. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households
14. Hagentoft, C.-E. (1988). Heat loss to the ground from a building: Slab on the ground and cellar. *Research Portal*. <https://portal.research.lu.se/en/publications/heat-loss-to-the-ground-from-a-building-slab-on-the-ground-and-ce>
15. <http://www.snip.com/>. (2003). *Volume 27: Energy And Thermal Engineering* (No. 27). <http://www.snip.com/index.php?Page=167#C27>

16. Kalamees, T., & Kurnitski, J. (2006). Estonian test reference year for energy calculations. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/238772626_Estonian_test_reference_year_for_energy_calculations
17. Kissock, K., Raghavan, N., & Selvacanabady, A. (2013). Simplified Model for Ground Heat Transfer from Slab-On-Grade Buildings. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/268095059_Simplified_Model_for_Ground_Heat_Transfer_from_Slab-On-Grade_Buildings_DE-13-041
18. KredEx. (2017). *LIGINULLENERGIA ELUHOONED RIDA- JA KORTERELAMUD*. https://kredex.ee/sites/default/files/2019-03/Liginullenergia_eluhooned_Rida_ja_korterelamu_juhend.pdf
19. Lawrence Berkeley Rahvuslik Laboratoorium. (2006, juuni 20). *Conrad 5 & Viewer 5 Technical and Programming Documentation*. Lawrence Berkeley Rahvuslik Laboratoorium. <https://windows.lbl.gov/sites/default/files/Downloads/conrad-and-viewer-06-20-06.pdf>
20. Nicolai, A., Grunewald, J., & Zhang, J. J. (2015). *Delphin 5 User manual and program reference*. Technische Universität Dresden. <https://bauklimatik-dresden.de/delphin/documentation.php>
21. Palanen, A., & Pedassaar, L. (2023). *ENERGIATÕHUSUSE PARANDAMISE VÕIMALUSED VÕRU LINNA MILJÖÖVÄÄRTUSLIKE HOONETE NÄITEL*. Tallinna Tehnikakõrgkool.
https://kliimaministeerium.ee/sites/default/files/documents/2024-05/2023_V%C3%B5ru%20stsenaariumid_TKTK%20%C3%B5put%C3%B6%C3%B6_palanen_pedassaar.pdf
22. Physibel. (2020). *M6—Voltra manual*. Physibel.
<https://www.physibel.be/fr/knowledge>
23. Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M., & Thomas, H. R. (1999). Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *ScienceDirect*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032199000180>
24. Seppänen, O. (2001). *Rakennusten Lämmitys*. Suomen LVI-liitto ry.
25. Soome keskkonnaministeerium. (2003). *Keskkonnaministeeriumi määrus soojusisolatsiooni kohta* (No. C4). <https://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>
26. Spooner, D. C. (1982). Heat loss measurements through an insulated domestic ground floor. *Sage Journals*, 3(4).
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/014362448200300401>

LISAD

LISA 1 SRMK C4 MEETODI SOOJUSTAKISTUSTE VÄÄRTUSED

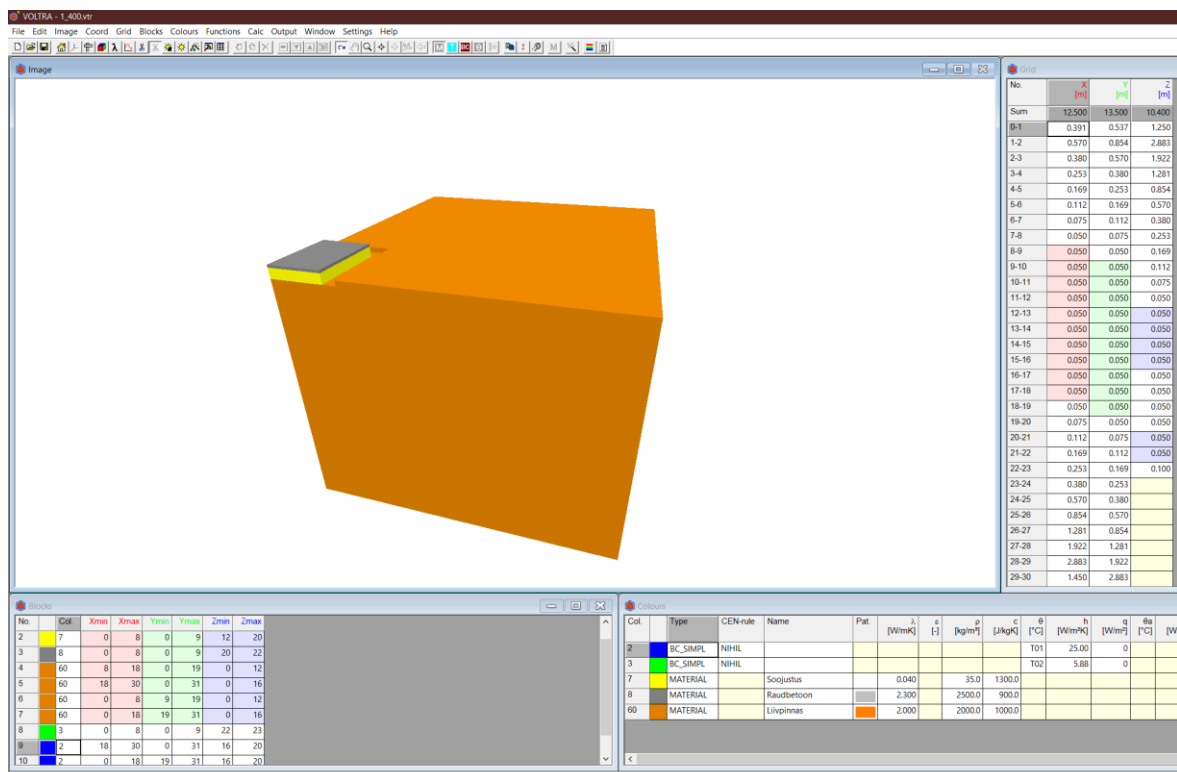
Järgnevalt on esitatud SRMK C4 lihtsustatud arvutusmeetodis kasutatud tabuleeritud õhkvahe, pinnase (ääre- ja siseala) ning õhukese konstruktsioonikihi soojustakistused.

Tabel L1.1 SRMK C4 arvutusmeetodis esitatud õhkvahe, pinnase (ääre- ja siseala) ning õhukese konstruktsioonikihi soojustakistused.

TABLE 6. GROUND HEAT RESISTANCE R_b WHEN FOUNDATIONS AND SUBSOIL ARE PERMANENTLY DRIED					
Soil material	Normal thermal conductivity γ_n	Earth's thermal resistance R_b m ² K/W			
		Base soil under the base		The land next to the foundation wall	
		edge area	interior area	edge area	interior area
	W/m K				
1	2 3456				
Clay					
Sand and gravel, drained	1.4	0.8	3.20	0.40	1.60
Sand and sand					
Sand and gravel, undrained Moraine	2,3	0.50	2.00	0.25	1.00
Rock	3.5	0.30	1.20	0.15	0.60

LISA 2 VOLTRA ARVUTUSMUDELI NÄIDE

Järgnevalt on esitatud tüüppoone 1 Voltra arvutusmodeli näide 400 mm põhisoojustuse korral kuiva pinnasega olukorras. Paremal küljel näha telgede jaotus ehk mudeli arvutusvõrgu tihedus, mis on tihedam põranda perimeetril ja soojustuse serva all. Paremal all on näha materjalide parameetrid.



Joonis L2.1 Voltra arvutusmodeli näide.

LISA 3 PÕRANDATE SOOJSLÄBIVUSED JA VÕRDUS TABELI KUJUL

Järgnevalt on esitatud kõigi põrandate soojuslääbivused ning nende võrdlus Voltraga saadud soojuslääbivuste suhtes tabeli kujul.

Tabel L3.1 Hoone 1 põrandate soojuslääbivused erinevate meetoditega arvatades.

Põrandate soojuslääbivus U [W/m ² *K]																			
HOONE 1	Arvutusmeetod																		
Soojustuse paksus	Voltra (kuiv)	Voltra (const)	Voltra	Delphin (kuiv)	Delphin	Delphin (const)	Delphin (RH1m)	Heat3	Therm	ISO 13370	SNIP	DS 418	A. J. Wright	Hagen toft	Kissock	Seppänen	SRMK C4	Spooner_sim	Spooner_us
0	1.027	1.027	1.027	0.996	1.048	0.996	0.986	1.011	1.009	1.001	0.476	0.584	1.259	1.467	0.765	0.541	0.688	2.292	3.337
10	0.814	0.814	0.814	0.798	0.837	0.800	0.789	0.803	0.807	0.792	0.426	0.509	0.896	1.026	0.660	0.461	0.587	1.308	1.680
50	0.450	0.450	0.450	0.447	0.466	0.448	0.440	0.447	0.450	0.434	0.299	0.337	0.425	0.506	0.451	0.300	0.370	0.534	0.563
80	0.337	0.337	0.337	0.336	0.352	0.336	0.332	0.336	0.338	0.328	0.244	0.269	0.310	0.367	0.370	0.241	0.290	0.377	0.375
100	0.289	0.289	0.289	0.288	0.302	0.289	0.286	0.288	0.290	0.282	0.217	0.237	0.264	0.310	0.331	0.213	0.253	0.316	0.307
200	0.169	0.169	0.169	0.169	0.176	0.169	0.167	0.168	0.169	0.165	0.141	0.149	0.157	0.175	0.219	0.136	0.155	0.175	0.161
400	0.091	0.091	0.091	0.091	0.094	0.091	0.089	0.091	0.091	0.090	0.083	0.085	0.095	0.093	0.131	0.080	0.087	0.093	0.083
800	0.048	0.048	0.048	0.047	0.049	0.048	0.046	0.048	0.048	0.048	0.045	0.046	0.061	0.048	0.073	0.044	0.047	0.048	0.042

Tabel L3.2 Hoone 2 põrandate soojuslääbivused erinevate meetoditega arvatades.

Põrandate soojuslääbivus U [W/m ² *K]																			
HOONE 2	Arvutusmeetod																		
Soojustuse paksus	Voltra (kuiv)	Voltra (const)	Voltra	Delphin (kuiv)	Delphin	Delphin (const)	Delphin (RH1m)	Heat3	Therm	ISO 13370	SNIP	DS 418	A. J. Wright	Hagen toft	Kissock	Seppänen	SRMK C4	Spooner_sim	Spooner_us
0	0.727	0.727	0.727	0.717	0.759	0.718	0.714	0.707	0.721	0.729	0.415	0.584	0.824	0.973	0.631	0.424	0.525	1.610	3.337
10	0.608	0.608	0.608	0.605	0.640	0.606	0.603	0.594	0.608	0.608	0.374	0.509	0.673	0.783	0.545	0.368	0.464	0.961	1.680
50	0.376	0.376	0.376	0.398	0.398	0.378	0.375	0.370	0.379	0.370	0.269	0.337	0.393	0.424	0.372	0.250	0.317	0.438	0.563
80	0.294	0.294	0.294	0.295	0.311	0.295	0.294	0.290	0.296	0.286	0.223	0.269	0.301	0.322	0.305	0.204	0.256	0.323	0.375
100	0.256	0.256	0.256	0.257	0.272	0.258	0.257	0.254	0.258	0.250	0.200	0.237	0.262	0.277	0.273	0.183	0.227	0.276	0.307
200	0.157	0.157	0.157	0.157	0.165	0.157	0.156	0.156	0.158	0.154	0.133	0.149	0.161	0.164	0.181	0.121	0.145	0.161	0.161
400	0.087	0.087	0.087	0.088	0.089	0.088	0.086	0.087	0.088	0.087	0.079	0.085	0.096	0.090	0.108	0.073	0.084	0.088	0.083
800	0.047	0.047	0.046	0.046	0.048	0.046	0.045	0.046	0.047	0.047	0.044	0.046	0.058	0.047	0.060	0.041	0.046	0.046	0.042

Tabel L3.3 Hoone 3 põrandate soojuslääbivused erinevate meetoditega arvatades.

