

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY KARLOVY

Katedra fyzické geografie a geoekologie

**Stanovení směru a rychlosti přízemního větru
z údajů pro volnou atmosféru**

**Determination of wind direction and speed
from free atmosphere data**

(diplomová práce)

Václav Mach

Vedoucí práce: RNDr. Radan Huth, DrSc.

Telč, 2013

Zadání diplomové práce

Název práce:

Stanovení směru a rychlosti přízemního větru z údajů pro volnou atmosféru

Klíčová slova:

statistický downscaling, přízemní vítr, rychlost a směr větru, atmosférická cirkulace

Motivace práce:

Určování hodnot přízemních klimatických prvků z velkoprostorových údajů o volné atmosféře, tj. statistický downscaling, je důležitým nástrojem při interpretaci výstupů z globálních klimatických modelů a konstrukci scénářů klimatické změny pro konkrétní lokality. Většina studií statistického downscalingu se soustředí na teplotu a srážky; cílem této práce bude použít metod statistického downscalingu na hodnoty rychlosti a směru větru. Práce se soustředí na výběr vhodných metod a výchozích veličin (prediktorů), její součástí může být i aplikace na výstupy globálních modelů pro budoucí klima, tj. odhad budoucích změn (v časovém horizontu do konce 21. století) charakteristik větru v ČR. Práce může mít praktické využití při určování budoucích zásob větrné energie. Práce je příspěvkem k mezinárodnímu projektu COST ES1102 (VALUE – Validating and Integrating Downscaling Methods for Climate Change Research).

Cíle práce:

- rešerše literatury soustřeďující se na statistický downscaling obecně a downscaling charakteristik větru speciálně
- výběr metod vhodných pro downscaling obou charakteristik větru
- naprogramování metod
- příprava dat
- aplikace metod na reálná klimatická data (vítr na stanicích, prediktory z reanalýzy)
- výběr nejvhodnějších metod a prediktorů

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

statistický downscaling: lineární regrese, další jednoduché statistické metody

zájmové území: Česká republika

data: prediktory – reanalýzy (NCEP/NCAR nebo ERA), prediktandy – staniční data z ČR

Základní literatura

R.E.Benestad, I.Hanssen-Bauer, D.Chen, 2008: *Empirical-Statistical Downscaling*. World Scientific.

D.Maraun et al., 2010: Precipitation downscaling under climate change: recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Rev. Geophys.*, **48**, RG3003.

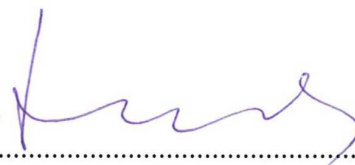
Další časopisecká literatura podle pokynů vedoucího práce.

Datum zadání:

9.1.2012



.....
student: Bc. Václav Mach



.....
vedoucí práce: RNDr. Radan Huth, DrSc.

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje.

V Telči, 20.8.2013

Podpis:

Abstract

Determination of wind direction and speed from free atmosphere data.

This work deals with relationship between surface wind and large-scale predictors in the Czech Republic. Approach is statistical downscaling based on multiple linear regression with stepwise screening. Tested predictors include four geopotential heights (hgt 500, hgt 700, hgt 850 and hgt 1000), sea level pressure and surface wind components U and V. Observed surface wind speed and azimuth from 18 meteorological station ČHMÚ is used as predictand. Period of interest is define by used data on term 1961 - 2010. In three different methods are compared straight downscaling of wind components U and V, used wind speed calculate from downscaled components U and V, and straight downscaling of wind speed without distinguish wind direction. Resulting models are tested by cross-validation method. The resulting equation allows good simulation of surface wind at most of station. The better method to downscaling surface wind speed is prescribe method of calculate wind speed from downscaled components U and V.

Abstrakt

Stanovení směru a rychlosti přízemního větru z údajů pro volnou atmosféru.

Tato práce pojednává o vztahu mezi přízemním větrem v České republice a údaji pro volnou atmosféru. Řešení je provedeno pomocí statistického downscalingu, přenosovou funkcí je násobná lineární regrese s krokovým výběrem prediktorů. Testovanými prediktory jsou čtyři geopotenciální výšky (hgt 500, hgt 700, hgt 850 a hgt 1000), tlak přepočtený na hladinu moře a složky větru U a V. Hodnoty rychlosti a směru větru naměřené na 18 meteorologických stanicích ČHMÚ byly použity jako prediktandy. Období zájmu je vymezeno roky 1961 - 2010. Ve třech odlišných metodách byly porovnány výsledky downscalingu složek větru U a V, výpočtu rychlosti větru ze složek větru U a V a downscaling rychlosti větru. Výsledné modely byly otestovány metodou křížové validace. Výsledné rovnice dobře simulují přízemní vítr pro většinu stanic. Lepší metodou pro downscaling rychlosti větru byla stanovena metoda výpočtu rychlosti větru z downscalingových složek U a V.

OBSAH

1. ÚVOD	7
2. REŠERŠE LITERATURY	10
3. DATA.....	14
3.1. PREDIKTORY	14
3.2. PREDIKTANDY	16
4. METODIKA	19
4.1. DATA A VÝPOČTY	20
4.2. METODY SLOŽEK VĚTRU U A V	22
4.3. METODY RYCHLOSTI VĚTRU	24
5. VÝSLEDKY.....	25
5.1. SLOŽKY VĚTRU U A V	25
5.2. RYCHLOST VĚTRU	30
6. DISKUZE	35
6.1. SLOŽKY VĚTRU U A V	35
6.2. RYCHLOST VĚTRU	40
7. ZÁVĚR.....	45
8. ZDROJE.....	46
8.1. LITERATURA	46
8.2. DATOVÉ ZDROJE	48
9. SEZNAM PŘÍLOH	49
9.1. OBRÁZKY.....	49
9.2. TABULKY	49
9.3. GRAFY	49

1. ÚVOD

Přízemní vítr je jedním z hlavních prvků počasí. Vítr výrazně působí na celou přírodní sféru a tím ji spoluutváří. Kromě dalších meteorologických prvků, jako je tlak, teplota a vlhkost vzduchu, sluneční záření a oblačnost se srážkami, je pro lidstvo poznání větru velmi důležité. Neméně důležitá je i možnost tyto prvky předpovídat, a to v krátkodobém i dlouhodobém časovém horizontu, stejně tak na lokální i globální úrovni. Dlouhodobý odhad budoucího stavu a chování těchto meteorologických prvků je dosti problematický, především pak v lokálním a mikroregionálním měřítku.

Modelování některých prvků je na globální úrovni mnohem snazší a spolehlivější. První matematický model popisující klima vznikl v roce 1956 (Phillips, 1956). Dále byly vyvíjeny další globální klimatické modely. Tyto modely umožňují velmi dobře simulovat stav volné atmosféry pomocí základních meteorologických prvků (nejčastěji jde o tlak vzduchu, geopotenciální výšky, teploty, atp.). Další výhodou je možnost simulace těchto prvků v čase, tedy do budoucna i minulosti. Tyto modely však odhadují stav volné atmosféry, věnují se tedy makroregionálnímu až globálnímu měřítku. Globální klimatické modely jsou tvořeny prostorovou sítí bodů pokrývající zájmové území. Pro každý bod takového modelu je počítán stav modelovaného prvku s určitým časovým krokem. Kvůli značné výpočetní náročnosti (Giorgi & Mearns, 1991) těchto úloh není možné tyto modely vytvářet v dostatečné podrobnosti (hustotě bodů) a dostatečně malém časovém kroku pro jejich použití na mikroregionálním nebo lokálním měřítku. Simulace meteorologických prvků klimatickým modelem na lokálním měřítku však není vzhledem ke globálním vazbám atmosférických procesů možná.

Přízemní vítr lze tedy jen velmi těžko popsat globálním klimatickým modelem. Řešením je tedy metoda, která umožní využít globální klimatický model k popisu meteorologických prvků na globální a lokální úrovni. Nástrojem, který dokáže překonat rozdíl mezi globálním klimatickým modelem a situací v lokálním měřítku, tedy v případě této práce k získání modelu popisujícího přízemní vítr v dané lokalitě, je downscaling. Tento nástroj umožňuje odvození klimatických informací malého měřítka z klimatických informací velkého měřítka. Downscaling tedy svým principem umožňuje na základě vstupu omezených dat z malého měřítka překonat rozdíl mezi jednotlivými měřítky na zájmovém území.

Principem downscalinu v klimatologii je tedy odvození vztahu mezi meteorologickými prvky simulovanými pro volnou atmosféru (většinou tedy takovými prvky, které lze dobře simulovat globálním klimatickým modelem)(prediktory) a reálnými

naměřenými hodnotami u povrchu (prediktandy). Prediktandy mohou být různé meteorologické prvky, které se mají odvozovat pro lokální měřítko. Výhodou takového postupu je i možnost simulace lokálního klimatu v čase (tedy do doby, pro kterou v dané oblasti nejsou dostupné údaje (minulost, budoucnost)), neboť právě globální klimatické modely mají dobré předpoklady k modelování takových úloh. Různé metody postupu při downscalingu klimatu lze rozdělit na tři základní principy (Giorgi & Mearns, 1991).

Dynamický downscaling vytváří klimatický model s mnohem větší hustotou bodů, nicméně je vytvořen jen pro omezenou oblast. Omezením zájmové oblasti je tedy možné výrazně zahustit síť bodů, kterými je tvořen. Stále se tedy jedná o podobnou prostorovou síť s uzlovými body, kterou je tvořen i globální model. Tento model je vlastně vnořen do globálního modelu, na všech okrajích do regionálního modelu vstupují údaje z modelu globálního (Giorgi & Mearns, 1991). Výhodou je rovnoměrné pokrytí celého zájmového území, neposkytuje však přímo lokální informace.

Další metodou je prostorová úprava uzlových bodů globálního modelu. Tato úprava může spočívat například ve vyšším rozlišení v zájmovém území, avšak na úkor ostatních oblastí. Jinou možností je geometrická úprava rozložení uzlových bodů mezi jednotlivými oblastmi tak, že v zájmové oblasti je hustota těchto bodů mnohem vyšší, než v okolních oblastech. Tato metoda tedy spočívá v přímém využití globálního modelu mikroregionální úrovní. Vyžaduje však předpoklad neovlivnění výsledku řidší sítě uzlových bodů v nezájmové lokalitě na úkor hustší sítě v zájmové lokalitě (Giorgi & Mearns, 1991).

Statistický downscaling je naproti tomu zaměřen přímo na konkrétní lokality. Jedná se tedy o hledání statistického vztahu mezi údaji pro volnou atmosféru z klimatického modelu velkého měřítka a konkrétními naměřenými údaji. Výsledkem jsou tedy skutečně lokální informace. Základním principem je tedy nalezení funkce mezi lokálním a velkoprostorovým klimatem (Giorgi & Mearns, 1991). Časovým měřítkem při statistickém downscalingu mohou být denní, měsíční nebo sezónní průměry. Pro downscaling větru se však většinou používají denní hodnoty. Pro statistický downscaling je několik předpokladů: (Storch et al., 2000)

- vstupní prediktory jsou dobře simulovány globálním modelem
- prediktory vysvětlují značnou část proměnlivosti cílové proměnné
- prediktory nesou informaci o změně klimatu (například při simulaci jiných podmínek (změna intenzity slunečního záření, ...), při změně mořského proudění, ...).
- prediktandy nejsou dobře simulovány globálním klimatickým systémem
- lze předpokládat stálý vztah mezi prediktory a prediktandy

Postup statistického downscalingu tedy spočívá v nalezení přenosové funkce. Mezi nejčastější metody stanovení této funkce patří:

- (násobná) lineární regrese (tato funkce byla použita při zpracování této práce, více viz. kapitola 4. Metodika)
- kanonická korelační analýza
- analogy (v prediktorech i prediktandech jsou stanoveny různé situace, které si odpovídají). Tato metoda však nemůže simulovat hodnoty mimo rozsah naměřených hodnot
- klasifikační přístupy (prediktory rozděleny do tříd, následně jsou jednotlivé naměřené hodnoty prediktandů přiřazovány k těmto třídám)

Tyto funkce se nejdříve trénují (tedy parametry rovnic se modelují podle reálných naměřených dat) a následně se aplikují na údaje z globálního klimatického modelu.

2. REŠERŠE LITERATURY

Odborná literatura související s tématem této práce je rozdělena na několik bloků. Nejdříve je stručně popsána historie samotného downscalingu a první použití. Následují pasáže postupně se věnující jednotlivým aspektům downscalingu v této práci, od použitých dat až po přenosové funkce.

Prvním krokem k použití principu downscalingu lze datovat do roku 1948 (Klein, 1948 in Klein & Bloom, 1987). Tato práce se věnovala vztahu mezi pětidenními srážkami a šablonou s výškami hladiny 700 hPa. Prediktandem byla data naměřená na pozemních stanicích. Postup byl v tomto případě grafický a byl stanoven schématický model. Hned další pokus směřoval k měsíčnímu úhrnu srážek, jako prediktor byla opět použita výška hladiny 700 hPa (Martin & Hawkins, 1950 in Klein & Bloom, 1987). Prediktory byly vytvořeny stanovením 21 srážkových oblastí. Již o dva roky později byl proveden další výzkum, který se opět věnoval vztahu srážek a tlaku vzduchu, nicméně poprvé byla použita korelace (Stidd, 1954 in Klein & Bloom, 1987). Již v prvních pokusech o downscaling meteorologických prvků použitelných při předpovědi počasí byl použit princip statistického downscalingu. Následoval první komplexní projekt, který proběhl v letech 1952 - 1956 a techniky downscalingu se dále rychle rozvíjely. V roce 1956 byl poprvé vytvořen matematický model popisující cirkulaci atmosféry (Phillips, 1956) a tím se pro statistický downscaling otevřely další možnosti v použití prediktorů.

Downscaling se dále během let neustále vyvíjel, především s dalším zlepšováním dostupných dat (klimatických modelů) a rostoucímu výkonu výpočetní techniky, který samozřejmě možnosti downscalingu (i klimatických modelů) dosti limituje. První prací, která metodiku statistického downscalingu uplatnila v klimatologii se věnovala měsíčním hodnotám přízemních teplot a měsíčním hodnotám srážek vzhledem k měsíčním anomáliím velkých měřítek (Kim et al., 1984).

Zřejmě nejobsáhlejší prací, která v současnosti popisuje nejčastěji používané přístupy v downscalingu je kniha *Empirical-Statistical downscaling* (Benestad et. al., 2008). Text se podrobně věnuje popisu výběru prediktorů a jejich úpravám. Dále jsou popsány nejčastěji používané přenosové funkce od lineárních přes nelineární až po metody analogů a generátory počasí, s popisem výhod i nevýhod jednotlivých postupů.

Výběr prediktorů je při vývoji statistického downscalingového modelu klíčový (Maraun et. al, 2010). Výběr musí být podřízen dostupností dat pro zájmovou oblast, též však musí mít odpovídající vztah k danému meteorologickému prvku (Huth, 1999; Timbal et. al., 2008). K podobným výzkumům se často používá reanalýza dat pro volnou atmosféru od institucí NCEP/NCAR¹ (Kalnay et al., 1996). Tato data poskytují velký výběr možných prediktorů a spolehlivě pokrývají celou zájmovou oblast (podrobný popis je v kapitole 3. Data). Tento soubor dat byl použit například při downscalingu větru v jižní Francii (Salameh et. al., 2008), na Iberském poloostrově (García, 2011) nebo i v Peru a Chile (Goubanova et. al., 2010). V Evropě je též využívána reanalýza ERA². Mnohem důležitější je však konkrétní výběr prediktorů z dané reanalýzy. Při downscalingu se velmi často využívají tyto prediktory:

- tlak přepočtený na hladinu moře (SLP)
- různé geopotenciální výšky (hgt 500, hgt 700, hgt 850, hgt 1000), či různé tloušťky mezi jednotlivými hladinami (například tloušťka hgt 500 - hgt 1000)
- další výběr již většinou závisí na konkrétním zaměření, mohou to být teploty na různých hladinách, složky větru v různých výškách a na různých hladinách, či srážky, výpar, atd.

Přehledná práce srovnávající různé prediktory statistického downscalingu ve střední Evropě je *Statistical Downscaling of Daily Temperature in Central Europe* (Huth, 2001). V práci je porovnáno několik metod i prediktorů. Pro potřeby hodnocení denních teplot zde byly jako nejlepší prediktory vyhodnoceny kombinace vždy dvou z jmenovaných: geopotenciální výška 500 (hgt 500), tlak na hladině moře (SLP), teplota na 850hPa a šířka geopotenciálních výšek hgt 500 a hgt 1000 (hgt 1000 - 500 hPa). Rozdíly mezi těmito kombinacemi jsou velmi malé.

Práce věnující se přízemnímu větru téměř vždy využívají prediktor SLP, následují různé varianty a kombinace geopotenciálních výšek. Časté bývají i složky přízemního větru. Dalšími možnostmi je třeba relativní vorticitata počítaná na hladině 500 hPa (Pryor et. al, 2005). Možný vztah přízemního větru a prediktorů přízemní teplota, teplota na hladině 1000hPa, vítr a teplota na hladině 850 hPa a tloušťka 1000-850 hPa byl zkoušen pro kraj

¹ NCEP - National Centers for Environmental Prediction (USA)

NCAR - National Center for Atmospheric Research (USA)

² Klimatický model instituce European Centre for Medium-Range Weather Forecast

Finmark (severní Norsko)(Nawri & Harstveit, 2011) Nejlepším byl vyhodnocen vítr na hladině 850 hPa.

Použití různých prediktandů lze napříč výzkumy rozdělit na dvě základní skupiny podle zájmového území. První skupinu tvoří zájmové území na pevnině, v osídlených a dobře dostupných oblastech. V těchto oblastech jsou téměř vždy k dispozici reálná data naměřená na stálých stanicích.

Druhou skupinu tvoří buď zájmové oblasti ve špatně dostupných oblastech s příliš řídkým rozmístěním pozemních stanic, nebo oblasti která pozemní stanice úplně postrádají (případně oceánské oblasti, pro které jsou povrchová měření též omezená). V těchto případech je možné použít třeba údaje z mořských bójí (Goubanova et. al., 2010). Další možností jsou různé klasifikační přístupy. V těchto případech jsou vytvářeny povětrnostní třídy (Badger et. al., 2010; Pryor & Schoof, 2005) z různých radarových či družicových dat o přízemním větru. Tyto třídy jsou následně klasifikovány tak, aby odpovídaly různým povětrnostním podmínkám. Následně jsou použity jako prediktandy.

Různé přenosové funkce, které používá statistický downscaling, již byly zmíněny v úvodu. Většina studií, která řeší downscaling větru, předpokládá lineární vztah mezi prediktory a prediktandy, neboť právě lineární přenosové funkce s různými modifikacemi jsou využívány zdaleka nejvíce. Porovnání kanonické korelace, násobné lineární regrese a singulárního rozkladu pro downscaling teplot byl proveden ve střední Evropě (Huth, 2002). Nejlépe byla hodnocena násobná lineární regrese s krokovým (stepwise) výběrem prediktorů (též nazývána pointwise)³. Celkově lze násobnou lineární regresi v různých modifikacích v případě downscalingu větru považovat za nejčastěji používanou. Jako příklad lze uvést severní Evropu (Pryor et. al., 2005), jižní Francii (Salameh et. al., 2008) nebo pobřeží Peru (Goubanova et. al., 2010).

