

METEOROLOGICKÉ ZPRÁVY

Meteorological Bulletin

ROČNÍK 67 (2014)

V PRAZE DNE 29. ZÁŘÍ 2014

ČÍSLO 4

VĚTRNÁ MAPA ČESKÉ REPUBLIKY PRO VÝŠKU 100 M NAD ZEMSKÝM POVRCHEM

David Hanslian, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., Boční II 1401, 141 31, Praha 4 / Katedra meteorologie a ochrany prostředí MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, hanslian@ufa.cas.cz)

Jiří Hošek, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., Boční II 1401, 141 31, Praha 4

Zuzana Chládová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., Boční II 1401, 141 31, Praha 4

Lukáš Pop, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., Boční II 1401, 141 31, Praha 4 / Katedra meteorologie a ochrany prostředí MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8

Wind map of the Czech Republic for the height of 100 m above surface. The wind map of the Czech Republic at a height of 100 m above surface was calculated for the purpose of wind energy potential evaluation. The applied approach combines the abilities of three models: the VAS statistical method, the WASP program and model designed for applications in wind energy, and the PIAP numerical flow model. The individual models were described in the preceding article (Hanslian et al. 2012). The calculations were performed individually for the „hybrid model“ VAS/WASP, which combines the VAS method and the WASP model, and for the PIAP model. The final wind map is a combination of those two results in the ratio of 7:3. The results of PIAP were originally taken from a height of 10 m and were re-calculated for a 100 m height by the WASP model. The highest possible number of available wind measurements in the Czech Republic were taken into account during the calculation of the VAS/WASP model, including the measurements on temporary wind masts and the wind data from automated emission monitoring (AEM) stations. A verification of the wind map using new independent wind measurements, obtained after the wind map calculation, was performed as well.

KLÍČOVÁ SLOVA: větrná mapa – průměrná rychlost větru – model mezní vrstvy atmosféry – model PIAP – model VAS/WASP – model WASP – Česká republika

KEYWORDS: wind map – average wind speed – boundary layer model – PIAP model – VAS/WASP model – WASP model – Czech Republic

1. ÚVOD

V předchozím příspěvku v Meteorologických zprávách (Hanslian et al. 2012) byly popsány modely a metody využívané v Ústavu fyziky atmosféry pro výpočet rychlosti větru nad územím České republiky. Jedná se o interpolační metodu VAS (Sokol, Štekl 1994; Sokol, Štekl 1995), aplikovaný model a program WASP (Troen, Petersen 1989), dynamický model PIAP (Svoboda 1990; Svoboda, Štekl 1994; Svoboda et al. 2013) a tzv. hybridní model VAS/WASP (Hanslian et al. 2012) kombinující první dvě zmíněné metody. Na základě těchto postupů bylo od počátku 90. let vytvořeno několik generací tzv. větrných map, které měly za cíl plošně znázornit průměrnou rychlost větru nad územím ČR.

Zatímco první větrné mapy vytvořené metodou interpolace mezi měřeními na meteorologických stanicích bylo možno pokládat za spíše orientační odhady rozložení větrných podmínek v různých částech České republiky, v pozdějších letech začaly být používány modely WASP, PIAP a navzájem též VAS/WASP, které podrobněji simulují proudění nad konkrétními tvary zemského povrchu. Přestože tyto modely dává

jí, ve srovnání s prostým využitím interpolačních metod, realističtější obraz rozložení větrných podmínek, jejich výsledky stále obsahují nezanedbatelné nepřesnosti, částečně systematického charakteru. Protože systematické chyby lze vhodnými postupy částečně, nebo zcela eliminovat, byla snaha o další zpřesnění namířena do značné míry tímto směrem.

Výpočet dosud poslední větrné mapy České republiky byl proveden v roce 2007, přičemž impulzem byly zakázky společnosti Česká přenosová soustava, a. s. (ČEPS) na zjištění technického a realizovatelného potenciálu větrné energie v České republice (Hanslian et al. 2008; Hanslian, Pop 2008; Hanslian 2011). Pro odhad větrného potenciálu bylo nutné mít co nejlepší představu o větrných podmínkách na území ČR v detailním prostorovém rozlišení a ve výšce rotorů větrných elektráren. Jako základní výška nad zemským povrchem proto byla zvolena hladina 100 m. Dodatečně byl proveden též výpočet ve výšce 10 m nad zemí, která odpovídá měřením na standardních meteorologických stanicích; v oblasti větrné energetiky je reprezentativní pro segment tzv. malých větr-



Obr. 1 Typické efekty ovlivňující naměřené rychlosti větru na profesionální meteorologické stanici (Kuchařovice). Umístění anemometru nad střechou domu vede k nadhodnocení naměřených rychlostí větru, naměřené větrné podmínky jsou dále mírně ovlivněny lesním porostem v pozadí (tento potenciálně značný vliv je zde limitován nízkou četností proudění ve směru od lesa), blízkými stromy, měřicím stožárem a sousedním anemometrem. Při použití naměřených dat je nutno mít tyto vlivy na vědomí.

Fig. 1. The typical issues of wind measurement at a manned weather station (Kuchařovice). The anemometer position above the rooftop artificially increases the measured wind speed. The observed wind climate is also affected by the forest to the rear (its potentially strong effect is limited by the low frequency of wind direction from the forest), nearby trees, a wind mast and a parallel anemometer. These effects must be taken into account if this measurement is to be used.

ných elektráren. Tento výsledek byl publikován v samostatném článku (Hanslian et al. 2013a,b).

Cílem předkládaného článku je ukázat postup výpočtu větrné mapy ČR ve výšce 100 m. Výpočet kombinuje schopnosti modelů používaných v Ústavu fyziky atmosféry a odráží dosavadní zkušenosti s nimi. Nejprve byly nezávisle na sobě provedeny výpočty modelů PIAP a VAS/WASP pro celé území ČR, výsledky obou modelů byly následně zkombinovány a takto byla získána výsledná větrná mapa. Dosti zásadní okolností pro přesnost výsledku je správné nakládání se vstupními meteorologickými daty, proto byla poměrně velká pozornost věnována této otázce (kapitola 2). Parametry výpočetního postupu jsou podrobněji popsány v kapitole 3, kapitola 4 prezentuje finální větrnou mapu. Článek je publikován s poměrně výrazným časovým odstupem od provedení výpočtu, což umožňuje nezávislé ověření přesnosti dosaženého výsledku, které by bezprostředně po dokončení výpočtu nebylo možné (kapitola 5).

2. POUŽITÁ MĚŘENÍ VĚTRU

2.1 Přehled použitých dat

Za účelem vytvoření větrné mapy byl shromážděn co nejširší soubor větroměrných dat. Na rozdíl od předchozích prací nebyla k výpočtu využívána pouze data ze standardních meteorologických stanic, ale byly prověřeny také možnosti dalších datových zdrojů.

Profesionální meteorologické stanice tvoří páteří sítí nejdůležitějších meteorologických stanic. Měření je prováděno nejčastěji ve výšce 10 m nad zemí, výjimečně ve větší výšce, zejména při umístění nad střechou budovy stanic. Obvykle se jedná o kvalitní a dobře umístěné stanice s dlouhodobými



Obr. 2 Příklad dobrovolnické automatizované stanice (Brod nad Dyjí). Ve směru fotografie je řada domů s velkým vlivem na proudění, v okolí se nacházejí další komplexní překážky. Tato stanice je tak na hranici využitelnosti pro modelování větru.

