TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
EHITUSE JA ARHITEKTUURI INSTITUUT

LIGINULLENERGIA ELUHOONED

PIIRDETARINDITE LIITEKOHTADE JOONSOOJUSLÄBIVUSE ARVUTUS

TALLINN

Oktoober 2017

Euroopa Liit
Ühtekuuluvusfond

Eesti
tuleviku heaks

KREDEX

Sisukord

1 Eessõna 3
2 Sissejuhatus 4
3 Piirdetarindite liitekohtade joonsoojusläbivus 6
3.1 Mõisted ja tähised 6
3.2 Arvutuspõhimõtted 8
3.2.1 Pinna soojustakistused 8
3.2.2 Arvutusulatus 9
3.2.3 Tarindi soojuslikult mittehomogeense materjalikihi taandamine soojuslikult homogeenseks materjalikihiks 10
3.2.4 Piirdetarindite liitekohtade pikkused ja soojustuse katkestused 11
3.3 Arvutusmeetodid ja -tarkvarad 11
3.4 Joonsoojusläbivuse arvutus 13
3.4.1 Kahe tasapinnalise tarindi liitumine 13
3.4.2 Akna ja seina liitumine 14
3.4.3 Kahe välisseina liitekoht välisnurgas 15
3.4.4 Räästa sõlm 17
3.4.5 Parapeti sõlm 18
3.4.6 Sokli sõlm pinnasele toetava põrandaga 20
3.5 Külmasilla kriitilisuse hindamine temperatuuriindeksi abil 24
3.6 Joonsoojusläbivuse ja külmasilla kriitilisuse arvutuste lähteandete ja tulemuste esitamine 25
4 Kirjanduse loetelu 30

1 Eessõna

Käesolev rida- ja korterelamute projekteerimise abimaterjal on valminud ühe osana KredEx-i Liginullenergia eluhoonete projektist. Projekti eesmärgiks oli välja töötada liginullenergia eluhoonetele tehnilisi tüüplahendusi, mis on vormistatud näidisprojektide ja juhendmaterjalide kujul. Abimaterjal on abiks tellijatele, töövõtjatele ja projekteerijatele põhimõtteliste lahenduste valikul ning eel- ja põhiprojekti koostamisel. Käesolev abimaterjal koostatud, et selgitada standardi EVS-EN ISO 10211 arvutuspõhimõtteid.

Projekti töös on osalenud tellijatena Kalle Kuusk KredEx-st ja Margus Tali MKM-st. Näidisprojektid ja juhendmaterjalid on valminud TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituudi liginullenergiahoonete uurimisrühma ning projektis osalenud ehitusettevõtete, arendajate, majatehaste, arhitektide ja eriosade projekteerijate koostöös. Ettevõtetest osalesid projekti töös Andres Jakobi ja Roman Metsaluik, YIT Ehitus, Madis Nurm ja Tiit Kuusik, Merko Ehitus, Raivo Külaots, Matek, Ivar Mardim ja Madis Lobjakas, Timbeco Ehitus, Aivar Villemson, AAKV/LAAM, Heiki Õitspuu, Energiamaja, Velle Kadalipp, Arhitektuuribüroo JVR, Kaspar Kruuse ja Anton Andres, KAMP Arhitektid, Tõnu Laigu, QP Arhitektid ja Teet Tark, Hevac. TTÜ-st osalesid Jarek Kurnitski, Endrik Arumägi, Raimo Simson, Targo Kalamees, Francesco de Luca, Hendrik Voll, Anti Hamburg, Paul Klõšeiko, Laur Vatsfeld, Sander Jakunin, Jaanus Hallik ja Henri Sarevet.

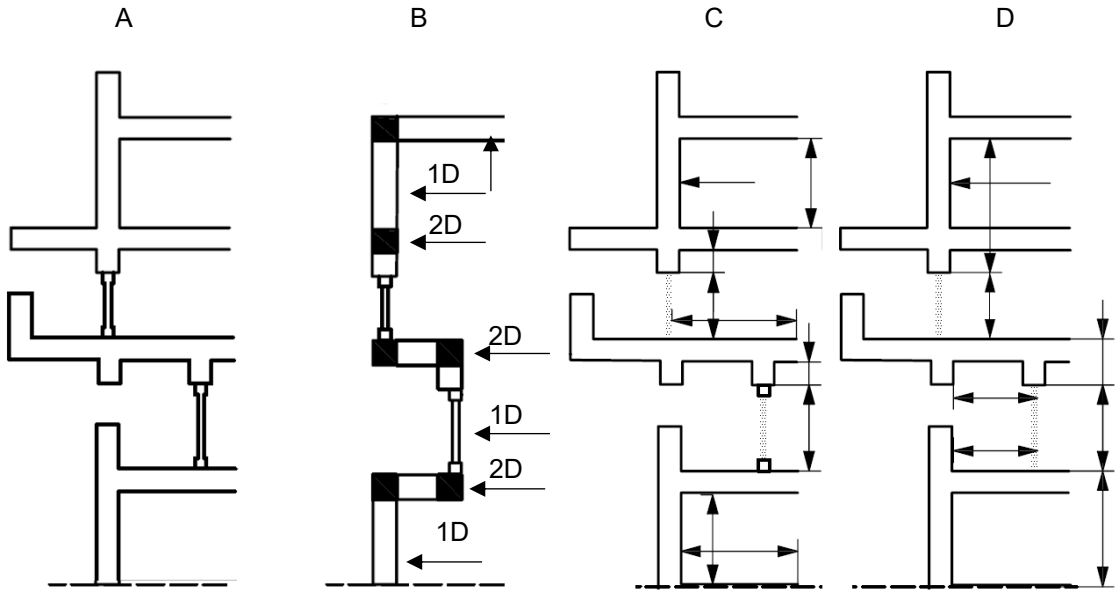
Niiskusturvalist ja külmasillavaba liginullenergiahoonet!

2 Sissejuhatus

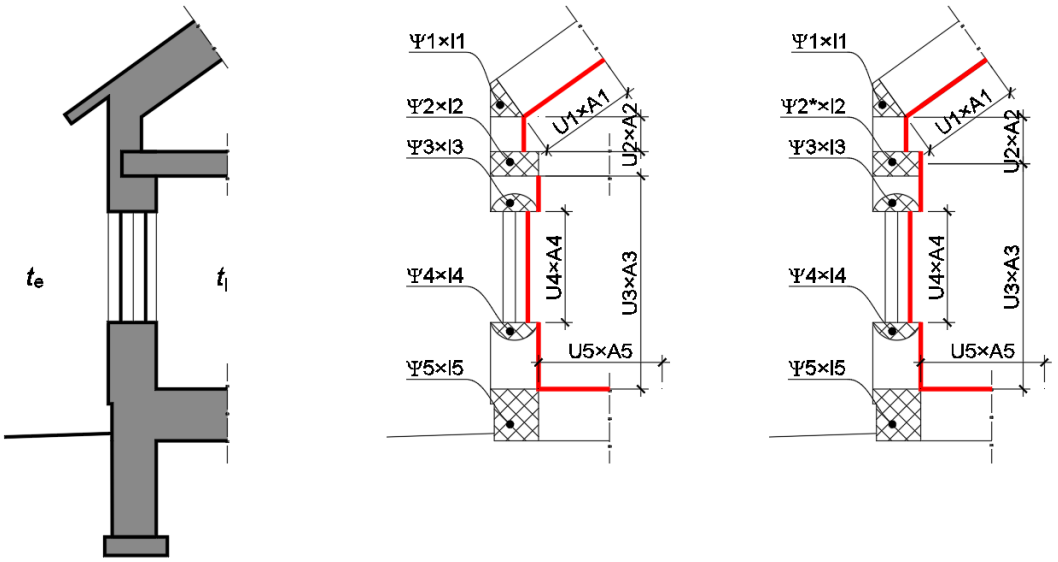
Hoone piirdetarindite soojuskadusid on vaja teada, et:

- hinnata hoone energiatõhusust,
- projekteerida hoone küttesüsteeme.

Hoone koosneb erinevatest piirdetarinditest. Piirdetarindid eraldavad hoone sisekeskkonda väliskeskkonnast ja erinevaid ruume hoone sees. Terve hoone detailsele kahe- või kolmemõõtmelisele soojuslikule modelleerimisele seab piirid tarkvara arvutusvõimekus ja andmete sisestamise töömaht. Seetõttu modelleeritakse hoone sisekliima- ja energiaarvutuses üksikuteks tasapinnalisteks osadeks (1D) ning nendevahelisteks liitekohtadeks (2D, 3D) (Joonis 2.1).



Joonis 2.1 Hoonepiirete soojuskadude arvutus EVS-EN 13789 baasil:
A: Lõige hoonest;
B: Soojuskadude arvutuseks võetakse hoone üksikuteks tasapinnalisteks osadeks (valge ala) ja nendevahelisteks liitekohtadeks (must ala).
Soojuskadude arvutamisel arvestatakse välispiirete pindalad sisemõõtudega (C, arvutus ruumide või tsoonide kaupa) või üldiste sisemõõtudega (D).



Joonis 2.2 Hoone (vasakul) piirdetarindite soojuskadude arvutus ruumide või tsoonide kaupa (keskel) või üldiste sisemõõtudega (paremal).

Tavapärases energiatõhusas hoones on soojuskadu läbi piirdetarindite liitekohtade ja soojustuse katkestuste suurusjärgus 10-20 % kogusoojuskaost. Täpsemates arvutustes korrutatakse omavahel piirdetarindite liitekohtade pikkus (*l*, m) tema joonsoojusläbivusega ($\Psi \times l$) ja sumeeritakse punktsoojusläbivuste mõju ($\Sigma \chi \times n$).

Ehitusprojekti koostamisel on vaja teada konkreetsete hooneelementide omadusi:

- geomeetria,
- soojuslikud omadused:
  - materjali soojuserijuhtivus,
  - pinna emissioonitegur.

Kui projekteeritakse tööprojektist üldisemat staadiumi (eelprojekt või põhiprojekt), kirjeldatakse projektlahenduse elemendid tehniliste omaduste alusel, mis jäävad hilisemates projekteerimisstaadiumites lõpliku valiku aluseks. Eelprojektis või põhiprojektis ei ole vaja kõikide sõlmjooniste esitamist. Küll aga on vajalik nende läbitöötamine, mis võimaldaks ehitusprojekti koostada nii, et hiljem ei tuleks lahendusi muuta vaid piisab detailiseerimisest. Projektlahendus on võimalik korralikult joonestada ja ehituslahendus tekstiliselt kirjeldada vaid siis, kui võetakse aluseks ehitamisel reaalselt kasutatavate toodete sõlmejoonised. Ainult sel juhul on ehitajal selline projekt, mille järgi ehitada, ja järelevalvel, mille alusel tulemuse kvaliteeti kontrollida. Tarindite liitekoha joonise sobiv mõõtkava on M1:10 või M1:5.

Joon- ja punktsoojuskaod arvutatakse temperatuurivälja tarkvaraga vastavalt asjakohastele standarditele (EVS-EN ISO 10211). Kui projekteeritakse tööprojektist üldisemat staadiumi (eelprojekt või põhiprojekt), kirjeldatakse projektlahenduse elemendid tehniliste omaduste alusel, mis jäävad hilisemates projekteerimisstaadiumites lõpliku valiku aluseks. Eelprojekti staadiumis kasutab projekteerija joonsoojusläbivustena järgmisi andmeid:

- Projekteerib piirdetarindite liitekohtade põhimõttelahendused ja arvutab välja nende joonsoojusläbivused. Et võtta arvesse edasises projekteerimises täpsustunud lahenduse tõttu võimalikku joonsoojusläbivuse suurenemist arvestav piirdetarindite soojuserikao arvutustes esmaste joonsoojusläbivuste väärtutena ~10% suuremate väärtustega;
- Kasutab oma varasemate ehitusprojektide sarnaste piirdetarindite liitekohtade joonsoojusläbivusi. Kuna iga projekt on mõnevõrra erinev arvestab oma teiste projektide joonsoojusläbivuste kasutamisel ~15 % suuruse varuga;
- Kasutab piirdetarindite liitekohtade kataloogide joonsoojusläbivusi arvestades ~20% varuga;
- Kasutab energiatõhususe arvutusmetoodika (MTMm nr. 58, tabel 7) kohaseid joonsoojusläbivuse baasväärtusi (need võivad olla 0-50% tagavara kasuks).

