

SOOJUSTATUD VÄLISSEINA HINGAMINE JA SELLE ARVUTUSMETOODIKA

Alar Piirfeld

Vahtpolüstüreeniga (tavakeeli *vahtplast*, mida nimetatakse vene keele mõjul vahel ka *penoplastiks*) ja mineraalvillaga krohvisüsteeme on Eestis välisseinte soojustamiseks kasutatud ligi viisteist aastat. Nad (üldnimetus ka *liitsoojustussüsteemid*, vastandina *tuuldulate soojustussüsteemidele*) on energiatõhususnõuete tõttu levinud. Samas on selle teemaga hakanud kaasas käima palju väärarusaamu, mida enamasti lihtsalt teadmatusest propageeritakse. Paljudele on tuttavad väljendid:

- maja peab hingama;
- vahtplast ei hinga;
- vahtplast hingab halvemini kui mineraalvill;
- ärge mähkige oma maja kilekotti;
- polümeerkrohv ei hinga;
- meil on karm kliima, mis pole võrreldav Kesk-Euroopaga.

Kõik need väljendid on seotud välisseina hingamisega, millest on meedias sageli juttu. Näiteks võib tuua mõne tekstilõigu ja pealkirja:

- puitmaja on ehitusmaterjalina eriline veel seetõttu, et ta hingab, soodustades eluruumide õhuvahetust;
- lubikrohv hingab, takistades sellega mädaniku ja vammide teket krohvitud puitpindades;
- puitkiudplaat hingab, st on võimeline siduma ruumi olevat veeauru ning seda ka loovutama;
- materjal laseb õhku läbi, nii et teie maja kogu aeg hingab;
- palk hingab, palgil on suurepärane isolatsioonivõime ning see ühtlustab tõhusalt siseõhu soojust ja niiskust;
- krohvisüsteem hingab, lastes läbi veeauru;
- hea soojustus hingab.

Jääb mulje, et kui materjal ei hinga, on ta halb materjal, ning muidugi hakatakse otsima hingavaid materjale. Eespool esitatud eksitavad väljaütlemised loovad müüdi, mida pole sugugi kerge murda. Seda enam, et selliseid müüte levitavad ka insenerid, ehituseksperdid, ehituskoolide õppejõud, projekteerijad ja järelevalvatajad. Mis on siis *seina aururežiim* (üks *hingamise* vasteid)? Hämmastav, et suhteliselt lihtsa aritmeetilise ülesande lahendamiseks ei saa hakkama väga paljud Eesti ehitusinsenerid. Kui mõne Lääne-Euroopa kõrgkooli ehitusfüüsikaeksami pilet nõuaks seinade aururežiimi arvutamist, kukuks enamik meie inseneridest läbi. Eestis on vaid umbes kakskümmend inseneri, kes on suutelised sel teemal kaasa rääkima, ülejäänud räägivad külajutte, mida toetab ka meedia. Uudis selle kohta, et Rootsis on probleeme vahtplastsoojustusega, müüb hästi. Seda, et vahtplast ja polümeerkrohvi kaetud maju on Euroopas ehitatud juba viiskümmend aastat ja kaetud on kümneid miljoneid ruutmeetrit ning et autoriteetsed uurimisinstituudid on teinud sel teemal sadu positiivse lõppjäreldeusega uuringuid, ei peeta avaldamist väärivaks uudiseks. Ka Eestis levitatakse ühe vahtplastsoojustamise katse tulemust, aga katseprotokollid, mille põhjal saaks halvaks tunnustatud soojustust kontrollida, on salastatud. Kahjuks mõjutavad need ehitusfüüsikalise demagoogiaga võrreldavad jutud ja artiklid ka tellijate, ehitajate ning korteriühistute valikuid. Välisseina hingamise olemust neile selgitatud ei ole. Sel teemal on küll avaldatud mitme päeva inseneri populaarteaduslikke artikleid, kuid nende hääl on jäänud üldise "hingamise" taustal nõrgaks. Kõik see ajendaski autorit kirjutama käesolevat artiklit.

SEINA HINGAMINE

Paljud on kuulnud väljendit *seina hingamine* ning nii mõnigi võtnud selle oma käibefraasiks. Hingamise all mõeldakse aga eri asju ja sageli valesti. Käibejutte on kolmesuguseid.

Hingamine kui ventilatsioon

Inimese hingamine on tema füsioloogiline omadus: kopsudesse värske õhu (hapniku) sisse- ja süsinikdioksiidi väljahingamine. Midagi sarnast toimub ka hoone puhul. Ruumis elamiseks on vaja värsket õhku ning saastunud õhk peab välja pääsema. Selle jaoks on olemas ventilatsioon. Ventilatsiooniviise on mitmesuguseid, mõni neist teistest tõhusam, mõni odavam:

- veneaegsete akende pilud;
- kinni ja lahti käiv aken;
- loomulik ventilatsioon korstna (tuulutuslõõri) kaudu;
- sundventilatsioon,
- soojusvahetiga ventilatsioon.

Tasub meelde tuletada, et ventilatsiooni abil vahetatav õhk on gaasisegu, mis koosneb põhiliselt lämmastikust, hapnikust, süsihappegaasist, argoonist, veeaurust ja metaanist. Kui mõne gaasi kontsentratsioon ruumis läheb liiga suureks (nt pannkook läheb kõrbema), siis on inimese loomulik reaktsioon otsida abi ventilatsioonist. Tavaliselt pannakse käima pliidikubul olev ventilaator või avatakse aken. Loogiline, eks? Kui aga jõutakse gaasisegu mingi koostisosa, nt veeauruni, jääb loogilisest mõtlemisest puudu. Inimene ei ole võimeline oma ruumigaasisegust mingit koostisosa lahutama ega seda eraldi kuhugi juhtima – õhk tuuakse sisse ja juhitakse välja koos kõige selles sisalduvaga. Keerulisemalt võib seda nimetada õhu konveksiooniks koos veeauru konvektiivse liikumisega. Kui siseruumiõhu niiskus tõuseb inimese jaoks ebasoovitava tasemeni, siis otsitakse abi ventilatsioonist (nii nagu pannkoogi kõrbemise puhul). Vähim, mida teha saab, on avada aken. Järjest tõusva energiahinna taustal on ventilatsioon seotud üha kasvavate küttekuludega. Koos saastunud õhuga viiakse välja soojust, lihtsate ventilatsioonisüsteemidega (avatud aken) rohkem, keerulistega (soojusvahetiga varustatutega) suhteliselt vähem.

