

Závěrečná zpráva projektu VaV/320/08/03

Výzkum vhodnosti lokalit v ČR z hlediska zásob větrné energie a zpracování metodiky pro posuzovací a schvalovací řízení při zavádění větrných elektráren

V Praze, 30. listopadu 2004

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Vedoucí projektu: RNDr. Josef Štekl, CSc.
Zpracovatelé: Mgr. David Hanslian
Mgr. Jiří Hošek
RNDr. Jacek Kerum
RNDr. Jaroslav Svoboda, CSc.
RNDr. Josef Štekl, CSc.

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1 | ÚVOD | 4 |
| 2 | MODELY PRO VYHODNOCENÍ VĚTRNÉHO POTENCIÁLU NA ÚZEMÍ ČR S MALÝM KROKEM SÍTĚ | 5 |
| 2.1 | Hybridní model VAS / WAsP | 5 |
| 2.1.1 | Metoda VAS..... | 5 |
| 2.1.2 | Metoda WAsP..... | 6 |
| 2.1.3 | Vstupy popisující orografii a parametr drsnosti povrchu..... | 8 |
| 2.1.4 | Větroměrná data..... | 10 |
| 2.1.4.1 | Charakteristika použitých větroměrných dat..... | 10 |
| 2.1.4.2 | Základní opravy větroměrných dat..... | 11 |
| 2.1.4.3 | Výběr použitých stanic a odstranění vlivu okolí..... | 12 |
| 2.1.4.4 | Kvalita a reprezentativnost větroměrných dat..... | 12 |
| 2.1.4.5 | Fyzická kontrola větroměrných stanic..... | 13 |

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.4.6 | Stínění stanice blízkými překážkami..... | 13 |
| 2.1.4.7 | Orografie v okolí stanice | 14 |
| 2.1.4.8 | Charakter naměřených dat..... | 15 |
| 2.1.5 | Realizace hybridního modelu VAS / WAsP | 16 |
| 2.1.6 | Verifikace hybridního modelu VAS / WAsP | 17 |
| 2.1.7 | Vypočtená pole proměnných..... | 18 |
| 2.2 | Dynamický model PIAP..... | 20 |
| 2.2.1 | Stručná charakteristika metody | 20 |
| 2.2.2 | Model pro výpočet scénářů proudění | 21 |
| 2.2.3 | Model pro výpočet větrných růžic | 21 |
| 2.2.4 | Výpočetní oblast a scénáře proudění..... | 21 |
| 2.2.5 | Výběr referenčních stanic a spočtené výsledky | 22 |
| 2.2.6 | Závěry vyplývající z modelování dynamickým modelem | 23 |
| 2.3 | Porovnání modelů VAS/WAsP a PIAP | 24 |
| 3 | POSUDEK VĚTRNÉHO POTENCIÁLU A VHODNOSTI LOKALITY PRO STAVBU VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN..... | 26 |
| 3.1 | Současné možnosti metod při projektování větrných elektráren | 26 |
| 3.1.1 | Úvod..... | 26 |
| 3.1.2 | Ukazatele analýzy nepřesnosti | 26 |
| 3.1.3 | Jednotlivé komponenty nejistoty v určení výnosu energie | 26 |
| 3.1.3.1 | Meteorologická změřená data | 27 |
| 3.1.3.2 | Dlouhodobá korelace..... | 27 |
| 3.1.3.3 | Popis povrchu terénu..... | 28 |
| 3.1.3.4 | Modelování větrného pole..... | 28 |
| 3.1.3.5 | Model větrné farmy | 28 |
| 3.1.3.6 | Výkonové křivky..... | 29 |
| 3.1.4 | Typické nejistoty při výpočtu výnosu | 29 |
| 3.1.5 | Vyhodnocení realizovaných projektů..... | 29 |
| 3.1.6 | Výpočet výnosu s minimálními nepřesnostmi | 29 |
| 3.1.7 | Závěr..... | 30 |
| 3.2 | Měření charakteristik větru | 30 |
| 3.2.1 | Vlastnosti větroměrných přístrojů, jejich přednosti a nedostatky | 30 |
| 3.2.2 | Okolnosti ovlivňující výsledky měření. | 31 |
| 3.2.3 | Cejchování měřidel | 32 |
| 3.2.4 | Vliv námrazy na měření rychlosti větru..... | 33 |
| 3.2.5 | Umístění čidel | 33 |
| 3.2.6 | Meteorologický stožár..... | 34 |
| 3.2.7 | Verifikace měření, délka měření, přepočet na dlouhodobou řadu | 34 |
| 3.2.8 | Doplňková měření | 35 |
| 3.3 | Vliv námrazy a turbulence na výrobu elektrické energie větrnou elektrárnou... 35 | |
| 3.3.1 | Určení vlivu námrazy na činnost větrné elektrárny | 36 |
| 3.3.2 | Určení vlivu turbulence a vertikálního stříhu větru na činnost větrné elektrárny.... | 37 |
| 3.4 | Hlukové emise v okolí větrné elektrárny..... | 38 |
| 3.4.1 | Základní charakteristiky hluku..... | 38 |

| | | |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.2 | Nejvyšší přípustné hodnoty hluku podle současné legislativy..... | 39 |
| 3.4.3 | Akustická studie | 40 |
| 3.4.4 | Hygienické měření | 41 |
| 3.5 | Hodnocení vlivu stroboskopického efektu větrných elektráren | 41 |
| 3.5.1 | Popis programu STIN..... | 41 |
| 3.5.2 | Vstup modelu STIN | 42 |
| 3.5.3 | Výstup modelu STIN | 42 |
| 3.6 | Určení roční výroby elektrické energie | 43 |
| 3.7 | Všeobecné požadavky na měření složek větru a doporučené parametry | 45 |
| 3.7.1 | Všeobecné požadavky | 45 |
| 3.7.2 | Měřicí stanoviště | 45 |
| 3.7.3 | Doba měření | 46 |
| 3.7.4 | Meteorologický stožár a použité přístroje..... | 46 |
| 3.7.5 | Měření dopplerovským sodarem..... | 46 |
| 3.7.6 | Zpracování měřených dat | 46 |
| 3.8 | Doporučení standardní formy pro posouzení větrných poměrů | 47 |
| 3.8.1 | Všeobecné požadavky | 47 |
| 3.8.2 | Předběžné posouzení větrných poměrů..... | 47 |
| 3.8.2.1 | Vliv blízkého a vzdáleného okolí na proudění..... | 47 |
| 3.8.2.2 | Metody výpočtu větrných charakteristik a výsledky výpočtu..... | 48 |
| 3.8.2.3 | Výpočet ztrát stíněním | 48 |
| 3.8.2.4 | Hlukové emise a stroboskopický efekt..... | 48 |
| 3.8.2.5 | Závěrečné vyhodnocení..... | 48 |
| 3.8.3 | Posouzení větrných poměrů lokality | 48 |
| 3.8.3.1 | Měření meteorologických parametrů | 48 |
| 3.8.3.2 | Prohlídka stanoviště | 48 |
| 3.8.3.3 | Výpočet ztrát stíněním | 49 |
| 3.8.3.4 | Hlukové emise a stroboskopický efekt..... | 49 |
| 3.8.3.5 | Produkce elektrické energie blízkou větrnou elektrárnou..... | 49 |
| 3.8.3.6 | Závěrečné zhodnocení..... | 49 |
| 4 | POROVNÁNÍ MĚŘENÍ PROFILU RYCHLOSTI NA METEOROLOGICKÉM STOŽÁRU S MĚŘENÍM DOPPLEROVSKÝM SODAREM REMTECH..... | 50 |
| 4.1 | Umístění přístrojů a metodika porovnávání..... | 50 |
| 4.2 | Porovnání vertikálních průměrů rychlosti větru | 50 |
| 4.3 | Porovnání normovaných profilů..... | 51 |
| 4.4 | Zhodnocení výsledků..... | 51 |
| 5 | ZÁVĚR..... | 53 |

1 ÚVOD

Přesné určení výnosu projektu výstavby větrné elektrárny či farmy větrných elektráren je na jedné straně pro investora výchozím parametrem pro rozhodování, na druhé straně je však spojeno s nepřesnostmi, které vycházejí z často nízké kvality výchozích dat, jsou spojeny s omezenými možnostmi současných matematických metod a zahrnují i odchylky reálných hodnot od ideálního stavu výkonové křivky a to zvláště v členitém horském terénu. K nepřesnostem může přispět i stanovení vertikálního profilu rychlosti větru výpočtem, kdy nad hranicí přízemní vrstvy atmosféry použití logaritmického vztahu vede k významným odchylkám.

Prvé plošně kontinuální zpracování pole průměrné roční rychlosti větru na území České republiky bylo zpracováno pod označením VAS v ÚFA AV ČR (Štekl a kol., 1995). Již v této práci se řešila otázka kvality větroměrných dat a při výpočtu byly uplatněny subjektivně určené korekce tzv. „klíčových“ stanic z hlediska větrné energetiky. V další etapě byla ke zpracování větrného atlasu použita měření z normálového období 1961-1990 a data z příhraničních okrajových částí výpočetní oblasti. Současně byl použit dánský model WASP k určení pole průměrné roční rychlosti větru (Štekl a kol., část 1, 2, 2002).

Měření meteorologickými stožáry pro účely větrné energetiky zahájila pracovní skupina ÚFA AV ČR v roce 1999. Zkušenosti z této činnosti byly použity při zpracování této výzkumné zprávy.

Cílem této výzkumné zprávy je na základě vlastního výzkumu a zahraničních zkušeností, převážně z Německa, zformulovat postupy, které umožní optimalizovat numerické modelování proudění, vymezí rámec jednotného přístupu k formulování předběžného posouzení větrných poměrů stanoviště na základě výpočtů meteorologických charakteristik matematickými modely a k formulování posouzení větrných poměrů stanoviště na základě stožárového měření složek větru, případně dalších parametrů.

Již několik let se na našem pracovišti věnujeme výzkumu vertikálního profilu složek větru v různých reliéfových podmínkách a při rozdílném parametru drsnosti zemského povrchu pomocí dopplerovského sodaru. Možné aplikace se nabízí ve větrné energetice, kde nákladné meteorologické stožáry s výškou 80 až 120 m je možné nahradit nepřímým měřením. Tuto moderní metodu, která se začala zkoušet i v zahraničí, verifikujeme porovnáním s klasickým měřením na 85 m vysokém stožáru.

Nové a originální metodické postupy, jako osobní hodnocení rušivých vlivů na měření stanice, numerická oprava těchto vlivů a následný výběr reprezentativních stanic s kvalitním měřením, spojení předností statistického modelu VAS, postihující deformace synoptického a subsynoptického měřítka s přednostmi modelu WASP, který má možnost zahrnout vliv drsnosti povrchu v okolí a účinek terénních překážek menších rozměrů a výpočty prováděné v malém kroku sítě, dávají naději na zvýšení aplikability a přesnosti výpočtu. Významným přínosem k posouzení přesnosti výpočtu hybridním modelem je možnost porovnání s polem průměrné roční rychlosti větru, určené modelem mezní vrstvy atmosféry PIAP BLM (dále označovaný zkráceně jako PIAP), založeném na jiné metodě řešení než hybridní model.

Zvláštní pozornost se v práci věnuje formulaci požadavků, které musí být splněny pro měření parametrů na meteorologickém stožáru. Stejně tak je formulována struktura předběžného posouzení (vychází z modelů vypočtených dat) a posouzení (vychází z realizovaného měření) větrných poměrů na konkrétní lokalitě. Tyto návrhy by měly být podkladem pro následné zařazení do legislativní normy.

2 MODELÝ PRO VYHODNOCENÍ VĚTRNÉHO POTENCIÁLU NA ÚZEMÍ ČR S MALÝM KROKEM SÍTĚ

2.1 Hybridní model VAS / WAsP

Hlavní metodou výpočtu polí průměrné roční rychlosti větru v této zprávě byla aplikace kombinace modelů WAsP a VAS, kterou označujeme jako hybridní model. První z nich byl použit k odstranění lokálních vlivů orografie, změn drsnosti povrchu a především překážek. Druhý model sloužil k interpolaci získaných klimatologických charakteristik v hrubším rozlišení do plochy celého státu. Měl tak za úkol postihnout trendy vzniklé vlivem větších orografických útvarů. Jedná se o třetí verzi modelu – VAS3 – pro jednoduchost v následujícím textu označený jako VAS. Předchozí aplikace modelu WAsP v kombinaci s jiným modelem byly již popsány v dílčí zprávě projektu VaV 320/08/03 (Štekl a kol., 2003). Nejlépe takovou metodu popisuje Frank a kol (2001).

2.1.1 Metoda VAS

Meteorologická měření rychlosti a směru větru vstupují do modelu spolu s kartézskými souřadnicemi místa v třírozměrném prostoru. Jsou považována za funkční hodnoty třírozměrné funkce, jejíž řešení v ostatních bodech prostoru metoda vypočítává.

Použitá metoda interpolace je založena na postupu systému MEZOMA (Sokol a kol., 1991). Mezi její předpoklady patří především dostatečná hustota vstupních meteorologických stanic a reprezentativnost naměřených dat v širším okolí stanice z hlediska orografie, drsnosti povrchu a dalších vlivů. Pokud používáme přímo naměřená data, nejsou tyto předpoklady v dostatečné míře splněny – to znamená, aby byla zachována dostatečná síť míst měření, je třeba vybrat i méně kvalitní a méně reprezentativní stanice. Právě takové lokální vlivy jsou však modelovány dále popsanou metodou WAsP, která za předpokladu dostatečně přesných vstupních dat tyto vlivy odstraní a tím se smažou i rozdíly vyvolané polohou jednotlivých míst měření. Navíc je schopna vyhodnotit vliv překážek v okolí anemometrů, který by byl v případě aplikace originálních dat také zdrojem chyb. V předkládané práci byla proto zvolena pro výpočet kombinace obou modelů, aby bylo docíleno co možná největší reprezentativnosti výsledku. Tento postup, pokud je nám známo, nebyl dosud použit.

Postup interpolace skalární veličiny do trojrozměrného prostoru je následující. Nejprve je pro každý bod se vstupními daty vypočten vertikální gradient proměnné. Mezi každou dvojicí měření s vertikálním převýšením větším než prahová hodnota (zde nastavena na 150m) je určen poměr du/dz , kde du je rozdíl počítané proměnné obou bodů a dz jejich převýšení. Pro rychlost větru jak celkovou, tak i v sektorech směru, bylo zavedeno ještě doplňující kritérium, podle kterého byly vybrány jen gradienty větší než nula. Z vyhovujících gradientů byl vypočítán průměr vážený inverzní vzdáleností mezi odpovídající dvojicí bodů. Takový způsob vážení zaručil, aby bližší stanice měly značně větší váhu pro výpočet gradientů. S pomocí gradientu je každé vstupní měření převedeno na referenční hladinu (zde bylo zvoleno 400 m n.m., což je kategorie nadmořských výšek, do které spadá poměrně velké množství meteorologických stanic). Dalším krokem metody je dvourozměrná interpolace gradientů a hodnot na referenční hladině do celé modelové domény. Zvolenou metodou je interpolace pomocí postupných korekcí, která byla detailně popsána ve zprávě projektu VaV 320/6/00 (Štekl a kol., 2002). Na základě digitálního modelu terénu je nakonec v bodech modelové sítě z interpolovaného gradientu a hodnoty na referenční hladině vypočtena výsledná hodnota proměnné v daném bodě.

Výstupem modelu VAS jsou tak pole vypočtených hodnot na základě (do určité míry vždy shlazené) orografie a dále pole vertikálních gradientů proměnné a hodnot na referenční hladině. Pro každou konkrétní lokalitu, pro kterou většinou můžeme určit nadmořskou výšku přesněji než ze čtverce rastrového digitálního modelu reliéfu, tak lze transformaci z referenční hladiny provést zvlášť. Pokud jde o horizontální krok sítě interpolace, je pro model VAS vhodné rozlišení v řádu kilometrů (v této aplikaci byl použit ověřený horizontální krok 2 km).

2.1.2 Metoda WAsP

Model WAsP představuje model proudění v přízemní vrstvě atmosféry složený z dílčích modelů postihujících různé účinky zemského povrchu na větrné charakteristiky (Troen & Petersen, 1989). Postup určení větrného potenciálu daného místa můžeme rozdělit na tři kroky:

1. Výpočet regionálních klimatologických charakteristik (Wind Atlas analysis model)
2. Aplikace regionálních klimatologických charakteristik (Wind Atlas application model)
3. Výpočet roční produkce energie v daném místě

První krok popisuje schéma 2.1. Naměřená data jsou zpracována do histogramů, u nichž jsou jednotlivými modely pro drsnost, orografii a případně i překážky (tato část nebyla v této aplikaci použita) přepočteny mezní hodnoty. Opravené histogramy jsou dále vertikálně posunuty do standardních hladin 10, 20, 50, 100 a 200 m. Teprve potom jsou z nich určovány parametry Weibullova rozdělení.

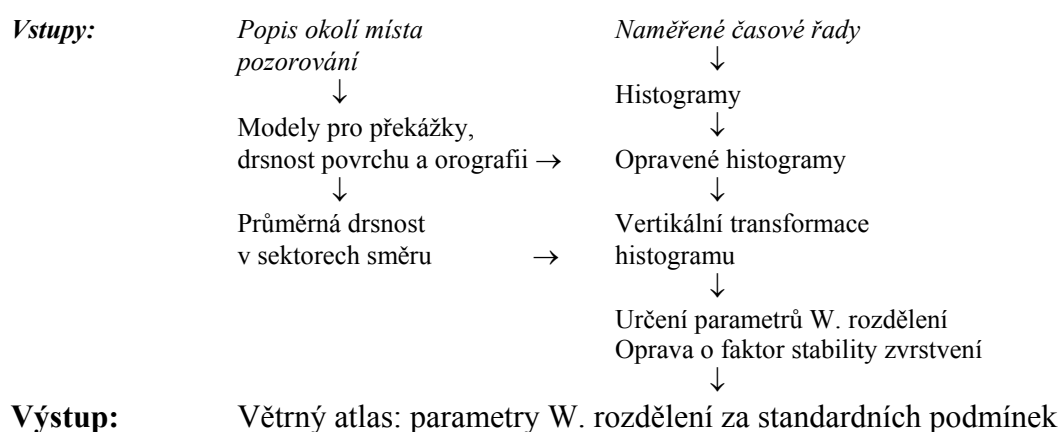
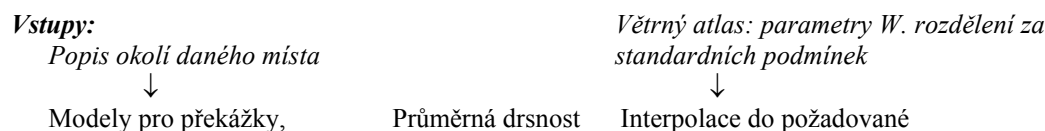


Schéma 2.1 Výpočet regionálních klimatologických charakteristik (Wind Atlas analysis model)

Výsledek prvního kroku představují regionálně platné charakteristiky pro standardní podmínky. V druhém kroku jsou opět použity k určení lokálního větrného klimatu. Druhý krok tak probíhá v opačném směru. Rozdílem je fakt, že se nepoužívají histogramy, ale pracuje se přímo s parametry Weibullova rozdělení. Opět je třeba aplikovat modely pro orografii a drsnost povrchu, pouze v opačném smyslu. Proces je naznačen na schématu 2.2.



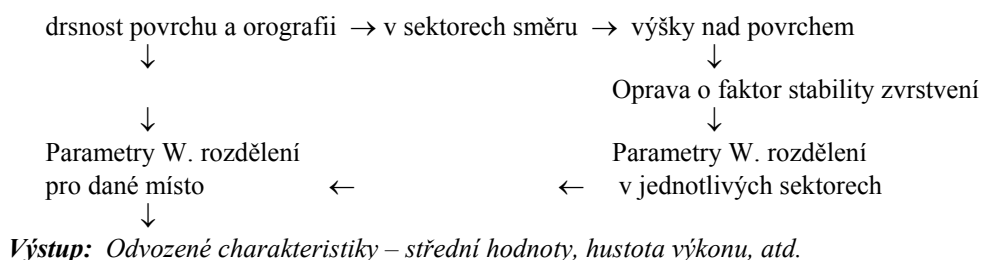


Schéma 2.2 Aplikace regionálních klimatologických charakteristik (Wind Atlas application model)

Vliv drsnosti povrchu a jejích změn na proudění je modelován pomocí konstrukce logaritmického vertikálního profilu větru za předpokladu neutrálního teplotního zvrstvení s malou opravou o odchylky způsobené stabilitou nebo nestabilitou atmosféry od tohoto základního stavu. Pro výpočet profilu je nezbytným vstupem parametr drsnosti povrchu, který program načítá jako digitální mapu nebo směrovou růžici. Změny parametru drsnosti povrchu vytvářejí v nejnižší části atmosféry interní mezní vrstvu, kde vertikální profil rychlosti větru ležící pod ní odpovídá místní drsnosti povrchu a profil ležící nad ní drsnosti povrchu před změnou. Model pak původní profil upraví ve snaze postihnout vliv interní mezní vrstvy. Vychází přitom ze závislosti výšky této vrstvy nad povrchem na vzdálenosti od místa změny drsnosti směrem po větru.

K simulaci odchylek v proudění způsobených orografii byl do programu WAsP integrován numerický model proudění využívající spektrálních metod. Jeden z největších rozdílů proti ostatním modelům spočívá v použití soustavy polárních souřadnic k popisu vstupních dat. To je umožněno zavedením válcových souřadnic r , ϕ a z , kde první je poloměr, druhá azimut a poslední výška nad zemským povrchem. Odchylky způsobené orografii jsou pak řešeny po jednotlivých sektorech směru větru. Střed soustavy je umístěn do počítaného bodu, takže popis terénu je v jeho okolí nejpřesnější a směrem od něj se stává hrubším. Postupujeme-li od něj kterýmukoli směrem, velikost buňky reprezentující jednu hodnotu se zvětšuje s každým krokem o 6% (Troen, 1990). Výpočet pole větru je založen na potenciálu proudění, přičemž je jedním z předpokladů indiferentní zvrstvení.

Sami autoři uvádějí, že model pro vliv orografie je v programu WAsP největším zdrojem chyb. Odhady zesílení rychlosti větru na vrcholu 1 až 2 km dlouhého kopce se sklonem svahů do 30% mají typickou chybu kolem 10% (Troen & Petersen, 1989) a pro strmější svahy se chyba zvětšuje. Z naší zkušenosti vyplývá, že model v případě velmi členité orografie její vliv nadhodnocuje.

Při výpočtu větrných charakteristik v jednom bodě, což při posuzování lokalit pro větrnou energetiku bývá, je výhodou použita soustava polárních souřadnic, která má popis orografie a drsnosti povrchu nejpřesnější v nejbližším okolí požadovaného místa, za předpokladu, že subjektivní určení parametru drsnosti odpovídá realitě. K určení plošného rozložení charakteristik se však výhoda poněkud vytrácí, protože pro každý bod je nutno celý proces opakovat a pokaždé s jinou soustavou souřadnic. Také je třeba připomenout metodu zpracování naměřených řad, která je zaměřena speciálně na energii větru a v níž model upřednostňuje vyšší než průměrné rychlosti. Určitá omezení dávají orografické podmínky v dané oblasti. Jelikož větší chyby se začínají objevovat u svahů strmějších než 30%, hodí se WAsP spíše pro použití v méně členitém terénu. Dále orografický model, zaměřený na zhodnocení vlivu lokálních terénních tvarů, dobře nevystihuje změny proudění vyvolané orografickými tvary většího měřítka (řádově desítek případně stovek kilometrů) a předpokládá indiferentní teplotní zvrstvení (ve skutečnosti je zvrstvení spíše stabilní), což

vyžaduje typ použité metodiky pro simulaci větru. Velkou výhodou je u WAsPu díky spektrálním metodám mnohem menší časová náročnost výpočtu než u numerických modelů proudění, které rovnice integrují v po sobě následujících iteracích.

Teoreticky lze model aplikovat v jakémkoli horizontálním rozlišení, hranici tak určuje přesnost zpracování vstupních dat. S geografickými daty, jaké jsou dnes k dispozici, má již smysl používat rozlišení 100x100 metrů sítě modelovaných bodů.

