

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

katedra fyzické geografie a geoekologie



DLOUHODOBÉ TRENDY RYCHLOSTI VĚTRU V ČECHÁCH

Long-term trends of wind velocity in Bohemia

Bakalářská práce

Jan Stryhal

Květen 2010

Vedoucí práce: RNDr. I. Sládek, CSc.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citoval.

Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Havlíčkově Brodě dne 10. května 2010

.....

Jan Stryhal

Poděkování

Děkuji svému školiteli, panu RNDr. Ivanu Sládkovi, CSc., za vedení a cenné připomínky při vypracování této práce.

Děkuji Mgr. Ondřeji Ledvinkovi za formální připomínky k textu.

Děkuji Českému hydrometeorologickému ústavu, Ústavu fyziky atmosféry AV ČR a Klimatologickému ústavu Wroclawské univerzity za laskavé poskytnutí dat, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

Dlouhodobé trendy rychlosti větru v Čechách

Abstrakt

Hlavním cílem této práce je analýza dlouhodobých trendů rychlosti větru na vybraných meteorologických stanicích. V úvodní části je věnována pozornost některým teoretickým aspektům proudění vzduchu a také dostupné literatuře, která se zabývá otázkou zákonitostí chodu a dlouhodobých trendů rychlosti větru, zejména na území České republiky. Těžištěm práce je analýza tří časových řad rychlosti větru stanic Milešovka, Szrenica (Polsko) a radiosondážní stanice v Praze-Libuši z tlakové hladiny 850 hPa, zahrnující hodnocení denního a ročního chodu rychlosti větru, trvání různých rychlostí větru, a především dlouhodobých trendů rychlosti větru. Trendy jsou odhadnuty z řad ročních, sezónních i krátkodobých průměrů, jsou statisticky testovány a zvláštní pozornost je věnována i jejich porovnání s dlouhodobými změnami pozorovanými v kalendářích synoptických situací české a německé meteorologické služby. Součástí práce je i test homogenity použitých dat.

Klíčová slova: rychlost větru, dlouhodobé trendy, analýza časových řad, klimatické změny

Long-term trends of wind velocity in Bohemia

Abstract

The main objective of this study is to evaluate the long-term trends of wind velocity at selected meteorological stations. In the first part, some theoretical aspects of wind and present-day knowledge of wind in the area of the Czech Republic are being explored. The main part is composed of wind velocity analysis based upon time series of Czech Milešovka station and Praha-Libuš radio station and Polish Szrenica station placed near the Czech-Polish border in the Giant Mountains. Trends of wind velocity are estimated from annual, seasonal and short-term averages, their significance is tested and they are compared to long-term change in frequency of cyclonic and anticyclonic synoptic situations. Homogeneity of used data is tested.

Keywords: wind velocity, long-term trends, time series analysis, climate change

OBSAH

1	Úvod	6
1.1	Trendy rychlosti větru a jejich souvislosti s globálními změnami klimatu	8
2	Charakteristika proudění vzduchu v České republice	10
2.1	Zákonitosti vzdušného proudění	10
2.2	Proudění vzduchu ve volné atmosféře	11
2.3	Průměrné pole přízemního větru	12
2.4	Chod rychlosti větru	12
2.4.1	<i>Denní chod rychlosti větru</i>	13
2.4.2	<i>Roční chod rychlosti větru</i>	14
2.5	Vertikální profil větru	14
2.6	Dlouhodobé trendy rychlosti větru v České republice	15
2.7	Reprezentativnost a homogenita větroměrných dat	16
2.8	Kalendáře synoptických situací	17
3	Testované časové řady a použité metody	20
3.1	Časové řady	20
3.1.1	<i>Milešovka</i>	20
3.1.2	<i>Szrenica</i>	22
3.1.3	<i>Praha-Libuš</i>	22
3.2	Použité metody	22
3.2.1	<i>Test homogenity</i>	22
3.2.2	<i>Denní a roční chod rychlosti větru</i>	22
3.2.3	<i>Histogram rychlosti větru</i>	23
3.2.4	<i>Trendy ročních průměrů</i>	23
3.2.5	<i>Sezónní chod trendů</i>	23
3.2.6	<i>Roční chod trendů pro klouzavá 60denní období</i>	23
3.2.7	<i>Trendy výskytu vysokých rychlostí větru</i>	24
4	Analýza časových řad rychlosti větru	25
4.1	Test homogenity	25
4.2	Analýza denního a ročního chodu rychlosti větru	27
4.2.1	<i>Denní chod rychlosti větru</i>	27
4.2.2	<i>Roční chod rychlosti větru</i>	28
4.2.3	<i>Histogram rychlosti větru</i>	29
4.3	Analýza dlouhodobých trendů rychlosti větru	30
4.3.1	<i>Kolísání ročních průměrů</i>	30
4.3.2	<i>Sezónní kolísání denních maxim a minim a absolutních maxim</i>	33
4.3.3	<i>Trendy rychlosti větru pro klouzavá 60denní období</i>	37
4.3.4	<i>Trendy vysokých rychlostí větru</i>	39
5	Diskuse	40
6	Závěr	43
	Seznam použité literatury a internetových zdrojů	44
	Seznam obrázků	47
	Seznam příloh	48

Kapitola 1

Úvod

Předkládaná práce se zabývá v první řadě analýzou časových řad rychlosti větru na třech vybraných meteorologických stanicích. Využívá k tomu metod hodnocení denního a roční chodu rychlosti větru, svou hlavní pozornost však koncentruje na analýzu dlouhodobých trendů rychlosti větru. K hodnocení trendů využívá různě dlouhá období – jako základ jsou použity roční průměry, k detailnějšímu vzhledu do rozložení trendů během roku potom slouží analýza sezónních průměrů a průměrů za klouzavá 60denní období. Přestože hodnocení extrémů na základě termínových měření není ideální, budou sledovány i trendy průměrných denních maximálních a minimálních hodnot rychlosti větru, sezónních maximálních nárazů větru a četnosti výskytu vysokých rychlostí větru (spadajících dle Beaufortovy stupnice síly větru do kategorií vichřice a výše).

Použité metody jsou čerpány převážně z českých odborných studií, zabývajících se trendy klimatických prvků (např. Sobíšek, 2000; Moliba et al., 2006), případně jsou vhodně upraveny pro účely hodnocení rychlosti větru a také s ohledem na charakter časových řad. Před samotným hodnocením časových řad je otestována jejich homogenita pomocí testu doporučeného Drozdovem et al. (1989).

Součástí této práce je i stručný popis základních fyzikálních zákonitostí vzdušného proudění ve volné atmosféře a v mezní vrstvě atmosféry a shrnutí současného poznání chodu a dlouhodobých trendů rychlosti větru na území České republiky.

Vítr je jedním ze základních meteorologických prvků a jako takový je důkladně sledován na meteorologických stanicích. Hlavní využití poznatků o chodu dvou základních charakteristik větru – rychlosti a směru – je v oblasti předpovědi počasí. Dlouhé časové větroměrné řady ale (především v dnešní době výkonné výpočetní techniky) umožňují sledovat kromě krátkodobých výkyvů také dlouhodobé trendy rychlosti a směru větru. Tyto trendy lze využít při hledání odpovědi na otázku, zda se během sledovaného období mění klimatické podmínky konkrétního místa. Významným důvodem pro studium zákonitostí vzdušného proudění v mezní vrstvě atmosféry je v dnešní době také stále hojnější využívání energie větru. Právě měření v blízkosti zemského povrchu jsou cenná z hlediska poznatků využitelných pro větrnou energii a také poznání účinků větru na zemský povrch (antropogenní i přírodní objekty), nicméně právě tato měření jsou zatížena „chybou“ vyplývající z povahy proudění vzduchu v mezní vrstvě atmosféry.

Volba časových řad pro tuto práci byla mj. vedena snahou eliminovat na minimum možné místní vlivy na charakter proudění vzduchu. Byly vybrány dvě horské stanice (Milešovka, Szrenica), jejichž výhoda je v minimálním ovlivnění časových řad urbanizačními efekty, zároveň tyto vysoko položené stanice poměrně dobře reprezentují proudění ve volné atmosféře (Weber, 1997). Kromě toho byla využita časová řada rychlosti větru z aerologických měření prováděných na stanici Praha-Libuš v hladině 850 hPa, což zhruba odpovídá výšce 1500 m n. m. V této výšce je již vliv zemského povrchu na proudění (s výjimkou silně instabilního zvrstvení atmosféry) zanedbatelný a skutečný vítr se svými parametry významně blíží větru geostrofickému. Délka časových řad je bohužel u těchto tří stanic rozdílná, ve všech případech však alespoň 30letá a navzájem se z části překrývají. Tato skutečnost nicméně významně ovlivňuje možnost porovnání trendů i použité metody. Autor si je vědom, že zahrnutí zahraniční meteorologické stanice je při hodnocení trendů meteorologických prvků na území ČR neobvyklé, nicméně stanice Szrenica leží v Krkonoších v bezprostřední blízkosti česko-polské státní hranice a svou polohou a blízkostí oběma českým hodnoceným stanicím je dostatečně reprezentativní pro účely této práce.

Pozornost věnovaná trendům větru v odborné literatuře zcela jistě nedosahuje pozornosti, která se klade dlouhodobým změnám některých dalších meteorologických prvků – především teploty vzduchu a srážek, a dále oblačnosti a délce slunečního svitu (Huth, Pokorná, 2004). Příčin této skutečnosti je zcela jistě více, jednou z nich je jistě fakt, že analýzy právě výše zmíněných prvků poskytují většinou (statisticky) významné výsledky korelující s probíhajícími změnami globálního klimatu. V tomto směru si práce klade za cíl rozšířit okruh studií zaměřených na trendy v dlouhodobých řadách větroměrných dat.

Klimatické změny jsou v posledních několika letech stále častěji diskutovanou záležitostí, na úrovni vědecké, popularizační, laické, ale i politické – především na posledních dvou úrovních se šíří řada desinterpretací, mýtů a katastrofických scénářů budoucího vývoje. Proto součástí této práce je i stručné zhodnocení současného poznání klimatických změn a především úlohy, jakou by v nich měly sehrát právě změny rychlosti větru. Ve studiích hodnotících klimatické změny je problematika větru velmi upozaděna a je o ní referováno většinou pouze nepřímo (v souvislosti s extrémními povětrnostními jevy).

Jako o nedílné součásti globální změny klimatu je referováno o změnách v charakteru proudění vzduchových mas nad určitým regionem. Tyto změny lze doložit například současným sledováním sezónních či ročních průměrů časových řad několika meteorologických prvků. V současnosti se běžně mluví o zesilování cyklonality v chladném půlroce a naopak jejím oslabování v létě. Tento trend se projevuje mj. růstem průměrných zimních teplot a podílu zimních srážek, růstem oblačnosti na podzim či naopak slunečního svitu v létě. Vzhledem k tomu, že vyšší rychlosti větru jsou dosahovány v době, kdy význam barické složky proudění převyšuje význam složek termické a terénní (viz např. Brázdil et al., 1999), lze vyslovit hypotézu, že existuje poměrně úzký vztah mezi průměrnou rychlostí větru vyjádřenou sezónním či ročním středním stavem a relativní četností výskytu cyklonálních synoptických situací.

Pro účely synoptické meteorologie i dynamické klimatologie se již řadu desetiletí konstruuji kalendáře synoptických situací, ve kterých je každý den přiřazen do určité třídy na základě aktuální povětrnostní situace. Na základě (Cahynová, Huth, 2007) lze v případě typologie používané ČHMÚ pro území Česka každou vzorovou situaci označit jako cyklonální (celkově 13 typů) či anticyklonální (13 typů), výjimečně jako přechodnou (2 typy). Německá povětrnostní služba (Deutscher Wetterdienst) publikuje dva kalendáře. Kalendář objektivní Wetterlagenklassifikation rozeznává 4 kategorie dle cyklonality v hladinách 950, resp. 500 hPa (celkem 40 typů). Subjektivní klasifikace „Großwetterlagen Europas“ (kalendář na ní postavený začíná v roce 1881) rozlišuje 29 typů (po 10 cyklonálních a anticyklonálních, 9 bez vyjádřené cyklonality) a jeden přechodný (nezařazený). Ve všech případech je tak možné určit poměr četnosti výskytu cyklonálních a anticyklonálních situací a jeho trend a tento porovnat se zjištěnými průměry rychlosti větru. Trendy cyklonality zjištěné na základě online dat tří zmíněných kalendářů jsou popsány v kapitole 2.8.

Data pro účely této práce byla laskavě zapůjčena Českým hydrometeorologickým ústavem (dále ČHMÚ), Ústavem fyziky atmosféry Akademie věd ČR (dále ÚFA AV ČR) a Klimatologickým ústavem Wroclawské univerzity (dále KÚWU). Kalendáře synoptických situací jsou volně k dispozici na stránkách ČHMÚ a Německé povětrnostní služby.

1.1 Trendy rychlosti větru a jejich souvislosti s globálními změnami klimatu

Globální změny klimatu jsou v dnešní době jedním z nejčastěji skloňovaných fenoménů odehrávajících se v přírodě. Většina autorů, kteří se zabývají ve svých studiích dlouhodobými trendy meteorologických prvků, zasazuje nějakým způsobem prokázané trendy do souvislostí klimatických změn.

Mnoho současných studií se zabývá otázkou trendů teplot a srážkových úhrnů a jejich dopady na hospodaření člověka. Právě zvyšování globální teploty je pravděpodobně nejsledovanějším (minimálně veřejností) aspektem klimatických změn; klade se především do souvislosti se zvyšováním koncentrací skleníkových plynů – zejména oxidu uhličitého a vodní páry – v atmosféře (Chládová, Kalvová, 2005). Samotný pojem „změny klimatu“ („climate change“) nabývá v současnosti různých významů. Přírodovědec za tímto termínem vidí jakoukoli probíhající změnu klimatu, resp. klimatického systému, bez rozlišení jejího činitele; oproti tomu např. Rámcová úmluva OSN o změně klimatu považuje za změnu klimatu pouze změnu přičítanou přímo či nepřímo lidské činnosti měnící složení atmosféry, která je přídatkem k přirozené variabilitě klimatu (IPCC, 2007).

Změny globálního klimatického systému se neobejdou bez vlivu na lidskou činnost, a proto se značná pozornost věnuje opatřením, které tyto vlivy zmírní. Příkladem může být např. Zelená kniha „Adaptace na klimatickou změnu v Evropě – možnosti pro postup EU“. Změny klimatu se

projeví rozličným způsobem a s různou intenzitou v různých částech Země. Pro Českou republiku identifikoval ČHMÚ (2007) následující nepříznivé účinky klimatických změn:

- nárůst četnosti a intenzity výskytu extrémních povětrnostních jevů (povodně, bouřky, vlny extrémních teplot (vysokých i nízkých), malá tornáda),
- nejvýznamnější změny nastanou v dlouhodobém rozložení teplot a srážek (zvýšení průměrné teploty, úbytek srážek v teplém půlroce, úbytek dnů se sněžením a výskytem sněhové pokrývky).

O dlouhodobých změnách větru se tedy přímo v prognózách budoucího vývoje klimatu nemluví, velká pozornost se ale klade na výskyt extrémních povětrnostních situací; právě jejich nedílnou součástí jsou většinou i výjimečné projevy větru. Ty hrají důležitou roli při řadě procesů, např. větrná eroze (z pohledu hospodaření člověka negativně se projevující např. odnosem ornice či poškozováním povrchu staveb unášeným materiálem), desertifikace, eroze na pobřežích v důsledku bouří (vč. intenzivnějších a čtenějších tropických bouří) aj. Z hlediska požadavků technické klimatologie má silný vítr význam hlavně pro své tlakové účinky na terénní předměty a stavby (Sobíšek, 2000) a jako takový může způsobit destrukci produktů stavebního inženýrství, ale i zemědělství, lesnictví atd. Mnohé současné studie v rámci posuzování časových větroměrných řad právě proto věnují zvýšenou pozornost trendům výskytu vysokých rychlostí větru.

Dle Brázdila (2002) může pokračování antropogenně podmíněného procesu globálního oteplování výrazně ovlivnit změny ve výskytu, intenzitě a dopadech meteorologických extrémů, nicméně poznatky o vývojových trendech extrémů v České republice zatím nejsou jednoznačné. Pro získání uspokojivých odpovědí o širokých souvislostech globálního oteplování s meteorologickými extrémami bude nutné nejprve zkvalitnit existující datové základny „zejména se zřetelem na homogenitu a délku řad“ (Brázdil, 2002, s. 365).

Kapitola 2

Charakteristika proudění vzduchu v České republice

2.1 Zákonitosti vzdušného proudění

Prvotní příčinou přemísťování vzdušných částic v atmosféře je nerovnoměrné dotování zemského povrchu sluneční radiací, vedoucí k vytváření horizontálních tlakových gradientů. Změna tlaku vzduchu v horizontálním směru je jedinou dynamickou příčinou větru. Pokud by neexistovala žádná další síla působící na vzdušné částice, pohybovaly by se ve směru tlakového gradientu a rozdílly v tlaku vzduchu by byly rychle vyrovnávány. Ve skutečnosti jakmile je částice uvedena do pohybu, začne na ni působit Coriolisova síla – uchylující síla zemské rotace – která mění směr pohybu a zpomaluje vyrovnávání tlakových rozdílů v atmosféře. Velikost horizontální složky Coriolisovy síly¹ se mění v přímé úměře zeměpisné šířce (Štekl, 1996).

Proudění ve volné atmosféře, jehož podoba je dána především interakcí sil tlakového gradientu a Coriolisovy síly, je možné v hrubých rysech popsat jako geostrofické nebo gradientové (cyklostrofické) proudění. Pro geostrofické proudění se předpokládá nulové zrychlení a rovnováha sil Coriolisovy a tlakového gradientu. Vítr vane podél rovnoběžně uspořádaných izobar (na S polokouli směrem takovým, že nižší tlak vzduchu se nachází po levé straně) a nepůsobí tak vyrovnání tlakových rozdílů. Druhou aproximací proudění ve volné atmosféře je vítr gradientový, popisující idealizovaný pohyb částice vzduchu po zakřivené dráze (kruhu), tedy v cykloně či anticykloně. I v tomto případě směřuje vítr podél izobar a nevyrovnává tak tlakové rozdílly (Vysoudil, 2000). Ačkoli ani jedna z uvedených aproximací nevystihuje proudění ve volné atmosféře přesně, tak v případě, že je pole větru a tlaku vzduchu ve volné atmosféře výrazně odlišně uspořádané, proběhne rychlá přestavba obou polí během relativně krátkého intervalu (1–2 hodiny) do podoby blízké geostrofickému proudění (Bednář, Zikmunda, 1985).