Důležitým jevem, který je v některých dílech zmiňován a který lze vzhledem k reliéfu očekávat i na území České republiky, je vliv konfigurace terénu na přízemní vítr. Tento vliv lze samozřejmě očekávat a v klimatických modelech se vliv reliéfu na klima zájmové oblasti též zohledňuje. V severním Norsku byl při analýze variability přízemního větru zaznamenán významný vliv terénu na přízemní vítr (Nawri & Harstveit, 2011). Zejména v údolích a fjordech byl směr větru ovlivněn základním směrem údolí. Vliv konfigurace terénu na přízemní vítr je pěkně doložen v případě downscalingu větru v jižní Francii. Na několika stanicích je zaznamenán velký rozdíl v přesnosti simulace downscalingu mezi složkami větru

³ Spočívá v postupném výběru prediktorů z prediktorového pole, dokud dochází ke zlepšování modelu.

U a V (složka U reprezentuje zonální složku větru, složka V reprezentuje meridionální složku větru). To je zjevně způsobeno umístěním stanice a konfigurací okolního reliéfu. (Salameh et. al., 2008). Přízemní vítr na stanicích v blízkosti výrazných terénních zlomů je reliéfem výrazně ovlivněn, což lze dokumentovat značným rozdílem přesnosti modelace pro meridionální a zonální směr větru. Tyto rozdíly jsou vybrány v tabulce 1. Pro každou stanici je k dispozici porovnání přesnosti simulace pro složku větru U a V, set A,B a C představuje různé zkoušené prediktory. Porovnání pro 6 hodinové , denní a týdenní průměry je ve třech řádcích ke každé stanici.

Tabulka 1 Závislost složek větru U a V na jednotlivých stanicích v jižní Francii

Explained variance (%)	Sets of large-scale explanatory variables					
	Set (A)		Set (B)		Set (C)	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Cannes	58.12	27.82	60.12	36.33	61.54	38.34
	73.72	34.52	76.62	47.23	77.72	49.29
	75.81	45.41	84.12	52.71	89.72	58.09
Lyon	19.29	83.10	25.93	85.25	28.78	85.89
	30.85	88.16	39.32	90.54	46.13	91.37
	25.55	88.22	52.00	90.69	66.17	90.68
Nice	19.15	12.51	22.41	21.79	24.13	24.38
	35.51	18.57	40.24	28.91	43.42	34.61
	34.38	21.86	57.74	38.79	65.46	55.86
Nimes	42.24	67.20	53.02	70.84	55.26	71.46
	57.65	77.88	69.31	82.59	71.40	83.33
	64.68	86.20	77.79	88.92	86.07	90.60
Orange	51.82	78.98	58.51	80.37	60.10	81.12
	60.63	87.75	69.44	89.31	70.99	90.04
	60.84	88.74	64.63	90.03	68.78	92.61
Toulon	80.01	33.82	81.15	38.89	82.01	41.81
	88.55	51.37	89.90	58.76	90.84	62.93
	91.42	53.69	92.68	63.35	95.28	76.65

Zdroj: Salameh et. al. (2008)

Velmi výrazný je rozdíl přesnosti simulace mezi složkami větru U a V pro stanici Lyon, který je výrazně ovlivněn polohou v údolí Rhony. Pro složku U je tak úspěšnost simulace nízká. Stejně je to pro stanici Orange. Opačný projev má vysoké pobřežní pohoří západních Alp. V těsné blízkosti tohoto pohoří se nachází stanice Cannes a Toulon.

3. DATA

K provedení statistického downscalingu jsou tedy nutné dva soubory dat. Jeden popisuje stav volné atmosféry (prediktory), druhý (prediktandy) popisuje skutečný přízemní vítr v zájmové oblasti.

3.1. PREDIKTORY

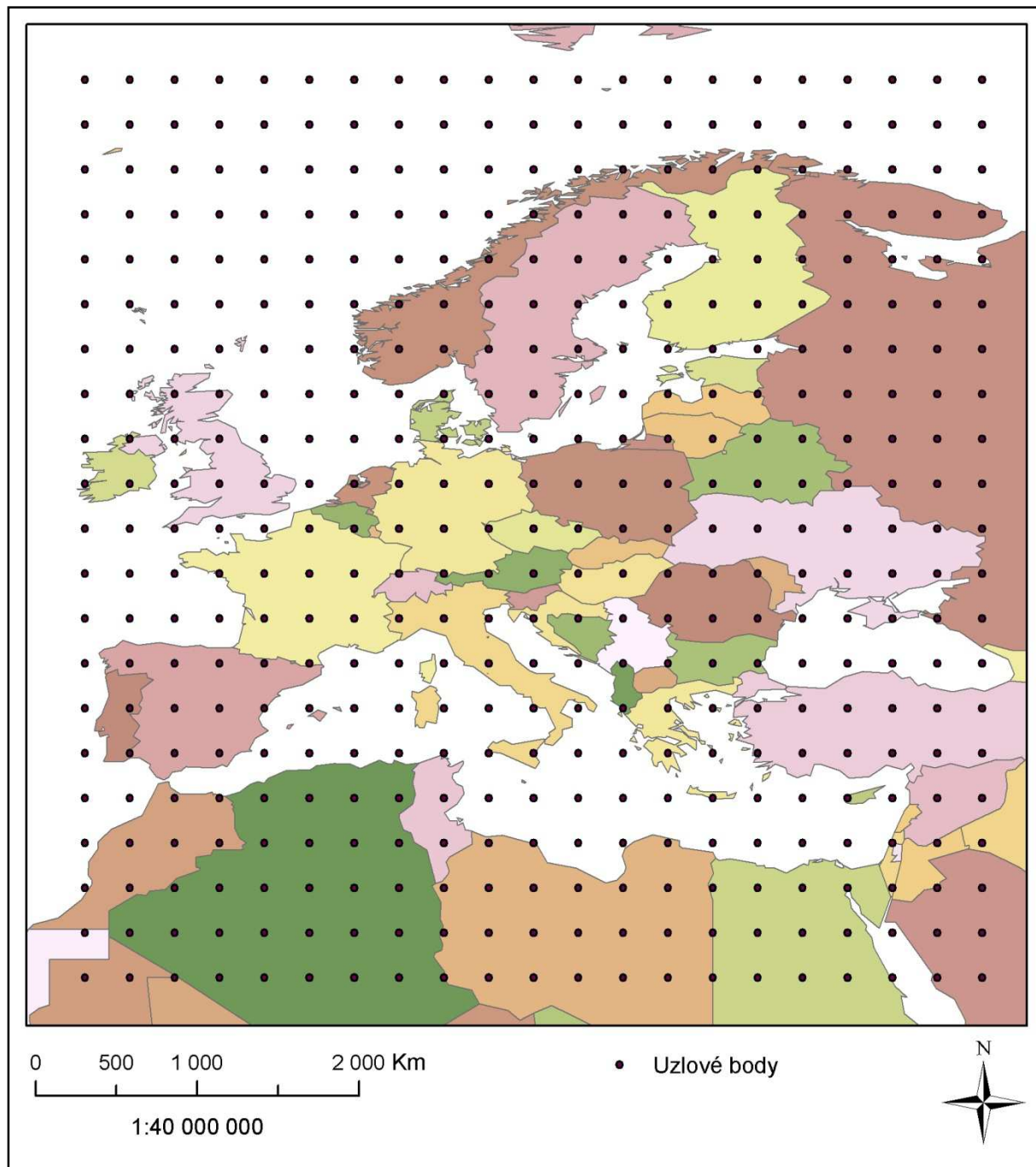
Zdrojem dat, která popisují stav volné atmosféry v zájmovém území, byla zvolena reanalýza volné atmosféry amerických institucí NCEP/NCAR. Tato reanalýza byla vybrána pro optimální prostorové rozlišení, dostatečný výběr modelovaných meteorologických prvků a snadnou dostupnost. Velkou výhodou oproti jiným reanalýzám je však pravidelná aktualizace, která v době zpracování této práce umožnila použít data až do roku 2010. Data jsou poskytována ve formátu pro čtvrtkouli ohraničenou severním pólem, rovníkem a 90° zeměpisné délky východním i západním směrem. Hustota bodů sítě této reanalýzy je 2,5° pro zeměpisnou šířku i délku (odpovídá cca 277,7 km meridionálně a 178,5 km zonálně na území ČR). Celkově je tedy tvořena z 2701 uzlových bodů, dostupná je v časových krocích 1 den a 6 hodin. Prostorově bylo z tohoto souboru dat vybráno 441 uzlových bodů, které dostatečně pokrývají zájmové území.

Postup výběru uzlových bodů pro zájmové území byl takový, že byl zvolen uzlový bod co nejbližší geografickému středu České republiky (50°s.š., 15°v.d.), kolem kterého bylo v každém směru zahrnuto dalších 10 uzlových bodů. Vznikl tak výběr 21x21 bodů s krajními polohami 75° s.š. - 25° s.š. v meridionálním směru a 10° z.d. - 40° v.d. v zonálním směru, což právě odpovídá již zmíněným 441 bodům. Poloha všech uzlových bodů je názorně zobrazena na obrázku 1. Takovýto výběr by měl bezpečně zajistit dostatečně velkou oblast překrytí zájmového území prediktorovým polem, zároveň však udržuje náročnost výpočetních úloh na rozumné míře.

Celá reanalýza pro všechny prediktory byla v době zadání této práce dostupná pro období mezi roky 1948 až 2010. Pro výpočty byla použita data z období 1961 až 2010, které odpovídá časovému rozsahu použitých prediktandů. Mezi prvky, které byly testovány, protože mohou mít těsný vztah k přízemnímu větru, byly vybrány geopotenciální výšky (hgt) hladin 1000,850,700 a 500 hPa), tlak přepočtený na hladinu moře (SLP) a přízemní rychlosti větru složek větru u a v (u je zonální složka větru, v je meridionální složka větru, v tomto případě jsou složky označeny malými písmeny) (wind). Tento výběr je zvolen vzhledem k doposud

provedeným podobným výzkumům uvedeným v rešerši literatury. Ve všech případech byly použity hodnoty v časovém rozlišení jednoho dne.

Obrázek 1 Prostorové rozložení uzlových bodů klimatického modelu



Zdroj podkladových dat: ESRI (2008)

Data jsou dostupná v komprimované podobě po jednotlivých prediktorech, vždy jeden soubor pro každý rok. V těchto souborech jsou uložena přímo surová data, tedy 73 sloupců x 37 řádků x 365 dní v roce. Z těchto dat byla vybrána vždy příslušná matice 21 sloupců x 21

řádků, která představuje údaje daného prediktoru pro vymezenou oblast za jeden den. Poté bylo vždy příslušných 21 řádků poskládáno za sebe do jednoho řádku tak, aby jeden řádek reprezentoval jeden den. Každý řádek tedy obsahuje 441 sloupců. Následně bylo celé padesátileté období spojeno do jednoho souboru, který konsekvntně z předešlých kroků obsahuje 441 sloupců a 18262 řádků. To je počet dnů za padesátileté období, na kterých byly následně programovány metody downscalingu .

3.2. PREDIKTANDY

Druhou skupinou použitých dat jsou hodnoty naměřené na pozemních stanicích Českého hydrometeorologického ústavu. Přízemní vítr je zaznamenáván ve dvou parametrech: směru (udáván v azimutu s přesností na desítky stupňů) a rychlosti (s přesností na desetiny m/s). Použity byly denní hodnoty tak, aby časová podrobnost dat korespondovala s časovou podrobností použitých prediktorů.

Rychlost větru je uváděna ve čtyřech časových modech. Tři uvádějí rychlost naměřenou v klimatických termínech, tedy v 7 hodin ráno, ve 14 hodin odpoledne a v 21 hodin večer. Čtvrtý sloupec udává průměrnou denní rychlost, která je aritmetickým průměrem předešlých tří hodnot. Tato hodnota je následně použita jako denní hodnota rychlosti větru.

Směr větru je uváděn ve třech časových intervalech, podobně jako rychlost větru. Tedy v 7 hodin ráno, ve 14 hodin odpoledne a v 21 hodin večer. Z těchto hodnot byl denní směr větru vypočten v programu MS Excel 2007 podle následujícího vzorce:

$$D = \text{mod}(450 - \text{degrees}(\text{arctg2}(\text{sum}(\sin(\text{radians}(D07, D14, D21))), \text{sum}(\cos(\text{radians}(D07, D14, D21))))), 360)$$

kde: hodnoty D07, D14 a D21: uvádějí směr větru ve stupních v danou hodinu

radians: převádí stupně na radiány

sum: sčítá hodnoty třech zmíněných měření

arctg2: vypočte arkustangens ze dvou souřadnic

mod: vypočte zbytek po dělení, v tomto případě po dělení 360 stupni

sin, cos: matematické funkce sinus a cosinus

Tento postup vede k získání denní hodnoty směru větru ve stupních, přičemž řeší i problematiku průměrování směru větru v okolí hodnoty azimutu 360°.

Vztah mezi prediktory a prediktandy byl tedy hledán na datech za padesátileté období 1961 - 2010 s časovým krokem 1 den. Seznam všech stanic s jejich nadmořskými výškami je uveden v tabulce 2. Jejich poloha a rozmístění je patrné z obrázku 2.

Údaje ze všech stanic byly převedeny jednoduchým výpočtem i na skalární složky, tedy rychlost větru v meridionálním (poledníkovém) směru jako složka V (kladné hodnoty jsou pro severní vítr, záporné pro jižní) a v zonálním (rovnoběžkovém) směru jako složka větru U (kladné hodnoty pro východní vítr, záporné hodnoty pro západní).

$$U = F * \sin D$$

$$V = F * \cos D$$

kde: F je rychlost větru (m/s), D je směr větru (azimut ve stupních)

Data byla uložena v souborech po jednotlivých stanicích, vždy pro celé padesátileté období. To po úpravách dat prediktorů (viz. min. kapitola) dává dohromady korespondující tabulky, kde každý řádek v pořadí znamená stejný den pro prediktory i prediktandy. Tato úprava dat již umožňuje velmi snadné zadávání hodnot do různých výpočtů.

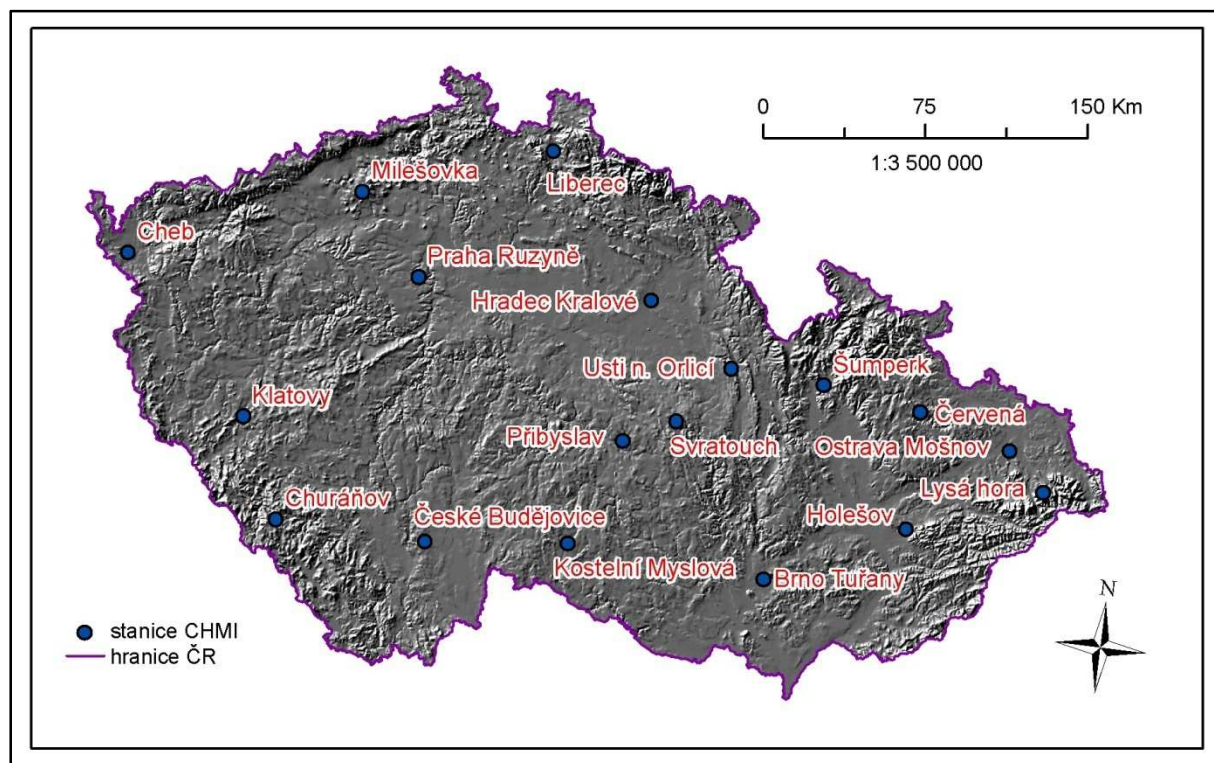
Tabulka 2 Seznam pozemních stanic

Název stanice	Nadmořská výška (m n.m.)
Brno Tuřany	241
Červená	750
České Budějovice	388
Holešov	222
Hradec Králové	250
Cheb	474
Churáňov	1118
Klatovy	425
Kostelní Myslová	569
Liberec	398
Lysá hora	1324
Milešovka	833
Ostrava Mošnov	251
Praha Ruzyně	364
Přibyslav	530
Svratouch	737
Šumperk	328
Ústí n. Orlicí	402

Zdroj: CHMI

Za sledované padesátileté období se v měřených datech objevily i dny s chybějícími záznamy. Pro stanici Ústí nad Orlicí se jedná jen o jeden den, ve stanici Šumperk chybí jedno období po 1172 dnech a druhé období zahrnující 181 dnů. Tyto dny byly z výpočtů vynechány.

Obrázek 2 Poloha pozemních stanic ČHMÚ



Zdroj dat: ArcCR500, staženo 12.8.2009, CHMI.

4. METODIKA

K nalezení co nejpřesnější přenosové funkce, která co možná nejlépe bude popisovat vztah mezi údaji pro volnou atmosféru a přízemním větrem, byla po zhodnocení dostupných dat a výsledků dosavadních prací na toto téma vybrána metoda vícenásobné lineární regrese. Základním předpokladem této metody je lineární vztah mezi prediktory a prediktandy. Obecný tvar této rovnice je následující:

$$Y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + m$$

kde Y je závislá proměnná (naměřená rychlost větru, prediktand), b jsou parciální regresní koeficienty, x jsou hodnoty nezávislých proměnných (prediktorů), m je konstanta. Příslušné regresní koeficienty b je tedy nutné odhadnout takové, aby daná rovnice v každý testovaný den co možná nejpřesněji vracela hodnotu Y (tedy reálný stav). Každé x tedy představuje jednu hodnotu prediktoru (z celého prediktorového pole, které je pro každý den tvořeno příslušnou maticí 441 bodů), pro každý den nese jinou hodnotu. Jednou z možností je tento výpočet provést pro celé prediktorové pole (tedy nuceně všechna x (všech 441 bodů za jeden den) vždy vložit do výpočtu) a tím získat příslušné hodnoty b a m . Vzniká tím však zbytečně složitá rovnice, která v případě downscalingu větru k dosažení výsledku vůbec není nutná.

