

SKLENĚNÉ KONSTRUKCE

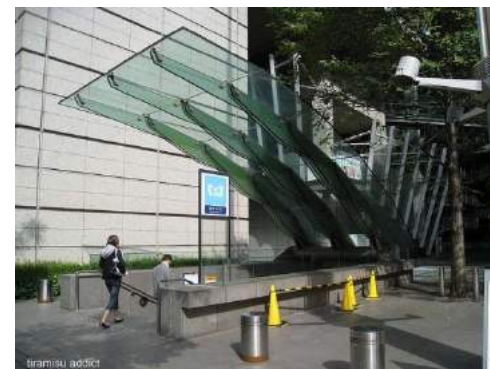
TEORIE, PRAXE A EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM ÚKDK

Ondřej Pešek

OBSAH

2

- ❖ Historie výroby skla
- ❖ Plavené sklo – výroba, vlastnosti
- ❖ Úpravy skla – temperování, vrstvení
- ❖ Navrhování podle norem
- ❖ Soudobé konstrukce
- ❖ Poruchy
- ❖ Výzkum ÚKDK
- ❖ Praktický příklad



HISTORIE VÝROBY SKLA

3

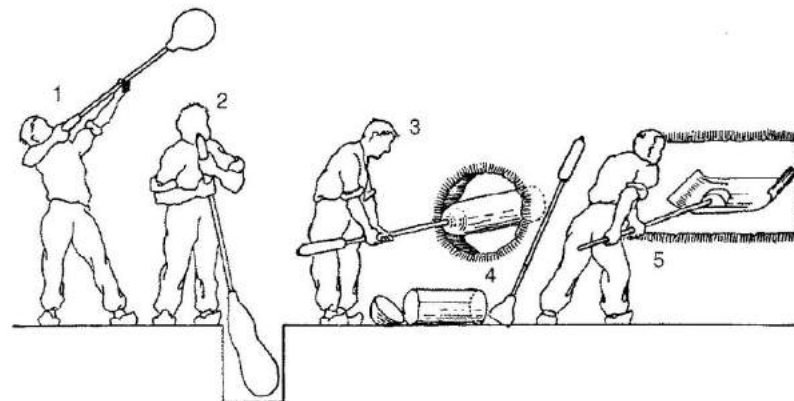
Ruční výroba

❖ ze skleněných foukaných válců

14. století Čechy

=> „procédé de Bohème“

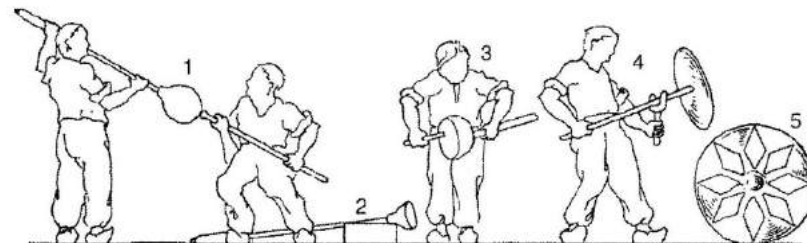
válec ø 400 mm dl. 1100 mm



❖ roztáčení

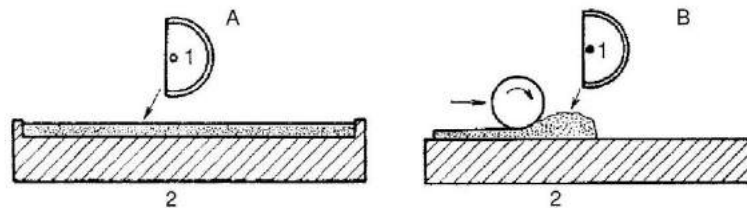
9. století Sýrie

14. století Francie



❖ lití a válcování na stole

17. století Francie



HISTORIE VÝROBY SKLA

4

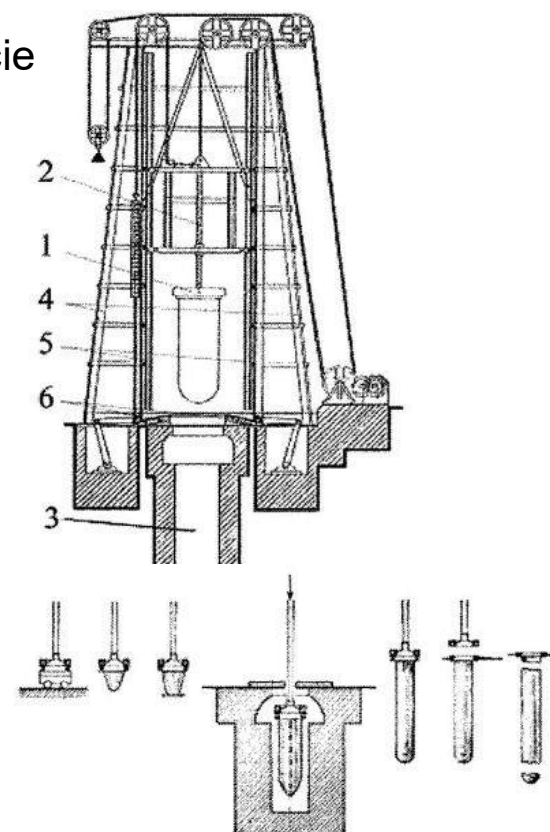
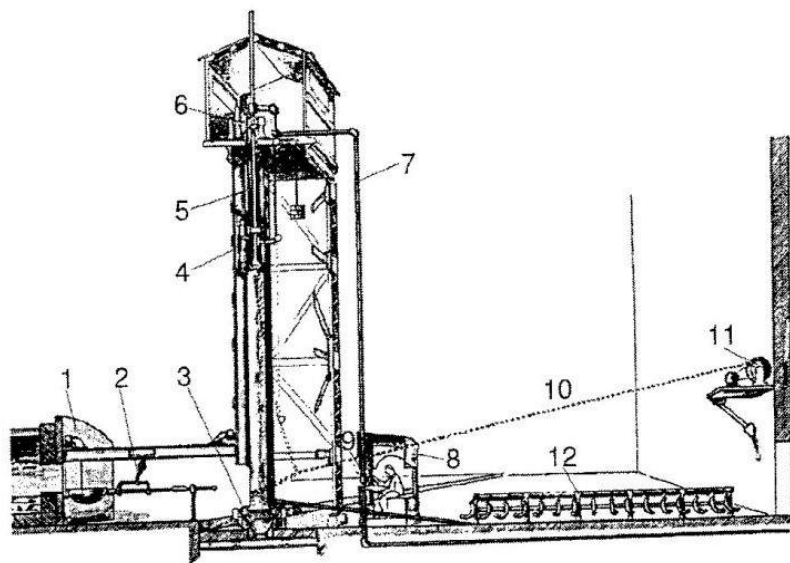
Strojní výroba

❖ Lubbersova metoda ze skleněných válců

❖ Sievertova metoda ze skleněných válců

20. století USA

20. století Francie



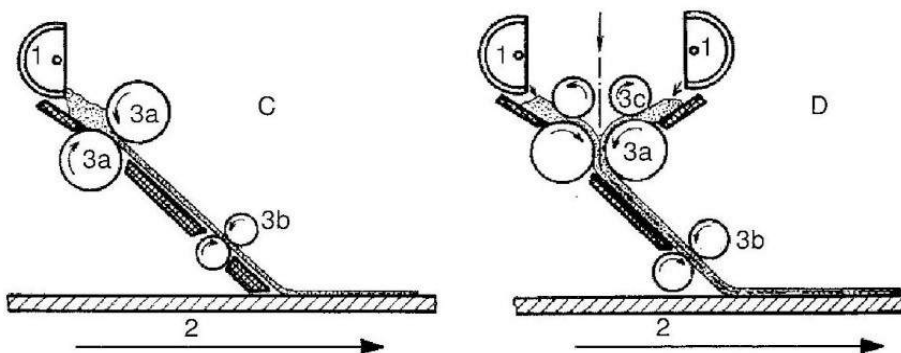
HISTORIE VÝROBY SKLA

5

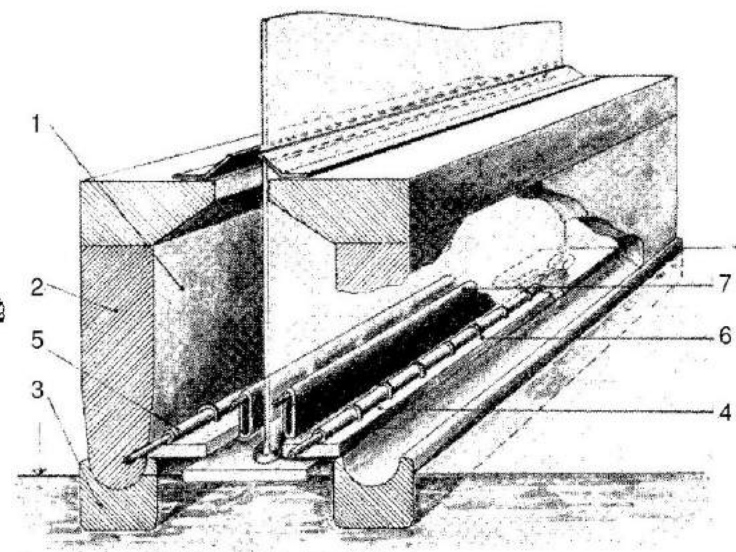
Strojní výroba

❖ kontinuální lití

1925 Ford + Saint Gobain

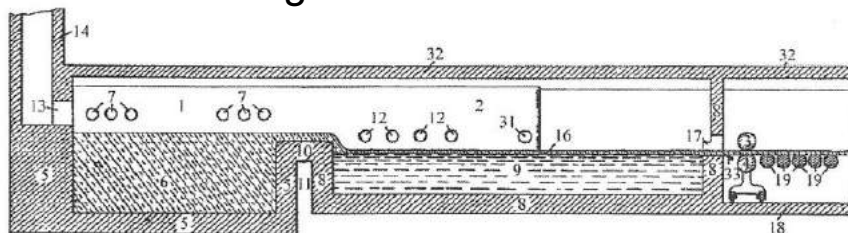


❖ kontinuální tažení



❖ kontinuální plavení

1959 Anglie



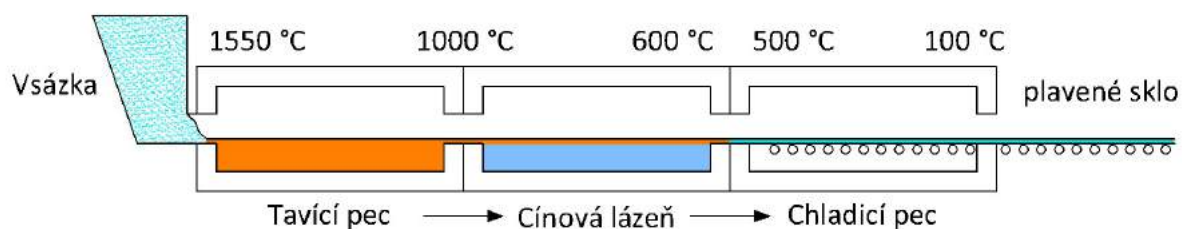
1919 Hostomice

Ilustrace Š. POPOVIČ: *Výroba a zpracování plochého skla*. Grada Publishing a.s.

Praha, 2009. ISBN 978-80-247-3154-4

PLAVENÉ SKLO (FLOAT)

6



Rovnovážná tloušťka:

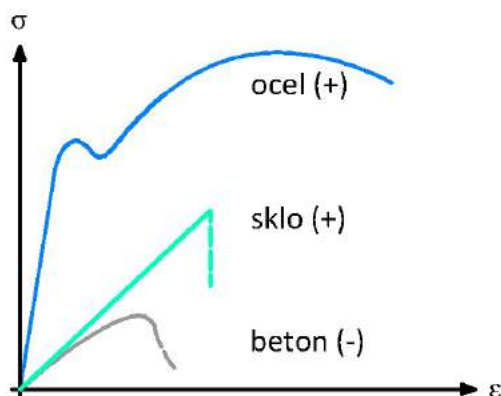
$$T^2 = (S_g + S_t + S_{gt}) \cdot \frac{2\rho_t}{g \cdot \rho_g \cdot (\rho_t - \rho_g)}$$

$E = 70 \text{ GPa}$

$\nu = 0,23$

$G \approx 30 \text{ GPa}$

Česká terminologie	Anglická terminologie	Německá terminologie
Sodnovápenatokřemičité sklo	Soda lime silicate glass	Kalk-Natron-silicatglas
Borosilikátové sklo	Borosilicate glass	Borosilikatglas



Složka		Sodnovápenatokřemičité sklo	Borosilikátové sklo
Oxid křemičitý	SiO ₂	69-74 %	70-87 %
Oxid vápenatý	CaO	5-14 %	-
Oxid sodný	Na ₂ O	10-16 %	0-8 %
Oxid boritý	B ₂ O ₃	-	7-15 %
Oxid draselný	K ₂ O	-	0-8 %
Oxid hořečnatý	MgO	0-6 %	-
Oxid hlinitý	Al ₂ O ₃	0-3 %	0-8 %
Ostatní		0-5 %	0-8 %

PLAVENÉ SKLO

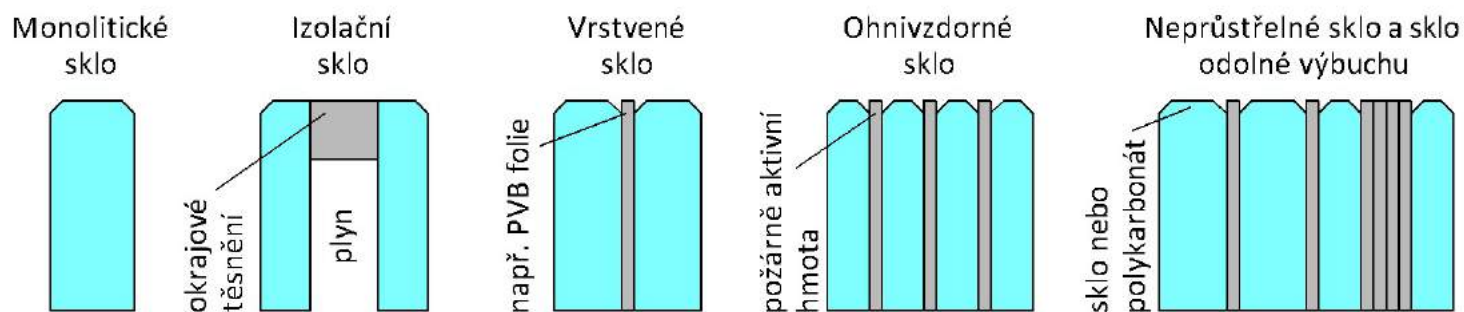
7

Veličina	Symbol	Jednotka	Sodnovápenato- křemičité sklo	Borosilikátové sklo
Hustota (při 18°C)	ρ	kg.m ⁻³	2500	2200 - 2500
Tvrdomost (Knoop)	HK _{0,1/20}	GPa	6	4,5 - 6
Youngův modul (modul pružnosti)	E	MPa	70 000	60 000 - 70 000
Poissonovo číslo	ν	-	0,23 [▼]	0,2
Střední součinitel délkové tepelné roztažnosti [▲]	α	10 ⁻⁶ K ⁻¹	9	Třída 1: 3,1 – 4,0 Třída 2: 4,1 – 5,0 Třída 3: 5,1 – 6,0
Měrná tepelná kapacita	c_p	J.kg ⁻¹ K ⁻¹	720	800
Odolnost proti rozdílu teploty a náhlé změně teploty	-	K	40	80
Souč. tepelné vodivosti	λ	W.m ⁻¹ K ⁻¹	1	1
Střední index lomu viditelného záření	n	-	1,52 [▲]	1,50
Emisivita (opravená)	ε	-	0,837	0,837

ÚPRAVY SKLA

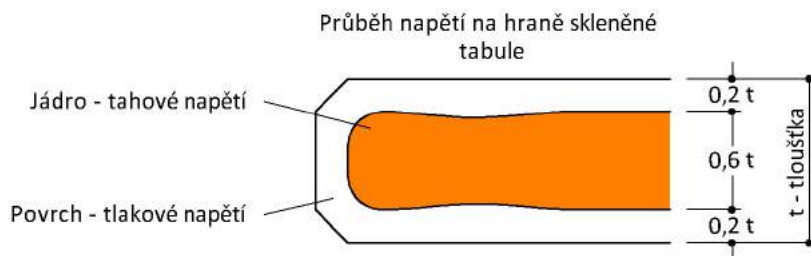
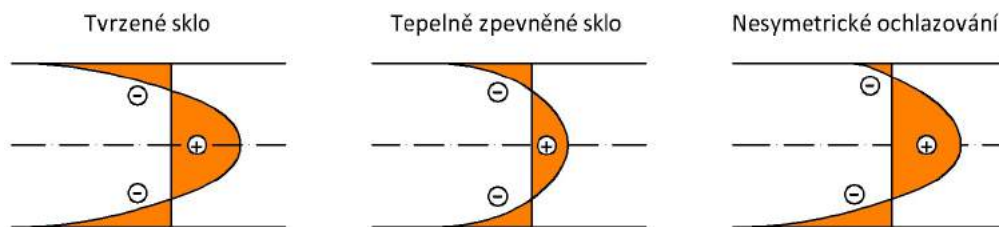
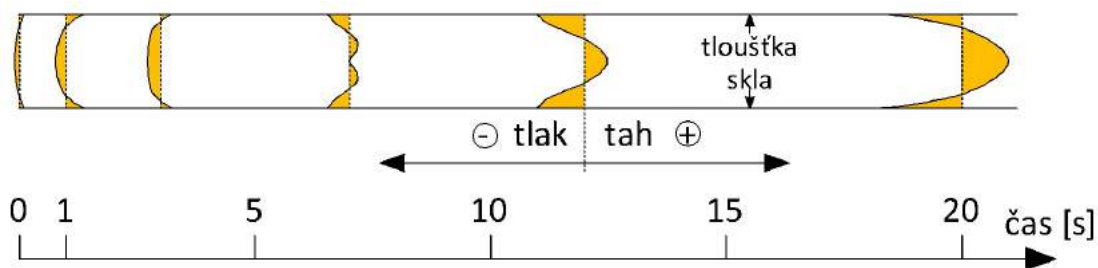
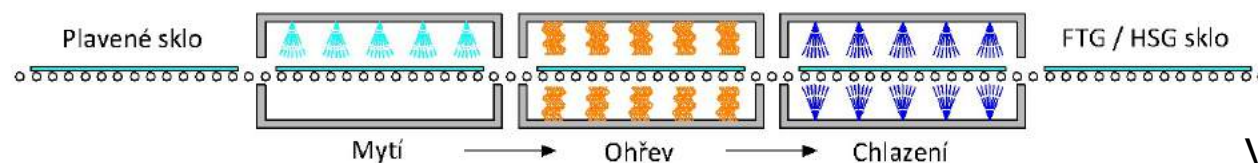
8

- ❖ Řezání - získání požadovaného tvaru a velikosti
- ❖ Ohýbání plochého skla – kolem jedné nebo dvou os
- ❖ Úprava hran – zkosení hran, broušení, leštění
- ❖ Vrtání otvorů
- ❖ Aplikace povrchových úprav
- ❖ Tepelné úpravy
- ❖ Vrstvení skla