V blízkosti zemského povrchu se na charakteru proudění významným způsobem podílí síla tření. Působí proti směru pohybu vzduchu a je vyvolána třením proudícího vzduchu o zemský povrch (vnější tření) a třením uvnitř vzduchu (vnitřní tření). Vrstva vzduchu, ve které se projevuje tření, se nazývá mezní vrstva atmosféry (vrstva tření; dále také MVA). MVA nabývá různé mocnosti v závislosti na drsnosti povrchu, rychlosti proudění a instabilitě zvrstvení atmosféry. Tloušťka MVA tak může nabývat hodnot od zhruba 100 do 300 m v zimě po více než

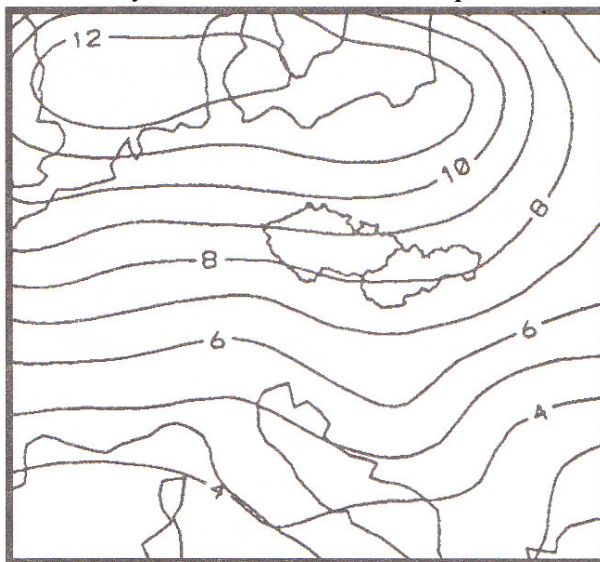
¹ vertikální složka Coriolisovy síly je prakticky zanedbatelná, protože její velikost je o čtyři řády menší než velikost zemské tíže

1500 m v létě (AVIMET). Výsledné pole přízemního větru na konkrétním místě je potom spojuováno třemi složkami – složkou barickou (určena rozložením tlakových útvarů v širokém okolí), termickou (charakteristická tepelná a radiační bilance zemského povrchu daného místa) a terénní (Sobíšek, 2000).

2.2 Proudění vzduchu ve volné atmosféře

Výsledky sondážního měření v Praze-Libuši z tlakové hladiny 850 hPa lze dle Sládka (2001) v hrubých rysech považovat za reprezentativní pro celé Čechy. Z tohoto měření, které je v ČR unikátní, plyne, že ve volné atmosféře se dominantně uplatňuje zonální proudění vzduchu západního (a přílehlých) směrů, pro které jsou zároveň typické nejvyšší průměrné rychlosti (cca 11 m/s; při nerozlišeném směru je celoroční průměr přibližně 9 m/s). Vzhledem k charakteru proudění ve volné atmosféře je pro rychlost větru rozhodující síla tlakového gradientu (barická složka proudění vzduchu).

Obr. 1 – Průměrná rychlost větru ve výšce 800 m n. m. v chladném půlroce



Poznámky: Rychlosti jsou uvedeny v m/s.

Zdroj: Štekl, 1996

Pro proudění ve volné atmosféře platí nad územím ČR pokles rychlosti od severu k jihu o zhruba $0,5 \text{ m} \times \text{s}^{-1} / 100 \text{ km}$ (v zimním období, ve výšce 800 m, podél 15. poledníku), v létě je tento gradient menší (Štekl, 1996), viz obr. 1.

2.3 Průměrné pole přízemního větru

Jak již bylo uvedeno, přízemní vítr je (na území Česka) výslednicí tří složek: barické, termické a terénní (Sobíšek, 2000).

Barická složka závisí na rozložení tlakových útvarů v Evropě a jejím okolí. Jsou to Islandská tlaková níže, Azorská tlaková výše, zimní Asijská tlaková výše, zimní středomořská cyklona a letní Jihoasijská cyklona. Poloha a intenzita těchto útvarů ovlivňuje bezprostředně rychlost i směr větru nad územím ČR. Z klimatologického hlediska má na průměrné charakteristiky větru vliv průměrná poloha a intenzita uvedených barických útvarů za delší časové období.

Termická složka se projevuje lokálními odchylkami od průměrného stavu pole v závislosti na různé tepelné a radiační bilanci zemského povrchu na různých místech. Tato složka je velmi proměnlivá jak prostorově, tak časově a je hlavní příčinou denního chodu rychlosti a směru větru. Vliv této složky je také patrný při srovnání nížinného a horského typu denního chodu rychlosti větru.

Terénní složka (orografie) ovlivňuje pole větru v různém měřítku. V makrometeorologickém měřítku má hlavní význam kotlinová poloha ČR, snížení terénu mezi Alpami a Karpaty vyvolává tzv. „dýzový“ efekt proudění. Ostatní terénní tvary v ČR ovlivňují proudění na menších územních celcích a jejich vliv závisí především na směru proudění. Zvýšený terén vyvolává návětrný a závětrný efekt, stáčení směru větru do osy dlouhých údolí a změnu jeho rychlosti při zužování či rozšiřování údolí.

Barická složka je zodpovědná za výskyt většiny silných větrů. Uplatňuje se tak typicky v zimním období, kdy má rozhodující vliv na počasí zonální cirkulace. Naopak extrémně velké rychlosti větru v teplém půlroce jsou spojeny s konvekčními jevy a mají tak převážně lokální charakter. V celkovém součtu se ale termická složka uplatňuje v souboru extrémně silných větrů jen relativně nevýznamně (Brázdil et al., 1999).

Rychlost větru je výrazně ovlivněna místními vlivy. Tolasz (1995) porovnal trendy rychlosti větru vyjádřené ročními průměry na stanicích Mošnov a Ostrava-Poruba, vzájemně vzdálených pouhých 14 km. Zatímco v Mošnově, nacházejícím se prakticky ve volné krajině, rychlost větru ve sledovaném období stabilně mírně rostla, v Ostravě-Porubě se poměrně výrazně snižovala s postupujícím rozšiřováním aglomerace.

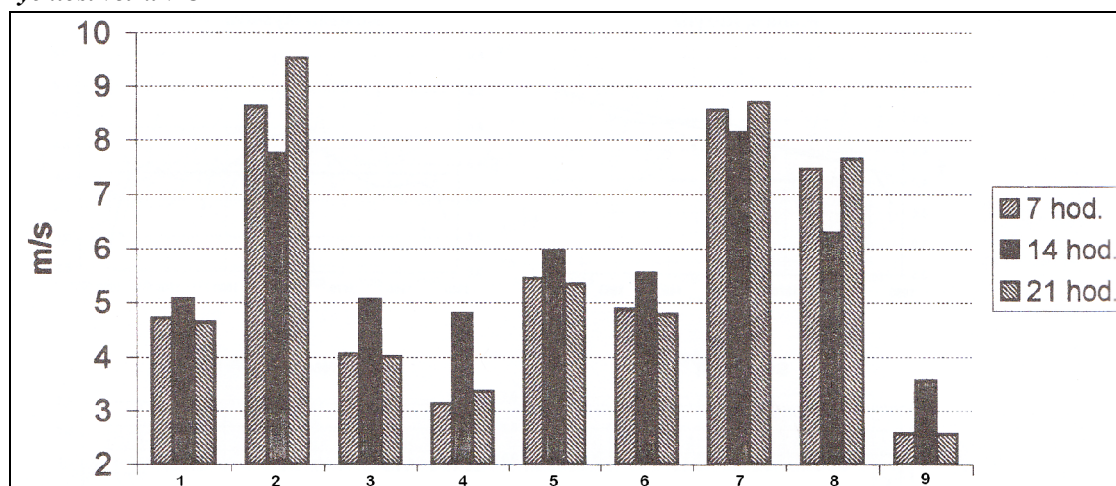
2.4 Chod rychlosti větru

Časová variabilita rychlosti větru má charakter periodických a aperiodických změn. Zdrojem aperiodických změn (různého časového i prostorového rozsahu) mohou být víry turbulentního proudění, konvekční jevy, atmosférické fronty či pohyblivé cyklony. Periodické změny se projevují ve formě denního a ročního chodu.

2.4.1 Denní chod rychlosti větru

Rozlišují se dva základní typy denního chodu rychlosti větru: nížinný (pevninský, přízemní) typ s maximem kolem poledne a minimem kolem půlnoci a horský (mořský, výškový) typ s maximem před půlnocí a minimem v dopoledních hodinách. Rozhodující vliv na denní chod rychlosti větru má denní chod intenzity turbulence². Intenzivní promíchávání vzduchu ve dne vede k přenosu hybnosti vzduchu směrem k zemskému povrchu; důsledkem je zvyšování rychlosti větru u zemského povrchu a naopak snižování rychlosti větru v horní části MVA (Štekl, 2000). Amplituda denního chodu je potom nejvýraznější v místech s maximálním vlivem radiálně aktivního zemského povrchu v letním období.

Obr. 2 – Průměrné termínové rychlosti větru na vybraných meteorologických stanicích a průměrná rychlost větru v ČR



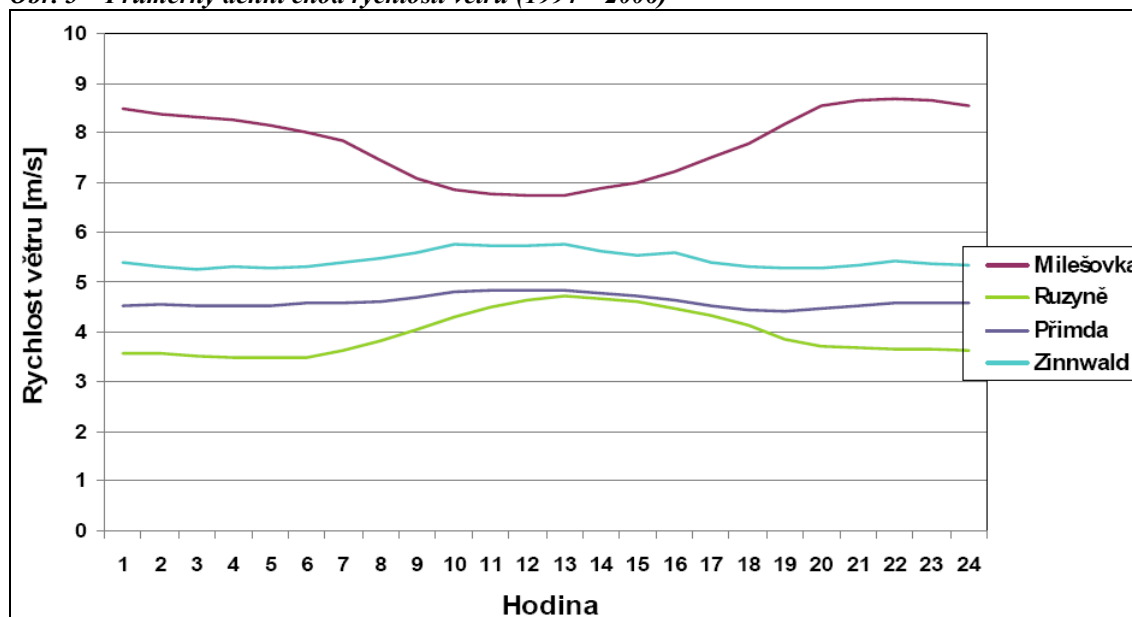
Poznámky: 1 – Přimda (742 m n.m.), 2 – Milešovka (837 m n.m.), 3 – Praha, Ruzyně (364 m n.m.), 4 – Kostelní Myslová (569 m n.m.), 5 – Svatouch (737 m n.m.), 6 – Nedvězí (722 m n.m.), 7 – Praděd (1490 m n.m.), 8 – Lysá hora (1324 m n.m.), 9 – průměr ČR.

Zdroj: Sobišek, 2000

Horský typ denního chodu se projevuje pouze na vrcholech izolovaných hor významně převyšujících terén, jako např. na Sněžce, Pradědu, Lysé hoře či Milešovce (Štekl, 2008), není tedy přednostně určen pouze nadmořskou výškou.

Vliv nadmořské výšky a tvaru reliéfu na denní chod rychlosti větru je demonstrován na obr. 2 a 3.

² Turbulence je stav proudění vzduchu spojený s existencí nepravidelných vírových pohybů, které vyvolávají turbulentní fluktuační rychlosti proudění. Rozměry vírů leží v rozsahu od mm do stovek m. Při turbulentním proudění vzduchu má každá částice určitou složku rychlosti odlišnou od průměrné rychlosti vzduchu (Štekl, 2000).

Obr. 3 – Průměrný denní chod rychlosti větru (1994 – 2006)

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

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

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

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

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

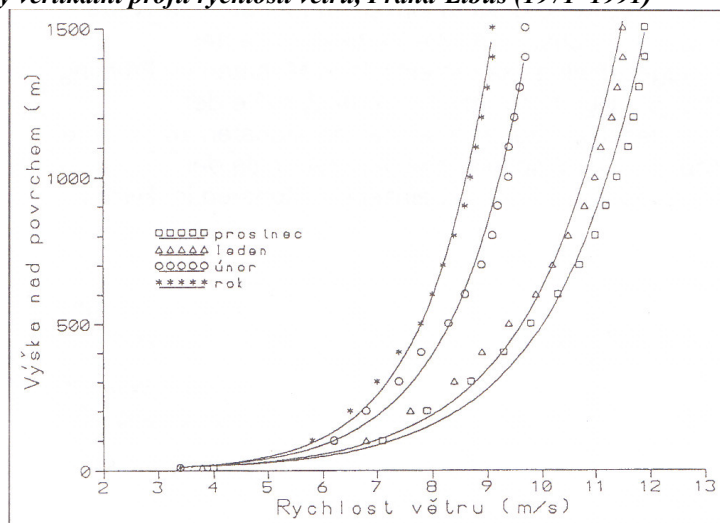
Zdroj: Štekl, 2008

2.4.2 Roční chod rychlosti větru

V ročním chodu rychlosti větru lze podobně jako v denním chodu najít rozdíly mezi stanicemi nížinného a horského typu. Bez ohledu na místo měření je minimum rychlosti v dlouhodobém průměru dosahováno v teplé části roku a maximum v zimě. Hlavní rozdíl lze pozorovat v roční amplitudě, která je výraznější na stanicích horského typu. Důvodem je skutečnost, že tyto stanice v zimě leží nad horní hranicí MVA a jsou vystaveny víceméně geostrofickému proudění, jehož roční chod je určen pouze proměnami horizontálního barického gradientu (Štekl et. al, 2000). Roční chod rychlosti větru je ilustrován graficky v kapitole 4.2.

2.5 Vertikální profil větru v ČR

Vertikální profil rychlosti větru je vyjádřen obr. 4. Na obrázku jsou zachyceny průměry pro zimní měsíce a roční průměr. Vertikální změna rychlosti větru je největší v přízemní vrstvě atmosféry a s rostoucí výškou klesá. Zimní měsíce se vyznačují nejrychleji přibývajícím rychlostí větru s výškou, naopak nejstrmější tvar má křivka v létě. Obdobně větší přírůstek větru s výškou nastává v nočních hodinách, nejmenší v poledních. V denním chodu v poledních hodinách, resp. v ročním chodu v létě dosahuje totiž maxima vertikální přenos hybnosti z vyšších vrstev MVA směrem k zemskému povrchu, v jehož důsledku dochází k růstu rychlosti větru blíže zemskému povrchu na úkor vyšších pater MVA (Štekl, 1996).

Obr. 4 – Průměrný vertikální profil rychlosti větru, Praha-Libuš (1971–1991)

Zdroj: Štekl, 2000

2.6 Dlouhodobé trendy rychlosti větru v ČR

Sobíšek (2000) provedl rozsáhlou studii trendů rychlosti přízemního větru na území České republiky. Pro svoji analýzu vybral 69 reprezentativních úplných časových řad rychlosti větru za období 1961–1990. Vzhledem k tomu, že neočekával určitý charakter trendu, využil lineární regrese metodou nejmenších čtverců. Ve více než 80 % časových řad odhalil statisticky významné trendy. Nicméně ani v takto rozsáhlém souboru se nepodařilo zjistit žádnou obecně platnou souvislost mezi charakterem trendu a meteorologickými podmínkami na stanicích. Výsledné trendové křivky pro osm vysoce reprezentativních stanic (Přimdu, Milešovku, Prahu-Ruzyni, Svatouch, Kostelní Myslovou, Nedvězí, Praděd a Lysou horu) jsou patrné z přílohy 1.

Trendy ve všech třech pozorovacích termínech jsou zhruba shodné s trendem průměrné rychlosti. Výraznější rozdíly jsou v trendech vypočítaných pro jednotlivá roční období. Ale ani při hodnocení ročních období samostatně nelze vyvodit žádné obecně platné závěry. Specifický chod mají trendy na horských stanicích Pradědu a Lysé hoře, kde lze ve všech ročních obdobích vysledovat výrazný pokles rychlosti větru.

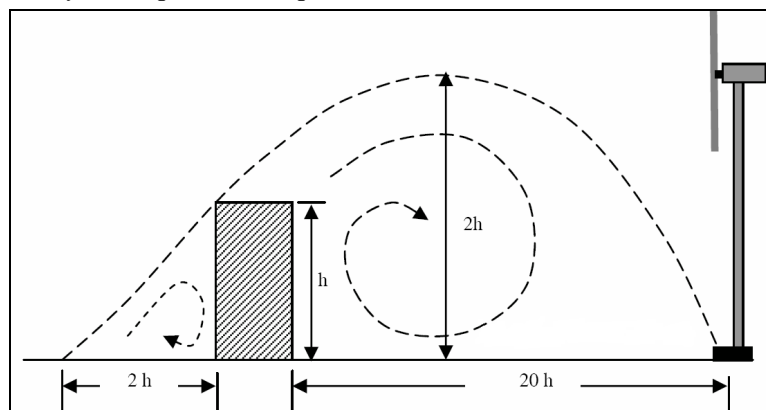
Hodnocení kratších období je pro vysledování trendů problematické – čím kratší je interval, tím větší je variabilita výsledků. Toto platí zejména pro rychlost větru, pro kterou je typická velká časová i prostorová rozkolísanost. Ročním chodem trendů rychlosti větru se zabývá studie (Moliba, Huth, Beranová, 2006), ve které autoři spočítali pro několik českých stanic trendy za klouzavá 60denní období navzájem posunutých o deset dní (více o této metodě viz kapitola 3). Vzhledem k rozdílům mezi jednotlivými stanicemi autoři hovoří o nehomogenním charakteru trendů větru a pravděpodobném vlivu lokálních faktorů na jednotlivých stanicích. Z této analýzy je patrný poměrně výrazný roční chod trendů většinou s několika (lokálními) maximy a minimy.

