

Zatížení větrem

- Miroš Pirner, Ondřej Fischer: Zatížení staveb větrem. ČKAIT, 2003
- ČSN P ENV 1991-2-4

Vznik větru

- vítr ve tvaru proudu: vyrovnávání tlaku v atmosféře, která je nerovnoměrně ohřátá Sluncem
- vítr ve tvaru víru: na styku proudů různých rychlostí

V některých částech světa lze pozorovat pravidelné větry.

V ČR jsou náhodné větrné bouře.

Atmosférický tlak

celkový tlak je dán Bernoulliovou rovnicí

$$p = p_a + \frac{1}{2}\rho v^2$$

p celkový tlak

p_a atmosférický tlak

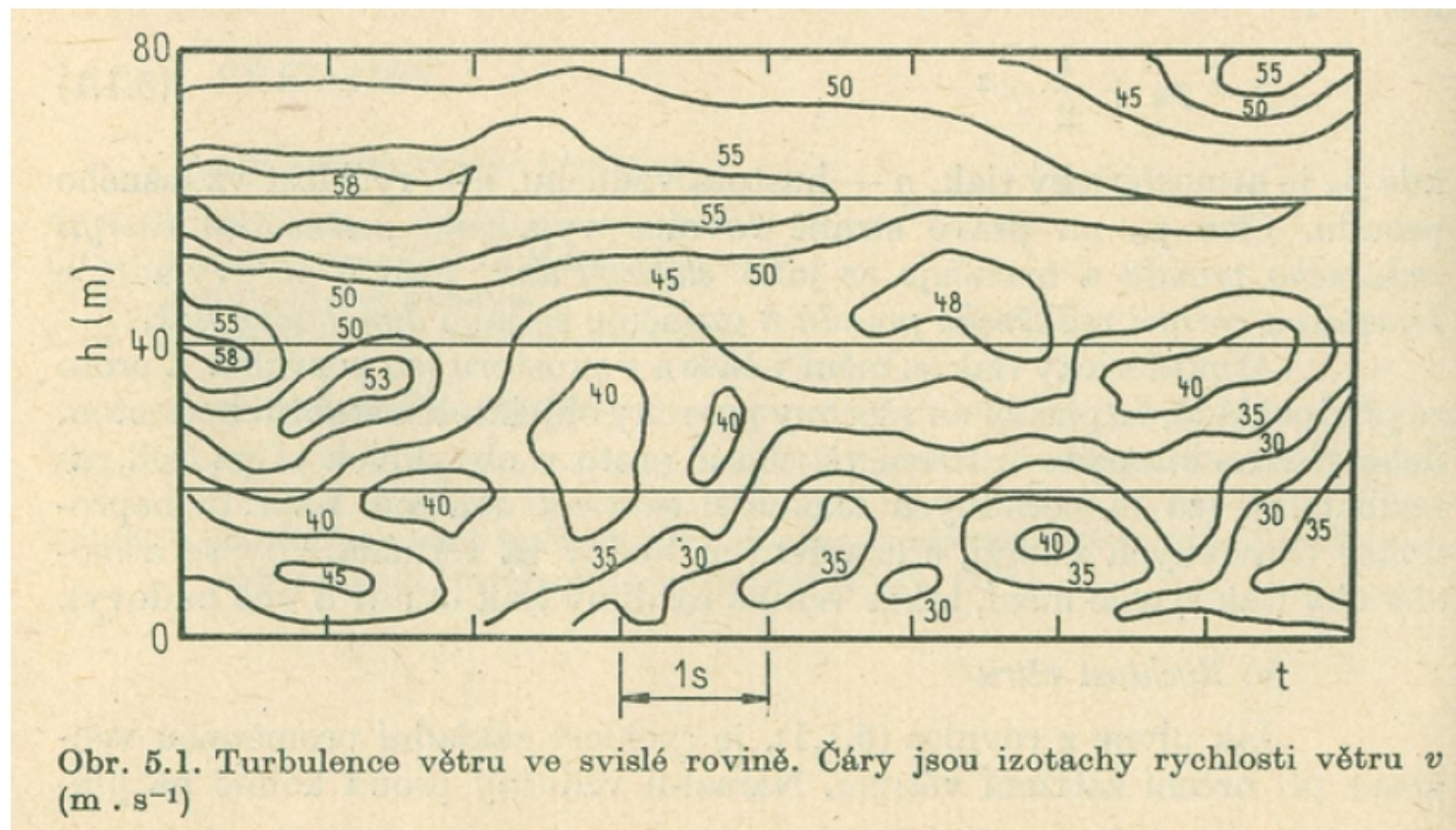
ρ hustota vzduchu

v rychlost vzduchu

Člen p_a vyjadřuje potenciální energii (statický tlak) a $\frac{1}{2}\rho v^2$ vyjadřuje kinetickou energii (dynamický tlak).

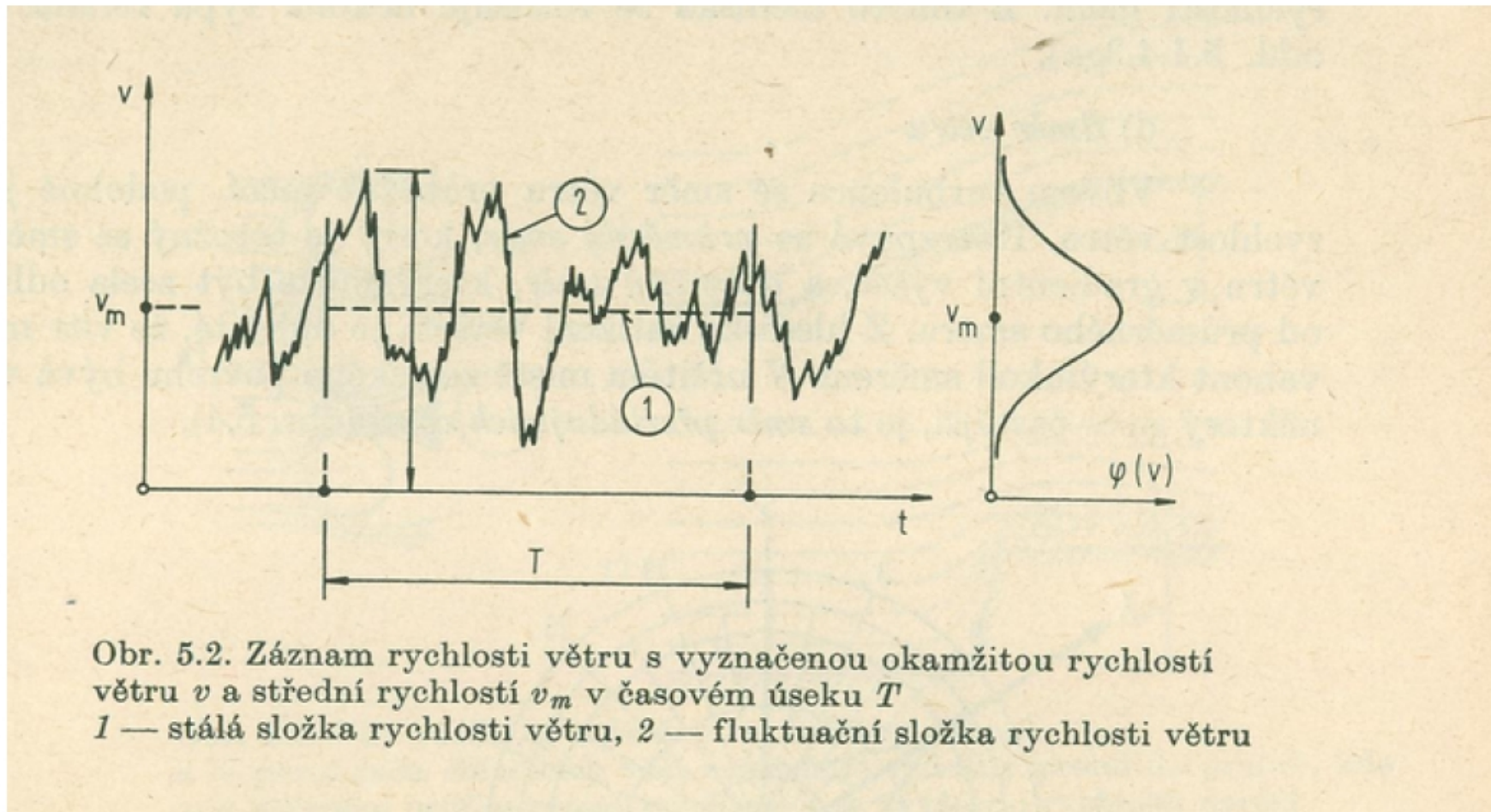
Rychlost větru

Rychlost větru je náhodná veličina.

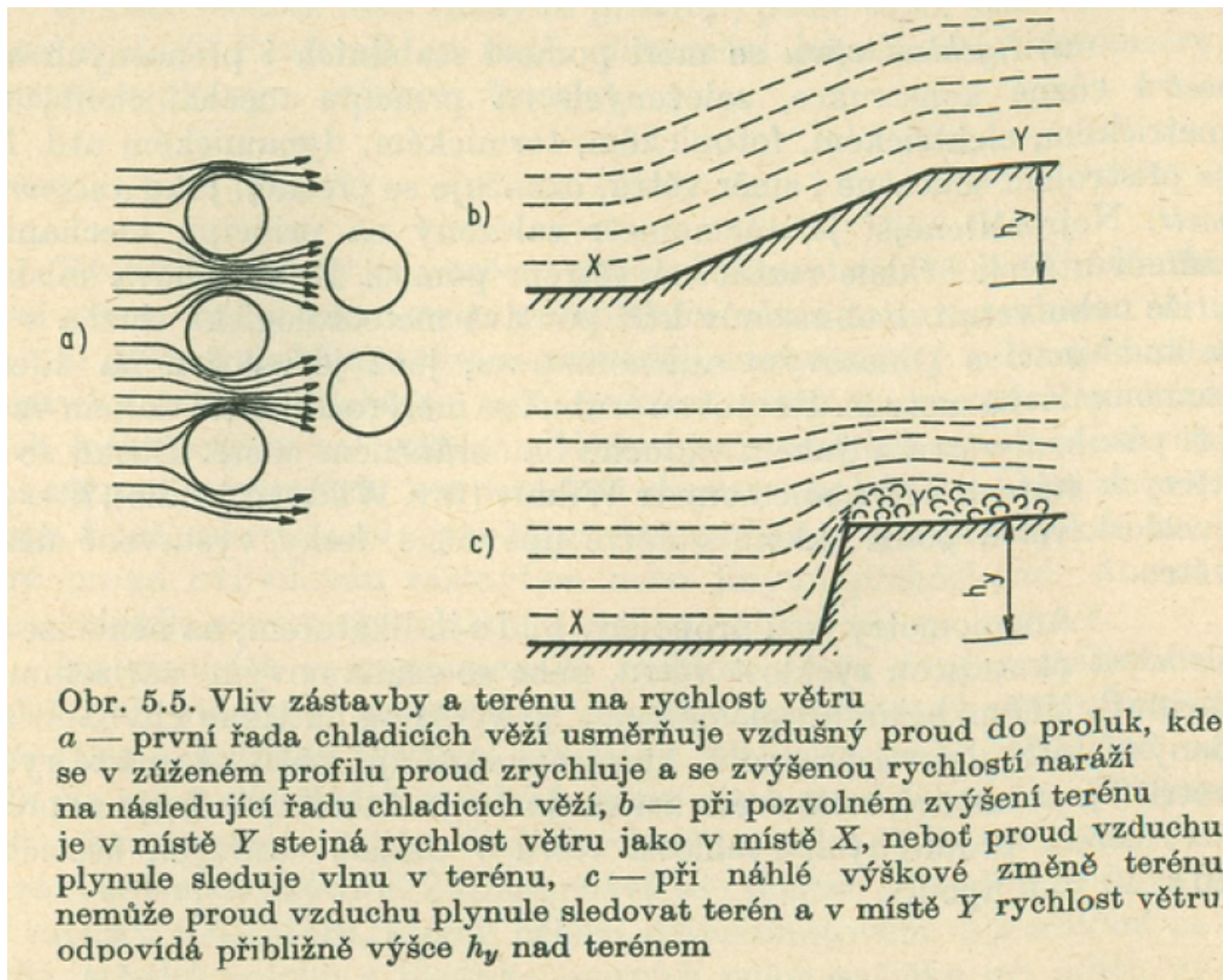


Obr. 5.1. Turbulence větru ve svislé rovině. Čáry jsou izotachy rychlosti větru v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

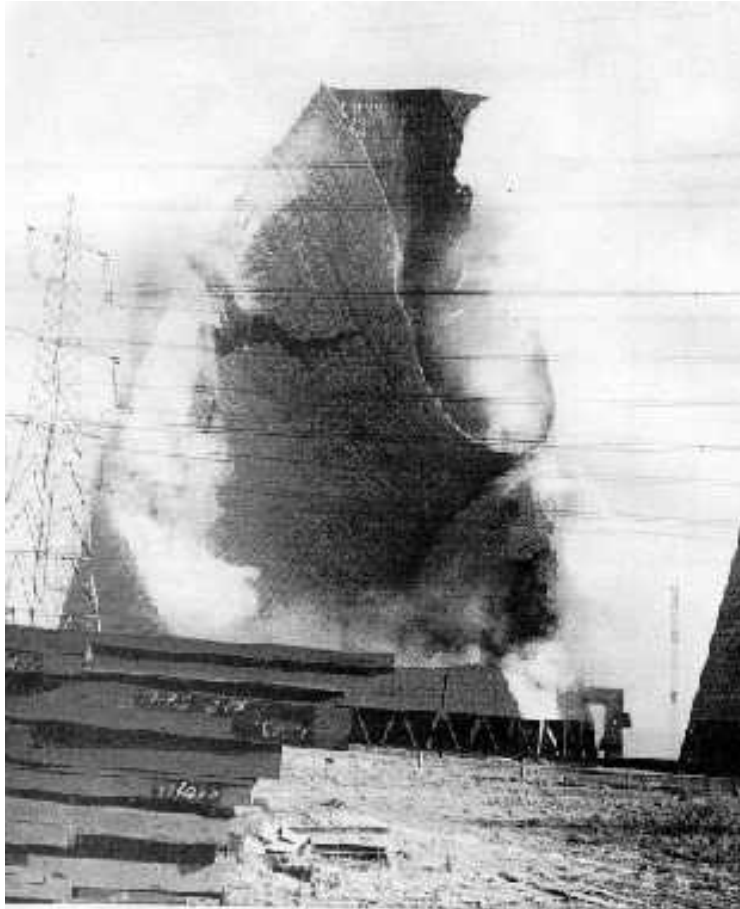
Rychlost větru



Rychlost větru



Ferrybridge cooling towers collapse 1st November 1965



Atmosférická mezní vrstva

Ve výškách nad $300 - 600m$ lze rychlost větru považovat za konstantní. Mezi zemským povrchem a touto výškou je atmosférická mezní vrstva.