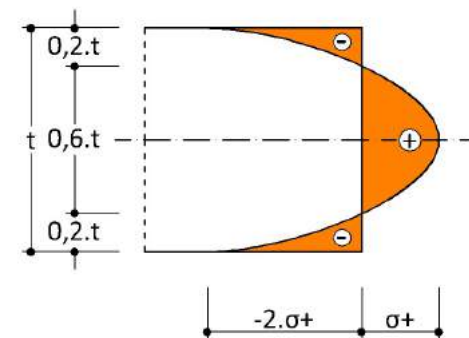


ÚPRAVY SKLA

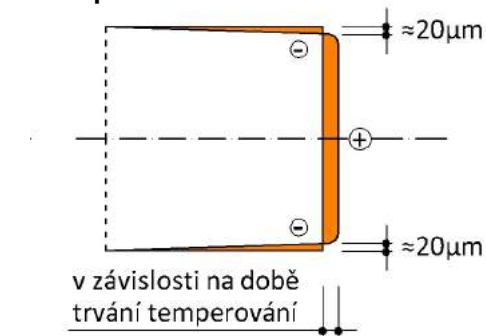
Temperování skla



Výsledek temperování



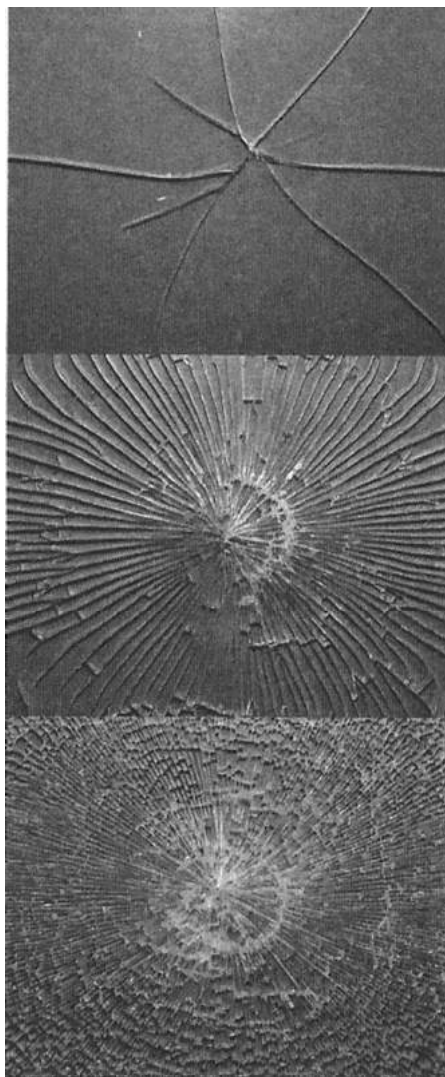
Výsledek chemického temperování



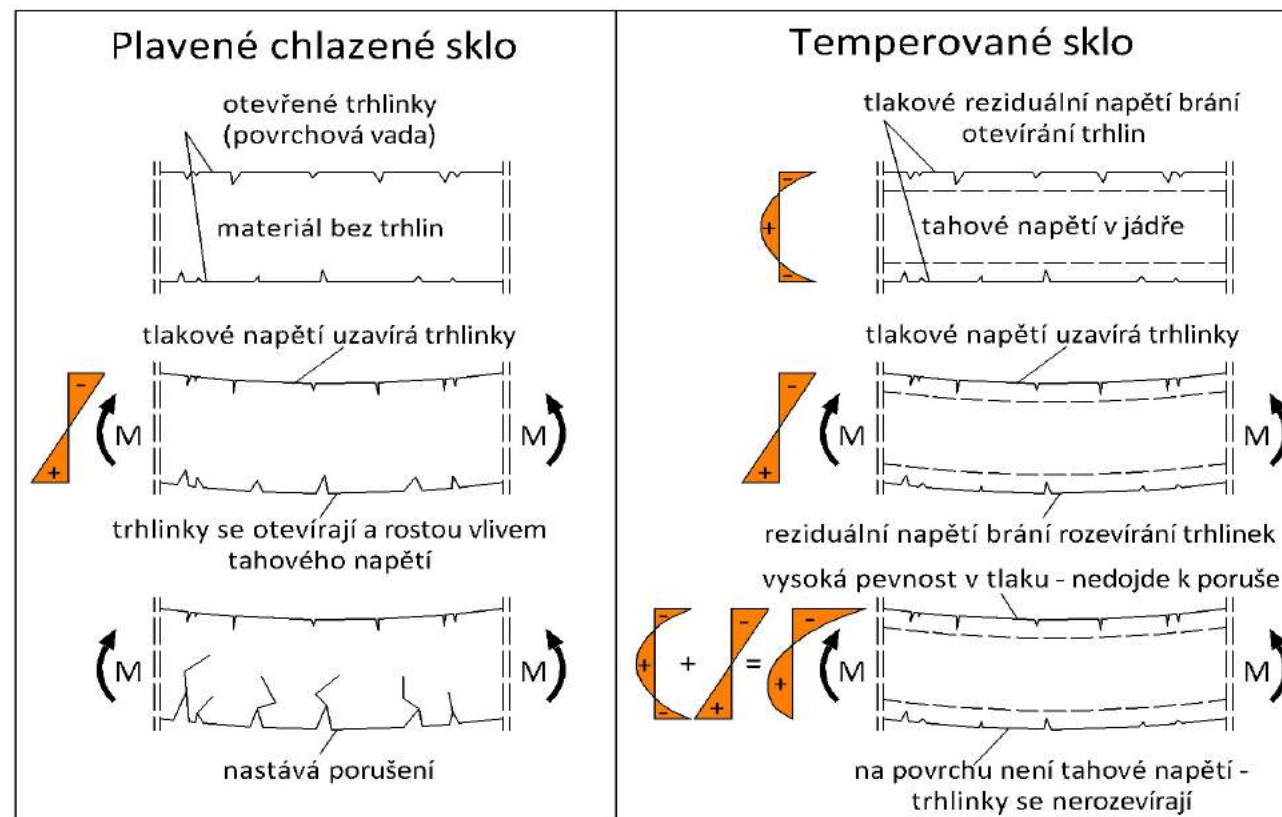
ÚPRAVY SKLA

Temperování skla

10



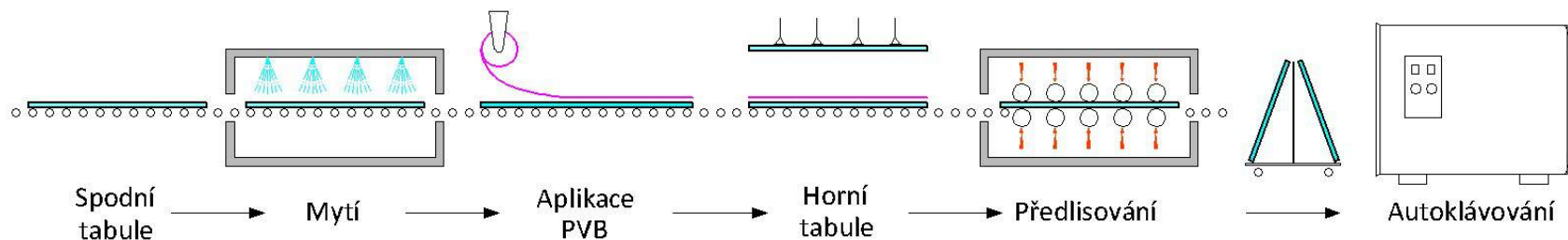
Reziduální napětí	Česká terminologie	Anglická terminologie	Německá terminologie
Žádné	Plavené sklo, chlazené sklo	Float glass, Annealed glass [ANG]	Float glas
Střední	Tepelně zpevněné sklo	Heat strengthened glass [HSG]	Teilvorgespanntes Glas [TVG]
Vysoké	Tepelně tvrzené sklo	Fully tempered glass [FTG]	Einscheiben-Sicherheitsglas [ESG]



ÚPRAVY SKLA

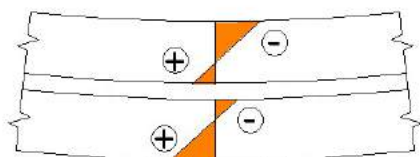
Vrstvení skla

11

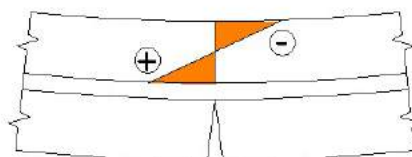


Popis	Česká terminologie	Anglická terminologie	Německá terminologie
Vrstvené sklo z tabulí plaveného nebo tepelně zpevněného skla	Vrstvené sklo	Laminated glass	Verbundglas [VG]
Vrstvené sklo z tabulí tepelně tvrzeného skla s definovanou odolností	Vrstvené bezpečnostní sklo	Laminated safety glass	Verbund-Sicherheitsglas [VSG]

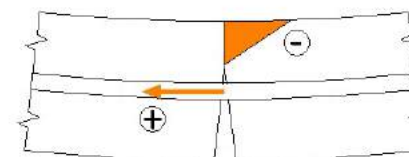
❖ Post breakage behaviour – pokritické chování



Fáze 1



Fáze 2

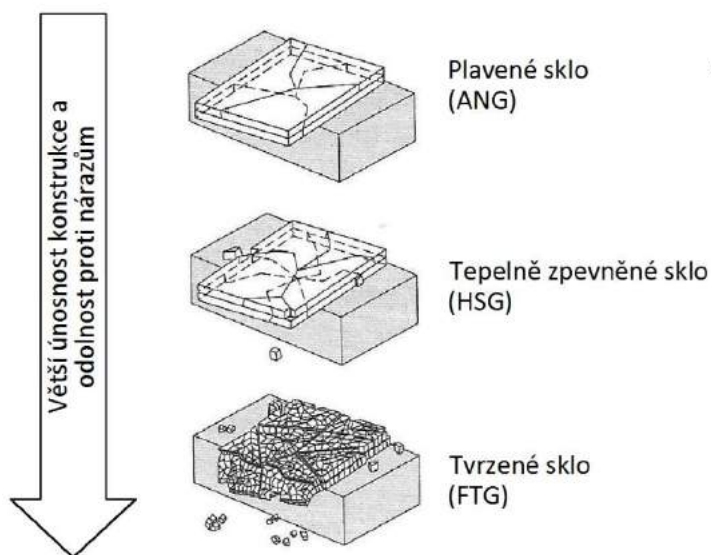


Fáze 3

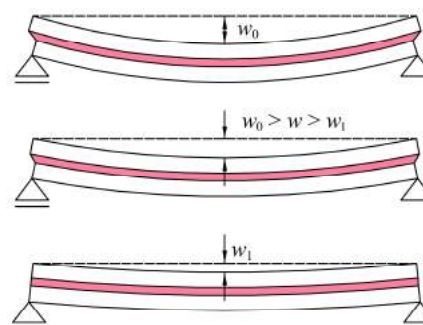
ÚPRAVY SKLA

Vrstvení skla

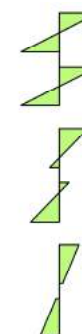
12



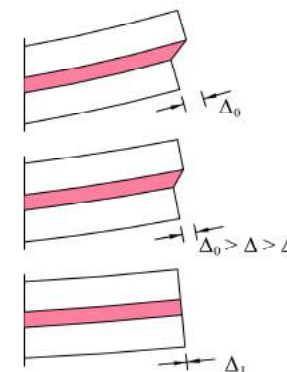
Příklad ohýbaného nosníku z vrstveného skla



Normálové napětí



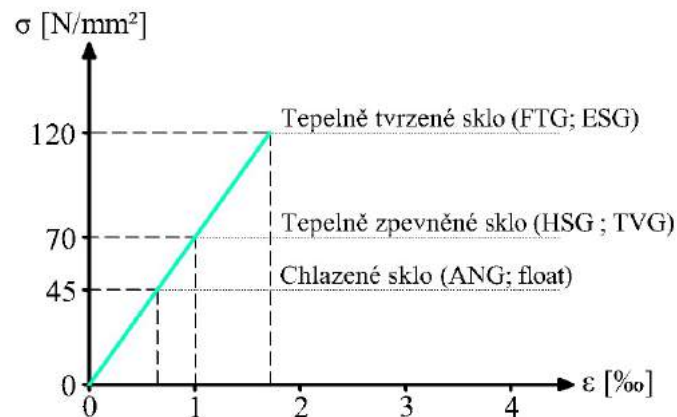
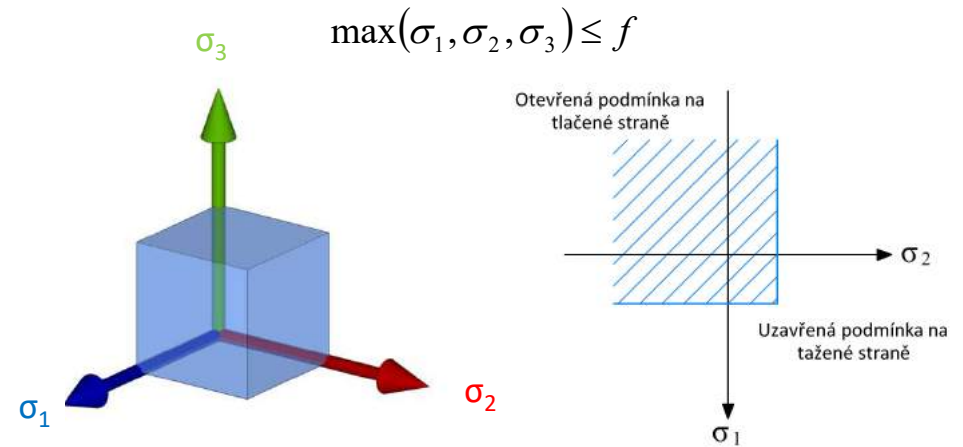
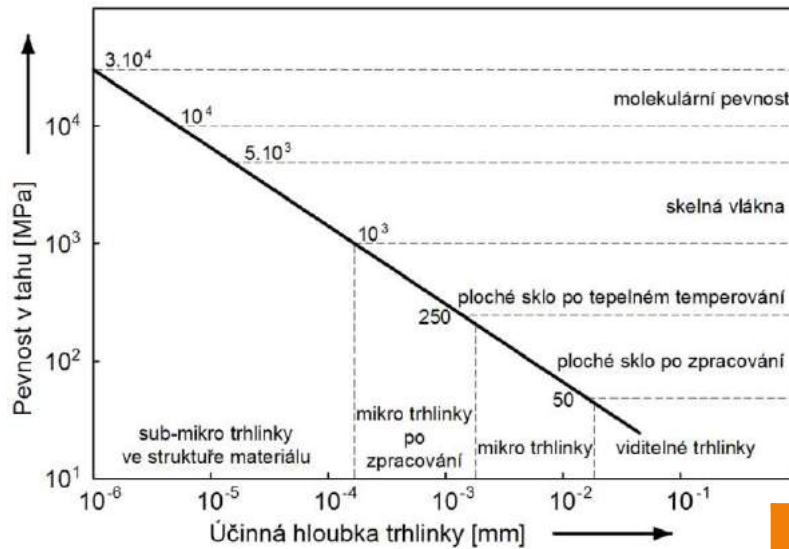
Detail koncového úseku



PLAVENÉ SKLO

Pevnost skla

13



Druh skla	způsob výroby	$f_{b,k}$ [MPa]
Tepelně tvrzené bezpečnostní sklo, prohříváné tepelně tvrzené bezpečnostní sklo	plavené sklo nebo ploché tažené sklo	120
	vzorované sklo	90
	smaltované plavené nebo smaltované vzorované sklo	75
Tepelně zpevněné sklo	plavené sklo nebo ploché tažené sklo	70
	vzorované sklo	55
	smaltované plavené nebo smaltované vzorované sklo	45
Chemicky zpevněné sklo	plavené sklo nebo ploché tažené sklo	150
	vzorované sklo	150
Tepelně tvrzené borokřemičité bezpečnostní sklo	borokřemičité sklo	120
Chlazené plavené sklo	=> bez tepelné úpravy	45

NAVRHOVÁNÍ PODLE NOREM

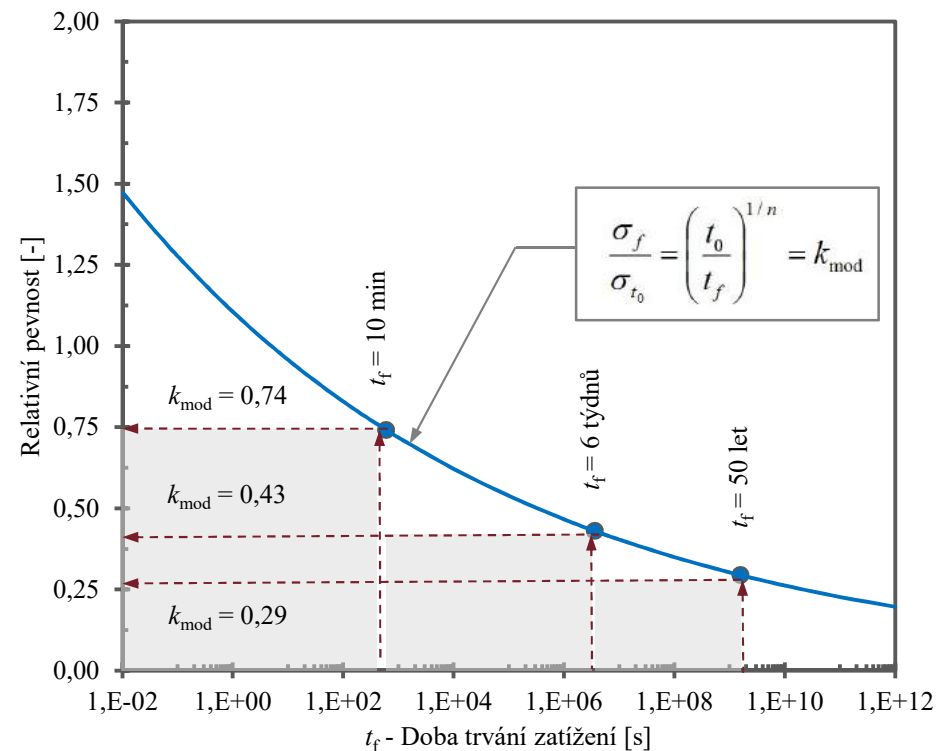
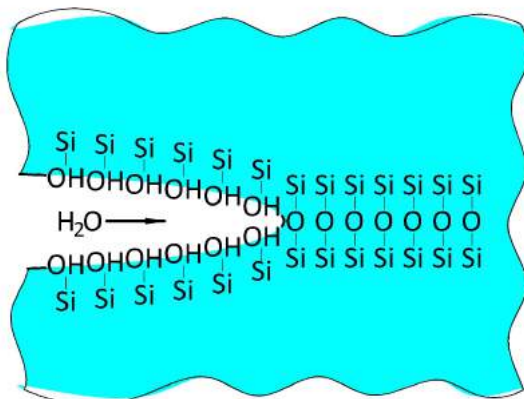
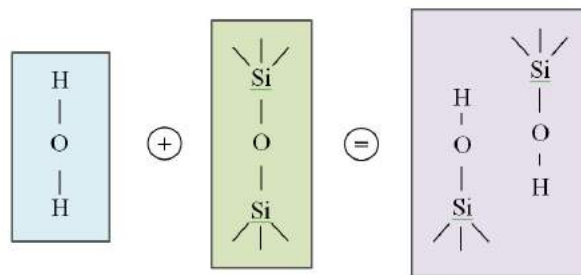
14

- ❖ **ČSN EN 1748-1-1** Sklo ve stavebnictví – Zvláštní základní výrobky – Borosilikátová skla – Část 1-1: Definice a obecné fyzikální a mechanické vlastnosti.
- ❖ **ČSN EN 572-1** Sklo ve stavebnictví – Základní výrobky ze sodnovápenatokřemičitého skla – Část 1: Definice a obecné fyzikální a mechanické vlastnosti.
- ❖ **ČSN EN 1863-1** Sklo ve stavebnictví – Tepelně zpevněné sodnovápenatokřemičité sklo – Část 1: Definice a popis.
- ❖ **ČSN EN 12150-1** Sklo ve stavebnictví – Tepelně tvrzené sodnovápenatokřemičité bezpečnostní sklo – Část 1: Definice a popis.
- ❖ **ČSN EN 12337-1** Sklo ve stavebnictví – Chemicky zpevněné sodnovápenatokřemičité sklo – Část 1: Definice a popis.
- ❖ **ČSN EN 14179-1** Sklo ve stavebnictví – Prohřívané (HST) tepelně tvrzené sodnovápenatokřemičité bezpečnostní sklo – Část 1: Definice a popis.
- ❖ **ČSN EN ISO 12543-1** Sklo ve stavebnictví – Vrstvené sklo a vrstvené bezpečnostní sklo – Část 1: Definice a popis součástí.
- ❖ **ČSN EN 572-2** Sklo ve stavebnictví – Základní výrobky ze sodnovápenatokřemičitého skla - Část 2: Sklo float.
- ❖ **prEN 13474-1** Glass in building – Design of glass panes – Part 1: General basis of design.
- ❖ **prEN 16612** Glass in building – Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing.
- ❖ **prEN 16613** Glass in building – Laminated glass and safety laminated glass - Determination of interlayer mechanical properties.