Meil on paljude kortermajade aknad renoveerimise ajal vahetatud. Mis sellega muutub? Vanade akende pilud suletakse ja koos sellega likvideeritakse korterites ka seni toimunud ventilatsioonisüsteem või selle osa. Uue süsteemi ehitamist ei peeta aga mõistlikuks. Seetõttu pole enam tõhusat vahendit, millega ruumist eemaldada neid gaasisegu koostisosi, sh veeauru, mille kontsentratsioon on ülemäära suur. Pole siis mingi ime, kui siseruumi õhu relatiivne niiskus hakkab tõusma. Küttekulusid kokku hoides püütakse sisetemperatuuri võimalikult madalal hoida, mistõttu ei ole vastuvõetav ka akende avamine ja sellega kaasnev ruumiõhu jahutamine. Kõik see viib seinapindade niiskumiseni ning kondensatsioonivee ja hallituse tekkimiseni ruumi sisepinnal või selle lähedal, kui soojustamata kortermaja sein sisepinna temperatuur langeb talvel alla kastepunkti (ca 12–14 °C).

Inimesed on aga kuulnud, et seinad hingavad. Seetõttu loodetakse, et halvasti ventileeritud ruumi temperatuuri alanemisega kaasnevat õhu suurenevat relatiivset niiskust vähendab see, et veeaur pääseb läbi seinaga välja. Eesti insenerid ju räägivad, et veeaur liigub soojemalt poolelt külmemale poole. Nüüd aga tulevad mängu müüdid. Üldiselt võib veeaur liikuda kahel moel, kas konvektiivselt või difuusselt. Konvektiivset liikumist inimene tajub ja sel juhul liigub veeaur koos õhuga. Difusne liikumine on seotud veeauru osarõhkude vahel ja seda liikumist inimene ei taju. Siinkohal ilma ehitusfüüsikalise ettevalmistuseta inimesed enam kaasa rääkida ei oska. Veeauru difusioonist tuleb juttu veel allpool.

Hoone seinad peavad olema õhutihedad, seda nõuab ka käesoleva aasta alguses kehtima hakanud Vabariigi Valitsuse määrus “Energiatõhususe miinimumnõuded”. Siis **läbi seinaga ventilatsioon ei toimi** ning ei saa loota, et värske õhk voolab läbi seinaga sisse ning saastunud õhk, sh veeaur, sealtkaudu ka välja. Selline läbi seinaga ventileerimine on võimalik läbipuhutavate ja suurte palgivahedega hoonete puhul, aga siis on ventilatsioon ja ka kütmine omaniku kontrolli all väljas.

Räägitakse puitmajade tervislikust õhust. Õhk on neis tervislik peamiselt tänu läbipuhutavale seinale. Aga sellistes läbipuhutavates majades kulutatakse väga palju kütet ning kütte liigkulutajaid ei saa kuidagi ökoloogiliselt mõlevate inimeste hulka arvata.

Eelneva põhjal võib öelda, et kuigi on olemas mõiste *ventilatsioon*, ei ole tehniliselt korrektne rääkida seina hingamisest kui läbi seina toimuvast õhuvahetusest.

Hingamine kui veeauru sidumine

Ehitusmaterjalide veeauru sidumise võime ei ole ühesugune. Siseruumides on soovitatav, et mingi osa ülemäärasest veeaurust seintesse akumuleeruks. Kuival ajal pääseb see siseruumidesse tagasi. Selline puhverkiht vähendab ruumi siseõhu niiskuse kõikumist. Eeltoodu ei tähenda, et peaksime veeauru suvel seintesse salvestama, kust seda siis talvel oleks hea võtta. Nii pikaks ajaks ei ole võimalik seda teha. Veeauru sidumise poolest on head kõik massiivsed mineraalsed ehitusmaterjalid – tellised, betoon, poorbetoon, loomulikult ka puit ning mitu looduslikku ja puitkiudu sisaldavat soojustusmaterjali (tselluvill). Krohvkatte veeauru sidumise võimet tähtsustatakse üle. Savikrohvil kui materjalil on see näitaja väga hea, aga veeauru kogus, mida savikrohvikihist siduda suudab, on massiivseinaga võrreldes tühine. Seetõttu on tehniliselt korrektne rääkida seina *veeauru sidumisest*, mitte hingamisest.

Hingamine kui veeauru difusioon

Veeauru difusiooniga seoses on palju vääritimõistmist. Siin ei räägi ma aurust, mis kergitab pliidil potikaant, ega ka aurumasinat käitavast aurust. Mõni nn ekspert on väljendanud isegi mõtet, et hoonesisese veeauru rõhu toimel lööb krohv ja värv välisseina küljest lahti. Sellised eksperdid tuleks kooli tagasi saata. Kuuma õhu (või auru) 1000 Pa suurune rõhuvahetus võib tõesti midagi lahti suruda, aga sama suur **veeauru osarõhu** vahe ei tee seda mitte, inimesed seda ei tunnetagi. Üle tähtsustatakse ka materjali difusioonitakistuskonstanti μ ning hinnatakse selle näitaja järgi seda, mida materjali difusioonitakistuskonstandiga hinnata pole võimalik. Selles teemarühmas on kolm mõistet:

- materjali difusioonitakistuskonstant μ ,
- materjalikihi aurutakistus S_d ,
- tekkiva kondensatsioonivee hulk kg/m^2 .

Seinamaterjali (nt vahtplast, mineraalvill, krohv) hingamist hinnatakse tihti materjali difusioonitakistuskonstandi kaudu. Mineraalvillast läheb läbi nii konvektiivne (koos õhuga) kui ka difuusne veeaur (talvel osarõhkude erinevuse tõttu). Konvektiivne veeaur vahtplastist läbi ei pääse, küll aga difuusne. Kindel on aga see, et mineraalvillast läheb difuusne veeaur läbi tunduvalt (15–60 korda) paremini kui vahtplastist ning lubikrohvist ca 12 korda paremini kui polümeerikrohvist. Täiesti väär on aga hinnata seina hingamist difusioonitakistuskonstandi järgi. Palju on võetud sõna selle kohta, et *mineraalvill hingab paremini kui vahtplast*. Sellega mõeldakse, et kondensatsioonivee tekkimine ohustab vahtplastiga kaetud hoone seina tunduvalt rohkem kui mineraalvillaga seina. Siin teevad vigu mitte ainult erihariduseta inimesed, vaid ka ehitusinsenerid. Mõeldakse materjali difusioonitakistuskonstanti, aga hinnatakse kondensatsioonivee teket. Neil on küll omavaheline seos, ent see pole korrelatiivne, st et suurem difusioonitakistuskonstant ei tähenda seda, et suurem oleks ka kondensatsioonivee tekkimise oht. Seda tõestab näide klaasist välispiirete kohta (võrreldakse kolme lahendust).