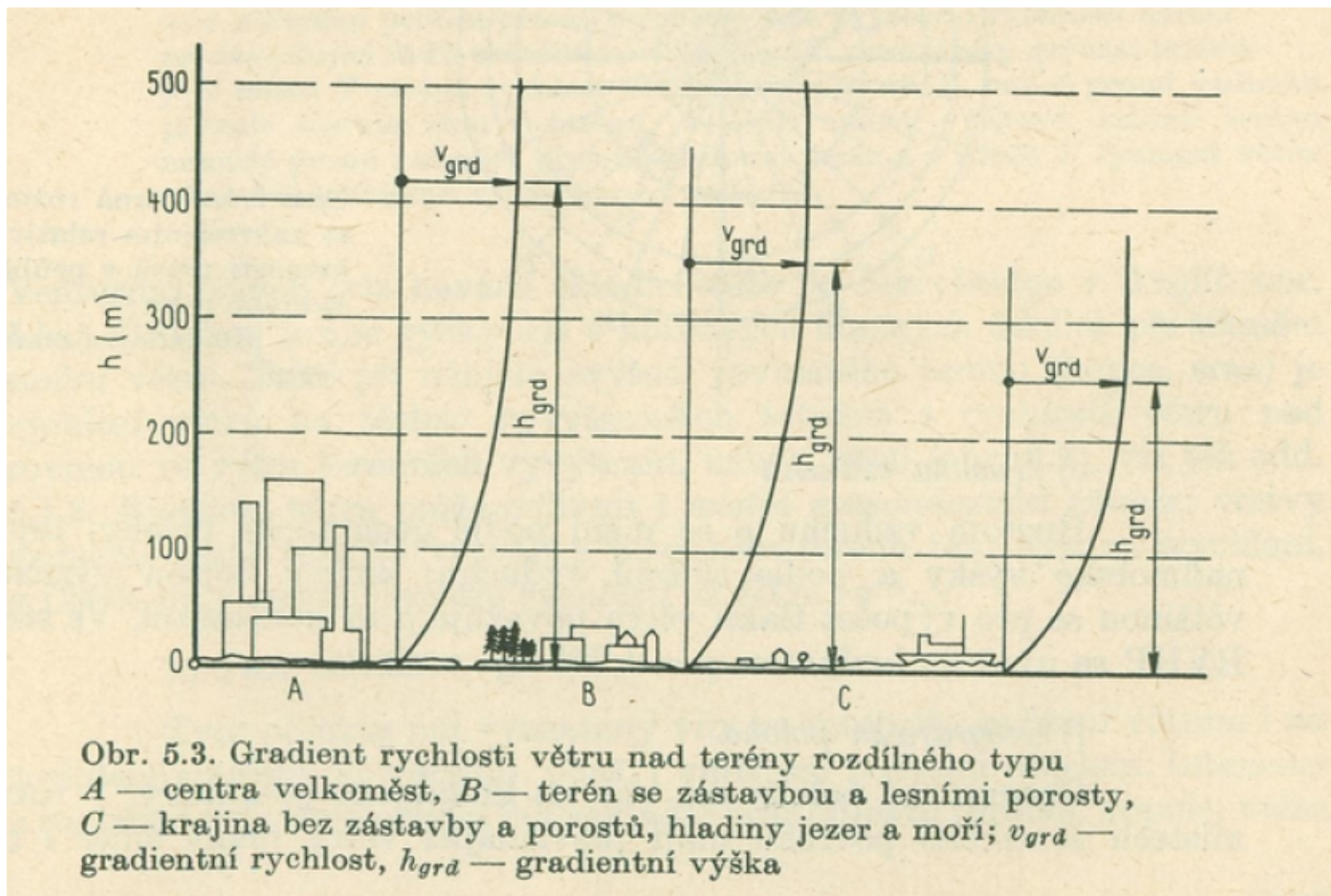
$$v_z = v_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha$$

v rychlost ve výšce z

v_{10} rychlost ve výšce $10m$

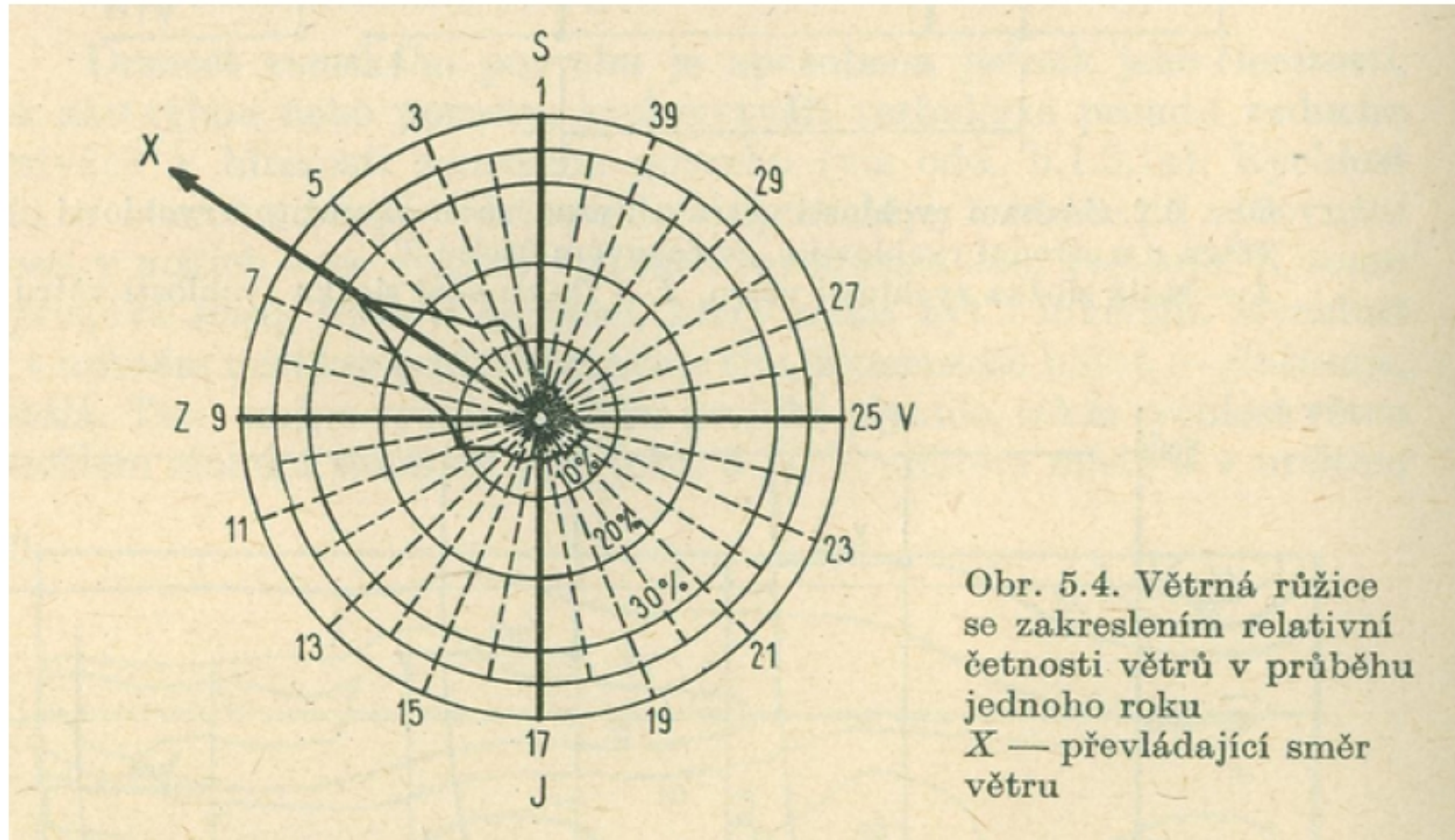
α součinitel drsnosti

Atmosférická mezní vrstva



Směr větru

Směr větru je dán větrnou růžicí



Statické působení větru

Projevuje se jako souvislé zatížení nerovnoměrně rozložené po celé konstrukci.

Podle směru se uvažuje:

- zatížení kolmé k povrchu (tlak, sání)
- zatížení rovnoběžné s povrchem (tření)

Turbulence

Vlivem drsnosti povrchu dochází ke zpomalení vzdušného proudu.

Mezní vrstva je vrstva, ve které se mění rychlost vzduchu z nuly (u povrchu konstrukce) až do rychlosti proudu neovlivněného konstrukcí.

Tloušťka mezní vrstvy je několik milimetrů u malých a hladkých těles až několik set metrů pro členitý terén velkoměst.

Pro malé rychlosti větru a malé objekty zůstává proudění laminární (převažují viskózní síly). Pro větší rychlosti a větší obtékané objekty se proudění stává trubulentním (převažují setrvačné síly).

Turbulence

Reynoldsovo číslo

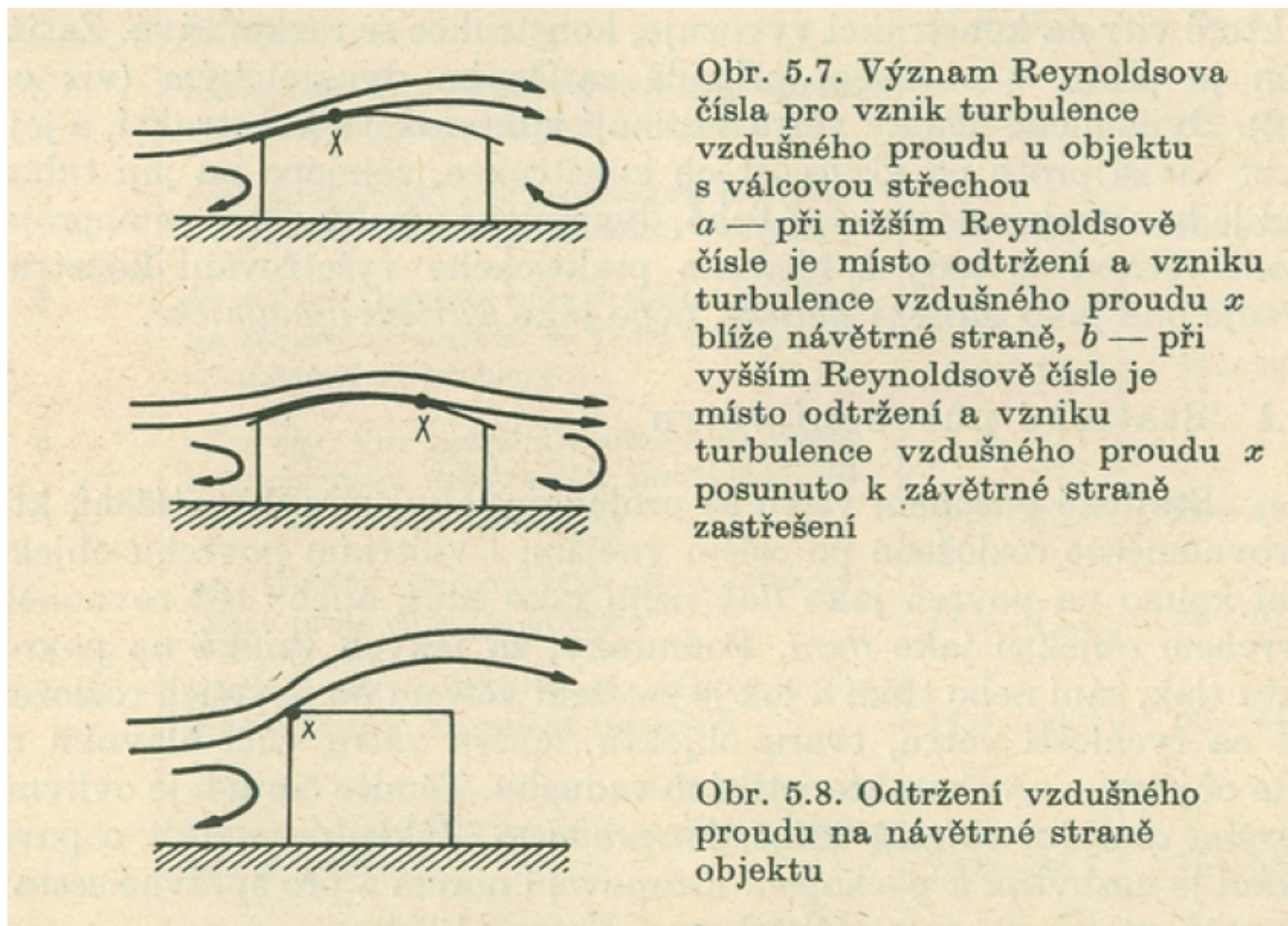
$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu}$$