NAVRHOVÁNÍ PODLE NOREM

Návrhová pevnost skla

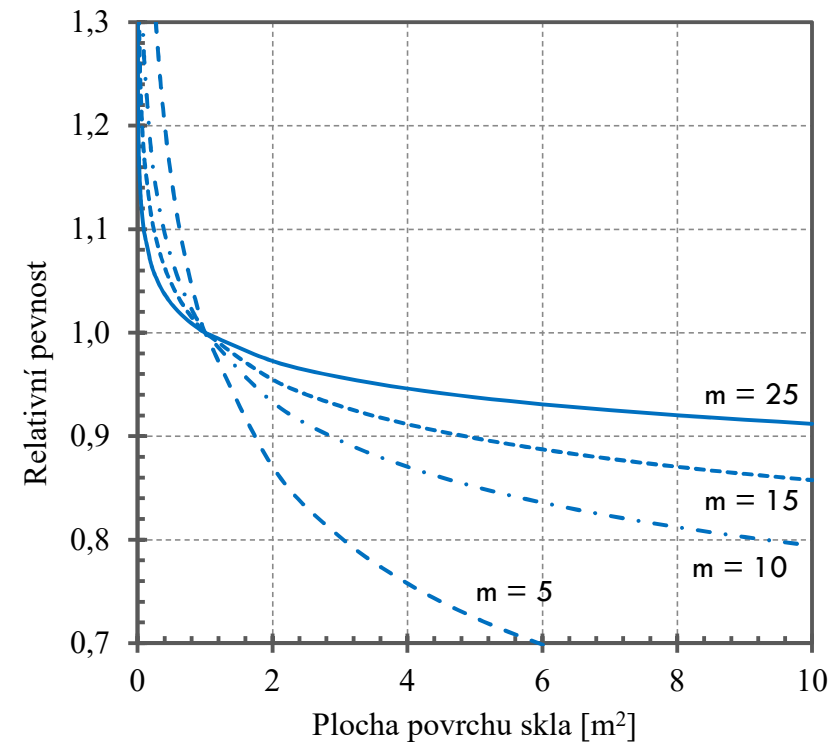
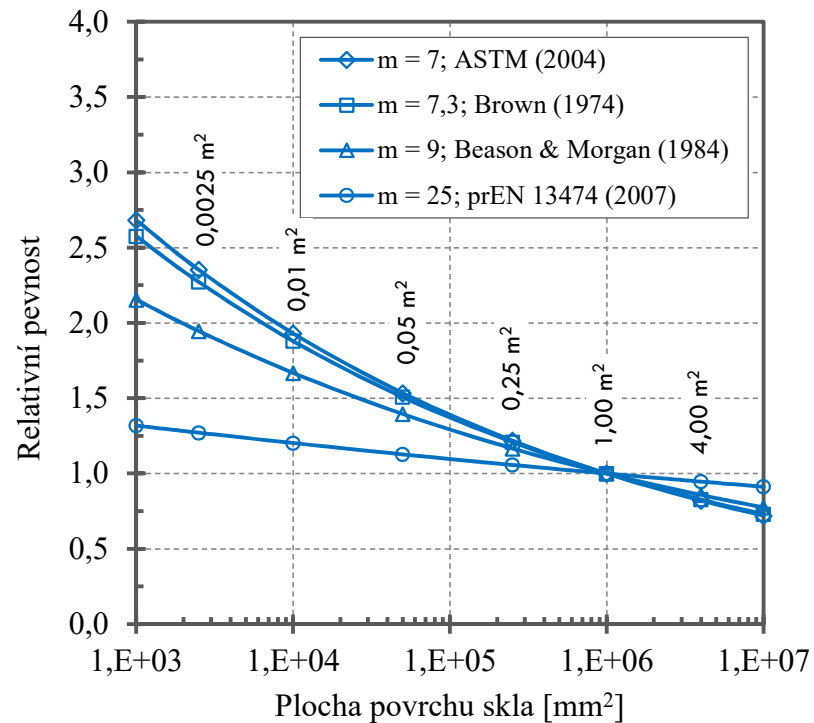
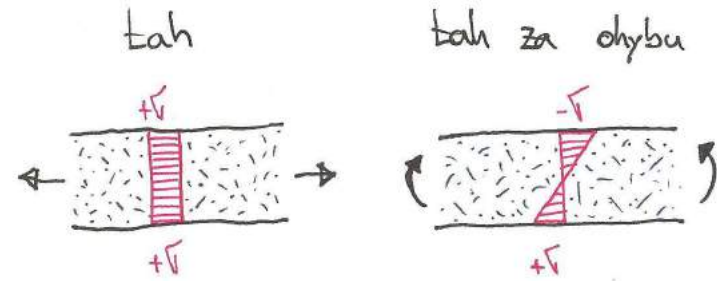
❖ vliv okolního prostředí (vlhkost) + historie zatížení



NAVRHOVÁNÍ PODLE NOREM

16

- ❖ vliv způsobu namáhání
- ❖ vliv velikosti (size effect)



NAVRHOVÁNÍ PODLE NOREM

17

Princip pevnostního posouzení

❖ prEN 13474

$$\sigma_{\text{eff,d}} \leq f_{\text{g,d}}$$

$$f_{\text{g,d}} = \left(k_{\text{mod}} \frac{f_{\text{g,k}}}{\gamma_{\text{m}} \cdot k_{\text{A}}} + \frac{f_{\text{b,k}} - f_{\text{g,k}}}{\gamma_{\text{v}}} \right) \cdot \gamma_{\text{n}}$$

$$\sigma_{\text{eff,d}} = \left[\frac{1}{A} \int_A (\sigma_1(x, y))^\beta \, dx \, dy \right]^{1/\beta}$$

k_{mod} – vliv prostředí a trvání zatížení

k_{A} – vliv plochy skla A (size effect)

γ_{n} – národní součinitel

❖ prEN 16612

$$\sigma_{\text{max}} \leq f_{\text{g,d}}$$

$$f_{\text{g,d}} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot k_{\text{sp}} \cdot f_{\text{g,k}}}{\gamma_{\text{M,A}}} + \frac{k_{\text{v}} \cdot (f_{\text{b,k}} - f_{\text{g,k}})}{\gamma_{\text{M,v}}}$$

k_{mod} – vliv prostředí a trvání zatížení

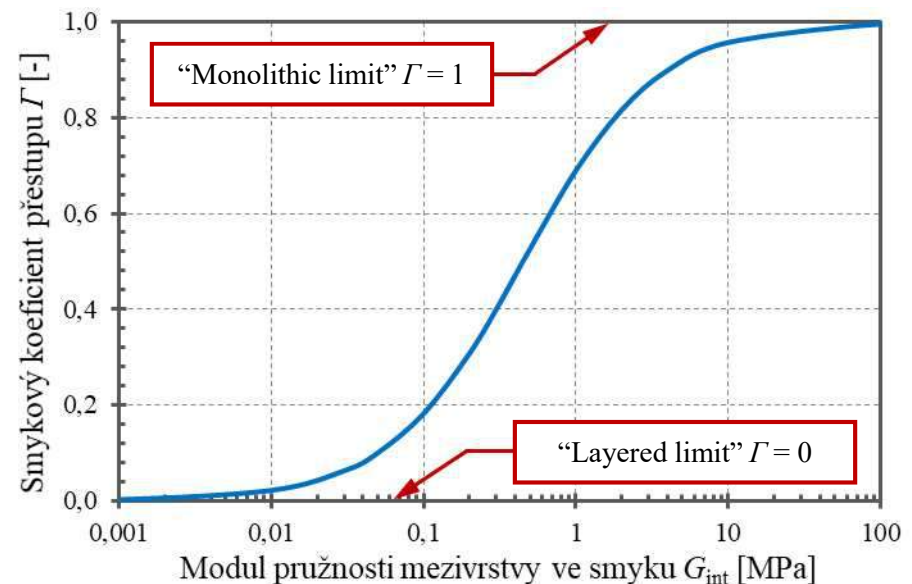
k_{sp} – úprava povrchu (surface profile)

k_{v} – poloha skla při temperování

ÚČINNÁ TLOUŠŤKA SKLA

18

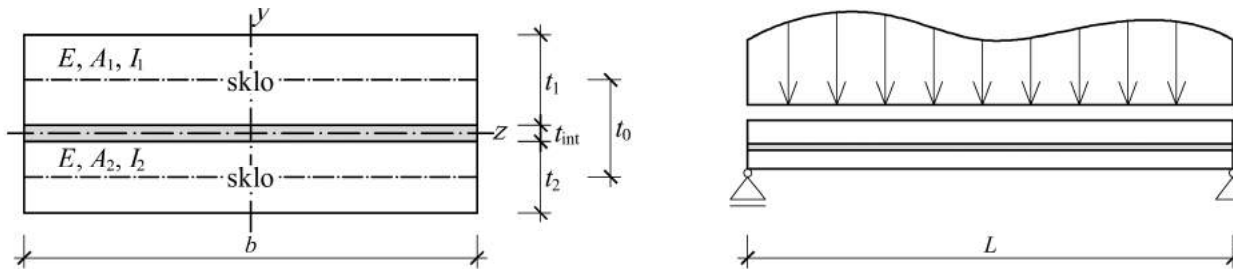
- ❖ potřebné pro ruční výpočet
- ❖ vliv spolupůsobení jednotlivých skleněných tabulí spojených mezivrstvou → přenos smykem v mezivrstvě
- ❖ zajišťuje smyková tuhost materiálu mezivrstvy → modul pružnosti ve smyku G_{int}
- ❖ vliv teploty a trvání zatížení (visko-elastický materiál)
- ❖ různé modely a početní postupy – průkopník Wölfel (sendvičové konstrukce)



ÚČINNÁ TLOUŠŤKA SKLA

19

Model Wölfel – Bennison – Calderone



$$\Gamma = \frac{1}{1 + \beta \frac{E \cdot t_{\text{int}}}{G_{\text{int}} \cdot b \cdot L^2} \cdot \frac{A_1 \cdot A_2}{A_1 + A_2}}$$

$$\Gamma = \frac{1}{1 + 9,6 \frac{E \cdot \alpha_s \cdot t_{\text{int}}}{G_{\text{int}} \cdot t_0^2 \cdot L^2}}$$

$$\alpha_s = \frac{1}{b} \cdot \frac{A_1 \cdot A_2}{A_1 + A_2} \cdot t_0^2 = t_1 \cdot t_{s,2}^2 + t_2 \cdot t_{s,1}^2 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 + t_2} \cdot t_0^2$$

$$t_{s,1} = \frac{t_0 \cdot t_1}{t_1 + t_2}$$

$$t_{s,2} = \frac{t_0 \cdot t_2}{t_1 + t_2}$$

$$t_{\text{eff,w}} = \sqrt[3]{t_1^3 + t_2^3 + 12 \cdot \Gamma \cdot \alpha_s}$$

$$t_{1,\text{eff},\sigma} = \sqrt{\frac{t_{\text{eff,w}}^3}{t_1 + 2 \cdot \Gamma \cdot t_{s,2}}}$$

$$t_{2,\text{eff},\sigma} = \sqrt{\frac{t_{\text{eff,w}}^3}{t_2 + 2 \cdot \Gamma \cdot t_{s,1}}}$$

SOUDOBÉ KONSTRUKCE

20



Schodiště



SOUDOBÉ KONSTRUKCE

21

Fasády

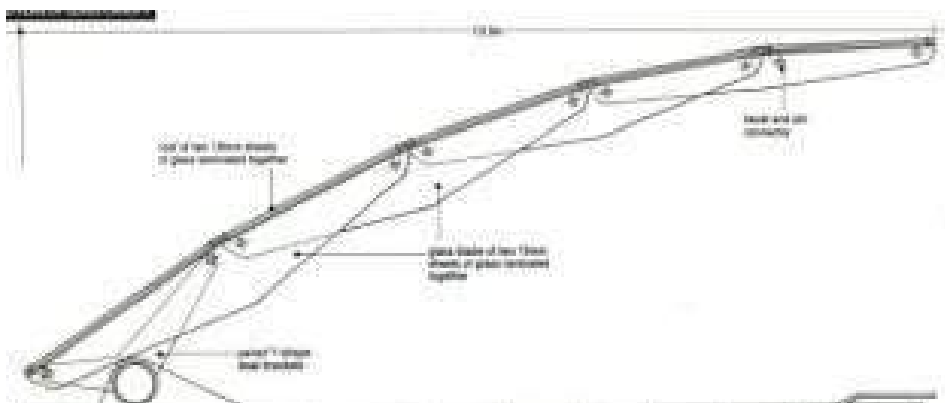


SOUDOUBÉ KONSTRUKCE

22



Přístřešky



SOUDOBÉ KONSTRUKCE

23



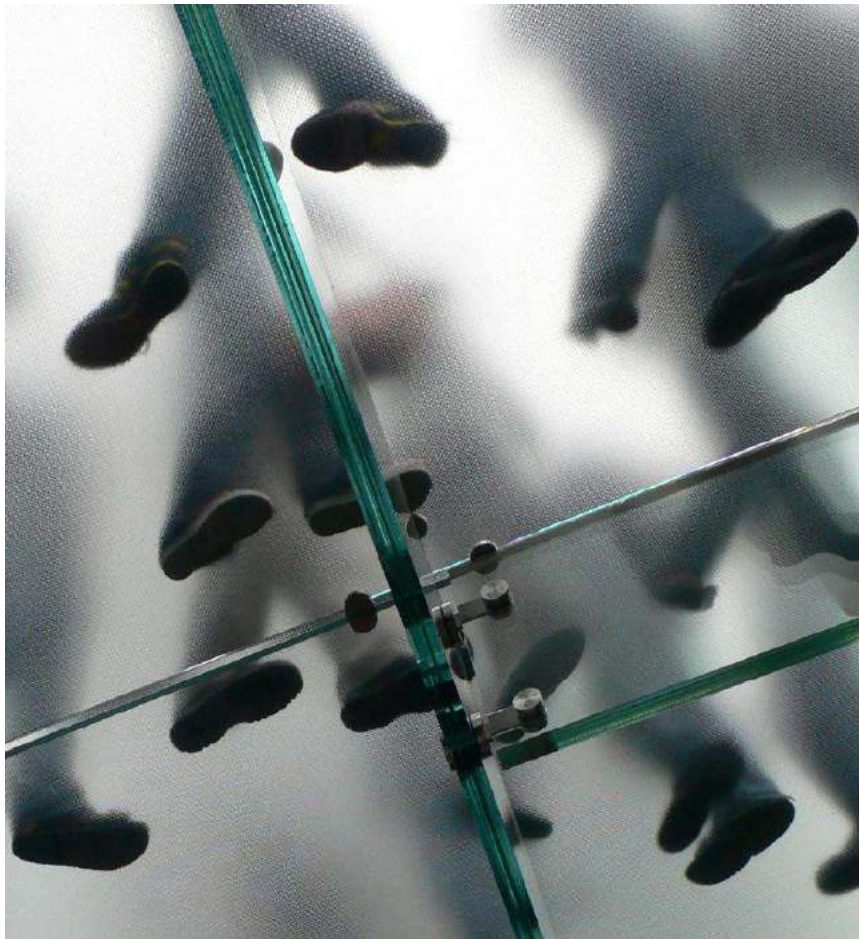
Zastřešení



SOUDOBE KOSTRUKCE

24

Pochůzné plochy



SOUDOBÉ KONSTRUKCE

25



Prostorové konstrukce



SOUDOBÉ KONSTRUKCE

26

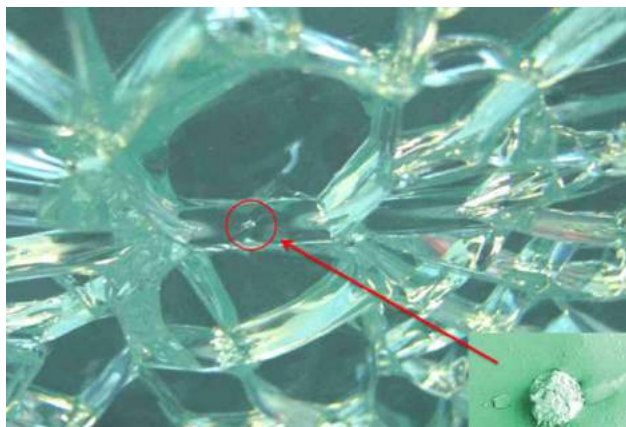
Lávky



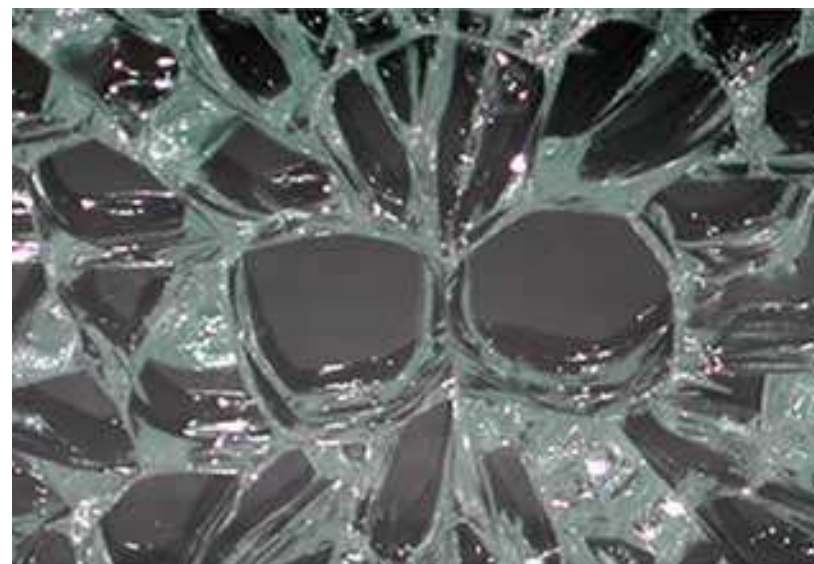
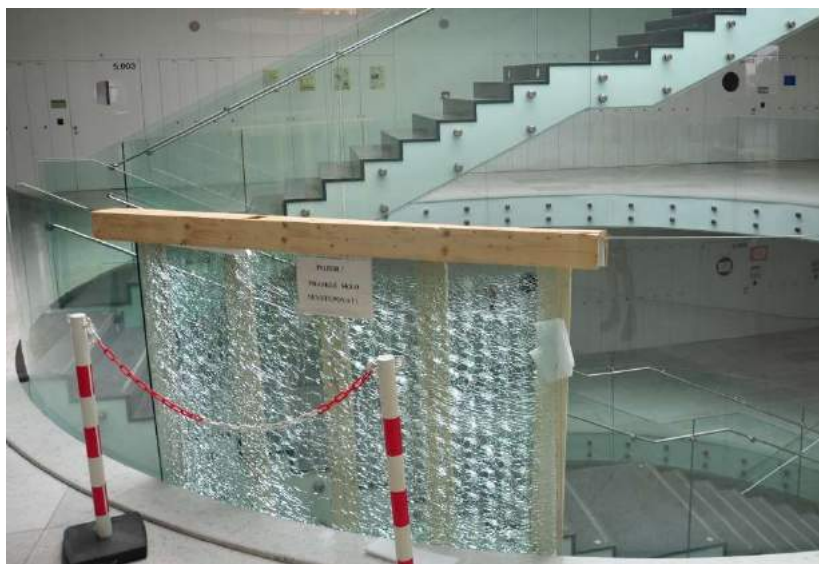
PORUCHY