2.1.3 Vstupy popisující orografii a parametr drsnosti povrchu

Vstupem, který v modelu popisoval celkovou orografii, byl v našem případě digitální model reliéfu DMR s horizontálním krokem 100m. Souřadný systém modelu reliéfu představoval systém S42 zobrazený v Gauss-Krügerově projekci. V důsledku toho byly tyto souřadnice vybrány jako základní pro výpočet a zobrazení výsledků. Jediným problémem je diskontinuita Gauss-Krügerova zobrazení na 18 poledníku v.š., 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 stále zůstávají vzhledem k danému účelu zanedbatelné.

Jelikož model WAsP vyžaduje terén popsáný vrstevnicemi, bylo nutno převést rastrovou orografii do vektorové podoby. Při zpracování vstupních meteorologických měření byl zvolen interval vrstevnic 5 – 10 metrů v závislosti na členitosti povrchu. Pro konečné zpracování, při kterém byly jednotlivé digitální mapy podstatně rozsáhlejší měly vrstevnice intervaly 10 – 20 metrů. K převodu, stejně jako k práci s ostatními digitálními geografickými vstupy a výstupy, byl využit geografický informační systém ArcView 3.1. Příklad použitého rastrového digitálního modelu reliéfu s rozlišením 100 m a interpolovaných vrstevnic ukazuje [obrázek 2.1](#).

Podrobnější popis orografie byl vyžadován v okolí vstupních meteorologických měření. K tomu účelu byly zakoupeny digitální mapy reliéfu ze sady DMÚ 25 – digitální model území v rozlišení 1:25 000. Orografie je zde vyjádřena jako vrstevnice s intervalem 5 metrů a nebylo již proto třeba model reliéfu převádět. Příklad vrstevnic digitálního modelu terénu DMÚ 25 ukazuje [obrázek 2.2](#).

Obr. 2.1 Orografie 100x100m a vrstevnice interpolované v intervalu 10 m **Obr. 2.2** Orografie 100x100m a vrstevnice DMÚ25 s intervalem 5 m

Parametr drsnosti povrchu patří k nezbytným vstupům většiny meteorologických modelů. Představuje v nich důležitou okrajovou podmínku k řešení rovnice vertikálního profilu rychlosti větru. Pro jednotlivá místa je nejlepším způsobem určení parametru drsnosti povrchu v požadovaném místě uskutečnit profilová měření rychlosti větru a teploty. Tyto experimenty jsou však velmi časově a materiálně náročné a navíc jimi lze pokrýt jen nejbližší okolí meteorologického stožáru, na němž jsou přístroje umístěny. Pro výpočty nad větší plochou, což je i případ této práce, je nejvhodnějším a často jediným způsobem určení parametru drsnosti povrchu odhad na základě typu povrchu (resp. jeho pokryvu), který se v daném místě vyskytuje. Jednou z možností je v takovém případě využít některé z řady klasifikací land-use, resp. land-cover (klasifikace využití půdy, resp. zemského pokryvu). Velkou výhodou je, že tyto klasifikace bývají zpracovány již v digitální podobě. Každý typ povrchu se zde vyznačuje určitou charakteristickou drsností, tedy typickou hodnotou parametru drsnosti. Vzhledem

k tomu, že v minulosti proběhla řada měření vertikálního profilu větru, je v literatuře k dispozici dostatek informací přiřazujících různým třídám typu povrchu takovou typickou hodnotu. Dobrým vodítkem může být například [Wieringova práce \(1993\)](#), která shrnuje řadu měření nad homogenními povrchy ve snaze získat pro ně reprezentativní hodnoty parametru drsnosti povrchu a výšky hladiny posunutí.

V našem případě byla k určení parametru drsnosti povrchu vybrána mezinárodní klasifikace CORINE (land-cover), která pokrývá celé území ČR. 32 kategorií této klasifikace vyskytujících se na našem území bylo dále sloučeno podle přiřazené hodnoty parametru drsnosti. Přesnost zpracování odpovídá měřítku 1:100 000, což je pro danou výpočetní síť postačující. Spektrum hodnot parametru drsnosti popisující konečných 9 tříd je podstatně širší, než původních standardních 5 kategorií 0.0001 m, 0.03 m, 0.1 m, 0.4 m a 1.0 m.

[Tabulka 2.1](#) obsahuje hodnoty přiřazené kategoriím land-cover. Příklad rozložení parametru drsnosti povrchu zobrazuje [obrázek 2.3](#). Vzhledem k tomu, že výška nad povrchem se skutečně počítá od určité hladiny uvnitř vrstvy překážek ovlivňujících profil větru, není parametr drsnosti jen vstupem do modelu, ale i vodítkem k určení výšky, pro kterou je vítr modelován. Ačkoliv v místech, kde se dá předpokládat stavba větrné elektrárny, dosahuje parametr drsnosti povrchu jen nízkých hodnot a povrch je velmi dobře definován.

| <i>Kategorie</i> | <i>z_0 (m)</i> |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <i>vodní plochy</i> | 0.0002 |
| <i>letiště, holé skály</i> | 0.02 |
| <i>orná půda, louky, pastviny</i> | 0.05 |
| <i>zemědělská krajina s příměsí přirozené vegetace</i> | 0.1 |
| <i>vinice, ovocné sady</i> | 0.3 |
| <i>komplexní systémy kultur a parcel</i> | 0.4 |
| <i>střídající se lesy a křoviny</i> | 0.5 |
| <i>zástavba, průmyslové zóny</i> | 0.6 |
| <i>lesní porosty</i> | 0.8 |

Tabulka 2.1 Charakteristické hodnoty parametru drsnosti povrchu (z_0) pro kategorie land-cover

Obr. 2.3 Parametr drsnosti povrchu v oblasti meteorologické stanice Červená

Použití digitální mapy land-cover jako podkladu k vyhodnocení drsnosti povrchu je jistě výhodné vzhledem k jejímu pokrytí celého území ČR, ale její přesnost je tím do určité míry omezená (nerozlišuje výšku lesa, území pod hranicí rozlišitelnosti nejsou vyhodnocována). V té části výpočtu, kdy jsou data naměřená na meteorologických stanicích očišťována od místních vlivů, je parametr drsnosti povrchu jedním z klíčových faktorů ovlivňujících výsledek odstranění lokálních vlivů z naměřených dat. Nároky na přesnost určení tohoto parametru jsou tu proto vyšší a digitální mapy, které ho popisují, byly často v nejbližším okolí lokalit vstupních měření upraveny na základě zpracování údajů o poloze meteorologických stanic.

2.1.4 Větroměrná data

2.1.4.1 Charakteristika použitých větroměrných dat

Podkladem pro výpočet pole větru v České Republice byla větroměrná data z klimatických a synoptických stanic na území České republiky a blízkého zahraničí. K dispozici byla:

a) klimatická data ze 170 klimatických a 35 synoptických stanic zakoupená od ČHMÚ. Jedná se o údaje ze tří standardních klimatických termínů (7h, 14h a 21h). Data zpravidla pokrývají období 1993-2003; u některých klimatických stanic byla k dispozici jen pro období 1993-1998 - data ze 40 takových stanic nebyla dále zpracovávána.

b) synoptická data ze 40 českých a ze zahraničních synoptických stanic z vlastních zdrojů ÚFA AV ČR. Jedná se o údaje z hodinových synoptických měření (ve výjimečných případech jen z hlavních či vedlejších synoptických termínů) a pokrývají zpravidla období 1994-2003.

V případech, kdy byla na synoptické stanici k dispozici současně klimatická i synoptická data, byla použita synoptická data. Byla tedy zpracovávána klimatická data ze 130 klimatických stanic a synoptická data ze 40 českých a 13 zahraničních synoptických stanic, celkem ze 183 stanic.

Na větroměrných stanicích byly ve zpracovávaném období používány různé typy měřících přístrojů:

Na synoptických stanicích byl používán *Univerzální anemograf Metra*, který podává kontinuální záznam (anemogram) okamžité rychlosti větru, celkové dráhy větru a směru větru. Okamžitá rychlost větru je měřena na principu Pitotovy trubice, celková dráha větru je měřena miskovým anemometrem a směr větru tradičně směrovkou. Termínové hodnoty jsou odečítány z anemogramu. Anemograf Metra byl v posledních letech vesměs nahrazen miskovými anemometry Väisälä, které předávají data již v elektronické podobě.

Na klimatologických stanicích byl ve valné většině používán tzv. *anemoindikátor*. Anemoindikátor se skládá z měřící hlavice tvořené miskovým anemometrem a směrovkou a z indikačního přístroje s osmipólovým přepínačem a tlačítkem. Hlavice se umísťuje na sklopný ocelový stožár opatřený bleskosvodem. Indikační přístroj, který je propojen s hlavicí kabelem, je umístěn v místnosti, případně v meteorologické budce, do vzdálenosti až 50m od stožáru. Při určování směru větru se postupně přepínají polohy přepínače, dokud indikátor nezačne ukazovat rychlost větru. Pokud ukazuje indikátor rychlost větru pouze v jedné poloze, je tato totožná se směrem větru. Ukazuje-li indikátor rychlost větru ve dvou sousedních polohách (ať současně či střídavě), leží hodnota směru mezi těmito polohami. Rychlost větru se odečte z indikátoru po přepnutí přepínače na směr, který právě ukazuje směrovka. Rychlost lze přečíst rovněž přímo po stisknutí tlačítka. Tlačítko se též využívá při malých rychlostech větru (blízkých bezvětří), aby se pozorovatel přesvědčil, zda lze odečíst směr. Pokud má pozorovatel podezření na špatnou funkci měřícího přístroje, je povinen odhadovat rychlost větru podle stupňů Beauforta ([Návod pro pozorovatele, 1994](#)). Tato technika, jak vyplývá z uvedeného, nezaručuje potřebnou přesnost měření. Přístroje jsou v provozu i několik desetiletí, nejsou přecejchovány a obsluhují je pozorovatelé - dobrovolníci. V současné době dochází k postupné automatizaci klimatologických stanic, při níž jsou anemoindikátory nahrazovány anemometry Väisälä.

Cejchování použitých anemometrů na profesionálních stanicích je prováděno standardně jedenkrát za 2 roky, v případě poškození bleskem, námrazou či při jiné mechanické poruše i častěji.

Předcházející zpracování statistického modelu [VAS1 \(Štekl a kol., 1994\)](#) vycházelo ze synoptických dat na území ČR v období 1989-1992 a zpracování modelem [VAS2 \(Štekl a](#)

kol., 2002) vycházelo z klimatických dat na území ČR v období 1961-1990 a dat v příhraničních oblastech přepočtených na toto období. Ukázalo se, že data v období 1961-1990 byla systematicky a přitom nerovnoměrně snížena v hodnotě rychlosti větru v důsledku stínění okolními překážkami. Soubor dat pro model VAS1 byl pouze čtyřletý a využíval poměrně malého počtu stanic, a proto nezaručoval dostatečnou reprezentativnost.

Vzhledem k existenci denního chodu rychlosti, případně i směru větru, nejsou výsledky získané z měření ve třech klimatických termínech denně zcela totožné s výsledky získanými z 24 hodinových měření. Porovnání klimatických a synoptických dat ze synoptických stanic, kde byly k dispozici obojí, ukázalo, že klimatická data dávají o 0 až 0.15 m/s (typicky o 0.05 až 0.1 m/s) vyšší průměrnou rychlost než synoptická data. To je dáno relativně vyšší vahou denní doby vůči noční v klimatických datech ve spojení se skutečností, že ve dne je na většině stanic vyšší průměrná rychlost větru než v noci. Po zvážení více možností byla zvolena cesta ponechat klimatická i synoptická data v původní podobě s tím, že takto vzniklé mírné nadhodnocení rychlosti větru na klimatických stanicích je částečně kompenzováno nižší citlivostí přístrojů na těchto stanicích. Jak bude popsáno dále, je takto vzniklá chyba zanedbatelná vůči jiným, závažnějším zdrojům nejistoty.

Pro použití naměřených hodnot meteorologického prvku ke klimatologickým účelům je nutno použít dostatečně dlouhou řadu, aby nebyla významně ovlivněna krátkodobými odchylkami. Z toho důvodu se v klimatologii stanovuje standardní období, po které by mělo trvat měření, aby jej bylo možno považovat za klimatologicky průkazné. Nejčastěji se v této souvislosti mluví o 30-leté řadě měření. V našem případě byly z mnoha důvodů použity výrazně kratší, zpravidla 10-leté či 11-leté řady měření. Domníváme se však, že použití delší řady měření by již neznamenal citelné zvýšení vypovídací schopnosti dat, ale zato by vedlo ke zhoršení komplikací daných problematou kvalitou a reprezentativností větroměrných dat.

2.1.4.2 Základní opravy větroměrných dat

U zpracovávaných stanic byla nejprve provedena zevrubná kontrola větroměrných dat. Takto bylo nalezeno a opraveno několik typů zjevných chyb. Nejzávažnější byly tyto dvě opravy:

a) Směr větru na klimatických stanicích byl často měřen v 8-dílné či 16-dílné stupnici, avšak zapisován byl v desítkách stupňů. Takto byla například SSV směru přiřazena hodnota 20° namísto 22.5°, SV směru 40° namísto 45°, VSV směru 70° namísto 67.5° atd. Způsob zápisu dat se navíc často v průběhu času měnil. Pokud by tato data byla použita v původní podobě, došlo by k výrazné deformaci směrové růžice. Proto byla všechna období s 8-směnou či 16-směnou stupnicí vyhledána a jednotlivým směrům přiřazeny jejich předpokládané skutečné hodnoty

b) Rychlost větru byla v některých obdobích uváděna v desetinných číslech. Jak vyplynulo z kontextu, nejednalo se v těchto případech o přesnější údaje rychlosti větru, ale o mylný posun desetinné čárky. Všechny hodnoty rychlosti větru psané v desetinných číslech proto byly vynásobeny deseti.

Dalším krokem bylo převedení větroměrných dat do formátu, používaného modelem WAsP. K tomuto účelu musely být upraveny všechny případy bezvětří. Model WAsP takové termíny zařazuje rovnoměrně do všech směrů, což při vyšším počtu bezvětří silně ovlivňuje průměrné rychlosti v jednotlivých směrech (snižuje se rychlost v málo četných směrech a naopak se zvyšuje ve frekventovaných směrech). Proto byly případy bezvětří před importem do formátu modelu WAsP nahrazeny rychlostmi 0.001 m/s (aby nebyly modelem považovány za bezvětří) a byly rozděleny do jednotlivých směrů s četnostmi úměrnými četnostem nenulových rychlostí větru.

2.1.4.3 Výběr použitých stanic a odstranění vlivu okolí

Pro výpočet pole větru kombinací modelů VAS/WAsP je vhodné využít co nejvyšší počet větroměrných stanic, aby byla co nejlépe zachycena prostorová proměnlivost větrných poměrů v České republice. Na druhou stranu ale nesmí být použity příliš nekvalitní či neopravitelně nereprezentativní stanice, neboť potom by výpočet vedl k nesprávným či zavádějícím výsledkům. Z toho důvodu bylo přistupováno k výběru použitých stanic s mimořádnou opatrností.

Kritérii při výběru použitých stanic byly především:

- stínění stanic blízkými překážkami
- orografie v okolí stanice
- charakter a kvalita naměřených dat

Při rozhodování, zda bude určitá stanice použita či nikoli, byla brána v úvahu také "potřebnost" této stanice v modelu. Jestliže se v blízkosti mírně problematické stanice nacházela jiná, kvalitnější stanice, potom méně kvalitní stanice nebyla použita. Naopak pokud se v širokém okolí stanice nenacházela jiná použitelná stanice, potom byla použita i méně kvalitní stanice. V žádném případě však nebyla použita taková stanice, o jejichž kvalitě by panovaly závažnější pochybnosti.

U vybraných stanic byl prostřednictvím modelu WAsP modelován a následně odstraněn vliv okolí stanice na naměřená data. Tímto způsobem bylo vypočteno "ideální větrné klima" dané stanice, jaké by se v místě stanice nacházelo za ideálních podmínek (absolutně rovný terén, žádné překážky, konstantní parametr drsnosti). Tento pak sloužil jako vstup do další fáze modelování.

2.1.4.4 Kvalita a reprezentativnost větroměrných dat

Kvalita a reprezentativnost větroměrných dat má klíčový význam pro kvalitu výsledné mapy větru. Proto jim byla věnována mimořádná pozornost.

Za **kvalitní** lze považovat takovou řadu měření větru, která věrně vystihuje větrné klima v místě stanice ve výšce 10m nad terénem. Dosáhnout kvalitní větroměrné řady není samozřejmostí, neboť z hlediska měření patří vítr k nejproblematičtějším meteorologickým prvkům. Naměřené výsledky rychlosti a směru větru jsou často zásadně ovlivňovány nejrůznějšími vnějšími vlivy, například:

- typem a kvalitou používaného anemometru
- svědomitostí a návyky pozorovatele (resp. pozorovatelů) na meteorologické stanici
- charakterem bezprostředního okolí stanice (existence či neexistence překážek v blízkém okolí anemometru, umístění anemometru (na stožáru, na střeše budovy ...))

Uvedené (a další) faktory jsou nezdědka časově proměnlivé a vedle zkreslení průměrných hodnot mohou vnášet do časové řady větroměrných dat různé nereálné trendy či náhlé změny. Tyto výrazně komplikují či znemožňují rozpoznání skutečných klimatických trendů, avšak pro naše účely spíše napomáhají rozpoznání málo kvalitních dat.

Odstranění nežádoucích vnějších vlivů z naměřených dat je velmi obtížné, často prakticky nemožné. Lze jedinečně hodnotit kvalitu větroměrných dat a na jejím základě nekvalitní data vyřadit.

Za **reprezentativní** lze považovat taková větroměrná data, která odrážejí typické větrné poměry v širším okolí stanice. Ideálně reprezentativní stanice se nachází na otevřeném prostranství, v rovinném terénu či na mírně vyvýšenině, v jejím okolí se nenacházejí žádné

výrazné terénní útvary či překážky. Je pochopitelné, že v České republice neexistuje mnoho stanic, které by se tomuto ideálu blížily a většina stanic je více či méně nereprezentativních. Především v horských oblastech lze jen těžko najít skutečně reprezentativní místo pro stanici (s výjimkou vrcholových poloh). Nízkou reprezentativností ovšem trpí i velký počet především dobrovolnických stanic v nižších polohách.

Na rozdíl od nízké kvality měření lze nereprezentativnost polohy stanice do jisté míry modelovat a následně odstranit.

2.1.4.5 Fyzická kontrola větroměrných stanic

Ukázalo se, že pro správné ohodnocení kvality měření a pro věrohodné odstranění vlivů blízkého okolí na naměřená data, je velkým přínosem fyzická návštěva na místě stanice. Proto byl během léta 2003 proveden terénní průzkum vybraných větroměrných stanic. Na navštívených stanicích byla přesně zaměřena jejich poloha, kompletně vyfotografováno jejich okolí a zmapovány výrazné překážky v okolí, v některých případech byla také hrubě zmapována drsnost terénu v širším okolí stanice. Vzhledem k omezeným časovým možnostem nebylo možno navštívit všechny stanice, proto byly přednostně navštíveny stanice v oblastech klíčových pro rozvoj větrné energetiky. Byly navštíveny všechny stanice, nacházející se na Moravě, ve východních a severních Čechách a na Vysočině s výjimkou několika zjevně nepoužitelných stanic. Většina stanic v jižních a západních Čechách nebyla navštívena.

2.1.4.6 Stínění stanice blízkými překážkami

Informace o okolí stanice byly u navštívených stanic získány osobní zkušeností a prostřednictvím vytvořené přehledné sestavy fotografií; u ostatních stanic byla jediným zdrojem informací poloha stanice na topografické mapě, v některých případech též fotografie od ČHMÚ.

Z práce s modelem WAsP vyplynulo, že model je schopen poměrně věrohodně modelovat a odstranit vliv rozdílného parametru drsnosti v okolí stanice. Vliv překážek WAsP věrohodně modeluje tehdy, pokud se nejedná o příliš blízké či vysoké překážky. Překážky v bezprostředním okolí stanice lze v modelu WAsP spíše parametrizovat nežli modelovat (je nutno podhodnotit jejich velikost, jinak model udává nereálně vysoké opravy). Existence blízkých, relativně vysokých překážek (typicky stromů, v některých případech i budov kolem stanice) je proto faktorem výrazně snižujícím kvalitu a tím pádem i použitelnost měření. Z různých typů překážek model udává příliš vysoké opravy pro domy se šikmou střechou (bylo nutno uvažovat jen část výšky šikmé části budovy) a při modelování více řad překážek nacházejících se za sebou (byla uvažována vždy jen nejbližší překážka).

Obecně platí, že čím bližší, vyšší a četnější překážky se nacházejí v okolí stanice, tím méně kvalitní výsledky lze od takové stanice očekávat. Jen část převážně synoptických stanic se nachází na volných prostranstvích bez významných překážek v jejich blízkém okolí a z tohoto hlediska je lze považovat za bezproblémové. Naopak některé stanice se nacházejí v naprosto nevhodné poloze mezi vysokými stromy či domy. Takové stanice byly vždy vyřazeny. Typická klimatologická stanice je obklopena stromy nižšími či srovnatelně vysokými s výškou anemometru, částečně i nižšími budovami. To je obvyklý případ stanic, nacházejících se uvnitř či na okraji obcí, nejčastěji v zahradách obytných domů či na prostranstvích mezi domy. Použití těchto stanic se mnohdy nebylo možno vyhnout. U navštívených stanic proto byly významné překážky zmapovány a vloženy do modelu WAsP. U některých stanic bylo na základě terénního průzkumu upraveno i rozložení parametru drsnosti. U nenavštívených stanic bylo předpokládáno stínění vlivem okolí v některých

případech alespoň parametrizováno. Otázkou je, jakým způsobem je ovlivněno měření prováděné v nevelké výšce nad střechou budovy, což je případ několika klimatologických a mnoha synoptických stanic.

2.1.4.7 Orografie v okolí stanice

Obecně platí, že čím členitější a komplikovanější terén je v okolí stanice, tím méně reprezentativní jsou měření na této stanici a tím méně spolehlivě lze vliv terénu odstranit modelem WAsP. Stanice v rovinatém nebo mírně zvlněném terénu jsou z tohoto pohledu bezproblémové. Stanice ve středně zvlněném terénu, který je typický například pro Českomoravskou vrchovinu, byly ve většině případů použity (pokud byly jinak kvalitní), avšak při větších sklonech svahů či v příliš komplikovaném terénu bylo ve výjimečných případech nutno vložit dodatečné opravy, snižující velikost modelem udávaných orografických oprav.

Nejhorší situace nastává v horských oblastech. Zde se mnoho stanic nachází ve strmých svazích či na dně hlubokých údolí. Takové stanice byly většinou vyřazeny, neboť proudění je zde natolik silně formováno okolním terénem, že se do značné míry ztrácí původní "reprezentativní" informace o větru. Možnosti modelu WAsP odstranit vliv terénu jsou u těchto stanic velmi omezené.

Použitelnou informaci jsou v horských oblastech schopny podat především stanice ve vrcholových polohách, což jsou zároveň převážně kvalitní profesionální stanice. Orografické opravy modelu WAsP jsou u těchto stanic natolik vysoké a nerealistické, že bylo nutno sáhnout k výrazným korekcím (Přimda, Klínovec, Sněžka). K některým stanicím pak bylo přistupováno zcela odlišným způsobem (Grosser Arber, Milešovka, Praděd, Lysá hora): Vyjdeme-li z předpokladu, že větrné poměry těchto stanic lze považovat za reprezentativní pro danou nadmořskou výšku, pak lze jejich měření použít přímo jako vstup do modelu VAS. Na tyto stanice tedy nebyl aplikován proces odstranění lokálních vlivů modelem WAsP a následného zpětného výpočtu.

