LOCAFI+

Temperatuur vertikaalses konstruktsioonielemendis kohaliku põlengu tingimustes

Leping n° 754072

6. Tulepüsivuse määramine

6. Tulepüsivuse määramine

6.1. Üldine lahenduskäik

Samm 1 : Termilise koormuse määramine

Samm 2 : Termiline analüüs

Samm 3 : Mehaaniline analüüs

Üldine protseduur samm-sammult (Samm 1 → Samm 2 → Samm 3), kuid täpsemalt tuleb vastasmõju arvestada mõlemas suunas. Kui seda topeltvastsmõju ei arvestata, peab insener olema teadlik vastavatest eeldustest!

- Elemendi deformatsioonid/siirded võivad mõjutada põlengu arengut
- Elemendi deformatsioonid/siirded võivad mõjutada tule termilist mõju elemendile
- Elemendi kõrgenenud temperatuur võib mõjutada energia neeldumist seintes/põrandas
- Plastsed deformatsioonid ja pragunemine võivad põhjustada muude elementide soojenemist või soojuse leket
- …

6. Tulepüsivuse määramine

6.2. Põlengu stsenaariumi määratlus

6.2.1. Sektsiooni põleng

- Standard tulekahju mudel (ISO-834, Süsivesinik,…)
- Loomuliku tulekahju mudel (parameetriline mudel vastavalt standardi EN 1991-1-2 Lisale A, OZone tarkvara, mille aluseks on EN 1991-1-2 Lisa D ja E)

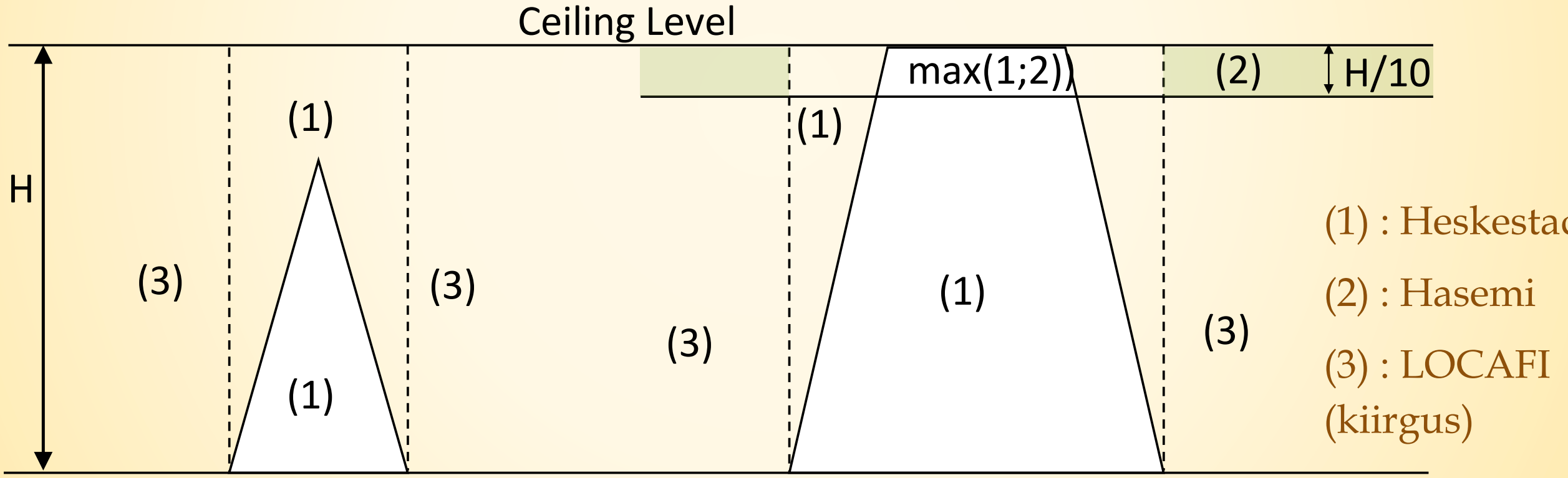
6.2.2. Kohalik põleng

- Põlengu stsenaariumi määrab insener/ametkond (diameeter, RHR)

6. Tulepüsivuse määramine

6.2. Põlengustsenaariumi määratlus

6.2.2. Kohalik põleng



6. Tulepüsivuse määramine

[W.m^{-2}]

6.3. Termiline analüüs

6.3.1. Püsiv temperatuur

Püsiv temperatuur on temperatuur θ, mille juures neelduv soojusvoog on tasakaalus eralduva (konvektiivse ja kiirguva) vooga

$$0 = \underbrace{\alpha_c(\theta - 20)}_{\text{Eralduv konvektiivne voog}} + \underbrace{\sigma\varepsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4]}_{\text{Eralduv kiirgusvoog}} - \underbrace{\varepsilon * \dot{h}_{m,r}}_{\text{Vastuvõetav voog}}$$

Sektsioonitulekahju korral tuleb keskmine langev kiirgusvoog $\dot{h}_{m,r}$ asendada $\dot{h}_{m,tot}$, mis sisaldab nii konvektiivset kui kiirgusvoogu.

$$\dot{h}_{m,tot} = min\left(\dot{h}_{m,r} + \dot{h}_{m,c}; 100000\right) \qquad [\mathrm{W.m^{-2}}]$$

