

Energiatõhususe valdkonna seadusandluse ja arvutusmetoodika muudatused

KOHT: Teaduspargi 6/1, Tallinn SATURN seminariruum

AEG: 14.11.2018 11:30 - 17:00

KONSPEKT

Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

Targo Kalamees

Sisukord

1	Piirdetarindite liitekohtade joonsoojuslähivus	2
1.1	Mõisted ja tähised	2
1.2	Arvutuspõhimõtted	4
1.3	Arvutusmeetodid ja -tarkvarad	7
1.4	Joonsoojuslähivuse arvutus	8
1.5	Külmasilla kriitilisuse hindamine temperatuuriindeksi abil	18
1.6	Joonsoojuslähivuse ja külmasilla kriitilisuse arvutuste lähteandete ja tulemuste esitamine	20
2	Piirdetarindite õhulekete mõõtmine	25
2.1	Taust	25
2.2	Mõisted ja tähised	26
2.3	Aparatuur	27
2.4	Õhulekete mõõtmine	29
2.5	Katsemeetodid	29
2.6	Ettevalmistustööd	30
2.7	Mõõtmise etapid	32
2.8	Hoone tehniliste näitajate arvutus	35
2.9	Tulemuste esitamine	36
2.10	Õhulekkekohtade tuvastamine	38
2.11	Mõõtemääramatus	40
2.12	Tulemuste aruanne	41
3	Kirjanduse loetelu	43

1 Piirdetarindite liitekohtade joonsoojuslähivus

1.1 Mõisted ja tähised

- **Soojus**; soojushulk Q , J ($W \cdot s$, 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;
- **Soojuseriijuhtivus** λ , $W/(m \cdot K)$ (*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 „soojuslähivustegur“;
- **Soojustakistus** R , $m^2 \cdot K/W$ (*thermal resistance*): kindla paksusega toote või elemendi omadus takistada soojuse voogu (üldiselt soojuslähivuse teel) läbi toote või elemendi (pinnalt pinnale) statsionaarsetes tingimustes ja on arvutatav valemist: $R = \frac{T_1 - T_2}{q}$,

$$R = \frac{d}{\lambda};$$

- **Soojuslähivus** U , $W/(m^2 \cdot K)$ (*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 „soojuslähikandetegur“ ja ajalooliselt on kasutuses olnud termin „soojusjuhtivus“ (*thermal conductance*);

- **Piirdetarind** (*building fabric, building envelope*): ehitise põhiosa või piire, nagu sein, pörand, vahelagi, uks, aken, katus, mis eraldab ruumi teisest ruumist, välisõhust või pinnasest. Inglisekeelset 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 soojuslähivus on lokaalselt suurem soojustuse katkestuse, materjalist suurema soojuseriijuhtivusega materjali läbiviigu, piirdetarindi geomeetria muutuse või muul sellisel põhjusel. Külmasild võib olla probleemiks piirdetarindite soojusliku või niiskuskuliku toimivuse tõttu või piirdetarindite 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 punktsoojuslähivuse abil;
- **Joonsoojuslähivus** (*linear thermal transmittance*) Ψ , $W/(m \cdot K)$. Füüsikaline suurus, mille abil kirjeldatakse piirdetarindite kahemõõtmelise liitekohta või joonkülmasilla soojuskadu. Piirdetarindite kahemõõtmelise liitekohta või joonkülmasilla soojusvool võrreldes olukorraga kui ei võeta arvesse külmasilla olemasolu, jagatud

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

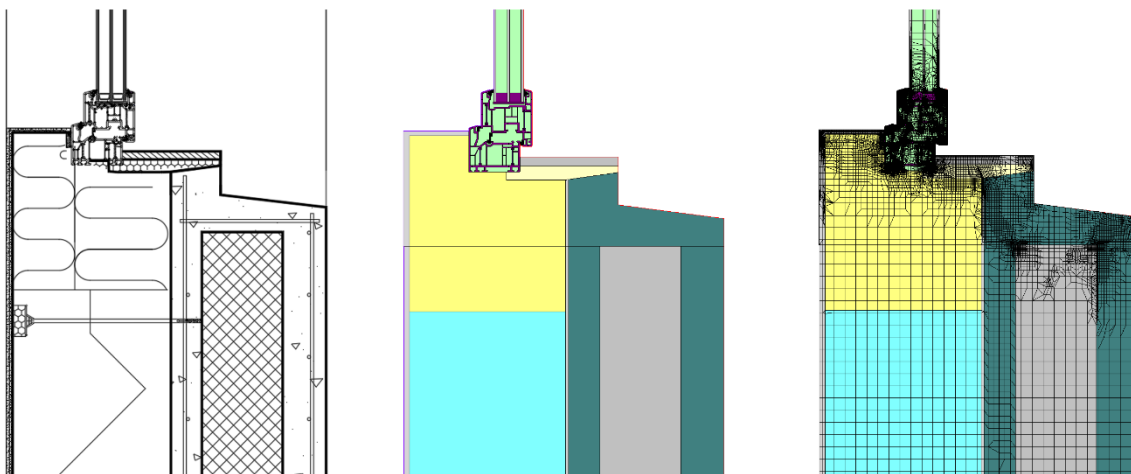
mõlemale poole joonkülmasilda jääva sise- ja väliskeskkonna temperatuurivahe ja külmasilla arvutusulatus (adiabaatiliste katkestustasapindade vaheline mõõt).

- **Punktsoojusläbivus** (*point thermal transmittance*) χ , W/K
Füüsikaline suurus, mille abil kirjeldatakse piirdetarindite kolmemõõtmelise liitekohaga või punktkülmasilla soojuskadu. Piirdetarindite kolmemõõtmelise liitekohaga või joonkülmasilla soojusvool võrreldes olukorraga kui ei võeta arvesse külmasilla olemasolu, jagatud mõlemale poole joonkülmasilda jääva sise- ja väliskeskkonna temperatuurivahe ja külmasilla arvutusulatus (adiabaatiliste katkestustasapindade vaheline mõõt).
- **Tarindite liitekohaga arvutusulatus soojuserikadu** (*thermal coupling coefficient*) L_{2D} , W/(m·K), L_{3D} , W/K: kahe- või kolmemõõtmelise temperatuuriväljaarvutuse arvutuse tulemusena määratud piirdetarindite liitekohaga arvutusulatus 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.

1.2 Arvutuspõhimõtted

Arvutatav piirdetarindite liitekoht või külmasild jagatakse väikesteks elementideks. Üksikutest elementidest koostatakse uuritavat sõlme piisavalt täpselt kirjeldav tervikudel põhimõttel, et kus on geomeetria keerulisem, on elementide sõlmpunktide vahemaa väiksem (Joonis 1.1).

Kui arvutusmudel ääritingimusteed 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 1.1 Akna ja seina liitekohta (vasakul) jaotamine eri soojuseri juhtivusega materjaliosadeks (keskel) ja väikesteks elementideks (paremal).

Tarindite liitekohta või külmasilla arvutusulatus soojuserikadu L_{2D} ja L_{3D} kirjeldab antud kahe- või kolmemõõtmelise tarindite liitekohta läbivat soojusvoolu (2D olukorras pikkusühiku kohta) (1.1)

$$L_{2D} = \frac{\Phi}{(t_i - t_e)}, \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \quad 1.1$$

Piirdetarindite liitekohta joonsoojusläbivuse Ψ , W/(m·K) saab arvutada valemi 1.2 abil

$$\Psi_j = L_{2D} - \sum_{x=1}^N U_x \cdot b_x, \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \quad 1.2$$

kus:

- | | |
|----------|--|
| Ψ_j | tarindite liitekohta joonsoojusläbivus, W/(m·K). |
| L_{2D} | kahemõõtmelise arvutuse tulemusel leitud tarindi arvutusulatus soojuserikadu, W/(m·K); |
| U_x | liitekohta moodustavate hooneosade ja tarindite soojusläbivus, W/(m ² ·K); |
| b_x | liitekohta moodustavate hooneosade ja tarindite arvutusulatus pikkus, m; |

1.2.1 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 | $R_{si} = 0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W};$ |
| • sisepinna soojuspinnatakistus, horisontaalne soojusvool | $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W};$ |
| • sisepinna soojuspinnatakistus, soojusvool alla | $R_{si} = 0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W};$ |
| • välispinna soojuspinnatakistus, soojusvool alla | $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}.$ |

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

Külmasilla kriitilisuse hindamisel kasutatakse suuremaid sisepinna soojustakistusi, vt. ptk. 1.5 Külmasilla kriitilisuse hindamine temperatuuriindeksi abil lk. 18, Tabel 1.3.

1.2.2 Arvutusulatus

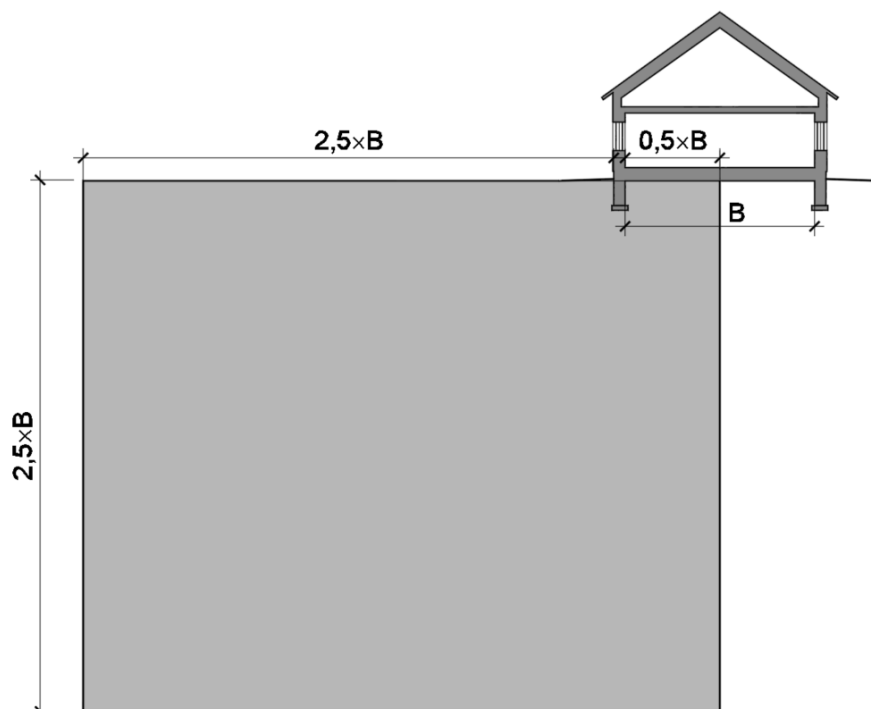
Kuna kogu hoone modelleerimisel ühtainsat geomeetrilist mudelit ei ole mõistlik, siis jagatakse hoone mitmeks osaks, kasutades selleks adiabaatilisi katkestustasapindu. Osadeks jagamine tuleb teha nii, et jaotatud hoone ja tervikliku hoone arvutuste tulemused teineteisest ei erineks. Jaotus mitmeks geomeetrilisteks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

Enamus juhtudel piisab, kui arvutusulatuse määramisel lähtutakse Tabel 1.1 juhistest.

Tabel 1.1 Arvutusulatus tarindite liitekohaga 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 $3 \times d$)
Pinnasega kontaktis olevate tarindite sõlmed	
• Horisontaalne kaugus vertikaalsest tasapinnast hoone sees	0,5 x põranda mõõt või 4 m (olenevalt sellest, kumb väärtustest on väiksem)
• Horisontaalne kaugus vertikaalsest tasapinnast väljaspool hoonet	2,5 x põrandamõõt või 20 m (olenevalt sellest, kumb väärtustest on väiksem).
• Vertikaalne kaugus horisontaalsest tasapinnast maapinnast allpool	2,5 x põrandamõõt 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 x põrandamõõt või 20 m (olenevalt sellest, kumb väärtustest on väiksem).
• Horisontaalne kaugus vertikaalsest tasapinnast hoone sees	0,5 x põrandamõõt või 4 m (olenevalt sellest, kumb väärtustest on väiksem)

Kui arvutused hõlmavad ka soojuskadu pinnasesse (vundamendid, põrandad, keldrid), siis tuleb katkestustasapinnad arvutada põrandamõõtmega abil (Joonis 1.2).



Joonis 1.2 Pinnast hõlmava 2D geomeetrilise mudeli katkestustasapinnad.

Kahemõõtmeliste arvutuste puhul asub põranda keskel vertikaalne sümmeetriasapind (nii modelleeritakse poolt hoonest). Kui ristkülikuliste hoonete puhul piirduakse ühe tüüpsõlmega, lähtutakse põranda väiksemast 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 modelleeritakse 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).

1.2.3 Tarindi soojuslikult mittehomogeense materjalikihi taandamine soojuslikult homogeenseks materjalikihi

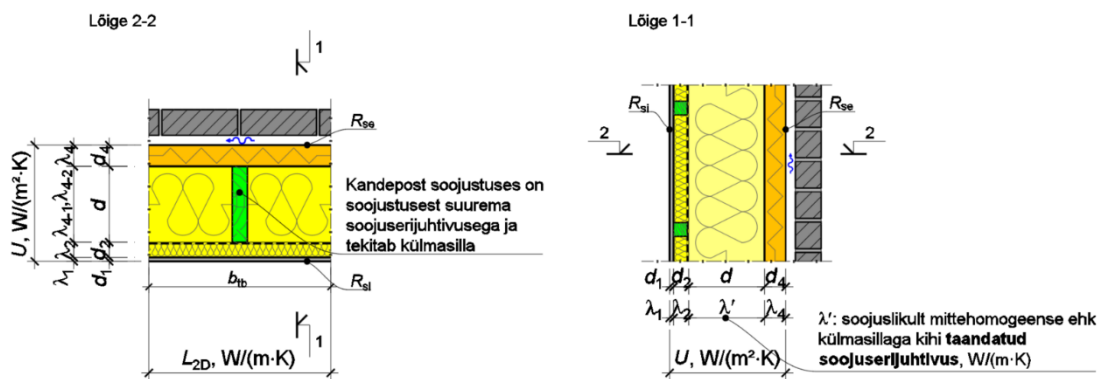
Kahemõõtmelise temperatuurivälja arvutuses tuleb liituvat tarindi soojuslikult mittehomogeenset materjalikihti taandada soojuslikult mittehomogeenseks materjalikihi vastavalt valemile 1.3 (vt. ka Joonis 1.3):

$$\lambda' = \frac{d}{\frac{b_{td}}{L_{2D}} - R_{si} - \sum \frac{d_j}{\lambda_j} - R_{se}} \quad 1.3$$

kus:

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

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine



Joonis 1.3 Taandatud soojuseriituvuse arvutuspõhimõte.

Mittemhomogeenset materjalikihti võib taandada, kui:

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

1.3 Arvutusmeetodid ja -tarkvarad

Tarindite liitekohta 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. Soojuslähivuse 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 punktsoojuslähivuste 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 1.2). Arvutuse käigus jaotatakse arvutatav tarindite liitekoht väikesteks osadeks ning arvutatakse temperatuuri ja soojuslevi muutuvates või tasakaalutingimustes.

Tabel 1.2. Tarkvarad, mida saab kasutada mitmemõõtmelise soojuslevi arvutuseks.

