



TALLINNA
TEHNIKAÜLIKOOL



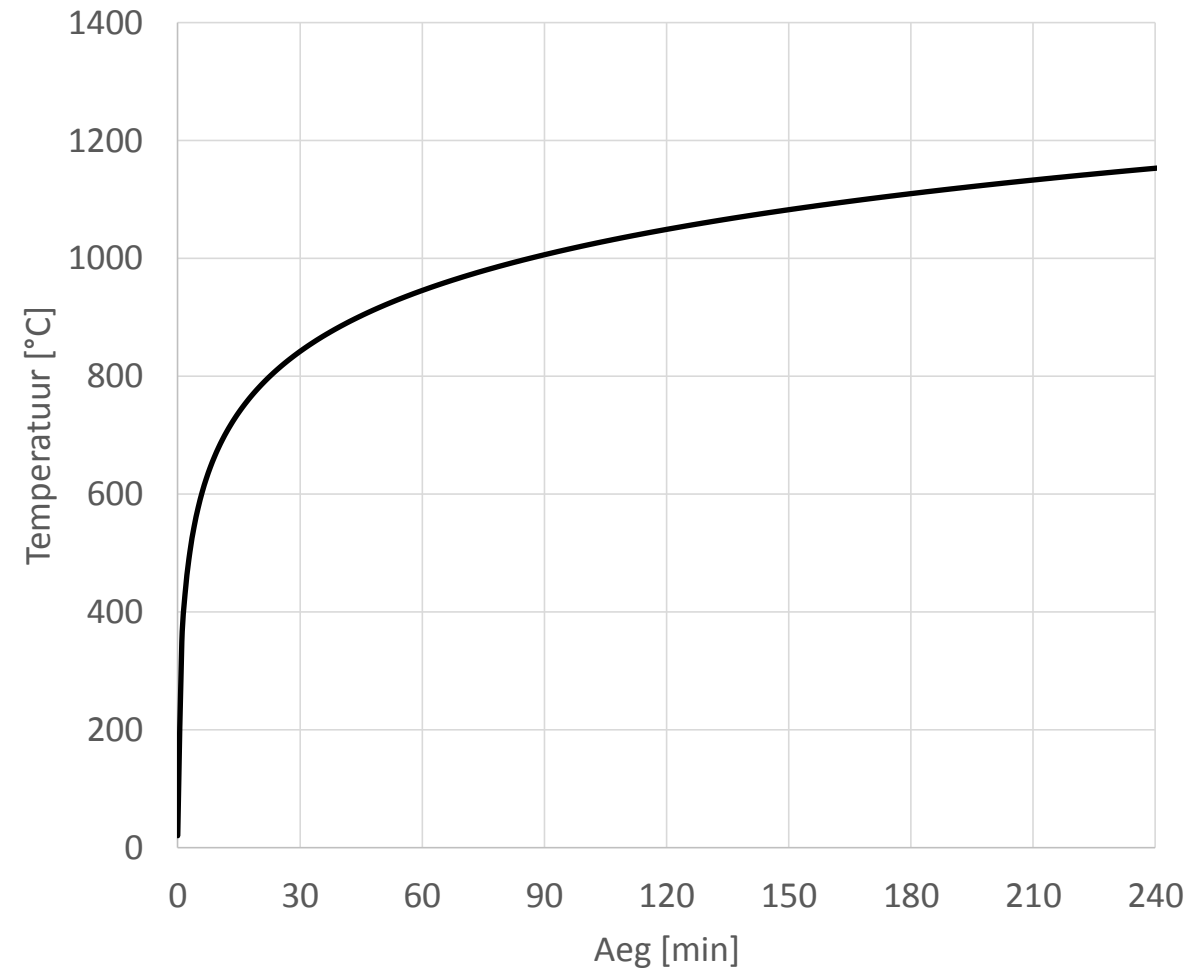
EESTI EHTUSINSENERIDE LIIT

PUITKONSTRUKTSIOONIDE TULETÕKESTUSVÕIME

Katrin Nele Mäger
katrinnele@gmail.com

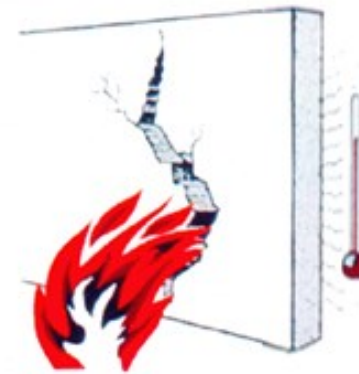
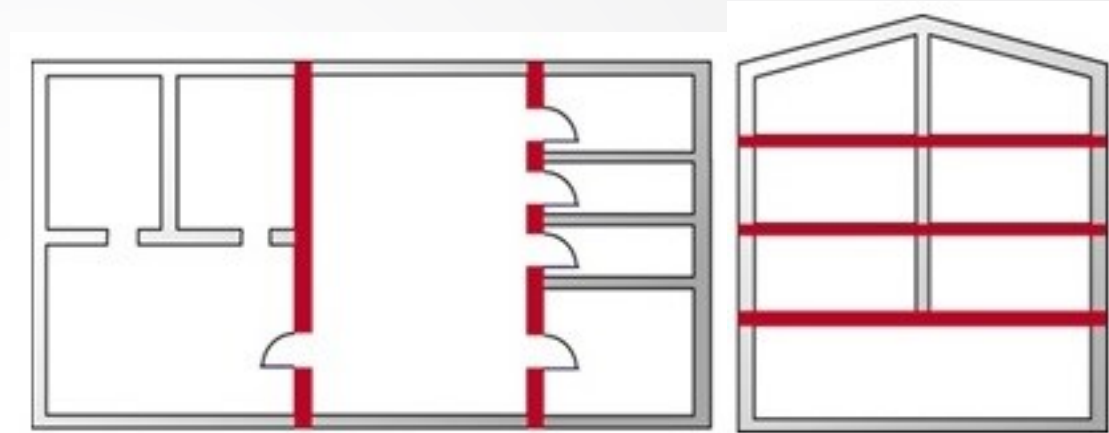
Millest tuleb juttu?

- Tuletõkestusvõime = eraldusfunktsioon
- Kehtivad standardid ja nõuded
- Aktsepteeritud arvutusmeetodid
- Termilised simulatsioonid



MIS ON TULETÕKESTUSVÕIME?

- Standardtulekahju
- I (isoleerivus)
 - $\Delta T \leq 140 \text{ K}$
 - $\Delta T \leq 180 \text{ K}$
- E (terviklikkus)
 - Leegid ja gaasid ei tungi läbi konstruktsiooni
 - St pragusid ei tohi olla



Terviklikkus Isoleerivus
E I

EN 1995-1-2:2005(+NA:2006)

Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-2:

Üldreeglid. Tulepüsivusarvutus

- Lisa E (teatmelisa) Sein ja põranda konstruktsiooni eraldava funktsiooni analüüs
- Tabeliväärtused / lihtsad valemid
- Rakendatav piiratud konstruktsioonidele

EESTI STANDARD EVS-EN 1995-1-2:2005+NA:2006

EUROKOODEKS 5:
Puitkonstruktsioonide projekteerimine
Osa 1-2: Üldist. Tulepüsivusarvutus

Eurocode 5: Design of timber structures
Part 1-2: General – Structural fire design

EVS EESTI STANDARDIKESKUS

Fire Safety in Timber Buildings / Tuleohutud puitmajad. 3.

- Euroopa tehnilised juhendid
- Aktsepteeritud arvutusmeetodid!
- Peaaegu universaalne