See lihtsustatud meetod ei arvesta elemendi soojusinertsiga

6. Tulepüsivuse määramine

6.3. Termiline analüüs

6.3.2. Samm-sammuline protseduur (ühtlane temperatuur)

Elemendi temperatuur määratakse soojuslikust tasakaalust

$$\rho_a c_a(T)\frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V}\left[\varepsilon * \dot{h}_{m,r} + \alpha_c(20-\theta) + \varepsilon\left(\sigma(293^4 - (\theta+273)^4)\right)\right]$$

ρ_a, c_a, ja A_m/V on elemendi tihedus [kg.m^{-3}], erisoojus [J.kg^{-1}.K^{-1}] ja massiivsus [m^{-1}]

EN 1993-1-2 kohaselt ei tohi aja samm Δt olla pikem kui 5 sekundit

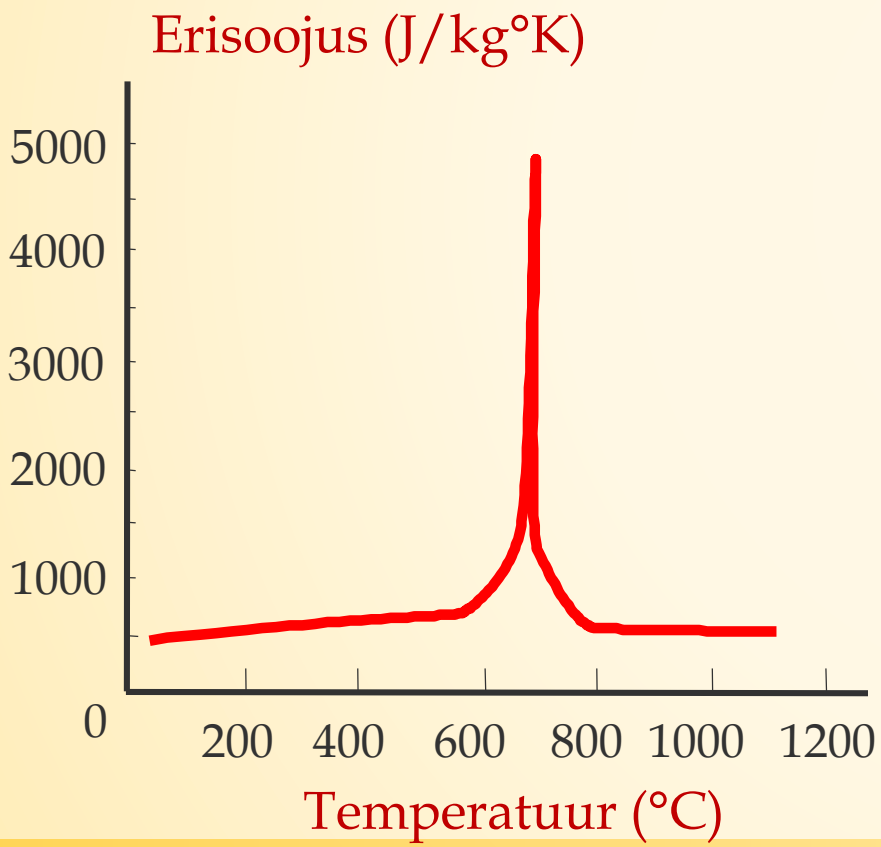
Sektsioonitulekahju puhul tuleb langev kiirgusvoog $\dot{h}_{m,r}$ asendada $\dot{h}_{tot}$, mis sisaldab nii konvektiivset kui kiirgusvoogu.

$$\dot{h}_{m,tot} = min\left(\dot{h}_{m,r} + \dot{h}_{m,c}; 100000\right) \qquad [\mathrm{W.m^{-2}}]$$