Náhlá „exploze“ tepelně tvrzeného skla

27



HST
heat
soak
test



PORUCHY

Delaminace vrstveného skla

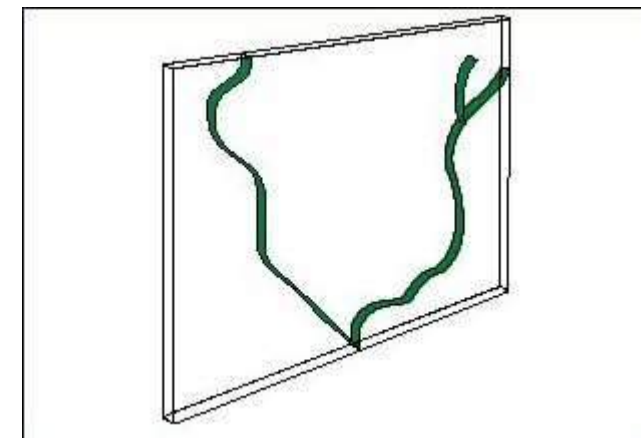
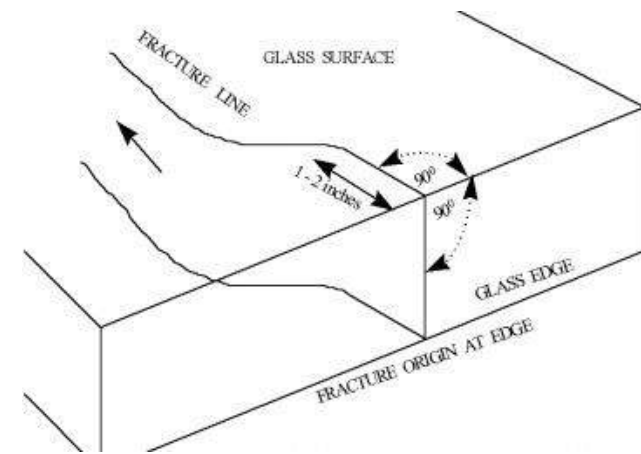
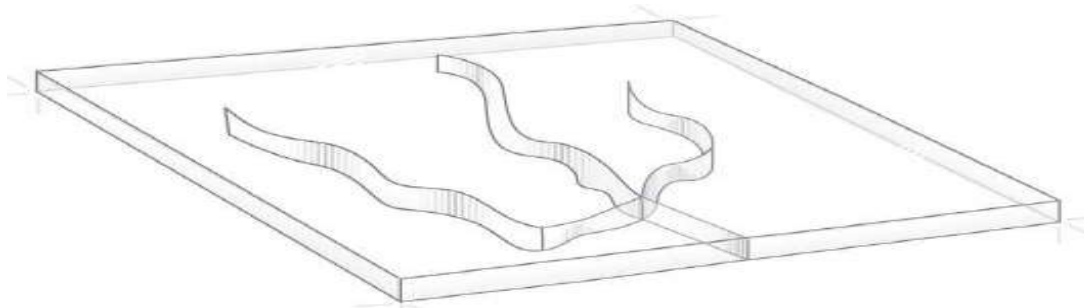
28



PORUCHY

Tepelný šok

29



VÝZKUM KDK

30

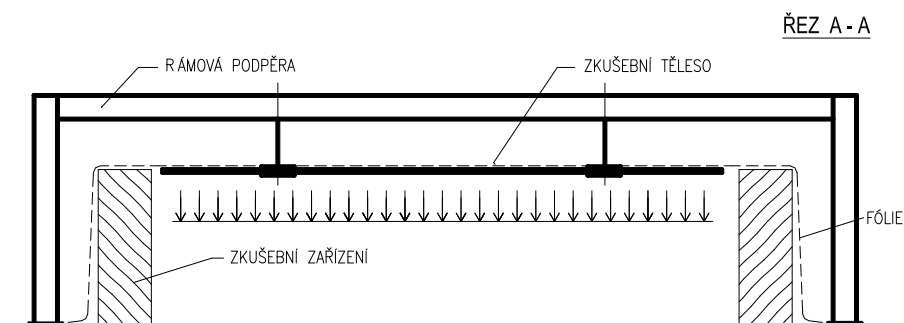
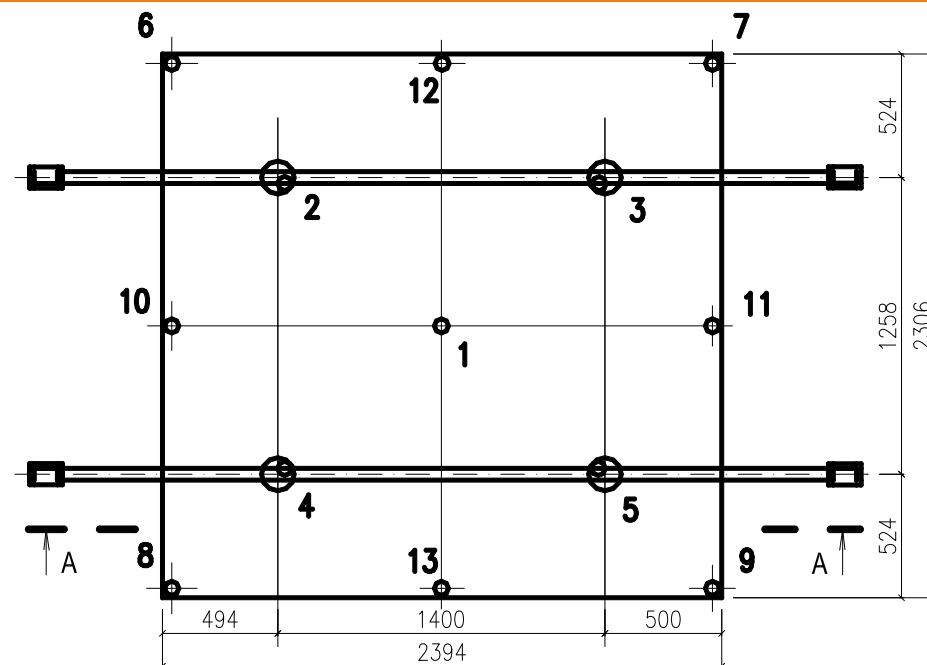
- ❖ **Od r. 1980**
- ❖ **Plošné dílce příčně zatížené – desky**
 - ❖ **Bodově uložené**
 - ❖ **Liniově uložené**
- ❖ **Prutové prvky – stabilitní problémy**
 - ❖ **Osový tlak → rovinný vzpěr**
 - ❖ **Ohyb na tuhou osu → klopení**
 - ❖ **Interakce vzpěru a klopení**

VÝZKUM KDK

Desky bodově podepřené

31

Těleso	tl. [mm]	Skladebné uspořádání
T1	12	ESG 12 Bezpečnostní sklo
T2		
T3	2 x 10	VSG 10.10.2 Vrstvené sklo
T4		
T5	2 x 8	VSG 8.8.2 ESG Vrstvené bezpečnostní sklo
T6		



VÝZKUM KDK

Desky bodově podepřené

32



Desky bodově podepřené

Výsledky zatěžovacích zkoušek

33

Skutečná hmotnost jednotlivých skleněných deskových zkušebních těles zjištěná vážením dosahuje následujících hodnot:

tělesa T1, T2	.....	163,00 kg,	tj.	29,50 kg.m ⁻²
tělesa T3, T4	.....	280,00 kg,	tj.	50,72 kg.m ⁻²
tělesa T5, T6	.....	214,40 kg,	tj.	38,84 kg.m ⁻²

Experimentálně stanovená návrhová únosnost (zatížení) nosného dílce odpovídající konvenčnímu meznímu průhybu, který se u konstrukčního skla volí v rozmezí 1/100 až 1/200 rozpětí:

Zkušební těleso	Mezní únosnost p_{\max} [kPa]
T 1	3,23
T 2	5,46
T 3	1,50
T 4	2,44
T 5	- x)
T 6	3,51

x) Pozn.: těleso bylo cíleně porušeno mechanicky při zatížení $p = 3$ kPa

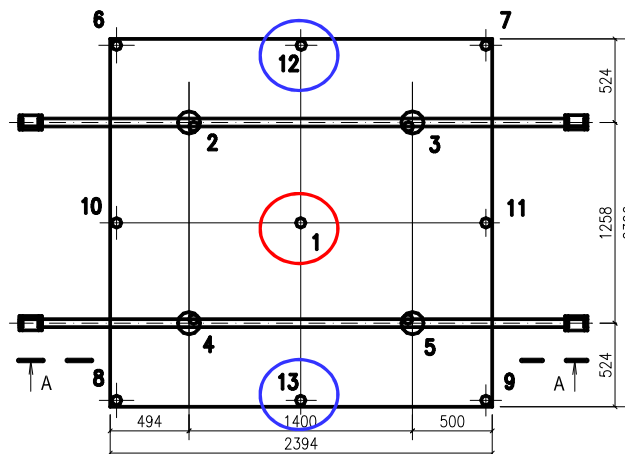
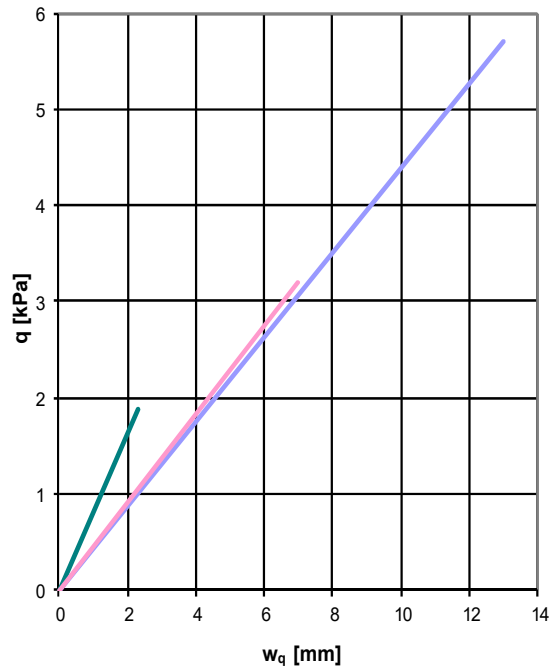
Desky bodově podepřené

Výsledky zatěžovacích zkoušek

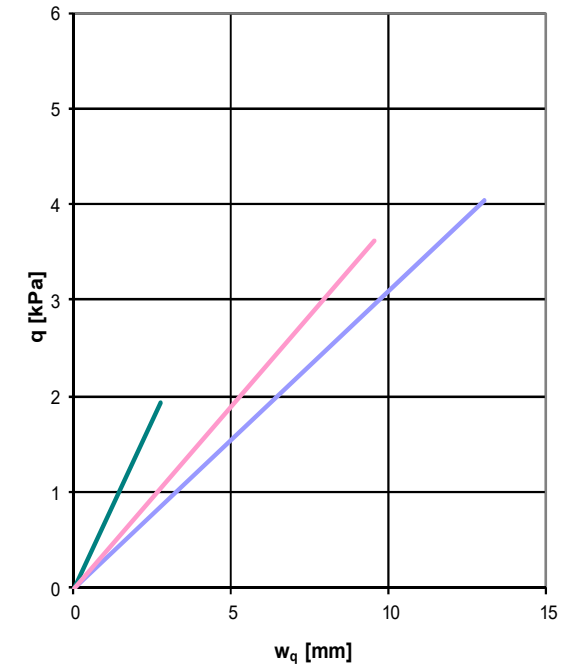
34

Výsledné závislosti q - w pro všechna zkušební tělesa stejné konstrukční a materiálové skladby zpracované metodou nejmenších čtverců.

BOD 1
testy T1, T2, testy T3, T4, testy T5, T6



BODY 12, 13
testy T1, T2, testy T3, T4, testy T5, T6



— testy T1, T2 — testy T3, T4 — testy T5, T6

— testy T1, T2 — testy T3, T4 — testy T5, T6

Desky bodově podepřené

Mechanismus porušení

35

Kromě problému závislosti přetvoření (průhybu) v procesu nárůstu zatížení až do dosažení objektivní mezní únosnosti zkušebního tělesa je zvláště v případě nosných systémů z konstrukčního skla nezbytné analyzovat důsledky mechanismu porušení skleněného dílce z hlediska bezpečnosti osob v překrytém prostoru.

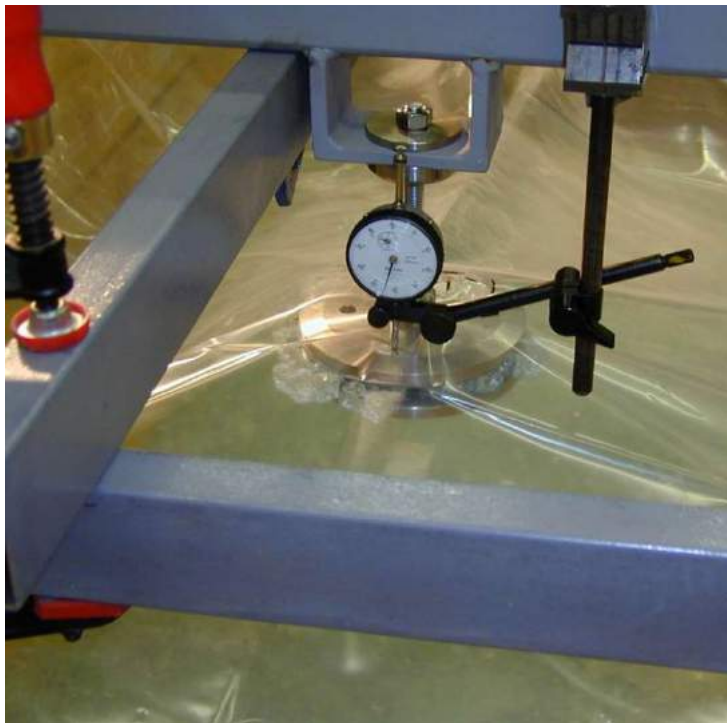
V uvedeném smyslu se proto zaměříme dále podrobněji na dokumentaci způsobu a průběhu porušení jednotlivých zkušebních těles T1 až T6 na mezi objektivní únosnosti při působení plného rovnoměrného zatížení.

Desky bodově podepřené

Mechanismus porušení – zkušební tělesa T1 a T2

36

Jednovrstvé kalené sklo vykazuje příznivé pevnostní a deformační charakteristiky i hladinu mezní únosnosti. K porušení na mezi objektivní únosnosti dochází náhle, a to při iniciaci lomu skla v oblasti uchycení kovovými kruhovými deskami. Z hlediska bezpečnosti je příznivé, že se tabule skla rozpadne na malé části, nicméně všechny úlomky skla propadnou do překrytého prostoru.



Desky bodově podepřené

Mechanismus porušení – zkušební tělesa T3 a T4

37

Dvouvrstvé nekalené sklo s mezilehlou fólií má z analyzovaných typů zkušebních těles relativně nejmenší únosnost a tuhost, a to zejména též z hlediska podílu mezního zatížení a vlastní tíhy skleněného dílce. Na hladině objektivní mezní únosnosti dochází k postupnému rozvíjení lomových linií, proces porušování dílce není jednorázový. Z hlediska bezpečnosti v překrytém prostoru je příznivé, že skleněný dílec zůstává i po porušení v zásadě celistvý a ztužující fólie umožňuje i manipulaci s celým zkušebním tělesem



Desky bodově podepřené

Mechanismus porušení – zkušební těleso T5

38

Dvouvrstvé kalené sklo s mezilehlou fólií vykazuje příznivé přetvárné i pevnostní parametry. Úder klavírem uprostřed střešního dílce inicioval prudký a náhlý rozvoj dělení vrstvené skleněné tabule lomovými liniemi na drobné dílčí části, avšak vlivem vazby vytvořené mezilehlou fólií nedošlo k rozpadu deskového tělesa na dílčí úlomky. Nicméně po obvodu závěsných kovových svěrných desek došlo k vytvoření otvorů porušením mezilehlé fólie a celý skleněný zkušební dílec se po době rámcově 10 sekund propadl na dno zkušebního zařízení



Desky bodově podepřené

Mechanismus porušení – zkušební těleso T6

39

S ohledem na jinak příznivé deformační i pevnostní charakteristiky navrženého skladebného řešení dílce zastřešení lze považovat za účelné eliminovat naznačený problém doplňkovou technickou úpravou vylučující pád porušeného tělesa. Navržená úprava spočívá ve vložení ochranného lanka pod skleněnou střešní desku. Lanko je uchyceno na závěsná oka v ose šroubů kruhových svěrných desek a je vedeno v diagonálách a dále po linii spojující čtyři podpůrné uzly skleněné desky. Použité ocelové lanko mělo průměr $\varnothing 5$ mm, obecně postačí dimenze odpovídající hmotnosti skleněného dílce a počtu závěsů.

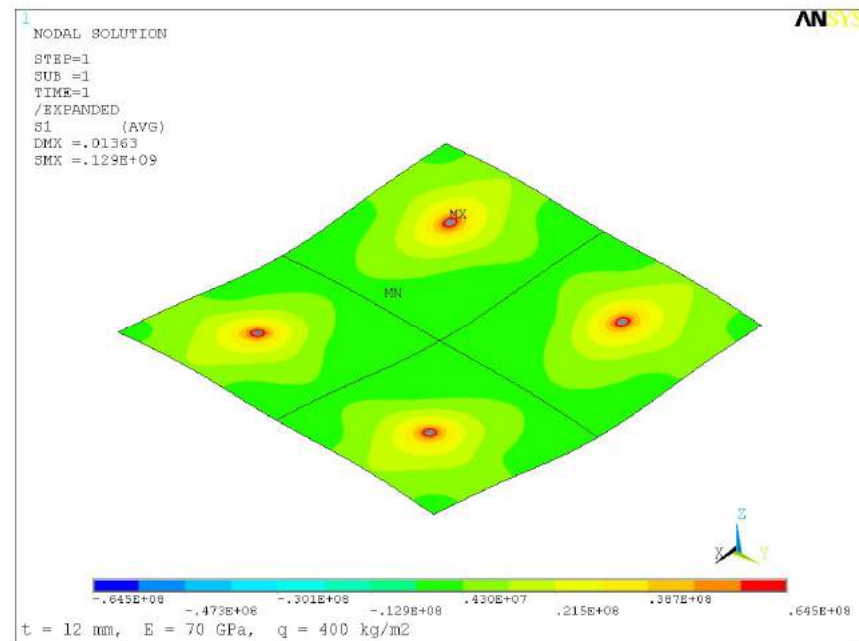
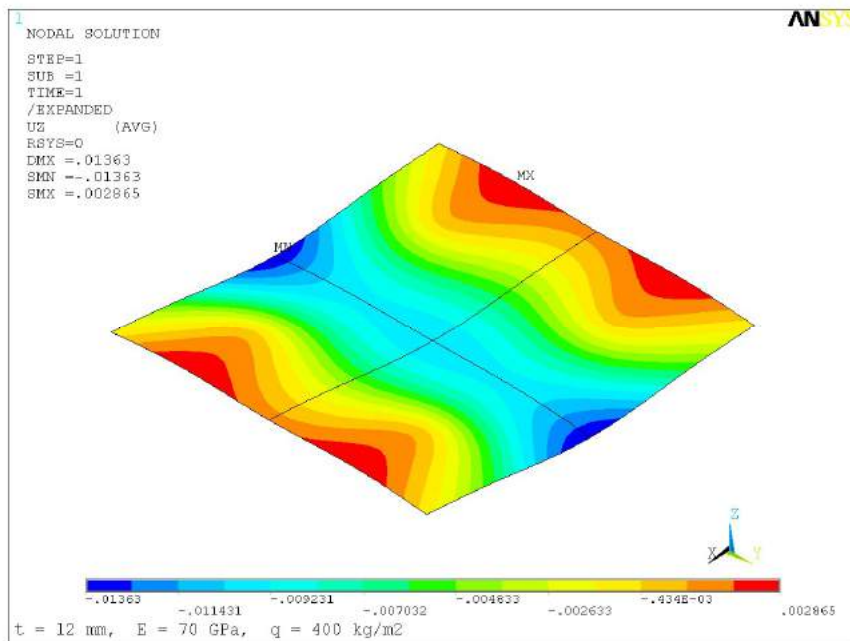


Desky bodově podepřené

Numerická analýza

40

Pro zkoušená tělesa z konstrukčního skla byl vytvořen výpočtový statický model s využitím programového systému ANSYS. V první fázi byl model sestaven pro dílec z jednovrstvého kaleného skla s rozměry odpovídajícími zkušebním tělesům T1, T2 (tloušťka 12 mm a další rozměry podle obr. 2) a okrajovými podmínkami simulujícími podepření při zatěžovacích zkouškách, které bylo navrženo tak, aby odpovídalo uložení dílce ve skutečné konstrukci.