Väga esmastes arvutustes (kontseptsiooni ja eskiisi staadiumis), kus aktsepteeritakse suuremat ebatäpsust võib piirdetarindite liitekohtade soojuskao arvesse võtta, arvestades nende osakaaluks ~20 % ($H_{2D+3D} = H_{j1D} \times 0{,}28$).

Kui märkimisväärseid lokaalseid soojustuse katkestusi (rõdu/varikatuse konsoolid, korsten, postvundamendid vms.) ei ole, võib piirdetarindite 3D punktsoojusläbivused (kolme piirdetarindi ühine nurk) võtta arvesse suurendades piirdetarindite liitekohtade soojuserikadu 5-10 % (suuremal hoonel vähem, väiksemal hoonel rohkem).

3 Piirdetarindite liitekohtade joonsoojusläbivus

3.1 Mõisted ja tähised

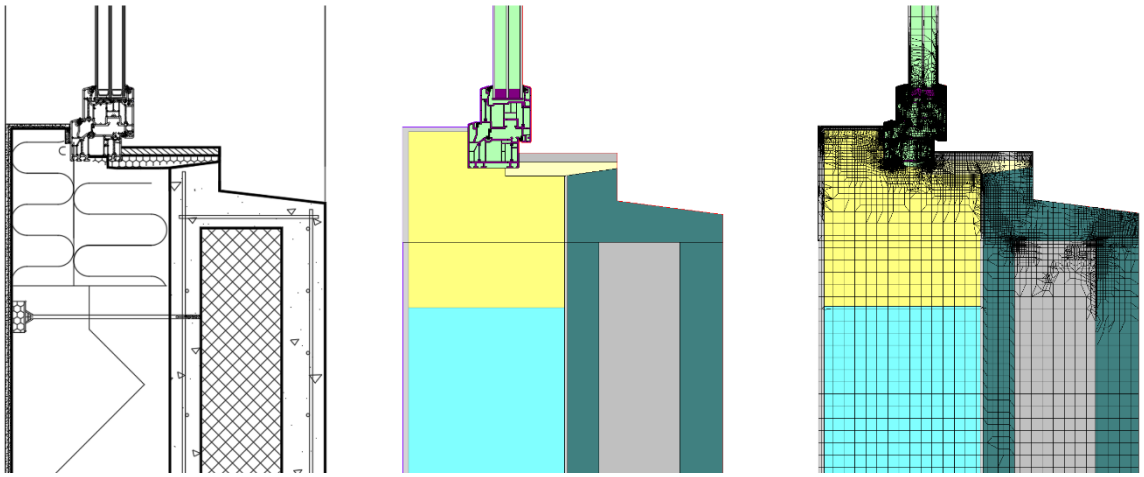
- **Soojus**; soojushulk Q, J (W·s, 0,2388 cal) (*heat; quantity of heat*) iseloomustab soojusvahetuse teel levivat energiahulka. Soojushulk loetakse kokkuleppeliselt positiivseks siis, kui energia suundub süsteemi sisse;
- **Soojusvool** Φ, W=J/s (heat flow rate): soojushulk, mis kandub ajaühikus läbi vaadeldava pinna;
- **Soojusvoog** (ka soojusvoolu tihedus) q, W/m^2 (*heat flux*): soojusvool vaadeldava pinna pindalaühiku kohta;
- **Soojuserijuhtivus** λ, W/(m·K) (*thermal conductivity*): materjali omadus, mis väljendab soojusvoolu vattides, mis läbib 1 meetri paksuse ja 1 m^2 pinnaga materjalikihi, kui temperatuuride vahe vastastikuste pindade vahel on 1 K. Mitte-ehituslikus kasutuses on tarvitusel ka sõnastus „soojusläbivustegur“;
- **Soojustakistus** R, m^2·K/W (*thermal resistance*): kindla paksusega toote või elemendi omadus takistada soojuse voogu (üldiselt soojusläbivuse teel) läbi toote või elemendi (pinnalt pinnale) statsionaarsetes tingimustes ja on arvutatav valemist: $R = \frac{T_1 - T_2}{q}$, $R = \frac{d}{\lambda}$;
- **Soojusläbivus** U, W/(m^2·K) *(thermal transmittance*): tarindi omadus, mis väljendab soojusvoolu (üldisemas mõttes: juhtivus + konvektsioon + kiirgus) vattides läbi 1 m^2 pinnaga tarindi, kui temperatuuride vahe erinevate keskkondade vahel on 1 K; arvutatav valemist: $U = \frac{\Phi}{(T_1 - T_2) \cdot A}$; $U = \frac{1}{R_{tot}}$ Mitte-ehituslikus kasutuses on tarvitusel ka termin „soojusläbikandetegur” ja ajalooliselt on kasutuses olnud termin „soojusjuhtivus“ (*thermal conductance*);
- **Piirdetarind** (*building fabric, building envelope*): ehitise põhiosa või piire, nagu sein, põrand, vahelagi, uks, aken, katus, mis eraldab ruumi teisest ruumist, välisõhust või pinnasest. Ingliskeelset mõistet *building envelope* kasutatakse konkreetsemalt välispiirdetarindite kohta;
- **Soojustus** (ka soojustusmaterjal, soojusisolatsioonimaterjal) (*thermal insulation*): materjalikiht soojuslevi oluliseks takistamiseks;
- **Soojuslikult homogeenne kiht** (*thermally homogeneous layer*): konstantse paksusega kiht, mille soojuslikud omadused on ühetaolised või mida võib käsitleda ühetaolistena.
- **Külmasild** (*thermal bridge*): hoone piirdetarindi osa, kus muidu ühtlaselt väike soojusläbivus on lokaalselt suurem soojustuse katkestuse, materjalist suurema soojuserijuhtivusega materjali läbiviigu, piirdetarindi geomeetria muutuse või muul sellisel põhjusel. Külmasild võib olla probleemiks piirdetarindite soojusliku või niiskusliku toimivuse tõttu või piirdetarinite soojuskao suurendamise tõttu. Külmasillad võib jagada:
  - **joonkülmasild** (*linear thermal bridge*): piirdetarindite liitekoht või külmasild, mida iseloomustab ühel kolmest ristteljest ühtlane ristlõige ehk külmasild mille ristlõige on tarindi pinnas suunas jätkuvalt samasugune;
  - **punktkülmasild** (*point thermal bridge*): soojustuse katkestus või lokaalne külmasild, millel pole tarindi tasapinna suunas püsivalt jätkuvat mõõdet ja mille mõju on võimalik väljendada punktsoojusläbivuse abil;
- **Joonsoojusläbivus** (*linear thermal transmittance*) Ψ, W/(m·K).
  Füüsikaline suurus, mille abil kirjeldatakse piirdetarindite kahemõõtmelise liitekoha või joonkülmasilla soojuskadu. Piirdetarindite kahemõõtmelise liitekoha või joonkülmasilla soojusvool võrreldes olukorraga kui ei võeta arvesse külmasilla olemasolu, jagatud mõlemale poole joonkülmasilda jääva sise- ja väliskeskkonna temperatuurivahe ja külmasilla arvutusulatusega (adiabaatiliste katkestustasapindade vaheline mõõt).

- **Punktsoojusläbivus** (*point thermal transmittance*) χ, W/K
  Füüsikaline suurus, mille abil kirjeldatakse piirdetarindite kolmemõõtmelise liitekoha või punktkülmasilla soojuskadu. Piirdetarindite kolmemõõtmelise liitekoha või joonkülmasilla soojusvool võrreldes olukorraga kui ei võeta arvesse külmasilla olemasolu, jagatud mõlemale poole joonkülmasilda jääva sise- ja väliskeskkonna temperatuurivahe ja külmasilla arvutusulatusega (adiabaatiliste katkestustasapindade vaheline mõõt).
- **Tarindite liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu** (*thermal coupling coefficient*) L_{2D}, W/(m·K), L_{3D}, W/K: kahe- või kolmemõõtmelise temperatuuriväljaarvutuse arvutuse tulemusena määratud piirdetarindite liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu. Soojusvool sise- ja väliskeskkonna temperatuurierinevuse kohta mis läbib neid kahte keskkonda ühendavat tarindit.
- **Katkestustasapind** (*cut-off plane*): ehitise tasapinnad, mis on kolme- või kahemõõtmeliste mudelile piirdeks, eraldades mudelit ülejäänud hoonest. Kõik katkestustasapinnad on adiabaatilised ehk üle selle pinna juurde antud või äravõetud soojushulk võrdne nulliga;
- **Sisepinna temperatuuriindeks** (*temperature factor at the internal surface*) f_{Rsi}, - sise- ja välispinna temperatuuride vaheline erinevus, jagatuna sise- ja välistemperatuuride erinevusega, mis on arvutatud sisepinna soojustakistuse R_{si} põhjal. Temperatuuriindeksi abil on võimalik hinnata külmasilla kriitilisust tema soojus- ja niiskustehnilise toimivuse suhtes.
- **Redutseeritud soojuserijuhtivusega (kvaasihomogeense) kihi ekvivalentne soojuserijuhtivus** λ', W/(m·K): soojuslikult peaaegu homogeenne kiht, mis koosneb mitmest erineva soojusjuhtivusega materjalist, kuid mida on võimalik käsitleda ekvivalentse soojusjuhtivusega homogeense kihina.

3.2 Arvutuspõhimõtted

Arvutatav piirdetarindite liitekoht või külmasild jagatakse väikesteks elementideks. Üksikutest elementidest koostatakse uuritavat sõlme piisavalt täpselt kirjeldav tervikmudel põhimõttel, et kus on geomeetria keerulisem, on elementide sõlmpunktide vahemaa väiksem (Joonis 3.1).

Kui arvutusmudel ääretingimusteed ehk tarindite liitekohta ümbritsevad temperatuurid on teada, saab arvutusvõrgu sõlmpunktide temperatuure arvutada energia jäävuse seadusest ja soojuslevi Fourier'i seadusest tuletatud võrrandite süsteemi abil Temperatuuri jaotumise andmete põhjal on võimalik Fourier' seadust kohaldades arvutada soojusvoogusid.



Joonis 3.1 Akna ja seina liitekoha (vasakul) jaotamine eri soojuserijuhtivusega materjaliosadeks (keskel) ja väikesteks elementideks (paremal).

Tarindite liitekoha või külmasilla arvutusulatuse soojuserikadu L_{2D} ja L_{3D} kirjeldab antud kahe- või kolmemõõtmelist tarindite liitekohta läbivat soojusvoolu (pikkusühiku kohta) (3.1)

$$L_{2D} = \frac{\Phi}{(t_i - t_e)}, \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \qquad 3.1$$

Piirdetarindite liitekoha joonsoojusläbivuse Ψ, W/(m·K) saab arvutada valemi 3.2 abil

$$\Psi_j = L_{2D} - \sum_{x=1}^{N} U_x \cdot b_x, \text{ W/(m·K)} \qquad 3.2$$

kus:

Ψ_j tarindite liitekoha joonsoojusläbivus, W/(m·K).

L_{2D} kahemõõtmelise arvutuse tulemusel leitud tarindi arvutusulatuse soojuserikadu, W/(m·K);

U_x liitekohta moodustavate hooneosade ja tarindite soojusläbivus, W/(m^2·K);

b_x liitekohta moodustavate hooneosade ja tarindite arvutusulatuse pikkus, m;

3.2.1 Pinna soojustakistused

Energiaarvutuste jaoks kasutatavad sisepinna soojustakistused on esitatud standardis EVS-EN ISO 6946, 2017b, millele ka EVS-EN ISO 10211, 2017 standard viitab:

- sisepinna soojuspinnatakistus, soojusvool üles R_{si} = 0,10 m^2·K/W;
- sisepinna soojuspinnatakistus, horisontaalne soojusvool R_{si} = 0,13 m^2·K/W;
- sisepinna soojuspinnatakistus, soojusvool alla R_{si} = 0,17 m^2·K/W;
- välispinna soojuspinnatakistus, soojusvool alla R_{se} = 0,04 m^2·K/W.

Külmasilla kriitilisuse hindamisel kasutatakse suuremaid sisepinna soojustakistusi, vt. ptk. 0

Külmasilla kriitilisuse hindamine temperatuuriindeksi abil lk. 24, Tabel 3.3.