Nimi	Tüüp	2D/3D	Ääritingimused	Geomeetria	Litsents	Valideerimine
Ehitusfüüsika tarkvarad						
AnTherm	H	3D	SS	R	Kommerts	EN ISO 10211
Argos	H	2D	SS	FF	Kommerts	
Bisco / Bistra	H	2D	SS / TR	FF	Kommerts	EN ISO 102112
Champs-bes	HAM	2D	TR	R	Vabavara	EN ISO 10211

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

Nimi	Tüüp	2D/3D	Ääritingimused	Geomeetria	Litsents	Valideerimine
David32	H	3D	SS	R	Vabavara	EN ISO 10211
Delphin	HAM	2D	TR	R	Kommerts	HAMSTAD;
Flixo	H	2D	SS	FF	Kommerts	EN ISO 10211
FramePlus	H	2D		FF	Kommerts	
HAMLab	HAM	3D	TR	R	Vabavara	
Heat 2	H	2D	TR	R	Kommerts	EN ISO 10211
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
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	
Phoenix	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.

Ääritingimused: SS – statsionaarolukord, TR – muutuvad ääritingimused.

Geomeetria: R – hulknurkne geomeetria, FF – vaba geomeetria, st ka kõverjooned.

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 liitekohta joonise sobiv mõõtkava on M1:10 või M1:5.

1.4 Joonsoojuslähivuse arvutus

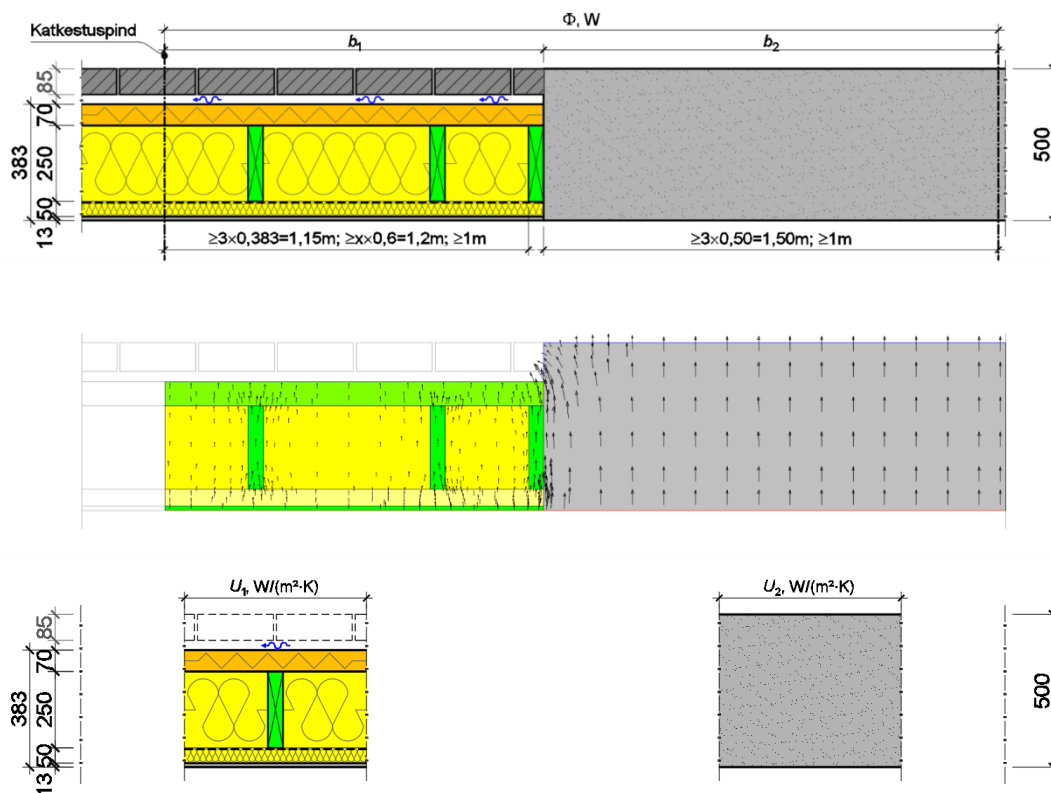
1.4.1 Kahe tasapinnalise tarindi liitumine

Kahe erineva paksusega ja soojuslähivusega välisseina liitekohas on täiendav soojuskadu (Joonis 1.4). Piirdetarindite liitekohta joonsoojuslähivuse arvutukäik on järgmine:

- Koostatakse tarindite liitekohta temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatusesega mõlemale poole liitekohta:

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

- 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 soojuslähivuse arvutustes arvesse ei võeta;
- Määratakse materjalide arvutuslikud soojuseriitvused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuseriitvusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Puitkarkasseinas on postidest sees pool ristiroovitusega soojustuskiht. See mittehomoogeenne materjalikiht kirjeldatakse taandatud soojuseriitvuse suurusega vastavalt valemile 1.3.
- 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 liitekohta (pikkusühiku kohta) (Joonis 1.4, keskel);
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse tarindite liitekohta arvutusulatus soojuseriitadu L_{2D} , $W/(m \cdot K)$ vastavalt valemile 1.1;
- Arvutatakse liituvate tarindite soojuslähivused U_i , $W/(m^2 \cdot K)$ (Joonis 1.4, all) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu liitekohta läbiv soojusvool (liitekohta kogusoojuslähivus);
- Piirdetarindite liitekohta joonsoojuslähivuse Ψ , $W/(m \cdot K)$ saab arvutada valemi 1.2 abil, kui arvutusulatus soojuseriitadest lahutada liituvate tarindite soojuslähivuste ja arvutusulatuste korrutised.

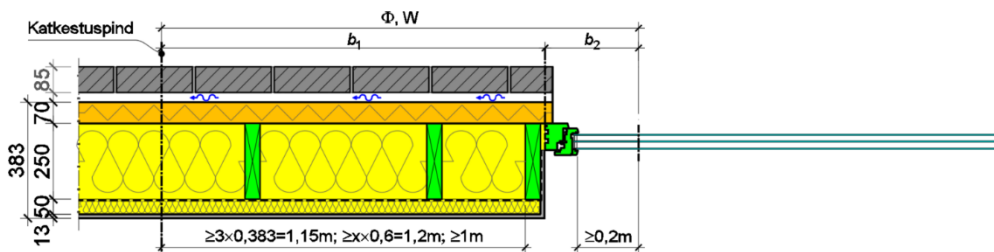


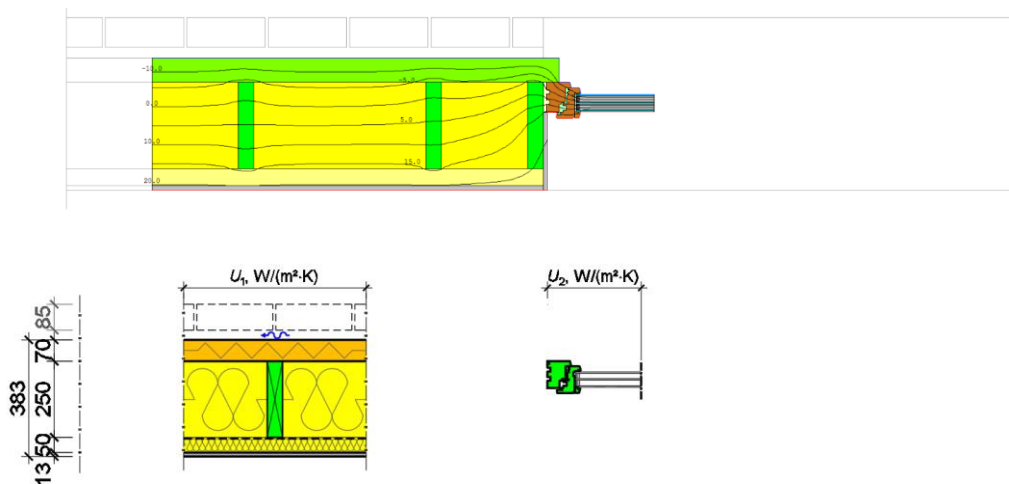
Joonis 1.4 Kahe, erineva paksusega ja soojuslähivusega, piirdetarindi liitekohta joonsoojuslähivuse arvutuspõhimõte.

1.4.2 Akna ja seina liitumine

Akna ja välisseina liitekohas on täiendav soojuskadu (Joonis 1.5). Liitekoha joonsoojusläbivuse arvutukäik on järgmine:

- Koostatakse tarindite liitekoha temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatusega mõlemale poole liitekohta:
 - Seinal alates seinäärsest 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 arvutusulatusale;
- Akna puhul kasutatakse reaalselt 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 materjalihihte soojusläbivuse arvutustes arvesse ei võeta;
- Määratakse materjalide arvutuslikud soojuseriitvused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuseriitvusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Puitkarkassseinas on postidest sees pool ristiroovitusega soojustuskiht. See mittehomogeenne materjalihiht kirjeldatakse taandatud soojuseriitvuse suurusega vastavalt valemile 1.3.
- 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 1.5, keskel);
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse akna ja seina liitekoha arvutusulatus soojuserikadu L_{2D} , W/(m·K), VT. valem 1.1;
- Arvutatakse välisseina ja akna soojusläbivused U_i , W/(m²·K) (Joonis 1.5, all) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu liitekohta läbiv soojusvool (liitekoha kogusoojusläbivus). Akna puhul kasutatakse arvutusulatus osamudelit (liitekoha mudelist eemaldatakse sein);
- Akna ja välisseina liitekoha joonsoojusläbivuse Ψ , W/(m·K) saab arvutada valemi 1.2 abil, kui arvutusulatus 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).





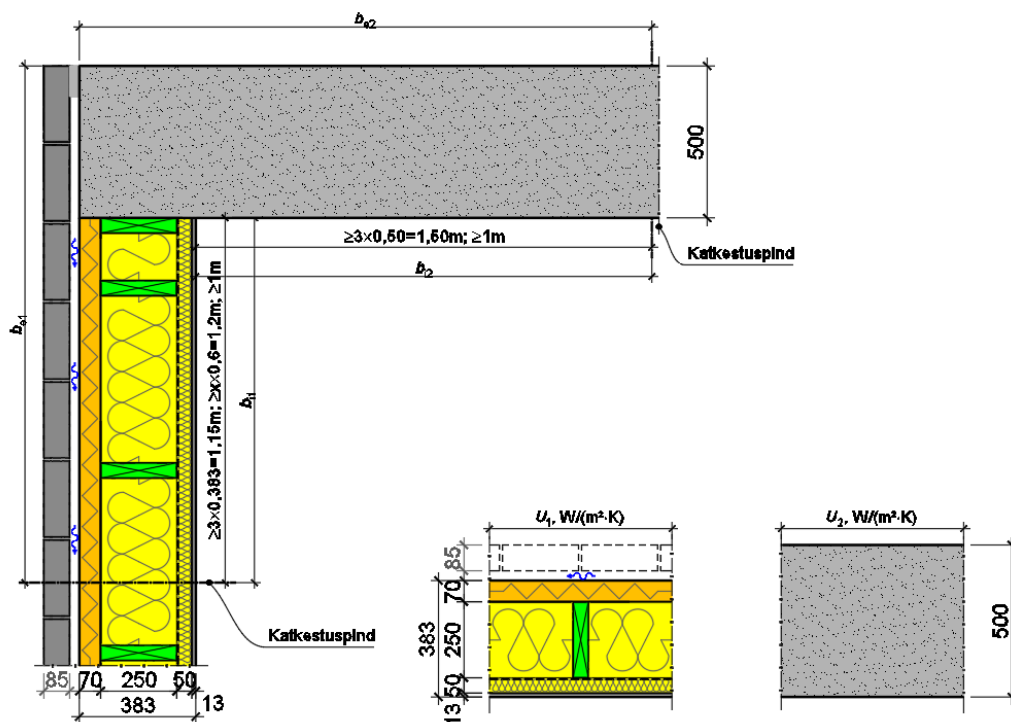
Joonis 1.5 Akna ja välisseina liitekohta joonsoojusläbivuse arvutuspõhimõte.

1.4.3 Kahe välisseina liitekoht välisnurgas

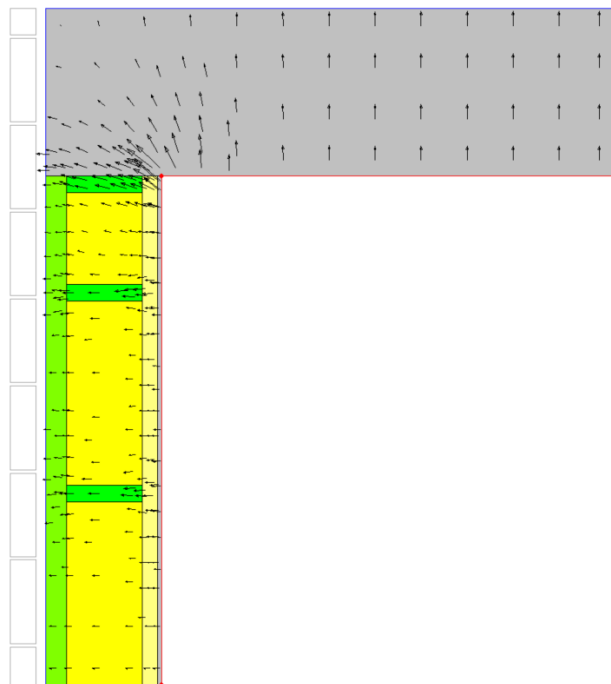
Kahe välisseina liitekohas on täiendav soojuskadu (Joonis 1.6), mille joonsoojusläbivuse arvutukäik on järgmine:

- Koostatakse tarindite liitekohta temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatuses 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 soojuseriitvused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuseriitvusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Puitkarkassseinas on postidest sees pool ristiroovitusega soojustuskiht. See mittehomogeenne materjalikiht kirjeldatakse taandatud soojuseriitvuse suurusega vastavalt valemile 1.3.
- 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 liitekohta;
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse tarindite liitekohta arvutusulatuses soojuserikadu L_{2D} , W/(m·K) vastavalt valemile 1.1;
- Arvutatakse välisseinte soojusläbivused U_i , W/(m²·K) (Joonis 1.7 Soojusvool kahe välisseina liitekohta välisnurga) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu liitekohta läbiv soojusvool (liitekohta kogusoojusläbivus);
- Välisseinte liitekohta joonsoojusläbivuse Ψ , W/(m·K) saab arvutada valemi 1.2 abil, kui arvutusulatuses soojuserikaost lahutada mõlema seina soojusläbivuste ja arvutusulatuses korrutised.

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine



Joonis 1.6 Kahe välisseina välisnurga liitekohaga joonsoojuslähivuse arvutuspõhimõte.



Joonis 1.7 Soojusvool kahe välisseina liitekohas välisnurgas.

