

Palkmaja soojaks: seestpoolt soojustamine ja välispiirete õhupidavuse parandamine.

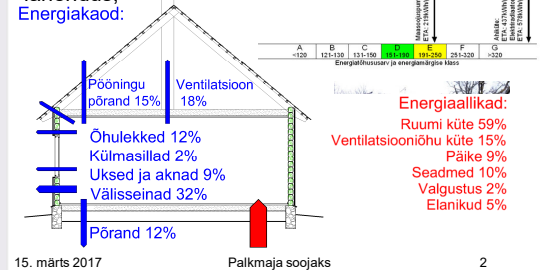
Üllar Alev
Tallinna Tehnikaülikool
ullar.alev@ttu.ee

EVM - 15. märts 2017

Tarnitud energia protsentuaalne jaotus

- Tüüppoone **renoveerimiseelne olukord**;
- Suurimate kadude likvideerimine on otstarbekaim lahendus;

Energiakaod:



Õhupidavus

- Hoonepiirete ebapiisav õhupidavus väljendub planeerimatus ja kontrollimatus õhuvoolus hoone piirete kaudu.
- Õhulekete mõju sõltub:
 - hoonepiirete õhupidavusest;
 - lekkekohtade paiknemisest;
 - õhurõhkude erinevusest kahel pool piiret;
 - kasutatavate materjalide omadustest ja
 - kliimatingimustest.

15. märts 2017

Palkmaja soojaks

3

Õhupidavus

- Hoonepiirete ebapiisav õhupidavus väljendub planeerimatus ja kontrollimatus õhuvoolus hoone piirete kaudu.
- Mõju avaldub järgmistes tegurites:
 - hoone energiätõhusus;
 - niiskustehnilised probleemid;
 - hallituse, õhusaaste ja radooni levik põrandaalusest ruumist siseruumidesse, ebasoovitavate lõhnade liikumine korterite vahel;
 - piirete pindade alajahtumine;
 - sisekliima kvaliteet, tuuletõmbus;
 - ventilatsioonisüsteemide toimivus;
 - müraprobleemid;
 - tuleohutus.

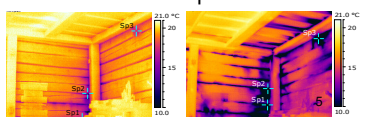
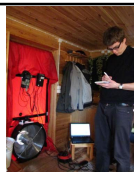
15. märts 2017

Palkmaja soojaks

4

Õhupidavuse mõõtmine

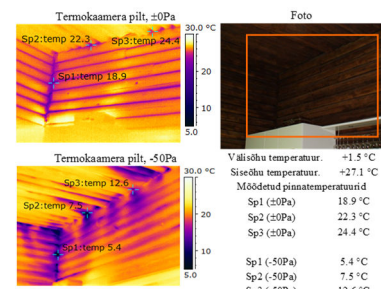
- Piirete õhupidavuse hindamine:
 - õhuleketest (EVS EN 13829)
 - lekkekohtade tuvastamine, termograafia
- Lekkeõhu hulk 50Pa juures jagatakse:
 - piirete pindalaga, saadakse õhulekkearv q_{50} , $m^3/(h \cdot m^2)$
 - sisekubatuuri, saadakse õhuvahetuskordsus n_{50} : 1/h
- Hoone välispiirete õhupidavust iseloomustab õhulekkearv q_{50} $m^3/(h \cdot m^2)$: rõhkude erinevusel mõõdetud lekkeõhu vooluhulk välispiirete ruutmeetri kohta.