2.7 Reprezentativnost a homogenita časových řad rychlosti větru

Dle Sobiška (2000) můžeme od reprezentativních dat očekávat, že charakterizují chod klimatického prvku na daném územním celku jen s malou časovou proměnlivostí. Od větroměrných dat se zároveň očekává jejich minimální ovlivnění třením, tedy že přibližně odpovídají rychlosti a směru větru nad vrstvou tření. Rychlost větru v klimatologickém termínu 14h je nejvíce ovlivněna nahodilými místními vlivy, a proto se pro analýzy trendů hodí nejméně (Sobišek, 2000). Vzhledem k tomu, že přízemní vítr se standardně měří ve výšce 10 m, jsou nutně naměřená data v závislosti na různé drsnosti povrchu v okolí stanice ovlivněna silou tření. Pro analýzu trendů rychlosti větru z tohoto hlediska se jeví výhodnější využívat časových řad z horských oblastí, popř. aerologická data. Zde ovšem hrozí jiná rizika vnášející chyby do měření větru; horské stanice jsou vystaveny ve větší míře extrémním projevům počasí, z čehož může plynout rychlejší opotřebení přístrojů, např. zásahy blesky. Negativní vliv při měření rychlosti větru anemometry má zejména námraza, která se především vyskytuje právě na horských stanicích. Výsledkem potom mohou být chybnější měření či chybně změřené rychlosti (např. zvýšená četnost bezvětří).

Otázce homogenity časových řad je věnována velká pozornost v každé odborné studii, protože může výrazným způsobem ovlivnit konečný výsledek – sebelepší práce vycházející z chybných dat nemůže popsat probíhající trendy. Nejdůležitějším zásahem do kontinuity měření rychlosti větru je změna polohy čidla anemografu. Vzhledem k výrazné prostorové variabilitě větru vlivem proměnlivé drsnosti povrchu může naměřená data vážně ovlivnit ale i jakákoli změna v blízkém okolí (růst či kácení stromů, stavba budov...). Vertikální a horizontální vzdálenost, na kterou předměty prostřednictvím turbulencí ovlivňují výslednou rychlost a směr větru, je patrná z obrázku 5. Dalším faktorem ovlivňujícím homogenitu měření je výměna přístrojů za nové (v případě opotřebení, popř. výměna za nový typ).

Obr. 5 – Turbulence vyvolaná překážkou v proudění vzduchu



Zdroj: Mathew, 2006

2.8 Kalendáře synoptických situací

„Potřeba katalogu, sestaveného pro co nejdelší období a pokrývajícího všechny dny, je naléhavá jak v synoptice při doplňování předpovědi barického pole a vyhledávání analogií v dlouhodobé předpovědi, tak i při dynamicko-klimatologickém zpracování oblastí nebo určitých míst“ (HMÚ, 1967, s. 9).

Právě v díle kolektivu autorů synoptické a letecké služby Hydrometeorologického ústavu z roku 1967, ze kterého pochází tato citace, byly položeny základy typizace povětrnostních situací, která je dodnes používána Českým hydrometeorologickým ústavem při konstrukci kalendáře synoptických situací. Synoptickou situaci lze definovat jako stav určený přízemním a výškovým prouděním, polohou frontální zóny, charakterem tlakového pole a vzduchové hmoty. Právě tyto parametry mají rozhodující vliv na rozložení vertikálních pohybů a tím i na projevy počasí.

V případě typologií používaných českou a německou meteorologickou službou lze každý typ zařadit do kategorie cyklonálních, anticyklonálních, případně přechodných (nezařazených) typů. Kromě typologie ČHMÚ lze pro území České republiky využít i typologii Großwetterlagen, která má s českou typologií společný základ a pokrývá rozsáhlé území střední Evropy a jejího okolí. Obě typologie patří do kategorie subjektivních. V některých případech totiž nelze danou synoptickou situaci jednoznačně zařadit a volba tak záleží na autorovi kalendáře. Ještě těžší volba vzniká v případě, kdy pro celé území republiky neplatí jedna situace, popřípadě dojde opakovaně k rychlé přestavbě tlakového pole.

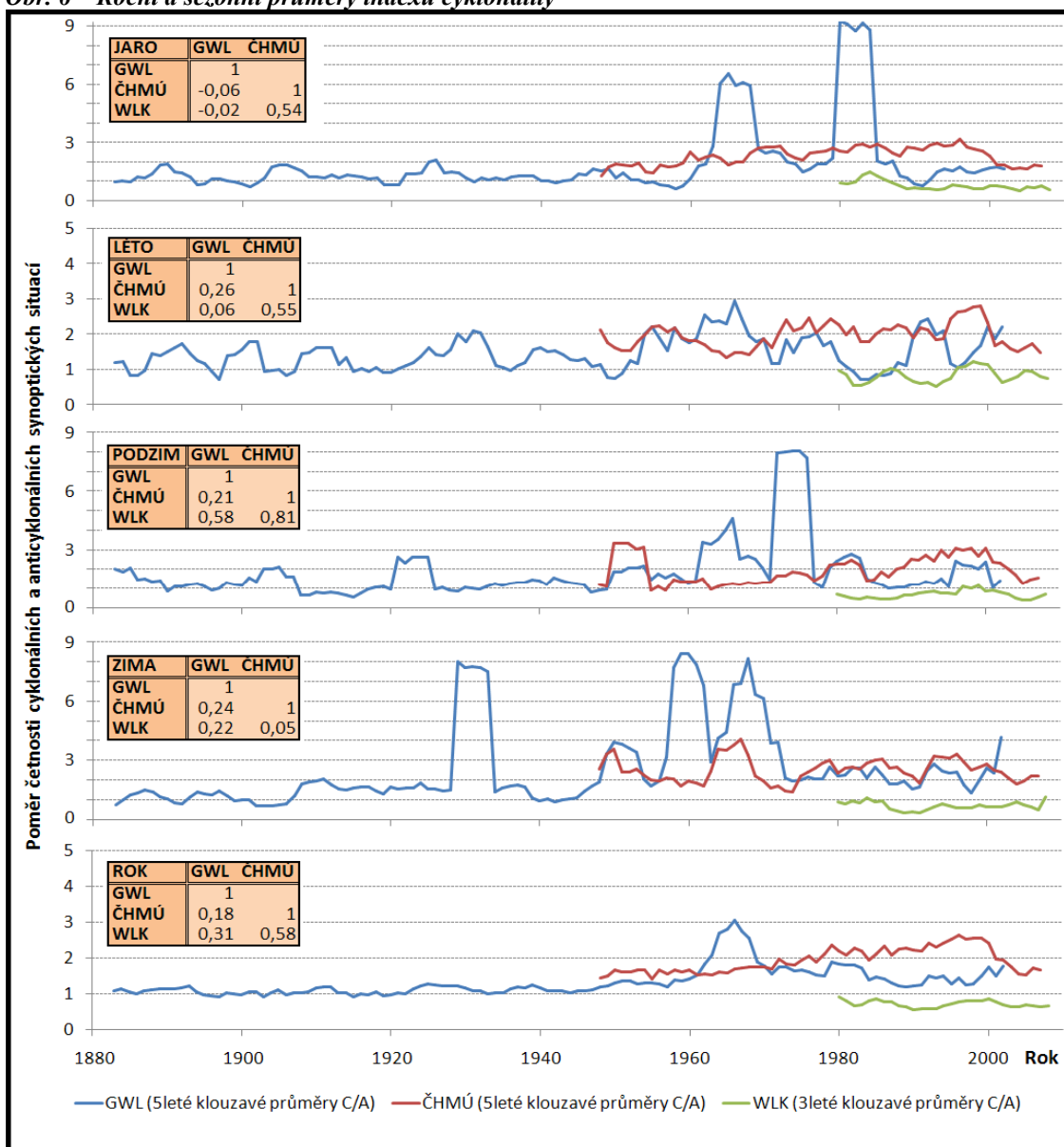
Změnou průměrné délky trvání synoptických situací v českém kalendáři se zabývala studie Cahynové a Hutha (2007), kteří prokázali výrazné zkrácení délky trvání cyklonálních i anticyklonálních situací po roce 1972, zřejmě z důvodu personálních změn v řešitelském kolektivu. Pozorovaný nárůst počtu dní s cyklonální cirkulací (a tedy i poměru četnosti cyklonálních a anticyklonálních situací) je tedy způsoben častějším opakováním, nikoli prodlužováním těchto situací. Hodnocení cyklonality se shoduje v českém kalendáři a katalogu „der Großwetterlagen Europas“ v 63,5 % případů (dní), přitom větší shoda nastává v zimě. Zhruba 15 % dní je v českém kalendáři hodnocena jako cyklonální a německém jako anticyklonální. Toto číslo se postupně od 60. let zvyšuje s růstem počtu cyklonálních situací v českém kalendáři. Nicméně určitá odchylka je přirozená vzhledem k rozdílným územním celkům.

Německá povětrnostní služba (Deutscher Wetterdienst) publikuje kromě kalendáře Großwetterlagen také objektivní klasifikaci synoptických situací, tzv. Wetterlagenklassifikation. Kritéria pro vymezení jednotlivých tříd jsou v tomto případě cyklonality v hladině 950 a 500 hPa, převažující směr proudění v hladině 750 hPa a obsah vodní páry v troposféře. Na základě těchto čtyř parametrů je vymezeno 40 tříd, neexistují žádné přechodné či nerozhodné stavy. Tato klasifikace by měla dle autorů reprezentovat oblast Německa a sousedních regionů a provádí se každý den ke 12 hodinám UTC (Deutscher Wetterdienst).

V úvodu této práce byla vyslovena hypotéza, že existuje poměrně úzký vztah mezi průměrnou rychlostí větru vyjádřenou sezónním či ročním středním stavem a relativní četností výskytu cyklonálních synoptických situací. Za účelem ověření této hypotézy byly pro tři výše zmíněné

kalendáře povětrnostních situací zkonstruovány vývojové grafy indexu cyklonality (viz obr. 6), který byl určen jako poměr všech situací (v příslušné klasifikaci a pro dané období) hodnocených jako cyklonálních a všech situací anticyklonálních. V případě klasifikace ČHMÚ je to tedy $(Wc+Wcs+NWc+Nc+NEc+Ec+SEc+SWc1+SWc2+SWc3+C+B+Bp)/(Wa+Wal+NWa+NEa++Ea+SEa+Sa+SWa+A+Ap1+Ap2+Ap3+Ap4)$, v případě klasifikace Großwetterlagen $(WZ+SWZ+NWZ+NZ+HNZ+NEZ+HFZ+HNFZ+SEZ+SZ)/(WA+SWA+NWA+NA+HNA++NEA+HFA+HNFA+SEA+SA)$ a u klasifikace Wetterlagenklassifikation třídy $(AZ+ZZ)/(AA+ZA)$.

Obr. 6 – Roční a sezónní průměry indexu cyklonality



Poznámky: GWL – klasifikace Großwetterlagen, ČHMÚ – klasifikace Českého hydrometeorologického ústavu, WLK – objektivní Wetterlagenklassifikation. Vymezení sezón viz obr. 20. V tabulkách jsou uvedeny hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu. Výpočet indexu C/A pro jednotlivé kalendáře viz text.

Zdroj dat: ČHMÚ, Deutscher Wetterdienst

Z uvedených hodnot korelačního koeficientu a průběhu grafů je možné určit, jak velké mohou být (zejm. v některých sezónách) odlišnosti v hodnocení výskytu cyklonálních a anticyklonálních situací různými klasifikacemi. Velmi významným faktorem, který snižuje hodnoty koeficientu korelace, je absence výskytu anticyklonálních situací v některých obdobích v klasifikaci Grosswetterlagen, např. v podzimních měsících 1974 či zimě 1930/1931 se nevyskytla žádná, opakovaně se vyskytují poměry 1:20 a výraznější. Pokud se pro korelaci použije zkrácené období 1983–2004, ve kterém se již tak výrazné rozdíly nevyskytují, jsou zjištěné závislosti v některých případech těsnější a také očekávanější (např. hodnota koeficientu pro klasifikace ČHMÚ a Grosswetterlagen v zimě vzroste na 0,53).

Předpokládaný nárůst cyklonality je potvrzen ve většině případů konstrukcí lineárního trendu. Směrnice lineárních trendů jsou zaznamenány v tab. 1. Statisticky významné trendy (kromě ročních průměrů) můžeme nalézt pouze v jarním období.

Tab. 1 – Směrnice lineárního trendu indexu cyklonality

klasifikace	rozsah řady	rok	jaro	léto	podzim	zima
GWL	1881–2004	0,006	0,017	0,004	0,011	0,021
ČHMÚ	1946–2009	0,011	0,009	0,001	0,012	0,000
WLK	1979–2009	-0,003	-0,017	0,003	0,005	0,003

Poznámky: GWL – klasifikace Großwetterlagen, ČHMÚ – klasifikace Českého hydrometeorologického ústavu, WLK – objektive Wetterlagenklassifikation. Vymezení sezón viz obr. 20. Číselná hodnota udává směrnici lineárního trendu proloženého vývojovým grafem příslušného indexu cyklonality. Sytě jsou vyznačeny trendy, které jsou statisticky významné na 95% hladině spolehlivosti.

Zdroj dat: ČHMÚ, Deutscher Wetterdienst

Kapitola 3

Testované časové řady a použité metody

Pro analýzu dlouhodobých trendů rychlosti větru, uvedenou v kapitole 4, byly použity tři časové řady rychlosti větru. Všechny tři řady relativně dobře odrážejí podmínky proudění vzduchu ve volné atmosféře. Milešovka, nejvyšší vrch Českého středohoří, lze být právem považována za horskou stanici, jsou zde díky výraznému převýšení nad okolním terénem dosahovány na našem území nejvyšší hodnoty ročních průměrů rychlosti větru, přestože hora svojí výškou zdaleka nedosahuje výšky pohraničních pohoří. Dále byla v analýze použita data ze stanice Szrenica, která leží v polských Krkonoších nedaleko od trojmezí Královéhradeckého a Libereckého kraje a polského Dolnoslezského vojvodství. Třetí testovanou řadu tvoří aerologická měření rychlosti větru z tlakové hladiny 850 hPa v Praze-Libuši. Rychlost větru v této výšce je většinou ovlivněna zemským povrchem již zanedbatelně, proto bude mj. možné na základě těchto měření posoudit, do jaké míry vítr na dvou vybraných stanicích odpovídá proudění ve volné atmosféře.

Pro veškeré zveřejněné analýzy a vizualizace výsledků byl použit program Microsoft Office Excel 2007. Případné grafické úpravy byly provedeny v programu Microsoft Malování 5.1.

3.1 Časové řady

3.1.1 Milešovka

Časová řada Milešovky je v tomto výběru výrazně nejdelší – měření rychlosti a směru větru na této hoře začala v roce 1905 a bez výrazných přestávek trvá v prakticky nezměněné podobě dodnes. Větroměrné přístroje jsou od počátku pozorování umístěny na 4,5 metru vysoké kovové konstrukci, která je vztyčena na věži vycházející z místní observatoře. Celková výška přístrojů nad zemským povrchem je tedy 22,5 metru, neboli 859 m n. m.

Měření byla významněji přerušena pouze dvakrát – v lednu 1917 v důsledku vyčerpání zásob uhlí potřebných k vytápění budovy a v září 1938 po vyhlášení mobilizace. Zdaleka nejvýraznější narušení kontinuity dat nastalo až v důsledku ztráty základního pozorovacího materiálu za měsíce květen až červenec z let 1930 až 1935. Za toto období jsou k dispozici pouze měsíční průměrné hodnoty.

Po celé období se měří jednotně v klimatologických termínech 7, 14 a 21 hodin místního středního slunečního času (MSSČ).

Vzhledem k faktu, že Milešovka je jedním z největrnějších míst v České republice, byla měření větru od počátku věnována velká pozornost. Možným zdrojem nehomogenit měření mohly být výměny anemografů – proběhly v letech 1905, 1924, 1936 a 1964. Předpokládá se, že především na počátku 20. let byla přesnost měření ovlivněna stářím přístroje a nutností opakovaných oprav v důsledku bouřlivého větru či zásahů bleskem. Výměna za modernější typy vedla postupně pravděpodobně ke zvyšování citlivosti měření, a tak i ke snižování počtu bezvětří. Významným faktorem ovlivňujícím homogenitu měření na Milešovce je skutečnost, že část měření byla ve výkazech uváděna jako síla větru a část jako rychlost větru. Zatímco rychlost větru je přesně dána meteorologickými přístroji a má jasnou dynamickou hodnotu vázající se k určitému bodu v prostoru, určení síly větru (zaznamenané např. pomocí Beaufortovy stupnice³) má subjektivní charakter. Pokud jsou zaznamenané hodnoty síly větru – stupně Beauforta (°B) zprůměrovány za delší období, nelze je již přesně převést zpět – vzhledem k „(...) nelineárně rostoucí šířce intervalu ekvivalentní rychlosti větru s rostoucí silou větru (od 0,5 m/s při 0 °B na 4,2 m/s při 12 °B)“ (Brázdil et al., 1999, s. 59).

Cirkulační poměry Milešovky jsou výsledkem spolupůsobení všeobecné cirkulace atmosféry a orografických vlivů blízkého i vzdáleného okolí. Milešovka převyšuje údolí řeky Bíliny o 700 m a okolní krajinu až o 300–400 m. Relativně malá plocha aktivního povrchu vyvolává snížení vlivu tření oproti poměrům v nížině zhruba o polovinu, takže rychlost skutečného větru je na Milešovce 85 % hodnoty geostrofické rychlosti a směr skutečného větru je od geostrofického odchýlen asi o 25°. Koeficient tření dosahuje na Milešovce 33 % hodnoty pro Prahu-Ruzyni.