Põrandate soojuslääbivus U [W/m ² *K]																			
HOONE 3	Arvutusmeetod																		
Soojustuse paksus	Voltra (kuiv)	Voltra (const)	Voltra	Delphin (kuiv)	Delphin	Delphin (const)	Delphin (RH1m)	Heat3	Therm	ISO 13370	SNIP	DS 418	A. J. Wright	Hagen toft	Kissock	Seppänen	SRMK C4	Spooner_sim	Spooner_us
0	0.634	0.633	0.634	0.628	0.666	0.628	0.627	0.613	0.626	0.637	0.400	0.584	0.718	0.829	0.505	0.424	0.497	1.482	3.337
10	0.541	0.541	0.541	0.539	0.576	0.539	0.540	0.526	0.537	0.540	0.362	0.509	0.609	0.675	0.436	0.368	0.442	0.894	1.680
50	0.349	0.349	0.349	0.349	0.371	0.349	0.349	0.342	0.349	0.343	0.262	0.337	0.382	0.388	0.297	0.250	0.306	0.417	0.563
80	0.277	0.277	0.277	0.277	0.294	0.277	0.278	0.273	0.277	0.269	0.217	0.269	0.300	0.301	0.244	0.204	0.249	0.310	0.375
100	0.243	0.243	0.243	0.244	0.258	0.244	0.244	0.240	0.244	0.235	0.196	0.237	0.263	0.261	0.219	0.183	0.222	0.266	0.307
200	0.152	0.152	0.152	0.152	0.159	0.152	0.151	0.150	0.152	0.148	0.130	0.149	0.165	0.158	0.145	0.121	0.143	0.158	0.161
400	0.086	0.086	0.086	0.086	0.089	0.086	0.084	0.085	0.086	0.085	0.079	0.085	0.099	0.088	0.087	0.073	0.083	0.087	0.083
800	0.046	0.046	0.046	0.046	0.047	0.046	0.045	0.046	0.046	0.046	0.044	0.046	0.059	0.047	0.048	0.041	0.045	0.046	0.042

Tabel L3.4 Hoone 4 põrandate soojuslääbivused erinevate meetoditega arvatades.

Põrandate soojuslääbivus U [W/m ² *K]																			
HOONE 4	Arvutusmeetod																		
Soojustuse paksus	Voltra (kuiv)	Voltra (const)	Voltra	Delphin (kuiv)	Delphin	Delphin (const)	Delphin (RH1m)	Heat3	Therm	ISO 13370	SNIP	DS 418	A. J. Wright	Hagen toft	Kissock	Seppänen	SRMK C4	Spooner_sim	Spooner_us
0	0.103	0.101	0.104	0.106	0.115	0.106	0.108	0.095	0.100	0.102	0.106	0.584	0.098	0.115	0.688	0.055	0.385	0.139	3.337
10	0.097	0.095	0.097	0.100	0.110	0.100	0.104	0.089	0.094	0.094	0.101	0.509	0.095	0.102	0.594	0.051	0.351	0.087	1.680
50	0.081	0.080	0.082	0.085	0.095	0.085	0.090	0.076	0.080	0.077	0.087	0.337	0.085	0.081	0.405	0.043	0.260	0.052	0.563
80	0.074	0.073	0.075	0.078	0.088	0.078	0.083	0.069	0.074	0.070	0.080	0.269	0.079	0.074	0.333	0.039	0.217	0.045	0.375
100	0.070	0.069	0.071	0.075	0.083	0.075	0.079	0.066	0.070	0.066	0.076	0.237	0.076	0.070	0.298	0.037	0.196	0.043	0.307
200	0.057	0.056	0.057	0.061	0.068	0.061	0.064	0.054	0.058	0.054	0.062	0.149	0.062	0.058	0.197	0.030	0.132	0.037	0.161
400	0.043	0.042	0.043	0.046	0.050	0.046	0.047	0.041	0.043	0.042	0.046	0.085	0.046	0.043	0.118	0.024	0.079	0.030	0.083
800	0.029	0.029	0.029	0.031	0.033	0.031	0.031	0.028	0.030	0.029	0.031	0.046	0.030	0.030	0.066	0.018	0.044	0.023	0.042

Tabel L3.5 Hoone 1 erinevate arvutusmeetoditega arvutatud põranda soojuslääbivuste erinevus Voltra soojuslääbivuste suhtes.

Arvutusmeetodi põranda soojuslääbivuse erinevus Voltra suhtes																			
HOONE 1	Arvutusmeetod																		
Soojustu- se paksus	Voltra (kuiv)	Voltra (const)	Voltra	Delphin (kuiv)	Delphin	Delphin (const)	Delphin (RH1m)	Heat3	Therm	ISO 13370	SNIP	DS 418	A. J. Wright	Hagentoft	Kissock	Seppänen	SRMK C4	Spooner _sim	Spooner _us
0	0.0%	0.0%	0%	-3%	2%	-3%	-4%	-2%	-2%	-3%	-54%	-43%	23%	43%	-26%	-47%	-33%	123%	225%
10	0.0%	0.0%	0%	-2%	3%	-2%	-3%	-1%	-1%	-3%	-48%	-37%	10%	26%	-19%	-43%	-28%	61%	106%
50	0.0%	0.0%	0%	-1%	4%	0%	-2%	-1%	0%	-3%	-34%	-25%	-5%	13%	0%	-33%	-18%	19%	25%
80	0.0%	0.0%	0%	0%	4%	0%	-1%	0%	0%	-3%	-28%	-20%	-8%	9%	10%	-29%	-14%	12%	11%
100	0.1%	0.1%	0%	0%	5%	0%	-1%	0%	0%	-3%	-25%	-18%	-9%	7%	14%	-26%	-13%	9%	6%
200	0.0%	0.0%	0%	0%	4%	0%	-1%	0%	0%	-2%	-17%	-12%	-7%	4%	30%	-19%	-8%	4%	-5%
400	0.1%	0.1%	0%	0%	3%	0%	-2%	0%	0%	-1%	-9%	-6%	4%	2%	44%	-13%	-4%	2%	-10%
800	0.1%	0.1%	0%	0%	3%	0%	-3%	0%	0%	0%	-5%	-3%	28%	1%	54%	-8%	-2%	0%	-12%

Tabel L3.6 Hoone 2 erinevate arvutusmeetoditega arvutatud põranda soojuslääbivuste erinevus Voltra soojuslääbivuste suhtes.

Arvutusmeetodi põranda soojuslääbivuse erinevus Voltra suhtes																			
HOONE 2	Arvutusmeetod																		
Soojustu- se paksus	Voltra (kuiv)	Voltra (const)	Voltra	Delphin (kuiv)	Delphin	Delphin (const)	Delphin (RH1m)	Heat3	Therm	ISO 13370	SNIP	DS 418	A. J. Wright	Hagentoft	Kissock	Seppänen	SRMK C4	Spooner _sim	Spooner _us
0	0.0%	0.0%	0%	-1%	4%	-1%	-2%	-3%	-1%	0%	-43%	-20%	13%	34%	-13%	-42%	-28%	121%	359%
10	0.0%	0.0%	0%	-1%	5%	0%	-1%	-2%	0%	0%	-39%	-16%	11%	29%	-10%	-40%	-24%	58%	176%
50	0.0%	0.0%	0%	6%	6%	0%	0%	-1%	1%	-2%	-28%	-10%	4%	13%	-1%	-34%	-16%	16%	50%
80	0.0%	0.0%	0%	0%	6%	1%	0%	-1%	1%	-3%	-24%	-8%	3%	10%	4%	-30%	-13%	10%	28%
100	0.0%	0.0%	0%	0%	6%	1%	0%	-1%	1%	-2%	-22%	-7%	2%	8%	7%	-29%	-11%	8%	20%
200	0.0%	0.0%	0%	0%	5%	0%	0%	-1%	1%	-2%	-15%	-5%	3%	4%	15%	-23%	-8%	3%	3%
400	0.1%	0.1%	0%	0%	2%	0%	-2%	0%	0%	0%	-9%	-2%	10%	3%	24%	-17%	-4%	1%	-6%
800	0.1%	0.1%	0%	0%	3%	0%	-3%	0%	0%	0%	-5%	-1%	25%	2%	30%	-12%	-2%	0%	-10%

Tabel L3.7 Hoone 3 erinevate arvutusmeetoditega arvutatud põranda soojuslääbivuste erinevus Voltra soojuslääbivuste suhtes.

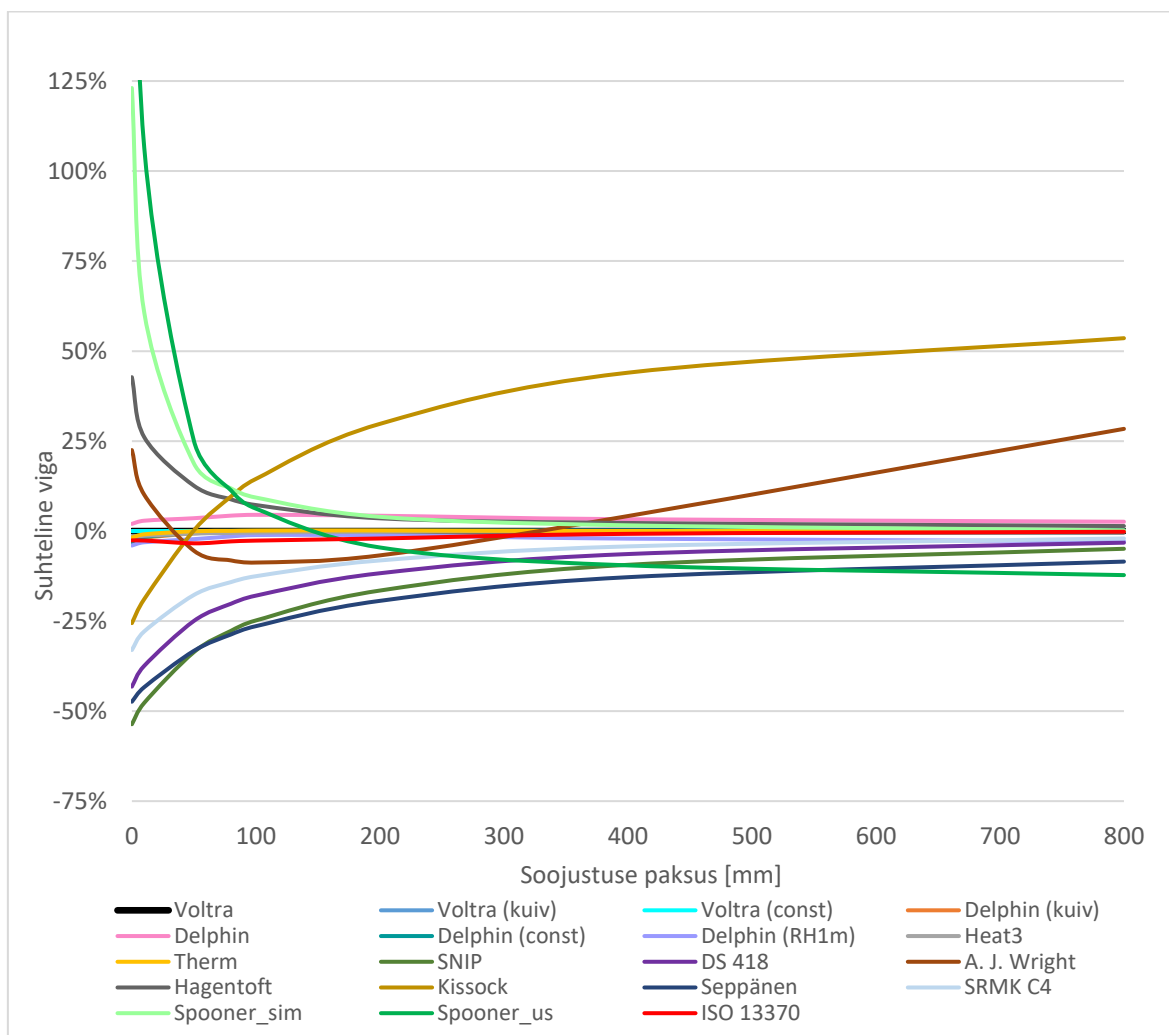
Arvutusmeetodi põranda soojuslääbivuse erinevus Voltra suhtes																			
HOONE 3	Arvutusmeetod																		
Soojustu- se paksus	Voltra (kuiv)	Voltra (const)	Voltra	Delphin (kuiv)	Delphin	Delphin (const)	Delphin (RH1m)	Heat3	Therm	ISO 13370	SNIP	DS 418	A. J. Wright	Hagentoft	Kissock	Seppänen	SRMK C4	Spooner _sim	Spooner _us
0	0.0%	-0.1%	0%	0%	5%	0%	-1%	-3%	-1%	1%	-8%	13%	31%	-20%	-33%	-22%	134%	427%	
10	0.0%	-0.1%	0%	0%	6%	0%	0%	-3%	-1%	0%	-33%	-6%	13%	25%	-20%	-32%	-18%	65%	210%
50	0.0%	0.0%	0%	0%	6%	0%	0%	-2%	0%	-2%	-25%	-3%	9%	11%	-15%	-28%	-12%	20%	61%
80	0.0%	0.0%	0%	0%	6%	0%	0%	-2%	0%	-3%	-21%	-3%	8%	9%	-12%	-26%	-10%	12%	36%
100	0.0%	0.0%	0%	0%	6%	0%	0%	-1%	0%	-3%	-20%	-2%	8%	7%	-10%	-25%	-9%	9%	26%
200	0.0%	0.0%	0%	0%	5%	0%	0%	-1%	0%	-2%	-14%	-2%	9%	4%	-5%	-20%	-6%	4%	6%
400	0.1%	0.1%	0%	0%	4%	0%	-2%	0%	0%	-1%	-8%	0%	15%	3%	1%	-15%	-3%	1%	-4%
800	0.1%	0.1%	0%	0%	3%	0%	-2%	0%	0%	0%	-4%	0%	29%	2%	5%	-11%	-1%	0%	-9%