Dále zde vzniká velké riziko "přetrénování modelu"! Násobná lineární regrese hledá lineární vztah a ten je samozřejmě výrazně ovlivněn případnými extrémními hodnotami v trénovacím vzorku dat (soubor dat, na kterých je model trénován). Použitím velkého množství prediktorů pro simulaci je tedy možné dosáhnout vysoké hodnoty korelačního koeficientu výsledné rovnice, nicméně je simulována pro zcela konkrétní podmínky a ovlivněna nahodilými extrémními projevy trénovacího vzorku dat.

Lepším řešením se jeví použití dopředné krokové verze násobné lineární regrese (též nazývané forward stepwise), kdy dochází k výběru jen těch prediktorů z prediktorového pole, které nejvíce ovlivňují prediktand. Postup této metody spočívá ve výpočtu jednotlivých lineárních regresních rovnic zvlášť pro každý prediktor. Rovnice s nejvyšší korelací je brána jako základ a do této rovnice jsou postupně podle hodnot korelací přidávány další nezávislé proměnné. Pokud dojde ke zlepšení modelu, pokračuje se dalším přidáváním rovnic, dokud dochází ke zlepšování modelu. Poté se výpočet zastaví s omezeným množstvím vybraných prediktorů.

Časová přesnost kroku výpočtů je jeden den, odpovídající zvoleným prediktorům i prediktandům. Testovány byly všechny možné kombinace prediktorů i prediktandů, z nichž

byla vždy vybrána kombinace s nejvyšším korelačním koeficientem příslušné násobné lineární regrese.

Velmi důležitou metodou použitou při zpracování této práce byla křížová validace. Křížová validace slouží k ověření platnosti regresního modelu na nezávislém datovém souboru, přičemž se využijí všechny denní hodnoty, které jsou k dispozici. Tato metoda je při ověřování klimatických modelů často využívána. Její počátky sahají nejméně do třicátých let, využívána je však až od šedesátých let (Stone, 1974). Její použití v klimatologických studiích bylo detailně testováno na konkrétním případě přízemních teplot v severním Pacifiku (Michaelsen, 1987), přičemž byla vyzkoušena pro různé výpočetní metody. Metoda násobné lineární regrese byla vyhodnocena jako velmi výhodná především pro simulování historického klimatu (hindcast) (Michaelsen, 1987). Ovšem pro stejně zvolené prediktory poskytuje podobné výsledky jako ostatní zkoušené metody (Michaelsen, 1987).

Princip křížové validace spočívá v rozdělení dat na trénovací a ověřovací sady. Tyto sady jsou však stanoveny tak, aby postupnými změnami rozsahu těchto sad byl každý prvek (v případě této práce den) použit k validaci. Tedy podle jedné sady dat je natrénován model, který poté simuluje hodnoty odpovídající ověřovací sadě. Porovnání ověřovací sady dat se simulovanými hodnotami umožňuje právě hodnocení úspěšnosti simulace. Poté se oba soubory dat v sadách prohodí a testován je další soubor hodnot.

V případě této práce byla data rozdělena na pět desetiletých období. Čtyři období vždy sloužila k trénování modelu, poslední desetiletí sloužilo k ověření simulace. Celý proces se tedy opakoval pětkrát.

4.1. DATA A VÝPOČTY

Všechny výpočty byly provedeny ve statistickém programu Statistica 10. Na výpočet regresních koeficientů byl použit nástroj Statistics/Multiple regression. V tomto případě byly vstupní parametry krokové násobné lineární rovnice ponechány na přednastavených hodnotách. Tyto rovnice tedy sloužily pouze pro základní porovnání míry vazby jednotlivých prediktorů k přízemnímu větru. Z těch byly vybrány dvě kombinace prediktorů s nejvyššími dosaženými hodnotami korelačních koeficientů. Ty byly následně podrobně testovány. Ručním nastavením vstupních parametrů krokové násobné lineární regrese bylo vždy pro příslušný prediktor a stanici dosaženo nejvhodnější výsledné rovnice, tedy nejvhodnějšího výběru prediktorů z prediktorového pole. Toto nastavení bylo provedeno pomocí hodnot F1 a F2, kdy (hodnoty F příslušných prediktorů jsou odhadovány pomocí F-testu, který testuje

vztah mezi závislými a nezávislými hodnotami) hodnota F1 určuje, který prediktor do modelu vstoupí a F2 udává hodnotu, kdy je prediktor vyřazen z modelu. Tento postup byl nutný z důvodu příliš velkého množství prediktorů, které do modelu vstupovaly při standardním nastavení krokové násobné lineární regrese. Tím byly některé modely postiženy přetrénovaností. Pro každou stanici byly stanoveny odlišné hodnoty F1 a F2.

Hodnoty F1 a F2 tedy byly zvoleny pro každou stanici a prediktor jiné. Byly vybírány dle subjektivního hodnocení na základě velikosti hodnoty F každého jednotlivého prediktoru z prediktorového pole. Následně bylo vyzkoušeno několik variant, kdy podle snižování zvolených hodnot F docházelo k postupnému přidávání prediktorů a zvyšování hodnoty korelačního koeficientu daného modelu. V určitém bodě se však růst korelačního koeficientu výrazně zpomalí i přes prudký nárůst počtu vkládaných prediktorů.

Pro výpočet výsledných rovnic byl použit nástroj Statistics/Advance Linear Models/General Regression Models, funkce Multiple regression. Tento proces byl již proveden pouze pro dvě kombinace prediktorů a v nastavení krokové lineární regrese již byly nastaveny příslušné hodnoty F. Tato funkce umožňuje rovnou provést s vypočtenou rovnicí křížovou validaci dat, takže každý výpočet běžel celkem pětkrát.

Do těchto nástrojů je však pro prediktor možné vložit maximálně 500 proměnných. Proto bylo v případě výpočtu kombinací dvou různých prediktorů zvolena matice, která určité prediktory z prediktorového pole vynechává. Na obrázku 3 jsou vyznačeny pozice, na kterých byly prediktory v prediktorovém poli vynechány. Nuly značí vynechané proměnné, zachované proměnné jsou značeny pořadovými čísly. Tučně zvýrazněná hodnota značí střed matice (tedy 50°s.š., 15°v.d.). Takto bylo dosaženo maximálního počtu vkládaných proměnných, pro každý prediktor tedy 225 proměnných.

Testována byla i opačná varianta (tedy obvodový rámeček zachován, následné střídání prstenců vynechávaných a zachovaných proměnných). Výsledky poskytovaly obě varianty prakticky shodné, uvedená varianta je však výhodnější větším rozsahem středu bez vynechaných proměnných při stejném celkovém množství proměnných. Tím je též ověřeno, že rozsah vkládaných proměnných je dostatečný, okrajové proměnné jsou geograficky již tak vzdálené, že přízemní vítr na území Česka neovlivňují. Konkrétní metoda střídání či vynechávání proměnných má celkově na výsledek velmi malý vliv. Hodnoty spolu sousedící nesou velmi podobné informace.

Obrázek 3 Vynechané prediktory v prediktorovém poli

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	0
0	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	0
0	65	0	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	0	83	0
0	86	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	102	0	104	0
0	107	0	109	0	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	0	123	0	125	0
0	128	0	130	0	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	0	144	0	146	0
0	149	0	151	0	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	0	165	0	167	0
0	170	0	172	0	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	0	186	0	188	0
0	191	0	193	0	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	0	207	0	209	0
0	212	0	214	0	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	0	228	0	230	0
0	233	0	235	0	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	0	249	0	251	0
0	254	0	256	0	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	0	270	0	272	0
0	275	0	277	0	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	0	291	0	293	0
0	296	0	298	0	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	0	312	0	314	0
0	317	0	319	0	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	0	333	0	335	0
0	338	0	340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	354	0	356	0
0	359	0	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	0	377	0
0	380	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	398	0
0	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.2. METODY SLOŽEK VĚTRU U A V

Jednotlivé výpočty proběhly pro každou stanici dvěma metodami. Pro každou stanici tedy proběhly celkem tři výpočty. Dva výpočty byly provedeny na každé stanici pro složku větru U a V. Třetí výpočet hledal vztah mezi prediktorem a rychlostí větru bez rozlišení jeho směru. Metody downscalingu přízemního větru pomocí jeho složek a pomocí jeho rychlosti byly následně porovnány.

Postupně tedy byly pro každou stanici vyzkoušeny všechny simulace pro prediktory (hgt 500, hgt 700, hgt 850, hgt 1000, SLP a přízemní rychlost větru u a v) a příslušné prediktandy (složka větru U, složka větru V). Dále byly prediktory kombinovány do dvojic. Pokaždé byla zaznamenána hodnota korelačního koeficientu, počet vybraných prediktorů z prediktorového pole a jejich rozmístění. Pro názornost je uvedena v tabulce 3, která zobrazuje korelační koeficienty jednotlivých regresních rovnic zmíněných prediktorů pro stanici Svratouch. Velikost hodnoty je zvýrazněna na pozadí datovou čarou (délka podbarvení každé buňky názorně odpovídá číselné hodnotě v buňce vzhledem k dalším hodnotám daného sloupce), dvě nejvyšší hodnoty jsou zvýrazněny červeně.

Kombinace prediktorů, které poskytly nejvyšší hodnoty korelačních koeficientů, byly následně po nastavení příslušných parametrů F podrobeny křížové validaci.

Tabulka 3 Výsledky korelačních koeficientů pro stanici Svratouch

Prediktor	U	V
hgt 1000	0,828	0,826
hgt 850	0,826	0,798
hgt 700	0,769	0,717
hgt 500	0,714	0,658
SLP	0,843	0,846
wind (u,v)	0,847	0,839
SLP + hgt1000	0,842	0,848
SLP+ hgt 850	0,850	0,851
SLP + hgt 700	0,847	0,851
SLP + hgt500	0,843	0,850
SLP + wind (u,v)	0,851	0,853
hgt 1000 + hgt 850	0,840	0,832
hgt 1000+ hgt 700	0,836	0,831
hgt 1000 + hgt 500	0,835	0,830
hgt 850 + hgt 700	0,835	0,820
hgt 850 + hgt 500	0,834	0,812
hgt 700 + hgt 500	0,809	0,778

Křížová validace dat tedy byla provedena pro dvě kombinaci prediktorů, pro které byly v základních simulacích dosaženy nejvyšší hodnoty korelačních koeficientů. Výpočet křížové validace proběhl tak, že rovnice byla trénována na 40letém období. Vždy však byla násobná lineární regrese spuštěna se stejnými parametry F. Zbývajících 10 let sloužilo jako ověřovací období, pro které byly hodnoty odhadovány podle vypočtené rovnice. Takto bylo po pěti desetiletých cyklech prostřídáno celé padesátileté období. Následně byla modelovaná data pro rychlost a směr větru dána do korelace se skutečně naměřenými hodnotami. Ukázkou takového výsledku uvádí tabulka 4. Tabulka uvádí prvních dvacet dní sledovaného období ve stanici České Budějovice. Prediktorem je SLP + hgt 850, prediktandem je složka větru U. Křížová validace byla tedy provedena pro prediktory SLP + hgt 850 a SLP + wind. V případě prediktoru wind byly samozřejmě vždy korelovány odpovídající si složky větru v prediktoru i prediktandu (tedy U a u, podobně V a v).

Tabulka 4 Ukázka pozorovaných a simulovaných hodnot

Den	Pozorované hodnoty	Simulované hodnoty	Residua
1	1,0214	0,54165	0,47974
2	0,6655	0,57327	0,09227
3	0,7660	1,28749	-0,52145
4	0,2674	0,15078	0,11660
5	0,3243	-1,85300	2,17735
6	1,6217	0,51065	1,11109
7	-0,2315	-0,83023	0,59870
8	0,9730	-0,87064	1,84369
9	-0,1161	-0,83719	0,72110
10	0,7962	0,48834	0,30787
11	-0,9397	0,46043	-1,40013
12	-0,9848	-0,21486	-0,76994
13	0,3333	0,80534	-0,47201
14	0,2287	0,98715	-0,75840
15	0,2287	2,56698	-2,33823
16	0,4575	1,99893	-1,54144
17	-0,2306	1,74884	-1,97946
18	2,8088	3,19616	-0,38733
19	3,0642	2,90353	0,16065
20	1,0214	1,76945	-0,74805

4.3. METODY RYCHLOSTI VĚTRU

Hledání vztahu mezi rychlostí větru a údaji pro volnou atmosféru proběhlo ve dvou variantách. Jedna byla provedena přímým výpočtem z již získaných vztahů pro složky větru U a V. Druhá varianta spočívala opět v přímém downscalingu rychlosti větru.

První varianta tedy spočívá v přepočtu simulovaných hodnot rychlostí složek větru U a V na rychlost větru bez rozlišení směru. Tedy predikované hodnoty (viz. tabulka 4) pro dvě složky větru v každé stanici byly podle jednoduchého principu Pythagorovy věty přepočítány na rychlost větru. Tyto údaje byly korelovány přímo se skutečně naměřenými údaji o rychlosti větru.

V druhé variantě byl vztah hledán stejnou metodou, jako v případě složek U a V. Použity byly stejné prediktory, prediktandem však byla rychlost větru bez rozlišení směru. Jediný rozdíl byl u prediktoru wind, který je v reanalýze volné atmosféry udáván též ve složkách u a v. Tyto složky byly taktéž přepočítány na celkovou rychlost a poté použity do downscalingu. Následně byly opět vyhodnoceny nejlepší prediktory a provedena křížová validace.

5. VÝSLEDKY

Tato kapitola je opět rozdělena do dvou částí. První se tradičně týká přízemního větru složeného ze složek U a V. V druhé části jsou kromě výsledků downscalingu rychlosti větru provedeném stejnou metodou, jako v případě složek U a V i srovnání s další metodou, která spočívá ve výpočtu rychlosti větru z již simulovaných složek U a V. Následující kapitoly zároveň ukazují rozdílný vliv jednotlivých prediktorů na různé pojetí složek větru a různých metod.

Vždy je k dispozici srovnání všech testovaných prediktorů, dva vybrané jsou detailně rozpracovány.

5.1. SLOŽKY VĚTRU U A V

Pro jednotlivé složky větru U a V byly tedy testovány všechny vybrané prediktory. V tabulce 5 jsou zaznamenané výsledky všech dílčích výpočtů pro každou kombinaci prediktoru a složky větru v každé stanici. Každá hodnota je pro lepší názornost zvýrazněna na pozadí datovou čarou, přičemž u složky U je použita modrá datová čára, u složky V je použita zelená datová čára. Pro každou stanici jsou barevným textem zvýrazněny dva nejlepší prediktory pro každou složku.

Složka větru U má nejvyšší dosažené hodnoty korelačních koeficientů mezi jednotlivými prediktory zvýrazněny červeně. Je patrné, že hodnoty jsou si velmi podobné a u jednotlivých stanic se celkové pořadí prediktorů různě střídá. Zdaleka nejvíce se na těchto pozicích vyskytuje dvojice kombinovaných prediktorů SLP + wind a SLP + hgt 850. U některých stanic se jako nejlepší prediktor objevuje i kombinace SLP + hgt 700, SLP + hgt 500 nebo SLP + hgt 1000. Z vyrovnaných hodnot je zřejmé, že jednotlivé hodnoty tlaku na různých geopotenciálních výškách nesou velmi podobnou informaci a jakákoliv kombinace s prediktorem SLP nebo wind poskytuje velmi dobré výsledky.

Oproti tomu složka větru V má celkově výsledky horší a pořadí prediktorů již není tak jednoznačné. Jako nejlepší případy lze v tomto případě vyhodnotit opět kombinace prediktorů SLP + wind, SLP + hgt 850 a v tomto případě se častěji vyskytuje i kombinace SLP + hgt 700. Rozdíly mezi jednotlivými prediktory jsou však tak malé, že za nejlepší dva lze opět považovat nejčastěji se vyskytující SLP + wind a SLP + hgt 850.

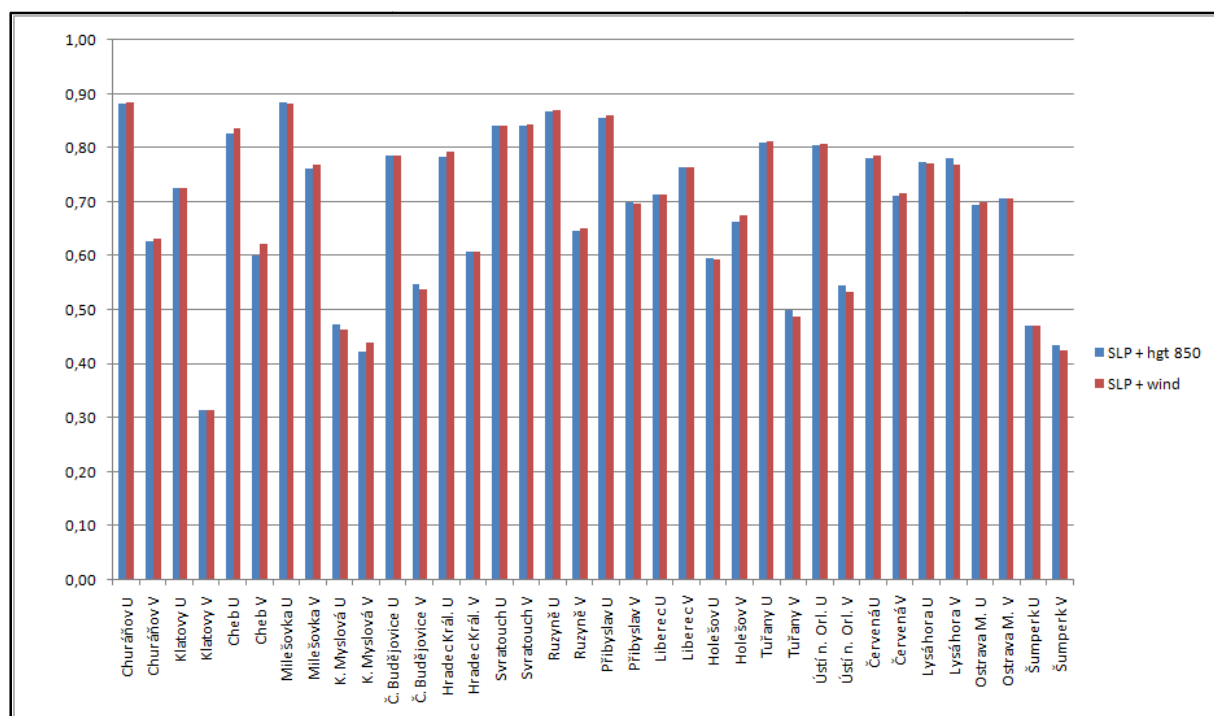
Celkové srovnání hodnot mezi jednotlivými stanicemi již naznačuje některé možné vlivy na přízemní vítr v ČR a jeho projevy vzhledem ke globálnímu klimatu. Celkově vyšší