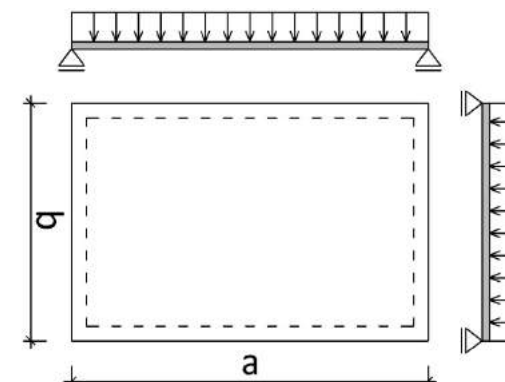
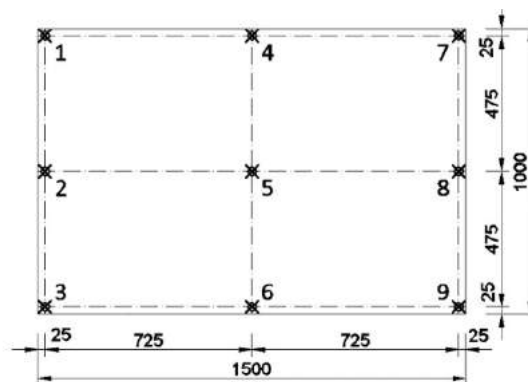
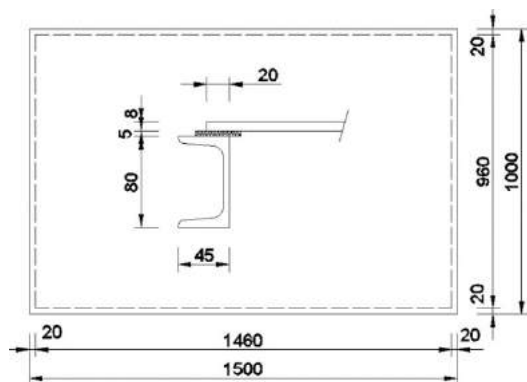
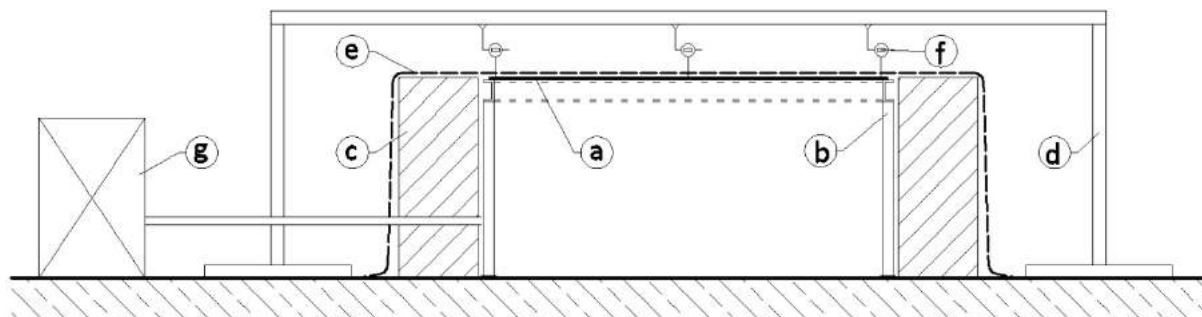


VÝZKUM KDK

Desky liniově podepřené

41

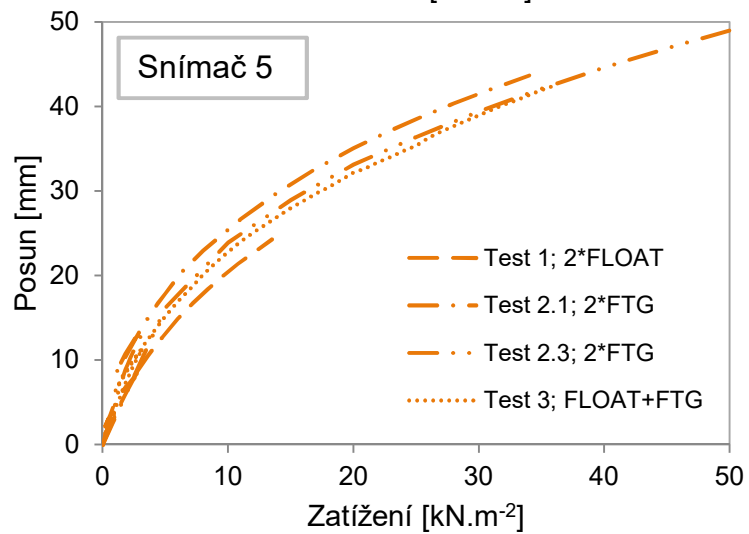
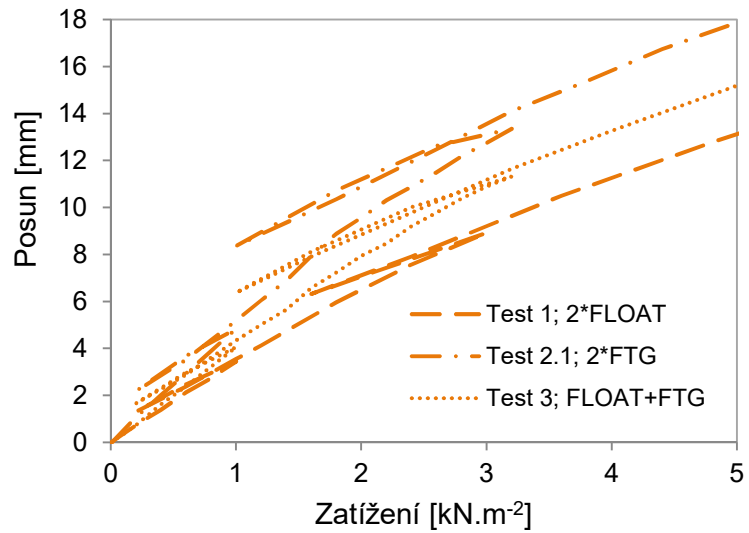
Vzorek	Popis	
T1	Vrstvené sklo: 4 mm float + 0,78 mm PVB + 4 mm float	
T2	Laminated glass: 4 mm FTG + 0,78 mm PVB + 4 mm FTG	
T3	Laminated glass: 4 mm float (spodní) + 0,78 mm PVB + 4 mm FTG (horní)	



Desky liniově podepřené

Výsledky experimentu

42



Desky liniově podepřené

Mechanismus porušení – zkušební těleso T1

43

Vzorek T1: 2*4 mm plavené sklo

Mezní únosnost 13,6 kN/m²



Desky liniově podepřené

Mechanismus porušení – zkušební těleso T2

44

Vzorek T2: 2*4 mm „kalené“ sklo

Test 2.1: Zatíženo na 50 kN/m², test přerušeno z důvodu limitů měřicího zařízení

Test 2.2: PVC kryt porušen při zatížení 54 kN/m²

Test 2.3: Porušení při už zatížení **51,5 kN/m²**



Desky liniově podepřené

Mechanismus porušení – zkušební těleso T3

45

Vzorek T3: 4 mm float + 4 mm FTG

Float sklo porušeno při zatížení

26 kN/m² (průběh hlavních napětí)

Další nárůst zatížení až na hodnotu

37,2 kN/m²

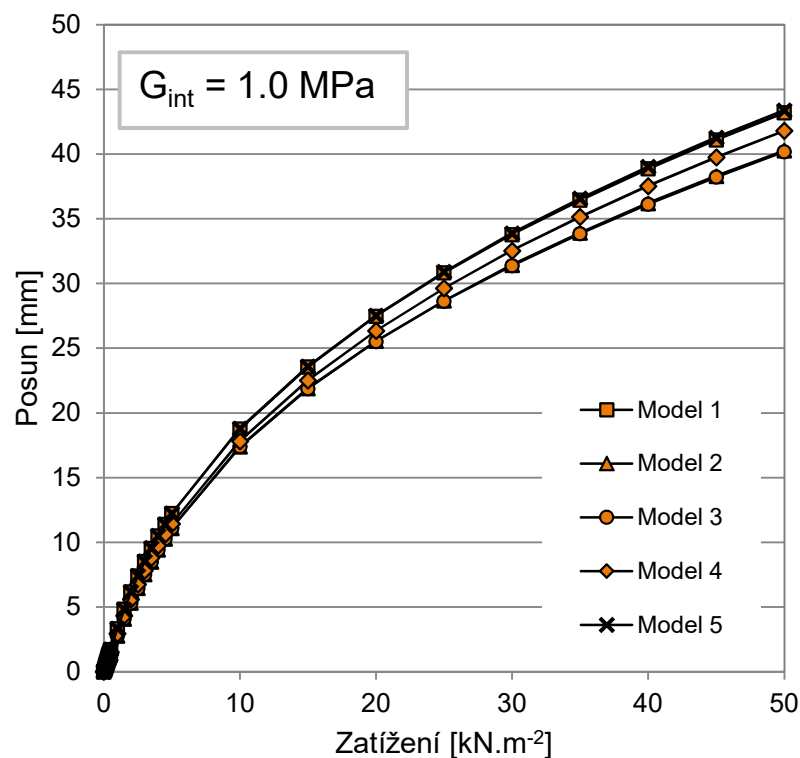
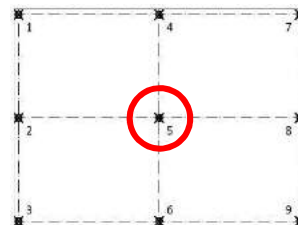


Desky liniově podepřené

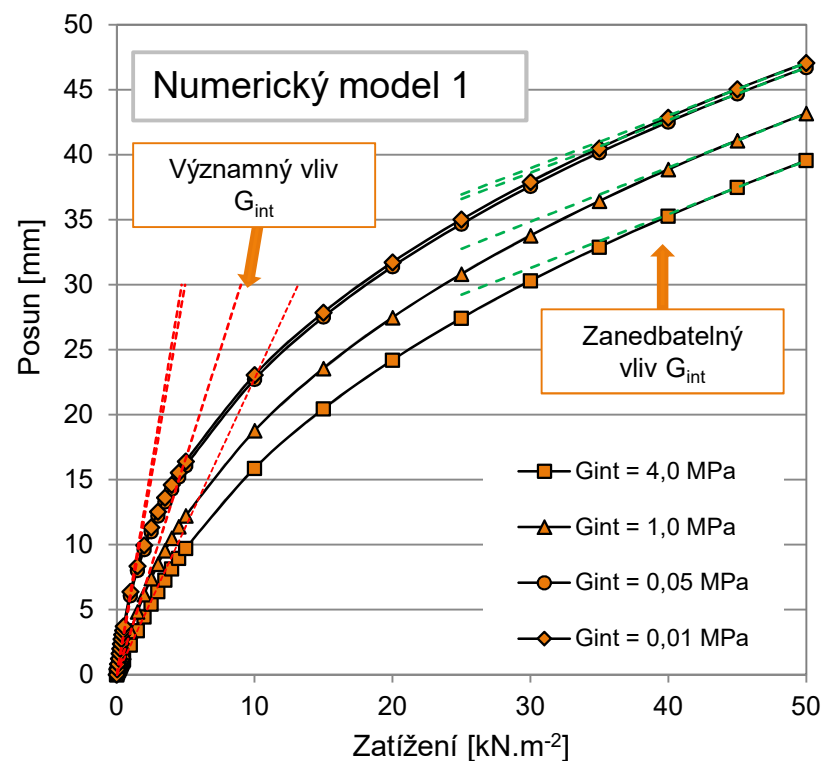
Numerická analýza

46

Průhyb uprostřed desky



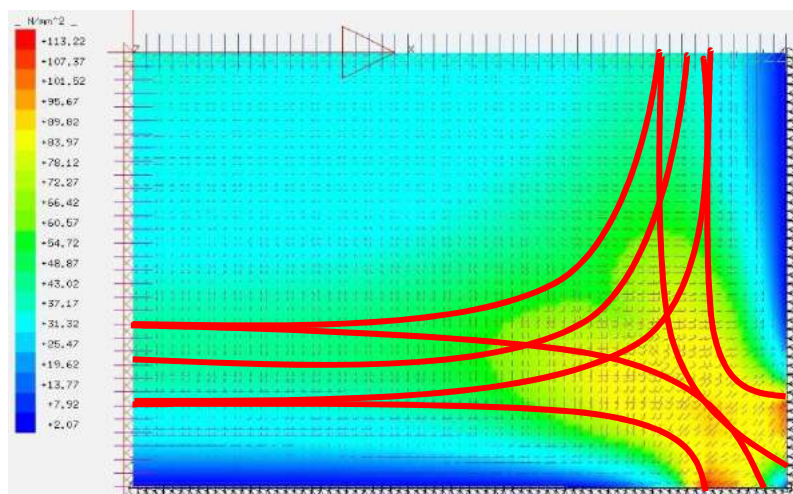
Vliv viskoelastického chování PVB folie



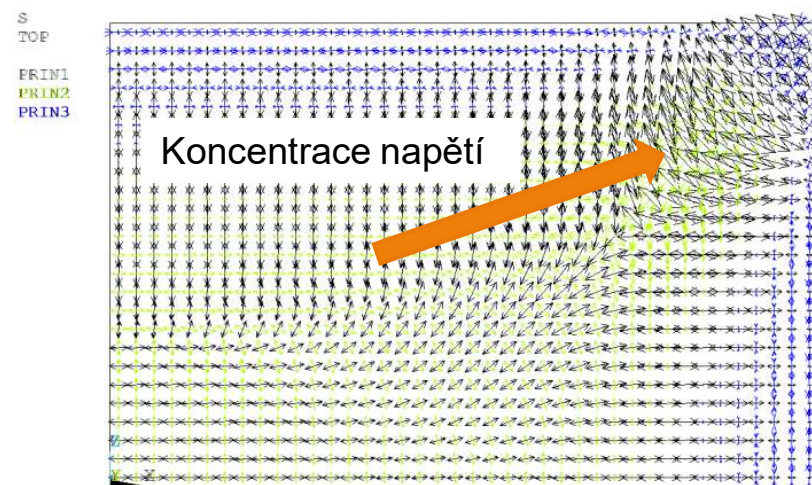
Desky liniově podepřené

Srovnání analýz

47



SJ MEPLA: Hlavní napětí při zatížení 26 kN/m²



ANSYS: Hlavní napětí při zatížení 50 kN/m²

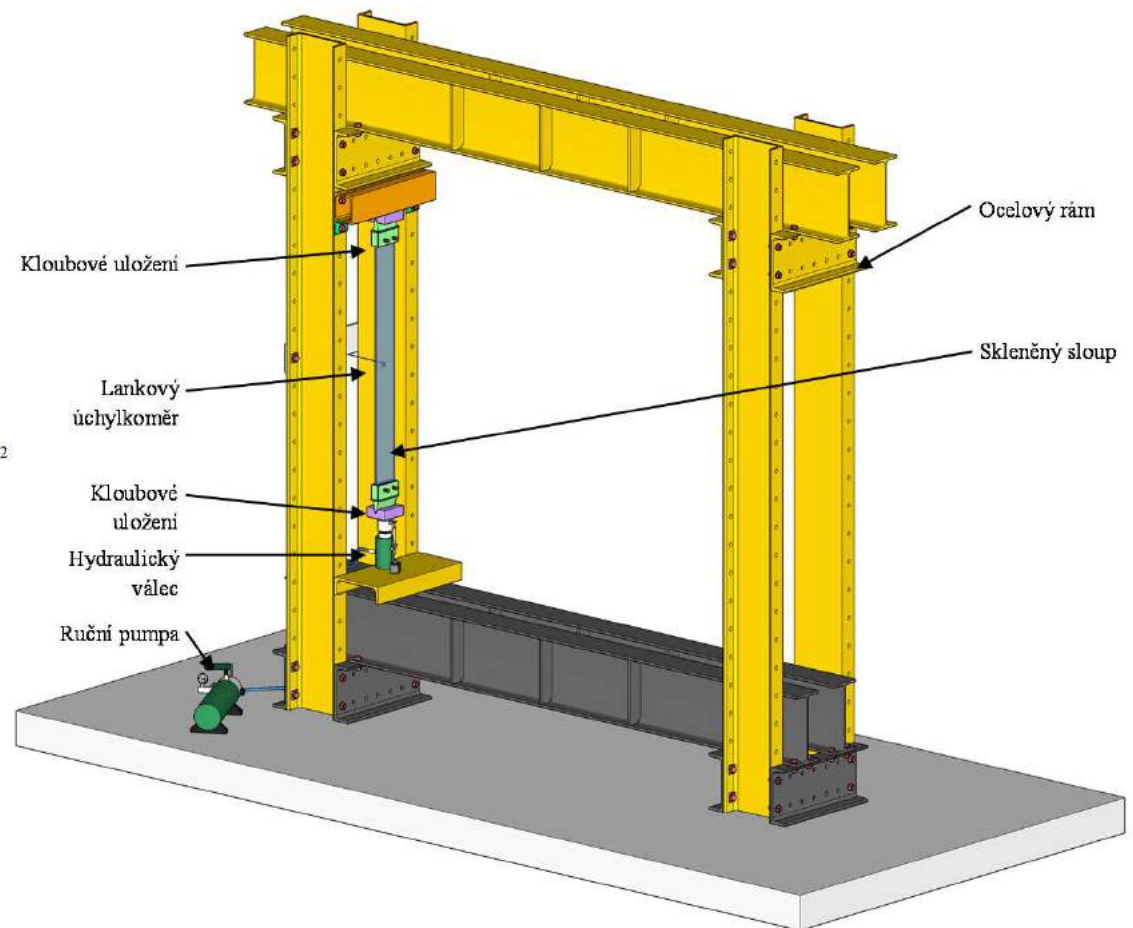
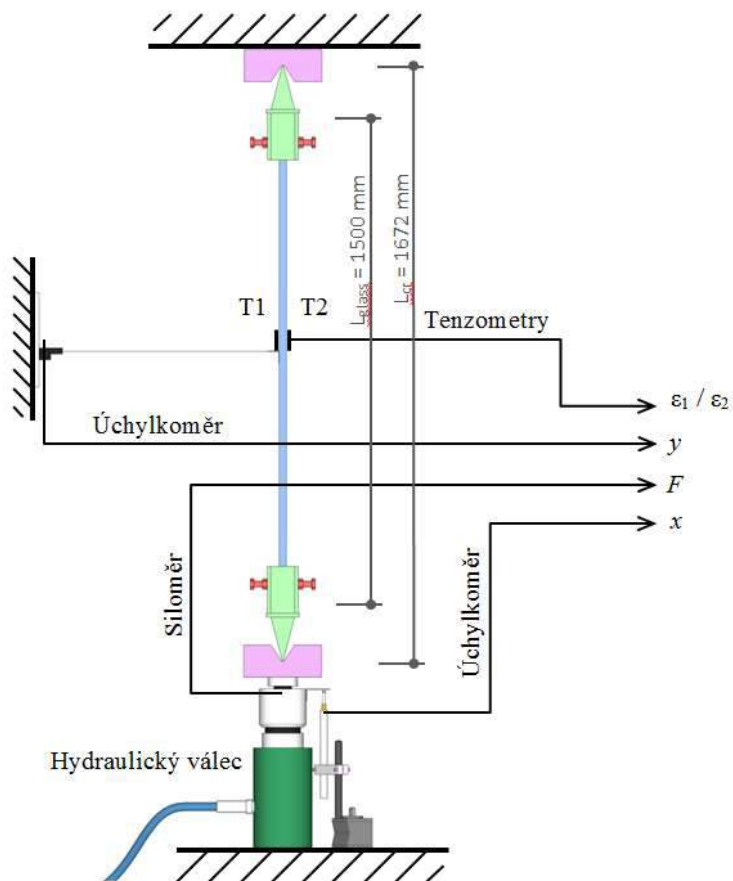
Desky liniově podepřené

**Záznam testu
zkušebního
tělesa T2**

48



Označení	Popis	Sklo	Folie	Délka [mm]	Šířka [mm]	Tloušťka skla [mm]	Tloušťka folie [mm]
ESG 12	Bezpečnostní sklo	Tepelně tvrzené	-	1500	150	12	-
VG 66.2	Vrstvené dvojsklo	Plavené chlazené	PVB	1500	150	6+6	0,76
VSG 66.3	Vrstvené bezpečnostní dvojsklo	Tepelně tvrzené	EVASAFE	1500	150	6+6	1,14
VSG 444.33	Vrstvené bezpečnostní trojsklo	Tepelně tvrzené	EVASAFE	1500	150	4+4+4	1,14