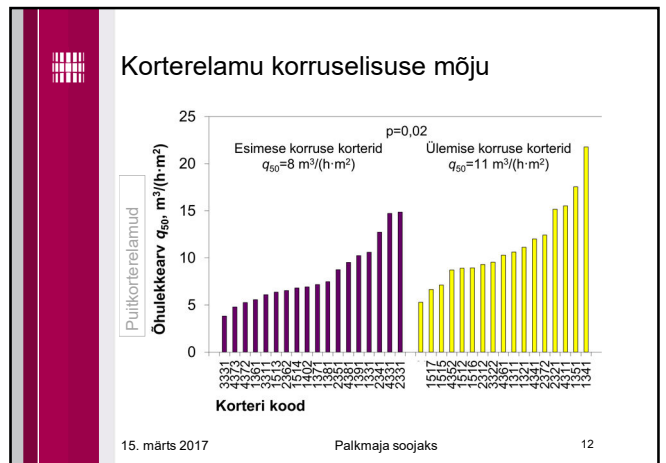
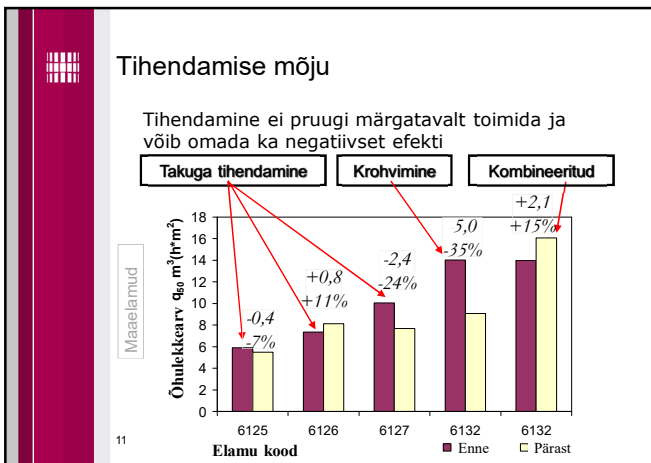
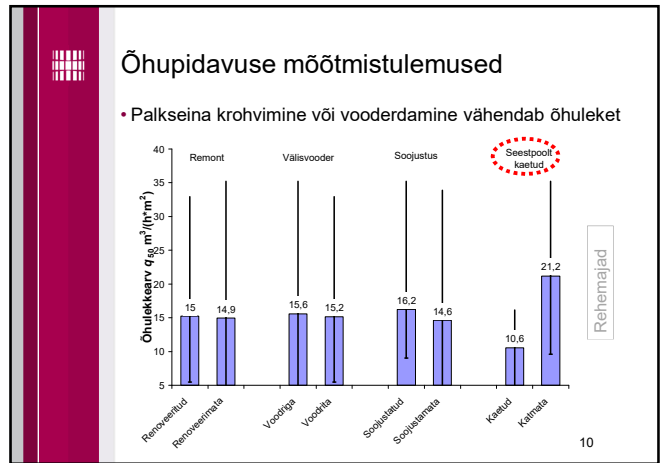
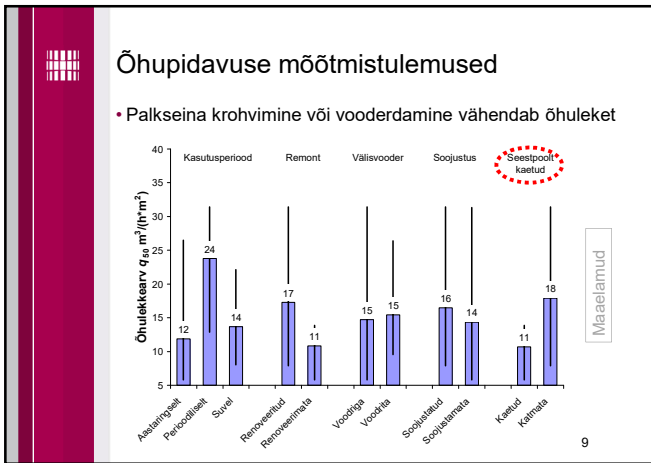
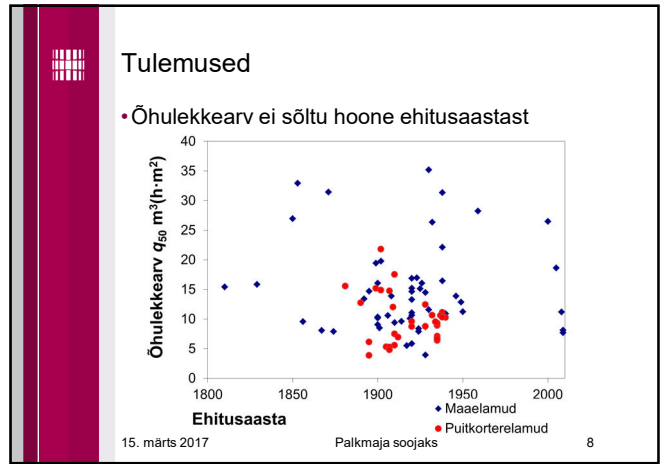
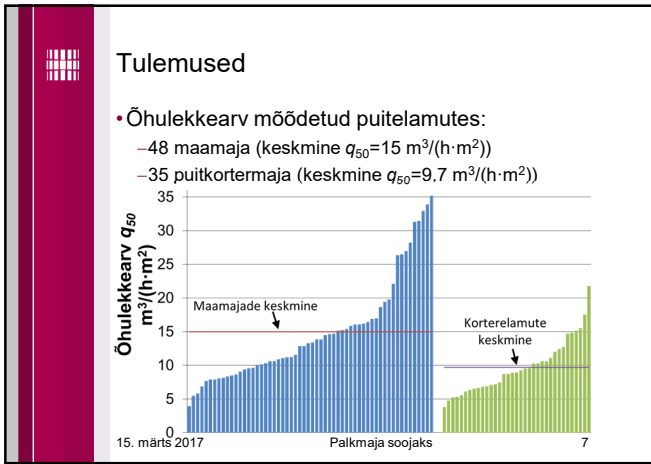
15. märts 2017

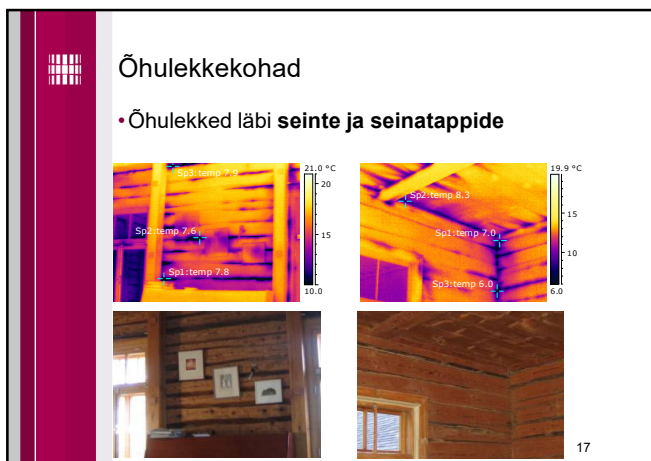
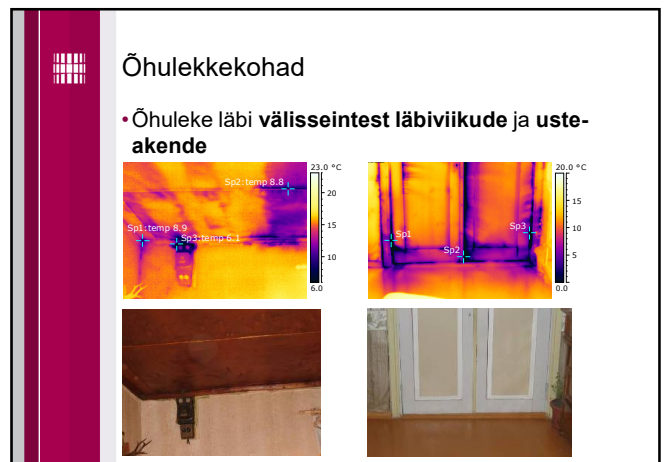
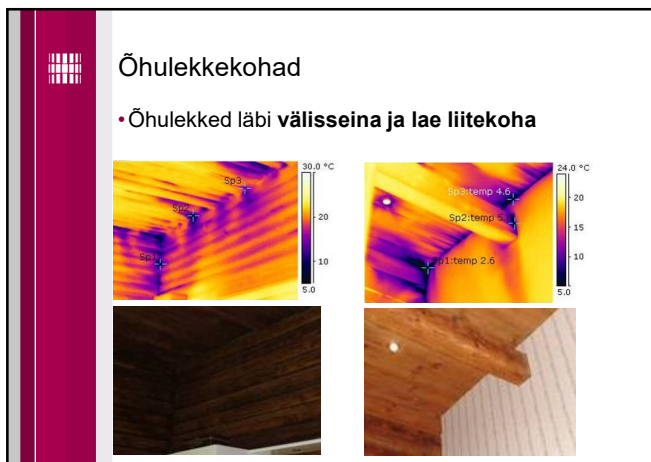
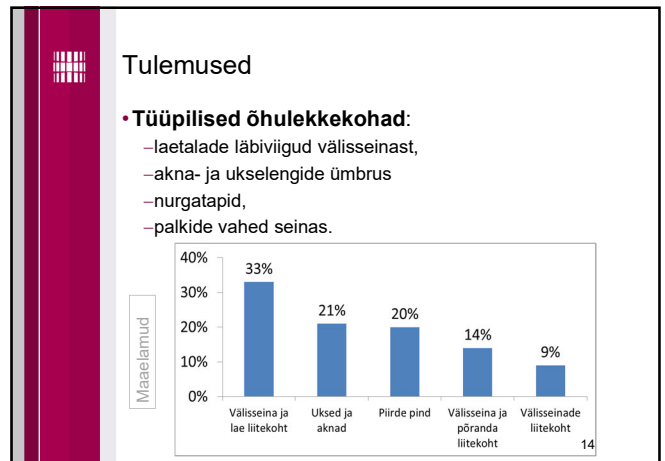
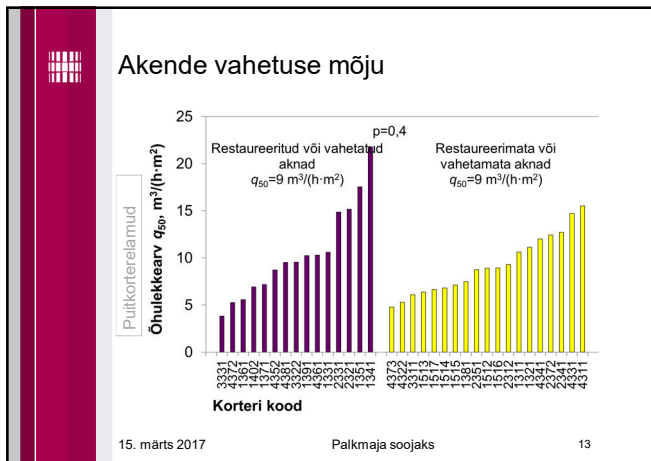
Õhulekkekohad