Tabulka 5 Korelační koeficienty testovaných prediktorů pro složky U a V

Stanice / prediktor	Churáňov	Klatovy	Cheb	Milešovka	K. Myslová	Č. Budějovice	Hrad. Králové	Svratouch	Ruzyně	Přibyslav	Liberec	Holešov	Tuřany	Ústí n. Orl.	Červená	Lysá hora	Ostrava M.	Šumperk
hgt 1000	U 0,8614	0,7217	0,8254	0,8671	0,4322	0,7740	0,7748	0,8284	0,8581	0,8898	0,7001	0,5788	0,7965	0,8005	0,7692	0,7604	0,6866	0,4756
	V 0,6123	0,3120	0,5858	0,7567	0,4067	0,5361	0,5994	0,8239	0,6339	0,6860	0,7588	0,6548	0,4862	0,5340	0,6962	0,7645	0,6996	0,4276
hgt 850	U 0,8705	0,7124	0,8102	0,8660	0,4370	0,7580	0,7630	0,8255	0,8394	0,8168	0,6711	0,5595	0,7699	0,7839	0,7350	0,7607	0,6556	0,4648
	V 0,6147	0,3170	0,5831	0,7432	0,3947	0,5279	0,5812	0,7977	0,6156	0,6713	0,7154	0,6159	0,4714	0,5276	0,6713	0,7592	0,6626	0,4137
hgt 700	U 0,8189	0,6630	0,7585	0,8204	0,4086	0,7028	0,7113	0,7694	0,7845	0,7510	0,6185	0,5120	0,7026	0,7263	0,6700	0,7277	0,6005	0,4212
	V 0,5610	0,2959	0,5360	0,6723	0,3774	0,4562	0,5188	0,7169	0,5414	0,5941	0,6280	0,5452	0,4204	0,4799	0,6046	0,6924	0,5876	0,3488
hgt 500	U 0,7594	0,6122	0,7055	0,7638	0,3814	0,6574	0,6586	0,7141	0,7249	0,6922	0,5661	0,4793	0,6493	0,6705	0,6138	0,6664	0,5558	0,3769
	V 0,5161	0,2691	0,4935	0,6185	0,3557	0,4180	0,4682	0,6584	0,4995	0,5424	0,5669	0,4901	0,3799	0,4337	0,5487	0,6323	0,5311	0,3013
SLP	U 0,8765	0,7260	0,8275	0,8824	0,4718	0,7845	0,7899	0,8428	0,8667	0,8532	0,7168	0,5841	0,8121	0,8109	0,7889	0,7719	0,7060	0,4874
	V 0,6297	0,3184	0,6031	0,7675	0,4283	0,5554	0,6139	0,8458	0,6541	0,6991	0,7639	0,6710	0,5033	0,5461	0,7143	0,7732	0,7142	0,4475
wind (u, v)	U 0,8798	0,7262	0,8414	0,8891	0,4569	0,7815	0,7970	0,8466	0,8709	0,8496	0,7002	0,5910	0,8005	0,8168	0,7745	0,7758	0,6824	0,4733
	V 0,6494	0,3327	0,6330	0,7651	0,4482	0,5537	0,6099	0,8392	0,6660	0,6943	0,7606	0,6720	0,4982	0,5452	0,7258	0,7646	0,7022	0,4499
SLP + hgt 1000	U 0,8800	0,7321	0,8931	0,8876	0,4764	0,7914	0,7902	0,8423	0,8718	0,8605	0,7188	0,6013	0,8164	0,8182	0,7858	0,7740	0,7058	0,4846
	V 0,6314	0,3323	0,6069	0,7684	0,4173	0,5540	0,6175	0,8477	0,6599	0,6999	0,7721	0,6757	0,5041	0,5533	0,7207	0,7791	0,7135	0,4519
SLP+hgt 850	U 0,8867	0,7355	0,8389	0,8917	0,4904	0,7942	0,7984	0,8499	0,8749	0,8631	0,7237	0,6038	0,8179	0,8193	0,7872	0,7840	0,7310	0,4896
	V 0,6431	0,3430	0,6178	0,7745	0,4463	0,5626	0,6203	0,8512	0,6548	0,7085	0,7717	0,6707	0,5030	0,5531	0,7259	0,7884	0,7151	0,4522
SLP + hgt 700	U 0,8836	0,7350	0,8395	0,8890	0,4894	0,7936	0,7951	0,8467	0,8717	0,8635	0,7230	0,6048	0,8174	0,8180	0,7922	0,7824	0,7061	0,4937
	V 0,6389	0,3363	0,6126	0,7718	0,4492	0,5610	0,6190	0,8431	0,6543	0,7006	0,7223	0,6757	0,5117	0,5540	0,7205	0,7865	0,7146	0,4523
SLP + hgt 500	U 0,8826	0,7328	0,8356	0,8849	0,4893	0,7921	0,7933	0,8491	0,8713	0,8613	0,7205	0,6134	0,8153	0,8184	0,7917	0,7790	0,7066	0,4893
	V 0,6364	0,3331	0,6140	0,7727	0,4483	0,5524	0,6215	0,8500	0,6572	0,7008	0,7720	0,6734	0,5067	0,5519	0,7236	0,7835	0,7159	0,4471
SLP + wind (u,v)	U 0,8920	0,7352	0,8468	0,8915	0,5088	0,7974	0,8003	0,8509	0,8761	0,8658	0,7297	0,6088	0,8161	0,8274	0,7966	0,7827	0,7108	0,5078
	V 0,6531	0,3411	0,6346	0,7729	0,4568	0,5632	0,6279	0,8528	0,6737	0,7060	0,7743	0,6881	0,5120	0,5590	0,7327	0,7788	0,7185	0,4520
hgt 1000 + hgt 850	U 0,8790	0,7285	0,8333	0,8792	0,4677	0,7841	0,7896	0,8399	0,8626	0,8483	0,7171	0,5907	0,8049	0,8104	0,7718	0,7779	0,6949	0,4775
	V 0,6293	0,3322	0,5984	0,7645	0,4143	0,5427	0,6048	0,8332	0,6412	0,6912	0,7526	0,6601	0,4951	0,5428	0,7034	0,7786	0,7012	0,4356
hgt 1000 + hgt 700	U 0,8746	0,7281	0,8918	0,8767	0,4551	0,7831	0,7859	0,8364	0,8617	0,8491	0,7129	0,5920	0,8043	0,8093	0,7698	0,7726	0,6903	0,4789
	V 0,6236	0,3228	0,5944	0,7626	0,4186	0,5405	0,6046	0,8314	0,6409	0,6514	0,7539	0,6596	0,4900	0,5427	0,7056	0,7762	0,7018	0,4371
hgt 1000 + hgt 500	U 0,8708	0,3194	0,5898	0,7596	0,4172	0,5389	0,6010	0,8303	0,6391	0,6904	0,7549	0,6583	0,4920	0,5402	0,7041	0,7741	0,7013	0,4361
	V 0,8776	0,7234	0,8210	0,8749	0,4636	0,7752	0,7803	0,8352	0,8546	0,8375	0,6912	0,5841	0,7934	0,8006	0,7588	0,7757	0,6753	0,4790
hgt 850 + hgt 700	U 0,6307	0,3253	0,5985	0,7563	0,4141	0,5450	0,6000	0,8204	0,6364	0,6660	0,7361	0,6420	0,4845	0,5362	0,6930	0,7674	0,6888	0,4297
	V 0,8764	0,7213	0,8171	0,8741	0,4563	0,7710	0,7785	0,8337	0,8473	0,8288	0,6826	0,5798	0,7878	0,7968	0,7530	0,7744	0,6653	0,4678
hgt 850 + hgt 500	U 0,6278	0,3281	0,5956	0,7529	0,4137	0,5337	0,5972	0,8115	0,6317	0,6649	0,7279	0,6350	0,4882	0,5340	0,6886	0,7712	0,6842	0,4327
	V 0,8541	0,6973	0,7946	0,8564	0,4331	0,7439	0,7515	0,8091	0,8240	0,7994	0,6611	0,5554	0,7556	0,7690	0,7173	0,7586	0,6435	0,4424
hgt 700 + hgt 500	V 0,5998	0,3166	0,5726	0,7160	0,3951	0,5051	0,5641	0,7784	0,5927	0,6479	0,6861	0,6010	0,4639	0,5083	0,6585	0,7442	0,6443	0,4006

hodnoty korelačního koeficientu jsou dosaženy na stanicích, které jsou v terénu na vyvýšených místech a přízemní vítr je tam málo ovlivněn konfigurací terénu. Například lze jmenovat Milešovku, Svratouch a Lysou horu. Na těchto stanicích jsou též velmi malé rozdíly mezi korelačními koeficienty pro složky U a V. Naopak stanice mimo exponovaná místa mají vždy korelační koeficient nižší alespoň pro jednu složku, například Tuřany, Ústí nad Orlicí nebo Klatovy. Nejmarkantnějším případem je však stanice Šumperk, která se nachází ve výrazné kotlině. Zvláštním případem je stanice Kostelní Myslová, u které jsou takto slabé výsledky překvapivé. Podrobné výsledky pro dva vybrané prediktory s nejvyššími korelačními koeficienty jsou zobrazeny v grafu 1.

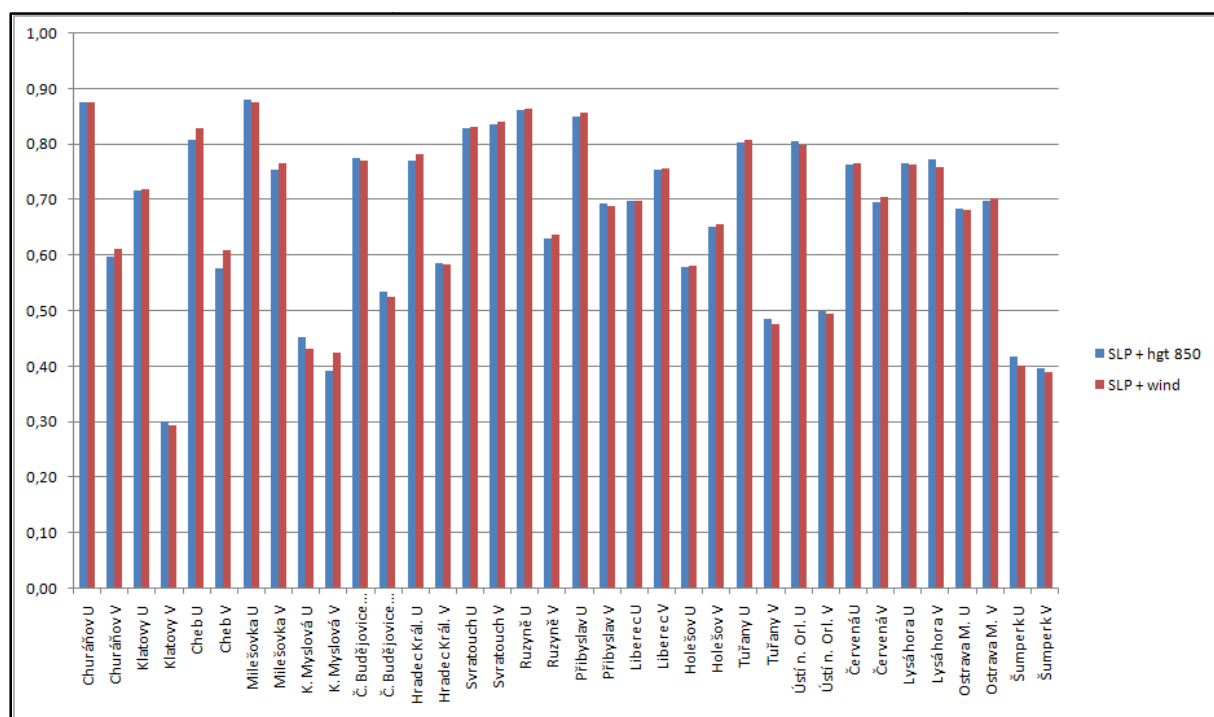
Graf 1 Korelační koeficienty dvou vybraných prediktorů



Na grafu 2 jsou již zobrazeny výsledky korelací pozorovaných a predikovaných dat podle simulací vzešlých z již zmíněných prediktorů SLP + hgt 850 a SLP + wind. V tomto případě jsou již zobrazeny korelace z výsledků křížové validace, tedy simulované hodnoty již pochází z násobné lineární regrese s upravenými parametry F. Tedy simulovaná data, která jsou zde korelována s pozorovanými daty jsou vždy odhadována na desetileté období, přičemž na zbylých čtyřiceti letech je rovnice trénována. Opět jsou řazeny podle stanic, vždy pro každou stanicí složka větru U i V. Hned na první pohled je tento graf velmi podobný s předešlým grafem 1, který zobrazuje korelační koeficienty ze simulací se základním nastavením. Výsledky jsou totiž prakticky stejné, jen korelační koeficient je vždy zhruba o

dvě setiny nižší. Je tedy zřejmé, že výrazné omezení počtu prediktorů vstupujících do výsledného modelu nijak výrazně nesníží konečnou míru korelace mezi simulovanými a skutečnými údaji. Pro většinu stanic jsou výsledky tedy velmi dobré, ve většině případů je dosaženo korelačního koeficientu minimálně 0,7, někde i výrazně více. Nízké výsledky pro obě složky jsou ve stanici Šumperk a opět je problematická stanice Kostelní Myslová. Oba srovnávané prediktory SLP + hgt 850 i SLP + wind jsou opět téměř bez rozdílu a poskytují téměř shodné výsledky.

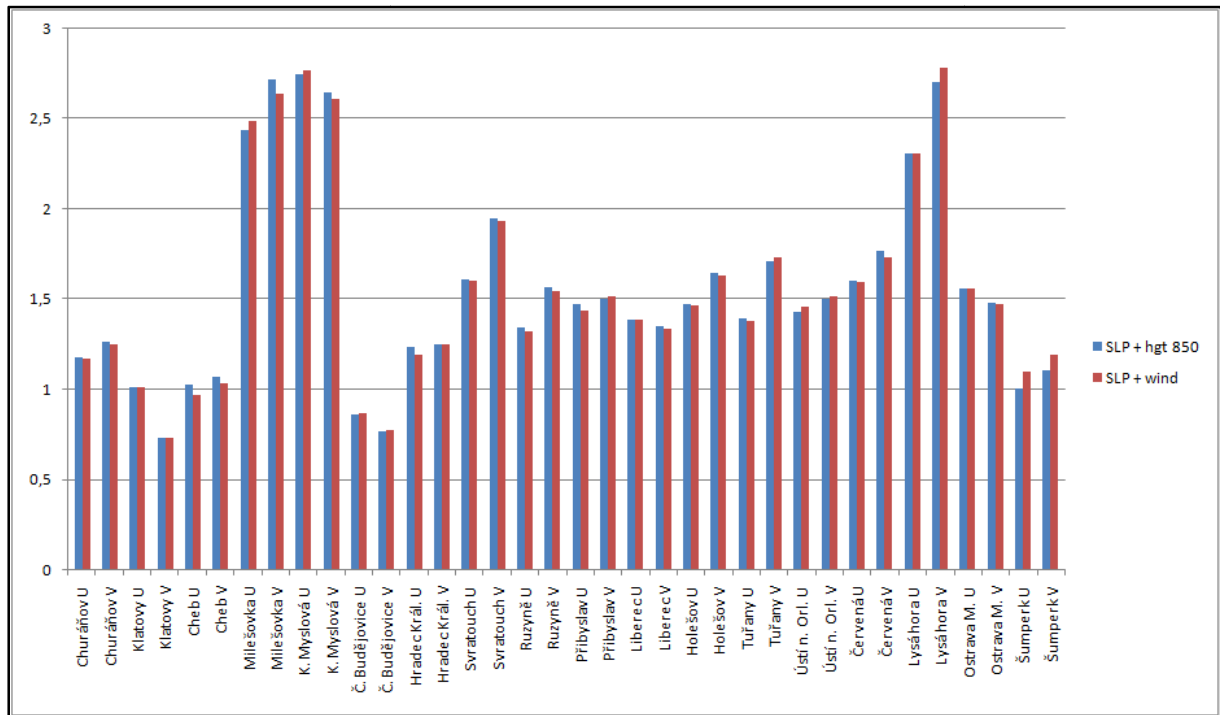
Graf 2 Korelační koeficienty po úpravě vstupních parametrů



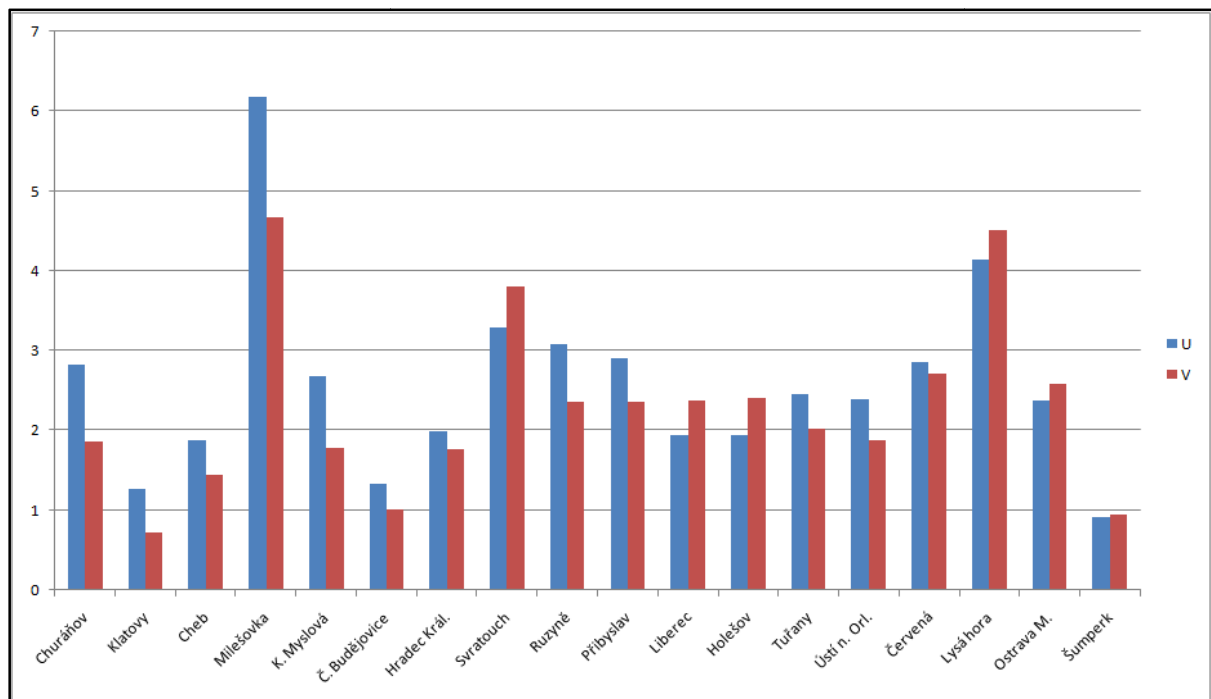
Nicméně korelační koeficient ukazuje pouze na relativní vztah mezi pozorovanými a simulovanými hodnotami. Na grafu 3 jsou zobrazeny průměrné hodnoty reziduí mezi pozorovanými a simulovanými hodnotami. Opět lze prohlásit oba testované prediktory za stejně dobré a poskytující prakticky ten samý výsledek. Na první pohled je patrné, že na drtivé většině stanic je hodnota průměrné odchylky do 1,5 m/s. Trochu překvapivě se nejvyšší odchylky vyskytují v případech, které měly velmi dobré výsledky regresního koeficientu, zejména stanice Milešovka a Lysá hora. Je to však způsobeno celkovou průměrnou rychlostí větru na těchto exponovaných stanicích, kdy ani odchylky přes 2,5 m/s neznamenal významnou nepřesnost předpovědi. Méně se to již projevuje na méně exponovaných stanicích jako je Svratouch či Churáňov. Dokonce ani stanice Šumperk se špatnými výsledky z předešlých srovnání nedopadla v tomto hodnocení špatně. Je to však způsobeno celkově velmi

nízkou průměrnou rychlostí větru na této stanici. Graf 4 zobrazuje průměrné rychlosti složek větru za sledované padesátileté období. Podobně nízký je i průměr rychlosti větru na stanici České Budějovice. Problematická je ovšem opět stanice Kostelní Myslová, kde je průměrná odchylka téměř stejně velká, jako samotná průměrná rychlost větru na této stanici!

