

Zatížení zemními tlaky

- I. Vaníček: Mechanika zemin. Skriptum ČVUT, 1996
- ČSN 731001

Svislé napětí v zemině

$$\sigma_z = \gamma z + \sigma_0$$

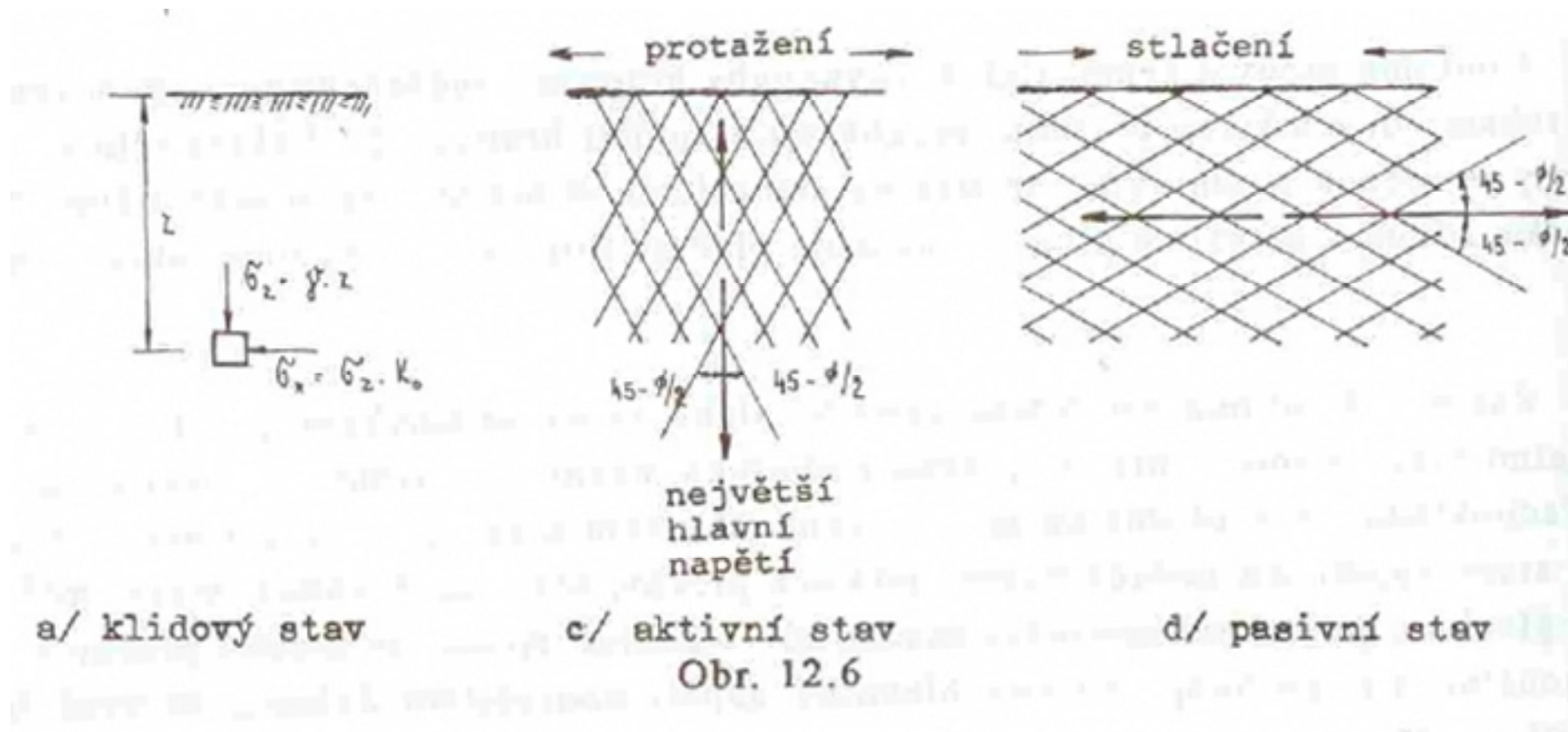
σ_z [Pa] svislé napětí

γ [N/m³] objemová tíha zeminy

z [m] hloubka

σ_0 [Pa] zatížení na povrchu

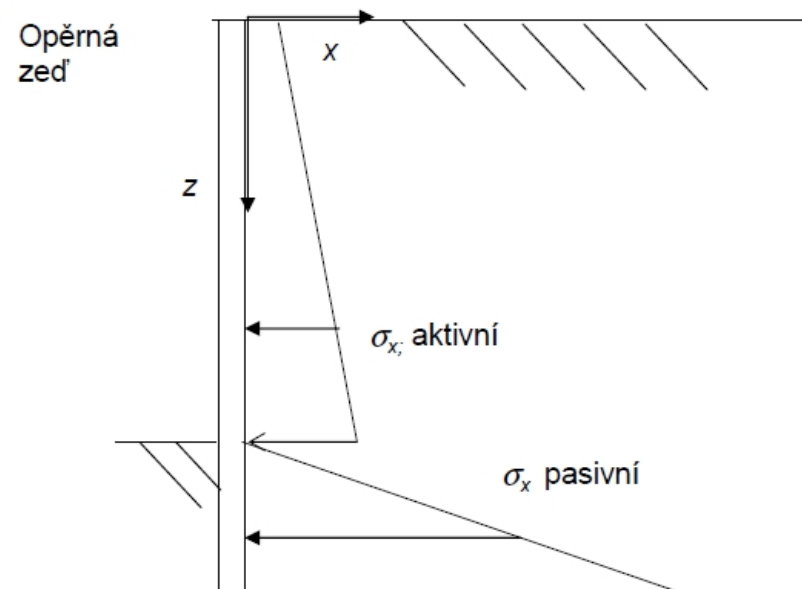
Druhy zemních tlaků podle Rankinovy teorie



[Vaníček: Mechanika zemin, 1996]

Druhy zemních tlaků

- Vychází z Rankinovy teorie
- Zemní tlak
 - v klidu
 - **aktivní** (zemina tlačí do konstrukce)
 - **pasivní** (konstrukce tlačí do zeminy)



- Výpočty zemních tlaků založeny na parametrech:
 - φ [°]: úhel vnitřního tření
 - c [Pa]: součinitel koheze
 - γ [Nm⁻³]: vlastní tíha zeminy
- Vlastní výpočet zemních tlaků se liší pro zeminy
 - soudržné ($c > 0$ Pa)
 - nesoudržné ($c = 0$ Pa)

Zemní tlak v klidu

Zemina působí klidovým zemním tlakem na velmi tuhé konstrukce, u nichž není možný posun.