1. Välispiirdeks on ühekihiline klaas, mis talvel seestpoolt jäätab, st et piirdes tekib kondensatsioonivesi ning süsteem on halb. Klaas, mille difusioonitakistuskonstant μ on lõpmatult suur, ei lase veeauru (ei konvektiivset ega difuusset) läbi.
2. Välispiirdeks on kahekihiline klaasiga aken. Talvel sisepind osaliselt jäätab, st et karmide tingimuste korral tekib kondensatsioonivesi ning piire on halb, kuigi klaas veeauru läbi ei lase.
3. Välispiirdeks on kolmekihilise klaasiga aken. Talvel on akna sisepind kuiv, st et piire on hea. Klaas veeauru läbi ei lase.
4. Katseks võib kolmekihilise klaasiga aknale panna sissepoole 10 cm mineraalvilla. Kui talvel nädala pärast klaasi ja villa vahelist pinda kontrollida, näeme kondensatsioonivett. Järeldame, et välispiire on halb, kuigi veeauru läbilaskvus on endiselt null.

5. Kui panna katseks ühekihilisele klaasiga aknale väljapoole 10 cm polüstürooli, siis märkame talvel mõne aja pärast, et klaas muutub kuivaks.

Kõigi viie näite puhul välispiire veeauru läbi ei lasknud (difusioonitakistuskonstant lõpmatult suur), aga 3. ja 5. näites piirdesse kondensatsioonivett ei tekkinud, teistes aga tekkis – korrelatsioon difusioonitakistuskonstandiga puudub. Järelikult on tähtis seinakihtide omavaheline paiknemine, täiesti ebaoluline aga kogu seina võime veeauru läbi lasta. Veeaur difundeerub läbi seinamaterjali kihi (kui seina ehitus seda võimaldab) veeauru kõrgema osarõhuga ruumist madalama osarõhuga ruumi poole, kusjuures difundeerunud veeauru kogus sõltub osarõhkude vahest ning kihi difusioonitakistusest.

Tavaliselt arvatakse, et veeaur peab läbi seina pääsema, sest sellest on kas loetud või kuulnud. Tuleb aga arvestada, et kui inimene võib tajuda õhu liikumist, siis veeauru difuussel liikumist **osarõhuvahe** tõttu ta ei taju. See, kas veeaur difundeerub läbi seina või mitte, ruumi niiskusraadiuse otseselt ei mõjuta – liigse veeauru viib ruumist välja ventilatsioon. Ka siis, kui sein veeauru hästi läbi laseb, võib sellest difuusselt läbi liikuda ülimalt 1% väljaviimist vajavast veeaurukogusest. Ülejäänud 99% peab pääsema välja konvektiivselt, s.o ventilatsiooni kaudu. Liigniiskusest lahti saamiseks ei maksa seega loota veeauru difusioonile läbi seina.

Eeltoodust lähtuvalt ei saa panna võrdusmärki *veeauru seina läbiva difusiooni* ja hingamise vahele. Tehniliselt on see mõttetud. Kui hingamisel võib olla null- ja maksimumväärtus, siis mittehingamist mõõta ei saa.

Difusioonitakistuskonstant μ iseloomustab difusiooni läbi seinamaterjali. Ta on näitaja, mis annab teada, mitu korda on materjali difusioonitakistus suurem kui sama paksu seisva õhu (või mineraalvilla) kihi oma. See dimensioonita konstant annab küll teavet materjali omaduste kohta, kuid selle kaudu ei ole võimalik hinnata sellest materjalist tehtud seinakihi **aurutakistust** S_d , mis annab mingi pildi kogu seina difusioonist käitumisest. Seinakihi aurutakistuse (siin ja edaspidi on jutt difuusselt veeaurutakistusest) arvutamiseks on vaja materjali difusioonitakistuskonstant korrutada kihi paksusega. Saadakse seisva õhu (või mineraalvilla) kihi paksus meetrites S_d , millel on samasugune difusioonitakistus kui vaadeldaval materjalil:

$$S_d = \mu \cdot s \text{ m,}$$

kus μ on vaadeldava ehitusmaterjali difusioonitakistuskonstant ja s materjalikihi paksus meetrites.

Ehitusmaterjalide difusioonitakistuskonstandid ning nendest materjalidest moodustatud kihtide aurutakistused on tabelis 1.

Tabel1. Ehitusmaterjale iseloomustavaid näitajaid

Materjal	Difusiooni-takistus-konstant μ	Tavaline kihipaksus s m	Aurutakistus $S_d = \mu \cdot s$ m	Lambda λ [W/(mK)]
Betoon	30	0,2	6	2,1
Tellis	6–12	0,24	1,4–2,9	1
Poorbetoon	6–10	0,24	1,44–2,4	0,12
Aeroc	4,6	0,375	2,25–3,8	0,09
Klinker	380–470	0,03	1–1,4	0,8
Lubikrohv	11	0,025	0,3	0,87
Tsementkrohv	19	0,025	0,5	1,4
Polümeerkrohv	140	0,002	0,3	0,7
Kuusepuit	40	0,025	1,0	0,13
Vahtpolüstüreen välisseinas	15–40	0,15	2,3–6	0,04
Mineraalvill	1	0,15	0,15	0,04
Õlivärv	20 000–27 000	0,000015	0,3–0,5	
Fibo	6	0,25	1,5	0,29
Mineraalne viimistluskrohv	9,5	0,002	0,02	0,9

Silikaatvärv	300	0,0004	0,12	0,7
Difuusne dispersioonvärv	800	0,0004	0,32	0,7

Seina konstrueerimisel kehtib rusikareegel: seinakihtide aurutakistused peavad seest väljapoole vähenema. See tähendab, et väljaspool oleva kihi aurutakistus ei tohi olla sisemise omast suurem. Sellest rusikareeglist kinnipidamiseks ei ole üldse oluline, kui suur on seina summaarne aurutakistus. Ka selle tähtsaks pidamine on üks kultiveeritavatest müütidest. Kogu seina aurutakistus on üksikute kihtide aurutakistuste summa:

$$S_d = S_{d1} + S_{d2} + S_{d3} + \dots + S_{dN}$$

Kaks äärmuslikku näidet:

a) 15 cm mineraalvilla + 2 cm paksune tuuletõke:

$$S_d = S_{d-vill} + S_{d-tuuletõke} = 1 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,02 = 0,19 \quad \text{m}$$

$$S_{d-tuuletõke} < S_{d-vill}$$

b) 15 cm vahtklaasi + 2 cm mineraalset viimistluskrohvi:

$$S_{d-vahtklaas} + S_{d-min\ krohv} = \infty + 9,5 \cdot 0,02 = \infty$$

$$S_{d-vahtklaas} > S_{d-min\ krohv}$$

Mõlemal juhul on rusikareeglist kinni peetud, kuigi seinte aurutakistused on äärmuslikult erinevad (0,19 m ja lõpmatus). Mõlemad süsteemid on lubatud ja toimivad.