- Õhulekkekohtade tuvastamine termokaamera



6





Õhupidavuse kokkuvõte

- Vanade palkmajade õhulekke on suur $q_{50} = 10 \dots 18 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$: see tuleb energiaarvutustes eraldi arvesse võtta.
- Piiire õhulekke vähendamine vähendab ka elamu energiatarvet.
- Seestpoolt krohvitud või muu õhutiheda kihiga kaetud elamute õhulekke oli kaks korda väiksem.
- Ülemise korruse korterite keskmine õhulekke on suurem kui esimese korruse korteritel.
- Elamu vanus, renoveerimine (töökvaliteet?), laudise olemasolu ja akende vahetus ei omanud märkimisväärset mõju hoone õhupidavusele.

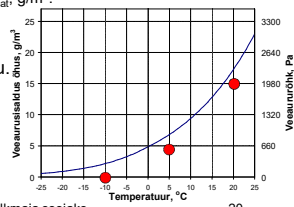
15. märts 2017 Palkmaja soojaks 18

Niiskuse probleemid, niiskus õhus ja hoonepiiretel.



Niiskus õhus

- Mida kõrgem on õhutemperatuur, seda rohkem võib õhk sisaldada veeauru.
- Igal temperatuuril on õhus olevatele veemolekulidele teatav maksimaalne piir (kontsent. suurem: kondenseerumine):
 - veeauru küllastusrõhk: p_{sat} , Pa,
 - veeauru küllastussisaldus: v_{sat} , g/m³.
- Mida kõrgem on õhu temperatuur, seda rohkem võib õhk sisaldada veeauru.
- Näiteks
 - 10°C: 2,1 g/m³ või 259 Pa;
 - +5°C: 6,8 g/m³ või 872 Pa;
 - +20°C: 17,3 g/m³ või 2337 Pa



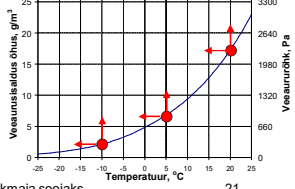
15. märts 2017

Palkmaja soojaks

20

Niiskus õhus

- Kui veeauru küllastusrõhk või veeauru küllastussisaldus on saavutatud, siis täiendavate veemolekulide õhku lisamisel kondenseerub osa veemolekule välja.
- Kui õhu temperatuur langeb alla küllastustemperatuuri, kondenseerub osa veemolekule välja
- Kondenseerumine toimub nii pluss- kui ka miinus-temperatuuridel



15. märts 2017

Palkmaja soojaks

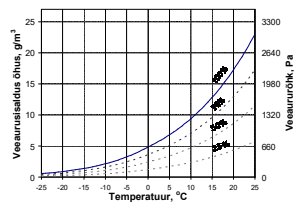
21

Niiskus õhus

- Veeauru hulka õhus võib iseloomustada:
 - veeauru massi suhtega kuiva õhu massi: **absoluutne niiskus**, kg/kg;
 - veeauru massi suhtega kuiva õhu mahtu: **õhu veeaurusisaldus**, g/m³;
 - veeauru osarõhuga, Pa;
 - suhtelise niiskusega, %.

- Suhteline niiskus ϕ , RH (Relative Humidity):**
 - Õhu veeauru osarõhu suhe veeauru küllastusrõhku,
 - Õhus oleva veeauru koguse ja õhus samadel tingimustel maksimaalselt sisalduda võiva veeauru koguse suhe;

$$RH = \frac{p}{p_{\text{sat}}} \cdot 100 = \frac{v}{v_{\text{sat}}} \cdot 100$$



15. märts 2017

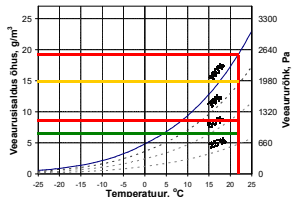
Palkmaja soojaks

22

Suhteline niiskus: õhu veeauru sisalduse muutus

- +22 °C → v_{maks} : 19,4 g/m³
- v : 6,8 g/m³ → RH 35 %
- v : 8,8 g/m³ → RH 45 %
- v : 15 g/m³ → RH 77 %

$$RH = \frac{p}{p_{\text{sat}}} \cdot 100 = \frac{v}{v_{\text{sat}}} \cdot 100$$



15. märts 2017

Palkmaja soojaks

23

Niiskuse liikumine: difusioon

- Difusioon on füüsikaline nähtus, mille mõjul erinevad gaasid või gaasi erinevad kontsentratsioonid moodustavad homogeense gaasisegu.
- Difusioon: veeaur liigub suurema veeauru sisalduse poolt väiksema veeauru sisalduse poole (suurema veeauru osarõhu poolt väiksema poole)