Tabel L3.8 Hoone 4 erinevate arvutusmeetoditega arvutatud põranda soojuslääbivuste erinevus Voltra soojuslääbivuste suhtes.

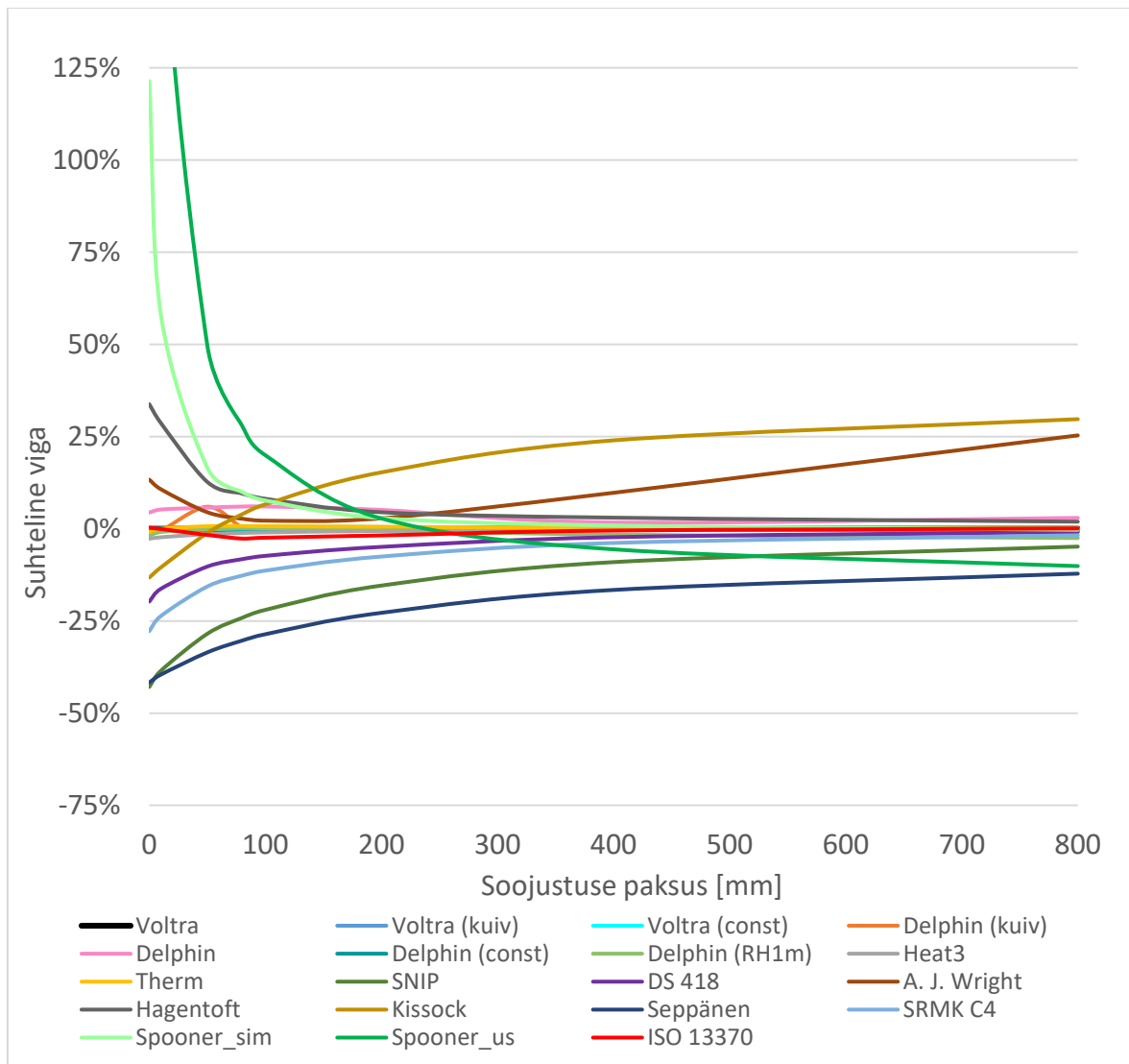
Arvutusmeetodi põranda soojuslääbivuse erinevus Voltra suhtes																			
HOONE 4	Arvutusmeetod																		
Soojustu- se paksus	Voltra (kuiv)	Voltra (const)	Voltra	Delphin (kuiv)	Delphin	Delphin (const)	Delphin (RH1m)	Heat3	Therm	ISO 13370	SNIP	DS 418	A. J. Wright	Hagentoft	Kissock	Seppänen	SRMK C4	Spooner _sim	Spooner _us
0	-0.5%	-2.4%	0%	3%	11%	3%	4%	-8%	-3%	-2%	3%	463%	-6%	11%	564%	-47%	271%	34%	3118%
10	-0.5%	-2.5%	0%	3%	13%	3%	7%	-8%	-3%	-4%	4%	424%	-2%	5%	512%	-47%	261%	-10%	1630%
50	-0.5%	-2.7%	0%	4%	17%	4%	10%	-7%	-2%	-6%	7%	313%	5%	-1%	396%	-48%	218%	-37%	588%
80	-0.5%	-2.7%	0%	5%	17%	5%	11%	-7%	-2%	-6%	7%	261%	6%	-1%	346%	-48%	191%	-39%	403%
100	-0.5%	-2.7%	0%	5%	18%	5%	11%	-7%	-1%	-6%	7%	235%	7%	-1%	321%	-48%	177%	-40%	334%
200	-0.4%	-2.5%	0%	6%	18%	6%	11%	-6%	0%	-5%	7%	159%	8%	1%	243%	-47%	129%	-36%	180%
400	-0.3%	-2.1%	0%	6%	16%	6%	10%	-5%	1%	-3%	7%	99%	6%	0%	175%	-45%	85%	-29%	92%
800	-0.1%	-1.4%	0%	6%	13%	6%	7%	-4%	1%	-1%	6%	57%	3%	2%	124%	-40%	51%	-21%	42%

LISA 4 PÕRANDATE SOOJSLÄBIVUSED VOLTRA SUHTES

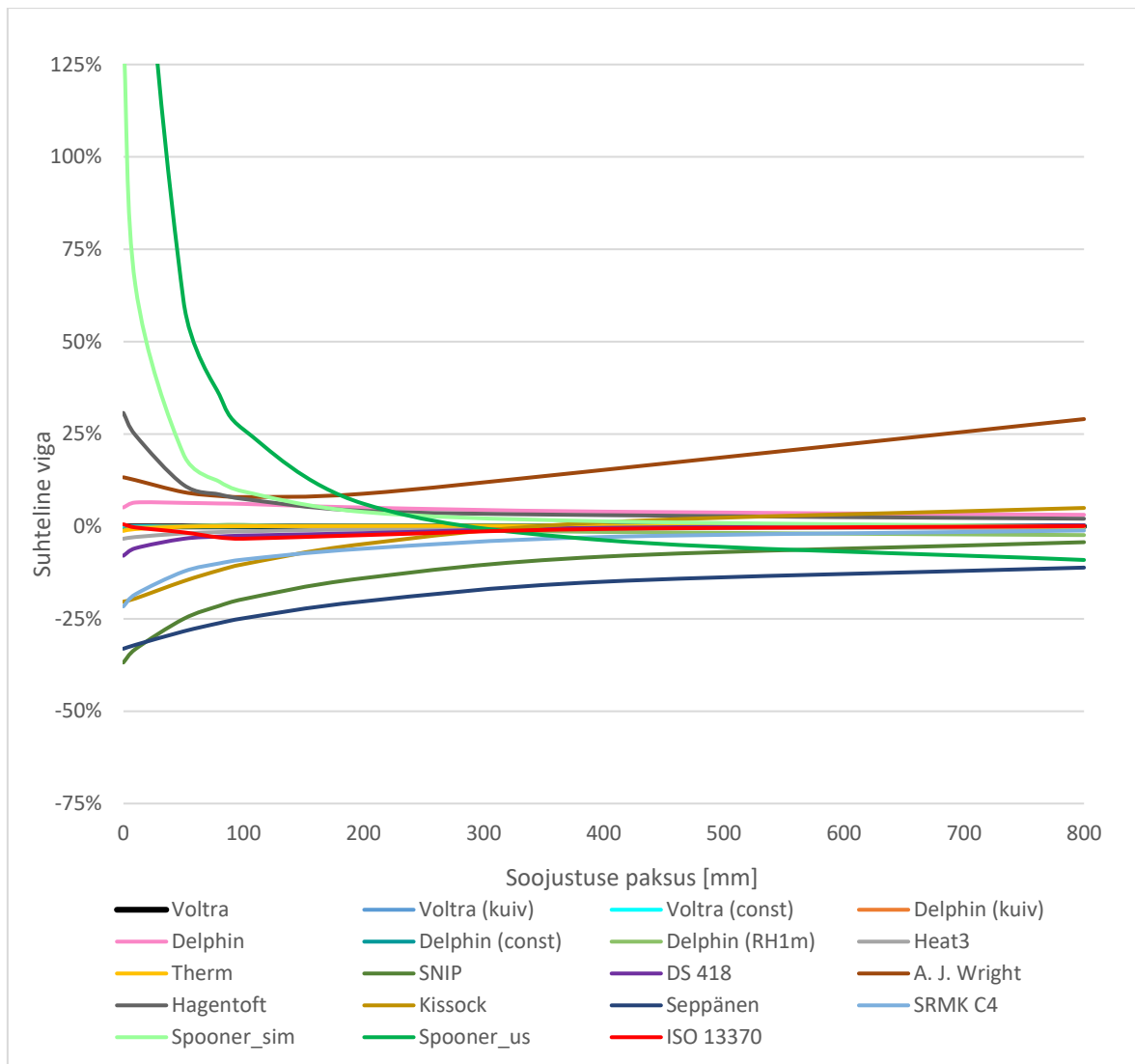
Järgnevalt on esitatud kõigi tüüphoonete põrandate soojuslähivused, mis arvatud nii lihtsustatud meetoditega kui ka arvutustarkvaradega võrdluses Voltra soojuslähivustega.



