

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

VODNÍ A VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Energie větru

Milan Bělík

Energie atmosféry

- energie chemická

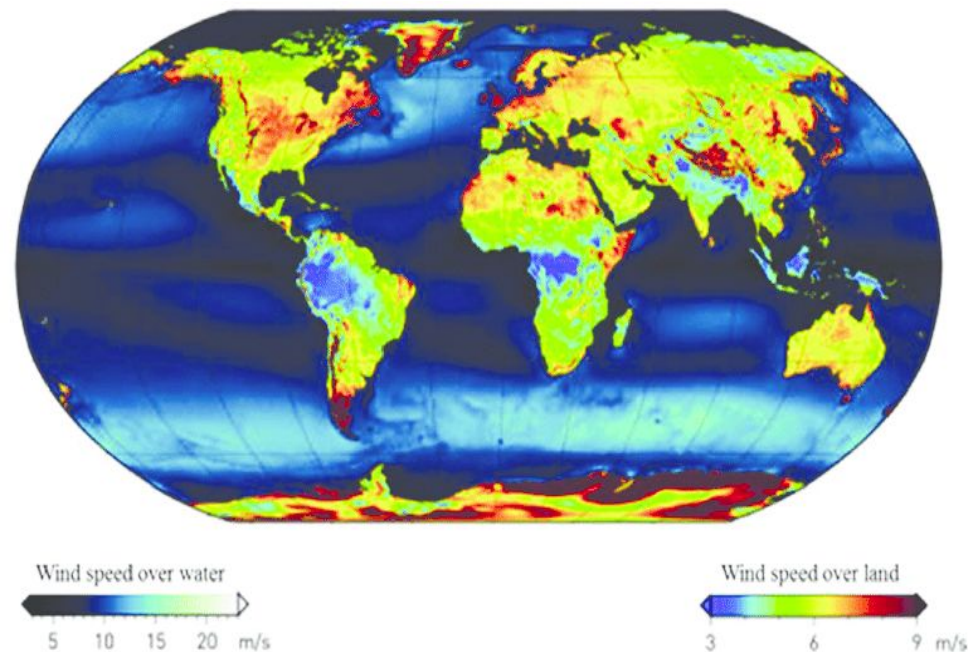
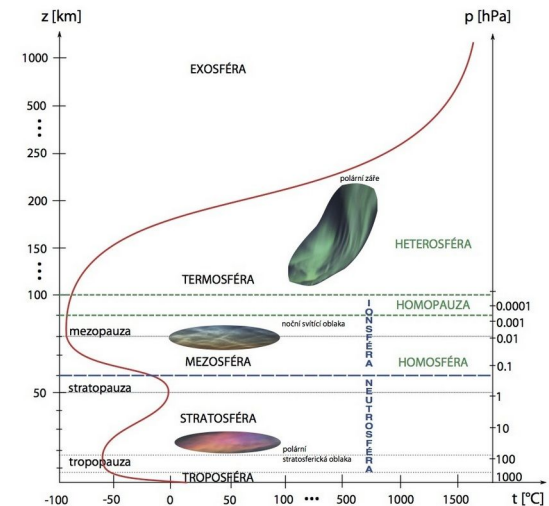
- oxidační činidlo – exotermní reakce
- koncentrační spád - minimální koncentrace

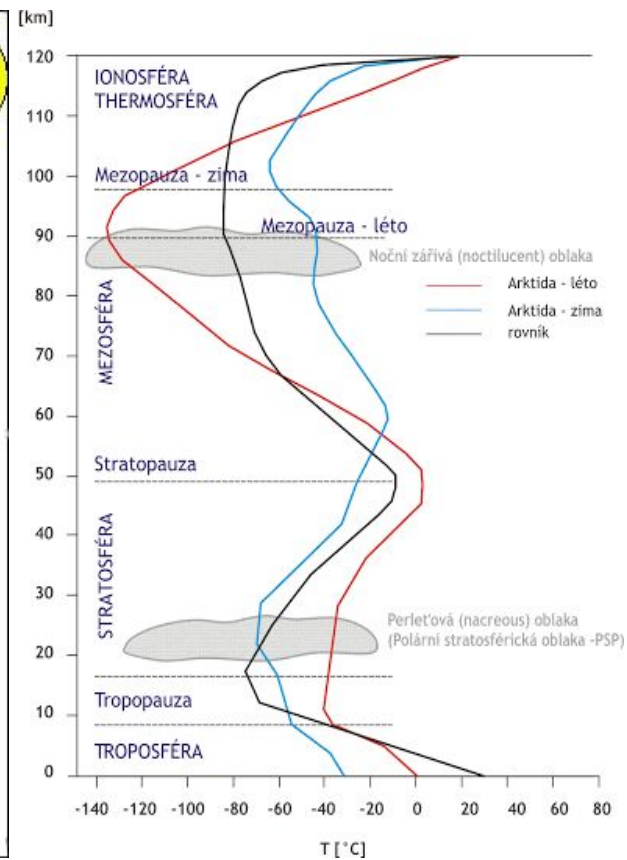
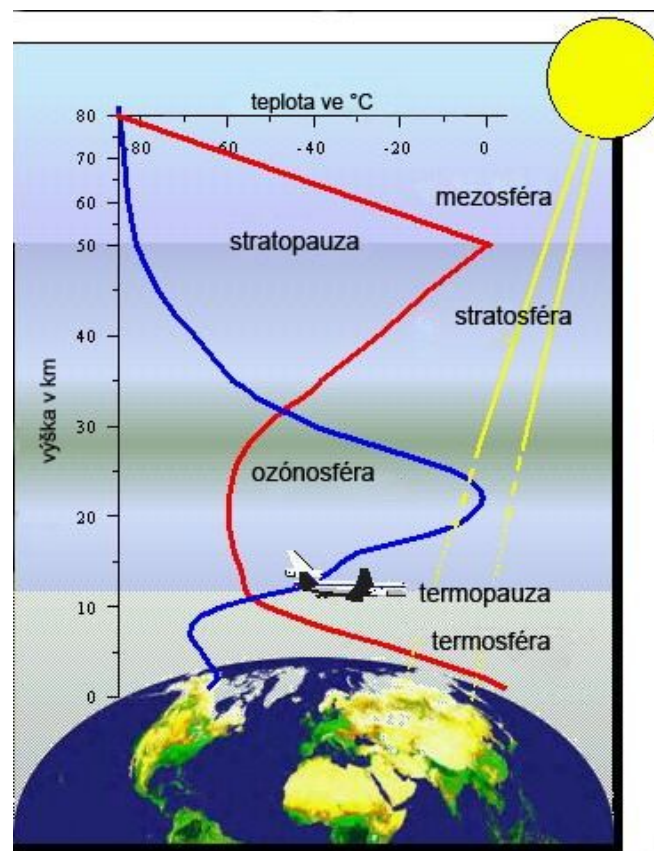
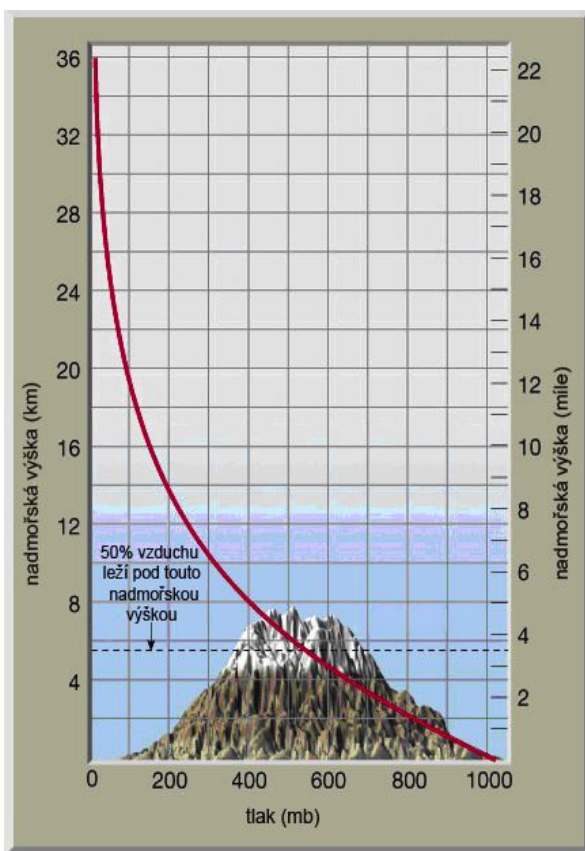
- energie tepelná