Významným problémem jsou velkoprostorové orografické útvary jako jsou česká pohraniční pohoří včetně podhůří či moravské úvaly a brány, jejichž vliv nelze modelem WAsP modelovat (na rozdíl od modelu PIAP). V takových oblastech je potřeba mít k dispozici dostatečný počet vhodně rozmístěných stanic. Tak například stanice Ostrava-Mošnov a Běloutín vystihují proudění v Moravské bráně a stanice Staré Město u Uherského Hradiště vystihuje proudění v Dolnomoravském úvalu. Naproti tomu neexistuje vhodná stanice, která by vystihovala proudění v severní části Hornomoravského úvalu, a proto zde lze očekávat méně kvalitní výsledky. Proudění ve Vyškovské bráně je částečně vystihnuto stanicí Brno-Tuřany, na druhou stranu tato stanice bude mírně zkreslovat výsledky ve svém okolí mimo Vyškovskou bránu. V takových oblastech proto nelze zcela spoléhat na výsledky modelu VAS/WAsP a zvýšenou pozornost je třeba věnovat výsledkům modelu PIAP.

S horskými oblastmi a s orografickými formami středního a velkého měřítka je spojena také otázka místních cirkulačních systémů (tj. horských a údolních větrů) a větrů typu fěnu či bóry. Výskyt těchto prostorově velmi heterogenních typů proudění na území České republiky je dosud zmapován jen částečně, data z některých horských a podhorských stanicích však ukazují na jejich nezanedbatelný význam na lokální klima. Vzhledem k velké prostorové proměnlivosti těchto typů proudění a malým rozměrům území, které je jimi ovlivněno, nelze tyto jevy modelem VAS/WAsP dostatečně dobře popsat. Podchyceny mohou být pouze lokálně, a to tehdy, když se v místě jejich výskytu nachází meteorologická stanice. V takovém případě naopak bylo nutno zvážit, zda extrapolace lokálních podmínek do širšího okolí nepovede k zavádějícím výsledkům ve větší vzdálenosti od pohoří. Vyřazena však z tohoto důvodu žádná stanice nebyla.

2.1.4.8 Charakter naměřených dat

Při bližším pohledu na naměřená data lze leccos usoudit o jejich kvalitě. Kvalitní data se vyznačují takovým četnostním rozdělením rychlostí větru, které přibližně odpovídá křivce Weibullova rozdělení. Průměrné rychlosti i četnostní rozdělení rychlosti větru v průběhu času mírně kolísají, ale nevyskytuje se zde žádný výrazný trend ani náhlé skokové změny (leđa, že by se takový trend nebo takové změny vyskytovaly simultánně na více navzájem blízkých stanicích).

Ve skutečnosti bývá četnostní rozdělení rychlostí větru od Weibullova rozdělení dosti vzdálené, a to zejména na klimatických stanicích při měření větru prostřednictvím anemoindikátoru, zřejmě především v důsledku nízké citlivosti přístroje a rozdílných návyků pozorovatelů. Na synoptických stanicích zpravidla četnostní rozdělení rychlostí větru přibližně odpovídá Weibullovu rozdělení, stejně jako měření na automatizovaných klimatických stanicích.

Zdaleka nejběžnější vadou je příliš vysoká četnost bezvětří zpravidla ve spojení s nízkou četností rychlostí větru 1 m/s, případně i 2 m/s. To je zjevně způsobeno nízkou citlivostí přístroje, který začíná měřit teprve od rychlostí 2-3 m/s. Rozdílné návyky pozorovatelů a rozdílná kvalita přístrojů jsou pak zřejmě důvodem, proč se četnost bezvětří stanici od stanice velmi výrazně liší. Na menším počtu stanic je naopak velmi málo bezvětří a mnoho rychlostí 1 m/s - to nejspíš pozorovatel zapisoval rychlost 1 m/s i při nepatrném pohybu vzduchu bez ohledu na neotáčející se misky anemometru. Naštěstí rychlosti větru pod 3 m/s nehrají podstatnou roli při výpočtu energie větru. Model WASP pro své výpočty nahrazuje naměřená data teoretickým Weibullovým rozdělením tak, aby byla zachována energie větru a nikoli průměrná rychlost. Průměrná rychlost je proto touto vadou ovlivněna (zpravidla podhodnocena) jen mírně, což je chyba, která zřejmě směřuje převážně proti smyslu chyby způsobené prováděním měření pouze ve třech klimatických termínech. Spíše než průměrná rychlost či energie větru je takto negativně ovlivněn méně důležitý parametr k Weibullova rozdělení. Stanice proto nebyly kvůli vysokému podílu bezvětří vyřazovány, pokud byly v jiných ohledech kvalitní.

Důležitou, avšak nezodpovězenou otázkou, je věrohodnost dat při velkých rychlostech větru. Ze srovnání jednotlivých roků či jednotlivých stanic často vyplývá vysoká variabilita četností a velikostí velkých rychlostí větru. Tato variabilita v některých případech zjevně neodráží skutečnost, ale spíše nejednotnost či nehomogenitu měření vysokých rychlostí. Nejvýrazněji se projevuje při automatizaci stanic, kdy zpravidla došlo k výraznému poklesu velkých rychlostí. Velké rychlosti mají velkou váhu při výpočtu energie větru, ale celkově jsou málo četné, a proto lze také předpokládat, že ve většině případů nemá jejich nejednotné měření zásadní vliv na konečný výsledek.

Další typickou vadou klimatických dat je preference vybraných rychlostí větru. Jedná se například o sudé hodnoty nebo, častěji, o hodnoty odpovídající stupňům Beaufortovy stupnice. Přitom však tyto "Beaufortovské" preferované rychlosti nejsou zcela jednotné, ale u některých stanic se liší. Opět se nejedná o zásadní překážku použitelnosti stanice pro výpočet, ale o indikátor snížené kvality příslušné stanice.

U některých stanic se vyskytují výhradně rychlosti větru odpovídající Beaufortově stupnici. Z terénního průzkumu vyplynulo, že se většinou jedná o stanice bez anemometru, kde je rychlost větru pouze odhadována podle Beauforta. Takové stanice nebyly použity.

Použity nebyly ani stanice s extrémně nízkou rychlostí větru. Ukazuje se, že stanice s rychlostí větru pod 1,5 m/s leží vždy v natolik nereprezentativní poloze, že je nelze věrohodně "očistit" od vlivu okolí.

Překvapivě se ukázaly velmi nedůvěryhodnými i některé stanice s příliš vysokými rychlostmi větru (Chrudim, Staré Město, Jablunkov). V případě použití těchto stanic vycházejí zjevně nereálné výsledky. Jistou indicií může být skutečnost, že na těchto stanicích zcela chybí rychlosti větru 0 či 1 m/s. Nabízí se tak vysvětlení, že jsou na těchto stanicích všechny rychlosti větru o určitou hodnotu posunuty nahoru. Avšak to je pouze spekulace a vzhledem k tomu, že podstata a velikost této chyby není známa spolehlivě, musely být uvedené stanice vyřazeny.

U velkého počtu stanic, včetně některých profesionálních, se vyskytuje zjevná *časová nehomogenita* naměřených dat. Nehomogenity se změnou průměrné rychlosti nebo změnou četnostního rozdělení, často však obojím. Nehomogenity mají podobu nereálných trendů či náhlých změn, v některých případech však není zřejmé, zda se jedná o trend či několik skokových změn.

Existuje celá řada možných příčin vzniku nehomogenit v časové řadě měření. Jejich výskyt ale vždy upozorňuje na problematickou kvalitu příslušného měření nebo přinejmenším jeho části.

Nejtypičtější příčinou skokové nehomogenity byl přechod na měřicí přístroje Väisälä. Zatímco na synoptických stanicích přechod z Univerzálního anemografu Metra na přístroj Väisälä neznamenal příliš výraznou změnu (někdy došlo k mírnému poklesu průměrné rychlosti větru či mírnému poklesu počtu bezvětří), automatizace klimatologických stanic je zcela nepřehlédnutelná. V důsledku automatizace se vždy výrazně změnilo četnostní rozdělení: zpravidla poklesla četnost velkých rychlostí větru a bezvětří (často velmi silně) a celé četnostní rozdělení se přiblížilo Weibullovu rozdělení. Průměrná rychlost větru se většinou tolik nezměnila; častěji docházelo k jejímu poklesu nežli k nárůstu.

Vedle této snadno vysvětlitelné a pochopitelné nehomogenity se na některých stanicích vyskytovaly nehomogenity, o jejichž příčině se lze jen dohadovat. Nereálné trendy v datových řadách mohly být způsobeny například stárnutím přístroje, růstem vegetace či stavební činností v okolí větroměrné stanice. Náhlé změny pak nejspíš výměnou přístroje či pozorovatele, kácením stromů kolem stanice a v některých případech i stěhováním stanice (informace o stěhování byly na rozdíl od ostatních událostí k dispozici). Výskyt takových nehomogenit vždy výrazně snižuje důvěryhodnost příslušné stanice. Kvůli neúnosnému kolísání průměrné rychlosti byly některé stanice vyřazeny. U jiných stanic byly použity jen některé roky měření (vždy pouze celé roky, aby nedošlo k chybě v důsledku ročního chodu rychlosti větru). Tak bylo činěno tehdy, bylo-li možno očekávat, že chyba způsobená krátkým pozorovacím obdobím bude mít menší dopad na kvalitu výsledné mapy větru než chyba způsobená použitím nedůvěryhodných dat či nezařazením stanice do výběru. Nejčastěji se to týkalo automatizovaných stanic, ze kterých byla použita pouze data z let po automatizaci.

2.1.5 Realizace hybridního modelu VAS / WAsP

V první části aplikace metody složené z modelů WAsP a VAS byla původní data očištěna od vlivu nejbližšího okolí a jejím výsledkem byly klimatické charakteristiky větru pro referenční výšky nad povrchem a referenční drsnosti povrchu. Tyto podmínky by se na daném místě vyskytly, pokud by zde byla homogenní a konstantní drsnost povrchu, plochý terén a pokud by proudění nenarušovaly žádné překážky. K odstranění lokálních vlivů byly použity všechny části programu WAsP – model pro orografii, drsnost povrchu i překážky. Tato část výpočtu do značné míry souvisí se zpracováním větroměrných dat a údajů o poloze a okolí stanic, popsaným v první části textu.

Regionálně platné charakteristiky větru byly při dalším zpracování aplikovány na digitální model reliéfu shlazený s poloměrem 2 km a referenční drsnost povrchu $z_0 = 0,1$ m. Poloměr hlazení terénu byl nastaven na 2 km, jelikož tato vzdálenost odpovídá horizontálnímu kroku následné interpolace. Model WASP byl v této fázi výpočtu aplikován v opačném smyslu než v předešlém výpočtu – vliv orografie a drsnosti povrchu byl k idealizovanému proudění připočten. Výpočtem bylo získáno 26 proměnných charakterizujících větrné poměry širšího okolí stanic: průměrná rychlost větru a parametr k Weibullova rozdělení jak celkově, tak po jednotlivých sektorech směru větru, a dále četnost větru v těchto sektorech. Výsledné hodnoty odpovídají proudění v 10 metrech nad povrchem shlazeného terénu s homogenním parametrem drsnosti povrchu 0.1 m.

V dalším kroku výpočtu byly proměnné interpolovány metodou VAS, která je popsána v [části 2.2.1](#), do sítě uzlových bodů s krokem 2 km a bilineární interpolací zahuštěny do sítě s krokem 500m. Tato pole byla důležitým mezivýsledkem výpočtu, a proto je alespoň původní pole průměrné rychlosti s rozlišením 2 km uvedeno v [příloze 2](#). Výsledná pole byla dostatečným zdrojem informací pro následné modelování programem WASP a mohla být upravena do požadovaného formátu histogramů.

Posledním krokem výpočtu byla opět aplikace modelu WASP. Z interpolovaných hodnot byl odstraněn vliv shlazeného terénu použitého v interpolaci a byly získány očištěné klimatologické charakteristiky větru v síti bodů s krokem 500 metrů. V konečném rozlišení 100x100 m byly tyto hodnoty aplikovány na digitální model terénu a parametru drsnosti povrchu. Vzhledem k tomu, že toto rozlišení právě odpovídá rozlišení vstupních dat, je lepší hledat přesnost výsledku někde na úrovni 200x200 metrů. Výsledkem byly pole proměnných popisujících větrné podmínky, které jsou popsány v [části 2.1.7](#).

2.1.6 Verifikace hybridního modelu VAS / WASP

K verifikaci získaných výsledků byla použita samotná vstupní data. Pro každé místo měření byla provedena interpolace modelem VAS z ostatních stanic vstupního souboru, ze kterého byla tedy hodnocená meteorologická stanice vypuštěna. Na vypočtené hodnoty byla pak přirozeně aplikována stejná procedura jako v případě samotného výpočtu. Interpolované větrné charakteristiky byly převedeny modelem WASP ze shlazeného terénu na větrné atlasy a dále k nim byl připočten vliv skutečné orografie a drsnosti povrchu. Na rozdíl od výpočtu polí rychlosti větru byly použity i překážky, což je logické, vzhledem k tomu, že s nimi bylo počítáno již ve vstupních datech. Získané průměrné rychlosti větru mohly pak být srovnány se skutečně naměřenými průměry.

Naměřené a modelované průměrné rychlosti větru a odchylky pro všechny tuzemské meteorologické stanice shrnuje [příloha 3](#). Průměrná absolutní odchylka u těchto dat dosáhla 0.44 m/s a odmocnina ze střední kvadratické chyby (RMSE) 0.53 m/s. Největší rozdíly mezi modelem a skutečností, větší než 1 m/s, se objevily u šesti meteorologických stanic uvedených v [tabulce 2.2](#). U dvou z nich (Rokytnice v Orlických horách a Frenštát pod Radhoštěm) byly kvůli obtížnému popisu okolních překážek místo odpovídajícího modelu použity korekce, které nelze jednoduše aplikovat v opačném smyslu. Tento fakt vysvětluje i poměrně velké kladné odchylky modelovaných hodnot. V případě stanic Přibyslav a Vatín byly navzájem opačné chyby způsobeny faktem, že obě stanice leží v podobné nadmořské výšce, ale naměřená průměrná rychlost větru se liší o více než 1.5 m/s. Při použitém způsobu verifikace byl na těchto stanicích výpočet proveden vždy na základě druhé stanice. Za kvalitnější měření je v tomto případě nutno považovat lépe umístěnou stanici Přibyslav. V ostatních případech však jde o skutečnou chybu metody, často způsobenou jedinečností stanice vzhledem k okolním použitým datům.

| wmo | název | X | Y | Z | u | u-mod | du |
|-------|------------------------------|---------|---------|-----|------|-------|-------|
| 11583 | Černovice - Dobešov | 3497352 | 5469547 | 586 | 3.47 | 2.27 | -1.20 |
| 11659 | Příbyslav | 3555305 | 5494869 | 530 | 4.36 | 3.36 | -1.00 |
| 11785 | Frenštát pod Radhoštěm | 3734634 | 5494954 | 436 | 2.22 | 3.24 | 1.02 |
| 11660 | Vatín | 3570174 | 5488390 | 555 | 2.80 | 3.93 | 1.13 |
| 11676 | Rokytnice v Orlických horách | 3604458 | 5560308 | 572 | 2.20 | 3.49 | 1.29 |
| 11533 | Olešná | 3450206 | 5468176 | 452 | 1.73 | 3.10 | 1.37 |

Tabulka 2.2 Největší odchylky modelované průměrné rychlosti větru od naměřené hodnoty

Tabulka 2.3 uvádí sedm stanic, u kterých dopadla verifikace nejlépe (chyba se v absolutní hodnotě držela pod 0.07 m/s). Převážně se jedná o měření, v jejichž okolí se nachází jiná meteorologická stanice s podobnými větrnými poměry.

| Wmo | Název | X | Y | Z | u | u-mod | du |
|-------|-----------------------|---------|---------|-----|------|-------|-------|
| 11696 | Dyjákovice | 3595621 | 5405384 | 201 | 3.02 | 2.95 | -0.07 |
| 11693 | Dukovany | 3582978 | 5440991 | 400 | 4.10 | 4.04 | -0.06 |
| 11464 | MILEŠOVKA (ÚFA AV ČR) | 3424393 | 5603237 | 833 | 7.06 | 7.00 | -0.06 |
| 11546 | České Budějovice | 3461476 | 5424617 | 395 | 1.98 | 1.95 | -0.03 |
| 11593 | Nové Hradky - Byňov | 3485458 | 5409273 | 475 | 2.25 | 2.29 | 0.04 |
| 11635 | Jindřichův Hradec | 3496904 | 5447592 | 525 | 2.52 | 2.58 | 0.06 |
| 11624 | Chotusice - let. | 3527820 | 5534602 | 235 | 2.92 | 2.99 | 0.07 |

Tabulka 2.3 Nejmenší odchylky modelované průměrné rychlosti větru od naměřené hodnoty

Příloha 4 obsahuje dva "scatter plot" diagramy popisující vztah měřených a modelovaných hodnot průměrné rychlosti větru a vztah chyby modelovaných hodnot a nadmořské výšky. Na prvním z grafů je vidět, že u malých a středních rychlostí jsou body rozloženy poměrně symetricky kolem přímky $x = y$, která definuje ideální případ, kdy model přesně odpovídá skutečnosti. Jak ukazuje zobrazený lineární trend i uvedená rovnice, která ho popisuje, u vyšších průměrných rychlostí (>5 m/s) se zdá být model slabší než skutečnost. Je ale pravda, že při přibližně pěti případech, které do této kategorie spadají, nelze považovat trend za významný. Odchylka navíc není příliš velká a při rychlosti 12 m/s by podle lineárního trendu činila asi 1 m/s. Druhý graf ukazuje vztah odchylek k nadmořské výšce. Je zřejmé, že pro nadmořské výšky do přibližně 700 m se žádná závislost neprojevuje, což vyplývá z množství méně kvalitních měření použitých v interpolaci a větší četnosti meteorologických stanic s průměrnou rychlostí odlišnou od okolních měření v podobné nadmořské výšce. Od 700 m se u odchylek projevila slabá pozitivní závislost na nadmořské výšce, i když počet stanic zde není významný.

2.1.7 Vypočtená pole proměnných

Výsledkem výše popsaného výpočtu bylo množství polí proměnných charakterizujících větrné poměry. Pole mají horizontální rozlišení 100 metrů a pokrývají celé území České republiky. Za hranicemi země byly na některých místech větrné charakteristiky vypočteny také, ale kvůli nedostatečnému popisu parametru drsnosti povrchu (a do jisté míry i orografie) je nelze použít.

Pro každý bod výsledného pole jsou k dispozici geografické údaje: Gaussovy souřadnice středu čtverce, modelová nadmořská výška, výška nad povrchem. V každém uzlu sítě jsou také určeny následující klimatologické charakteristiky větru: celková průměrná rychlost větru, parametr Weibullova rozdělení A a k , hustota výkonu větru ve W/m^2 . V každém z osmi sektorů směru větru byly ještě navíc vypočteny následující údaje: průměrná rychlost větru a parametry Weibullova rozdělení A a k při proudění z daného směru a četnost takového proudění (definující větrnou růžici).

Výsledné pole průměrné roční rychlosti větru v 10 metrech nad povrchem uvádí [příloha 5](#). Nejvyšší hodnoty se podle očekávání objevují na hřebenech nejvyšších pohoří, kde se průměrná rychlost větru dostává často i nad 6 m/s. V pohořích s nejčlenitějším reliéfem se naplno projevila vlastnost modelu WAsP nadhodnocovat vliv malých orografických tvarů se strmými svahy. Vyšší hodnoty rychlosti větru nad velkými vodními plochami (jako jsou např. Nechanice nebo Lipno) jsou důsledkem velmi nízkého parametru drsnosti povrchu nad vodou, který je v modelu nastaven na standardních 0.0001 m. Nejrozsáhlejší plochy území s průměrnými rychlostmi větru nad 5 m/s se objevují v Krušných horách, Krkonoších a v Hrubém Jeseníku, lokálně se vyšší rychlosti vyskytují též na vrcholcích a nejvyšších hřebenech Beskyd, ojediněle i dalších pohoří (Javorníky, Doupovské hory, České Středohoří, Ještědský hřbet a Jizerské hory, Šumava, Bílé Karpaty). Rozsáhlejší plochy s rychlostmi větru nad 4 m/s se objevují v oblasti Žďárských vrchů a horního Posázaví, na pozvolných jihovýchodních svazích Českomoravské vrchoviny, v oblasti Dražanské vrchoviny, Oderských vrchů a Nízkého Jeseníku a lokálně též na výraznějších vrcholcích a hřebenech většiny dosud nejmenovaných pohoří České republiky.

Nejnižší rychlosti větru ve výšce 10 m se vyskytují obecně v údolích a v oblastech s vysokou drsností terénu. Rozlehlejšími územími s nízkými rychlostmi větru jsou oblasti Sokolovské, Českobudějovické a Třeboňské pánve, dále pak severovýchodní část České tabule a severní část Hornomoravského úvalu. Zřetelně ohraničené oblasti menšího měřítka s výrazně sníženými rychlostmi větru ve výšce 10 m odpovídají větším městským aglomeracím a lesním komplexům, tedy územím s velkou drsností terénu.

Průměrnou rychlost větru z každého z osmi sektorů zobrazují [přílohy 6-13](#). Při interpretaci těchto map musíme brát v úvahu fakt, že se nejedná o rozložení rychlosti větru při určité synoptické situaci, ale o průměrnou rychlost větru v případech, kdy na daném místě vane vítr z určitého sektoru. Tak například nelze automaticky říci, že při synoptické situaci s prouděním z jihovýchodního sektoru v oblasti Moravské brány nefouká. Při takové situaci zde zpravidla vane vítr z jiného než z jihovýchodního směru (například z jihu), zatímco malá rychlost jihovýchodního větru reprezentuje jen malý počet výjimečných případů. Lze ale říci, že v Moravské bráně nejspíš dochází k orografickému zesílení rychlosti větru vanoucího z jihozápadního a severovýchodního sektoru.

Z porovnání map pro vyplývají výrazné rozdíly mezi jednotlivými směry. Z pohledu celé České republiky s výjimkou Nízkého Jeseníku, Oderských vrchů a Moravské brány vane nejslabší vítr ze severního, severovýchodního a východního sektoru. V západní polovině území vane také velmi slabý vítr od jihovýchodu a jihu. Při proudění z těchto sektorů však dochází k výraznému zesílení větru v oblasti jižní Moravy, Českomoravské vrchoviny a severovýchodních Čech. Zde se projevuje známá deformace proudění vyvolaná alpskou a karpatskou horskou překážkou popsána například v práci [Svobody a Šteklá \(1995\)](#). Téměř na celém území České republiky pak vane relativně silný vítr z jihozápadního, severozápadního a především západního sektoru. To vyplývá z celkové převahy situací se západním prouděním ve střední Evropě, přičemž tyto situace se zároveň vyznačují nejvyššími rychlostmi geostrofického větru.

Uvedené výsledky vyplývají ze specifického větrného klimatu různých oblastí České republiky. Například [Sobišek \(2000\)](#) rozdělil Českou republiku podle převládajícího větrného klimatu na 15 specifických oblastí. Výsledky modelu VAS/WASP jeho závěry v zásadě potvrzují. Pro potřeby větrné energetiky jsou přitom nejzajímavější oblasti s nadprůměrnými rychlostmi větru:

- v oblasti západních až severozápadních Čech je nejsilnější (a současně nejčtetnější) vítr ze západního sektoru. K tomu se v Doupovských a Krušných horách přidává velmi silný severozápadní vítr (v Krušných horách je dokonce převládajícím směrem větru), relativně silný je zde také vítr ze severního, jihozápadního a ve východní části Krušných hor také z jihovýchodního sektoru.

- zesíleným jihozápadním prouděním (vedle standardního západního větru) se vyznačuje oblast mezi městy Ústí nad Labem, Plzeň a Praha.

- podhůří Šumavy a současně i nejsevernější část Čech (Liberecko, Šluknovsko) se vyznačuje relativně silným prouděním z jižních a západních sektorů.

- severní část Českomoravské vrchoviny a Žďárské vrchy se vyznačují velkým zesílením proudění z jižního a jihovýchodního sektoru, avšak relativně vysoké rychlosti má také proudění ze západních sektorů (jihozápad, západ a severozápad).

- na jihovýchodních svazích Českomoravské vrchoviny dosahuje velkých rychlostí především vítr z jihovýchodního, západního a severozápadního sektoru. Zesílení jihovýchodního větru se projevuje i v celkově méně větrných částech jižní Moravy.

- Dražanská vrchovina se vyznačuje relativně velkými rychlostmi větru ze všech jižních a západních směrů (od jihovýchodu po severozápad).