6. Tulepüsivuse määramine

6.3. Termiline analüüs

6.3.2. Samm-sammuline protseduur (ühtlane temperatuur)



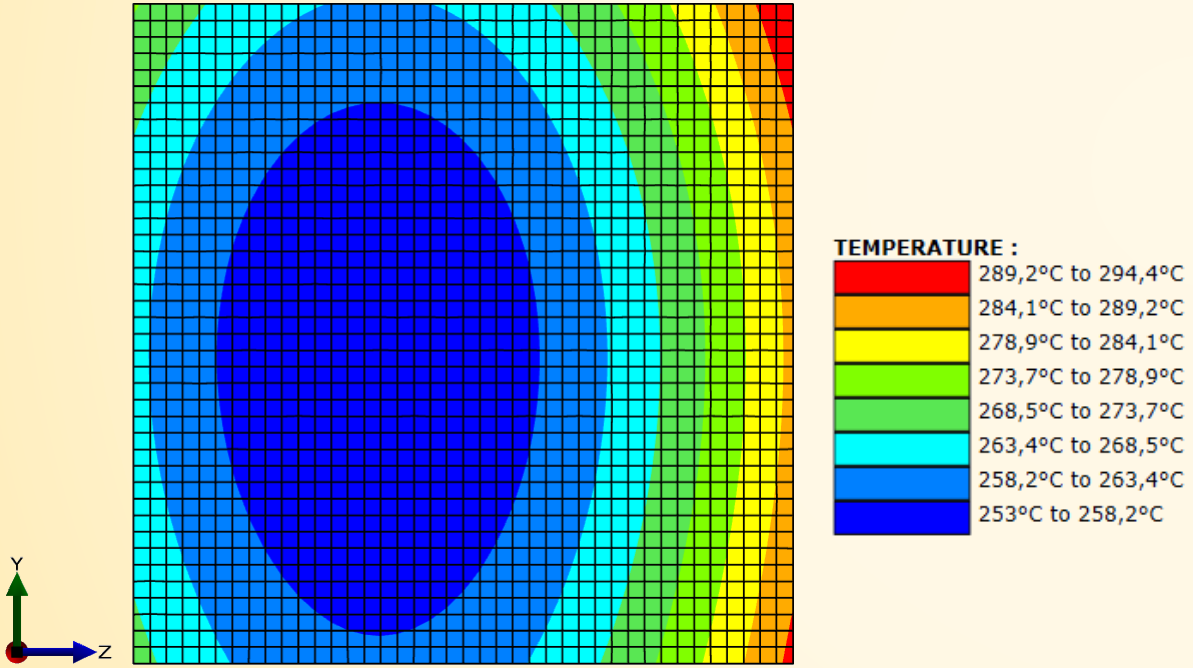
Terase mahumass : 7850 kg/m^3

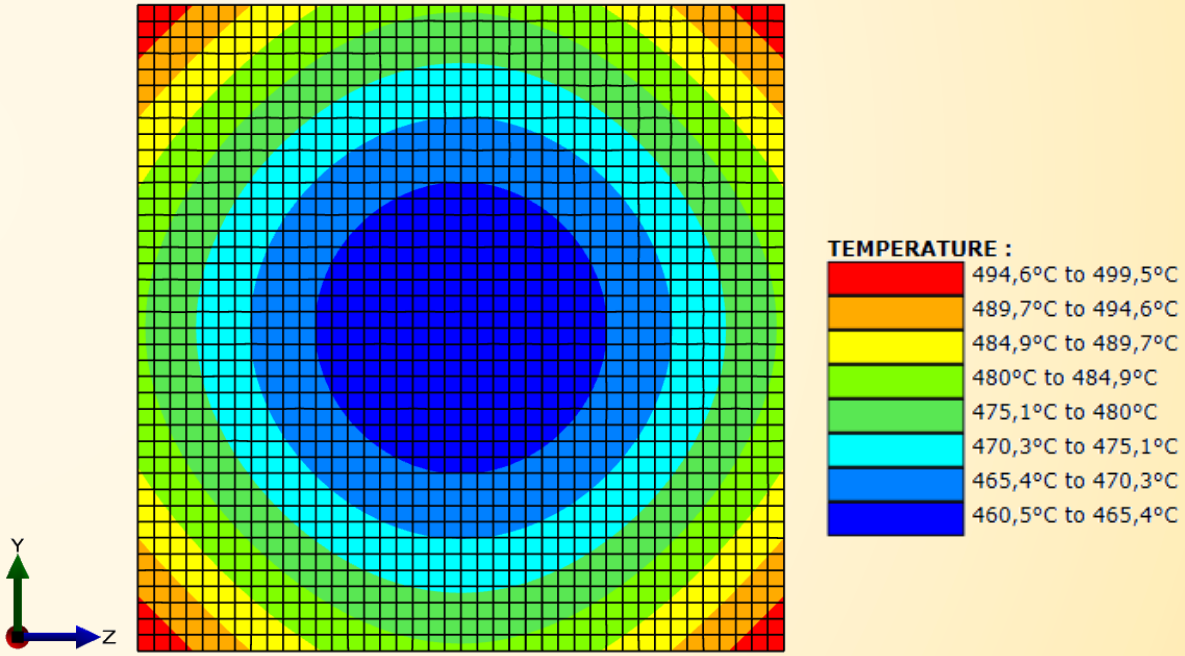
on temperatuurist sõltumatu

6. Tulepüsivuse määramine

6.3. Termiline analüüs

6.3.3. F.E. termiline analüüs (ebaühtlane temperatuur)





Temperatuuri jaotus [°C] pärast 33 minutit ruudukujulise ristlõikega 130[mm]x130[mm] 3.36 [m] postil, mida ümbmritsevad 3 autot ja 1 kaubik a) kõrgusel 0.94[m] ; b) kõrgusel 3.1[m]

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.1. Üldreeglid standardis EN 1993-1-2

Eurokoodeks 3 tulepüsivuse osas käsitletakse ainult terasest konstruktsioonide kandevõimet tules R.

Konstruktsioonide kandevõime on tagatud, kui vastava põlengu kestuse t korral

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$$

kus $E_{fi,d,t}$: arvutuslike koormuste mõju (Eurokoodeks 0 ja 1)

$R_{fi,d,t}$: konstruktsiooni arvutuslik kandevõime ajahetkel t

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.1. Üldised reeglid standardis EN 1993-1-2

Alaline ja ajutine kombinatsioon

$$E_d = 1.2*\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1.5*Q_{k,1} + 1.5*\sum_{i \geq 2} \Psi_{0,i}\, Q_{k,i}$$

Erakorraline kombinatsioon

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{1,1}\, Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i}\, Q_{k,i}$$

Soovituslik, täpsemalt vt Rahvuslikust lisast

Koormus	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Klass A : eluruumid	0.7	0.5	0.3
Klass B : bürooruumid	0.7	0.5	0.3
Klass C : kogunemisruumid	0.7	0.7	0.6
Klass D : kaubandusruumid	0.7	0.7	0.6
Klass E : laoruumid	1	0.9	0.8
…	…	…	…

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.1. Üldreeglid standardis EN 1993-1-2