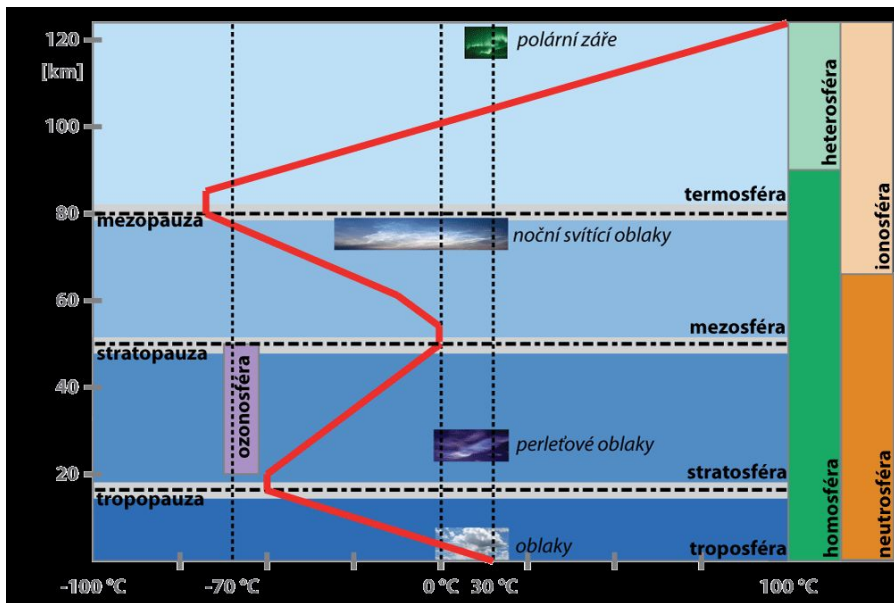
- tepelný spád
 - vzdušné vrstvy (zemský povrch 25°C – stratosféra -50°C – exosféra 1000°C)
 - voda / vzduch (proudící nezamrzající voda arktických řek)

- energie mechanická

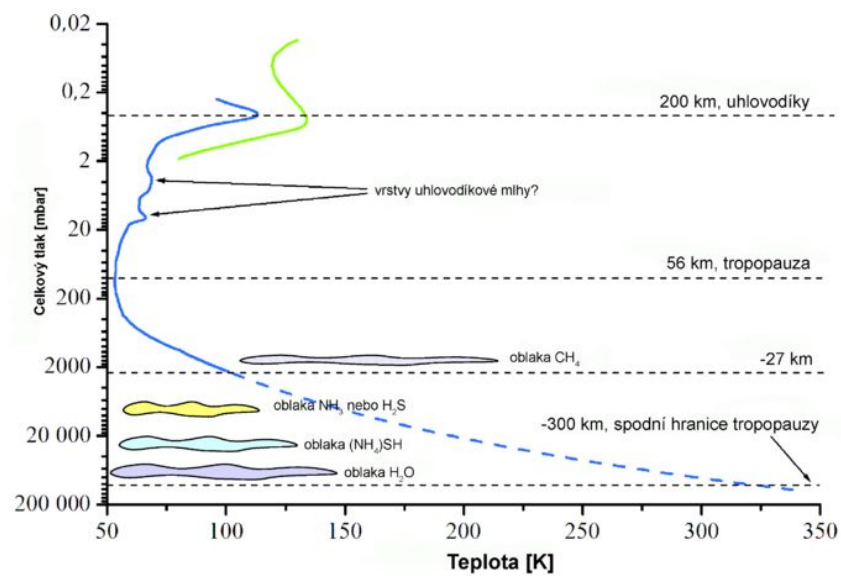
- energie tlaková
 - statický tlak vzdušných vrstev
 - tlakový gradient vzdušných vrstev
- kinetická energie
 - energie větru
 - stálé proudění (geostrofické)
 - proměnlivé proudění (přízemní)

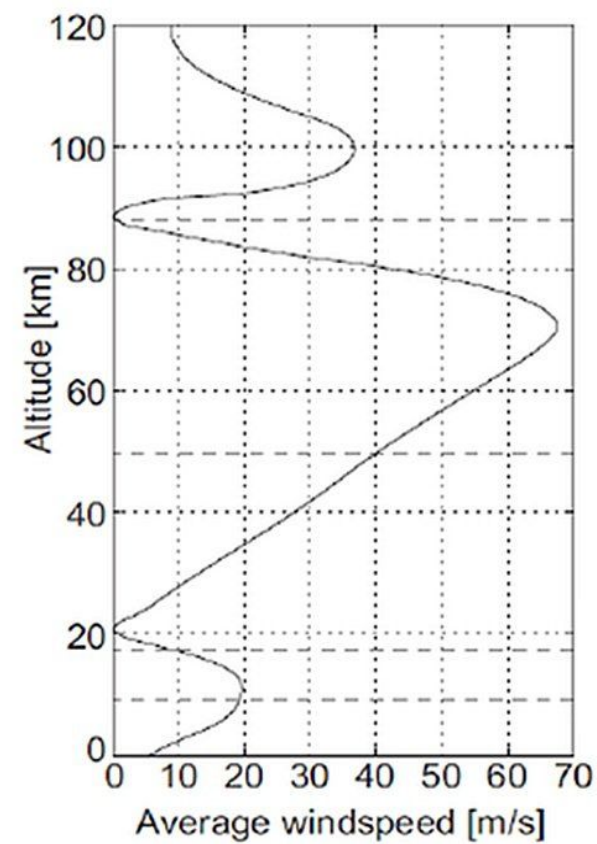
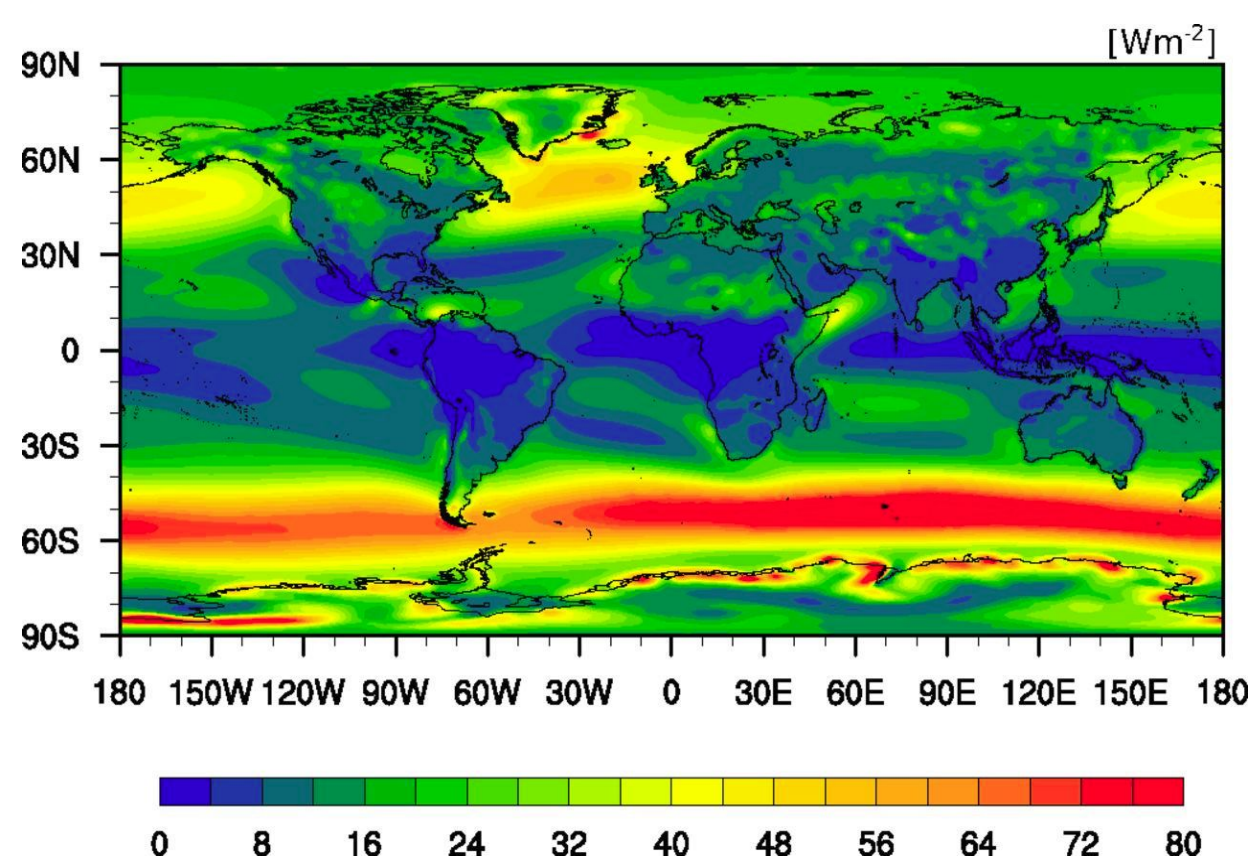