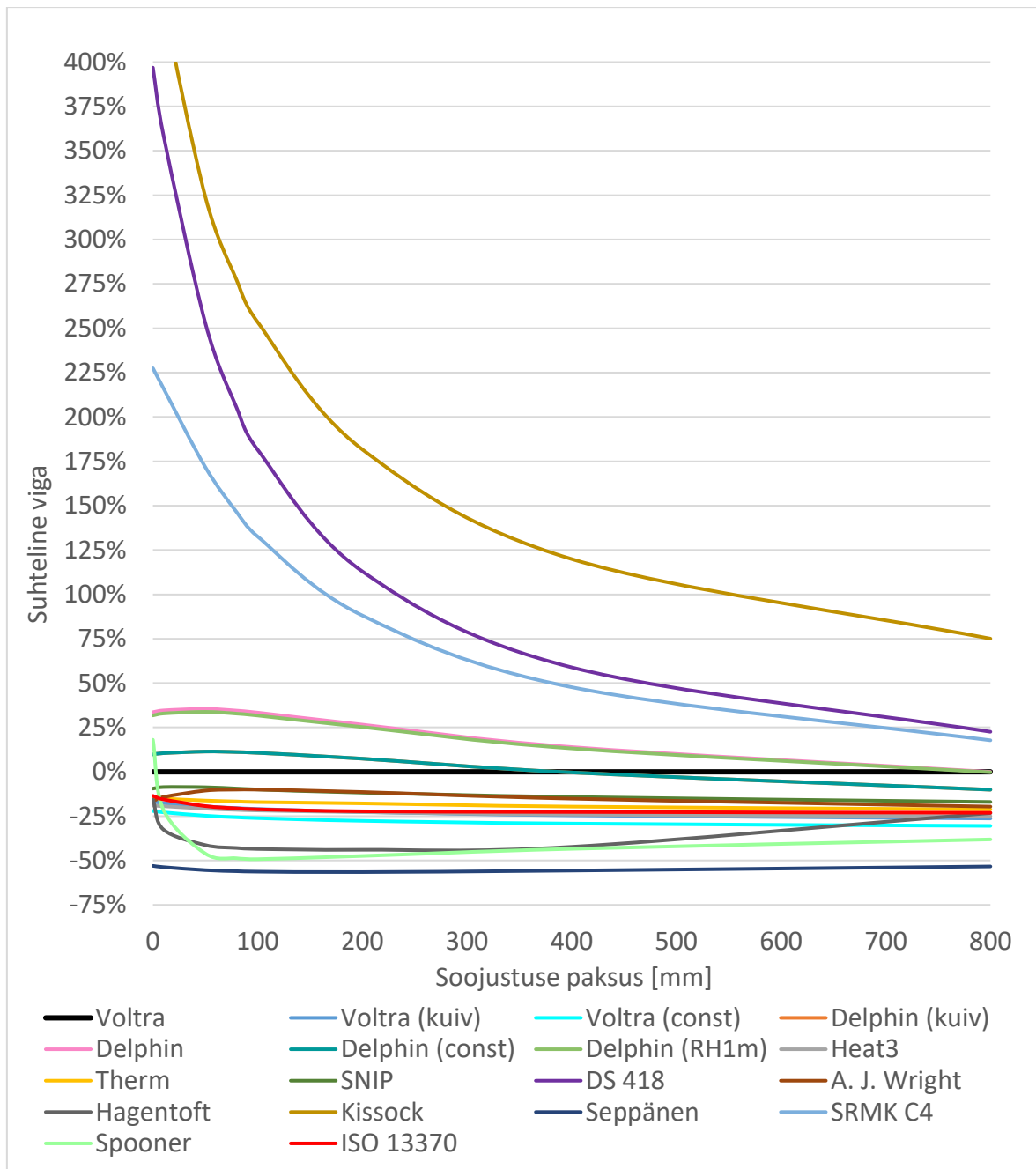
Joonis L4.1 Kõigi meetoditega arvatud tüüphoonete 1 põrandate soojuslähivused võrdluses Voltra soojuslähivustega.



Joonis L4.2 Kõigi meetoditega arvatud tüüphonee 2 pörandate soojuslähivused võrdluses Voltra soojuslähivustega.



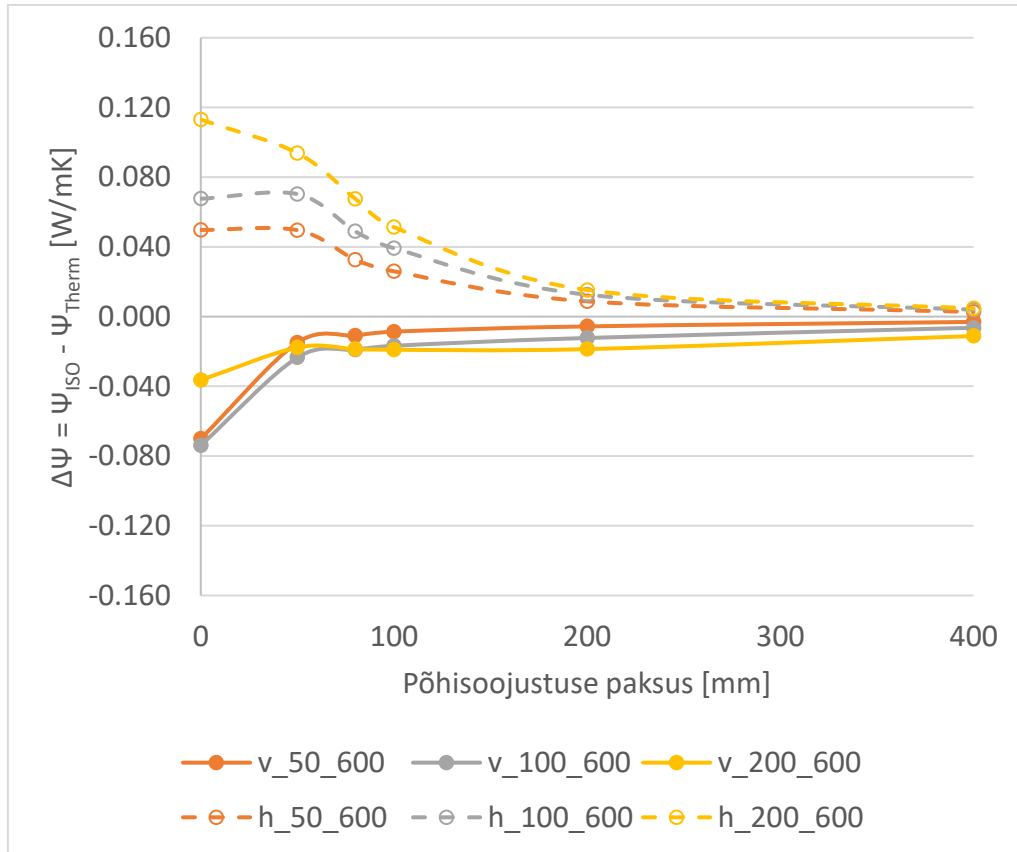
Joonis L4.3 Kõigi meetoditega arvatud tüüphone 3 pörandate soojuslähivused võrdluses Voltra soojuslähivustega.



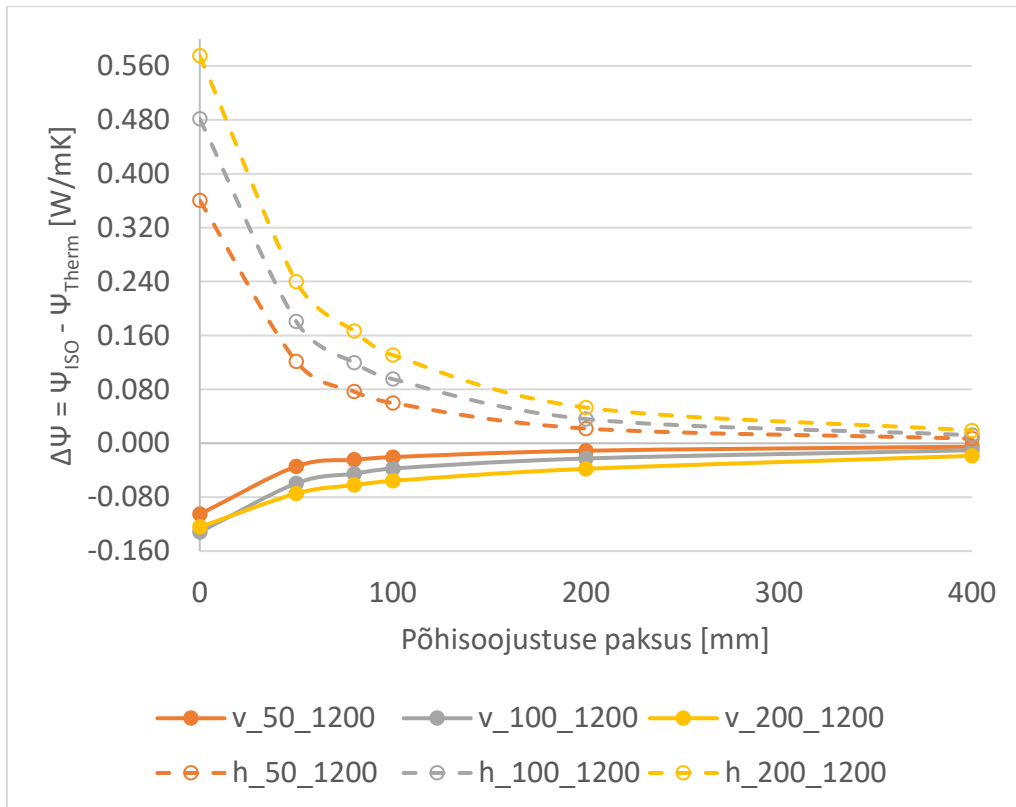
Joonis L4.4 Kõigi meetoditega arvatud tüüppoone 4 pörandate soojusläbivused võrdluses Voltra soojusläbivustega.