v rychlost proudu

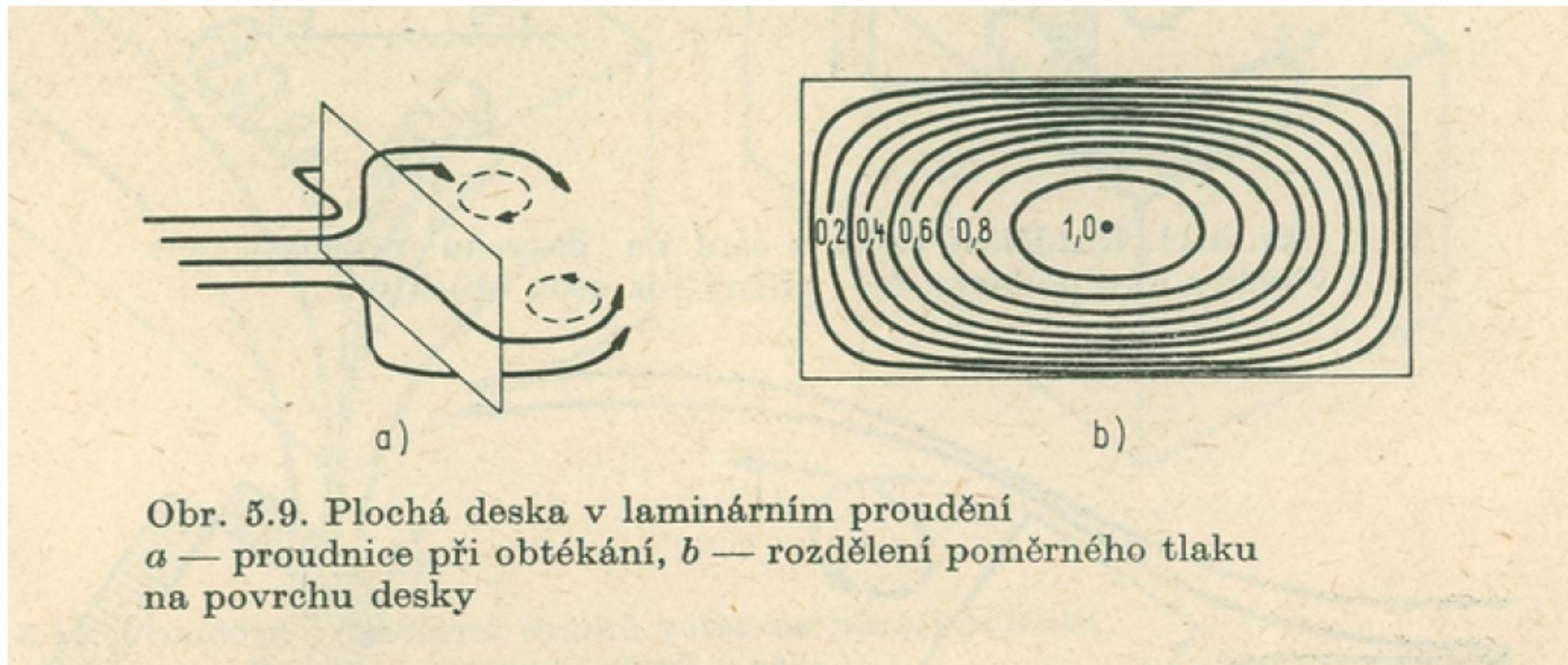
d charakteristický rozměr tělesa

ν kinetická viskozita ($\nu = 14,5 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)

