LOCAFI+

Temperatuur vertikaalses konstruktsioonielemendis kohaliku põlengu tingimustes

Leping n° 754072

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.1. Virtuaalse tahke leegi kontseptsioon

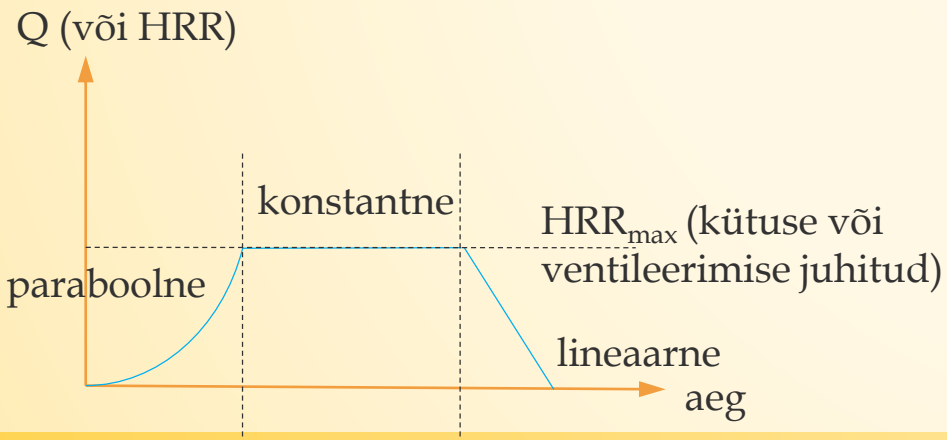
Leegi mudel

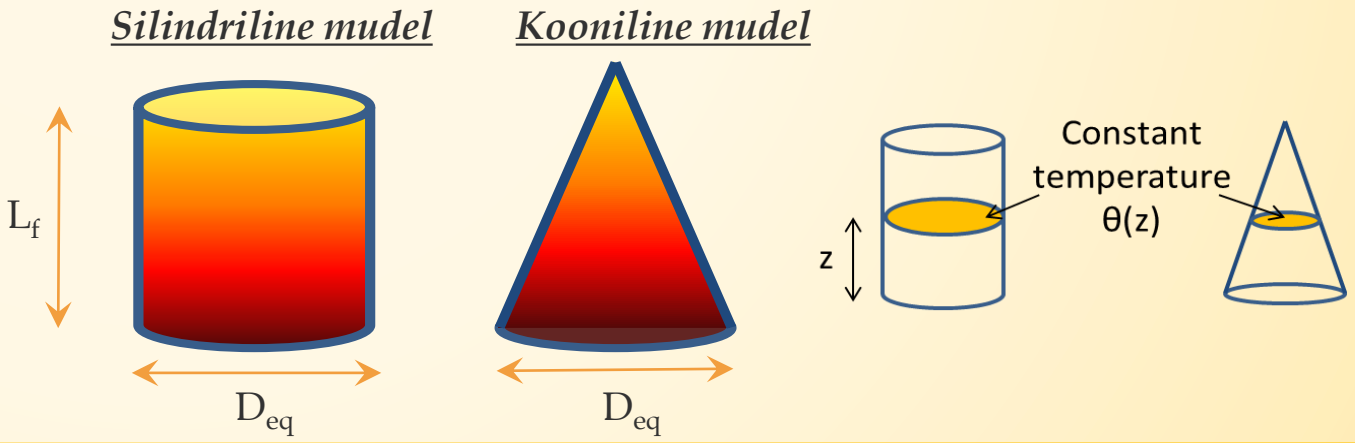
Samm 1: Tule ala muudetakse ekvivalentseks kettaks $D_{fire} = \sqrt{\frac{4.S}{\pi}}$

Samm 2: Soojuse eraldumismäär (HRR) arvutatakse EN 1991-1-2 Lisa E järgi (kasvufaas, püsivfaas, langusfaas)

Samm 3: Leegi pikkus L_f arvutatakse EN 1991-1-2 Annex C järgi $L_f(t) = -1.02\, D_{fire} + 0.0148\, Q(t)^{0.4}$

Samm 4: Tule mõju esitatakse virtuaalse kompaktse koonilise või silindrilise mudelina, mille määravad D_{eq} and L_f



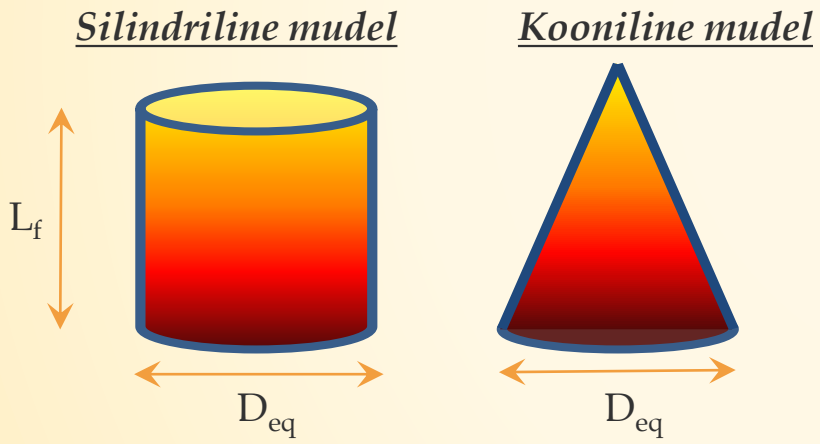


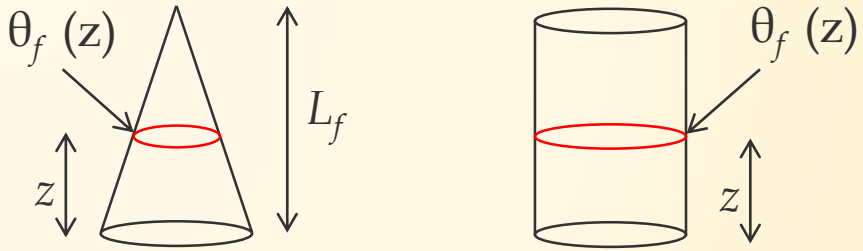
4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.1. Virtuaalse tahke leegi kontseptsioon

Leegi mudel

Kui leek ei ulatu laeni ($L_f < H_{ceiling}$ või lagi puudub)





$$\theta_f(z) = \min\left(900; 20 + 0.25\left(0.8Q(t)\right)^{2/3}(z - z_0)^{-5/3}\right)$$

$$z_0 = -1.02D_{fire} + 0.00524\, Q(t)^{0.4}$$

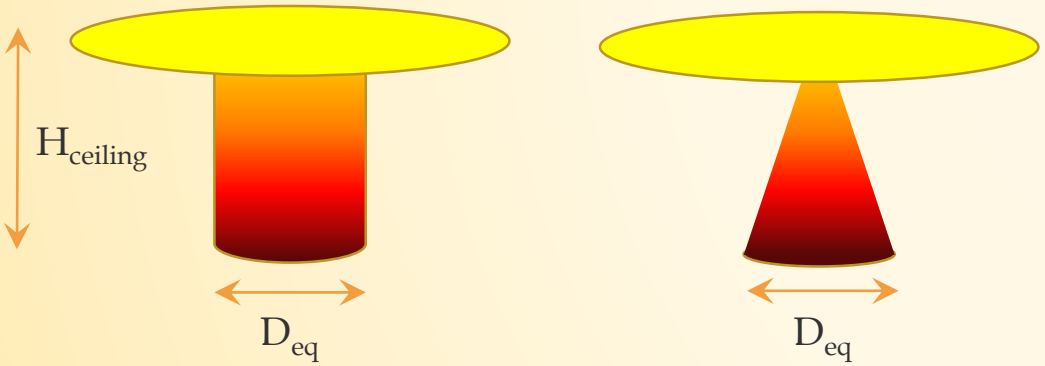
4. Analüütiline meetod ja valideerimine

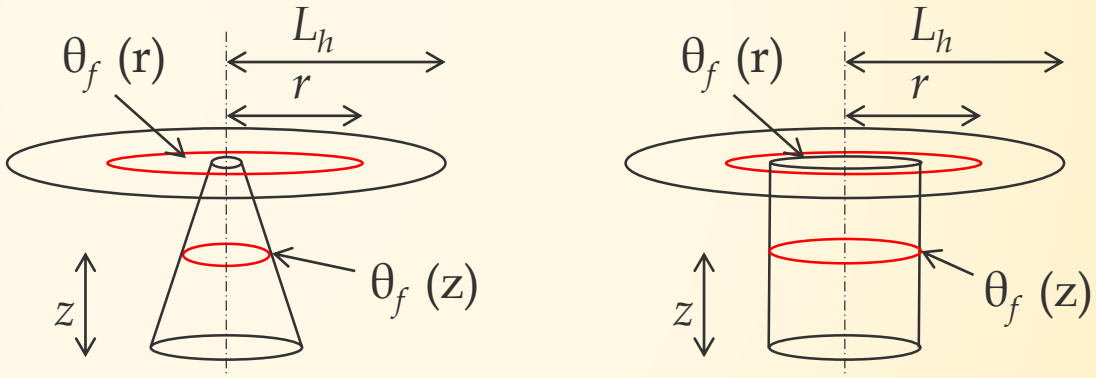
4.1. Virtuaalse tahke leegi kontseptsioon