Fire safety in timber buildings



Technical guideline for Europe



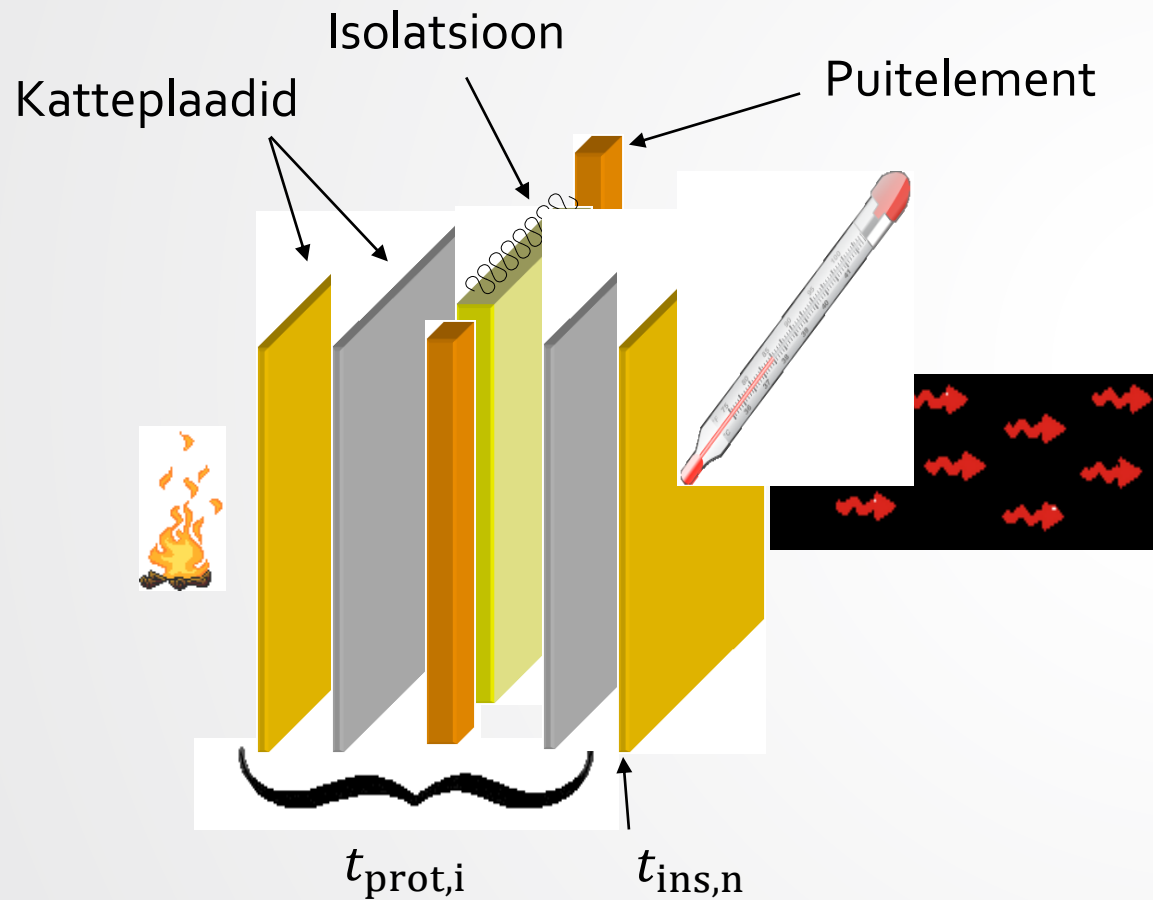
<http://www.kodumaja.ee/et/Tootearendus/Konstruksioonide-tulekindlus-ja-ehitise-tuleriskide-analuus>

TULEVIK: EN 1995-1-2:2020

- Kaasaaegne, kasutajasõbralikum
- 3 taset
 1. Tabeliväärtused
 2. Arvutusmeetodid
 3. Täpsustatud arvutusmeetodid