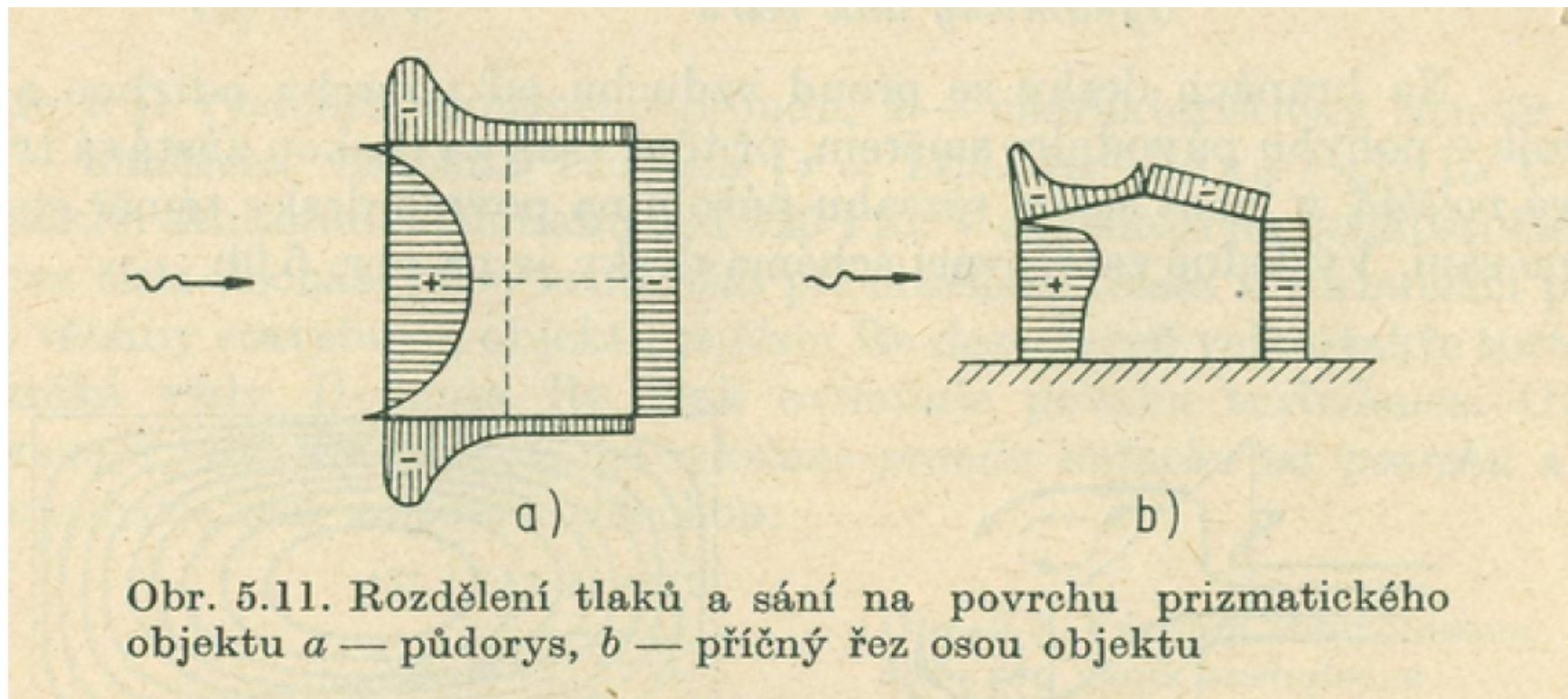
Odtrhávání proudu



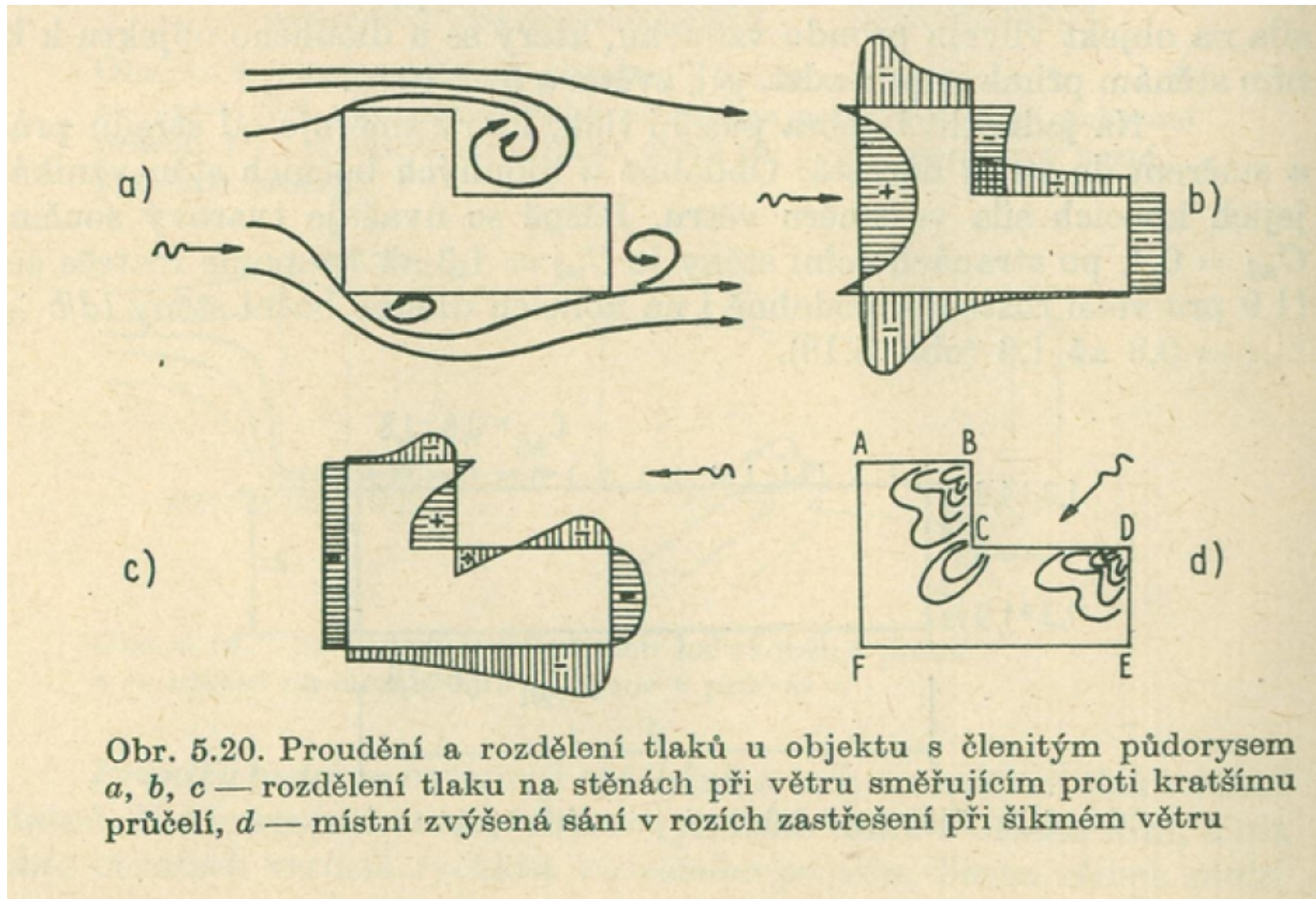
Tlak větru - deska



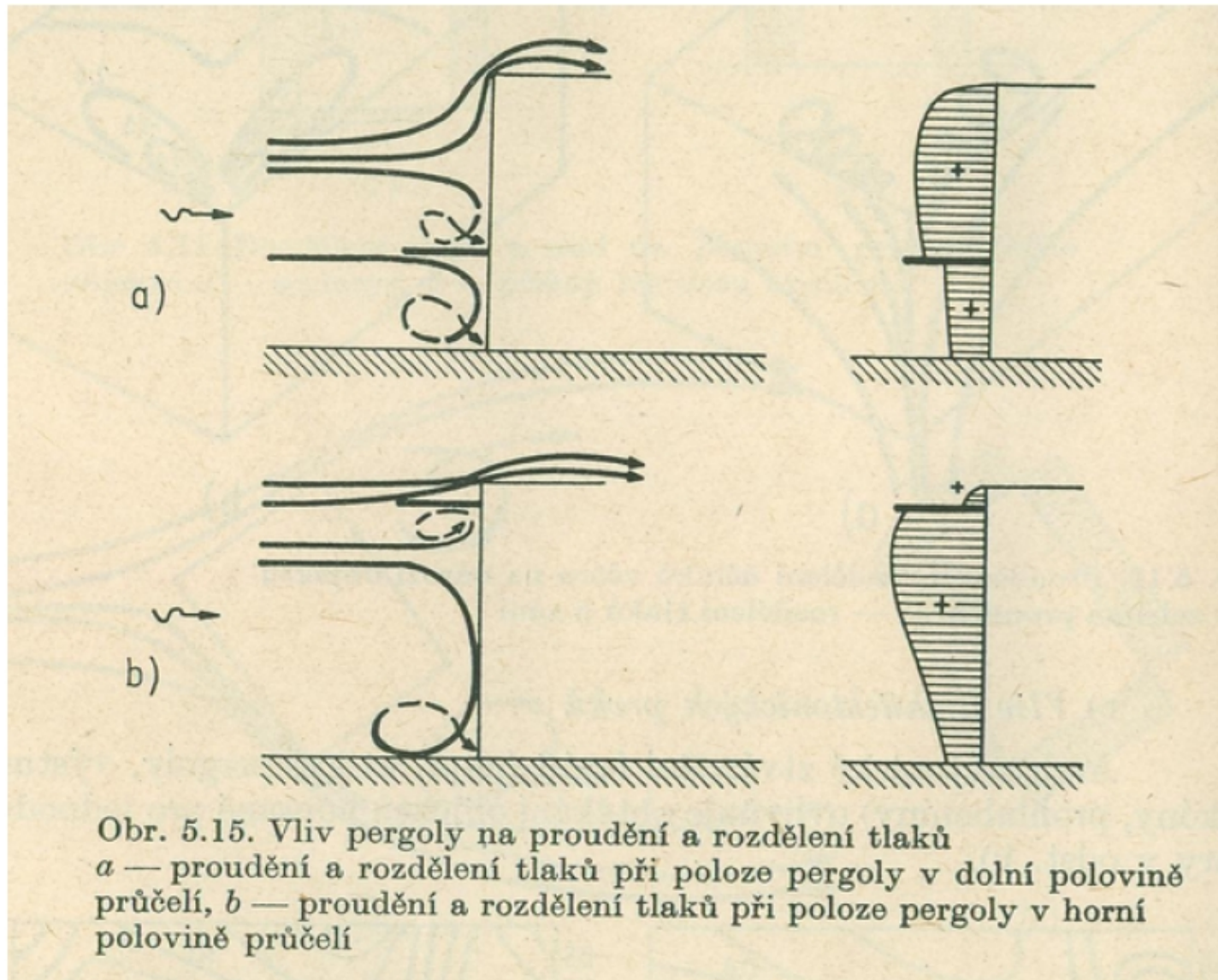
Tlak větru - prizmatický objekt



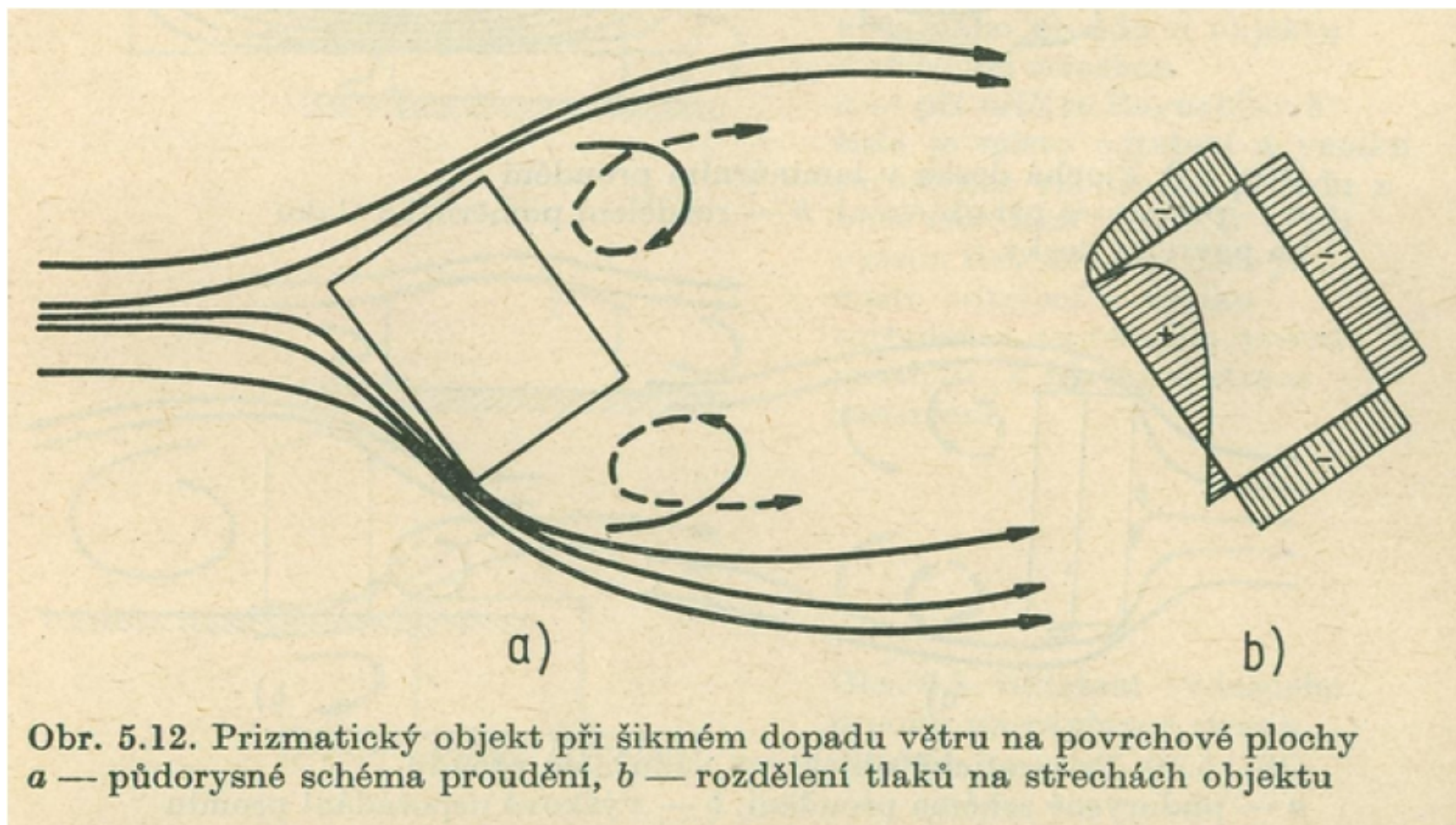
Tlak větru – členitý objekt



Tlak větru – členitý objekt

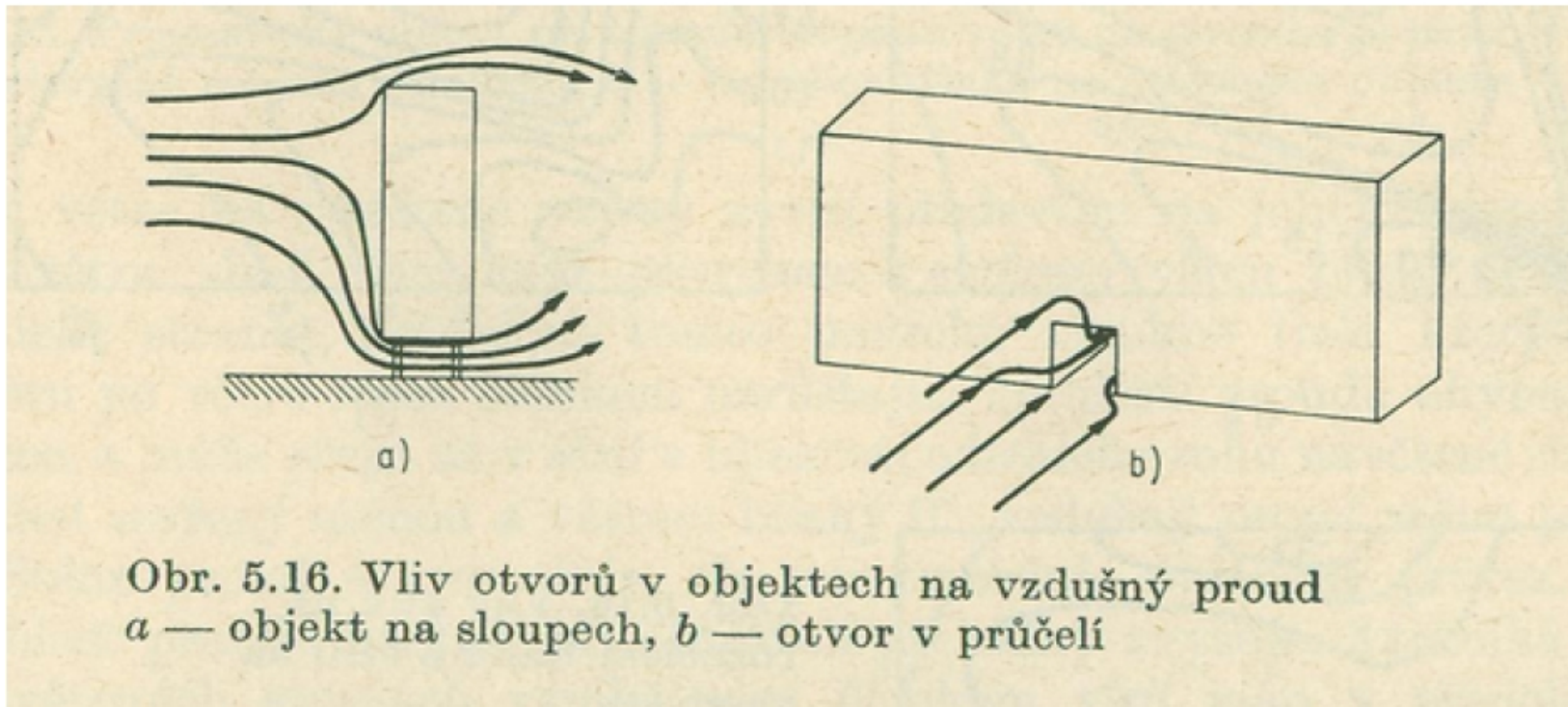


Tlak větru – šikmo působící vítr

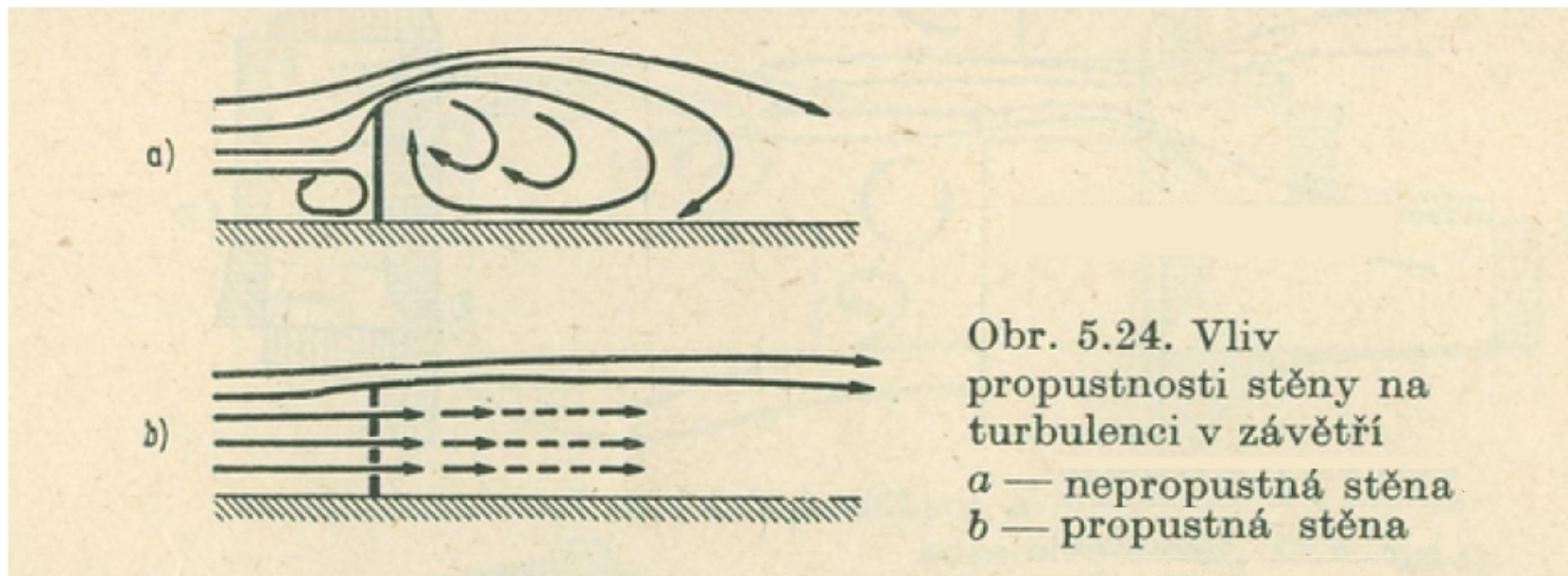


Obr. 5.12. Prizmatický objekt při šikmém dopadu větru na povrchové plochy
a — půdorysné schéma proudění, *b* — rozdělení tlaků na střechách objektu