LISA 5 PÕRANDATE JOONSOOJUSLÄBIVUSTE PARANDID SERVASOOJUSTUSEST

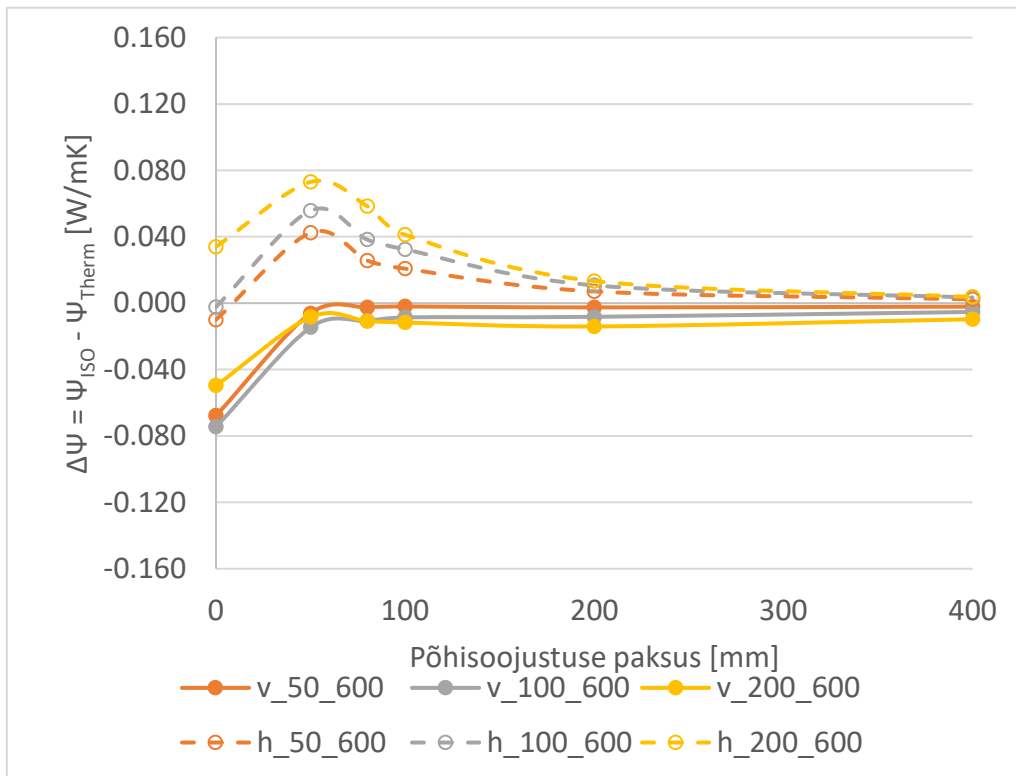
Järgnevalt on esitatud kõigi tüüphoonete joonsoojusläbivuste parandite erinevus servasoojustusest ISO vs Therm.



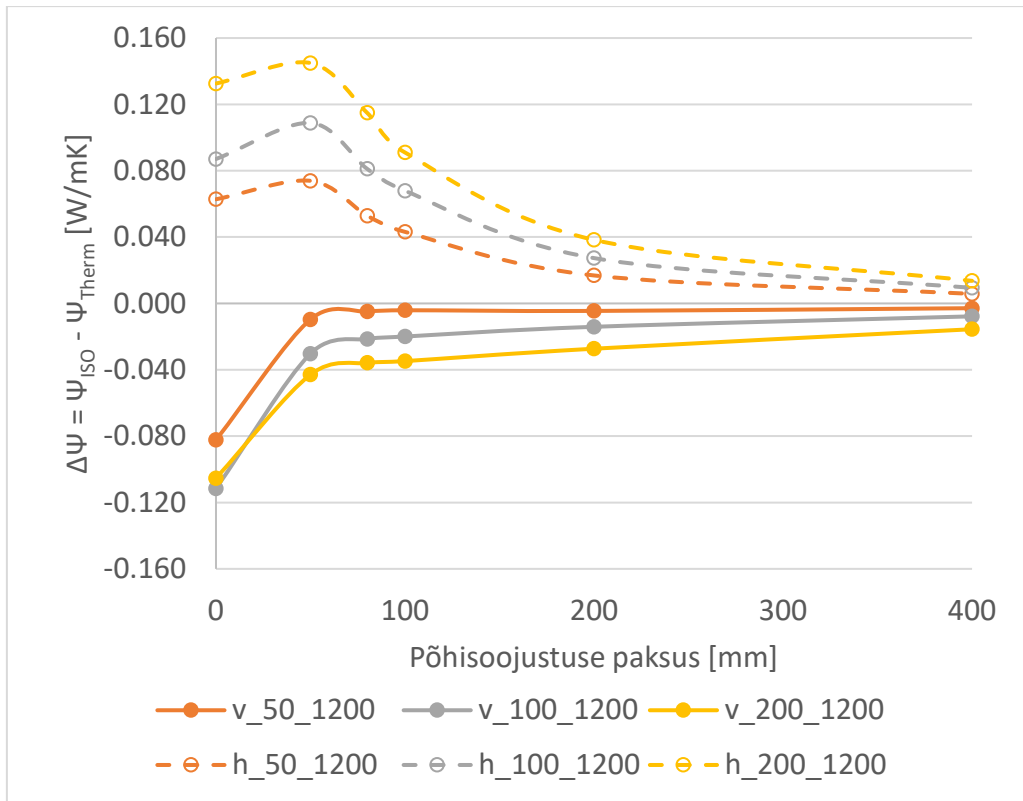
Joonis L5.1 Tüüphoon 1 ISO 13370 joonsoojusläbivuse parandite erinevus servasoojustusest Thermi'ga võrdluses. Servasoojustuse laius 600 mm.



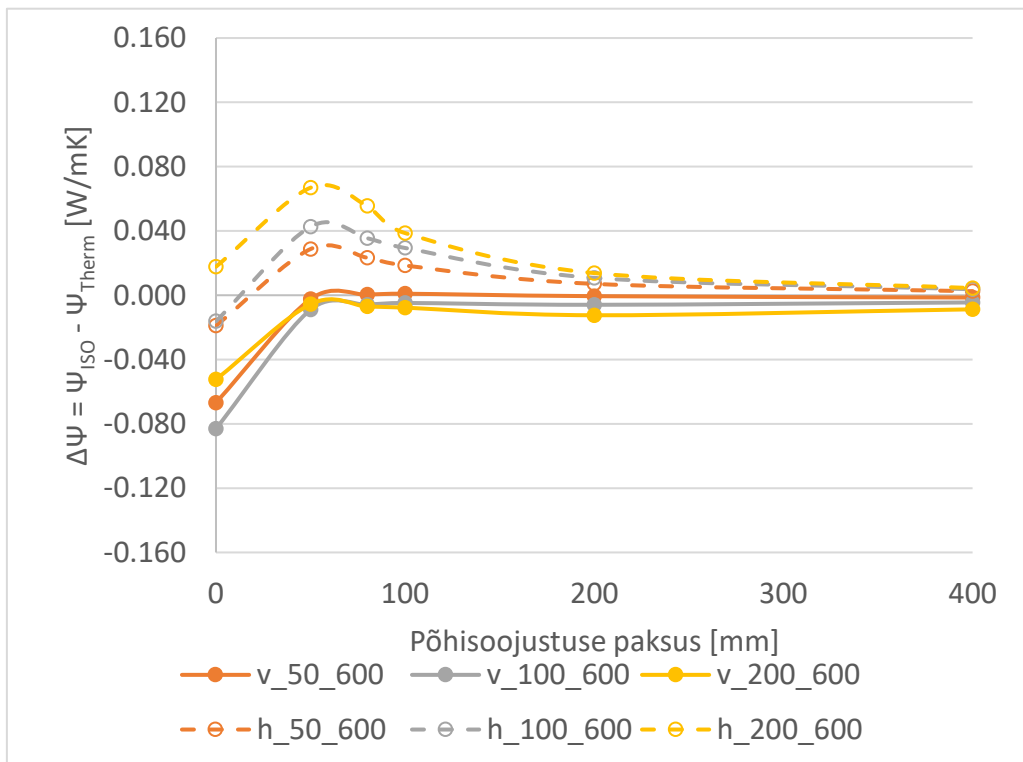
Joonis L5.2 Tüüppoone 1 ISO 13370 joonsoojuislabivuse parandite erinevus servasoojustusest Thermi'ga võrdluses. Servasoojustuse laius 1200 mm.



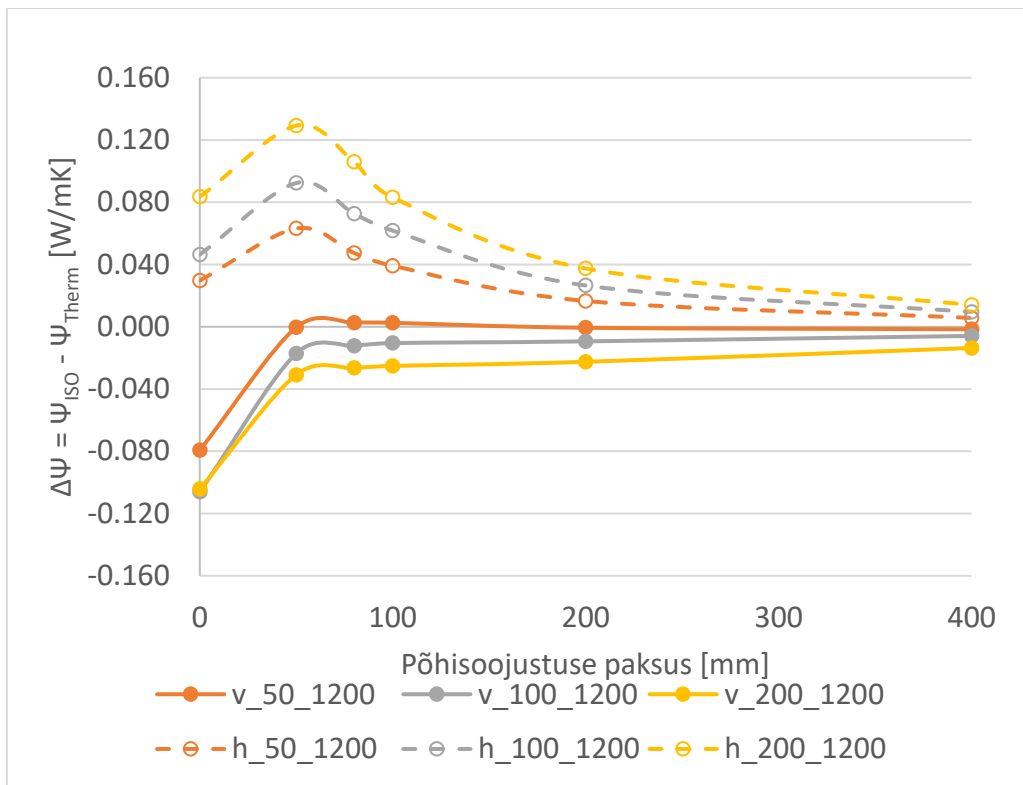
Joonis L5.3 Tüüppoone 2 ISO 13370 joonsoojuislabivuse parandite erinevus servasoojustusest Thermi'ga võrdluses. Servasoojustuse laius 600 mm.



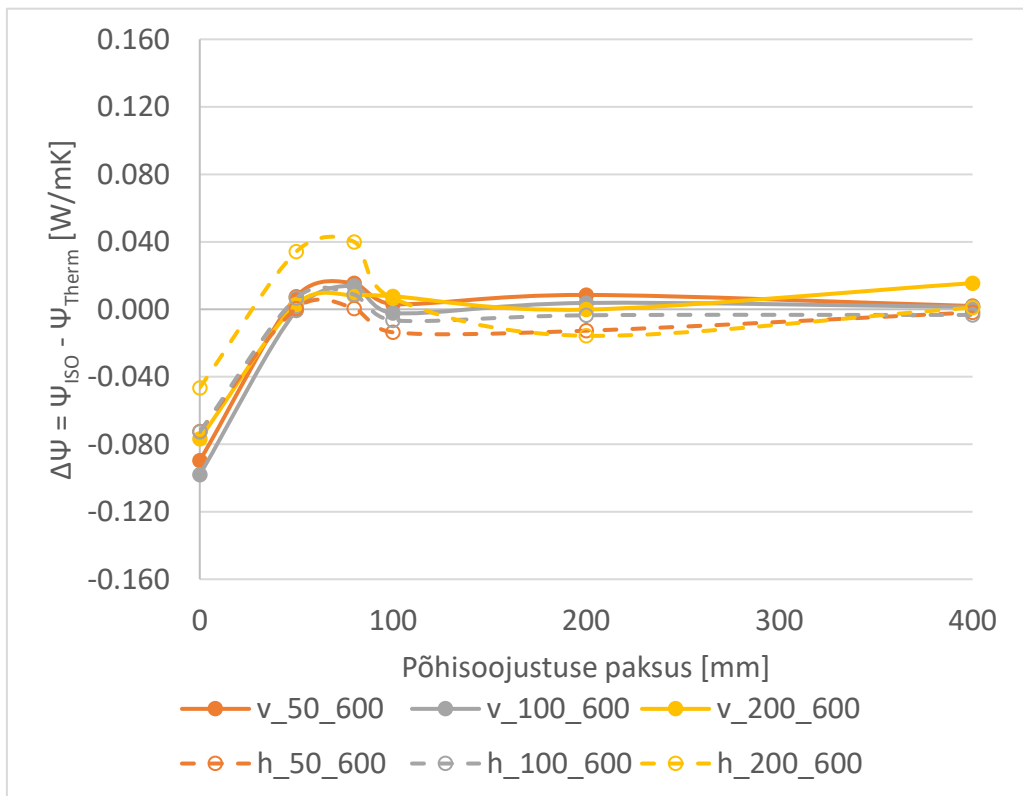
Joonis L5.4 Tüüppoone 2 ISO 13370 joonsoojuslähivuse parandite erinevus servasoojustusest Thermi'ga võrdluses. Servasoojustuse laius 1200 mm.