3.2.2 Arvutusulatus

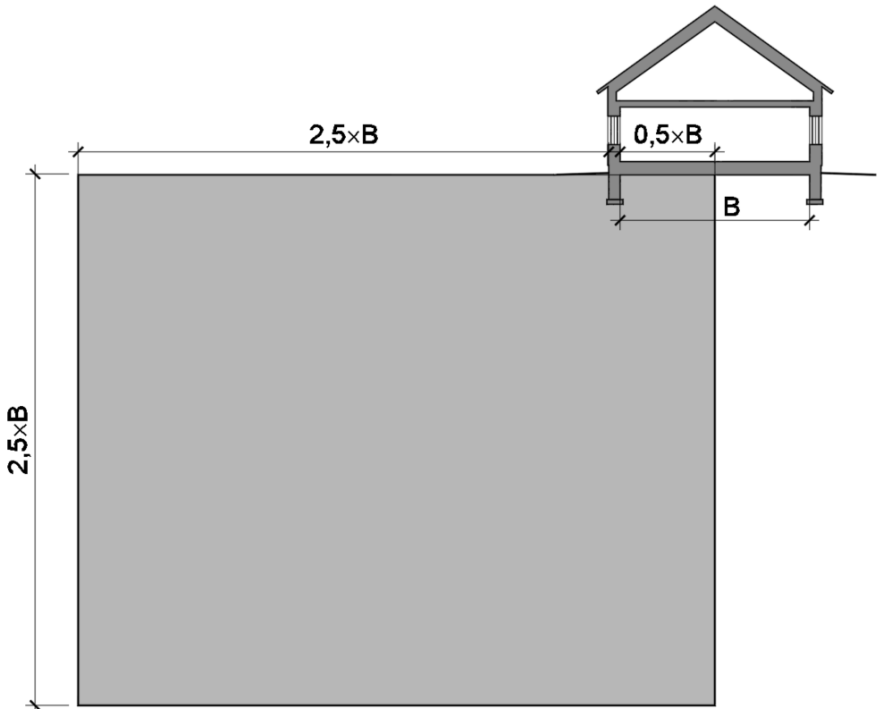
Kuna kogu hoone modelleerimisel ühtainsat geomeetrilist mudelit ei ole mõistlik, siis jagatakse hoone mitmeks osaks, kasutades selleks adiabaatilisi katkestustasapindu. Osadeks jagamine tuleb teha nii, et jaotatud hoone ja tervikliku hoone arvutuste tulemused teineteisest ei erineks. Jaotus mitmeks geomeetrilisteks mudeliks saavutatakse tänu sobivate katkestustasapindade asukohtade valikule. Arvutatava liitekoha suurus valitakse nii suur, et arvutusulatuse servas on soojuslevi tarindi pinnaga risti ja liitekoha kahemõõtmeline soojuslevi ei mõjuta soojuslevi liitekoha serva alal.

Enamus juhtudel piisab, kui arvutusulatuse määramisel lähtutakse Tabel 3.1 juhistest.

Tabel 3.1 Arvutusulatus tarindite liitekoha soojuskadude arvutamisel (täpsemalt vt. EVS-EN ISO 10211, 2017).

Tarindi kirjeldus	Arvutusulatus ehk katkestuspinna kaugus liituvast tarindist,
Õhuga kontaktis olevate tarindite sõlmed	Suurem kas: 1 m või 3 x tarindi paksus *d* või Sümmeetriatasand (kui <1m või 3×d)
Pinnasega kontaktis olevate tarindite sõlmed	
• Horisontaalne kaugus vertikaalsest tasapinnast hoone sees	0,5 × põranda mõõt või 4 m (olenevalt sellest, kumb väärtustest on väiksem)
• Horisontaalne kaugus vertikaalsest tasapinnast väljaspool hoonet	2,5 × põranda mõõt või 20 m (olenevalt sellest, kumb väärtustest on väiksem).
• Vertikaalne kaugus horisontaalsest tasapinnast maapinnast allpool	2,5 × põranda mõõt või 20 m (olenevalt sellest, kumb väärtustest on väiksem).
• Vertikaalne kaugus horisontaalsest tasapinnast allpool põrandapinda (kohaldatakse üksnes juhul, kui vaadeldav põrandapind asub enam kui 2 m. madalamal maapinnast)	2,5 × põranda mõõt või 20 m (olenevalt sellest, kumb väärtustest on väiksem).
• Horisontaalne kaugus vertikaalsest tasapinnast hoone sees	0,5 × põranda mõõt või 4 m (olenevalt sellest, kumb väärtustest on väiksem)

Kui arvutused hõlmavad ka soojuskadu pinnasesse (vundamendid, põrandad, keldrid), siis tuleb katkestustasapinnad arvutada põranda mõõtme abil (Joonis 3.2).



Joonis 3.2 Pinnast hõlmava 2D geomeetrilise mudeli katkestustasapinnad.

Kahemõõtmeliste arvutuste puhul asub põranda keskel vertikaalne sümmeetriatasapind (nii modelleeritakse poolt hoonest). Kui ristkülikuliste hoonete puhul piirdutakse ühe tüüpsõlmega, lähtutakse põranda väiksemat mõõtmest (laius). Kolmemõõtmeliste arvutuste ja ristkülikukujulise hoone puhul võetakse aluseks vertikaalsed adiabaatilised pinnad pinnases mõlemas suunas põranda keskel (modelleerides ühte neljandikku hoonest). Ristkülikust erineva kujuga hoonete korral modeleeritakse hoonet kas tervikuna (koos pinnasega igas küljes) või teisendada ülesanne kahemõõtmeliseks, kasutades määramata pikkusega hoonet, mille laius on võrdne põranda tunnusmõõtmega, *B* (EVS-EN ISO 13370, 2017).

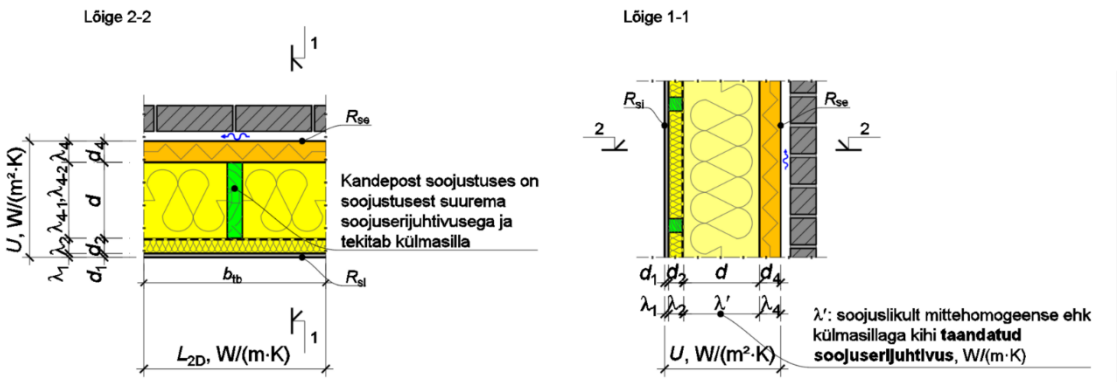
3.2.3 Tarindi soojuslikult mittehomogeense materjalikihi taandamine soojuslikult homogeenseks materjalikihiks

Kahemõõtmelise temperatuurivälja arvutuses tuleb liituva tarindi soojuslikult mittehomogeenne materjalikiht taandada soojuslikult mittehomogeenseks materjalikihiks vastavalt valemile 3.3 (vt. ka Joonis 3.3):

$$\lambda' = \frac{d}{\frac{b_{td}}{L_{2D}} - R_{si} - \Sigma \frac{d_j}{\lambda_j} - R_{se}} \qquad 3.3$$

kus:

λ'	soojuslikult mittehomogeense ehk külmasillaga kihi taandatud soojuserijuhtivus, W/(m·K).
d	soojuslikult mittehomogeense kihi paksus, m;
b_{tb}	arvutusulatuse pikkus, m;
L_{2D}	kahemõõtmelise arvutuse tulemusel leitud tarindi arvutusulatuse soojuserikadu, W/(m·K);
d_j	tarindi osaks oleva homogeense kihi paksus, m;
λ_j	nimetatud homogeensete kihtide soojuserijuhtivus, W/(m·K).



Joonis 3.3 Taandatud soojuserijuhtivuse arvutuspõhimõte.

Mittehomogeenset materjalikihti võib taandada, kui:

- kõnealused materjalikihid asuvad tarindi osas, mis muutub pärast lihtsustamist külgnevaks elemendiks (liituv piirdetarind);
- taandatud soojuserijuhtivusega kihi soojuserijuhtivus pärast lihtsustamist ei ületa lihtsustamiseelse kihi kõige väiksema soojusjuhtivusega materjali soojusjuhtivust üle 1,5 korra.

3.2.4 Piirdetarindite liitekohtade pikkused ja soojustuse katkestused

Enamus juhtudel piisab, kui summeerida kokku järgmised piirdetarindite liitekohtade soojuskaod (pikkused kõik mõõdud mõõdetakse piirdetarindite sisepinnast):

- Välisseinte välisnurk (pikkus = seina kõrgus põrandast laeni);
- Välisseinte sisenurk (pikkus = seina kõrgus põrandast laeni);
- Katuslagi (katuslaega hoonel) / välissein (pikkus = välisseina perimeeter (liitekoha joonsoojusläbivus võib olla erinev räästas, viilus või parapetis));
- Pööningu põrand (pööninguga hoonel) / välissein (pikkus = välisseina perimeeter);
- Põrand / välissein (pikkus = välisseina perimeeter);
- Rõdu / välissein (pikkus = rõdu laius (ehk pikkus vaate peal));
- Katuslagi / vahesein (pikkus = katuslae ja vaheseina pikkus (ei arvestata kahte vaheseina külge));
- Katusehari (katus liitub katusega) (pikkus = katusharja pikkus);
- Põrand / vahesein (pikkus = põranda ja vaheseina pikkus (ei arvestata kahte vaheseina külge));
- Aken / sein alt (pikkus = akna laius);
- Aken / sein külgedelt ja ülalt (pikkus = akna laius + 2 korda akna kõrgus);
- Uks / sein alt (pikkus = ukse laius);
- Uks / sein külgedelt ja ülalt (pikkus = ukse laius + 2 korda ukse kõrgus);
- Rõdu konsool (pikkus = punktsoojusläbivus);
- Korsten = punktsoojusläbivus või korstna ümbermõõt, kui on joonsoojusläbivus);
- Post-vundament (pikkus = punktsoojusläbivus);
- Välisseinte ja katuse nurk, välisseinte ja põranda nurk (pikkus = punktsoojusläbivus).

3.3 Arvutusmeetodid ja -tarkvarad

Tarindite liitekoha soojuslevi ja temperatuurijaotuse arvutusmeetodid on esitatud standardites:

- EVS-EN ISO 10211, 2017 Külmasillad hoones. Soojusvood ja pinnatemperatuurid. Üldised arvutusmeetodid;
- EVS-EN ISO 10077, 2017 Akende, uste ja luukide soojustehniline toimivus. Soojusläbivuse arvutus.
    - Osa 1: Üldosa;
    - Osa 2: Raamide numbriline arvutusmeetod;
- ISO 15099, n.d. Thermal performance of windows, doors and shading devices. – Detailed calculations.

Tarindite liitekohtade joon- ja punktsoojusläbivuste ning temperatuuriindeksi väärtustena kasutatakse ehitusprojekti andmeid. Soojuslevi on tarindite geomeetria muutudes, liitekohtades ja soojustuse katkestuste juures kahe- või kolmemõõtmeline. Mitmemõõtmelise arvutuse tegemiseks on otstarbekas kasutada sellekohast arvutustarkvara (Tabel 3.2). Arvutuse käigus jaotatakse arvutatav tarindite liitekoht väikesteks osadeks ning arvutatakse temperatuuri ja soojuslevi muutuvates või tasakaalutingimustes.

Tabel 3.2. Tarkvarad, mida saab kasutada mitmemõõtmelise soojuslevi arvutuseks.