Proudění – budova s otvorem



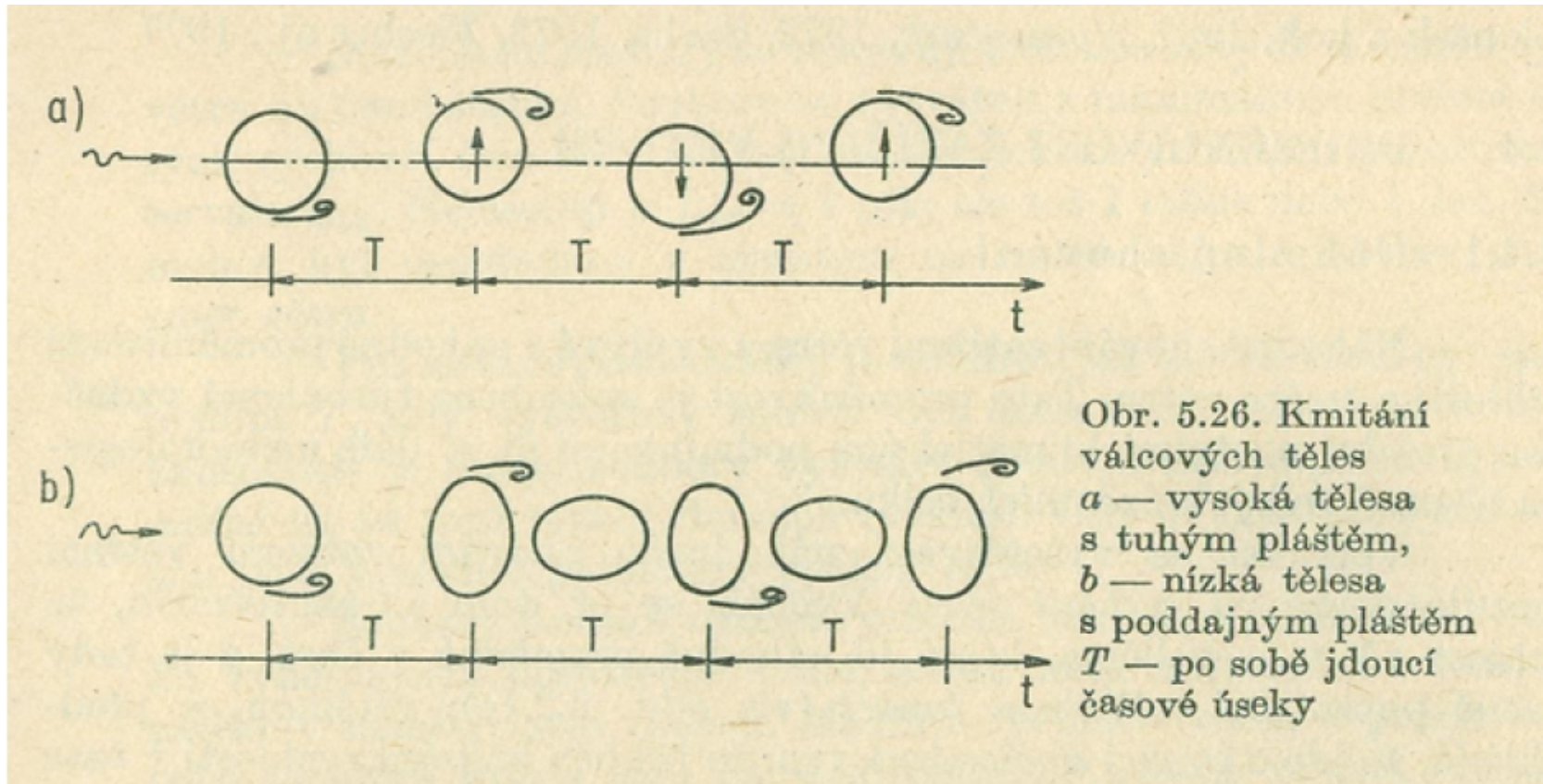
Propustná stěna



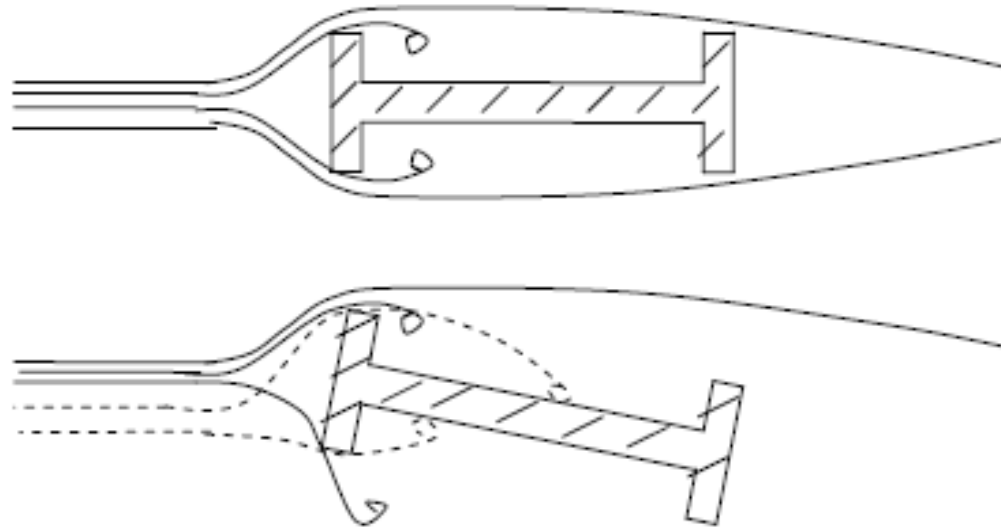
Dynamické působení větru

- kmitání objektu ve směru větru (poryvy a fluktuace rychlosti)
- kmitání štíhlých válcovitých objektů kolmo na směr větru (jedná se o komíny, stožáry, je způsobeno Kármánovými víry)
- ovaling - kmitání tenkostěnných velkopřířezových trub v příčném řezu (otevřené plynojemy, naftové nádrže komíny, je způsobeno Kármánovými víry)
- buffeting - kmitání objektu v úplavu jiného objektu
- galloping - kmitání zavěšených těles kolmo na směr větru
- flutter - ohybové a torzní kmitání

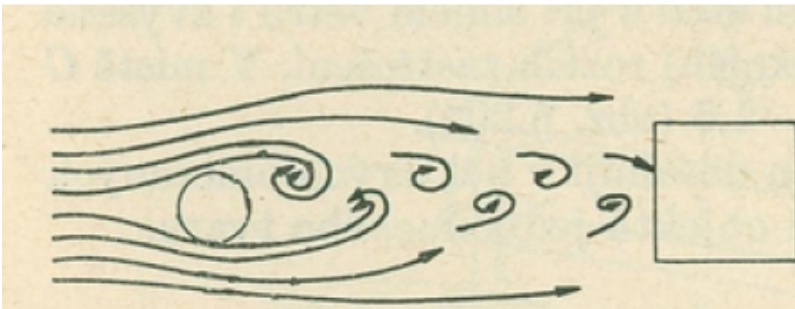
Kmitání kolmo na směr větru a ovalling



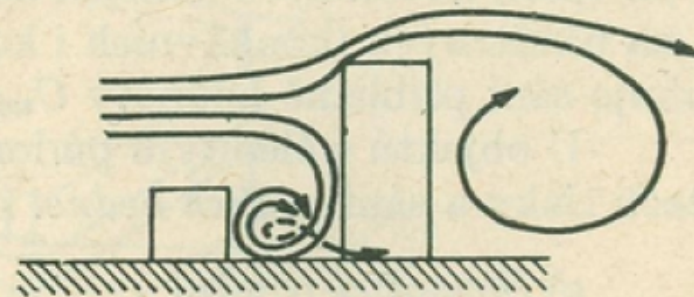
Tacoma bridge galloping + fluttering July 1, 1940 - November 7, 1940



Buffeting



Obr. 5.22. Působení Kármánových vírů na objekt umístěný za válcovým tělesem



Obr. 5.23. Ovlivnění tlaků na povrchu objektu vyšším objektem v jeho závětrí

Zatížení podle normy

Omezení:

- platí pro konstrukce nižší než $200m$
- platí pro mosty o rozpětí do $200m$
- platí pro lávky pro chodce a cyklisty do $30m$
- neplatí pro zavěšené a visuté mosty
- neplatí pro kotvené stožáry

Tlak větru

Vnější a vnitřní tlak větru

$$w_e(z) = q_{ref} c_e(z_e) c_{pe}$$

$$w_i(z) = q_{ref} c_e(z_i) c_{pi}$$

q_{ref} je referenční střední tlak větru

c_e je součinitel expozice

z je výška nad terénem

c_{pe}, c_{pi} jsou součinitelé vnějšího a vnitřního tlaku

Referenční střední tlak větru



$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2$$

- ρ je měrná hmotnost vzduchu
(není-li uvedeno jinak, je $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$)
- v_{ref} je referenční rychlost (získá se z mapy)

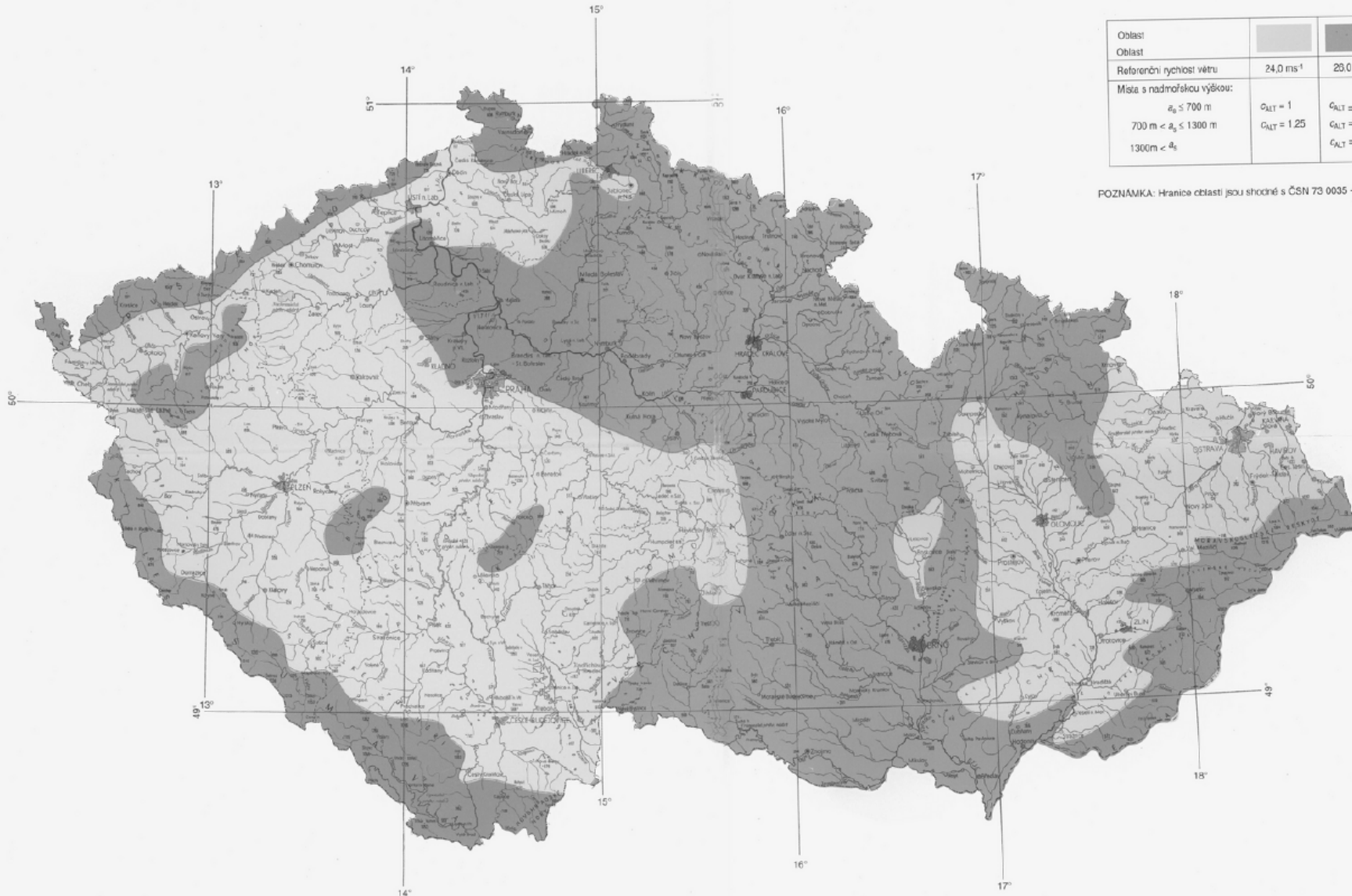
Mapa větrových oblastí

ČSN P ENV 1991-2-4 PŘÍLOHA 1

MAPA VĚTROVÝCH OBLASTÍ NA ÚZEMÍ ČR
1 : 1 000 000

Oblast:		
Oblast		
Referenční rychlost větru	24,0 ms ⁻¹	25,0 ms ⁻¹
Místa s nadmořskou výškou:		
$a_0 \leq 700$ m	$C_{ALT} = 1$	$C_{ALT} = 1$
$700 \text{ m} < a_0 \leq 1300$ m	$C_{ALT} = 1,25$	$C_{ALT} = 1,16$
$1300 \text{ m} < a_0$		$C_{ALT} = 1,27$

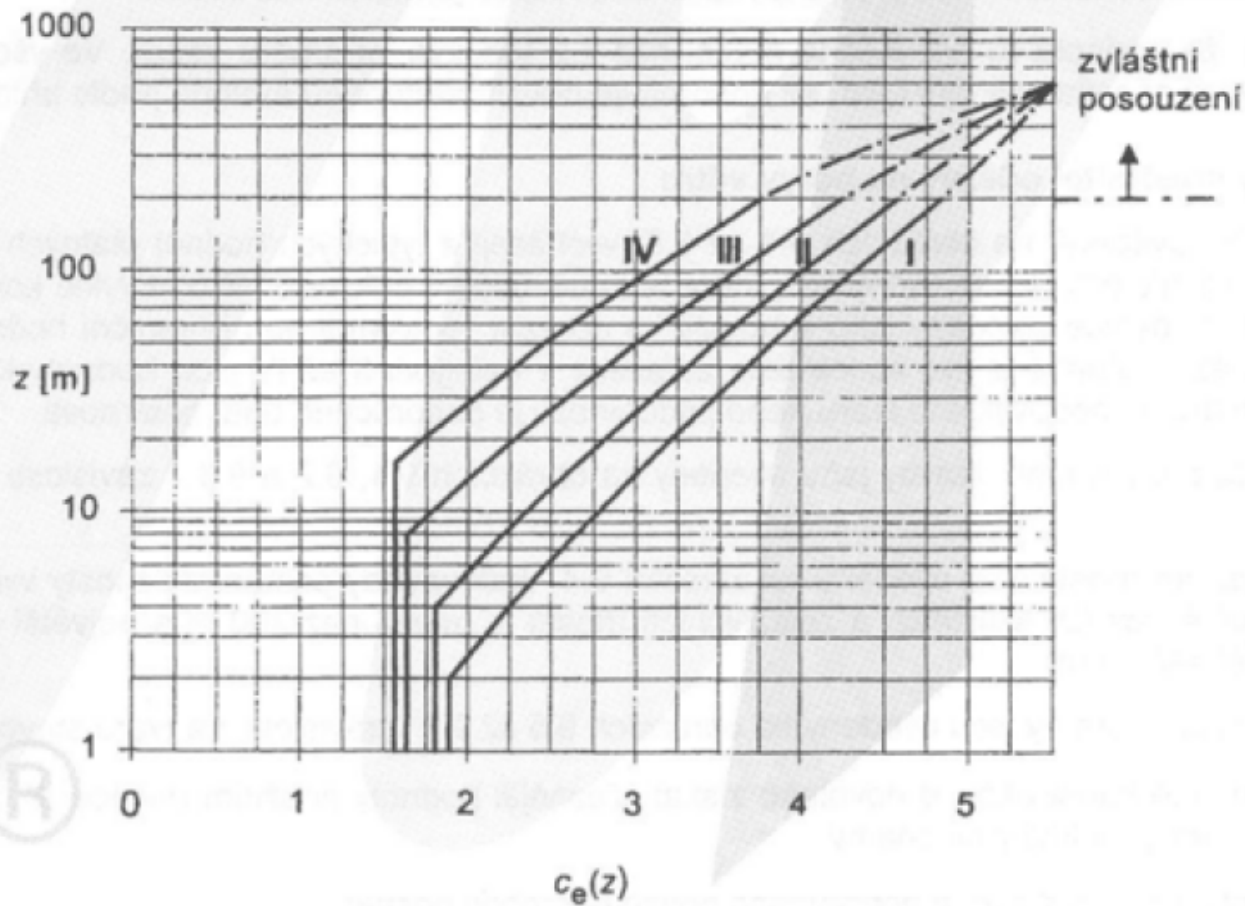
POZNAMKA: Hranice oblastí jsou shodné s ČSN 73 0035 - Příloha 1