VÝZKUM KDK

Pruty tlačené – vzpěrná odolnost

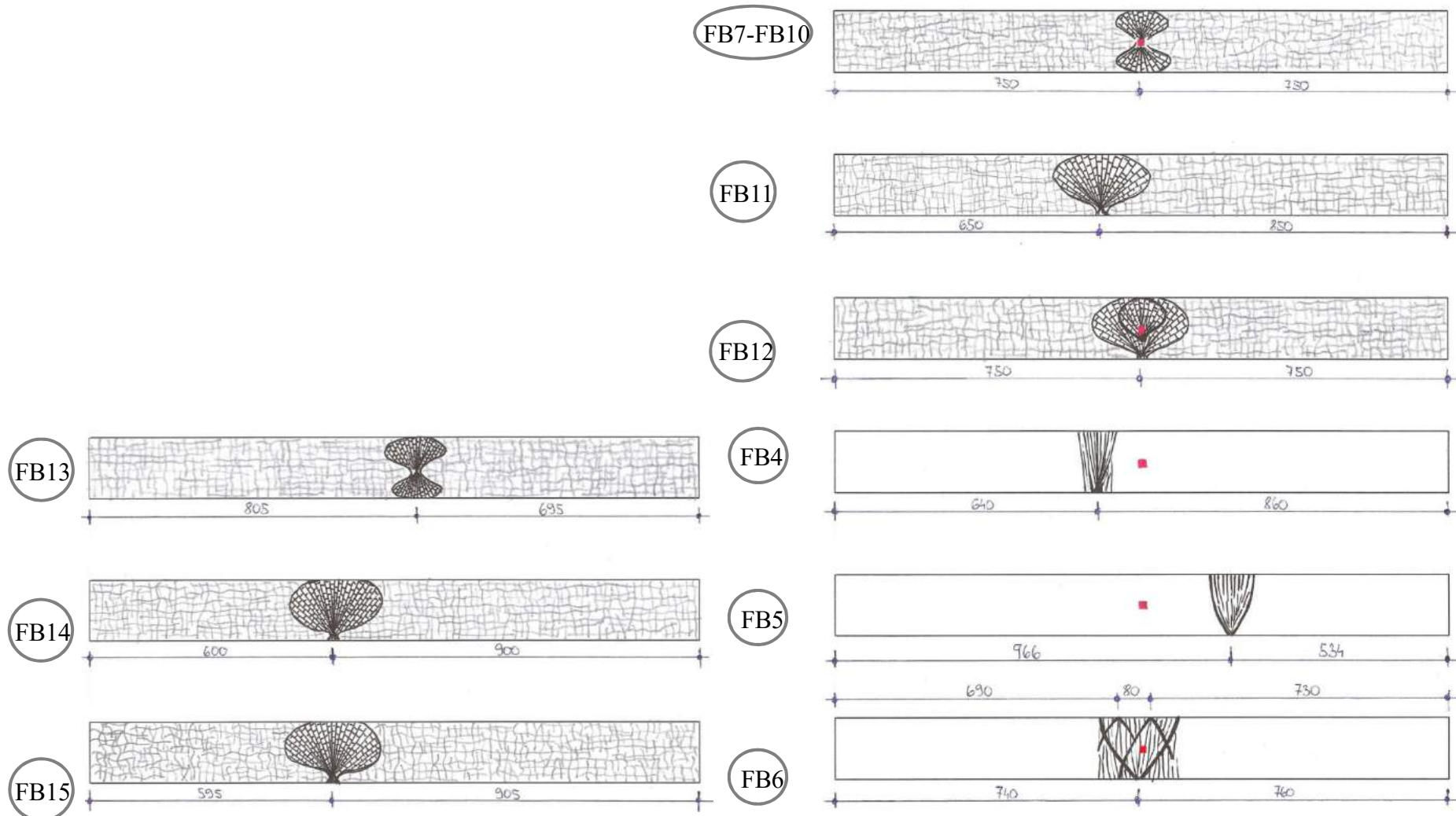
51



Pruty tlačené – vzpěrná odolnost

Mechanismus porušení – tělesa FB4 - FB15

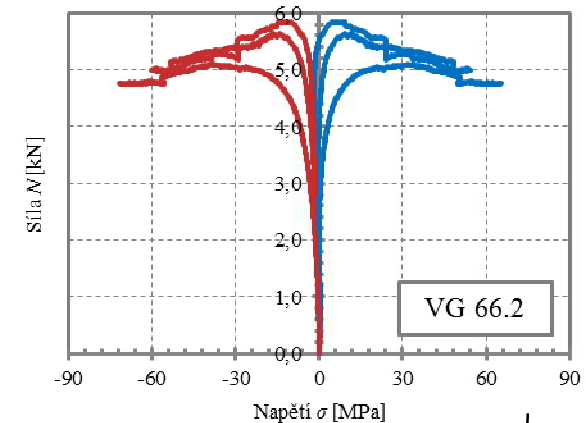
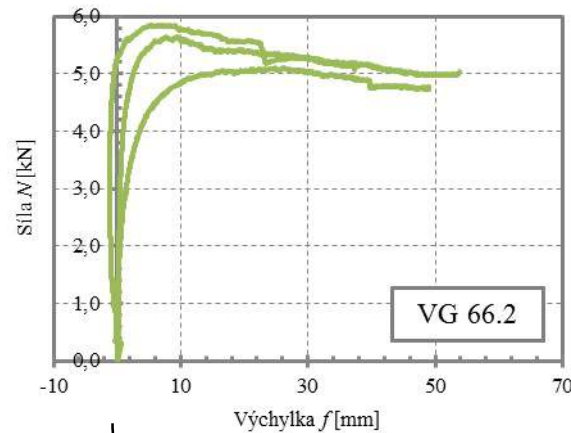
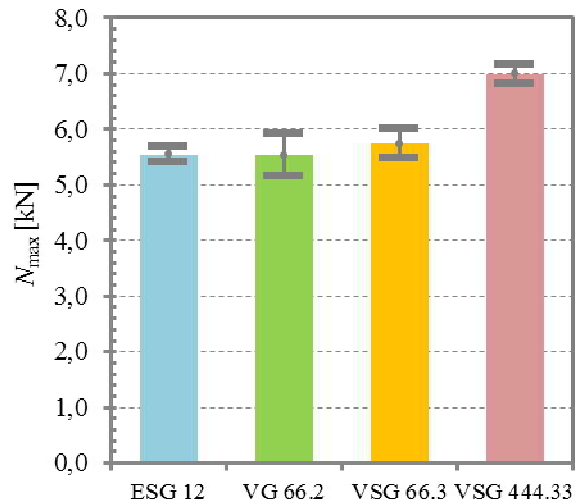
52



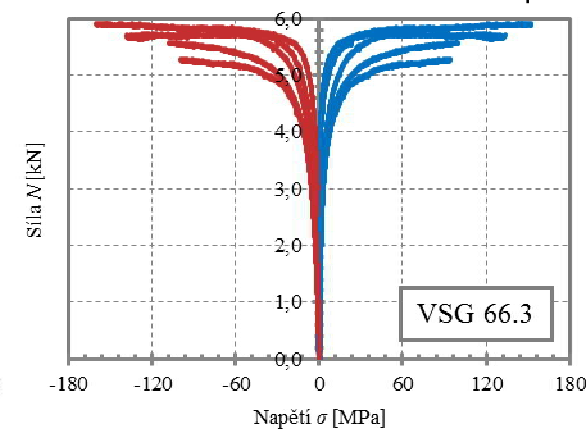
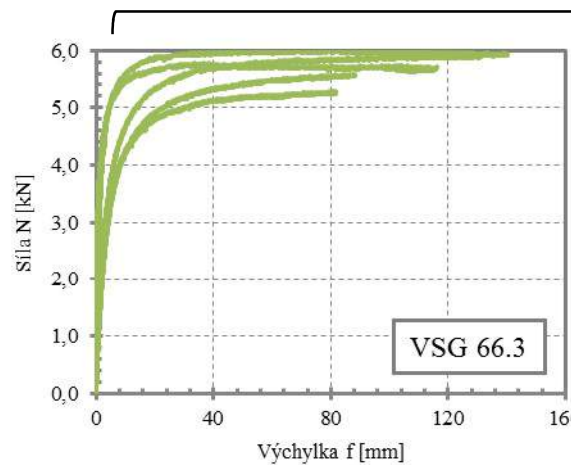
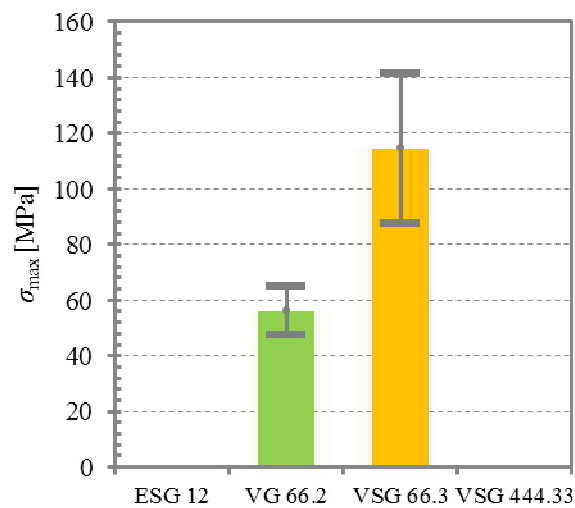
Pruty tlačené – vzpěrná odolnost

Výsledky experimentu

53



PVB folie
EVASAFE folie

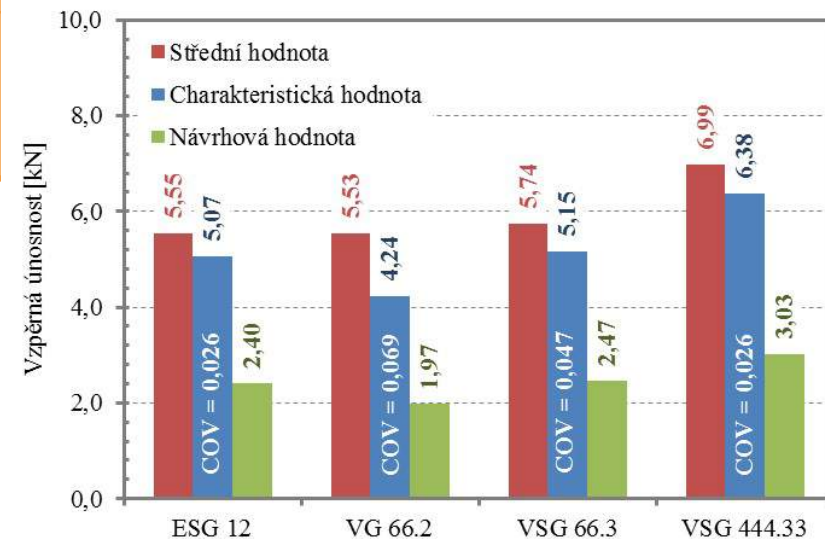


Pruty tlačené – vzpěrná odolnost

Statistické vyhodnocení výsledků experimentu

54

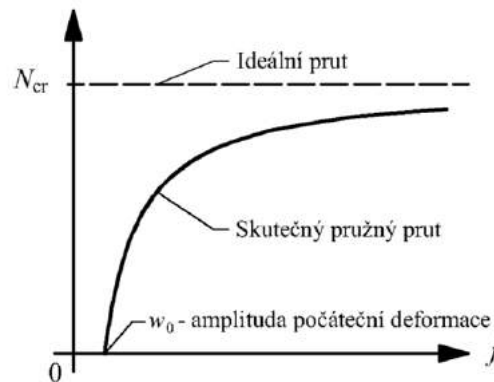
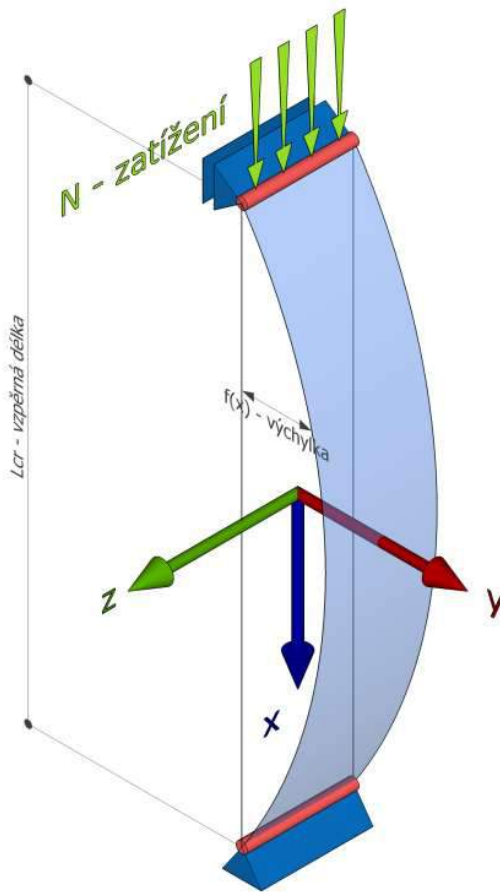
	Normální rozdělení	Lognormální rozdělení
Průměr	$m_x = \frac{1}{n} \cdot \sum x_i$	$m_x = \frac{1}{n} \cdot \sum \ln x_i$
Směrodatná odchylka	$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (x_i - m_x)^2}$	$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (\ln x_i - m_x)^2}$
Variační koeficient	$V_x = \frac{s_x}{m_x}$	
Charakteristická hodnota	$X_k = m_x (1 - k_n \cdot V_x)$	$X_k = \exp(m_x - k_n \cdot s_x)$
Návrhová hodnota	$X_d = m_x (1 - k_{d,n} \cdot V_x)$	$X_d = \exp(1 - k_{d,n} \cdot s_x)$
	$X_d = \frac{m_x}{\gamma_m} (1 - k_n \cdot V_x)$	$X_d = \frac{1}{\gamma_m} \exp(m_x - k_n \cdot s_x)$



Pruty tlačené – vzpěrná odolnost

Teoretická analýza – teorie II. řádu

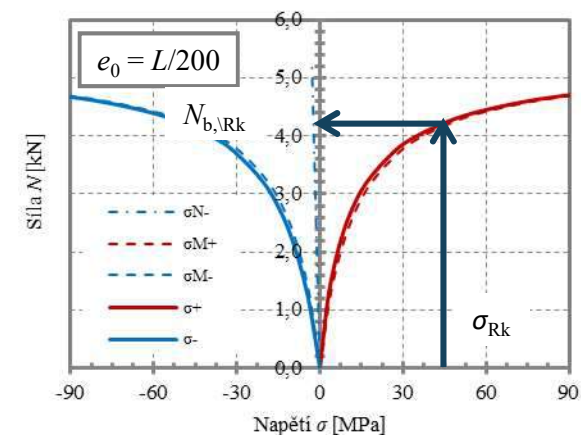
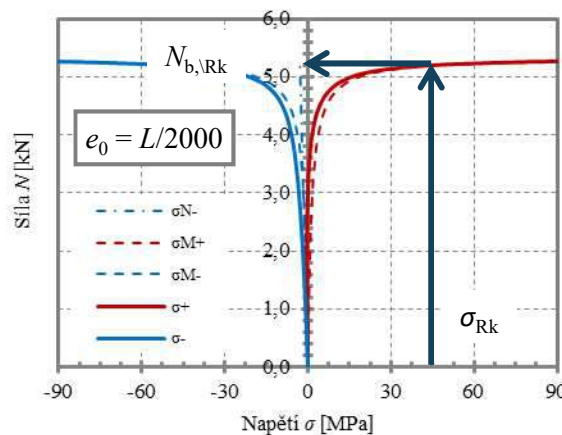
55



$$f(w_0)_{L/2} = w_0 \frac{N}{N_{cr} - N}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E \cdot I_{z,eff}}{L_{cr}^2}$$

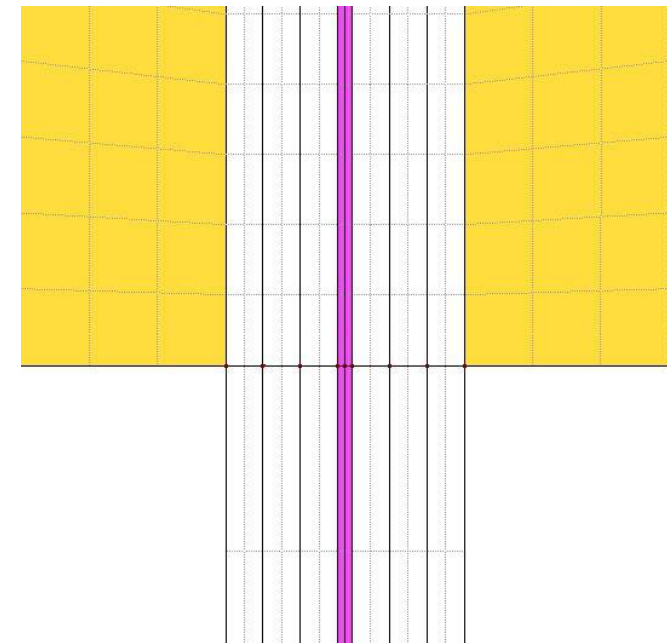
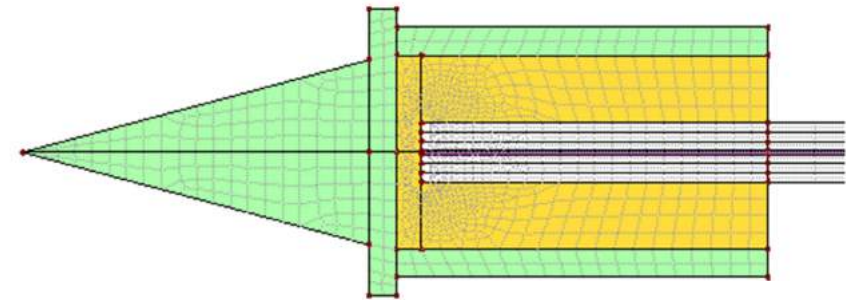
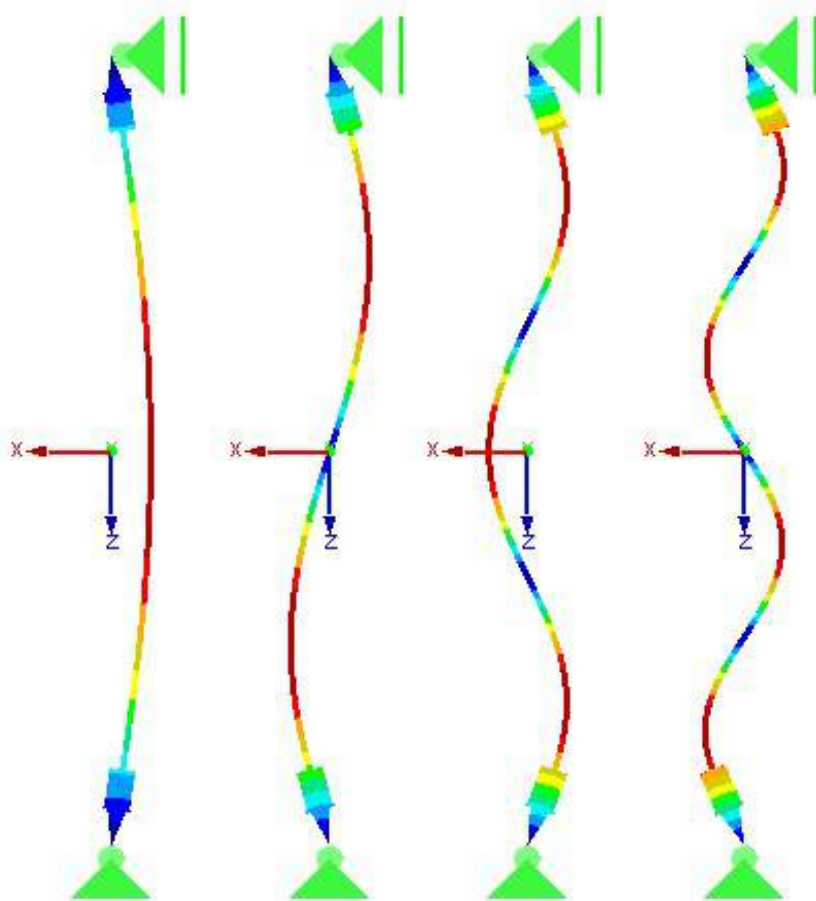
$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{N}{A} \pm N w_0 \left(\frac{1}{1 - N/N_{cr}} \right) / W = \sigma_0 \left(1 \pm \frac{\eta}{1 - \sigma_0/\sigma_{cr}} \right)$$



