



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VĚTRNÝ POTENCIÁL V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY V NIŽŠÍCH VRSTVÁCH ATMOSFÉRY

WIND POTENTIAL IN THE CONDITIONS OF THE CZECH REPUBLIC IN THE LOWER ATMOSPHERE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Sedláček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub

Linda

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jakub Sedláček**
Studijní program: Energetika
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Linda**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Větrný potenciál v podmínkách České republiky v nižších vrstvách atmosféry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využívání obnovitelných zdrojů energie je v dnešní době populární. Jednou z dominantních oblastí je větrná energie. Prvním krokem při výstavbě větrné elektrárny je určení větrného potenciálu lokality. Ve většině případů se jedná o dlouhodobá a nákladná měření. Alternativou je použití simulačních nástrojů. Existuje několik nástrojů pro stanovení tohoto potenciálu (většinou online kalkulačky). Cílem této práce bude porovnat simulační nástroj s vypočtenými hodnotami větrného potenciálu v místě, kde jsou k dispozici dlouhodobá měření v nejnižších vrstvách atmosféry (data ČHMU). Práce se zaměří na spodní vrstvy atmosféry, protože se již několikrát ukázalo, že velmi velké větrné elektrárny nejsou v podmínkách České republiky realizovatelné, a to především kvůli záběru půdy.

Cíle bakalářské práce:

1. Prieskum dostupných metód určovania veterného potenciálu v ČR
2. Spracovanie dát dlhodobého merania v určenej lokalite (stanica ČHMU)
3. Porovnanie vypočítaných hodnôt voči dostupným simulačným nástrojom

Seznam doporučené literatury:

HAU, Erich, Wind Turbines – fundamentals, technologies, Applications, Economics, 2006. 2. vydání. Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN – 10-3-540-24240-6.

CROME, Horst. Technika využití energie větru, 2002. Ostrava: HEL, ISBN 80-86167-19-4.

ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru, Transformační technologie, 2006-10, [last updated 2020-10-23]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/04.html>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce se zabývá online simulačními nástroji větrného potenciálu, konkrétně přesností jejich odhadu skrze Weibullovu křivku. Pro porovnání jsou využita data z měřících stanic, která výhradně zaměřena na nižší vrstvy atmosféry. První část práce osvětluje problematiku větru, jeho charakteristik a další důležité pojmy pro bližší porozumění tématu. Následující část je věnována větrným mapám a modelům, užívaných k jejich konstrukci. V poslední části jsou simulační nástroje porovnány se skutečnými naměřenými daty a je vyhodnocena jejich přesnost. Na základě této přesnosti je na závěr posouzen výsledek této práce.

Klíčová slova

Větrný potenciál, větrná mapa, nižší vrstvy atmosféry, Weibullova funkce

ABSTRACT

The presented bachelor thesis deals with online wind potential simulation tools, specifically the accuracy of their estimation through Weibull curves. For comparison, data from measuring stations exclusively focused on the lower atmosphere are used. The first part of the paper explains the wind, its characteristics and other important concepts for a better understanding of the topic. The following part is devoted to wind maps and models used for their construction. In the last part, the simulation tools are compared with actual measured data and their accuracy is evaluated. Based on this accuracy, the result of this work is finally assessed.

Key words

Wind potential, wind map, lower layers of atmosphere, Weibull function

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEDLÁČEK, Jakub. *Větrný potenciál v podmínkách České republiky v nižších vrstvách atmosféry*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157630>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jakub Linda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Větrný potenciál v podmínkách České republiky v nižších vrstvách atmosféry vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jakobovi Lindovi za ochotu, shovívavost, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Děkuji rovněž Českému hydrometeorologickému ústavu za poskytnutí větroměrných dat.

OBSAH

ÚVOD.....	1
1 Vítr.....	2
1.1 Vznik větru	2
1.2 Charakteristika větru.....	2
1.2.1 Rychlost větru	3
1.2.2 Četnost rychlostí větru	4
1.2.3 Směr větru	5
1.3 Vlivy na proudění vzduchu.....	6
2 Větrné mapy	8
2.1 Konstrukce větrných map	8
2.2 Mikroměřítkové metody a modely.....	8
2.2.1 Metoda VAS.....	8
2.2.2 Model WAsP	9
2.2.3 Model VAS/WAsP.....	10
2.3 Mezoměřítkové modely	13
2.3.1 Model PIAP.....	13
2.4 Kombinace modelů VAS/WAsP a PIAP	14
2.5 Kombinace modelů WasP a WRF	15
2.6 Přesnost větrných map	16
2.7 Určení Weibullovy funkce.....	16
3 Větrný potenciál	17
3.1 Výběr lokalit	17
3.2 Zpracování dat	19
3.2.1 Měřicí stanice Košetice	19
3.2.2 Měřicí stanice Dukovany	21
3.3 Porovnání dat	23
3.3.1 New European Wind Atlas (NEWA).....	23
3.3.2 Větrné podmínky ve výšce 10 metrů.....	31
3.4 Vyhodnocení a poznatky	33
ZÁVĚR.....	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	36
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	38
SEZNAM OBRÁZKŮ	39
SEZNAM TABULEK	40

ÚVOD

Obnovitelné zdroje jsou v posledních letech stále na vzestupu. Tomu však není divu, jelikož vlivem globálního oteplování je snaha snižovat emise skleníkových plynů, které stojí za celým problémem. Větrná energie je jedním z těchto zdrojů a představuje významný potenciál pro výrobu relativně čisté elektrické energie. Návrh výstavby větrných elektráren však vyžaduje stanovení větrného potenciálu pro určení vhodnosti lokality. Tyto identifikace vyžadují nákladných dlouhodobých měření v konkrétních oblastech, a jako alternativa tak byly vyvinuty simulační nástroje, tzv. online větrné mapy, jejichž úkolem je poskytnout rychlé a efektivní odhady větrného potenciálu libovolné lokality.

Práce tedy osvětlí základní problematiku větru a jeho charakteristiky pro určení větrného potenciálu, dále přiblíží metodiku konstrukce větrných map, a nakonec vyhodnotí přesnost odhadů online modelových nástrojů porovnáním větroměrných dat, které tyto nástroje poskytují s daty zjištěnými měřicími stanicemi Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ).

Samotné posouzení bude zaměřeno na nižší vrstvy atmosféry, jelikož se již ukázalo, že potenciál velmi velkých větrných elektráren je v podmínkách České republiky již relativně naplněn, zatímco potenciál nižších vrstev atmosféry nebyl dosud dostatečně probádán.

1 Vítr

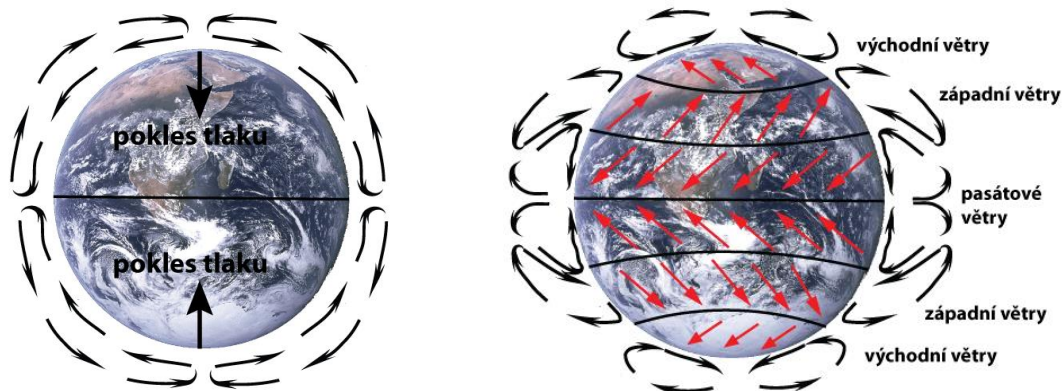
Pro uvedení do tématu větru a lepší pochopení všech termínů a spojitostí v následujících částech práce, představí tato kapitola všechny podstatné pojmy a oblasti potřebné pro určení větrného potenciálu lokality.

Konkrétně tedy kapitola objasní základy znalostí vzniku, charakteristik a proudění větru.

1.1 Vznik větru

Samotný počátek má vítr ve slunečním záření jehož 2,5 % energie se přemění právě na pohybovou energii větru. [1] Tohoto faktu je docíleno nerovnoměrným ohříváním povrchu Země, kvůli kterému vznikají místa s rozdílnými hustotami, a tedy i rozdílnými tlaky, vzduchu. Vlivem rozdílů tlaků následně vzniká síla tlakového gradientu, která se snaží tyto rozdíly vyrovnat. [2] Vzduch se tedy začne přesouvat z míst o tlaku nižším do míst o tlaku vyšším. Když vzduch přejde do pohybu, začne na něj, vlivem rotace Země, působit odstředivá a Coriolisova síla, a dochází tak k proudění vzduchu. Toto proudění vzduchu nazýváme vítr. [3]

Vzhledem k tomu, že sluneční záření dopadá na Zemi neustále, dochází k nepřetržitému proudění vzduchu neboli k tzv. planetární cirkulaci vzduchu. Cirkulaci charakterizují tlaková pásma, která současně s Coriolisovou silou určují směry proudění vzduchu v globálním měřítku. V oblasti rovníku, vlivem nejnižšího tlaku a nejvyššího ohřívání, stoupá vzduch nahoru do vyšších vrstev atmosféry, kde se následně stáčí směrem k pólům, kde je tlak naopak vyšší. Kvůli poklesu tlaku v nižších vrstvách atmosféry pak klesá vzduch zpátky dolů a stáčí se zpět k rovníku. Tuto elementární cirkulaci, viditelnou na Obr. 1 vlevo, však dále komplikuje rotace Země, která vlivem Coriolisovy síly proudění odkloňuje a z jednoho prostého systému vytváří několik na sobě závislých podsystemů proudění vzduchu, vizualizovaných na Obr. 1 vpravo. [4]



Obr. 1 Elementární planetární cirkulace vzduchu (vlevo), Skutečná planetární cirkulace (vpravo). [4]

1.2 Charakteristika větru

Pro získání úplného přehledu o povětrnostních podmínkách, a tedy větrném potenciálu, dané lokality je potřeba znát patřičné charakteristiky větru. Těmito charakteristikami jsou rychlost, četnost rychlostí a směr větru.

1.2.1 Rychlost větru

Tak jako vznik větru, i jeho rychlost je závislá na nerovnoměrném ohřevu povrchu Země. V závislosti na tom, jak se různá místa na Zemi různě ohřívají, se také rychlost větru mění. Můžeme tedy pozorovat změny i na denní bázi, kdy dopolední vítr zpravidla zesiluje a k večeru zase ustává. [5]

Dalším vlivem, který má dopad na změnu rychlosti větru je vzdálenost od povrchu Země. S klesající nadmořskou výškou se vítr dostává do kontaktu s povrchem Země, který jeho rychlost vlivem drsnosti a členitosti snižuje prostřednictvím tření a turbulencí. [6] Ve speciálních případech nemusí překážky vítr pouze zpomalovat, jelikož v případech, kdy vítr prochází různými průsmyky, údolními, kotlinami či vhodně se zužujícími prostory mezi budovami, může docházet k tzv. dýzovému efektu, který rychlost větru naopak zvýší. [3] Tyto vlivy mají za následek neustálé změny rychlosti větru v závislosti na čase, jinak řečeno turbulence.

Zpracování rychlosti větru existuje spousta, avšak pro energetické účely rozlišujeme dvě hlavní. První metodou je zjištění rychlosti větru pro výpočet výkonu větrné elektrárny. V tomto případě je zapotřebí výpočtu skrze efektivní rychlost větru po částech, jelikož výkon je závislý na třetí mocnině rychlosti, což by v případě užití průměrné rychlosti způsobilo významné nepřesnosti. Druhou, pro tuto práci podstatnější, metodou je zjištění rychlosti větru pro určení průměrných rychlostí větru konkrétních oblastí v jistém časovém intervalu a následné vyobrazení větrného potenciálu lokality příslušnými křivkami. Tento způsob umožňuje použití průměrných rychlostí větru, které se pomocí distribuční funkce vynesou do grafické závislosti četnosti rychlostí větru, znázorněné na Obr. 2, pomocí které je následně vyhodnocen větrný potenciál lokality. [1]

Pro obě zmíněné metody zjištění rychlosti větru je třeba dlouhodobého měření. Pro pouhé přibližné určení však existuje i mezinárodně akceptovaná stupnice odhadu rychlosti v závislosti na projevu větru, tzv. Beaufortova stupnice účinků větru, reprezentována Tab. 1. [7]

Tab. 1 Beaufortova stupnice účinků větru; upraveno. [7]

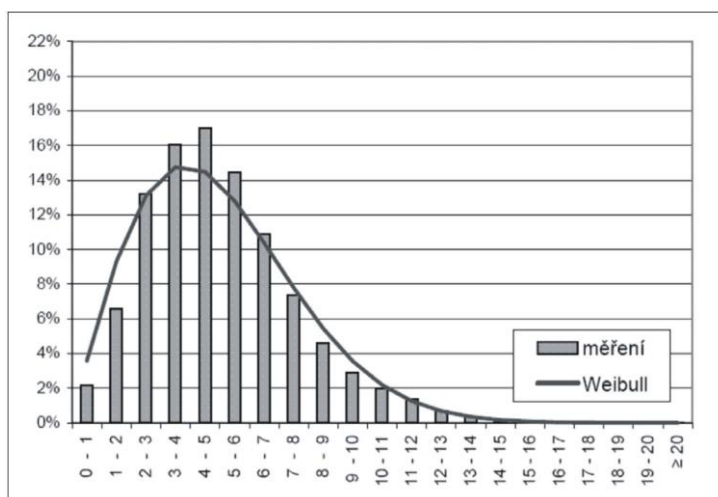
stupeň	označení	příznak	rychlost [m/s]
0	bezvětří	kouř stoupá kolmo	0-1
1	vánek	pohyb kouře	1-2
2	větrík	šelestění listů	2-4
3	slabý vítr	pohyb větviček	4-6
4	mírný vítr	zdvihá se prach	6-8
5	čerstvý vítr	ohýbají se keře	8-10
6	silný vítr	ohýbá větší větve	10-12
7	prudký vítr	ohýbá stromy	12-14
8	bouřlivý vítr	ulamuje větve	14-17
9	vichřice	strhává tašky, láme slabší stromy	17-20
10	silná vichřice	vyvrací stromy, strhává střechy	20-24
11	mohutná vichřice	působí rozsáhlé škody	24-30
12	orkán	ničivé účinky	přes 30

1.2.2 Četnost rychlostí větru

Větrný potenciál lokality nestojí pouze na rychlostech větru, ale taky na jejich četnostech, které hovoří o jejich časovém výskytu. Aby však bylo možné tyto pojmy propojit, je třeba naměřené hodnoty rychlostí větru vynést do grafických závislostí.

Každé proudění má turbulentní charakter, proto se okamžitá rychlost v čase mění. V meteorologii se, z důvodu setrvačnosti měřících přístrojů, ale okamžité hodnoty rychlosti nevyužívají. Naměřenými hodnotami rychlostí větru jsou tak myšleny střední hodnoty rychlostí větru za určitý časový interval, který bývá pro tato dlouhodobá měření v rámci jednotek až desítek minut. [5]

Závislosti středních hodnot rychlostí na jejich četnosti lze vynést do sloupcových grafů. Ty však nejsou v podobě matematických závislostí, a právě proto je místo elementárních matematických rozdělení využíváno rozdělení teoretických. Nejlépe reprezentujícím teoretickým rozdělením pro pravděpodobnost výskytu rychlostí je rozdělení Weibullovo, resp. jeho distribuční funkce. Aby bylo tedy možné nahradit sloupcové grafy Weibullovou funkcí, jak lze vidět na Obr. 2, je pro výstižný výsledek zapotřebí použít široký datový soubor měření středních rychlostí větru, většinou o délce alespoň jednoho roku. [8]

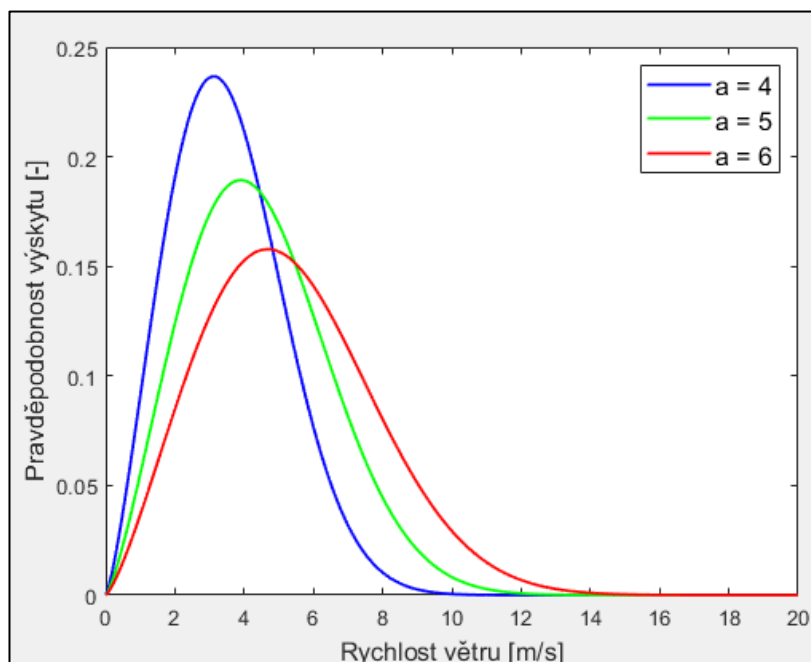


Obr. 2 Weibullovo rozdělení. [8]