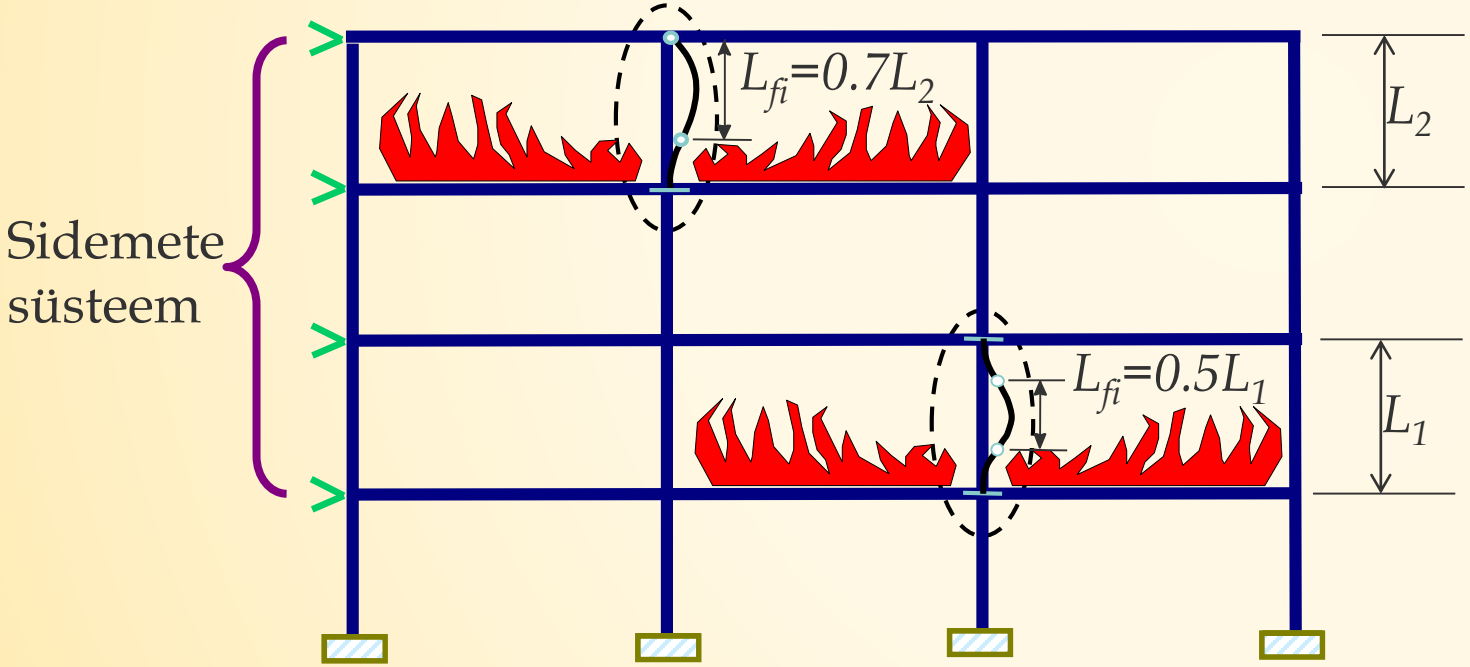
Terase osavarutegurid kõrgel temperatuuril

Arvutuse tüüp	Norm. Temp.	Põleng
Ristlõige	$\gamma_{M0} = 1.0$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Stabiilsus	$\gamma_{M1} = 1.0$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Tõmbele purunemine	$\gamma_{M2} = 1.25$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Liited	$\gamma_{M2} = 1.25$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.1. Üldreeglid standardis EN 1993-1-2



Tingimused :

- Siirdumatute sõlmedega
- Jätkuvad postid ja otsad kinnitatud
- Postide ja talade tulepüsivus on sama

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.1. Üldreeglid standardis EN 1993-1-2

Tulepüsivuse kontroll ühega kolmest meetodits :

Temperatuur : $\theta_{cr,d} \geq \theta_d$

Kõige lihtsam, kehtib ainult ühtlase temperatuuri T° korral

Kandevõime : $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$

Sobiv käsitsiarvutuseks (arvestab vähendatud kandevõimet ette-nähtud aja jooksul)