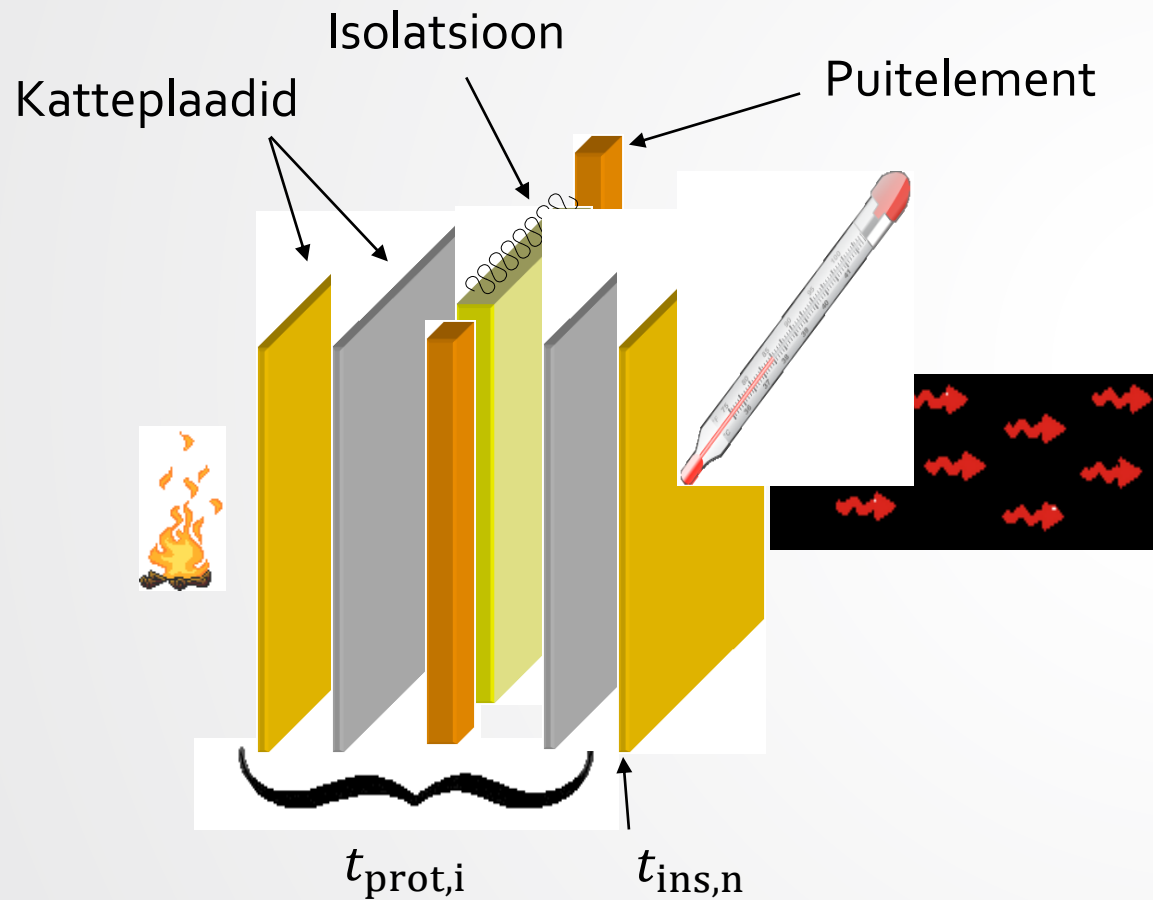
TÄIUSTATUD KOMPONENTIDE LIITMISE MEETOD



$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n}$$

Konstruksiooni isolatsiooniaeg on viimase materjalikihi isolatsiooniaja ja tulepoolsete kihtide kaitseaegade summa.

TÄIUSTATUD KOMPONENTIDE LIITMISE MEETOD



Külmal poolel asuva materjalikihi isolatsiooniaeg

$$t_{\text{ins},n} = (t_{\text{ins},0,n} \cdot k_{\text{pos,exp},n} + \Delta t_n) \cdot k_{j,n}$$

Tulepoolsel materjalikihi kaitseaeg

$$t_{\text{prot},i} = (t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} + \Delta t_i) \cdot k_{i,j}$$

$$\Delta \bar{T}_{\text{ins}} = 140 \text{ K}$$

$$\Delta \bar{T}_{\text{prot}} = 250 \text{ K}$$

$$\Delta T_{\text{ins}} = 180 \text{ K}$$

$$\Delta T_{\text{prot}} = 270 \text{ K}$$

KAITSEAEG $t_{\text{prot},i}$

$$t_{\text{prot},i} = \left(t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} + \Delta t_i \right) \cdot k_{i,j}$$

- Baaskaitseaeg
- Aeg, mille jooksul temperatuur kihi taga tõuseb 250 kraadi võrra
- Sõltub kihi materjalist, paksusest, (tihedusest)

KAITSEAEG $t_{\text{prot},i}$

$$t_{\text{prot},i} = (t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} + \Delta t_i) \cdot k_{i,j}$$

- Positsioonitegur
- Sõltub vaadeldava ja sellele eelnevate kihtide kaitseaegadest

KAITSEAEG $t_{\text{prot},i}$

$$t_{\text{prot},i} = (t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} + \Delta t_i) \cdot k_{i,j}$$

- Positsioonitegur
- Sõltub vaadeldavale kihile järgnevast materjalist

KAITSEAEG $t_{\text{prot},i}$

$$t_{\text{prot},i} = (t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} + \Delta t_i) \cdot k_{i,j}$$

- Lisakaitseaeg
- Ainult tulekaitse- (F-tüüpi) kipsplaatidega kaitstud kihtide puhul
- Sõltub vaadeldava materjalikihi ja eelneva (kipsi-)kihi kaitseaegadest
- Vertikaalne või horisontaalne konstruktsioon

KAITSEAEG $t_{\text{prot},i}$

$$t_{\text{prot},i} = (t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} + \Delta t_i) \cdot k_{i,j}$$

- Liitetegur
- Kas kihi taga on järgmine materjal või tühimik

ISOLATSIOONIAEG $t_{ins,n}$

$$t_{ins,n} = (t_{ins,0,n} \cdot k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) \cdot k_{j,n}$$

- Baaisolatsiooniaeg
- Temperatuuri tõus kihi taga on 140 kraadi
- Sõltub kihi materjalist, paksusest, (tihedusest)

ISOLATSIOONIAEG $t_{ins,n}$

$$t_{ins,n} = (t_{ins,0,n} \cdot k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) \cdot k_{j,n}$$

- Positsioonikoefitsent
- Sõltub vaadeldava ja eelnevate kihtide isolatsiooni- ja kaitseaegadest

ISOLATSIOONIAEG $t_{ins,n}$

$$t_{ins,n} = (t_{ins,0,n} \cdot k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) \cdot k_{j,n}$$

- Lisakaitseaeg
- Kehtib kihi kohta, mida kaitseb otseselt tuletõkkekips

ISOLATSIOONIAEG $t_{ins,n}$

$$t_{ins,n} = (t_{ins,0,n} \cdot k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) \cdot k_{j,n}$$