Dle Štekl (1996) je na Milešovce a jiných vrcholových stanicích dosahovaná rychlost větru vyšší, než je rychlost v této výšce očekávaná (na základě měření ve volné atmosféře).

Nejbližší horskou překážkou k Milešovce jsou Krušné hory s idealizovanou osou 235–055° vzdálenou 25 km. Tato bariéra při SZ proudění vyvolává vznik tzv. závětrné dynamické brázdy, která se pravděpodobně projevuje i ve výšce stanice. Vliv na proudění na Milešovce (zesílením proudění v JV kvadrantu) má i tzv. zaalpská závětrná brázda nízkého tlaku vzduchu zvyšující horizontální tlakový gradient mezi Alpami a Karpaty. Převládající proudění vzduchu od západu je způsobeno v hlavní míře polohou akčního tlakového centra – Islandské tlakové níže, která se nejvýrazněji projevuje v chladné části roku. V teplé části roku se zásadní měrou projevují výběžky vysokého tlaku vzduchu od Azor. Silné větry jsou nejčastěji spojeny se zonálním prouděním a jsou nejčastěji pozorovány ve 21 hodin, nejméně často ve 14 hodin.

Průměrný denní chod rychlosti větru dosahuje svého maxima mezi 19. a 23. hodinou (později v létě) a minima mezi 9. a 14. hodinou (později v zimě).

V této práci jsou využity data z klimatologických termínů z let 1905–2007. Informace uvedené v této kapitole (není-li uvedeno jinak) jsou čerpány z (Brázdil et al., 2000).

³ Beaufortova stupnice větru byla vytvořena v roce 1805 Sirem F. Beaufortem. Používala se k určení a zaznamenání síly větru v případech, kdy nebyl dostupný anemometr, pouze na základě slyšených, cítěných a viděných účinků větru. Existovaly různé verze navzájem se lišící rozsahem ekvivalentní rychlosti větru (Mather, 1987). Rychlost větru je spolehlivě vedena v záznamech klimatologických měření na Milešovce od roku 1956 (Brázdil et al., 1999).

3.1.2 Szrenica

Ze stanice Szrenica jsou pro účely této práce k dispozici data z termínů 7, 13 a 19 hodin MSSČ z let 1961 až 1990. Nadmořská výška stanice je 1362 m n. m. Bližší informace o metodice měření rychlosti větru na této stanici a možných nehomogenitách se nepodařilo zjistit.

V oblasti Krkonoš je oproti Milešovce typická silněji zastoupená meridionální složka proudění – v důsledku tzv. „dýzového“ efektu i efektu návětrí pohoří, takže v chladné polovině roku převládá jižní směr větru a v létě severní (Sobíšek, 2000).

3.1.3 Praha-Libuš

Praha-Libuš je jediným místem na území ČR, kde se provádí aerologická měření meteorologických prvků. Měření se provádějí v hlavních synoptických termínech 00, 06, 12 a 18 hodin UTC. K dispozici je řada termínových měření rychlosti větru z let 1974 až 2007 pro tlakovou hladinu 850 hPa. Řada je relativně úplná, významnější výpadky měření jsou pouze v roce 1984 (chybí cca 7% termínových hodnot), ve všech ostatních letech je počet maximálně kolem 2%. Na základě (Sládek, 2001) bude v rámci této práce časová řada Prahy-Libuše reprezentovat charakter proudění vzduchu ve volné atmosféře.

3.2 Použité metody

3.2.1 Test homogenity

Prvním krokem před samotným zjišťováním trendů je otestování homogenity časových řad. Ve většině odborných studií bývá testům homogenity přikládána velká pozornost. V časové řadě Milešovky, která je přes sto let dlouhá, lze identifikovat řadu rizikových faktorů, které by na homogenitu mohly mít negativní vliv. O řadě stanice Szrenica není tolik dostupných informací jako v případě Milešovky, takže test bude hlavním zdrojem informací o možných nehomogenitách.

K otestování homogenity je použit test doporučený Drozdovem et al. (1989). Základem tohoto testu je konstrukce křivek daných vztahy

$$\sigma_n = \sigma_x \times \sqrt{(n - n^2 / N)} \text{ a}$$

$$\sum \Delta x_n = \sum (x_n - X_N),$$

kde σ_x je směrodatná odchylka ročních průměrných rychlostí větru x , n je pořadí roku v N -leté řadě, X_N je průměrná rychlost větru N -leté řady.

Řadu lze prohlásit za nehomogenní na úsecích, kde platí nerovnost $|\sum \Delta x| > |\sigma_n|$.

3.2.2 Denní a roční chod rychlosti větru

Dle (Štekl et al., 2000) je zvykem denní a roční chody určovat dobou výskytu minima a maxima a hodnotou amplitudy. Vzhledem k charakteru zdrojových dat – celá práce vychází pouze z termínových měření – budou voleny metody odlišné. Bude-li se dále v této práci hovořit

o maximálních či minimálních hodnotách, výsledky vždy budou založené pouze na termínových měřeních. V případě denního chodu větru jsou to průměrné termínové rychlosti větru za období 1981–1990. Vhodnější by bylo delší časové období, ale pro možnost porovnání byla délka snížena na jednu dekádu, pro kterou jsou dostupná data ze všech tří stanic.

Roční chod rychlosti větru je pro každou řadu vypočítán také za období 1981–1990; pro každý den v roce je určena průměrná rychlost větru ze všech dostupných termínových měření. V případě Milešovky, která má výraznější roční chod denních amplitud rychlosti větru, byly spočteny navíc i průměry pro jednotlivé termíny za období 1905–2007.

3.2.3 Histogram rychlosti větru

Analýza četnosti různých rychlostí větru byla provedena pro všechny stanice zvlášť pro všechny termíny měření. Hranice intervalů byly inspirovány rozsahem stupňů Beaufortovy stupnice, byly upraveny na základě povahy použitých dat; zatímco rychlosti z aerologických měření jsou uváděny v přesnosti na setiny m/s, přízemní měření jsou v rozlišení celých m/s. Intervaly byly proto zvoleny i s ohledem na to, aby rychlosti uvedené v celých m/s připadly do odpovídajícího stupně Beaufortovy škály.

3.2.4 Trendy ročních průměrů

Pro všechny tři řady jsou zjištěny hodnoty ročních průměrů a směrodatných odchylek rychlosti větru. V případě Milešovky jsou opět hodnoceny zvlášť také termínové průměry vč. jejich diferencí. Je-li to možné, je vypočten lineární trend (metodou nejmenších čtverců), popř. pokud lineární trend není patrný, je zkonstruována křivka klouzavých průměrů.

3.2.5 Sezónní chod trendů

Sezóny jsou definovány dle (Chládová, Kalvová, 2005) jako tzv. doby roční klimatické, s rozsahem zima: 1. 12.–28. 2., jaro: 1. 3.–31. 5., léto: 1. 6.–31. 8. a podzim: 1. 9.–30. 11. Za účelem zjednodušení výpočtu není zahrnut 29. únor. Jsou hodnoceny sezónní průměry denních maximálních a minimálních (termínových) hodnot rychlosti větru a absolutní naměřená maxima. Jsou zkonstruovány lineární trendy a je otestována jejich statistická významnost (porovnaním hodnoty trendu a rozsahu 95% intervalu spolehlivosti umístěného kolem střední hodnoty).

Na základě pochybností o homogenitě první poloviny řady Milešovky vyjádřených v (Brázdil et al., 1999) je řada Milešovky pro účely této analýzy zkrácena na dobu 1956–2007.

3.2.6 Roční chod trendů pro klouzavá 60denní období

Tato metoda je převzata ze studie (Moliba et al., 2006). Pro každou řadu a každý rok jsou vypočteny průměry za klouzavá 60denní období, navzájem posunutá o 10 dní. První období trvá od 1. ledna do 1. března (je vyjádřeno středním datem 31. ledna), druhé od 11. ledna do 11. března atd., až poslední od 26. prosince do 24. února. Pro každé z těchto (36) období se vypočítá trend použitím lineární regrese pomocí nejmenších čtverců. Statistická významnost trendů je posuzována pomocí intervalů spolehlivosti. „Za nenulový či významný trend je pova-

žován ten, jehož odhad leží vně 95% intervalu spolehlivosti umístěného kolem nuly“ (Moliba et al., 2006, s. 130).

3.2.7 Trendy výskytu vysokých rychlostí větru

Pro jednotlivé roky byla vypočtena relativní četnost (v %) termínových měření s naměřenou rychlostí větru definovanou dle Beaufortovy stupnice jako vichřice (stupeň 9; 20,8–24,4 m/s), silná vichřice (stupeň 10; 24,5–28,4 m/s), mohutná vichřice (stupeň 11; 28,5–32,6 m/s) a orkán (stupeň 12; 32,7 m/s a více). Pro četnost rychlosti nad 20,8 m/s byl potom vypočítán lineární trend. V případě Milešovky byl trend určen (pro účely srovnání) pro dvě různě dlouhá časová období, definovaná rozsahem zbylých dvou řad (tj. 1961–1990, resp. 1974–2007).

Kapitola 4

Analýza časových řad rychlosti větru

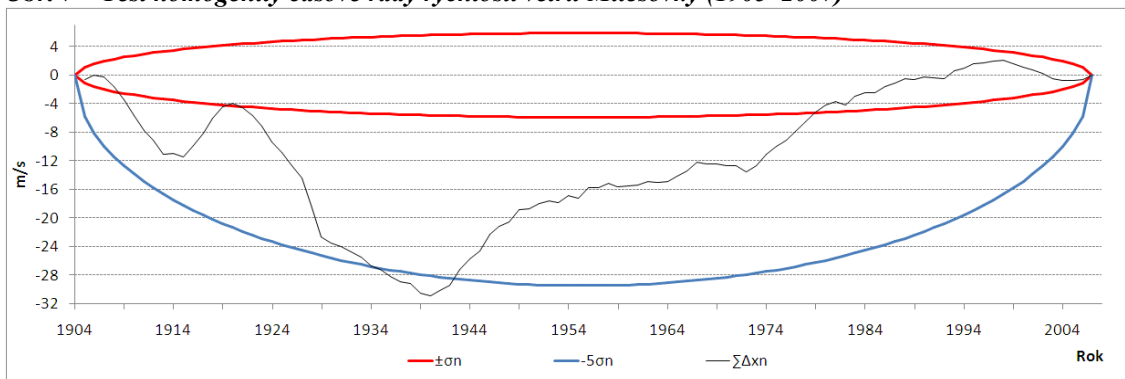
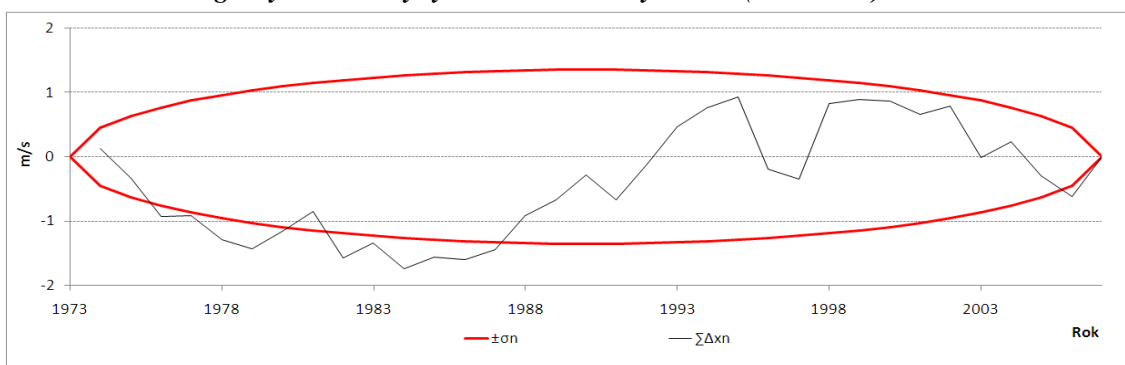
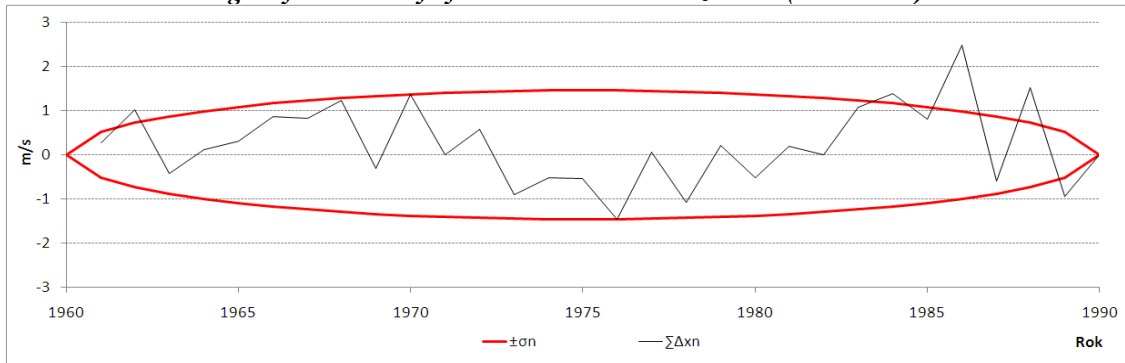
4.1 Test homogenity

Při měření meteorologických prvků na meteorologických stanicích může dojít čas od času ke změnám různého druhu, jako jsou oprava či výměna přístrojové techniky, posun místa pozorování, výměna pozorovatele, stavební úpravy v blízkém okolí apod. Tyto změny mohou v měření vyvolat vznik nehomogenit, které znehodnocují časovou řadu a znemožňují její správnou analýzu. Pro použité časové řady existuje nespočet množství informací o povaze změn, ke kterým docházelo v průběhu měření. Nejvíce dostupných informací je o časové řadě Milešovky; vzhledem k délce zdejší řady a na základě dostupné literatury je patrné, že především první polovina řady určité nehomogenity obsahuje. Významnou roli hraje vrcholová poloha stanice s extrémními projevy počasí (silný vítr, blesky či námraza) podepisujícími se na stavu anemometru. Dle Brázdil et al. (1999) vznikly ale nejvýraznější nehomogenity měření v důsledku používání několika stupnic pro zaznamenávání síly větru, popř. přepočítáváním zprůměrovaných hodnot síly větru na rychlost větru. Provedený test nehomogenity řady potvrdil. Nastavení hranice na $1 \times \sigma$ je poměrně přísné, nicméně kumulovaná odchylka ročních průměrů od průměru celé řady tuto mez překračuje (zejména v první třetině řady) velmi výrazně (obr. 7). Vzhledem k tomuto výsledku se trendy uvedené předkládané práci vztahují pouze k období 1956–2007, které je (s výjimkou velkého nárůstu rychlosti v polovině 70. let) relativně homogenní (obr. 8).

Časová řada aerologických měření rychlosti větru z Prahy-Libuše je především poznamenána výměnou starých „sovětských“ přístrojů za nové typy během 90. let 20. století. Tato transformace vedla k výraznému zpřesnění měření klimatických prvků na jediné české radiosondážní stanici, zároveň pravděpodobně i nárůstu rychlosti větru (Skřivánková, 2005).

V případě řady rychlosti větru ze stanice Szrenica (s výjimkou let 1986–1989) test výraznější nehomogenity neprokázal.

Testy homogenity větroměrných řad stanic Praha-Libuš a Szrenica dle metody popsané v kapitole 3.2.1 jsou znázorněny na obr. 9 a 10.

Obr. 7 – Test homogenity časové řady rychlosti větru Milešovky (1905–2007)**Obr. 8 – Test homogenity časové řady rychlosti větru Milešovky (1956–2007)****Obr. 9 – Test homogenity časové řady rychlosti větru Prahy-Libuše (1974–2007)****Obr. 10 – Test homogenity časové řady rychlosti větru stanice Szrenica (1961–1990)**

Poznámka k obrázkům 7–10: Výpočet a význam symbolů viz kapitola 3.2.1.

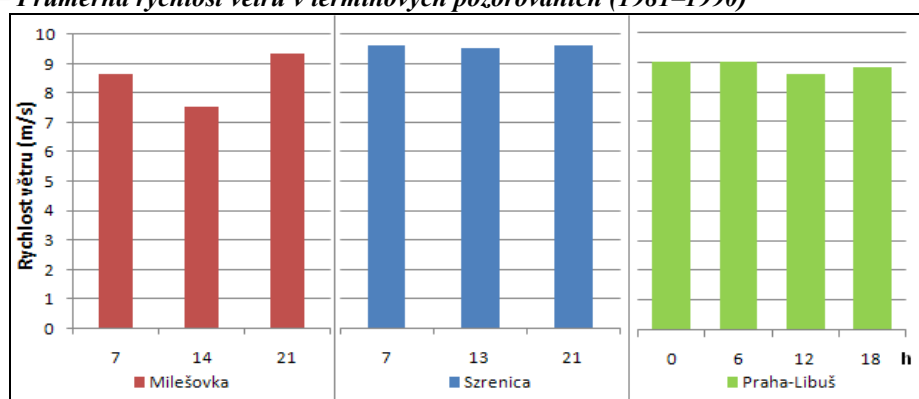
Zdroje dat: ÚFA AV ČR, ČHMÚ, KÚWU

4.2 Analýza denního a ročního chodu rychlosti větru

4.2.1 Denní chod rychlosti větru

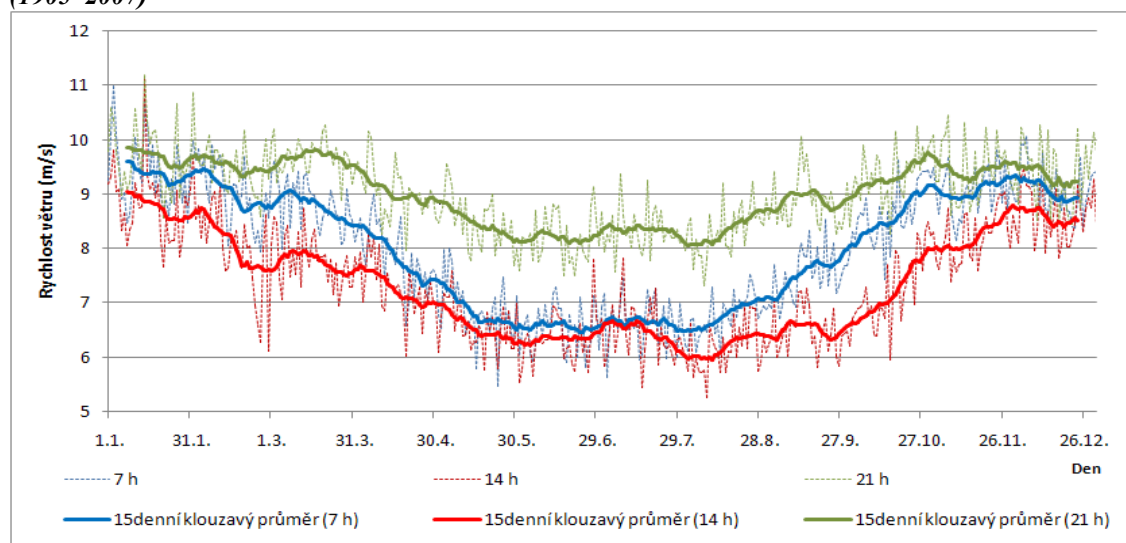
Denní chod rychlosti větru na vybraných stanicích je na obr. 11 zachycen formou průměrných rychlostí větru v klimatických, resp. synoptických termínech. Vzhledem k tomu, že každá řada sleduje rozdílně dlouhé období, byla pro tento účel vybrána jediná společná dekáda: 1981–1990. Z obrázku je patrné, že všechny tři řady jsou charakteristické horským typem denního chodu rychlosti větru, ačkoli jediná stanice, která má tento chod výrazný, je Milešovka.