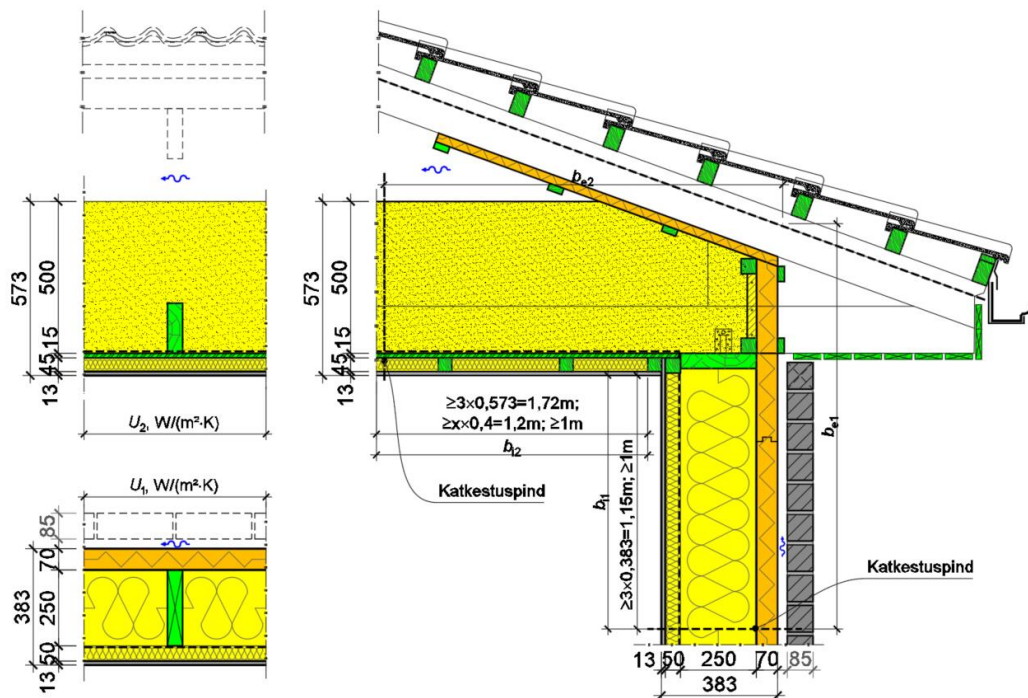
1.4.4 Räästa sõlm

Välisseina ja kaldkatusega hoone katuse ja pööningu põranda liitekohas on täiendav soojuskadu (Joonis 1.8), mille joonsoojuslähivuse arvutukäik on järgmine:

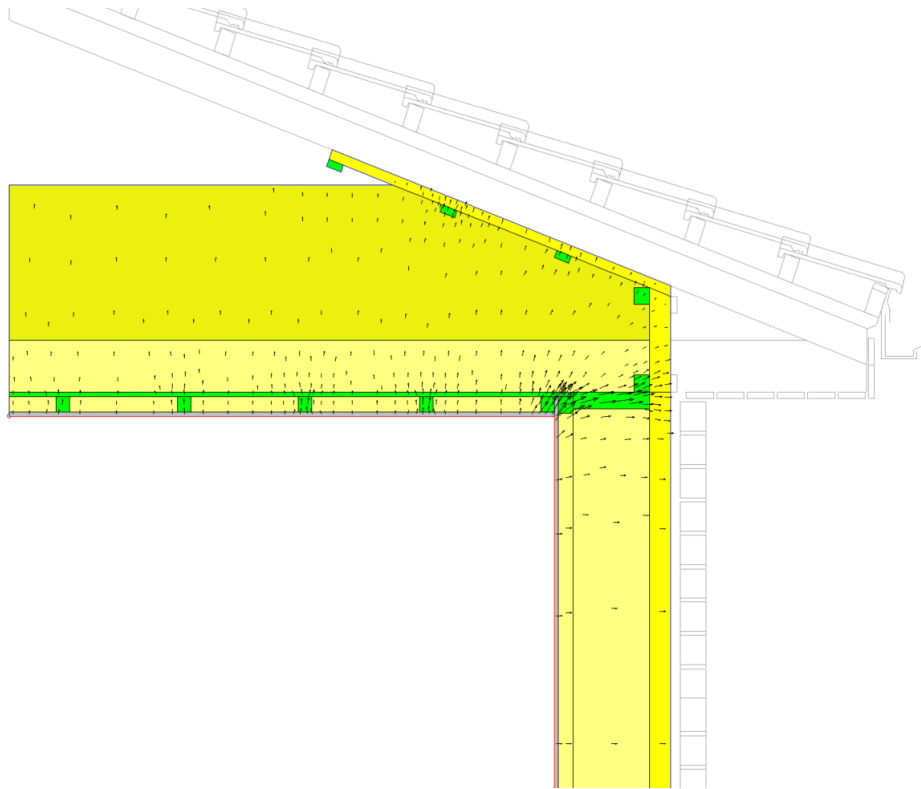
- Koostatakse tarindite liitekohta temperatuurivälja arvutusmodel arvutusulatusega mõlemale poole liitekohta:
 - vähemalt 3 korda tema paksust,

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

- vähemalt 1 meeter,
- nii, et katkestuspind kajastaks puitroovide sümmeetriat;
- Kuna tellisfassaadi tagune ja pööning on välisõhuga tuuldav, siis materjalikihte alates tuuletõkkeplaadist või soojustuse välispinnast väljapoole soojuslähivuse arvutustes arvesse ei võeta;
- Määratakse materjalide arvutuslikud soojuseriitvused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuseriitvusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Puitkarkasseinas on postidest sees pool ristiroovitusega soojustuskiht ja pööningu põrandas on katusefermi alumise vöö kiht. Need mittehomogeensed materjalikihid kirjeldatakse taandatud soojuseriitvuse suurusega vastavalt valemile 1.3.
- Sõltumata laeroovide tegelikust jaotusest, paigaldatakse roov alati seina äärde, siis joonistatakse see post välja ka temperatuurivälja mudelisse;
- Arvutatakse soojusvool Φ , W läbi räästasõlme liitekohta (pikkusühiku kohta) (Joonis 1.9);
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse tarindite liitekohta arvutusulatus soojuserikadu L_{2D} , W/(m·K) vastavalt valemile 1.1;
- Arvutatakse välisseina ja pööningu põranda soojuslähivused U_i , W/(m²·K) (Joonis 1.9) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu räästa liitekohta lähiv soojusvool (liitekohta kogusoojuslähivus);
- Räästasõlme liitekohta joonsoojuslähivuse Ψ , W/(m·K) saab arvutada valemi 1.2 abil, kui arvutusulatus soojuserikaost lahutada välisseina ja pööningu põranda soojuslähivuste ja arvutusulatuste korrutised.



Joonis 1.8 Välisseina ja pööningu põranda liitekohta joonsoojuslähivuse arvutuspõhimõte.



Joonis 1.9 Soojusvool välisseina ja pööningu põranda liitekohas.

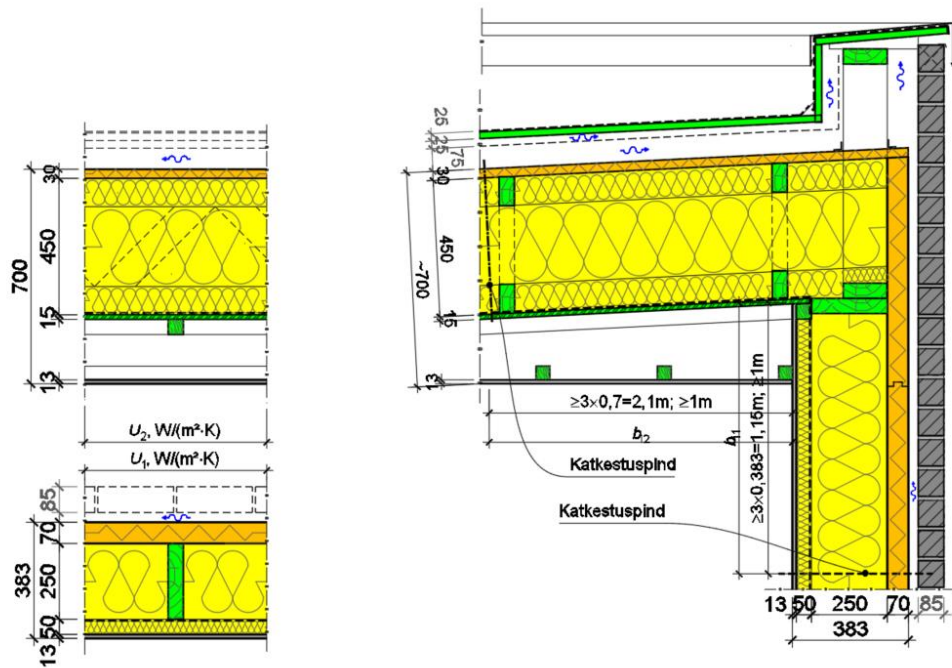
1.4.5 Parapeti sõlm

Välisseina ja lamekatusega hoone liitekohas on täiendav soojuskadu (Joonis 1.10), mille arvutukäik on järgmine:

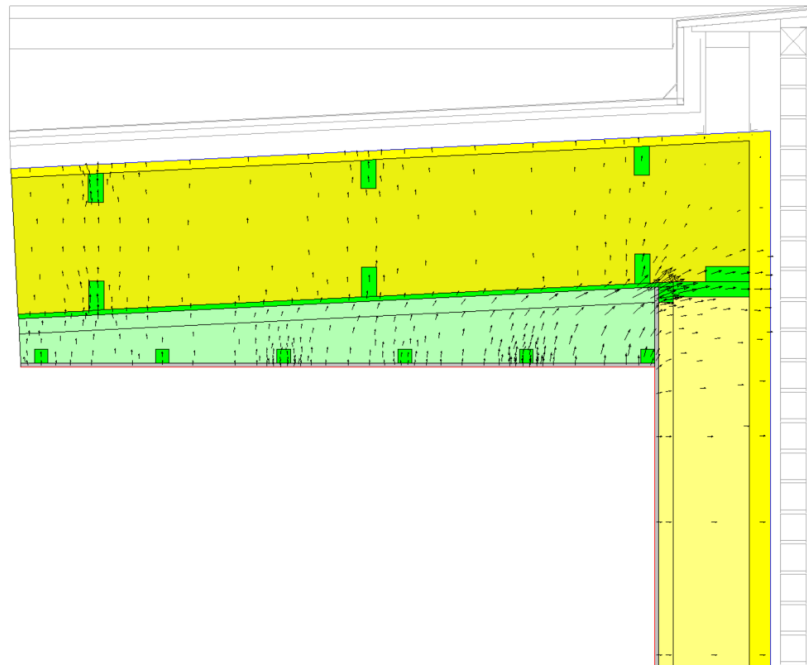
- Koostatakse tarindite liitekohta temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatuses mõlemale poole liitekohta seintel:
 - vähemalt 3 korda tema paksust,
 - vähemalt 1 meeter,
 - nii, et katkestuspind kajastaks puitroovide sümmeetriat;
- Kuna tellisfassaadi tagune ja pööning on välisõhuga tuuldud, siis materjalikihte alates tuuletõkkeplaadist või soojustuse välispinnast väljapoole soojuslähivuse 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 mittehomoogeensed materjalikihid kirjeldatakse taandatud soojuserijuhtivuse suurusega vastavalt valemile 1.3.
- Sõltumata laeroovide tegelikust jaotusest, paigaldatakse roov alati seina äärde, siis joonistatakse see post välja ka temperatuurivälja mudelisse;
- Arvutatakse soojusvool Φ , W läbi parapetisõlme liitekohta (pikkusühiku kohta) (Joonis 1.11);
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse tarindite liitekohta arvutusulatuses soojuserikadu L_{2D} , W/(m·K) vastavalt valemile 1.1;
- Arvutatakse välisseina ja katuslae soojuslähivused U_i , W/(m²·K) (Joonis 1.10) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu parapeti liitekohta läbiv soojusvool (liitekohta kogusoojuslähivus). Ripplae ja katuslae vaheline õhuruum modelleeritakse ekvivalentse soojustakistusega materjaline. Õhkvahesid, mille mõõtmised ristuvate telgede mõlemal suunal on suuremad kui 0,5 m, käsitletakse ruumidena;

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

- Parapetisõlme joonsoojusläbivuse Ψ , $W/(m \cdot K)$ saab arvutada valemi 1.2 abil, kui arvutusulatuse soojuserikaost lahutada välisseina ja katuslae soojusläbivuste ja arvutusulatuste korrutised.



Joonis 1.10 Välisseina ja pööningu pörandi liitekohas joonsoojusläbivuse arvutuspõhimõte.



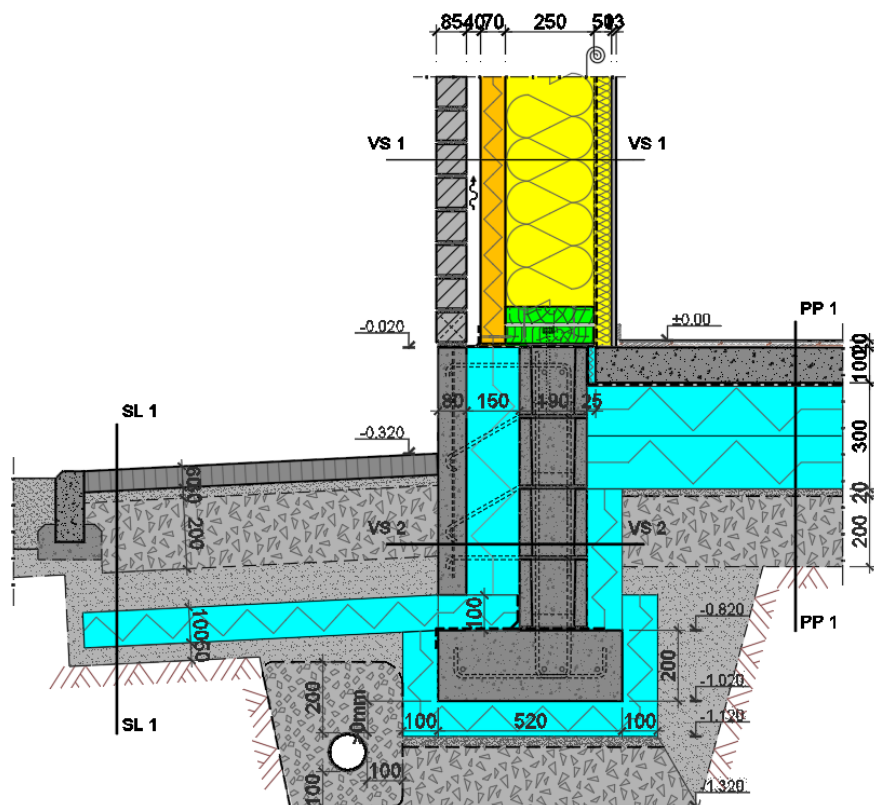
Joonis 1.11 Soojusvool välisseina ja katuslae liitekohas.