Pruty tlačené – vzpěrná odolnost

Numerická analýza – teorie velkých deformací

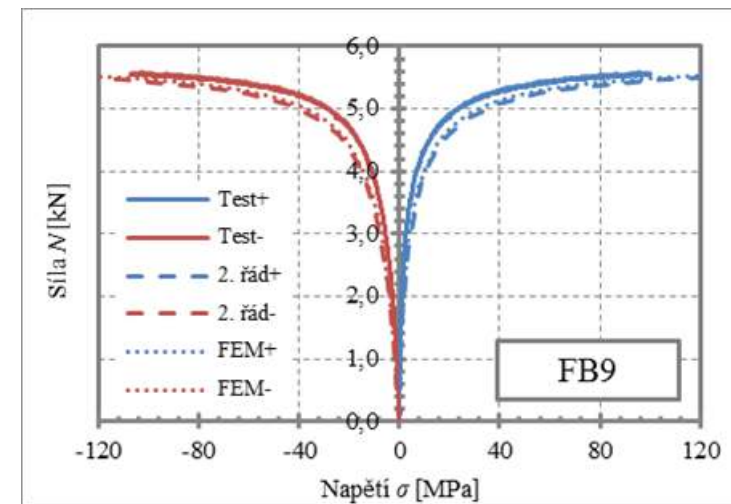
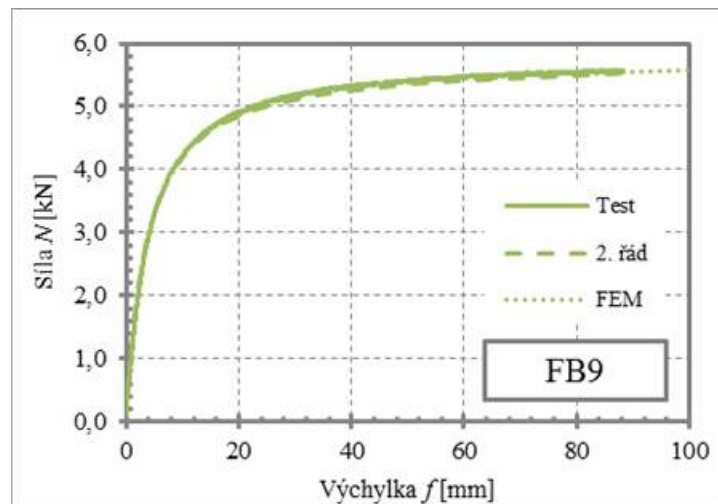
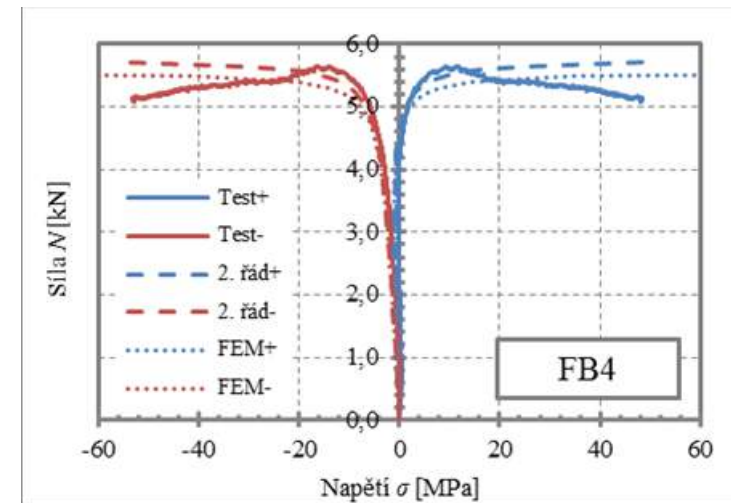
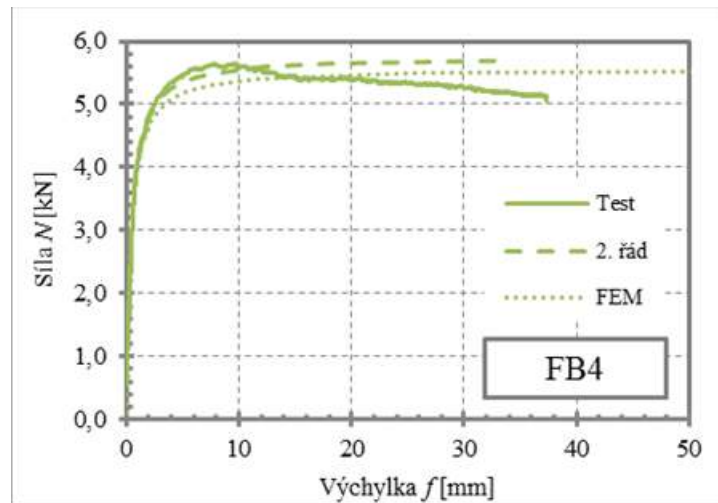
56



Pruty tlačené – vzpěrná odolnost

Srovnání analýz

57



Pruty tlačené – vzpěrná odolnost

Praktický návrh – křivky vzpěrné pevnosti

58

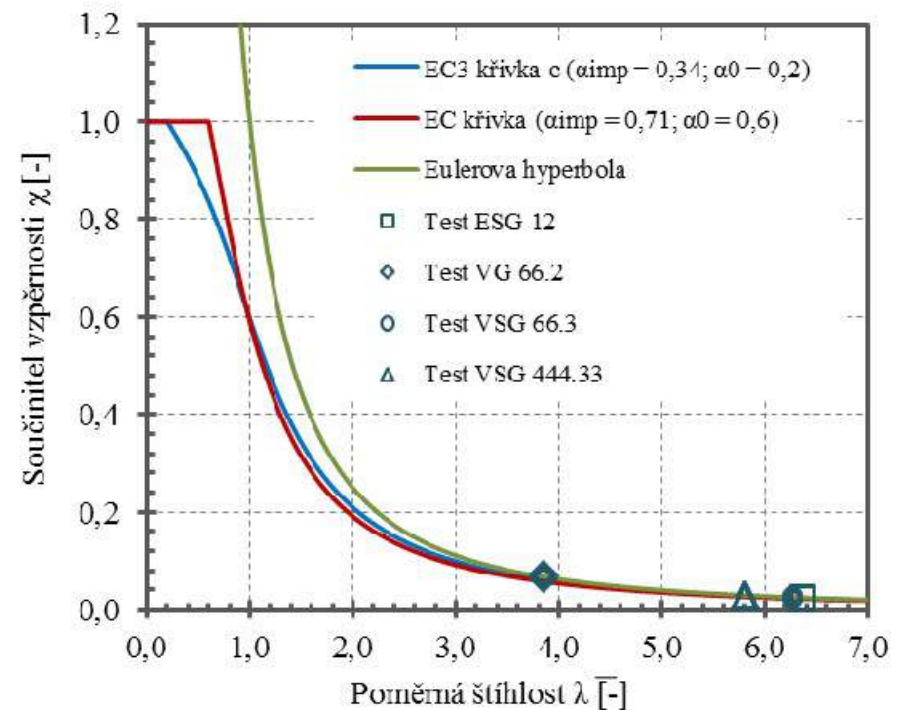
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\sigma_{Rk} \cdot A_{eff}}{N_{cr}}}$$

$$\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{imp} \cdot (\bar{\lambda} - \alpha_0) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$N_{b,Rk} = \chi \cdot \sigma_{Rk} \cdot A_{eff}$$

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \sigma_{Rd} \cdot A_{eff}$$



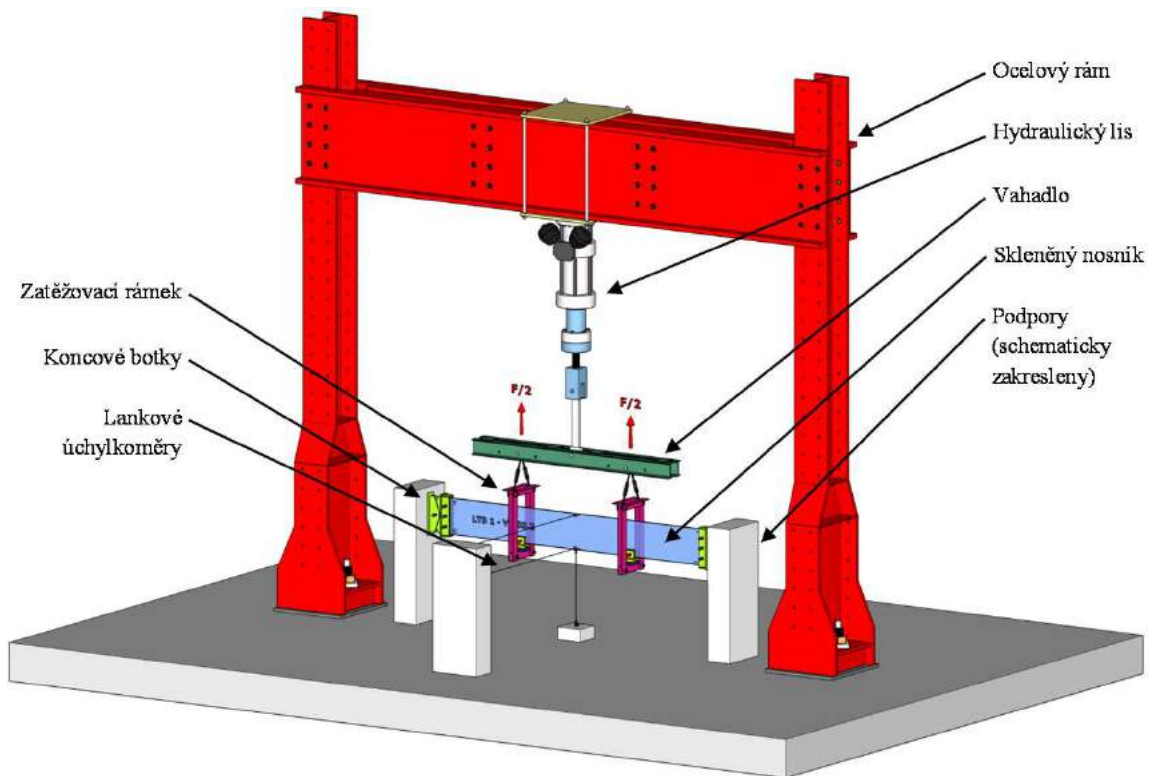
Pruty tlačené – vzpěrná odolnost

**Záznam testu
zkušebních těles
FB14 a FB15**

59



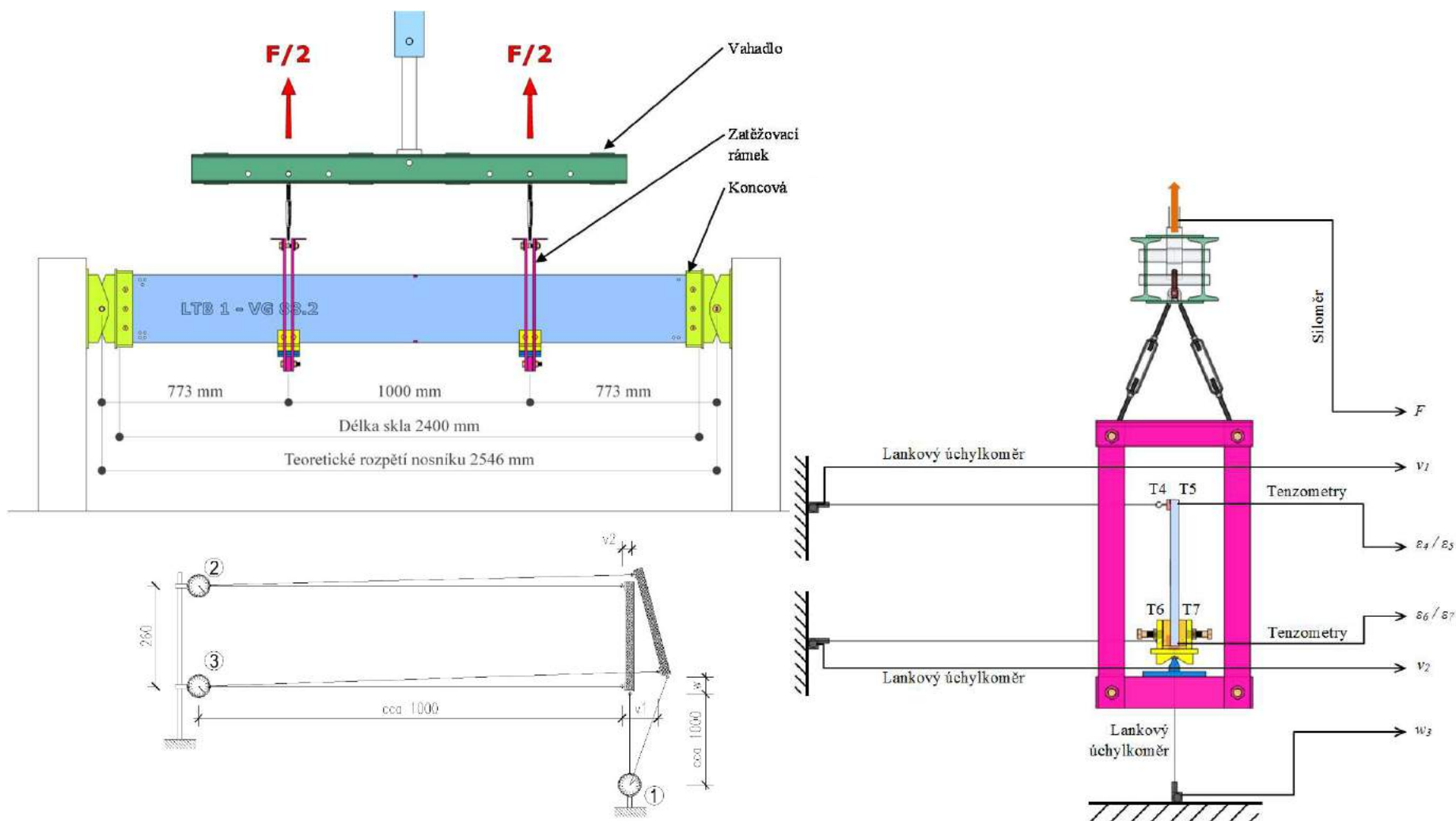
Označení	Popis	Sklo	Folie	Délka [mm]	Šířka [mm]	Tloušťka skla [mm]	Tloušťka folie [mm]
VG 66.2	Vrstvené dvojsklo	Plavené chlazené	EVASAFE	2400	280	6+6	0,76
VG 88.2	Vrstvené dvojsklo	Plavené chlazené	EVASAFE	2400	280	8+8	0,76
VG 1010.2	Vrstvené trojsklo	Plavené chlazené	EVASAFE	2400	280	10+10	0,76