- v prostoru mezi Jeseníky a Moravskoslezskými Beskydy výrazně převládá (co do četnosti i rychlosti větru) jihozápadní a severovýchodní proudění.

- v hřebenových polohách Krkonoš, Hrubého Jeseníku a Moravskoslezských Beskyd je silné proudění ze všech sektorů, přičemž jihozápadní sektory jsou celkově silnější než sektory severovýchodní

2.2 Dynamický model PIAP

2.2.1 *Stručná charakteristika metody*

Výpočet se realizuje pomocí dvou modelů:

- model pro výpočet vybraných scénářů proudění vzduchu
- model pro přiřazení reálných situací natékajícího proudění simulovaným scénářům a následné statistické výpočty.

Tyto modely jsou na sobě do značné míry nezávislé v tom smyslu, že můžeme kombinovat různé modely pro výpočet proudění vzduchu a řadou modelů pro statistické zpracování spočtených scénářů proudění. Při realizaci výpočtů však samozřejmě musí výpočet scénářů proudění předcházet jejich statistickému zpracování.

Dvoustupňovou metodu výpočtu větrných růžic jsme byli nuceni zvolit kvůli velké složitosti řešené úlohy. Při současných možnostech výpočetní techniky by simulace proudění vzduchu nad tak rozlehlou oblastí s potřebným rozlišením po dobu potřebnou pro následné klimatologické zpracování vyžadovala náklady neúměrně převyšující očekávané přínosy z těchto simulací. Naší snahou bylo zjednodušit řešenou úlohu tak, aby výsledné větrné růžice popisovaly hlavní pozorované rysy a přitom celkové řešení bylo snadno realizovatelné.

2.2.2 Model pro výpočet scénářů proudění

Pro výpočet vybraných scénářů natékajícího proudění jsme použili 3-rozměrný nestacionární numerický model mezní vrstvy atmosféry PIAPBLM, vyvinutý v ÚFA AVČR a zkráceně označený jako PIAP. Model PIAP je 3-rozměrný, nehydrostatický a nestacionární. Základní soustavu pohybových rovnic tvoří Reynoldsovy rovnice pro střední hodnoty rychlosti. V modelu je použita Boussinesq- aproximace. Soustava rovnic se uzavírá pomocí rovnice pro kinetickou turbulentní energii za použití Kolmogorovovy hypotézy a speciální hypotézy pro charakteristický rozměr turbulentních vírů. Podrobnější popis tohoto modelu byl publikován (Svoboda, 1990, Svoboda, Štekl, 1994).

Pro výpočet jednoho simulovaného pole proudění požaduje model PIAP následující minimální vstupy:

- údaje o nadmořské výšce terénu (v pravidelné síti bodů nebo pomocí vektorového popisu vrstevnic)
- údaje o drsnosti terénu
- údaje o natékajícím proudění vzduchu

2.2.3 Model pro výpočet větrných růžic

Větrné růžice v zadaném místě terénu se počítají vhodným kombinováním údajů, které získáváme ze spočtených scénářů proudění. Simulovaná pole větru používáme jen k určení změn ve vektoru větru, které můžeme pozorovat mezi různými body terénu (nepříliš vzdálenými).

Tento postup nazýváme ideou referenční stanice: Pro každý spočtený scénář proudění vzduchu počítáme rozdíly mezi místem výpočtu větrné růžice a referenční stanicí a tyto spočtené rozdíly aplikujeme na změřené veličiny v referenční stanici. Pro každý změřený případ na referenční stanici můžeme najít „nejbližší“ scénář proudění (přesněji: použijeme „pracovní scénář“ určený interpolací mezi dvěma nejbližšími scénáři). Takovým způsobem pro každý změřený případ na referenční stanici odvozujeme odpovídající hodnoty směru a rychlosti větru v místě výpočtu větrné růžice.

Při vyhodnocování rozdílů mezi referenční stanicí a místem výpočtu větrné růžice používáme různé algoritmy pro směr a rychlost větru. Odlišnost rychlosti větru charakterizujeme poměrem rychlostí větru mezi místem výpočtu a referenční stanicí. Naproti tomu odlišnost směru proudění charakterizujeme rozdílem směrů větru v místě výpočtu a v místě referenční stanice.

Máme-li k dispozici dostatečně dlouhou řadu měření složek větru na referenční stanici, lze výše uvedeným způsobem odvodit odpovídající časovou řadu na výpočetním stanovišti. Odvozenou časovou řadu pak zpracováváme standardními statistickými metodami. Pokud máme k dispozici jen již zpracované tabulky četností směru a rychlosti větru, lze generovat na referenční stanici takovou virtuální časovou řadu, která bude mít stejnou tabulku četností. Tuto virtuální časovou řadu pak použijeme místo skutečné časové řady.

2.2.4 Výpočetní oblast a scénáře proudění.

Na okrajích výpočetní oblasti byly použity umělé okrajové podmínky: na vtoku byl použit stav mezní vrstvy nad homogenní rovinou, na výtoku byly u některých veličin kladeny požadavky na jejich derivace. Proto výpočetní oblast použitá pro simulaci proudění musela dostatečně přesahovat oblast pro výpočet větrných růžic. Oblast pro výpočet scénářů proudění spolu s nadmořskou výškou je uvedena na obr. 2.4 (malými čtverečky jsou znázorněny dvě použité referenční stanice). Na obr. 2.5 jsou zobrazeny hodnoty parametru drsnosti zemského

Obr. 2.4 Terén ve výpočetní oblasti (stupnice je v metrech nadmořské výšky)

povrchu, které byly odvozeny z digitálních map land-cover CORINE (hodnoty drsnosti jsou pod stupnicí šedi uvedeny v cm).

Horizontální krok výpočetní sítě byl 600 m. Ve vertikální ose byl použit proměnný krok (minimální hodnota u země 1 m, maximální hodnota 200m). Horní hranice výpočetní oblasti byla 2583 m nad zemským povrchem. Výpočetní síť obsahovala 1045 x 643 x 25 uzlových bodů. Směr a rychlost proudění vzduchu byly zapisovány v hladinách 10, 20, 30, 50, 80, 120, 200 m nad zemským povrchem.

Bylo spočteno 16 scénářů proudění vzduchu. Ve všech případech bylo použito natékající proudění s teplotním zvrstvením odpovídajícím standardní atmosféře (pokles teploty s výškou o 0.6 °C na 100 m). Horizontální tlakový gradient představující vliv okolního prostředí jsme vyjadřovali pomocí rychlosti geostrofického proudění. Ve všech případech natékajícího proudění byla geostrofická rychlost u zemského povrchu rovna 10 m/s. Geostrofická rychlost přitom mírně narůstala s výškou (0.2 m/s na 100 m). Tento nárůst byl vybrán na základě zkušeností s dřívějšími simulacemi proudění vzduchu. Jednotlivé scénáře se mezi sebou lišily jen směrem natékajícího proudění. Směr natékajícího proudění rovnoměrně pokrýval 360° (rozdíl směrů natékajícího proudění mezi dvěma sousedními scénáři byl tudíž 22,5°). Výpočet scénářů byl proveden na paralelním počítači SGI ALTIX 3300 instalovaném ve výpočetním středisku ČVUT.

Výběr scénářů byl učiněn s ohledem na předpokládané použití vypočtených větrných růžic pro účely větrné energetiky. Proto byla použita jen jedna hodnota rychlosti větru a podrobný popis směru natékajícího proudění. Je třeba si uvědomit, že výběr scénářů se podstatnou měrou podílí na zjednodušení komplexní úlohy „výpočet větrných růžic“.

Obr. 2.5 Parametr drsnosti ve výpočetní oblasti (stupnice je v centimetrech)

2.2.5 Výběr referenčních stanic a spočtené výsledky

Pro celé území České republiky byly zvoleny dvě referenční stanice:

| stanice | Gaussovy souřadnice (m) | | nadm. výška (m) |
|------------|-------------------------|---------|-----------------|
| Kocelovice | 3416102 | 5482342 | 519 |
| Dukovany | 3582978 | 5440991 | 400 |

V síti s krokem výpočetního modelu (tj. 600 m) bylo pro každou referenční stanicí spočteno pole průměrné rychlosti větru ve výšce 10 m nad zemským povrchem nad celým územím České republiky. Z těchto dvou polí bylo odvozeno třetí výsledné pole tak, že v každém uzlovém bodě bylo použito to z obou polí, jehož referenční stanice byla blíže tomu uzlovému bodu, ve kterém se počítalo pole výsledné. Aby bylo dosaženo pozvolnějšího přechodu mezi prvním a druhým polem, přiřazovali jsme uzlovým bodům třetího pole vážené průměry spočtené z prvních dvou polí, ale pouze v tom případě, když vzdálenosti počítaného uzlového bodu od obou referenčních stanic se lišily o méně než nějaká vhodně zadaná hodnota (byla použita hodnota 12 km).

Výsledné pole průměrné rychlosti je zobrazeno v [příloze 14](#) stejným způsobem jako pole z hybridního modelu VAS/WAsP.

Vzhledem k tomu, že v modelu pro výpočet větrných růžic lze odvodit virtuální řady měření větru v lokalitě meteorologické stanice, můžeme snadno porovnat spočtené a změřené větrné růžice a histogramy. V [příloze 15](#) jsou uvedeny spočtené hodnoty průměrné rychlosti

větru ve výšce 10 m nad zemským povrchem a jejich chyby od změřených hodnot pro větší počet meteorologických stanic. Přitom nebyl brán zřetel na odchylky v umístění anemometru a předpokládá se standardní výška 10 m nad zemským povrchem. Extrémní chyby se vyskytly na Milešovce a na Sněžce, což bylo možné očekávat, vzhledem k jejich extrémní poloze a velkému kroku modelové sítě. Pokud vyloučíme stanice Milešovku a Sněžku, bude střední hodnota chyby vypočtené rychlosti rovna hodnotě -0,35 m/s a její směrodatná odchylka bude 0,84 m/s. V příloze 16 jsou malými čtverečky zobrazeny polohy jednotlivých stanic. Čísla u čtverečků označují meteorologický indikativ stanice (první dvojčíslí 11 se přitom vypouští kvůli lepší čitelnosti blízkých stanic).

V příloze 17 jsou zobrazeny spočtené a změřené růžice a histogramy pro vybrané meteorologické stanice. Na každé straně je vlevo nahoře uvedena použitá referenční stanice, vpravo nahoře pak indikativ a zkrácený název stanice, jejíž větrné růžice a histogramy jsou na stránce zobrazeny.

2.2.6 Závěry vyplývající z modelování dynamickým modelem

Spočtené větrné růžice ukazují, že změny proudění vzduchu vyvolané hlavními rysy terénu jsou modelem vcelku dobře popsány. Jedná se o takové změny natékajícího proudění, které mají platnost v širším okolí meteorologických stanic, tj. nejsou důsledkem lokální konfigurace terénu. Použitý horizontální krok 600 m neumožňuje modelovat situaci na takových stanicích, jako jsou Milešovka a Sněžka. Použitým horizontálním krokem by bylo možné vysvětlit větší rozdíly v rychlostech větru i na některých dalších horských stanicích. V dalším výzkumu se však musíme zabývat některými rozdíly, které se systematicky vyskytují v některých oblastech o větší rozloze. Typickým příkladem takové oblasti jsou Krušné hory, kde model podél zlomu terénu na jižní straně pohoří dává systematicky vyšší hodnoty rychlosti větru. Ze stejného důvodu si zasluhují pozornost některé meteorologické stanice na Českomoravské vrchovině. Proto je nutné v dalším výzkumu vysvětlit příčiny těchto rozdílů. Dalším logickým krokem budou pokusy s úpravami některých algoritmů modelu, které by vedly ke snížení pozorovaných rozdílů.

Za zmínku stojí skutečnost, že veškeré větrné růžice byly spočteny na základě měření jen ve dvou referenčních meteorologických stanicích. Jak je přitom patrné z větrných růžic a histogramů uvedených v přílohách, dochází nad některými částmi České republiky ke značným deformacím natékajícího proudění, přičemž znatelné rozdíly ve větrných růžicích lze pozorovat i mezi dvěma poměrně blízkými stanicemi. Meteorologické stanice Krásné – vysílač (11616), Košetice (11628), Bílý Kříž (11796) jsme uvedli v příloze 17 dvakrát, abychom tím demonstrovali závislost výsledku na použité referenční stanici. Tyto tři stanice byly jednou spočteny pomocí referenční stanice Kocelovice a podruhé pomocí referenční stanice Dukovany. Při výběru referenční stanice musíme kromě vzdálenosti uvažovat také vliv přirozených předělů, které se projevují v procesech větších měřítek.

2.3 Porovnání modelů VAS/WAsP a PIAP

Porovnání rychlostí větru spočtených modely VAS/WAsP a PIAP shrnuje [tabulka 2.4](#) a [Příloha 18](#).

| rozdíl průměrné rychlosti v 10 m [m/s] | podíl na území České republiky |
|----------------------------------------|--------------------------------|
| méně než -2.0 | 0.68% |
| -2.0 - -1.5 | 4.71% |
| -1.5 - -1.0 | 13.74% |
| -1.0 - -0.5 | 28.43% |
| -0.5 - 0.0 | 30.58% |
| 0.0 - 0.5 | 15.04% |
| 0.5 - 1.0 | 4.61% |
| 1.0 - 1.5 | 1.45% |
| 1.5 - 2.0 | 0.53% |
| více než 2.0 | 0.23% |

Tabulka 2.4 Rozdíl mezi průměrnou rychlostí větru v 10 m nad zemským povrchem podle modelu VAS/WAsP a PIAP (kladná čísla znamenají vyšší hodnoty podle modelu VAS/WAsP)

Rozdíly mezi modely jsou způsobeny především:

- rozdílem mezi modelovým krokem modelů PIAP a WAsP
- nedostatečně hustou sítí použitelných stanic, vstupujících do modelu VAS/WAsP
- nejistou kvalitou některých stanic vstupujících do modelu VAS/WAsP
- omezenou schopností obou modelů modelovat proudění v oblastech s členitou orografií

V celkovém pohledu dává model PIAP na území České republiky vyšší hodnoty průměrných rychlostí větru než hybridní model VAS/WAsP. V západní části území je tento rozdíl vyšší než ve východní části, neboť model PIAP dává vyšší rychlosti větru v oblasti počítané podle referenční stanice Kocelovice (aplikované na západní část území), než při výpočtu podle stanice Dukovany (aplikované na východní část území).

Celkově velké rozdíly mezi oběma modely v jihozápadní polovině Čech a v prostoru Mladoboleslavska, Podkrkonoší a severovýchodního pohraničí Čech mohou být částečně způsobeny podhodnocením rychlosti větru modelem VAS/WAsP v důsledku malého počtu a nízké kvality zdejších stanic. V jihozápadní polovině Čech se přidává skutečnost, že stanice nalézající se v této oblasti nebyly navštíveny v rámci terénního průzkumu a rychlost větru zde mohou snižovat neznámé překážky v okolí těchto stanic.

Další zřetelný rozdíl mezi výsledky modelů VAS/WAsP a PIAP, projevující se především v oblastech s členitou orografií, vyplývá z odlišných modelových kroků těchto modelů. V rámci hybridního modelu VAS/WAsP model WAsP s malým modelovým krokem reaguje především na bezprostřední okolí výpočtového bodu, tj. na terénní tvary malého měřítko do vzdálenosti několika kilometrů od tohoto bodu, zatímco vliv velkých terénních tvarů (pohoří) je zachycen modelem VAS, který určuje, že ve výsledku dává VAS/WAsP ve výše položených oblastech celkově vyšší hodnoty rychlosti větru. Naopak model PIAP není schopen malé terénní tvary zachytit a reaguje až na terénní tvary řádu jednotek kilometrů a větší. Společným rysem modelů VAS/WAsP a PIAP je jejich velmi silná, zvláště u modelu PIAP až přehnaná reakce na výrazné orografické tvary, kdy je vítr na výrazných hřebtech velmi zesílen, naopak v údolích je velmi zeslaben. Ve výsledku tedy rychlost větru podle

modelu WAS/WAsP věrně kopíruje všechny horské hřebeny bez ohledu na to, zda se jedná o dominantní horský hřeben či nižší postranní hřbet, zatímco PIAP dává velmi vysoké rychlosti pro hlavní hřebeny pohoří, jinde v horských oblastech, tj. v údolích, na svazích i na níže položených postranních hřbetech pak rychlost větru výrazně klesá. Model PIAP takto dává výrazně vyšší hodnoty než model VAS/WAsP na dominantních hřbetech či terénních zlomech (bez ohledu na jejich nadmořskou výšku), zatímco mimo hlavní hřbety pohoří, tedy na většině plochy horských oblastí, dává výrazně vyšší hodnoty model VAS/WAsP

Nápadným jevem ve srovnání modelů jsou velké rozdíly mezi modely v oblastech vrchovin, jako jsou Nízký Jeseník a Oderské vrchy, Dražanská vrchovina, jižní část Českomoravské vrchoviny a Středočeské pahorkatiny, Brdy a Slavkovský les. Tento rozdíl je nejspíš dán především nadhodnocením rychlostí větru modelem PIAP. V některých částech (především v jižní části Českomoravské vrchoviny a v Třeboňské pánvi) může hrát částečnou roli již zmíněný nedostatek kvalitních stanic a z něho vyplývající podhodnocení modelu VAS/WAsP.

Vyšší hodnoty dává model PIAP také v oblasti Moravské a Vyškovské brány, neboť je schopen, na rozdíl od modelu VAS/WAsP, deformace proudění v prostoru těchto specifických orografických útvarů.

V ostatních oblastech jsou rozdíly mezi modely VAS/WAsP a PIAP nižší a lze zde konstatovat dobrou shodu mezi oběma modely.

Pro zpracování posudků větrného potenciálu stanoviště na základě matematického modelování se jako nejhodnotnější jeví současné použití hybridního modelu VAS/WAsP i modelu PIAP. Zpracovatel posudku, který je obeznámen s vlastnostmi použitých modelů při rozdílných výsledcích na základě zkušenosti rozhodne o řešení, které se více blíží skutečnosti.

3 POSUDEK VĚTRNÉHO POTENCIÁLU A VHODNOSTI LOKALITY PRO STAVBU VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

3.1 Současné možnosti metod při projektování větrných elektráren

3.1.1 Úvod

Výsledek výpočtu výnosu projektu větrné elektrárny či farmy je spojen s nepřesnostmi, které mohou být jak podle charakteru projektu, tak podle druhu použitých dat a způsobu výpočtu různé úrovně. Zatím se při projektech v zemích západní Evropy běžně přijímá desetiprocentní nepřesnost, která se při ekonomickém výpočtu započítává jako bezpečnostní srážka. Teprve prověrka projektu pomocí specifické analýzy v úvahu přicházejících nepřesností ukáže korektní ocenění projektu a jeho rizika. Protože nepřesnosti určení výnosu energie jsou obvykle a zejména vysoké pro projekty se slabým výnosem, může mít taková specifická analýza pro úspěch projektu neobyčejný význam.

3.1.2 Ukazatele analýzy nepřesnosti

Vypočtené výnosy jsou určující pro výpočet rentability projektu větrné farmy. Proto může nutnost výpočtu nepřesnosti záviset na různých stádiích vývoje projektu farmy :

Předběžný návrh : Vhodný koncept pro určení energetického výnosu se dá navrhnout jedině s pomocí analýzy stanoviště po identifikaci podstatných faktorů nepřesnosti parametrů projektu. Takový koncept umožní přiměřené ekonomické nasazení prostředků s pokud možno včasnými závěry.

Odhad : Prozkoumání a odhad nepřesností daného výpočtu výnosu energie představuje náročnou úlohu z důvodu složitosti výpočetních metod, často obecně neznámých ovlivňujících faktorů a nutných zkušeností ve zhodnocení výpočetních metod a základních dat. V případě pochybností často užívaná strategie vyžádání si více (třech i čtyř) dobrozdání o větrných poměrech na stanovišti většinou nepřispívá ke snížení možných nepřesností výpočtu (Strack, 2003).

Zmenšení rizika : Ukáže-li se plánovaný záměr příliš riskantní a hrozí-li jeho ztroskotání, lze po analýze faktorů nepřesností pomocí cílených opatření jak nepřesnosti, tak nároky na zajištění projektu redukovat.

3.1.3 Jednotlivé komponenty nejistoty v určení výnosu energie

Výpočet výnosu vychází z meteorologických, topografických a technických vstupních dat a na nich založených výpočtových postupech. Různé postupy řešení se přitom liší co do původu a rozsahu vstupních dat, jakož i způsobu modelování.

Vyšetření možných nepřesností při výpočtu energetického výnosu zařízení předpokládá identifikaci a kvantifikaci různých komponent nejistoty výpočtu a jejich vhodný součet s ohledem na případnou závislost k dosažení celkové výše nejistoty výpočtu v rámci výpočtu chyb.

3.1.3.1 Meteorologická změřená data

Důležitou vstupní veličinou pro výpočet výnosu větrného zařízení představují meteorologická data. Tato data pocházejí jak z klasických meteorologických stanic, tak ze stožárů měřících složky větru nebo z těchto dat do malých vzdáleností určené hodnoty pomocí numerických výpočetních modelů.

V původní koncepci WASP-u, která se v zemích západní Evropy stále používá, pocházejí tato data ze stálých dlouhodobých měření meteorologických stanic, na kterých probíhá měření v 10 m výši, které může být silně ovlivněno svým okolím (blíže viz kapitola 2.1.4).

Kvalita dat z těchto stanic často neodpovídá požadavkům větrné energetiky. Kromě častých nedostatků v odečtu dat a jejich úplnosti má negativní vliv zejména nízká kvalita samotné měřicí techniky a nepřesná kalibrace přístrojů. Chyby měření se projevují silněji v nižších měřených hodnotách, což platí také pro rušivé vlastnosti anemometrů, jako jsou závislost na šikmém proudění a turbulenci (kapitola 3.2). Nepřesnosti v takových dat se dají většinou jen odhadnout, typická nepřesnost se projevuje okolo 10% ve výnosu energie (Strack, 2003). Řada stanic navíc nemá reprezentativní polohu pro potřeby větrné energetiky – blíže viz kap. 2.1.4.

Vysoce cenné měření větru ve větších výškách nad povrchem vykazuje relativně malou nepřesnost, která se pohybuje v rozmezí 1-2% rychlosti větru (odpovídá cca 3-5% ve výnosu - Strack, 2003). Provádí-li se však stožárové měření v horských polohách bez možnosti vytápění čidel, je chyba měření mnohem vyšší vzhledem k nepříznivým účinkům námrazy. Takové měření vyžaduje ve všech směrech optimální provedení a obecně musí být zajištěno odborným pracovníkem.

Zejména v souvislosti s použitím numerických modelů proudění pro výpočet výnosu energie na daném stanovišti se používají dlouholetá přízemní nebo výšková větrná data z klimatických modelů počasí (regionálně platná) jako vstupní data pro výpočet výnosu. Nepřesnost těchto dat se dá ovšem jen velmi těžko odhadnout. Na základě dlouholetých zkušeností lze vyslovit podezření, že tato data, použitá jako jediný podklad pro výpočet výnosu energie, nemohou splnit požadavky větrné energetiky (Strack, 2003).

3.1.3.2 Dlouhodobá korelace

Provedení měření na stanovišti (případně použitelné údaje o výnosu větrného zařízení) se vztahují obvykle na relativně krátký časový interval 1-2 let, ale i méně, který není klimatologicky reprezentativní. Abychom obdrželi závažnou informaci o budoucích větrných podmínkách, je zapotřebí najít návaznost na pokud možno dlouhodobé, a tím co nejvíce reprezentativní, období z minulosti. K tomu se dají použít korelační metody a vhodná, dlouhodobě konsistentní data.

Požadavky na různé metody korelace jsou tím vyšší, čím kratší časový úsek měření máme k dispozici. To platí ve zvláštní míře o neuzavřených klimatických periodách v době trvání pod 1 rok. Ve skupině pro větrnou energetiku ÚFA AV ČR byla z řady metod, vhodných pro „prodloužení“ časově krátkého měření na časově dlouhé období, vybrána metoda pro účely větrné energetiky nejvhodnější. Při použití referenční stanice s menší nadmořskou výškou než je výška stanoviště měření byla chyba v intervalu od 0,3 do 0,6 m/s, při použití referenční stanice s větší nadmořskou výškou než je výška stanoviště měření byla chyba výpočtu v intervalu od -0,1 do 0,3 m/s. Vyjádřeno v procentech - z průměrné roční rychlosti větru jde o chybu 3,75% (Štekl, Jež, 2000).