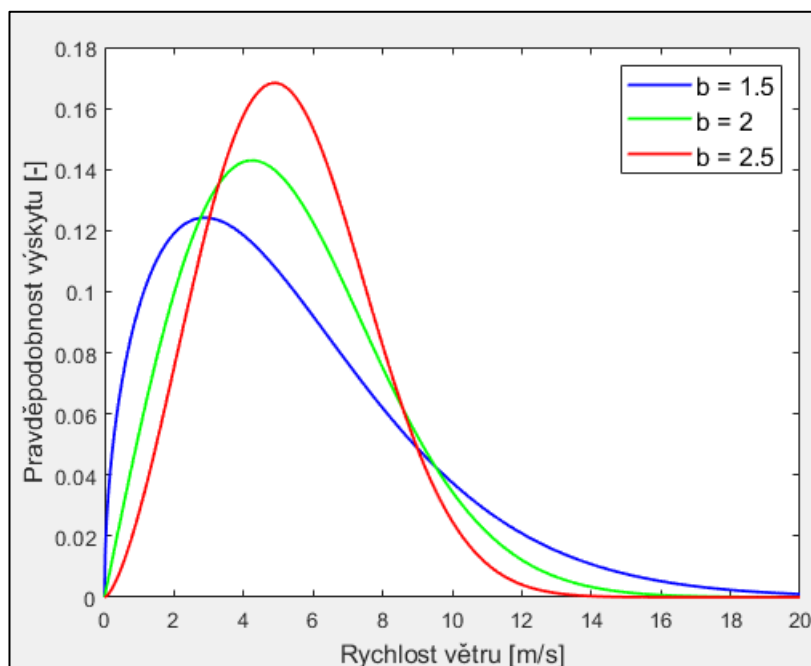
Jak je ze vzorce 1.1 patrné, Weibullova funkce je definována dvěma parametry, „a“ a „b“, které mohou nabývat různých hodnot nezávisle na sobě. Na základě těchto hodnot se mění tvar a poloha křivky. Parametr „a“ úzce souvisí se střední hodnotou rychlosti větru, jak ukazuje možný odhad parametru pomocí vzorce 1.2. Parametr „b“ je spjat s hodnotou drsnosti povrchu, jeho velikost však již takto primitivně odhadnout nelze. Se zvyšující se hodnotou obou parametrů se křivka posouvá doprava neboli k vyšší rychlostem, což tedy značí větší větrnost oblasti. Mimo posuvy vpravo se zároveň se zvýšením hodnoty parametru „a“ také posouvá maximum dolů, čímž rozšiřuje, resp. zvětšuje tak plochu pod křivkou, zatímco zvýšení hodnoty parametru „b“ posouvá maximum nahoru a zužuje, resp. zmenšuje tak plochu pod křivkou. Tyto závislosti změny tvaru a polohy křivky lze pozorovat na Obr. 3 a Obr. 4. Dle parametru „b“ lze rovněž rozlišit dva speciální typy Weibullova rozdělení. Když $b = 1$, jedná se o rozdělení exponenciální a v případě $b = 2$ mluvíme o rozdělení Rayleighově. [9]

$$f(x; b, a) = \frac{b \cdot x^{b-1}}{a} \cdot \exp \left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b \right] \quad (1.1)$$

$$\bar{v} \approx 0,88 \cdot a \quad (1.2)$$



Obr. 3 Změna parametru „a“ při konstantní hodnotě parametru „b = 2.3.“



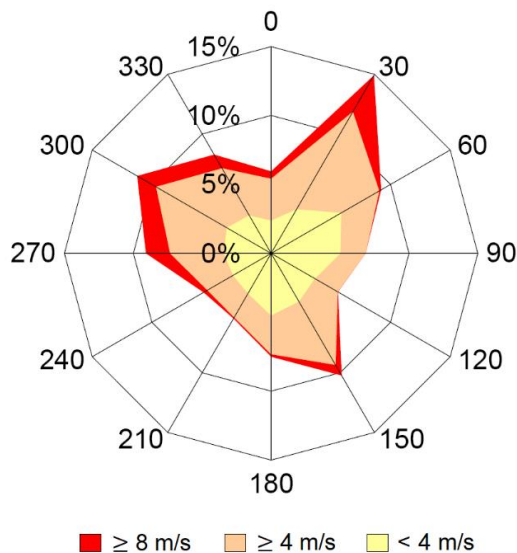
Obr. 4 Změna parametru „b“ při konstantní hodnotě parametru „a = 6.“

1.2.3 Směr větru

Rychlost větru je vektorová veličina a není tedy definována pouze svou hodnotou, ale také svým směrem, který je velmi podstatný z hlediska překážek a členitosti zemského povrchu.

Současně s rychlostí větru a četností rychlostí větru plně definuje větrný potenciál konkrétní lokality, a pro nejlepší přehlednost se všechny tyto charakteristiky vynášejí do tzv. větrných růžic.

Základem růžice je kříž znázorňující směry světových stran, který je pro větší variabilitu směrů rozpočítán do 360°. Podklad větrné růžice následně doplňuje závislost četnosti rychlostí, dokreslující zbytek pavučiny. Na tento poklad jsou již jen vyneseny střední hodnoty rychlostí větru, za určitý interval, v závislosti na jejich četnosti a dominantním směru, odkud vanou. [1] Výslednou větrnou růžici reprezentuje Obr. 5, která je typická konkrétně pro oblast jihovýchodní Moravy, Dražanské vrchoviny a podhůří Orlických hor. [9]

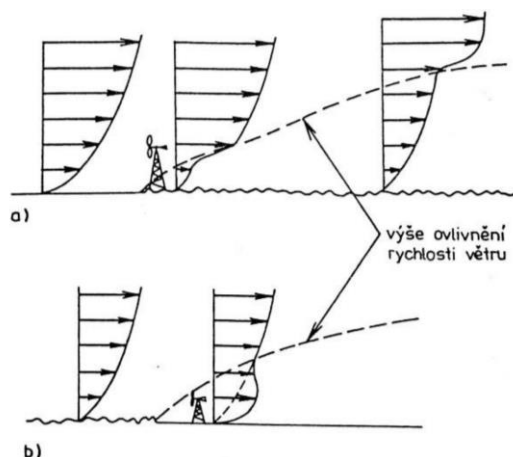


Obr. 5 Větrná růžice; upraveno. [9]

1.3 Vlivy na proudění vzduchu

Jak bylo již zmíněno v podkapitole 1.1, proudění vzduchu je primárně ovlivněno slunečním zářením, rotací Země a tlakovými pásmy. V nižších vrstvách atmosféry však rozlišujeme i vlivy místní a proudění vzduchu tak začíná být významně ovlivňováno dalšími vlivy, jako je vzdálenost od povrchu Země, jeho drsnost a členitost či překážky.

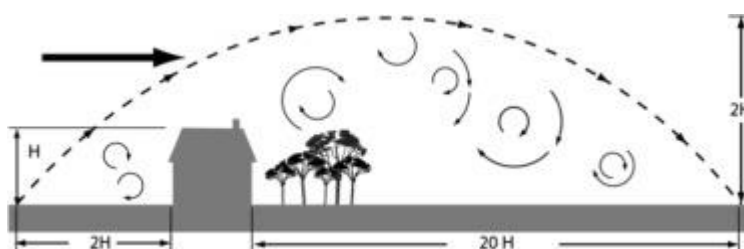
Pokud se tedy jedná o změny rychlosti větru v nižších vrstvách atmosféry, začíná být velmi podstatný rychlostní profil větru, konkrétně ten vertikální, jelikož právě na něm lze nejlépe pozorovat postupnou změnu v závislosti na vzdálenosti od povrchu, jak ukazuje Obr. 6. [10]



Obr. 6 Změna rychlostního profilu větru v závislosti na drsnosti povrchu:
a) změna z hladkého na drsný, b) změna z drsného na hladký. [10]

Vlivem klesající vzdálenosti od zemského povrchu tedy narůstá vliv drsnosti povrchu, v jehož důsledku začíná být třecí síla mezi vrstvami vzdušné hmoty významná, a snižuje se tak rychlost větru. Pro vhodný větrný potenciál je tedy prvně snaha dostat se co nejvýše, pokud je však nízká část atmosféry pevně dána, lze větrný potenciál ovlivnit pouze volbou lokality.

Jedním ze dvou faktorů je dostatečně velká vzdálenost od jakýchkoliv větších překážek, které vlivem turbulencí, viditelných na Obr. 7, způsobují nerovnoměrnost rychlostí větru, což není pro větrné stroje obecně možné zpracovat. [11]



Obr. 7 Vznik turbulencí vlivem překážek. [11]

Druhým faktorem je následně míra drsnosti povrchu, jelikož s rostoucí drsností povrchu roste také vliv tření, a tedy i ztráty rychlosti větru. Přibližné určení drsnosti zemského povrchu se provádí pomocí exponentu n , jež nabývá hodnot dle Tab. 2. [10]

Tab. 2 Hodnoty exponentu n dle typu povrchu; upraveno. [10]

typ povrchu	n
uhlazený povrch, vodní hladina	0.14
louka, nízké traviny	0.16
vysoká tráva, nízké plodiny	0.18
řídké lesy, porosty vysokých plodin	0.21
husté lesy	0.28
vesnice, malá města	0.48

Jak udává rovnice 1.3, lze pomocí tohoto exponentu následně aproximovat změnu rychlosti větru v závislosti na vzdálenosti od povrchu Země. [10] Je ovšem nutno konstatovat, že typ vyhodnocení drsnosti povrchu dle Tab. 2 a platnost rovnice 1.3 náleží vertikálnímu profilu exponenciálnímu. Lze totiž rozlišit i další hojně využívaný druh vertikálního profilu, kterým je profil logaritmický, který umožňuje promítnout více faktorů drsnosti povrchu. Nelze jej však použít pro všechny formy povětrnostních podmínek, a proto je častěji aplikovaným modelem vertikální profil exponenciální. [11]

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (1.3)$$

2 Větrné mapy

Větrné mapy představují velmi užitečné nástroje pro širokou škálu uživatelů, jelikož právě s jejich pomocí jsme schopni efektivně a rychle získat přibližný přehled o větrném potenciálu libovolné lokality.

Větrných map v dnešní době existuje již spousta, ne každá však umožňuje vyobrazení větrného potenciálu (vyhodnocení větrných charakteristik) České republiky v plné míře. V souladu s tímto faktem byly zvoleny 2 konkrétní větrné mapy, které splňují funkci vyobrazení nejlépe.

Typickými představiteli jsou „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny“ [12] a „New European Wind Atlas.“ [13]

2.1 Konstrukce větrných map

Konstrukce větrných map se provádí pomocí různých metod a modelů, které můžeme rozlišit na dva základní typy: mezoměřítkové a mikroměřítkové.

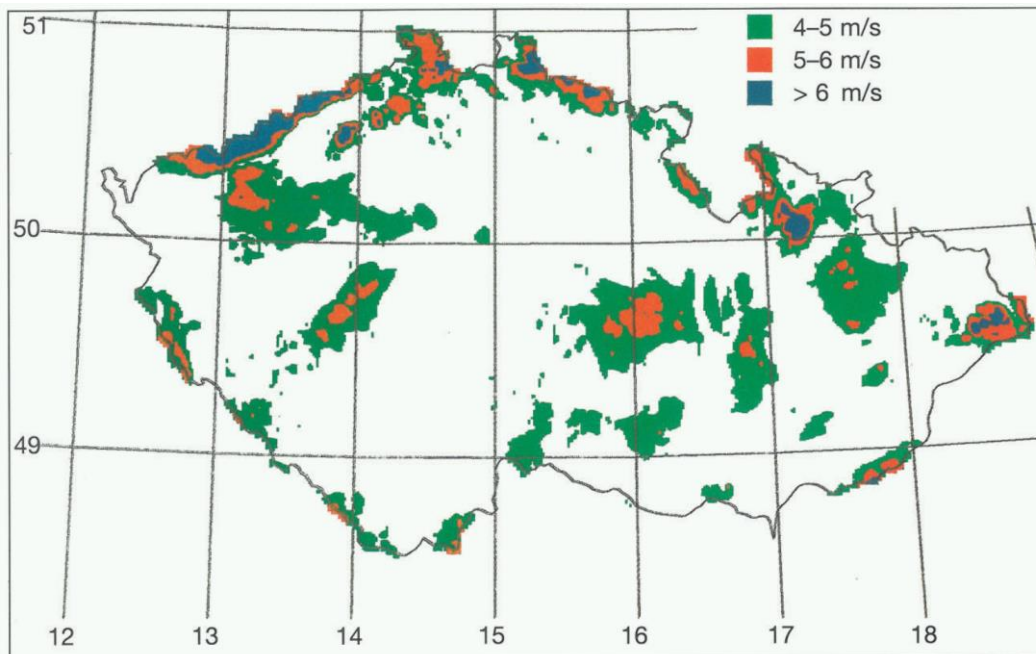
Každá z větrných map, zmíněných v úvodu kapitoly, využila pro svou konstrukci jiné metody a modely, o kterých budu v této kapitole pojednávat.

2.2 Mikroměřítkové metody a modely

Jedná se o metody a modely zohledňující primárně vlivy místní (lokální topografie, překážky), čímž jsou schopny dosáhnout vysokých prostorových rozlišení velmi rychlým výpočtem na základě mnoha zjednodušení. Právě do této kategorie se řadí metoda VAS a modely WAsP a VAS/WAsP, použité pro konstrukci větrných map, zmíněných v úvodu kapitoly. [14]

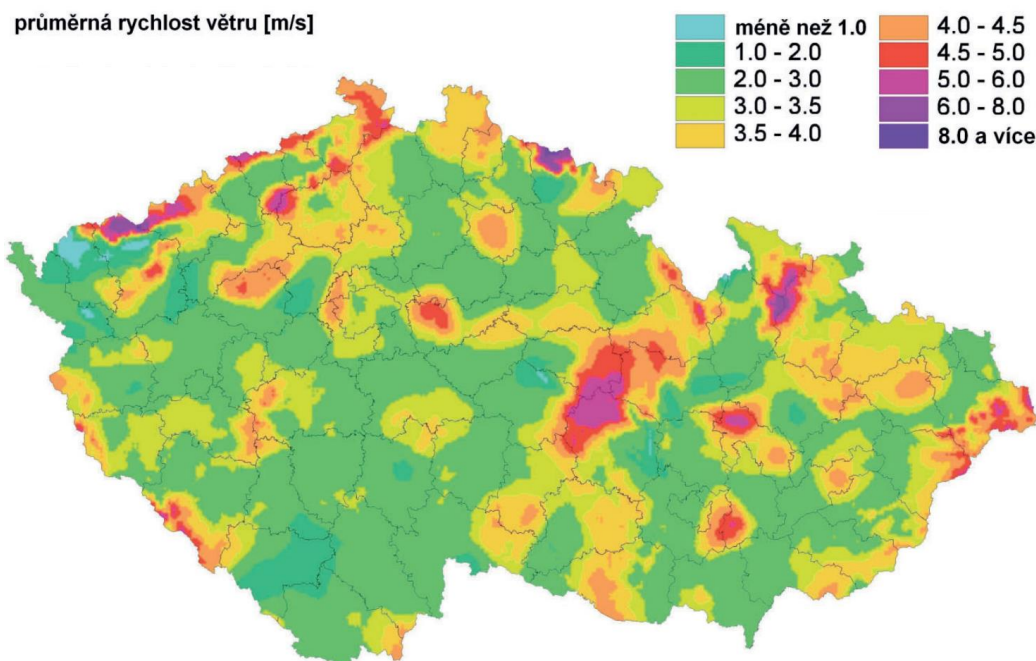
2.2.1 Metoda VAS

Tuto statickou metodu vyvinul Ústav fyziky atmosféry AV ČR, pomocí níž byla sestrojena první větrná mapa u nás (1993).



Obr. 8 První větrná mapa České republiky (model VAS 1 v 10 m nad povrchem). [15]

Metoda je založena na trojrozměrné interpolaci průměrných hodnot z měření rychlostí větru, do uzlových bodů pokrývajících celou plochu ČR, za předpokladu, že vliv orografie, drsnost terénu apod. jsou již zahrnuty v naměřených datech. [16]



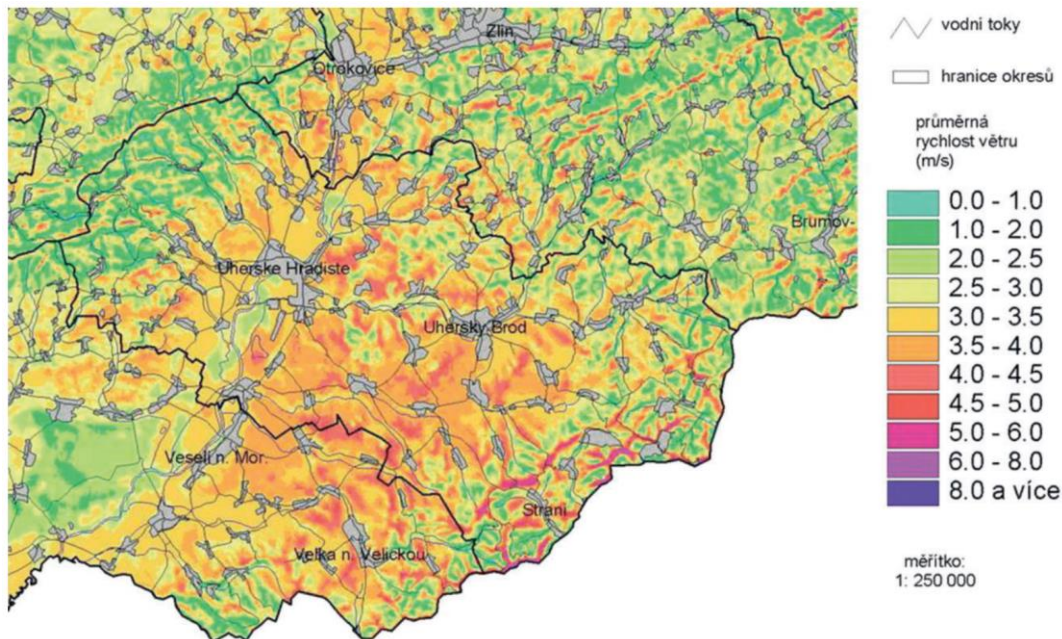
Obr. 9 Model VAS 2 (průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem – 2002). [15]

Předností metody je uvážení nárůstu rychlostí větru s nadmořskou výškou. Nebere však v potaz, již zmíněnou, orografii a drsnost terénu, na úkor čehož není rovněž schopna zohlednit fyzikální vztahy mezi prouděním vzduchu a vlastnostmi terénu. Nelze s ní ani podrobně uvážit místní podmínky v okolí stanice a cílového bodu. Mimo to také potřebuje velmi hustou síť měřících stanic, což má za následek vyšší chybovost a nižší reprezentativnost stanic. [15]

Jak je již tedy zřejmé, zápory této metody převažují její klady, a proto se v dnešní době již nevyužívá samostatně, ale v kombinaci s modelem WAsP.