VÝZKUM KDK

Pruty ohýbané – odolnost v klopení

61



VÝZKUM KDK

Pruty ohýbané – odolnost v klopení

62

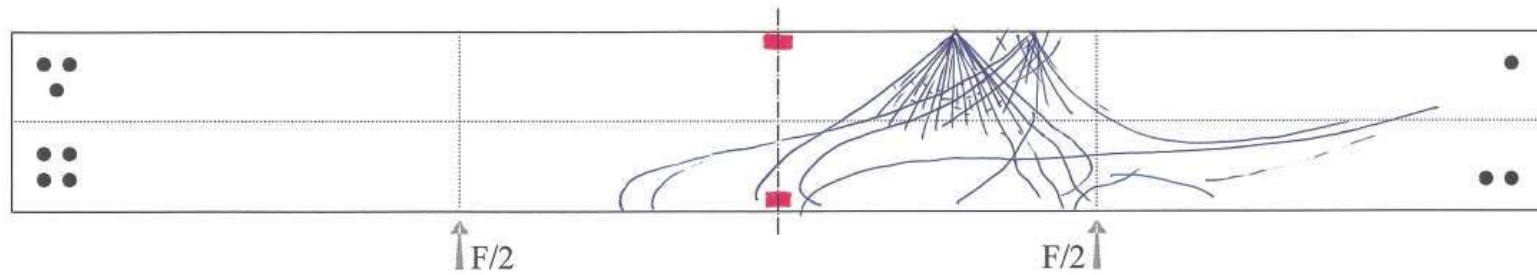


Pruty ohýbané – odolnost v klopení

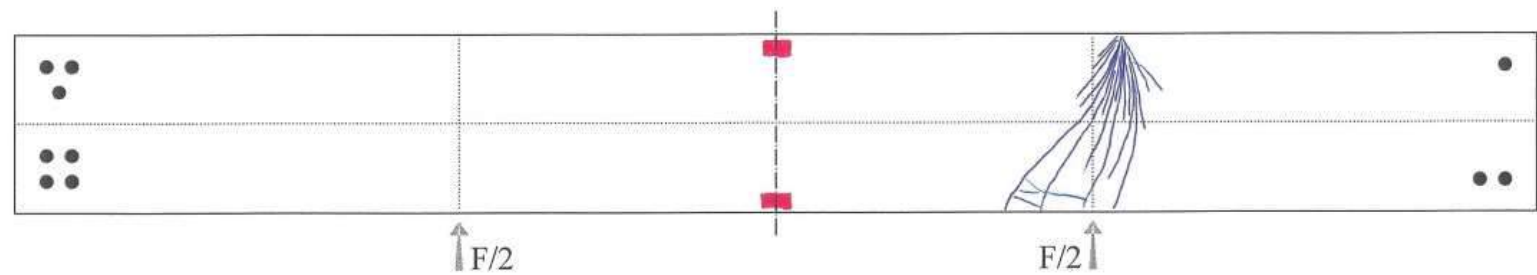
Mechanismus porušení

63

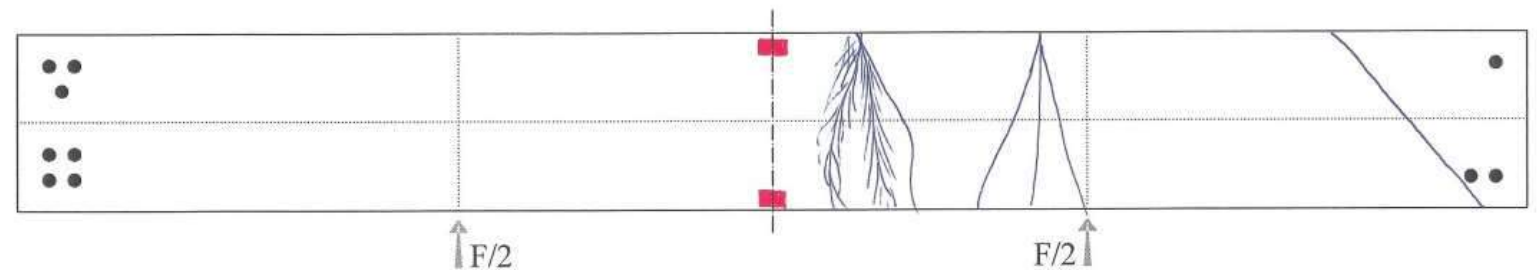
LTB1



LTB4



LTB7

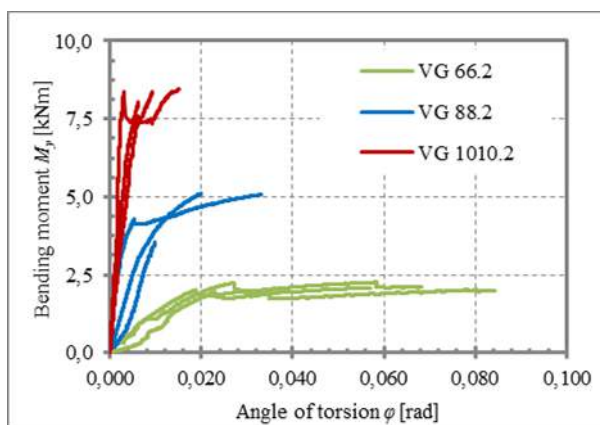


Pruty ohýbané – odolnost v klopení

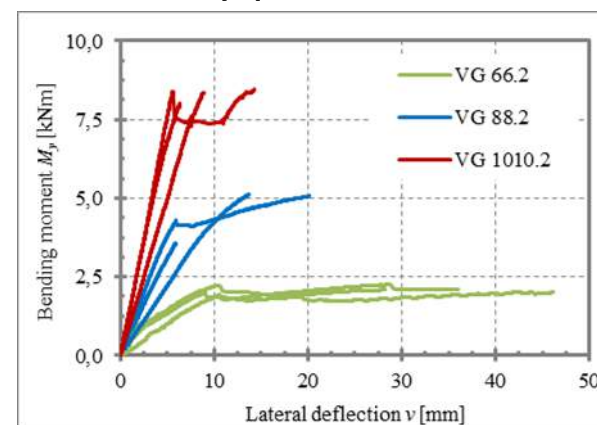
Výsledky experimentu

64

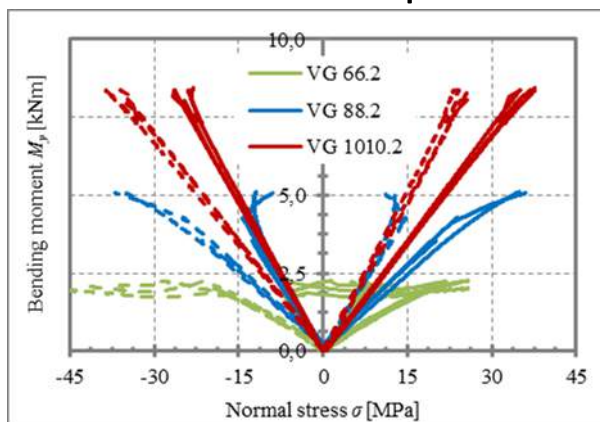
❖ Úhel natočení



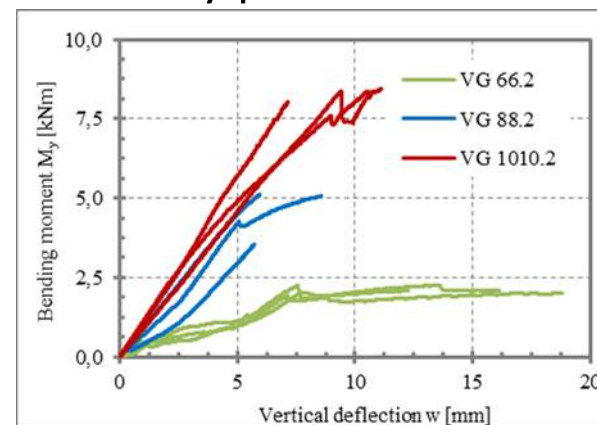
❖ Příčný posun



❖ Normálové napětí



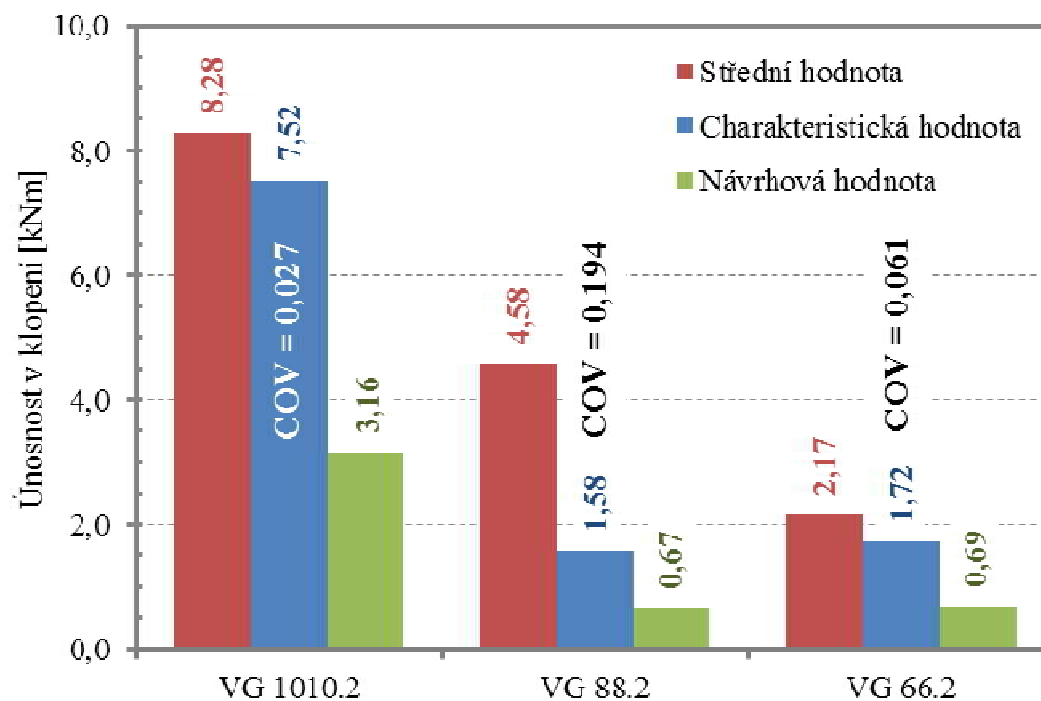
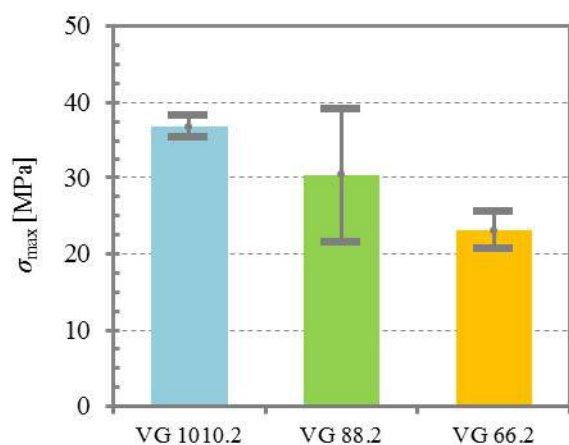
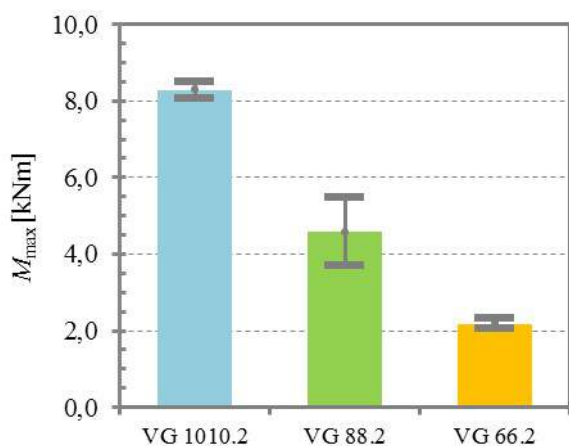
❖ Svislý posun



Pruty ohýbané – odolnost v klopení

Statistické vyhodnocení

65



Pruty ohýbané – odolnost v klopení

Teoretická analýza – teorie II. řádu

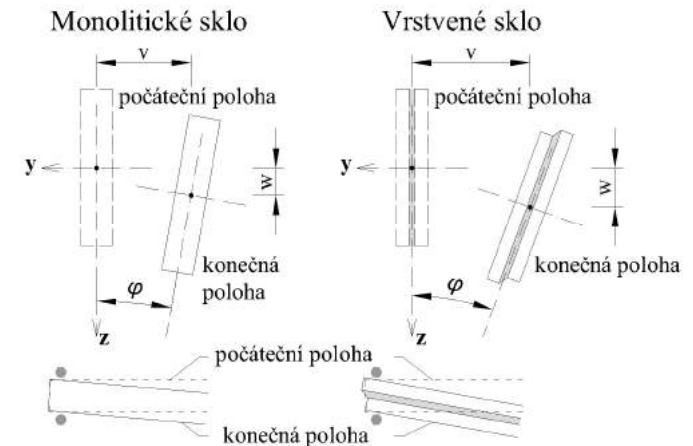
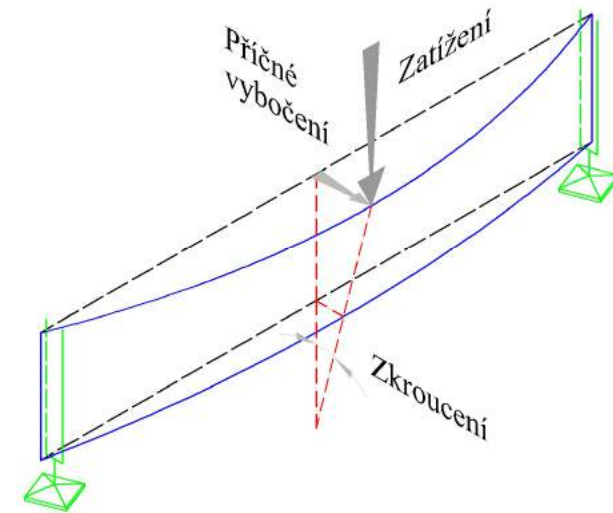
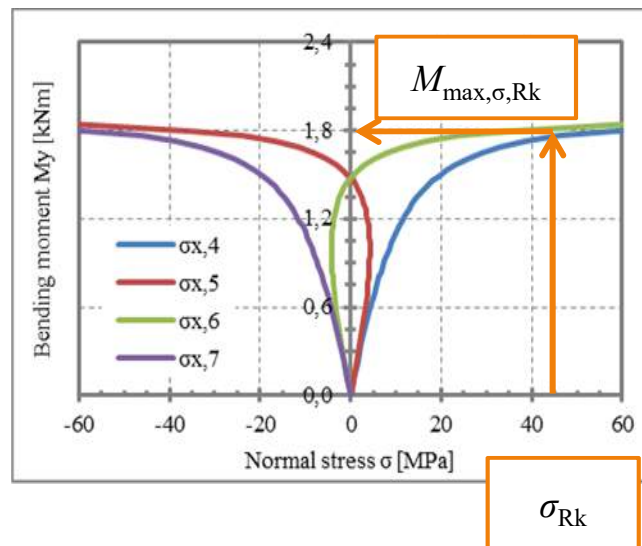
66

$$\varphi(x) = \frac{\varphi_0 \left(\frac{c_1^2 \cdot M_y^2}{E \cdot I_z} - c_2 \cdot \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot M_y \cdot z_g \right) + c_1 \cdot \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot M_y \cdot v_0}{G \cdot I_t \cdot \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 - \frac{c_1^2 \cdot M_y^2}{E \cdot I_z} + c_2 \cdot \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot M_y \cdot z_g} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{L} \cdot x\right)$$

$$v(x) = \frac{c_1 \cdot \frac{G \cdot I_t}{E \cdot I_z} \cdot M_y \cdot \varphi_0 + c_1^2 \cdot \frac{M_y^2}{E \cdot I_z} \cdot v_0}{G \cdot I_t \cdot \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 - \frac{c_1^2 \cdot M_y^2}{E \cdot I_z} + c_2 \cdot \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot M_y \cdot z_g} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{L} \cdot x\right)$$

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{M_y}{W_{\text{eff},y}} \pm \frac{M_z}{W_{\text{eff},z}}$$

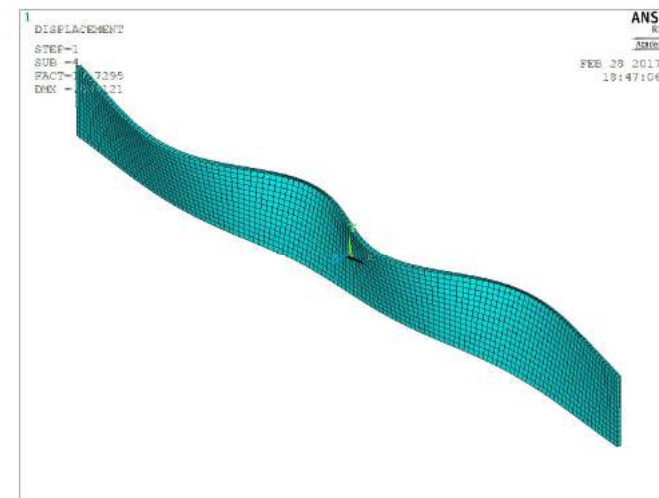
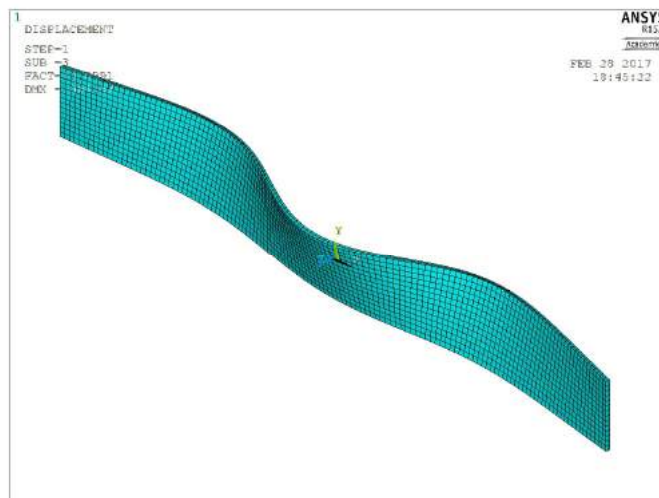
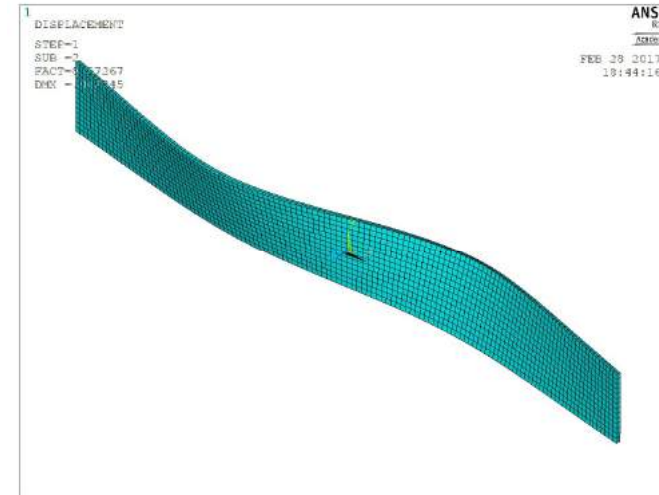
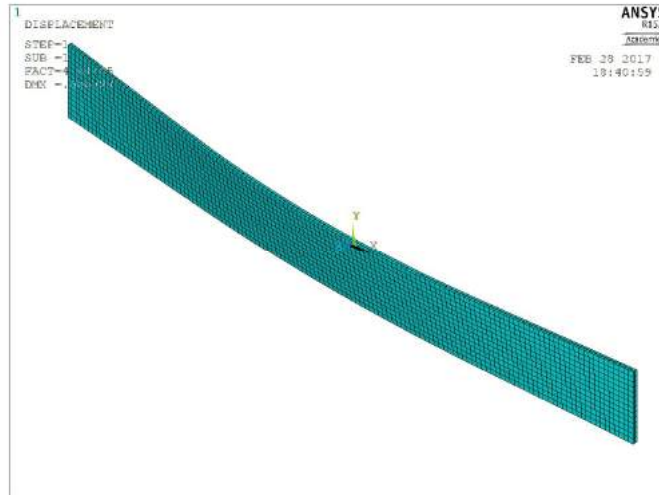
$$M_{\max,\sigma,Rk} \rightarrow \sigma_{\max} = \sigma_{Rk}$$



Pruty ohýbané – odolnost v klopení

Numerická analýza – teorie velkých deformací

67



Pruty ohýbané – odolnost v klopení

Praktický návrh – křivky klopení

68

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E I_{z,eff}}{L_{LT}^2} \left[\sqrt{(C_2 z_g)^2 + \frac{G I_{t,eff} L_{LT}^2}{\pi^2 \cdot E I_{z,eff}}} - C_2 z_g \right]$$

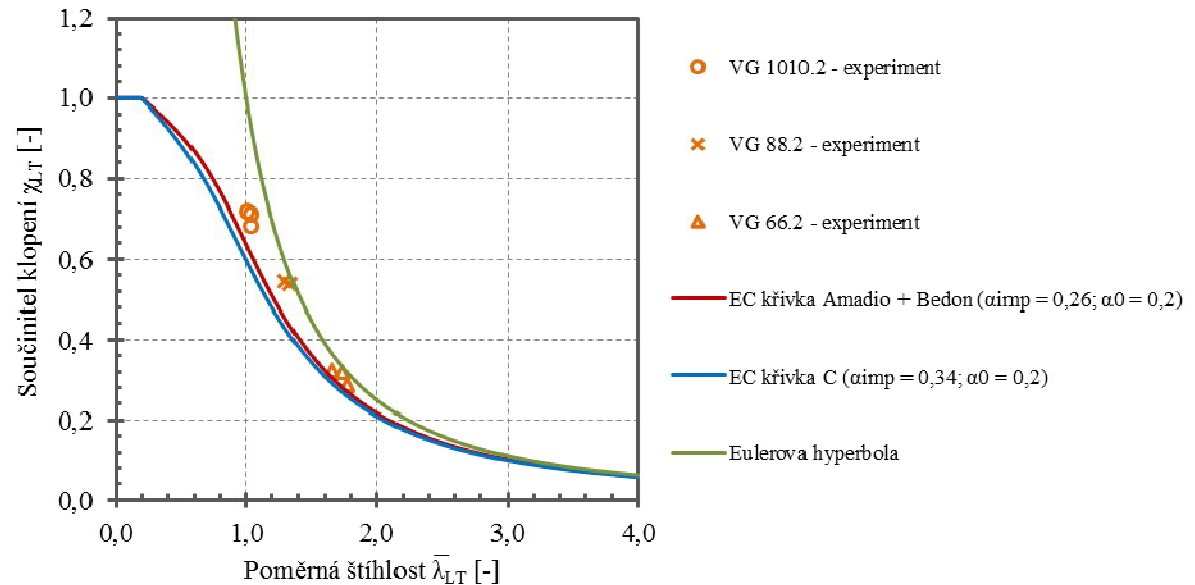
$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\sigma_{Rk}}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{\sigma_{Rk} \cdot W_y}{M_{cr}}}$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{imp} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \alpha_0) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$$

$$M_{b,Rk} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_{g,k}$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_{g,d}$$



„MOUDRÝ MUŽ NEVYSTAVUJE ZKOUŠCE SKLO A ŽENU“

LOPE DE VEGA



http://www.fce.vutbr.cz/KDK/pesek.o/CO52/prezentace_sklo_2018.pdf

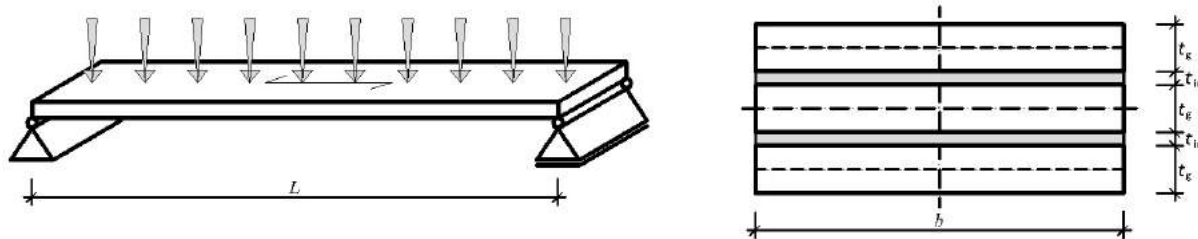
LS 2018

CO052 – Vybrané problémy navrhování a realizace
kovových a dřevěných konstrukcí a mostů

PRAKTICKÝ PŘÍKLAD

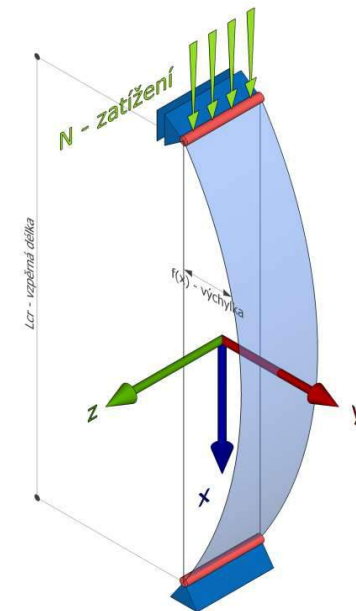
70

❖ Schodišťový stupeň



http://www.fce.vutbr.cz/KDK/pesek.o/CO52/příklad_1.xlsx

❖ Tlačný prut



http://www.fce.vutbr.cz/KDK/pesek.o/CO52/příklad_2.xlsx