Fig. 2. An example of an unmanned weather station (Brod nad Dyjí). The buildings in the direction of the photograph clustered together and other nearby complex obstacles will strongly alter the local wind climate. The applicability of such wind measurement for wind modeling is problematic.

řadami měření, často zde ale dochází k výskytu nehomogenit v naměřených datech (viz níže). U některých větroměrných čidel je problematické jejich umístění nad střechou budovy, kde dochází k deformaci proudění v důsledku jejího obtékání (obr. 1). Celkově bylo k dispozici 35 českých a řada zahraničních profesionálních stanic.

Dobrovolnické automatizované stanice doplňují síť profesionálních stanic. Měření je prováděno na stožáru ve standardní výšce 10 m. Problematická bývá často poloha těchto stanic, neboť se zpravidla nacházejí v blízkosti zástavby a dalších překážek (obr. 2). Většinu z nich z tohoto důvodu nelze pro výpočet použít. Také kvalita samotného měření bývá spíše nižší než u profesionálních stanic. Vzhledem k tomu, že výstavba automatizovaných stanic probíhala relativně nedávno před zpracováním větrné mapy, byly obvykle k dispozici kratší než desetileté řady měření. Celkově bylo k dispozici 71 těchto stanic.

Podrobnější informace o měření větru v síti profesionálních a automatických meteorologických stanic Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) lze najít v práci Řepky (2011).

Stanice automatizovaného imisního monitoringu (AIM) zahrnují zpravidla i senzor rychlosti a směru větru, bylo proto možné využít pro výpočet větrné mapy i je. Stanice mívají podobu typizovaného kontejneru, ke kterému je připevněn stožár s anemometrem ve standardní výšce 10 m (obr. 3). Kvalita větroměrných dat je v rámci sítě AIM dosti proměnlivá, výhodou některých stanic AIM je jejich umístění v otevřeném prostoru bez významnějších okolních překážek. Dle databáze ČHMÚ existuje 91 stanic AIM s měřením větru, z těchto stanic byla pro účely výpočtu větrné mapy získána větroměrná data 36 tzv. pozadových stanic, které bývají umístěné mimo městské aglomerace a průmyslové zóny.

Stožárová měření větru jsou používána zejména k přesnému zjištění větrných poměrů pro potřeby větrné energetiky.



Obr. 3 Stanice AIM Měděnec. Stanice nebyla použita, neboť se v jejím okolí nacházejí výhodněji umístěná měření na meteorologických stožárech.

Fig. 3. AIM station Měděnec. This wind measurement was not used, because more favourable wind measurements exist nearby.

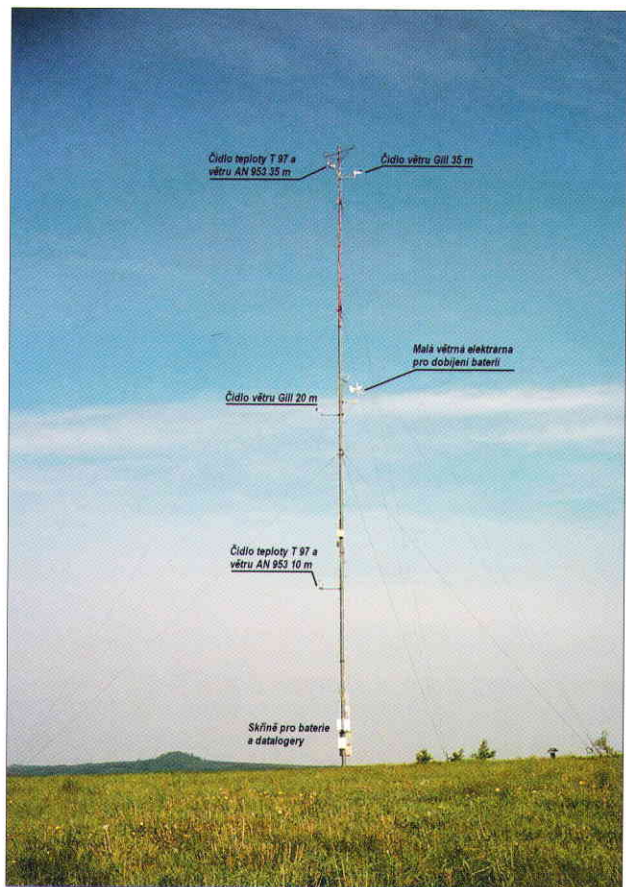
Ve standardním případě se jedná o lehké trubkové konstrukce budované pouze pro tento účel (obr. 4). Levnější alternativou je umístění senzorů na stávající objekty, zejména telekomunikační věže. V takových případech však mohou být naměřené hodnoty dosti výrazně ovlivněny deformací proudění při obtékání věže, což je zvláště problematické v případech, kdy měření probíhalo ve vzdálenější minulosti a není k dispozici fotodokumentace. Měření použitá k výpočtu probíhala v letech 1995–2006, senzory byly umístěny nejčastěji ve výškách mezi 30 a 50 metry nad zemí. Vedle větší výšky nad zemí je výhodou těchto měření jejich lokalizace zpravidla na vrcholcích kopců či na otevřených prostranstvích. Kvalita měření byla různá, u novějších měření zpravidla dobrá. Mírnou nevýhodou je krátká doba měření, typicky po dobu jednoho roku. Některá starší měření byla ukládána do datalogerů s omezenou paměťovou kapacitou, a nebyly tak k dispozici původní naměřené hodnoty, ale pouze histogramy rychlostí, případně i směru větru v jednotlivých měsících. Celkem bylo k dispozici 40 stožárových měření větru, z toho 19 s daty pouze v podobě histogramů. Celkem 10 ze stožárových měření se nacházelo v oblasti Krušných hor, neboť tato oblast byla od počátku nejvíce v ohnisku zájmu pro využití větrné energie.

Jiné typy existujících měření větru, např. v rámci silničního monitoringu či různých domácích, průmyslových či zemědělských stanic, využívány nebyly vzhledem k převážně problematické kvalitě, špatné dokumentaci a obtížné dostupnosti těchto měření.

2.2 Zpracování měření větru

2.2.1 Výběr použitých měření

Prvním krokem bylo vyhodnocení celkové využitelnosti jednotlivých měření pro simulaci větrných poměrů. V první řadě se jedná o kvalitu samotného měření. Na tu lze do jisté míry usuzovat ze statistických vlastností naměřených dat. Např. zvýšený výskyt bezvětří, četné výpadky, špatně vysvětlitelné změny průměrné rychlosti větru nebo výrazné změny v rozdělení směru či rychlosti větru jsou indikátory snížené důvěryhodnosti naměřených hodnot. Druhou zásadní



Obr. 4 Meteorologický stožár 35 m vysoký včetně popisu zařízení.

Fig. 4. Wind mast 35 m high.

okolností je umístění senzoru. Významné je jeho zcela bezprostřední okolí (negativním faktorem je např. umístění nad budovou, v zákrytu věže či ostatních senzorů), dále se jedná o výskyt překážek v okolí měřicího místa (budovy, stromy) a nakonec o celkové umístění v terénu (problematické je umístění v okolí lesních porostů, v prostoru sídel a obecně v údolních polohách). Relativně méně důležitým faktorem je délka měření, neboť i kratší měření lze prodloužit na dlouhodobější průměr, za minimum trvání měření se považuje cca jeden rok.