2.2.2 Model WAsP

Tento statický model byl vytvořen dánským institutem Risø National Laboratory přímo pro větrnou energetiku. Součástí není jen model, ale také software umožňující důkladný přepočítání větrných poměrů mezi místem měření větru a blízkými větrnými elektrárnami. [16] Model umožňuje výpočet v rámci přízemní vrstvy atmosféry uvažujícím s určitými vlivy zemského povrchu na větrné charakteristiky. Pomocí korekčních modelů tedy uvažuje vliv překážek, drsnosti povrchu a orografie. [15]



Obr. 10 Ukázka podrobného plošného výpočtu modelem WASP (průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem). [15]

Vzhledem k tomu, že je model tvořen přímo na míru větrné energetice, naměřená data zobrazená v histogramech jsou v průběhu výpočtu nahrazena daty Weibullova rozdělení. [15]

Oproti metodě VAS, model WASP již umožňuje podrobné zohlednění místních podmínek v okolí stanice a cílového bodu, čímž dosahuje vysokého prostorového rozlišení, znázorněného na Obr. 10. Dalšími přednostmi tohoto modelu jsou realistický výpočet vertikálního profilu větru a relativně nízká náročnost výpočtu, díky mnoha zjednodušením. Tato zjednodušení mají však za následek nepřesné orografické vyhodnocení, které může navýšit chybu modelu v řádech desítek procent. Model rovněž není schopen zohlednit vliv rozsáhlejších terénních tvarů a změny teplotní stratifikace neboli zvrstvení atmosféry. [15]

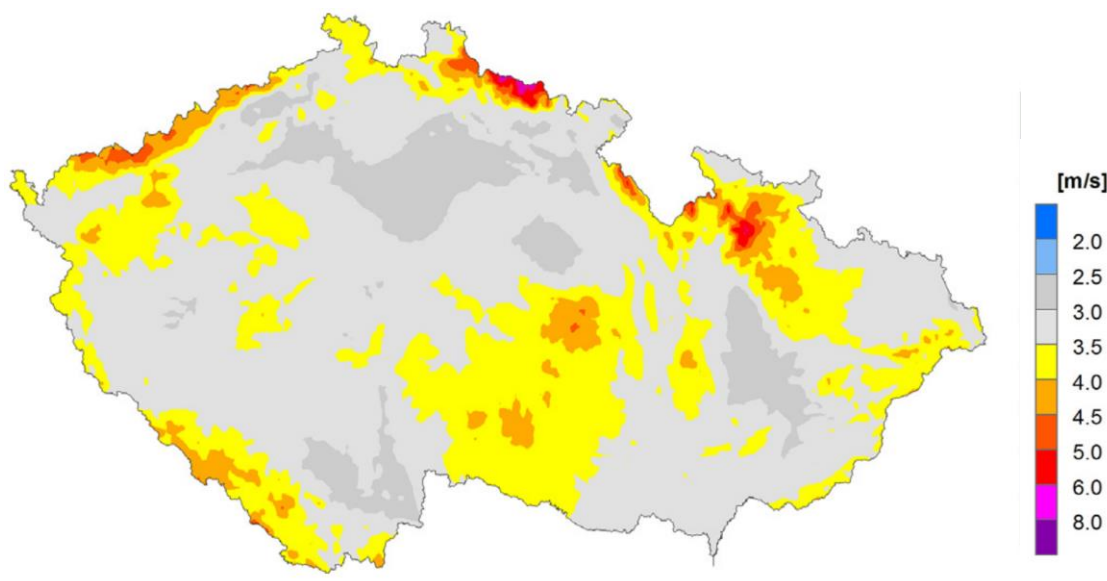
Využití modelu je ideální při stanovení větrného klimatu v rovinném nebo mírně členitém terénu s menšími vzdálenostmi od měřicích stanic, jelikož s rostoucí vzdáleností a členitostí terénu roste také jeho nepřesnost. Tak jako metody VAS, i model WASP vyžaduje hustou síť měřicích stanic. [15]

Obvykle se mimo konstrukci větrných map využívá pro výpočet větrných charakteristik konkrétních lokalit nebo menších území se záměrem výstavby větrné elektrárny, jejíž předpokládanou výrobu elektřiny jsme schopni pomocí modelu rovněž určit. [15]

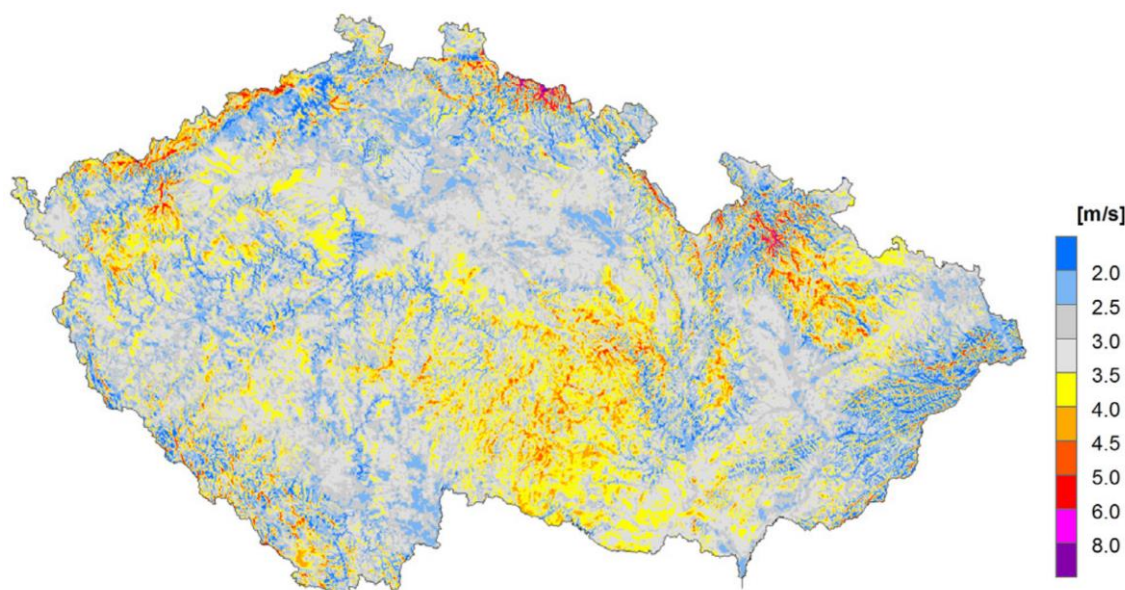
2.2.3 Model VAS/WAsP

Jedná se o statický hybridní model, složený z metody VAS a modelu WASP, který využívá předností obou stylů, jenž se navzájem poměrně doplňují.

Nejprve je využito modelu WASP, pomocí kterého jsou eliminovány vlivy okolních podmínek specifické pro dané lokality míst měření, a jehož výsledkem jsou zobecněné větrné podmínky lokalit. Pomocí metody VAS jsou následně tato zobecněná data interpolována z míst měřicích stanic do prostorů cílových bodů, s ohledem na nadmořskou výšku, čímž získáme zobecněnou větrnou mapu, kterou můžeme vidět na Obr. 11. Nakonec je znovu využito metody WASP, jejíž aplikací zrealizujeme finální plošný výpočet větrné mapy v detailním rozlišení, reprezentované na Obr. 12. [15]



Obr. 11 Model VAS/WAsP po aplikaci metody VAS (průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem). [14]

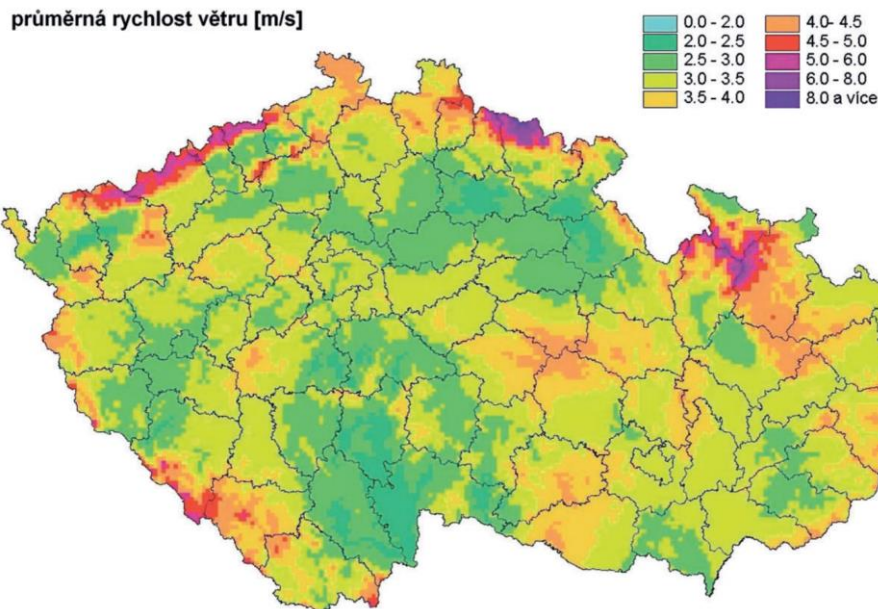


Obr. 12 Model VAS/WAsP (průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem). [14]

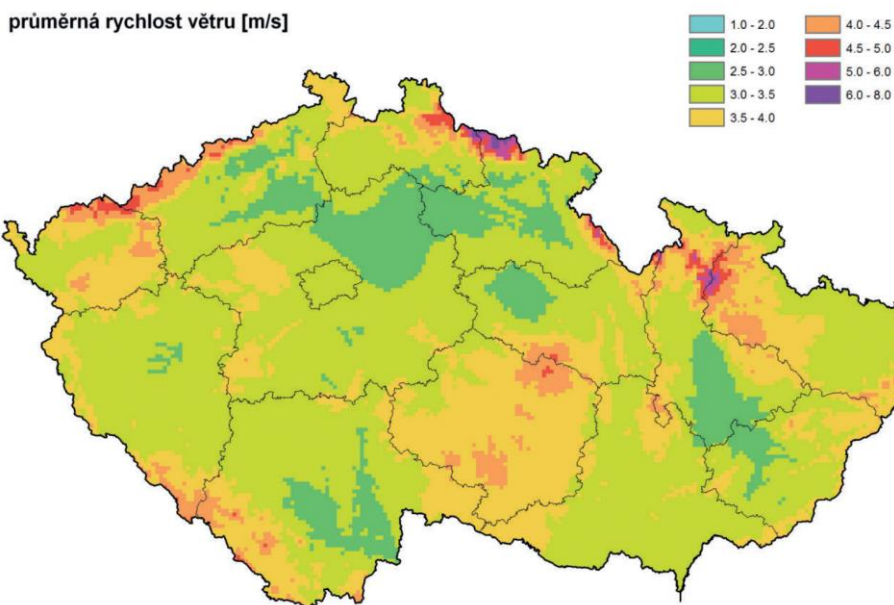
Mezi výhody modelu se řadí přednosti jednotlivých modelů, konkrétně se tedy jedná o kvalitní zohlednění vlivu nadmořské výšky, v rámci modelu VAS, a zohlednění vlivu lokální orografie a drsnosti terénu, v rámci modelu WAsP. [15]

Hlavním negativem však zůstává hlavní nevýhoda obou jednotlivých metod, a tedy, pro nejreálnější vyobrazení, právě potřeba co nejvyššího počtu reprezentativních referenčních stanic, z důvodu chyby rostoucí se vzdáleností od referenčního bodu. Použití modelu je dále omezeno orografickými útvary středního měřítká, jejichž vliv nedokáže zohlednit. [15]

Vliv výběru reprezentativních referenčních stanic lze pozorovat na Obr. 13 a Obr. 14. K hlavním faktorům výrazné změny zde patří dopad zpřísnění volby stanic, který jejich počet snížil a dopad vyšší kvality naměřených dat, který počet stanic rovněž snížil. Nižší počet stanic tedy ve výsledku znamená výrazně nižší prostorové rozlišení, které je zřejmé na Obr. 14.



Obr. 13 Výsledek interpolace metodou VAS v rámci metody VAS/WAsP 1 v 10 m nad povrchem (2004). [15]



Obr. 14 Výsledek interpolace metodou VAS v rámci metody VAS/WAsP 2 v 10 m nad povrchem (2007). [15]

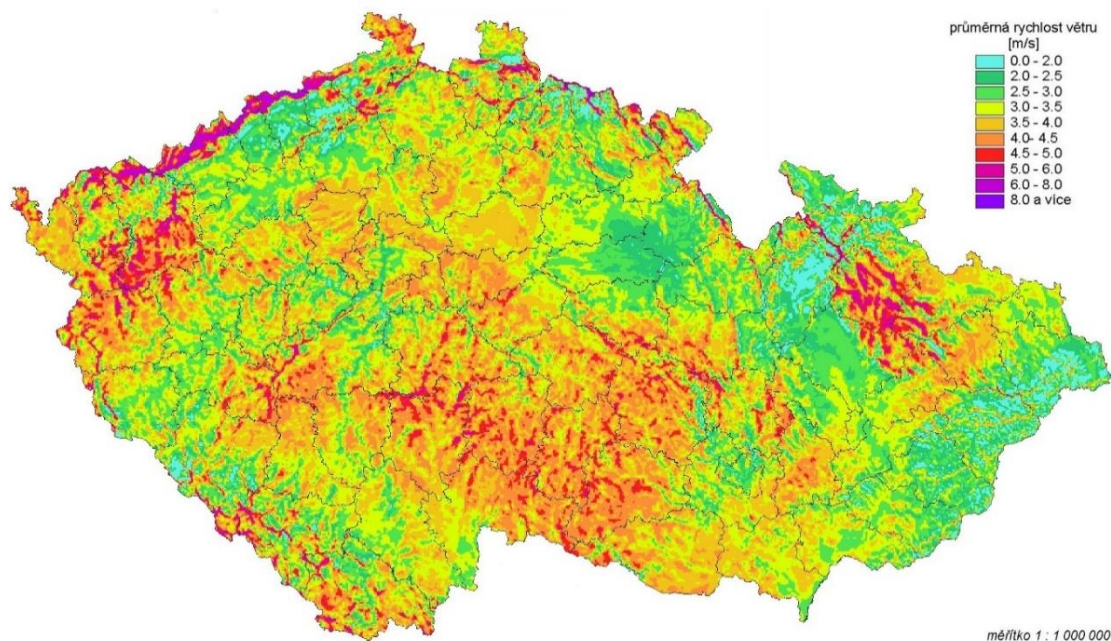
2.3 Mezoměřítkové modely

Jedná se o modely se zaměřující se především na regionální vlivy, a tedy i komplexnější meteorologické jevy, lépe vystihující realitu, za což však platí velmi zdlouhavým výpočtem a nižším rozlišením. Právě této kategorii odpovídají modely PIAP a WRF, jež jsou součástí konstrukce větrných map, zmíněných v úvodu kapitoly. [14]

2.3.1 Model PIAP

Tak jako statickou metodu VAS, tento dynamický model vyvíjí Ústav fyziky atmosféry AV ČR. Jedná se o model proudění v mezní vrstvě atmosféry, který fyzikálně odpovídá realitě mnohem více, než přešla statická metoda a modely. [16]

Jedná se o dvoustupňový výpočet, pro snadnější realizaci simulací, jehož výstupem jsou větrné růžice charakterizující proudění vzduchu popisované oblasti. Nejprve jsou určeny teoretické scénáře proudění vzduchu, čehož je dosaženo trojrozměrným nestacionárním numerickým modelem mezní vrstvy atmosféry, jehož jádrem je užití několika pohybových rovnic, aproximací a hypotéz. K výsledným teoretickým scénářům jsou následně přiřazeny proudění reálná pomocí statistické metody, jejíž základem je využití směrů a rychlostí natékajícího proudění větru jako základního parametru, přiřazovaného ke konkrétním lokalitám pomocí virtuálních řad. [15]



Obr. 15 Průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem (model PIAP); sloučeno. [17]

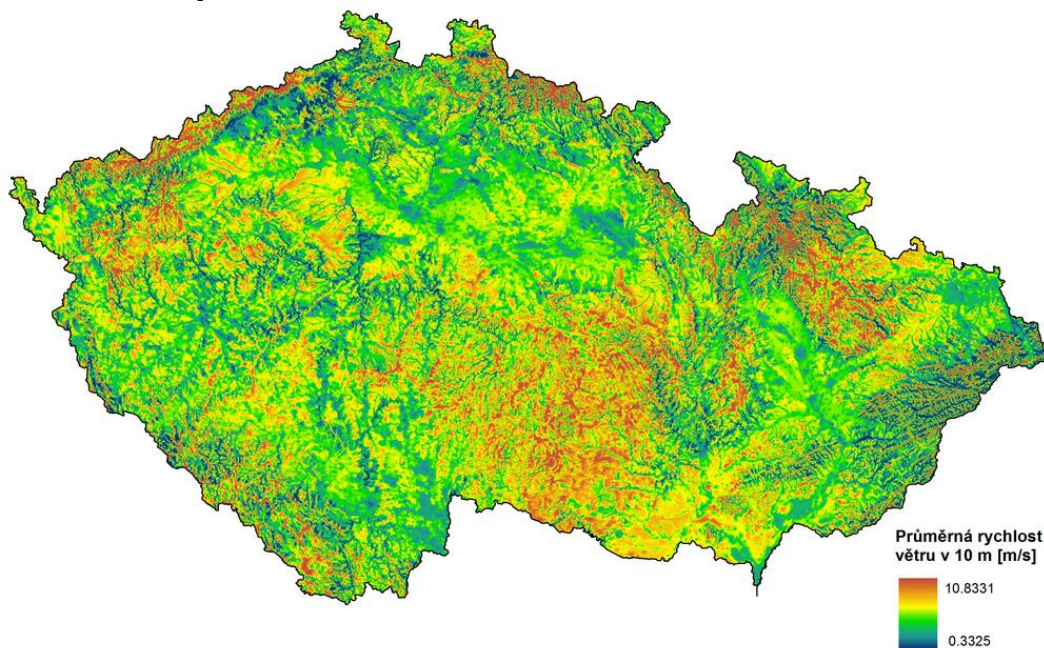
Mezi přednosti modelu patří lepší aplikace vlivů orografie na proudění vzduchu, než je to u modelu WASP. Oproti modelu WASP je rovněž umožněn výpočet pro větší vzdálenosti mezi měřicími stanicemi a jejich menší počet, pro pokrytí celé plochy ČR, aniž by tím byl výsledek, jakkoliv kvalitativně ovlivněn. V důsledku jeho nízké výpočetní náročnosti oproti jiným mezoměřítkovým meteorologickým modelům (MMM) má rovněž vyšší prostorové rozlišení. [15]