Uran





Druhy větru

- geostrofický (cyklostrofický)

nad 1000 m

horizontální tlakový gradient

Coriolisova síla

uspořádané sférické izobary

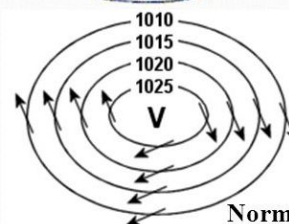
nevyrovnává se tlakový rozdíl

cyklona, anticyklona

Anticyklona

Tlaková výše

Počasí v tlakové výši je slunečné.

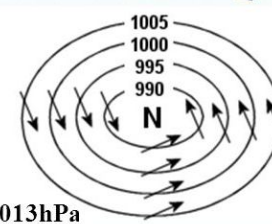


Normální tlak – 1013hPa

Cyklona

Tlaková níže

Počasí v tlakové níže je deštivé s přechody jednotlivých front.



přízemní vítr

tření o povrch

mezní vrstva atmosféry MVA

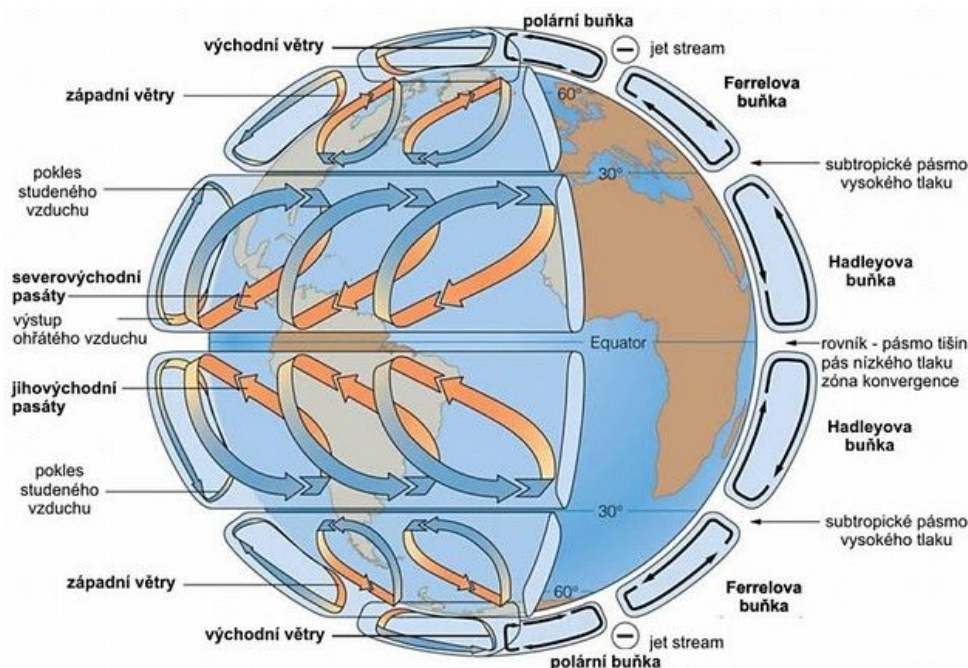
tlaková složka

tepelná složka

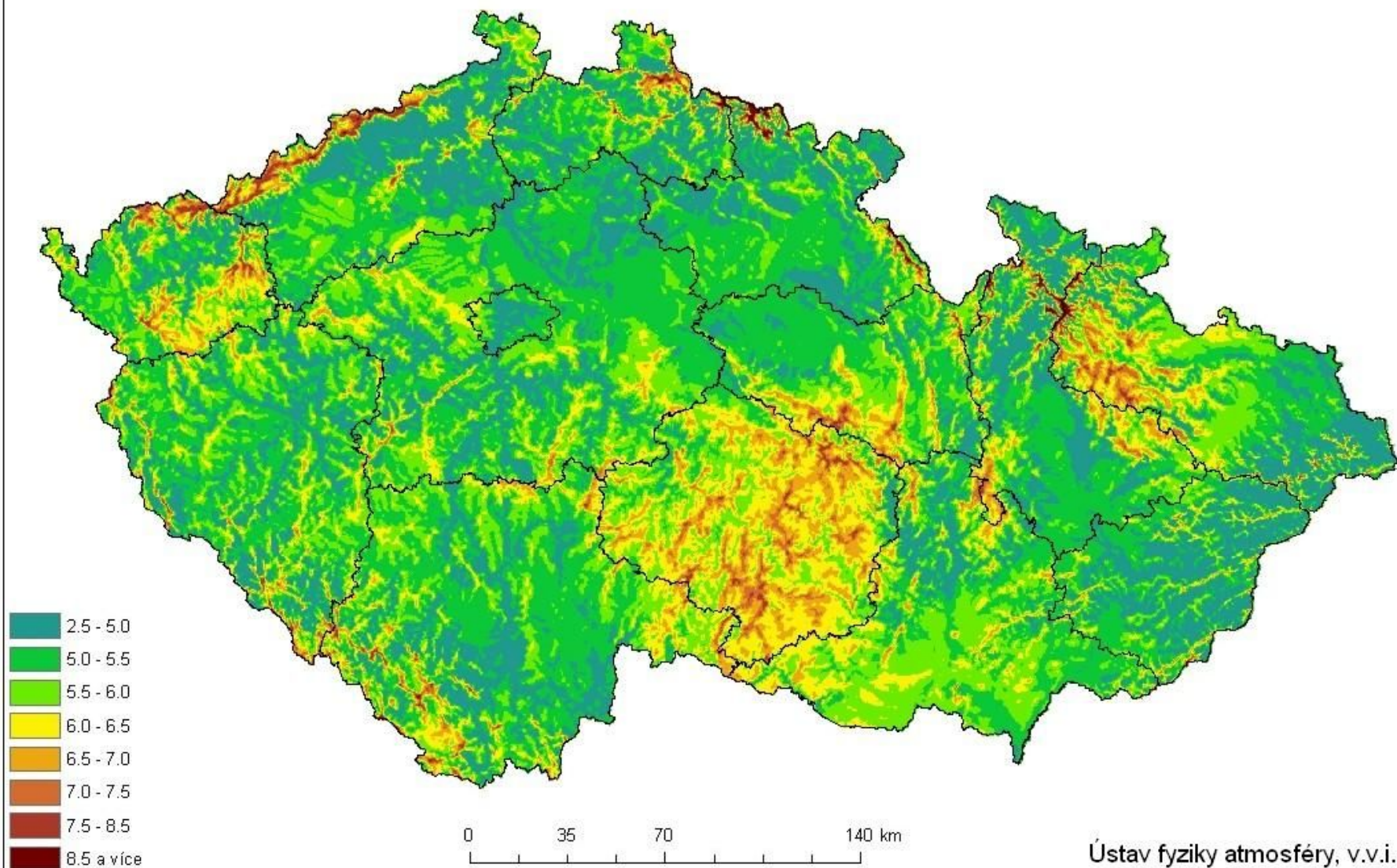
třecí složka (terénní)

1360 W/m²

2 % na vítr (168 mit t uhlí)