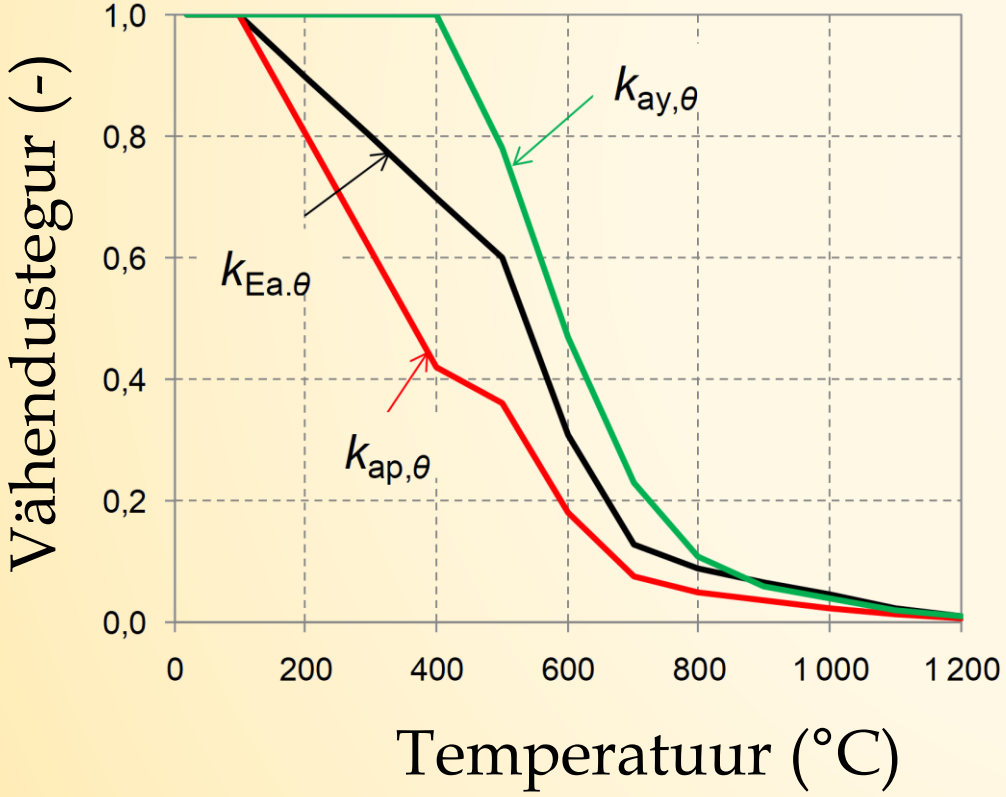
Aeg : $t_{fi,d} \geq t_{fi,required}$

Kasutatav ainult keerukamate vahenditega, nagu FEM mudelid

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.2. Posti analüütiline kontroll EN 1993-1-2 kohaselt



Temperatuur

$k_{y,\theta}$: voolavuspiiri vähendustegur

$k_{E,\theta}$: Young'i mooduli vähendustegur

$k_{p,\theta}$: proportsionaalsuspiiri vähendustegur

Kehtiv EN 1993-1-2 kehtib terastele S235 kuni S460

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.2. Posti analüütiline kontroll EN 1993-1-2 kohaselt

Temperatuur

Koormuse erakorraline kombinatsioon

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

täpsemalt vt *Rahvuslik lisa*

$$E_d = 1.2 * \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1.5 * Q_{k,1} + 1.5 * \sum_{i \geq 2} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Koormatusastme tegur

$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d,t}}{E_d}$$

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.1. posti analüütiline kontroll EN 1993-1-2 kohaselt

Temperatuur

Koormatusastme tegur

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{2.1} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q.1} Q_{k.1}}$$

Eesti rahvuslikus lisas $\Psi_{1,1}$ vt Rahvuslik lisa

$Q_{k,1}/G_k$	η_{fi}
0	0.74
1	0.53
2	0.46
4	0.41

Põlengu arvutustes erakorraline arvutusolukord

γ_{GA} = 1.0 Alaline koormus;

$\psi_{2.1}$ = 0.3 Kombinatsioonitegur; muutuvkoormus, büroo

Normaaltemperatuur, ELU arvutusolukord

γ_G = 1.2 Alaline koormus;

$\gamma_{Q.1}$ = 1.50 Kombinatsioonitegur; muutuvkoormused

EN 1993-1-2 soovituslik η_{fi} = 0.65 (v.a. klass E, η_{fi} = 0.7)

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.2. Posti analüütiline kontroll EN 1993-1-2 kohaselt

Temperatuur

Erakorraline koormuskombinatsioon

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Soovituslik, täpsemalt vt Rahvuslik lisa

Koormatusastme tegur

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d,t}}{R_d} < \eta_{fi}$$

Arvutuslik kandevõime normaaltemperatuuril

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.1. Posti analüütiline kontroll EN 1993-1-2 kohaselt

Temperatuur

Kasutusaste

$$\mu_0 = \left(\frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,0}} \right) = \eta_{fi,t} \left(\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \right)$$

- Arvestab osavaruteguritega normaal- ja kõrgetel temperatuuridel T° (tavaliselt on need mõlemad 1.0)
- Võimaldab otse arvutada kriitilise temperatuuri T°
- Kui kandevõime on määratud stabiilsuse kaotamisega, on vajalik teada tingsaledust

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.1. Posti analüütiline kontroll EN 1993-1-2 kohaselt

Temperatuur

$\bar{\lambda}_{fi,0}$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
μ_0											
0.04	1000	977	949	913	880	839	787	742	696	678	659
0.06	900	885	866	837	795	756	700	679	656	630	602
0.08	860	839	811	785	749	697	674	647	616	588	564
0.10	820	797	780	752	703	677	648	614	585	557	527
0.12	792	777	755	719	685	656	622	588	559	526	474
0.14	775	757	730	694	668	636	597	567	533	487	373
0.16	758	737	705	681	652	615	580	546	507	408	
0.18	742	717	691	668	636	596	563	524	453		
0.20	725	698	680	655	619	582	545	503	384		
0.22	708	689	669	641	603	568	528	457			
0.24	696	679	658	628	591	554	511	406			
0.26	688	670	647	615	579	540	485				
0.28	679	660	636	602	568	526	446				
…	…	…	…	…	…	…	…				