Tak malá nepřesnost se dá docílit pouze pomocí vysoce sofistikovaných korelačních postupů, které se dokáží přizpůsobit různým větrným situacím, navíc za předpokladu využití vhodných konsistentních referenčních datových souborů. Naproti tomu hrozí nebezpečí, že použitím nevhodné metody nebo dat, s korelační chybou 20% a více, zcela promarníme úsilí a

náklady vynaložené na přesné krátkodobé měření. Obecně se dá říci, že identifikace vhodnosti referenčních dat je velmi náročná a možná jen s pomocí srovnávací konsistenční analýzy změřených dat z různých zdrojů.

3.1.3.3 *Popis povrchu terénu*

Drsnost povrchu terénu je teoretická veličina a podstatný parametr, který ovlivňuje rychlost větru a její změnu s výškou. Určení drsnosti terénu vyžaduje zkušenost, je subjektivní a podléhá nepřesnostem, které se dají ovšem kvantifikovat.

Nejpřesnějším způsobem určení parametru drsnosti povrchu je výpočet na základě profilového měření rychlosti větru a teploty vzduchu pomocí stožárového měření. Výpočtem určené hodnoty jsou však platné pouze pro blízké okolí kolem meteorologického stožáru. Pro větší plochy je nejvhodnějším způsobem určení parametru drsnosti odhad na základě typu povrchu. Jednou z možností je v takovém případě využít některé z řady klasifikací land-use, resp. land-cover, například způsobem uvedeným v [kap. 2.1.3](#).

3.1.3.4 *Modelování větrného pole*

Nepřesnosti modelování větrného pole zahrnují nepřesnosti popisu terénu (stupně jeho shlazení) a nepřesnosti modelu. Každý numerický model vychází z větší či menší řady zjednodušení a parametrizací. Např. u modelu WASP se vnášejí chyby při očišťování dat od vlivu okolí, avšak největší chyby vznikají při výpočtu vlivu terénu na „přenášení“ dat. Jestli v rovinném terénu lze úspěšně použít vstupní data ve vzdálenosti několika desítek km od stanoviště výpočtu, v komplexním terénu se tato vzdálenost snižuje o jeden řád. Silné vlivy okolí, které vznikají na stálých meteorologických stanicích nejvíce stíněním a turbulencí od blízkých překážek, se nedají úplně odstranit, což vysvětluje podstatné nejistoty v takto získaných datových souborech. Při dobře provedených měřeních s výškou měření okolo 50 m tyto chyby s ohledem na malé vlivy okolí odpadají, musí se ovšem jednat o plochy nebo jen lehce zvlněný terén.

V silně vertikálně členitém území se vliv terénu v rámci jednoduchého orografického modelu WASP nedá zcela popsat a použití WASPu je svázáno se zvýšenými nepřesnostmi, které lze jen odhadnout na základě zkušeností a s přihlédnutím na typ krajiny a vzdálenost stanoviště od míst měření. Zde se lze odvolat na použití numerických modelů proudění, které mají potenciální možnost popisu v úvahu přicházejících efektů. Obecně se dají výsledky s pomocí modelů proudění, s ohledem na komplexnost tématiky a relativně malých zkušeností, ocenit jen velmi těžko. V tomto směru očekáváme významný přínos ke zpřesnění výpočtu od nově koncipovaného hybridního modelu, který využívá výhod jak statistického, tak dynamického modelování, jakož i principu souběžného výpočtu tímto hybridním modelem a modelem mezní vrstvy atmosféry (PIAP). Tento postup umožňuje porovnáním vypočtených hodnot určit absolutní hodnotu odchylek a hlavně umožňuje určit plochy jejich největších hodnot, což má značný aplikační význam.

3.1.3.5 *Model větrné farmy*

Pro výpočet ztrát, způsobených vzájemným odstíněním na farmě umístěných zařízení se obvykle používá model větrné farmy Risoe, který vychází z jednoduchých empiricky stanovených předpokladů. Vypočtené stínění na farmě může být zatíženo případně výraznými nepřesnostmi, které jsou však ve výpočtu jen málo znatelné. Analýzu těchto problémů provedl [Seifert \(2003\)](#).

3.1.3.6 Výkonové křivky

Výkonové křivky větrných elektráren se ve značné míře podílejí na celkové nepřesnosti určení výkonu zařízení. V závislosti na větrných podmínkách můžeme pro výkonovou křivku, stanovenou směrnici IEC počítat s 6-8% nepřesností (Strack, 2003). Vlivem turbulence na výkonovou křivku se zabývali Svoboda a Čermák (2001) a van Radecke (2004). K tomu je třeba dodat odchylky nebo nepřesnosti, způsobené dynamickými efekty anemometru.

3.1.4 Typické nejistoty při výpočtu výkonu

Na základě nepřesností výpočtu komponent výkonu větrných zařízení, uvedených v kap. 3.1.3, poukazujeme na celkové nepřesnosti prognózy výkonu pro typickou situaci. Typickou nepřesnost výkonu s využitím pouze jedné meteorologické stanice můžeme očekávat v komplexním terénu a vzdálenosti od stanice více než 15-20 km, což je pro plánování nevhodné. Nepřesnosti se dají redukovat pomocí vysoce kvalitního měření větrných charakteristik v místě budoucí výstavby větrné elektrárny. Měření a jeho vyhodnocení musí být však odborně zajištěno.

Jsou-li k dispozici vhodné údaje o výkonu blízko ležícího (řádově několik km) větrného zařízení, potom lze výpočty výkonu v příznivém případě porovnáním dat realizovat jen s lehce vyššími nepřesnostmi. Ve složitém terénu se často nedají jako reprezentativní považovat údaje, které se nenacházejí blízko stanoviště, což může mít za následek chybu až nad 20% (Strack, 2003).

3.1.5 Vyhodnocení realizovaných projektů

Pro stanovení odchylek dřívějších výpočtů výkonu bylo vyhodnoceno více než 400 větrných elektráren, pro které byly v DEWI (Deutsches Windenergie Institut, Wielhelmshaven) v minulosti provedeny výpočty výkonů (Strack, 2003).

Kolem průměrné lineární závislosti je nápadný rozptyl, který se projevuje standardní odchylkou středních hodnot farmy rovnou 16%, přičemž se střední hodnota vypočtených výkonů nachází 2% nad skutečnou hodnotou. Odečteme-li z této chyby nepřesnost provozních dat, dostaneme jako výsledek 13% standardní nepřesnost pro výpočty výkonu energie.

V tomto vyhodnocení jsou převážně zahrnuty výpočty výkonu v roce 1997 a dříve, a to na základě tehdejšího stavu techniky a menšího počtu referenčních větrných zařízení pro srovnání. To znamená, že velká část výpočtů byla provedena výhradně na bázi meteorologických stanic. Tato situace odpovídá stavu v ČR a patrně lze očekávat, že třináctiprocentní standardní odchylka bude vyjadřovat nepřesnost vypracovaných projektů.

Při této analýze se ukázalo, že výnosy určitých typů větrných elektráren ležely výše než byla prognóza, naopak výnosy jiných typů větrných elektráren ležely pod úrovní prognózy.

Tím vystupuje do popředí význam výkonových křivek a nutnost přesného stanovení této důležité charakteristiky větrné elektrárny.

3.1.6 Výpočet výkonu s minimálními nepřesnostmi

Nepřesnosti výpočtu výkonu energie se dají efektivně minimalizovat tím, že eliminujeme dva důležité faktory nepřesnosti: chybu měření větrných charakteristik a chybu ve stanovení výkonové křivky. To by bylo umožněno speciální konstelací tak, že výrobce poskytne záruku na výkon energie, který závisí na provedeném měření větrných charakteristik, jež bylo použito jako základ pro předpověď výkonu energie před výstavbou větrné farmy. Takto lze redukovat celkovou nepřesnost v určení výkonu energie pod 10%.

Úspěšná implementace a přijetí takového přístupu vyžaduje dobrou a úplnou celkovou koncepci a v neposlední míře vysoký stupeň důvěry ve schopnosti a nestrannost odborníka provádějícího výpočet výnosu.

Výhodou tohoto konceptu pro provozovatele větrné farmy je, kromě zmenšení nepřesnosti projektu a tím i možného snížení zálohy na bezpečnost, zajištěný výkon větrné farmy pomocí jednoduché a transparentní kontroly. Projekční riziko se tak v podstatě redukuje na riziko kolísání větru (Štekl, Jež, 1999).

3.1.7 Závěr

Výpočty energetického výnosu projektů větrných farem jsou spojeny s chybami lišícími se případ od případu. Paušální předpoklady nebo přehlížení chyb výpočtu nemohou tuto záležitost řešit. Pečlivou analýzou ovlivňujících faktorů lze stanovit tyto chyby pro jednotlivé případy. To vytváří základ pro nalezení účinných pracovních postupů a zvládnutí rizika pro daný projekt. Pro stanovení efektního plánování, přezkoušení a minimalizaci nepřesností existujících výpočtů energetického výnosu a prověrku stávajících projektů je třeba navrhnout chybovou analýzu. Použitím vhodných koncepcí lze nepřesnosti svázané s výpočtem výnosu větrného zařízení minimalizovat a zároveň podstatně snížit pozdější provozní rizika.

3.2 Měření charakteristik větru

3.2.1 Vlastnosti větroměrných přístrojů, jejich přednosti a nedostatky

Vlastnosti větroměrných přístrojů pramení z jejich konstrukcí. Ve své podstatě jde o čtyři základní principy měření rychlosti větru:

dynamický – anemometry s pitotovou trubicí, měřící rozdíl mezi celkovým a statickým tlakem větru v plovákové komoře. Výhodou tohoto měření je v první řadě robustní měřidlo tvořené Robinsonovým křížem a pitotovou trubicí, umístěnou na směrovce a vlastní čidlo, které je plovákovou komorou, kam se celkový tlak přenáší. Záznam je prováděn na registrační pásku, na dnešní dobu poměrně složitou mechanickou cestou. Nevýhodou tohoto měření je poměrně vysoký práh citlivosti (okamžik, kdy se přístroj pod tlakem proudícího vzduchu rozeběhne), náchylnost na námrazu a velká setrvačnost miskového Robinsonova kříže. V současné moderní době se od tohoto principu měření, starého téměř 80 let, upouští.

lopatkový (Woodmanovo kolo nebo čelní vrtule) – zařízení snímající směr a rychlost pomocí směrovky a lopatkového kola nebo vrtule, natáčejícího se proti větru plochou rotujících lopatek, které přenášejí točivý moment pomocí radiální hřídele na dynamo, vyrábějící stejnosměrný proud, jehož hodnoty se napětově nebo proudově přenášejí do vyhodnocovací části, kalibrované přímo v jednotkách rychlosti větru. Výhodou je poměrně nízký práh citlivosti, nevýhodou velká čelní plocha a tím náchylnost pro zachycení sebemenší námrazy a tím znehodnocení měření parametrů větru a poměrně velká setrvačnost rotujících částí. Směr větru je přenášen pomocí selsinů do vyhodnocovací části (displeje). Přístroje jsou náchylné na mechanické závady, vyžadují pečlivou údržbu a časté kontroly.

miskový (Robinsonův kříž se směrovkou nebo bez ní) – čtyř nebo třiramenný horizontální věnec s polokulovými miskami axiálně uložený, převádějící točivý moment na tachodynamo, opět vyrábějící proud nebo napětí, které se přepočtem zobrazuje na displeji přímo v jednotkách rychlosti. Směr větru je snímán buď selsinem nebo optoelektronicky.

V současnosti převažuje princip optickoelektronický. Tyto přístroje se vyrábějí buď jako celek (kříž se směrovkou) nebo odděleně. Nevýhodou je omezená možnost vyhřívání jako ochrany proti námraze vzhledem k vysychání maziva ložisek při použití vyšší teploty a jejich choulostivost. Rovněž linearita hodnot měření je při vyšších rychlostech znehodnocena vlastním odporem rotujících misek.

ultrasonické anemometry a sodary - oba typy přístrojů pracují na principu šíření a odrazu zvukových vln od různě hustých vrstev. Jejich výhodou je absence točivých částí, čili chybí mechanické převody, ve kterých se ztrácí část energie a které jsou zdrojem poruch (choulostivá ložiska, omezená možnost vytápění jako ochrany proti námraze atp.). Tyto přístroje, jsou dražší, jsou však díky možnosti lepší ochrany před námrazou spolehlivější.

U ultrasonických přístrojů, pracujících v neslyšitelných vlnových délkách, je principem tříosý systém vysílačů a přijímačů, který zachycuje fluktuaci vzduchové částice. Výsledek měření je však silně závislý na umístění přístroje, který velmi citlivě reaguje na turbulence. I při doporučené vzdálenosti čidla, která činí sedminásobek průměru stožáru, jsou ztráty na rychlosti až 15%. Další nevýhodou je omezená možnost ochrany proti atmosférickým srážkám, hlavně tuhým, které při vyšší intenzitě hodnoty měření značně zkreslují.

U sodarů (akustické lokátory, pracující ve slyšitelných vlnových délkách), se využívá dopplerovských efektů. Vzhledem k poměrně vysoké intenzitě zvukových signálů jsou však využívány pouze v málo obydlených místech, jako u velkých podniků, na letištích atp. Jejich pomocí se provádí sondáž vertikálního profilu větru, zaměřenou zvláště na jeho stříh. Těmito přístroji se proměřují nejspodnější vrstvy atmosféry (podle typu přístroje od země do 150 m, 500m 1500 m). Principem je jednoosý nebo tříosý systém vysílačů a citlivých přijímačů (mikrofonů), které vyhodnocují signál odražený od různě hustých vrstev vzduchu ve formě směru a rychlosti větru. Nedostatkem tohoto principu měření jsou poměrně velké rozměry a hmotnost zařízení, které se tak produkuje spíše jako stacionární a nepříjemný zvukový doprovod. Náklady na jeho pořízení jsou značné a zařízení je energeticky náročné (vyžaduje síťové napětí).

3.2.2 Okolnosti ovlivňující výsledky měření.

Metody měření rychlosti a směru větru jsou dány požadavky danými účelem měření. Pro meteorologické účely se například provádí měření parametrů větru (směr, rychlost a nárazy větru) podle metodiky dané Světovou meteorologickou organizací 15 minut před každou celou hodinou. Pro účely zabezpečení letectví se používají buď desetiminutové průměrné hodnoty každých půl hodiny pro obecnou informaci nebo klouzavé dvouminutové průměry pro bezprostřední informaci posádek letadel při startu nebo přistání. Za nárazy větru se v tomto případě považují okamžitá zrychlení proudění, která trvají alespoň 3 sec a liší se od průměrné hodnoty rychlosti větru (deseti nebo dvouminutové) alespoň o 5 m/sec. Pro klimatické účely se vítr měří 3× denně: v 7, 14 a 21 hod středního místního času a předpisem je stanoven průměrovací interval 4 minuty. V současné době se díky nástupu automatizace měření na meteorologických stanicích klimatické hodnoty „vytahují“ z kontinuálního měření automatických stanic, u nichž je vzorkovací doba 15 minut.

Pro účely stavebnictví nebo v povrchových dolech, zkrátka všude tam, kde jsou zařízení s dlouhými rameny ve velkých výškách (jeřáby, velkorypadla), se používají signální anemometry, kde není třeba sledovat průměrné hodnoty větru a jeho vývoj, ale okamžité hodnoty, přesahující výrobcem danou mez z důvodů bezpečnosti provozu zařízení. Totéž se týká větrných elektráren, kde jsou hodnoty z anemometru umístěného na gondole strojovny základem pro automatické nastavování úhlu náběhu listů rotoru, popřípadě nastartování a odstavení elektrárny při překročení kritických rychlostí větru.

Jiné budou požadavky na metody a výsledky měření při výzkumu či mapování větrných podmínek ve vybraných lokalitách. Ve všech případech jsou tak nároky na vypovídající hodnoty výsledku měření různě vysoké. Obecně lze říci, že pro běžné účely vystačíme s výsledky, kde je směr větru prezentován s přesností na desítky stupňů zeměpisné stupnice ($010^\circ - 360^\circ$, 0° je v případě klidu) a rychlost v celých jednotkách. Měření je prováděno kontinuálně a hodnoty jsou prezentovány průměrem. Pro případ výzkumu nebo měření pro specifické účely jsou však nároky vyšší. Soupravy pro měření parametrů větru snímají údaje v sekundových intervalech a pomocí procesorů, kam se ukládají, jsou přepočítávány na požadované průměrné hodnoty, zapisované do paměti zařízení (datalogerů). V tomto případě je požadavek na přesnost hodnot poněkud vyšší. Pro účely dalšího statistického zpracování je požadováno měření směru větru s přesností na 1° zeměpisné stupnice a rychlost na desetiny m/s. Současná elektronika oba požadavky dostatečně splňuje.

Je však jinou otázkou, jaké výsledky měření získáváme. Je nutné mít na paměti, že dostáváme data z přístrojů, které jsou zatíženy určitými chybami v měření, danými jejich konstrukcí a umístěním. Každý anemometr má určitý práh citlivosti, který závisí na setrvačnosti hmoty Robinsonova kříže a tření v ložiskách. Podle typu přístrojů leží prahová citlivost mezi 0,2 - 0,8 m/s. Nemalou roli zde hraje i proudění samotné. Vítr si nelze představovat jako proudění vzduchu rovnoběžné s povrchem terénu. Právě tvar terénu způsobuje při různých rychlostech různě turbulentní proudění, vyvolané jak mechanickým účinkem překážek, tak vertikálními konvektivními toky, případně baroklinitou atmosféry. Zatímco čidla jsou umístěna na výložnicích vodorovně, pohyb vzduchové částice nemusí být vždy k tomuto umístění horizontální. Je-li jakékoliv čidlo ofukováno pod jiným úhlem než 0° , bude vykazovat chybu, která se zvětšuje se zvětšujícím se úhlem proudění. Tato chyba, označovaná jako chyba vyvolaná „šikmým prouděním“, se bude vyskytovat například při měření v terénu na nebo blízko výrazného svahu. Dá se určitým způsobem eliminovat měřením pomocí tříosého anemometru (měření vektorů v osách X , Y a Z – např. Young) nebo ultrasonickým anemometrem podobně konstruovaným (Metek, Sony, Young atd).

Jiná chyba měření, která vede k nadhodnocení rychlosti a označuje se jako overspeeding efekt má následující důvod: v důsledku setrvačnosti pohyblivé části anemometru nejsou optimálně zachyceny změny rychlosti větru. Na základě aerodynamických vlastností může miskový anemometr reagovat na náhlé zvětšení rychlosti větru rychleji než na zmenšení rychlosti. V důsledku rozdílů projevujících se mezi silícím a slábnoucím větrem, obdržíme při nárazovitém větru či při turbulentním proudění v průměru vyšší rychlosti větru než ve skutečnosti jsou. Např. při intenzitě turbulence 20 % se tato chyba pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,4 % rychlosti větru (Štekl, 1997).

Dalším zdrojem chyb měření je časový obvod zařízení. Čip, který má na starosti časové krokování, nebývá naprosto stoprocentní a v případě vyššího nároku na frekvenci měření (u ultrasonických anemometrů to je až $20\times$ za sekundu) zde vzniká chyba nestejného časového úseku průměrování. Jednou ze zásadních chyb měření směru proudění bývá nepřesná orientace čidla vůči zeměpisnému severu. Stává se, že při nastavení výložného ramene dojde k chybě i několika desítek stupňů.

U ultrasonických anemometrů nastává problém při intenzivnějších srážkách a námraze, kdy jsou vysílače a mikrofony zalepeny kapkami vody, vločkami sněhu nebo krystaly námrazy. Při jejich vypařování nebo tání může na čidlech zůstat zbytek kondenzačních jader, které znečištěním citlivých elementů značně zkreslí výsledky měření.

3.2.3 Cejchování měřidel

Pro správnou činnost větroměrných přístrojů je nezbytné jejich seřizování a cejchování. Národní laboratoří pro cejchování anemometrů v České republice je Odbor přístrojové

techniky Českého hydrometeorologického ústavu. Každý výrobce zařazuje své výrobky do kvalitativních tříd. Pro účely měření větru jsou podle národních a mezinárodních norem přístroje tohoto typu zařazována do kategorie provozních měřidel a výrobce je povinen udat parametry výrobku – rozsah měření a jistotu údajů měřením získaných. Pro rychlosti do 5 m/s se udává odchylka od skutečné rychlosti (zpravidla 0,2 m/s) a pro rychlosti vyšší než 5 m/s procentuální chyba měření z rozsahu přístroje. Dalším důležitým ukazatelem anemometru je právě jeho rozsah. Většinou se pohybuje v rozmezí 0 až 50 m/s nebo 0 až 60 m/s. Požadujeme-li od přístroje vyšší přesnost měření, pak tu jsou cesty dvě: pořídit přístroj ve vyšší kvalitativní třídě (provozní měřidla s kalibrační křivkou) nebo si dát běžná provozní měřidla ocejchovat. Cejchováním získáme kalibrační tabulku, podle které provádíme opravu měření v daném intervalu rychlostí proudění. Při tomto nároku je však třeba přístroje předat k ocejchování 1x za dva roky. Cejchování se provádí až po důkladné údržbě a seřízení zařízení v aerodynamickém tunelu. Cejchování by mělo proběhnout rovněž v případě, že se získaná data při použití několika přístrojů ve velmi podobných podmínkách výrazně liší, nebo po opravě přístroje z důvodů jakékoliv závady (např. porušená rovina rotujících misek, pád ledu z námrazy na anemometr, po zásahu bleskem atd.).

3.2.4 Vliv námrazy na měření rychlosti větru

Námraza je jedním z faktorů, který v zimním období velmi znehodnocuje měření parametrů větru. Různí výrobci eliminují vliv námrazy různým řešením anemometru tak, aby bylo získáváno co nejvíce věrohodných výsledků, např. vyhřívání a dělené přístroje. Jak již bylo výše uvedeno, přístroj může být konstruován buď jako celek, nebo měření rychlosti a směru větru. V případě kompaktního přístroje je otázka vyhřívání složitější. Těleso anemometru se vyhřívá na vnitřní teplotu nejvýše 25°C, protože při vyšších teplotách se vypařují mazadla ložisek. Při silné námraze to však nestačí, teplo se jen obtížně přenáší na směrovku a rotující část anemometru a dochází k jeho zamrznutí. Vzhledem k tomu, že u mobilních zařízení není stálá obsluha, nastává problém stanovit kdy začala být námraza tak intenzivní, že již ovlivnila čistotu přístroje a měření parametrů větru je již nereprezentativní. Totéž se týká i odeznění námrazy, tedy okamžiku, kdy námraza přestala vlivem ohřevu přístroje měření ovlivňovat. Tento případ je méně častý u vytápěných ultrasonických přístrojů. Díky tomu, že tyto přístroje nemají točivé součásti a nehrozí vysychání jakéhokoliv média, snadněji se ohřívají a na námraze tolik netrpí. Na druhou stranu jsou tyto přístroje náchylnější na znečištění vysílacích a přijímacích elementů a výsledky měření pak neodpovídají skutečnosti.

3.2.5 Umístění čidel

Důležitou roli hraje umístění čidel na různých objektech. Pokud je k dispozici vysoká budova (střecha domu, silo), je nutné vyloučit vliv turbulence vznikající při proudění přes střechu objektu. Dosahuje se toho pomocí stožáru, který by měl být vysoký podle plochy střechy pod jeho patou. Pokud jde o nepoužívaný komín, stačí tyč o výšce 3 m nad korunou komínu. Komín, který je v provozu, je pro jakékoliv měření nevhodný. Jedná-li se o hřebenovou střechu domu, je doporučeno umístit čidlo na tyč převyšující hřeben o 6 -10 m. Pokud jde o plochou střechu, pak by měl stožárek převyšovat patu nejméně o sedminásobek nejdelší vzdálenosti paty od okraje střechy. Nesmíme zapomenout, že se musí jednat o nejvyšší bod v okolí (osaměle stojící dům, komín atp.). Umístění na střeše domu nebo jiného objektu, který je obklopen dalšími vyššími překážkami (vyšší domy, další komín v těsné blízkosti, vzrostlé stromy atp.), je pro měření nevyhovující.