Zásadní podmínkou je dobrá dokumentace místa měření a případných změn, neboť pokud nejsou známa přesná umístění senzoru a charakter jeho okolí, pak nelze smysluplně odfiltrovat jejich vliv na naměřenou rychlost větru. Zdrojem informací o měřeních byla metadata ČHMÚ či příslušného poskytovatele dat (umístění stanice a její případné přesuny, výška měření, v některých případech též fotodokumentace), dále letecké snímky – ortofotomapy, které poskytují představu o rozmístění překážek v okolí stanice, a u většiny použitých měření též osobní návštěva a podrobná fotodokumentace měřicího místa.

Měření, u kterých bylo shledáno nejhorší umístění senzorů nebo u kterých byly zjištěny zásadní problémy s kvalitou naměřených dat, byla z dalšího zpracování vyřazena. Při výběru použitých měření bylo bráno v úvahu taktéž jejich rozmístění; spíše byla vyřazena taková měření, v jejichž okolí existují jiné dobře umístěné a kvalitní zdroje větrných dat, než měření, která jsou v rámci svého širšího okolí jedinečná.

Celkově bylo pro použití v modelových výpočtech, zejména v modelu VAS/WAsP, vybráno:

- 31 ze 40 dostupných profesionálních stanic (včetně 3 v blízkém zahraničí),
- 17 ze 71 automatických stanic INTER,
- 6 z 36 uvažovaných stanic AIM,
- 14 z 21 měřicích stožárů s úplnými řadami měření,
- 10 z 19 měřicích stožárů s daty ve formě histogramů.

2.2.2 Zpracování naměřených dat

V dalším kroku bylo provedeno podrobné vyhodnocení naměřených dat. V jeho rámci byly analyzovány případné nesrovnalosti, jako výpadky, nehomogenity či podezřelé chování naměřených dat.

Výskyt problémových období byl v případě měření s delšími časovými řadami víceméně pravidlem. Typickým jevem, zejména pro dobrovolnické meteorologické stanice, byl postupný pokles naměřené rychlosti větru a zvýšení počtu výskytu bezvětří cca tři roky po instalaci nového senzoru z důvodu opotřebením miskového anemometru. Dalším častým jevem byl výskyt nehomogenit, projevujících se celkovými změnami rozdělení rychlostí větru či větrných růžic. K tomu docházelo naopak více u profesionálních meteorologických stanic, zřejmě v důsledku změn v poloze senzorů či jiných změn v rámci stanice. Zejména při umístění anemometru na střeše budovy či v blízkosti jiných objektů (antény, ostatní senzory, samotný měřicí stožár) může docházet ke značným změnám naměřených hodnot i při zdánlivě nepodstatných přesunech senzoru na velmi malé vzdálenosti. Příčinou nehomogenit jsou také změny v okolí měřicího přístroje, ať již se jedná o bezprostřední okolí senzoru (okolní senzory ap.) nebo o změny v okolí meteorologické stanice (např. růst nedalekého lesa – Churáňov, Červená u Libavé ap.).

Období, která se jevila jako chybná nebo výrazně nedůvěryhodná, byla z dalšího zpracování vyřazena. Ve většině případů lze totiž získat lepší představu o větrných podmínkách lokality z relativně krátké, ale spolehlivé datové řady než z delší řady měření, obsahující zpravidla těžko odstranitelné chyby, které mohou kontaminovat kvalitnější data. Pokud došlo v průběhu měření k posunům polohy senzoru, pak byla zpracována, pokud možno, pouze měření z období, pro které byly k dispozici spolehlivé informace o umístění přístroje a dokumentace jeho okolí. Ve výsledku byly i v případě dlouhodobě měřicích stanic většinou použity jen relativně krátké úseky naměřených dat, typicky v délce 3 až 6 roků.

2.2.3 Prodloužení měření na dlouhodobý průměr

Aby data vstupující do modelového výpočtu pokrývala dostatečně dlouhou periodu, byly chybějící úseky doplněny a časové řady prodlouženy na jednotné období 1997–2006. Prodloužení (doplnění) bylo provedeno na základě referenční řady, kterou byla řada rychlostí a směru geostrofického větru v hladině 925 hPa podle reanalýz NCEP/NCAR. Výhodou použití reanalýz je, ve srovnání s měřeními na pozemních meteorologických stanicích, jejich vyšší spolehlivost z hlediska časové homogenity. Nevýhodou je relativně nízké časové a prostorové rozlišení reanalýzy, data jsou k dispozici v hrubé síti bodů a v intervalu 6 hodin, a jejich nižší míra korelace s přízemním větrem. Faktor homogenity je však pro účel prodloužení časových řad zásadnější.

V rámci použité metody je v období, kdy existují větro-
měrná data souběžně na referenční a doplňované (prodlužova-
né) časové řadě, definován statistický vztah mezi těmito řada-

mi. Ten je následně aplikován na doplňovanou (prodlužova-
nou) řadu v době, kdy nejsou měření na této řadě k dispozici. Vzhledem k tomu, že zpravidla platí různé poměry mezi rychlostí větru na referenční a doplňované řadě při různých směrech proudění, byl zohledněn i vliv směru větru. Obecně platí, že kvalita doplnění závisí, kromě podmínky homogenity referenční časové řady, na těsnosti vztahu mezi doplňovanou (prodlužovanou) a referenční řadou měření a na délce období souběžných dat.

Stožárová měření s výsledky dostupnými pouze v podobě souhrnných histogramů byla taktéž prodloužena prostřednictvím reanalýz na období 1997–2006. Prodloužení však bylo možné provést pouze zjednodušeně na základě poměru průměrných rychlostí, a bylo tedy méně přesné než v případě ostatních měření. V případě chybějících informací o směrech větru byla větrná růžice simulována podle okolních stanic. Mimo jiné i z těchto důvodů byl tento druh stožárových měření využíván jen v případech, kdy se v okolí nevyskytovalo jiné vhodnější měření větru.