Obr. 11 – Průměrná rychlost větru v termínových pozorováních (1981–1990)



Zdroje dat: ÚFA AV ČR, ČHMÚ, KÚWU

Obr. 12 – Roční chod denních průměrů rychlosti větru na Milešovce v klimatických termínech (1905–2007)



Zdroj dat: ÚFA AV ČR

V nočním termínu je v porovnání s měřením v Praze-Libuši rychlost na Milešovce výrazně vyšší než rychlost interpolovaná na tuto výšku z hladiny 850 hPa a dosahuje téměř stejné hodnoty jako rychlost na hoře Szrenica, která je zhruba o 500 m vyšší. Naopak rychlost v termínu 14 h je nižší. Vysoko položená Szrenica a měření z Prahy-Libuše již vykazují jen nepatrné sní-

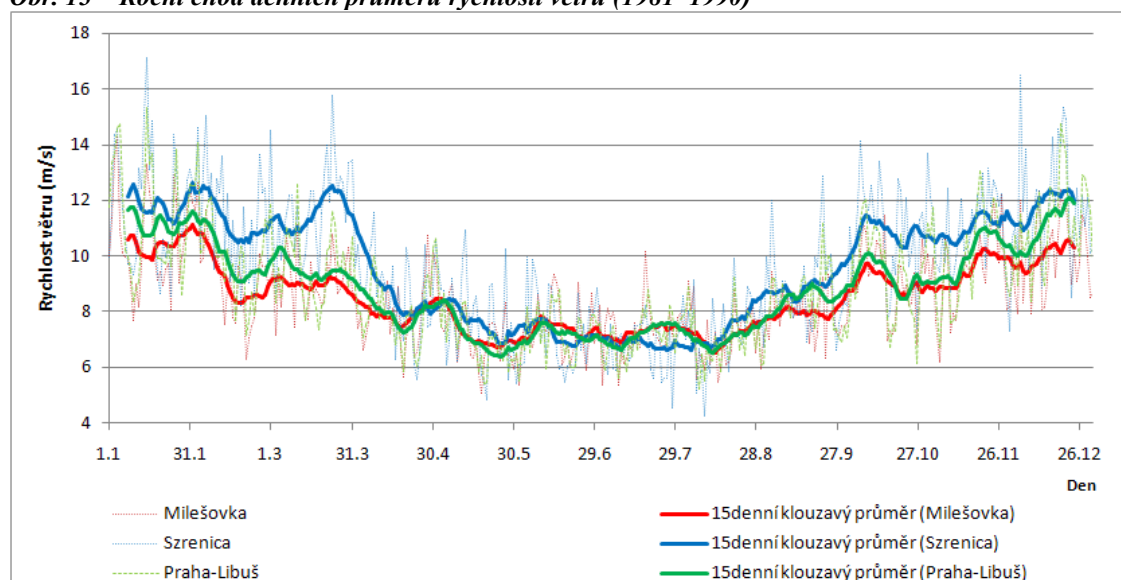
žení rychlosti větru v poledním termínu, denní chod je jinak prakticky nevyjádřený a proto nebude dále analyzován. Slabě vyjádřený denní chod značí blízkost geostrofickému proudění, u kterého se již neprojevuje (v důsledku nulového významu termické složky proudění).

Na obr. 12 se zobrazeným ročním chodem rychlosti větru na Milešovce je také patrné, jak se amplituda denního chodu mění během roku – maxima dosahuje během srpna a minima v prosinci. Vzhledem k tomu, že amplituda denního chodu je dána především termickou složkou proudění, je patrný její minimální podíl v zimních měsících. Obdobně nižší je význam této složky i v nočním termínu. Důkazem je skutečnost, že průměrná roční amplituda v termínu 21 h je zhruba o 2 m/s nižší než ve zbylých dvou termínech.

4.2.2 Roční chod rychlosti větru

V ročním chodu je pro všechny stanice typické, že maximální průměrné rychlosti se vyskytují v zimním období a minimální v letním. Zároveň vyšší rychlosti větru jsou typické i vyšší variabilitou. Na obr. 13 je srovnán roční chod denních průměrů rychlosti větru pro hodnocené stanice. Pro toto srovnání bylo opět zvoleno jednotné období 1981-1990. Na stanici Milešovka je patrný méně výrazný roční chod rychlosti větru, amplituda je zhruba o 2 m/s nižší než na zbylých stanicích. Důvodem je výrazně vyšší rychlost větru v teplém půlroce, než jaká by byla pro tuto výšku odhadována, díky již zmiňované specifické topografii. Z grafu je také patrná jistá odlišnost průběhu křivky pro řadu stanice Szrenica (např. v březnu a červenci). Tato skutečnost by pravděpodobně mohla být způsobena odlišným charakterem proudění vzduchu v Krkonoších, kde je výraznější meridionální složka proudění s převažujícími větry jižního směru v chladném půlroce a severního směru v půlroce teplém (Sobíšek, 2000).

Obr. 13 – Roční chod denních průměrů rychlosti větru (1981–1990)



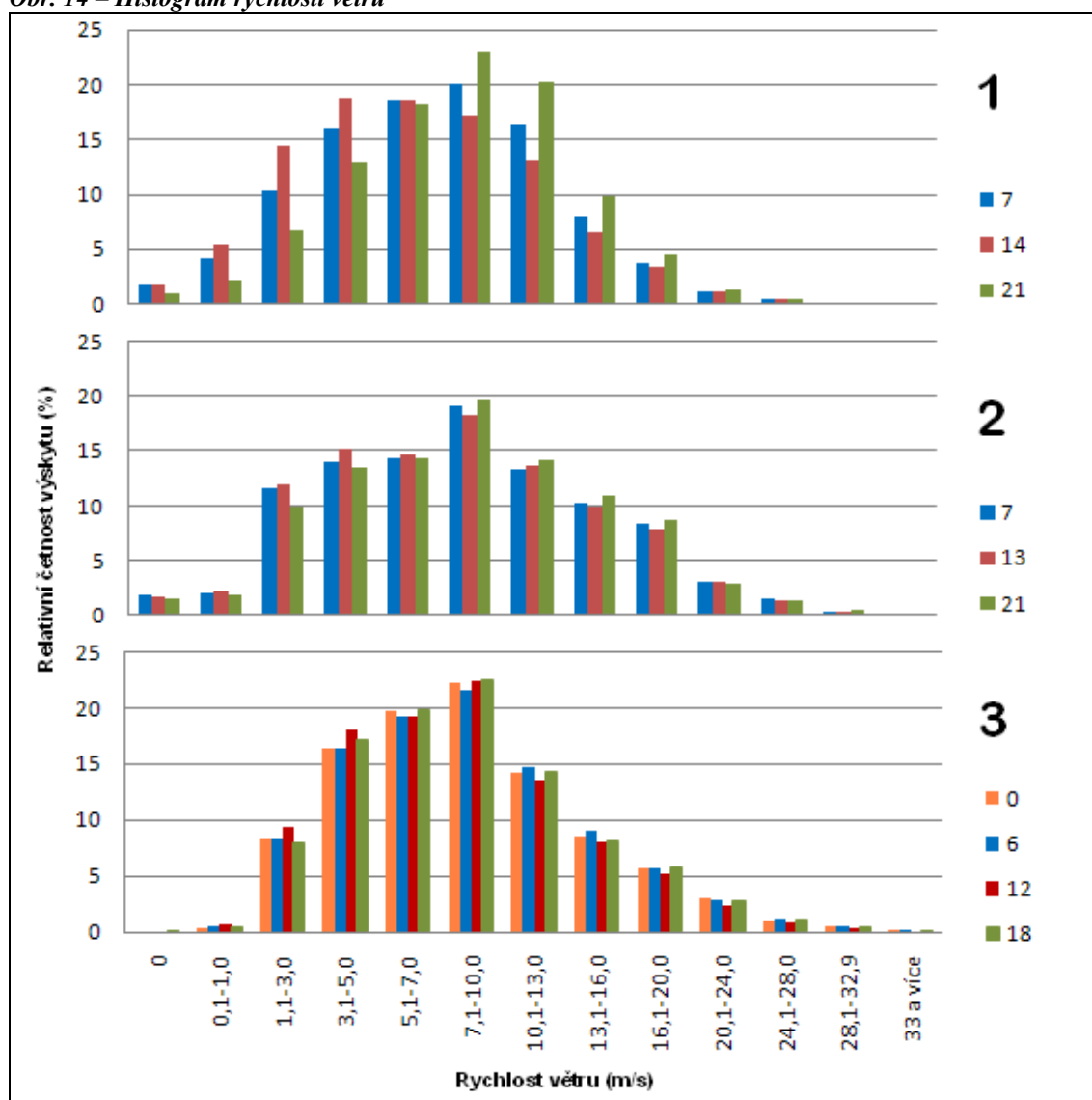
Zdroje dat: ÚFA AV ČR, ČHMÚ, KÚWU

4.2.3 Histogram rychlosti větru

Pro všechny tři stanice je typický častý výskyt rychlosti větru v intervalu 7,1–10 m/s, což odpovídá zhruba stupni 5 na Beaufortově stupnici. Výjimkou v tomto směru je pouze termín 14 h na Milešovce, kde se častěji vyskytují nižší rychlosti větru (4 a 5 m/s). Pro řadu aerologických měření je typický výrazně nižší podíl rychlostí větru do 1 m/s (jen kolem 0,5%) ve srovnání s přízemními měřeními. Důvody spočívají v odlišné citlivosti měření (např. vliv námrazy na činnost anemometrů) i charakteru proudění (role termické a terénní složky proudění).

Třídní intervaly rychlosti větru byly upraveny na základě (Bednář et al., 1999) a zhruba odpovídají jednotlivým stupňům Beaufortovy stupnice. Relativní výskyt různých rychlostí větru je pro všechny stanice a termíny měření znázorněn na obr. 14.

Obr. 14 – Histogram rychlosti větru



Poznámky: 1 – Milešovka (1905–2007), 2 – Szrenica (1961–1990), 3 – Praha-Libuš (1974–2007).

Zdroje dat: ÚFA AV ČR, ČHMÚ, KÚWU

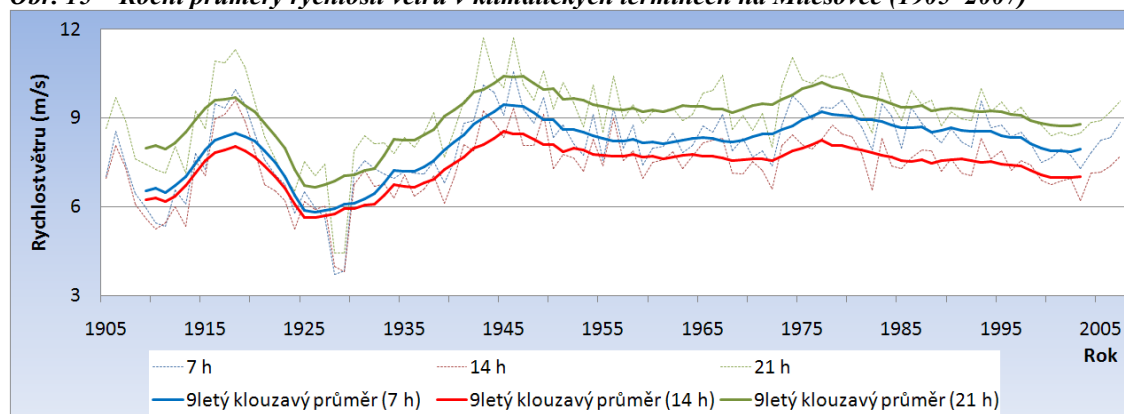
4.3 Analýza dlouhodobých trendů rychlosti větru

K analýze dlouhodobých trendů rychlosti větru bylo použito několika metod. Vypočteny jsou jak termínové, tak absolutní dlouhodobé průměry za různě dlouhá časová období (roční a sezónní průměry, klouzavé 60denní průměry), kromě toho je věnována pozornost i dlouhodobým změnám četnosti silných větrů. Tam, kde je to možné, je zkonstruován lineární trend metodou nejmenších čtverců a je uvedena jeho statistická významnost.

4.3.1 Kolísání ročních průměrů

Interanuální kolísání průměrné rychlosti větru přináší první přiblížení probíhajících dlouhodobých změn. Pohledem či proložením trendovou křivkou lze celkem snadno odhadnout převažující trend. Na obr. 15 jsou znázorněny roční průměry rychlosti větru pro jednotlivé termíny na Milešovce v období 1905–2007. Pro zvýraznění trendu bylo v tomto případě použito shlazení 9letými průměry, použití lineárního trendu se jeví z důvodu velké rozkolísanosti ročních průměrů (zvláště v první polovině řady) jako nevhodné. V časové řadě lze identifikovat řadu období jako podprůměrně či nadprůměrně větrných – velmi slabá cirkulace je zřejmá v letech 1924 až 1935 a naopak silná zhruba v obdobích 1917–1920, 1943–1948 a 1974–1980. Od poloviny 40. let 20. století je na Milešovce patrný pokles rychlosti větru završený minimem v roce 2004.

Obr. 15 – Roční průměry rychlosti větru v klimatických termínech na Milešovce (1905–2007)

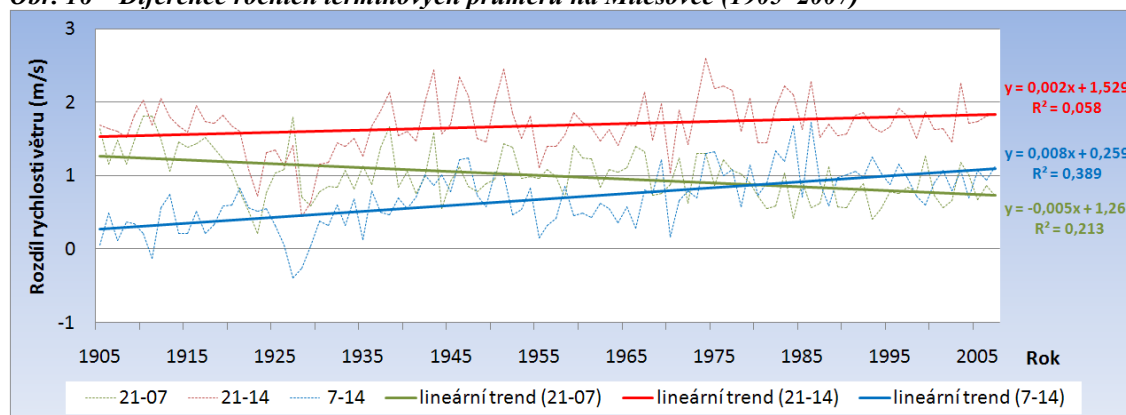


Zdroj dat: ÚFA AV ČR

Při letmém pohledu na tentýž obrázek je patrné, že se v dlouhodobém měřítku lehce mění difference mezi průměrnými rychlostmi větru v klimatických termínech, zejm. roste rozdíl mezi rychlostí v 7 a 14 hodin, v menší míře ve 21 a 14 hodin. Tyto difference a jejich lineární trendy jsou znázorněny na obr. 16. Zhruba se dá říct, že se zvyšuje amplituda denního chodu (toto tvrzení je bez nároku na vysokou přesnost, protože denní extrémy se přesně nekryjí s termíny 21 a 14 hodin; viz červená trendová čára na obr. 16) a vítr v 7 h postupně zrychluje a přibližuje se rychlosti měřené večer. Pro testování významnosti lineárních trendů byly vypočteny intervaly spolehlivosti; na hladině významnosti 0,05 lze prohlásit všechny trendy za prokázané.

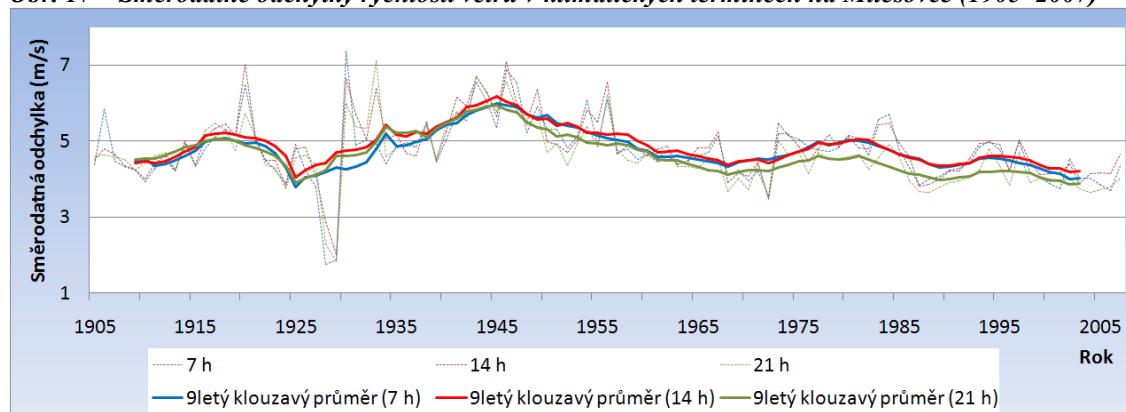
Na obr. 17 jsou pro stejnou stanici a období zobrazeny změny ročních směrodatných odchylek rychlosti větru. Směrodatná odchylka viditelně kopíruje křivku průměrů; mezi rychlostí větru a jeho variabilitou existuje přímá závislost. Toto platí zejména pro polední termín, v menší míře i ranní. Ve 21 hodin je (přes nejvyšší průměrnou rychlost větru) variabilita nejmenší, pravděpodobně v důsledku poklesu vlivu termické složky vzdušného proudění.