Podobný problém nastává pokud pro měření použijeme trubkový (sloupový) stožár s cílem provádět měření v několika úrovních. Podle zahraničních zkušeností by měl být přístroj umístěn na výložníku, jehož rameno je sedminásobnou délkou průměru sloupového stožáru. Podle našich zkušeností je lepší, je-li čidlo umístěno na rameni, které je v délce desetinásobkem průměru stožáru. I tak se ještě na přístroji při vyšších rychlostech projevují vlivy závětrné turbulence. Pro co největší eliminaci vlivu úplavu je třeba výložník upevnit tak, aby byl v závětrří nejméně se vyskytujícími předpokládaných četnostech směrů větru. U příhradového stožáru jsou měření zatížena v porovnání s trubkovými stožáry daleko většími chybami vyvolanými turbulencí při profoukávání stožáru a zeslabením proudění. Vzhledem k mohutnosti rozměrů těchto stožárů by bylo třeba budovat velmi dlouhá ramena, což je technický problém vzhledem k páce, která nastává již tíhou vlastního ramena, nemluvě o případech vzniku námrazy. Druhým problémem pak je případná potřeba výměny poškozeného anemometru. Z toho důvodu můžeme připustit měření na takovém stožáru jen v případě, že bude vybaven nejméně dvěma čidly ve stejné výškové úrovni.

3.2.6 Meteorologický stožár

V naší republice je několik firem, zabývajících se výrobou a provozování meteorologických stožárů. Tyto stožáry se pro potřebu měření parametrů větru osazují nejen anemometry, ale také teploměry pro potřeby výpočtů profilů proudění a turbulencí. Jejich výška je závislá na požadavku objednatele a možnostech dodavatelů. V podstatě jde o stožáry 20-ti až 50-ti metrové. V zahraničí se provozují stožáry o výšce 30, 50, 80, 100 i 120 m, stavěné metodou páky, kotvené ve čtyřech bodech. Čidla se umísťují v patrech po 10 až 20 metrech, napájení zařízení je voleno od připojení k síti 220 V přes adaptéry nebo pomocí baterií 12 V či solárních článků.

V současné době se staví stožáry trubkové, které mají před příhradovými několik výhod. Odmyslíme-li vliv závětrné turbulence, způsobené příhradovinou, jsou náchylnější k zachycování námrazy a hrozí u nich větší nebezpečí zborcení pod její tíhou. Oproti trubkovému má však větší výhodu ve snadnějším přístupu k jednotlivým patrům umístění výložníků. Je to však jeho jediná výhoda. Výška stožáru se volí podle tvaru terénu a podle předpokládané výšky budoucího objektu, pro jehož stavbu se měření provádí. Stožár je nutno stavět na základě stavebního povolení k přechodné stavbě a protože je svojí podstatou překážkou, je nutné ho podle místních podmínek a tvaru terénu opatřit výstražným nátěrem, popřípadě osadit výstražným osvětlením (podle požadavků stavebního úřadu).

Optimálním řešením je opatřit stožár výložníky po 10 m od 10 m nad terénem počínaje. Díky tomuto rozložení umístění přístrojů se snadněji přepočítává měření na vyšší profil. Jak bylo popsáno výše, volba směru umístění výložných ramen je dána zjištěním převládajících relativních četností směrů větru v místě stavby tak, aby byla v závětrří nejméně se vyskytujícími směrů větru, popřípadě větrů s nejnižší průměrnou roční rychlostí.

3.2.7 Verifikace měření, délka měření, přepočítání na dlouhodobou řadu

Doporučenou délkou měření je nejméně jeden rok. Je to z důvodu zachycení ročního chodu větru, který může být pro různá místa různý. Rychlost a směr větru jsou ovlivněny klimatickým charakterem tlakového pole, tvarem orografie vzdáleného a blízkého okolí a charakterem zemského povrchu. Prvním a velkým vlivem na parametry větru je tvar terénu (jeho geomorfologie) a jeho drsnost. Při hodnocení výsledků měření se tak musí vzít v úvahu nejen vlastnosti měřidel, ale hlavně místní podmínky, intenzitu turbulence, vliv námrazy a atmosférických srážek (zvláště smíšených a tuhých). Dále je nutné vyloučit chyby měření způsobené mechanickým poškozením přístroje padající námrazou, příliš silným větrem

unášejším také různé drobné předměty, stáří přístroje (většina provozních měřidel poskytuje spolehlivé výsledky po dobu 5 let, to je doba životnosti udávaná pro běžnou třídu přístrojů většinou výrobců), poškození samotného přístroje a elektroniky zapisovačů elektrickým výbojem (ať přímým zásahem či indukovanou elektřinou) atd. Všechny tyto vlivy jsou včetně zamrznutí přístroje při výskytu silné námrazy zdrojem hrubých chyb. Jejich eliminace je obtížná a provádí se pomocí porovnání s řadou měření získanou ze stanoviště nejbližší meteorologické stanice.

K tomuto účelu se používají statistické metody, z nichž první je metoda porovnání naměřené řady se řadou na sekulární stanici. Tím se dají odstranit nejhrubší chyby v měření. Po té je provedena řada statistických výpočtů, jako stanovení absolutních a relativních četností výskytu směrů větru, stanovení četností výskytu intervalů rychlosti větru, výpočet denní, měsíční a roční průměrné rychlosti větru, stanovení průměrných rychlostí větru ve směrových sektorech, grafické konstrukce a zobrazení výpočtů, výpočet Weibullova rozdělení a jeho parametrů (A, k), přepočet profilu na větší výšku a výpočet zásob větrné energie. Takto zpracovaná řada se po podobném výpočtu a zpracování dat z nejbližší vhodné a podobně umístěné meteorologické stanice podle řady ze stejného časového úseku, v jakém bylo provedeno měření na meteorologickém stožáru, statisticky převede na dlouhodobou řadu měření, nejčastěji na parametry desetileté řady (Štekl, Jež, 1999). Výsledek charakterizuje dlouhodobé parametry větru v daném místě. Závěry měření slouží jako podklad pro posudkové posouzení a dají se použít jako základní data pro výpočet pomocí modelů, které mohou nabídnout nejvhodnější umístění, popřípadě rozmístění věží větrných elektráren.

3.2.8 Doplnková měření

Jak bylo zmíněno výše, měření na meteorologickém stožáru nemusí být striktně omezeno jen na měření parametrů větru. Měření může být rozšířeno o měření teploty alespoň ve dvou úrovních pro získání představy o stratifikaci teploty ve vrstvě a pro přesnější výpočet profilu rychlosti větru a vhodné pro výpočet turbulentních toků, dále o měření vlhkosti opět alespoň ve dvou úrovních pro výpočet teploty rosného bodu pro potřeby stanovení nasycení vzduchové hmoty vodními parami s cílem nepřímého určení možného vzniku námrazy. Čidel pro tyto účely je na našem trhu k výběru dostatek, doporučuje se však provádět měření pomocí přístrojů vyrobených toutéž firmou vzhledem ke stereotypnímu výrobnímu postupu a tím i stejnému možnému vlivu výrobního procesu na jistotu kvality získaných dat. Většina výrobců nabízí sadu čidel k měření všech základních meteorologických prvků (směr a rychlost větru, teplota, vlhkost, tlak vzduchu), která dostatečně pokryjí naše požadavky.

3.3 Vliv námrazy a turbulence na výrobu elektrické energie větrnou elektrárnou

Měření na meteorologickém stožáru můžeme rovněž doplnit o měření námrazy – jejího výskytu a intenzitě, rychlosti narůstání a jejího množství v kilogramech přepočtených na potřebné jednotky plochy nebo délky. Výrobců námrazoměrů však není mnoho, v naší republice se kusovou výrobou zabývá Ústav fyziky atmosféry AV ČR. Měření pomocí námrazoměru je velmi užitečné, do značné míry pomáhá zúžit eliminaci chybných dat z anemometrů, postižených námrazou. Je však energeticky náročné a v případě měření v polních podmínkách často závislé na kapacitě baterií, třebaže se jedná o několik měsíců zimního půlroku.

3.3.1 Určení vlivu námrazy na činnost větrné elektrárny

Tvorba námrazy na větrných elektrárnách významným způsobem ovlivňuje produkci elektrické energie snížením účinnosti listů rotoru, v případech silné námrazy vyřazením celého systému z provozu kvůli vyřazení funkce řídicího anemometru vlivem námrazového „obalu“.

Na základě čtyřletého experimentu (1994-1997) na Dlouhé Louce (870 m) v Krušných horách se v průměru snížila roční produkce elektrické energie o 11% (Štekl, Hrdlička, 1999). Seifert (1999) uvádí, že při rychlosti větru v ose rotoru 8 m/s námraza, vyskytující se 100 dnů za rok, kdy je zařízení mimo provoz, sníží produkci na 70% možné produkce.

Intenzita námrazy se dělí podle meteorologického kritéria na slabou, je-li její tloušťka menší než 1 cm, mírnou při tloušťce 1-3 cm a silnou, je-li její tloušťka větší než 3 cm. Vyjádřeno měřením meteorologickým námrazoměrem v jednotkách kg/m^2 se hmotnost námrazy nad 10 kg/m^2 řadí do kategorie silné námrazy a hmotnost nad 30 kg/m^2 pak do kategorie velmi silné námrazy (Štekl, 1997).

Tříměsíční měření hmotnosti námrazy (leden až březen 1999) na Dlouhé Louce (870 m) ukázala, že nejčastější je námraza o hmotnosti od $0,5$ do $1,0 \text{ kg/m}^2$ (Štekl, Hrdlička, 1999). Řídké byly případy (4 dny) s výskytem námrazy o hmotnosti nad 3 kg/m^2 .

Zatížení námrazou, charakterizované průměrným počtem dnů s námrazou se obecně zvyšuje s narůstající nadmořskou výškou stanoviště. Např. v Kostelní Myslové u Telče (527 m n.m.) jsou to 23 dny, v Nedvězí (725 m n.m.) 45 dnů, na Svratouchu (737 m n.m.) 47 dnů, na Přimdě (745 m n.m.) 60 dnů, v Červené u Libavé (750 m n.m.) 67 dnů, na Milešovce (837 m n.m.) 102 dny, na Pradědu (1459 m n.m.) 151 den. Ke vlivu nadmořské výšky však různým podílem přispívají lokální vlivy jako je větrná expozice a procesy ovlivňující tvorbu mlh, při kterých převážná část případů s námrazou vzniká.

Na základě statistických zpracování lze konstatovat, že v ČR se ve výškách kolem 850 m n.m. námraza vyskytuje v období od konce října do začátku května. Denní relativní četnosti jsou vyšší než 60% od poslední listopadové dekády do konce první březnové pentády. V prvních dvou lednových dekádách lze očekávat denní relativní četnost výskytu námrazy nad 80%. V poměrném zastoupení jde ze 43% o námrazu slabou, z 19% o námrazu mírnou a z 38% o námrazu silnou (Brázdil, Štekl, 1999). Tyto údaje jsou mj. aplikovatelné na pláň v Krušných horách, vhodné pro výstavbu větrných elektráren.

Předběžný odhad vlivu námrazy na činnost větrné elektrárny v plánované lokalitě pro výstavbu můžeme určit z námrazové mapy území ČR. Tato mapa byla vypracována na EGÚ, a.s., Brno (2001), pro účely energetiky. Je určena na základě plošného měření hmotnosti námrazy na horizontálních tyčích o délce 1 m a průměru 30 mm, uložených ve výšce 5 m nad povrchem ve směru sever-jih a západ-východ, později pak námrazoměry. Hmotnost námrazy se váže k námrazovému cyklu, což je období od začátku tvoření do jejího opadnutí. Hmotnost námrazy se na této mapě dělí do následujících tříd: do $0,5 \text{ kg/m}^2$, do 1 kg/m^2 , do 2 kg/m^2 , do 3 kg/m^2 , do 5 kg/m^2 , do 8 kg/m^2 , do 12 kg/m^2 , do 18 kg/m^2 , nad 18 kg/m^2 . Hmotnost námrazy do 1 kg/m^2 je autory označována jako lehká, do 2 kg/m^2 jako střední a do 3 kg/m^2 jako těžká. Ostatní kategorie jsou brány jako kritické.

Pro určení hmotnosti námrazy v lokalitě připravované výstavby větrné elektrárny a potom při jejím provozu byl v ÚFA AV ČR vyvinut a v kusové produkci je vyráběn námrazoměr. Princip funkce přístroje a základní technické údaje jsou uvedeny v příloze 19.

Měření námrazoměrem, instalovaným na meteorologickém stožáru má dva směry využití. V první řadě jde o klimatické charakteristiky (četnost výskytu jevu, hmotnost námrazy), ve druhé řadě pak o využití těchto měření pro případné vyloučení větroměrných dat ovlivněných silnou námrazou, kterou podle našich zkušeností ani vyhřívání čidel neovlivní.

Měření námrazoměrem v místě instalované větrné elektrárny, případně farmy, umožní jednak průběžně informovat pomocí sítě GSM provozovatele o hmotnosti námrazy a zároveň předávat výstražná upozornění k okamžiku, kdy hmotnost námrazy dosáhla stanovené kritické hodnoty. Tato výstraha umožní provozovateli osobní přítomnost u ohroženého zařízení a organizaci ochranných opatření.

Na meteorologickém stožáru u Albrechtic u Frýdlantu se předpokládala instalace dvou námrazoměrů, a to ve výšce 40 m a 10 m s cílem měřit i možný vliv výšky nad terénem na vznik námrazy. Měření mělo probíhat v zimním období let 2004-2005. Po vyřazení tohoto stožáru z provozu budou dva námrazoměrné přístroje nainstalovány na meteorologický stožár u Václavic. Dvouleté období řešení úkolu VaV neumožnilo získat výsledky měření pro tuto závěrečnou zprávu. Získané výsledky budou publikovány v časopise Větrná energie.

3.3.2 Určení vlivu turbulence a vertikálního stříhu větru na činnost větrné elektrárny

Turbulentní proudění v mezní vrstvě atmosféry je vyvoláváno charakteristickými vlastnostmi zemského povrchu daného místa. Řadí se k nim tvar reliéfu a charakter zemského povrchu, který jednak působí mechanickými účinky (parametr drsnosti) a dále termickými účinky (vertikální teplotní profil s výraznou denní a roční variabilitou). Turbulentní proudění lze charakterizovat jako souhrn vírových elementů o průměrech od řádu milimetrů až do řádu kilometrů. V případě rotorů větrných elektráren největší význam mají turbulentní víry do rozměru desítek metrů.

V turbulentním proudění se rychlost větru v daném bodě rychle mění v čase. *Okamžitá rychlost u* je superpozicí dvou rychlostí, a to *průměrné rychlosti za zvolený časový interval \bar{u}* a *pulzační rychlosti u'*

$$u = \bar{u} + u'$$

Míra časové variability rychlosti se vyjadřuje disperzí σ_u^2 , která je definována vztahem

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2, \text{ kde}$$

u_i jsou okamžité hodnoty rychlosti,

\bar{u} jsou průměrné hodnoty za zvolený časový interval (v praxi to bývá interval pěti až deseti minut).

Intenzita turbulence I je určena vztahem $I = \sigma_u / \bar{u}$.

Zelený a Foken (1995) publikovali vztah určující závislost výkonu větrné elektrárny E na hustotě vzduchu ρ , na rychlosti větru \bar{u} a intenzitě turbulence I

$$E = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 (1 + 3I^2),$$

z čehož vyplývá, že s vyšší hodnotou intenzity turbulence lze očekávat při stejné rychlosti větru vyšší výkon větrné elektrárny.

Výkonové křivky, které uvádějí výrobci, jsou většinou platné pro intenzitu turbulence 0,1, což je splněno v rovinném terénu. V horském terénu může tato hodnota dosahovat až 0,7-0,8. V lokalitě Dlouhá Louka v Krušných horách byla při západním proudění naměřena průměrná hodnota intenzity turbulence v závislosti na rychlosti větru 0,12 až 0,18, okamžité hodnoty přesahovaly 0,3 (Štekl, 1997). Např. výkon větrné elektrárny EWT 315 kW na Dlouhé Louce ležel jednoznačně při intenzitě turbulence 0,29 nad výkonovou křivkou a při intenzitě turbulence 0,19 pod výkonovou křivkou.

Svoboda a Čermák (2002) zjistili na měřeních z Dlouhé Louky, že pokud je výkon větrné elektrárny určován z průměrné rychlosti větru, pak skutečný výkon ve většině případů roste s rostoucí intenzitou turbulence. Na základě šestiměsíčního měření na Dlouhé Louce (větrná elektrárna EWT 315 kw s výškou sloupu 30 m) se ukázalo, že při rychlostech větru v ose turbíny do 10 m/s ve většině případů reálný výkon větrné elektrárny byl vyšší než výkon určený z výkonové křivky. Naopak při rychlostech větru vyšších byl reálný výkon pod úrovní očekávané výroby z výkonové křivky.

Zároveň se uvedení autoři zabývali vlivem vertikálního profilu rychlosti větru na výkon větrné elektrárny. Jde o to, že změřené vertikální profily rychlosti větru na Dlouhé Louce vykazovaly značnou časovou proměnlivost. Ta je vyvolávána souhrnným účinkem řady faktorů, kde patrně nejdůležitější roli má časová změna vertikálního teplotního gradientu. Z měření vyplývá, že rozdíl okamžitých rychlostí větru na vzdálenost 80 až 90 m, což je rozpětí rotorů větrných elektráren, je až 10 m/s. V takových případech však nastává relativně velká chyba při určení okamžitého výkonu větrné elektrárny, určeného podle rychlosti větru v ose rotoru.

Závěrem lze konstatovat, že intenzita turbulence se jako veličina zcela vlastní každému konkrétnímu stanovišti nedá určit jinak než přímým měřením. Z toho důvodu faktory vyvolávající odchylky od výrobcem prezentované výkonové křivky, jako je intenzita turbulence a vertikální profil rychlosti větru mezi dolní a horní úvratí listů rotoru, by měly být obsaženy v programu měření při přípravě projektu výstavby větrné elektrárny.

3.4 Hlukové emise v okolí větrné elektrárny

3.4.1 Základní charakteristiky hluku

Hluk působený činností větrných elektráren je jedním z nejzávažnějších faktorů, které ze zákona limitují území, kde lze uvažovat o jejich výstavbě. Každá větrná elektrárna je zdrojem určité hlukové emise. Ta je dána jednak mechanickým hlukem stroje a jednak aerodynamickým hlukem, především hlukem způsobeným průchodem listů vrtule okolo stožáru. Mechanický hluk stroje, často velmi obtěžující své okolí, byl závažným problémem prvních větrných elektráren. Tato etapa již byla překonána a u současných větrných elektráren zpravidla převažuje aerodynamický hluk.

Hluková emise větrné elektrárny je charakterizována **hladinou akustického výkonu L_{WA}** se zařazeným váhovým filtrem A . Ta je udávána v dB vzhledem k jednotkovému bodovému zdroji zvuku o výkonu 1 pW umístěnému ve středu rotoru, který má ve směru větru stejné hlukové emise jako větrná elektrárna. L_{WA} je určována pro různé rychlosti větru, přičemž rozhodující je interval od 6 m/s do 10 m/s (ČSN EN 61400-11). Běžné hodnoty hladiny akustického výkonu dnešních velkých větrných elektráren se pohybují mezi 100 dB a 106 dB, u elektráren určených pro neobydlené oblasti či mělká moře mohou být vyšší.

Důležitou informací je též *akustické spektrum* hlukové emise L_{Wf} .

Informace o hladině akustického výkonu elektrárny a jejím akustickém spektru lze získat technickým měřením daného typu elektrárny. Specifikací tohoto náročného měření, které by měl provést výrobce před uvedením větrné elektrárny na trh, se zabývá již zmíněná norma ČSN EN 61400-11 a zájemce o stavbu větrné elektrárny by měl od výrobce výsledky měřených údajů vyžadovat.

Intenzita zvuku v určitém místě je charakterizována **hladinou akustického tlaku** L_p , která se vyjadřuje v dB a je určena vztahem

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}, \text{ kde}$$

p je okamžitý akustický tlak v Pa

p_0 je referenční akustický tlak; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Pro představu uvádíme příklady různých hodnot L_p :

| | |
|--------|---------------------------------|
| 0 dB | - práh slyšitelnosti |
| 20 dB | - šum listí, tichá místnost |
| 30 dB | - šepot, tichý byt, tichá ulice |
| 40 dB | - tlumený hovor, zvuk ledničky |
| 50 dB | - běžný pouliční hluk |
| 60 dB | - hlasitý hovor |
| 70 dB | - frekventovaná ulice |
| 90 dB | - jedoucí vlak |
| 120 dB | - startující letadlo |
| 140 dB | - akustické trauma |

U paty současných větrných elektráren je typický hluk mezi 50 dB a 60 dB

3.4.2 Nejvyšší přípustné hodnoty hluku podle současné legislativy

Nejvyšší přípustné hodnoty hluku (hladiny akustického tlaku) ve venkovním prostředí definuje Nařízení vlády č. 502/2000 Sb. ze dne 27. listopadu 2000 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrace. Podle tohoto nařízení nesmí tzv. ekvivalentní hladina akustického tlaku $L_{Aeq,T}$ pocházející z větrných elektráren překročit v tzv. chráněných venkovních prostorech staveb (tedy na vnějších zdech staveb určených k bydlení, ale i rekreačních zařízení, například chalup) hodnotu 50 dB v denní době (6:00 - 22:00) a hodnotu 40 dB v noční době (22:00 - 6:00). O 5 dB nižší hodnoty platí pro chráněné venkovní prostory staveb nemocnic a staveb lázní.

Hodnota **ekvivalentní hladiny akustického tlaku** $L_{Aeq,T}$ je určena vztahem:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L(t)}, \text{ kde}$$

T je doba, ke které se ekvivalentní hladina vztahuje

$L_{Aeq,T}$ je tedy průměrná hodnota hluku za dobu T , což je v denní době 8 nejhluchnějších hodin a v noční době jedna nejhluchnější hodina.

Dále platí korekce na hluk s tzv. *tónovou složkou*. Při výskytu výrazné tónové složky v akustickém spektru se všechny výše uvedené limitní hodnoty snižují o 5 dB (tedy na 45 dB ve dne a 35 dB v noci). Podle §4 zmíněného Nařízení vlády č. 502/2000 Sb. tato korekce platí, má-li hluk tónový charakter, který je prokazatelný kmitočtovou analýzou v třetinooktávových pásmech. Pokud lze tónový charakter hluku prokázat úzkopásmovou analýzou v kmitočtových pásmech 6 procent (jedna dvanáctina oktávy) nebo subjektivně, snižují se nejvyšší přípustné hodnoty o 2 dB. Korekce na výskyt tonality je odůvodněna silně obtěžujícím charakterem hluku, který takovou tónovou složku obsahuje. Existenci tónové složky lze zjistit z akustického spektra hlukové emise elektrárny, získaného od výrobce, respektive hygienickým měřením. Současné větrné elektrárny se s výskytem tónové složky ve

spektru většinou nepotýkají, tonalita se však může objevit při mechanické poruše elektrárny (skřípání, vrzání ap.).

Hluk způsobovaný průchodem listů vrtule kolem stožáru, tedy typický zvuk větrný elektráren, lze považovat za *impulzní hluk*. Pro takový hluk ve venkovním prostředí žádná korekce stanovena nebyla na rozdíl od tzv. *vysoce impulzního hluku*, jako jsou různé údery či nárazy (nebo například střelba). Pro ten je stanovena další korekce -7 dB, u větrných elektráren by se ale vyskytovat neměl.

Pro *provádění povolených staveb* (tedy i stavby větrné elektrárny) je povolená korekce +10 dB k základní nejvyšší přípustné ekvivalentní hladině akustického tlaku, a to v době od 7 do 21 hodin. Povolená intenzita hluku při stavbě se tedy zvedá na 60 dB.