$$\sigma_x = k_r \sigma_z = \sigma_z \frac{\nu}{1 - \nu}$$

σ_x vodorovné napětí

σ_z svislé napětí

k_r součinitel tlaku zeminy v klidu

ν Poissonovo číslo

Aktivní zemní tlak

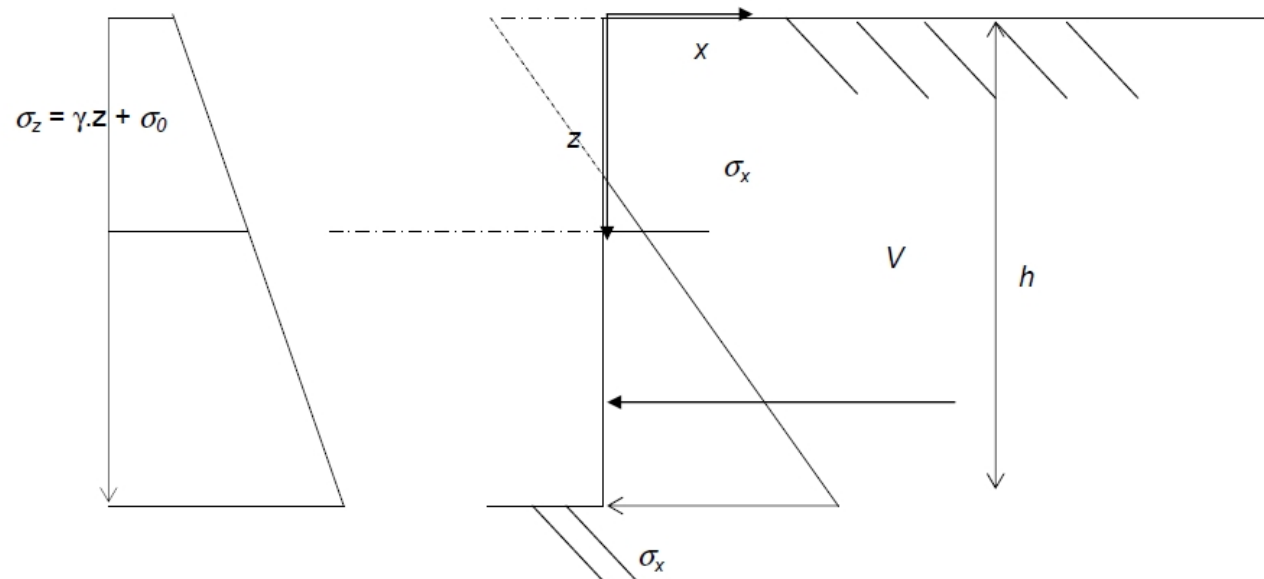
Aktivní zemní tlak vzniká již při sebemenším oddálení konstrukce od zeminy; je to nejčastější případ.

$$\sigma_x = \sigma_z \cdot k_a - 2c\sqrt{k_a}, k_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$$

k_a součinitel aktivního tlaku

φ úhel vnitřního tření

c součinitel koheze



Pasivní zemní tlak

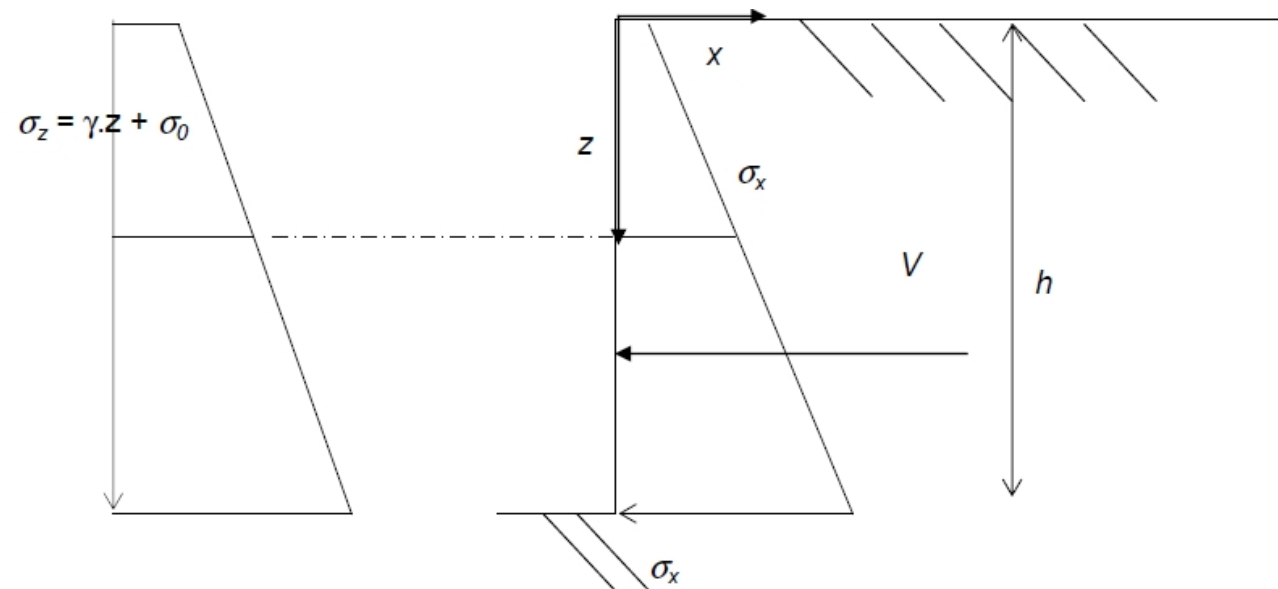
Pasivní tlak vzniká při pohybu konstrukce do zeminy.

$$\sigma_x = \sigma_z \cdot k_p + 2c\sqrt{k_p}, k_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$$