21°C, RH 39%
 v : 7.2g/m³
 p : 970Pa

-15°C, RH 85%
 v : 1.2g/m³
 p : 140Pa

15. märts 2017

Palkmaja soojaks

24

Niiskuse liikumine: konvektsioon

- Konvektsiooni korral liigub niiskus piirdes õhuvoolu mõjul läbi poorse materjali või tarindis olevate pragude ja aukude kaudu.
- Konvektsioon sõltub:
 - õhu rõhkude erinevusest
 - materjali õhujuhitvusest
 - pragude olemasolust
- Konvektsiooni teel võib liikuda oluliselt rohkem veeauru, kui difusiooni teel: õhupidavus

21°C, RH 39%
 $v: 7.2\text{g/m}^3$
 $p: 970\text{Pa}$

→

-15°C, RH 85%
 $v: 1.2\text{g/m}^3$
 $p: 140\text{Pa}$

$\Delta P +10\text{Pa}$

25

Konvektiivne niiskusvool

- Kui siseruumides on alarõhk:
 - imendub külm ja kuiv välisõhk ruumi konstruktsiooni pragude ja vuukide kaudu.
 - õhk soojeneb, tema suhteline õhuniiskus langeb ja see võib konstruktsioone kuivatada.
 - õhu soojenemise ja niiskuse aurustumise tõttu tarind jahtub.
- Kui siseruumides on ülerõhk:
 - imendub soe ja niiske siseõhk õue konstruktsiooni pragude ja vuukide kaudu.
 - õhk jahtub, tema suhteline õhuniiskus tõuseb ja see võib konstruktsioone niisutada.
 - kui siseõhu niiskussisaldus on kõrgem kui välisõhu või konstruktsiooni küllastusniiskussisaldus, kondenseerub veeaur piirdekonstruktsiooni.

15. märts 2017
Palkmaja soojaks
26

Niiskuse liikumine

- Difusioon
- Konvektsioon
- Kapillaarne liikumine on vee liikumine materjalis oleva kapillaarjõu ja vee pindpinevuse toimel;
- Gravitatsioon
- Eeldavad vaba vee olemasolu;

15. märts 2017
Palkmaja soojaks
27

Niiskuse liikumine

15. märts 2017
Palkmaja soojaks
28

Niiskuse kriitiline tase

- Hoonepiiretes tuleb vältida hallituse kasvu
- Hoonepiiretes tuleb vältida veeauru kondenseerumist (vaba vett), kuna:
 - suureneb materjalide soojajuhtivus
 - soodsad tingimused puidu mädanemisele
 - soodsad tingimused metallide korrosiooniks
 - soodsad tingimused hallituse tekkeks
 - puit ja puidupõhised materjalid 75...80%
 - paber kipsplaadil 80...85%
 - mineraalvill 90...95%
 - betoon 90...95%

29

Siseõhu niiskuskoormus

Siseruumide **niiskuskoormust** näitab siseõhu ja välisõhu veeaurusisalduste (või veeauru osarõhkude) erinevus: **niiskuslisa $\Delta v, \text{g/m}^3$** ($\Delta p, \text{Pa}$).

$$\Delta v = v_i - v_e = \frac{G}{q_v}, \text{ g/m}^3$$

- v_e välisõhu veeaurusisaldus, g/m^3
- v_i siseõhu veeaurusisaldus, g/m^3
- G niiskustoodang, g/h
- q_v ventilatsiooni õhuvooluhulk, m^3/h ($q_v = n \cdot V$)
- n õhuvahetuskordus, $1/\text{h}$
- V ruumi kubatuur, m^3

30

Soojusvool

Soojusvool Φ , W näitab läbi konkreetse pinnahüki toimuvat soojusvoogu:

$$\Phi = q \cdot A = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot (T_1 - T_2)$$

- Φ soojusvool, W,
- A pindala, m²,
- T_1, T_2 temperatuur, K,
- d materjalikihi paksus, m.

15. märts 2017 Palkmaja soojaks 31

Hoone piirdetarindid

- Hoonete välispiirded peavad olema pikaajaliselt:
 - piisavalt soojustatud ja
 - õhupidavad.
- Piirde soojuspidavus e. soojustakistus sõltub eelkõige:
 - kasutatud materjalidest,
 - materjalide paksusest,
 - külmasildade olemasolust.
- Soojusjuhtivus

$$R = d / \lambda, (m^2 \cdot K) / W$$

$$U = 1 / R_T, W / (m^2 \cdot K)$$

15. märts 2017 Palkmaja soojaks 32

Materjali soojuseri juhtivus

- Tähis λ , ühik W/(m·K):
- Väljendab:
 - soojusvoolu vattides,
 - mis läbib 1 meetri paksuse ja
 - 1 m² pinnaga materjalikihi,
 - kui temperatuuride vahe vastastikkuste pindade vahel on 1 K.

Materjal	Soojuseri juhtivus W/(m·K)
Vask	395
Alumiinium	200
Teras	50
Betoon	1,7...2,1
Tellis	0,6
Vesi	0,6
Jää	2,2
Puit	0,12...0,14
Mineraalvill	0,04...0,045
Õhk (paigalseisev)	0,026
Argoon	0,018

33

Materjali soojuseri juhtivus

- Tähis λ , ühik W/(m·K)

Materjal	Soojaeri juhtivus λ , W/(m·K)
Mineraalvill	0,035...0,04
Tselluvill	0,05...0,06
Pilliroog	0,06...0,08
Saepuru, hõõvillast	0,07...0,08
Puit	0,11...0,14
Kergrbetoon	0,15...0,23

Puitkarkassein / min.vill 15cm: ~0,3 W/(m²·K)
 Puitkarkassein / saepuru 15cm: ~0,5 W/(m²·K)
 Palksein 15cm: ~0,75...0,8 W/(m²·K)