3. REALIZACE VĚTRNÉ MAPY

3.1 Geografické vstupy: orografie a parametr drsnosti povrchu

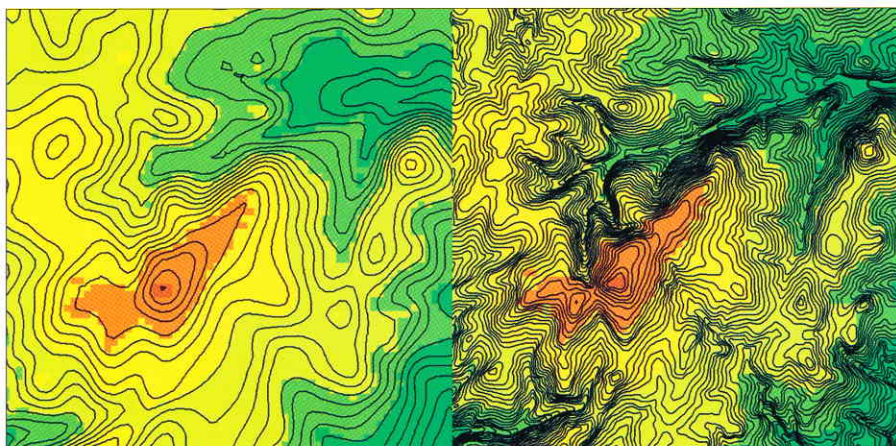
Nejdůležitější informací o vlastnostech povrchu modelovaného území jsou data o orografii, tedy o tvarech terénu. Za zdroj orografických dat byla vybrána kombinace digitálního modelu reliéfu DMÚ 25, s digitálními vrstevnicemi po 5 m, a rastrový model DMR, který udává nadmořskou výšku pro celé území republiky v pravidelném rastru s krokem 100 m. Druhý uvedený zdroj informace o orografii byl použit jen na malé části území České republiky v méně členitých územích. Jelikož vstupem do modelu WAsP jsou vektorové vrstevnice, bylo třeba část rastrového modelu převést do požadovaného formátu. V tomto případě byly vrstevnice vygenerovány lineární interpolací uvnitř polí rastru. Příklad vrstevnic digitálního modelu terénu DMÚ 25 a rastrového modelu DMR ukazuje obr. 5.

Dalším parametrem zemského povrchu, který ovlivňuje proudění, je jeho drsnost. Vyjadřuje vliv nerovností, např. zástavby a různých typů vegetačního krytu, což působí na proudění v mezní vrstvě. K jeho určení pro rozsáhlé zájmové oblasti byla vybrána mezinárodní klasifikace land-cover CORINE. Pokrývá celé území České republiky a obsahuje dostatečné množství kategorií typu pokrytí povrchu. Každé z celkem 32 kategorií, vyskytujících se na území ČR, byla

Tab. 1 Charakteristické hodnoty parametru drsnosti povrchu (z_0) pro kategorie land-cover.

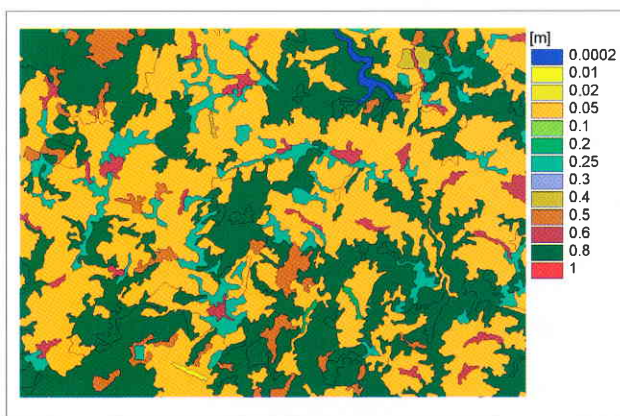
Table 1. Typical values of roughness length (z_0) for land-cover classes.

Kategorie	z_0 [m]
Vodní plochy	0,000
Letiště, holé skály	0,02
Orná půda, louky, pastviny	0,05
Zemědělská krajina s příměsí přirozené vegetace	0,1
Vinice, ovocné sady	0,3
Komplexní systémy kultur a parcel	0,4
Střídající se lesy a křoviny	0,5
Zástavba, průmyslové zóny	0,6
Lesní porosty	0,8



Obr. 5 Orografie 100 × 100 m a vrstevnice interpolované v intervalu 10 m (vlevo) a převzaté z digitálního modelu terénu DMU 25 s intervalem 5 m (vpravo).

Fig. 5. Orography 100 × 100 m together with contour lines interpolated to 10 m intervals (left) and taken from the DMU 25 digital terrain model.



Obr. 6 Parametr drsnosti povrchu v oblasti meteorologické stanice Červená.

Fig. 6. Roughness length map around the Červená manned weather station.

přiřazena určitá hodnota parametru drsnosti. Hodnoty přiřazené kategoriím land-cover ukazuje tab. 1, zde neuvedené kategorie hrají nepodstatnou roli. Základem pro výběr charakteristických hodnot tohoto parametru pro jednotlivé třídy byl článek J. Wieringy (1993), který shrnuje řadu měření nad homogenními povrchy. Přesnost zpracování odpovídá měřítku 1:100 000, což je pro účely provedeného výpočtu postačující. Příklad rozložení parametru drsnosti povrchu zobrazuje obr. 6.

Výsledná klasifikace drsnosti povrchu a orografie byla převedena do formátu vyžadovaného modelu. U modelu PIAP byly orografie i drsnost povrchu zprůměrovány do rastru s horizontálním krokem 600 m. Model VAS/WASP vyžaduje model orografie i drsnosti povrchu ve vektorové podobě, v případě orografie jsou to vrstevnice a v případě drsnosti povrchu jsou to linie odpovídající hranicím jednotlivých polygonů klasifikace CORINE, ke kterým je z obou stran přiřazen tento parametr.

Jako základní souřadný systém, ve kterém byly generovány vstupní geografické informace o orografii a drsnosti povrchu, byl zvolen systém S-42 zobrazený v Gauss-Krügerově projekci. Ten byl také použit pro modelové výpočty a zobrazení výsledků. Jediným problémem je diskontinuita Gauss-Krügerova zobrazení na 18. poledníku v. d., který je hranicí dvou pásů (třetího a čtvrtého). Řešením byl převod celého území do třetího pásu, což sice znamená zvýšení zkreslení zvoleného kartografického zobrazení, odchylky ale zůstávají vzhledem k danému účelu zanedbatelné (Novák, Murdych 1988).

3.2 Realizace modelu PIAP

Obecný princip výpočtu modelu PIAP byl popsán v předchozím článku (Hanslian et al. 2012). Pro výpočet větrné mapy byl model použit s těmito parametry:

- výpočetní doména obsahovala 1045 × 643 × 34 uzlových bodů a pokrývala celou ČR,
- konstantní horizontální kroky podél obou navzájem kolmých os byly rovny 600 m,
- ve vertikální ose byl použit proměnný krok. V první hladině 2 m nad zemským povrchem byl vertikální krok 0,3 m. Vertikální krok narůstal až do hodnoty 50 m a pak zůstal konstantní až do výšky 400 m nad zemským povrchem, kde opět začal růst, až dosáhl hodnoty 200 m,
- horní hranice výpočetní oblasti byla ve výšce 3 310 m nad zemským povrchem,
- teplotní zvrstvení natékajícího proudění bylo ve všech scénářích shodné a odpovídalo poklesu teploty s výškou o 0,9 °C na 100 m, tj. bylo použito teplotní zvrstvení blízké indiferentnímu, které odpovídá poklesu 1,0 °C na 100 m,
- ve všech scénářích byl v natékajícím proudění uvažován konstantní přírůstek geostrofického větru s výškou 0,25 m.s⁻¹ na výšku 100 m,
- u zemského povrchu byly v natékajícím proudění zadávány dvě hodnoty geostrofické rychlosti: 5 m.s⁻¹ a 10 m.s⁻¹,
- v natékajícím proudění bylo použito 16 směrů geostrofického větru, rovnoměrně pokrývajících celou růžici s krokem 22,5 stupně.

Kombinací dvou rychlostí s 16 směry bylo tedy získáno celkem 32 scénářů. Jednotlivé scénáře se od sebe lišily pou-

Tab. 2 Referenční stanice použité pro výpočet modelu PIAP.