1.4.6 Sokli sõlm pinnasele toetava põrandaga

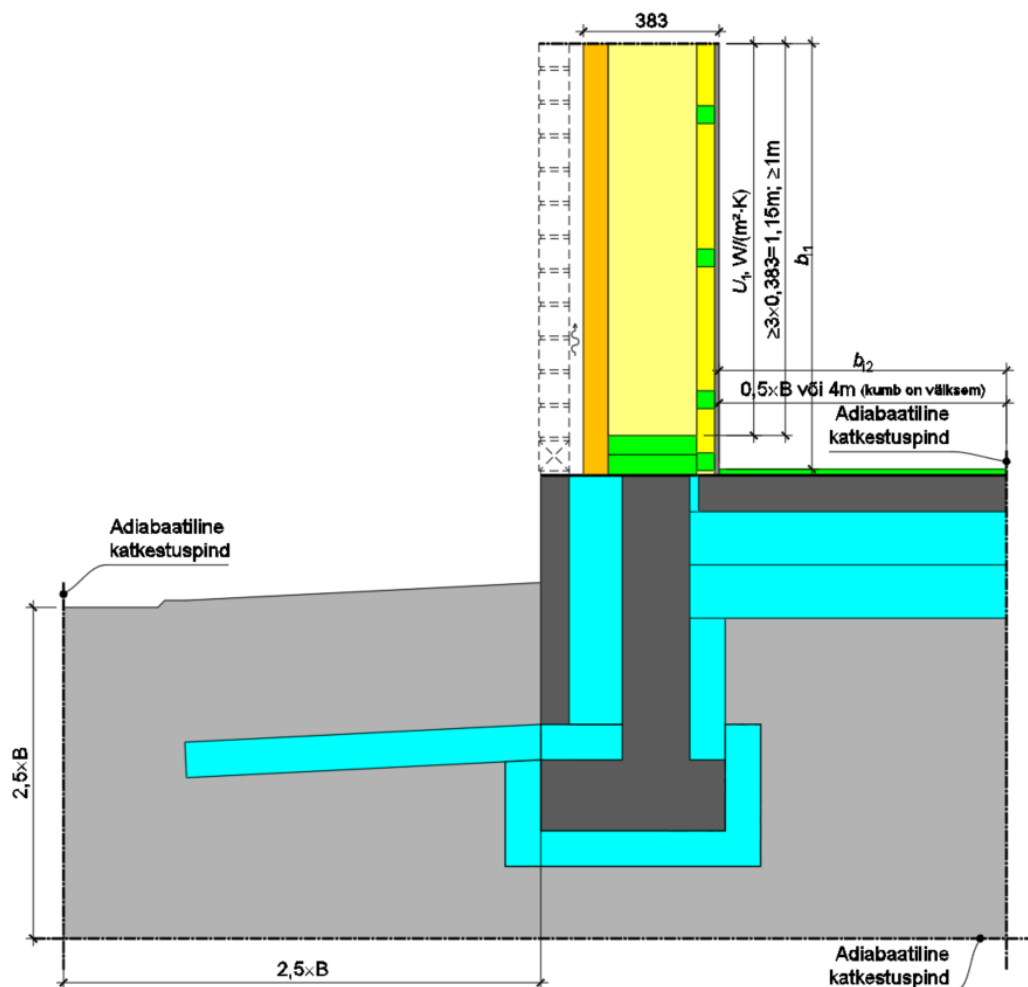
Pinnasele toetatud betoonpõranda, lintvundamendi ja puitkarkassvälisseina koht soklis on (Joonis 1.12). Soklisõlme joonsoojuslähivuse arvutukäik on järgmine:

- Koostatakse tarindite liitekohta temperatuurivälja arvutusmudel arvutusulatusega mõlemale poole liitekohta:
 - seinal:
 - vähemalt 3 korda tema paksust,
 - vähemalt 1 meeter,
 - põrandal:
 - horisontaalne kaugus vertikaalsest tasapinnast väljaspool hoonet:
 $2,5 \times \text{põranda mõõt} (\leq 20\text{m})$,
 - vertikaalne kaugus horisontaalsest tasapinnast maapinnast allpool:
 $2,5 \times \text{põranda mõõt} (\leq 20\text{m})$,
 - vertikaalne kaugus horisontaalsest tasapinnast allpool põrandapinda (kohaldatakse üksnes juhul, kui vaadeldav põrandapind asub enam kui 2 m. madalamal maapinnast): $2,5 \times \text{põranda mõõt} (\leq 20\text{m})$
 - horisontaalne kaugus vertikaalsest tasapinnast hoone sees: $0,5 \times \text{põranda mõõt} (\leq 4\text{m})$
- Kuna tellisfassaadi tagune on välisõhuga tuulduv, siis seda materjalikihte tuuletõkkeplaadist väljapoole soojuslähivuse arvutustes arvesse ei võeta;
- Määratakse materjalide arvutuslikud soojuseriitvused arvestades temperatuuri ja niiskuse mõju soojuseriitvusele (EVS-EN ISO 10456, 2008);
- Kui tarindites on mittehomoogeensed materjalikihid, mille osad ei jää temperatuuriväljaarvutustes näha, siis need mittehomoogeensed materjalikihid kirjeldatakse taandatud soojuseriitvuse suurusega vastavalt valemile 1.3.
- Temperatuurivälja arvutuses kasutatud temperatuuride erinevuse abil arvutatakse tarindite liitekohta arvutusulatuse soojuserikadu L_{2D} , $W/(m \cdot K)$ vastavalt valemile 1.1;
- Arvutatakse välisseina ja põranda soojuslähivused U_i , $W/(m^2 \cdot K)$ (Joonis 1.10) samade materjaliomadustega nagu on arvutatud ka kogu parapeti liitekohta lähiv soojusvool (liitekohta kogusoojuslähivus). Põranda soojuslähivus on otstarbekas arvutada põranda osamudeli abil. Osamudeli tegemiseks eemaldatakse sein osa kuni põranda (põranda soojustuse) alumise pinnani (Joonis 1.14). Kohas, kus sein varem põrandaplaadi või pinnasega kokku puutus, kasutatakse adiabaatilisi piirdepindu. Põranda arvutusulatuse 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 joonsoojuslähivuse Ψ , $W/(m \cdot K)$ saab arvutada valemi 1.2 abil, kui arvutusulatuse soojuserikaoist lahutada mõlema seina soojuslähivuste ja arvutusulatuste korrutised.

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

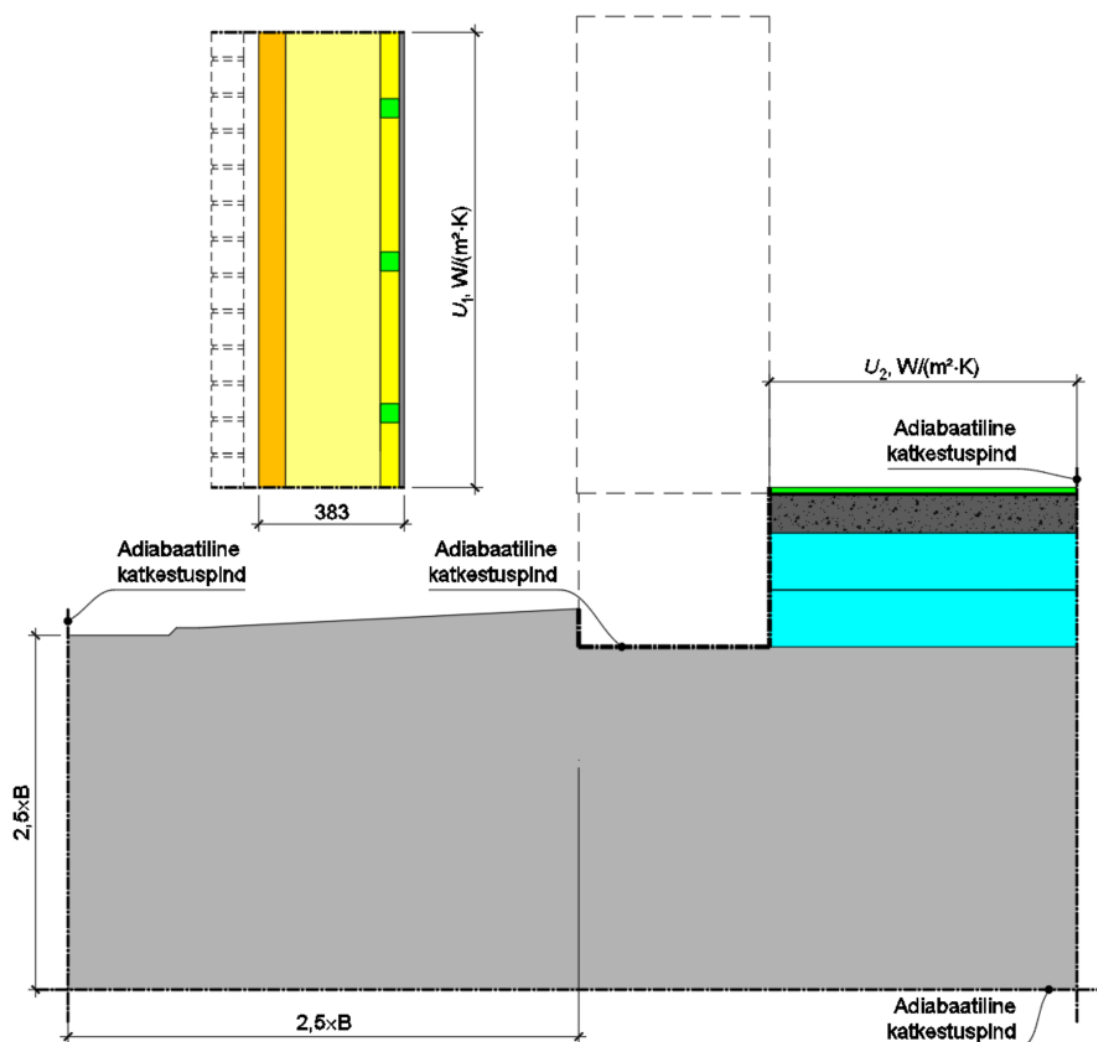


Joonis 1.12 Pinnasele toetatud betoonpõranda ja puitkarkassvälisseina koht soklis.



Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

Joonis 1.13 Pinnasele toetatud betoonpõranda ja puitkarkassvälisseina liitekohta soojuslevi ja temperatuurivälja arvutusmudel.



Joonis 1.14 Välisseina ja pinnasele toetatud betoonpõranda soojusläbivuse arvutuse osamudelid.

1.5 Külmasilla kriitilisuse hindamine temperatuuriindeksi abil

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

$$f_{Rsi} = \frac{t_{si} - t_e}{t_i - t_e} = \frac{R_T - R_{si}}{R_T} \quad 1.4$$

- 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

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

(üldiselt kasutatakse kriitilisuse taset, kus 90% olukordadest ei ületa määratud taset ja 10% olukordadest ületab määratud taset).

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

- sisepinna soojuspinnatakistus, aknaklaas $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$;
- sisepinna soojuspinnatakistus, ruumi ülejäänud osad $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

EVS-EN ISO 10077, 2017 standardi kohaselt on vähendatud kiirguse ja konveksiooniga kohtades (servades või kahe pinna vahelises ühenduses) sisepinna soojuspinnatakistus, $R_{si} = 0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Tabel 1.3 esitab pinna soojustakistused, mida kasutada külmasilla kriitilisuse arvutustes.

Tabel 1.3 Külmasilla kriitilisuse arvutustes kasutatud pinna soojustakistused.

	Pinna soojustakistus sõltuvalt soojusvoolu suunast		
	Üles (lagi)	Horisontaalne (sein)	Alla (põrand)
R_{si} , ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$) (akende juures servades või kahe pinna vahelises ühenduses, kus on vähendatud kiirgus/konveksioon)	0,10	0,13	0,17
R_{si} , ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$) (valgust mitteläbilaskvate tarindite pindadel)	0,25	0,25	0,25
R_{se} , ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	0,04	0,04	0,04

Hoonete projekteerimisel Eestis või Eestis olevate uute ja olemasolevate hoonete soojusliku kvaliteedi hindamisel kasutatakse Tabel 1.4's esitatud temperatuuriindeksi piirsuurusi. Suurema niiskuskooormusega ruumidel (niiskusklassid 4 ja 5) tuleb aktsepteeritav temperatuuriindeks määrata eraldi, aga see ei või olla alla 0,8.

Tabel 1.4 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	$\geq 0,8$	$\geq 0,8$
≤ 2	$\geq 0,8$	$\geq 0,65$

Aknaraamile veeauru kondenseerumise vältimiseks kasutatakse Tabel 1.5's esitatud temperatuuriindeksitemperatuuriindeksi piirsuurusi. Suurema niiskuskooormusega ruumidel (niiskusklassid 4 ja 5) tuleb aktsepteeritav temperatuuriindeks määrata eraldi aga see ei või olla alla 0,75.

Tabel 1.5 Temperatuuriindeksite piirsuurused Eesti hoonete projekteerimise aknaraamile veeauru kondenseerumise vältimiseks (EVS-EN ISO 13788, 2012).

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

1.6 Joonsoojuslähivuse ja külmasilla kriitilisuse arvutuste lähteandete ja tulemuste esitamine

Standardi EVS-EN ISO 10211, 2017 kohaselt tuleb esitada sisendandmed nagu

Tabel 1.6 Joonsoojuslähivuse ja külmasilla kriitilisuse arvutuste lähteandmed

Nimetus	Tähis	Ühik	Väärtus	Päritolu, andmete allikas
Geomeetriliste omaduste parameetrid				
Piirdetarindi või liitekohala laius	b	m		
Piirdetarindi paksus	d	m		
Pikkus	l	m		
Põrandaplaadi tunnusmõõt	B	m		
Soojuslike omaduste parameetrid				
Kõikide kasutatud materjalide arvutuslikud soojusjuhtivused	λ_{Uj}	W/(m·K)		
Soojustakistus	R	m ² ·K/W		
Välispinna soojustakistus	R_{se}	m ² ·K/W		
Sisepinna soojustakistus	R_{si}	m ² ·K/W		
Soojuslähivus	U	W/(m ² ·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 1.7 Joonsoojuslähivuse ja külmasilla kriitilisuse arvutuste arvutustulemuste

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

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

Joonis 1.15 esitab näite arvutuste lähteandmete ja tulemuste esitamiseks Exceli tabelarvutuse.

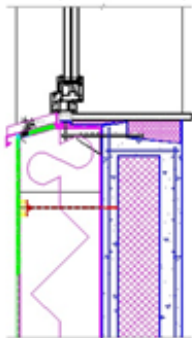
Tarkvara:							
Kuupäev:							
Autor:							
Välissein-akna liitumine akna allosas							
Lähteandmed				$R_s, \text{m}^2\text{K/W}$	$h_s, \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$\theta, ^\circ\text{C}$	
Välispind (välisõhk)				0.04	25.0	-15.0	
Välispind (pinna)				0	1000	7.0	
Sisepind. Joonsoojuslähivuse 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, $\theta_i - \theta_e$						36.0	K
Liituvate tarindite soojuslähivused							
1. liituv tarindi soojuslähivus, U_1						0.1369	W/m ² K
2. liituv tarindi soojuslähivus, U_2						1.845	W/m ² K
Liituvate tarindite arvutusulatus (arvutusmodelist)							
1. liituv tarindi arvutusulatus, l_{11} (sisemõõdud)						1635	mm
1. liituv tarindi arvutusulatus, l_{e1} (välismõõdud)						1635	mm
2. liituv tarindi arvutusulatus, l_{12} (sisemõõdud)						702	mm
2. liituv tarindi arvutusulatus, l_{e2} (välismõõdud)						702	mm
Tarindite liitekohta arvutusulatust läbiv soojusvool, Φ						59	W
Madalaim sisepinna temperatuur						11.7	°C
Külmasilla arvutusulatuse soojuserikadu ja joonsoojuslähivused							
Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (2D arvutusest), L_{2D}						1.628	W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatuse ligikaudne (1D) soojuserikadu (sisemõõdud), $U_1 \times l_{11} + U_2 \times l_{12}$						1.519	W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatuse ligikaudne (1D) soojuserikadu (välismõõdud), $U_1 \times l_{e1} + U_2 \times l_{e2}$						1.519	W/(m·K)
Tarindite liitekohta joonsoojuslähivus Ψ_1 (sisemõõdud)						0.109	W/(m·K)
Tarindite liitekohta joonsoojuslähivus Ψ_e (välismõõdud)						0.109	W/(m·K)
Tarindite liitekohta sisepinna minimaalne temperatuuriindeks f_{Rsi}						0.742	
Eestis on elamute tarindite temperatuuriindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} > 0,8$.							
Eestis on elamute akna temperatuuriindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} > 0,7$.							

Joonis 1.15-1 Akna ja välisseina liitekohta arvutustulemuste esitus tabelina.

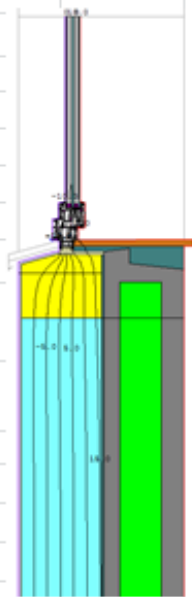
Tarkvara:	
Kuupäev:	
Autor:	

Välissein-akna liitumine akna allosas

Liitekohta sõlm M1:20



Temperatuurivälja joonis M1:20



Joonis 1.15-2 Akna ja välisseina liitekohta arvutustulemuste esitus tabelina.

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

Tabel 1.8 esitab tüüpiliste materjalide soojusläbivuste omadused.