Leegi mudel

Kui leek ulatub laeni ($L_f > H_{ceiling}$)

Silindriline mudel ***Kooniline mudel***





$$\theta_f(z) = \min\left(900; 20 + 0.25\left(0.8Q(t)\right)^{2/3}(z - z_0)^{-5/3}\right)$$

$$z_0 = -1.02D_{fire} + 0.00524\, Q(t)^{0.4}$$

$$L_h(t) = H\left(2.9Q(t)_H^{0.33} - 1\right)$$

$\dot{h}(r)$ *arvutatud Hasemi mudelist*

$\theta_f(r)$ *satisfies to* $\dot{h}(r) = \sigma\left(\left(\theta_f(r) + 273\right)^4 - 293^4\right) + 35\left(\theta_f(r) - 20\right)$

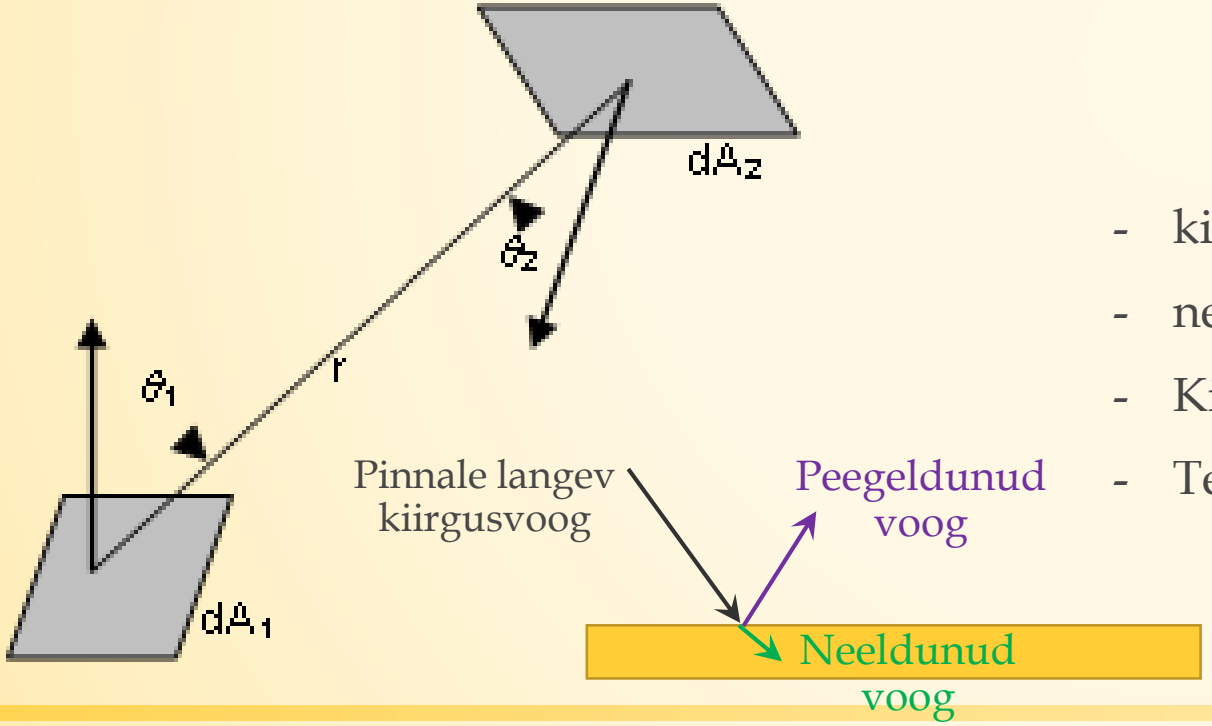
Märkus : rõnga mõju on väike, välja arvatud siis, kui element on rõnga sees → võetakse arvesse ainult lae tasandis olevatele elementidele

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.2. Geomeetriline meetod soojusvoo hindamiseks

Soojuskiirgusvoo hindamine

Soojuskiirgusvoog antud kiirguspinnalt dA_1 ja vastuvõetav pinnal dA_2 on:



$$\emptyset_{dA_1 \to dA_2} = \alpha_2 \varepsilon_1 \sigma . T^4 \frac{cos(\theta_1) cos(\theta_2) dA_1 dA_2}{\pi r^2}$$

- kiirgusvõime ε_1 (kiirgavalt pinnalt) on leekidel 1
- neelduvus α_2 sõltub vastuvõtva pinna omadustest
- Kirchoff'i seadus : neelduvus (α) = kiirgusvõime (ε)
- Terasel, $\varepsilon = \alpha = 0.7$

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

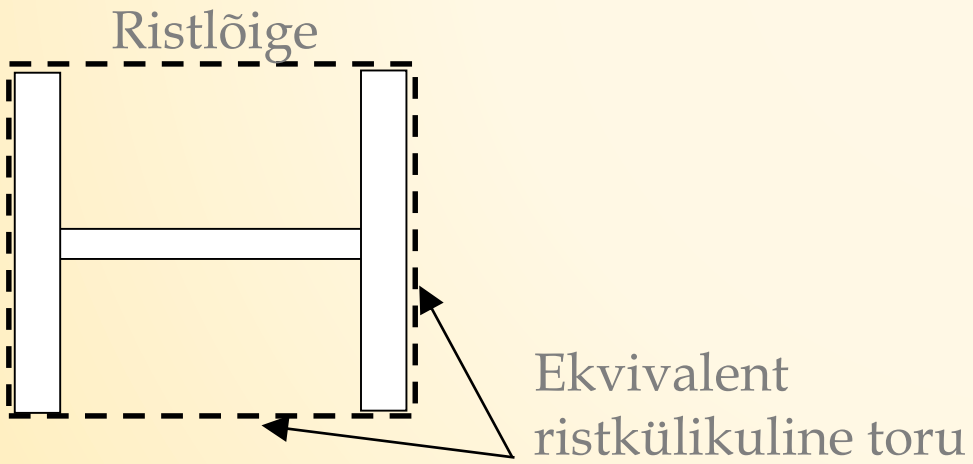
4.2. Geomeetriline meetod soojusvoo hindamiseks

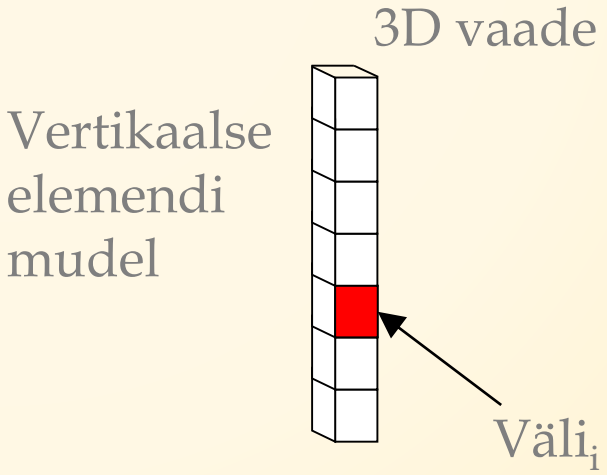
Vertikaalse elemendi mudel

Nõgusate osadega ristlõigetel on **varjefekt** → lihtsustatult arvutatakse soojusvood kumeral perimeetril

I- või H-ristlõigete puhul asendatakse ristlõige ristkülikulise toruristlõikega (vastavalt EN 1991-1-2 Lisa G)