Nimi	Tüüp	2D/3D	Ääretingimused	Geomeetria	Litsents	Valideerimine
Ehitusfüüsika tarkvarad						
AnTherm	H	3D	SS	R	Kommerts	EN ISO 10211, EN ISO 10077-2
Argos	H	2D	SS	FF	Kommerts	
Bisco / Bistra	H	2D	SS / TR	FF	Kommerts	EN ISO 10211, EN ISO 10077-2
Champs-bes	HAM	2D	TR	R	Vabavara	EN ISO 10211
David32	H	3D	SS	R	Vabavara	EN ISO 10211
Delphin	HAM	2D	TR	R	Kommerts	HAMSTAD; EN 15026:2007
Flixo	H	2D	SS	FF	Kommerts	EN ISO 10211, EN ISO 10077-2
FramePlus	H	2D		FF	Kommerts	
HAMLab	HAM	3D	TR	R	Vabavara	
Heat 2	H	2D	TR	R	Kommerts	EN ISO 10211 EN ISO 10077-2
Heat 3	H	3D	TR	R	Kommerts	EN ISO 10211
KOBRA v3.0w	H	3D	SS	R	Vabavara	EN ISO 10211
KOBRU86 / Sectra	H	2D	SS / TR	R	Kommerts	EN ISO 10211
RadTherm	H	3D	TR	FF	Kommerts	EN ISO 10211
Solido	H	3D	SS	FF	Kommerts	EN ISO 10211
TAS ambiens	H	2D	TR	FF	Kommerts	EN ISO 10211
Therm	H	2D	SS	FF	Vabavara	EN ISO 10211
Trisco / Voltra	H	3D	SS / TR	R	Kommerts	EN ISO 10211
UNorm	H	3D	SS	R	Vabavara	EN ISO 10211, EN ISO 10077-2
WUFI 2D 3.2	HM	2D	TR	FF	Kommerts	EN ISO 10211
Universaalsed lõplike elementide meetodi tarkvarad						
Ansys multiphysics	Univ.	3D	TR	FF	Kommerts	
Ansys CFX	Univ.	3D	TR	FF	Kommerts	
Fluent	Univ.	3D	TR	FF	Kommerts	
Phoenics	Univ.	3D	TR	FF	Kommerts	
Comsol multiphysics	Univ.	3D	TR	FF	Kommerts	EN ISO 10211
SAMCEF thermal	H	3D	TR	FF		

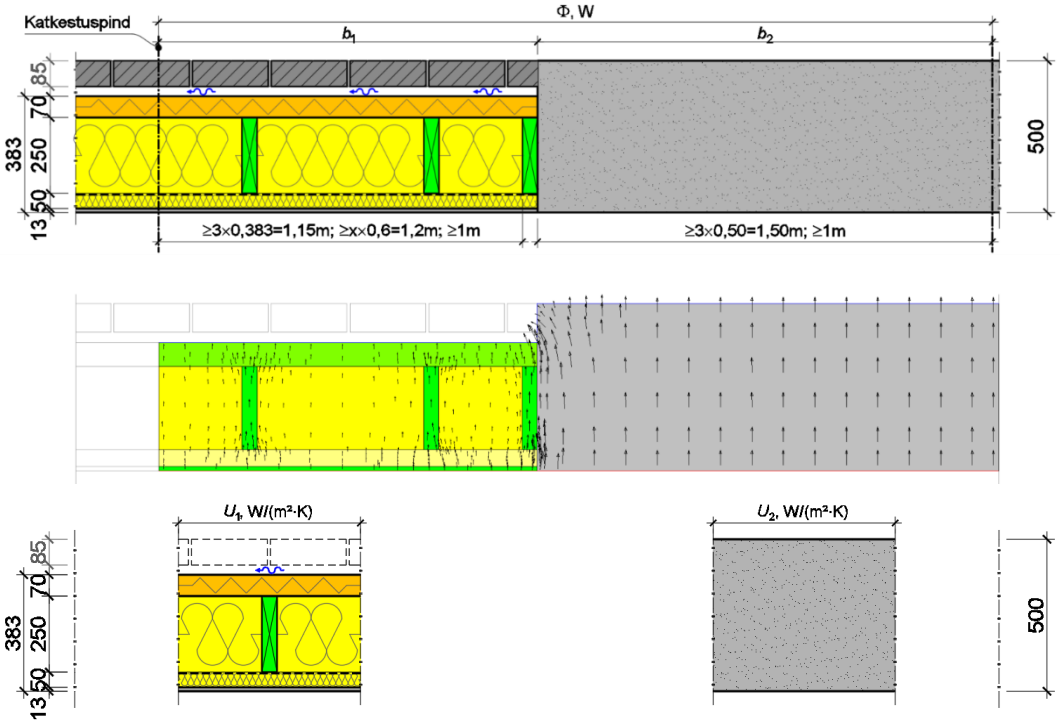
Tarkvara tüüp: H – soojuslevi, HAM – soojus-, õhu- ja niiskuslevi, Univ.– universaalne.
2D – kahemõõtmeline arvutus, 3D – kolmemõõtmeline arvutus.
Ääretingimused: SS – statsionaarolukord, TR – muutuvad ääretingimused.
Geomeetria: R – hulknurkne geomeetria, FF – vaba geomeetria, st ka kõverjooned.

3.4 Joonsoojusläbivuse arvutus

3.4.1 Kahe tasapinnalise tarindi liitumine

Kahe erineva paksusega ja soojusläbivusega välisseina liitekohas on täiendav soojuskadu (Joonis 3.4). Piirdetarindite liitekoha joonsoojusläbivuse arvutukäik on järgmine:

- Koostatakse tarindite liitekoha temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatusega mõlemale poole liitekohta:
  - vähemalt 3 korda liituva tarindi paksust,
  - vähemalt 1 meeter,
  - nii, et katkestuspind kajastaks karkassipostide sümmeetriat;
- Kuna puitkarkasseina tellisfassaadi ja tuuletõkke vaheline õhkvahe on välisõhuga tuulduv, siis tuuletõkkeplaadist väljaspool olevaid materjalikihte soojusläbivuse arvutustes arvesse ei võeta;
- Määratakse materjalide arvutuslikud soojuserijuhtivused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuserijuhtivusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Puitkarkassseinas on postidest sees pool ristiroovitusega soojustuskiht. See mittehomogeenne materjalikiht kirjeldatakse taandatud soojuserijuhtivuse suurusega vastavalt valemile 3.3.
- Sõltumata karkassipostide tegelikust jaotusest, paigaldatakse puitpost alati puitseina otsa, poorbetoonseinaga liitumise juurde ja joonistatakse see post välja ka temperatuurivälja mudelisse;
- Arvutatakse soojusvool Φ, W läbi tarindite liitekoha (pikkusühiku kohta) (Joonis 3.4, keskel);
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse tarindite liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu L_{2D}, W/(m·K) vastavalt valemile 3.1;
- Arvutatakse liituvate tarindite soojusläbivused U_i, W/(m^2·K) (Joonis 3.4, all) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu liitekohta läbiv soojusvool (liitekoha kogusoojusläbivus);
- Piirdetarindite liitekoha joonsoojusläbivuse Ψ, W/(m·K) saab arvutada valemi 3.2 abil, kui arvutusulatuse soojuserikaost lahutada liituvate tarindite soojusläbivuste ja arvutusulatuste korrutised.

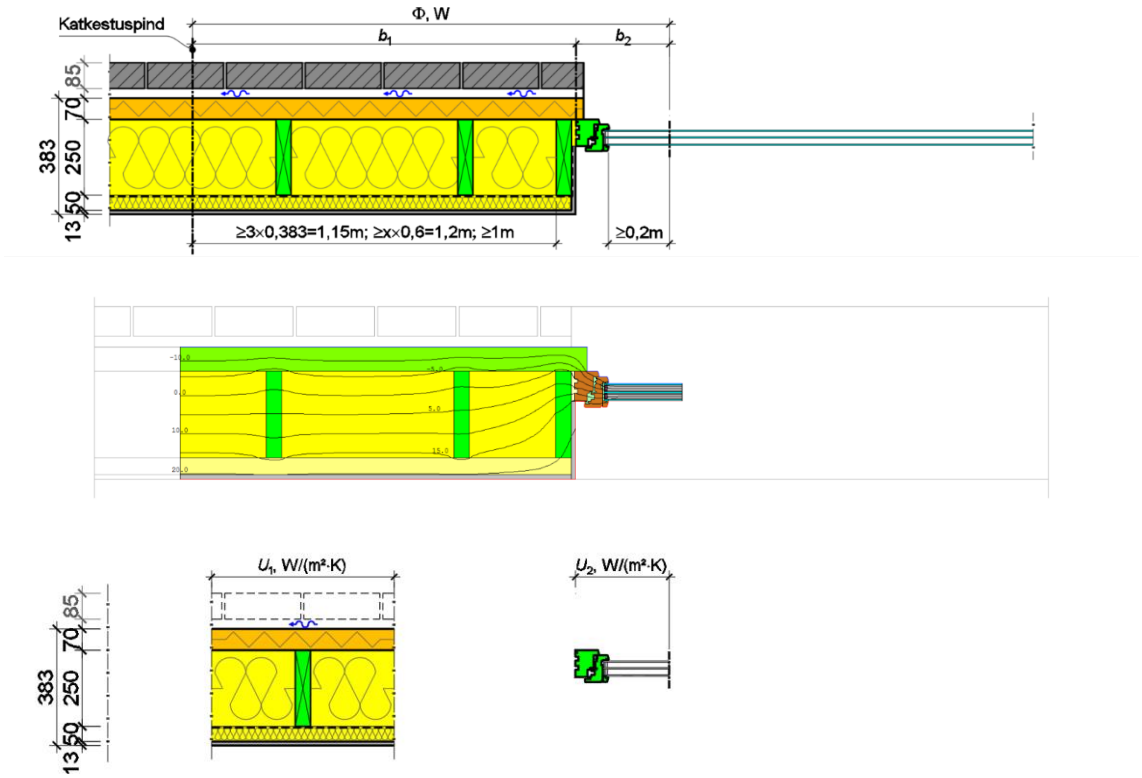


Joonis 3.4 Kahe, erineva paksusega ja soojusläbivusega, piirdetarindi liitekoha joonsoojusläbivuse arvutuspõhimõte.

3.4.2 Akna ja seina liitumine

Akna ja välisseina liitekohas on täiendav soojuskadu (Joonis 3.5). Liitekoha joonsoojusläbivuse arvutukäik on järgmine:

- Koostatakse tarindite liitekoha temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatusega mõlemale poole liitekohta:
  - Seinal alates seinaäärsest postist:
    - vähemalt 3 korda tema paksust,
    - vähemalt 1 meeter,
    - nii, et katkestuspind kajastaks karkassipostide sümmeetriat;
  - aknal alates raami kõige suuremast eendist nähtavast klaasiosast (arvestamata väljaulatuvaid tihendeid) (EN ISO 10077-2, 2012):
    - kuni 60 mm paksuse klaasingu korral on piisav 0,2m arvutusulatus,
    - muudel juhtudel tuleb pikkust suurendada vastavalt standardile (ISO 10211, 2007) ehk sarnaselt seina arvutusulatusele;
- Akna puhul kasutatakse reaalset akna lengi ja raami lahendust, kuna siis saab akna liitekoha joonsoojusläbivuse kõige reaalsemalt arvesse võtta;
- Kuna seina tellisfassaadi ja tuuletõkke vaheline õhkvahe on välisõhuga tuulduv, siis tuuletõkkeplaadist väljaspool olevaid materjalikihte soojusläbivuse arvutustes arvesse ei võeta;
- Määratakse materjalide arvutuslikud soojuserijuhtivused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuserijuhtivusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Puitkarkassseinas on postidest sees pool ristiroovitusega soojustuskiht. See mittehomogeenne materjalikiht kirjeldatakse taandatud soojuserijuhtivuse suurusega vastavalt valemile 3.3.
- Sõltumata karkassipostide tegelikust jaotusest, paigaldatakse puitpost alati puitseina otsa, poorbetoonseinaga liitumise juurde ja joonistatakse see post välja ka temperatuurivälja mudelisse;
- Arvutatakse soojusvool Φ, W läbi tarindite liitekoha (pikkusühiku kohta) (Joonis 3.5, keskel);
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse akna ja seina liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu L_{2D}, W/(m·K) vastavalt valemile 3.1;
- Arvutatakse välisseina ja akna soojusläbivused U_i, W/(m^2·K) (Joonis 3.5, all) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu liitekohta läbiv soojusvool (liitekoha kogusoojusläbivus). Akna puhul kasutatakse arvutusulatuse osamudelit (liitekoha mudelist eemaldatakse sein);
- Akna ja välisseina liitekoha joonsoojusläbivuse Ψ, W/(m·K) saab arvutada valemi 3.2 abil, kui arvutusulatuse soojuserikaost lahutada akna ja seina soojusläbivuste ja arvutusulatuste korrutised. Seina arvutusulatus (b_1) on katkestuspinnast kuni akna lengini (akna paigalduseks jääv vuuk on seina osa). Akna arvutusulatus (b_2) on akna lengist kuni katkestuspinnani).