k_p součinitel pasivního tlaku

φ úhel vnitřního tření

c součinitel koheze

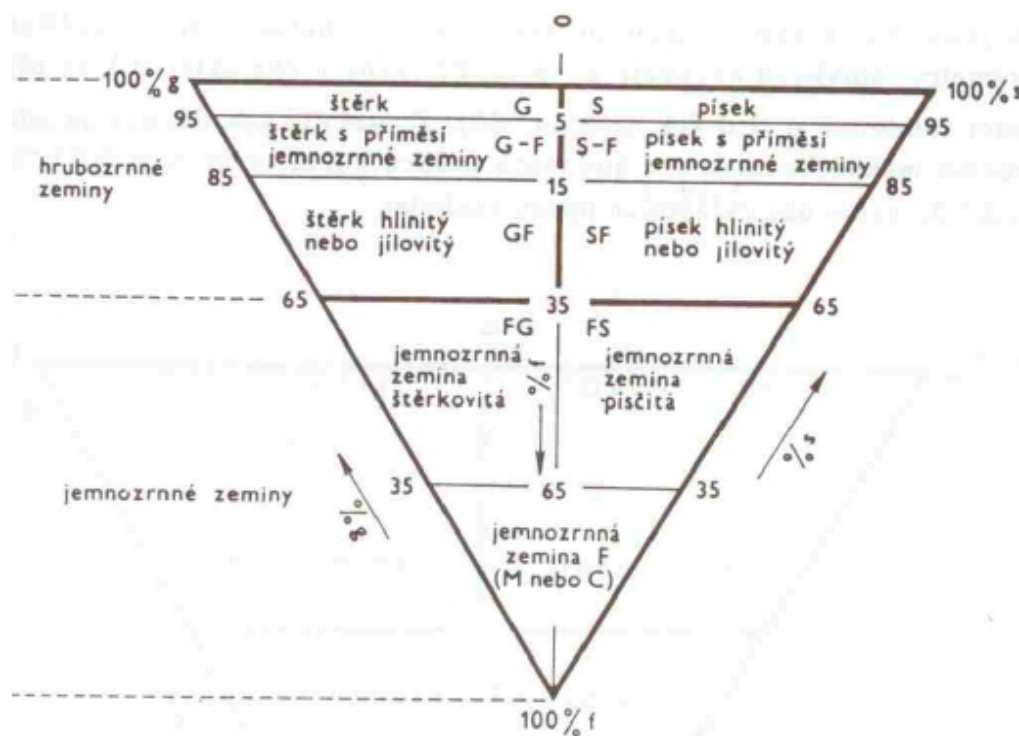


Zatřídění zemin

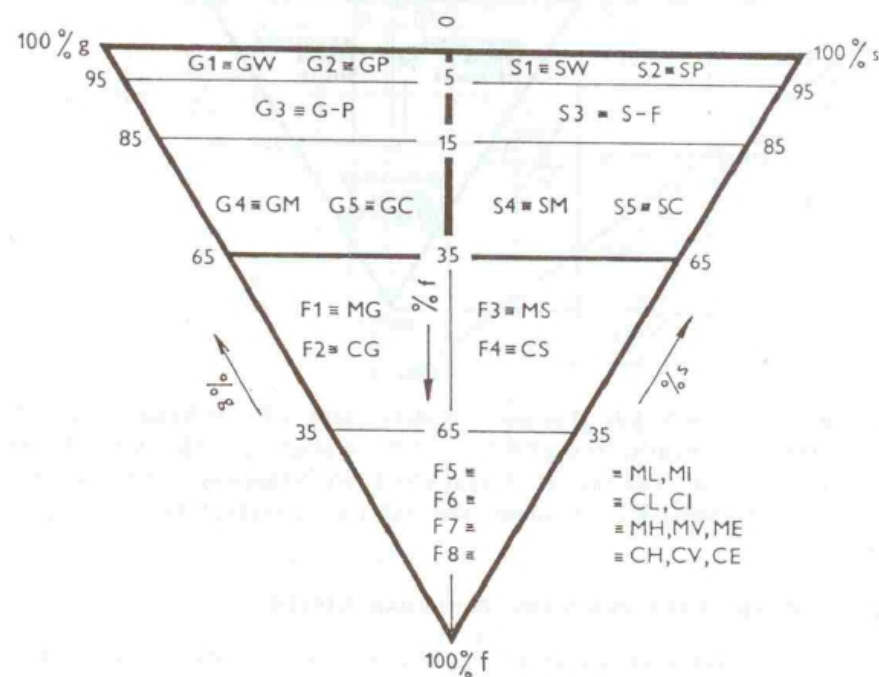
Podle procentuálního zastoupení jednotlivých částic nebo frakcí se určují výchozí klasifikační skupiny - tab. 4.1. Zde se rozlišují:

- velmi hrubé zeminy
 - balvany
 - kameny
 - hrubé zeminy
 - štěrk
 - písek
 - jemnozrnné zeminy
- symbol B
 - symbol Cb
 - symbol G
 - symbol S
 - symbol F

(po upřesnění rozlišení na hlinu M a jíl C).



Obr. 4.2



Obr. 4.3

Zatřídění zemin

c_u, φ_u ... totální parametry
 plně saturované zeminy
 c_{ef}, φ_{ef} ... efektivní parametry
 vysušené zeminy

Tabulka 4.2. Směrné normové charakteristiky jemnozrnných zemin

Třída	Symbol	Charakteristika	Konzistence				tvrdá
			měkká	tuhá	pevná		
			–	–	$S_r > 0,8$	$S_r < 0,8$	
F 1	MG	v, β, γ (kN m^{-3})	$v = 0,35; \beta = 0,62; \gamma = 19,0$				vyšetří se zkouškami
		E_{def} (MPa)	5–10	10–20	12–24	15–30	
		c_u (kPa)	40	70	70	70–80	16–24 vyšetří se zkouškami
		φ_u (°)	0	0	10	12–15	
		c_{ef} (kPa)	4–12		8–16	16–32	
		φ_{ef} (°)	26–32				
F 2	CG	v, β, γ (kN m^{-3})	$v = 0,35; \beta = 0,62; \gamma = 19,5$				vyšetří se zkouškami
		E_{def} (MPa)	4–8	7–15	10–12	18–25	
		c_u (kPa)	30	60	60	60–70	18–26 vyšetří se zkouškami
		φ_u (°)	0	0	10	12–15	
		c_{ef} (kPa)	6–14		10–18	18–36	
		φ_{ef} (°)	24–30				
F 3	MS	v, β, γ (kN m^{-3})	$v = 0,35; \beta = 0,62; \gamma = 18,0$				vyšetří se zkouškami
		E_{def} (MPa)	3–6	5–8	8–12	12–15	
		c_u (kPa)	30	60	60	60–70	20–28 vyšetří se zkouškami
		φ_u (°)	0	0	10	12–15	
		c_{ef} (kPa)	8–16		12–20	20–40	
		φ_{ef} (°)	24–29				
F 4	CS	v, β, γ (kN m^{-3})	$v = 0,35; \beta = 0,62; \gamma = 18,5$				vyšetří se zkouškami
		E_{def} (MPa)	2,5–4	4–6	5–8	8–12	
		c_u (kPa)	30	50	70	70–80	22–31 vyšetří se zkouškami
		φ_u (°)	0	0	5	8–14	
		c_{ef} (kPa)	10–18		14–22	22–44	
		φ_{ef} (°)	23–27				

Zatřídění zemin

Třída	Symbol	Charakteristika	Konzistence					
			měkká	tuhá	pevná		tvrdá	
			–	–	$S_r > 0,8$	$S_r < 0,8$	$S_r > 0,8$	$S_r < 0,8$
F 5	ML MI	$v, \beta, \gamma (\text{kN m}^{-3})$	$v = 0,40; \beta = 0,47; \gamma = 20,0$				vyšetří se zkouškami	
		E_{def} (MPa)	1,5–3	3–5	5–8	7–10	10–15	12–20
		c_u (kPa)	30	60	70	70–80	200	80–90
		φ_u (°)	0	0	5	8–14	0	15–20
		c_{ef} (kPa)	8–16		12–20	20–40	20–28 vyšetří se zkouškami	
		φ_{ef} (°)	19–23					
F 6	CL CI	$v, \beta, \gamma (\text{kN m}^{-3})$	$v = 0,40; \beta = 0,47; \gamma = 21$				vyšetří se zkouškami	
		E_{def} (MPa)	1,5–3	3–6	6–8	8–12	10–15	12–20
		c_u (kPa)	25	50	80	80–90	170	80–90
		φ_u (°)	0	0	0	4–12	0	14–18
		c_{ef} (kPa)	8–16		12–20	20–40	20–28 vyšetří se zkouškami	
		φ_{ef} (°)	17–21					
F 7	MH MV ME	$v, \beta, \gamma (\text{kN m}^{-3})$	$v = 0,40; \beta = 0,47; \gamma = 21$				vyšetří se zkouškami	
		E_{def} (MPa)	1–3	3–5	5–7	7–10	10–15	12–20
		c_u (kPa)	25	50	80	80–90	170	80–90
		φ_u (°)	0	0	0	4–12	0	14–18
		c_{ef} (kPa)	4–10		8–16	14–28	16–24 vyšetří se zkouškami	
		φ_{ef} (°)	15–19					
F 8	CH CV CE	$v, \beta, \gamma (\text{kN m}^{-3})$	$v = 0,42; \beta = 0,37; \gamma = 20,5$				vyšetří se zkouškami	
		E_{def} (MPa)	1–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–15
		c_u (kPa)	20	40	80	80–90	150	80–90
		φ_u (°)	0	0	0	3–10	0	12–16
		c_{ef} (kPa)	2–8		6–14	14–28	14–22 vyšetří se zkouškami	
		φ_{ef} (°)	13–17					

Zatřídění zemin

Směrné normové charakteristiky písčitých zemin

Třída	Symbol	ν	β	γ (kN m^{-3})	E_{def} (MPa)		φ_{ef} (°)		c_{ef} (kPa)	Činitele ovlivňující stanovení charakteristik v rámci rozpětí třídy
					$I_D = 0,33-0,67$	$I_D = 0,67-1$	$I_D = 0,33-0,67$	$I_D = 0,67-1$		
S 1	SW	0,28	0,78	20	30-60	50-100	34-39	37-42	0	$I_D, w, \% g,$ tvar zrn, angularita
S 2	SP	0,28	0,78	18,5	15-35	30-50	32-35	34-37	0	
S 3	S-F	0,30	0,74	17,5	12-19	17-25	28-31	30-33	0	
S 4	SM	0,30	0,74	18	5-15		28-30		0-10	podíl jemných částic a konzistence zeminy
S 5	SC	0,35	0,62	18,5	4-12		26-28		4-12	