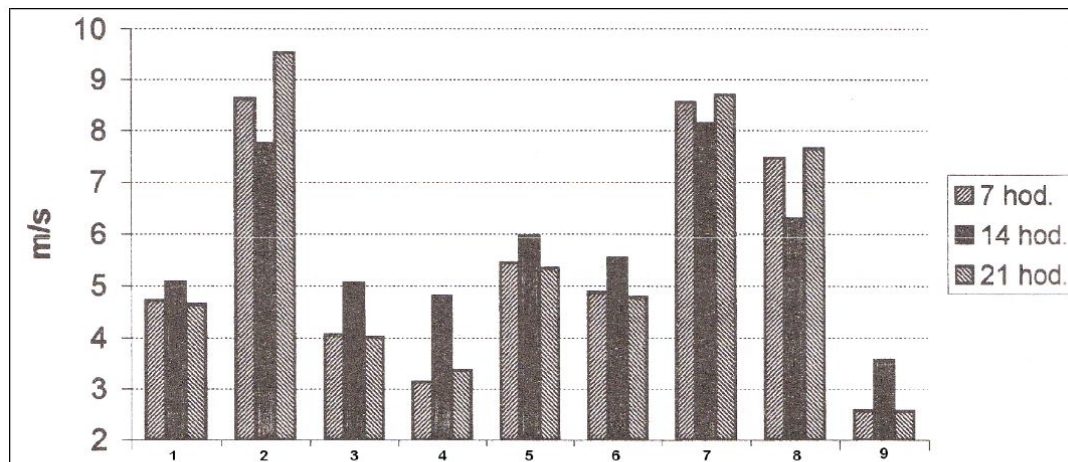


Výsledné pole průměrné rychlosti větru v m/s ve výšce 100 m

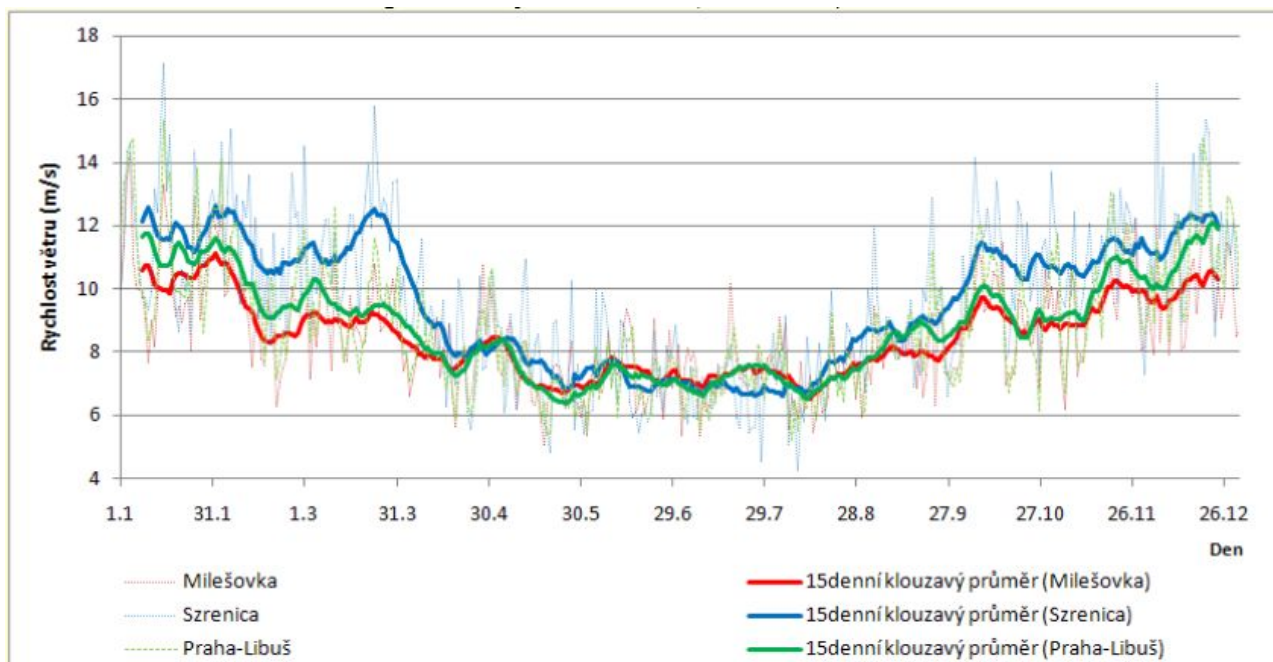


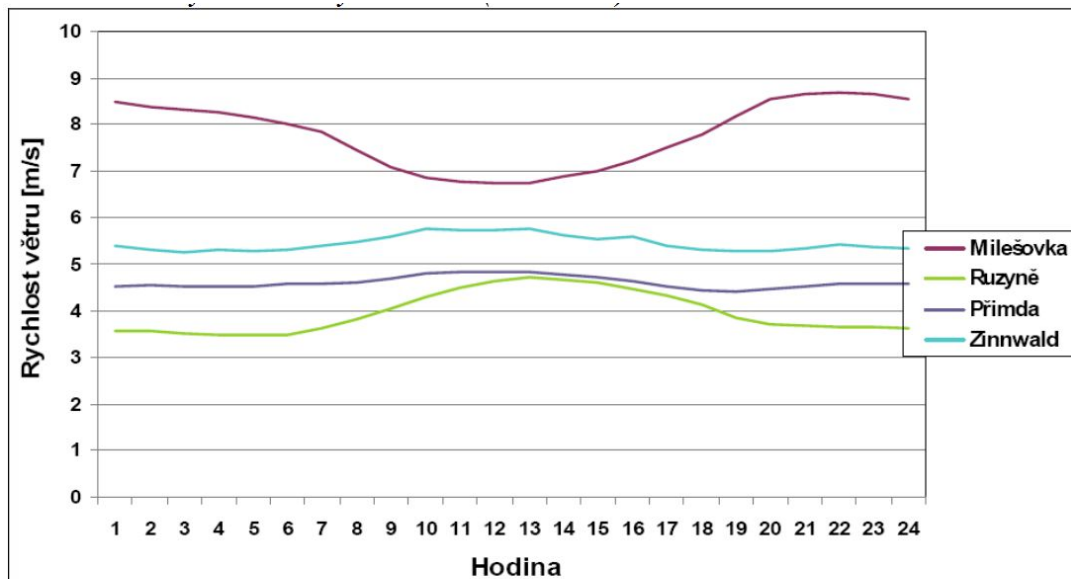
Chod rychlosti větru

- denní období
- roční období
- sezónní větry



Poznámky: 1 – Přimda (742 m n.m.), 2 – Milešovka (837 m n.m.), 3 – Praha, Ruzyně (364 m n.m.), 4 – Kostelní Myslová (569 m n.m.), 5 – Svratouch (737 m n.m.), 6 – Nedvězí (722 m n.m.), 7 – Praděd (1490 m n.m.), 8 – Lysá hora (1324 m n.m.), 9 – průměr ČR.