Tabel 1.8 Tüüpiliste materjalide soojusläbivuste omadused.

Materjal	Soojuseriijuhtivus 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
Vahtsilikaatsiit	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

2 Piirdetarindite õhulekete mõõtmine

2.1 Taust

Hoone piirdetarindite ebapiisav õhupidavus väljendub planeerimatus ja kontrollimatus õhuvoolus läbi pragude ja ebatiheduste. Hoone piirdetarindite õhulekked mõjutavad järgmiseid hoone omadusi:

- niiskusturvalisus;
- hallituse, õhusaaste ja radooni levik põrandaalusest ruumist siseruumidesse, õhusaaste liikumine garaazist eluruumidesse, ebasoovitavate lõhnade liikumine ruumide vahel;
- energiatõhusus;
- piirdetarindite pindade alajahtumine;
- sisekliima kvaliteet, tuuletõmbus;
- ventilatsioonisüsteemide toimivus;
- akustiline kvaliteet;
- tuleohutus.

Piirdetarindis, milles on palju ebatihedusi, võib niiskuse konvektsioon kanda edasi tunduvalt suuremaid niiskuse koguseid, kui niiskuse difusioon seda suudab. Kuigi hoone piire võib olla projekteeritud niiskustehniliselt turvaliselt toimivaks veeauru difusiooni suhtes (EVS-EN ISO 13788, 2012), võib niiskuse konvektsioon põhjustada lubamatult kõrgeid niiskustasemeid. Uuringud on tõestanud, et õhulekete teel kandub siseruumidesse hallituseeoseid, radooni või õhusaastet garaazist.

Õhulekked mõjutavad oluliselt hoonete energiatõhusust eelkõige kütte- ja jahutuskulude kaudu. Piirdetarindite soojuslähivuse vähenemisega kasvab õhuvahetusele (ventilatsioon ja infiltratsioon) suhteline osakaal. Hoonel, mille piirdetarindite õhuleke on suur, võib õhulekkekohtade kaudu toimuv õhuvahetus olla samas suurusjärgus või suuremgi kui ventilatsiooniseadmete poolt vahetatav õhu hulk. Mõeldes hea sisekliima juures ka küttekuludele, on otstarbekas kasutada soojatagastusega ventilatsiooniagregaati, kus tubadesse sissepuhutav õhk soojendatakse väljatõmbeõhu soojusega. Kui piirded ei ole õhupidavad, siis vahetub suur osa õhku soojatagastit läbimata. Tavapärase hoone energiakulu võib olla 10...30% suurem kui väga väikese õhulekkega hoonel. Õhulekkearvu ühe ühiku muutus mõjutab elamu kütteenergiakulu 7% ja koguenergiakulu ~ 4%.

Piirete ebapiisavat õhupidavust ei saa käsitada kui loomulikku ventilatsiooni. Läbi piirde ebatiheduste toimuv õhu liikumine ei ole kontrollitav, juhitud ega vajadusel filtreeritav. Kui näiteks, niiskuskahjustuste tagajärjel on piirdesse tekkinud hallitust või mädanikku, kannab õhk hallituse eosed siseruumi. Kvaliteetse sisekliima kujundamisel mängivad peamist rolli eelkõige toimiv kütte- ja ventilatsioonisüsteem ning ehitusfüüsikaliselt korrektselt toimivad hoonepiirded.

Võimaliku tulekahju puhkemise korral peab tule ja suitsu levik ehitises olema takistatud. Hoonepiirete õhupidavus mõjutab tuleohutust eelkõige tulekahju algstaadiumis tekkiva suitsu leviku kaudu läbi piirete. Ehitise tuletõkketarindite tulepüsivuse määratluses tähendab tähis *E* tarindi tihedust ehk terviklikkust teatud aja jooksul. See määrab tuleohutusest lähtuvalt tarindi õhupidavuse nõude üldiselt. Täpsemalt suitsu läbitungimise piirangut tähistab tähis *S*.

Kasvamas on elanike nõudmised hoonete sisekliima suhtes. Läbipuhuvate piirdetarinditega hoones on soojuslik mugavus halvem. Eestis tehtud uuringud näitasid, et kui hoonepiirded lekkisid rohkem kurtsid elanikud külmade põrandate üle.

Tuleb aga rõhutada, et õhupidavate piiretega peab kaasas käima toimiv, efektiivne ja tasakaalustatud ventilatsioonisüsteem. Kui õhupidavate piiretega hoonel ei ole toimivat ventilatsioonisüsteemi, siis õhk siseruumides ei vahetu ja sisekliima saab rikutud. Ventilatsioon peab tagama piisava õhuvahetuse ja ei tohi halvendada hoone soojuslikku

mugavust ega akustilist kvaliteeti (seadmete müra, õhu liikumiskiirus, ventiilid, seadistus või ebapiisav mürasummutus) mis sunnib kasutajaid projekteeritud ventilatsiooni muutma või seda mitte kasutama. Ventilatsioonisüsteemid piirdetarindite õhulekke mõõtetulemust otseselt ei mõjuta, sest värskeõhuklapid, õhu sissepuhke- ja väljatõmbeventiilid kaetakse mõõtmise ajaks teibiga kinni.

Kogu hoone õhupidavust mõjutavad kokkuvõttes kõikide piirete, liitekohtade, akende ja uste jne õhupidavused. Õhupidavuse tagamine nõuab põhjalikke, lõpuni läbimõeldud ja kompleksseid lahendusi. Piirdetarindid ja nende liitekohad tuleb projekteerimise käigus hoolikalt läbi mõelda, õhutõke peab olema korralikult paigaldatud ja liitekohad nõutavalt teostatud.

2.2 Mõisted ja tähised

2.2.1 Mõisted

- Õhulekke vooluhulk (**air leakage rate**) hoone piirdetarindeid läbiv õhu vooluhulk MÄRKUS See termin hõlmab selles rahvusvahelises standardis kasutatava õhu voolu tekitamise seadmetega (vt jaotist 4) tekitatud õhu voolu läbi vuukide, pragude ja poorsete pindade või nende kombinatsiooni.
- hoone piirdetarindid (**building envelope**): Piirdetarind, mis eraldab katsetatava hoone või selle osa siseruumi väliskeskkonnast või teisest hoonest või hoone teisest osast
- Õhuvahetuskordsus (**air change rate**) läbi hoone piirdetarindi lekkinud õhu vooluhulga ja hoone siseruumala suhe h^{-1} ,
- õhuläbivus (**air permeability**) läbi hoone piirdetarindite lekkinud õhu vooluhulga ja piirdetarindite pindala suhe
- **piirdetarindite erilekkehulk** (**specific leakage rate**) ehk piirdetarindite õhulekkevooluhulk hoone ümbrise pindala kohta referentsõhurõhuvahel
- erilekkehulk põranda pindala kohta (**specific leakage rate**) õhulekkevooluhulk hoone läbi piirdetarindite hoone netopindala kohta referentsõhurõhuvahel
- efektiivne lekkepindala (**effective leakage area (ELA)**) lekkepindala katsel kasutatud referentsõhurõhuvahel, kogu hoone ümbrise ulatuses. See näitab torujase ava pindala, mille kaudu lekib sama palju õhku, kui läbi kõikide hoonepiirete antud õhurõhuerinevuse juures
- hoone ümbrise efektiivne erilekkepindala (**specific effective leakage area**) piirdetarindi lekkepindala referentsõhurõhuvahel hoone ümbrise pindala kohta
- hoone efektiivne erilekkepindala põranda pindala kohta (**specific effective leakage area**) lekkepindala referentsõhurõhuvahel hoone netopindala kohta
- ava sulgemine (**to close an opening**) sulguriga varustatud ava seadistamine suletud asendisse, ilma ava õhutihedust täiendavalt suurendamata MÄRKUS Kui sulgemine ei ole võimalik (nt sulgur puudub), siis jääb ava (uks, aken, luuk vms) avatuks.
- ava tihendamine (**to seal an opening**) ava muutmine õhutihedaks, kasutades selleks sobivaid vahendeid (liime, pneumoballoone, tihendeid, teipe jne)

2.2.2 Tähised

Tähis	Mõõtühik	Selgitus
A	m^2	pindala
ELA	m^2	efektiivne lekkepindala
C	$m^3/(h \cdot Pa^n)$	õhuvoolutegur
n	h^{-1}	õhuvahetuskordsus
p	Pa	rõhk
$\dot{V}$	m^3/h	õhulekkevooluhulk
q	$m^3/(h \cdot m^2)$	piirdetarindite õhulekkearv
V	m^3	hoone siseruumala
Δp	Pa	rõhu erinevus, rõhuvahe
ϕ, RH	—, %	suhteline niiskus
T	K	absoluutne temperatuur Kelvini skaalal
θ	°C	temperatuur Celsiuse kraadides
ρ	kg/m^3	õhu tihedus

Indeks	Selgitus
E	hoone ümbris (siseruumide ja väliskeskkonna vaheliste piirdetarind)
$\langle Tbl_large_span \rangle \langle /Tbl_large_span \rangle_F$	põrand
pr	referentsrõhuvahe
e	väliskeskkond, väliskliima
i	sisekeskkond, sisekliima
0	standardtingimused, null-lekkeõhuvoolu olukord
m	mõõteväärtus
r	referentsväärtus
$+_i -$	+ ja – tähendavad vastavalt üle- ja alarõhku hoone seest hinnatuna
$1, 2$	1 ja 1 tähendavad vastavaid mõõteetappe
50	õhurõhuerinevust 50 Pa
v	veeaur
s	küllastus
r	lugemid

2.3 Aparatuur

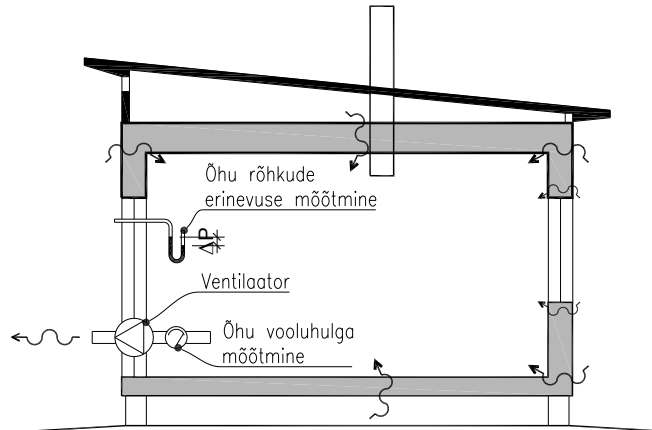
2.3.1 Ventilaatoriga survestamise meetod

Õhulekke mõõtmisel tekitatakse üle piirdetarindite kas ala- või ülerõhk. Ülerõhk tähendab seda, et õhurõhk hoone sees on kõrgem kui väljas. Alarõhk tähendab seda, et õhurõhk hoone sees on väiksem kui väljas. Iga õhurõhuerinevuse juures mõõdetakse ära lekkeõhuvool. Hea tava kohaselt tehakse õhulekketest nii ülerõhu, kui ka alarõhu tingimistes.

Ventilaatoriga survestamise meetodi seade koosneb õhukanaliga ühendatud ventilaatorist, tema kiiruse regulaatorist ning õhurõhuerinevuse, temperatuuri ja õhuvooluhulga mõõteseadmetest. Õhukanali suurus ja ventilaatori võimsus valitakse nii, et lineaarne voolukiirus õhukanalis langeb õhu vooluhulga mõõturi mõõtepiirkonda. Ventilaatoril või puhuril peaks olema reguleeritava pöörlemiskiirusega mootor, mis võimaldab katta kogu nõutavat õhuvooluhulga piirkonda. Tavaline mõõteseadmete komplekt sisaldab ka

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearu mõõtmine

ventilaatori või puhuri paigaldamiseks ettenähtud raami ning õhutihedat kangast seadme paigaldamiseks olemasolevasse ukse- või aknaavasse.



Joonis 2.1 Hoonepiirete õhupidavuse mõõtepõhimõte (üleval) ja mõõteseadme (all).

Mõõtmiseks on lubatud kasutada seadmeid, mis võimaldavat katset läbi viia lubatud tolerantside piires. Mõõtetäpsuse tagamiseks tuleb õhulekke mõõtmiseks kasutatavat mõõtmisüsteemi vastavalt tootja poolt kehtestatud nõuetele või standardiseeritud kvaliteedisüsteemidele perioodiliselt kalibreerida.

Üldised nõuded mõõteseadmetele on järgmised:

- Õhuvoolu tekitamise seade võimaldab üle hoone piirdetarindite või selle osa tekitada kindlaksmääratud ulatuses üle- või alarõhku;
- Süsteem peab tagama igal rõhuvahel konstantse õhuvoolu, õhu vooluhulga lugemite tegemiseks vajaliku aja jooksul;
- Õhurõhumõõteseadme võimaldab mõõta õhurõhuvahet vahemikus 0 Pa kuni 100 Pa täpsusega ± 1 Pa;
- Õhu vooluhulga mõõteseadme võimaldab mõõta õhu vooluhulka täpsusega ± 7 % mõõteväärtusest. Õhu vooluhulga lugemit tuleb parandada vastavalt õhu tihedusele;
- Temperatuuri mõõteseadme täpsusega peab olema vähemalt $\pm 0,5$ K;
- Õhuvoolu tekitamise seadme ühendamisel tuleb tagada, et seadme ja hoone vahelised ühendused oleksid lekete välistamiseks tihendatud.

2.3.2 Hoone ventilatsioonisüsteem

Suuremate hoonete puhul on võimalik tekitada õhurõhuerinevust üle hoone piirdetarindite ka hoone enda ventilatsiooniseadmega. Selleks tuleb ventilaatorid ja siibrid seadistada nii,

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

et süsteem saaks tekitada hoones üle- või alarõhku viisil, mis võimaldab mõõta kogu sisse- või väljaliiikuva õhuvooluhulka. Näiteks alarõhu tekitamiseks tuleb väljatõmme jätta eraldi tööle ja sissepuhe blokeerida. Reeglina tuleb ventilatsiooniseadme tellimisel pöörata erilist tähelepanu, kas seda on võimalik kasutada õhupidavuse mõõtmise jaoks. Vajadusel tuleb teha täiendavad muudatused. Uurida tuleks ka õhukanalite süsteemi ja valida välja sobivad kohad õhuvooluhulga mõõtmisteks.

Kuna reaalse hoone kütte-, ventilatsiooni- ja konditsioneerimissüsteemide õhuvoolu kanalites on õhuvooluhulkade mõõtmise vastavuskriteeriumide täitmine sageli raskendatud, siis on võimalik õhuvooluhulka $\dot{V}$ määrata ka hoonesse sisenevasse õhuvoogu pidevalt märkegaasi lisades.

Meetodit võib pidada pigem hoone õhupidavuse esmaseks kontrollimiseks. Oluline on ka asjaolu, et õhupidavuse mõõtmise etapis ei ole hoone puhtus veel sellel tasemele, et saaks ventilatsioonisüsteemi avada. Kui ventilatsioonisüsteemiga mõõdetakse hoone piirdetarindite õhupidavust, on oht, et kogu süsteem saab seest tolmuks.

2.4 Õhulekete mõõtmine

2.4.1 Mõõtmise aeg ehitusprotsessis

Hoone piirdetarindite õhulekke mõõtmised võivad toimuda alles pärast seda, kui hoone või selle osa piirdetarindite ehitamine on lõpetatud.

Et vältida võimalike tihendustööde tegemiseks konstruktsioonide ümberehitust, on mõistlik õhulekke mõõtmisi teha ka ehitusprotsessi varasemates staadiumites, näiteks enne siseviimistlustööde alustamist.