Lõplikku tulemust selline aurutakistusel põhinev arvutusmeetod ei anna, sest arvesse peaks võtma mingi kihi olulisust seina aururežiimis ning kihi soojustakistust. Tapeedi aurutakistus on näiteks tühiselt väike ning eespool toodud võrrandeid arvestades ei tohiks tapeeti betoonseinale kleepida. Et tapeedi aurutakistus ei mängi kogu seina aururežiimis olulist osa, ei tuleks seda arvutuses arvestada. Küll aga tuleb arutamisel arvesse võtta soojapidavuse näitajaid, mis on eri materjalidel tohutult erinevad. Millal aga arvestada mingi kihi mõju ja millal mitte? See nõuab juba keerukamat aururežiimi arvutust – vaja on selgitada, kas konstruktsioonis võib tekkida kondensatsioonivett ning kui seda tekib, siis kui palju.

Kondensatsioonivee tekke arvutamine ei ole erihariduseta inimese jaoks lihtne, kuigi ei ole vaja diferentsiaalvõrrandeid, logaritme ega muid keerukaid tehteid – ainult aritmeetika. Levinuim on H. Glaseri välja töötatud ning normis DIN 4108 kirjeldatud meetod. Vaatamata mõnele puudusele on see staatiliseks nimetatav meetod inseneri jaoks suhteliselt lihtne ning annab ülevaatliku pildi seinakonstruktsiooni aururežiimist. Staatilise meetodi puudused:

- aururõhu kõver on sirge kahe punkti vahel;
- temperatuurikõver ei sõltu kondensatsiooni- ja aurumissoojusest;
- soojusjuhtivuse muutus kondensitekke puhul jääb arvesse võtmata;
- veeauru difusioonivoprofiil jääb mõjutamata.

On olemas ka dünaamilisi arvutusmeetodeid mille tarvis on mitu firmat välja töötanud arvutusprogrammi (N.: WUFI-programm). Uue energiatõhususe määruse kohaselt peavad insenerid hakkama tegema kondensatsiooniveega seotud arvutusi, pole aga öeldud, kumma meetodiga neid teha.

Veeauruga seoses on tähtis hoone välispiirde (sein, lagi, põrand) selline ehitus, mis ei lase tekkida kondensatsioonivett (kui seda tekib lubatud kogus, peab ta saama välja kuivada). Ehitusfüüsikas tuntakse siseruumiõhu niiskusega seotud mõisteid ventilatsioon,

veeaurusiduvus, veeauru difusioon ja veeauru kondenseerumine, mõiste hingamine on aga määratlemata.

SEINA KONDENSEERUMISRISKI ARVUTUS

Selle peatüki võivad tavainimesed rahulikult vahele jätta ja keskenduda järgmisele, kus on mõned Eestis levinud soojustussüsteemide näited. See peatükk on mõeldud eelkõige neile ehitusinseneridele, kes tunnevad sügavat huvi Glaseri meetodi arvutusvalemite suhtes. Tundes Glaseri meetodit saavad insenerid aru ka dünaamilisest meetodist. Nende valemite abil on võimalik ka ilma programmita kondensvee tekkeoht välja arvutada.

Veeauru osarõhk (ehk partsiaalrõhk) ruumis arvutatakse valemiga:

$$P = P_s \times \varphi,$$

kus

P_s – küllastunud aururõhk [Pa]

φ - relatiivne õhuniiskus [%].

Küllastunud aururõhk on maksimaalne võimalik õhus sisalduva veeauru rõhk antud temperatuuril. Neid väärtusi saab võtta vastavatest tabelitest, näiteks DIN 4108-5, valemite nende väärtuste arvutamiseks siinkohal ei kirjelda.

Relatiivne niiskus on õhus sisalduva veeauru koguse suhe veeauru küllastuskogusesse või vastavalt veeauru osarõhu suhe küllastusrõhusesse.

Materjalikihi veeauru difusioonitakistus tuleneb valemist:

$$1/\Delta = \mu * s * \frac{1}{\delta_L} [m^2 hPa / kg]$$

kus

μ -- ehitusmaterjali difusioonitakistuskonstant;

s – ehitusmaterjali kihipaksus [m];

δ_L – õhu aurujuhtivusväärtus [kg/mhPa].

δ_L on seotud ümbritseva õhu temperatuuriga, aga antud arvutustes võib võtta kui konstanti:

$$\delta_L \approx 0,68 * 10^{-6} [kg / mhPa]$$

Seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seina puhul on:

$$1/\Delta = \sum (\mu_n * s_n) * 1,5 * 10^6 [m^2 hPa / kg]$$

Auru läbimisel, nii nagu ka sooja läbimisel on sise- ja välispinna üleminekutakistused $1/\beta_1$ ja $1/\beta_2$. Võrreldes aga ehitusmaterjali üldise difusioonitakistusega on need tühised.

Veeauru difusioonivoog i tuleneb sisemisest p_i ja välimisest p_a partsiaalrõhkudest järgnevalt:

$$i = \frac{p_i - p_a}{1/\Delta} [kg / m^2 h]$$

Difusiooni arvutuse eesmärk on kindlaks teha, kas difusiooni tõttu seinas tekib kondensveett või mitte. Kondensvee tekkimisel ei tohi kondensvesi kahjustada seinakonstruktsioone ja soojustusmaterjale. Selle tingimuse täitmiseks tuleb jälgida, et (vastavalt DIN 4108-3):

- kondenseerumisperioodil tekkinud kondensvesi peab kuivamisperioodil välja kuivama;
- konstruktsioon ei tohi kondensvee tõttu kahjustuda (korrosioon, seened);
- kondensvee kogus ei tohi ületada $1,0 \text{ kg/m}^2$;
- kapillaarselt mitteimavate ehitusainete puhul on kondensvee koguse piirang $0,5 \text{ kg/m}^2$;
- puidu puhul on piiranguks niiskusesisaldus 5%, puidust ehitusmaterjalide puhul 3%.

Raamtingimused, mis tuleks arvesse võtta arvutuste tegemiseks on järgmised (DIN 4108-3 järgi):
Kondenseerumisperioodil (t_T): väliskliima $-10 \text{ }^\circ\text{C}$, 80% rel. niiskus; sisekliima $+20 \text{ }^\circ\text{C}$, 50% rel. niiskus; perioodi pikkus 1440 h (60 päeva). [Eesti tingimustes võiks siin muuta perioodi pikemaks – 2160 h ehk 3 kuud].