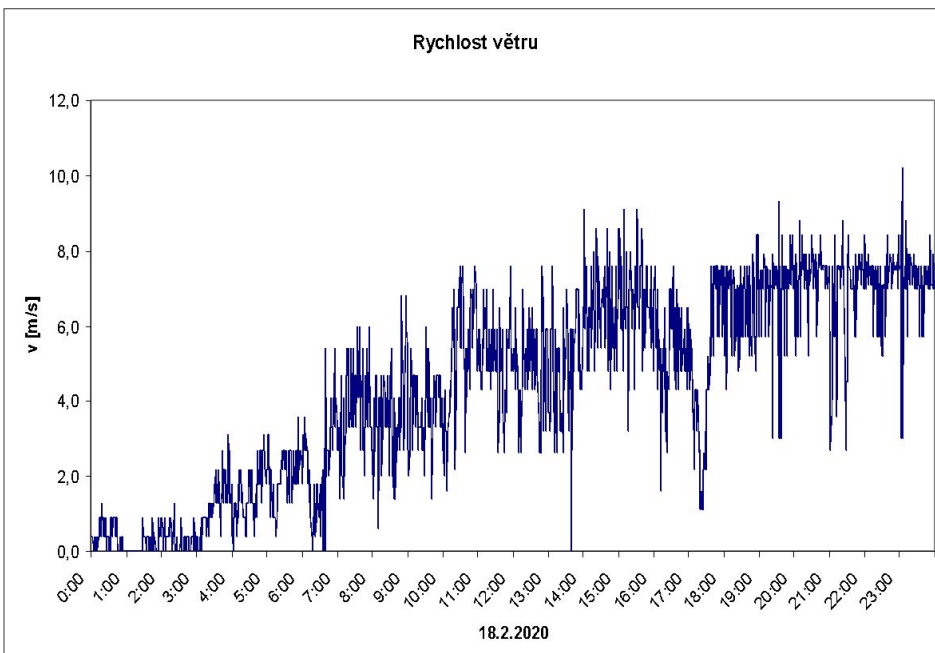
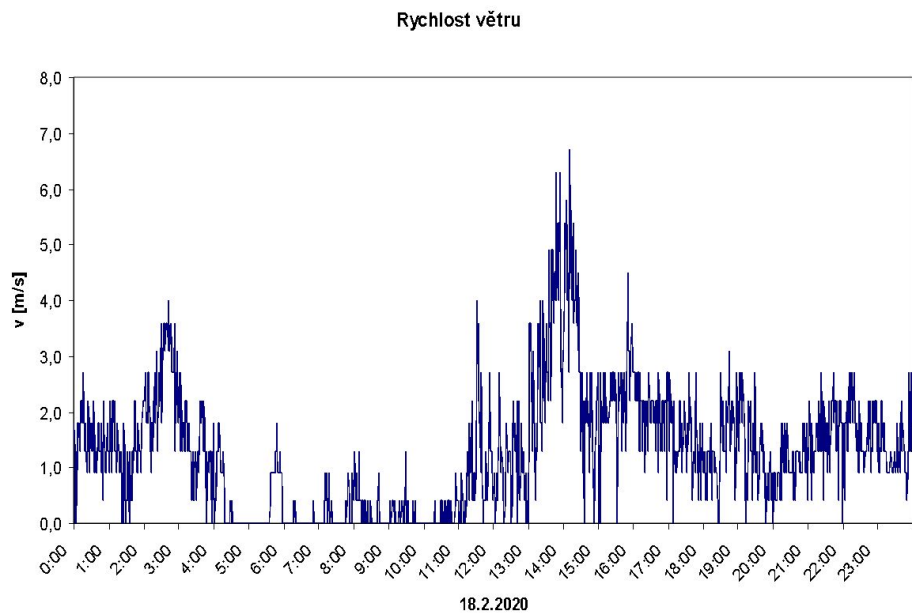
Poznámky: (Název stanice – kraj – nadmořská výška – prům. rychlost větru – charakter tvaru terénu).

Milešovka – Ústecký – 837 m n. m. – 8,2 m/s – hora kuželovitého tvaru.

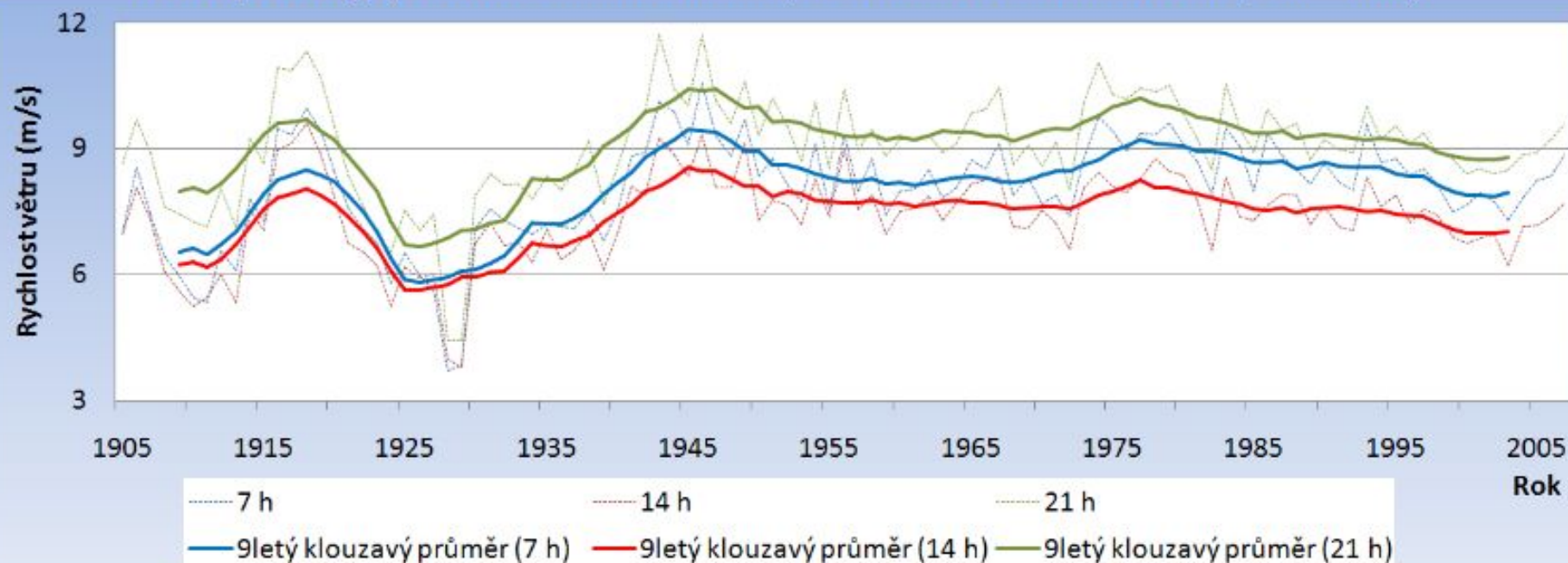
Praha-Ruzyně – Praha – 380 m n. m. – 4,0 m/s – plocha letiště.

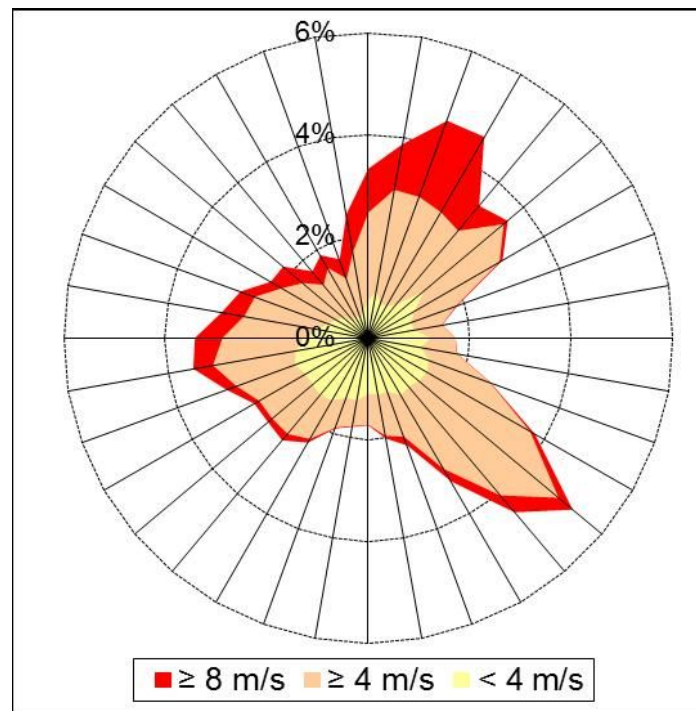
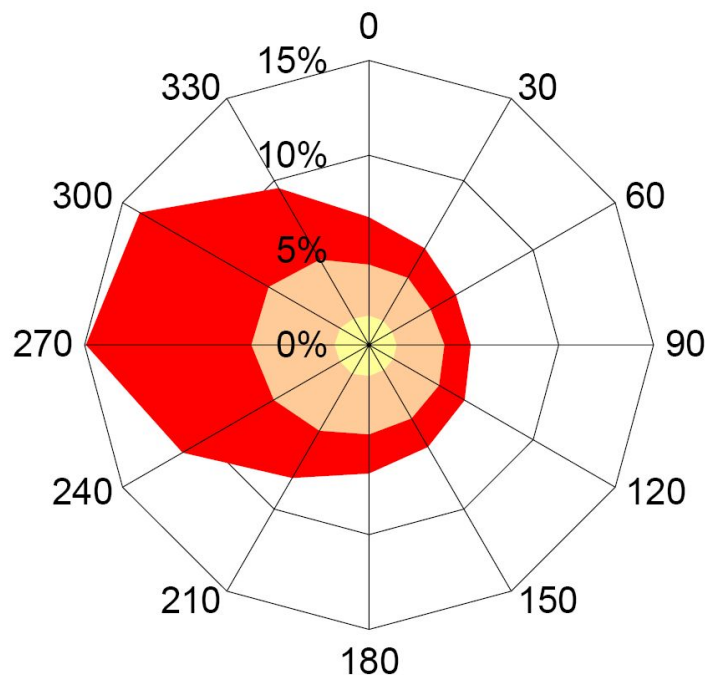
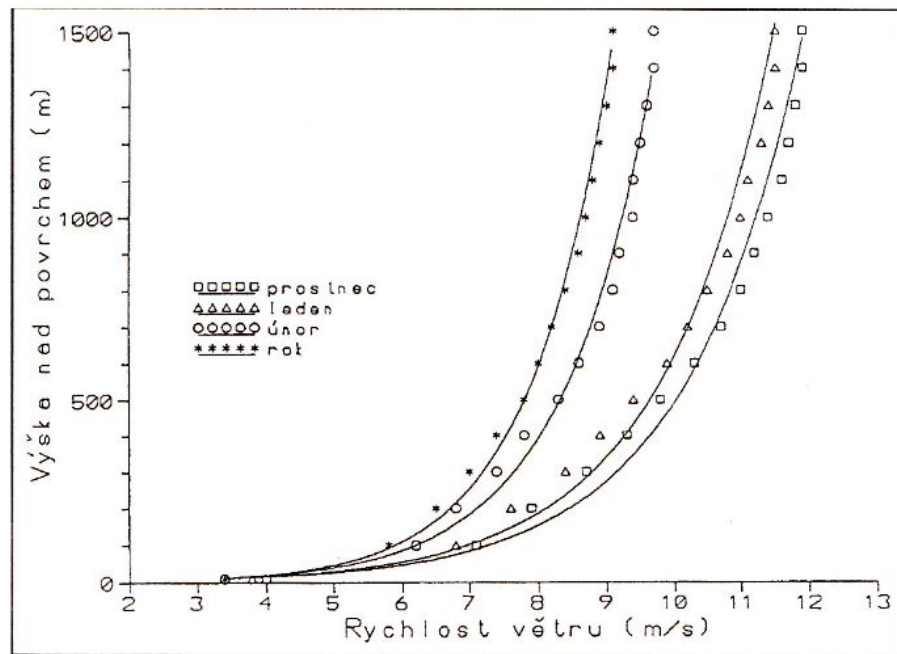
Přimda – Plzeňský – 742 m n. m. – 4,6 m/s – vrchol protáhlé hory.