Table 2. Reference stations used for the PIAP model calculation.

Indikativ		Název	Souřadnice S-42		Výška [m]	
WMO	ČR		E	N	Nadmořská	Nad zemí
11487	C1KOCE01	Kocelovice	3415886	5482372	518	10
11518	P1PRUZ01	Praha-Ruzyně	3446849	5552387	364	10
11659	P3PRIB01	Příbrav	3555305	5494867	528	10
11693	B2DUKO01	Dukovany	3582974	5440992	405	10
11782	O1MOSN01	Mošnov – let.	3725426	5512057	251	10

ze směrem a rychlostí geostrofického větru v natékajícím proudění. Směr geostrofického větru byl konstantní uvnitř každého scénáře, ale rychlost geostrofického větru narůstala s výškou.

Pro výpočet větrné mapy bylo nezávisle na sobě použito 5 referenčních stanic (tab. 2). Kritériem bylo, mimo jiné, umístění stanic v plochem terénu bez významných okolních překážek, neboť PIAP při svém výpočtu neošetřuje vlivy nejbližšího okolí stanic. Pro jednotlivé referenční stanice byly vypočteny větrné podmínky nad celým územím České republiky ve výšce 10 m nad zemí. Výsledné pole rychlosti větru bylo určeno kombinací polí pro jednotlivé referenční body. Váhu vstupního pole určovala převrácená hodnota druhé mocniny vzdálenosti od daného místa, což odpovídá klasickému nastavení interpolace IDW (Inverse Distance Weighted).

Výsledné pole průměrné rychlosti větru na území ČR vypočtené modelem PIAP ve výšce 10 m nad zemským povrchem ukazuje obr. 7.

Vzhledem k tomu, že výsledek modelu PIAP lze považovat za realistické ve výšce 10 m, avšak ne ve větších výškách nad povrchem, byl proveden výpočet tímto modelem pouze v této základní výšce. Do výšky 100 m byly vypočtené rychlosti větru převedeny na základě vertikálního profilu větru vypočteného modelem VAS/WAsP. Výsledky modelu VAS/WAsP byly pro tento účel převzorkovány na rozlišení 600 m, které odpovídá rastru modelu PIAP.

3.3 Realizace modelu VAS/WAsP

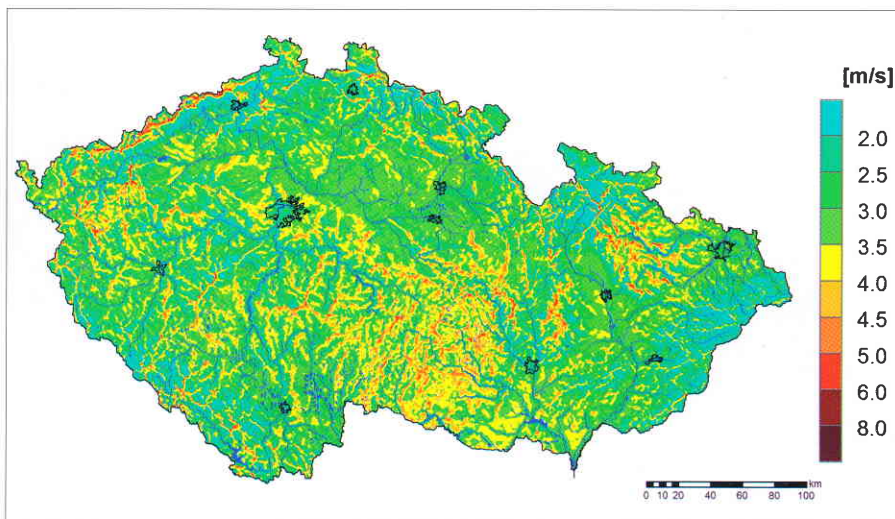
Model VAS/WAsP, popsáný v předchozím článku (Hanslian et al. 2012), byl poprvé realizován v roce 2004 (VAS/WAsP 1). Současná verze z roku 2007 (VAS/WAsP 2) se od předchozího modelu liší především výběrem a způsobem zpracování vstupních měření větru.

Prvním krokem při realizaci modelu VAS/WAsP bylo očištění větrných podmínek v místě měření od vlivu okolí modelem WAsP. Naměřená data, vybraná a zpracovaná dle kap. 2.2, byla nejprve převedena do vstupního formátu „tab“, který nahrazuje naměřené četnostní rozdělení rychlostí větru teoretickým Weibullovým rozdělením. Počet směrových sektorů lze zvolit libovolně, ve větrné energetice se však nejčastěji pracuje s 12směrnou různicí, proto byl zvolen tento počet směrových sektorů.

Očištění od vlivu lokální drsnosti povrchu a orografie provádí model WAsP automaticky na základě příslušných geo-

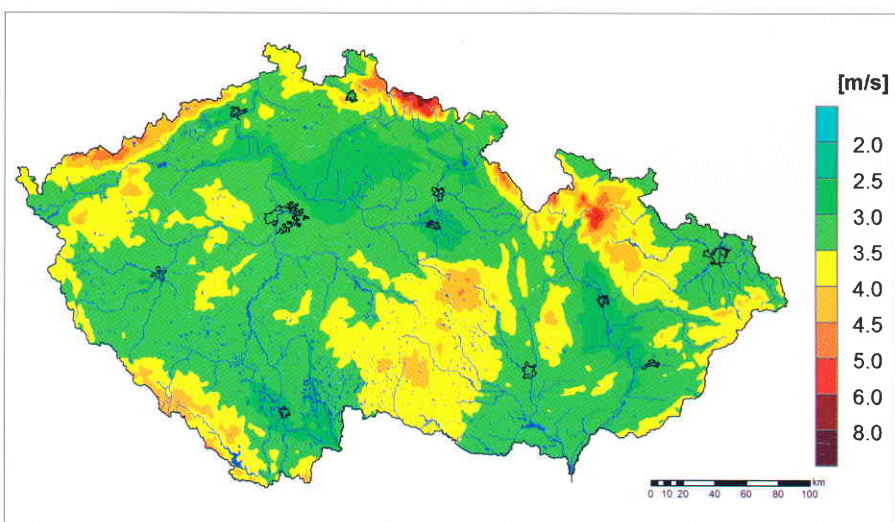
grafických podkladů, jednotlivá měření však vyžadují individuální přístup při zohlednění vlivu umístění senzoru a okolních překážek. K tomuto účelu lze v jednodušších případech použít koncept překážek modelu WAsP, pokud se však jedná o překážky příliš zásadní, tj. blízké a převyšující úroveň měření, či vícenásobné, pak tento postup dává nerealistické výsledky. V takových případech musely být použity postupy založené spíše na zkušenostech a na subjektivní úvaze než na objektivním vyhodnocení překážek, jako např. deklarace nižší efektivní výšky měření nad zemským povrchem (v případě velkého množství překážek ve většině směrů), subjektivní úpravy modelu překážek či aplikace uživatelských korekcí. Podobně bylo zohledněno i předpokládané nadhodnocování rychlosti větru nad střechami budov či nad telekomunikačními věžemi.