Aurumisperioodil t_V :

- seinad ja mitte vastu katust olevate lagede puhul: väliskliima $+12 \text{ }^\circ\text{C}$, 70% rel. niiskus; sisekliima $+12 \text{ }^\circ\text{C}$, 70% rel. niiskus; kliima kondenseerumiskohas $+12 \text{ }^\circ\text{C}$, 100% rel. niiskus; perioodi pikkus 2160 h ehk 90 päeva.
- laed vastu katust: väliskliima $+12 \text{ }^\circ\text{C}$, 70% rel. niiskus; katusepinna temperatuur $+20 \text{ }^\circ\text{C}$; sisekliima $+12 \text{ }^\circ\text{C}$, 70% rel. niiskus; kliima kondenseerumiskohas temperatuur vastavalt temperatuurikõverale, 100% rel. niiskus; perioodi pikkus 2160 h ehk 90 päeva.

Lihtsustatud variandina sobib viimase asemel kasutada ka a)-varianti. Ekstreemste kliimatingimuste korral (kliimaruumid, ekstreemne väliskliima, ujulad, saunad) ei ole lihtsustatud arvutusmeetodika lubatud. Sellisel juhul tuleb arvutustes aluseks võtta reaalsed kliimatingimused. Aurureziimi käsitsi arvutamiseks on soovitatav täita vastav tabel (vt. Tabel 2)

Tabel 2

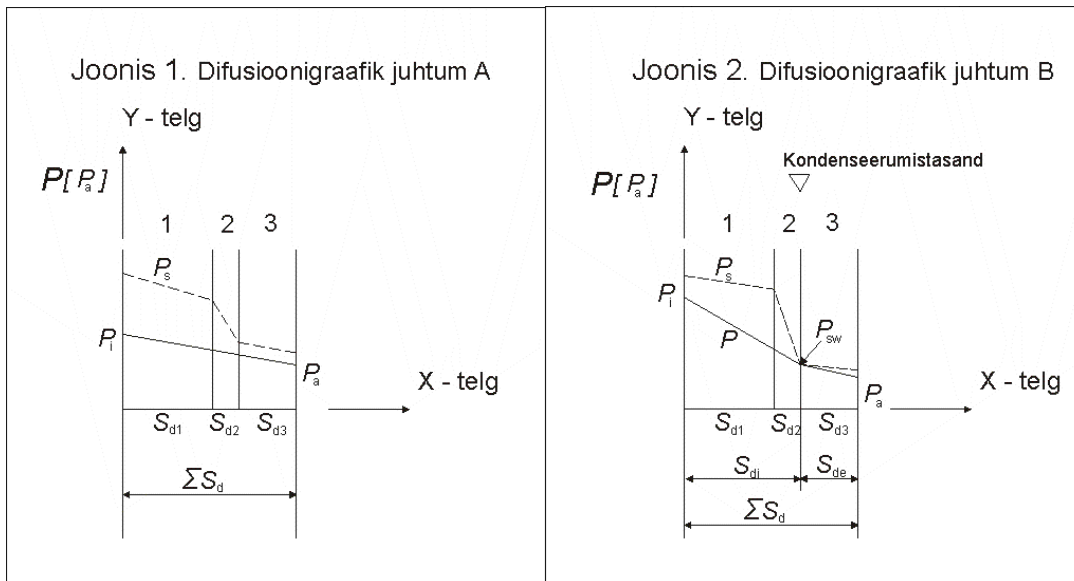
Nr	1 Seinakiht n	2 S_n	3 λ_n	4 μ_n	5 $R_n = S_n / \lambda_n$ $R_{si}; R_{se}$	6 $S_{dn} = \mu_n \cdot d_n$	7 $\Delta\theta = R_n \cdot (\theta_i - \theta_a)$ $\Delta\theta = R_n \cdot U$	8 θ	9 p_s
--	--	[m]	[W/(mK)]	--	[m ² K/W]	[m]	[K]	[C°]	[Pa]
--	Sisekihi soojaülekanne	--	--		--			$20 \text{ }^\circ\text{C} = \theta_i$	$2340 = p_{si}$
1									
2									
3									
4									
5									
--	Väliskihi soojaülekanne	--	--		--			$-10 \text{ }^\circ\text{C} = \theta_a$	$208 = p_{sa}$

$$R_T =$$

$$U = 1/R_T$$

Aurureziimi diagrammi koostamiseks võetakse ruuduline paber ning kantakse sinna x-telg (mastaap ca seina summaarne S_d) ja y-telg (mastaap ca 2400 Pa). X-teljele kantakse materjalide kihid mitte reaalpaksustes vaid S_d -väärtuses, y-teljele kantakse osarõhkude skaala (Joonis 1). Üle terve graafiku kantakse arvutuslikult saadud temperatuurikõverale vastav veeauru küllastusrõhu p_s kõver. Need väärtused saadakse vastavatest tabelitest (DIN 4108-3). Tegelik

veeau ru osarõhu sirge saadakse sisemise veeau ru osarõhu p_i ja välimise osarõhu p_a punktide ühendamise teel ning kantakse samale diagrammile. Juhul kui küllastuskõver ei puutu kokku tegeliku veeau ru osarõhu sirgega, siis mitte kuskil seinakonstruktsiooni punktis ei teki 100 % niiskust ehk kondensvett (Juhtum A, joonis 1). Kui nad kokku puutuvad, siis tekib sellises punktis p_{sw} või tasandil kondensvesi (Juhtumid B,C või D). Veeau ru tegelik osarõhu kõver ei saa kunagi tõusta kõrgemale kui küllastusrõhu kõver. Seetõttu kuiva seina puhul on tegeliku veeau ru osarõhu graafik sirge, aga märja seina puhul ühendatakse sisemine veeau ru osarõhu punkt p_i kondenseerumispunktiga p_{sw} ja see punkt välimise osarõhu punktiga p_a .



Kondensvee kogus W_T on arvutatav järgmiste valemiga:

$$W_T = t_T * (i_i - i_a) [kg / m^2]$$

Kus t_T on kondenseerumisperiod [h];

i_i – difusioonivoo tihedus seest kondenseerumispirkonda

$$i_i = \frac{p_i - p_{sw}}{1 / \Delta_i} [kg / (m^2 h)]$$

i_a -- difusioonivoo tihedus kondenseerumispirkonnast välja

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{1 / \Delta_a} [kg / (m^2 h)]$$

Juhul kui kondenseerumine toimub mitmes tasandis tuleb kondensvee kogust arvutada iga tasandi kohta eraldi.