Kuna õhupidavuse mõõtmine tehakse kogu hoonele või hooneosale tervikuna on vajalik selle tegemine planeerida juba varakult ehituse kalendergraafikusse.

2.4.2 Mõõtmistingimused

Mõõtmistäpsus sõltub lisaks kasutatavatest seadmetest ja aparaatidest ka mõõtmisaegsetest keskkonnatingimustest.

Piisavalt väikese suurusega null-lekkeõhuvoolu rõhuvahe saavutamine on tõenäoliselt raskendatud kui:

- kui sise-/välisõhu temperatuuride vahe ja hoone või selle osa kõrguse korrutis on suurem kui $250 \text{ m} \cdot \text{K}$;
- tuule kiirus maapinna lähedal ületab 3 m/s
- meteoroloogiline tuulekiirus ületab 6 m/s ;
- meteoroloogiline tuulekiirus saavutab väärtuse 3 Beauforti skaalal

Õhu vooluhulga mõõtmistulemuste korrigeerimiseks õhutiheduse põhjal tuleb registreerida temperatuurid hoone sees ja väljas:

- enne katset;
- katse ajal;
- pärast katset.

Tuule kiirus või tugevus tuleb registreerida. Piisab tuule tugevuse visuaalsest hindamisest puude, vee jne põhjal vastavalt Beauforti skaalale.

2.5 Katsemeetodid

Hoone õhulekke mõõtmiseks on erinevaid katsemeetodeid.

- **Meetod 1** on ette nähtud kasutuses oleva hoone katsetamiseks, kui loomuliku ventilatsiooni avad on suletud ja kogu hoone mehaanilise ventilatsiooni või õhu konditsioneerimise avad on tihendatud.

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

- **Meetod 2** on ette nähtud hoone piirdetarindit katsetamiseks, mille kõik kavatsuslikud avad on tihendatud ja ukсед, aknad ning luugid on suletud.
- **Meetod 3** on ette nähtud eriotstarbeliste hoonete katsetamiseks, kusjuures kavatsuslikke avadega toimitakse vastavalt igas riigis selleks otstarbeks kohaldatavatele standarditele või eeskirjadele.

Meetodi valik oleneb katse eesmärgist. Näiteks meetodit 1 võib kasutada hoone kui terviku õhupidavuse hindamiseks, meetodit 2 erinevate ehitusviiside omavaheliseks võrdluseks ja meetodit 3 vastavuse hindamiseks ehitusmäärustes või standardites hoonete energiatõhususe arvutusteks kindlaksmääratud õhulekke väärtustele.

Möödetava hoone või selle osa ulatus oleneb katse eesmärgist ja on määratletud järgmiselt:

- Tavaliselt hõlmab möödetav hoone osa kõiki sisekliima tagamisega ruume (st ruume, mida on tervikuna ette nähtud kas otseselt või kaudselt kütta, jahutada ja/või ventileerida);
- Kui mõõtmise eesmärgiks on mõõta vastavust ehitusmäärustes või standardis kindlaksmääratud õhulekkearvule ja mõõtmise ulatus on selles määruuses või standardis määratletud, siis peab mõõtmise ulatus vastama sellele määruusele või standardile;
- Kui mõõtmise eesmärgiks on mõõta vastavust ehitusmääruuses või standardis kindlaksmääratud õhulekkearvule, kuid mõõtmise ulatus ei ole selles määruuses või standardis määratletud, siis hõlmab möödetav hoone osa kõiki sisekliima tagamisega ruume;
- Erijuhtudel võib mõõtmise ulatus olla määratletud kokkuleppel kliendiga.

Kogu testitav hoone või hoone osa muudetakse rõhuerinevuse tekitamisel üheks tsooniks: kõik testitava hoone osas olevad vaheuksed peavad olema avatud, tagamaks ühtset õhurõhuerinevust sise- ja väliskeskkonna vahel. Hoone seisundit tuleb testi ajal jälgida: aknad, ukсед, vaheseinad, katused ja põrandad, reguleeritavad avatäidete asendid ning sihtotstarbeliste avade tihendamiseks kasutatud materjalid.

Hoone üksikuid osi võib mõõta eraldi, nt korterelamus võib mõõta iga korterit eraldi. Kuid sel juhul tuleb tulemuste tõlgendamisel arvestada sellega, et sel viisil mõõdetud õhulekke võib sisaldada ka lekete hoone külgnevatesse osadesse. On võimalik, et üksikute korterite õhulekkearv vastab nõuetele, kuid terve hoone õhulekkearv ei vasta nõuetele või vastupidi. Vaheseinte ja vahelagede lekete kõrvaldamiseks tuleb hea tava kohaselt survestada või vähemalt mõõta tekitatud õhurõhuerinevust ka külgnevates ruumides, nagu põõningud, keldrid või külgnevad korterid, kuna katsemeetod võib tekitada õhuvoolu nimetatud ruumidesse või neist välja.

2.6 Ettevalmistustööd

Hoone ettevalmistus sõltub rakendatavast katsemeetodist:

- **1. meetodi ettevalmistustööd:**
 - Kõik hoone välisaknad, -ukсед ja -luugid tuleb sulgeda;
 - Hoone piirdetarindite loomulikku ventilatsiooni võimaldavad ventilatsiooniavad tuleb sulgeda;
 - Kogu hoone mehaanilise ventilatsiooni või õhu konditsioneerimise avad tuleb tihendada, st et tihendada tuleb:
 - kas ventilaatori ja hoone ümbrise vahelised peakanalid,
 - kas kõik üksikud õhu sisse- ja väljalaskeseadmed, või
 - välisavad (sissevõtt ja väljalase);
 - Hoone väliste piirdetarindite kavatsuslikud avad, kaasaarvatud perioodiliselt kasutatavad mehaanilised ventilatsiooni ja õhu konditsioneerimise avad, tuleb sulgeda;
 - Tule- ja suitsuohutuspäigaldised peavad olema oma normaalses kasutusseisundis, näiteks tule- ja suitsuohutuspäigaldised, mis on tavaliselt kinni ja avanevad tulekahju korral automaatselt, jäetakse suletuks; tule- ja

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

suitsuohutuspaigaldised, mis on tavaliselt avatud ja sulguvad tulekahju korral automaatselt, jäetakse avatuks;

- Hoone piirdetarindites olevad avad, mis ei ole ette nähtud ventileerimiseks, nagu näiteks välisukse või -seina sisse paigaldatud postkast, tulekustutusvahendid ja nii edasi, tuleb sulgeda. Hoone välistes piirdetarindites olevatele pragudele eelõeldu ei laiene (need on hoone olukorda kajatavad lekked);
- Teisi meetmeid hoone piirdetarindite tiheduse parandamiseks ei tohi rakendada.
- **2. meetodi ettevalmistustööd:**
 - Kõik hoone ümbrise aknad, ukсед ja luugid tuleb sulgeda;
 - Hoone ümbrise loomulikku ventilatsiooni võimaldavad ventilatsiooniavad tuleb sulgeda. Kogu hoone mehaanilise ventilatsiooni või õhu konditsioneerimise avad tuleb tihendada nii nagu on kindlaks määratud 1. meetodi puhul;
 - Kõik ülejäänud hoone ümbrise kavatsuslikud avad tuleb tihendada, välja arvatud aknad, ukсед ja luugid, mis jäävad suletuks.
- **3. meetodi ettevalmistustööd:**
 - Hoone piirdetarindite kavatsuslikud avad peavad olema suletud, tihendatud või avatud vastavalt katse spetsiaalsele eesmärgile ;
 - Avad, mis ei ole ette nähtud ventileerimiseks, peavad olema suletud, tihendatud või avatud vastavalt katse spetsiaalsele eesmärgile;
- **Kõikide meetodite üldised ettevalmistustööd:**
 - Enne mõõtmist tuleb kõik välisõhu sissevõtuga küttesüsteemid, mehhaanilised ventilatsioonisüsteemid ja konditsioneerid peavad olema välja lülitatud. Kõik mehhaaniliste ventilatsioonisüsteemide või konditsioneeride lõppseadmed peavad olema õhukindlalt hermetiseeritud;
 - Kanalisatsiooni äravooluavad ja trapid tuleb veega täita või tihendada;
 - Avatud küttekolded peavad olema tuhost puhastatud, et vältida ruumide saastumist tuhaga. Tähelepanu tuleb pöörata ka küttesüsteemide heitgaasidega seotud ohtude vältimiseks. Arvestada tuleb ka külgnevates hooneosades asuvaid küttekoldeid;
 - Tuleb läbi viia hoone seisundi üldine hindamine. Koostada kirjed akende, uste, läbipaistmatute seinte, katuse ja põranda, reguleeritavate avade asendi ja kõigi kavanduslikes avades kasutatud tihendite kohta.

Tabel 2.1 Välistes piirdetarindites olevate avade seisund mõõtmise ajal

Hoonete avade liigitus	1. meetod: Hoone tavakasutuse tingimustes	2. meetod Hoone piirdetarindite õhulekke mõõtmine	3. meetod Spetsiaalne eesmärk
Loomuliku ventilatsiooni avad, värskõhuklapid	Suletud	Tihendatud	Suletud, tihendatud või avatud vastavalt spetsifikatsioonile
Kogu hoone mehaanilise ventilatsiooni või õhu konditsioneeride avad	Tihendatud	Tihendatud	Suletud, tihendatud või avatud vastavalt spetsifikatsioonile
Ainult perioodiliselt kasutatavad hoone mehaanilise ventilatsiooni või õhu konditsioneeride avad	Suletud	Tihendatud	Suletud, tihendatud või avatud vastavalt spetsifikatsioonile
Hoone ümbrise aknad, ukсед ja luugid	Suletud	Suletud	Suletud, tihendatud või avatud vastavalt spetsifikatsioonile
Avad, mis ei ole ette nähtud ventileerimiseks	Suletud	Tihendatud	Suletud, tihendatud või avatud vastavalt spetsifikatsioonile

Mõõtmiseks paigaldatakse mõõteseadme raam piirdetarindi sobivasse ukse- või aknaavasse veendudes, et seadme ja hoone vahelised ühenduskohad on lekete välistamiseks hermetiseeritud. Õhupidavates hoonetes on võimalik, et uks või aken

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

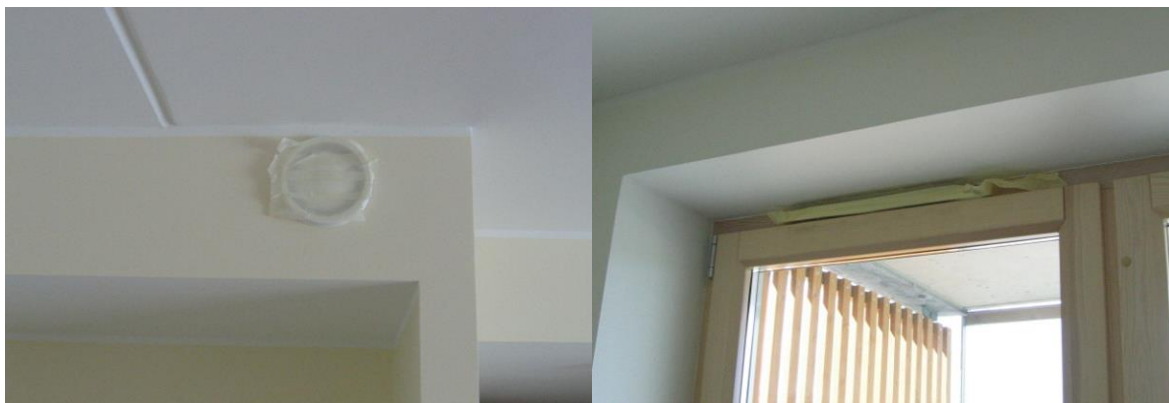
moodustab peamise õhulekke. Sellistel puhkudel tuleb mõõteseadme asendi ja/või testi tulemuste tõlgendamisel olla ettevaatlik.

Sise- ja väliskeskkonna õhurõhu erinevusi mõõdetakse reeglina vaadeldava hoone piirdetarindi madalaima pörandapinna tasandilt. Kõrghoonetes on heaks tavaks mõõta rõhkude erinevust ka vaatlusaluse hoone ülemise korruse pörandi tasandil. Tuleb veenduda, et sise- ja väliskeskkonna õhurõhu muutus ei ole põhjustatud õhuvoolu tekitamise seadmetest. Välist surveventiili tuleb kaitsta dünaamilise rõhu eest nt. T-toru paigaldades või seda perforeeritud karbikuga ühendades. Eriti tuulistes tingimustes näeb hea tava ette välise surveventiili paigaldamist hoonest mõnevõrra kaugemale, kuid mitte teiste takistuste lähedusse. Survetorusid ei tohi paigaldada vertikaalselt. Vältida tuleks suurte temperatuurierinevuste (nt. päikese mõjul) toimet.

Alati tuleb katsel kasutataval ligikaudu kõige suuremal rõhuvahel kontrollida kogu hoone piirdetarindite suurtele leketele ja ajutiselt tihendatud avade tihedust. Selliste lekete avastamise kohta tuleb koostada üksikasjalikud kirjed.

Kõik avastatud puuduvad või lekkivad ajutised tihendid, näiteks kütte-, ventilatsiooni- või õhustussüsteemi komponentidel, tuleb kohe korda teha.

Kogu katsetatav hoone või hoone osa tuleb ette valmistada nii, et see toimiks surveastamisel ühe ühtse tsoonina. Kõik katsetatavas hooneosas asuvad ruumide vahelised avad (uksed, luugid, jne) peavad olema avatud. Praktilistel ja turvalisusest tulenevatel põhjustel on lubatud mõned uksed hoida suletuna, näiteks juurdepääsud liftile või elektriklii ruumile.



Joonis 2.2 Hoonepiirete õhulekke mõõtmise ajaks suletakse ventilatsiooniavad (vasakul) ja värskõhuklapid (paremal).

2.7 Mõõtmise etapid

2.7.1 Loomulik ehk null-lekke rõhuvahe

Katse alustamisel tuleb õhurõhu erinevuse mõõtmisseade avada ja kontrollida või korrigeerida nullnäitu.

Õhuvoolu tekitamise seadme ava suletakse ajutiselt ja ühendatakse rõhumõõtmisseade sise- ja välisrõhu vahe mõõtmiseks. Rõhu referentsväärtuseks (null) loetakse välisrõhku. Loomulik rõhuvahe registreeritakse vähemalt 30 s vältel (vähemalt 10 väärtust) ja arvutatakse:

- loomuliku rõhuvahe positiivsete väärtuste keskmine, Δp_{01+} ,
- loomuliku rõhuvahe negatiivsete väärtuste keskmine, Δp_{01-} ,
- loomuliku rõhuvahe kõikide väärtuste keskmine, Δp_{01} .

Sama tegevust korratakse ka katse lõpus (määrates väärtused Δp_{02+} , Δp_{02-} ja Δp_{02}).

Kui Δp_{01+} , Δp_{01-} , Δp_{02+} , või Δp_{02-} absoluutväärtused on suuremad kui 5 Pa, siis loetakse katse kehtetuks. Kui kirjeldatud katse kohta koostatakse katseprotokoll, siis tuleb katsetingimuste nõuetele mittevastavus katseprotokollis ära märkida.

2.7.2 Rõhuvahede mõõtevahemik

Õhuvoolu tekitamise seadmelt võetakse ajutine kate maha ja lülitatakse seade sisse.