Graf 3 Průměrné hodnoty reziduí dvou vybraných prediktorů (m/s)



Graf 4 Průměrné rychlosti složek větru na pozorovaných stanicích (m/s)



5.2. RYCHLOST VĚTRU

Podobné hodnocení lze provést i pro rychlost větru bez rozlišení jeho směru. V tomto případě jsou výsledky mezi stanicemi z pohledu spolehlivosti prediktorů vyrovnanější, obecně však celkově o něco horší. Zajímavé je však i srovnání s metodou přepočtu rychlosti větru ze složek větru, tedy použití výsledků z předešlé kapitoly věnované výpočtům podle složek větru U a V a následný přepočet těchto složek na rychlost větru.

Korelační koeficienty pro rychlost větru podává srovnání mezi výsledky korelačních koeficientů podle jednotlivých testovaných prediktorů pro jednotlivé stanice. V tomto prvním přehledu jsou opět hodnoty z prvních simulací, tedy násobná lineární regrese neměla upraveny parametry. Tabulka je koncipována podobně jako v minulé kapitole. Tedy vždy dvě nejvyšší hodnoty pro každou stanicí jsou červeně zvýrazněny. Již na první pohled je zřejmý rozdíl oproti výsledkům ze složek větru a též vzhledem k hodnotám korelačních koeficientů jiné optimální kombinace prediktorů. V tomto případě je optimální prediktor wind samotný, a to bez kombinace s jakýmkoliv jiným prediktorem. Při tomto postupu jsou hodnoty korelačního koeficientu pro každou stanicí o poznání nižší, než v případě složky U. Přesto jsou však výrazně vyšší, než jakákoliv další hodnota v pořadí, která pochází z pestrého výběru různých kombinací dalších prediktorů, které jsou již mezi sebou vcelku vyrovnané. V tomto případě lze tedy prediktor wind považovat za optimální volbu. Pro názornější porovnání byl vytvořen graf 5, pro který byla opět zvolena kombinace prediktorů SLP + hgt 850 a wind. Na první pohled je z grafu zřejmé, že prediktor wind poskytuje hodnotu korelačního koeficientu pro všechny stanice vyšší, v některých případech je rozdíl až dvě desetiny.

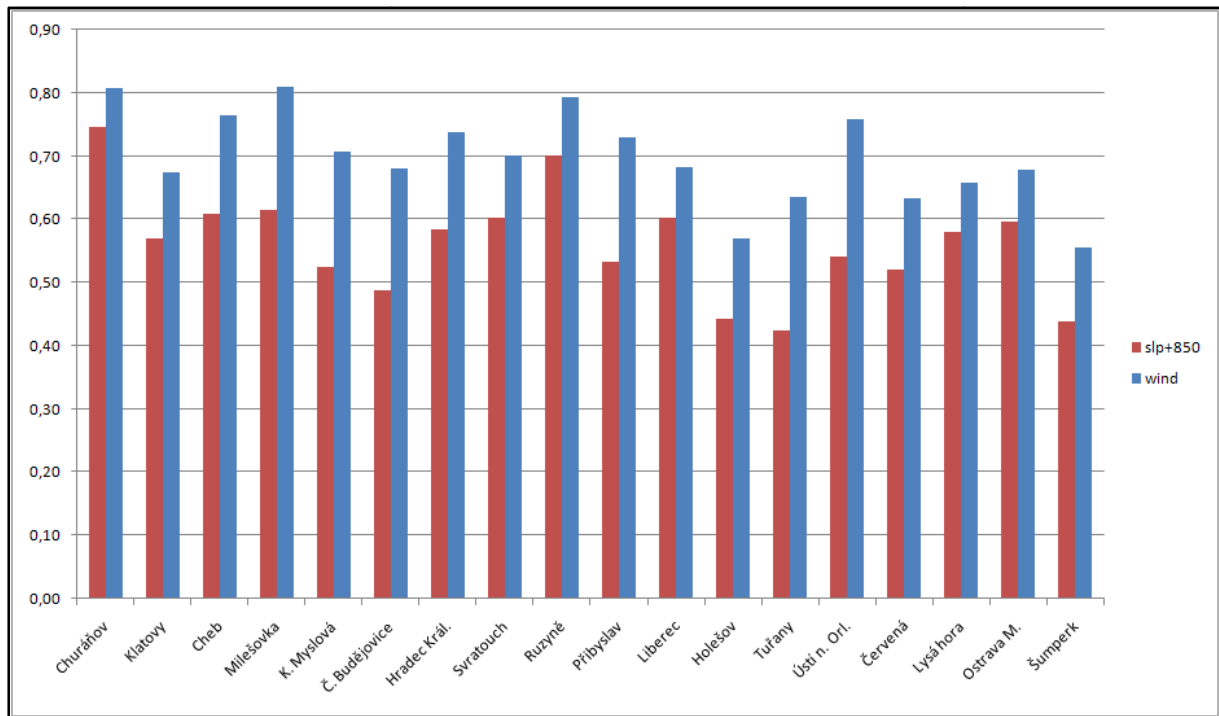
Srovnání korelací naměřených a predikovaných dat z křížové validace však přináší další posun hodnot korelačních koeficientů a tedy další změnu v hodnocení metod. Graf 6 srovnává výsledky 4 různých přístupů k odvození vztahu přízemního větru a rozdíly jsou markantní. V tomto grafu jsou již srovnávány korelační koeficienty z porovnání simulovaných dat během křížové analýzy a reálných hodnot.

V tomto srovnání naprosto nejhůře dopadla metoda downscalingu prediktoru SLP + hgt 850. V porovnání s dalšími přístupy poskytuje nejnižší korelační koeficient. Na pomyslném druhém místě se již mnohem těsněji umístil prediktor wind, který již pro výpočet přízemního větru metodou násobné lineární regrese poskytuje uspokojivější výsledky. Na některých stanicích, jako je Cheb, Milešovka či Ústí nad Orlicí se dalším výpočtovým metodám prakticky vyrovná nebo je i mírně předčí, přesto na jiných stanicích (Svratouch, Ruzyně) již výrazně ztrácí.

Tabulka 6 Korelační koeficienty pro rychlost větru

Stanice / Prediktor	Churáňov	Klatovy	Cheb	Milešovka	K. Myslová	Č. Budějovice	Hrad. Králové	Svratouch	Ruzyně	Příbrav	Liberec	Holešov	Tuřany	Ústí n. Orl.	Červená	Lysá hora	Óstrava M.	Šumperk
hřt 1000	0,7142	0,5108	0,5615	0,5908	0,4346	0,4375	0,5270	0,5266	0,6686	0,4334	0,5565	0,3924	0,3460	0,4702	0,4862	0,5472	0,5573	0,3828
hřt 850	0,7181	0,5131	0,5749	0,5834	0,4257	0,4625	0,5275	0,4853	0,6695	0,4194	0,5306	0,3902	0,3622	0,4718	0,4676	0,5156	0,5463	0,3557
hřt 700	0,6790	0,4712	0,5521	0,5403	0,3907	0,4192	0,4751	0,4245	0,6388	0,3701	0,4823	0,3679	0,3326	0,4209	0,4404	0,4613	0,5229	0,3419
hřt 500	0,6259	0,4326	0,5052	0,5061	0,3644	0,3880	0,4251	0,3938	0,5903	0,3471	0,4570	0,3286	0,2957	0,3765	0,4081	0,4235	0,4937	0,3078
SLP	0,7337	0,5332	0,5677	0,6096	0,5069	0,4721	0,5584	0,5883	0,6749	0,5076	0,5897	0,4254	0,4185	0,4930	0,5029	0,5683	0,5790	0,4200
wind	0,8078	0,6752	0,7647	0,8094	0,7082	0,6798	0,7374	0,7013	0,7933	0,7308	0,6829	0,5702	0,6353	0,7592	0,6336	0,6578	0,6780	0,5566
SLP + hřt1000	0,7338	0,5642	0,5950	0,6105	0,4839	0,5174	0,5740	0,5959	0,6904	0,5175	0,5890	0,4467	0,3924	0,5292	0,5031	0,5825	0,5784	0,4322
SLP + hřt 850	0,7457	0,5698	0,6098	0,6160	0,5241	0,4685	0,5649	0,6033	0,7003	0,5332	0,6023	0,4434	0,4244	0,5407	0,5210	0,5806	0,5952	0,4387
SLP + hřt 700	0,7451	0,5695	0,6064	0,6115	0,5280	0,5053	0,5593	0,5952	0,6933	0,5041	0,5952	0,4229	0,3999	0,5392	0,5215	0,5822	0,5778	0,4425
SLP + hřt500	0,7456	0,5817	0,5965	0,6113	0,5356	0,5024	0,5870	0,5995	0,6931	0,5041	0,5973	0,4196	0,4095	0,5264	0,5157	0,5709	0,5965	0,4431
hřt 1000 + hřt 850	0,7332	0,5439	0,5937	0,6023	0,4692	0,4707	0,5436	0,5452	0,6861	0,4663	0,5725	0,4184	0,3912	0,4963	0,5035	0,5557	0,5752	0,4015
hřt 1000 + hřt 700	0,7293	0,5416	0,5915	0,6042	0,4749	0,4683	0,5430	0,5419	0,6810	0,4612	0,5684	0,4093	0,3791	0,4845	0,4981	0,5549	0,5727	0,3998
hřt 1000 + hřt 500	0,7289	0,5446	0,5866	0,5955	0,4740	0,4770	0,5456	0,5436	0,6843	0,4648	0,5689	0,3969	0,3838	0,4976	0,4962	0,5522	0,5710	0,4024
hřt 850 + hřt 700	0,7315	0,5428	0,5860	0,5930	0,4539	0,4619	0,5401	0,5292	0,6806	0,4591	0,5581	0,4068	0,3810	0,4953	0,5053	0,5459	0,5722	0,3851
hřt 850 + hřt 500	0,7272	0,5448	0,5875	0,5950	0,4628	0,4761	0,5481	0,5287	0,6746	0,4535	0,5570	0,4026	0,3879	0,4927	0,4929	0,5405	0,5672	0,3890
hřt 700 + hřt 500	0,7093	0,5109	0,5710	0,5714	0,4327	0,4434	0,5144	0,4904	0,6584	0,4167	0,5156	0,3888	0,3801	0,4602	0,4728	0,5055	0,5554	0,3654

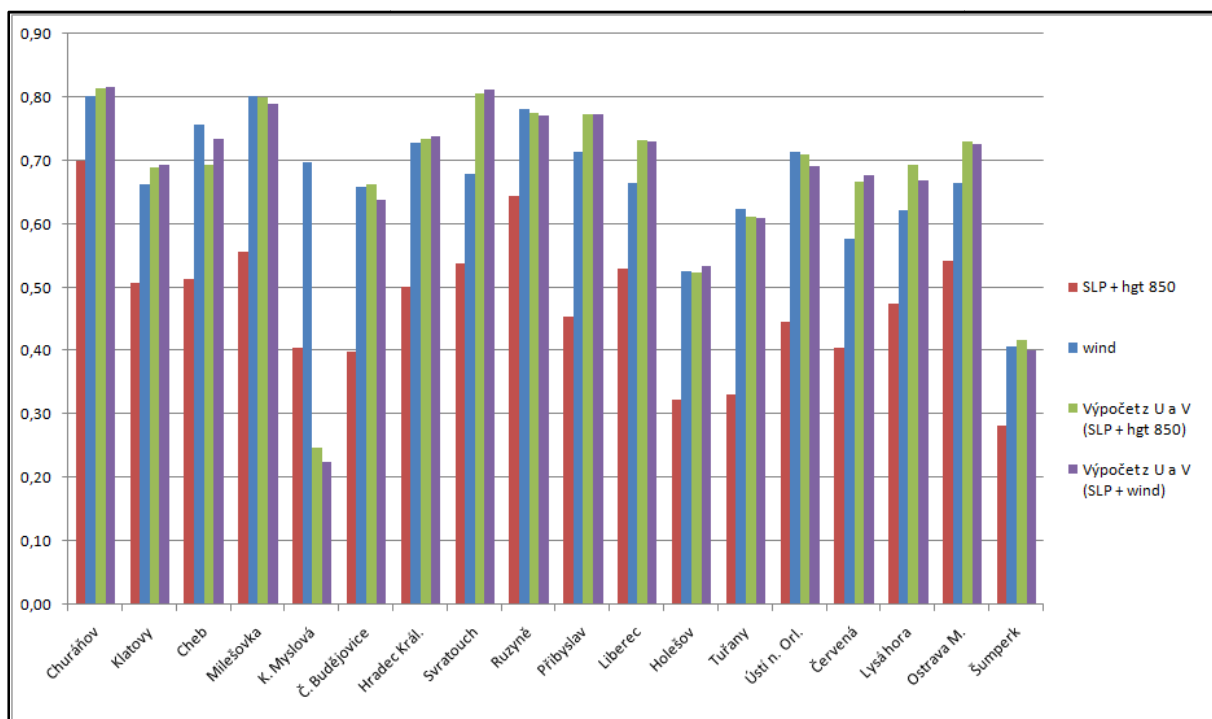
Graf 5 Korelační koeficienty vybraných prediktorů



Na pomyslném druhém místě se již mnohem těsněji umístil prediktor wind, který již pro výpočet přízemního větru metodou násobné lineární regrese poskytuje uspokojivější výsledky. Na některých stanicích, jako je Cheb, Milešovka či Ústí Nad Orlicí se dalším výpočtovým metodám prakticky vyrovná nebo je i mírně předčí, přesto na jiných stanicích (Svatouch, Ruzyně) již výrazně ztrácí. Zvláštností je opět stanice Kostelní Myslová, kde je tento postup zdaleka nejlepší. Celkově na této stanici metody přímého downscalingu rychlosti větru dominují nad výpočetními metodami ze složek větru. Tím vlastně i nad metodou downscalingu složek větru. Tento jev však byl zaznamenán pouze na této stanici.

Nejvyšší a nejvyrovnanější hodnoty korelačních koeficientů pro predikci rychlosti přízemního větru tedy poskytují metody výpočtu rychlosti větru ze dvou složek rychlosti větru, U a V. Kromě jedné stanice bylo takto vždy dosaženo lepších nebo srovnatelných výsledků než při přímém downscalingu rychlosti větru. Na některých stanicích poskytuje prediktor wind stejně dobré výsledky, výrazně lepší však není kromě výjimky Kostelní Myslové nikde. Celkově tak lze postup odvození vztahu mezi údaji pro volnou atmosféru a rychlostí větru pomocí přepočtu z downscalingu složek větru U a V považovat za lepší, než přímý downscaling prediktorů. Srovnání průměrných odchylek reziduálů (graf 7) mezi simulovanými a pozorovanými hodnotami ani v tomto případě nepodává žádné nečekané hodnoty. Nejmenší odchylky na většině stanic odpovídají výpočtu z výsledků větrných složek při použití prediktorových kombinací SLP + hgt 850 a SLP + wind.

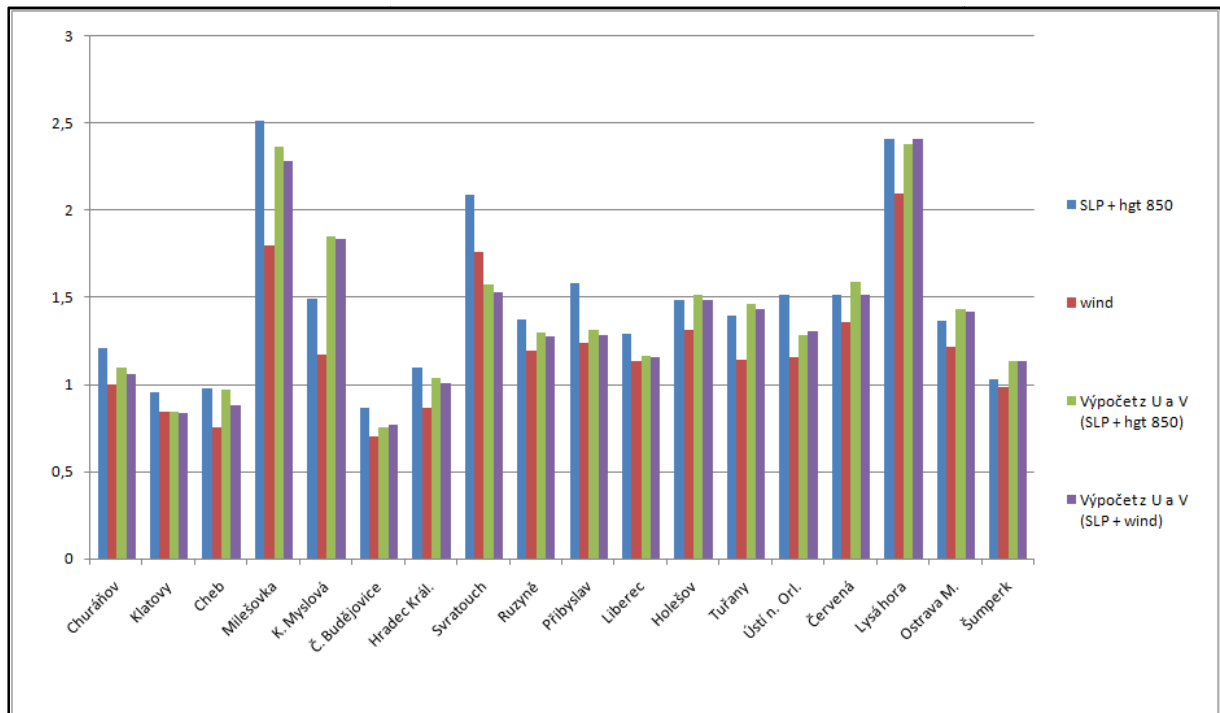
Graf 6 Korelační koeficienty vybraných prediktorů pro downscaling rychlosti větru po úpravě parametrů a metody výpočtu rychlosti větru ze složek větru



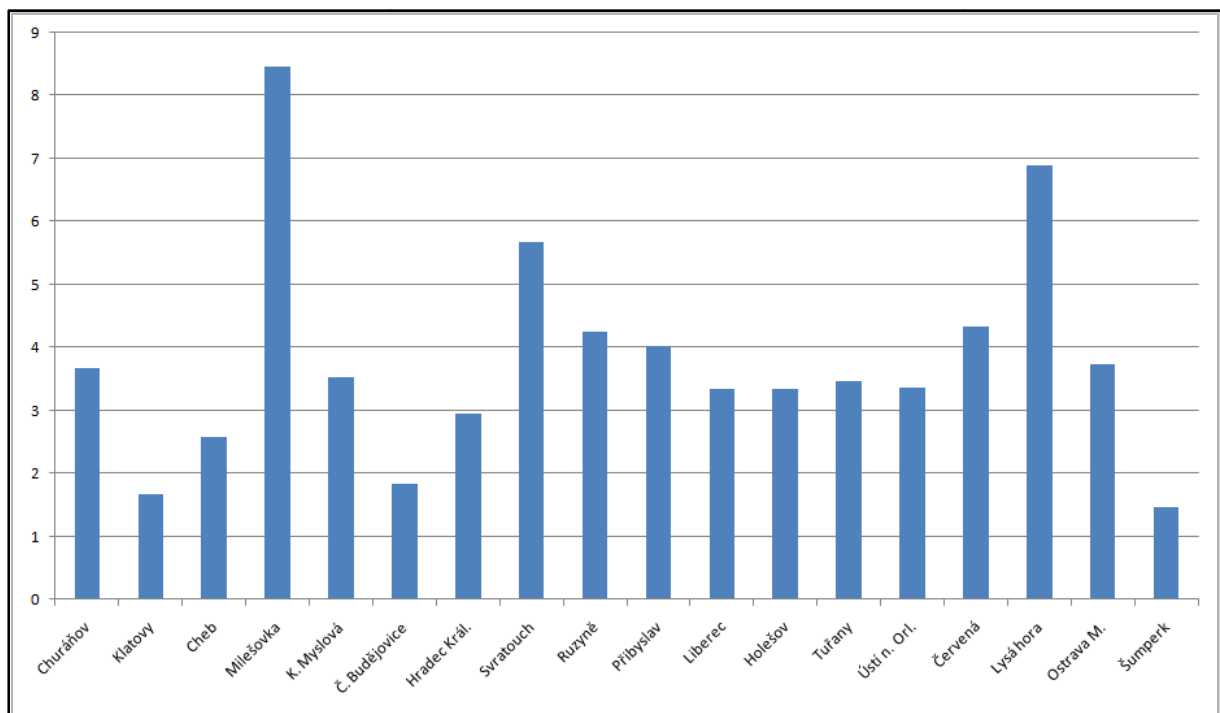
Nejvyšší hodnoty většinou odpovídají přímému downscalingu rychlosti větru s použitím prediktoru SLP + hgt 850. Odchytky prediktoru wind a výpočtových metod jsou vyrovnané a rozdíly mezi nimi na většině stanic malé na odpozorování nějakých zásadních rozdílů mezi metodami. I zde největší odchytky odpovídají exponovaným stanicím s nejvyššími průměrnými rychlostmi větru, stejně jako v minulé kapitole pro složky větru U a V. Největší odchytky jsou tedy dosaženy na stanicích Milešovka a Lysá hora, vyčnívá i stanice Svratouch.