Vůči jiným MMM bylo prostorové rozlišení silnou stránkou modelu, avšak ve srovnání s výše zmíněnými modely VAS a WAsP se jedná spíše o slabinu. Mezi jeho další nevýhody pak patří nerealistický vertikální profil větru nebo nadhodnocování orografie. [15]

Tak jako model WAsP, i model PIAP je možné uplatnit pro výpočet proudění větru v jednom bodě, ale pro využití jeho plného potenciál jej spíše aplikujeme na velké plochy. [15]

2.4 Kombinace modelů VAS/WAsP a PIAP

Kombinací těchto modelů získáme velmi dobré vyobrazení větrné mapy, proto je tato kombinace využita právě pro mapu „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny,“ viditelnou na Obr. 16. [16]



Obr. 16 Průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem (kombinace VAS/WAsP a PIAP). [16]

Ačkoliv se jedná o kombinaci modelů, samotný výpočet je prováděn nejprve nezávisle na sobě, jelikož každý model vyžaduje jiný vzdálenostní krok a je zapotřebí různý počet měřících stanic. Pro model PIAP stačí jednotky měřících stanic s dlouhým vzdálenostním krokem, ale model VAS/WAsP vyžaduje desítky měřících stanic s krátkým vzdálenostním krokem, pro vyobrazení plné rozlohy ČR s nejnižší chybovostí. [16]

Přestože spojením těchto modelů dokážeme sestrojít nejrealnější možnou formu větrné mapy, mají modely spoustu protichůdných vlastností, které ovlivňují následné sdružení nezanedbatelným zvýšením dílčích chybovostí, a jsme je tak nuceni kompenzovat rozdílnou vahou jednotlivých výpočtů. [16]

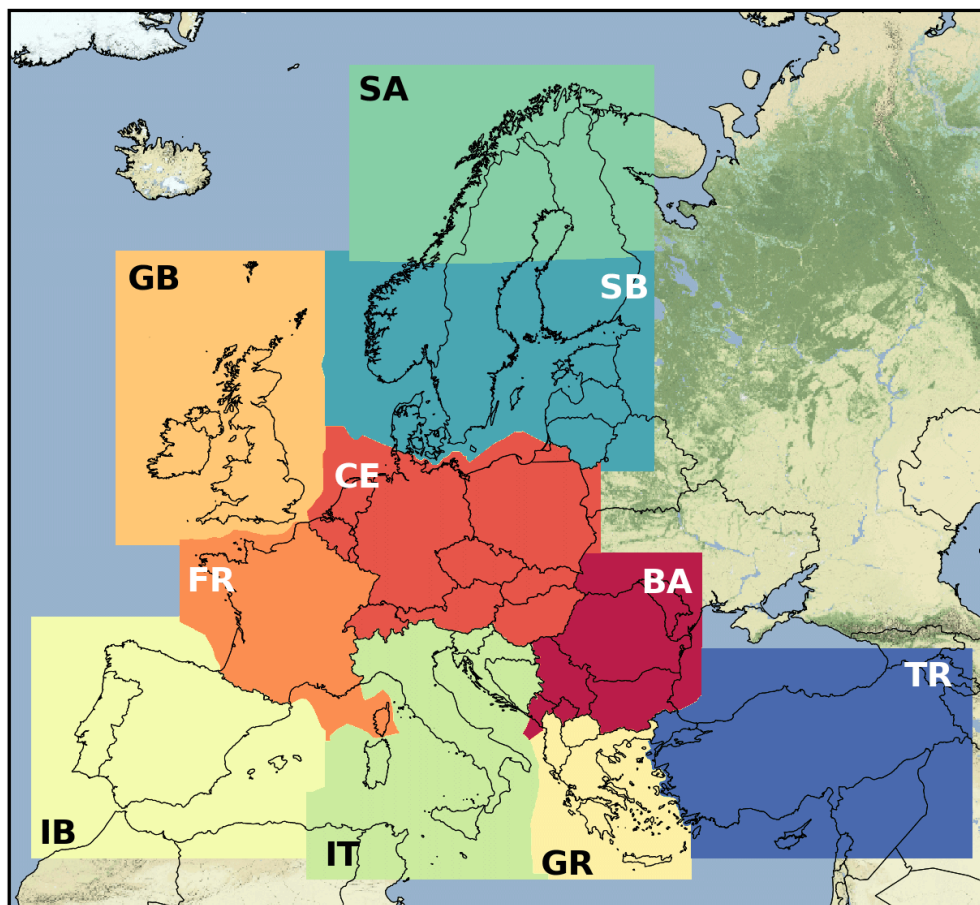
Kombinace těchto modelů spočívá pouze v elementárním váženém průměru s již zmíněnými adekvátními vahami výsledků modelů, kdy se odpovídající poměr vah může lišit výpočet od výpočtu, jelikož váha metody je přímo úměrná převrácené hodnotě druhé mocniny vzdálenosti referenčních stanic od počítaného bodu. V kombinaci modelů VAS/WAsP a PIAP bude tedy větší váha vždy připadat modelu VAS/WAsP. Pro uvedení příkladu byl pro mapu „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny“ aplikován poměr vah 7:3, kde je právě kladen vyšší důraz na výsledky modelu VAS/WAsP. [16]

2.5 Kombinace modelů WasP a WRF

WRF (Weather Research and Forecasting model [18]) je atmosférický model numerické předpovědi počasí, uzpůsobený různým meteorologickým aplikacím. Pro vlastní výpočet užívá třídimenzionální variační asimilaci dat. [19]

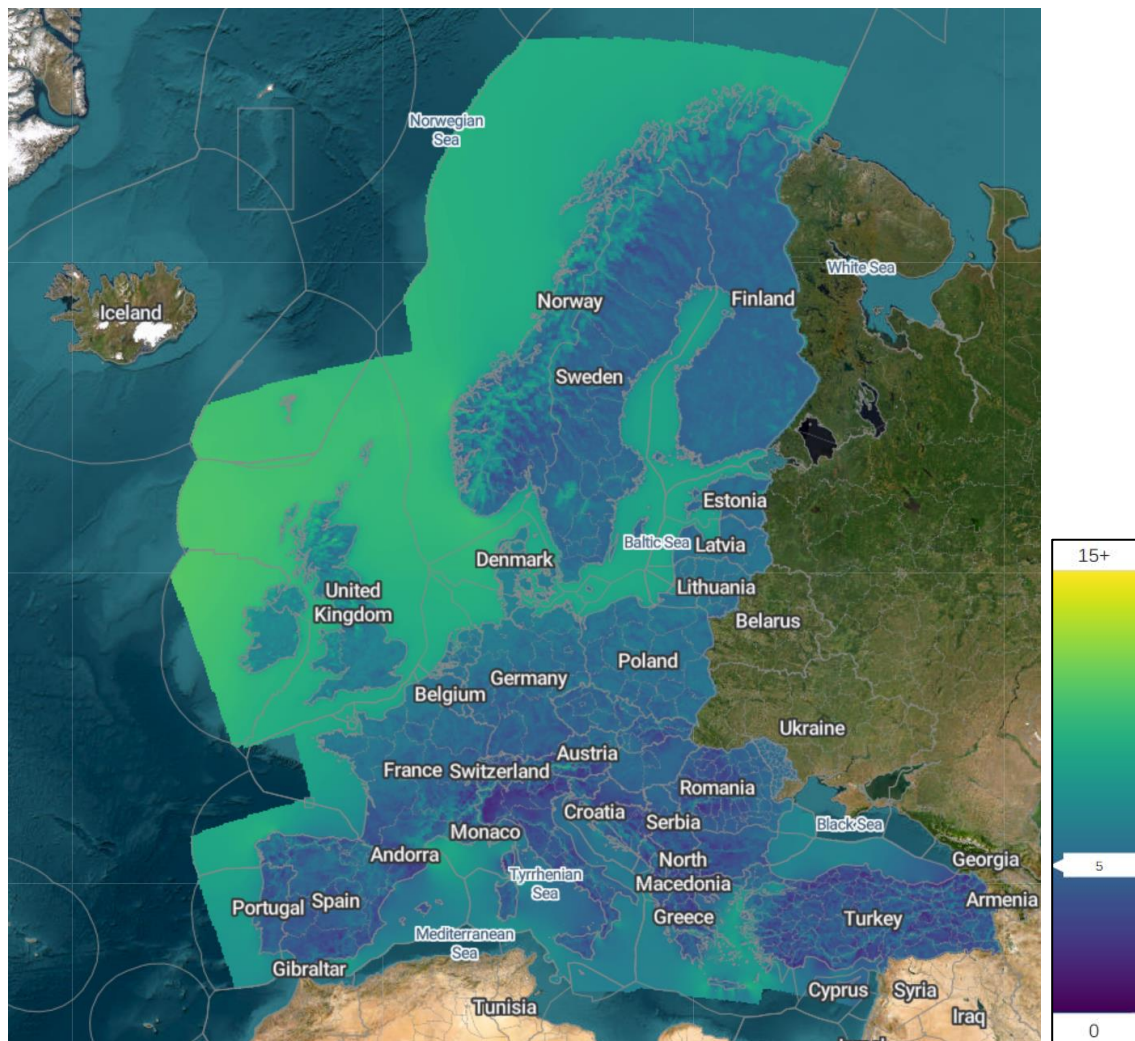
Setkat se s tímto modelem můžeme např. v problematice chemie vzduchu, přírodních požárů nebo hurikánů. Užití modelu tedy zpravidla zasahuje spíše do jiných odvětví, než je větrná energetika. Jedná se však o jeden z nejrozšířenějších modelů meteorologie a v kombinaci s modelem WAsP byl tedy užít pro konstrukci větrné mapy „New European Wind Atlas.“ [19]

Pro konstrukci větrné mapy nad rámec oblasti České republiky, musí být oblast nejprve rozdělena do několika na sobě nezávislých podoblastí, pro zachování vysokého prostorového rozlišení. Pro reprezentativní vyobrazení musejí být rovněž zavedeny podmínky pro vybrané podoblasti, mezi které se primárně řadí dostatečné překrytí oblastí navzájem a v případě přímořských domén pak pokrytí do dostatečné vzdálenosti od pobřeží. Výsledné rozdělení podoblastí můžeme sledovat na Obr. 17. [20]



Obr. 17 Rozdělení do podoblastí pro konstrukci větrné mapy s vysokým rozlišením. [20]

Model WAsP nakonec v kombinaci s modelem WRF plní funkci tzv. downscalingu, neboli navýšení přesnosti údajů, a tedy prostorového rozlišení. Konečnou kombinaci modelů lze vidět na Obr. 18. [20]



Obr. 18 „New European Wind Atlas.“ [13]

2.6 Přesnost větrných map

Přesnost větrných map je dána převážně přesností použitých výpočetních modelů a kvalitou vstupních dat, u kterých by ale chyba neměla překročit 10 %. Nejpodstatnějším faktorem je tedy právě přesnost modelů. [16]

Přesnost modelů je velmi závislá na terénu. Vyšších přesností lze dosáhnout zpravidla v otevřené a rovinnaté nebo mírně zvlněné krajině. Přesností nižších je dosaženo ve složitém a členitém terénu s velkými výškovými rozdíly, vysokými sklony svahů a četnými překážkami. Závislost na terénu je tedy tak vysoká, že se chyba modelu může pohybovat až v desítkách procent. [16]

2.7 Určení Weibullový funkce

Metod pro určení samotné Weibullový funkce existuje více. Lze ji spočítat z průměrné rychlosti, anebo na základě měření a rozšíření na území. Jakých konkrétních postupů je užíváno však dané mapy neuvádějí.

3 Větrný potenciál

Jak bylo již v předešlých kapitolách vysvětleno, větrný potenciál lokality je plně určen pomocí rychlostí, četností a směrů větru, přičemž četnosti jsou stanovovány prostřednictvím rychlostí větru a Weibullový funkce. Samotné rychlosti a směry větru jsou měřeny na meteorologických měřicích stanicích, rozmístěných po celé České republice, provozovaných ČHMÚ.

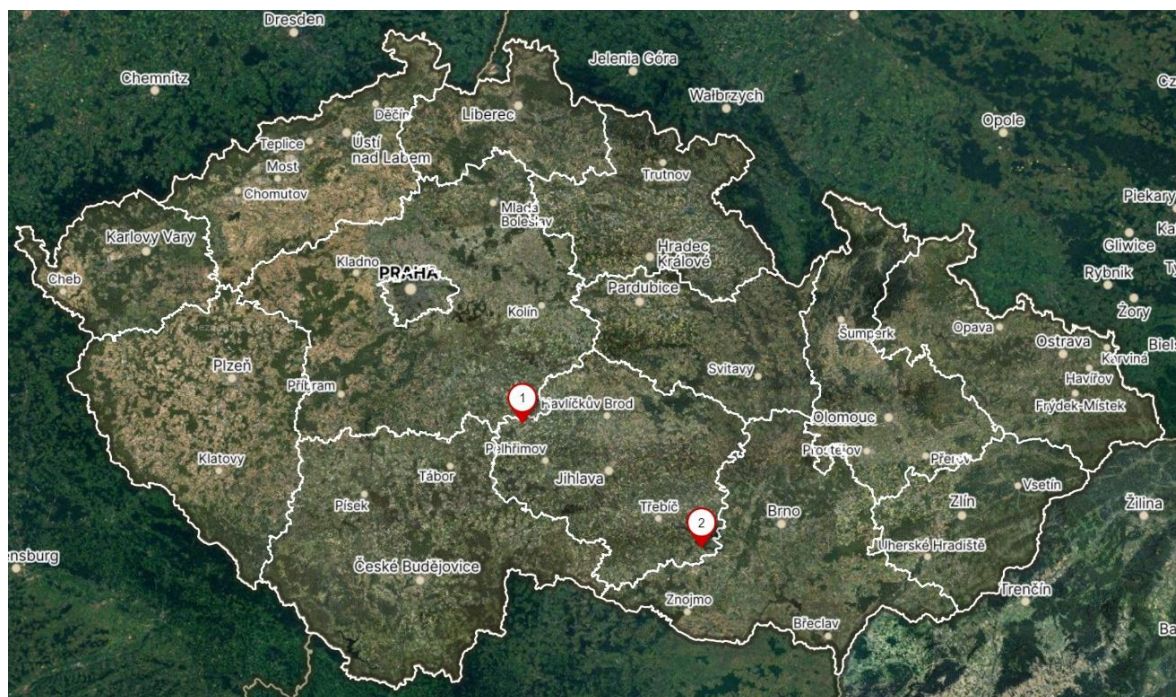
Měření rychlostí větru se provádí na meteorologických stožárech, v různých výškách nad zemí, pomocí tzv. anemometrů. Rozlišovány jsou primárně dva reprezentativní typy anemometrů, miskový a ultrasonický. Miskový anemometr funguje na principu převodu točivého momentu na dynamo a následně výrobě elektrického proudu nebo napětí, jejichž hodnoty jsou nakonec přepočítány na rychlosti větru. Ultrasonický anemometr naopak využívá šíření a odrazu zvukových vln od různě hustých vrstev proudění vzduchu, a nepřítomností mechanických částí nebo lepší odolností před námrazou se kvalitou řadí před miskový. Ultrasonická verze je však dražší, a proto se lze hojně setkat s oběma typy. [17]

Měření směrů větru je prováděno prostřednictvím selsynů (elektrická hřídel [21]) nebo optoelektronických přístrojů (kříž se směrovkou), již zabudovaných ve zmíněných anemometrech. [17]

Vzhledem k tomu, že konstrukce větrných růžic je velmi komplikovaná, budou v této části data směrů větru zanedbána. Pozornost bude věnována zbylým dvěma hlavním charakteristikám větru, rychlosti a četnosti rychlostí. Náplní kapitoly budou tedy Weibullový funkce, konkrétně jeho parametry „a“ a „b.“

3.1 Výběr lokalit

Jak je již z názvu práce zřejmé, podstatné byly nižší vrstvy atmosféry, resp. menší vzdálenosti nad zemským povrchem. Jelikož však meteorologické měřicí stanice ČHMÚ měří ve výškách velmi vysokých nebo velmi nízkých, byly vybrány pouze dvě měřicí stanice, které odpovídaly požadavkům nižší vrstvy atmosféry (výšky pohybující se okolo 50 metrů nad zemským povrchem) a množstevní variabilitě měření (počet dostupných různých výšek). Stanicemi jsou Košetice (1) a Dukovany (2).



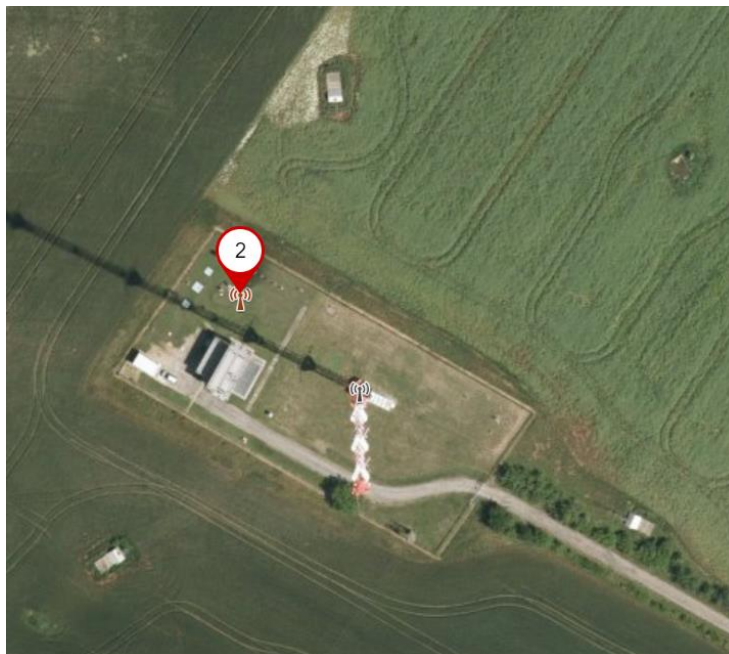
Obr. 19 Umístění vybraných měřicích stanic: Košetice (1) a Dukovany (2). [22]

Stanice Košetice poskytuje měření ve výškách 10, 50, 125, 240 a 250 metrů nad zemí. Splňuje tedy výšku okolo 50 metrů, ale zbylá diverzita výšek už se okolo této hranice nepohybuje. Rozsah hodnot je široký, což umožňuje vyhodnocení závislosti výsledků měření na výšce nad povrchem Země.