Katse käigus mõõdetakse õhuvooluhulka ja sise-/välisrõhu vahet rakendatava rõhuvahede mõõte- vahemiku ulatuses, muutes rõhuvahet ligikaudu kuni 10 Pa suuruste astmetena. Igal katsel tuleb madalaima ja kõrgeima rõhuvahe piirides kindlaks määrata ligikaudu võrdsete vahekaugustega vähemalt viis mõõtepunkti. Madalaim mõõtepunkt peab olema ligikaudu rõhuvahe 10 Pa juures (lubatav on hälve ± 3 Pa) või viiekordne loomulik rõhuvahe (Δp_{01}), neist suurim. Suurim rõhuvahe peab olema vähemalt 50 Pa, kuid arvutatavate tulemuste suurema täpsuse huvides on soovitatav lugemid võtta rõhuvahel kuni 100 Pa.

Väga suurte hoonete ja väga suure õhulekkega hoonete korral võib juhtuda, et õhuvoolu tekitamise seadme võimsus ei suuda 50 Pa rõhuvahet saavutada. Sel juhul tuleks kasutusele võtta täiendav või suurema võimsusega õhuvoolu tekitamise seade (üldise võimsuse suurendamiseks) ja/või tuleb katse teha rakendades olemasoleva õhuvoolu tekitamise seadmega saavutatavat suurimat rõhuvahet. Kui sel juhul saavutatav rõhuvahe jääb alla 25 Pa, siis on katsetulemus kehtetu. Kui suurim rõhuvahe jääb piiridesse 25 Pa kuni 50 Pa, siis peab see olema katseprotokollis selgelt esitatud, koos kinnitusega, et selle rahvusvahelise standardi nõuded ei ole täies ulatuses täidetud ja ka ülevaade selle põhjustest.

2.7.3 Mõõtmine erinevate rõhuerinevuste juures

Soovitatav on teha mõõtmiste seeriad nii üle- kui ka alarõhu tingimustes. Tuleb arvestada, et suurema õhurõhu erinevuse juures tehtavad mõõtmised on suurema täpsusega kui väiksemal rõhuvahel. Seetõttu tuleb madalamal rõhuvahel tehtavatel mõõtmistel olla eriti hoolikas.

Soovitatav on kontrollida, kas hoone piirdetarindite seisund ei ole iga katse ajal muutunud, näiteks kas tihendatud avad ei ole muutunu ebatihedaks või ukсед, aknad või õhuklapid ei ole tekitatud rõhu tõttu avanenud.

Alati tuleb kontrollida, et suurima rõhuerinevuse tingimustes ei tekiks lekkeid piirdetarindisse ega avaneks ajutiselt suletud avad, samuti veenduge, et torustike veekraanid on korralikult kinni keeratud või hermeetiliselt suletud. Lekete ilmnemisel tehke üksikasjalikke märkmeid. Kontrolli tulemusel avastatud defektsed või puuduvad ajutised tihendid, nt. kütte-, ventilatsiooni- või konditsioneerimissüsteemi komponentide osas, tuleb korda teha.

2.7.4 Õhulekkevooluhulga arvutamine

Tekitatud õhurõhuerienvus Δp määramisel lahutatakse igast mõõdetud rõhuvahest Δp_m keskmine loomulik rõhuvahe (parand), kasutades valemit 5.

Seejuures tuleb tähelepanu pöörata pluss- või miinusmärgile.

$$\Delta p = \Delta p_m - \frac{\Delta p_{0,1} + \Delta p_{0,2}}{2} \quad 5$$

Kõigepealt tuleb teisendada õhu vooluhulga mõõtesüsteemi abil saadud lugemid q_r vooluhulga mõõteseadme temperatuuri ja rõhku arvestades õhu vooluhulga mõõteväärtuseks $\dot{V}_m$ vastavalt seadme tootja juhistele:

$$\dot{V}_m = f(q_r) \quad 6$$

Seejärel teisendatakse mõõdetud õhu vooluhulk ülerõhul $\dot{V}_m$ õhu vooluhulgaks läbi hoone piirdetarindite $\dot{V}_{env}$, kasutades valemit 7.

$$\dot{V}_{env} = \dot{V}_m \left(\frac{p_1}{p_e} \right) \approx \dot{V}_{m1} \left(\frac{T_e}{T_{int}} \right)$$

7

Kus:

- ρ_i siseõhu tihedus, kg/m³;
- ρ_e välisõhu tihedus, kg/m³;
- T_i siseõhu absoluutne temperatuur, K;
- T_e välisõhu absoluutne temperatuur, K;

Õhulekke graafiliseks kujutamiseks nii ülerõhul kui ka alarõhul joonistatakse topeltlogaritmilist skaalat kasutades välja hoone piirdetarindeid läbivate õhu vooluhulkade ja vastavate rõhuvahede vaheline seos (Joonis 2.3).

Teisendatud andmeid tuleb kasutada õhuvooluteguri C_{env} ja õhuvoolueksponendi n arvutamiseks vastavalt valemile 8, kasutades vähimruutude meetodit:

$$\dot{V}_{env} = C_{env} (\Delta p)^n$$

8

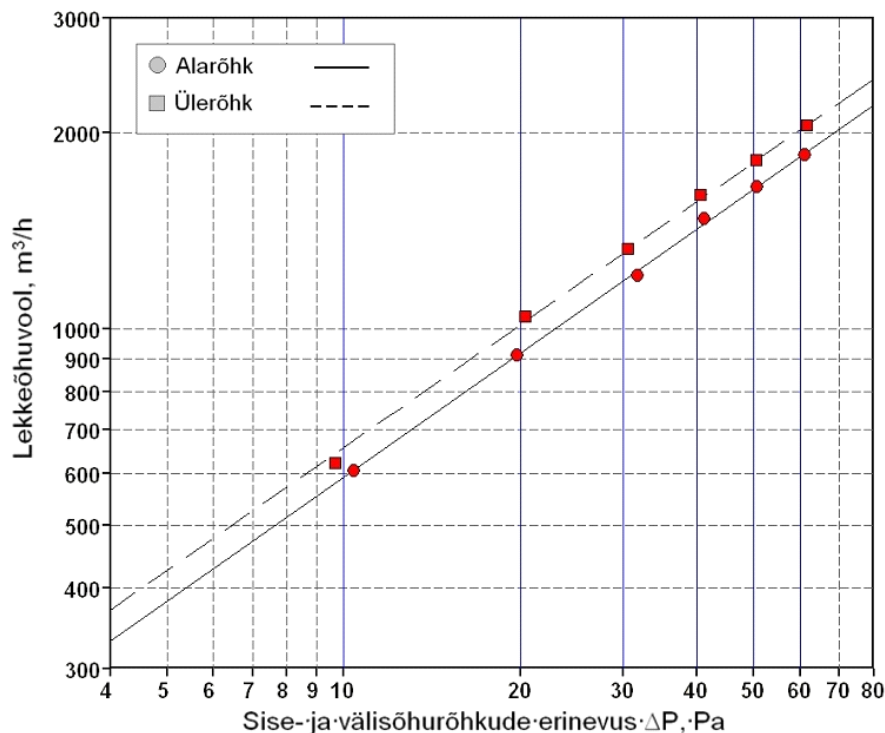
Kus:

- n õhuvoolu eksponent;
- Δp tekitatud õhurõhu erinevus, Pa;
- $\dot{V}_{env}$ õhu vooluhulk läbi hoone piirdetarindite, m³/h.

Valemi 8 sobivuse määramiseks tuleks arvutada tuletatud õhuvooluteguri ja õhuvoolueksponendi usaldusvahemikud.

C_{env} ja n saab arvutada kasutades standardi (EVS-EN ISO 9972, 2015) lisas C antud menetlust. Arvutada tuleb ka determinatsioonitegur r^2 (log-log diagrammilt). C_{env} , n ja r^2 tuleb arvutada eraldi nii ülerõhu kui ka alarõhu korral.

Et katsetulemused oleksid standardi (EVS-EN ISO 9972, 2015) kontekstis kehtivad peab n olema piirides 0,5 kuni 1 ja r^2 ei tohi olla väiksem kui 0,98.



Joonis 2.3. Näide õhulekete graafikust

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

Õhulekketegur C_L saadakse, korrigeerides õhuvoolutegurit C_{env} standardtingimustele [20 °C ja $1,013 \times 10^5$ Pa], kasutades alarõhu 9 ja ülerõhu valemite 10:

$$C_L = C_{env} \left(\frac{\rho_e}{\rho_0} \right)^{1-n} \approx C_{env} \left(\frac{T_0}{T_e} \right)^{1-n} \quad 9$$

Kus:

ρ_0 õhutihedus standardtingimustes, kg/m³;
 T_0 õhu absoluutne temperatuur standardtingimustes, K.

$$C_L = C_{env} \left(\frac{\rho_{int}}{\rho_0} \right)^{1-n} \approx C_{env} \left(\frac{T_0}{T_{int}} \right)^{1-n} \quad 10$$

Õhulekkevooluhulk q_{pr} referentsrõhu vahel Δp_r , väljendatuna m³/h, määratakse valemiga 11:

$$V_{pr} = C_L (\Delta p_r)^n \quad 11$$

Kus:

C_L on õhulekkekoefitsient m³/(h·Pa);

Δp on tekitatud rõhuerinevus, Pa;

n on õhuvoolueksponent.

Õhulekke referentsrõhk on tavaliselt 50 Pa.

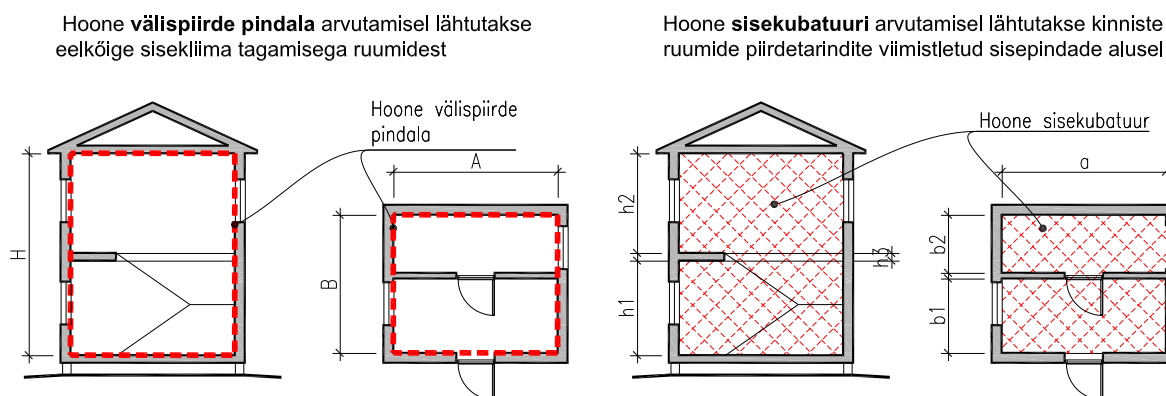
$$q_{50} = C_L (50 \text{ Pa})^n$$

2.8 Hoone tehniliste näitajate arvutus

Et erinevaid hooneid omavahel võrrelda ja hinnata nende piirdetarinate keskmist õhuleket, taandatakse õhulekkevooluhulk voone suurust iseloomustavatele omadustele:

- piirdetarindite pindala;
- sisekubatuur;
- netopindala.

Hoone suurust iseloomustavate näitajate arvutamisel kasutatakse hoone ja ruumide sisemõõtmeid (välisseinte või katuslae ja põranda sisepindade vahelised mõõtmised koos ruumide ning kandvate ja mittekanvate vaheseinte ning vahelagedega). Välispiirde pindala sisse arvestatakse ka pinnasele toetuva põranda pindala ning vaheseinte ja vahelagede paksusest moodustuv pindala, Joonis 2.4.



Joonis 2.4 Hoone välispiirde pindala (vasakul) ja sisekubatuuri (paremal) arvutamise põhimõtted

Olenevalt katse eesmärgist, eriti vastavuse määramisel ehitusmäärusele või standardile, võidakse kasutada erinevaid referentsväärtusi, nagu näiteks hoone väliste piirdetarindite

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

pindala või hoone piirdetarindite pindala, mille kaudu toimuva soojuskao põhjal arvutatakse hoonete energiavajadust. Kui taolisi väärtusi kasutatakse, siis tuleb need katseprotokollis määratleda.

2.8.1 Siseruumala

Hoone siseruumala V_i on hoone või selle mõõdetava osa siseruumala.

Selle ruumala määramiseks tuleb kasutada üldisi sisemõõtmeid. Siseseinte ja põrandate mahtu (nende alune pindala korrutatuna kõrgusega/pikkusega) ei lahutata. Hoone piirdetarindites olevaid õõnsusi ei lahutata. Mööbli ruumala ei lahutata.

2.8.2 Hoone piirdetarindite pindala

Hoone piirdetarindite või selle uuritava osa pindala A_E on kõigi siseruumala ümbritsevate põrandate, seinte ja lagede kogupindala. Arvesse võetakse ka maapinnast madalamale jäävate seinte ja põrandate pindalad.

Selle pindala arvutamisel tuleb kasutada üldisi sisemõõtmeid, st põrandapindala võib arvutada kui pikkuste 2 ja 4 korrutis. Siseseinte, põrandate ja lagede ning välisseinte põrandate ja lagede liitekohtade pindala ei lahutata.

Kui mõõdetakse näiteks hooneosi, siis ridaelamu piirdetarindite pindala arvestab ka ridaelamubokside vahelisi seinu. Mitmekorruselise elumaja korteri piirdetarindite pindala hõlmab naaberkorterite põrandaid, seinu ja lagesid.

2.8.3 Netopindala

Netopind A_F on hoone või selle mõõdetava osa kõigi ruumide netopindalade summaarne pind, mis arvutatakse vastavalt siseriiklikele eeskirjadele.

2016 aastal kehtiva siseriikliku eeskirja (Majandus- ja taristuministri määrus nr. 57 Ehitise tehniliste andmete loetelu ja arvestamise alused) kohaselt:

- Korruse suletud netopind ehk kasulik pind on korruse suletud brutopind, millest on maha arvatud korruse välistarindite alune pind, sisetarindite alune pind ja mittekandvate tarindite alune pind.
- Hoone suletud netopind on kõigi korruste suletud netopindade summa.
- Kui ruumis on alla 1,6 meetri kõrguseid osasid, näiteks kaldpindade puhul, võetakse suletud netopinna leidmisel arvesse vaid ruumiosad, kus ruumi kõrgus on vähemalt 1,6 meetrit.

2.9 Tulemuste esitamine

Tuletatud suurused arvutatakse referentsrõhul toimuva üle- kui ka alarõhukatse keskmise õhulekkevooluhulga põhjal. Kuid juhul kui katse on tehtud ainult ühel viisil, siis tuleks kasutada kättesaadavat õhulekkevooluhulka.

2.9.1 Hoonepiirete õhulekkearv

Hoone piirdetarindite õhulekkearv q_{Epr} referentsrõhuvahel arvutatakse, jagades õhulekkevooluhulga samal referentsrõhuvahel hoone ümbrise jaotise 6.1.2 kohasele pindalale, kasutades valemit 12:

$$q_{Epr} = \frac{q_{pr}}{A_E} \quad 12$$

Selle tuletatud suuruse määramisel kasutatav referentsrõhk on tavaliselt 50 Pa: $q_{E50} = \frac{q_{50}}{A_E}$

2.9.2 Õhuvahetuskordsus referentsrõhuvahel

Õhuvahetuskordsus n referentsrõhuvahel arvutatakse, jagades õhulekkevooluhulga samal referentsrõhuvahel sisekubatuuriga, kasutades valemit 13:

$$n_{pr} = \frac{q_{pr}}{V} \quad 13$$

Selle tuletatud suuruse määramisel kasutatav referentsrõhk on tavaliselt 50 Pa: $n_{50} = \frac{q_{50}}{V}$

2.9.3 Piirdetarindite õhuleke hoone netopindala kohta

Piirdetarindite õhuleke hoone netopindala kohta q_{Fpr} referentsrõhuvahel arvutatakse, jagades õhulekkevooluhulga referentsrõhuvahel pöranda jaotise 6.1.3 kohasele pindalale, kasutades valemit 14:

$$q_{Fpr} = \frac{q_{pr}}{A_F} \quad 14$$

Selle tuletatud suuruse määramisel kasutatav referentsrõhk on tavaliselt 50 Pa: $q_{F50} = \frac{q_{50}}{A_F}$

2.9.4 Efektiivne lekkepindala

Efektiivne lekkepind ELA_{pr} referentsrõhuvahel Δp_r , arvutatakse valemiga 15:

$$ELA_{pr} = \frac{1}{3600} C_L \left(\frac{\rho_0}{2} \right)^{0,5} (\Delta p_r)^{n-0,5} \quad 15$$

Selle tuletatud suuruse määramisel kasutatav referentsrõhk on tavaliselt 10 Pa.