34

Hoone piirdetarindid

- Hoonete välispiirded peavad olema pikaajaliselt:
 - piisavalt soojustatud ja
 - õhupidavad.
- Piirde soojuspidavus e. soojustakistus sõltub eelkõige:
 - kasutatud materjalidest,
 - materjalide paksusest,
 - külmasildade olemasolust.
- Soojuslähivus

$$R = d / \lambda, (m^2 \cdot K) / W$$

$$U = 1 / R_T, W / (m^2 \cdot K)$$

15. märts 2017 Palkmaja soojaks 35

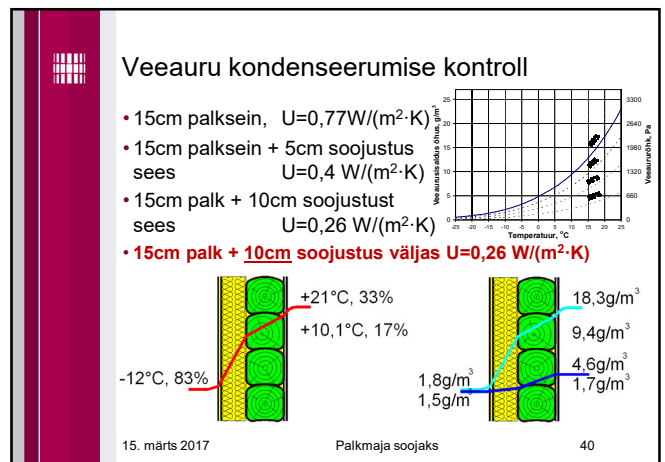
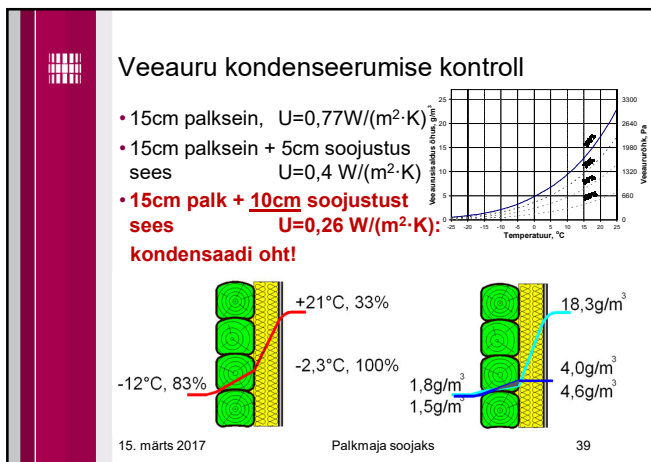
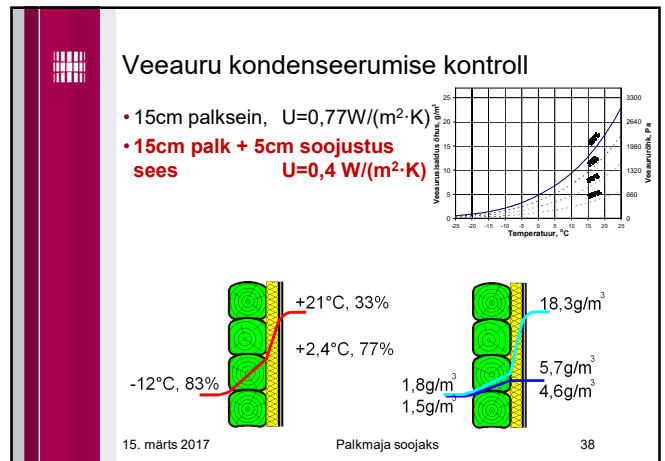
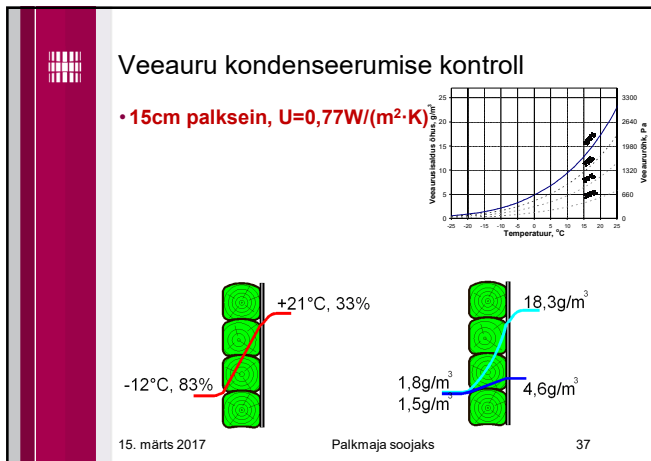
Materjali soojuseri juhtivus

- Tähis λ , ühik W/(m·K)

Materjal	Soojaeri juhtivus λ , W/(m·K)
Mineraalvill	0,035...0,04
Tselluvill	0,05...0,06
Pilliroog	0,06...0,08
Saepuru, hõõvillast	0,07...0,08
Puit	0,11...0,14
Kergrbetoon	0,15...0,23

Puitkarkassein / min.vill 15cm: ~0,3 W/(m²·K)
 Puitkarkassein / saepuru 15cm: ~0,5 W/(m²·K)
 Palksein 15cm: ~0,75...0,8 W/(m²·K)

36



Piirdetarindite soojuslähivus

- Otstarbeka soojustuse määramisel lähtutakse
 - hoone energiatõhususe miinimumnõuetest,
 - ehitustehnilistest nõuetest,
 - ruumide soojuslikust mugavusest ($\sim 0,5 W/(m^2 \cdot K)$),
 - hallituse ning kondensaadi vältimisest külmasildadel, sisepindadel ja tarindites ($\sim 1,2 W/(m^2 \cdot K)$),
 - majanduslikust otstarbekusest.
- Soojustus peab üldjuhul paiknema **kandetarindist külmemal poolel**, kuna see:
 - tagab kandetarindi püsivuse ühtlasel sisetemperatuuril,
 - vähendab oluliselt külmasildade mõju ja
 - on niiskustehniliselt turvaline.

15. märts 2017 Palkmaja soojaks 42

Kas soojustada seest poolt või väljast poolt?

- Väljast poolt:**
 - + Niiskustehniliselt turvaline;
 - + Kandekonstruksioon on soojas ja kuivas;
 - Tuleb lahendada kogu hoone korraga;
 - ± Korrektselt tehes säilib maja välisilme, halvasti tehes saab välisilme rikutud;
- Seest poolt:**
 - + Saab teha tubade kaupa, fassaadi ei ole vaja muuta;
 - Tekivad külmasillad vaheseinte, vahelagede ja avatäidete juures;
 - Madal temperatuur ja kõrge suhteline niiskus palkseina sisepinnal;



15. märts 2017 Palkmaja soojaks 43

Katsesein uues testmajas

Vasakult:

- **tselluüll** + aurutõke + kipsplaat
- **roomatt** + savikrohv
- **mineraalvill** + aurutõke+kipsplaat




Väljast →

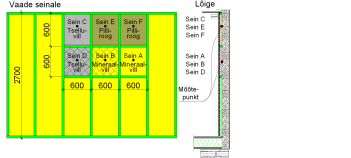
15. märts 2017 Palkmaja soojaks 44

Katsesein vanas kortermajas

Vaade seinale

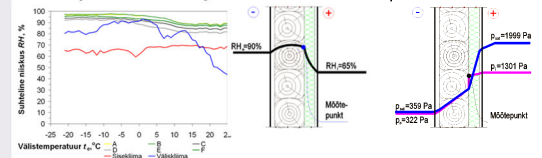


Lõige

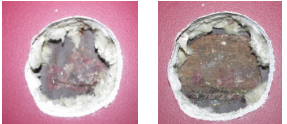


15. märts 2017 Palkmaja soojaks 45

Seespoolse soojustamise ohtud pole nali!