– Liitetegur

BAASISOLATSIOONIAEG / BAASKAITSEAEG

Materjal	Isolatsioonaja baasväärtus $t_{ins,0,n}$ [min]	Kaitseaja baasväärtus $t_{prot,0,i}$ [min]
Kipsplaadid Kipskiudplaadid	$24 \left(\frac{h_n}{15}\right)^{1,4}$	$30 \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$
Ehituspuit, ristkihtpuit Spoonliimpuit (LVL)	$19 \left(\frac{h_n}{20}\right)^{1,4}$	$30 \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1} \leq \frac{h_i}{\beta_0}$
Puitlaastplaadid Puitkiudplaadid	$22 \left(\frac{h_n}{20}\right)^{1,4}$	$33 \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1} \leq \frac{h_i}{\beta_0}$
OSB Vineer	$16 \left(\frac{h_n}{20}\right)^{1,4}$	$23 \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1} \leq \frac{h_i}{\beta_0}$
Kivivill $26 \leq \rho_i \leq 50 \text{ kg/m}^3$	0	$0,3h_i^{0,82+0,0066\rho_i}$
Klaasvill $15 \leq \rho_i \leq 26 \text{ kg/m}^3$	0	kui $h_i < 40 \text{ mm}$: 0 kui $h_i \geq 40 \text{ mm}$: $0,056 h_i + 13 \leq 30$

h_i : vaadeldava kihi paksus [mm]

h_n : viimase kihi paksus [mm]

ρ_i : vaadeldava kihi tihedus [kg/m^3]

β_0 : standardis EN 1995-1-2 [4.8] sätestatud sөөstumisaste

POSITSIOONITEGURID

Materjal	Asukohategur $k_{\text{pos,exp,i}}$ ja $k_{\text{pos,exp,n}}$
Vooderdis (kipsplaat, puit)	$t_{\text{ins,n}}$ asukohategur $k_{\text{pos,exp,n}}$ $1 - 0,6 \frac{\sum_{p=1}^{n-1} t_{\text{prot,p}}}{t_{\text{ins,o,n}}}$ kui $\sum_{p=1}^{n-1} t_{\text{prot,p}} \leq \frac{t_{\text{ins,o,n}}}{2}$ $0,5 \frac{\sqrt{t_{\text{ins,o,n}}}}{\sqrt{\sum_{p=1}^{n-1} t_{\text{prot,p}}}}$ kui $\sum_{p=1}^{n-1} t_{\text{prot,p}} > \frac{t_{\text{ins,o,n}}}{2}$
	$t_{\text{prot,i}}$ asukohategur $k_{\text{pos,exp,i}}$ $1 - 0,6 \frac{\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}}}{t_{\text{prot,o,i}}}$ kui $\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}} \leq \frac{t_{\text{prot,o,i}}}{2}$ $0,5 \frac{\sqrt{t_{\text{prot,o,i}}}}{\sqrt{\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}}}}$ kui $\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}} > \frac{t_{\text{prot,o,i}}}{2}$
Kivivill	$t_{\text{prot,i}}$ asukohategur $k_{\text{pos,exp,i}}$ $1 - 0,6 \frac{\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}}}{t_{\text{ins,o,i}}}$ kui $\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}} \leq \frac{t_{\text{prot,o,i}}}{2}$ $0,5 \frac{\sqrt{t_{\text{prot,o,i}}}}{\sqrt{\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}}}}$ kui $\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}} > \frac{t_{\text{prot,o,i}}}{2}$
Klaasvill $h_i \geq 40$ mm $15 \leq \rho_i \leq 30$ kg/m ³	$t_{\text{prot,i}}$ asukohategur $k_{\text{pos,exp,i}}$ $1 - 0,8 \frac{\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}}}{t_{\text{prot,o,i}}}$ kui $\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}} \leq \frac{t_{\text{prot,o,i}}}{4}$ $0,3 \left(\frac{t_{\text{prot,o,i}}}{\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}}} \right)^{0,7}$ kui $\sum_{p=1}^{i-1} t_{\text{prot,p}} > \frac{t_{\text{prot,o,i}}}{4}$

ρ_i : vaadeldava kihi tihedus [kg/m³]

Vaadeldava kihi materjal	Sellise kihi $k_{\text{pos,unexp,i}}$ mille taga on kipsplaat või puit	Sellise kihi $k_{\text{pos,unexp,i}}$ mille taga on soojustusmaterjal
Kipsplaat, kipskiudplaat	1,0	$0,5h_i^{0,15}$
Ehituspuit ja riskihtpuit, LVL	1,0	$0,35h_i^{0,21}$
Puitlaastplaat, puitkiudplaat	1,0	$0,41h_i^{0,18}$
OSB, vineer	1,0	$0,5h_i^{0,15}$
Kivivill	1,0	$0,18h_i^{(0,001 \times \rho_i + 0,08)}$
Klaasvill $15 \leq \rho_i \leq 26$ kg/m ³	1,0	$\frac{h}{100} - \frac{h^2}{30000} + 0,02$

h_i : vaadeldava kihi paksus [mm]