Seejärel jaotatakse perimeetri pind väljadeks

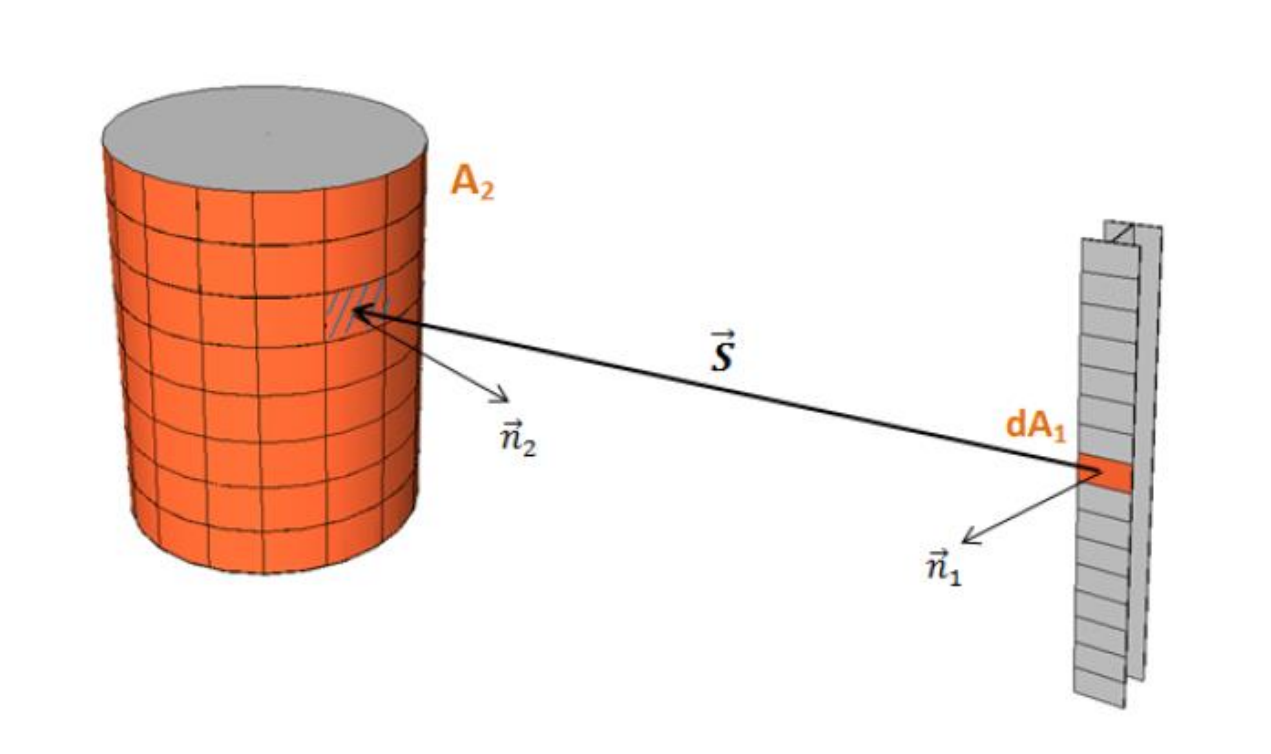




4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.2. Geomeetriline meetod soojusvoo hindamiseks

Numbriline integreerimine



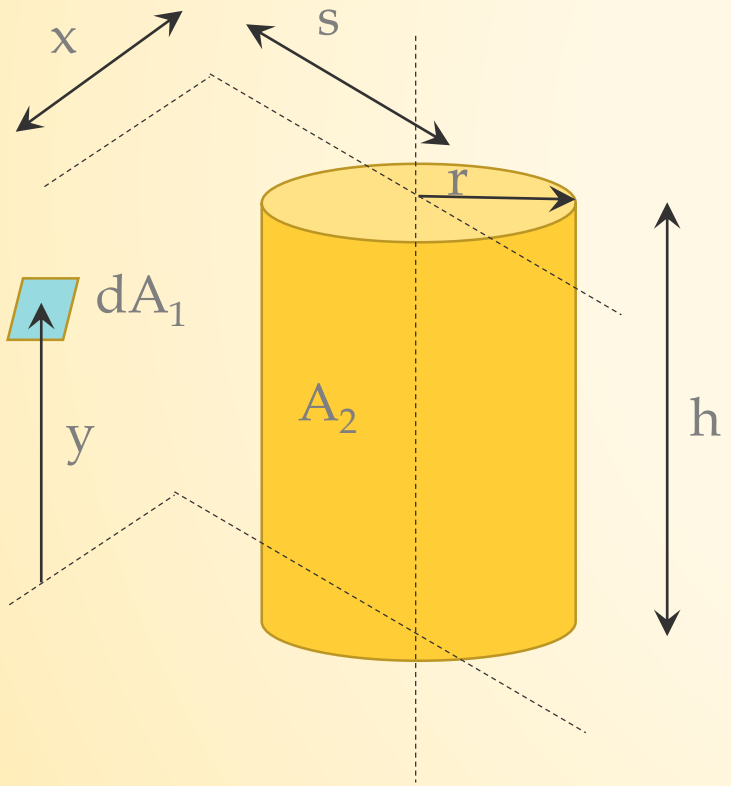
$$F_{d1-2} \simeq \frac{-1}{\pi} \sum_i \frac{(\vec{S}.\vec{n_1})(\vec{S}.\vec{n_2})}{S^4} \Delta A_i$$

- Arvutatakse iga "üksik" kiirguse ülekanne (igal ajasammul).
- Rakendustes on vaja vastavat tarkvara.
- Lubab rakendada mitteühtlasi tingimusi (kiirgusvood) ristlõike perimeetril.

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Lõpmatu pinna ja silindri vaheline seos



$$F_{dA_1 \to A_2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi}\left\{\begin{array}{l} cos^{-1}\left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1}\right) + cos^{-1}\left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1}\right) \\ -Y\left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A-1)^2 + 4Y^2}} cos^{-1}\left(\frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)}\right)\right] \\ -\sqrt{C}\frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} cos^{-1}\left(\frac{C - B + 1}{\sqrt{B}(C + B - 1)}\right) \\ +H cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{B}}\right) \end{array}\right\}$$

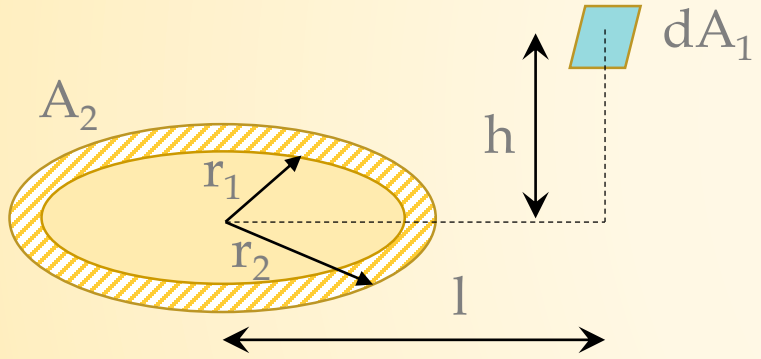
$$S = s/r$$
$$X = x/r$$
$$H = h/r$$
$$A = X^2 + Y^2 + S^2$$
$$B = S^2 + X^2$$
$$C = (H - Y)^2$$

Kehtib ainult siis, kui dA_1 –ga määratud pind ei lõiku silindriga!

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Lõpmatu pinna ja ringi vaheline seos



$$F_{dA_1 \to A_2} = \frac{H}{2}\left(\frac{H^2 + R_2^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_2^2 + 1)^2 - 4R_2^2}} - \frac{H^2 + R_1^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_1^2 + 1)^2 - 4R_1^2}}\right)$$

$$H = h/l$$
$$R = r/l$$

Kehtib ainult siis kui $l > r_2$!