Při pohledu na graf 8 je však jasné, že právě na těchto stanicích jsou nejvyšší průměrné rychlosti větru, přičemž na stanicích Milešovka a Lysá hora skutečně výrazně. Ve vyšších rychlostech lze tedy očekávat i větší odchylku od celkové rychlosti při simulaci. Zvláštností však je právě na těchto dvou stanicích výrazně nejnižší průměrná odchylka pro přímý downscaling prediktoru wind. Na stanici Šumperk je opět nízká průměrná rychlost větru, která ve spojení s polohou v kotlině způsobuje celkově horší výsledky pro tuto stanici a zároveň způsobuje ničím nevybočující hodnoty odchylek při těchto horších výsledcích. Špatný stav je opět na stanici Kostelní Myslová, kde je i přes nižší průměrné rychlosti větru vyšší hodnota průměrné odchylky. Pro tuto stanici se tedy nenašel žádný dostatečně kvalitní vztah mezi údaji pro volnou atmosféru a přízemním větrem pomocí jakékoliv metody.

Graf 7 Průměrné odchylky z nejlepších prediktorů a vypočtených rychlostí (m/s)



Graf 8 Průměrná rychlost větru na sledovaných stanicích (m/s)



6. DISKUZE

Tato kapitola se věnuje porovnáním výsledků různých metod a přístupů pro downscaling větru na území České republiky. Pro některé stanice jsou též přidány a diskutovány mapy, které zobrazují prostorové rozmístění prediktorů použitých ve výsledných rovnicích násobných lineárních regresí. Umístění těchto prediktorů je diskutovatelné vzhledem k obecným zákonitostem pohybů vzduchových mas v atmosféře. Dále budou dosažené výsledky konfrontovány s obecnými závěry podobně zaměřených výzkumů.

6.1. SLOŽKY VĚTRU U A V

Již v předešlé kapitole jsou na grafu 1 podrobně srovnány výsledky dvou prediktorů, které na jednotlivých stanicích dosahují nejvyšších korelačních koeficientů. Na celé řadě stanic jsou koeficienty pro složku větru V nižší, než pro složku U. Toto se většinou netýká stanic na exponovaných místech (Milešovka, Lysá hora), nicméně je pravděpodobné, že toto souvisí s převládajícím směrem větru v ČR. Převažující směr větru na území ČR je západní, tedy v podstatě odpovídající zonální složce U, která je tím pádem snáze simulovatelná. Dle srovnání odchylek přízemního větru od simulovaných hodnot v grafu 3, průměrných rychlostí větru na stanicích v grafu 4 a výsledků pro jednotlivé složky je patrné, že vyšší rychlosti větru se odhadují s vyšší přesností. To opět nahrává lepším výsledkům pro zonální složku U.

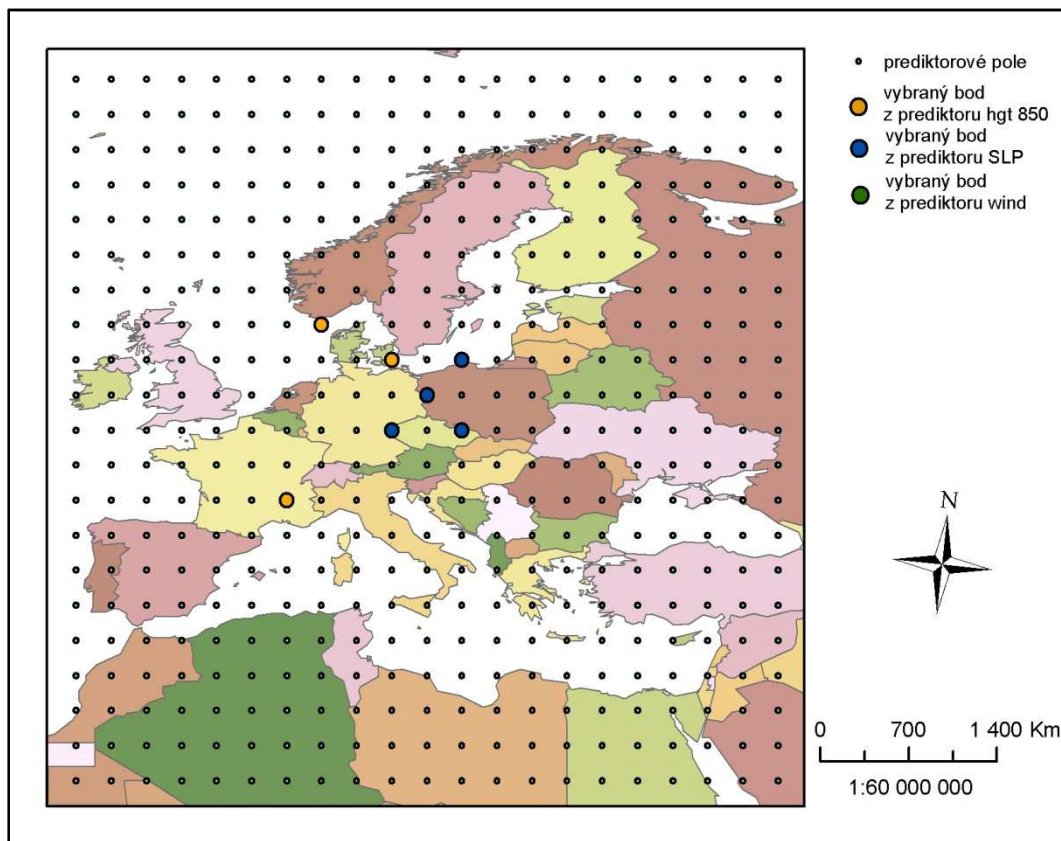
Dalším hlediskem, které v některých případech ovlivňuje úspěšnost downscalingu větru, je i konfigurace terénu v místě měření. Naprosto zjevným příkladem je stanice Šumperk, která sevřená v kotlině mezi okolními horami dosahuje velmi nízkých výsledků korelačních koeficientů. Tato poloha má však stejně tak na svědomí i nízké průměrné rychlosti větru v této lokalitě. Terén má však vliv zřejmě i na dalších stanicích, kde se navíc projevuje vliv jen na jednu složku větru. Příkladem by mohla být stanice Ústí nad Orlicí (poloha v údolí směru SZ - JV), Churáňov na Šumavě, nebo Holešov a Liberec, kde jsou dokonce výsledky pro složku V mírně lepší než pro složku U. Takto velký vliv terénu na směr přízemního větru však zaznamenali např. i T. Salameh et. al. (2008) v údolí Rhony, které je svým rozsahem několikanásobně větší, než údolí v okolí Ústí nad Orlicí. Nicméně podobný vliv terénu, který pozorujeme např. na stanici Ústí nad Orlicí byl dokumentován i na severním pobřeží Norska, které je rozbrázděno četnými fjordy (Nawri, Harstveit (2011)). Velký vliv terénu na přízemní vítr však dokládá i García (2011) v severním Španělsku. Dalšími stanicemi s lokálními terénními vlivy jsou i Cheb a České Budějovice.

Výběr testovaných prediktorů se zdá vhodný, neboť v různých kombinacích podávají skutečně lokální informace o přízemním větru. I v dalších výzkumech, které se zabývají výzkumy přízemního větru, byla volba prediktorů velmi podobná. Různé geopotenciální výšky se pro popis větru používají velmi často. Za zdůraznění stojí především prediktor SLP, který se používá prakticky vždy a často právě tento se podílí na konečném výsledku. Prakticky stejné hodnoty korelačních koeficientů, které poskytují kombinace prediktorů SLP + hgt 850 a SLP + wind, jsou poněkud zarážející. Grafy zobrazující výsledky pro složky větru U a V vypadají v těchto případech jako okopírované. Je tedy zjevné, že prediktor vytvořený pro stejný meteorologický prvek, kterému je věnován downscaling, nemusí automaticky vést k lepšímu výsledku. Prediktor wind, který je v reanalýze volné atmosféry produkován s prostorovým rozlišením 2,5° tedy nemusí nutně nést lepší informaci o přízemním větru, než geopotenciální výška na správné hladině se stejným prostorovým rozlišením. Další otázkou však také zůstává, jak přesně jsou tyto prediktory v reanalýze volné atmosféry počítány a jaké jsou mezi nimi vztahy.

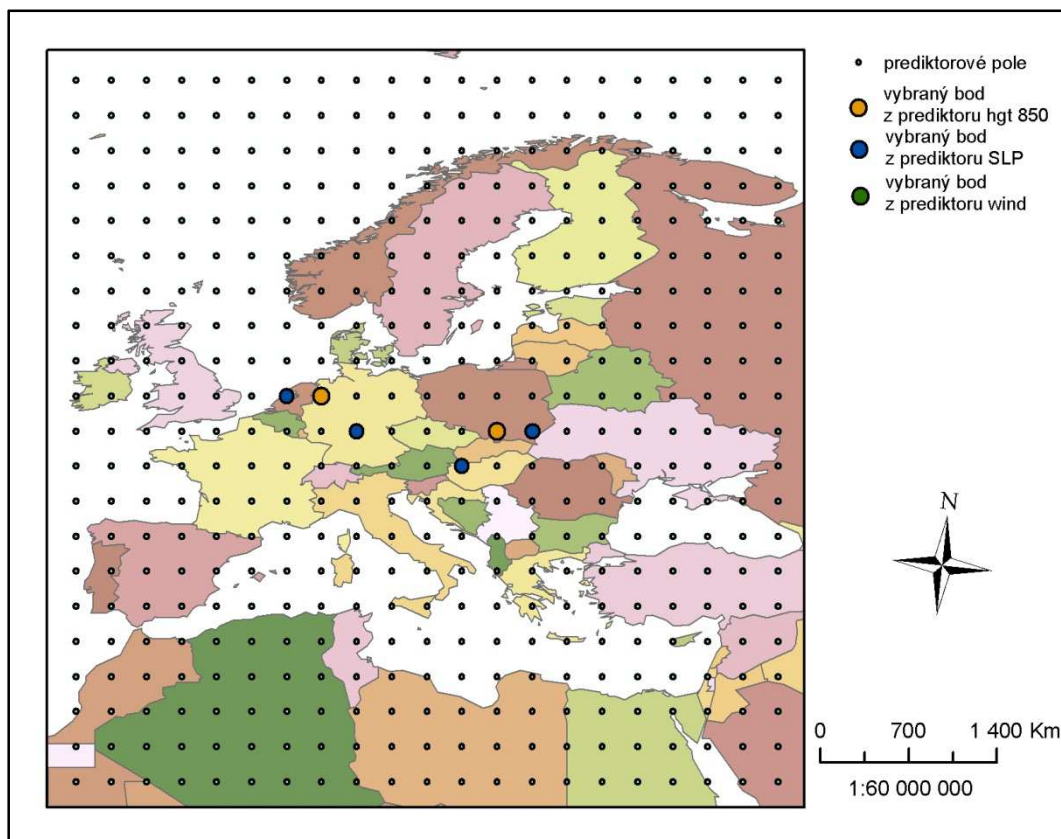
Použití násobné lineární regrese pro hledání vztahu mezi údaji pro volnou atmosféru a přízemním větrem je podle výsledků vhodné. Některé další výzkumy (Pryor et al., 2005; Goubanova et al., 2010; Salameh et al., 2008) také předpokládaly lineární vztahy a podle dosažených výsledků skutečně byly lineární vztahy nalezeny. Otázkou v tomto případě zůstává stanice Kostelní Myslová, kde zřejmě nelze horší výsledky vysvětlit nějakým vnějším vlivem, ani vliv reliéfu by v tomto případě neměl mít velkou váhu. Možná je samozřejmě i varianta, kdy lze v tomto případě najít jiný nelineární vztah, který umožní dobrý downscaling i v této lokalitě. Takový případ však násobná lineární regrese samozřejmě nemůže odhalit.

Rozložení vybraných prediktorů z prediktorových polí poskytuje další možnosti k hodnocení procesu downscalingu větru. Na obrázcích 4, 5 a 6 je zobrazeno prostorové rozmístění vybraných prediktorů pro stanici Milešovka (prediktor slp + hgt 850). Na prvním je patrná velká převaha bodů na sever a západ od zájmového území. To je v případě této stanice trochu nečekané, neboť podle dalších zmiňovaných stanic bude typické pro složku U výraznější rozmístění těchto bodů na sever a na jih od zájmového území. Rozdíl v hodnotách tlaku mezi těmito místy a s tím spojených tlakových útvarů je právě důvod k větrnému proudění v zonálním směru. Míra rozdílu tohoto tlaku je úměrná míře rychlosti větru. Na druhém obrázku je opět stejná situace pro meridionální složku větru. Na první pohled je patrné striktní rozložení těchto bodů na východ a západ od zájmového území. Takto umístěné body s údaji o hodnotách tlaku vzduchu mají fyzikální předpoklad pro dobrou vazbu na přízemní vítr.

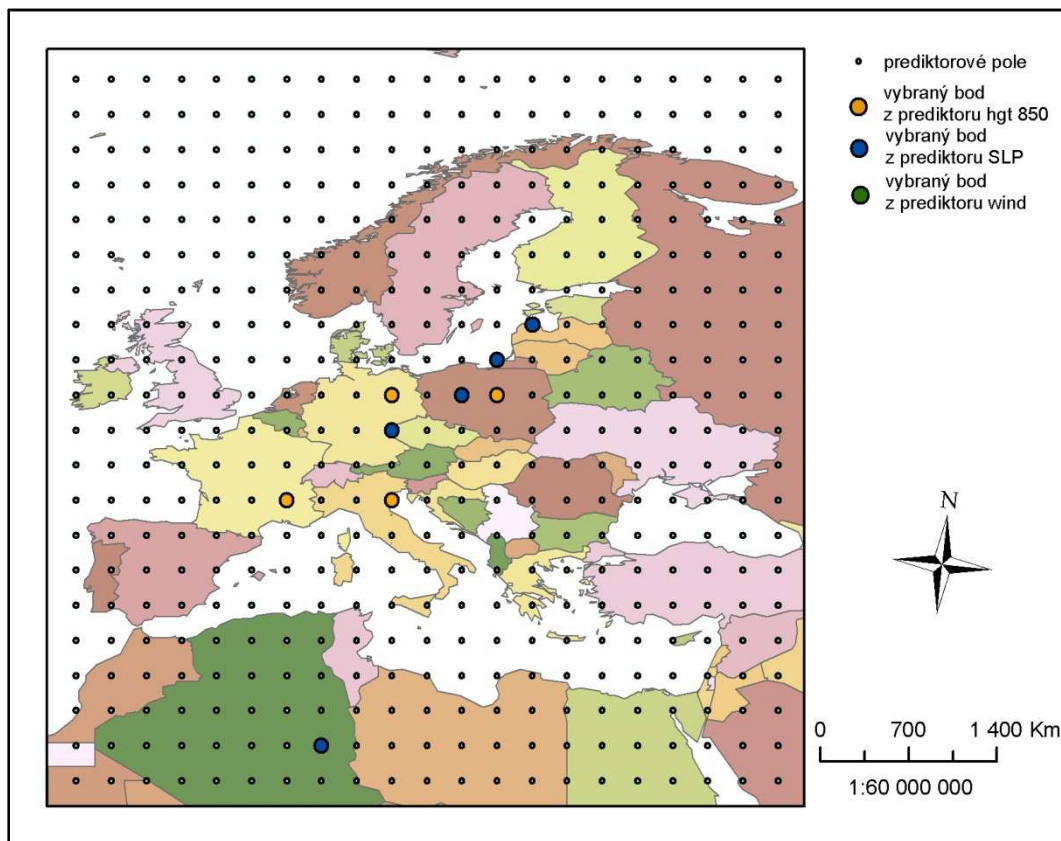
Obrázek 4 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Milešovka (složka U)