Kondensvee tekke iseloomu järgi jaotatakse seinad:

Juhtum B, kus kondensvesi tekib ühes seinatasandis;

Juhtum C, kus kondensvesi tekib kahes või mitmes tasandis;

Juhtum D, kus kondensvesi tekib seinakihis või –piirkonnas.

Igal seinal on olemas oma kuivamisrežiim. Kondenseerumine ja kuivamine peavad olema aasta lõikes positiivse bilansiga. Kui see on juba talvisel perioodil, siis kondenseerumist üldse ei toimu

(ehk Juhtum A). Juhul kui aga talvisel perioodil kondenseerumine toimub (mis on teatud piirides lubatud), siis tuleb jälgida, et see suvel välja kuivab ja ei ületaks talvel kriitilist kogust ehk piiravaid tingimusi.

Kuivamisdiagramm on analoogne kondenseerumisdiagrammiga. Kuivava vee koguse arvutusvalem:

$$W_v = t_v (i_i + i_a) [kg / m^2]$$

t_v -- kuivamisperiood [h]

Difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast ruumi sisse:

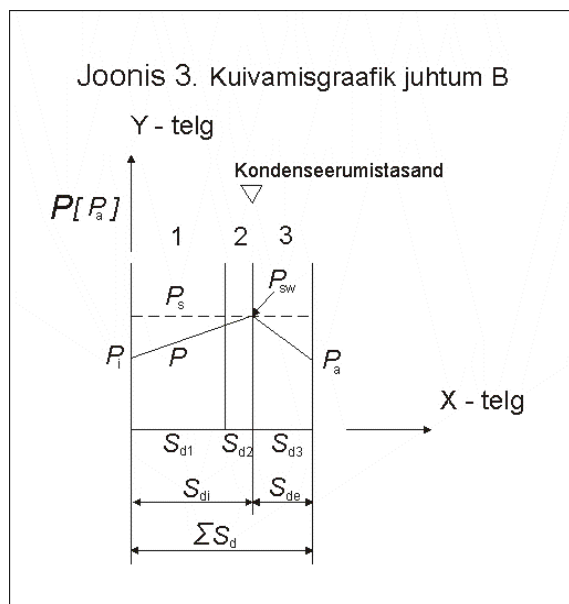
$$i_i = \frac{p_{sw} - p_i}{1 / \Delta_i} [kg / (m^2 h)]$$

Difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast välja:

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{1 / \Delta_a} [kg / (m^2 h)]$$

Juhul kui kondenseerumine on toimunud mitmes tasandis või kihis tervikuna, tuleb arvutada kihid eraldi.

Kondenseerunud vee kogus (juhtumid B, C või D) on aktsepteeritavad juhul kui $W_T < 1,0 \text{ kg/m}^2$ (või $0,5 \text{ kg/m}^2$ kapillaarselt mitteimavate ehitusmaterjalide puhul) ja $W_v > W_T$. Kuivamisgraafik Juhtum B puhul toodud Joonisel 3.

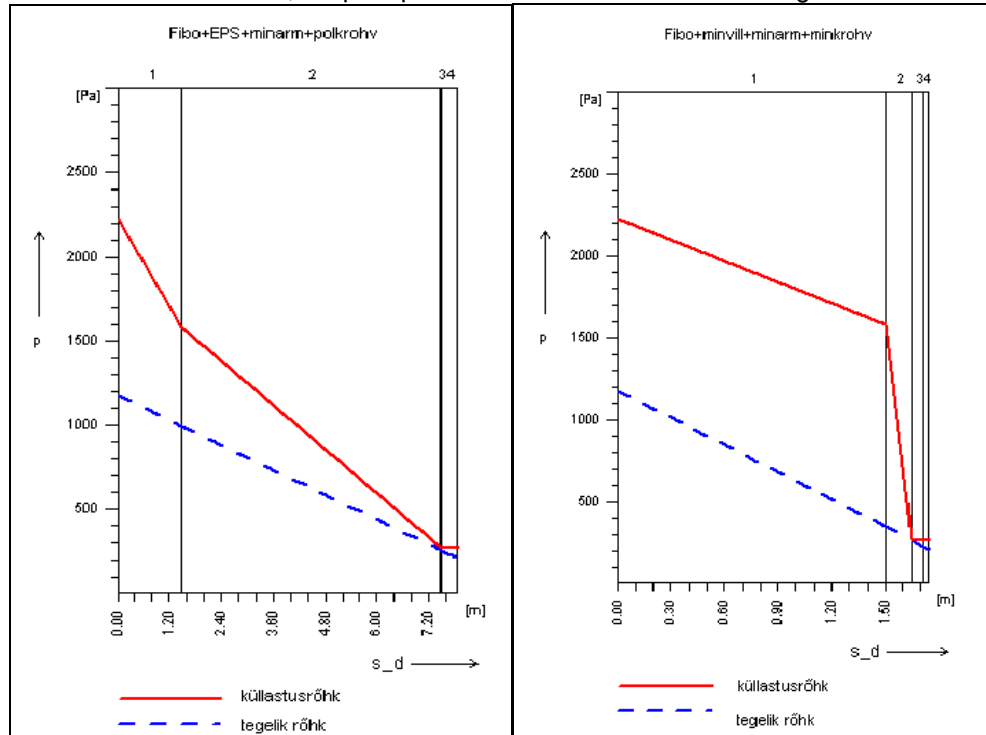


SEINTE DIFUSIOONIVOOTUSTE NÄITED

Järgnevalt mõned Eestis kasutatavad ja ka vahel poleemikat tekitavad soojustussüsteemidega seinakonstruktsioonid. Algdandmed on võetud eestpoolt.

1. Fibo(250)+peno(150)+mineraalne armeeringkiht+polümeerkrohv

Selline soojustussüsteem on tihti kasutatav seinakonstruktsioon. Õhutiheduse kohalt on selline süsteem üldiselt õhutihe, kui penoplast on liimitud vastavalt tehnoloogiale.



$U=0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$. Kondensvett ei teki ehk JUHTUM A.