Žinnwald – Sasko (SRN) – 882 m n. m. – 5,4 m/s – horská planina v blízkosti obce.



Roční průměry rychlosti větru v klimatických termínech na Milešovce (1905–2007)





Beaufortova stupnice

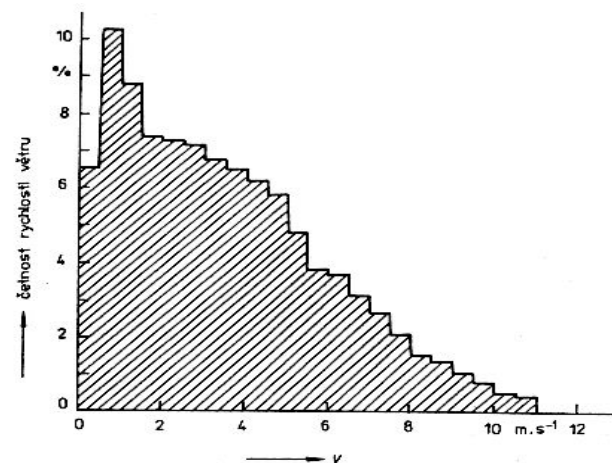
Rychlost od do (m.s ⁻¹)	Stupeň Beauforta	Označení sily větru	Projev v přírodě
0 0,2	0	bezvětrí	kouř stoupá kolmo
0,3 1,5	1	vánek	kouř stoupá podle větru, větrná směrovka se nepohne
1,6 3,3	2	slabý vítr	vítr je cítit na tváři, šelestí listů stromů, větrná směrovka se začne pohybovat
3,4 5,4	3	mírný vítr	listy a větvičky stromů se pohybují, pohybuje praporkem, slabě čeří hladinu stojaté vody
5,5 7,9	4	dost čerstvý vítr	pohybuje slabšími větvemi, zvedá prach a papíry, napíná praporek
8,0 10,7	5	čerstvý vítr	napíná větší prapory, pohybuje většími bezlistými větvemi, na stojatých vodách tvoří menší vlny, pro cit je již nepříjemný
10,8 13,8	6	silný vítr	pohybuje silnějšími větvemi a slabšími stromy, hučí v listnatých lesích, sviští dráty, použití deštníku je nesnadné, na vodě tvoří vlny s ojediněle zpěněnými vrcholky
13,9 17,1	7	prudký vítr	pohybuje bezlistými stromy střední tloušťky, vlny na stojaté vodě mají četné pěnivé vrcholky, chůze proti větru je namáhavá
17,2 20,7	8	bouřlivý vítr	vítr láme větve stromů, chůze proti větru značně obtížná, pohybuje silnějšími stromy
20,8 24,4	9	vichřice	působí menší škody na střechách, ulamuje bezlisté větve a menší stromy
24,5 28,4	10	silná vichřice	vyvrací stromy, působí škody na obydlích
28,5 32,6	11	mohutná vichřice	působí velké škody na domech i v lesích, poráží chodce
32,7 a více	12	orkán	ničivé účinky



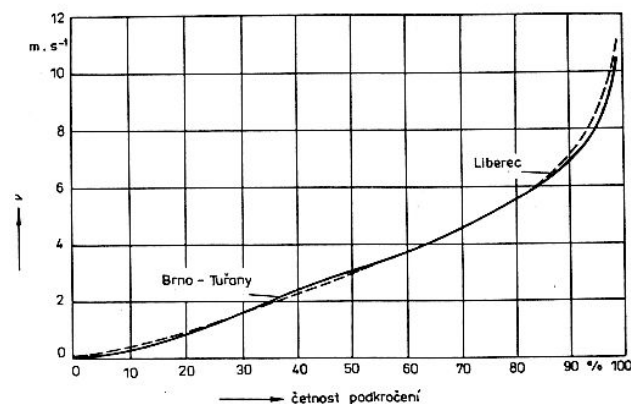
$v \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	1	2	3	4	5	6	7	8
$p_d \text{ (Pa)}$	0,6	2,3	5,2	9,2	14,4	20,7	28,2	36,8

$v \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	9	10	12	14	16	18	20
$p_d \text{ (Pa)}$	46,5	57,5	82,8	113	147	186	230

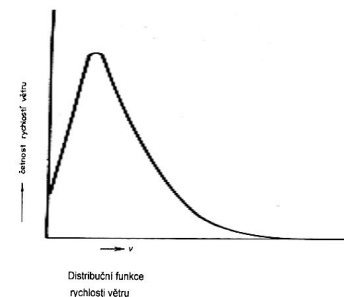
Měřené rychlosti větru (m.s^{-1})	Průměrná rychlost větru (m.s^{-1})						
	4	5	6	7	8	9	10
Do 0,5	4,2	2,8	1,96	1,48	1,17	0,95	0,74
1	13,7	9,7	7,2	5,06	4,54	3,42	2,85
2	17,6	13,7	10,6	8,55	7,10	5,93	5,13
3	16,5	14,3	11,9	9,9	8,4	7,1	6,3
4	13,9	13,1	11,6	11,0	8,85	7,75	6,9
5	10,6	10,8	10,6	9,8	8,8	8,0	7,2
6	7,5	8,9	9,25	8,9	8,45	7,65	7,1
7	5,36	7,2	7,75	8,0	7,7	7,4	6,85
8	3,76	5,48	6,4	6,85	6,85	6,85	6,5
9	2,62	4,0	5,13	5,9	6,05	6,28	6,15
10	1,7	3,0	4,1	5,5	5,4	5,6	5,6
11	1,1	2,3	3,2	4,0	4,7	5,0	5,13
12	0,57	1,6	2,5	3,2	3,9	4,35	4,56
13	0,4	1,14	1,9	2,6	3,3	3,78	4,1
14	0,23	0,68	1,6	2,16	2,7	3,2	3,65
15	0,19	0,45	1,14	1,7	2,3	2,74	3,2
16	0,11	0,34	0,8	1,42	1,9	2,3	2,74
17	-	0,25	0,68	1,14	1,6	2,0	2,4
18	-	0,15	0,45	0,85	1,4	1,71	2,06
19	-	0,11	0,34	0,66	1,13	1,48	1,71
20	-	-	0,23	0,41	0,85	1,25	1,48
21	-	-	0,20	0,31	0,68	0,97	1,25
22	-	-	0,17	0,25	0,57	0,85	1,14
23	-	-	0,11	0,19	0,4	0,68	0,91
24	-	-	0,05	0,17	0,28	0,57	0,80
25	-	-	-	0,11	0,25	0,45	0,68
26	-	-	-	0,07	0,20	0,40	0,57
27	-	-	-	0,04	0,17	0,34	0,45
28	-	-	-	-	0,14	0,25	0,36
29	-	-	-	-	0,11	0,20	0,32
30	-	-	-	-	-	0,14	0,25