Obr. 20 Detail umístění měřicí stanice Košetice (1). [22]

Stanice Dukovany pak poskytuje měření ve výškách 10, 18, 42, 79, 119 a 136 metrů nad zemí. Rovněž tedy splňuje podmínku výšky okolo 50 metrů. Zbylá rozmanitost výšek se nepohybuje tak daleko od požadované hodnoty a rozsah hodnot je dokonce širší než v případě Košetice. Závislost výsledků měření na výšce nad zemským povrchem bude tedy ještě výstižnější.



Obr. 21 Detail umístění měřicí stanice Dukovany (2). [22]

3.2 Zpracování dat

Data rychlostí větru za pětileté období (2016–2020) z obou lokalit poskytl ČHMÚ. Pro porovnání dat poskytnutých ČHMÚ byly zvoleny větrné online mapy „New European Wind Atlas,“ poskytující srovnání ve výškách 50, 100 a 200 metrů nad zemí, a „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny,“ umožňující srovnání ve výšce 10 metrů nad zemským povrchem.

Právě proto, že se dostupné výšky online map neshodují s výškami měřených dat, nebyla porovnání provedena prostřednictvím vykreslených Weibullových funkcí, ale pouze pomocí parametrů Weibullové funkce a jejich závislosti na rostoucí výšce nad povrchem Země. Pro tato srovnání byla využita online větrná mapa „New European Wind Atlas.“

Jediná výška, se kterou se shodovaly soubory naměřených dat je výška 10 metrů nad zemí, kterou disponuje i online větrná mapa „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny,“ a lze tedy data efektivně porovnat. Vzhledem k tomu, že se v tomto případě jedná o porovnání vždy pouze jedné hodnoty, výsledkem srovnání je tak procentuální chybovost. Pro větší rozpětí porovnání hodnot byly vybrány tři další práce, jedna diplomová a dvě bakalářské, které disponují dalšími parametry Weibullové funkce pro jiné lokality nebo stejné lokality v odlišných letech. Parametry z těchto prací byly do porovnávání zahrnuty také.

3.2.1 Měřicí stanice Košetice

Ve stanici Košetice probíhá měření v hodinových intervalech. Měření probíhalo bez jakýchkoliv výpadků, jelikož se v datovém souboru nevyskytovaly žádné mezery. Čistota dat byla tedy poměrně dobrá, až na pár desítek chyb v zápisu hodnot, o které musela být data očištěna.

Očištěná data rychlostí větru byla následně zpracována v programu MatLab, ze kterého byly pomocí Weibullova rozdělení vytaženy náležití parametry „a“ a „b“ pro příslušný rok a výšku. Zpracovaná data lze vidět v Tab. 3 a Tab. 4.

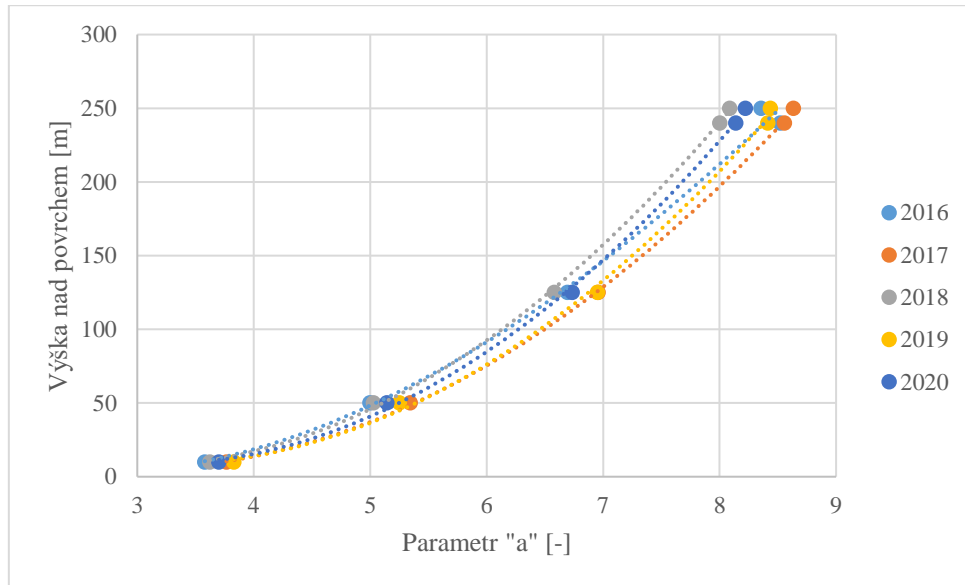
Tab. 3 Parametr Weibullové funkce „a“ v místě stanice Košetice.

a	10 m	50 m	125 m	240 m	250 m
2016	3.5794	4.9961	6.6935	8.5219	8.3569
2017	3.7652	5.3450	6.9582	8.5562	8.6348
2018	3.6220	5.0277	6.5800	8.0007	8.0857
2019	3.8301	5.2514	6.9521	8.4143	8.4370
2020	3.7014	5.1440	6.7353	8.1398	8.2203

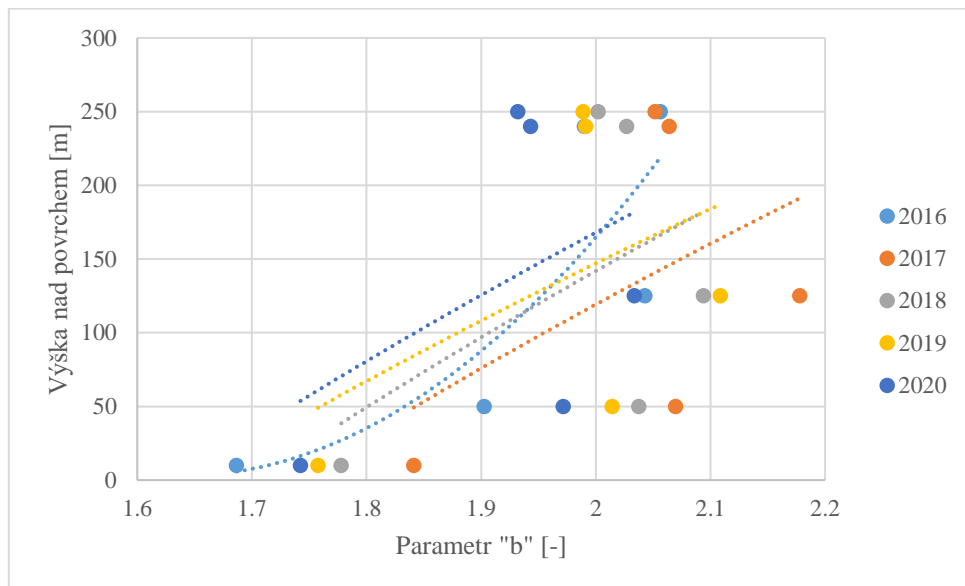
Tab. 4 Parametr Weibullové funkce „b“ v místě stanice Košetice.

b	10 m	50 m	125 m	240 m	250 m
2016	1.6866	1.9026	2.0428	1.9901	2.0562
2017	1.8412	2.0697	2.1779	2.0640	2.0516
2018	1.7779	2.0374	2.0938	2.0268	2.0021
2019	1.7576	2.0142	2.1087	1.9911	1.9888
2020	1.7423	1.9715	2.0337	1.9432	1.9319

Pomocí těchto zpracovaných hodnot je možné vykreslit změny parametrů „a“ a „b“ v závislosti na změně výšky od zemského povrchu proložení dat nejekvivalentnějšími křivkami (dle parametru R2), kterými byly v tomto případě křivky algebraické, pro parametr „a“, a převážně logaritmické, pro parametr „b.“ Jelikož bylo zpracování dat provedeno pro jednotlivé roky zvlášť, je následně přípustné porovnat tyto závislosti meziročně. Meziroční změnu je tedy možné sledovat na Obr. 22 a Obr. 23.



Obr. 22 Meziroční změny parametru Weibullový funkce „a“ v místě stanice Košetice.



Obr. 23 Meziroční změny parametru Weibullový funkce „b“ v místě stanice Košetice.

Z Obr. 22 je zřejmé, že parametr „a“ s výškou od zemského povrchu roste. Tato závislost se meziročně významně nemění. Vzhledem k tomu, že parametr „a“ úzce souvisí s rychlostí větru, lze předpokládat meziroční stálost střední rychlosti větru.

Obr. 23 následně ukazuje, že se parametr „b“ skrze roky již lehce mění, ale ne příliš výrazně. S narůstající výškou od povrchu Země parametr „b“ roste nebo klesá a pohybuje se tak okolo jedné hodnoty s výjimkou výšky 10 metrů nad povrchem, ve které jsou hodnoty lehce odchýleny, což bude pravděpodobně způsobeno o $\frac{3}{4}$ menším souborem očištěných hodnot než ve zbylých výškách (příčinou nadměry nulových velikostí středních hodnot rychlostí větru, které MatLab nedokázal zpracovat), a tedy menší reprezentativností. Ačkoliv byly křivky tohoto parametru vykresleny s největší možnou ekvivalencí (s nejvyšší hodnotou R2), stále křivky nepopisují závislost těchto parametrů dostatečně vhodně a je tedy nutné brát je s rezervou.

3.2.2 Měřicí stanice Dukovany

Ve stanici Dukovany probíhá měření v desetiminutových intervalech. Jedná se tedy o sedmkrát větší soubor rychlostí větru. V případě dat z této stanice však k výpadkům již docházelo, ale vzhledem k velkému objemu dat jsou tyto časté, ale velmi krátkodobé, výpadky poměrně zanedbatelné. Očištěná data byla opět zpracována programem MatLab, pomocí kterého byly znovu vytaženy parametry Weibullový funkce. Hodnoty parametrů závislých na příslušném roce a výšce zobrazuje Tab. 5 a Tab. 6.

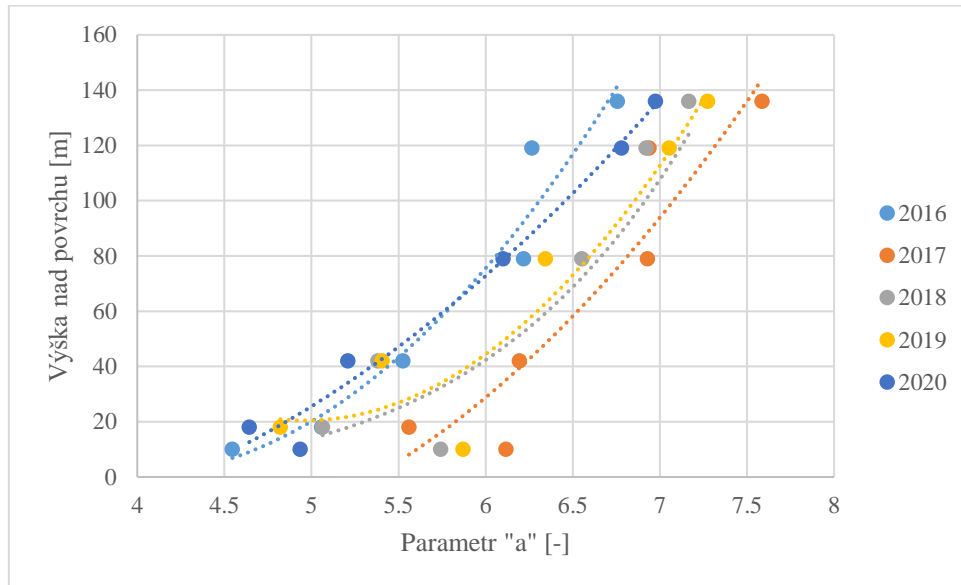
Tab. 5 Parametr Weibullový funkce „a“ v místě stanice Dukovany.

a	10 m	18 m	42 m	79 m	119 m	136 m
2016	4.5457	5.0573	5.5252	6.2172	6.2649	6.7555
2017	6.1163	5.5594	6.1938	6.9293	6.9378	7.5866
2018	5.7420	5.0632	5.3820	6.5510	6.9207	7.1662
2019	5.8703	4.8211	5.4045	6.3421	7.0530	7.2740
2020	4.9351	4.6428	5.2084	6.0992	6.7789	6.9742

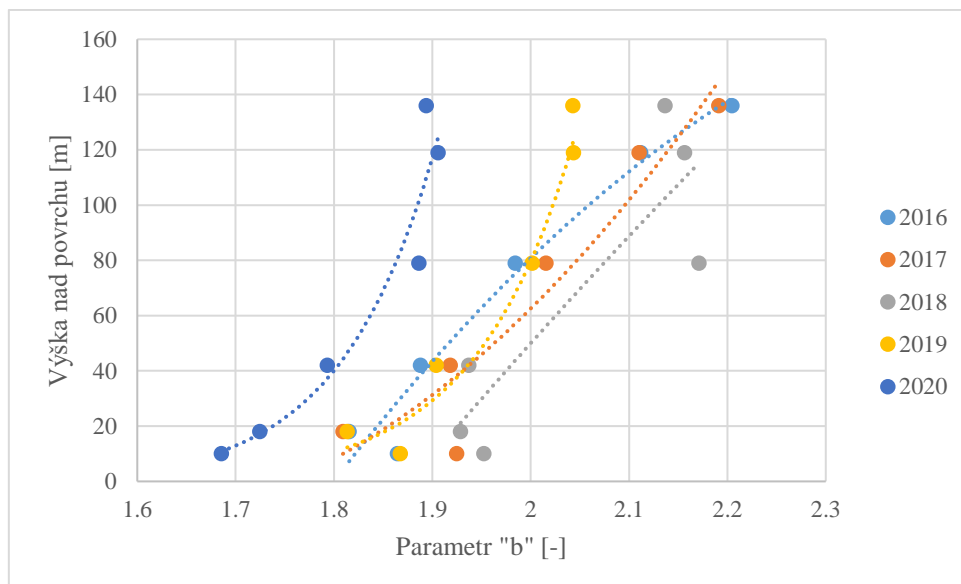
Tab. 6 Parametr Weibullový funkce „b“ v místě stanice Dukovany.

b	10 m	18 m	42 m	79 m	119 m	136 m
2016	1.8646	1.8155	1.8881	1.9844	2.1118	2.2045
2017	1.9248	1.8091	1.9182	2.0155	2.1103	2.1914
2018	1.9523	1.9288	1.9371	2.1711	2.1564	2.1365
2019	1.8674	1.8135	1.9040	2.0014	2.0436	2.0430
2020	1.6854	1.7247	1.7932	1.8863	1.9058	1.8937

Hodnoty byly vyneseny do grafů a byly tak opět vykresleny meziroční změny parametrů „a“ a „b“ v závislosti na výšce od povrchu Země. Vykreslení znovu charakterizují proložení křivkami. Závislosti parametru „a“ zase nejlépe vystihují křivky algebraické, avšak tvary závislosti parametru „b“ nabírají, vlivem rozptylů, již různých typů křivek (téměř každá křivka jiná). Tyto meziroční změny znázorňuje Obr. 24 a Obr. 25.



Obr. 24 Meziroční změny parametru Weibullové funkce „a“ v místě stanice Dukovany.



Obr. 25 Meziroční změny parametru Weibullové funkce „b“ v místě stanice Dukovany.

Jak bylo již zmíněno v rámci měřicí stanice Košetice, i data ze stanice Dukovany vykazují nárůst parametru „a“, a tedy nárůst střední hodnoty rychlosti větru s rostoucí výškou od zemského povrchu. Meziročně už však parametr „a“ nevykazuje takovou stálost, ale dochází k lehkým odchylkám. Jak ztvárňuje Obr. 25, i hodnoty parametru „b“ nabývají mírného rozptylu, stále se ale přibližně pohybují okolo jedné hodnoty.

V rámci výšky do 140 metrů předpovídají Dukovany i Košetice nárůst parametru „b.“ Pokles parametru, ke kterému došlo v Košetících ve výšce 250 metrů se tu však potvrdit nepodařilo, jelikož těmito daty stanice nedisponuje.

Vzhledem ke sledovaným rozptylům lze konstatovat, že v lokalitě měřicí stanice Dukovany bude meziročně docházet ke změnám povětrnostních podmínek. V lokalitě stanice Košetice je naopak možné očekávat jejich stálost.

Obecně lze sledovat výkyvy hodnot obou parametrů. Vzhledem k desetiminutovým měřením nabývají data větší přesnosti, avšak zvětšuje se i možná chyba měření. Právě tato chybovost nejpravděpodobněji způsobila odklony hodnot. Datový balíček zároveň disponuje výškami menších vzájemných rozdílů, což také způsobuje větší viditelnost rozdílů hodnot v grafických závislostech.

3.3 Porovnání dat

Pro získání dat online větrné mapy „New European Wind Atlas“ je třeba v tomto online modelovém prostředí zvolit lokalitu, vybrat oblast „mikroměřítko“ a v možnosti „ostatní vrstvy“ vybrat „Weibullové parametry,“ přičemž vyselektovat každý zvlášť pro jednotlivé dostupné výšky nad zemským povrchem. Získaná data byla následně porovnána s naměřenými daty poskytnutými ČHMÚ.

Získání dat z online větrné mapy „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny“ je prostší. V tomto případě stačí pouze zvolit lokalitu a nástroj již rovnou vyhodí všechny podstatné parametry do tabulky. Mapa však poskytuje pouze jednu výšku nad zemí a neumožňuje vyhledávání pomocí názvu lokality, ale pouze pomocí souřadnic hledaného místa. Získaná data byla následně porovnána s daty naměřenými poskytnutými ČHMÚ. Porovnávaná data byla v tomto případě ještě navýšena o hodnoty lokalit měřících stanic Brno-Žabovřesky a Troubsko (2019) z diplomové práce pana Ing. Jakuba Lindy [23], Kuchařovice, České Budějovice a Tušimice (2022) z bakalářské práce paní Bc. Lucie Rymešové [24] a Lednice (2019) z bakalářské práce pana Ing. Davida Ondráčka [25].