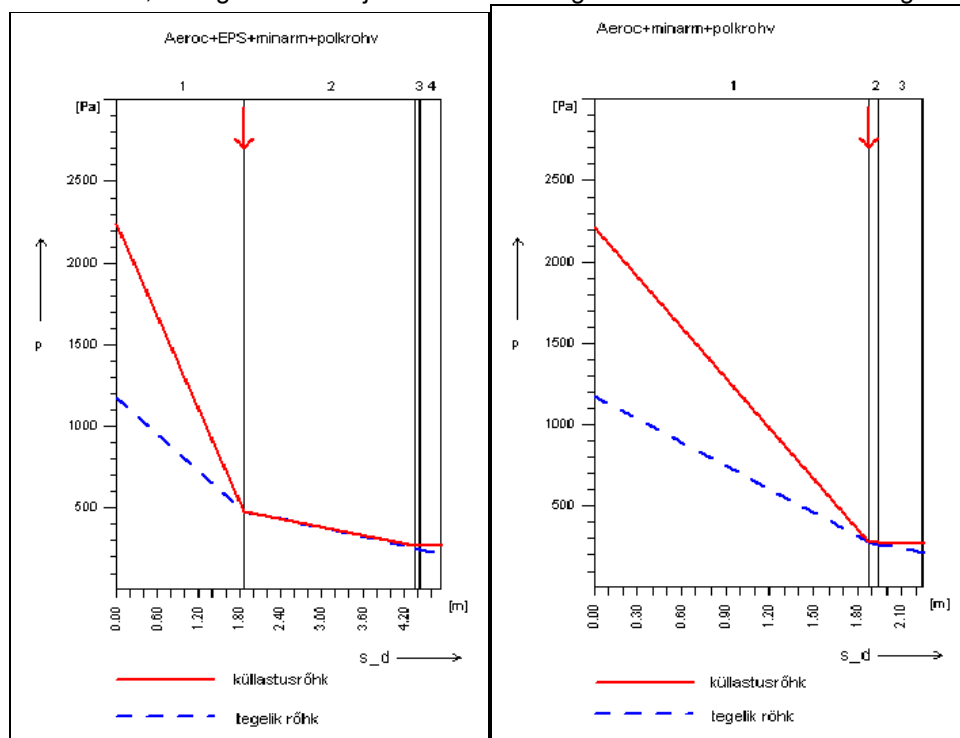
Praktilise poole pealt on väärarusaam ka tühjade vuukide mõjust kondensitekkemehhanismile. Tühja vuugi kohal võib süsteemi arvutada siis ilma sisemise kihita ehk Fibota. Sellises süsteemis (penoplast+armeering+polümeerkrohv) ei teki kondensvett – JUHTUM A. Reaalselt on iga sein punkt nende kahe seinakonstruktsiooni tingimuste vahel ja võib kindlusega öelda, et lahtised vuugid ei tekita kondensiriski. Iseküsimus on siis, kui Fibo siseseinal puudub õhutõke ja niiskuse konvektsiooniga võib niiskust seina juurde viia. Ka sel juhul ei juhtu midagi, kuna penoplast on ise õhutõkke eest.

2. Fibo (250)+ vill(150)+mineraalne armeeringkiht+mineraalkrohv

Selle süsteemi toon võrdluseks eelnevaga. Selline süsteem ilma sisemise õhutõkketa ei toimi, sest esimesed 2 kihti on õhku läbilaskvad ning villakihist võib hakata õhk konvektiivselt liikuma välisruumi. $U=0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$. Juhul kui sisemine õhutõke toimib kondensvett ei teki, ehk JUHTUM A, mistõttu selle parameetri seisukohast on antud süsteem võrdne eelnevaga. Sellises mineraalkrohviga süsteemis on aga üks probleem – nimelt pinnakiht ei ole tänu kõrgele veeimavusele ilmastiku eest piisavalt kaitstud, mistõttu võib süsteem hakata lagunema hoopis väljastpoolt. Seepärast on soovitatav mineraalsüsteemid katta fassaadvärviga. Värvkate aga on samuti aurutakistus, mida peaks süsteemides arvutama. Kõige difuussem (kuigi tehniliselt ka kõige probleemsem) on silikaatvärv. Silikaatvärviga üle võõbatud antud süsteemis tekib kondensvesi ehk JUHTUM D, aga on lubatud, kuna suvel kuivab tekkinud kondens välja. Antud süsteemis on äärmiselt oluline sisemise õhutõkke olemasolu, kuna vill ei takista niiskuse konvektiivset liikumist külma välispinna alla.

3. Aeroc(375)+peno(50)+mineraalne armeeringkiht+polümeerkrohv

Siin on süsteemi võrdlus jälle esimese variandiga, kus kandevsein on asendatud tuntud materjaliga Aeroc. Ülejäänud kihid on jäänud samaks, kusjuures penoplasti kihipaksus on vähendatud, et kogu seina soojustakistus oleks ligilähedane esimese variandiga.



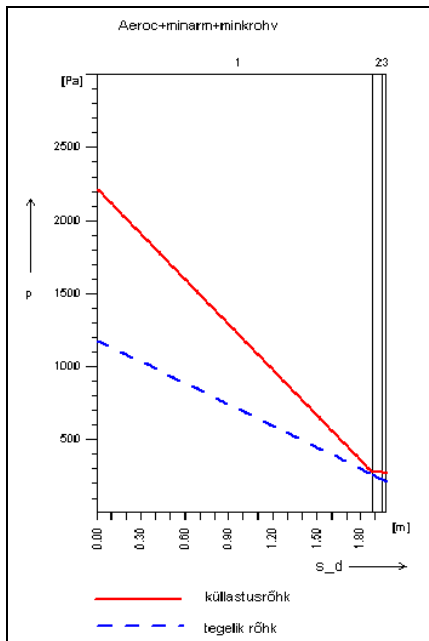
$U=0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$. Süsteem kuulub kategooriasse JUHTUM D (talvisel perioodil võib antud parameetrite järgi tekkida kondensvett kokku $0,4 \text{ kg/m}^2$, suvisel perioodil on aurumine võimalik $0,6 \text{ kg/m}^2$), mistõttu on lubatud sellise süsteemi kasutamine, kuna jääkkondensi ei teki.

4. Aeroc(375)+mineraalne armeeringkiht+polümeerkrohv

Näide 3 on arvatud 5 cm soojustusega, mille vajalikkust me siinkohal ei arutle. Kui aga kasutada 375 mm Aerocit ilma soojustuskihita, kuidas on lood kondensaadiga siis? Arvutame difusioonigraafiku ilma soojustuseta ja polümeerkrohviga. $U=0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$. Süsteem kuulub kategooriasse JUHTUM D (talvisel perioodil võib antud parameetrite järgi tekkida kondensvett kokku $0,5 \text{ kg/m}^2$, suvisel perioodil on aurumine võimalik $2,0 \text{ kg/m}^2$), mistõttu on lubatud sellise süsteemi kasutamine, kuna jääkkondensi ei teki.