Četnost rychlostí větru na meteorologické stanici



Integrální vyjádření distribuční funkce větru pro dvě meteorologické stanice v
Liberci a v Brně - Tuřanech pro přibližně stejné střední rychlosti větru

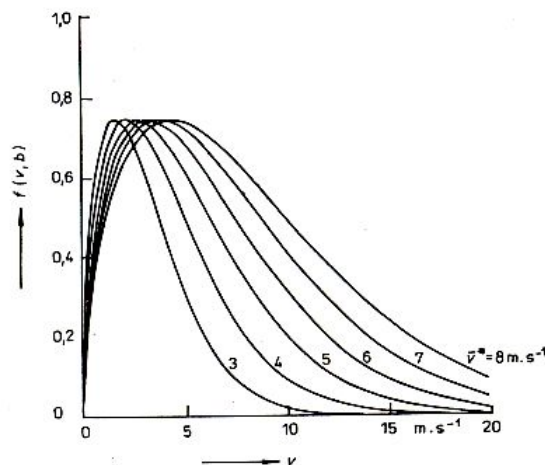


Weibullovo rozdělení

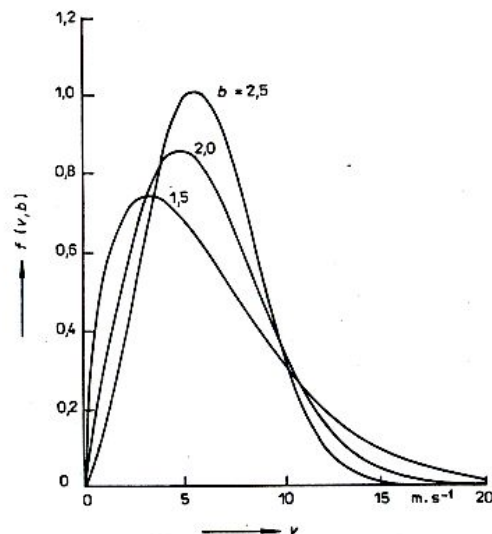
$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right]$$

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right]$$

$$v^* = 0,88a$$

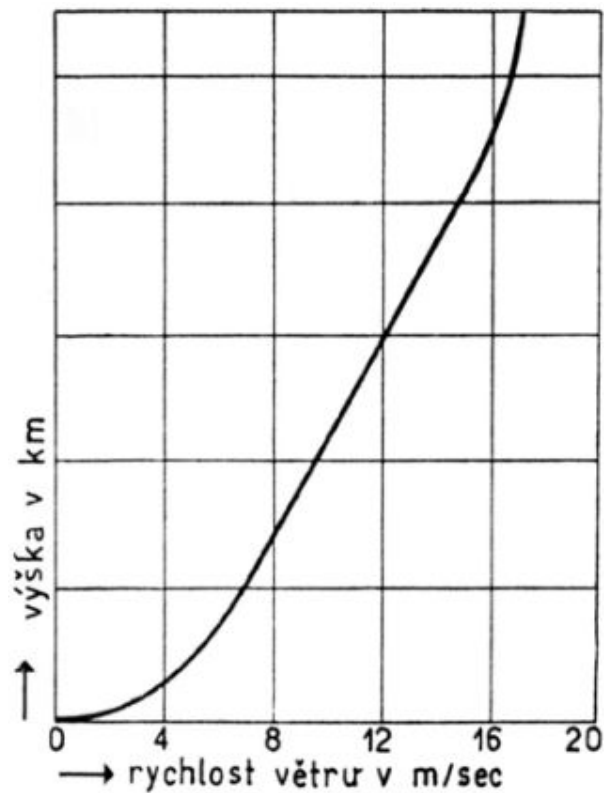


Ukázka náhradních distribučních funkcí podle Weibullova rozdělení pro střední rychlosti větru od 3 do 8 m.s^{-1} s tvarovým součinitelem $b = 1,5$



Vliv tvarového součinitele b na distribuční charakteristiku pro střední rychlosti větru 6 m.s^{-1}

$$v(z) = \frac{v_*}{\chi} \ln \frac{z + z_0}{z_0}$$

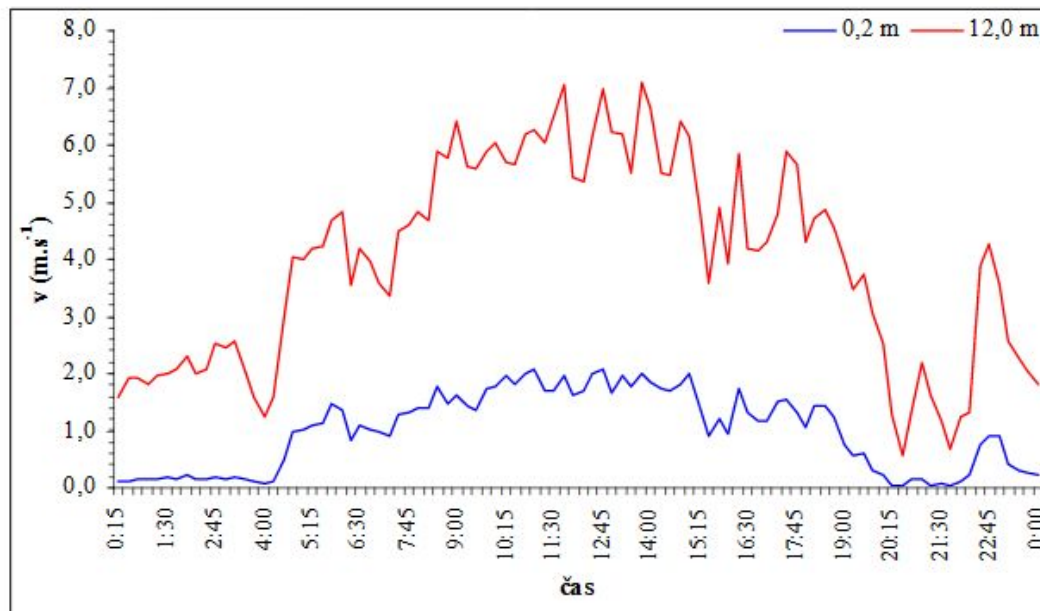


$$\frac{v_*}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^n$$

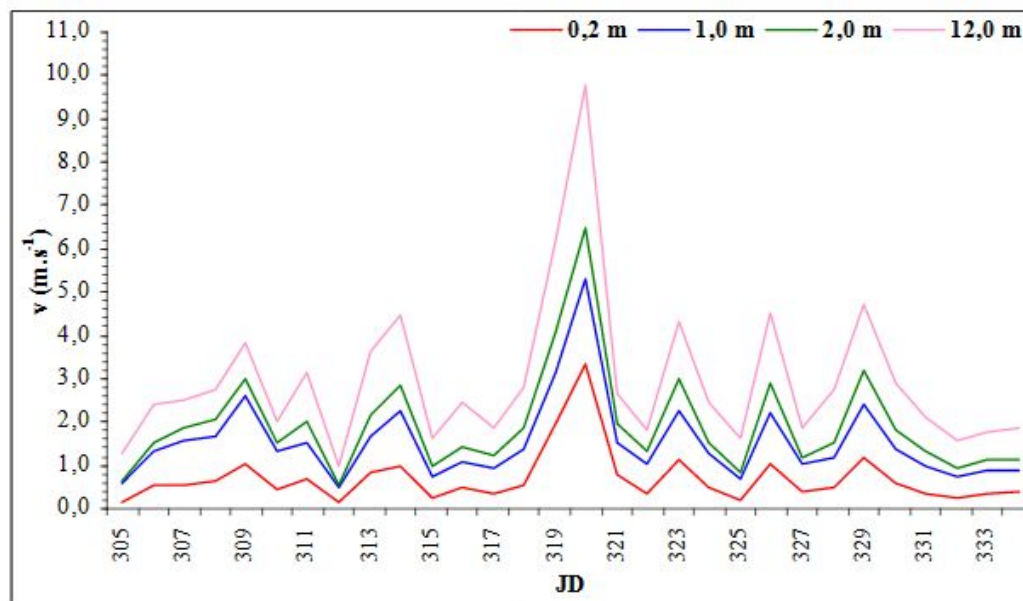
Druh povrchu	<i>n</i>
<i>a</i> - hladký povrch - vodní hladina, písek	0,14
<i>b</i> - louka s nízkým travnatým porostem nebo oranice	0,16
<i>c</i> - vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
<i>d</i> - porosty vysokých kulturních plodin, nízké lesní	0,21
<i>e</i> - lesy s mnoha stromy	0,28
<i>f</i> - vesnice a malá města	0,48