ρ_i : vaadeldava kihi tihedus [kg/m³]

LISAKAITSEAEG

Materjal	Vahelaed	Seinad
Kattekiht (kipsplaat, puit)	$t_{ins,n}$ lisakaitseaege Δt_n [min]	
	$0,06t_{prot,n-1} + 1,1t_{ins,0,n} - 5,0$ kui $t_{ins,0,n} < 8$ min	$0,03t_{prot,n-1} + 0,9t_{ins,0,n} - 2,3$ kui $t_{ins,0,n} < 12$ min
	$0,1t_{prot,n-1} - 0,035t_{ins,0,n} + 1,2$ kui $t_{ins,0,n} \geq 8$ min	$0,22t_{prot,n-1} - 0,1t_{ins,0,n} + 4,7$ kui $t_{ins,0,n} \geq 12$ min
	$t_{prot,i}$ lisakaitseaege Δt_i [min]	
	$0,06t_{prot,i-1} + 1,1t_{prot,0,i} - 5,0$ kui $t_{prot,0,i} < 8$ min	$0,03t_{prot,i-1} + 0,9t_{prot,0,i} - 2,3$ kui $t_{prot,0,i} < 12$ min
	$0,1t_{prot,i-1} - 0,035t_{prot,0,i} + 1,2$ kui $t_{prot,0,i} \geq 8$ min	$0,22t_{prot,i-1} - 0,1t_{prot,0,i} + 4,7$ kui $t_{prot,0,i} \geq 12$ min
Mineraalvill	$t_{prot,i}$ lisakaitseaege Δt_i [min]	
	$0,1t_{prot,i-1} - 0,035t_{prot,0,i}$	$0,1t_{prot,i-1} + t_{prot,0,i} - 1,0$ kui $t_{prot,0,i} < 6$ min $0,22t_{prot,i-1} - 0,1t_{prot,0,i} + 3,5$ kui $t_{prot,0,i} \geq 6$ min

LIITETEGURID ja ÕHKVAHE

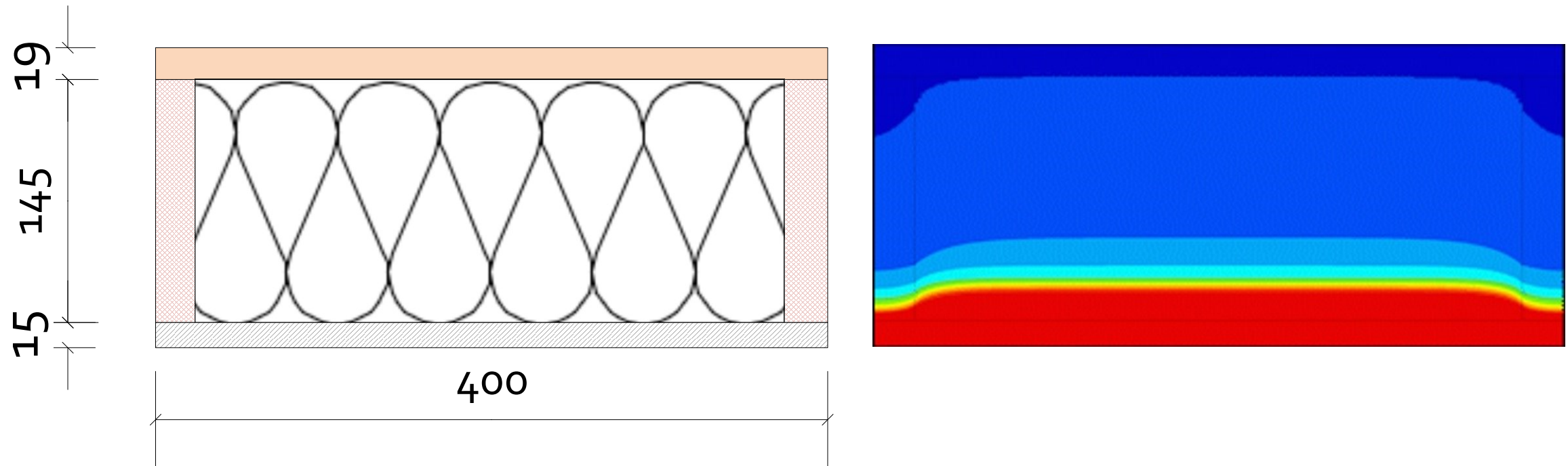
Materjal	Liitekohta tüüp	$t_{ins,n}$ tegur $k_{j,n}$	$t_{prot,i}$ tegur $k_{j,i}$		Materjal	Õhuvähe tulele avatud küljel olev kiht	Õhuvähe tulele mitteavatud küljel olev kiht	
			Kihid, mille taha jääb õhuvähe	Kihid, mille taha jääb karkassielement, plaadid või soojustusmaterjal				
Kattekiht (puut)		0,3	0,3	1,0	Kattekiht (kipsplaat, puut)	$k_{pos,unexp,i}$ tabeli 4.4 veeru 3 kohaselt	$1,6 k_{pos,exp,i}$ tabeli 4.3 kohaselt	$3 \Delta t_i$ (või $3 \times \Delta t_n$) tabeli 4.5 kohaselt
		0,4	0,4	1,0	Mineraalvill	$k_{pos,unexp,i} = 1,0$	$1,6 k_{pos,exp,i}$ tabeli 4.3 kohaselt	Δt_i (või Δt_n) tabeli 4.5 kohaselt
		0,6	0,6	1,0				
	Liitekohtadeta		1,0	1,0	1,0			
Kipsplaat, Kipskiudplaat		0,8	0,8	1,0				
Liitekohtadeta		1,0	1,0	1,0				
Mineraalvill		-	0,8	1,0				
	Liitekohtadeta		-	1,0	1,0			