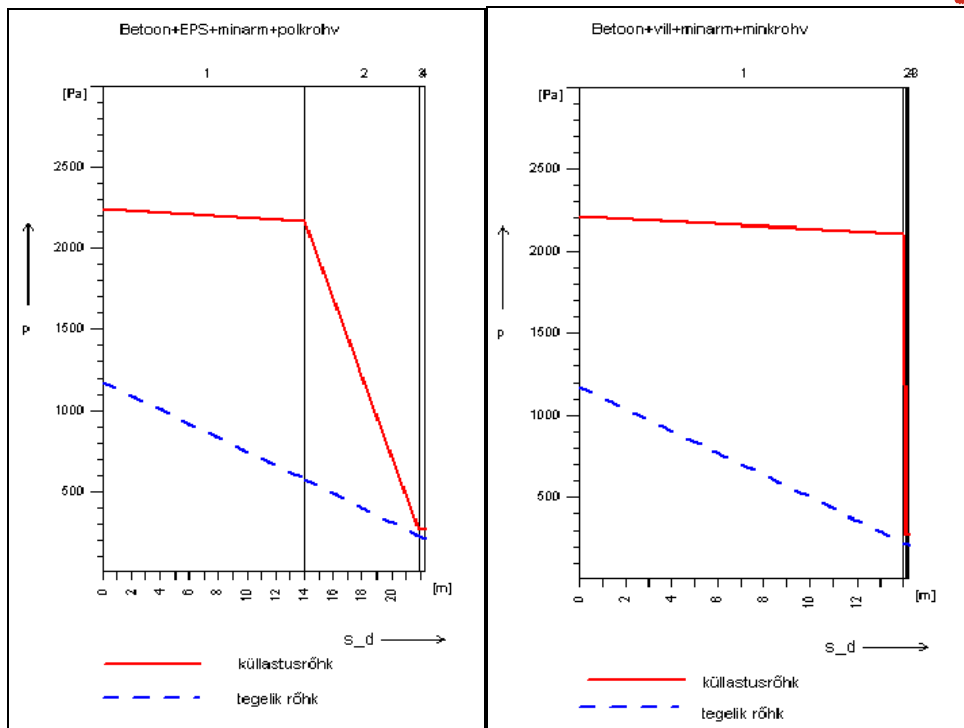
5. Aeroc(375)+mineraalne armeeringkiht+mineraalne krohv

Eelmise kahe näite puhul on kondensitekkeoht olemas, mistõttu tundub esmapilgul parem asendada polümeerkrohv mineraalkrohviga. Arvutame ilma soojustuskihita mineraalset süsteemi. $U=0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$. Kondensvett ei teki ehk JUHTUM A (juhul kui puudub krohvil värvkate). Kui aga süsteem ilmastiku eest kaitseks üle värvida, siis silikaatvärviga üle võõbatud antud süsteemis tekib kondensvesi ehk JUHTUM D. Difusiooni dispersioonvärviga üle võõbates jääb ikka JUHTUMISSE D. On lubatud, kuna suvel kuivab tekkinud kondens välja.



6. Betoon(200)+penoplast(150)+mineraalne armeeringkiht+polümeerkrohv

$U=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$. JUHTUM A – kondensvett ei teki. Selline konstruktsioon on kasutatav meil kortermajade ehitamisel. Vanade kortermajade renoveerimisel koosneb sein mitmest erinevast materjalist. Arvutuste tulemusel pole paneelmajade soojustamisel penoplastiga karta mingit kondensiohtu.



7. Betoon(200)+vill(150)+mineraalne armeeringkiht+mineraalkrohv

$U=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$. JUHTUM A – kondensvett ei teki ka siis kui süsteemile kanda nii silikaatvärv kui ka difuusne dispersioonvärv.

Kokku

Fibo puhul on ohutuim liitsüsteemiga soojustamise variant penoplastiga, krohvikihtiks võivad olla kõik tuntud õhekrohvid – JUHTUM A. Pannes Fibole soojustuseks mineraalvilla on ohuks ilma korraliku sisemise õhutõkketa õhu kontrollimatu konvektiivne liikumine süsteemis (ehk läbipuhumine) ja koos sellega ka liigne niiskuse transportimine (nii difuusne kui ka konvektiivne) välispinna alla. Sisemise õhutõkketa süsteemi väliskihis võib kondens tekkida juba mineraalsüsteemi ja värvkattega väliskihis puhul, sama probleem on ka polümeerset katete kasutamisel. Sisemise õhutõkketa süsteemide puhul ei saa määrata kondensitekke klassi, kuna läbipuhuva süsteemi tõttu ei ole ta enam klassikaline liitsüsteem ja difusiooni arvutus ei anna õiget pilti süsteemi tegelikust niiskusrežiimist. Õhu liikumine on süsteemisene ventilatsioon koos niiskuse kondenseerumise ja kuivamisega. Soojapidavus on sellistel süsteemidel halb, mistõttu ilma õhutõkketa süsteemid on lubamatud. Õhutõkkega mineraalvillaga soojustussüsteemid kuuluvad JUHTUMISSE D, ehk on lubatud ja kondens kuivab välja.

Aeroci puhul kuuluvad kõik eelkirjeldatud ja ehitusfüüsikaliselt korrektsed variandid JUHTUMISSE D, ehk tekib kondensvesi. Süsteemid lubatud, jääkkondensi ei teki. JUHTUM A on ainult puhta mineraalsüsteemi puhul, aga ehitusfüüsikaliselt on selle kattekiht nõrk ilmastiku suhtes. Pannes puhtale mineraalsüsteemile värvkatte peale langeb ta JUHTUMISSE D.

Betooni ja paneelmajade puhul on tänu betooni suurele aurutakistusele kondensitekkekoht tunduvalt väiksem kui Aeroci ja Fibo puhul. Sellistele hoonetele soojustussüsteemide valikuvõimalus on suur, võib ohutult kasutada soojustuseks nii penoplasti kui ka mineraalvilla, samuti krohvkattedeks kõiki tuntud õhekrohvisüsteeme. Kõik variandid kuuluvad JUHTUMISSE A, ehk kondensi ei teki. Kui tulla tagasi esimeses osas kirjeldatud kortermaja probleemi (siseseina



pinnatemperatuur +12 °C ja hallitus) juurde, siis paigaldades välispiirdele soojustuskihi tõstame sellega sisemise pinnatemperatuuri 18-20 °C –ni , koos sellega kondensi enam ei teki, koos sellega likvideerime hallituse tekkepõhjuse. Nagu eelpool selgitatud ei muudeta penoplastiga soojustamisel veeauru liikumisintensiivsust siseruumist välja – nii nagu ilma soojustuseta seinaga puhul läks vähemalt 99 % veeaurust välja ventilatsiooni abil, läheb praktiliselt sama kogus välja ka peale soojustamist. Ventilatsiooni oli vaja nii enne välisseina soojustamist kui ka peale välisseina soojustamist - ventilatsioonivajadus ei sõltu paneelile pealekantavast soojustussüsteemist.