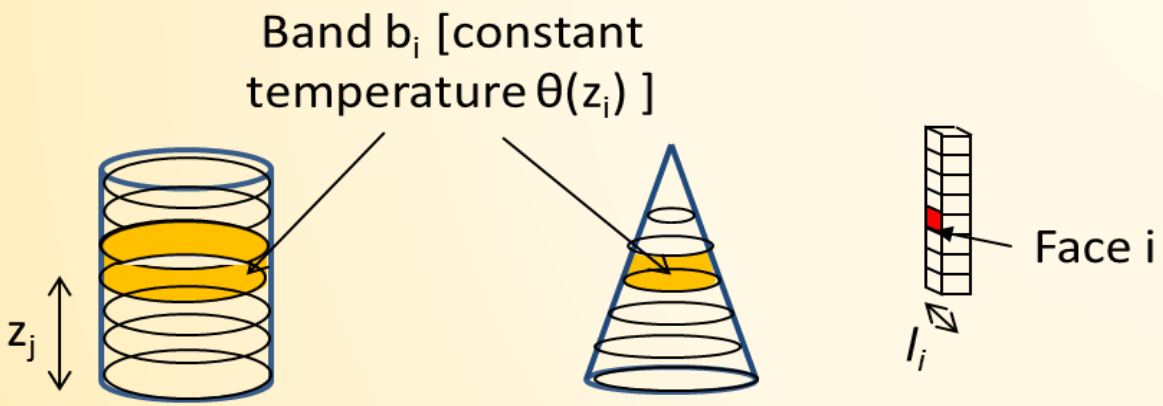
4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Leegi jaotamine silindriteks ja rõngasteks

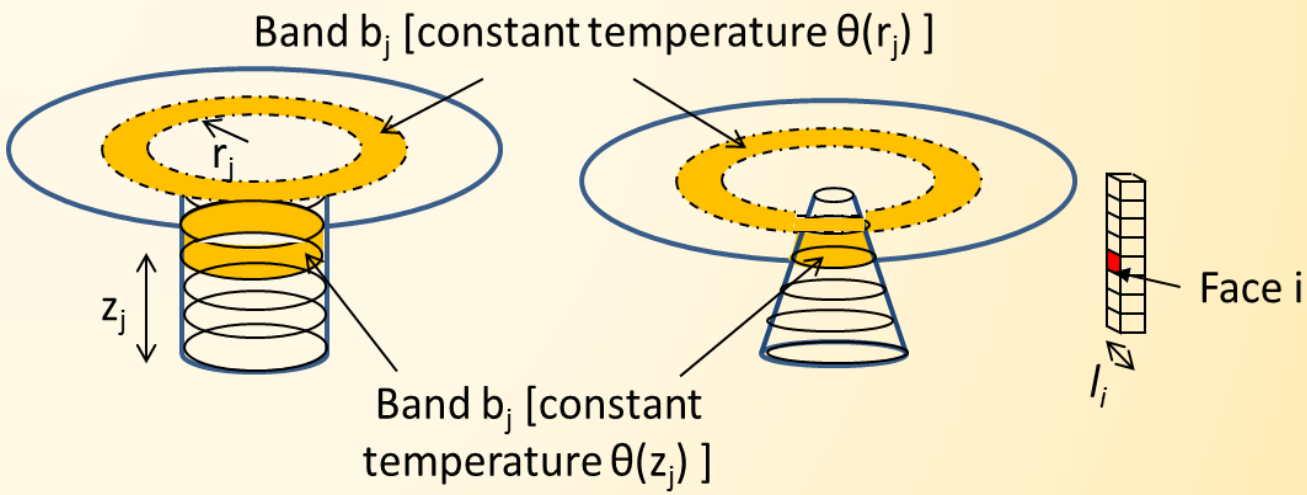
Kui leek ei ulatu laeni

($L_f < H_{ceiling}$ või lagi puudub)



Kui leek ulatub laeni

($L_f > H_{ceiling}$)

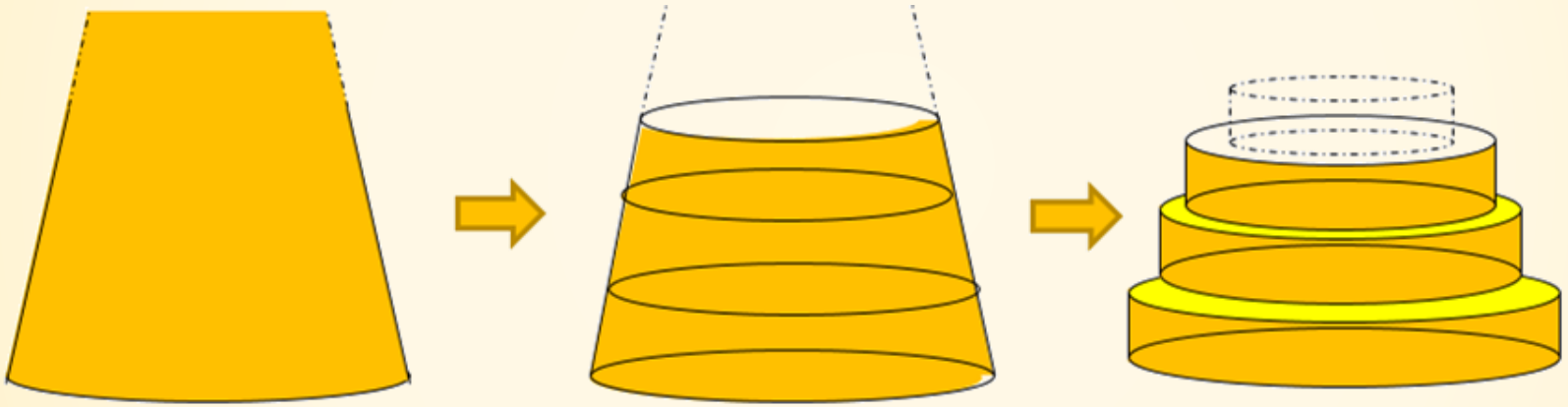


Märkus: rõnga osatähtsus on väga väike, v.a. kui element on ringi sees → arvestatakse ainult lae tasandis olevatele elementidele

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Leegi jaotamine silindriteks ja ringideks (Lihtsustus 1)



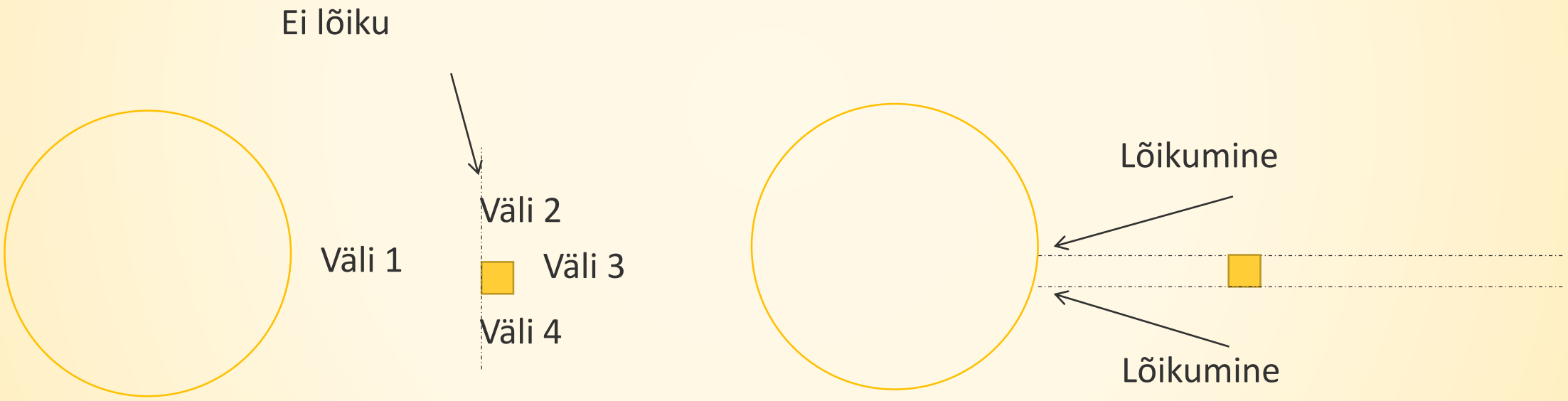
Kooniline tahke leek | Tüvikoonused | Silindrid ja rõngad

! Rõngaste mõju hüljates alahindame vastuvõetavat soojusvoogu ja võime langeva soojusvoo tule kohal saada isegi võrdseks 0-ga !