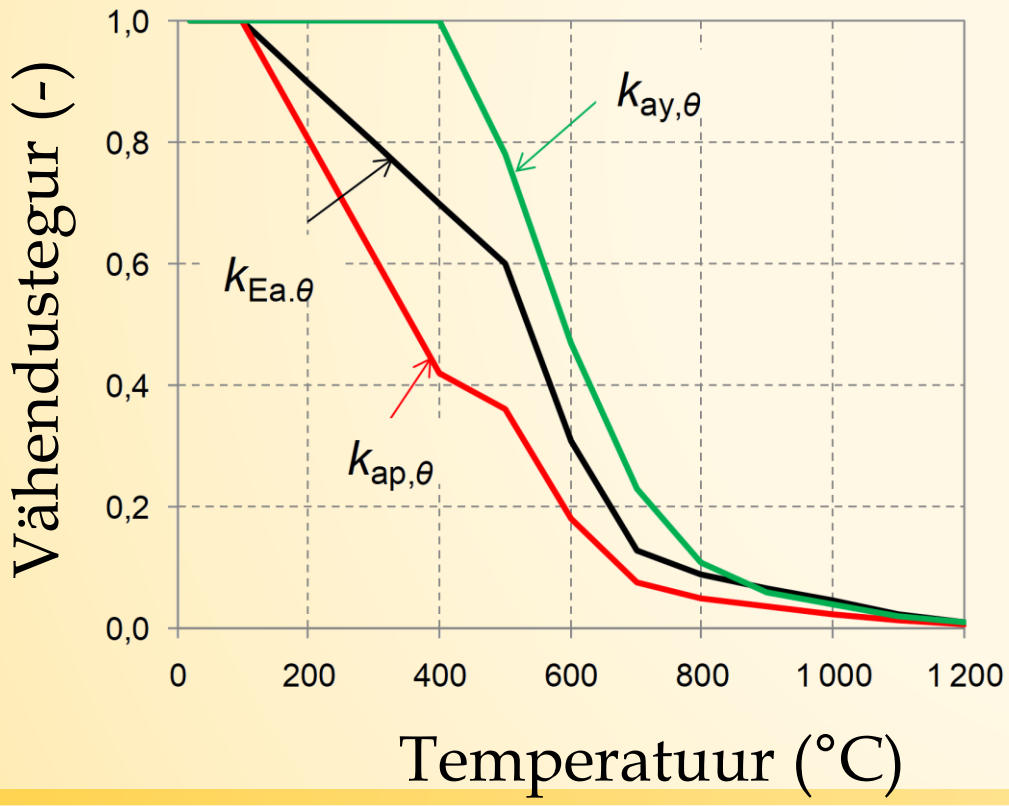
Teraselementide stabiilsuse kaotust määrav kriitiline temperatuur on toodud tabelis, mis on koostatud järgmistel alustel:

- Tingsaledus ajahetkel 0
- Ja koormatusaste $\mu_0 = N_{fi,d,t} / N_{pl,fi,0}$
- Iga terase klassi jaoks on tabeliandmed

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.2. Posti analüütiline kontroll EN 1993-1-2 kohaselt



Kandevõime

$k_{y,\theta}$: voolavuspiiri vähendustegur

$k_{E,\theta}$: Young'i mooduli vähendustegur

$k_{p,\theta}$: proportsionaalsuspiiri vähendustegur

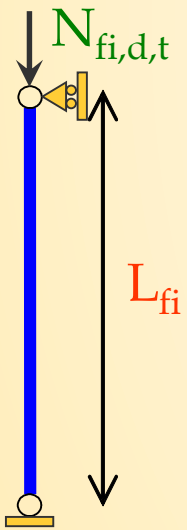
Kehtiv EN 1993-1-2 kehtib terase klassidele S235 kuni S460

6. Tulepüsivuse määramine

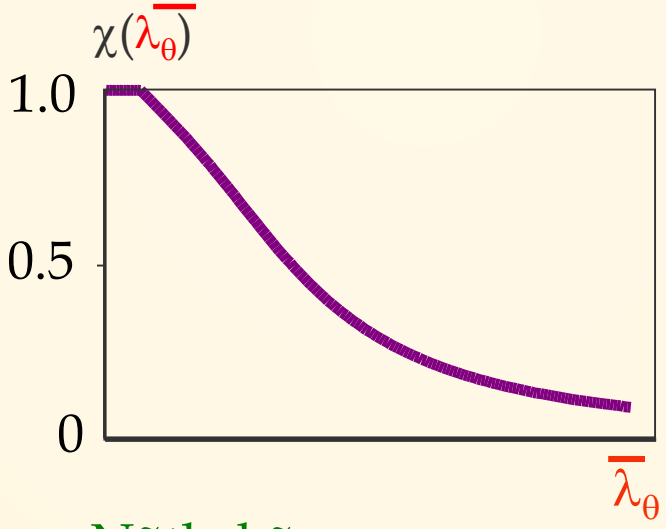
6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.1. Posti analüütiline kontroll EN 1993-1-2 kohaselt

Kandevõime



Ristlõike temperatuur



Nõtkekõver

$$\alpha = 0.65\sqrt{\frac{235}{f_y}} \qquad \overline{\lambda_\theta} = \overline{\lambda}\sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2}\left[1 + \alpha\overline{\lambda_\theta} + \overline{\lambda_\theta}^2\right]$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \overline{\lambda_\theta}^2}}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi}\, A\, k_{y,\theta}\, f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.2. Posti analüütiline kontroll EN 1993-1-2 kohaselt

Kandevõime

Erakorraline koormuskombinatsioon

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Eestis soovituslik, vt Rahvuslik lisa