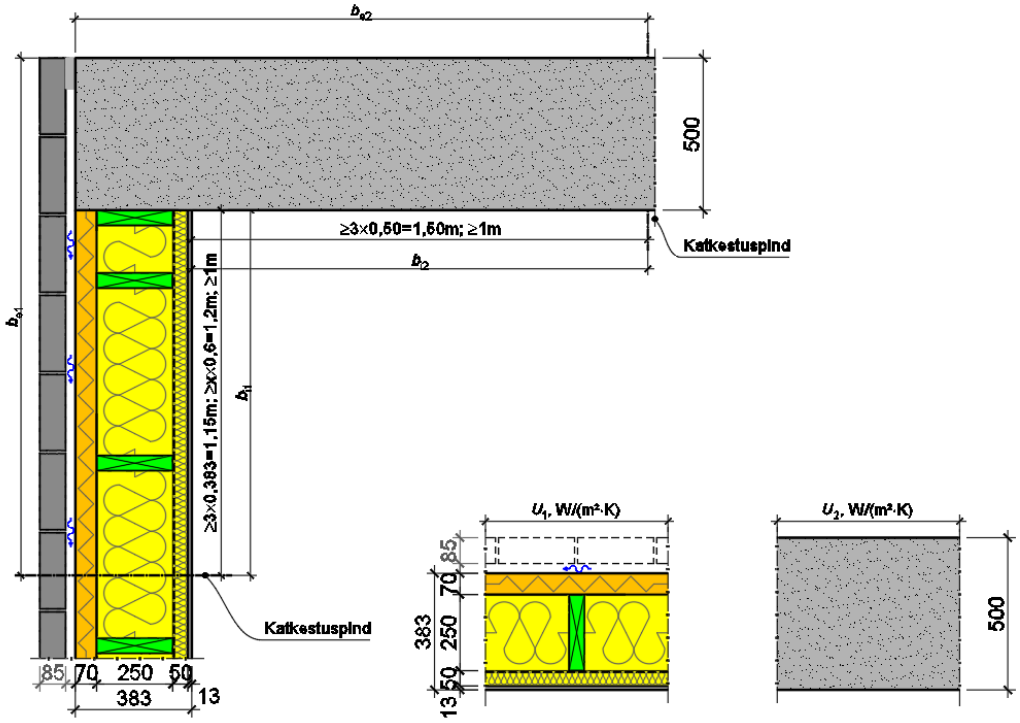


Joonis 3.5 Akna ja välisseina liitekoha joonsoojusläbivuse arvutuspõhimõte.

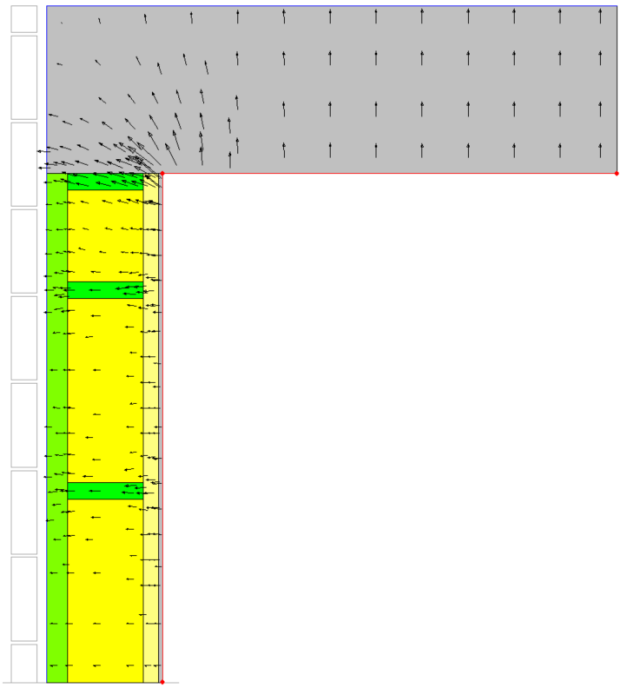
3.4.3 Kahe välisseina liitekoht välisnurgas

Kahe välisseina liitekohas on täiendav soojuskadu (Joonis 3.6), mille joonsoojusläbivuse arvutukäik on järgmine:

- Koostatakse tarindite liitekoha temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatusega mõlemale poole liitekohta seintel:
  - vähemalt 3 korda tema paksust,
  - vähemalt 1 meeter,
  - nii, et katkestuspind kajastaks karkassipostide sümmeetriat;
- Kuna seina tellisfassaadi ja tuuletõkke vaheline õhkvahe on välisõhuga tuulduv, siis tuuletõkkeplaadist väljaspool olevaid materjalikihte soojusläbivuse arvutustes arvesse ei võeta;
- Määratakse materjalide arvutuslikud soojuserijuhtivused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuserijuhtivusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Puitkarkassseinas on postidest sees pool ristiroovitusega soojustuskiht. See mittehomogeenne materjalikiht kirjeldatakse taandatud soojuserijuhtivuse suurusega vastavalt valemile 3.3.
- Sõltumata karkassipostide tegelikust jaotusest, paigaldatakse puitpost alati puitseina otsa, poorbetoonseinaga liitumise juurde ja joonistatakse see post välja ka temperatuurivälja mudelisse;
- Arvutatakse soojusvool Φ, W läbi seinte liitekoha;
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse tarindite liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu L_{2D}, W/(m·K) vastavalt valemile 3.1;
- Arvutatakse välisseinte soojusläbivused U_i, W/(m^2·K) (Joonis 3.7 Soojusvool kahe välisseina liitekoha välisnurga) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu liitekohta läbiv soojusvool (liitekoha kogusoojusläbivus);
- Välisseinte liitekoha joonsoojusläbivuse Ψ, W/(m·K) saab arvutada valemi 3.2 abil, kui arvutusulatuse soojuserikaost lahutada mõlema seina soojusläbivuste ja arvutusulatuste korrutised.



Joonis 3.6 Kahe välisseina välisnurga liitekoha joonsoojusläbivuse arvutuspõhimõte.

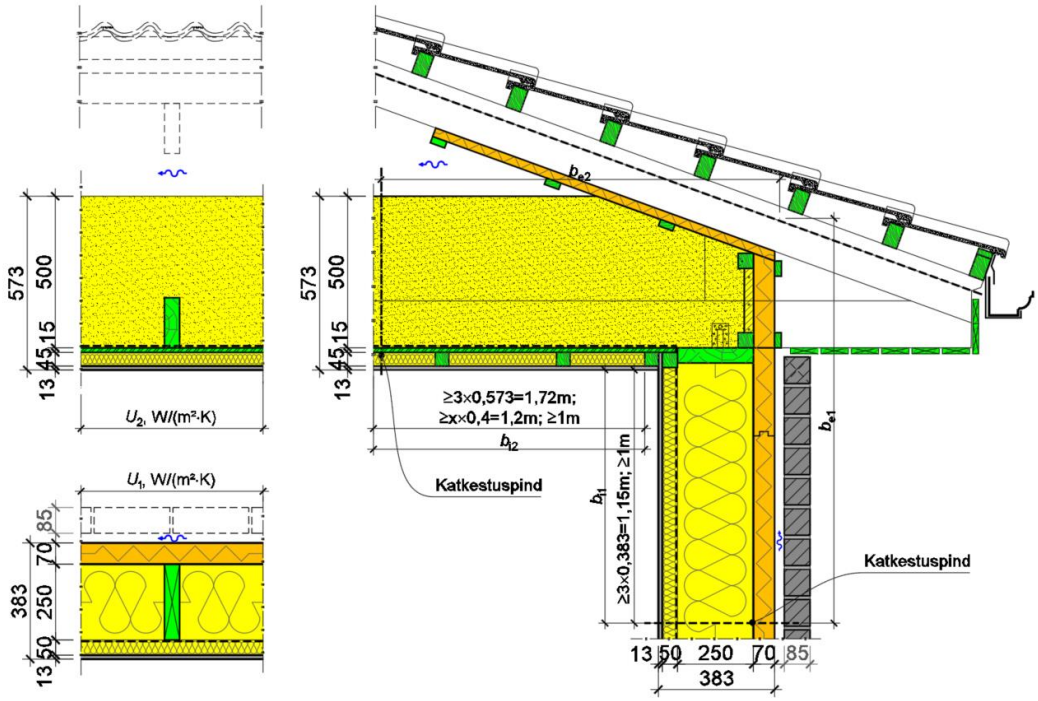


Joonis 3.7 Soojusvool kahe välisseina liitekoha välisnurgas.

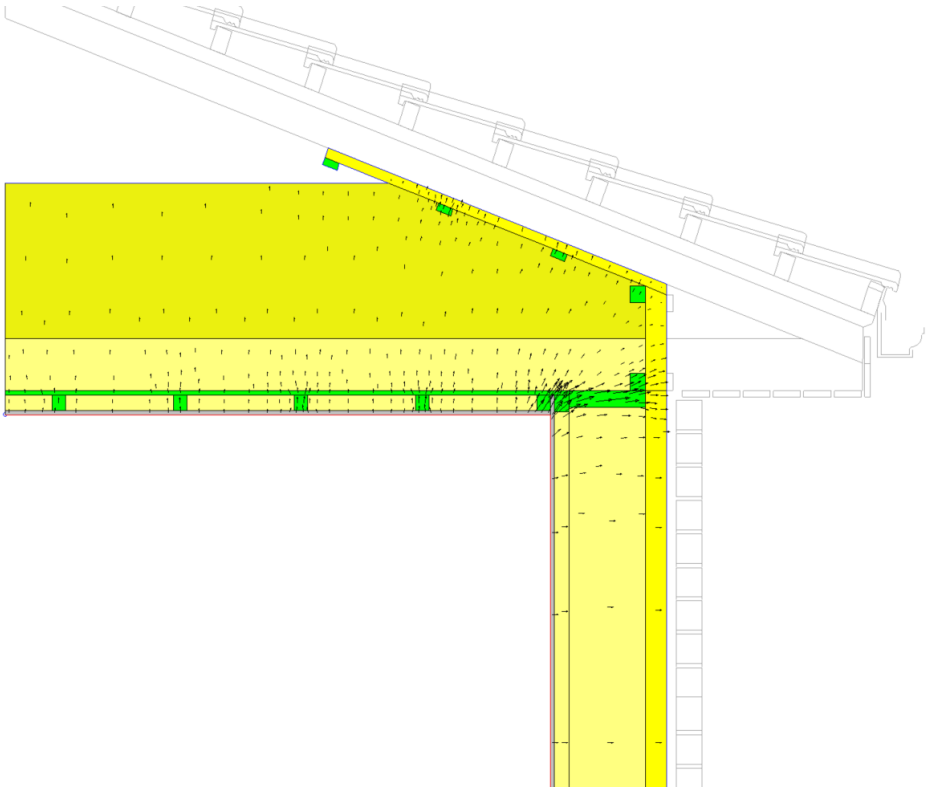
3.4.4 Räästa sõlm

Välisseina ja kaldkatusega hoone katuse ja pööningu põranda liitekohas on täiendav soojuskadu (Joonis 3.8), mille joonsoojusläbivuse arvutukäik on järgmine:

- Koostatakse tarindite liitekoha temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatusega mõlemale poole liitekohta:
    - vähemalt 3 korda tema paksust,
    - vähemalt 1 meeter,
    - nii, et katkestuspind kajastaks puitroovide sümmeetriat;
- Kuna tellisfassaadi tagune ja pööning on välisõhuga tuulduv, siis materjalikihte alates tuuletõkkeplaadist või soojustuse välispinnast väljapoole soojusläbivuse arvutustes arvesse ei võeta;
- Määratakse materjalide arvutuslikud soojuserijuhtivused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuserijuhtivusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Puitkarkassseinas on postidest sees pool ristiroovitusega soojustuskiht ja pööningu põrandas on katusefermi alumise vöö kiht. Need mittehomogeensed materjalikihid kirjeldatakse taandatud soojuserijuhtivuse suurusega vastavalt valemile 3.3.
- Sõltumata laeroovide tegelikust jaotusest, paigaldatakse roov alati seina äärde, siis joonistatakse see post välja ka temperatuurivälja mudelisse;
- Arvutatakse soojusvool Φ, W läbi räästasõlme liitekoha (pikkusühiku kohta) (Joonis 3.9);
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse tarindite liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu L_{2D}, W/(m·K) vastavalt valemile 3.1;
- Arvutatakse välisseina ja pööningu põranda soojusläbivused U_i, W/(m^2·K) (Joonis 3.9) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu räästa liitekohta läbiv soojusvool (liitekoha kogusoojusläbivus);
- Räästasõlme liitekoha joonsoojusläbivuse Ψ, W/(m·K) saab arvutada valemi 3.2 abil, kui arvutusulatuse soojuserikaost lahutada välisseina ja pööningu põranda soojusläbivuste ja arvutusulatuste korrutised.