3.4.3 Akustická studie

Nezbytnou součástí podkladů nutných pro stavbu větrné elektrárny je zpracování akustické studie. Tato studie vychází z údajů výrobce (nebo technického měření), tedy z hladiny akustického výkonu L_{WA} a hladin ve spektru L_{Wf} . Ve studii jsou tyto vstupní hodnoty přepočteny na hladinu akustického tlaku $L_{Aeq,T}$ u nejbližší chráněné zástavby. Výpočet by měl být proveden pro rychlosti větru 8 m/s, resp. 10 m/s, tedy pro rychlosti s nejvyšší hlukovou emisí elektrárny, kdy ještě nepřevažuje sekundární emise (hluk pozadí). Studie by měla obsahovat porovnání hluku z provozu větrné elektrárny a hluku pozadí (ideálně jejich regresních křivek), aby bylo zřejmé, za jakých podmínek je hluk větrné elektrárny převažující. Při interpretaci výsledků by měla být zohledněna rezerva 3 dB daná nejistotou výpočtu. (Jirásková, 2004) Orientační hodnoty minimální vzdálenosti samostatné velké větrné elektrárny s osou vrtule ve výšce 80m od staveb určených k bydlení, aby tato splňovala hygienický limit pro noční dobu (bez tónové složky) podle Stöhra (kulatý stůl, 22.9.2004) a informací firmy DeWind (www.dewind.de) jsou uvedeny v tabulce 3.2:

| L_{WA} elektrárny | vzdálenost od nejbližší zástavby |
|------------------------|-------------------------------------|
| 100 dB | 345 m |
| 101 dB | 375 m |
| 102 dB | 415 m |
| 103 dB | 450 m |
| 104 dB | 490 m |
| 105 dB | 535 m |

Tabulka 3.2 Přibližná minimální vzdálenost samostatné velké větrné elektrárny o výšce 80m od chráněné zástavby

Uvedené údaje mohou sloužit pouze pro předběžné plánování, nikoli však jako náhrada akustické studie. Skutečné hodnoty se mohou v důsledku místních podmínek od těchto údajů lišit. Obecně také platí, že vzdálenost, ve které je dosažena určitá hladina intenzity hluku mírně roste s výškou větrné elektrárny, tj. zvuk z vyšších elektráren se nese dál (řádově je nutno přičíst či odečíst 10 m až 15 m na každých 10 m výšky osy vrtule (www.dewind.de)). V případě většího počtu větrných elektráren (větrné farmy) je situace mnohem složitější a nelze ji takto zjednodušeně popsat. Vzhledem k tomu, že metodika vypracování akustické studie není v odborném zaměření našeho pracoviště a obsahuje řadu nevyjasněných otázek, touto tematikou jsme se hlouběji nezabývali.

3.4.4 Hygienické měření

V případě, kdy výsledky akustické studie naznačují, že intenzita hluku na nejbližší obytné zástavbě je blízká nejvyšší přípustné hodnotě 40 dB (resp. 50 dB pro denní dobu), je nutné po uvedení elektrárny do provozu provést **kontrolní hygienické měření** imisních parametrů (hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,T}$ a hladin ve spektru L_{req}) u nejbližší chráněné zástavby.

Pro způsob provedení hygienického měření lze doporučit metodiku uvedenou v normě ČSN EN 61400-11. Měření se provádí na odrazné desce, která odstraní parazitní hluk průchodu větru kolem mikrofonu (ten je v každém případě vybaven krytem proti větru). Neodstraní však hluk pozadí - tzv. sekundární emisi (stromy, okapy, bouchání a hvízdání různých předmětů, ...). Měření hluku větrné elektrárny a pozadí se provádí zvlášť, vždy synchronizovaně s měřením rychlosti větru v 1-minutových intervalech, v co nejširším rozsahu rychlostí větru. Výsledkem jsou dvě regresní křivky (hluku elektrárny a pozadí), jejichž průsečík odpovídá minimální rychlosti větru, při které již hluk pozadí maskuje hluk větrné elektrárny. Hladina akustického tlaku $L_{Aeq,T}$ by měla být udávána pro standardní podmínky s nejvyšší úrovní akustického tlaku, tedy pro směr větru k zástavbě a rychlost větru odpovídající výše zmíněnému průsečíku, kdy je ještě větrná elektrárna slyšitelná (Jirásková, 2004). Při měření je nutné vyhnout se anomálním podmínkám pro šíření zvukových vln, které mohou nastat například při výskytu nízké položené teplotní inverze.

Měření musí provést laboratoř, která má tuto metodu akreditovanou, což jsou například bývalé Okresní hygienické stanice.

Stejným způsobem se provádí tzv. **inspekční měření** v případě stížnosti obyvatel na hluk větrné elektrárny. Rozdíl mezi kontrolním a inspekčním měřením spočívá v tom, že při kontrolním měření se musí dokázat, že hluk nepřesahuje hygienickou normu, zatímco při inspekčním měření se naopak dokazuje překročení hygienické normy. Nejistota měření, která se pohybuje kolem 1,7 dB, je proto k výsledku hygienického měření přičítána (je nutno naměřit o chybu měření méně než je limit, aby bylo prokázáno splnění normy), naopak od inspekčního měření je odečtena (je nutno naměřit o chybu měření více než je limit, aby bylo prokázáno překročení normy) (kulatý stůl, 22.9.2004).

3.5 Hodnocení vlivu stroboskopického efektu větrných elektráren

3.5.1 Popis programu STIN

Výpočetní program STIN počítá základní charakteristiky doby „zastínění“ zadaného místa nebo míst pro zadanou konfiguraci větrných elektráren (VE). Program je založen na modelu, který simuluje pohyb Slunce po obloze během kalendářního roku a sleduje období, kdy je zadané místo v prostoru může být zastíněné vrtulí VE. Program počítá celkovou dobu možného zastínění a její procentuální vyjádření vzhledem k délce slunečního svitu (období, kdy je Slunce nad horizontem). Program je vytvořen pro platformu PC a operační systém Windows.

Výpočet je proveden za následujících zjednodušujících předpokladů:

- 1) Okolní krajina je plochá, a tedy se neuvažuje zákryt Slunce zvlněným terénem. Dále se neuvažují překážky, které by Slunce stínily. Zahrnutí překážek (umělých i orografických) je teoreticky možné, avšak vyžadovalo by komplikované zadávání vstupních dat.

- 2) Předpokládá se, že obloha je bez oblačnosti. Tento předpoklad lze jen obtížně obejít, protože nejsou k dispozici spolehlivé statistiky výskytu oblačnosti, které by mohly být při výpočtu využity. Je třeba si uvědomit, že zastínění Sluncem se vyskytuje téměř výhradně v době, kdy je Slunce nízko nad obzorem a nelze tedy standardní statistiky Slunečního svitu využít.
- 3) Vrtule VE je kolmo na směr slunečních paprsků, což je nejméně příznivý případ. Obdobně jako v předchozím bodě je obtížné využít případné znalosti větrné růžice v daném místě, neboť může existovat závislost směru větru na denní době, což obvykle větrné růžice neuvažují.
- 4) Neuvažuje se vzájemné zastínění (zákryt) míst, pro které se provádí výpočet. Tento bod souvisí s bodem 1.
- 5) Neuvažuje se současné zastínění několika VE.

Všechny uvedené předpoklady nadhodnocují celkovou dobu zastínění. Proto lze výsledek považovat program považovat za horní odhad (nejméně příznivý) vlivu VE na prostředí.

3.5.2 Vstup modelu STIN

Vstupní parametry programu STIN jsou obsaženy v souboru STIN.VST. Tento soubor obsahuje následující informace:

Informace o VE:

- Zeměpisné souřadnice
- Lokální popis polohy (x, y, z) v m
- Výšku tubusu a poloměr vrtule v m

Informace o objektech

- Objekt je popsán body (sít' bodů)
- Body jsou popsány (x, y, z) v m

Lokální systém souřadnic je orientován standardním způsobem, tj. x je od západu na východ a y je od jihu na sever. Souřadnice z značí nadmořskou výšku. Doporučuje se použít Gaussův systém s tím, že počátek souřadného systému se ztotožní s VE. Strukturu souboru STIN.VST popisuje [příloha 20](#).

3.5.3 Výstup modelu STIN

Výstup modelu STIN je textový soubor STIN.INF, který obsahuje:

1. Vstupní informace, tj. zadané parametry ze souboru STIN.VST.
2. Vypočtené hodnoty pro jednotlivé body:
 - délka slunečního svitu (Slunce nad horizontem) v hodinách (DELKA SVITU(H))
 - délka možného zastínění v hodinách STIN(H) a v % STIN(%) (tj. délka možného zastínění v poměru k délce slunečního svitu v procentech)
3. Měsíční charakteristiky zastínění:
 - minimální termín ve tvaru HHmm (hodina, minuta), kdy v daném měsíci může dojít k zastínění (OD).
 - maximální termín ve tvaru HHmm (hodina, minuta), kdy v daném měsíci může dojít k zastínění (DO).
 - rozdíl maximálního a minimálního termínu v minutách (S).

Ukázku výstupního souboru pro parametry uvedené v [příloze 20](#) obsahuje [příloha 21](#).

3.6 Určení roční výroby elektrické energie

K určení roční výroby elektrické energie na dané lokalitě je třeba mít k dispozici výkonovou křivku pro uvažovaný typ elektrárny. Výkonová křivka představuje závislost výkonu P na rychlosti větru u . Pokud chceme odhadnout celkovou výrobu energie musíme pro rychlost u funkční hodnotu výkonové křivky $P(u)$ vynásobit pravděpodobností této rychlosti na daném místě $f(u)$ a tento součin integrovat přes celou škálu zde se vyskytujících rychlostí větru:

$$P = \int_0^{\infty} f(u)P(u)du$$

Často je funkce hustoty pravděpodobnosti rychlosti větru popsána Weibullovým rozdělením a vztah pro roční výrobu potom dostane tvar:

$$P = \int_0^{\infty} \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right) P(u)du ,$$

kde A je parametr měřítka Weibullova rozdělení v m/s a k je bezrozměrný parametr tvaru Weibullova rozdělení. Rovnici v této podobě nelze řešit analyticky a je nutno použít numerické metody. Vzhledem k tomu, že skutečné výkonové křivky bývají poměrně hladké a spojitě, lze je s úspěchem popsat množinou bodů, mezi kterými se předpokládá lineární funkce:

$$P(u) = \frac{P_{i+1} - P_i}{u_{i+1} - u_i} (u - u_i) + P_i ,$$

kde rychlost větru u leží v intervalu (u_i, u_{i+1}) a dolní indexy popisují jednotlivé uzly křivky. Tento vztah potom dovoluje analytické řešení:

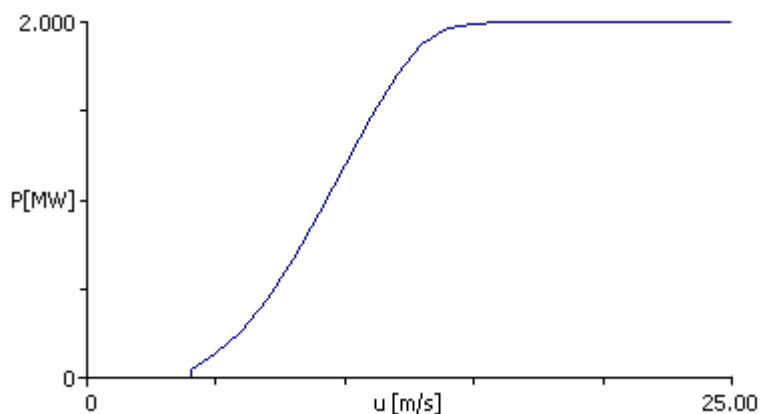
$$P = \sum_i \frac{P_{i+1} - P_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} (G_k(\alpha_{i+1}) - G_k(\alpha_i)) ,$$

kde $\alpha_i = u_i/A$ a funkce $G_k(\alpha)$ je $1/k$ násobek neúplné gama funkce dvou argumentů $1/k$ a α^k .

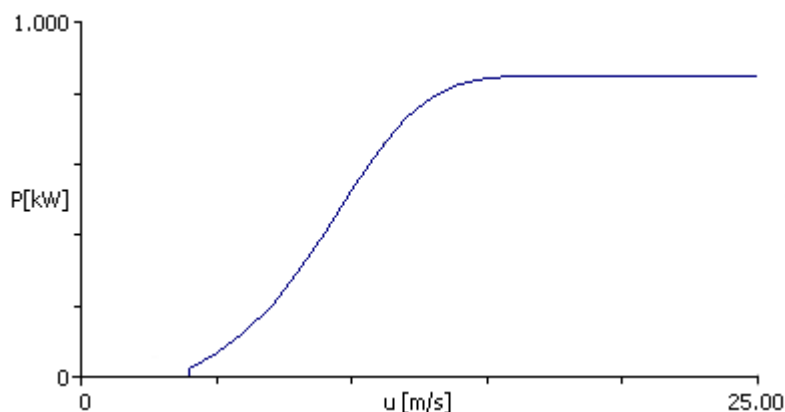
Jak je vidět z uvedených rovnic, je dobré k odhadu očekávané roční výroby energie znát celé statistické rozdělení rychlosti větru, resp. parametry Weibullova rozdělení A a k . Často se výroba počítá pouze na základě průměrné rychlosti větru a uvažuje se jednoparametrické Rayleighovo rozdělení rychlostí, které odpovídá Weibullovu rozdělení s parametrem $k = 2$. Následující [tabulka 3.4](#) na příkladu dvou elektráren ukazuje, jak se mění roční výroba v důsledku rozdílného tvaru statistického rozdělení rychlosti větru při stejném průměru $u = 7$ m/s. Odpovídající výkonové křivky jsou znázorněny na [obrázcích 3.1 a 3.2](#). Hodnoty parametru k byly zvoleny tak, aby odpovídaly rozsahu, jaký je běžný v posudcích na zásobu větrné energie lokality. Jak je vidět na uvedených hodnotách, maximální rozdíl mezi použitím Rayleighova ($k = 2$) a Weibullova rozdělení dosahuje u elektrárny V80 261 MWh a u elektrárny V52 asi polovinu. V málo pravděpodobném a nejnepríznivějším případě by tak tato odchylka činila méně než 6% celkové vyrobené energie.

| | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| A | 7.44 | 7.58 | 7.68 | 7.75 | 7.81 | 7.85 | 7.87 | 7.89 | 7.90 | 7.90 | 7.90 |
| k | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 2.1 | 2.2 |
| P(V80) | 5008 | 5148 | 5240 | 5292 | 5326 | 5333 | 5316 | 5298 | 5269 | 5229 | 5191 |
| odchylka | -5.0% | -2.3% | -0.6% | 0.4% | 1.1% | 1.2% | 0.9% | 0.6% | 0.0% | -0.8% | -1.5% |
| P(V52) | 2174 | 2237 | 2279 | 2305 | 2323 | 2329 | 2325 | 2321 | 2311 | 2297 | 2284 |
| odchylka | -5.9% | -3.2% | -1.4% | -0.3% | 0.5% | 0.8% | 0.6% | 0.4% | 0.0% | -0.6% | -1.2% |

Tabulka 3.4 Roční výroba [MWh] elektráren Vestas V80 a V52 při průměrné rychlosti větru v ose turbíny 7 m/s, standardní hustotě vzduchu (1.225 kg/m^3) a různém tvaru Weibullova rozdělení. Kurzívou je vyznačena odchylka v % od hodnoty při použití Rayleighova rozdělení ($k=2$).



Obr. 3.1 Výkonová křivka elektrárny VESTAS V80



Obr. 3.2 Výkonová křivka elektrárny VESTAS V52

Vedle naznačené nepřesnosti výpočtu roční produkce elektrické energie je třeba uvést další skutečnost. Lze očekávat, že další nepřesnosti vzniknou (zvláště v členitém horkém terénu) odchylkou reálné výkonové křivky od ideální, stanovené v rovinném terénu. Podíl na

tom má například fakt, že při proudění na hraně nad strmým svahem má značný podíl vertikální složka, která k výrobě energie nemůže přispět.

Při výpočtu výroby je také nutno počítat s rozdílnou hustotou vzduchu, zejména ve vyšších nadmořských výškách. Pro některé typy větrných elektráren existují výkonové křivky pro různé hodnoty hustoty vzduchu. Pokud ale nejsou k dispozici, je nutno výslednou výrobu např. podle průměrné teploty vzduchu a nadmořské výšky místa upravit.

3.7 Všeobecné požadavky na měření složek větru a doporučené parametry

3.7.1 Všeobecné požadavky

Měření složek větru, případně teploty a vlhkosti vzduchu (k nepřímému určení vlivu námrazy), případně časového průběhu hmotnosti námrazy až do výšky, která odpovídá projektované výšce tubusu, jsou základními údaji pro určení stupně rentability připravovaného projektu.

V současné době lze akceptovat následující způsoby měření :

Profilové měření (alespoň tříhladinové) na meteorologickém trubkovém stožáru do výšky osy turbíny. Měření na příhradovém stožáru musí respektovat v závislosti na větrné růžici požadavky na zdvojení čidel v daných hladinách a zvětšenou délku výložníků.

Profilové měření (alespoň tříhladinové) na meteorologickém trubkovém stožáru do výšky horní hranice přízemní vrstvy (kolem 40 m) a prodloužení profilu složek větru do výšky zhruba 120-140 m měřením dopplerovským sodarem.

Bodové měření na vyvýšených stavbách typu silo, tovární komín (vyřazený z provozu) nebo osaměle stojící vysoký objekt (dům). Při výpočtu profilu složek větru do výšek 80-100 m pomocí teoretického vztahu, s využitím měření v přízemní vrstvě vzduchu, existuje nebezpečí vzniku zkreslující chyby. Pokud je v lokalitě únosná hluková emise z dopplerovského sodaru, pak se doporučuje určit profil touto metodou.

Kvalitní a věrohodné měření může provést pouze pracovník, lépe pracovníci se vzděláním v oboru meteorologických měření a jejich vyhodnocování. Tato odbornost se v rámci výuky meteorologie a klimatologie přednáší na přírodovědeckých fakultách Karlovy a Masarykovy university, na MFF UK, Praha a na Vojenské akademii, Brno. Vzdělání v oboru umožňuje zhodnotit věrohodnost naměřených dat (nepříznivý vliv námrazy, mechanického poškození, elektrostatické pole atd.), porovnat data v rámci meteorologických polí a přepočítat data na standardní období (10 let).

3.7.2 Měřicí stanoviště

Meteorologické měření musí být uvozeno následujícími informacemi:

- zeměpisné souřadnice (s přesností na sekundy) a Gaussovy souřadnice stanoviště měření
- nadmořská výška stanoviště
- detailní topografická mapa s označením stanoviště (doporučuje se měřítko 1:25000)
- fotografie okolí stanoviště zahrnující celý sektor 360° (provádí se z meteorologického stožáru)
- popis okolí stanoviště s ohledem na překážky proudění a doložení jejich případných změn během měření
- při měření sodarem přesné určení polohy měření vůči stanovišti

- při poloze stanoviště mimo příjezdové cesty je třeba zakreslit přístup či příjezd do mapy

3.7.3 Doba měření

Ve zprávě o měření musí být uvedeno:

- doba zahájení měření se zřetelem na posun letního času a doba ukončení měření
- začátek a konec případného přerušení měření, dotčená čidla, důvod výpadku (námraza, blesk, výpadek dodávky energie apod.)

3.7.4 Meteorologický stožár a použité přístroje

Podrobným způsobem je třeba charakterizovat použitý stožár a měřicí přístroje:

- typ stožáru (trubkový, příhradový), výška stožáru
- výška umístění všech instalovaných čidel
- popis výložníků a umístění čidel (tloušťka a délka výložníků, vertikální nástavec na upevnění čidla), orientace výložníků vůči zeměpisnému severu
- fotografie stožáru vcelku a fotografie výložníků
- při měření na vysoké stavbě její fotografie a fotografie umístění čidel
- typ použitých čidel včetně výrobce, certifikát o kalibraci anemometru s datem
- typ použitého datalogeru, způsob snímání dat, doba průměrování, grafická ukázka záznamu

3.7.5 Měření dopplerovským sodarem

Při měření sodarem je třeba uvést kromě údajů z [kap. 3.7.2](#) a [3.7.3](#) následující:

- typ přístroje a jeho výrobce
- základní technická data
- časová frekvence měření, doba průměrování
- filtrující kritéria pro software k vyhodnocení kontroly správnosti

3.7.6 Zpracování měřených dat

Pro každou měřenou hladinu je třeba vyhodnotit následující parametry :

- distribuční funkce rychlosti větru (v intervalech 1 m/s)
- průměrná rychlost větru, parametry A , k Weibullova rozdělení, hodnota maximální rychlosti větru s termínem výskytu, hustota výkonu větru
- pro nejméně dvanáctidílnou různici relativní četnosti výskytu všech případů, případů $u \geq 4$ m/s, případů $u \geq 10$ m/s, hustota výkonu větru v odpovídajících variantách
- doporučuje se charakteristiky v bodech a) c) zobrazit graficky
- denní a roční chod rychlosti větru. Dále je třeba provést určení průměrné rychlosti větru, parametrů A , k Weibullova rozdělení a hustoty výkonu větru ve výšce osy projektované turbíny a ve výšce spodní úvratě rotoru projektované větrné elektrárny a uvést případné nejistoty ve vyhodnocených datech.

3.8 Doporučení standardní formy pro posouzení větrných poměrů

3.8.1 Všeobecné požadavky

Vymezení standardní formy zpracování posouzení větrných poměrů sleduje vymezení jakýsi minimální rozsah podkladů pro zpracování projektu výstavby větrné elektrárny (farmy VE) a tím garantovat srovnatelnost různých posudků a zajistit tak dostatečnou kvalitu posouzení.

Existují dvě úrovně posouzení větrných poměrů, které jsou určeny charakterem vstupní informace. V první úrovni se jedná o posouzení na základě dat, získaných z matematických modelů a dále je označujeme jako předběžné posouzení. Ve druhé úrovni jde o posouzení na základě výsledků měření meteorologických parametrů. Jak vyplývá z principu obou posouzení nelze je zaměňovat.

Předběžné posouzení je sice časově i finančně méně náročné, ale obvykle není postačujícím podkladem pro jednání o případné půjčce u bankovního domu. Toto předběžné posouzení je konečným řešením pro podnikatele připravující stavbu malých větrných elektráren vzhledem k tomu, že náklady na měření jsou neúměrně vysoké k nákladům na samotnou elektrárnu. Tento typ předběžného posouzení má však fundamentální význam i pro podnikatele připravující stavbu velkých elektráren. Výsledek předběžného posouzení umožňuje určit, zda hodnocená lokalita je neperspektivní a tedy investice do měření je zbytečná. Další variantou výsledku je, že větrný potenciál je na rozhraní rentability připravovaného projektu a následné rozhodnutí podnikatele, zda hodlá podstoupit riziko investice do měření. Poslední, nejlepší variantou, je větrný potenciál hodnocené lokality zaručující rentabilitu projektu. Pak už je věcí podnikatele, zda investuje do měření.

Otázkou zůstává oprávnění ke zpracování posouzení a legislativní rámec tohoto procesu. V každém případě by se mělo jednat o osoby s příslušným vzděláním či osoby, které prošly školením a uspěly u zkušebního pohovoru odborné komise při MŽP nebo při vybrané akademické instituci.

3.8.2 Předběžné posouzení větrných poměrů

Každé posouzení musí obsahovat základní informace:

- určení projektu zeměpisnými a Gaussovými souřadnicemi stanoviště, včetně jeho zeměpisného názvu a nadmořské výšky stanoviště
- jménem a adresou objednatele
- jménem (jmény) zpracovatele, včetně podpisu, označením organizace nebo společnosti, kde bylo posouzení zpracováno; datem zpracování

3.8.2.1 Vliv blízkého a vzdáleného okolí na proudění

V této části se uvede:

- stručný popis lokality se zřetelem na směrové rozložení parametru drsnosti, případně popis významných překážek ovlivňujících proudění
- vliv tvaru terénu ve vzdálenosti desítek km na větrné poměry lokality
- vliv tvaru terénu ve vzdálenosti stovek m a několika málo km na větrné poměry lokality

3.8.2.2 *Metody výpočtu větrných charakteristik a výsledky výpočtu*

Tato část obsahuje:

- specifikaci meteorologických dat použitých k výpočtu
- stručný popis použitých matematických modelů se zřetelem na pravděpodobné chyby výpočtu
- pro výšku 10 m a dále po deseti metrech následující charakteristiky :
 - průměrnou roční rychlost větru
 - parametry A, k Weibullova rozdělení
 - hustotu výkonu větru
 - roční produkci elektrické energie daným typem větrné elektrárny ve výškách dodávaných sloupů
 - větrnou růžici ve výšce 10 m.