Obr. 16 – Diference ročních termínových průměrů na Milešovce (1905–2007)



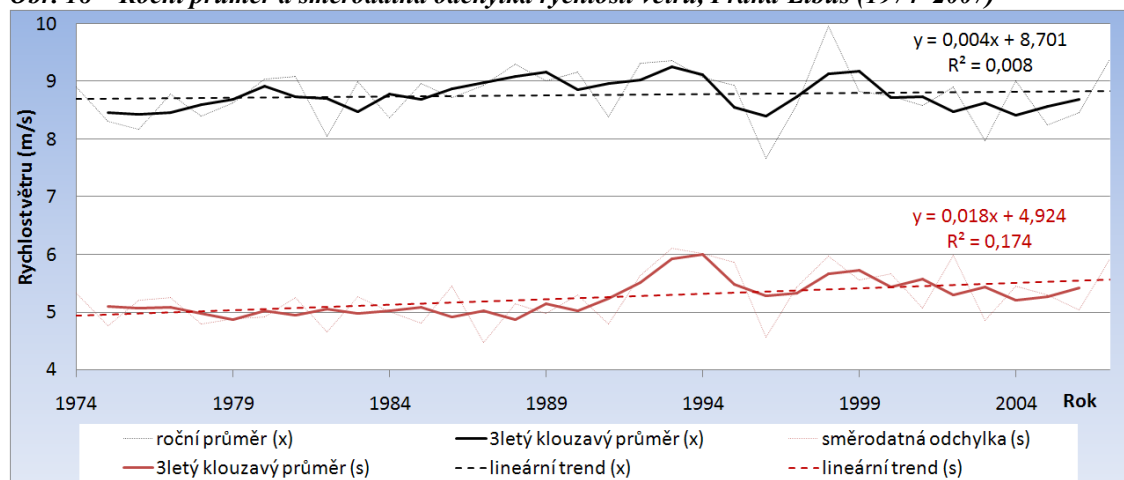
Zdroj dat: ÚFA AV ČR

Obr. 17 – Směrodatné odchylky rychlosti větru v klimatických termínech na Milešovce (1905–2007)

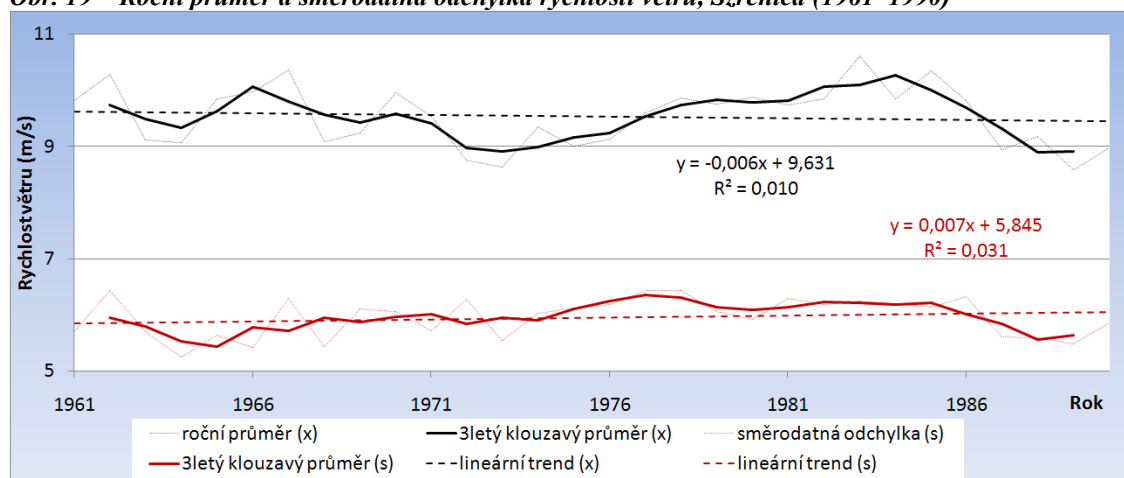


Zdroj dat: ÚFA AV ČR

V řadách stanic Szrenica a Praha-Libuš nebyly hodnoceny termíny zvlášť, protože rozdíly mezi nimi jsou velmi malé. Na obr. 18 a 19 je pro tyto dvě stanice znázorněn vývoj průměrných ročních rychlostí větru a směrodatných odchylek. Lineární trend rychlosti větru v Praze-Libuši je na hladině významnosti 0,05 neprokázaný, trend směrodatné odchylky ale ano. Trendy na stanici Szrenica nelze na hladině významnosti 0,05 prokázat.

Obr. 18 – Roční průměr a směrodatná odchylka rychlosti větru, Praha-Libuš (1974–2007)

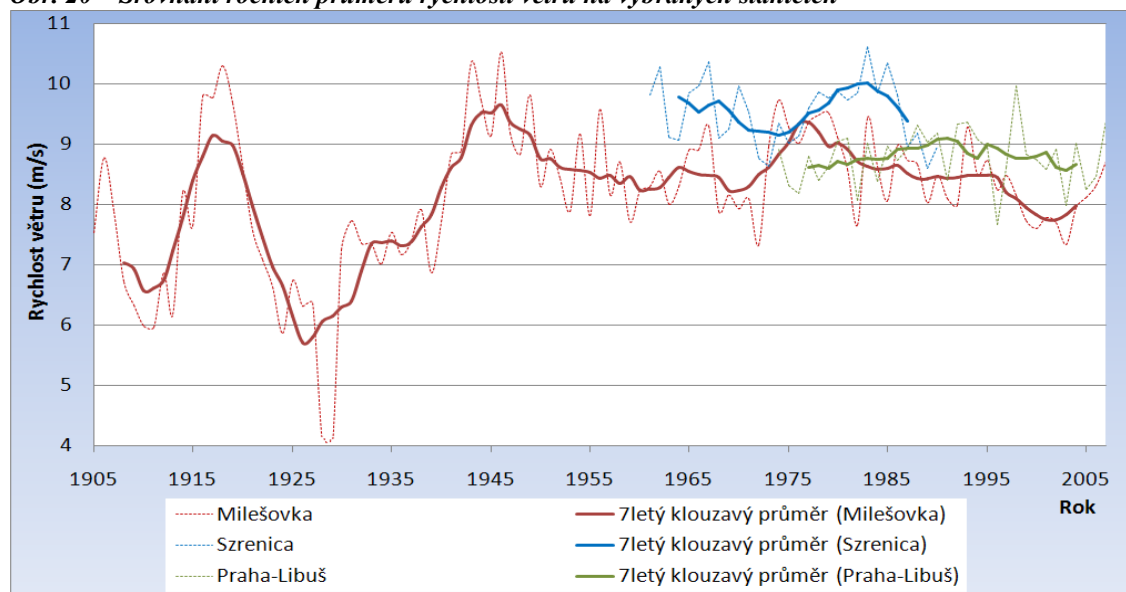
Zdroj dat: ČHMÚ

Obr. 19 – Roční průměr a směrodatná odchylka rychlosti větru, Szrenica (1961–1990)

Zdroj dat: KÚWU

Na obr. 20 jsou znázorněny roční průměry a klouzavé 7leté průměry rychlosti větru pro všechny stanice dohromady. Z tohoto srovnání je patrná velká rozkolísanost řady Milešovky v první polovině 20. století. Při porovnání klouzavých průměrů je zřejmé snižování rychlosti na obou horských stanicích během 60. a počátku 70. let, ovšem následný prudký nárůst rychlosti na Milešovce se na polské stanici ve stejné době neprojevuje. Zatímco na Milešovce lze sledovat od poloviny 70. let spíše sestupný trend, rychlost v Praze-Libuši se mírně zvyšuje. Shodné je naopak zeslabení proudění a následný nárůst v posledních letech obou řad. V období 1970–1985 lze na všech třech stanicích pozorovat zvyšování variability rychlosti větru; tento trend v Praze-Libuši trvá až do současnosti, naopak na Milešovce se variabilita snižuje. To potvrzuje tvrzení o přímě úměře mezi průměrnou rychlostí větru a její variabilitou.

Při snaze o srovnání dlouhodobých trendů rychlosti větru na vybraných stanicích se bohužel v plné míře projevuje rozdílná délka časových řad a jejich nedostatečný překryv.

Obr. 20 – Srovnání ročních průměrů rychlosti větru na vybraných stanicích

Zdroje dat: ÚFA AV ČR, ČHMÚ, KÚWU

4.3.2 Sezónní kolísání denních maxim a minim a absolutních maxim

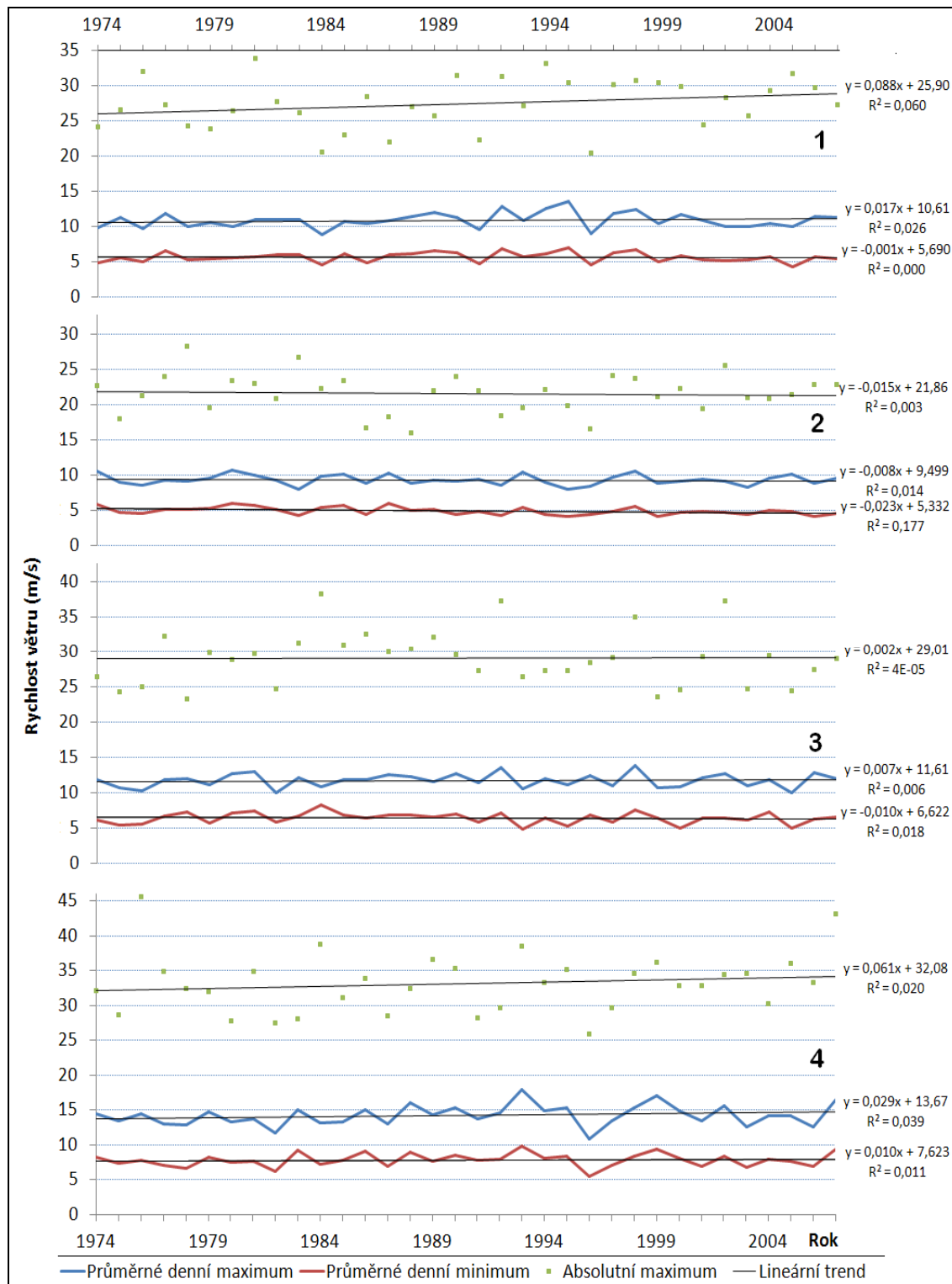
Tato statistika je ovlivněna faktem, že vychází z hodnot termínových měření. Výsledný rozdíl mezi hodnotami naměřenými v termínových a hodinových pozorováních může být (v závislosti na denním chodu) významný. Trendy průměrných denních maximálních a minimálních hodnot a absolutních maximálních naměřených rychlostí větru jsou pro tři hodnocené stanice a čtyři sezóny zobrazeny na obr. 21–23. Absolutní minima nejsou zobrazena, v případě větru jsou tyto po celou dobu velmi blízké nule a více než skutečné trendy by zobrazovaly možnosti přístrojů. Získané křivky jsou proloženy regresní přímkou, lineární trend je popsán rovnicí funkce a hodnotou spolehlivosti R^2 .

Při hodnocení ročních průměrů rychlosti větru v Praze-Libuši (viz obr. 18) byl zjištěn rostoucí trend rychlosti větru i jeho variability, rostoucí trend variability je statisticky významný. Na obr. 21 je patrné, že variabilita rychlosti větru vyjádřená průměrnou denní amplitudou roste ve všech obdobích zvláště i v celoročním průměru zhruba shodně (tempem cca $2 \text{ m} \times \text{s}^{-1} / 100 \text{ let}$), zima je současně sezónou s nejvýraznějším růstem hodnot průměrných denních maxim a minim i absolutních maxim. V létě a na jaře hodnoty naopak stagnují anebo klesají.

Trendy ročních průměrů na stanici Szrenica vykazují statisticky nevýznamný pokles, při hodnocení sezón zvláště je tento pokles potvrzen téměř ve všech případech, nicméně v období prosinec až únor je patrný výrazný růst rychlosti větru (obr. 22) vyjádřený absolutními maximy i průměrnými denními maximy. Naopak v letních měsících se rychlost výrazně snižuje.

Na Milešovce mají trendy všech hodnocených charakteristik v období 1956–2007 záporná znaménka, výjimku tvoří opět zimní období, kdy statisticky nevýznamně rostou průměry denních extrémů. Nejvýraznější pokles je opět sledován v letních měsících, což potvrzuje dříve vyslovenou hypotézu o oslabování proudění (vlivu barické složky proudění) v teplé části roku. Ve všech obdobích se současně snižuje i průměrná denní amplituda (obr. 23).

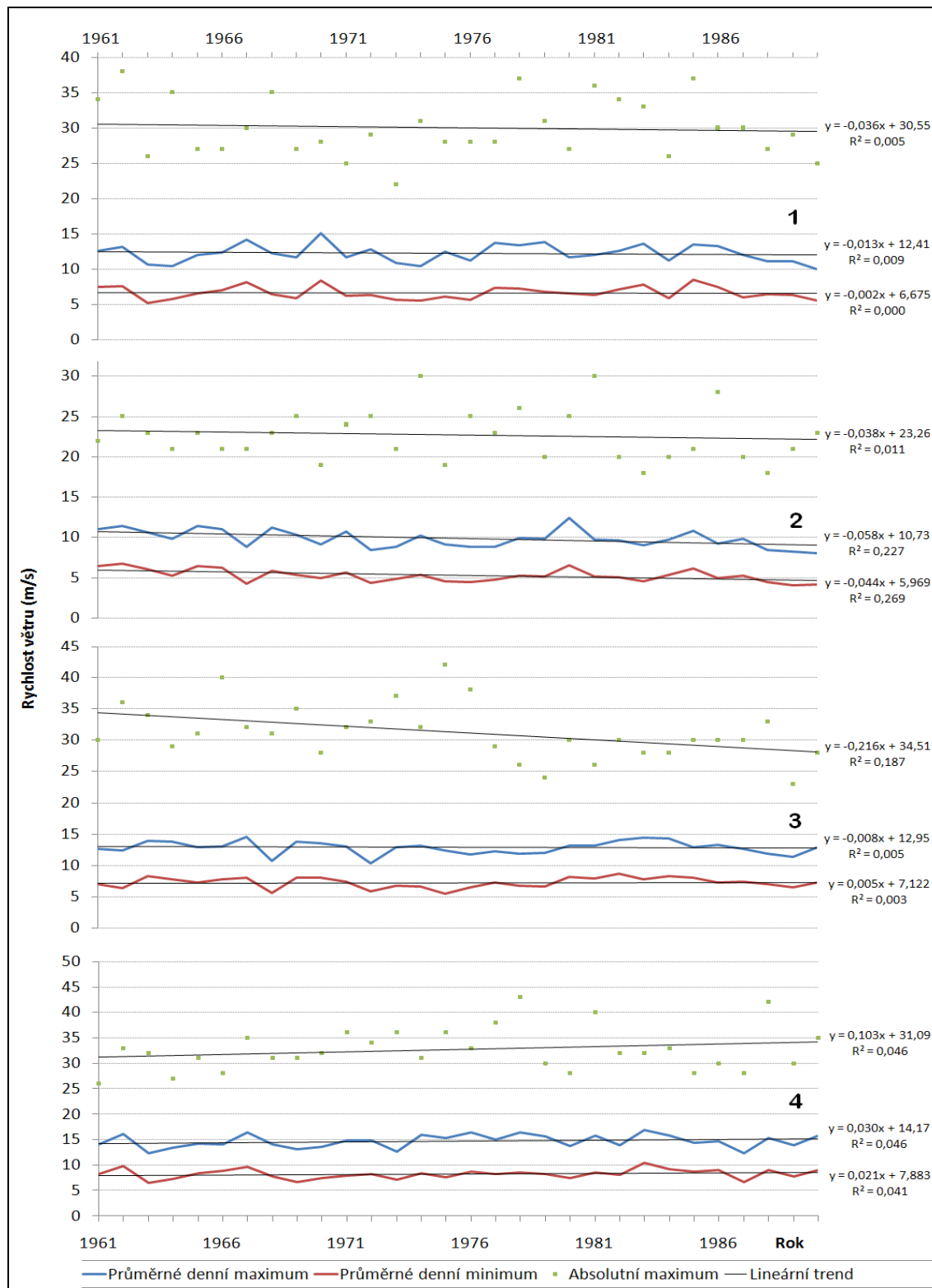
Obr. 21 – Průměrná denní maxima a minima a absolutní maxima, Praha-Libuš (1974–2007)



Poznámky: 1 – jaro (1.3.–31.5.), 2 – léto (1.6.–31.8.), 3 – podzim (1.9.–30.11.), 4 – zima (1.12.–28.2.). Statisticky významné trendy ($\alpha = 0,05$): jaro (absolutní maximum), léto a podzim (denní minimum).