3.3.1 New European Wind Atlas (NEWA)

Hodnoty parametrů Weibullové funkce získané z online větrné mapy „New European Wind Atlas“ pro lokalitu měřící stanice Košetice zobrazuje Tab. 7 a Tab. 8.

Tab. 7 Hodnoty parametru „a“ z online větrné mapy v místě stanice Košetice.

a	50 m	100 m	200 m
2024	6.18	7.74	9.29

Tab. 8 Hodnoty parametru „b“ z online větrné mapy v místě stanice Košetice.

b	50 m	100 m	200 m
2024	1.76	1.99	1.96

Pro přehlednou vizualizaci porovnání závislostí dat byly naměřené hodnoty poskytnuté ČHMÚ skrze roky zprůměrovány pro jednotlivé výšky. Tyto střední hodnoty parametrů za pětiletí (2016-2020) lze vidět v Tab. 9 a Tab. 10.

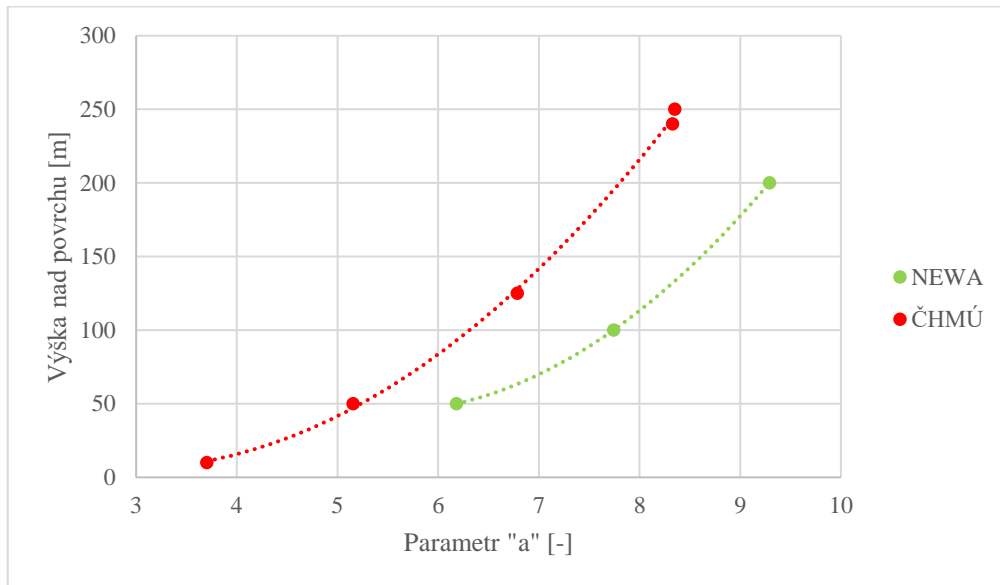
Tab. 9 Průměrné hodnoty parametru „a“ za pětiletí (2016-2020) v místě stanice Košetice.

a	10 m	50 m	125 m	240 m	250 m
2016-2020	3.6996	5.1528	6.7838	8.3266	8.3469

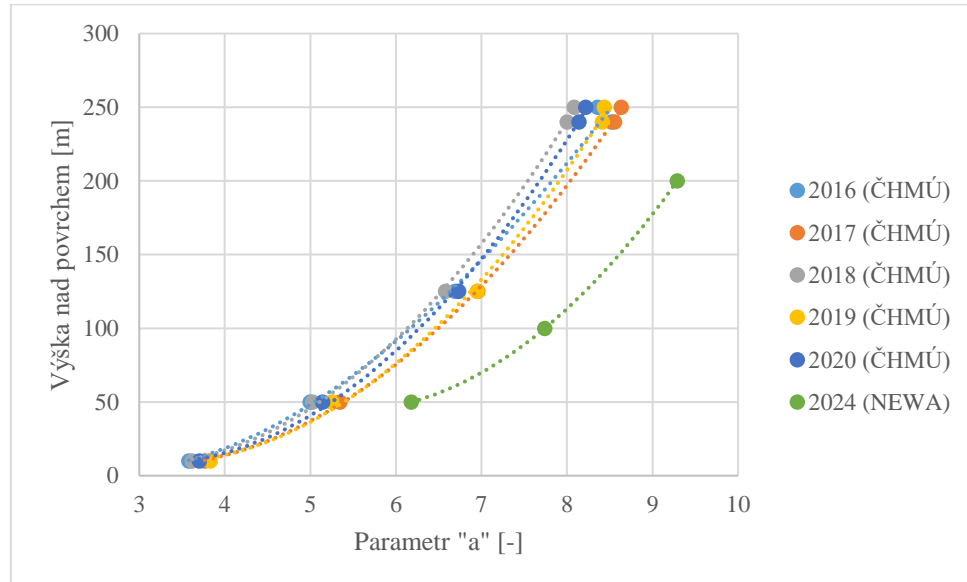
Tab. 10 Průměrné hodnoty parametru „b“ za pětiletí (2016-2020) v místě stanice Košetice.

b	10 m	50 m	125 m	240 m	250 m
2016-2020	1.7611	1.9991	2.0914	2.0030	2.0061

Hodnoty byly vyneseny do grafu a jejich závislosti byly navzájem porovnány. Ačkoliv v případě Košetice nedocházelo meziročně k výrazným odchylkám hodnot, v případě Dukovan tomu tak nebylo. Pro konzistentní porovnání tak byly i v tomto případě vykresleny porovnání dvě, pro lepší reprezentativnost výsledků. Srovnání parametru „a“ lze sledovat na Obr. 26 a Obr. 27. Porovnání parametru „b“ pak znázorňuje Obr. 28 a Obr. 29.

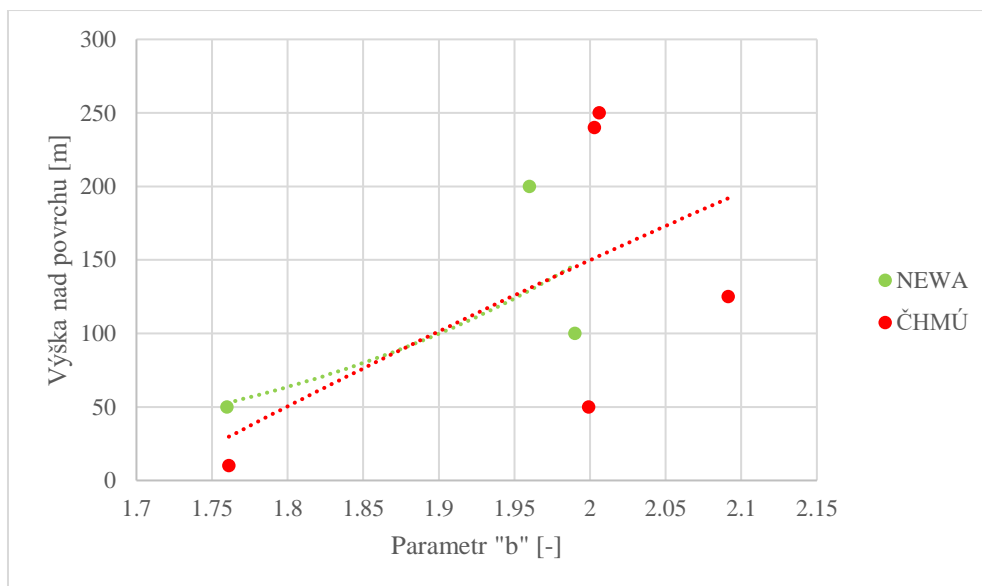


Obr. 26 Porovnání parametru „a“ vůči průměrným hodnotám za pětiletí (2016-2020) v místě měřicí stanice Košetice.

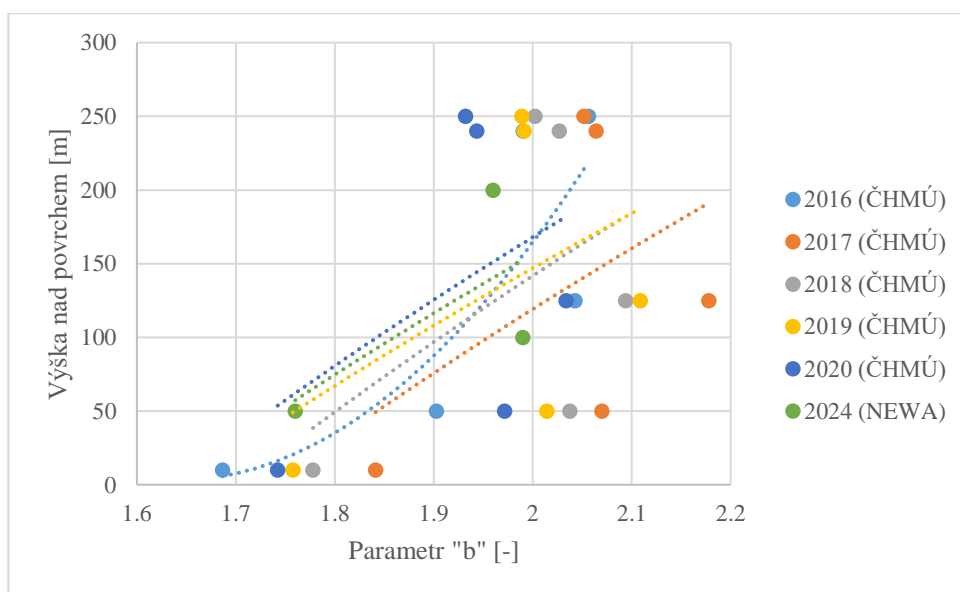


Obr. 27 Porovnání parametru „a“ vůči meziročním hodnotám v místě měřicí stanice Košetice.

Jak lze na Obr. 26 nebo Obr. 27 pozorovat, online modelový nástroj se viditelně a poměrně výrazně odchyluje od „reálných“ naměřených hodnot. Tato skutečnost může být postižena hned několika faktory, jako jsou např. nepřesnosti anemometrů nebo důsledek čištění dat. Vzhledem k meziročním relativním stálostem by však vlivy související s nepřesnostmi měření a zpracování dat neměly způsobovat rozptýl takových velikostí. Bude tedy pravděpodobné, že na odchylce bude mít největší podíl chybovost online větrné mapy, která lehce nadhodnocuje parametr „a“ se stoupající výškou od zemského povrchu.



Obr. 28 Porovnání parametru „b“ vůči průměrným hodnotám za pětiletí (2016-2020) v místě měřící stanice Košetice.



Obr. 29 Porovnání parametru „b“ vůči meziročním hodnotám v místě měřící stanice Košetice.

Pro stanici Košetice lze tedy obecně konstatovat, že Větrná mapa velikost hodnoty parametru „a“ s nabývajícím hodnotou výšky od povrchu Země nadhodnocuje, a velikost parametru „b“ naopak velmi lehce podhodnocuje. Velmi lehké podhodnocení podtrhuje fakt, že závislost parametru „b“ se v meziročním srovnání pohybuje v nejhustším intervalu a při porovnání s průměrnými hodnotami je téměř totožná se závislostí zprůměrovaných naměřených hodnot. Lze tedy říci, že hodnotu parametru „b“ vyhodnocuje online modelový nástroj poměrně dobře, rozhodně lépe než parametr „a“, stále ale dochází k relativním nepřesnostem, které je třeba brát v potaz.

Za povšimnutí stojí rovněž potvrzení skutečnosti poklesu parametru „b“ ve výšce okolo 200 metrů, kterou vykazuje stanice Košetice, ale stanice Dukovany, z důvodu absence měření v patřičné výšce, již potvrdit nemohla. Průběh parametru „b“ tedy poměrně sedí, i když proložení křivkou to tolik nepodtrhuje. Pro lepší proložení by bylo třeba mnohem více bodů, ke kterým však přístup není.

Tak jako pro lokalitu měřicí stanice Košetice, i pro lokalitu stanice Dukovany byly hodnoty parametrů Weibullové funkce získané z online větrné mapy „New European Wind Atlas“ vytaženy a sepsány do Tab. 11 a Tab. 12.

Tab. 11 Hodnoty parametru „a“ z online větrné mapy v místě stanice Dukovany.

a	50 m	100 m	200 m
2024	5.81	7.28	9.05

Tab. 12 Hodnoty parametru „b“ z online větrné mapy v místě stanice Dukovany.

b	50 m	100 m	200 m
2024	1.81	2.03	2.03

I v případě měřicí stanice Dukovany byly skrze roky hodnoty parametrů Weibullové funkce zprůměrovány a průměrné hodnoty tak lze sledovat v Tab. 13 a Tab. 14.

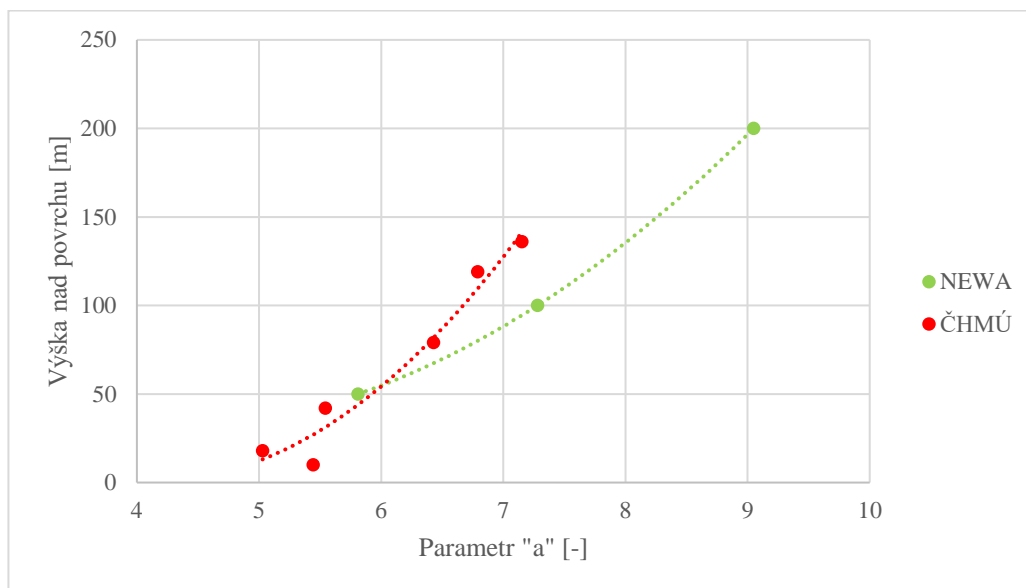
Tab. 13 Průměrné hodnoty parametru „a“ za pětiletí (2016-2020) v místě stanice Dukovany.

a	10 m	18 m	42 m	79 m	119 m	136 m
2016-2020	5.4419	5.0288	5.5428	6.4278	6.7911	7.1513

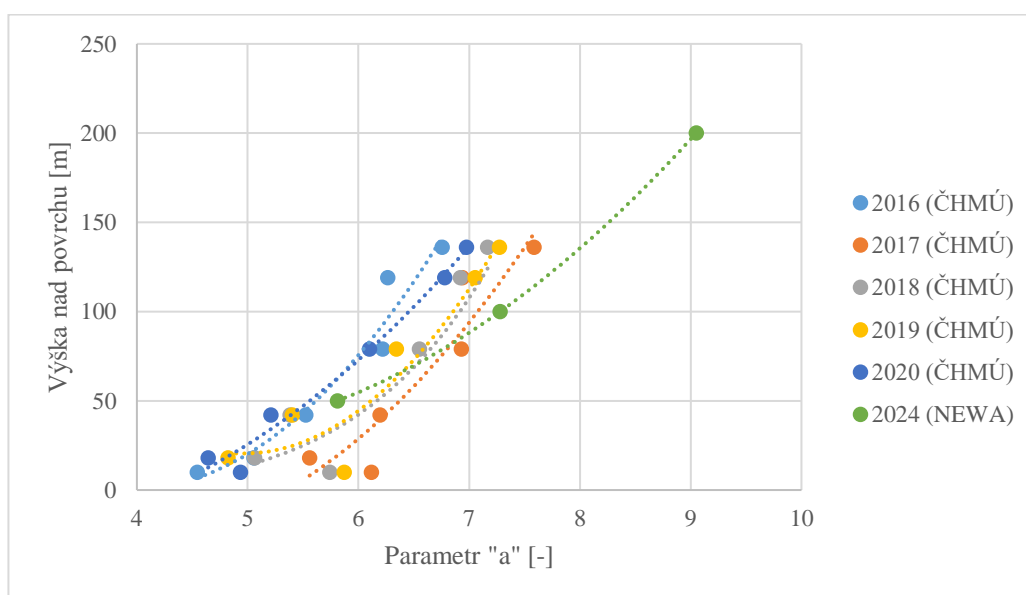
Tab. 14 Průměrné hodnoty parametru „b“ za pětiletí (2016-2020) v místě stanice Dukovany.

b	10 m	18 m	42 m	79 m	119 m	136 m
2016-2020	1.8589	1.8183	1.8881	2.0117	2.0656	2.0938

V rámci Dukovan již však z důvodu meziročního rozptylu závislostí nelze považovat průměrné hodnoty za reprezentativní. Pro konzistenci výsledků byly ale vykresleny i porovnání hodnot průměrných. Srovnání parametrů „a“ je pak možné pozorovat na Obr. 30 a Obr. 31. Porovnání parametrů „b“ je pak zobrazeno na Obr. 32 a Obr. 33.

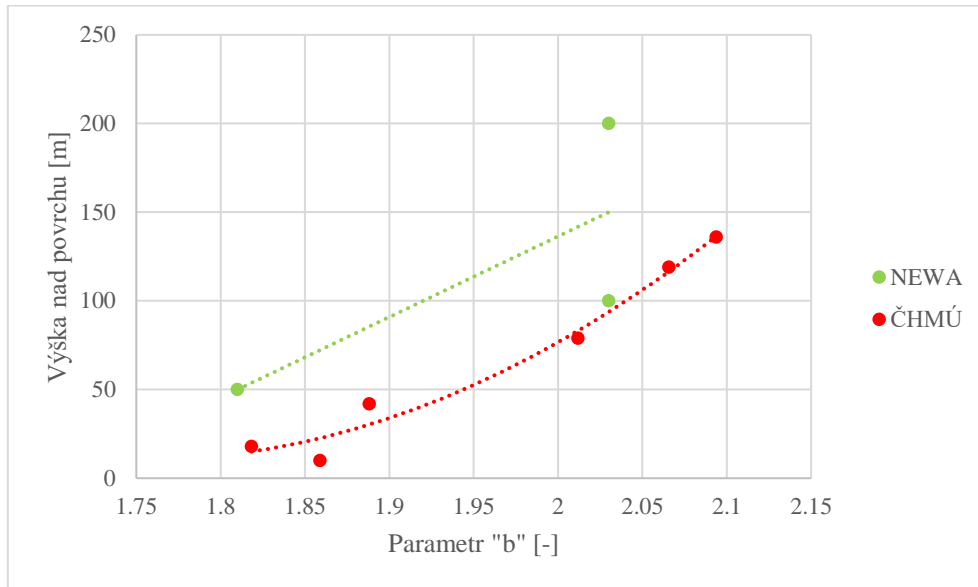


Obr. 30 Porovnání parametru „a“ vůči průměrným hodnotám za pětiletí (2016-2020) v místě měřicí stanice Dukovany.