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Leegi jaotamine silindriteks ja rõngasteks (Lihtsustus 2)

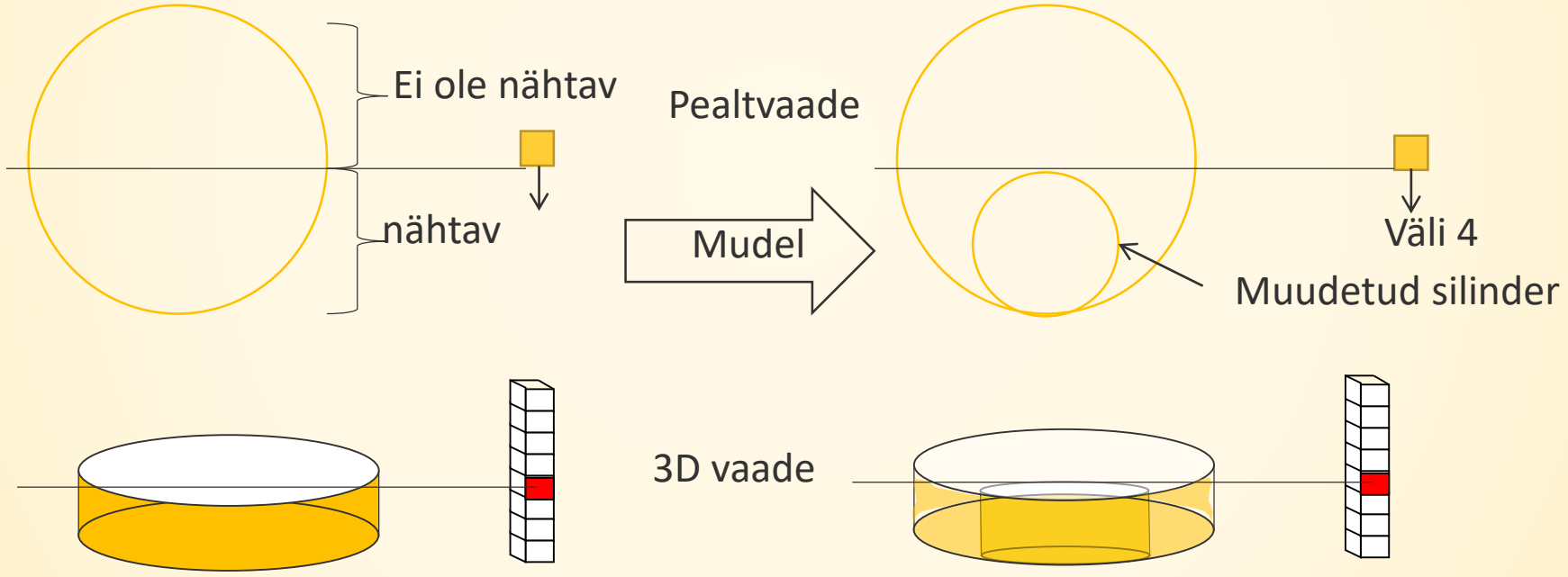


! Silindri jaoks avaldis ei kehti, kui vastuvõttev pind lõikub silindriga !

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Leegi jaotamine silindriteks ja rõngasteks (Lihtsustus 2)

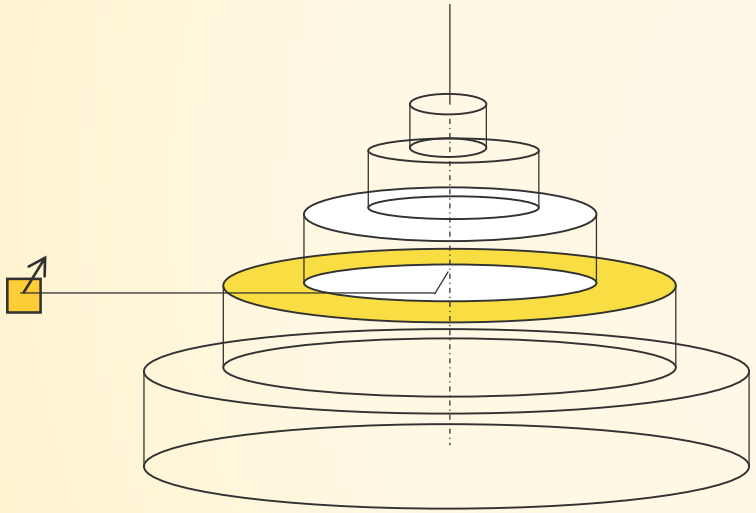


Sellel juhul muudetakse algne silinder silindriks nähtavas tsoonis

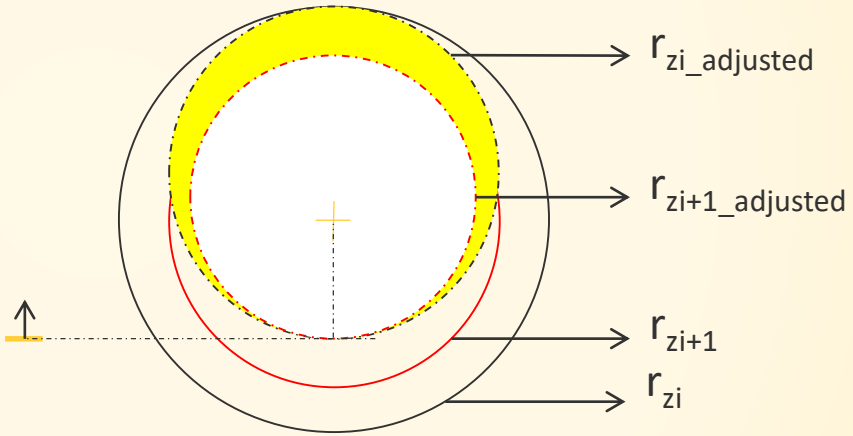
4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Leegi jaotamine silindriteks ja rõngasteks (Lihtsustus 3)



3D vaade



Pealtvaade

Osa ringidest on „varjatud“ ülevalpool asuva silindriga → arvestada tuleb vähendatud tsooniga (sellest vähendamisest loobumine on tagavaru kasuks)

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Täiendavad märkused

- Soovituslik silindri paksus on 50 cm
- Lae all olevatele elementidele tuleks lisada konvektsiooni mõju → Hasemi
- Mitme leegi puhul tuleb kõikide leekide mõjud liita: kogu maksimaalne vastuvõetav soojusvoog on 100 kW/m^2

$$\dot{h}_{tot} = min\left(\dot{h}_{rad_section} + \dot{h}_{conv}; 100000\right) \quad [\mathrm{W.m^{-2}}]$$

- Elemendi temperatuur arvutatakse elemendi soojuslikust tasakaalust

$$\rho_a c_a(T)\frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V}\left[\varepsilon * \dot{h}_{tot} + \alpha_c(20-\theta) + \varepsilon\left(\sigma(293^4 - (\theta+273)^4)\right)\right] \quad [\mathrm{W.m^{-2}}]$$

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

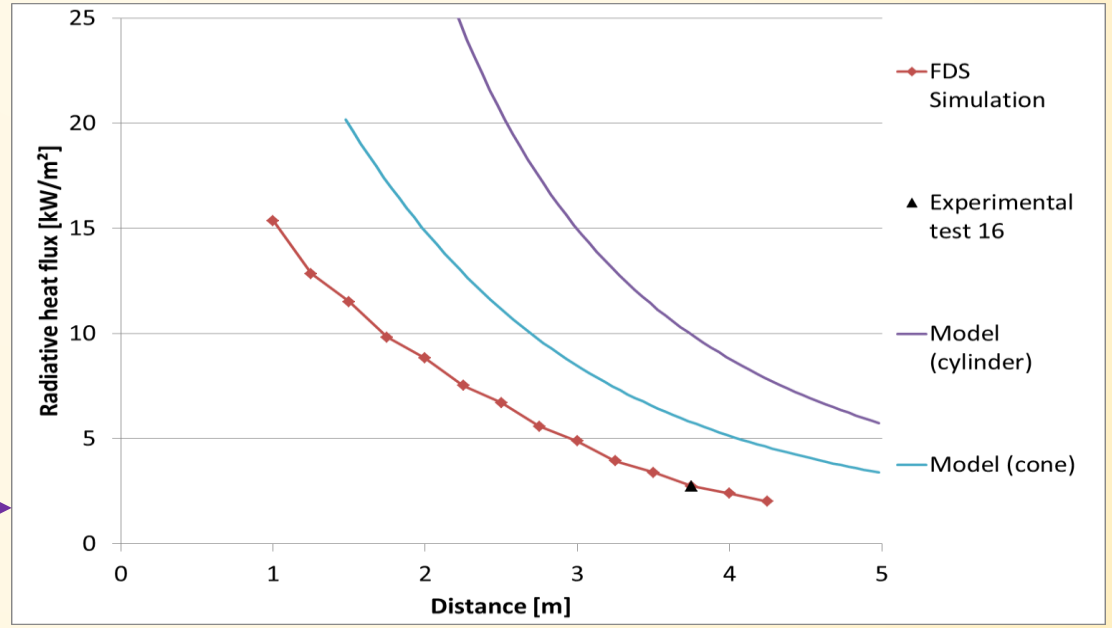
4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Mudeli valideerimine Liège katsete (ja FDS mudeli) alusel