Joonis 3.8 Välisseina ja pööningu põranda liitekoha joonsoojusläbivuse arvutuspõhimõte.

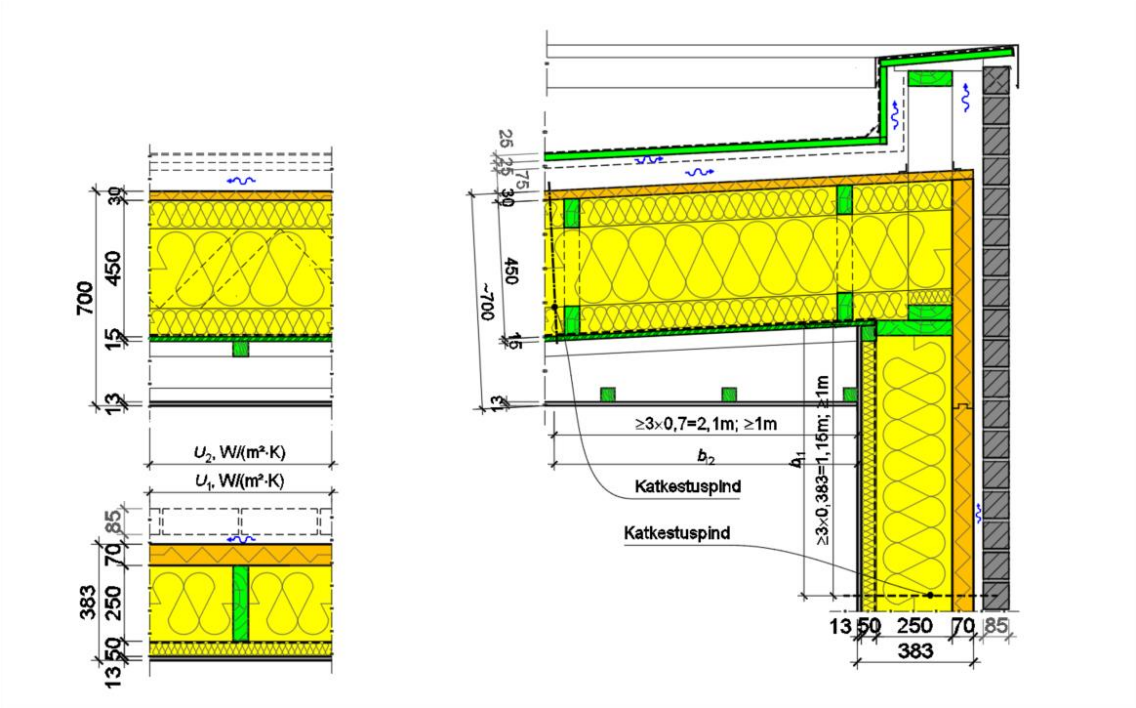


Joonis 3.9 Soojusvool välisseina ja pööningu põranda liitekohas.

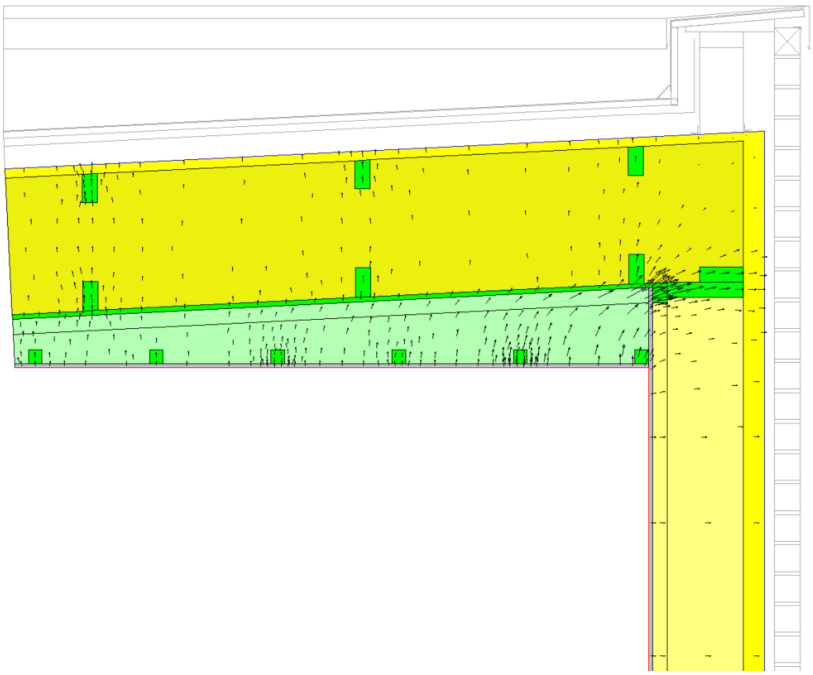
3.4.5 Parapeti sõlm

Välisseina ja lamekatusega hoone liitekohas on täiendav soojuskadu (Joonis 3.10), mille arvutukäik on järgmine:

- Koostatakse tarindite liitekoha temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatusega mõlemale poole liitekohta seintel:
    - vähemalt 3 korda tema paksust,
    - vähemalt 1 meeter,
    - nii, et katkestuspind kajastaks puitroovide sümmeetriat;
- Kuna tellisfassaadi tagune ja pööning on välisõhuga tuulduv, siis materjalikihte alates tuuletõkkeplaadist või soojustuse välispinnast väljapoole soojusläbivuse arvutustes arvesse ei võeta;
- Määratakse materjalide arvutuslikud soojuserijuhtivused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuserijuhtivusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Puitkarkassseinas on postidest sees pool ristiroovitusega soojustuskiht ja pööningu põrandas on katusefermi alumise vöö kiht. Need mittehomogeensed materjalikihid kirjeldatakse taandatud soojuserijuhtivuse suurusega vastavalt valemile 3.3.
- Sõltumata laeroovide tegelikust jaotusest, paigaldatakse roov alati seina äärde, siis joonistatakse see post välja ka temperatuurivälja mudelisse;
- Arvutatakse soojusvool Φ, W läbi parapetisõlme liitekoha (pikkusühiku kohta) (Joonis 3.11);
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse tarindite liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu L_{2D}, W/(m·K) vastavalt valemile 3.1;
- Arvutatakse välisseina ja katuslae soojusläbivused U_i, W/(m^2·K) (Joonis 3.10) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu parapeti liitekohta läbiv soojusvool (liitekoha kogusoojusläbivus). Ripplae ja katuslae vaheline õhuruum modelleeritakse ekvivalentse soojustakistusega materjaline. Õhkvahesid, mille mõõtmed ristuvate telgede mõlemal suunal on suuremad kui 0,5 m, käsitletakse ruumidena;
- Parapetisõlme joonsoojusläbivuse Ψ, W/(m·K) saab arvutada valemi 3.2 abil, kui arvutusulatuse soojuserikaost lahutada välisseina ja katuslae soojusläbivuste ja arvutusulatuste korrutised.



Joonis 3.10 Välisseina ja pööningu põranda liitekoha joonsoojusläbivuse arvutuspõhimõte.

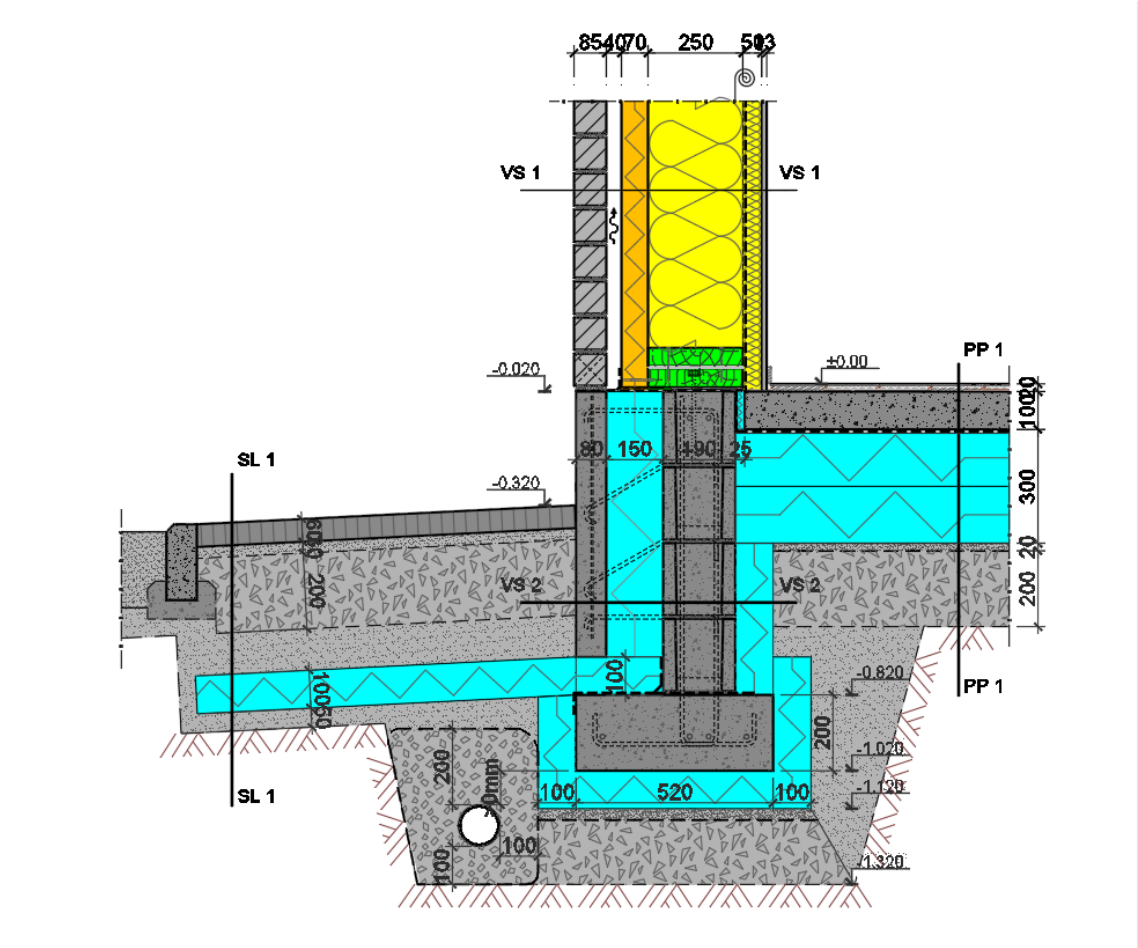


Joonis 3.11 Soojusvool välisseina ja katuslae liitekohas.

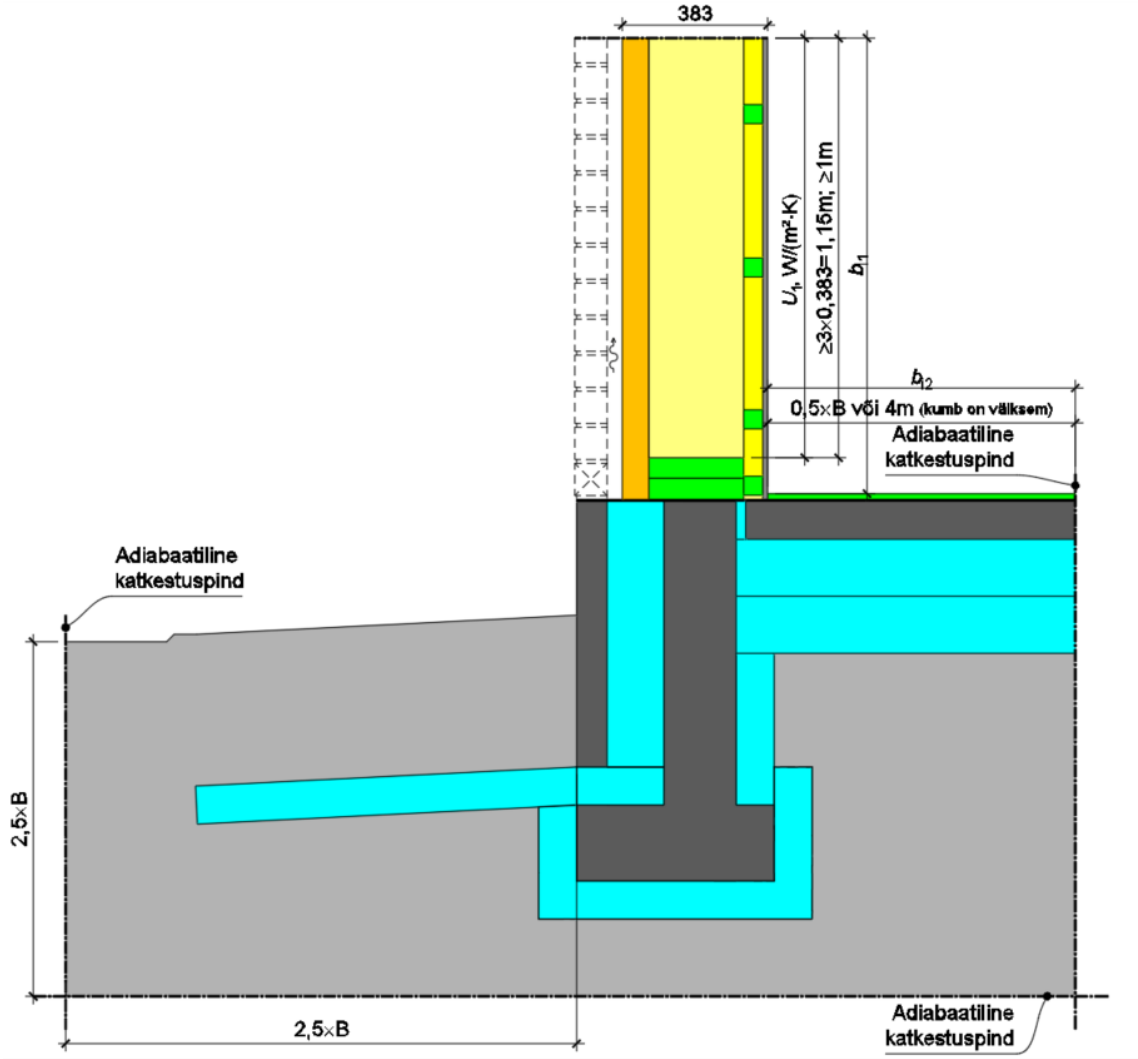
3.4.6 Sokli sõlm pinnasele toetava põrandaga