Po očištění naměřených dat od lokálních vlivů byla provedena interpolace získaných zobecněných větrných podmínek metodou VAS do rastru 2 × 2 km (obr. 8). Nakonec byly interpolované zobecněné větrné podmínky v každém čtverci dvou-



Obr. 7 Model PIAP – průměrná rychlost větru ve výšce 10 m nad povrchem.

Fig. 7. PIAP model – average wind speed at a height of 10 m above ground.



Obr. 8 Výsledek interpolace metodou VAS v rámci modelu VAS/WAsP pro parametr drsnosti 0,1 a výšku 10 m nad povrchem.

Fig. 8. Result of interpolation by the VAS method in the VAS/WAsP model for a roughness length of 0.1 m and a height of 10 m.

kilometrového rastru použity jako vstup do modelu WAsP, a tím byl dosažen konečný výsledek modelu VAS/WAsP s rozlišením 100 × 100 m (obr. 9).

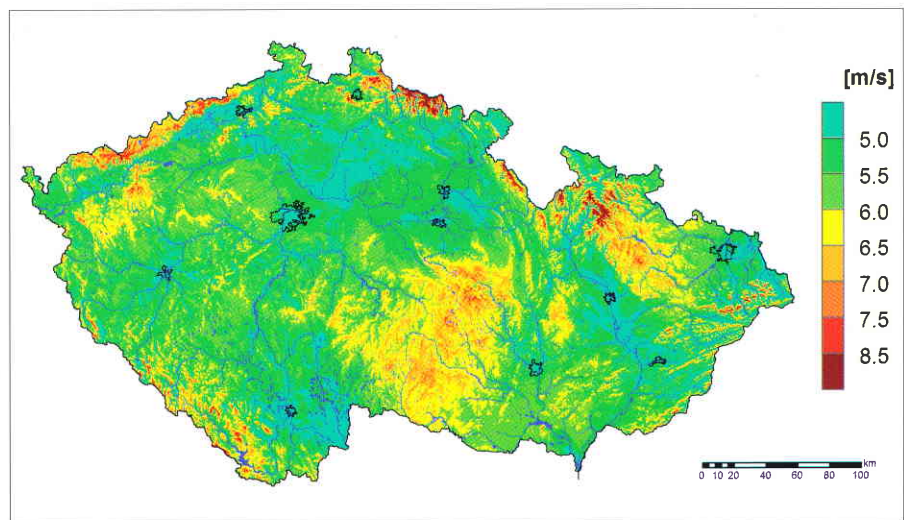
Konečný výsledek modelu VAS/WAsP již opět zohledňuje i lokální vlivy různorodé orografie a drsnosti povrchu na rychlost větru, nikoli však vlivy blízkých překážek, které nelze při velkoplošném výpočtu brát v úvahu. Jedinou opravou, která byla při závěrečné aplikaci modelu WAsP provedena, byla korekce známého nedostatku tohoto modelu, kterým je nadhodnocování zesílení rychlosti větru nad vyvýšenými terénními tvary se svahy o sklonu vyšším než 30 %. V takovém případě byla vypočtená rychlost větru redukována tak, že bylo uvažováno pouze 25 % zesílení proudění nad hodnotu zesílení odpovídajícího sklonům svahů 30 %.

3.4 Kombinace modelů PIAP a VAS/WAsP

Kombinace modelů PIAP a VAS/WAsP odpovídá postupu, který dle vlastních zkušeností přináší v typickém případě nejvíce realistické výsledky. Použitý postup vychází z těchto zjištění ohledně použitých modelů:

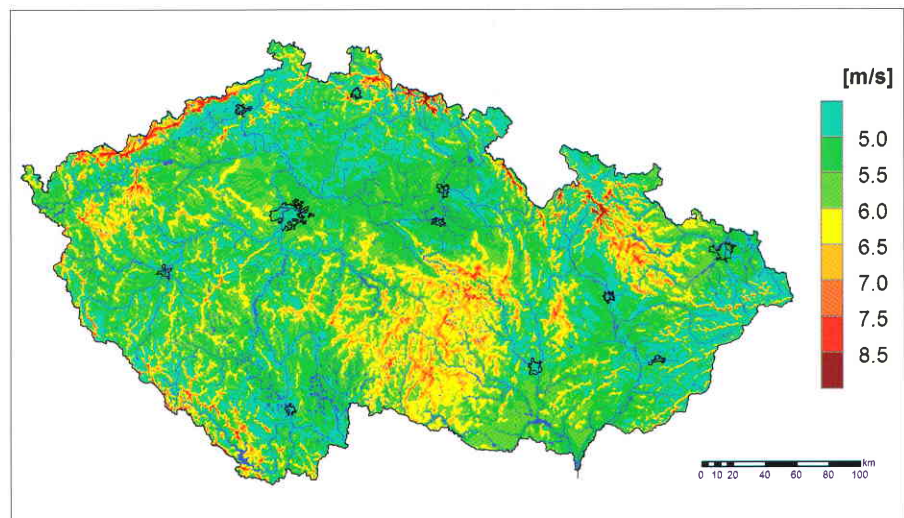
- model PIAP ve výšce 10 m nad zemí dává z hlediska orografie středního a většího měřítka poměrně realistické rozložení rychlosti větru, v absolutní míře však vliv těchto orografických tvarů nadhodnocuje. Na druhou stranu v důsledku relativně hrubého prostorového rozlišení (krok 600 m) tento model nedokáže zachytit jemné orografické tvary,
- model VAS/WAsP dokáže zohlednit vliv jemných orografických tvarů, v případě útvarů s prudkým sklonem však jejich vliv spíše nadhodnocuje. Naopak vliv orografických tvarů o rozměrech v řádu jednotek až několika desítek kilometrů model VAS/WAsP podhodnocuje, až zcela zanedbává,
- větrná růžice modelu PIAP dobře simuluje rozložení převládajících směrů větru a rychlosti větru, rozdíly mezi jednotlivými směry větru však bývají často nadhodnocené,
- větrná růžice modelu VAS/WAsP zpravidla také ukazuje v základních obrysech správné rozložení převládajících směrů, celkově je tato růžice ale nepřiměřeně „shlazená“ a předpokládá relativně významné četnosti a rychlosti větru i ze směrů, které se ve skutečnosti vyskytují jen vzácně (model nedoceňuje vliv orografie na směr větru).

Z uvedených vlastností vyplývá, že chyby obou modelů jsou v zásadě protichůdné, jako výhodné se proto jeví určité



Obr. 9 Model VAS/WAsP – průměrná rychlost větru ve výšce 100 m nad povrchem.

Fig. 9. VAS/WAsP model – average wind speed at a height of 100 m above ground.



Obr. 10 Výsledná větrná mapa – průměrná rychlost větru ve výšce 100 m nad povrchem.

Fig. 10. Resulting wind map – average wind speed at a height of 100 m above ground.

zprůměrování výsledků obou modelů. Na základě testování výsledků pro různé poměry se subjektivně jako nejlepší jevil poměr 7:3, konečný výsledek byl proto vypočten jako vážený průměr modelů VAS/WAsP a PIAP ve výšce 100 m, kde model VAS/WAsP má váhu 0,7 a model PIAP 0,3.

4. VÝSLEDNÁ VĚTRNÁ MAPA ČR

Výsledné pole průměrné rychlosti větru na území České republiky ve výšce 100 m nad zemí ukazuje obr. 10, v plném rozlišení jej lze nalézt na adrese http://www.ufa.cas.cz/imgs/DLouka/vetna_mapa.gif.