- Andurid asetsevad 3.75 m kaugusel tule allikast (kõrgus: 1.75 m)
- Anduri asend: risti tuli-andur teljega

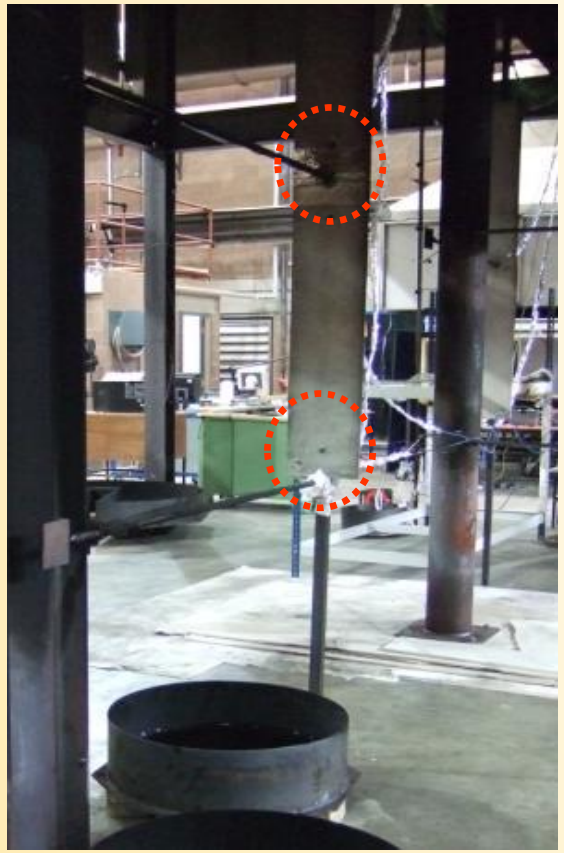
Diam.	Katse keskväärtus	Katse nr	Silinder-leek	Koonus-leek
[m]	[kW/m²]	[-]	[kW/m²]	[kW/m²]
0.60	0.31	1 to 4	1.20	0.74
1.00	0.73	5 to 8	3.23	1.95
1.40	1.36	9 to 14	6.19	3.67
1.80	2.12	15 to 18	9.95	5.78
2.20	3.39	19 to 22	14.55	8.30

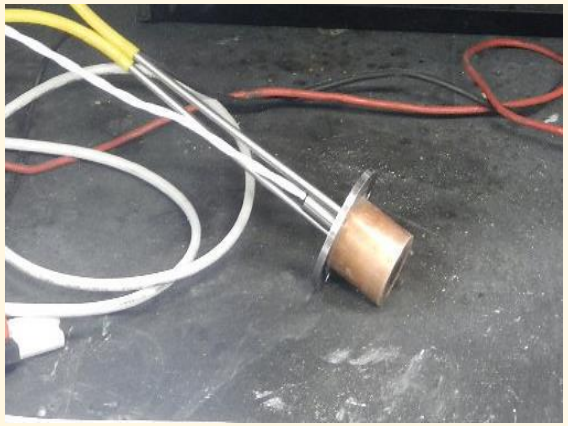


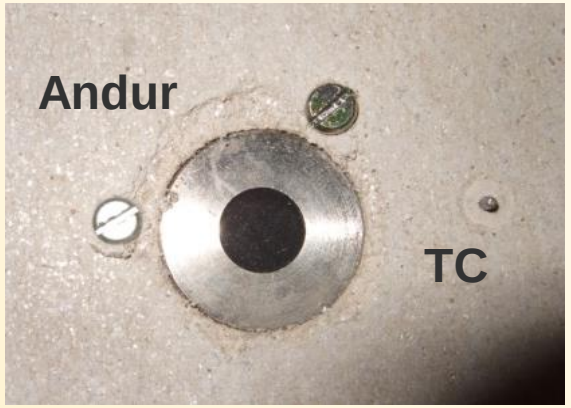
4. Analüütiline meetod ja valideerimine

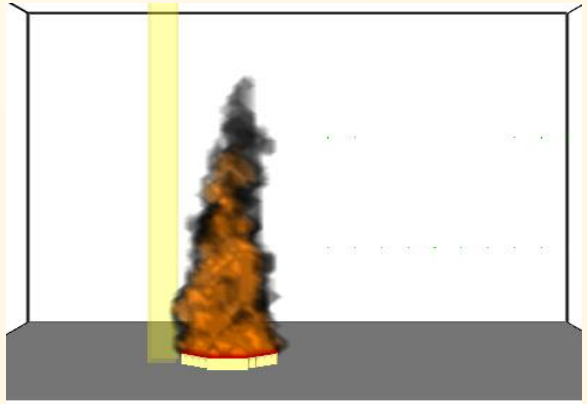
4.3. Lihtsustatud mudel

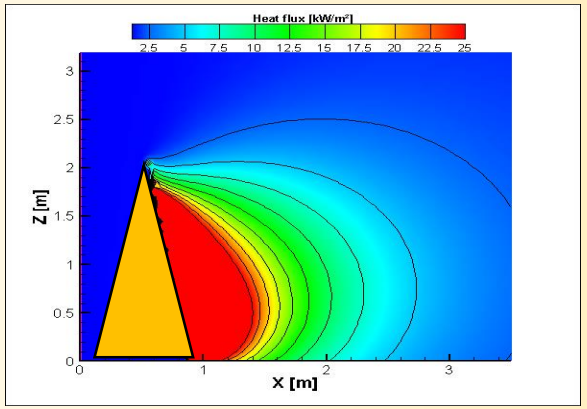
Mudeli valideerimine Ulsteri katsete (ja FDS mudeli) alusel

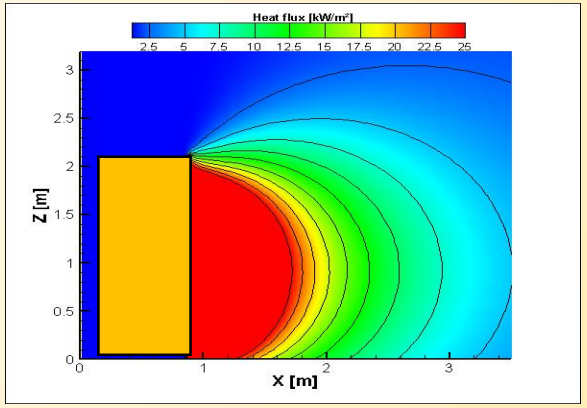








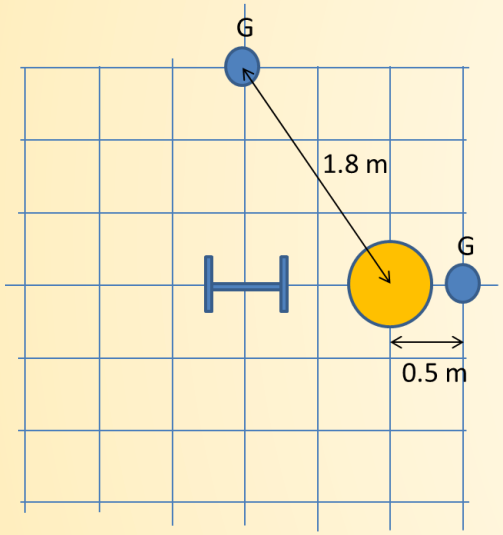


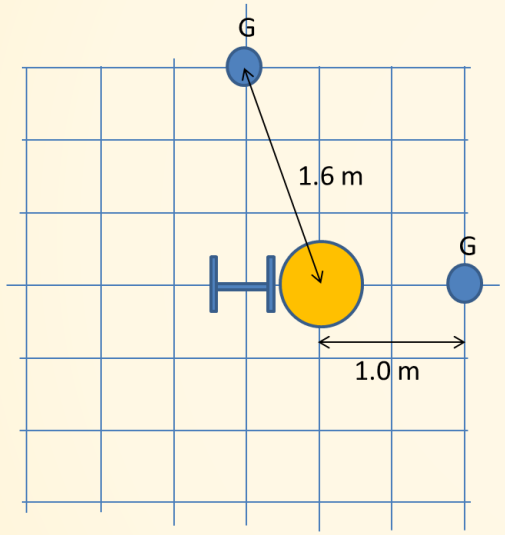


4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Mudeli valideerimine Ulsteri katsete (ja FDS mudeli) alusel