Zdroj dat: ČHMÚ

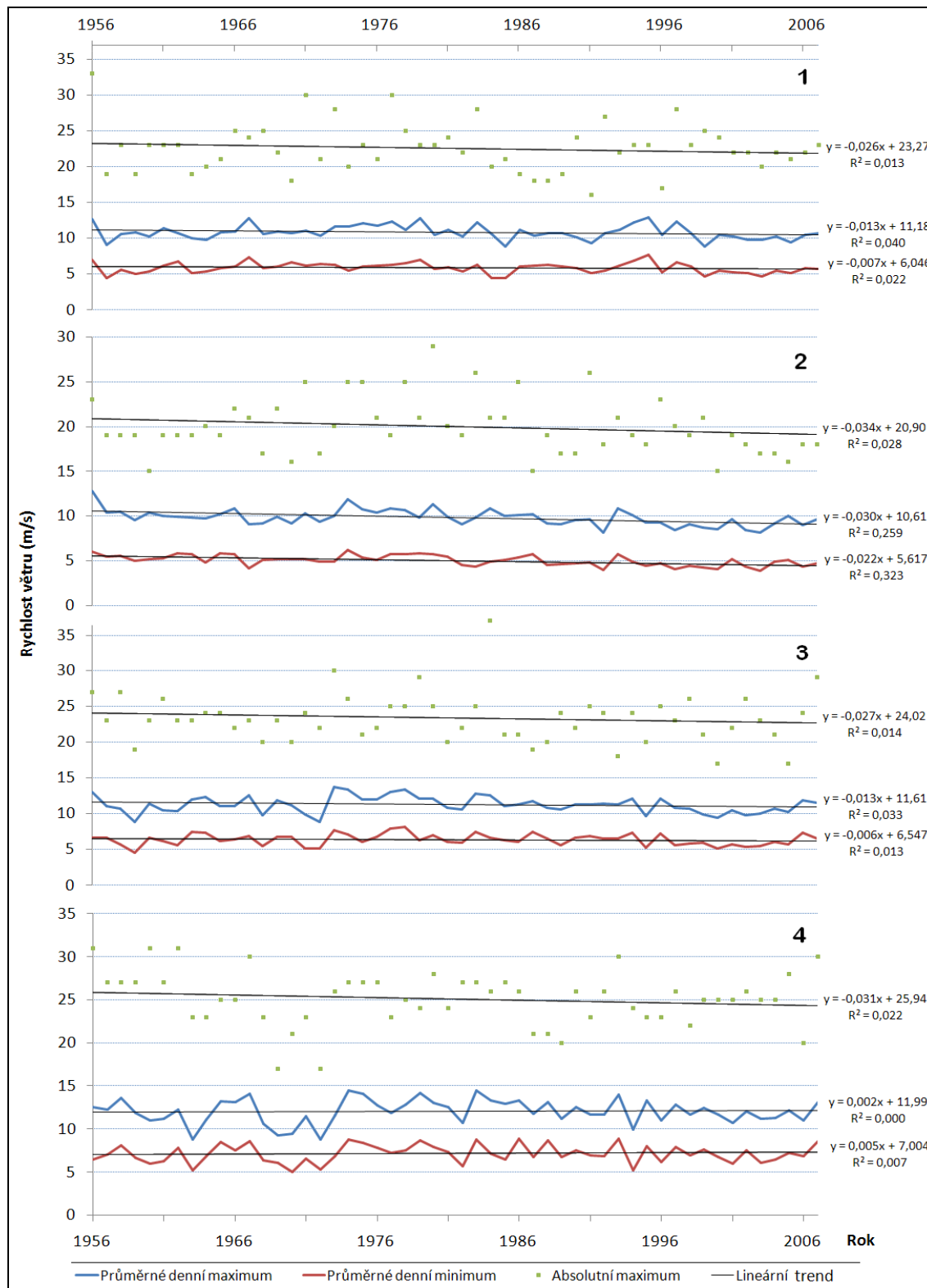
Obr. 22 – Průměrná denní maxima a minima a absolutní maxima, Szrenica (1961–1990)



Poznámky: 1 – jaro (1. 3.–31. 5.), 2 – léto (1. 6.–31. 8.), 3 – podzim (1. 9.–30. 11.), 4 – zima (1. 12.–28. 2.). Statisticky významné trendy ($\alpha = 0,05$): léto (denní maximum a denní minimum), podzim (absolutní maximum), zima (denní maximum a absolutní maximum).

Zdroj dat: KÚWU

Obr. 23 – Průměrná denní maxima a minima a absolutní maxima, Milešovka (1956–2007)



Poznámky: 1 – jaro (1.3.–31.5.), 2 – léto (1.6.–31.8.), 3 – podzim (1.9.–30.11.), 4 – zima (1.12.–28.2.). Statisticky významné trendy ($\alpha = 0,05$): jaro (denní maximum), léto (vše), podzim (denní maximum).

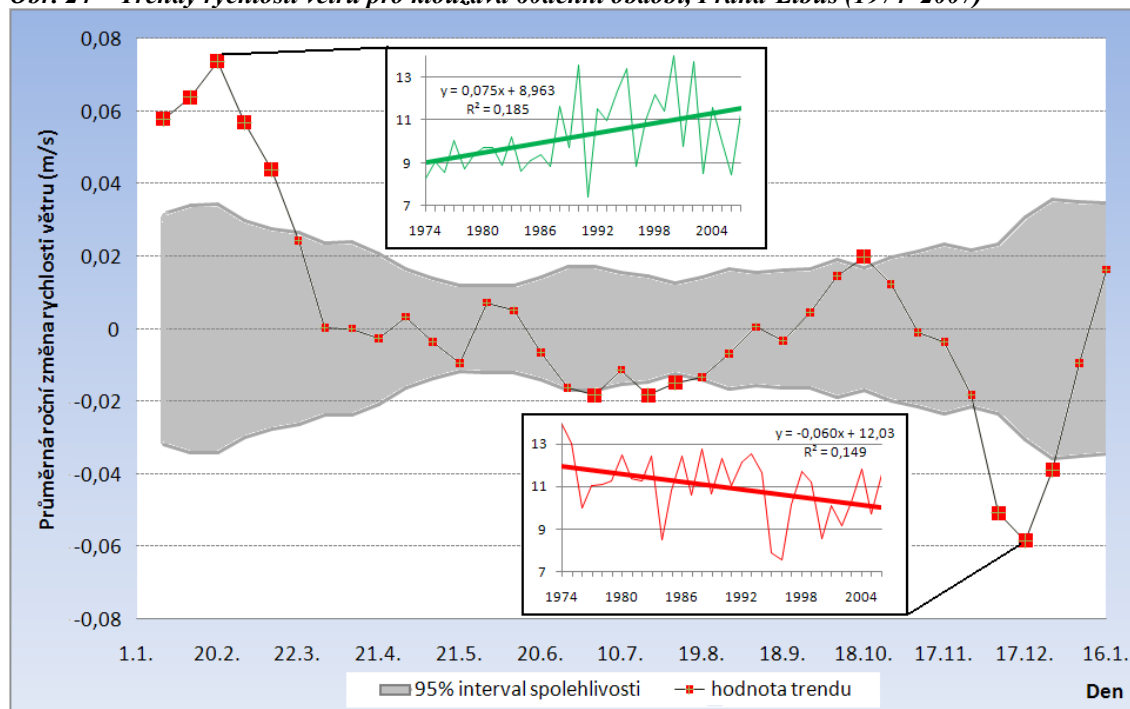
Zdroj dat: ÚFA AV ČR

4.3.3 Trendy rychlosti větru pro klouzavá 60denní období

Statistika hodnotící trendy rychlosti větru pro klouzavá období s délkou 60 dní byla převzata ze studie (Moliba et al., 2006). Výhodou této metody je hodnocení trendů za relativně dlouhá období, takže výsledek není příliš ovlivněn velkou variabilitou rychlosti větru v čase; na druhou stranu podává dostatek informací o kolísání trendů během roku, protože hodnotí celkem 36 navzájem o deset dnů posunutých období. Pro vizualizaci výsledků je použit graf znázorňující hodnoty trendu (v jednotkách změny rychlosti větru za rok) a rozsah 95% intervalu spolehlivosti kolem nuly (obr. 24–26). Časová řada Milešovky byla ze stejných důvodů jako v kapitole 4.3.2 zkrácena na období 1956–2007.

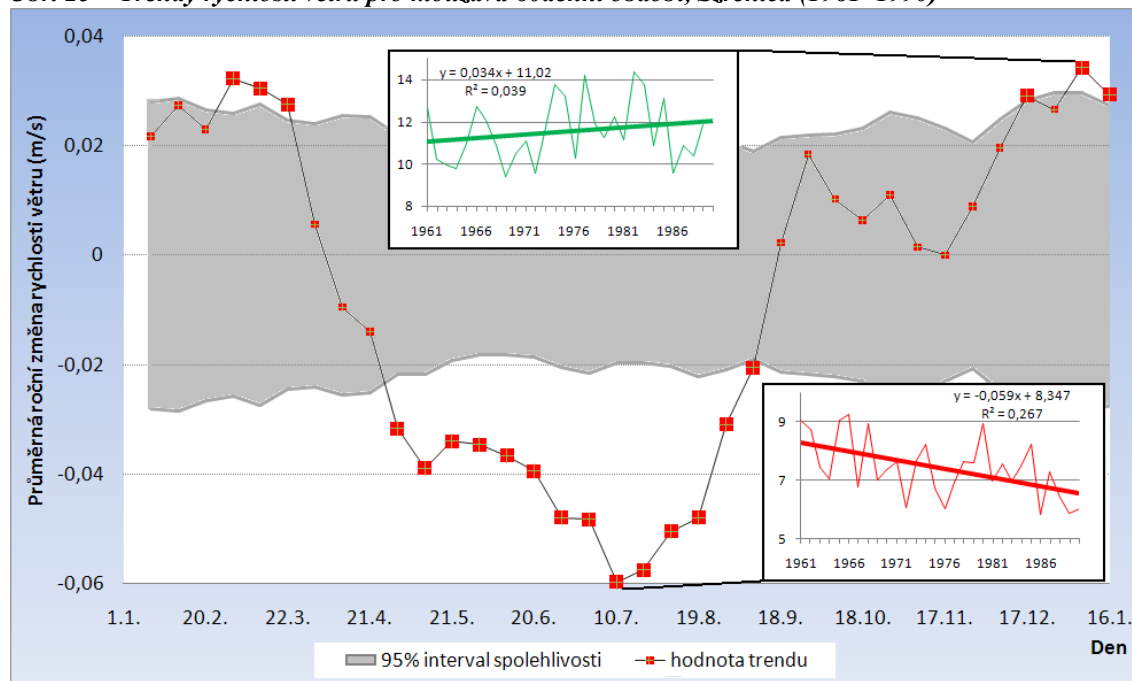
Všechny tři řady mají několik společných momentů – především je to pokles rychlosti větru v létě. Dle (Huth, Pokorná, 2004) se v období 1961–1998 v ČR významně zvyšuje teplota a doba slunečního svitu a snižuje oblačnost a relativní vlhkost. Uvedené trendy lze pozorovat celoročně s výjimkou podzimu, kdy jsou přesně opačné. Při tomto vývoji lze v teplém půlroce očekávat i rostoucí instabilitu atmosféry a pokles rychlosti větru i ve větších výškách, což je patrné na obr. 24 pro hladinu 850 hPa. Pokles je i zde statisticky významný, nicméně již výrazně menší než na horských stanicích.

Obr. 24 – Trendy rychlosti větru pro klouzavá 60denní období, Praha-Libuš (1974–2007)



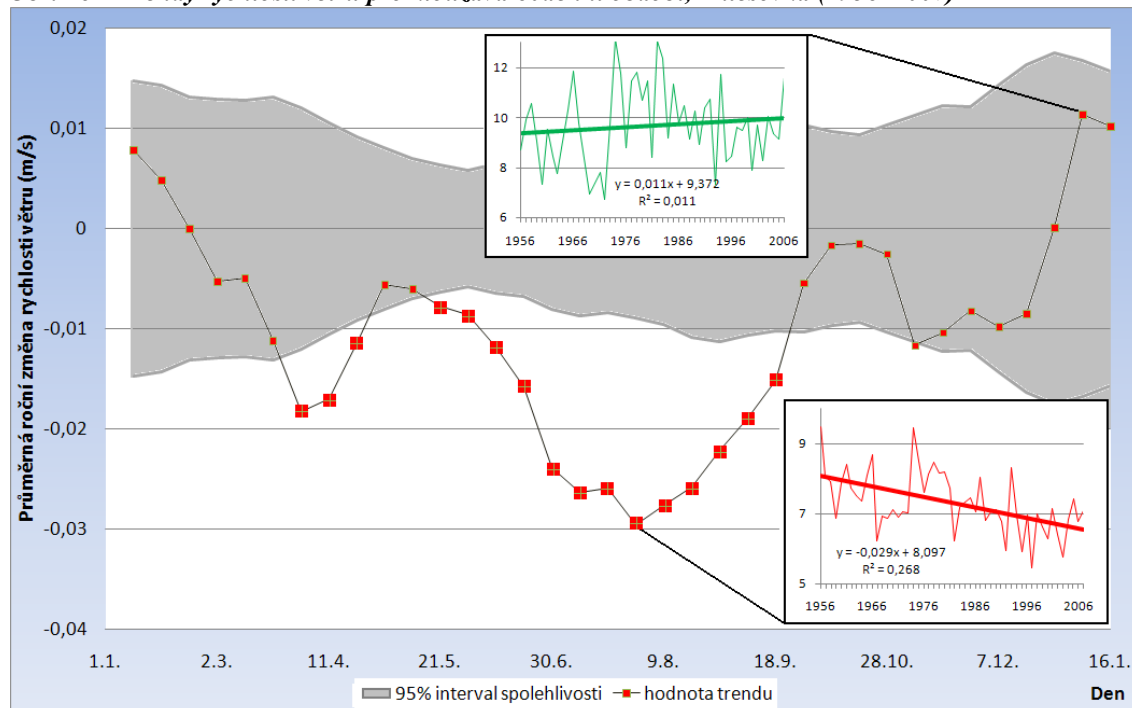
Poznámky: Na vertikální ose je znázorněna průměrná roční hodnota trendu, resp. rozsah 95% intervalu spolehlivosti kolem střední hodnoty, na ose x den v roce. Trend pro 60denní období je vyjádřen ke střednímu datu. Trendy ležící vně intervalu spolehlivosti lze prohlásit na $\alpha = 0,05$ za statisticky významné, v grafu jsou zvýrazněny zvětšenou velikostí znaku. Pro největší a nejmenší hodnotu trendu je ve výřezech znázorněno meziroční kolísání rychlosti větru s lineárním trendem (vertikální osa: rychlost v m/s, horizontální osa: rok). Výřezy se vztahují k datům 20. 2. (průměr za období 21. 1.–21. 3.) a 17. 12. (průměr za období 17. 11.–15. 1.).

Zdroj dat: ČHMÚ

Obr. 25 – Trendy rychlosti větru pro klouzavá 60denní období, Szrenica (1961–1990)

Poznámky: Popis os a výřezů viz obr. 24; výřezy se vztahují k datům 6.1. (období 7. 12.–4. 2.) a 10. 7. (období 10. 6.–8. 8.).

Zdroj dat: KÚWU

Obr. 26 – Trendy rychlosti větru pro klouzavá 60denní období, Milešovka (1956–2007)

Poznámky: Popis os a výřezů viz obr. 24; výřezy se vztahují k datům 6.1. (období 7. 12.–4. 2.) a 30. 7. (období 30. 6.–28. 8.).

Zdroj dat: ÚFA AV ČR

V zimním období je možné na všech stanicích pozorovat nárůst rychlosti větru, což potvrzuje zjištění z předchozí analýzy sezón. Vyšší rychlost v zimě souvisí s intenzivnější zonální cirkulací a je tak především důsledkem změny průměrného tlakového pole nad Evropou a okolím. Změny barické složky větru se plně projevují zejména ve volné atmosféře, což je patrné z řady Prahy-Libuše, kde maximální nárůst nastává v únoru ($0,75 \text{ m}\times\text{s}^{-1}/10 \text{ let}$). Naopak na Milešovce je nárůst v zimě nevýrazný, což je pravděpodobně důsledkem nižší nadmořské výšky a častějšího výskytu inverzí.

Zajímavá je amplituda trendů, která roste s nadmořskou výškou. Zatímco na Milešovce činí pouze cca $0,04 \text{ m}\times\text{s}^{-1}/\text{rok}$, na stanici Szrenica cca $0,1 \text{ m}\times\text{s}^{-1}/\text{rok}$ a v Praze-Libuši pak téměř $0,14 \text{ m}\times\text{s}^{-1}/\text{rok}$. Pokud bychom proložili grafy idealizovanou křivku ročního chodu trendů s minimem v létě a maximem na konci roku, bylo-by možné na podzim identifikovat jasné vymezené období, kdy jsou skutečné trendy poměrně výrazně odchýlené směrem k vyšším (resp. rostoucím) rychlostem. To souhlasí s výsledky studie autorů Huth a Pokorná (2004), kteří prokázali v této části roku (pro celé území Česka v období 1961–1998) významný pokles např. maximální teploty a slunečního svitu či nárůst oblačnosti a relativní vlhkosti. V mnoha ohledech právě podzim vykazuje nejjednodušší a nejvýraznější trendy meteorologických prvků v Čechách. V případě rychlosti větru trendy pro celý podzim neprokázali, nicméně metodou klouzavých krátkodobých průměrů bylo pro všechny stanice prokázáno krátké období na podzim, kdy se rychlost zvyšuje či stagnuje.