Při prvním pohledu na větrnou mapu nejvíce zaujmou rozsáhlé oblasti zvýšené rychlosti větru v oblasti vrchovin, horské oblasti na rozdíl od větrných map zpracovaných jednoduššími metodami tolik nevynikají. Takové rozložení je odrazem detailnějšího a realističtějšího výpočtu větrných podmínek. Horské hřbety sice patří mezi největrnější místa v České republice, podstatnou část rozlohy horských celků však tvoří zalesněná úbočí a údolní polohy, kde větrnost výrazně klesá. Zvláště ve velmi členitých horských celcích, jako jsou

Moravskoslezské Beskydy, tvoří vrcholové partie jen malý zlomek rozlohy pohoří. Rychlost větru zde navíc celkově snižuje efekt tzv. orografické drsnosti, kdy je energie proudění pohlcována v turbulencích vytvářejících se při přetékání ostře členitého reliéfu.

Na druhou stranu právě na výrazně vyjádřených vrcholech, hřebtech či v horských sedlech lze očekávat vůbec nejvyšší rychlost větru. Tu zřejmě nelze hledat na taktéž mimořádně větrném vrcholku Milešovky, jak se v minulosti často tradovalo, ale v mnohem výše položených vrcholových partiích Krkonoš a Jeseníků. V méně členitých nižších pohořích či vrchovinách takto vysokou rychlost očekávat nelze, přesto se v ČR v těchto lokalitách nacházejí velké rozlohy otevřených ploch na oblých hřebtech a náhorních plošinách, na nichž rovněž dochází k celkově nižšímu útlumu proudění v důsledku menší členitosti reliéfu. To vede k výskytu poměrně rozsáhlých nadprůměrně větrných oblastí, jak je z větrné mapy dobře patrné, především v oblasti Českomoravské vrchoviny a Nížkého Jeseníku.

Celkově podprůměrnou rychlostí větru se vyznačují především nížinné oblasti, uzavřená údolí a kotliny, dále pak oblasti s velkým zastoupením lesních porostů či vysokou mírou urbanizace, kde rychlost větru snižuje zvýšená drsnost povrchu.

Pokud se jedná o praktické využití potenciálu větru pro výrobu energie, což byl hlavní účel vytvoření větrné mapy, je nutné, vedle faktoru větrných podmínek, brát v úvahu také nejrůznější omezení charakteru technicko-ekonomického (například možnosti připojení k elektrické síti), environmentálního (ochrana přírody, hlukové limity) či společenského (souhlas obyvatel, přístup místních úřadů a politiků). Je zřejmé, že největrnější místa na hřebtech hor pro výstavbu větrných elektráren nepřipadají v úvahu, mnohem perspektivnější jsou lokality v rámci nižších pohoří a vrchovin. V tomto ohledu zvláště vynikají tři oblasti: Krušné hory, Českomoravská vrchovina a Nížký Jeseník. S průměrnými rychlostmi i přes $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ve výšce 100 m jsou největrnějšími z těchto oblastí ploché hřbety a náhorní plošiny Krušných hor, proto právě sem od počátku směřoval největší zájem o výstavbu větrných elektráren. V současné době větrné elektrárny v Krušných horách tvoří asi 50 % veškeré kapacity instalované v České republice. V rámci ostatních míst s průměrnou rychlostí větru nad $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ve 100 m nad zemí, což lze v současné době považovat za přibližnou hranici rentability pro větrné elektrárny, záleží v praxi spíše na vstřícnosti státní správy a obyvatelstva než na množství příhodných lokalit, proto lze více větrných elektráren nalézt například v Ašském výběžku či na Dražanské vrchovině než v mnohem rozsáhlejšímu prostoru Českomoravské vrchoviny.

5. DISKUZE A VERIFIKACE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Je samozřejmé, že i prezentovaná větrná mapa obsahuje určité nepřesnosti, které vyplývají z použitých dat a výpočetních postupů, byť tyto nepřesnosti jsou zřejmě menší než u dřívějších zpracování mapy. V první řadě se jedná o nedostatky jednotlivých modelů. Tyto nedostatky se sice částečně kompenzují jejich kombinací, toto řešení však pochopitelně nemůže odstranit veškeré chyby. Nejvýznamnější nepřesnosti vyplývají u obou modelů z jejich principiálních matematických a fyzikálních omezení, a proto se obecně projevují nejvíce v oblastech s velmi členitými orografickými podmínkami a velkými výškovými rozdíly, tedy v horských oblastech a v jejich podhůří. Samotný model VAS/WAsP dále v některých případech způsobuje systematické podhodnocování či nadhodnocování výsledků v oblastech s nedostatkem reprezentativních referenčních stanic. Model PIAP pak nadhodnocuje vypočtenou rychlost větru na rozsáhlejších horských hřebtech, v lokálním měřítku pak deformuje vypočtené pole větru díky své shlazené orografii.

Protože od výpočtu větrné mapy již uběhlo několik let, bylo možné s odstupem ověřit její přesnost využitím nezávislých měření, která v době jejího vytvoření nebyla známa. Jedná se celkem o 15 stožárových měření větru a jedno měření větru na větrné elektrárně ve výškách od 35 do 90 m nad zemí a s trváním měření od 12 do 26 měsíců. Měření byla zpracována shodným způsobem jako původní vstupní data do modelu VAS/WAsP. Naměřené větrné podmínky byly převedeny na shodné období a pomocí modelu WAsP přepočteny do výšky 100 m nad zemí, kde byly porovnány s hodnotami větrné mapy. Protože použitá data jsou důvěrná, a není možné zve-

Tab. 3 Verifikace větrné mapy podle nových stožárových měření větru.

Table 3. Verification of the wind map by new wind mast measurements.

ID	Nadm. výška	z_0	RIX	Výškové rozdíly	Odchylka od měření [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]		
	[m]	[m]	[%]	[m]	VAS/WAsP	PIAP	Větrná mapa
A	200	0,12	0	-10/100	0,19	-0,27	0,05
B	300	0,08	0	-20/50	0,20	0,37	0,25
C	300	0,10	0,2	-100/50	0,12	-0,19	0,03
D	300	0,09	0	-70/100	0,54	0,83	0,63
E	400	0,12	0,9	-50/50	-0,38	-0,60	-0,44
F	400	0,20	1,0	-130/130	0,64	-0,18	0,39
G	400	0,24	5,7	-100/50	0,71	0,54	0,66
H	400	0,19	1,4	-120/200	0,10	0,40	0,19
I	500	0,27	0,6	-150/50	0,02	0,63	0,20
J	500	0,28	0,6	-100/50	0,03	0,64	0,21
K	600	0,19	1,8	-200/10	-0,07	1,20	0,31
L	600	0,22	3,9	-150/200	-0,23	1,12	0,18
O	600	0,22	2,1	-200/0	0,53	1,04	0,68
P	700	0,18	2,1	-200/100	0,83	0,09	0,61
Q	700	0,17	0,2	-100/30	0,26	0,97	0,47
R	700	0,35	0,8	-200/130	0,28	-1,01	-0,11
Střední kvadratická chyba (RMSE)					0,41	0,72	0,40
Systematická odchylka (bias)					0,24	0,35	0,27

řejnit jejich polohu (jednotlivá měření jsou proto pojmenována písmeny A–R) ani jiné adresnější informace, pokusili jsme se alespoň o obecný popis okolního terénu. Vedle obecné charakteristiky okolního terénu je číselně charakterizována jeho členitost. K tomu byla vypočtena průměrná hodnota parametru drsnosti (z_0) a koeficient *RIX* (Bowen, Mortensen, 2004), který definuje procento svahů strmějších než 30 % v okruhu 3,5 km od místa měření. Dále je uvedena relativní výška vůči nadmořské výšce místa měření pro nejnižší a nejvyšší reprezentativní bod v okolí do 4 km.