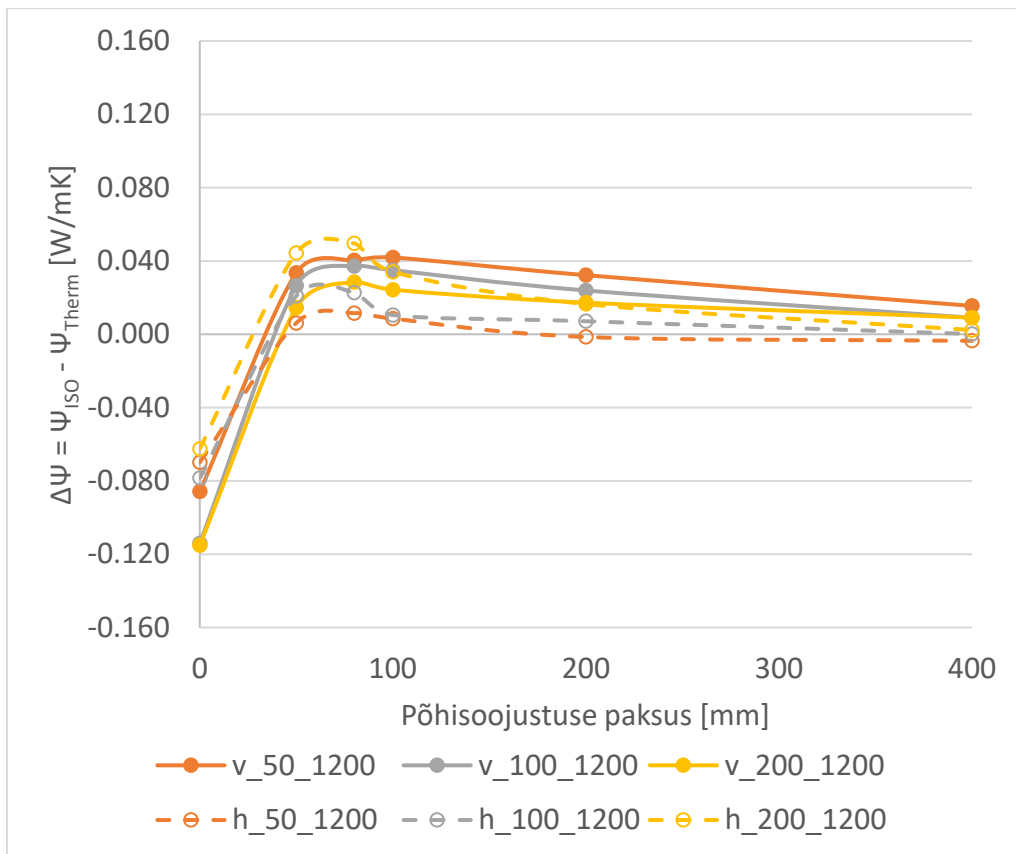
Joonis L5.5 Tüüppoone 3 ISO 13370 joonsoojuslähivuse parandite erinevus servasoojustusest Thermi'ga võrdluses. Servasoojustuse laius 600 mm.



Joonis L5.6 Tüüppoone 3 ISO 13370 joonsoojuslähivuse parandite erinevus servasoojustusest Thermi'ga võrdluses. Servasoojustuse laius 1200 mm.



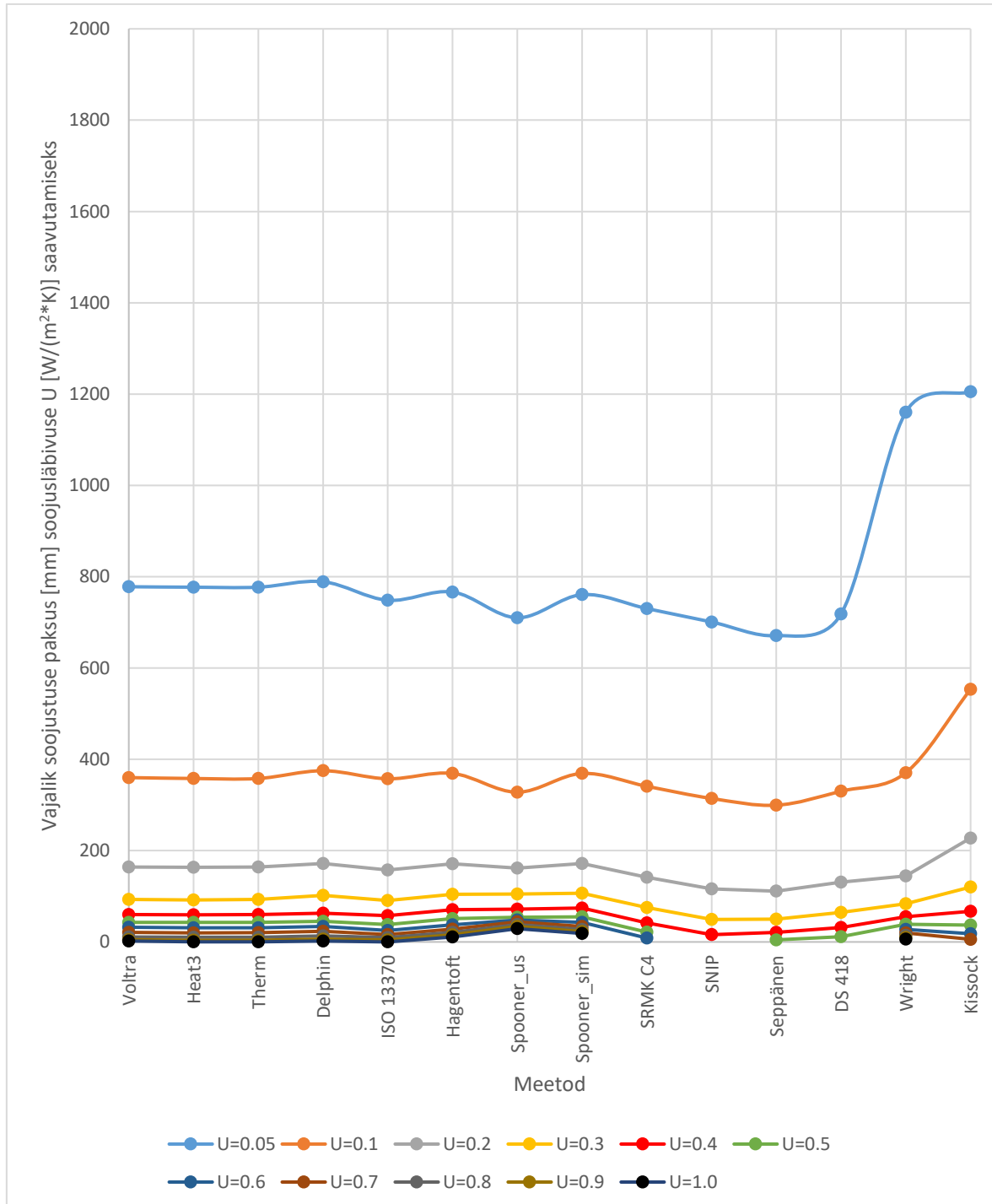
Joonis L5.7 Tüüppoone 4 ISO 13370 joonsoojuslähivuse parandite erinevus servasoojustusest Thermi'ga võrdluses. Servasoojustuse laius 600 mm.



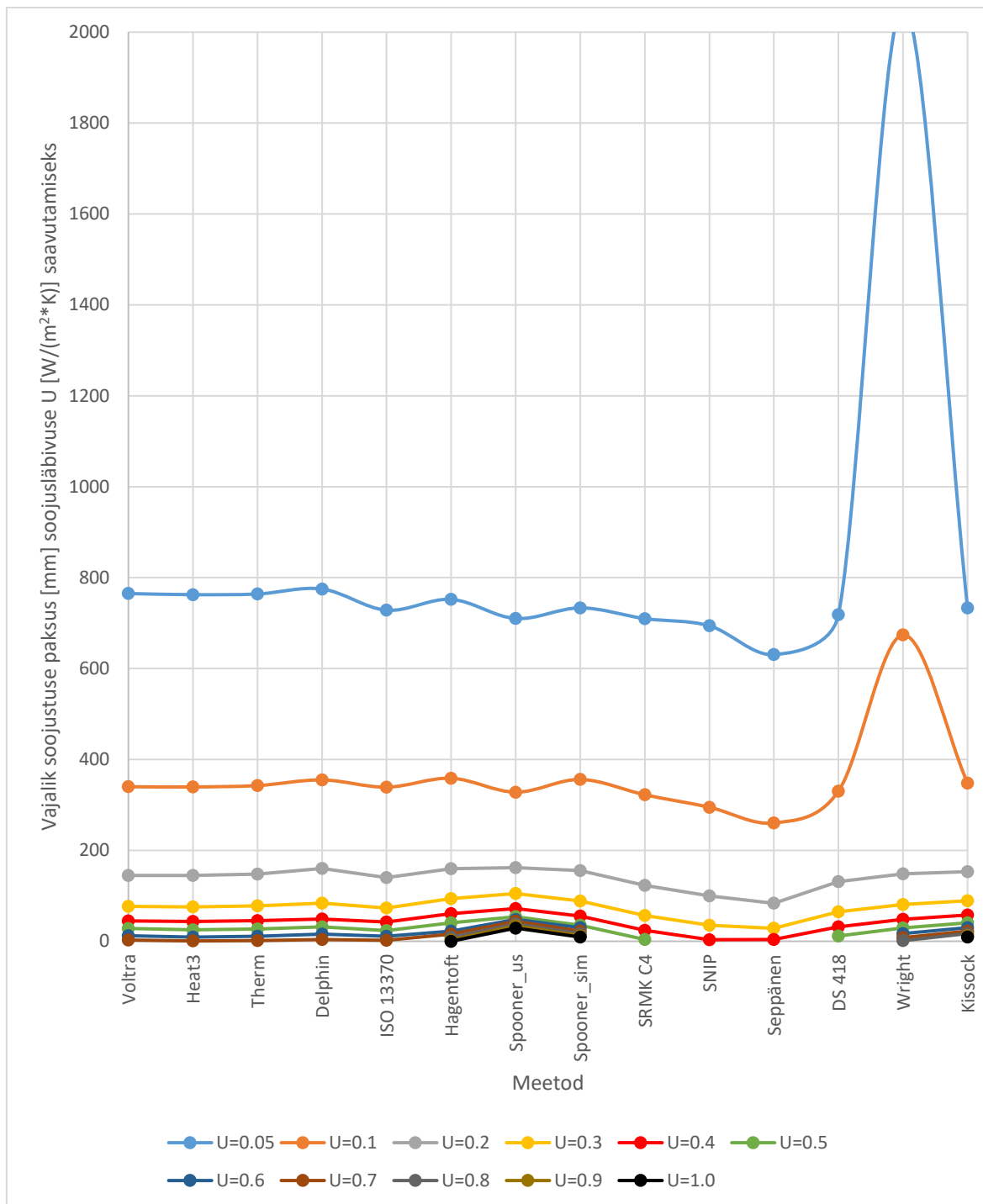
Joonis L5.8 Tüüphone 4 ISO 13370 joonsoojuslähivuse parandite erinevus servasoojustusest Thermi'ga võrdluses. Servasoojustuse laius 1200 mm.