Juhtum 1a
1 pan
D = 0.7 m
Andurid 0.5/1.8 m

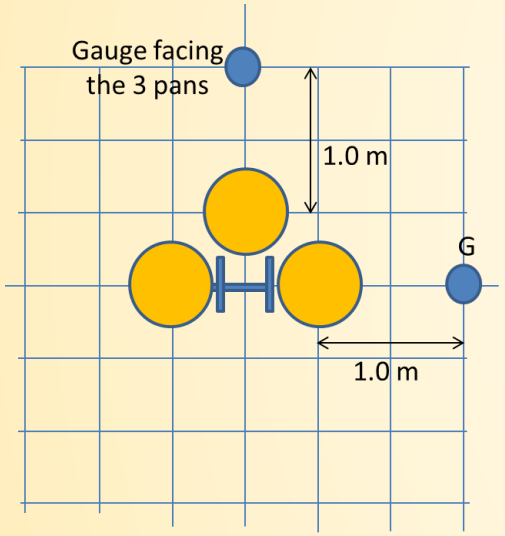
Juhtum 1b
1 pan
D = 0.7 m
Andurid 1.0/1.6 m

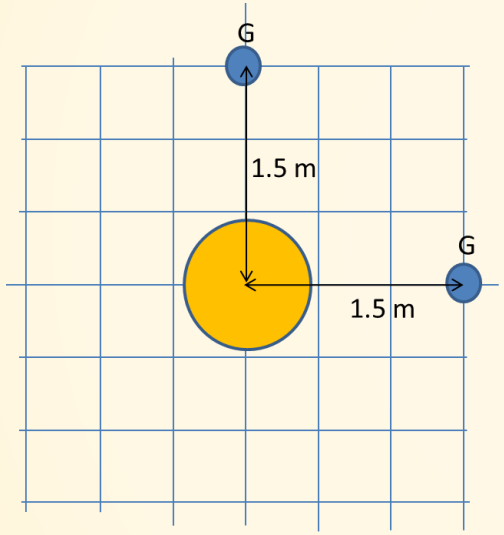
Anduri asukoht		Katse keskväärtus	FDS mudel	Silinder-leek	Koonus-leek
Kõrgus	Kaugus				
m	m	kW/m²	kW/m²	kW/m²	kW/m²
1.0	0.5	30.6	28.5	74.0	39.0
1.0	1.0	13.8	12.9	33.2	17.9
1.0	1.6	5.9	5.5	15.5	8.5
1.0	1.8	4.2	3.8	10.8	6.0
2.0	0.5	6.2	11.2	22.0	5.9
2.0	1.0	4.5	5.9	14.1	5.5
2.0	1.6	3.0	3.7	8.8	4.1
2.0	1.8	2.3	2.6	6.7	3.3

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Mudeli valideerimine Ulsteri katsete (ja FDS mudeli) alusel





Juhtum 3

3 pans

D = 0.7 m

Andurid 1.0 m

Juhtum 5

1 pan

D = 1.6 m

Andurid 1.5 m

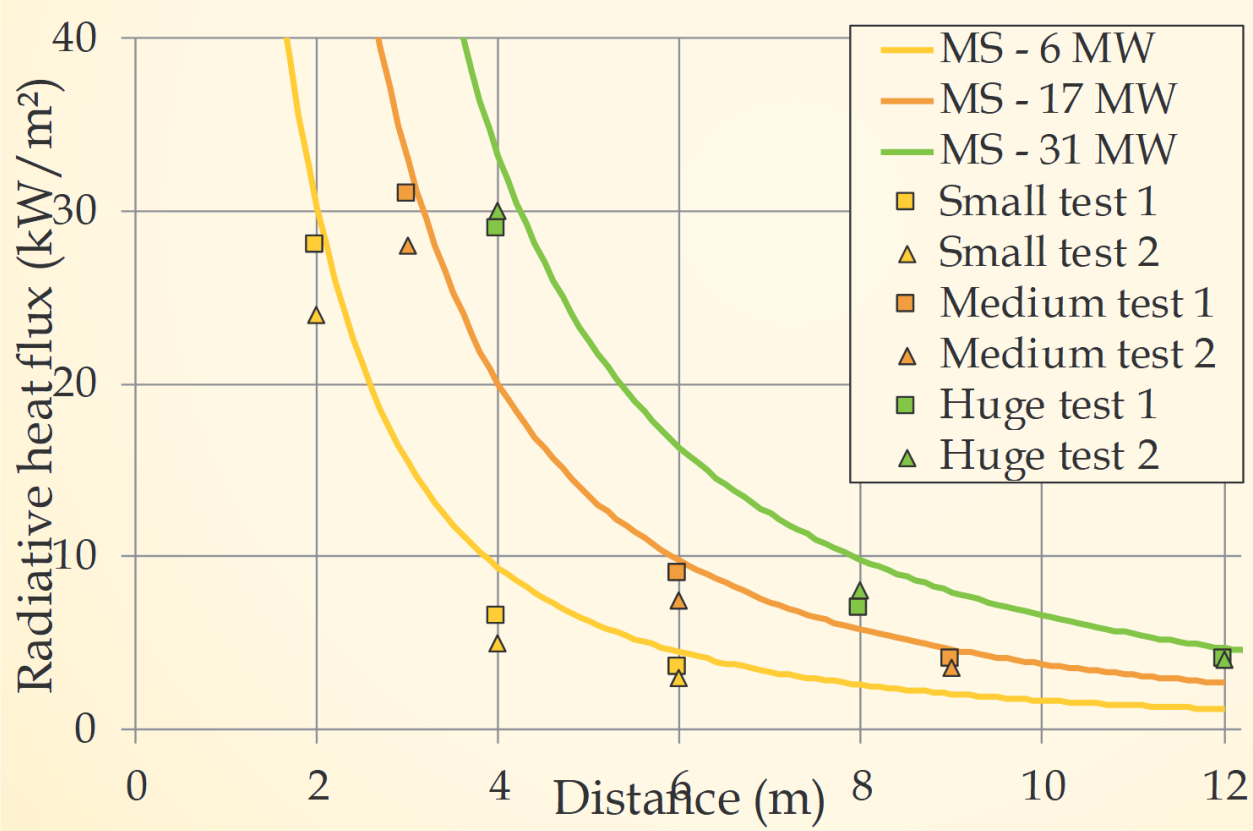
Andurite asukoht		Katse keskväärtus	Mudeli keskväärtus	Silinder-leek	Koonus-leek
Kõrgus	Kaugus				
m	m	kW/m²	kW/m²	kW/m²	kW/m²
1.0	1.0	31.0	26.6	66.3	37.4
1.0	1.0	24.3	21.6	62.0	34.6
2.0	1.0	15.0	17.7	40.9	16.2
2.0	1.0	13.0	13.6	38.5	15.9

Andurite asukoht		Katse keskväärtus	Mudeli keskväärtus	Silinder-leek	Koonus-leek
Height	Distance				
m	m	kW/m²	kW/m²	kW/m²	kW/m²
1.0	1.5	37.6	33.6	53.9	38.9
2.0	1.5	26.5	24.5	55.2	29.7

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.3. Lihtsustatud mudel

Mudeli valideerimine suurte diameetrite puhul (LCPP katsed)