Pinnasele toetatud betoonpõranda, lintvundamendi ja puitkarkassvälisseina koht soklis on (Joonis 3.12). Soklisõlme joonsoojusläbivuse arvutukäik on järgmine:

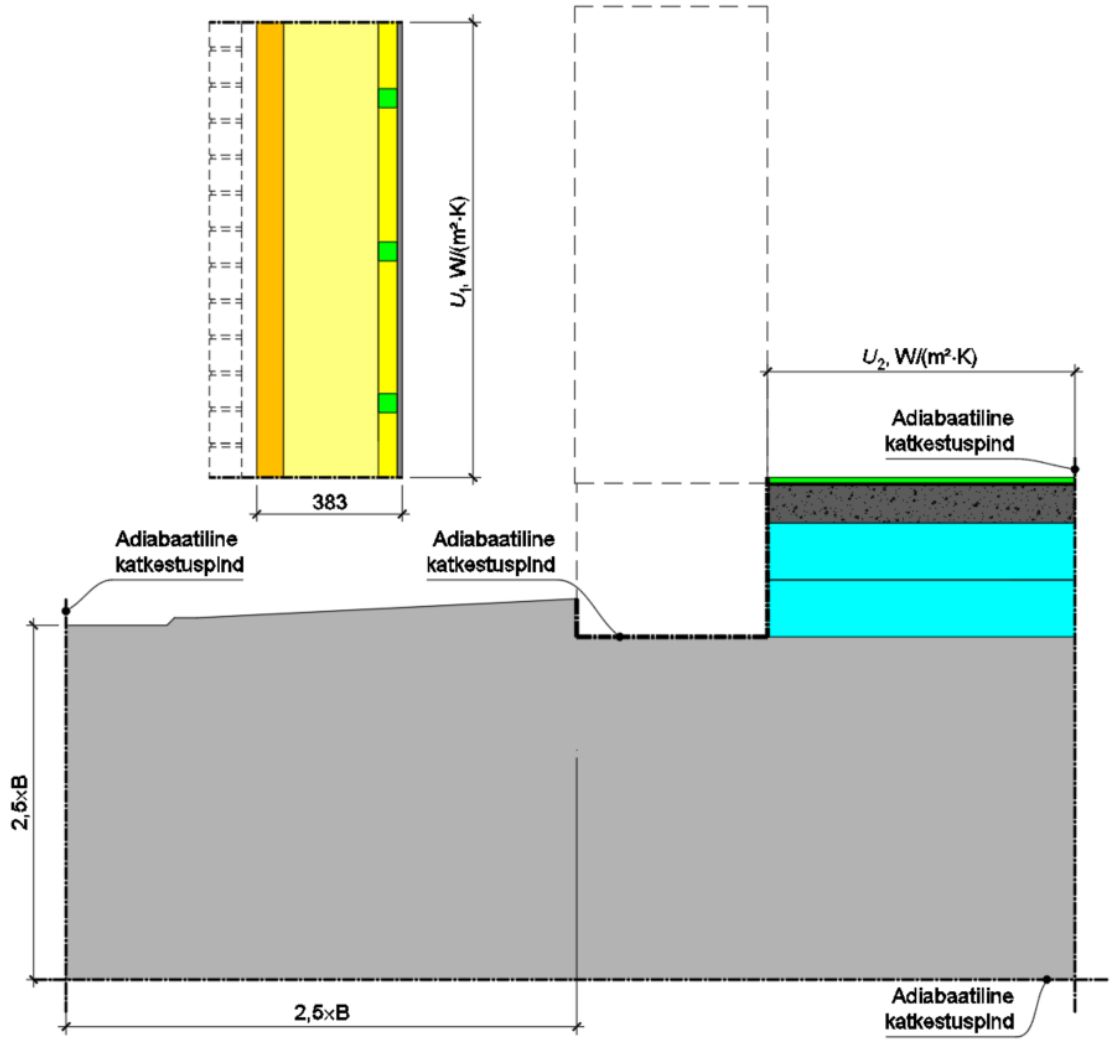
- Koostatakse tarindite liitekoha temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatusega mõlemale poole liitekohta:
  - seinal:
    - vähemalt 3 korda tema paksust,
    - vähemalt 1 meeter,
  - põrandal:
    - horisontaalne kaugus vertikaalsest tasapinnast väljaspool hoonet: 2,5 × põranda mõõt (≤20m),
    - vertikaalne kaugus horisontaalsest tasapinnast maapinnast allpool: 2,5 × põranda mõõt (≤20m),
    - vertikaalne kaugus horisontaalsest tasapinnast allpool põrandapinda (kohaldatakse üksnes juhul, kui vaadeldav põrandapind asub enam kui 2 m. madalamal maapinnast): 2,5 × põranda mõõt (≤20m)
    - horisontaalne kaugus vertikaalsest tasapinnast hoone sees:0,5 × põranda mõõt (≤ 4m)
- Kuna tellisfassaadi tagune on välisõhuga tuulduv, siis seda materjalikihte tuuletõkkeplaadist väljapoole soojusläbivuse arvutustes arvesse ei võeta;
- Määratakse materjalide arvutuslikud soojuserijuhtivused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuserijuhtivusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Kui tarindites on mittehomogeensed materjalikihid, mille osad ei jää temperatuuriväljaarvutustes näha, siis need mittehomogeensed materjalikihid kirjeldatakse taandatud soojuserijuhtivuse suurusega vastavalt valemile 3.3.
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse tarindite liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu L_{2D}, W/(m·K) vastavalt valemile 3.1;
- Arvutatakse välisseina ja põranda soojusläbivused U_i, W/(m^2·K) (Joonis 3.10) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu parapeti liitekohta läbiv soojusvool (liitekoha kogusoojusläbivus). Põranda soojusläbivus on otstarbekas arvutada põranda osamudeli abil. Osamudeli tegemiseks eemaldatakse seina osa kuni põranda (põranda soojustuse) alumise pinnani (Joonis 3.14). Kohas, kus sein varem põrandaplaadi või pinnasega kokku puutus, kasutatakse adiabaatilisi piirdepindu. Põranda arvusulatuse soojuserikao L_{2D} väärtus määratakse muudetud detaili teistkordse numbrilise arvutusega. Teise variandina arvutatakse standardis EVS-EN ISO 13370, 2017 kirjeldatud lihtsustatud meetodiga, võttes arvesse põrandaplaadi kogusoojustust.
- Soklisõlme joonsoojusläbivuse Ψ, W/(m·K) saab arvutada valemi 3.2 abil, kui arvutusulatuse soojuserikaost lahutada mõlema seina soojusläbivuste ja arvutusulatuste korrutised.



Joonis 3.12 Pinnasele toetatud betoonpõranda ja puitkarkassvälisseina koht soklis.



Joonis 3.13 Pinnasele toetatud betoonpõranda ja puitkarkassvälisseina liitekoha soojuslevi ja temperatuurivälja arvutusmudel.



Joonis 3.14 Välisseina ja pinnasele toetatud betoonpõranda soojusläbivuse arvutuse osamudelid.

3.5 Külmasilla kriitilisuse hindamine temperatuuriindeksi abil

Temperatuuriindeks saadakse temperatuurivälja tarkvara arvutustes kasutatud sise- ja välistemperatuuri ja minimaalse sisepinnatemperatuuri abil:

$$f_{Rsi} = \frac{t_{si} - t_e}{t_i - t_e} = \frac{R_T - R_{si}}{R_T} \qquad 3.4$$

f_{Rsi} temperatuuriindeks, -;
t_{si} minimaalne sisepinnatemperatuur, °C;
t_i sisetemperatuur, °C;
t_e välistemperatuur, °C;

Projekteerimisel tuleb arvestada, et sisepinna soojustakistus võib olla lokaalselt suurem, eriti seal, kus konvektsioon ja soojuskiirgus on piiratud. Soojuskadude ja külmasilla temperatuuriindeksi arvutustes kasutatakse erinevaid sisepinna soojustakistuste suurusi, sest hoone soojuskadu (joon- ja punktsoojusläbivus) arvutatakse keskmiste suuruste järgi, niiskustehniline toimimine (temperatuuriindeks) arvutatakse kriitiliste suuruste alusel (üldiselt kasutatakse kriitilisuse taset, kus 90% olukordadest ei ületa määratud taset ja 10% olukordadest ületab määratud taset).

EVS-EN ISO 13788, 2012 standard soovitab sisepinna temperatuuri kriitilisuse arvutustes kasutada järgmisi sisepinna soojustakistusi:

- sisepinna soojuspinnatakistus, aknaklaas R_{si} = 0,13 m²·K/W;
- sisepinna soojuspinnatakistus, ruumi ülejäänud osad R_{si} = 0,25 m²·K/W.

EVS-EN ISO 10077, 2017 standardi kohaselt on vähendatud kiirguse ja konvektsiooniga kohtades (servades või kahe pinna vahelises ühenduses) sisepinna soojuspinnatakistus, R_{si} = 0,2 m²·K/W.

Tabel 3.3 esitab pinna soojustakistused, mida kasutada külmasilla kriitilisuse arvutustes.

Tabel 3.3 Külmasilla kriitilisuse arvutustes kasutatud pinna soojustakistused.

	Pinna soojustakistus sõltuvalt soojusvoolu suunast		
	Üles (lagi)	Horisontaalne (sein)	Alla (põrand)
R_{si}, (m²·K)/W (akende juures servades või kahe pinna vahelises ühenduses, kus on vähendatud kiirgus/konvektsioon)	0,10	0,13	0,17
R_{si}, (m²·K)/W (valgust mitteläbilaskvate tarindite pindadel)	0,25	0,25	0,25
R_{se}, (m²·K)/W	0,04	0,04	0,04

Hoonete projekteerimisel Eestis või Eestis olevate uute ja olemasolevate hoonete soojusliku kvaliteedi hindamisel kasutatakse Tabel 3.4's esitatud temperatuuriindeksi piirsuurusi. Suurema niiskuskoormusega ruumidel (niiskusklassid 4 ja 5) tuleb aktsepteeritav temperatuuriindeks määrata eraldi, aga see ei või olla alla 0,8.

Tabel 3.4 Temperatuuriindeksite piirsuurused Eesti hoonete projekteerimise ja soojusliku kvaliteedi hindamisel (EVS-EN ISO 13788, 2012).

Niiskusklass	Temperatuuriindeksi piirsuurus $f_{Rsi,min}$	
	Uued hooned ja rekonstrueeritud hooned	Enne 2000 aastat ehitatud või rekonstrueeritud hooned olemasoleva olukorra hindamiseks
3	≥0,8	≥0,8
≤2	≥0,8	≥0,65

Aknaraamile veeauru kondenseerumise vältimiseks kasutatakse Tabel 3.5's esitatud tempertuuriindeksitemperatuuriindeksi piirsuurusi. Suurema niiskuskoormusega ruumidel (niiskusklassid 4 ja 5) tuleb aktsepteeritav temperatuuriindeks määrata eraldi aga see ei või olla alla 0,75.