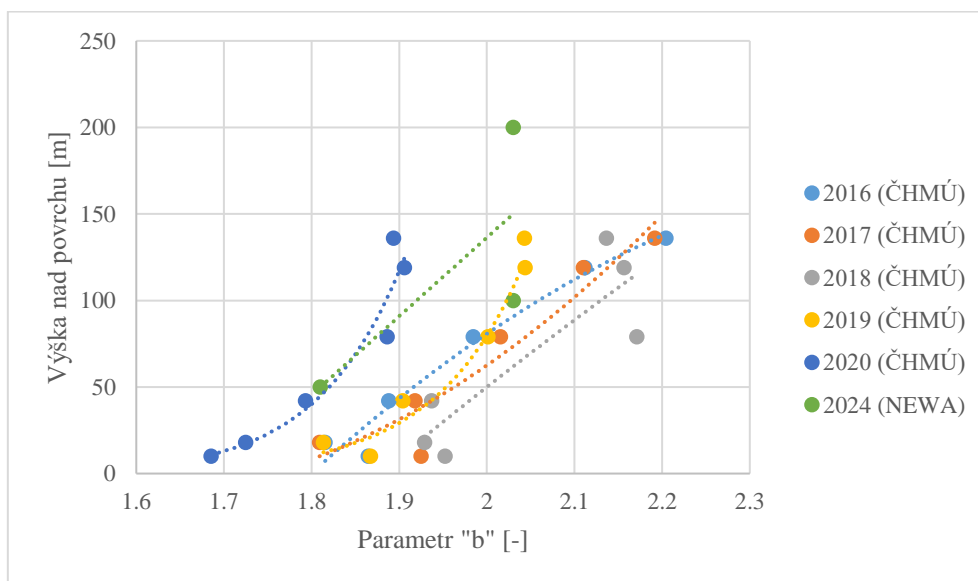


Obr. 31 Porovnání parametru „a“ vůči meziročním hodnotám v místě měřicí stanice Dukovany.

Tak jako v případě Košetic, i v situaci Dukovan, je z Obr. 31 zřejmé, že online modelový nástroj lehce nadhodnocuje velikost parametru „a“ v závislosti na výšce nad povrchem Země. Z důvodu většího meziročního rozptylu hodnot však závislost parametru „a“ z online větrné mapy mezi závislosti hodnot naměřených do intervalu poměrně sedí. Lze tedy konstatovat, že odchylkami naměřených hodnot jsou hodnoty online nástroje relativně velmi výstižné.



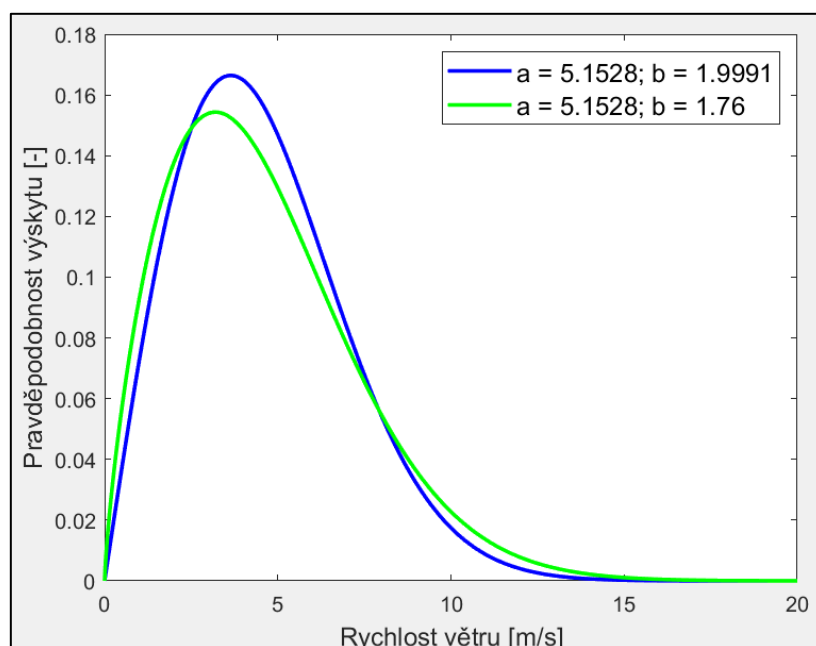
Obr. 32 Porovnání parametru „b“ vůči průměrným hodnotám za pětiletí (2016-2020) v místě měřicí stanice Dukovany.



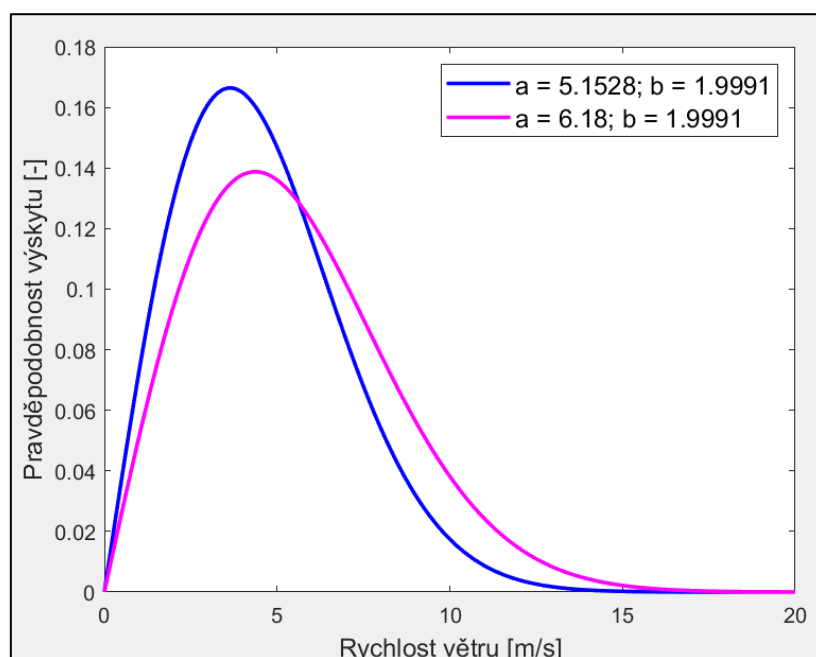
Obr. 33 Porovnání parametru „b“ vůči meziročním hodnotám v místě měřicí stanice Dukovany.

Ačkoliv se v případě Košetic závislosti dat online a dat naměřených, parametru „b“ téměř shodovaly, v případě Dukovan tomu tak kvůli meziročnímu rozptylu již není. Obecný průběh hodnot parametru „b“ by ale skutečnost z Košetic potvrzovat měl, jelikož k nárůstu a následnému poklesu by okolo výšky 200 metrů docházet mělo, alespoň dle predikce větrného atlasu. Je rovněž možné, že pokud by online větrná mapa disponovala větší rozmanitostí výšek, závislost by se mohla přiblížit závislostem z dat naměřených. Obecně by se ale dalo pojednávat o velmi lehkém podhodnocení parametru online větrným modelem.

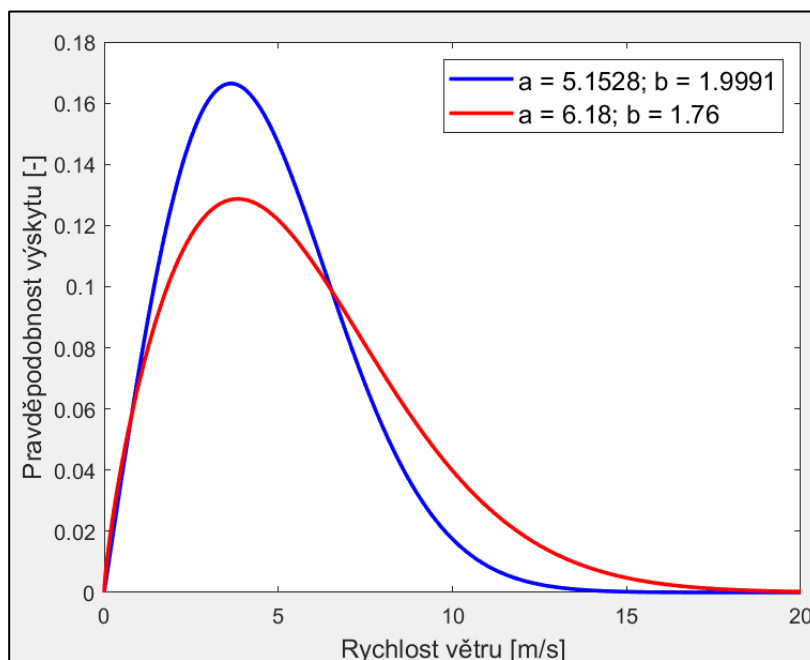
Nadhodnocení parametru „a“ a lehké podhodnocení parametru „b“ může znít poměrně abstraktně. Pro bližší pochopení tak byly vykresleny vlivy těchto změn na tvar a polohu Weibullový funkce do Obr. 34, Obr. 35 a Obr. 36. Pro reprezentativní ukázkou byla zvolena stanice Košetice, která disponuje stálostí větrných podmínek v jejím okolí. Jedinou výškou nad povrchem, se kterou se naměřené hodnoty Košetice s hodnotami větrného atlasu shodovaly byla výška 50 metrů, a proto tak byla zvolena za ukázkovou. Dle ní tak byly, pro jednoduchost, zvoleny průměrné hodnoty parametrů „a“ a „b“ za pětiletí (2016-2020) jako referenční. Referenční křivka je vykreslena modře. Křivka zelená pak vyjadřuje vliv lehkého podhodnocení parametru „b“ (Obr. 34), křivka růžová následně reprezentuje nadhodnocení parametru „a“ (Obr. 35) a křivka červená je nakonec výsledkem zahrnutí obou vlivů (Obr. 36).



Obr. 34 Vliv lehkého podhodnocení parametru „b.“



Obr. 35 Vliv nadhodnocení parametru „a.“



Obr. 36 Kombinace podhodnocení parametru „b“ a nadhodnocení parametru „a.“

Lze tedy na Obr. 36 pozorovat, že nadhodnocení parametru „a“ a podhodnocení parametru „b“ zvyšuje výskyt vysokých rychlostí větru, což energetický potenciál lokality může výrazně zvýšit, jelikož energie větru je závislá na jeho třetí mocnině.

3.3.2 Větrné podmínky ve výšce 10 metrů

Po seskupení parametrů Weibullovy funkce z dat poskytnutých ČHMÚ a dat tří dostupných závěrečných prací byla pro všechny patřičné lokality vytažena data z online větrné mapy „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny.“ Všechny hodnoty byly poté sepsány do tabulky a vypočtena jejich procentuální chybovost. Tuto skutečnost zobrazuje následujících osm dílčích tabulek, každá pro jednotlivou lokalitu. Znaménko „+“ v nich značí nadhodnocení, „-“ zase podhodnocení.

Tab. 15 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřící stanice Košetice.

Oblast	Období	Zdroj	a	b	Chybovost a [%]	Chybovost b [%]
Košetice	2016	ČHMÚ	3.5794	1.6866	+10.96	+8.34
	2017	ČHMÚ	3.7652	1.8412	+6.34	-0.07
	2018	ČHMÚ	3.622	1.7779	+9.90	+3.38
	2019	ČHMÚ	3.8301	1.7576	+4.72	+4.48
	2020	ČHMÚ	3.7014	1.7423	+7.93	+5.31
	2022	Bc. Lucie Rymešová	3.7274	1.6544	+7.28	+10.09
	2024	ÚFA AV ČR	4.02	1.84		

Tab. 16 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřící stanice Dukovany.

Oblast	Období	Zdroj	a	b	Chybovost a [%]	Chybovost b [%]
Dukovany	2016	ČHMÚ	4.5457	1.8646	-16.26	-2.45
	2017	ČHMÚ	6.1163	1.9248	-56.43	-5.76
	2018	ČHMÚ	5.742	1.9523	-46.85	-7.27
	2019	ČHMÚ	5.8703	1.8674	-50.14	-2.60
	2020	ČHMÚ	4.9351	1.6854	-26.22	+7.40
	2024	ÚFA AV ČR	3.91	1.82		

Tab. 17 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřící stanice Brno-Žabovřesky.

Oblast	Období	Zdroj	a	b	Chybovost a [%]	Chybovost b [%]
Brno-Žabovřesky	2019	Ing. Jakub Linda	3.044	1.936	+0.85	-15.93
	2024	ÚFA AV ČR	3.07	1.67		

Tab. 18 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřící stanice Troubsko.

Oblast	Období	Zdroj	a	b	Chybovost a [%]	Chybovost b [%]
Troubsko	2019	Ing. Jakub Linda	2.909	1.937	+14.19	-5.85
	2024	ÚFA AV ČR	3.39	1.83		

Tab. 19 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice Kuchařovice.

Oblast	Období	Zdroj	a	b	Chybovost a [%]	Chybovost b [%]
Kuchařovice	2022	Bc. Lucie Rymešová	4.2969	1.749	-11.61	+1.19
	2024	ÚFA AV ČR	3.85	1.77		

Tab. 20 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice České Budějovice.

Oblast	Období	Zdroj	a	b	Chybovost a [%]	Chybovost b [%]
České Budějovice	2022	Bc. Lucie Rymešová	2.3503	1.6625	+25.39	+9.15
	2024	ÚFA AV ČR	3.15	1.83		

Tab. 21 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice Tušimice.

Oblast	Období	Zdroj	a	b	Chybovost a [%]	Chybovost b [%]
Tušimice	2022	Bc. Lucie Rymešová	3.1762	1.5747	-12.63	-21.13
	2024	ÚFA AV ČR	2.82	1.3		

Tab. 22 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice Lednice.

Oblast	Období	Zdroj	a	b	Chybovost a [%]	Chybovost b [%]
Lednice	2019	Ing. David Ondráček	3.357	2.137	+4.36	-19.39
	2024	ÚFA AV ČR	3.51	1.79		

V lokalitě stanice Košetice je možnost nejširšího srovnání. Lze totiž porovnat hodnoty nejen z pětiletí 2016-2020, ale díky datům paní Bc. Lucie Rymešové jsou dostupná data i z roku 2022. Při porovnání dat s online modelovým nástrojem se chybovost neboli procentuální odlišnost obou parametrů pohybovala maximálně v jednotkách procent, přičemž se jednalo téměř výhradně o nadhodnocení parametrů.

Dukovany v tomto srovnání obstály ze všech stanic nejhůř. Parametr „b“ byl sice pouze velmi lehce podhodnocen (jednotky procent), avšak chybovost parametru „a“ nabývala podhodnocení dosahujících až 50 %. Nicméně, jak bylo již z meziročních změn patrné, v lokalitě Dukovany dochází ke znatelným změnám povětrnostních podmínek skrze roky, a výsledek porovnání odlišných let tak mohl být poměrně očekáván. Srovnání parametru „a“ v lokalitě této stanice, hovoří tedy pouze o nesouladu hodnot. Parametr „b“ pak zastupuje podstatnější funkci, jelikož výsledek jeho srovnání potvrzuje lehké odchylky, které byly konstatovány předchozím porovnáním (Košetice).

Odhad parametru „a“ v lokalitě stanice Brno-Žabovřesky, s nadhodnocením pod 1 %, byl nejlepším odhadem vůbec. Podhodnocení parametru „b“ však dosáhlo nad 15 %. Tato vysoká nepřesnost bude nejpravděpodobněji způsobena špatným odhadem členitosti zastavěné oblasti nebo turbulencemi, vlivem umístění stanice v městské části.

Stanice Troubsko vykázala přesně opačných výsledků než stanice Brno-Žabovřesky. Parametr „a“ tedy dosáhl významného nadhodnocení a parametr „b“ tak lehkého podhodnocení. Ačkoliv se stanice nachází také blízkosti města Brna, oblast lze již nazvat spíše vesnickou než městskou a odhady parametrů se tedy významně liší.

Tak jako odhad pro lokalitu Košetic, i Kuchařovice se dočkaly poměrně dobrého odhadu parametrů. Větrná online mapa tedy ani v tomto případě nebyla daleko od reality. Parametr „a“ zde nabyl podhodnocení a parametr „b“ lehkého nadhodnocení.

V lokalitě měřicí stanice České Budějovice bude, podobně jako v Dukovanech, docházet je změnám povětrnostních vlivů, jelikož i v tomto případě dochází k velmi znatelné chybovosti parametru „a“ a lehké chybovosti parametru „b.“ Směry odchylek však nabývají opačných směrů.

Jako oblast stanice Tušimice, i oblast stanice Lednice vykazuje podobné, a poměrně významné, podhodnocení parametru „b.“ V parametru „a“ se již však liší, jelikož Tušimice jej mají lehce podhodnocen, zatímco Lednice jej má velmi mírně nadhodnocen.

3.4 Vyhodnocení a poznatky

Zpracování dat a jejich porovnání přineslo přehled meziročních změn závislosti parametrů Weibullové funkce v závislosti na rostoucí výšce od zemského povrchu a také vneslo náhled do přesností predikcí online větrných map.