LISA 6 VAJAMINEV PÕRANDA SOOJUSTUSE PAKSUS ERINEVATE TARKVARADEGA ARVUTADES

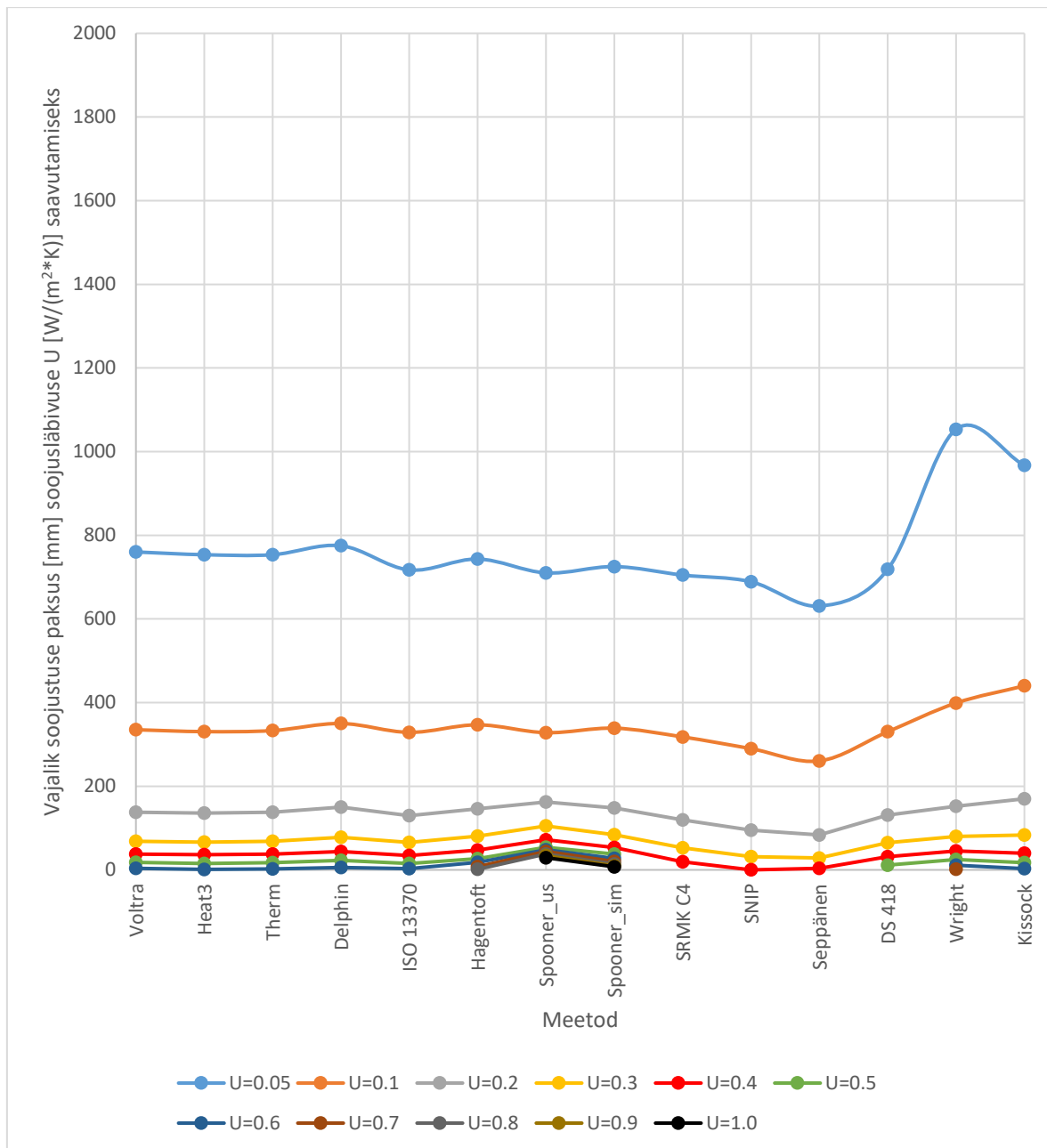
Järgnevalt on esitatud kõigi tüüphoonete vajamineva põranda soojustuse paksused ningi kindla soojuslähivuse saavutamiseks erinevate arvutusmeetoditega arvutades.



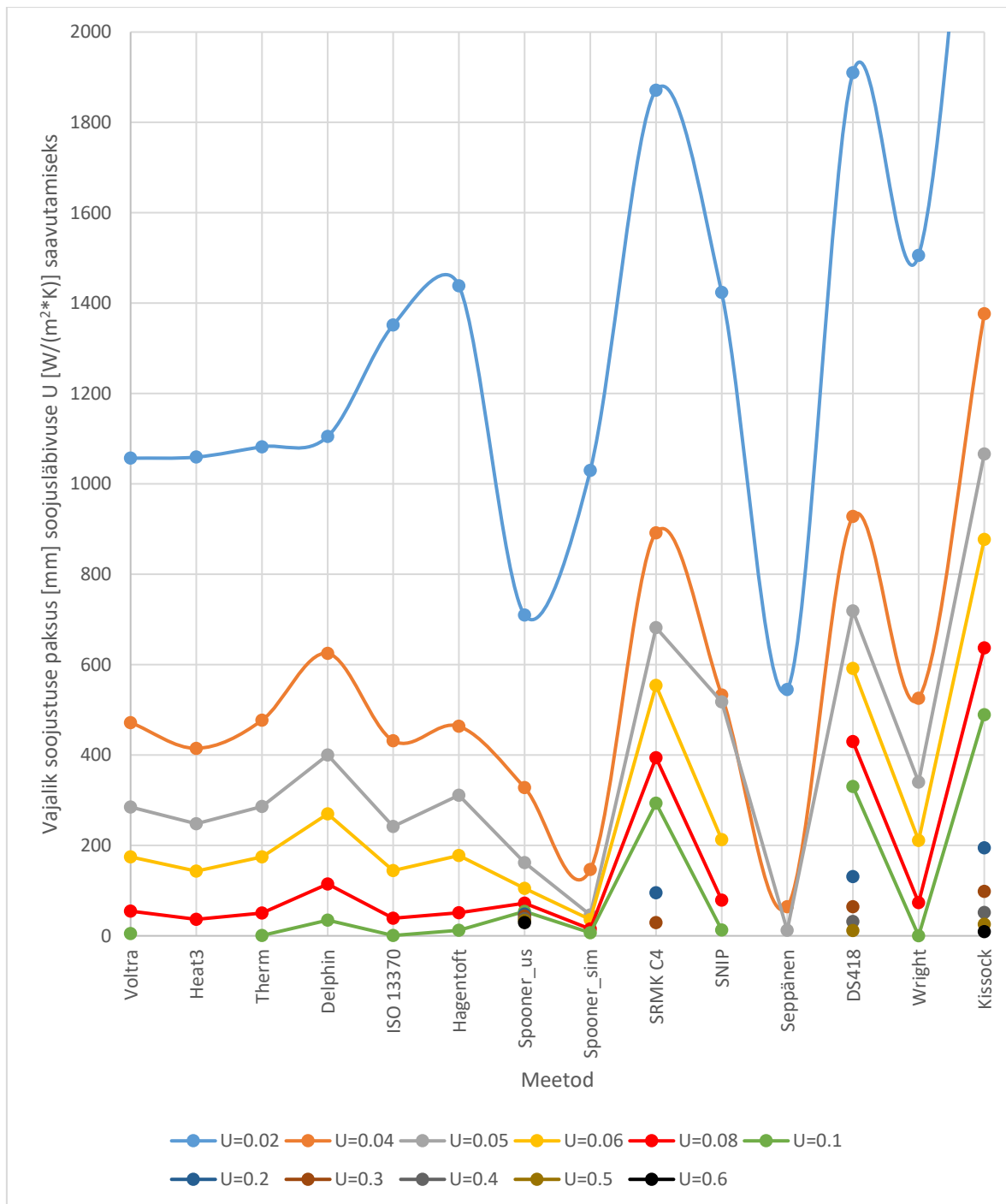
Joonis L6.1 Hoone 1 soojustuse vajalik paksus erinevate tarkvaradega arvutades kindla põranda soojuslähivuse saavutamiseks.



Joonis L6.2 Hoone 2 soojustuse vajalik paksus erinevate tarkvaradega arvutades kindla põranda soojuslähivuse saavutamiseks.



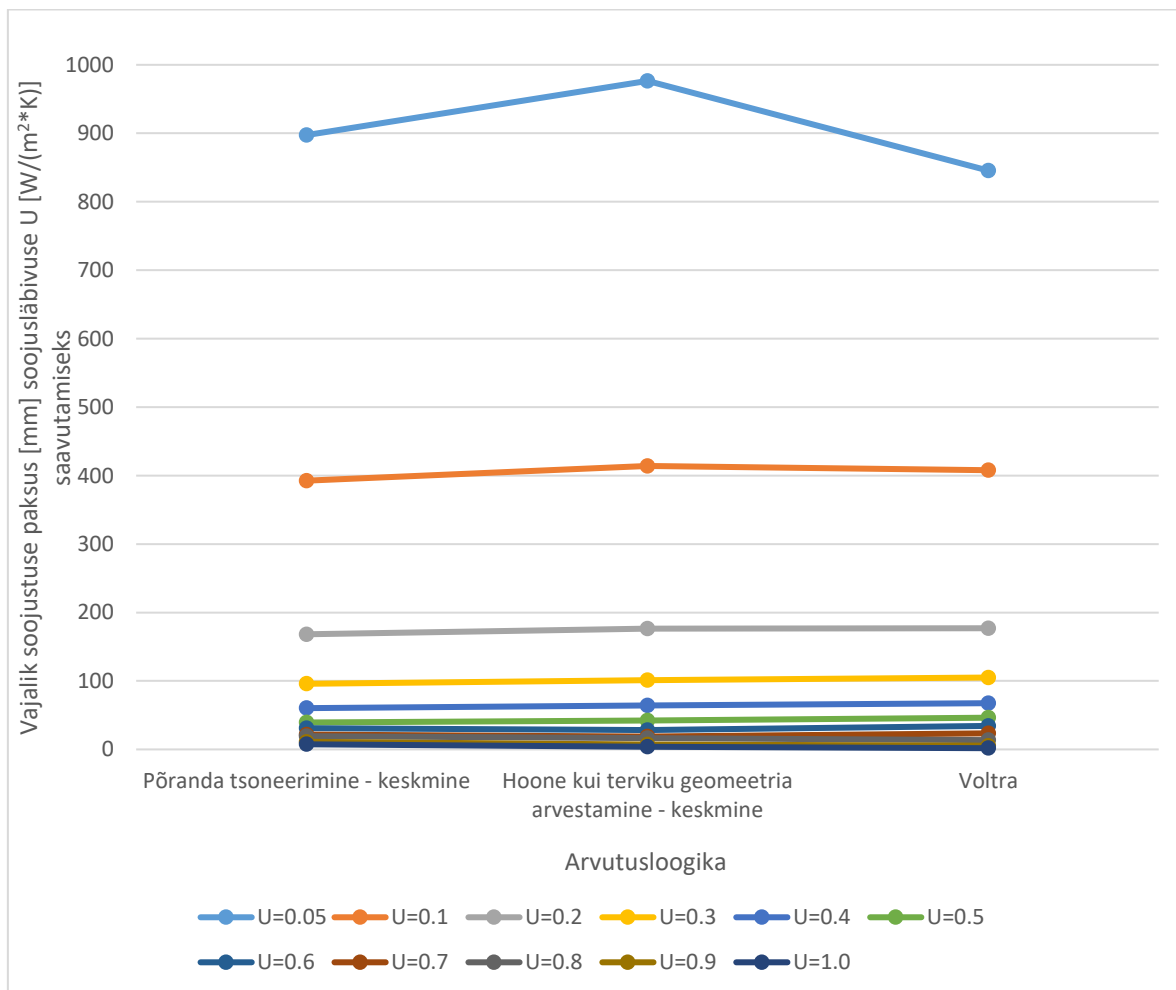
Joonis L6.3 Hoone 3 soojustuse vajalik paksus erinevate tarkvaradega arvutades kindla pörandu soojuslähivuse saavutamiseks.