2 aastat peale ehitust avati sein:

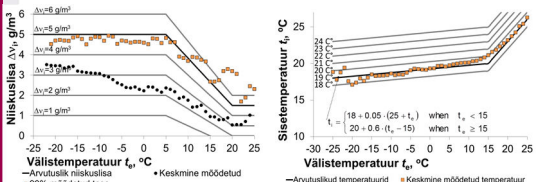


Seina kõverusest tulenevalt varieerus soojustuse paksus seinas 50...90 mm vahel

15. märts 2017 Palkmaja soojaks 46

Mudelis muudetud parameetrid

Parameeter	Basistase	Arvutatud versioonid					
Niiskussisa $\Delta w, \text{g/m}^2$ $t_a < +5^\circ\text{C}$ / $t_a > +20^\circ\text{C}$	5/1.5	1/0.5	2/0	3/0.5	4/1	5/1.5	6/2
Keskmine siseõhu temperatuur talvel $t_{s, \text{C}}$	19	18	19	20	21	22	23
Palkseina paksus, $d_{\text{palk}}, \text{mm}$	150	100	125	150	175	200	225
Soojustuse paksus, $d_{\text{soojustus}}, \text{mm}$	50	25	50	75	100	125	150
Palkide algniiskus, $w, \%$	14	14	15	16	17	18	19
Aurutõkketihhi suhteline difusioonitakistus, $S_{a, \text{m}}$	2	0.01	0.1	1	2	10	100

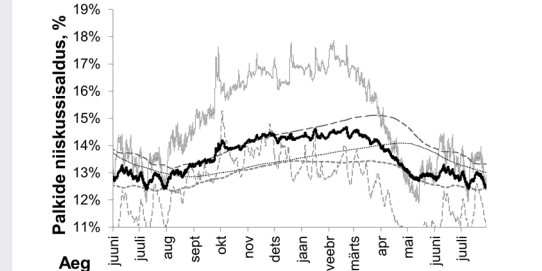


15. märts 2017 Palkmaja soojaks 47

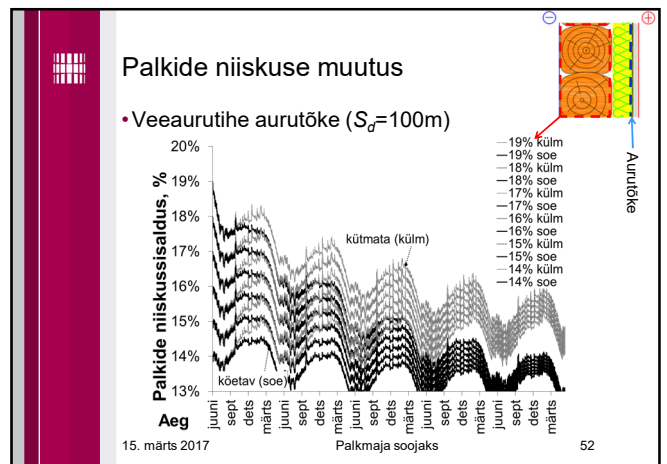
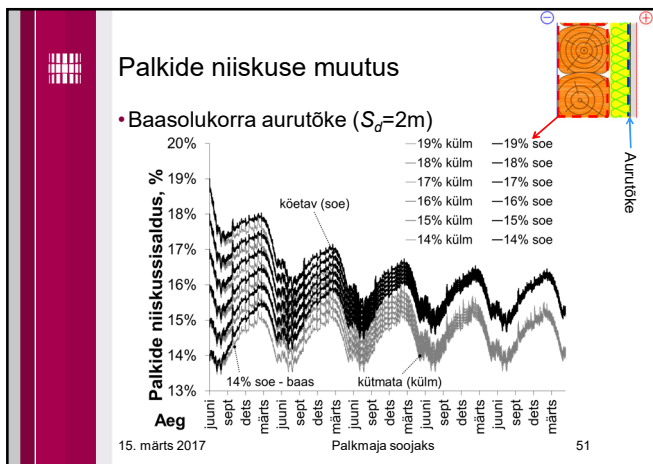
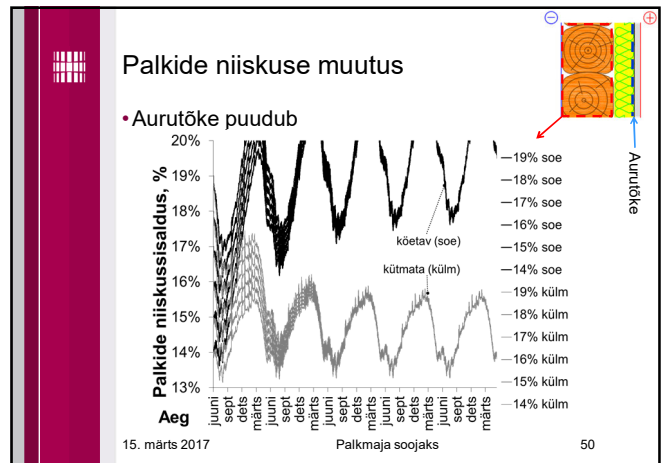
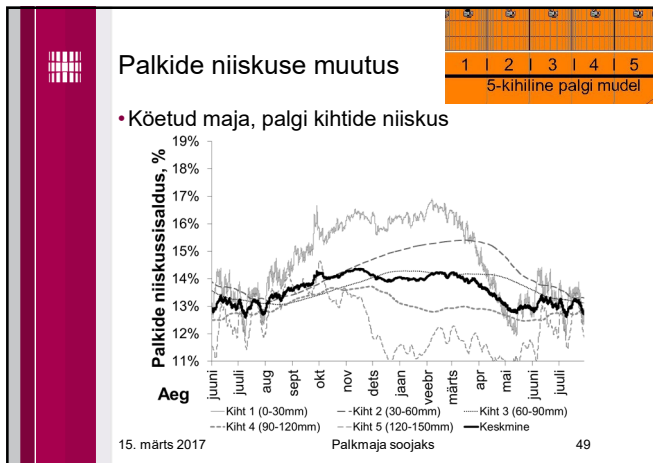
Palkide niiskuse muutus