V měřicí stanici Košetic se meziročně data téměř nemění. Pokud je tedy vyřazena možnost stálé výchylky skrze celé pětiletí (2016-2020), lze říci, že měření této stanice je velmi konzistentní, a tedy výhodné, pro porovnání (případně i kalibraci) simulačních nástrojů. Stanice Dukovany stejných kvalit nevykázala, alespoň co se týče parametru „a.“ Vzhledem k úzké spojitosti tohoto parametru se střední hodnotou rychlosti větru, v důsledku významných meziročních změn povětrnostních podmínek v této lokalitě, není ani vhodné parametr „a“ porovnávat, jelikož by tato srovnání nepřinesla žádný relevantní výsledek. Parametr „b“ však již relevantní je a jeho závislosti již uváženy byly. Lokalita Košetic tedy vyhodnotila odhad parametru „a“ modelového online nástroje „New European Wind Atlas“ jako mírně nadhodnocující. Obě lokality, Košetic i Dukovany, pak potvrdily odhad parametru „b“ jako mírně podhodnocující. O odchylky se však jednalo vždy relativně lehké, proto lze větrnou mapu „New European Wind Atlas“ považovat za relativně obstojnou.

Pro porovnání větrné mapy „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny“ bylo, díky dostupnosti dat závěrečných prací z dřívějších let, zvoleno více lokalit. Vzhledem k tomu, že se měřicí stanice Košetic ukázala v předchozí části jako nejreprezentativnější, bude porovnání s touto stanicí to výchozí. Lokalita stanice Košetic vykázala velmi mírné nadhodnocení obou parametrů s odchylkami menšími než v případě mapy „New European Wind Atlas.“ Dle této skutečnosti by se dala stanovit přesnost odhadu simulačního nástroje „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny“ za velmi spolehlivou. Tento fakt však narušují všechna ostatní porovnání, která vykazují ve všech případech odlišných výsledků. Chybovost v Dukovanech lze zdůvodnit změnami povětrnostních podmínek, v místě Brno-Žabovřesky bude mít vliv zastavba městské oblasti, příměstskou oblast Troubska budou muset ovlivňovat rovněž změny povětrnostních podmínek, Tušimice bude muset ovlivňovat blízká uhelná elektrárna a lokalitu Lednice pak zastavěná část obce. Jedinou stanicí, která se přiblížila k podobným výsledkům jako při porovnání s Košeticemi, byla měřicí stanice Kuchařovice. Anomálií by pak mohly být České Budějovice, které mají paradoxně větší odchylku parametru „a“ než parametru „b“, ačkoliv se stanice nachází v městské části. Vlivem budou tedy možné změny povětrnostních podmínek. Zmíněné faktory, které mohly pravděpodobně ovlivnit odchylku predikce větrné mapy jsou rovněž pouhými odhady. Je třeba však neopomenout možné meziroční změny v lokalitách o jednom páru parametrů a pro přesnější zhodnocení přesnosti odhadu porovnat

tak větší soubory dat pro jednotlivé lokality. To je však již nad rámec této práce a nad relevanci vyhodnocení spolehlivosti predikce simulačního nástroje „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny“ lze tedy momentálně jen polemizovat.

Je tedy možné konstatovat, že větrné mapy mohou fungovat jako relativně slušný nástroj pro zjištění větrného potenciálu libovolné lokality. Jelikož však nejsou schopny zohlednit kompletně všechny vlivy, specifické pro danou lokalitu (turbulence, překážky apod.), nejsou tak vždy spolehlivé, a je nutné brát jejich výsledky pouze za orientační.

ZÁVĚR

Práce se zaměřila na analýzu přesnosti predikcí simulačních nástrojů větrného potenciálu v lokalitách České republiky. Lokality představovaly místa měřících stanic ČHMÚ, které disponovaly měřeními rychlostí větru v nižších výškách nad zemským povrchem, jelikož se právě tyto výšky jeví jako potenciálně prosperitní.

První část práce položila základ znalostem problematiky větru a objasnila tak pojmy podstatné pro porozumění konstrukci větrných map a pochopení myšlenkových pochodů, jež byl užity při porovnávání dat v závěrečné části práce. Kapitola je přínosná nejen pro pochopení celé této práce, ale přináší povědomí i o samotném vzniku větru, který je jedním ze základních jevů na Zemi, což již samo o sobě rozšiřuje přehled o tom, jak naše planeta funguje.

Druhá část představila metodiku tvorby online modelových nástrojů a osvětlila její komplexnost. Z přehledu všech metod lze pozorovat, že nejlepších výsledků je dosahováno kombinací statických a dynamických modelů. Vyzdvihnout je zde vhodné model WASP od dánského institutu Risø National Laboratory, jelikož je jako součást kombinací nejpoužívanějším modelem ve svém oboru.

Ve třetí části práce nakonec došlo ke srovnání meziročních změn naměřených dat a jejich porovnání s daty predikovanými. K porovnání byly využity parametry Weibullový funkce, jelikož prostřednictvím vykreslených závislostí na rostoucí výšce nad zemským povrchem právě těchto parametrů lze porovnat všechna data, nezávisle na tom, v jak rozdílných výškách byla měřena.

Meziroční změny byly kvalitním faktorem pro vyhodnocení reprezentativnosti lokalit pro následné porovnání s větrnou mapou „New European Wind Atlas.“ Samotné srovnání přineslo vyhodnocení tohoto simulačního nástroje, i přes lehká nadhodnocení středních hodnot rychlostí větru a mírná podhodnocení orografie, jako relativně obstojného.

Porovnání větrné mapy „Větrné podmínky ve výšce 10 metrů, podmínky pro malé větrné elektrárny“ mohlo dojít k podobnému výsledku jako srovnání předchozí. Pro profesionálnější přístup bylo zvoleno více lokalit. Všechny lokality však nedisponovaly dostatečně dlouhodobými datovými soubory, a proto docházelo k významným odchylkám, jejichž příčiny bylo možné pouze odhadnout. Bylo by možné vyhodnotit tuto větrnou mapu jako ještě možná spolehlivější než mapu předchozí, jelikož orografii predikuje s velmi mírným nadhodnocením či podhodnocením (srovnatelné) a průměrnou hodnotu rychlosti větru nadhodnocuje ještě méně (přijatelnější). To by však platilo pouze pro stanice s dostupnými dlouhodobými měřeními (Košetice a Dukovany) a zanedbáno by tak bylo šest zbylých zvolených stanic. Pro zachování profesionality je tento přístup nepřijatelný a před definitivním vyhodnocením je tak doporučeno dalších analýz, které však přesahují rámec této práce.

Ukázalo se tedy, že online simulační nástroje dokážou poskytnout celkem relevantní informace o větrném potenciálu. Tato alternativa je rychlejší a efektivnější, avšak samotné vyhodnocení větrného potenciálu lokality má na návrh větrné turbíny tak podstatný vliv, že pro výpočet je stále potřebné užívat hodnot získaných z reálných dlouhodobých spolehlivých měření a brát tak predikované hodnoty spíše za orientační.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KAŠPAR, František. *Větrné motory a elektrárny*. Sv.1. Praha: Elektrotechnický svaz československý, 1948. Dostupné také z: <https://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:a6afd710-f132-11e7-8226-005056827e52>
- [2] RUDA, Aleš. Meteorologické prvky a jejich klimatologické charakteristiky. In: *Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity* [online]. 2014 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/03-prvky.html#proudeni
- [3] ŽÁK, Michal. Proč fouká a jak vzniká vítr? In: *In-počasi* [online]. 2015 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vitr-jak-vznika/>
- [4] KRÁLOVÁ, Magda. Všeobecná (planetární) cirkulace vzduchu. In: *Eduportál Techmania* [online]. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/meteorologie/vseobecna-planetarni-cirkulace-vzduchu>
- [5] ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru. *Transformační technologie* [online]. 2006-10. Brno: Jiří Škorpík [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/04.html>
- [6] ČESKÁ METEOROLOGICKÁ SPOLEČNOST. *Elektronický meteorologický slovník* [online]. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/780>
- [7] Beaufortova stupnice účinků větru. In: *TZB-info* [online]. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/101-beaufortova-stupnice-ucinku-vetru>
- [8] CETKOVSKÝ, Stanislav, Bohumil FRANTÁL, Josef ŠTEKL, et al. Větrná energie v České republice: hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí. *Studia Geographica 101*. Brno: Ústav geoniky AV ČR, 2010. ISBN 978-80-86407-84-5. ISSN 0587-1247. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/profile/Bohumil-Frantal/publication/47058785_Vetrna_energie_v_Ceske_republice_hodnoceni_prostorovych_vztahu_environmentalnich_aspektu_a_socioekonomickych_souvislosti/links/5a24fc35aca2727dd87e709e/Vetrna-energie-v-Ceske-republice-hodnoceni-prostorovych-vztahu-environmentalnich-aspektu-a-socioekonomickych-souvislosti.pdf
- [9] HANSLIAN, David, Jiří HOŠEK, Zuzana CHLÁDOVÁ a Lukáš POP. Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem II. In: *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9800-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-ii>
- [10] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. 1997. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1563-7.
- [11] BUKALA, Jakub, Krzysztof DAMAZIAK, Krzysztof KROSZCZYNSKI, Marcin KRZESZOWIEC a Jerzy MALACHOWSKI. Investigation of parameters influencing the efficiency of small wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [online]. 2015, **146**, 29-38 [cit. 2024-05-19]. ISSN 0167-6105. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610515001555?via%3Dihub>
- [12] *Větrné podmínky ve výšce 10 m, podmínky pro malé větrné elektrárny* [online]. Ústav fyziky atmosféry AV ČR, 2016 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/#>

- [13] *New European Wind Atlas* [online]. NEWA Consortium, 2019 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://map.neweuropeanwindatlas.eu/>
- [14] HANSLIAN, David a Jiří HOŠEK. Combining the VAS 3D interpolation method and Wind Atlas methodology to produce a high-resolution wind resource map for the Czech Republic. *Renewable Energy* [online]. 2015, **77**, 291-299 [cit. 2024-05-18]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114008398>
- [15] HANSLIAN, David, Zuzana CHLÁDOVÁ, Lukáš POP a Jiří HOŠEK. Modely pro konstrukci větrných map ČR. *Meteorologické zprávy* [online]. 2012, **65**(2), 33-58 [cit. 2024-05-23]. ISSN 0026-1173. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2012/Meteo-2012-02.pdf>
- [16] HANSLIAN, David, Jiří HOŠEK, Zuzana CHLÁDOVÁ a Lukáš POP. Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem I. In: *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9770-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-i>
- [17] HANSLIAN, David, Jiří HOŠEK, Jacek KERUM, Jaroslav SVOBODA a Josef ŠTEKL. Výzkum vhodnosti lokalit v ČR z hlediska zásob větrné energie a zpracování metodiky pro posuzovací a schvalovací řízení při zavádění větrných elektráren. *Závěrečná zpráva projektu VaV/320/08/03* [online]. 2004, 4-55 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.ufa.cas.cz/DATA/vetrna-energie/vav/zprava.pdf>
- [18] ZEMÁNKOVÁ, Kateřina, Jan BEDNÁŘ, Josef BRECHLER a Peter HUSZÁR. Výpočty koncentrací přízemního ozonu na území ČR pomocí modelu CAMx s přihlédnutím ke vlivu biogenních těkavých organických látek. *Meteorologické zprávy* [online]. 2011, **64**(3), 65-95 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2011/Meteo-2011-03.pdf>
- [19] POWERS, Jordan G., Joseph B. KLEMP, William C. SKAMAROCK, et al. The Weather Research and Forecasting (WRF) Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017, **98**(8). Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/312076325_The_Weather_Research_and_Forecasting_WRF_Model_Overview_System_Efforts_and_Future_Directions
- [20] DÖRENKÄMPER, Martin, Bjarke T. OLSEN, Björn WITHA, et al. The Making of the New European Wind Atlas – Part 2: Production and evaluation. *Geoscientific Model Development* [online]. European geosciences union, 2020, **13**(10), 5079-5102 [cit. 2024-05-18]. ISSN 1991-959X. Dostupné z: <https://gmd.copernicus.org/articles/13/5079/2020/>
- [21] PALLA, Miloš a Miroslav OPL. Selsyny. *ELUC* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/808>
- [22] *Mapy.cz* [online]. Seznam.cz [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://mapy.cz>
- [23] LINDA, Jakub. *Větrné stroje pro obydlené oblasti*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [24] RYMEŠOVÁ, Lucie. *Sezonní výkyvy v dodávkách energie z obnovitelných zdrojů*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [25] ONDRÁČEK, David. *Malé větrné turbíny v městském prostředí*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
\bar{v}	<i>Střední hodnota rychlosti</i>	<i>m/s</i>
$\overline{v_0}$	<i>Střední hodnota nulové rychlosti</i>	<i>m/s</i>
h	<i>Výška</i>	<i>m</i>
h_0	<i>Nulová výška</i>	<i>m</i>
Zkratka	Vysvětlení	
<i>MMM</i>	<i>Mezoměřítkový meteorologický model</i>	
<i>ČHMÚ</i>	<i>Český hydrometeorologický model</i>	
<i>NEWA</i>	<i>New European Wind Atlas</i>	
<i>ÚFA</i>	<i>Ústav fyziky atmosféry</i>	

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Elementární planetární cirkulace vzduchu (vlevo), Skutečná planetární cirkulace (vpravo). [4]
- Obr. 2 Weibullovo rozdělení. [8]
- Obr. 3 Změna parametru „a“ při konstantní hodnotě parametru „b = 2.3.“
- Obr. 4 Změna parametru „b“ při konstantní hodnotě parametru „a = 6.“
- Obr. 5 Větrná růžice; upraveno. [9]
- Obr. 6 Změna rychlostního profilu větru v závislosti na drsnosti povrchu: a) změna z hladkého na drsný, b) změna z drsného na hladký. [10]
- Obr. 7 Vznik turbulencí vlivem překážek. [11]
- Obr. 8 První větrná mapa České republiky (model VAS 1 v 10 m nad povrchem). [15]
- Obr. 9 Model VAS 2 (průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem – 2002). [15]
- Obr. 10 Ukázka podrobného plošného výpočtu modelem WAsP (průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem). [15]
- Obr. 11 Model VAS/WAsP po aplikaci metody VAS (průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem). [14]
- Obr. 12 Model VAS/WAsP (průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem). [14]
- Obr. 13 Výsledek interpolace metodou VAS v rámci metody VAS/WAsP 1 v 10 m nad povrchem (2004). [15]
- Obr. 14 Výsledek interpolace metodou VAS v rámci metody VAS/WAsP 2 v 10 m nad povrchem (2007). [15]
- Obr. 15 Průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem (model PIAP); sloučeno. [17]
- Obr. 16 Průměrná rychlost větru v 10 m nad povrchem (kombinace VAS/WAsP a PIAP). [16]
- Obr. 17 Rozdělení do podoblastí pro konstrukci větrné mapy s vysokým rozlišením. [20]
- Obr. 18 „New European Wind Atlas.“ [13]
- Obr. 19 Umístění vybraných měřicích stanic: Košetice (1) a Dukovany (2). [22]
- Obr. 20 Detail umístění měřicí stanice Košetice (1). [22]
- Obr. 21 Detail umístění měřicí stanice Dukovany (2). [22]
- Obr. 22 Meziroční změny parametru Weibullovovy funkce „a“ v místě stanice Košetice.
- Obr. 23 Meziroční změny parametru Weibullovovy funkce „b“ v místě stanice Košetice.
- Obr. 24 Meziroční změny parametru Weibullovovy funkce „a“ v místě stanice Dukovany.
- Obr. 25 Meziroční změny parametru Weibullovovy funkce „b“ v místě stanice Dukovany.
- Obr. 26 Porovnání parametru „a“ vůči průměrným hodnotám za pětiletí (2016-2020) v místě měřicí stanice Košetice.
- Obr. 27 Porovnání parametru „a“ vůči meziročním hodnotám v místě měřicí stanice Košetice.
- Obr. 28 Porovnání parametru „b“ vůči průměrným hodnotám za pětiletí (2016-2020) v místě měřicí stanice Košetice.
- Obr. 29 Porovnání parametru „b“ vůči meziročním hodnotám v místě měřicí stanice Košetice.
- Obr. 30 Porovnání parametru „a“ vůči průměrným hodnotám za pětiletí (2016-2020) v místě měřicí stanice Dukovany.
- Obr. 31 Porovnání parametru „a“ vůči meziročním hodnotám v místě měřicí stanice Dukovany.
- Obr. 32 Porovnání parametru „b“ vůči průměrným hodnotám za pětiletí (2016-2020) v místě měřicí stanice Dukovany.
- Obr. 33 Porovnání parametru „b“ vůči meziročním hodnotám v místě měřicí stanice Dukovany.
- Obr. 34 Vliv lehkého podhodnocení parametru „b.“
- Obr. 35 Vliv nadhodnocení parametru „a.“
- Obr. 36 Kombinace podhodnocení parametru „b“ a nadhodnocení parametru „a.“

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1 Beaufortova stupnice účinků větru; upraveno. [7]
Tab. 2 Hodnoty exponentu n dle typu povrchu; upraveno. [10]
Tab. 3 Parametr Weibullovovy funkce „a“ v místě stanice Košetice.
Tab. 4 Parametr Weibullovovy funkce „b“ v místě stanice Košetice.
Tab. 5 Parametr Weibullovovy funkce „a“ v místě stanice Dukovany.
Tab. 6 Parametr Weibullovovy funkce „b“ v místě stanice Dukovany.
Tab. 7 Hodnoty parametru „a“ z online větrné mapy v místě stanice Košetice.
Tab. 8 Hodnoty parametru „b“ z online větrné mapy v místě stanice Košetice.
Tab. 9 Průměrné hodnoty parametru „a“ za pětiletí (2016-2020) v místě stanice Košetice.
Tab. 10 Průměrné hodnoty parametru „b“ za pětiletí (2016-2020) v místě stanice Košetice.
Tab. 11 Hodnoty parametru „a“ z online větrné mapy v místě stanice Košetice.
Tab. 12 Hodnoty parametru „b“ z online větrné mapy v místě stanice Košetice.
Tab. 13 Průměrné hodnoty parametru „a“ za pětiletí (2016-2020) v místě stanice Dukovany.
Tab. 14 Průměrné hodnoty parametru „b“ za pětiletí (2016-2020) v místě stanice Dukovany.
Tab. 15 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice Košetice.
Tab. 16 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice Dukovany.
Tab. 17 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice Brno-Žabovřesky.
Tab. 18 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice Troubsko.
Tab. 19 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice Kuchařovice.
Tab. 20 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice České Budějovice.
Tab. 21 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice Tušimice.
Tab. 22 Porovnání parametrů „a“ a „b“ prostřednictvím chybovosti v lokalitě měřicí stanice Lednice.