Tabulka 4.3

Tabulka 4.4. Směrné normové charakteristiky štěrkovitých zemin

Třída	Symbol	ν	β	γ (kN m^{-3})	E_{def} (MPa)		φ_{ef} (°)		c_{ef} (kPa)	Činitele ovlivňující stanovení charakteristik v rámci rozpětí třídy
					$I_D = 0,33-0,67$	$I_D = 0,67-1,0$	$I_D = 0,33-0,67$	$I_D = 0,67-1,0$		
G 1	GW	0,20	0,90	21	250-390	360-500	36-41	39-44	0	$I_D, w, \% g,$ tvar zrn, angularita
G 2	GP	0,20	0,90	20	100-190	170-250	33-38	36-41	0	
G 3	G-F	0,25	0,83	19	80-90	90-100	30-35	33-38	0	
G 4	GM	0,30	0,74	19	60-80		30-35		0-8	podíl jemných částic a konzistence zeminy
G 5	GC	0,30	0,74	19,5	40-60		28-32		2-10	

Zatížení teplotou

- EN – 1991-1-5: Zatížení teplotními změnami
- Popisuje *klimatické* změny teplot, vliv proudění a slunečního záření,
- Nejčastější příčina poruch pro panelové a zděné objekty

Motivační příklad

Vypočtete protažení Nuselského mostu, délka mostu je 485 m .

1. Ohřátí o 15 C .

Protažení

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T = 485 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 15 = 0,0873\text{ m}$$

2. Teploty v zimě $T = -20\text{ C}$, v létě $T = 35\text{ C}$, rozdíl teplot

$$\Delta T = 55\text{ C}.$$

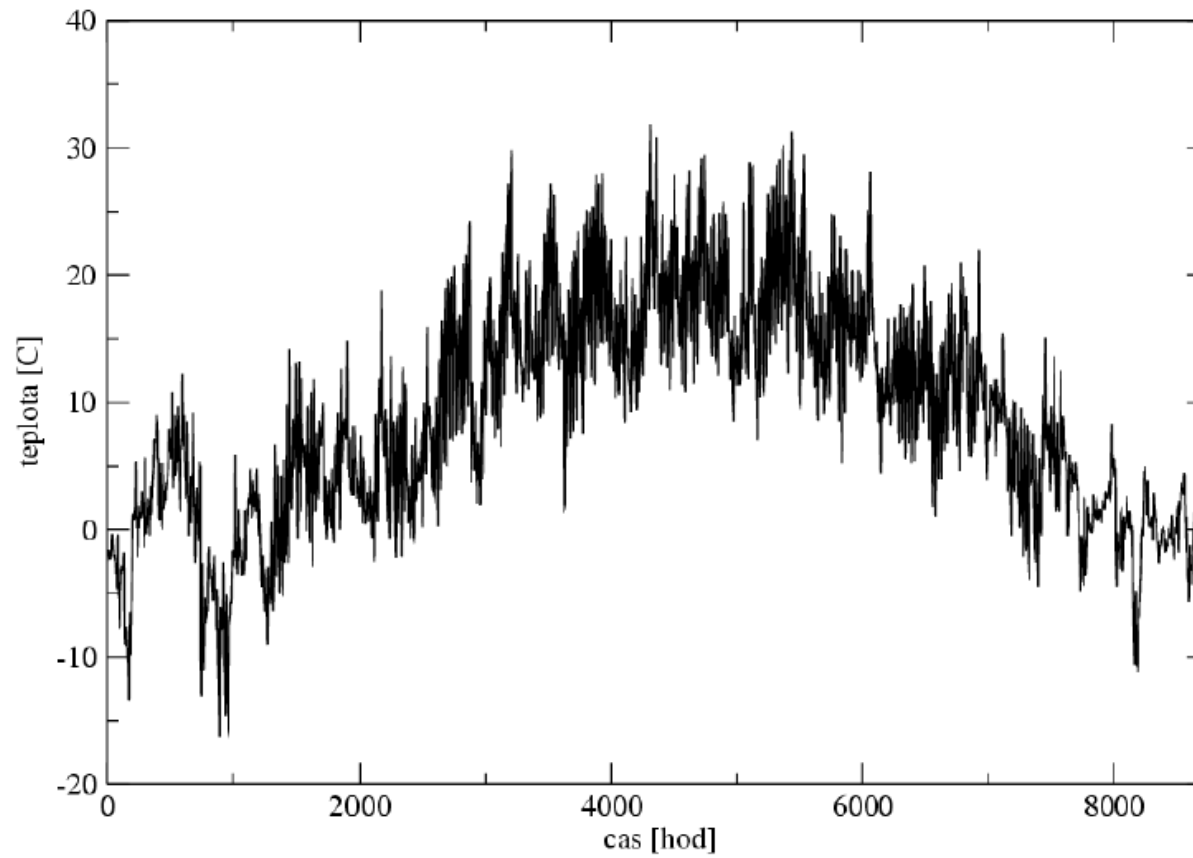
Protažení

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T = 485 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 55 = 0,3201\text{ m}$$