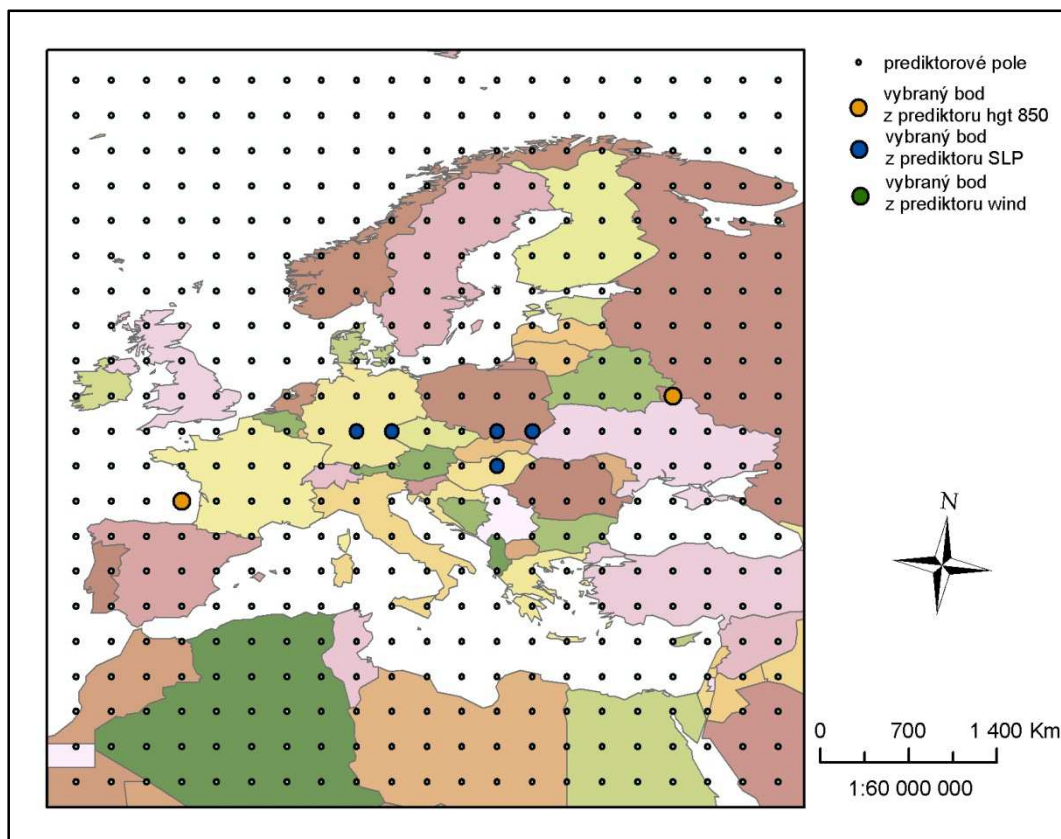
Obrázek 5 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Milešovka (složka V)



Obrázek 6 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Svatouch (složka U)

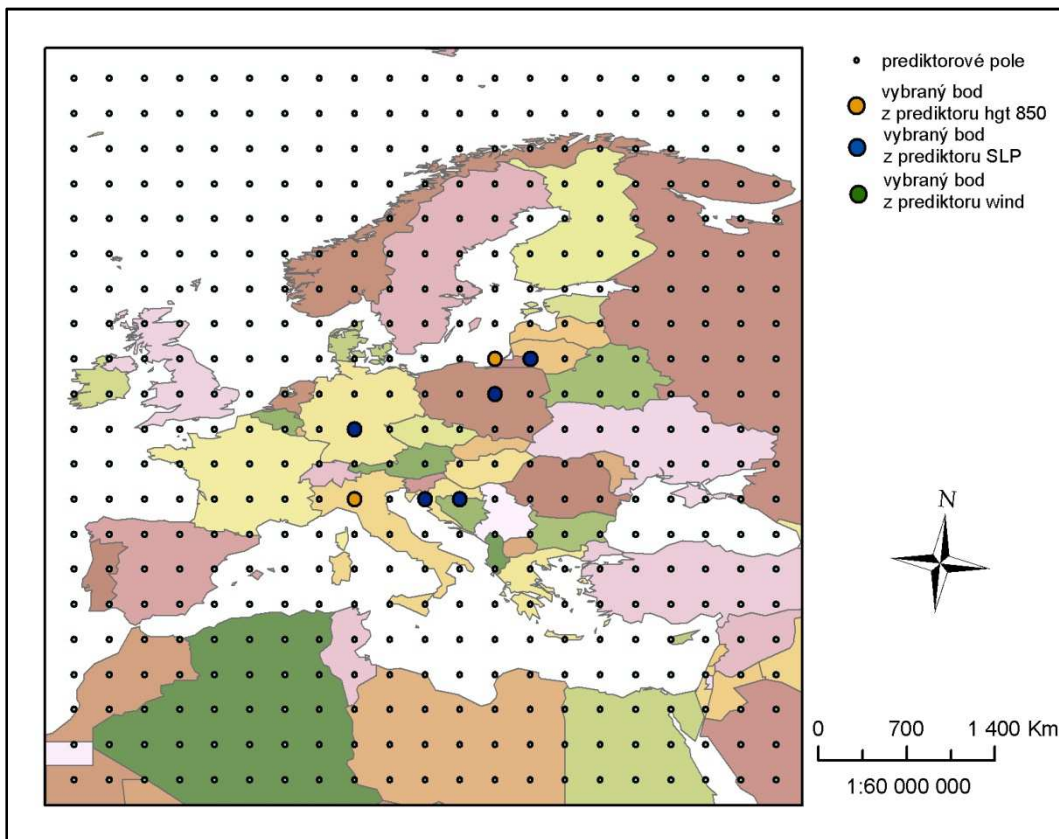


Obrázek 7 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Svatouch (složka V)

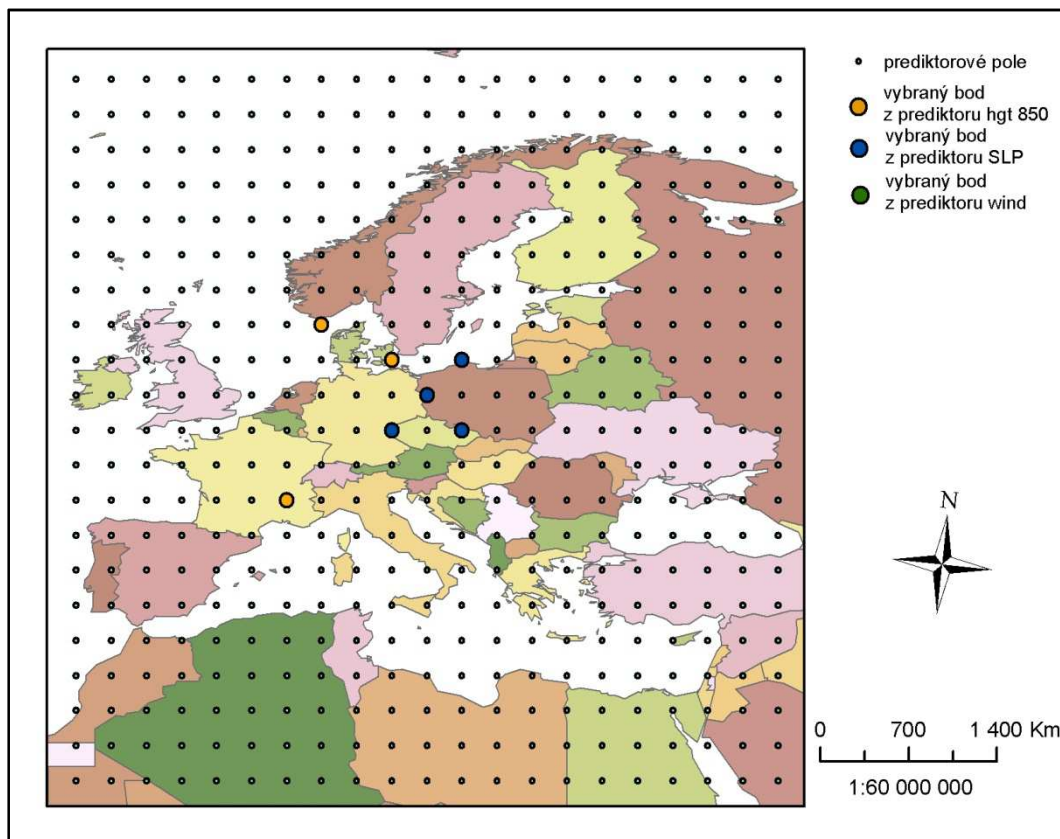


Na obrázcích 6 a 7 je stejně znázorněná situace pro stanici Svatouch. Pro složku U je již patrné rozmístění bodů JZ - SV, které by z podstaty problému mělo lépe vyjadřovat zonální složku větru. Pro složku V je rozložení V - Z naprosto zřejmé a potvrzuje se tak již naznačený trend ze stanice Milešovka. Na obrázcích 8 a 9 je opět stejná situace ještě pro stanici Lysá hora. V případě zonálního větru je opět patrné rozmístění prediktorů na JZ a SV, které zřejmě podle všech předložených příkladů je pro tuto složku na území ČR výhodnější, než přímé umístění S - J. V případě meridionálního směru není tentokrát rozmístění tak pravidelné, nicméně neodporuje předešlým případům. Za povšimnutí též stojí, že prediktor SLP, má většinou uzlové body v těsné blízkosti zájmového území. Naopak prediktor hgt 850 často zaujímá pozice vzdálenější. Z této hladiny je zřejmě vztah na přízemní vítr vázán z většího okolí stanice. Stejně tak se v tomto případě potvrzuje dostatečná velikost zvolené matice prediktorového pole. V centrální části, kde je hustota bodů větší se vyskytuje drtivá většina vybraných prediktorů. V řidčeji obsazeném okolí jde již o výjimky, avšak ani zde se žádný vybraný bod nepřibližuje okraji zvolené matice.

Obrázek 8 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Lysá hora (složka U)



Obrázek 9 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Lysá hora (složka V)



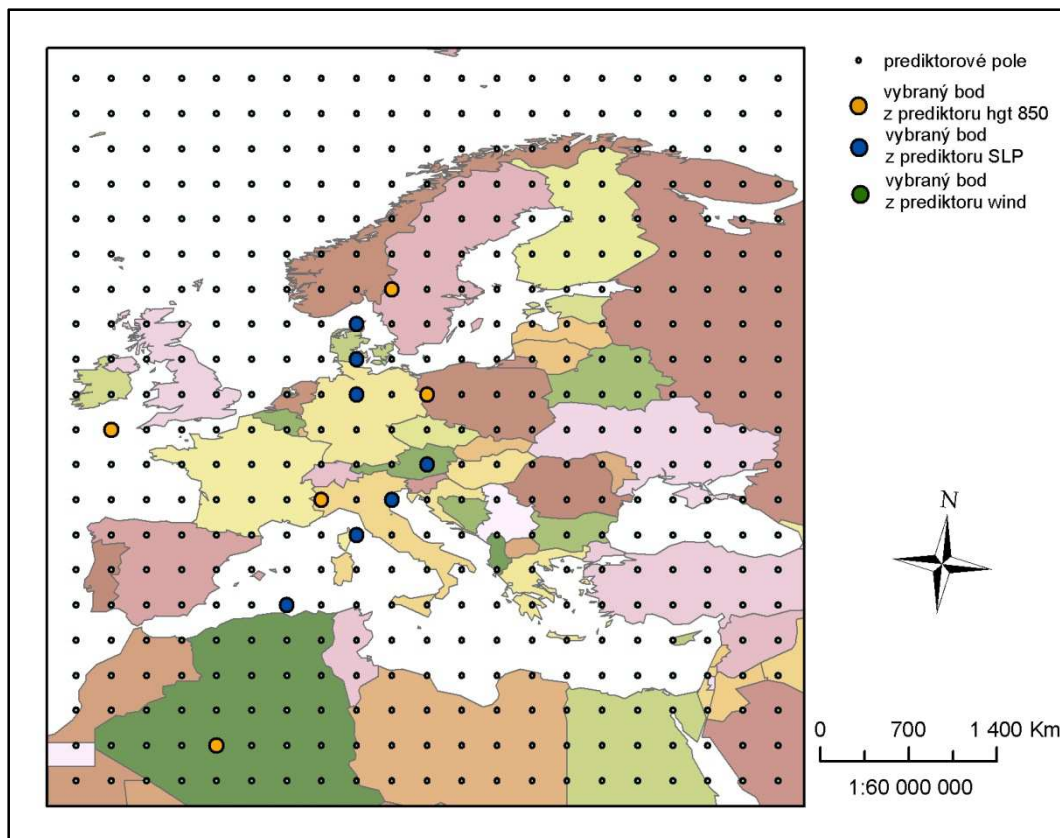
6.2. RYCHLOST VĚTRU

V případě hodnocení downscalingu rychlosti větru jsou výsledky odlišné od hodnocení složek větru. Již v kapitole výsledky zmíněný prediktor wind, který dosahuje nejvyšších korelací. To odporuje zjištěním z hodnocení složek větru, kde tento prediktor neposkytl lepší výsledky. Naopak při porovnání korelačních koeficientů simulovaných a naměřených hodnot pro rychlost větru lze prediktor wind považovat za optimální volbu. Pro názornější porovnání byl vytvořen graf 5, pro který byla opět zvolena kombinace prediktorů SLP + hgt 850. Na první pohled je z grafu zřejmé, že prediktor wind poskytuje hodnotu korelačního koeficientu pro všechny stanice vyšší, v některých případech je rozdíl až dvě desetiny.

Graf 6 je opět s výsledkem z přepočtených hodnot z downscalingu prediktoru SLP + hgt 850 srovnatelný. Zarážející tedy je, proč je kombinace prediktoru SLP + hgt 850 v přímém downscalingu rychlosti větru o tolik horší. Na obrázcích 10, 11 a 12 je zobrazené rozmístění vybraných prediktorů z prediktorového pole pro prediktor SLP + hgt 850 pro vybrané stanice Churáňov, Ruzyně a Milešovka. Zejména první dvě jmenované stanice dávají tušit mnohem větší prostorový rozsah vybraných uzlových bodů. V případě downscalingu rychlosti větru je tedy brán vliv z většího prostoru v okolí stanice. To zřejmě dává předpoklad

vyrovnanějším hodnotám mezi stanicemi, nicméně celkově výsledek regresního modelu zhoršuje. Navzdory tomu však tato varianta poskytuje lepší výsledky co se týče odchylek odhadovaných a pozorovaných hodnot. Graf 7 skutečně zobrazuje u většiny stanic tento

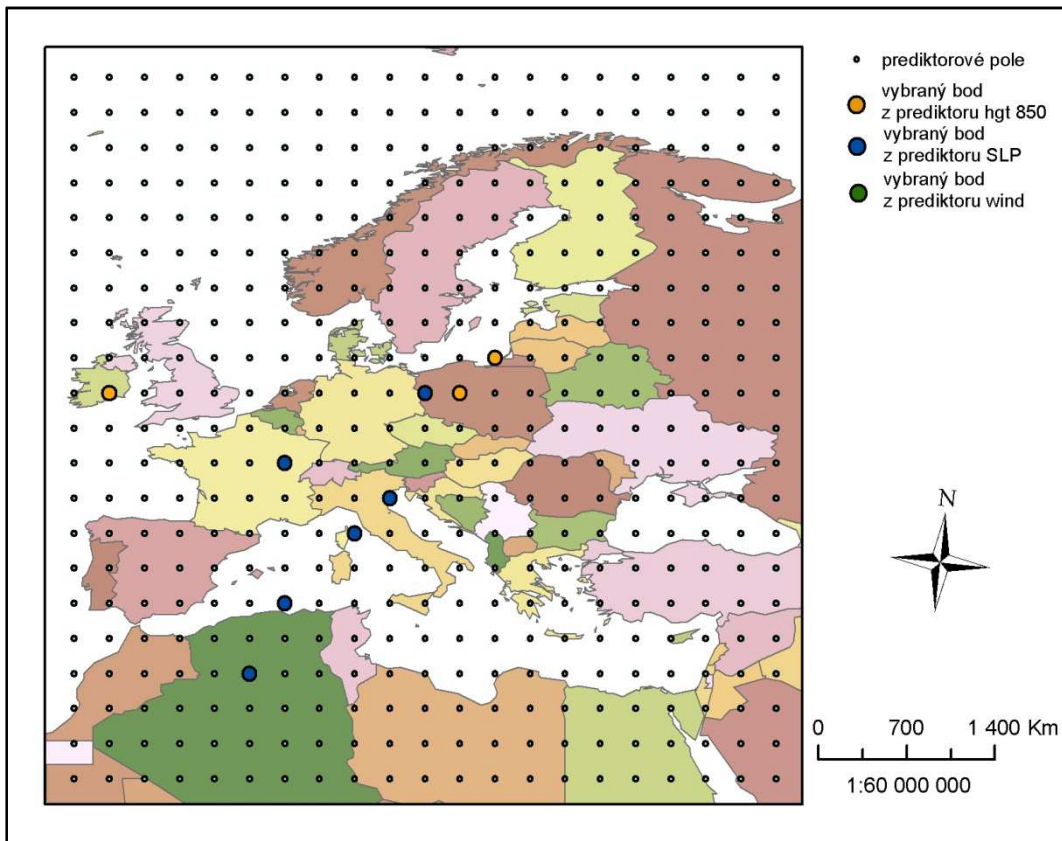
Obrázek 10 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Churáňov (rychlost větru)



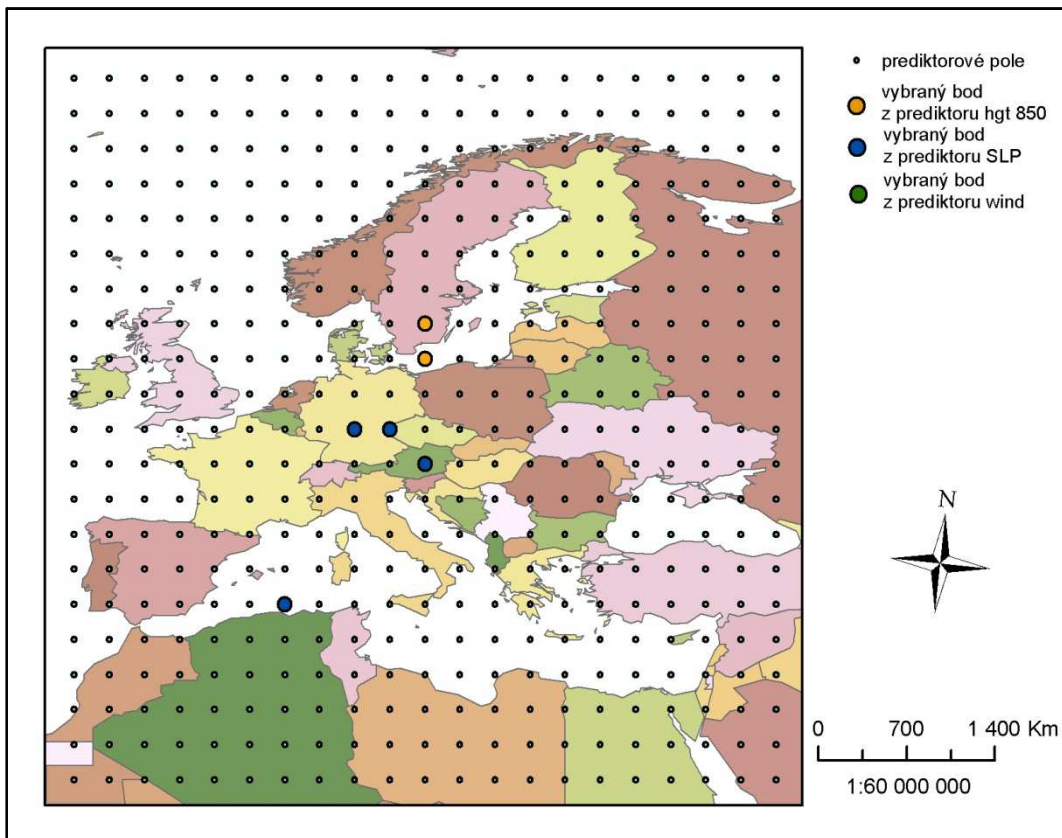
prediktor jako nejvhodnější, neboť dosahuje nejnižších odchylek. Velká oblast, z níž data vstupují do modelu, tedy nemusí znamenat nutně horší výsledek ve všech ohledech.