Kontrollikriteerium

$$\mathbf{R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}}$$

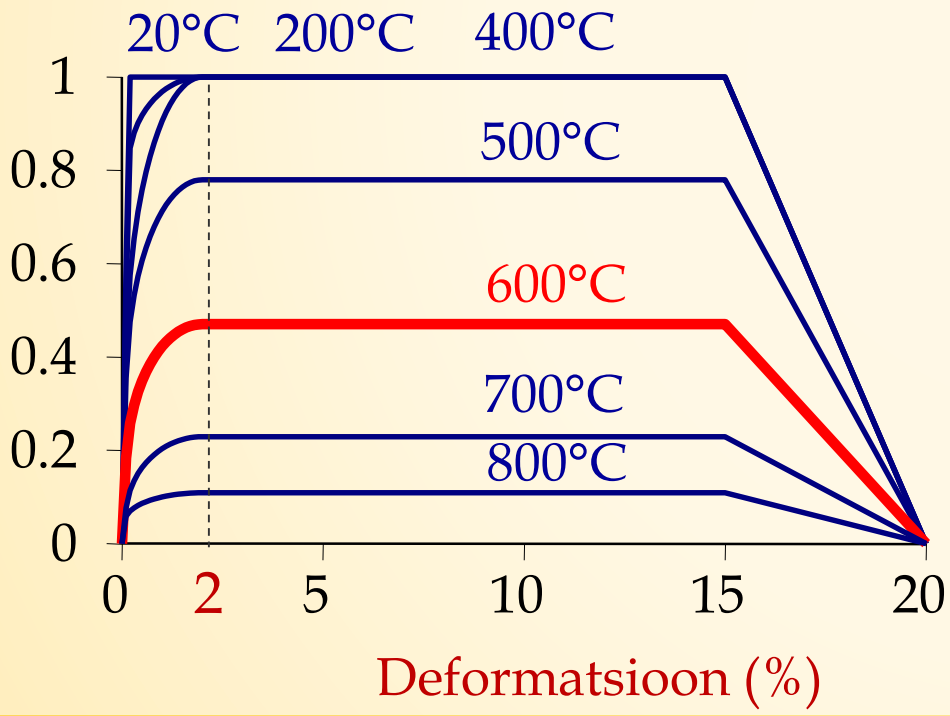
6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.3. Lõplike elementide meetodi

Normaliseeritud

Aeg

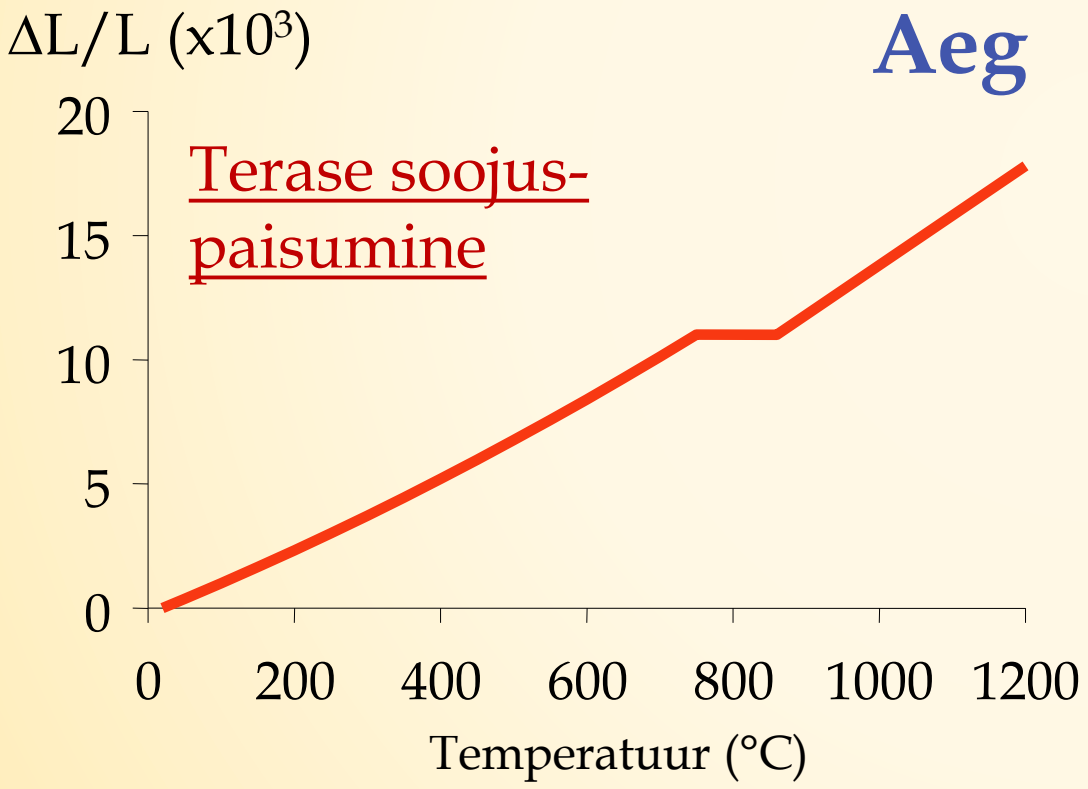


- Terase pinge-pikenemise diagramm on mittelineaarne (elastic, paraboolne, platoo, langev lõik)
- Voolavuspiir 600°C juures vähenenud üle 50%

6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.3. FEM analüüs



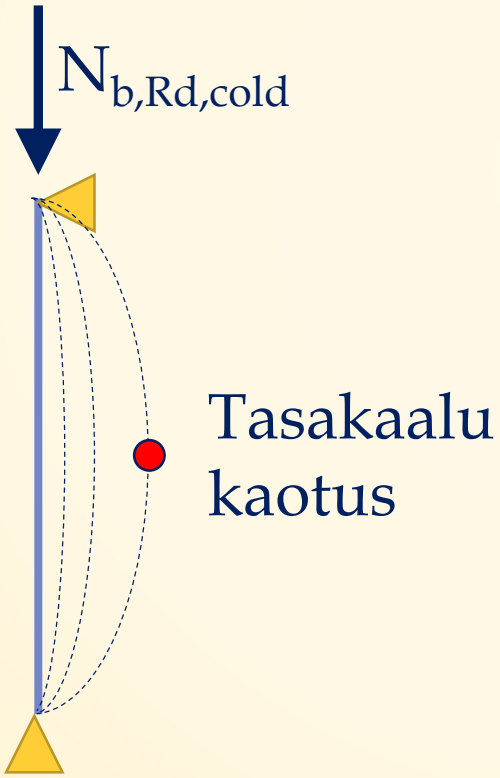
6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.3. FEM analüüs