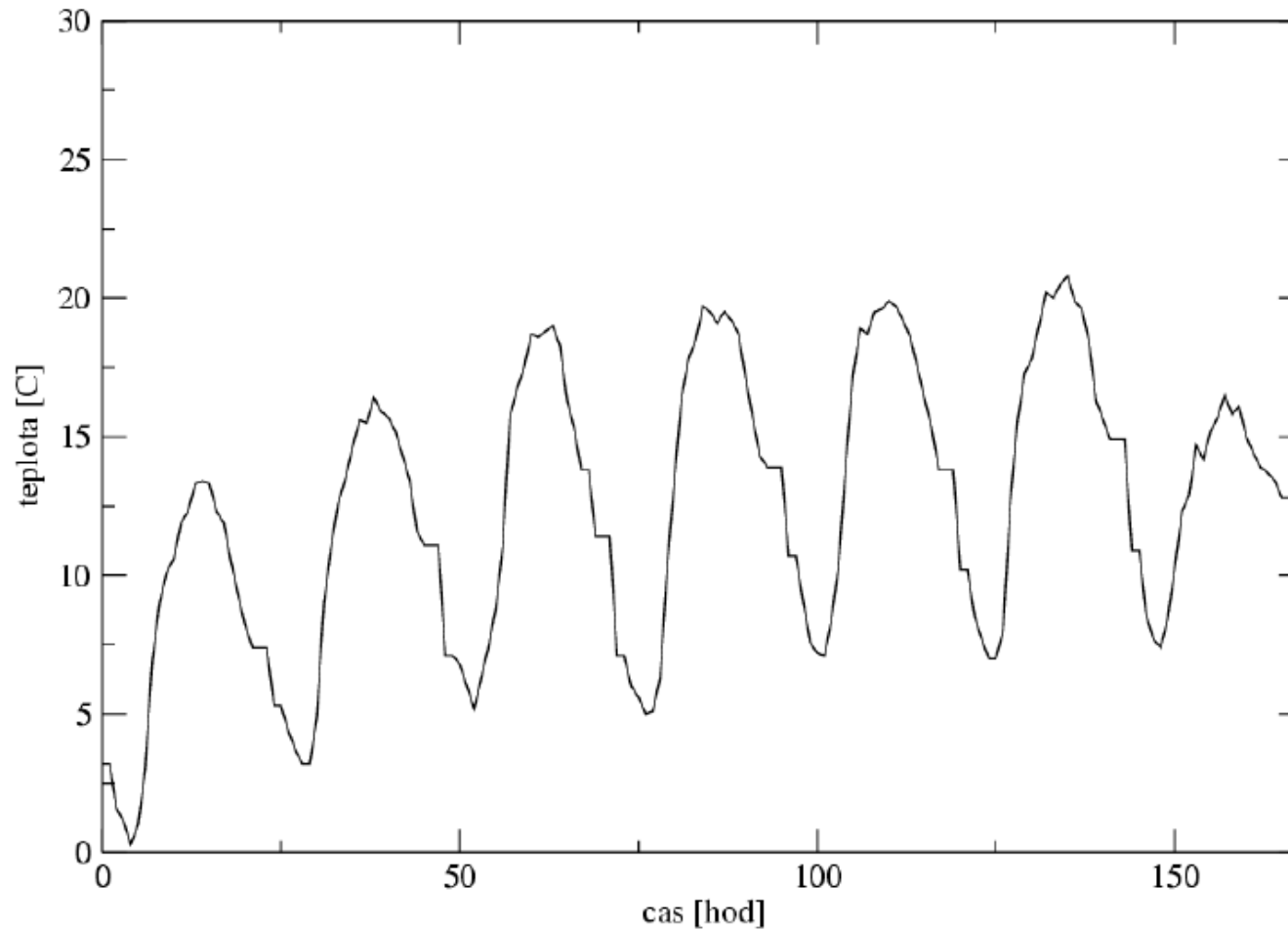
Vliv teploty

Prubeh teploty během jednoho roku



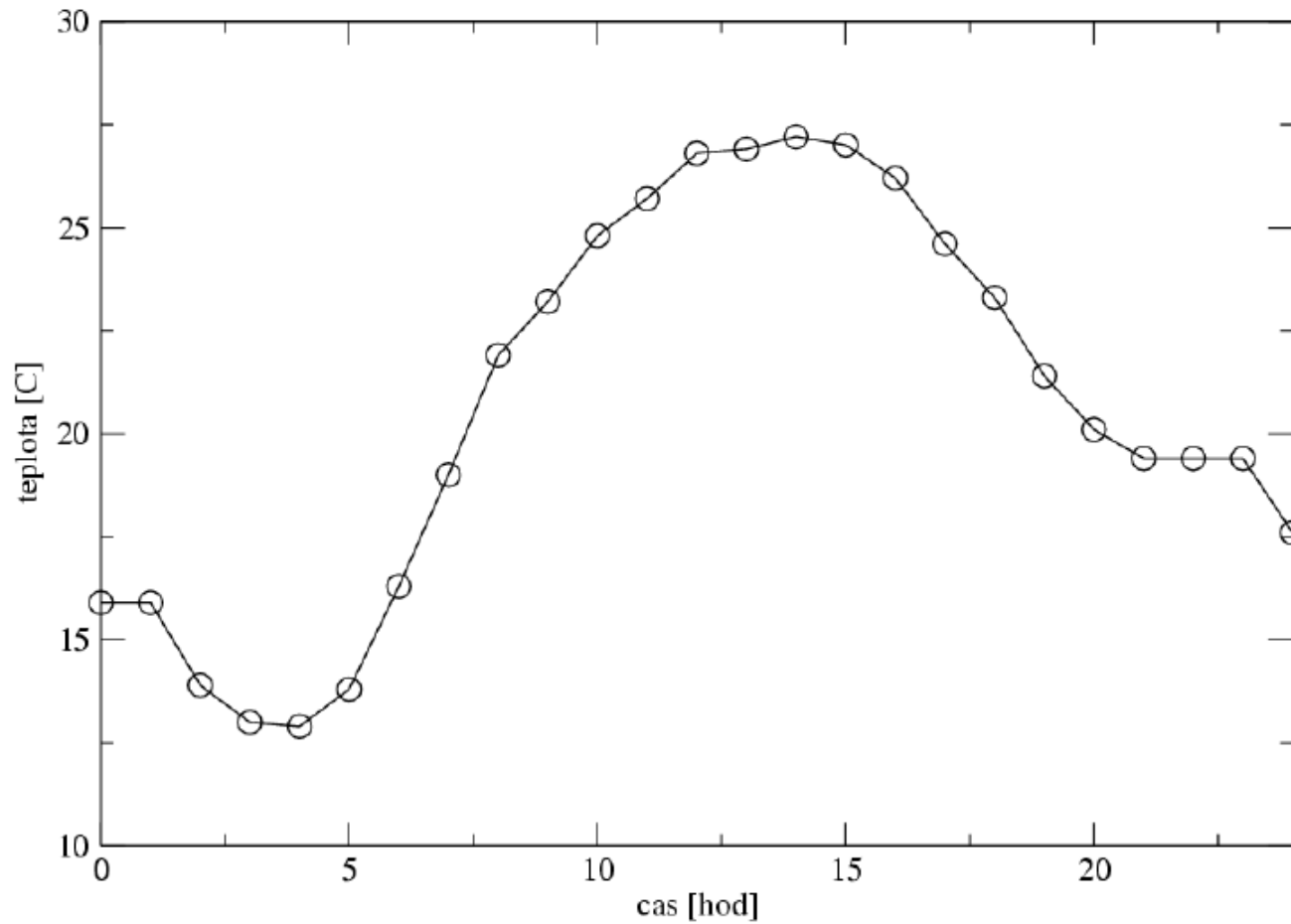
Vliv teploty

Prubeh teploty během jednoho týdne



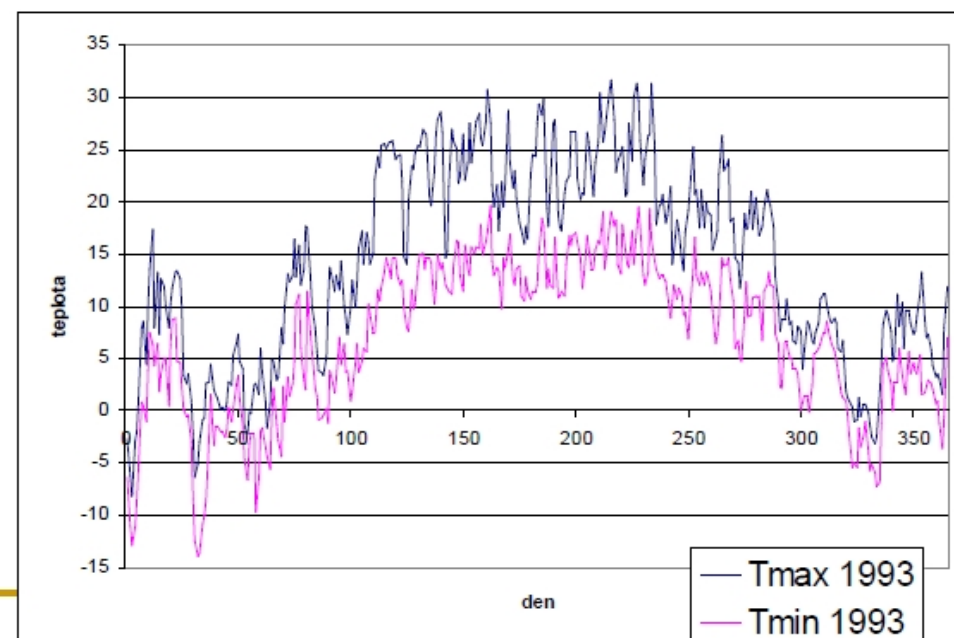
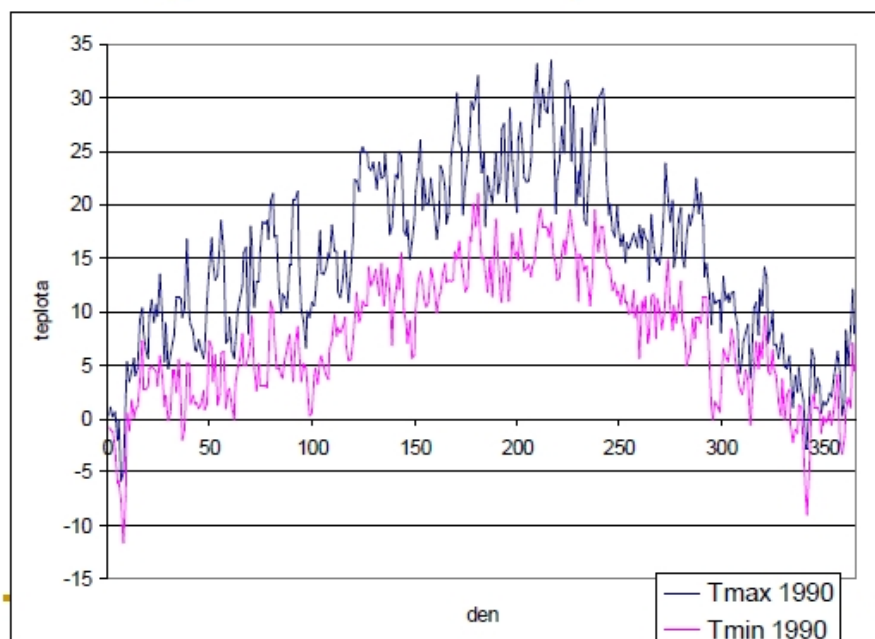
Vliv teploty