Součinitel expozice

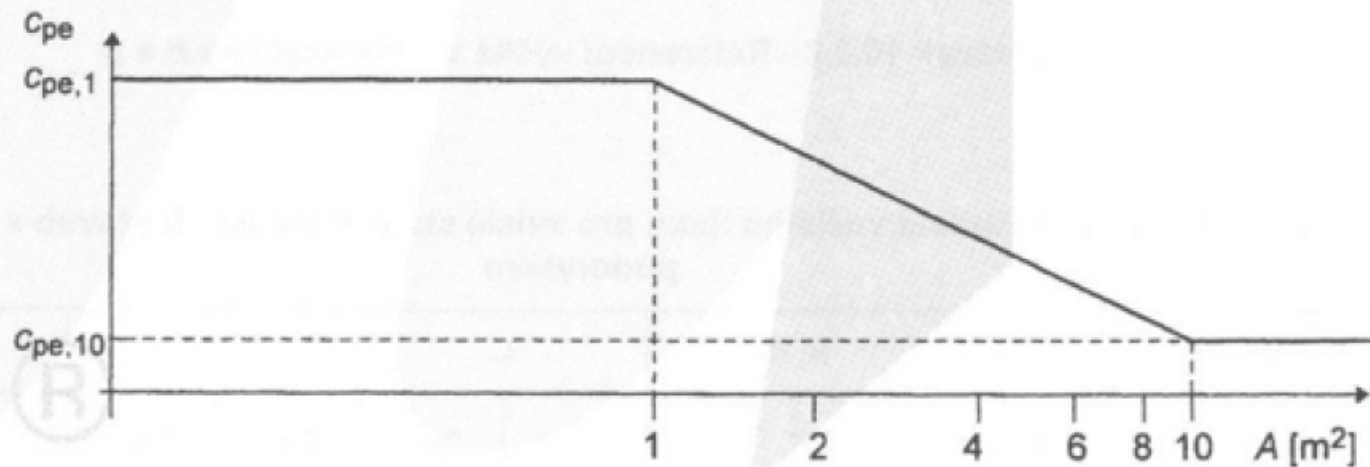
Kategorie terénu
I Rozbouřené otevřené more, jezera do vzdálenosti nejméně 5 km proti směru větru a rovná plochá krajina bez překážek
II Zemědělská půda s hraničními živými ploty, náhodné malé zemědělské stavby, domy a stromy
III Předměstské nebo průmyslové oblasti a souvislé lesy
IV Městské oblasti, ve kterých je nejméně 15% povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška je větší než 15 m

Součinitel expozice



Obrázek 8.3 - Součinitel expozice $c_e(z)$ jako funkce výšky z nad zemí a kategorie terénu I až IV (viz tabulka 8.1) pro $c_t = 1$

Součinitel vnějšího tlaku

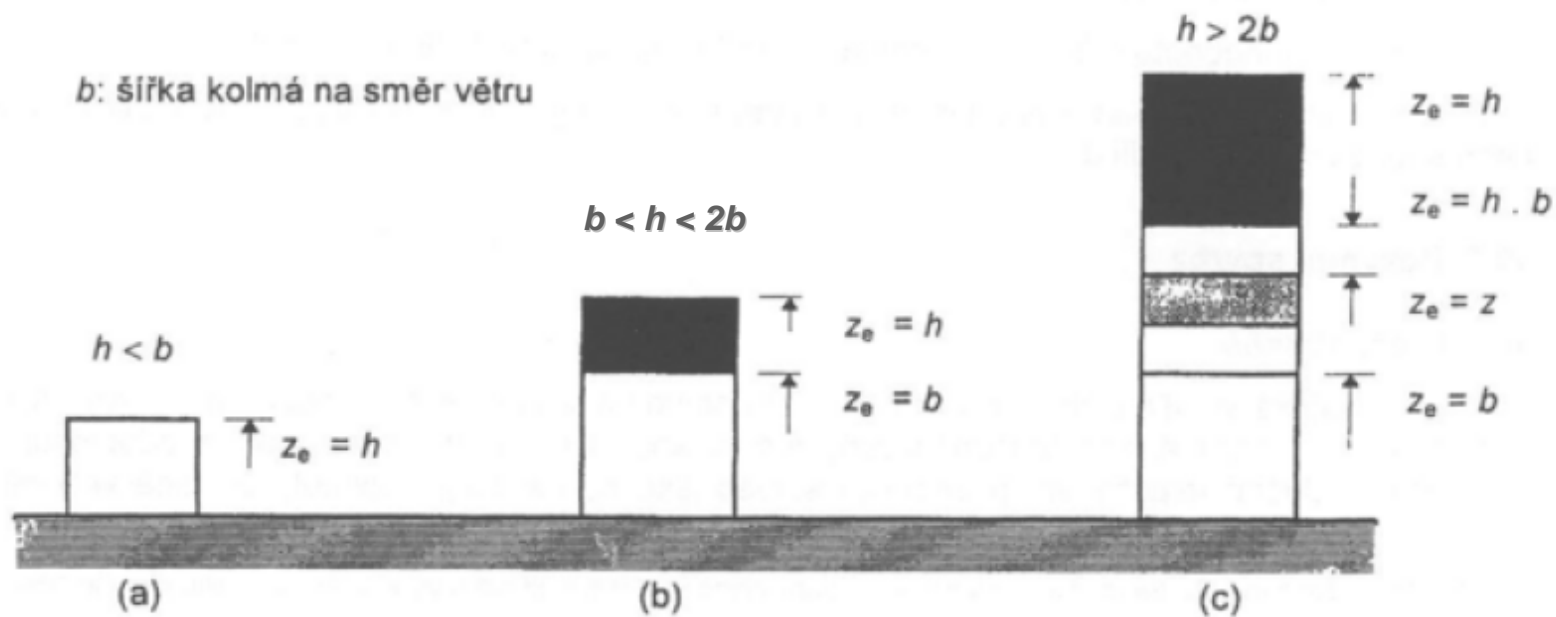


POZNÁMKA - Obrázek zobrazuje následující vztahy:

$A \leq 1 m^2$	$C_{pe} = C_{pe,1}$
$1 m^2 < A < 10 m^2$	$C_{pe} = C_{pe,1} + (C_{pe,10} - C_{pe,1}) \cdot \log_{10} A$
$A \geq 10 m^2$	$C_{pe} = C_{pe,10}$

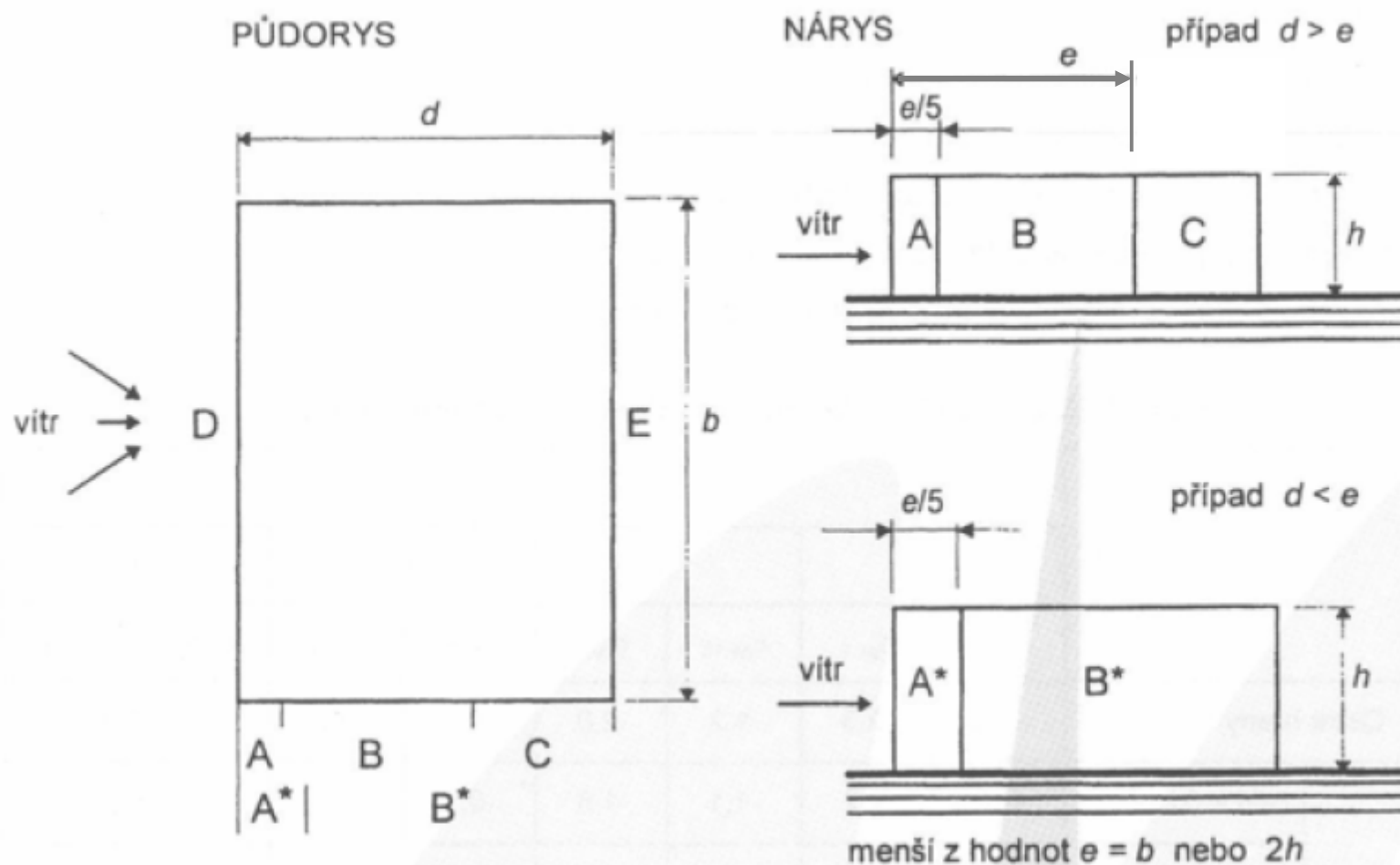
Obrázek 10.2.1 - Závislost součinitele vnějšího tlaku pro pozemní stavby na velikosti zatížené plochy A

Referenční výška



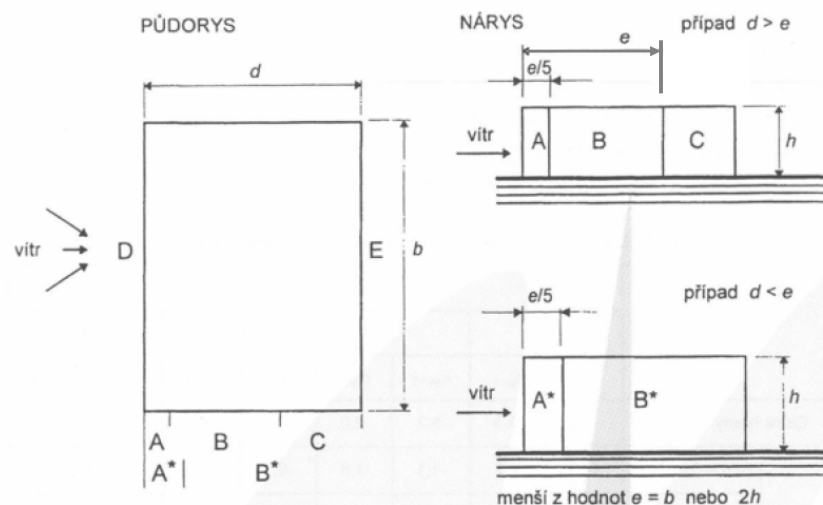
Obrázek 10.2.2 - Referenční výška z_e , závisující na h a b

Součinitel vnějšího tlaku – svislé stěny



Obrázek 10.2.3 - Legenda pro svislé stěny

Součinitel vnějšího tlaku – svislé stěny

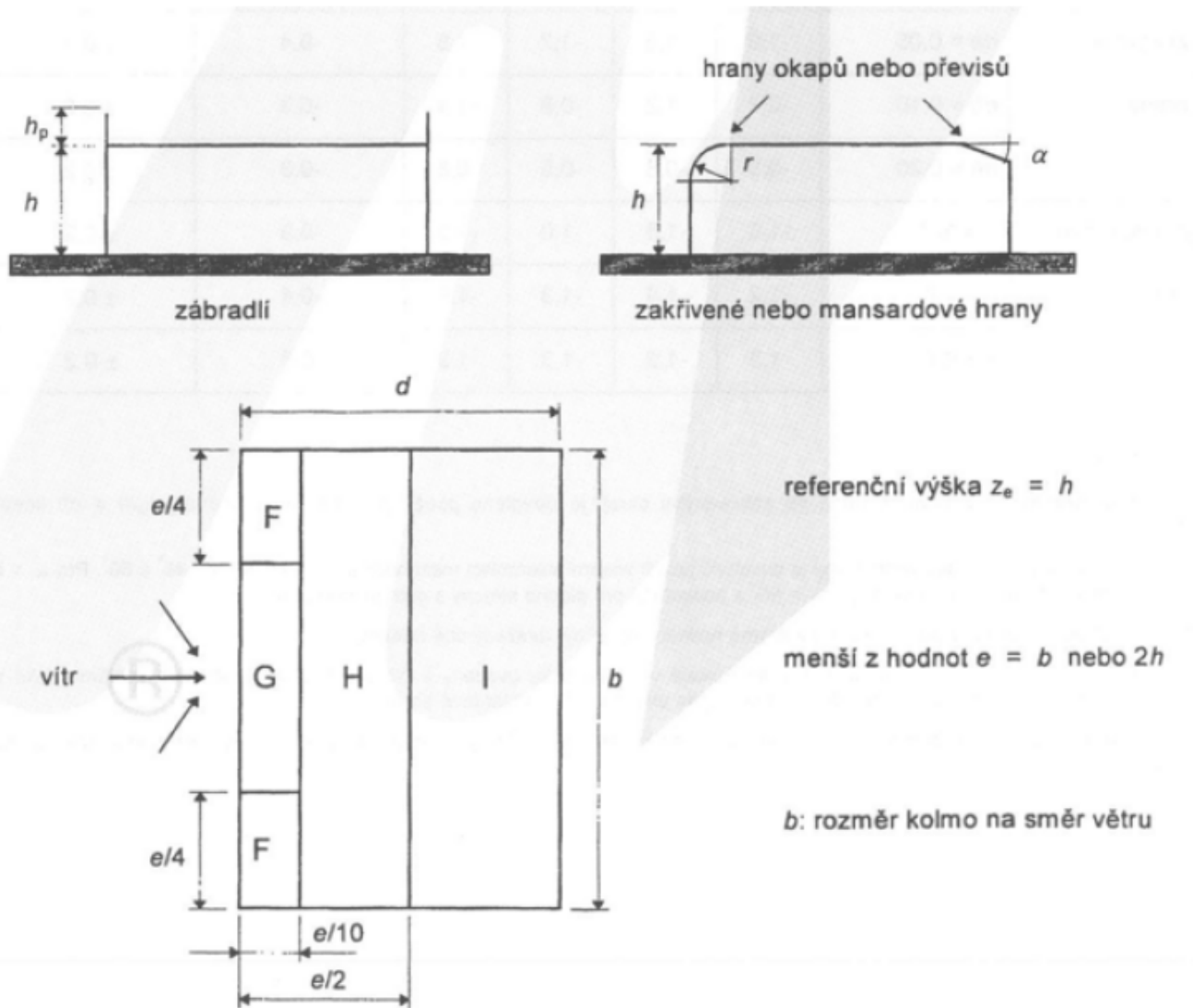


Obrázek 10.2.3 - Legenda pro svislé stěny

Tabulka 10.2.1 - Součinitele vnějšího tlaku pro svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem

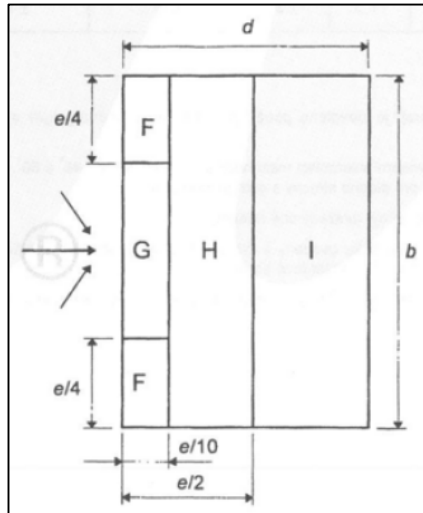
Oblast	A		B, B*		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
$d/h \leq 1$	-1,0	-1,3	-0,8	-1,0	-0,5		+0,8	+1,0	-0,3	
$d/h \geq 4$	-1,0	-1,3	-0,8	-1,0	-0,5		+0,6	+1,0	-0,3	

Součinitel vnějšího tlaku – ploché střechy



Obrázek 10.2.4 - Legenda pro ploché střechy

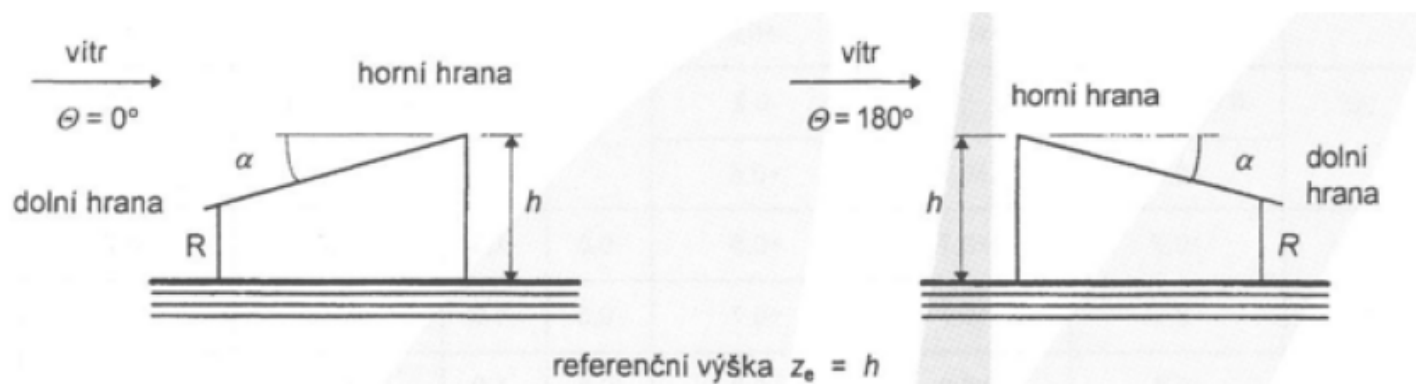
Součinitel vnějšího tlaku – ploché střechy



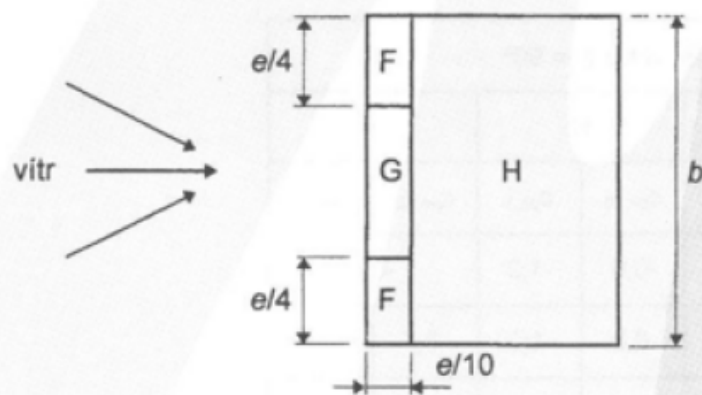
Tabulka 10.2.2 - Součinitele vnějšího tlaku pro ploché střechy

		Oblasti							
		F		G		H		I	
		$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
Ostré hrany		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	± 0,2	
se zábradlím	$h_p/h = 0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	± 0,2	
	$h_p/h = 0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	± 0,2	
	$h_p/h = 0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	± 0,2	
zakřivené hrany	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4		± 0,2	
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3		± 0,2	
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		± 0,2	
mansardové hrany	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3		± 0,2	
	$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4		± 0,2	
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5		± 0,2	

Součinitel vnějšího tlaku – pultové střechy



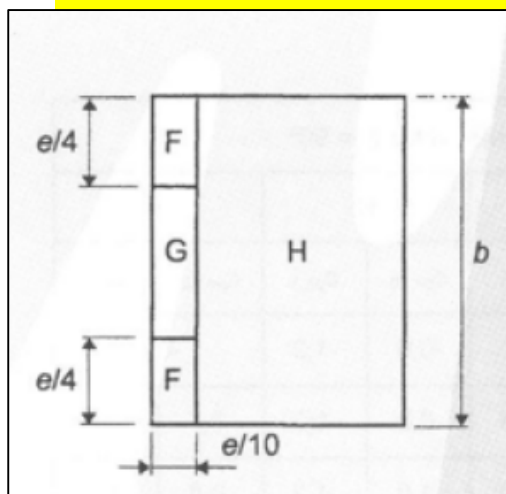
a) obecně



menší z hodnot
 $e = b$ nebo $2h$

(b) směr větru $\theta = 0^\circ$ a $\theta = 180^\circ$

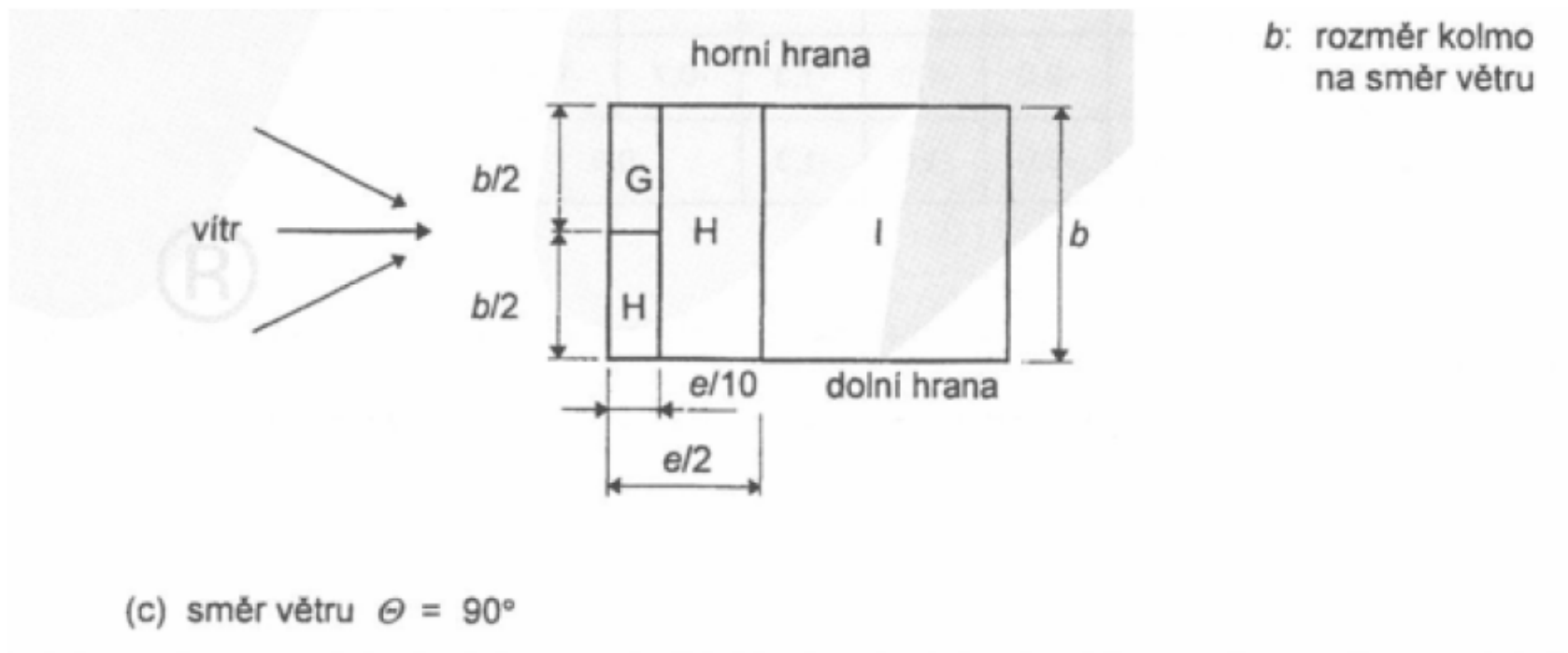
Součinitel vnějšího tlaku – pultové střechy



Tabulka 10.2.3 - Součinitele vnějšího tlaku pro pultové střechy

Úhel sklonu α	Oblast pro směr větru $\vartheta = 0^\circ$						Oblast pro směr větru $\vartheta = 180^\circ$					
	F		G		H		F		G		H	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-2,3	-2,5	-1,3	-2,0	-0,8	-1,2
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2
	+0,2		+0,2		+0,2							
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-1,1	-2,3	-0,8	-1,5	-0,8	
	+0,7		+0,7		+0,4							
45°	+0,7		+0,7		+0,6		-0,6	-1,3	-0,5		-0,7	
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	

Součinitel vnějšího tlaku – pultové střechy

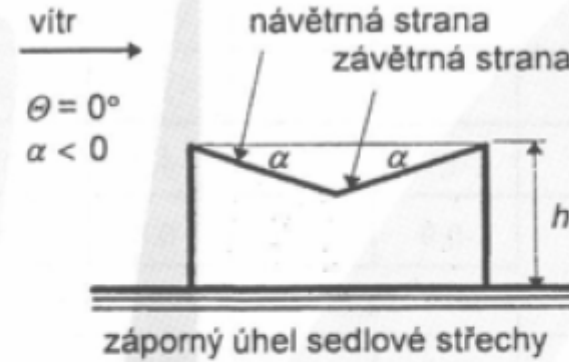
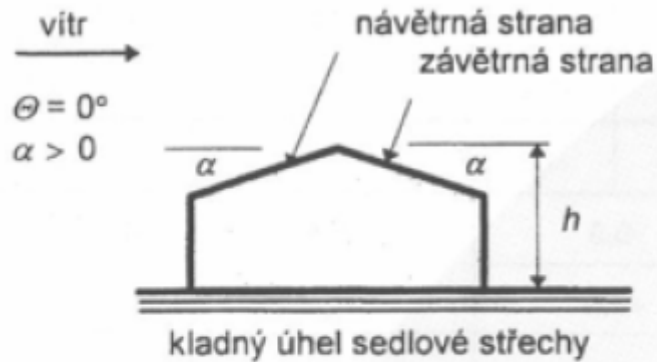


Obrázek 10.2.5 - Legenda pro pultové střechy

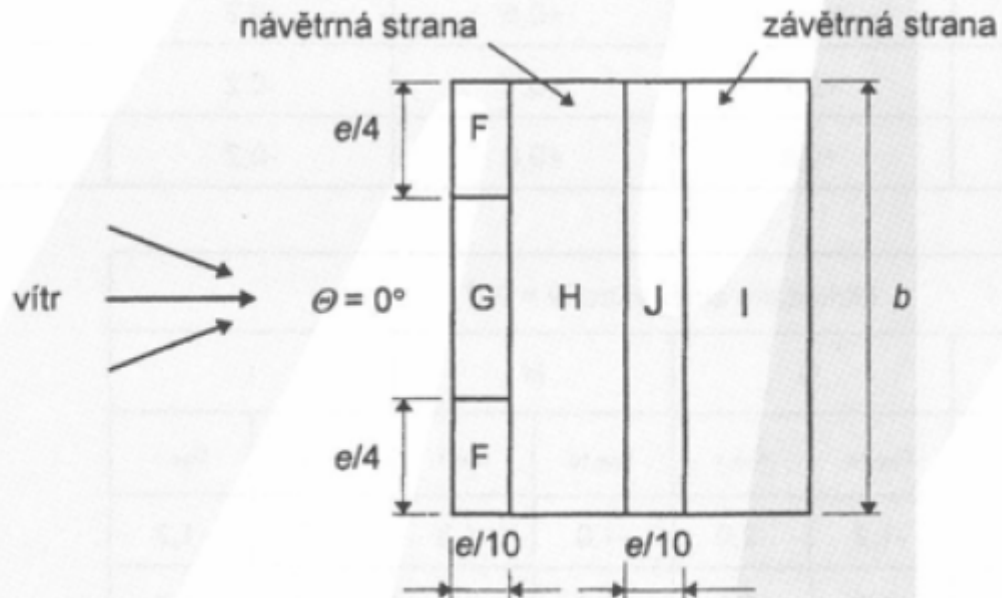
Součinitel vnějšího tlaku – pultové střechy