Tabel 3.5 Temperatuuriindeksite piirsuurused Eesti hoonete projekteerimise aknaraamile veeauru kondenseerumise vältimiseks (EVS-EN ISO 13788, 2012).

Niiskusklass	Temperatuuriindeksi piirsuurus $f_{Rsi,min}$
3	≥0,7
≤2	≥0,55

3.6 Joonsoojusläbivuse ja külmasilla kriitilisuse arvutuste lähteandete ja tulemuste esitamine

Standardi EVS-EN ISO 10211, 2017 kohaselt tuleb esitada sisendamdned nagu on toodud tabelis 3.6. Tulemuste esitamiseks võib kasutada vormi, mis on allalaetav Exceli failina (vt. joonised 3.15 ja 3.16).

Tabel 3.6 Joonsoojusläbivuse ja külmasilla kriitilisuse arvutuste lähteandmed

Nimetus	Tähis	Ühik	Väärtus	Päritolu, andmete allikas
Geomeetriliste omaduste parameetrid				
Piirdetarindi või liitekoha laius	b	m		
Piirdetarindi paksus	d	m		
Pikkus	l	m		
Põrandaplaadi tunnusmõõt	B	m		
Soojuslike omaduste parameetrid				
Kõikide kasutatud materjalide arvutuslikud soojuserijuhtivused	λ_U	W/(m·K)		
Soojustakistus	R	m²·K/W		
Välispinna soojustakistus	R_{se}	m²·K/W		
Sisepinna soojustakistus	R_{si}	m²·K/W		
Soojusläbivus	U	W/(m²·K)		
Temperatuur	t	°C		
Arvutus mudeli kirjeldus				
Loeteletakse piirangud geomeetrilise mudeli lihtsustustele				
Esitatakse pinnasega kontaktis oleva piirdetarindi arvutusmeetod (kas osamudel või EVS-EN ISO 13370, (2017)				
Numbrilise meetodiga seonduva vea hindamine, %				
Viide arvutusmeetodi/tarkvara valideerimisele				

Tabel 3.7 Joonsoojusläbivuse ja külmasilla kriitilisuse arvutuste arvutustulemuste

Nimetus	Tähis	Ühik	Väärtus
Joonsoojusläbivus	Ψ	W/(m·K)	
Tarindite liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu 2-mõõtmelisel arvutusel	L_{2D}	W/(m·K)	
Punktsoojusläbivus	χ	W/K	
Tarindite liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu 3-mõõtmelisel arvutusel	L_{3D}	W/K	
Sisepinna temperatuuriindeks	f_{Rsi}	-	

Joonis 3.15 esitab näite arvutuste lähteandmete ja tulemuste esitamiseks Exceli tabelarvutuse.

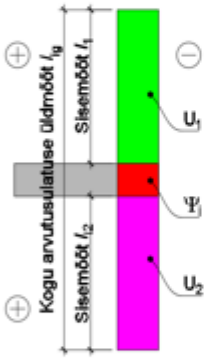
Tarkvara:	Therm 7.5
Kuupäev:	
Autor:	

Välissein 1 / Välissein 2 / Vahelagi

Lähteandmed	R_s, m²·K/W	h_s, W/(m²·K)	Θ, °C	
Välispind (välisõhk)	0.04	25.0	-15.0	
Välispind (pinnas)	0	1000	-15.0	
Sisepind. Joonsoojusläbivuse arvutuseks				
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0.13	7.7	21.0	
- Soojusvoog üles (lagi)	0.1	10.0	21.0	
- Soojusvoog alla (põrand)	0.17	5.9	21.0	
Sisepind. Külmasilla kriitilisuse hindamiseks				
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0.25	4.0	21.0	
- Soojusvoog üles (lagi)	0.1	10.0	21.0	
Sise- ja väliskesk. temperatuuride vahe, θ_i-θ_e			36.0	K

Liituvate tarindite soojusläbivused

1. liituva tarindi soojusläbivus, U_1	0.1126	W/m²K
2. liituva tarindi soojusläbivus, U_2	0.1934	W/m²K



Liituvate tarindite arvutusulatus (arvutusmu

1. liituva tarindi arvutusulatus, l_{i1} (sisemõõdud)	1510	mm
2. liituva tarindi arvutusulatus, l_{i2} (sisemõõdud)	1500	mm
Kogu arvutusulatuse üldmõõt l_{ig} (üldised sisemõõdud)	3335	mm

Tarindite liitekoha arvutusulatust läbiv soojusvool, Φ	19.5459	W
Liituvate taridite arutusulatuse keskmine soojusläbivus, U	0.1804	W/m²K
Madalaim sisepinna temperatuur	19.30	°C

Tarindite liitekoha arvutusulatuse soojuserikadu ja joonsoojus 0.543

Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (2D arvutusest), L_{2D}	0.543	W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (1D, sisemõõdud), $U_1 \times l_{i1} + U_2 \times l_{i2}$	0.460	W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (1D, üldised sisemõõdud), $U_1 \times l_{i1} + U_2 \times l_{i2}$	0.510	W/(m·K)

Tarindite liitekoha joonsoojusläbivus Ψ_l (sisemõõdud)	**0.09**	W/(m·K)
Tarindite liitekoha joonsoojusläbivus Ψ_{lg} (üldised sisemõõdud)	**0.04**	W/(m·K)

Tarindite liitekoha sisepinna minimaalne temperatuuriindeks f_{Rsi}	**0.95**

Eestis on elamute tarindite liitekohtade temperatuuriindeksi piirsuuruseks f_{Rsi} > 0,80.

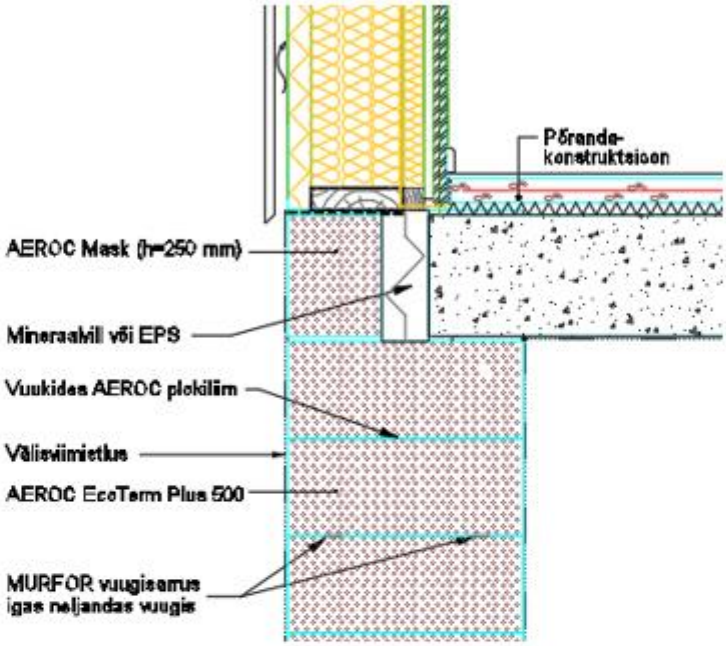
Eestis on elamute akende temperatuuriindeksi piirsuuruseks f_{Rsi} > 0,70.

Joonis 3.15-1 Vahelae ja välisseina liitekoha arvutustulemuste esitus tabelina.

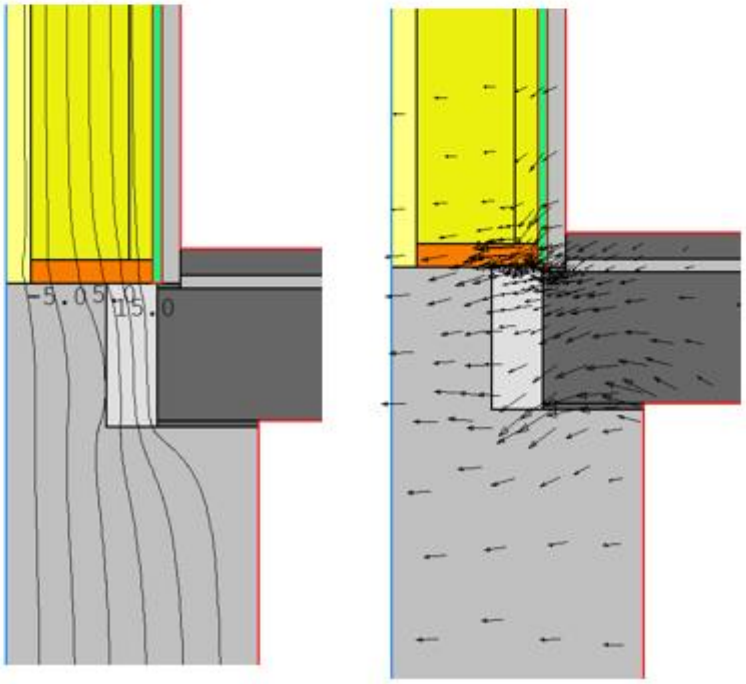
Tarkvara:	Therm 7.5
Kuupäev:	
Autor:	

Välissein 1 / Välissein 2 / Vahelagi

Liitekoha sõlm



Temperatuurivälja joo



Joonis 3.15-2 Vahelae ja välisseina liitekoha arvutustulemuste esitus tabelina.

Tabel 3.8 esitab tüüpiliste materjalide soojusläbivuste omadused.

Tabel 3.8 Tüüpiliste materjalide soojusläbivuste omadused.

Materjal	Soojuserijuhtivus λ_U, W/(m·K)
PIR/PUR soojusisolatsioon	0.025
EPS 100 Silver	0.030
EPS 60 Silver	0.032
Mineraalvill 0,032-33	0.032
EPS 120 Perimeeter	0.035
Mineraalvill 0,037-40	0.037
EPS 80	0.038
EPS 60	0.040
Vahtkumm	0.060
Linirec plaat	0.086
Montaaživaht	0.10
Poorbetoon Aeroc "Classic"	0.10
Puit	0.13
Šlakk (räbu)	0.15
PT isolaatorid	0.15
Vahtkukermiit	0.16
TEP-plaat	0.16
Vineer	0.17
Poorbetoon	0.17
Puitlaastplaat OSB	0.18
Vahtsilikaltsiit	0.20
Keramsiitbetoonplokk "Fibo 3"	0.20
EPDM kumm	0.25
Kipsplaat	0.25
Silikoon	0.35
Polüvinüülkloriid. PVC	0.50
Tsementkiudplaat	0.60
Asfaltbetoon	0.70
Mört	0.80
Müüritis keraamilistest tellistest	0.80
Lubiliivkrohv	0.80
Tsementliivkrohv	1.00
Klaas	1.00
Klaas	1.00
Müüritis silikaattellistest	1.10
Raudbetoon õõnespaneel	1.70
Polümeer-tsement (s.h. montaaži) segu (vuukides)	2.00
Pinnas	2.00
Betoon	2.00
Raudbetoon	2.30
Teras	50
Alumiinium	160

4 Kirjanduse loetelu

EN ISO 10077-2. (2012). *Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames (ISO 10077-2:2012)*. Brussels.

EVS-EN ISO 10077. (2017). *Akende, uste ja luukide soojuslik toimivus. Soojusläbivuse arvutus*.

EVS-EN ISO 10456. (2008). *Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid*.

EVS-EN ISO 13370. (2017). *Hoonete soojuslik toimivus. Soojuslevi pinnasesse. Arvutusmeetodid*. Tallinn. Retrieved from https://www.evs.ee/tooted/evs-en-iso-13370-2017

EVS-EN ISO 13788. (2012). *Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisisese kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid*. Tallinn. Retrieved from http://www.evs.ee/tooted/evs-en-iso-13788-2012

EVS-EN ISO 6946. (2017). *Hoonete komponendid ja hoonekonstruktsioonid. Soojustakistus ja soojusläbivus. Arvutusmeetod*.

EVS-EN ISO 10211. (2017). *Külmasillad hoones. Soojusvoolud ja pinnatemperatuurid. Detailsed arvutused*.

ISO 10211. (2007). *Thermal bridges in building construction -- Heat flows and surface temperatures -- Detailed calculations*. Retrieved from http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=40967

ISO 15099. (2003). *Thermal performance of windows, doors and shading devices -- Detailed calculations*. Geneva.