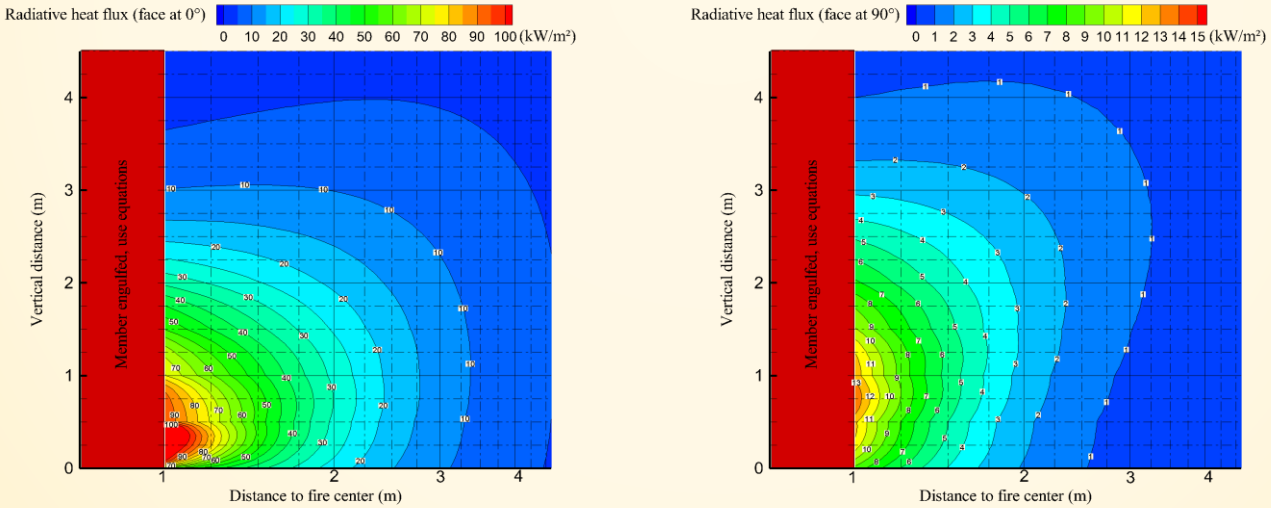


20

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.4. Samaväärtusgraafikud

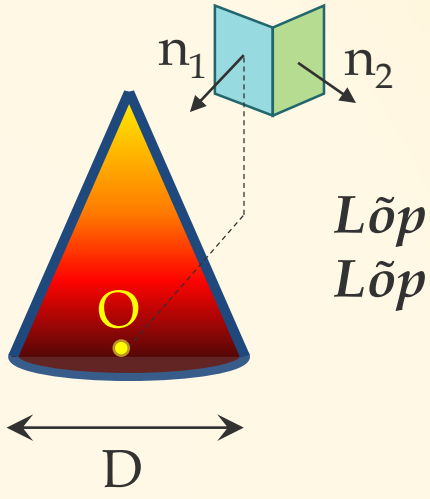
- Lisavõimalused SAFIR ja Ozone mudelite valideerimiseks
- Võimaldavad kiirest saada turvalisis tulemusi erinevate variantide võrdlemiseks projeteerimise algstaadiumis
- Võrdlustulemused analüütiliste meetodite valideerimiseks



D = 2m, RHR = 500 kW/m^2, θ = 0° (left) or θ = 90° (right)

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.4. Samaväärtusgraafikud



Lõplik pind 1: $\theta = 0°$
Lõplik pind 2: $\theta = 90°$

- Nomogramm sõltub parameetritest:
  - Leegi diameeter (m)
  - RHR (kW/m^2)
  - Vastuvõtva pinna asend (°)
- Nomogrammid arvestavad kiirgusega. Ei kasutata :
  - Leegi sees → HESKESTAD
  - Lae tasandis → HASEMI
- Eeldatatakse, et leegi kiirgusvõime on 1.0
- Annab langeva voo, mitte neelduva voo (tuleb korrutada kiirgusvõimega!)

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.4. Samaväärtusgraafikud

Juhtum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D (m)	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
HRR (kW/m²)	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500
Võimsus (MW)	0.8	1.6	3.1	4.7	1.8	3.5	7.1	10.6	3.1	6.3	12.6	18.8

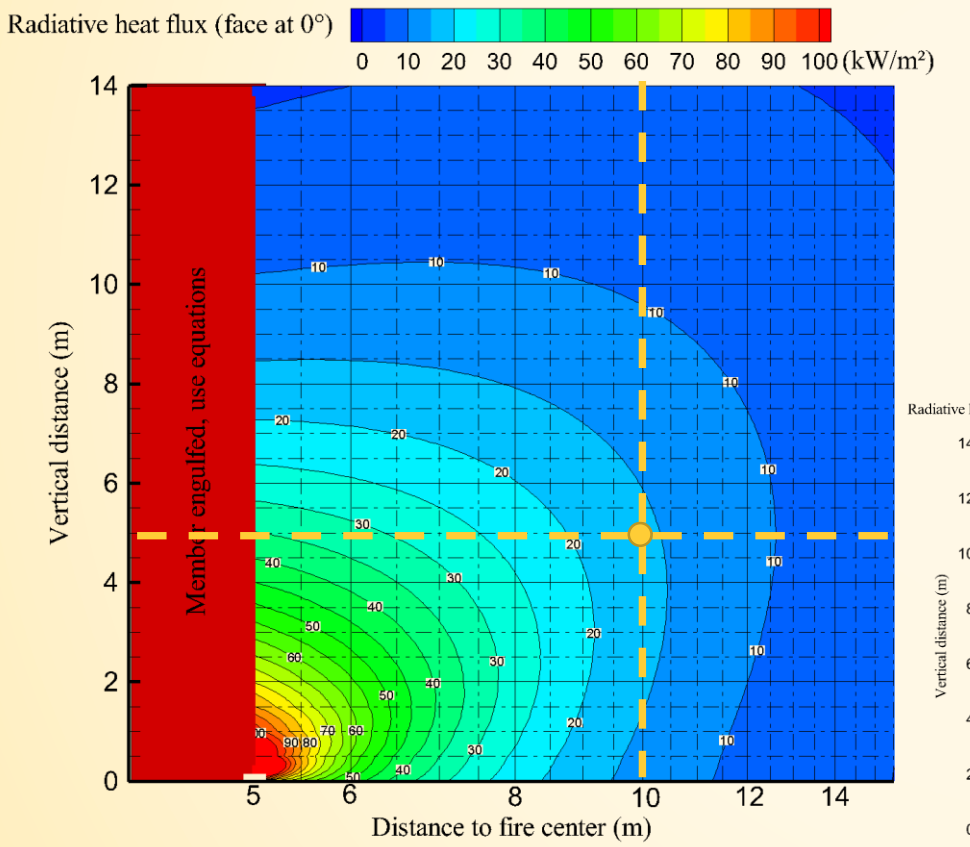
Juhtum	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
D (m)	6	6	6	6	8	8	8	9	9	9	10	10
HRR (kW/m²)	250	500	1000	1500	250	500	1000	250	500	750	250	500
Juhtum (MW)	7.1	14.1	28.3	42.4	12.6	25.1	50.3	47.7	15.9	31.8	19.6	39.3

Meetodi kasutusala (Annex C standardis EN 1991-1-2) : D ≤ 10 m ; Q ≤ 50 MW

→ Valitud konfiguratsioonid katavad arvutusmeetodi kasutusala

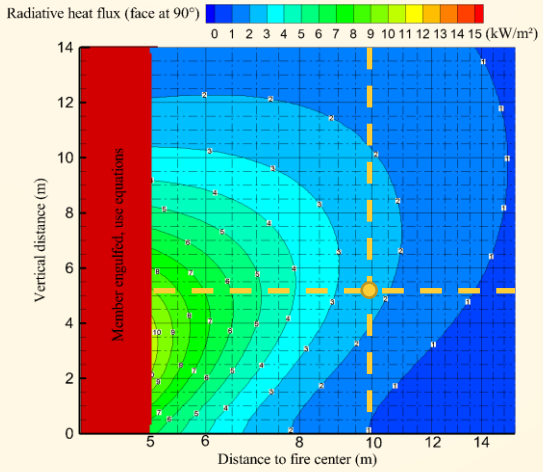
4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.4. Samaväärtusgraafikud



- Kohaliku põlengu parameetrid :
  - D = 10 m
  - RHR : 500 kW/m²
- Asukoht
  - Z = 5m
  - X = 10 m
  - Asend : 0°

Langev voog = 16 kW/m²



Langev voog = 2.4 kW/m²

- Asukoht
  - Z = 5m
  - X = 10 m
  - Asend : 90°

4. Analüütiline meetod ja valideerimine

4.5. Kokkuvõte

- LOCAFI projekt rakendab uut Virtuaalse Tahke Leegi kontseptsiooni.
- Temperatuuri jaotus Virtuaalse Tahke leegi perimeetril põhineb olemasolevatel seostel standardi EN 1991-1-2 Lisa C kohaselt (Heskestad, Hasemi).
- Kiirgusvoo ülekandumine põhineb kujuteguril, mis on toodud standardi EN 1991-1-2 Lisas G.
- Lihtsustatud mudel põhineb matemaatilistel seostel, mis esitavad kiirgusvoo, mis jõuab silindrilt ja ringilt lõpmatult väikesele pinnale.
- Konvektiivsed soojusvood tuleb arvutada eraldi. Konvektiivsed soojusvood mõjuvad arvestatavalt ainult juhtumitel, mida on käsitletud juba standardi EN 1991-1-2 Lisas C (leegi sisse haaratud elemendid või lae tasandis olevad elemendid).