ARVUTUSE TÄPSUS 3 / 3

- Soojusülekanne simulatsioonid LEM tarkvaraga
- Diferentsiaalvõrrandi numbriline lahendus
- Fourier' seadus: soojusvoog kehas on võrdeline temperatuuri gradiendiga
- Tulemus sõltub:
 - Elementide valik
 - **Materjalide kirjeldamine**

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

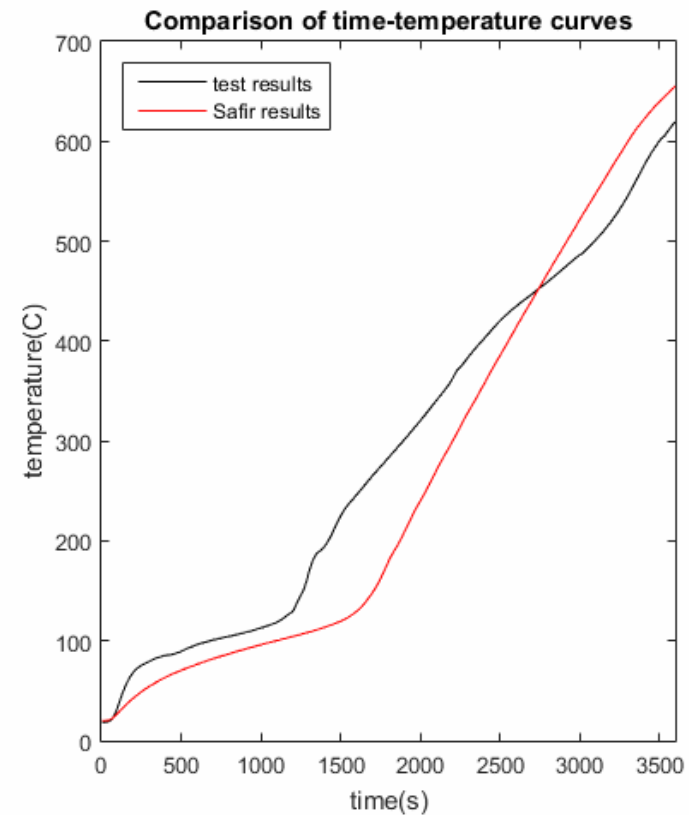
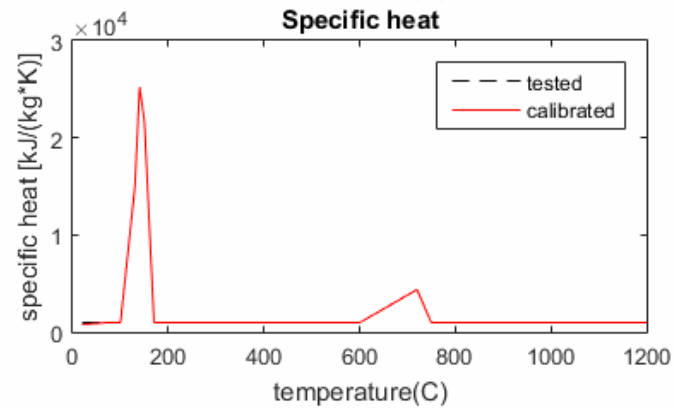
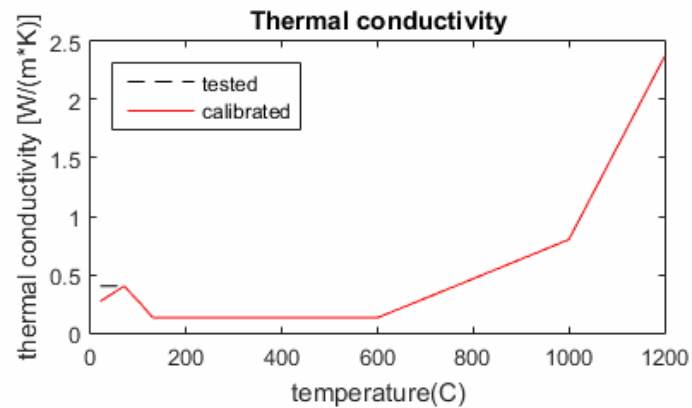
NÄIDE