1 | 2 | 3 | 4 | 5
5-kihiline palgi mudel

• Külma maja (suvila), palgi kihtide niiskus



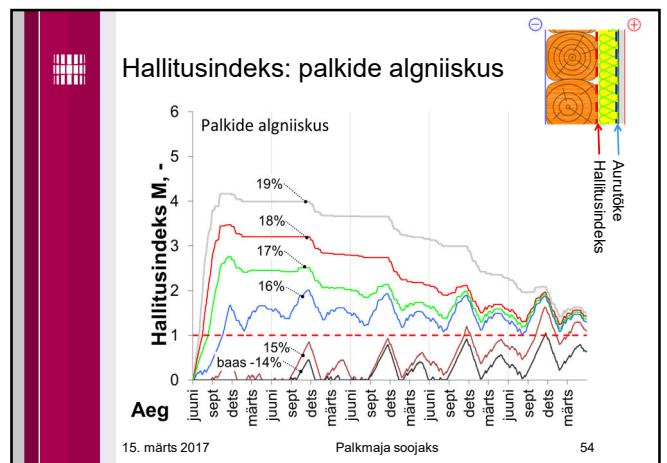
15. märts 2017 Palkmaja soojaks 48

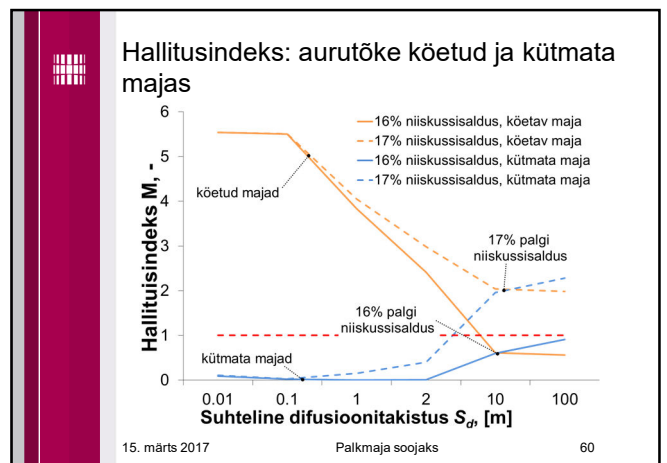
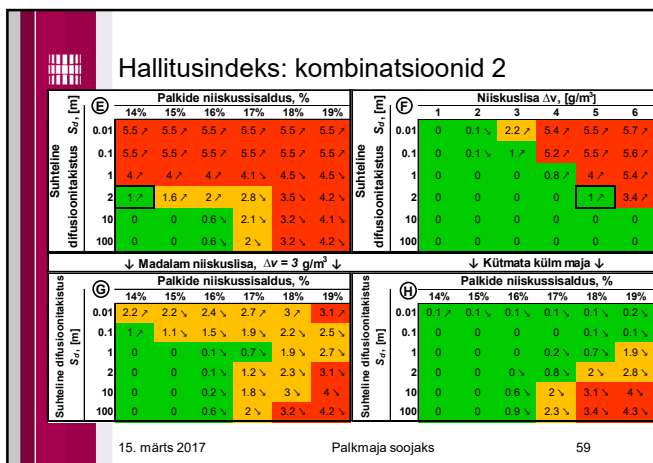
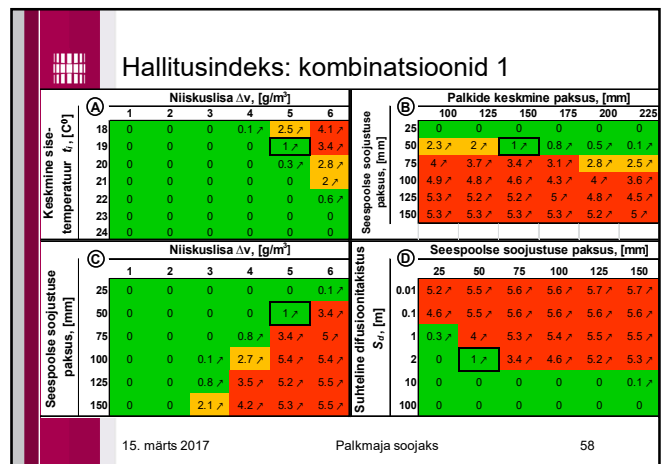
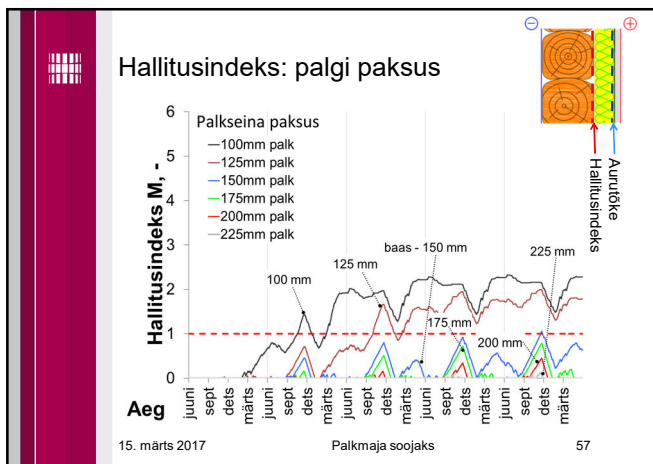
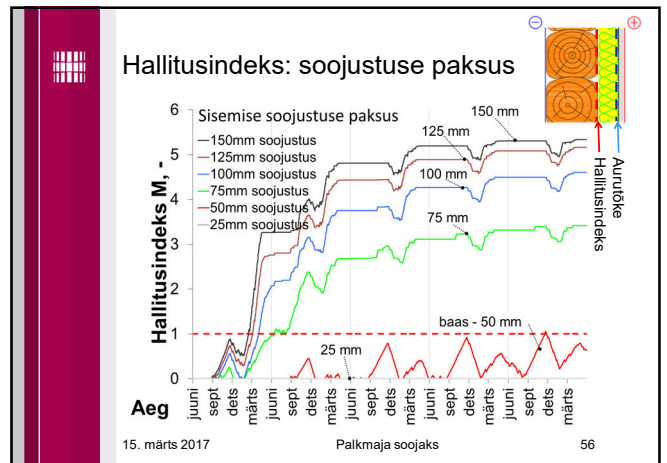
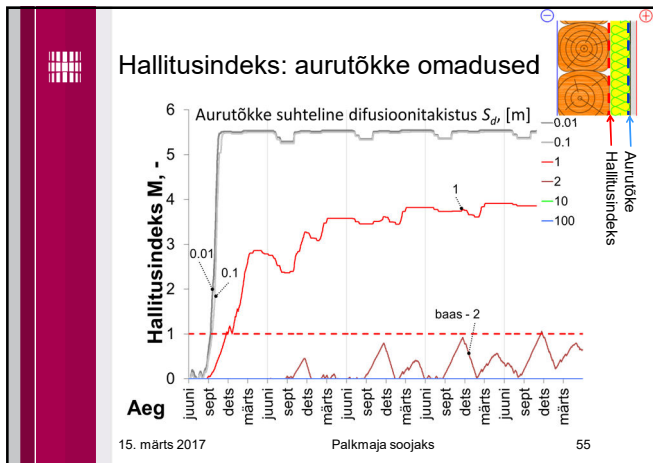