Úhel sklonu α	Oblast pro směr větru $\theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5°	-1,6	-2,2	-1,8	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
15°	-1,3	-2,0	-1,9	-2,5	-0,8	-1,2	-0,7	-1,2
30°	-1,2	-2,0	-1,5	-2,0	-1,0	-1,3	-0,8	-1,2
45°	-1,2	-2,0	-1,4	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
60°	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,7	-1,2
75°	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,5	

Součinitel vnějšího tlaku – sedlové střechy



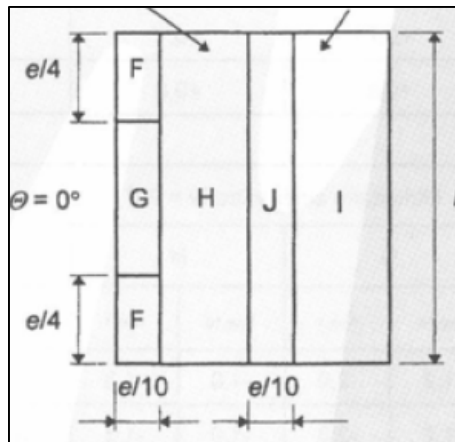
(a) obecně



(b) směr větru $\theta = 0^\circ$

referenční výška:
 $z_e = h$

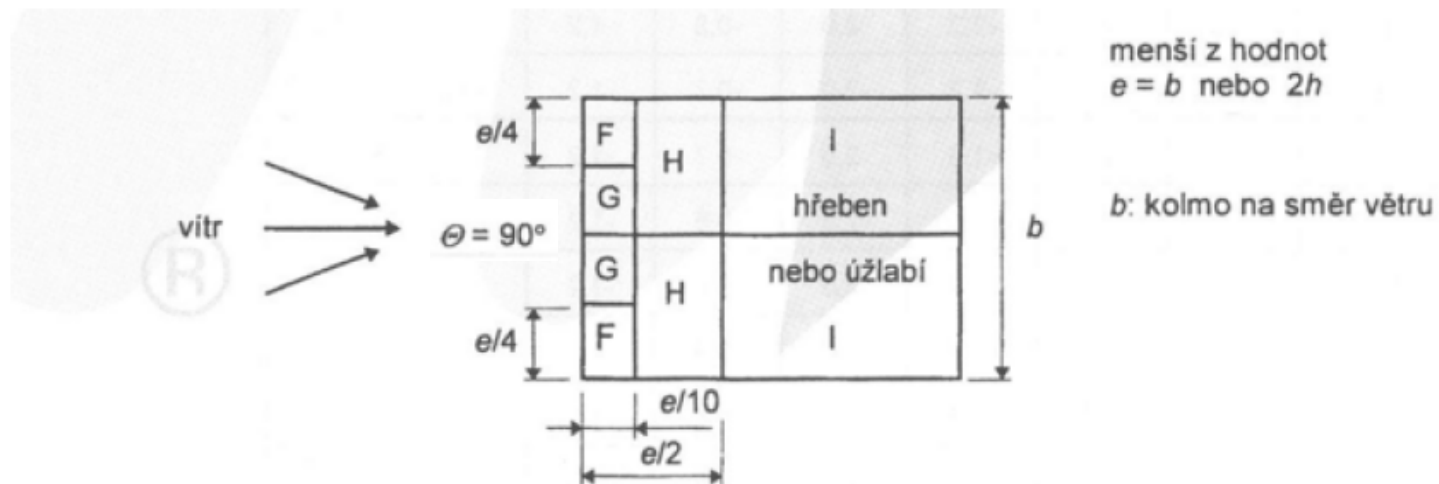
Součinitel vnějšího tlaku – sedlové střechy



Tabulka 10.2.4 - Součinitele vnějšího tlaku pro sedlové střechy

Úhel sklonu α	Oblast pro směr větru $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
-45°	-0,6		-0,6		-0,8		-0,7		-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,3		-0,3	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,3		-0,3	
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,4		-1,0	-1,5
	+0,2		+0,2		+0,2					
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4		-0,5	
	+0,7		+0,7		+0,4					
45°	+0,7		+0,7		+0,6		-0,2		-0,3	
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,2		-0,3	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,2		-0,3	

Součinitel vnějšího tlaku – sedlové i válcové střechy



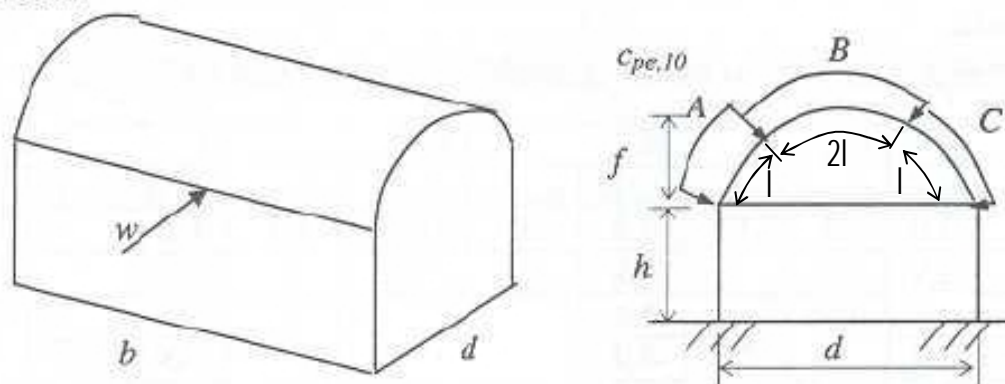
(c) směr větru $\theta = 90^\circ$

Obrázek 10.2.6 - Legenda pro sedlové střechy

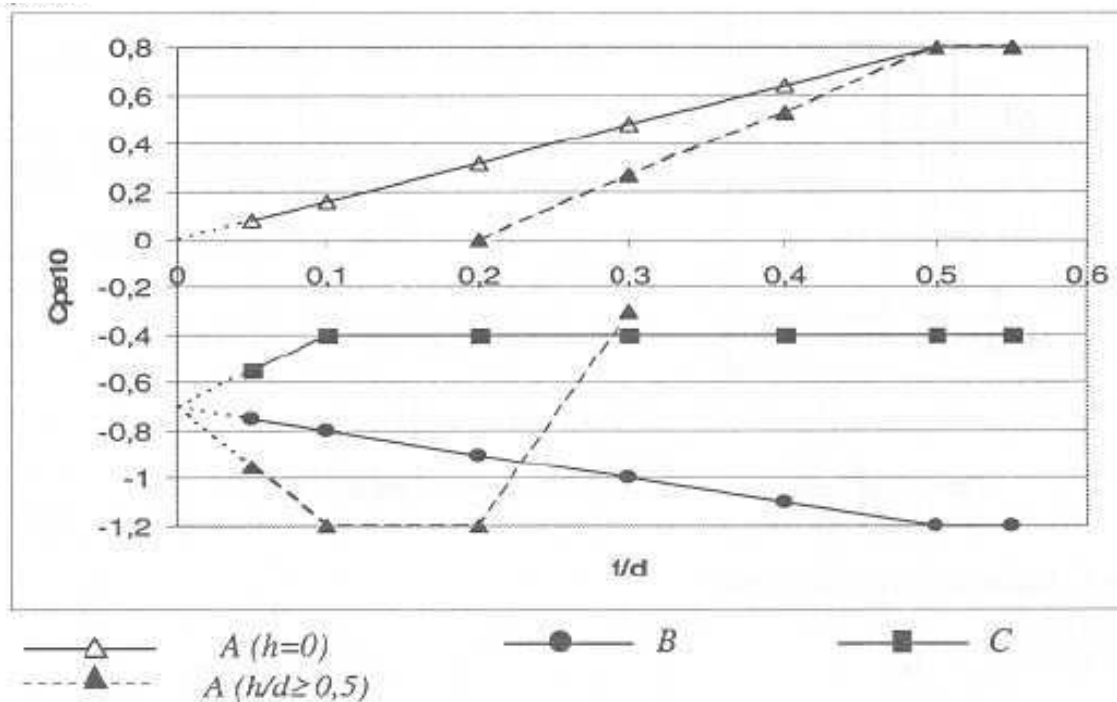
Součinitel vnějšího tlaku – sedlové střechy

úhel sklonu α	Oblast pro směr větru $\theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,8	-1,2
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,5	
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5	
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	
60°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	
75°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	

Součinitel vnějšího tlaku – válcové střechy



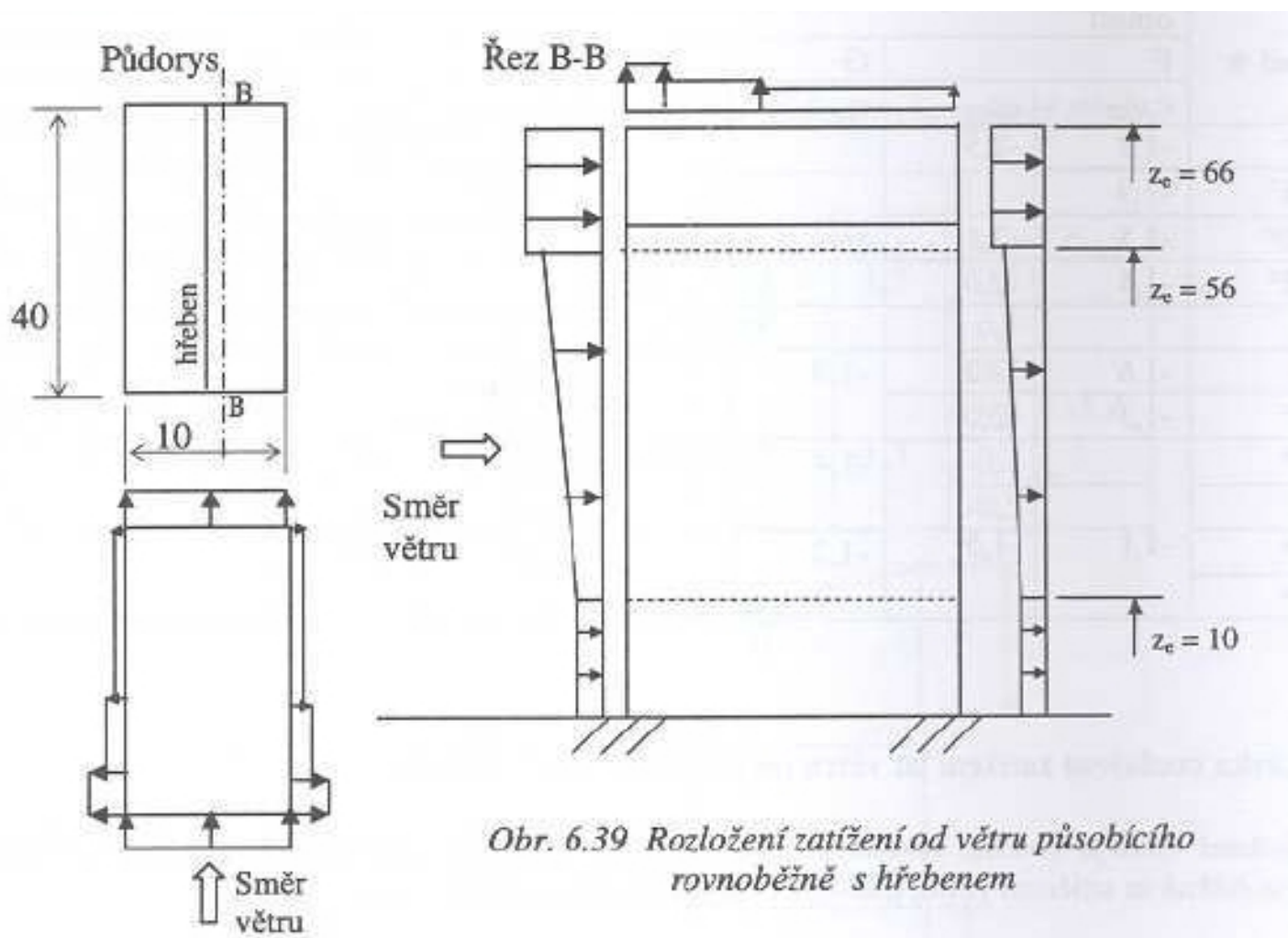
Obr. 6.34 Rozdělení oblastí tlaku větru na sedlovou střechu



Graf 6.3 Hodnoty $c_{pe,10}$ pro oblasti A,B,C v závislosti na poměrech h/d a f/d

Ukázka rozložení zatížení – vítr rovnoběžně s hřebenem

$b = 10 \text{ m}$



Obr. 6.39 Rozložení zatížení od větru působícího rovnoběžně s hřebenem

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.

Oprava 10.11.2010: Přidány kóty ploch pro válcovou střechu

Oprava 12.11.2010: Opraven překlep u referenčního středního tlaku větru

Oprava 30.11.2010: Oprava mezí pro h v obrázku 10.2.2

Oprava 30.11.2010: Oprava kóty na obrázku 10.2.3

Oprava 1.12.2010: Oprava popisku na obrázku 10.2.6

Datum poslední revize: 1.12.2010