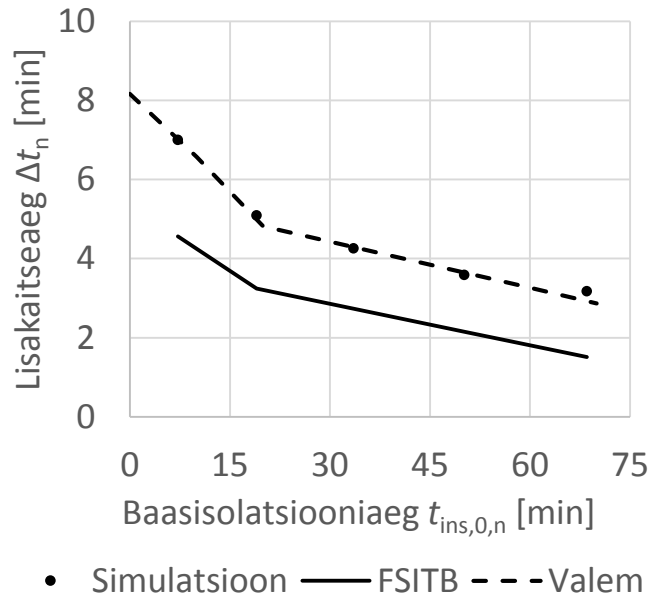
MATERJALIDE TERMIILISED OMADUSED

- Sõltuvad kuumutamise viisist
- Pole võimalik otse katseandmeid rakendada
- Vajalik korrektsioon => efektiivsed termilised omadused

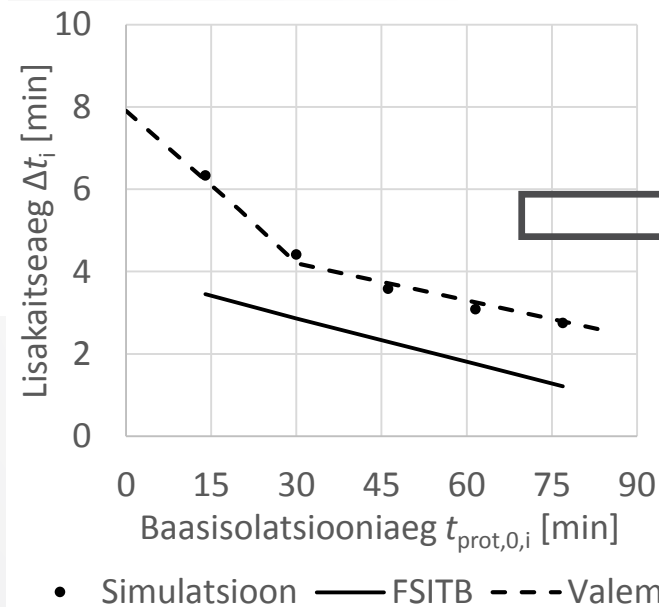
PUITKONSTRUKTSIOONIDE TULETÕKESTUSVÕIME ARVUTUSMEETODI TÄIENDAMINE UUTE MATERJALIDEGA



VALEMITE TULETAMINE



$$\Delta t_n = \begin{cases} 8,17 - 0,16 \cdot t_{ins,0,n} & \text{kui } t_{ins,0,n} < 19 \\ 5,6 - 0,039 \cdot t_{ins,0,n} & \text{kui } t_{ins,0,n} \geq 19 \end{cases}$$



$$\Delta t_i = \begin{cases} 7,9 - 0,12 \cdot t_{prot,0,i} & \text{kui } t_{prot,0,i} < 30 \\ 5,1 - 0,03 \cdot t_{prot,0,i} & \text{kui } t_{prot,0,i} \geq 30 \end{cases}$$

KOKKUVÕTE

- Eraldusfunktsioon ehk EI kriteerium
- Standard EVS-EN 1995-1-2
- Euroopa tehniline juhend
- Täiustatud komponentide liitmise meetod
- Täpsustatud arvutusmudelid – soojusülekande simulatsioonid