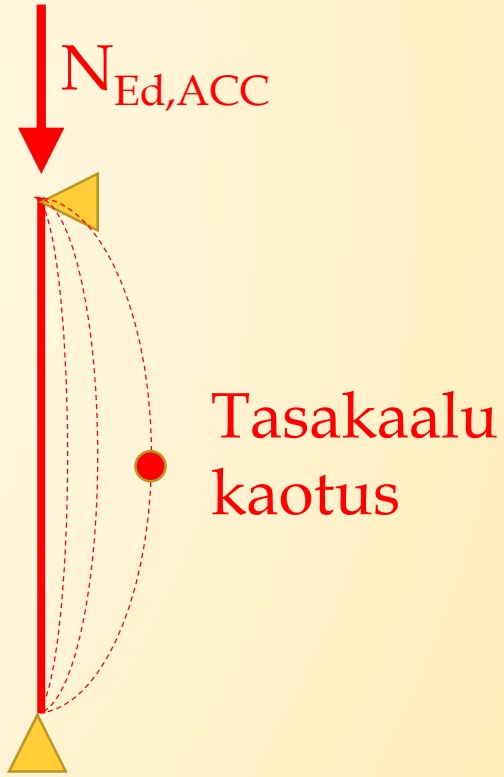
<u>Normaal-temperatuur</u>

- Alghälve
- Koormus suureneb kuni kandevõime kaotuseni



<u>Kõrge temperatuur</u>

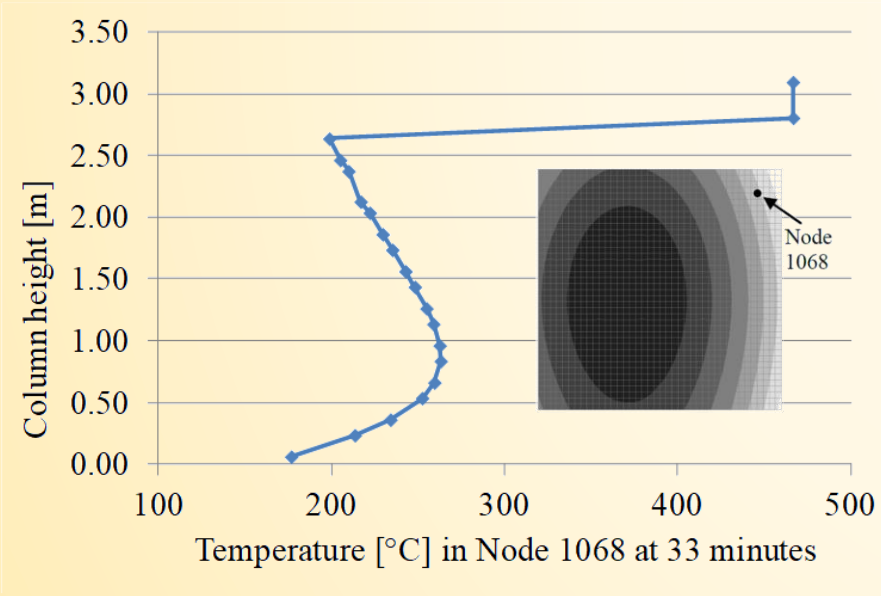
- Alghälve
- Algkoormus
- Temperatuur tõuseb kuni kandevõime kaotuseni



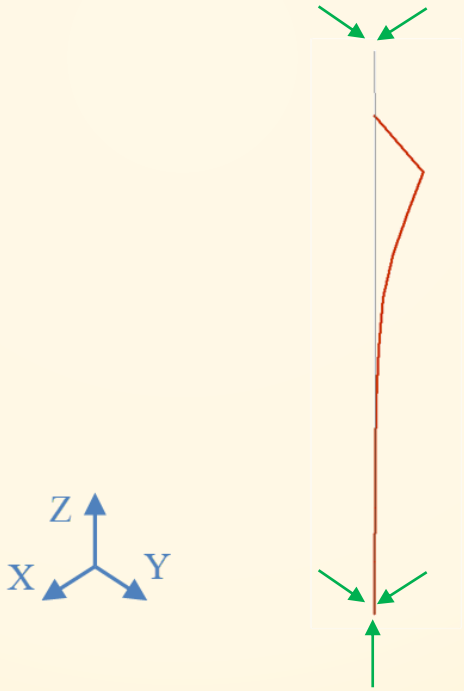
6. Tulepüsivuse määramine

6.4. Mehaaniline analüüs

6.4.3. FEM analüüs



Aeg



Vasakul :

Temperatuuri jaotus 3.36 [m] pikkuse posti sõlmes 1068 pärast 33 minutit, posti ristlõige 130[mm]x130[mm], posti läheduses 3 autot ja 1 kaubik

Paremal:

Posti deformeerunud kuju kandevõime kaotuse hetkel (mõõtkava tegur z-xy 1), posti pikkus 3.36 [m], ristlõige 130[mm]x130[mm], posti läheduses 3 autot ja 1 kaubik