2.9.5 Efektiivne erilekkepindala (piirdetarindite pindala kohta)

Efektiivne erilekkepindala ELA_{Epr} arvutatakse, jagades lekkepindala referentsrõhuvahel piirdetarindite pindalaga, kasutades valemit 16:

$$ELA_{Epr} = \frac{ELA_{pr}}{A_E} \quad 16$$

Selle tuletatud suuruse määramisel on referentsrõhk tavaliselt 10 Pa: $ELA_{E10} = \frac{ELA_{10}}{A_E}$

2.9.6 Efektiivne erilekkepindala (ruumide netopindala kohta)

Efektiivne erilekkepindala ELA_{Fpr} arvutatakse, jagades lekkepindala referentsrõhuvahel ruumide netopindalaga, kasutades valemit 17:

$$ELA_{Fpr} = \frac{ELA_{pr}}{A_F} \quad 17$$

Selle tuletatud suuruse määramisel kasutatav referentsrõhk on tavaliselt 10 Pa:

$$ELA_{F10} = \frac{ELA_{10}}{A_F}$$

2.10 Õhulekkekohtade tuvastamine

Lekkekohtade avastamine on vajalik lekkepindala vähendamiseks ja hoone lekkekohtade jaotuse hindamiseks. Võimalikud on järgmised meetodid.

2.10.1 Lahutamismeetod

Lekkimisele katsetatav piirdetaindi pindala ja/või ehituselement kaetakse õhutiheda membraaniga. Pärast uuritava pindala mõõtmist nii membraaniga kui ka ilma membraaniga on võimalik kahe mõõtmistulemuse vahe põhjal hinnata, kas tegemist on lekkepindalaga või mitte.

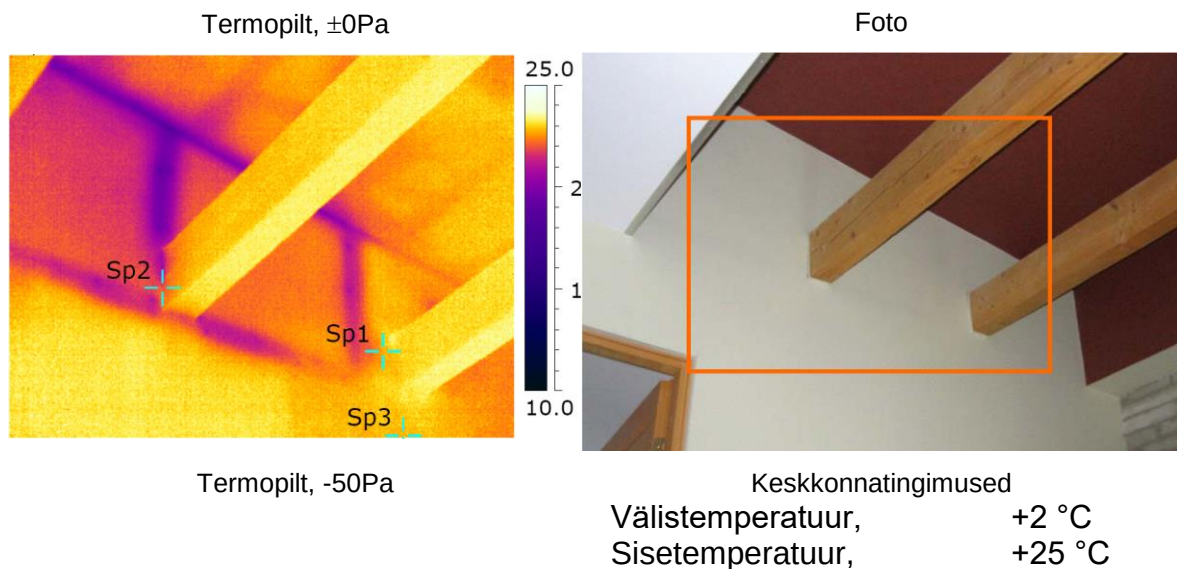
2.10.2 Infrapunakaamera (termoviisori) kasutamine

Sise- ja väliskeskkonna temperatuuride erinevuse korral on alarõhukatsel võimalik infiltratsiooni kohtade avastamiseks kasutada termokaamerat.

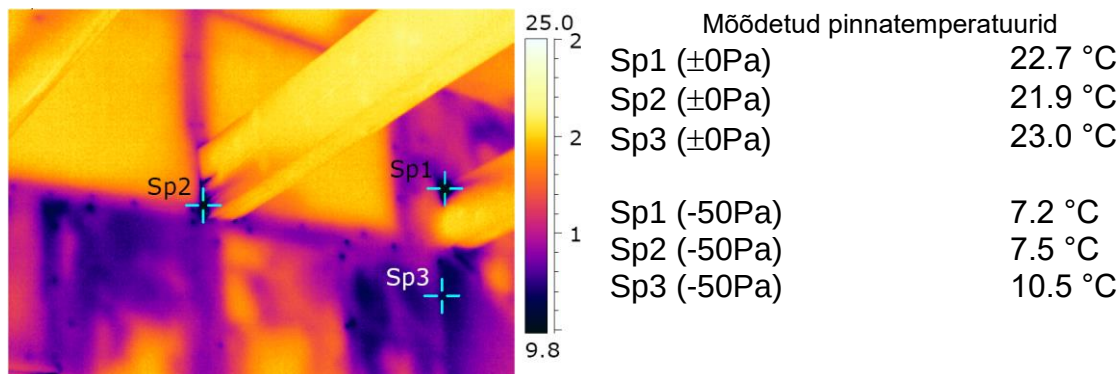
Õhulekkekohtade leidmiseks termograafia infrapunakaamera abil tuleb piirdepinna temperatuurid mõõta kaks korda:

- esmalt elamu tavatingimustes (et leida külmasillad ja õhulekke mõju normaalingimustes) ja
- teist korda samadest kohtadest, kui elamu on 20...30 minutit olnud 50-80 Pa alarõhu tingimustes (et leida õhulekked).

Läbi õhulekkekohtade hoonesse sisenenud külm välisõhk jahutas piirde sisepinda. Temperatuuride erinevus kahe termopildi vahel viitab õhulekkele. Mõõtmiste ajal oli sise- ja välistemperatuuri taotluslik erinevus $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Joonis 2.5 on toodud näide õhulekkekoha tuvastamisest termograafia infrapunakaamera abil.



Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine



Joonis 2.5 Termograafia infrapunakaamera abil õhulekkekohtade leidmine

2.10.3 Märkesuitsu kasutamine

Hoone piirdetaindieid, seadmeid jne läbiva õhuvoolu visualiseerimiseks ja lekkekohtade avastamiseks võib kasutada märkesuitsu. Selle meetodi kasutamine võib nõuda praktilisi oskusi, nt suitsu tekitamise kiiruse suhtes.

Märkesuitsuandur koosneb väikesest pumbast ja suitsuampullist, milles on hape. Kui läbi ampulli imetakse õhku, reageerib õhus olev veeaur happega ja ampullist väljub valge suits. Kuna märkesuits ei ole kuum, ei mõjuta soojuslik energia tema liikumist.

Märkesuitsuandur

Õhuleke sein ja lengi vahel



Joonis 2.6 Märkesuitsuanduri kasutamine õhulekkekohtade leidmisel

2.10.4 Anemomeetri kasutamine

Katse ajal (ülerõhk või alarõhk) võib hoida anemomeetrit hoone piirdetarindi või ehituselemendi nende liitekohtade vastas, kus kahtlustatakse lekkimist. Kui seade tuvastab õhu liikumist, siis osundab see lekkimisele.

2.10.5 Visuaalne vaatlus õhulekkekohtade leidmisel

Ka on võimalik tunnetada hoone ümbrisel õhuvoolu ehituselementide jne ümber käega, kuid see meetod ei sobi individuaalsete erinevuste tõttu.

Suuremad lekkekohad oli võimalik avastada ka kompamismeele abil käega. Alarõhu tingimustes võib läbi õhulekkekohtade tulla tuppa tolmu

2.11 Mõõtemääramatus

Ülerõukatse täielik määramatus oleneb paljudest teguritest. Andmetöötluses tuleks esitada iga tuletatud suuruse usaldusvahemiku hinnang.

2.11.1 Referentsväärtus

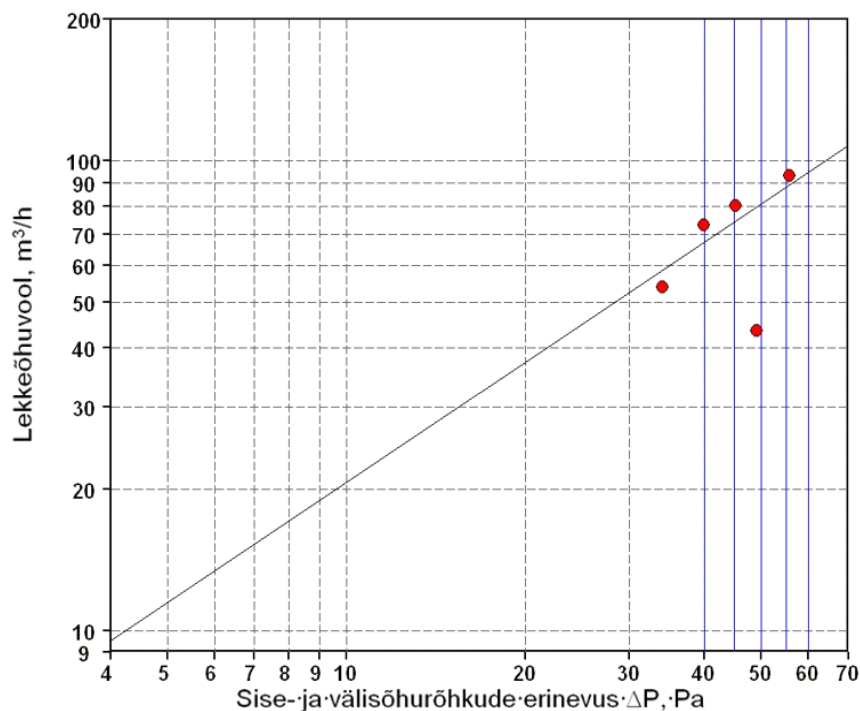
Referentsväärtuse täpsust saab hinnata kasutades vealevikuarvutust. Tavaliselt on määramatus vahemikus 3 % ja 10 %.

2.11.2 Kogumääramatus

Selle rahvusvahelise standardi kohaselt tehtud ülerõhukatsetel jaotistes 6.3.1 kuni 6.3.7 kirjeldatud tuletatud suuruste kogumääramatust saab hinnata kasutades vealevikuarvutust. See arvutus peaks sisaldama kõigi lõpptulemuse saamiseks kasutatud suuruste määramatusi. Tuulevaiksetes tingimustes on kogumääramatus enamikul juhtudel alla 10 %. Tuulistes tingimustes võib kogumääramatus ulatuda kuni ± 20 %-ni.

2.11.3 Keskkonnatingimustest põhjustatud vead

Tuulest ja temperatuuride erinevusest võib tekkida õhurõhkude erinevus. Kui see erinevus on suur, siis mõjutavad keskkonnatingimused liiga palju loomulikku õhurõhkude erinevust ja selle kaudu mõõtetulemust. Enne mõõtmisi tuleb kontrollida keskkonnatingimusi: kui tuule kiirus on üle 6 m/s või hoone kõrguse ja sise- ja välistemperatuuride erinevuse korrutis on üle 500 m·K, siis on soovitatav mõõtmised edasi lükata, kuni tingimused on sobivamad. Väikesest tuulest põhjustatud viga saab vähendada, kui mõõta õhurõhkude erinevust ja lekkeõhuvoolu hulka piisavalt pika aja jooksul. Suuremad tuulepuhangud võivad mõjutada mõõtetulemust juba nii palju, et mõõtmise aja pikendamisest ei ole kasu. Joonisel 2.5 on toodud tuulepuhangu tõttu ebaõnnestunud mõõtetulemus. 50 Pa juures on lekkeõhuvoolu hulk oluliselt väiksem. Sellise tulemuse korral tuleb mõõtmist korrata.



Joonis 2.7 Tuulepuhangu tõttu ebaõnnestunud mõõtetulemus

2.11.4 Mõõtemetoodika vead

Kuigi hoonepiirete õhupidavuse mõõtmine on võrdlemisi hästi standardiseeritud ja mõõtmise teostajast sõltumatu, on siiski võimalik ka valesti mõõta.

2.12 Tulemuste aruanne

Katseprotokollis tuleb esitada vähemalt järgmised andmed:

- kõik katsetatava objekti tuvastamiseks vajalikud andmed: postiaadress (sealhulgas korteri number, kui esineb) ja hinnanguline ehitusaeg;
- viide sellele rahvusvahelisele standardile, st ISO 9972 ja kõik kõrvalekalded sellest;
- katsemeetod (1, 2 või 3) ja katse liik (ülerõhk, alarõhk või mõlemad)
- katseobjekt;
 - katsetatavate hoone osade kirjeldus;
 - katsetatava hooneosa sisekubatuur;
 - kirjed arvutuste kohta, mis võimaldavad esitatud tulemusi tõendada;
 - hoone ümbrise kõigi avade seisund: suletud, tihendatud, avatud jne;
 - ajutiselt õhukindlalt tihendatud avade üksikasjalik kirjeldus (sealhulgas kasutatud vahendid), olemasolu korral;
 - mehaanilise ventilatsiooni tihendatud kohad, esinemise korral;
 - kütte-, ventilatsiooni- ja õhu konditsioneerimissüsteemi tüüp;
- aparatuur ja menetlused, st kasutatud seadmed ja mõõtevahendid;
- katseandmed:

Koolituse konspekt: Külmasildade arvutus ja õhulekkearvu mõõtmine

- 1) loomulikud rõhuvahed $\Delta p_{0,1+}$, $\Delta p_{0,1-}$, $\Delta p_{0,2+}$, $\Delta p_{0,2-}$, $\Delta p_{0,1}$ ja $\Delta p_{0,2}$ nii üle- kui ka alarõhukatsel;
 - 2) sise- ja välistemperatuurid;
 - 3) tuulekiirus, baromeetrirõhk, kui neid arvutustes kasutatakse;
 - 4) tekitatud rõhuvahed ja neile vastavad õhuvooluhulgad, tabeli kujul;
 - 5) õhulekke graafik, vt näiteks joonist 2;
 - 6) õhuvoolutegur C_{env} , õhuvoolueksponent, n , õhulekketegur, C_L , nii üle- kui ka alarõhul;
 - 7) kõik tuletatud suurused ja vastavad referentsväärtused vastavalt siseriiklikele eeskirjadele;
- g) katsetamise kuupäev.

3 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 elemendisise 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.