$$v_h^* = k_h v_{10}^*$$

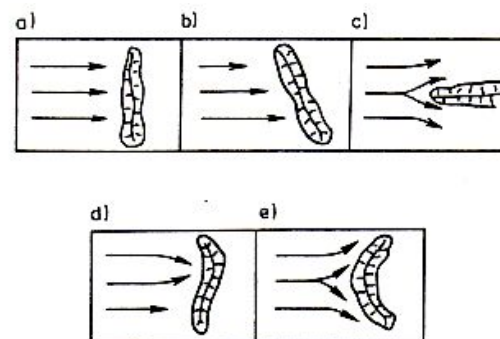
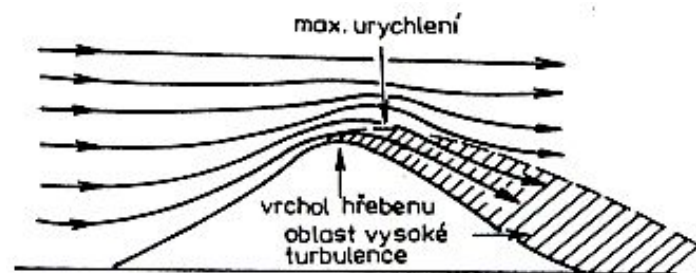
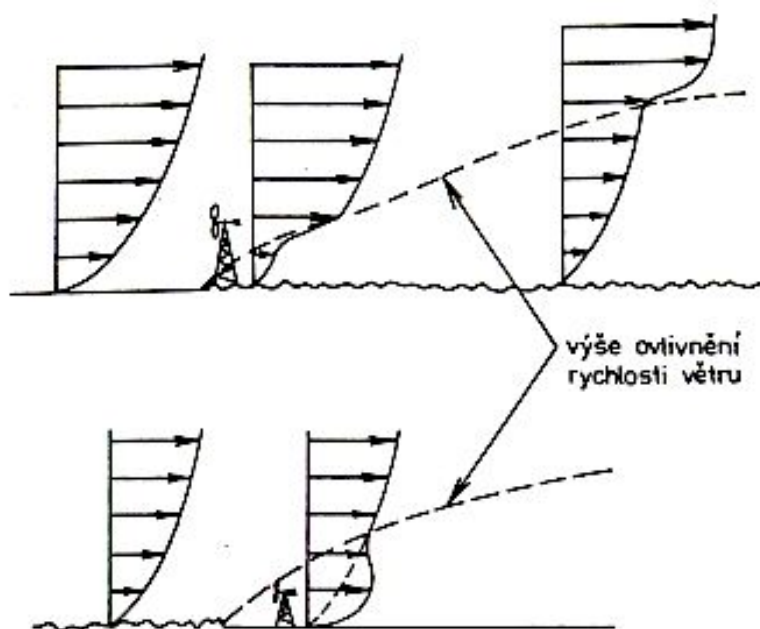
Druh povrchu	Výška <i>h</i> (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
<i>a</i>	0,91	1,00	1,06	1,10	1,14	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
<i>b</i>	0,90	1,00	1,07	1,12	1,16	1,19	1,22	1,25	1,27	1,29
<i>c</i>	0,88	1,00	1,08	1,13	1,18	1,22	1,25	1,28	1,31	1,34
<i>d</i>	0,86	1,00	1,09	1,16	1,21	1,26	1,30	1,34	1,37	1,40
<i>e</i>	0,82	1,00	1,12	1,21	1,29	1,36	1,42	1,47	1,52	1,57
<i>f</i>	0,72	1,00	1,21	1,39	1,55	1,69	1,82	1,95	2,06	2,17



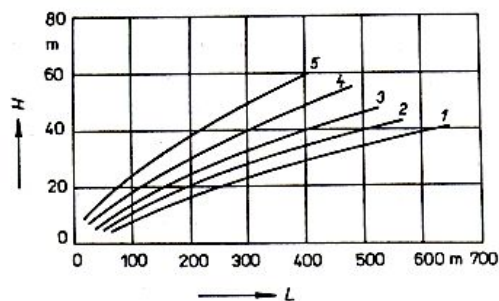
Čtvrthodinové průměry rychlosti větru ve dvou výškách - 0,2 m a 12,0 m (96 JD).



Průměrné denní rychlosti větru ve čtyřech výškách (0,2 m, 1,0 m, 2,0 m a 12,0 m).



Vliv orientace hřebenu k převládajícímu směru větru a jeho tvaru na vhodnost umístění větrného motoru. Orientace hřebenu: a) kolmá - nejlepší; b) šikmá - dobrá; c) rovnoběžná - vyhovující. Tvar hřebenu: d) vydutý - dobrý; e) vypuklý - horší.



Graf pro stanovení přechodové výšky H v závislosti na vzdálenosti od změny kvality povrchu L

Energie a výkon větru

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

$$m = \rho V = \rho A s$$

$$P_v = \frac{E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho \frac{A s}{\Delta t} v^2$$

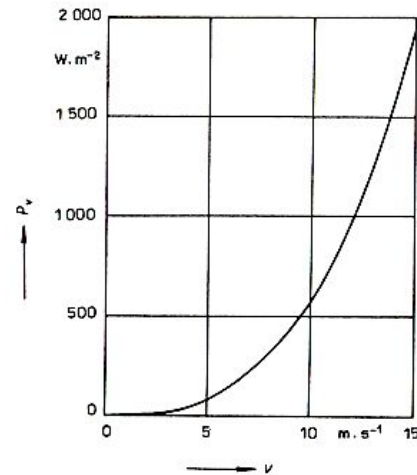
$$P_v = \frac{1}{2} \rho v^3$$

$$\rho = \frac{p_b}{rT}$$

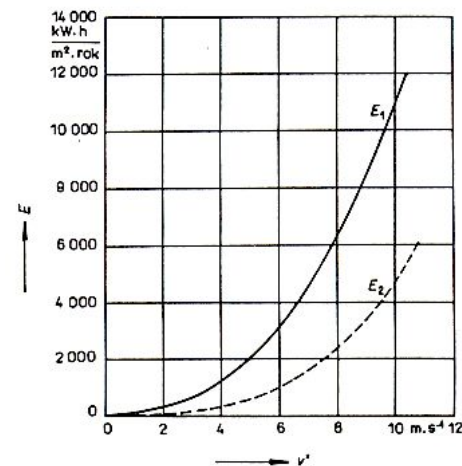
$$p_{b(h)} = p_{b(0)} \cdot (1 - 0,118358 \cdot 10^{-3} h + 0,5291 \cdot 10^{-8} h^2)$$

$$E_v = \int_{t_0}^t P_v \cdot dt$$

$$E_v = \sum_0^i E_i = \frac{1}{2} \sum_0^i \rho_i v_i^3 \Delta t_i$$



Závislost výkonu větru (P_v) protékajícího plochou 1 m^2 na jeho rychlosti v



Přibližná závislost roční energie větru E_1 protékajícího plochou 1 m^2 na jeho průměrné rychlosti v' , E_2 - roční energie větru vypočtená za předpokladu, že by celý rok vál průměrnou rychlostí

Možnosti využití energie větru

- pohyb

- plachta
- magnusův jev



- mechanický pohon

- mlýn
- lisy
- papírný, výroba plsti



- čerpadlo vody



- elektrárna