Prubeh teploty behem jednoho dne



Vliv teploty

- Příklad rozdělení denním maxim a minim (dodal Ing. J. Maděra)



Rozložení teploty po konstrukci

rozložení teploty po konstrukci je dáno rovnicí vedení tepla

je to bilanční rovnice pro tepelnou energii

teplota T [K]

tok tepla q [$J/m^2/s$]

Fourierův vztah

$$q(x) = -k \frac{dT(x)}{dx}$$

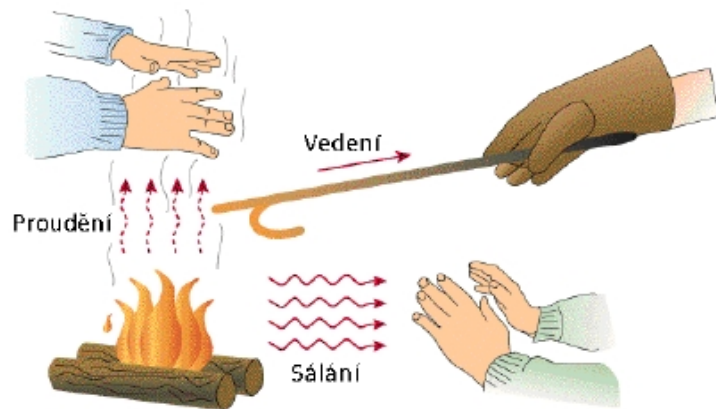
$$\mathbf{q}(\mathbf{x}) = -\mathbf{K} \text{grad } T(\mathbf{x}) = -\mathbf{K} \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)^T$$

Rovnice vedení tepla (jednorozměrný případ)

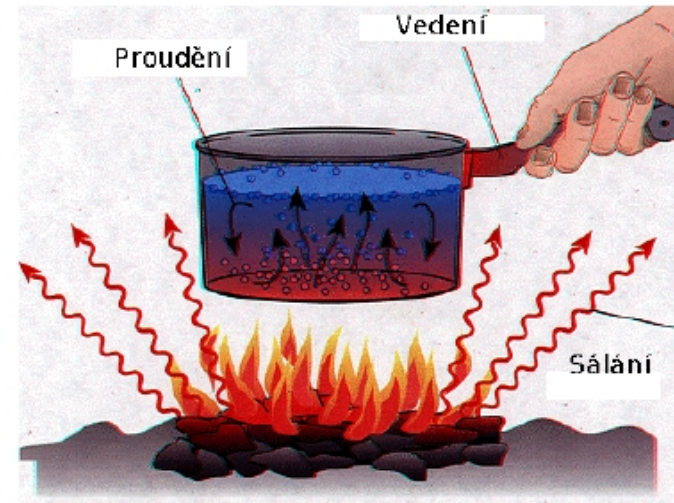
$$k \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + z(x, t) = \rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t}$$

$T(x, t)$	$[K]$	teplota
k	$[W/m/K]$	součinitel vodivosti
ρ	$[kg/m], [kg/m^3]$	hustota materiálu
c	$[J/kg/K]$	měrná teplená kapacita
$z(x, t)$	$[J/s/m], [J/s/m^3]$	zdroj tepla

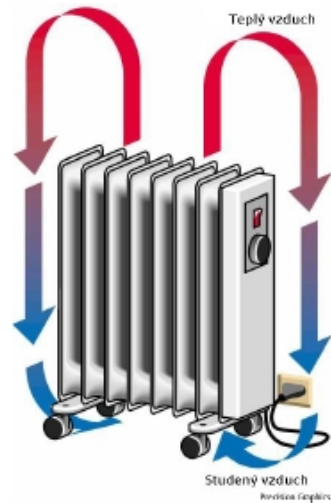
Okrajové podmínky



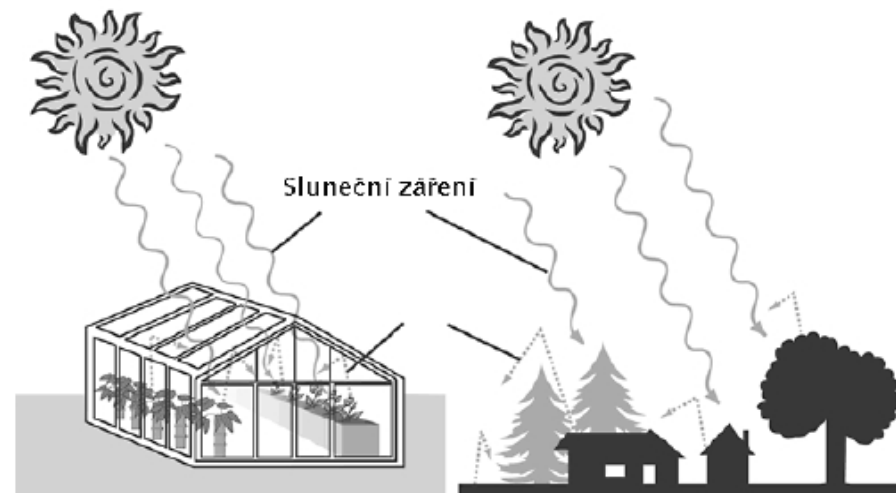
www.physics.brocku.ca/courses/1p23/images/FG11_16.gif



apollo.lsc.vsc.edu/classes/met130/notes/chapter2/graphics/pan.psd.gif



www.yourdictionary.com/images/ahd/jpg/A4cnvctn.jpg



www.press.uillinois.edu/epub/books/brown/images/fig9.1b.gif

Okrajové podmínky

Dirichletova okr. pod. $T(l) = T_b$

Neumannova okr. pod. $q(l) = -k \frac{dT(l)}{dx} = q_b$

Newtonova okr. pod. $q(l) = -k \frac{dT(l)}{dx} = \kappa(T(l) - T_{ext})$

radiační okr. pod. $q(l) = -k \frac{dT(l)}{dx} = \varepsilon\sigma(T(l)^4 - T_{ext}^4)$

$\kappa [W/m^2/K]$ - součinitel přestupu tepla

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2/K^4]$ - Stefanova-Boltzmannova konstanta

$\varepsilon [-]$ součinitel pohltivosti

Součinitel přestupu tepla κ se v normálních podmínkách pohybuje v rozmezí cca $10\text{--}15 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}$. Jeho velikost však silně závisí na teplotě; např. pro teploty $\approx 60^\circ\text{C}$ se zvyšuje na $\alpha \approx 50 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}$.
Nezaměňovat se součinitelem délkové teplotní roztažnosti.