Výsledek verifikace shrnuje tab. 3. Z tabulky je zřejmé, že velikost rozdílů mezi vypočtenými a reálnými hodnotami se, s výjimkou modelu PIAP, pohybuje v řádu desetin $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, oba použité modely i konečná větrná mapa přitom vypočtené rychlosti větru spíše nadhodnocují. V obou aspektech dává lepší výsledky model VAS/WAsP než model PIAP, nejlépe však vychází výsledná větrná mapa, což potvrzuje oprávněnost použité metody. Zejména v případě největších chyb jednotlivých modelů (měření K, L, P, R) vede kombinace modelů ke zřetelnému zlepšení. Velikost chyb v případě jednotlivých lokalit přibližně odpovídá očekávání, obecně jsou chyby větší v místech se složitějšími orografickými podmínkami. K nadhodnocování vypočtených rychlostí větru dochází spíše v oblastech, kde mají velkou váhu měření z profesionálních stanic, jeho příčinou proto může být nedostatečná kompenzace efektu nadhodnocení naměřených rychlostí větru na anemometrech umístěných nad střechami budov (viz obr. 1).

6. ZÁVĚR

Prezentovanou větrnou mapu lze chápat jako završení snahy o zmapování větrných podmínek pro větrné elektrárny v České republice. Touto problematikou se dlouhodobě zabýval tým okolo RNDr. Josefa Štekl v Ústavu fyziky atmosféry AV ČR. Větrná mapa ve své podstatě kombinuje všechny dříve používané postupy do jediného výsledku.

Pro možné budoucí další zpřesnění existují v principu dvě cesty. Za prvé je možné dále zdokonalit použitý přístup, ať již jde o fyzikální a matematické postupy modelu PIAP nebo o aplikaci modelu VAS/WAsP. Tuto cestu komplikuje skutečnost, že zdokonalení fyzikálního popisu reality modelem PIAP, či jeho vyšší prostorové rozlišení, by vedly k nárůstu potřebné výpočetní kapacity, u modelu VAS/WAsP je zase omezením potřeba dostatečného množství existujících měření větru o přijatelné kvalitě. Druhou cestou je použití zcela odlišného principu použitého například při výpočtu větrného atlasu Finska (Tammelin et al. 2013) i v řadě různých komerčních aplikací, např. AWS Truepower 2012. Jde o aplikaci standardního numerického předpovědního modelu ve vysokém prostorovém rozlišení (takto lze reálně dosáhnout rozlišení na úrovni jednotek km) a využití těchto výsledků pro následný detailní výpočet modelem WAsP či jiným prostředkem pro simulaci větrných podmínek v mikroměřítku. Tento postup může být při správném provedení poměrně přesný, nevýhodou je však jeho značná technická i výpočetní náročnost.

Literatura:

AWS Truepower, 2012. Description of the MesoMap system. Tech. Rep. Dostupné na WWW: https://dashboards.awstruepower.com/index.php/content/file/Description_of_MesoMap_System.pdf

BOWEN, A., MORTENSEN, N., 2004. WAsP prediction errors due to site orography. Risø National Laboratory: Roskilde, Denmark.

HANSLIAN, D., HOŠEK J., ŠTEKL, J., 2008. Odhad realizovatelného potenciálu větrné energie na území České republiky. Praha: Ústav fyziky atmosféry AV ČR, 32 s. Dostupné na WWW: http://www.ufa.cas.cz/vetrna-energie/doc/potencial_ufa.pdf.

HANSLIAN, D., POP, L., 2008. The technical potential of wind energy and a new wind atlas of the Czech Republic. In: *Proceedings of EWEC 2008*, Brusel, 31. 3.–3. 4. 2008. Dostupné na WWW: http://www.ewec2008proceedings.info/ewec2008/allfiles/2/263_EWEC2008fullpaper.pdf

HANSLIAN, D., 2011. Technický potenciál větrné energie v České republice. *Energetika*, roč. 61, č. 8–9, s. 467–471. ISSN 0375-8842

HANSLIAN, D., CHLÁDOVÁ, Z., POP, L., HOŠEK, J., 2012. Modely pro konstrukci větrných map v ČR. *Meteorologické zprávy*, roč. 65, č. 2, s. 36–44. ISSN 0026-1173.

HANSLIAN, D., HOŠEK, J., CHLÁDOVÁ, Z., POP, L., 2013. Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem I. *TZB-info*, 15. 4. 2013. ISSN 1801-4399. Dostupné na WWW: <http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9770-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-i>.

HANSLIAN, D., HOŠEK, J., CHLÁDOVÁ, Z., POP, L., 2013. Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem II. *TZB-info*, 22. 4. 2013. ISSN 1801-4399. Dostupné na WWW: <http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9800-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-ii>.

NOVÁK, V., MURDYCH, Z., 1988. Kartografie a topografie. Praha: SPN, s. 82

ŘEPKA, M., 2011. Přehled měření větru v České republice. *Meteorologické zprávy*, roč. 64, č. 4, s. 97–106. ISSN 0026-1173.

SOKOL, Z., ŠTEKL, J., 1994. 3-D mesoscale analysis of selected elements from SYNOP and SYRED reports. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 3, s. 242–246. ISSN 0941-2948.

SOKOL, Z., ŠTEKL, J., 1995. Estimation of annual mean ground wind speed over the territory of the Czech Republic. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 4, s. 218–222. ISSN 0941-2948.

SVOBODA, J., 1990. Numerical modeling of the atmospheric boundary layer over a hilly landscape. *Studia geophysica et geodetica*, Vol. 34, s. 167–184. ISSN 0039-3169.

SVOBODA, J., ŠTEKL, J., 1994. Mesoscale modelling of a flow modification caused by orography. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 3, s. 233–241. ISSN 0941-2948.

SVOBODA, J., CHLÁDOVÁ, Z., POP, L., HOŠEK, J., 2013. Statistical-dynamical downscaling of wind roses over the Czech Republic. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 112, s. 713–722. DOI: 10.1007/s00704-012-0759-y

TAMMELIN, B., VIHMA, T., ATLASKIN, E., BADGER, J., FORTELIUS, C. et al., 2013. Production of the Finnish Wind Atlas. *Wind Energy*, Vol. 16, s. 19–35. DOI: 10.1002/we.517

TROEN, I., PETERSEN, E. L., 1989. European Wind Atlas. Risø National Laboratory, Roskilde. 655 s.

WIERINGA, J., 1993. Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 63, s. 323–363. DOI: 10.1007/BF00705357

Lektoři (Reviewers): RNDr. Jiří Hostýnek, Prof. RNDr. Vít Voženilek, CSc.