Hallituse kasvu kriteerium

- Hallituseente kasvu tekkeks on vajalik sobiv:
 - niiskus (suhteline niiskus kasvupinnal $\geq 75 \dots 80 \%$);
 - temperatuur ($0 \dots +50^\circ C$, kuid arenguks parim temperatuur on $+20 \dots +35^\circ C$);
 - kasvualus (piisavalt toitained, aluselisus pH 5...6);
 - sobivate kasvutingimuse esinemise aeg.
- Hallitusindeks:**
 - 0 – kasv puudub;
 - 1 – väikest kasvu võib tuvastada vaid mikroskoobi all;
 - 2 – mikrokoobiga tuvastatav kasv (katvus kuni 10%);
 - 3 – visuaalselt tuvastatav katvus 10 - 30% ulatuses;
 - 4 – visuaalselt tuvastatav katvus 30 - 70% ulatuses;
 - 5 – visuaalselt tuvastatav katvus rohkem kui 70%;
 - 6 – visuaalselt tuvastatav katvus 100%.

15. märts 2017 Palkmaja soojaaks 53







Parameetrite mõju hallitusindeksile

Mõju alates olulisemast:

1. aurutõkkekihi veeaurutakistus;
2. niiskuskooormus *;
3. seespoolse soojustuse soojusläbivus;
4. palkide algne niiskussisaldus *;
5. palkide paksus ehk seina algne soojusläbivus ja
6. sisetemperatuuri tase *.

* - projekteerija ei saa mõjutada.

15. märts 2017

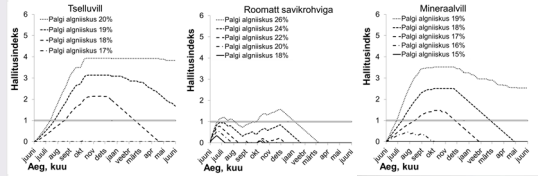
Palkmaja soojaks

61



Materjalid: tselluvill, roomatt või mineraalvill?

Palkide algniiskuse mõju:



NB! Mõõteseadmete määramatus vähemalt 2%



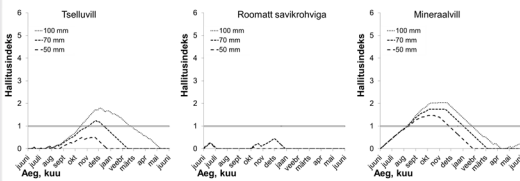
15. märts 2017

Palkmaja soojaks



Materjalid: tselluvill, roomatt või mineraalvill?

Soojustuskihi paksuse mõju:



Arvutustingimused: niiskulisla $4g/m^3$;
palkseina paksus 200mm;
palgi niiskustase 17%;
„tark“ aurutõke ($S_d=0,25...25m$)

15. märts 2017

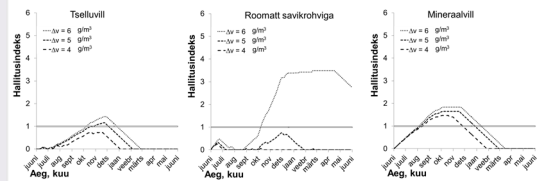
Palkmaja soojaks

63



Materjalid: tselluvill, roomatt või mineraalvill?

Niiskulisla mõju:



Arvutustingimused: soojustuse paksus 50mm;
palkseina paksus 200mm;
palgi niiskustase 17%;
„tark“ aurutõke ($S_d=0,25...25m$)

15. märts 2017

Palkmaja soojaks

64



Kokkuvõte

- Aurutõkke veeaurutakistus sõltub maja kasutusest. Materjali valik võiks tugineda esitatud tulemustele või konkreetse lahenduse arvutusele.
- Lisasoojustuse maksimaalne soojustakistus koos viimistluskihtidega ei tohiks üldiselt ületada algse palkseina soojustakistust.
- Enne soojustamist peab palksein olema võimalikult kuiv, s.t. mõõdetud niiskus $\leq 12\%$ kui kasutatakse mineraalvilla tiheda aurutõkkega.
- Oluline on tagada seina s.h. eelkõige aurutõkkekihi õhutihedus, läbiviigid (nt elektripaigaldised) on lubamatud.
- Tuleb tagada töökindel ventilatsiooni ja kütte tehnoloogia majas.

15. märts 2017

Palkmaja soojaks

65



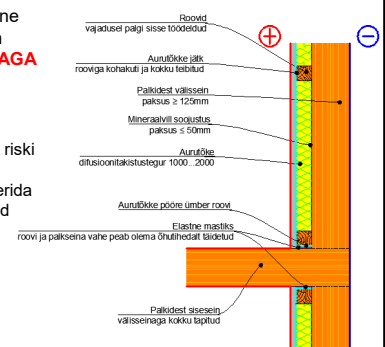
Seespoolse soojustamise lahendus

Palkseina seespoolne lisasoojustamine on võimalik lahendus, **AGA**

→ Eelpool toodud piirangutega tuleb arvestada

→ Kõrge kahjustuste riski tõttu tuleb enamik lahendusi projekteerida ja arvutada kogunud inseneri poolt

→ Ehitus tuleb teha vastavalt projektile.



15. märts 2017

Palkmaja soojaks

66