Počáteční podmínka

v případě nestacionární úlohy je třeba definovat počáteční podmínky

v jednorozměrné úloze

$$T(x, 0) = T_0(x)$$

v třírozměrné úloze

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$$

Třírozměrný případ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + z = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

funkce popisující teplotu je nyní 4 proměnných $T(x, y, z, t)$

k_x, k_y, k_z jsou tepelné vodivosti ve směru souřadnicových os x, y, z ,
mohou to být funkce závislé na x, y, z a t

řešení se získává téměř vždy numericky (metoda konečných prvků,
metoda sítí)

Stacionární jednorozměrný případ

$$k \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + z(x) = 0$$

stacionární jednorozměrný případ bez zdrojů

$$k \frac{d^2 T(x)}{dx^2} = 0$$

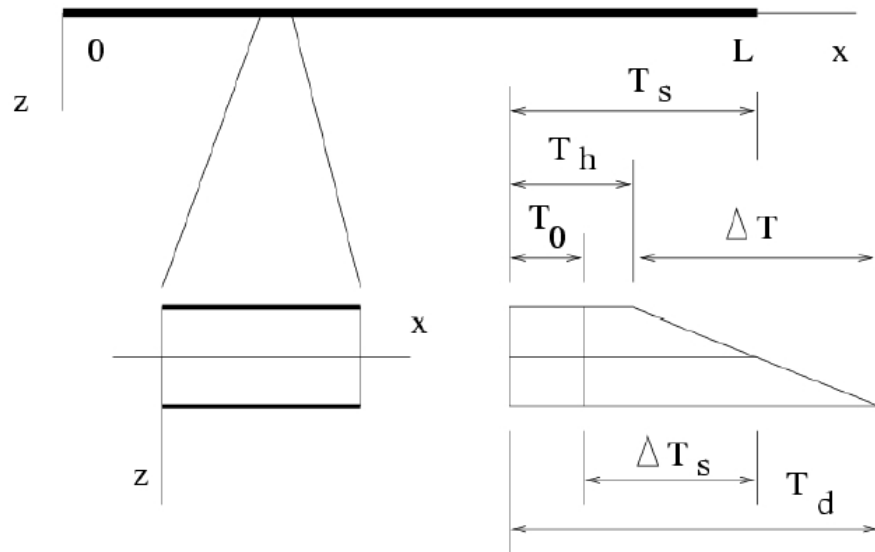
okrajové podmínky

$$T(0) = T_a \quad T(l) = T_b$$

řešení

$$T(x) = T_a + \frac{T_b - T_a}{l} x$$

Rozdělení teploty po průřezu



T_0 teplota při výstavbě

T_d teplota dolních vláken

T_h teplota horních vláken

T_s teplota na střednici prutu

ΔT rozdíl teplot krajních vláken

ΔT_s změna teploty na střednici prutu

Rozdělení teploty po průřezu

změna teploty na střednici prutu

$$\Delta T_s = T_s - T_0$$

rozdíl teplot krajních vláken

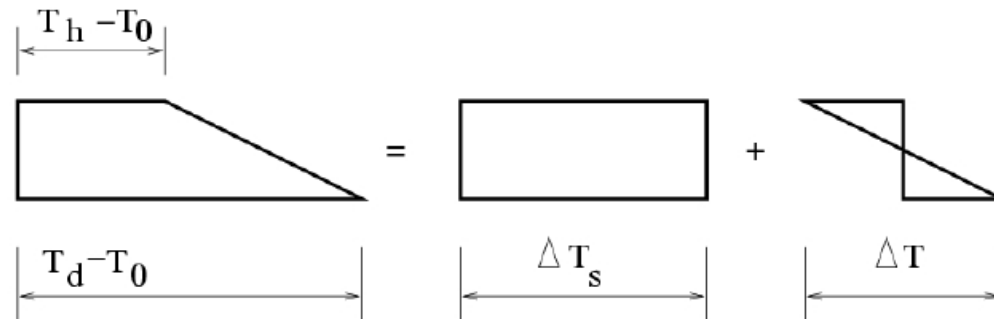
$$\Delta T = T_d - T_h$$

deformace od změny teploty

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T_s$$

normálové napětí

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_T)$$



Rovnoměrné oteplení prutu

protažení tyče, deformace od změny teploty

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$$

Δl [m] protažení tyče

l_0 [m] počáteční délka tyče

α [K^{-1}] součinitel teplotní roztažnosti

pro beton i ocel je $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

ΔT [K] změna teploty

Rovnoměrné oteplení prutu

Ve všech bodech průřezu je stejná změna teploty ΔT_s , proto je všude stejná deformace ε a napětí σ .

Deformaci prutu není bráněno (např. prostý nosník)

protažení prutu změnou teploty

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T_s$$

deformace prutu

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T_s$$

deformace od teploty

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T_s$$

normálové napětí

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_T) = E \cdot 0 = 0$$

Rovnoměrné oteplení prutu

Deformaci prutu je bráněno (např. vetknutý nosník)

protažení prutu změnou teploty

$$\Delta l = 0$$

deformace prutu

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = 0$$

deformace od teploty

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T_s$$

normálové napětí

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_T) = -E\alpha\Delta T_s$$

normálová síla

$$N = -EA\alpha\Delta T_s$$

Rovnoměrné oteplení prutu



[zdroj: [www](#)]

Nerovnoměrné oteplení prutu

Změna teploty se mění po průřezu, proto se mění i deformace ε a napětí σ .

Deformaci prutu je bráněno (např. vetknutý nosník)

změna teploty ve vzdálenosti z od těžiště

$$\Delta T(z) = \frac{z}{h} \Delta T$$

deformace od teploty ve vzdálenosti z od těžiště

$$\varepsilon_T = \alpha \frac{z}{h} \Delta T$$

normálové napětí ve vzdálenosti z od těžiště

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_T) = E\left(0 - \alpha \frac{z}{h} \Delta T\right) = -E\alpha \frac{z}{h} \Delta T$$

Nerovnoměrné oteplení prutu

normálová síla

$$N = \iint \sigma dA = 0$$

ohybový moment

$$M_y = \iint \sigma z dA = - \iint E \alpha \frac{z^2}{h} \Delta T dA = -EI_y \alpha \frac{\Delta T}{h}$$

Nerovnoměrné oteplení prutu

Deformaci prutu není bráněno (např. prostý nosník)

změna teploty ve vzdálenosti z od těžiště

$$\Delta T(z) = \frac{z}{h} \Delta T$$

deformace od teploty ve vzdálenosti z od těžiště

$$\varepsilon_T = \alpha \frac{z}{h} \Delta T$$

deformace nosníku vzdálenosti z od těžiště

$$\varepsilon = \alpha \frac{z}{h} \Delta T$$

normálové napětí ve vzdálenosti z od těžiště

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_T) = E\left(\alpha \frac{z}{h} \Delta T - \alpha \frac{z}{h} \Delta T\right) = 0$$