3.8.2.3 *Výpočet ztrát stíněním*

Jedná-li se o projekt výstavby farmy větrných elektráren, pak vhodným programem (WASP) se určí ztráty vzniklé stíněním v závislosti na vypočtené větrné růžici a vypočtené rychlosti větru a určí se „čistá“ výroba.

3.8.2.4 *Hlukové emise a stroboskopický efekt*

Na základě dat výrobce VE o hlukové emisii, jakož i empirických zkušeností se zhodnotí vhodnost lokality pro stavbu větrné elektrárny, případně farmy. Stroboskopický efekt se určí vhodným programem (např. STIN).

3.8.2.5 *Závěrečné vyhodnocení*

Na základě výpočtu roční produkce elektrické energie se určí stupeň vhodnosti lokality pro výstavbu větrné elektrárny, případně farmy. Uvede se vliv očekávané hlukové emise, stroboskopického efektu, vzdálenost k vedení VN a možnost příjezdu stavební techniky. Zhodnotí se očekávaný vliv námrazy pomocí „námrazové mapy“.

3.8.3 *Posouzení větrných poměrů lokality*

V tomto případě se vychází z provedeného měření (viz [kap. 3.7](#)).

Úvodní část je totožná s [kap. 3.8.1](#) a dále následuje část totožná s [kap. 3.8.2.1](#).

3.8.3.1 *Měření meteorologických parametrů*

V této části se využije protokol o měření větrných poměrů jak byl vymezen v [kap. 3.7](#). Případně se uvedou výsledky měření teploty a vlhkosti vzduchu, eventuálně měření hmotnosti námrazy. Není-li toto měření k dispozici, uvede se odhad vlivu námrazy určením z „námrazové mapy“.

3.8.3.2 *Prohlídka stanoviště*

Zpracovatel provede obchůzku stanoviště. Zápis z této obchůzky obsahuje:

- jméno osoby
- termín obchůzky

- fotografickou dokumentaci
- slovní zhodnocení okolí stanoviště

3.8.3.3 *Výpočet ztrát stíněním*

Jedná-li se o projekt výstavby farmy větrných elektráren, pak vhodným programem (WAsP) se určí ztráty vzniklé stíněním v závislosti na změřené větrné růžici a změřené rychlosti větru. Na tomto základě se určí „čistá“ výroba.

3.8.3.4 *Hlukové emise a stroboskopický efekt*

Pole hlukové emise v okolí větrné elektrárny či větrné farmy určuje formou hlukové studie akreditované pracoviště. Hluková studie není součástí posouzení větrných poměrů. Stroboskopický efekt se určí vhodným programem (např. STIN).

3.8.3.5 *Produkce elektrické energie blízko větrnou elektrárnou*

Pokud v blízkém okolí existuje větrná elektrárna (či větrná farma), uvedou se údaje o její produkci (měsíční, roční).

3.8.3.6 *Závěrečné zhodnocení*

Zhodnotí se očekávaná roční produkce elektrické energie vybranými typy větrných elektráren, případně při různých výškách sloupů. V případě stavby farmy se uvažuje „čistá“ produkce. Uvede se vliv očekávané hlukové emise, stroboskopického efektu, vzdálenost k vedení VN a možnost příjezdu stavební techniky. Zhodnotí se buď změřený nebo předpokládaný vliv námrazy na provoz zařízení. Uvedou se pravděpodobné nepřesnosti výpočtu.

4 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ PROFILU RYCHLOSTI NA METEOROLOGICKÉM STOŽÁRU S MĚŘENÍM DOPPLEROVSKÝM SODAREM REMTECH

4.1 Umístění přístrojů a metodika porovnávání

Srovnávací měření mezi dopplerovským sodarem a klasickými přístroji bylo realizováno u meteorologického stožáru u obce Albrechtice (Gaussovy souřadnice 3501820, 5637270). Sodary od firmy REMTECH typu PA1 a PA2 byly střídavě umístěny ve vzdálenosti 30 – 50 m od paty stožáru. Sodarová data byla zapisována s nejjemnějším možným vertikálním rozlišením (krok 10 m) s časovým průměrováním 5 minut. Na stožáru byla měřena rychlost větru klasickými miskovými anemometry ve výškách 41, 66 a 85 m nad terénem. Navíc byl na stožáru umístěn ve výšce 42 m sonický anemometr.

Dopplerovský sodar vyhodnocuje rychlost větru z dopplerovského posunu frekvence zvuku odráženého na nehomogenitách rychlosti. Aby bylo možné spolehlivě určit dopplerovský posun, musí mít zpracováváný úsek signálu určitou dobu trvání. Proto dopplerovský sodar může měřit jen prostorové průměry rychlosti větru. Tuto skutečnost je nutné vzít v úvahu zvláště v blízkosti zemského povrchu, kde změny rychlosti větru s výškou jsou značné a nelineární.

Proto jsme porovnání sodaru s klasickými čidly rozdělili na dvě části:

- porovnání rychlosti větru průměrované podél vertikály v celém rozsahu měření na stožáru (tj. v rozmezí 41 až 85 metrů),
- porovnání průměrných vertikálních profilů spočtených z normovaných vertikálních profilů ze sodaru a ze stožáru.

V obou verzích vyhodnocování tedy nepracujeme přímo s naměřenými hodnotami, ale s hodnotami odvozenými ze změřených vzorků. Vzhledem k tomu, že jsme měli k dispozici dva typy sodaru (typy označované výrobní firmou REMTECH jako PA1 a PA2), byla porovnání prováděna odděleně pro každý z těchto typů. Typ PA1 je novější, menší a přenosný typ sodaru. Typ PA2 je starší velký sodar, který musí být umístěn na přívěsném vozíku za osobním automobilem.

Jeden změřený vzorek odpovídal desetiminutovému průměru (pětiminutová základní sodarová data byla dodatečně průměrována). Zpracovávali jsme jen takové vzorky, ve kterých byla ve všech hladinách rychlost větru alespoň 3 m/s. Tím se sice poněkud zmenšil objem zpracováváných dat, ale zato se zmenšil vliv náhodných procesů, které bychom neměli možnost identifikovat. Celkem bylo k dispozici 69 vzorků pro typ PA1 a 221 vzorků pro typ PA2.

4.2 Porovnání vertikálních průměrů rychlosti větru

Ze sodarových i stožárových měření jsme nejprve spočítali vertikální průměry ve vrstvě 41 – 85 m. Rozdíly mezi těmito průměry jsme pak statisticky zpracovali. V následujícím textu používáme pracovní označení chyba pro rozdíly stožárová data minus sodarová data a také pro rozdíly data z sonického anemometru minus data z miskového anemometru.

Střední hodnota chyby sodaru PA1 byla 0,85 m/s. Směrodatná odchylka této chyby byla 1,15 m/s.

Střední hodnota chyby sodaru PA2 byla 0,82 m/s a její směrodatná odchylka byla 1,72 m/s.

Střední hodnota diferencí mezi miskovým a sonickým anemometrem, tj. střední chyba miskového anemometru (oba v hladině okolo 40 m) ve stejném období, kdy byl testován sodar PA1, dosáhla hodnoty -0,55 m/s. Směrodatná odchylka této chyby byla 0,10 m/s.

Střední chyba miskového anemometru v období měřeném sodarem PA2 byla -0,37 m/s a její směrodatná odchylka byla 0,06 m/s.

4.3 Porovnání normovaných profilů

Pod normovaným vertikálním profilem rozumíme vertikální profil, jehož hodnoty jsme získali vydělením změřených hodnot hodnotou změřenou na jednom z okrajů tohoto profilu. Z praktických důvodů volíme obvykle spodní okraj, neboť horní hranice vertikálních profilů se často mění (aniž tyto změny můžeme ovlivnit). To je zvláště patrné u sodarových měření, kdy horní hranice měření velmi značně v čase kolísá. Normované vertikální profily používáme proto, aby všechny změřené vzorky měly při výpočtu průměrného profilu stejnou váhu.

Pro každý časový vzorek jsme ze sodarových i stožárových měření nejprve spočetli odpovídající normované profily. Tyto profily jsme pak průměrovali. Vzhledem k tomu, že na stožáru byly jen 3 měřené hladiny, uvádíme průměrný vertikální profil jen ve formě následující tabulky.

Typ sodaru PA1:

| výška nad terénem (m) | bezrozměrné vertikální profily rychlosti | |
|--------------------------|------------------------------------------|------------------------|
| | rychlost ze stožáru | rychlost ze sodaru PA1 |
| 85 | 1,05 | 1,46 |
| 66 | 0,87 | 1,18 |
| 41 | 1,0 | 1,0 |

Typ sodaru PA2:

| výška nad terénem (m) | bezrozměrné vertikální profily rychlosti | |
|--------------------------|------------------------------------------|------------------------|
| | rychlost ze stožáru | rychlost ze sodaru PA2 |
| 85 | 1,04 | 1,29 |
| 66 | 0,94 | 1,16 |
| 41 | 1,0 | 1,0 |

4.4 Zhodnocení výsledků

Střední chyby sodaru PA2 dosahují přibližně dvojnásobku chyb miskového anemometru.

Zatímco směrodatné odchylky chyby miskového anemometru jsou oproti střední chybě podstatně menší, u obou typů sodaru je situace zcela opačná. Velké směrodatné odchylky u chyb sodarových měření je možné vysvětlit poměrně malým intervalem časového průměrování základních dat vzhledem k větší vzdálenosti mezi sodarovými měřeními a stožárem (sodar nemůže být těsně u stožáru kvůli chybám, které by mohly vznikat rušením od konstrukce stožáru). Naproti tomu, sonický i miskový anemometr byly umístěny na stožáru blízko u sebe.

Poněkud složitější je situace při porovnávání vertikálních profilů. Stožárová měření vykazují velmi malý nárůst rychlosti s výškou. Na jednu stranu nelze v měřeném terénu vyloučit jisté zesílení rychlosti větru u zemského povrchu v důsledku jeho zakřivení. Avšak systematický pokles rychlosti větru v hladině 66 m je přinejmenším podezřelý. Přitom vzhledem k chybám miskových anemometrů by takový průměrný normovaný profil rychlosti větru nemusel odpovídat skutečnosti. Oba dva různé typy testovaných sodarů přitom daly navzájem si podobné hodnoty normovaného profilu s podstatně větším nárůstem rychlosti s výškou. Faktem je, že v případě stožárového měření je každý přístroj jedinečný a anemometry se nemusí vyznačovat stejnou chybou měření. Naopak při měření sodarem je celý profil pozorován jedním přístrojem. Bez dalších měření by však bylo velmi obtížné určit skutečný tvar vertikálního profilu rychlosti větru na dané lokalitě.

Domníváme se, že z výše uvedeného rozboru lze usoudit, že sodary mohou být užitečnými prostředky pro rychlé určování vertikálních profilů rychlosti větru bez nutnosti stavby nákladných stožárů.

5 ZÁVĚR

V druhé kapitole výzkumné zprávy jsme se zabývali řešeními vedoucími ke zdokonalení dosavadních matematických modelů (VAS1, VAS2) pro určení pole průměrných ročních rychlostí větru na území ČR, a to v malém kroku sítě. Pro tento účel byl proveden výpočet pole větru v ploše ČR dvěma, na sobě nezávislými a principiálně odlišnými matematickými modely, a to hybridním modelem WAS/WAsP s rozlišením 100×100 metrů a modelem PIAP s rozlišením 600×600 metrů.

Hybridní model VAS/WAsP spojuje výhody modelu WAsP s vysokým rozlišením a statistického modelu VAS, který umožňuje interpolaci mezi stanicemi při současném zohlednění závislosti rychlosti větru na nadmořské výšce. Mezi předpoklady samotného modelu VAS patří vedle dostatečné hustoty vstupních meteorologických měření i reprezentativnost naměřených dat v širším okolí stanice. Poměrně často je však měření ovlivněno lokální orografií a drsností povrchu. Takové lokální vlivy jsou modelovány metodou WAsP, která za předpokladu dostatečně přesných vstupních dat tyto vlivy odstraní a tím se smažou i rozdíly v místních podmínkách jednotlivých stanic. Navíc je do značné míry schopna vyhodnotit vliv překážek v okolí anemometrů, který by byl v případě aplikace originálních dat dalším zdrojem chyb. Právě tyto skutečnosti nás vedly k použití kombinace modelů VAS a WAsP, které se vhodně doplňují v měřítku modelovaných jevů. Tímto způsobem však není možno odstranit chyby obsažené v původních větroměrných datech, ať už přístrojové či subjektivní a dále není možné použít tuto metodu v případě vysoce nereprezentativní polohy stanice, tedy při silném zastínění okolními překážkami, v hluboké údolní poloze či obecně v příliš členitém komplexním terénu. Z tohoto důvodu byla věnována mimořádná pozornost výběru stanic vstupujících do modelu a v rámci možností byla velká část stanic prověřena osobní návštěvou. Samotná realizace modelu VAS/WAsP probíhá třífázově: Nejprve byla měření na větroměrných stanicích očištěna od vlivu blízkého okolí metodou WAsP, poté byla provedena interpolace metodou VAS a na závěr byla metodou WAsP spočtena detailní pole průměrné rychlosti větru zohledňující místní podmínky. Výsledná pole průměrné rychlosti větru a dalších proměnných byla vypočtena s krokem 100x100 metrů, i když jejich použitelnost, vzhledem ke vstupním datům, se pohybuje od rozlišení 200x200 metrů.

PIAP BLM je nestacionární a nehydrostatický třírozměrný model mezní vrstvy atmosféry vyvinutý na ÚFA AV ČR. Výpočet probíhá ve dvou fázích: Nejprve je dynamicky modelováno proudění vzduchu nad celou výpočetní oblastí při vybraných scénářích proudění vzduchu. Poté je zpracováno větrné klima referenční stanice, jednotlivé reálné situace z této stanice jsou přiřazeny simulovaným scénářům a ty tím získají váhu, s jakou jsou aplikovány na výpočetní oblast. Výhodou modelu je malý počet stanic potřebných pro výpočet a lze tedy použít jen nejkvalitnější a nejlépe reprezentativní stanice - v našem případě byla použita stanice Kocelovice pro západní část území ČR a Dukovany pro východní část ČR, nevýhodou je vysoká citlivost modelu na výběr těchto stanic a na volbu okrajových podmínek.

Z porovnání výsledků hybridního modelu VAS/WAsP a modelu PIAP vyplývají v některých oblastech nezanedbatelné diference. Lépe přitom vyznívají výsledky modelu VAS/WAsP, kde spočtené chyby dosahují nižších hodnot (průměrná chyba modelu VAS/WAsP je 0,44 m/s, modelu PIAP 0,82 m/s). Chyby modelu VAS/WAsP jsou dány především nízkou hustotou či nízkou kvalitou použitých stanic, zatímco u modelu PIAP chyby vyplývají z neúplného řešení některých fyzikálních procesů a z omezeného rozlišení modelu (limitovaného současnými možnostmi výpočetní techniky). Celkově dává model PIAP vyšší rychlosti větru (v průměru o 0,35 m/s), a to zvláště v oblasti vnitřních vrchovin České republiky a na dominantních horských hřbetech a terénních hranách. Přestože výsledky předkládaných modelů jsou ve srovnání se staršími verzemi na vyšší kvalitativní úrovni, je

zřejmé, že v některých oblastech jejich chyby přesahují únosnou mez pro výpočet rentability projektu. V takových případech má v předběžném posouzení rozhodující význam zkušenost zpracovatele, který na základě znalosti použitých modelů rozhodne o konečném řešení.

Během zpracování obou modelů a analýzy jejich výsledků byly spatřeny nové možnosti, od kterých lze očekávat výrazné zlepšení kvality výstupů, jejichž realizace však byla mimo možnosti a rozsah tohoto úkolu. Jsou to například:

- fyzická kontrola všech stanic, použitých k výpočtům
- pro výpočet modelem VAS/WAsP použití vyššího počtu stanic, a to včetně kvalitních stanic s krátkou řadou měření či s měřením v minulosti. Různě dlouhé řady mohou být doplněny na vymezené standardní období. Naději lze v tomto směru spatřit v rostoucím počtu automatizovaných měření, ať už se jedná o standardní klimatologické stanice či o účelová měření pro potřeby dopravy či větrné energetiky
- další vývoj modelu PIAP BLM včetně zahrnutí radiačních a vlhkostních procesů v atmosféře
- použití rozšířených zahraničních modelů (KAMM, MM5)
- zahrnutí více úrovní modelů proudění s různým rozlišením a velikostí výpočtové domény

Výzkumný úkol se dále souhrnně zabývá metodami a postupy, které, pokud jsou dodržovány, vedou k výraznému snížení nepřesnosti při přípravě projektů pro výstavbu větrných elektráren ať jednotlivých či ve skupinách. Klíčovým faktorem je minimalizace možných chyb určení výnosů projektů větrných elektráren. Dosažené výsledky matematických modelů mohou posloužit k přibližnému výpočtu větrného potenciálu lokality, nemohou však být dostačujícím podkladem pro ekonomickou analýzu projektů ve větrné energetice. Mimořádně důležitou fází přípravy projektu výstavby větrných elektráren je proto měření meteorologických parametrů na konkrétním stanovišti. Byla navržena forma protokolu o provedeném měření a zároveň byly vymezeny podmínky, které musí být splněny při prováděném měření. Ve většině případů měření probíhá bez možnosti vytápění čidel a z toho důvodu je zatíženo chybami nikoli zanedbatelnými. Kromě standardně měřených veličin doporučujeme měření intenzity turbulence a měření možného vlivu námrazy buď přímo k tomuto účelu vyvinutým námrazoměrem nebo nepřímo pomocí údajů o teplotě a vlhkosti vzduchu. Na určování vlivu námrazy na projektované větrné elektrárny klademe silný důraz. Předběžné určení tohoto vlivu navrhuje provádět pomocí námrazové mapy České republiky.

V současné době jsou v praxi za nejhodnotnější považována měření na stožárech dosahujících výšky osy turbíny projektovaného zařízení, tedy stožáry s výškami až 110 m. Měření na vysokých stožárech jsou značně nákladná, navíc jejich provoz bývá ohrožován v zimním období námrazou, v letním období bouřkovými výboji. Proto byla v rámci tohoto projektu ověřována možnost určení vertikálního profilu složek větru do 120-130 m pomocí dopplerovského sodaru. Vzhledem k tomu, že v malých výškách nad zemí je sodarové měření nerealizovatelné, je nutné na připravovaném stanovišti provádět měření na meteorologickém stožáru s výškou nejméně 30m a toto měření pak prodloužit pomocí sodaru. Porovnáním měření dopplerovského sodaru s měřením na 85 m vysokém meteorologickém stožáru u Albrechtic blízko Frýdlantu se ukázalo, že určení profilu rychlosti větru sodarem je věrohodné a opravňuje k realizaci tohoto postupu v praxi. Toto zjištění, které dosud nebylo publikováno, dává možnost nemalých finančních úspor

Literatura

- Brázdil, R., Štekl, J. /1997/: Klimatické poměry Milešovky. Academia, Praha, s. 433
- Česká technická norma ČSN EN 614000-11: Větrné elektrárny - Část 11: Metodika měření hluku
- Gross, G. /2002/ : Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände. DEWI Magazin, Nr. 20, s. 28-36
- Frank H.P., Rathman O., Mortensen G., Landberg L. /2001/: The numerical wind atlas – the KAMM/WasP method, Risoe National Lab., Roskilde, Denmark
- Jiráska, A. /2003/: Akustická studie pro lokalitu Dlouhá Louka
- Jiráska, A. /2004/ : Hluk větrných elektráren.
http://www.zupu.cz/Zajimav/VE/AJ_clanek_Hluk_VE.htm
- Klug, H. /2003/ : Kalibration und Klassifizierung von Anemometern. DEWI Magazin, No. 22, s. 24-25
- kulatý stůl projektu Větrné elektrárny versus životní prostředí – fakta a mýty, téma Větrné elektrárny a hluk, 22.9.2004
- Námrazoměrná mapa České republiky, EGÚ, a.s., Brno (2001)
- Návod pro pozorovatele meteorologických stanice (1994). ČHMÚ, Praha
- Nařízení vlády č.502/2000 Sb., o ochraně před nepříznivými účinky hluku a vibrací
- van Radecke, H. /2004/ : Turbulenzkorrektur von Leistungskennlinien. DEWI Magazin, Nr. 24, s. 56-62
- Seifert, H. et al. /2003/ : Abstandsregelung in Windparks. DEWI Magazin, No. 22, s. 79-87
- Sobíšek, B. /2000/ : Rychlost a směr větru na území České republiky v období 1961-1990. NKP, 29, Praha, s. 86
- Sokol, Z., Štekl J., Pešice P. /1991/: Objective analysis of meteorological elements of Czech republic. Sborník: Mountainous meteorology, climatology and aerology of the lower layers of troposphere. Stará Lesná, 239-244
- Strack, M. /2003/ : Analyse der Unsicherheiten bei der Ertragsberechnung von Windparks. DEWI Magazin, Nr. 22, s. 5262
- Svoboda, J., Čermák, J. /2001/ : Vliv atmosférické turbulence na výkon větrné elektrárny. Větrná energie, No. 15, s. 2-3
- Svoboda, J., Štekl, J. /1995/: Mesoscale modelling of a flow deformation by orography. Meteorologische Zeitschrift, 5, s.218-222

- Štekl, J. /1997/: Meteorologie ve větrné energetice. Větrná energie, No.6, s. 48
- Štekl, J. /1999/ : Hluk emitovaný větrnými elektrárnami a jeho šíření. Větrná energie, No. 4, s. 12-15
- Štekl, J. /2003/ : Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice. ČEZ, a.s., Praha, s. 59-82
- Štekl, J. a kol. /1993/ : Perspektivy využití energie větru pro výrobu elektrické energie na území ČR. 1. část. Výzkumná zpráva ÚFA AV ČR, s. 119
- Štekl, J. a kol. /1994/ : Perspektivy využití energie větru pro výrobu elektrické energie na území ČR. 2. část. Výzkumná zpráva ÚFA AV ČR, s. 129
- Štekl, J. a kol. /1994/ : Perspektivy využití energie větru pro výrobu elektrické energie na území ČR. 3. část. Výzkumná zpráva ÚFA AV ČR, s. 138
- Štekl, J. a kol. /1995/ : Perspektivy využití energie větru pro výrobu elektrické energie na území ČR. 4. část. Výzkumná zpráva ÚFA AV ČR, s. 134
- Štekl, J. a kol. /2002/ : Závěrečná zpráva projektu VaV 320/6/00 – Větrná energie, 1. díl. ÚFA AV ČR, Praha s. 119.
- Štekl, J. a kol. /2002/ : Závěrečná zpráva projektu VaV 320/6/00 – Větrná energie, 2. díl. ÚFA AV ČR, Praha, s. 82
- Štekl, J. a kol. /2003/ : Projekt VaV 320/08/03 – zpráva o plnění za rok 2003. ÚFA AV ČR, Praha
- Štekl, J., Hrdlička, Ř. /1999/ : Námraza a její měření. Větrná energie, No. 11, s. 11-14
- Štekl, J., Jež, J. /1999/ : Časová variabilita výkonu větru v severních Čechách. Větrná energie, No. 11, s. 2-3
- Štekl, J., Jež, J. /2000/ : Metody „prodloužení“ ročního měření rychlosti větru. Větrná energie, No. 12, s. 2-5
- Troen, I. /1990/ : A high resolution spectral model for flow in complex terrain. Ninth Symposium on Turbulence and Diffusion, Roskilde, 417-420
- Troen, I. & Petersen, E. L. /1989/ : European Wind Atlas, Risø National Laboratory, Roskilde
- Wieringa, J. /1993/ : Representative roughness parameters for homogeneous terrain. Boundary-Layer Meteorol. 63, 323-363
- www.dewind.de
- Zelený, J., Foken, Th. /1995/ : Leistunguntersuchungen an einer Windkraftanlage im Gebirge. DEWI Magazin, 7, s. 46-51