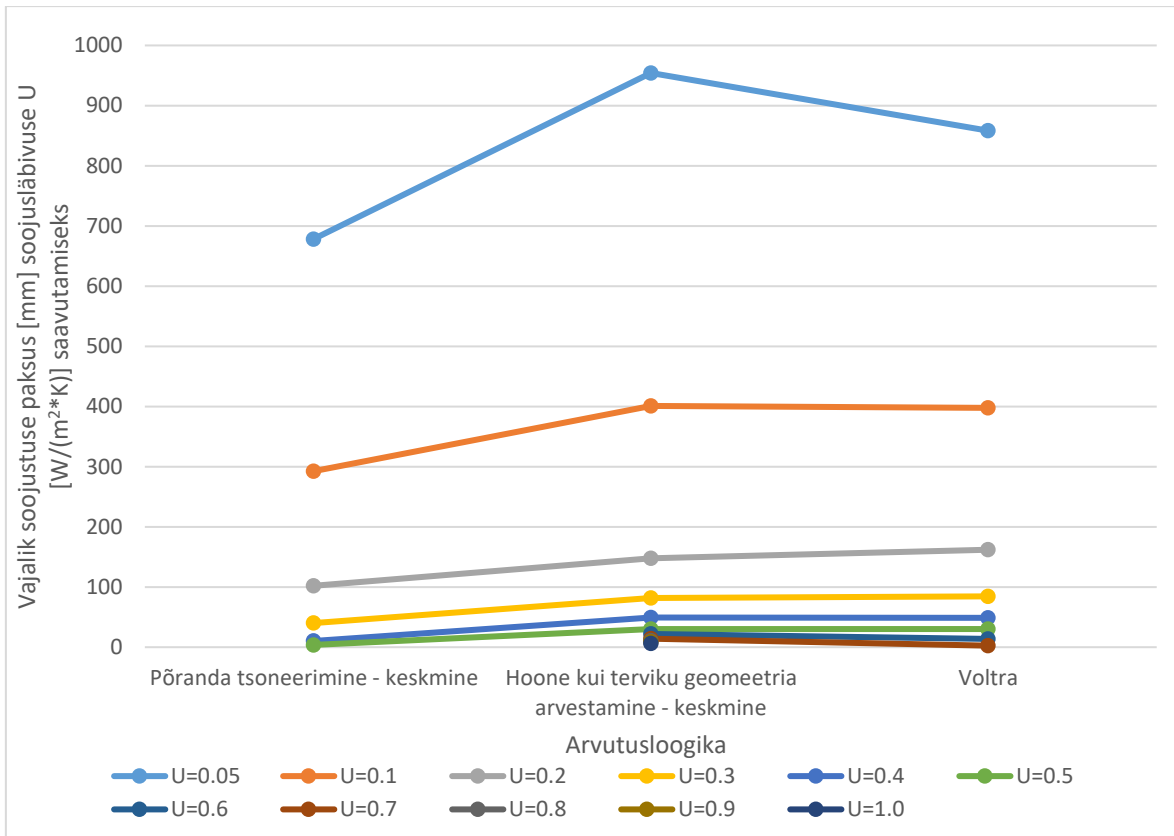
Joonis L6.4 Hoone 4 soojustuse vajalik paksus erinevate tarkvaradega arvutades kindla põranda soojusläbivuse saavutamiseks.

LISA 7 VAJAMINEV PÕRANDA SOOJUSTUSE PAKSUS ARVUTATUNA ARVUTUSLOOGIKATE KESKMISENA

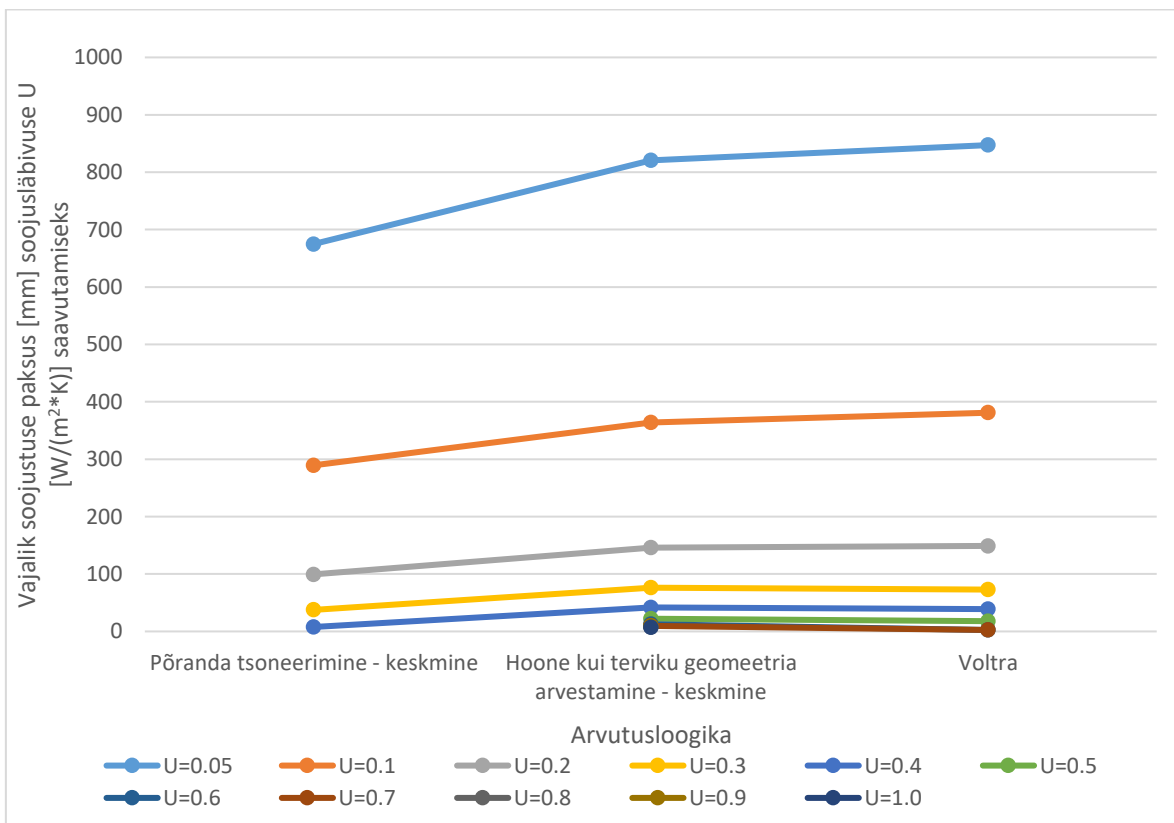
Järgnevalt on esitatud kõigi tüüphoonete vajamineva põranda soojustuse paksused mingi kindla soojuslähivuse saavutamiseks arvutatuna arvutusloogika grupi (vt Tabel 3.1) keskmisena.



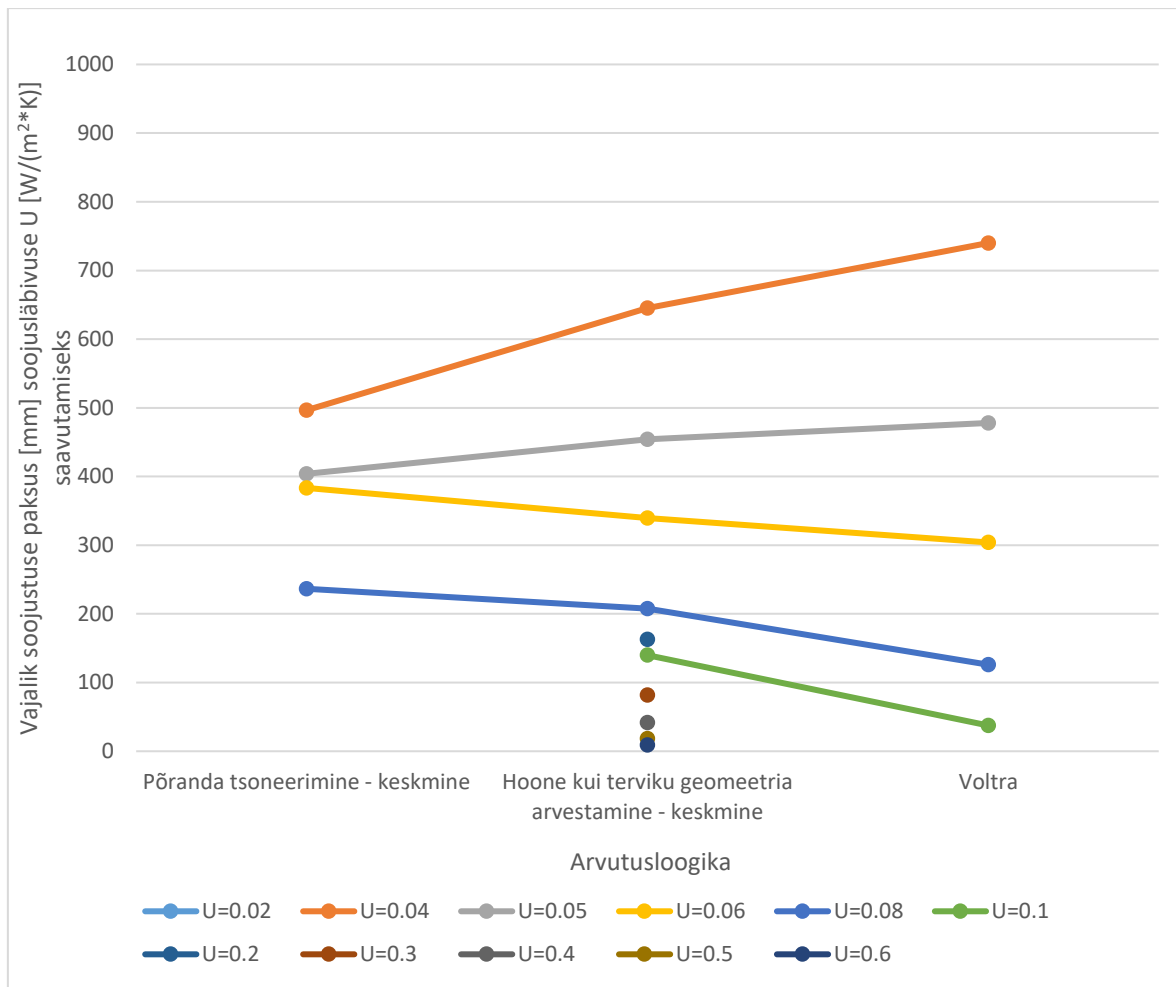
Joonis L7.1 Hoone 1 (4x6 m) vajalik soojustuse paksus konkreetse soojuslähivuse saavutamiseks, arvutatuna arvutusloogikate keskmisena.



Joonis L7.2 Hoone 2 (6x16 m) vajalik soojustuse paksus konkreetse soojuslähivuse saavutamiseks, arvatuna arvutusloogikate keskmisena.



Joonis L7.3 Hoone 3 (6x60 m) vajalik soojustuse paksus konkreetse soojuslähivuse saavutamiseks, arvatuna arvutusloogikate keskmisena.



Joonis L7.4 Hoone 4 (100x200 m) vajalik soojustuse paksus konkreetse soojuslähivuse saavutamiseks, arvatuna arvutusloogikate keskmisena.