Nerovnoměrné oteplení prutu

normálová síla

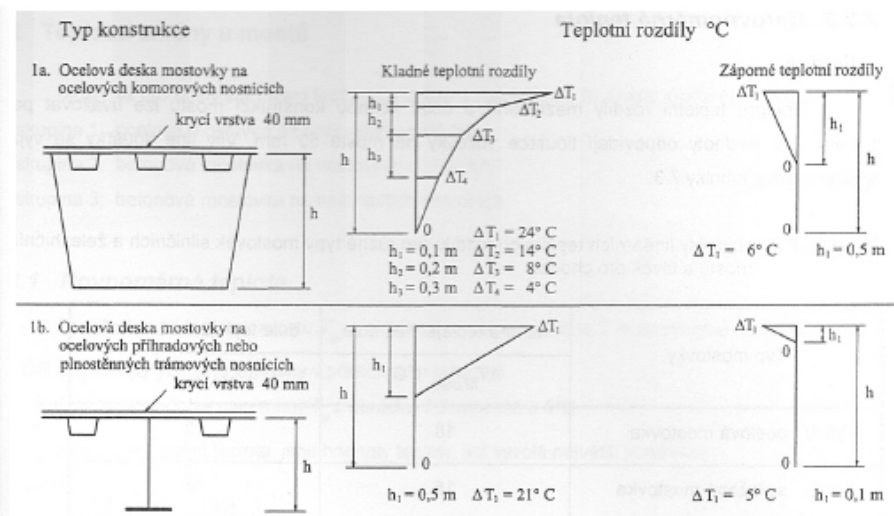
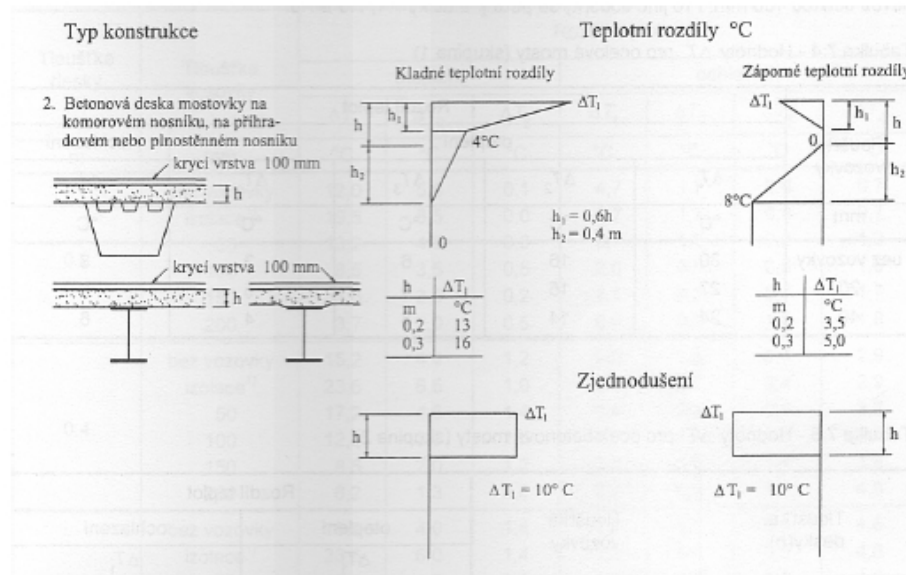
$$N = \iint \sigma dA = 0$$

ohybový moment

$$M_y = \iint \sigma z dA = 0$$

Nelineární rozdělení teploty po průřezu

- Např. teplotní změny u mostních konstrukcí



Studnička, Holický: Ocelové konstrukce 20: Zatížení staveb podle Eurokódu, ES ČVUT, 2003, str. 70—71

Principy zatížení konstrukcí požárem ČSN P ENV 1991-2-2

- Cílem je prokázání dostatečné bezpečnosti konstrukce při požáru
- Možno prokázat
 - *normovou požární odolností* [s],
 - návrhovou hodnotou únosností při požáru,
 - teplotou povrchu materiálu [K], [$^{\circ}C$]

4.1 Tepelné zatížení

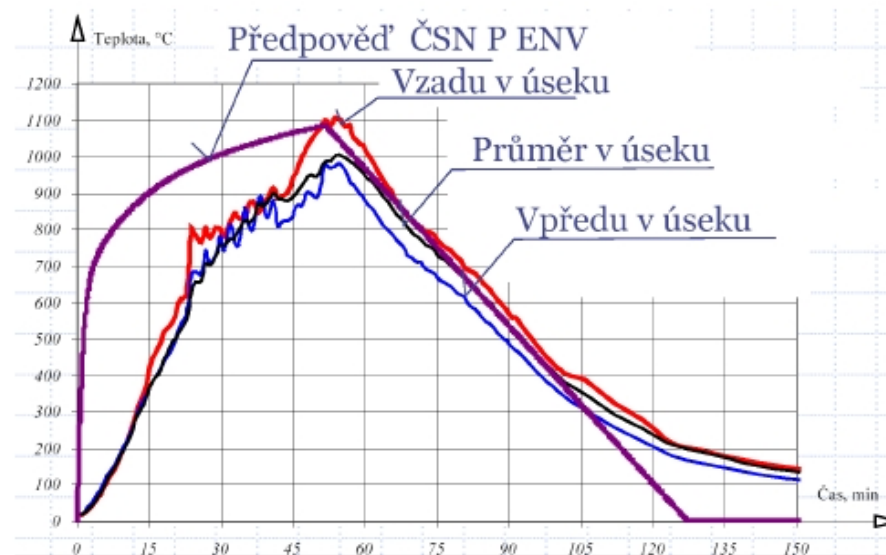
- Zahrnuje v sobě *sálavou* složku a složku odpovídající *proudění*
- Obě založeny na teplotní křivce požáru, která udává teplotu zaříče T_{∞} resp. teplotu mezní vrstvy T_o v závislosti na teplotě.

4.2 Ilustrativní příklad

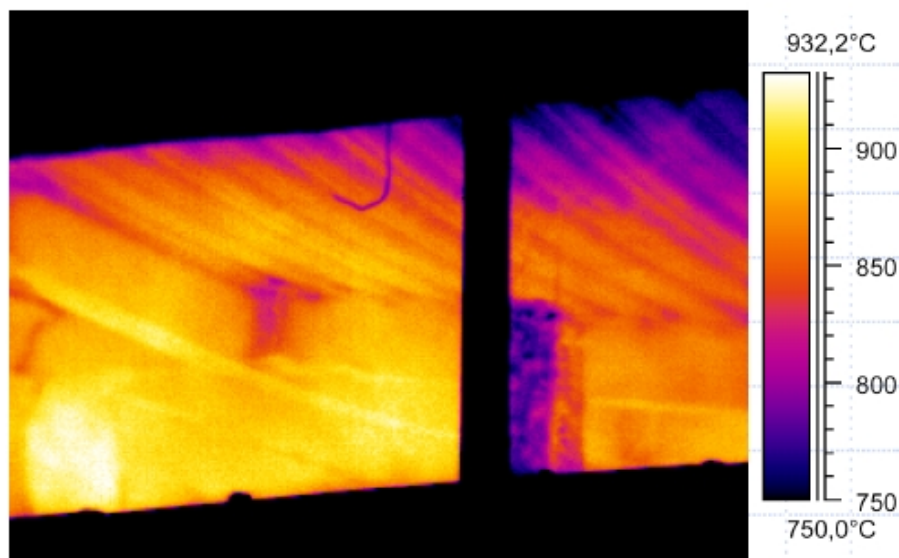
- Požární zkoušky velkého rozsahu v Cardingtonu (2003)
- people.fsv.cvut.cz/~wald/Cardington_LBTF_Structural_Integrity_Test



Schéma experimentu



Časová závislost teploty



Teplota prvků a styčnicků při požáru



Kolaps prvků při požáru

Tento dokument je určen výhradně jako doplněk k přednáškám z předmětu Zatížení a spolehlivost pro studenty Stavební fakulty ČVUT v Praze. Dokument je průběžně doplňován, opravován a aktualizován a i přes veškerou snahu autora může obsahovat nepřesnosti a chyby.

Při přípravě této přednášky byla použita řada materiálů laskavě poskytnutých doc. Ing. Janem Zemanem, Ph.D., doc. Ing. Jaroslavem Kruisem, Ph.D. a doc. Ing. Petrem Fajmanem, CSc. ze Stavební fakulty ČVUT v Praze. Ostatní zdroje jsou ocitovány v místě použití.

Prosba. V případě, že v textu objevíte nějakou chybu nebo budete mít námět na jeho vylepšení, ozvěte se prosím na matej.leps@fsv.cvut.cz.

Datum poslední revize: 22.11.2010