Přesně opačný výsledek přináší hodnocení prediktoru wind. Na obrázcích 13, 14 a 15 jsou opět zobrazeny vybrané prediktory z prediktorového pole pro prediktor wind na stanicích Churáňov, Ruzyně a Milešovka. Také v těchto modelech je patrný větší prostorový rozptyl prediktorů. I přes velmi dobré výsledky násobné lineární regrese tohoto prediktoru však v porovnání s hodnotami korelačních koeficientů z metody výpočtu rychlosti větru ze složek větru zřejmě nelze hovořit o zcela nejlepší volbě. I po přepočtu rychlosti větru ze simulovaných složek větru dávají po downscalingu tyto prediktory lepší nebo srovnatelné výsledky. Navíc však metoda přímého downscalingu rychlosti větru z prediktoru wind podává mezi stanicemi méně vyrovnané hodnoty průměrných reziduí a na některých stanicích

Obrázek 11 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Ruzyně (rychlost větru)



Obrázek 12 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Milešovka (rychlost větru)

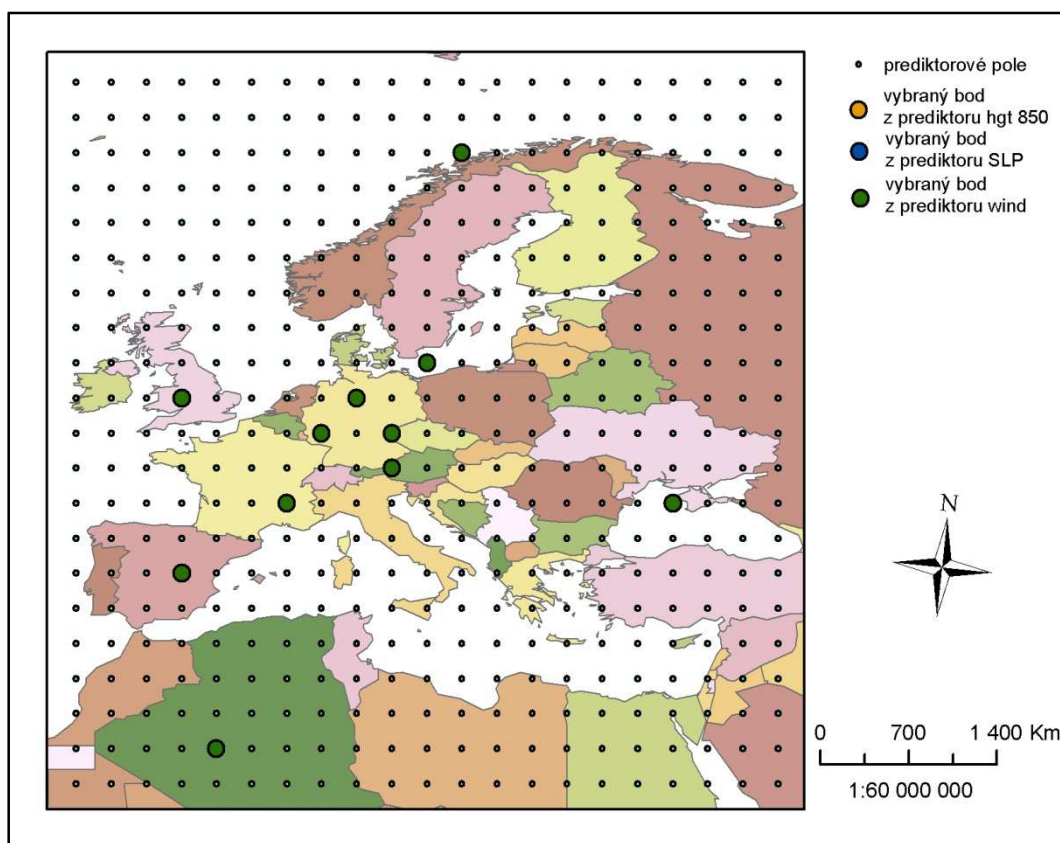


(Milešovka, Svratouch) nejvyšší odchylky předpověděných a naměřených rychlostí větru (graf 7).

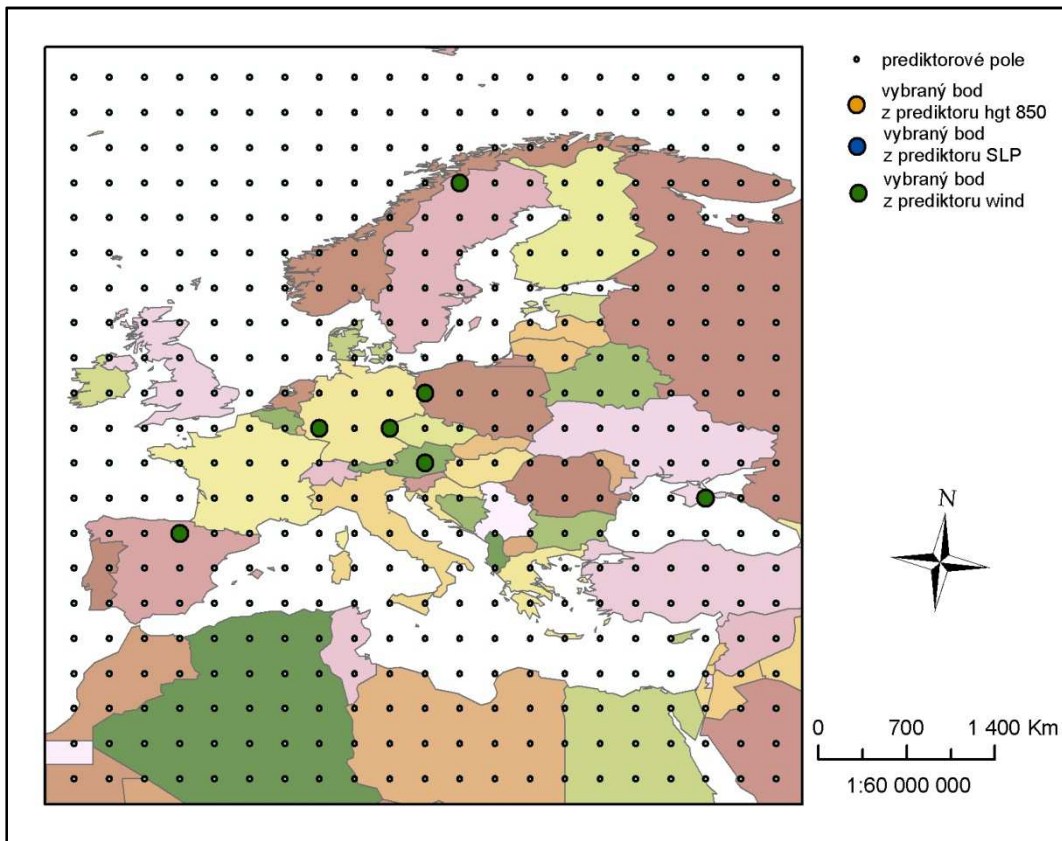
Jediným případem, kdy je tato metoda zjevně účinná a výrazně poráží ostatní metody, je stanice Kostelní Myslová. Tato stanice má celkově odlišné výsledky od ostatních, dále je zde velký rozdíl v úspěšnosti modelování mezi složkami větrnu a rychlostí větru. Na této stanici je určitě lepší přistupovat k downscalingu přízemního větru přes rychlost větru

Celkově však lze pro přístup k downscalingu rychlosti větru bez rozlišení jeho směru lépe hodnotit metodu přepočtu ze složek větru, která poskytuje lepší nebo srovnatelné výsledky, navíc mezi jednotlivými stanicemi více vyrovnané.

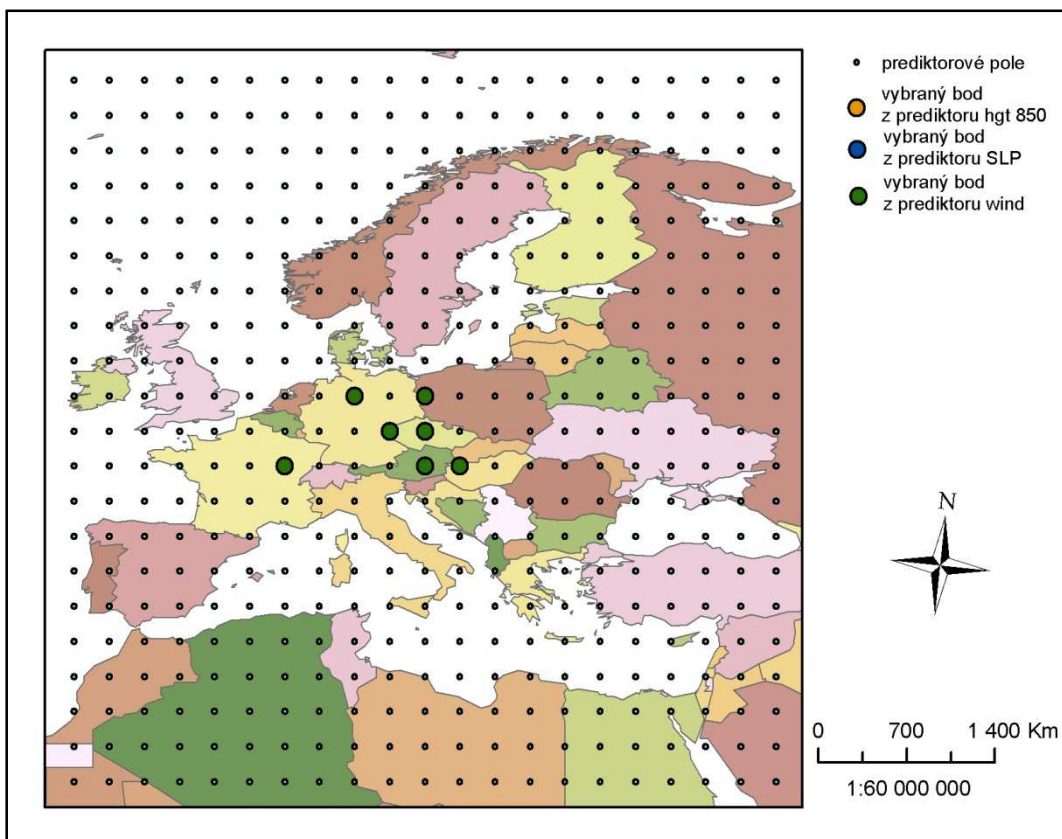
Obrázek 13 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Churáňov (rychlost větru)



Obrázek 14 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Ruzyně (rychlost větru)



Obrázek 15 Pozice vybraných prediktorů pro stanici Milešovka (rychlost větru)



7. ZÁVĚR

Zhodnocení předešlých kapitol lze uzavřít do několika bodů.

Ze všech testovaných prediktorů lze pro downscaling složek přízemního větru na území České republiky jako nejlepší vyhodnotit kombinaci prediktorů SLP + hgt 850, které s výjimkou jedné stanice poskytují dobré výsledky. Na některých stanicích, především těch umístěných v terénních depresích, byl doložen vliv konfigurace reliéfu na přízemní vítr. Tento vliv byl již dokumentován v několika předchozích studiích.

Násobná lineární regrese je podle dosažených výsledků vhodnou metodou pro downscaling přízemního větru na území České republiky. Podle hodnot dosažených výsledků nelze očekávat výrazně lepší výsledky použitím jiných metod. Případné další metody výpočtu by mohly být námětem pro další výzkum v této oblasti a případně by mohly poskytnout vysvětlení pro situaci na stanici Kostelní Myslová.

Pro downscaling rychlosti přízemního větru na území České republiky lze za lepší metodu považovat downscaling jednotlivých složek větru a následně jejich přepočet na celkovou rychlost větru.

Další možnosti výzkumu v této oblasti mohou být orientovány především na ověření případných nelineárních vztahů a též je možné tuto metodiku dále rozvíjet pro možnou simulaci přízemního větru na území České republiky do budoucnosti aplikací výsledných simulací na data z globálního klimatického modelu. Tento postup má předpoklady predikovat přízemní vítr v České republice, ať již s přihlédnutím na vývoj zásob větrné energie, tak na případné extrémní jevy větru.

8. ZDROJE

8.1. LITERATURA

- Badger, M., Badger, J., Nielsen, M., Hasager, Ch. B., Peña, A. (2010): *Wind Class Sampling of Satellite SAR Imagery for Offshore Wind Resource Mapping*. Journal of Applied Meteorology and Klimatology, 49: 2474-2491.
- Benestad, R. E., Hanssen-Bauer, I., Chen, D. (2008): *Empirical-Statistical downscaling*. World Scientific.
- Bergès, J. C., Chopin, F., Bessat, F. (2005): *Satellite based downscaling algorithm for rainfall estimation*. Colóquio Brasileiro de Ciências Geodesicas - IV CBCG, 16-20.
- García-Bustamante, E., et. al. (2012): *North Atlantic atmospheric circulation and surface wind in the Northeast of the Iberian Peninsula: uncertainty and long term downscaled variability*. Clim Dyn, 38:141–160.
- Giorgi, F., Mearns, L. O. (1991): *Approaches to the simulation of regional climate change: A review*. Reviews of Geophysics, 29, 2 :191-216.
- Goubanova, K., et. al. (2011): *Statistical downscaling of sea-surface wind over the Peru–Chile upwelling region: diagnosing the impact of climate change from the IPSL-CM4 model*. Clim Dyn, 36:1365–1378.
- Hessami, M., Ouarda, T. B. M. J., Gachon, P., St-Hilaire, A., Selva, F., Bobee, B.,(2004): *Evaluation of statistical downscaling method over several regions of eastern Canada*. 57th Canadian water resources association annual congress.
- Huth, R. (1999): *Statistical downscaling in central Europe*. Climate Research, 13, 91-101.
- Huth, R. (2002): *Statistical Downscaling of Daily temperature in Central Europe*. J. Climate, 15, 1731-1742.
- Kalnay et al., *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470, 1996.
- Kim, J.W., Chang, J.T., Baker, N.L., Wilks, D.S., Gates, W.L. (1984): *The statistical problem of climate inversion: determination of the relationship between local and large-scale climate*. Monthly Weather Review 112, 2069–2077.
- Klein, W. H. (1948): *Winter precipitation as related to the 700-milibar circulation*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 9, 439-453.
- Klein, W.H., Bloom, H.J. (1987): *Specification of monthly precipitation over the United States from the surrounding 700 mb height field*. Monthly Weather Review 115, 2118-2132.

- Maraun, D., et. al. (2010): *Precipitation downscaling under climate change: recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user*. Rev. Geophys., 48, RG3003.
- Martin, D. E., Hawkins, H. F. (1950): *Forecasting the weather, the relationship of temperature and precipitation over the United States to the circulation aloft*. Weatherwise, 3, 89-92, 113-116, 138-141.
- Mengelkamp, H. T., Kapitza, H., Pflüger, U. (1997): *Statistical-dynamical downscaling of wind climatologies*. J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67-68, 449-457.
- Michaelsen, J. (1987): *Gross-Validation in Statistical Climate Forecast Models*. Journal of climate and applied meteorology, 26: 1589-1600.
- Nawri, N., Harstveit, K. (2012): *Variability of surface wind directions over Finnmark, Norway, and coupling to the larger-scale atmospheric circulation*. Theor Appl Climatol, 107:15–33.
- Phillips, N. A. (1956). *The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 82 (352): 123–154.
- Pryor, S. C., J. T. Schoof, and R. J. Barthelmie (2005). *Empirical downscaling of wind speed probability distributions*. J. Geophys. Res., 110, D19109, doi:10.1029/2005JD005899.
- Salameh, T., Drobinski, P., Vrac, M., Naveau, P. (2009): *Statistical downscaling of near-surface wind over complex terrain in southern France*. Meteorol Atmos Phys 103, 253–265.
- Stone, M. (1974): *Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions*. J.R. Statist. Soc. B36, 111-147.
- Timbal, B., Fernandez, E., Li, Z. (2008): *Generalization of a statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia*. Environ. Modell. Softw., 24,342-358.
- Troen, I., E. L. Petersen (1989): *European Wind Atlas*. Risø National Laboratory, 656 pp.
- von Storch, H. (1999): *On the use of "inflation" in statistical downscaling*. J Climate, 12 , 3505 - 3506.
- von Storch, H., Hewitson, B., Mearns, L. (2000): *Review of empirical downscaling techniques, in Regional Climate Development Under Global Warming*. Eds. Iversen, T., B. A. K. Høiskar, General Technical Report 4, 2000.
- Wilby, R. L., Wigley, T. M. L. (1997): *Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations*. Prog. Phys. Geogr., 21, 530-548.

Wilby, R.L., Dawson, C. W., Barrow E. M. (2002): *SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts*. Environmental Modelling & Software, 17, 147– 159.

8.2. DATOVÉ ZDROJE

ČHMÚ (2011): Klimatická měření. Data o přízemním větru z 18 meteorologických stanic.

ARCDATA Praha (2006): Vektorová mapa České republiky 1 : 500000, arccr500,

ARCDATA Praha, s. r. o.

ESRI (2008): Europe countries, 1:15 000 000.

NCEP/NCAR (2011): *Údaje o volné atmosféře*. NCEP/NCAR Reanalysis. Staženo 20.5.2012, zdroj: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep/>.

9. SEZNAM PŘÍLOH

9.1. OBRÁZKY

Obrázek 1	Prostorové rozložení uzlových bodů klimatického modelu.....	15
Obrázek 2	Poloha pozemních stanic ČHMÚ	18
Obrázek 3	Vynechané prediktory v prediktorovém poli	22
Obrázek 4	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Milešovka (složka U).....	37
Obrázek 5	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Milešovka (složka V).....	37
Obrázek 6	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Svratouch (složka U)	38
Obrázek 7	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Svratouch (složka V)	38
Obrázek 8	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Lysá hora (složka U).....	39
Obrázek 9	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Lysá hora (složka V).....	40
Obrázek 10	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Churáňov (rychlost větru).....	41
Obrázek 11	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Ruzyně (rychlost větru)	42
Obrázek 12	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Milešovka (rychlost větru).....	42
Obrázek 13	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Churáňov (rychlost větru).....	43
Obrázek 14	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Ruzyně (rychlost větru)	44
Obrázek 15	Pozice vybraných prediktorů pro stanici Milešovka (rychlost větru).....	44

9.2. TABULKY

Tabulka 1	Závislost složek větru U a V na jednotlivých stanicích v jižní Francii.....	13
Tabulka 2	Seznam pozemních stanic	17
Tabulka 3	Výsledky korelačních koeficientů pro stanici Svratouch.....	23
Tabulka 4	Ukázka pozorovaných a simulovaných hodnot.....	24
Tabulka 5	Korelační koeficienty testovaných prediktorů pro složky U a V	26
Tabulka 6	Korelační koeficienty pro rychlost větru.....	31

9.3. GRAFY

Graf 1	Korelační koeficienty dvou vybraných prediktorů	27
Graf 2	Korelační koeficienty po úpravě vstupních parametrů	28
Graf 3	Průměrné hodnoty reziduí dvou vybraných prediktorů (m/s).....	29
Graf 4	Průměrné rychlosti složek větru na pozorovaných stanicích (m/s).....	29

Graf 5 Korelační koeficienty vybraných prediktorů	32
Graf 6 Korelační koeficienty vybraných prediktorů pro downscaling rychlosti větru po úpravě parametrů a metody výpočtu rychlosti větru ze složek větru	33
Graf 7 Průměrné odchylky z nejlepších prediktorů a vypočtených rychlostí (m/s).....	34
Graf 8 Průměrná rychlost větru na sledovaných stanicích (m/s).....	34