4.3.4 Trendy vysokých rychlostí větru

Atributem komplexních studií rychlosti větru jsou analýzy vysokých rychlostí větru nebo maximálních denních nárůzů. Vzhledem k tomu, že pro tuto práci jsou k dispozici pouze údaje z termínových měření, nelze se v této práci zabývat touto problematikou detailněji. Alespoň základní vhléd bude nicméně umožněn vypočtením podílu vysokých rychlostí větru (odpovídajících na Beaufortově stupnici síle větru vichřice a výše) ze souboru termínových měření.

V příloze 2 jsou vizualizovány výsledky této analýzy pro všechny tři řady ve shodném měřítku. Rozkolísanost řady Milešovky je při výběru měření nad $20,8 \text{ m/s}$ ještě výraznější, než bylo zjištěno analýzou průměrů. V extrémně větrném roce 1946 dosahuje téměř 10 % všech termínových záznamů rychlosti minimálně vichřice (z toho je 34 % v únoru, 22 % v lednu, 9 % prosinci), v roce 1943 téměř 8 % (25 % v dubnu, 22 % v březnu a 20 % v únoru) a v roce 1956 6 % (35 % v březnu, po 17 % v listopadu a prosinci). Mezi termíny měření nejsou v četnosti téměř žádné rozdíly, a to ani v hodnocení chladné a teplé části roku zvlášť. Oproti větrnému období 40. let se v prvních 11 letech řady vysoké rychlosti nevyskytují téměř vůbec. Pokles četnosti vysokých rychlostí větru patrný na Milešovce od 40. let do současnosti se neshoduje s nárůstem na zbylých dvou stanicích, svou roli zde ale hraje bezprecedentně silné proudění právě ve 40. letech. Společný je velmi nízký výskyt silných větrů v druhé polovině 80. let., což dobře koresponduje s výsledky analýzy ročních průměrů.

Kapitola 5

Diskuse

Analýzy rychlosti větru vztahující se k území Česka a uveřejněné v prostudované literatuře přináší většinou řadu statisticky významných trendů. Ve srovnání s analýzami jiných klimatických prvků (teplota, srážky, sluneční svit, oblačnost atd.) je nicméně pro rychlost (i směr) větru typická výraznější prostorová i časová proměnlivost. Tato proměnlivost bývá vysvětlována jako důsledek specifických místních vlivů v místě měření (topografie, drsnost povrchu), jako důsledek možných narušení kontinuity či homogenity měření, anebo prostě hrubými chybami při měření a správě dat. Pro studium trendů klimatických prvků a získání spolehlivých výsledků je zapotřebí rozsáhlá, podrobná a spolehlivá datová základna. V případě analýz větru – právě vzhledem k jeho vysoké proměnlivosti – se tato potřeba jeví snad ještě významnější. Na příkladu (Tolasz, 1995) bylo demonstrováno, jak výrazný vliv na odhadnuté trendy může mít volba stanic.

Jako obzvlášť přínosné se jeví komplexní studie, zabývající se zároveň trendy několika klimatických prvků zároveň (Huth, Pokorná, 2004; Moliba et al., 2006). Z těchto prací lze čerpat cenné informace pro hledání příčin probíhajících trendů rychlosti větru. Bohužel dosud žádná studie nezmiňuje trendy výškového proudění, ale vzhledem k velmi řídké a často i špatně dostupné datové základně je to pochopitelné. Předkládaná práce, založená na třech větroměrných řadách, relativně dobře popisujících proudění ve vyšších hladinách mezní vrstvy atmosféry, resp. ve volné atmosféře, má právě za cíl přispět k poznání trendů výškového proudění.

Nutno dodat, že tento výběr byl také ovlivněn velmi špatnou dostupností dat a že zejména odlišná délka a rozsah časových řad (1905–2007, 1961–1990, resp. 1974–2007) ztěžuje hodnocení trendů. Při některých analýzách se na podobě výsledků významně projevuje také fakt, že vychází z termínových měření. Zejména pro hodnocení trendů maximálních a minimálních rychlostí větru (průměrných i absolutních) a četnosti silných větrů by bylo dobré mít k dispozici podrobnější data. Rozdíl oproti výsledkům, kterých by bylo dosaženo např. z hodinových záznamů, lze očekávat větší v případě Milešovky, která má výrazněji profilovaný denní chod rychlosti větru a větší podíl silných větrů v důsledku konvekce.

Výrazná proměnlivost rychlosti větru, patrná v první polovině řady Milešovky, je v této práci (vzhledem ke skeptickému přístupu českých odborníků) hodnocena jen velmi opatrně. Z tohoto hlediska by jistě bylo zajímavé alespoň v hrubých rysech porovnat výsledky měření rychlosti větru na Milešovce s nějakou nedalekou horskou stanicí s dostatečně dlouhou časovou

řadou, např. německým Fichtelbergem. Dále je opatrně hodnocena nižší rychlost větru měřená v Praze-Libuši v 70. letech. Je zajímavé, že zrychlení je pozorováno právě v době, kdy se přecházelo na nové, přesnější typy přístrojů (Skřivánková, 2005), výrazně méně náchylnějších např. k interferencím s radiovými vysíláními. Je zajímavé, že řady Milešovky a Prahy-Libuše vykazují rozdílné trendy v množství provedených analýz, zejména se jedná o trend absolutních maxim a krátkodobých průměrů v zimním období. Vysvětlením by mohlo být, že je Milešovka ve větší míře v chladné části roku vystavována stabilnímu zvrstvení atmosféry a je tak méně zasažena postupně se zrychlujícím prouděním ve volné atmosféře. Výše zmíněná studie klimatických prvků v období 1961–1998 (Huth, Pokorná, 2004) naznačuje skutečně rozdíly mezi trendy Milešovky a pražských stanic, nicméně oblačnost na Milešovce v zimě nepřibývá. Vzhledem k časové proměnlivosti trendů je možné, že na vině je právě různá délka hodnocených období. Se stejným problémem se ostatně potýká výše zmíněná studie; výsledky pro období končící rokem 1998 jsou často diametrálně odlišné od trendů pozorovaných do 80. let, což autory vede k domněnce, že právě na konci 80., či během 90. let došlo ke změně znaménka trendů oblačnosti a slunečního svitu. Podobná změna trendu je patrná i z některých analýz, provedených v této práci (např. průměrná rychlost větru na stanici Szrenica), nicméně změny trendů nebyly podrobněji testovány.

Nejvýznamnějším trendem, zjištěným v rámci této práce a pozorovaným na všech stanicích, je pokles rychlosti větru v teplé části roku s maximem v červenci až srpnu. Do jisté míry je také patrný nárůst rychlosti větru v zimě, na Milešovce ale statisticky nevýznamný a v Praze-Libuši ohraničený pouze zhruba na leden až březen a předcházený výrazným zpomalováním v listopadu a prosinci, což je patrné z analýzy 60denních období. Metoda použitá pro hodnocení chodu trendů během roku přináší zajímavé výsledky a v mnoha ohledech zpřesňuje výsledky získané analýzou sezónních průměrů, na druhé straně přináší řadu otázek, jejichž řešení přesahuje rozsah této práce. Například zjištěný nárůst roční amplitudy trendů s nadmořskou výškou stanice (resp. měření) nekoreluje s roční amplitudou rychlosti větru a z teorie je známo, že nadmořská výška může mít na chod i rychlost větru vliv velmi sporadický. Navíc amplituda v Praze-Libuši je výrazná zejména kvůli minimu dosaženému na začátku zimy. Analýzou 60denních klouzavých průměrů bylo zjištěno krátké období na podzim, kdy se rychlost zvyšuje, popř. stagnuje. Toto období je pěkně vymezeno právě v Praze-Libuši díky následnému výraznému minimu. Důvodem, proč se stejně hluboké minimum nezobrazuje i v případě Milešovky, je odlišná délka testovaného období. Pokud by za počáteční rok byl zvolen rok 1974, hodnota by byla stejně záporná. Bohužel řada polské stanice není dost dlouhá, aby tento výrazný rozdíl mezi trendem rychlosti větru v prosinci a únoru mohla potvrdit či vyvrátit.

V kapitole 2.8 byla provedena analýza trendů cyklonality, jak ji zachycují tři kalendáře synoptických situací, pravidelně sestavované českou a německou meteorologickou službou. Vypočtené korelační koeficienty ukázaly, jak odlišné jsou v některých případech zjištěné výsledky v závislosti na metodice vypracovávání kalendářů a velikosti územních celků, ke kterým se vztahují atd. Překvapivě výsledky dosažené v českém kalendáři mnohem lépe korelují s objek-

ktivní klasifikací Wetterlagenklassifikation, než s metodologicky obdobnou Großwetterlagen klasifikací.

V úvodu práce byla vznesena hypotéza, že cyklonalita bude poměrně úzce souviset se střední rychlostí větru na testovaných stanicích. Vzhledem k rozpětí vypočtených korelačních koeficientů a malému počtu testovaných stanic nelze tuto hypotézu přijmout. Nicméně některé zjištěné vztahy jsou velmi těsné. Pokud bychom se omezili na období 1983–2003, ve kterém se nevyklytly extrémní hodnoty indexu cyklonality, nejlépe koreluje střední rychlost větru v Praze-Libuši celkem pochopitelně s kalendářem ČHMÚ (Pearsonův korelační koeficient je 0,42) a kalendářem Großwetterlagen (0,44). Objektivní Wetterlagenklassifikation a řada Prahy-Libuše vykazují naopak dokonce slabou negativní závislost (-0,17). Výsledky z Milešovky korelují slabě pouze s katalogem ČHMÚ (0,23). Za období 1905–2004 je zjištěná míra korelace mezi řadou Milešovky a indexem cyklonality vypočteném z klasifikace Großwetterlagen rovna 0,18. Nízký koeficient v tomto případě by mohl být dán relativně větším vlivem místních podmínek na rychlost větru a prokazatelně také nehomogenitou řady rychlosti větru Milešovky. Stanice Szrenica má v ročních průměrech prakticky nulovou korelaci s českým kalendářem, což souvisí s odlišným charakterem proudění na severu a ve středu Čech. Nicméně dobrá shoda existuje v zimě, kdy významnou roli hraje silné zonální proudění, projevující se poměrně jednotně jak v Krkonoších, tak v Praze.

Kapitola 6

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo zhodnotit dlouhodobé trendy rychlosti větru s využitím dostupné literatury a záznamů ze tří meteorologických stanic. Za tím účelem byla provedena analýza ročních, sezónních a krátkodobých průměrů rychlosti větru a analýza četnosti silných větrů. Dosažené výsledky lze v mnoha ohledech popsat způsobem, jakým jsou trendy charakterizovány v odborné literatuře – velkou časovou a prostorovou proměnlivostí. Vzhledem k volbě stanic není tato proměnlivost celkem pochopitelně tak výrazná, jako u studií hodnotících trendy větru na větším území, zejména pokud se jedná o území heterogenní (např. Česká republika), nicméně přesto jsou výsledky v mnoha ohledech rozporuplné.

K zjištěným výsledkům je zapotřebí přistupovat obezřetně, protože vychází z malého souboru časových řad a reflektují pouze proudění blízké horní části mezní vrstvy atmosféry (popř. volné atmosféry), což ale bylo záměrem. Z tohoto důvodu se na trendech podílejí převážně změny barické složky proudění; trendy pozorované na níže položených místech by se od zjištěných zákonitostí mohly výrazně lišit – v závislosti na místních vlivech.

Hlavní identifikované trendy, patrné v určité míře na všech třech stanicích, jsou nárůst průměrné rychlosti větru v zimním období (nejvýraznější ve volné atmosféře) a naopak pokles rychlosti v nejteplejší části roku. Tyto trendy docela dobře zapadají do již popsaných změn klimatu v prostředí střední Evropy. Zimní nárůst rychlosti větru je způsoben především živější zonální cirkulací, která je ve volné atmosféře charakteristická nejvyšší průměrnou rychlostí. V místech, která nejsou zasažena zimními inverzemi, lze tento trend očekávat výraznější. V létě analýza klouzavých 60denních období prokázala významné snižování rychlosti větru.

Součástí práce je uvedení tří katalogů synoptických situací a analýza trendů četnosti cyklonálních a anticyklonálních synoptických situací včetně uvedení korelace cyklonality a střední rychlosti větru.

Předkládaná práce přináší, případně potvrzuje některé odpovědi na otázky týkající se trendů rychlosti větru a jejich souvislostí s probíhajícími klimatickými změnami. Analýzy vychází nicméně z poměrně malého počtu časových řad různé délky, což mnohdy výrazně ovlivňuje jejich výsledky a (i vzhledem k minimálnímu počtu podobně zaměřených studií) omezuje možnosti srovnání a formulace obecně platných závěrů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INTERNETOVÝCH ZDROJŮ

Seznam použité literatury

- Bednář, J., Zikmunda, O. (1985): Fyzika mezní vrstvy atmosféry. Academia, Praha, 245 s.
- Brázdil, R., Štekl, J., Budíková, M., Dobrovolný, P., Fišák, J., Kolář, M., Prošek, P., Sokol, Z., Štěpánek, P., Štěpánková, P., Zacharov, P. (1999): Klimatické poměry Milešovky. Academia, Praha, 433 s.
- Brázdil, R. (2002): Meteorologické extrémy a povodně v České republice – přirozený trend nebo následek globálního oteplování? Geografie – Sborník ČGS, 107, č. 4, s. 349–370.
- Cahynová, M., Huth, R. (2007): Trendy v kalendáři povětrnostních situací HMÚ/ČHMÚ v období 1946–2002. Meteorologické zprávy, 60, č. 6, s. 175–182.
- Drozdov, O. A., Vasiljev, V. A., Kobyševa, N. V., Raevskij, A. N., Smekalova, L. K., Školnyj, E. P. (1989): Klimatologija. Gidrometeoizdat, Leningrad, 568 s.
- HMÚ (1967): Katalog povětrnostních situací pro území ČSSR. HMÚ, Praha, 94 s.
- Huth, R., Pokorná, L. (2004): Trendy jedenácti klimatických prvků v období 1961–1998 v České republice. Meteorologické zprávy, 57, č. 6, s. 168–178.
- Křivancová, S., Vavruška, F. (1997): Základní meteorologické prvky v jednotlivých povětrnostních situacích na území České republiky v období 1961 - 1990. Národní klimatický program ČR, sv. 27. ČHMÚ, Praha, 114 s.
- Moliba, J. C., Huth, R., Beranová, R. (2006): Roční chod trendů klimatických prvků v České republice. Meteorologické zprávy, 59, č. 5, s. 129–134.
- Skřivánková, P. (2005): Ověřovací testy radiosond Vaisala RS92 v Praze–Libuši. Meteorologické zprávy, 57, č. 2, s. 53–58.
- Slabý, S. (1993): Nárazy větru v České republice. Meteorologické zprávy, 46, č. 1, s. 4–10.
- Sládek, I. (2001): Proč jsou Krušné hory o tolik větrnější než Šumava. Větrná energie, 8, č. 1, s. 5–6.
- Sobíšek, B. (1992): Kontrola kvality větroměrných dat ve staniční síti v České republice v roce 1989. Národní klimatický program ČSFR, č. 5. Praha, ČHMÚ, 62 s.

- Sobíšek, B. (ed.) (1993): Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Academia, Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha, 594 s.
- Sobíšek, B. (2000): Rychlost a směr větru na území České republiky v období 1961–1990. Národní klimatický program ČR, Sv. 29. ČHMÚ, Praha, 87 s.
- Štekl, J. (1996): Vertikální profil rychlosti větru v mezní vrstvě atmosféry. *Větrná energie*, 3, č. 2, s. 3–6.
- Štekl, J. (1997): Meteorologie ve větrné energetice. *Větrná energie*, 4, č. 1, s. 3–48.
- Štekl, J., Sokol, Z., Zacharov, P. (2000): Denní a roční chod rychlosti větru v závislosti na nadmořské výšce nad územím České republiky. *Větrná energie*, 7, č. 2, s. 2–5.
- Tolasz, R. (1995): Dlouhodobé změny rychlosti větru ve volné krajině a v příměstské zóně. *Větrná energie*, 2, č. 1, s. 9–11.
- Vysoudil, M. (2000): Meteorologie a klimatologie pro geografii. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, 232 s.

Seznam použitých online dokumentů a internetových stránek

- AVIMET: O mezní vrstvě atmosféry – 1. část [online]. Internetové stránky pro interní komunikaci a informace pro pracovníky odboru letecké meteorologie ČHMÚ. Dostupný z WWW: <<http://www.avimet.cz/index.php?id=read&file=1233069758>>. [CIT: 11. 7. 2009].
- ČHMÚ (2007): Stanovisko Českého hydrometeorologického ústavu a Českého národního výboru pro omezování následků katastrof k Zelené knize „Adaptace na klimatickou změnu v Evropě – možnosti pro postup EU“ [online]. ČHMÚ, Praha, 3 s. Dostupný z WWW: <<http://www.chmi.cz/stanzelknihac.pdf>>. [CIT: 11. 2. 2008].
- ČHMÚ (2008): Typizace povětrnostních situací pro území České republiky [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.chmi.cz/meteo/om/mk/syntypiz/kalendar.html>>. [CIT: 1. 4. 2010].
- Deutscher Wetterdienst (2010): Die objektive Wetterlagenklassifikation [online]. Dostupný z WWW: <http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&gsbSearchDocId=675502>. [CIT: 1. 4. 2010].
- IPCC (2007): Změna klimatu 2007: Dopady změny klimatu, adaptace a zranitelnost. Příspěvek Pracovní skupiny II ke Čtvrté hodnotící zprávě Mezivládního panelu změny klimatu (IPCC). Shrnutí pro politické představitele, překlad dle verze ze 13. 4. 2007. Dostupný z WWW: <<http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/czech/ar4-wg2-spm.pdf>>. [CIT: 16. 6. 2009].
- Mather, J. R. (1987): Beaufort wind scale [online]. In: Oliver, J. E., Fairbridge, R. W. (eds.): The Encyclopedia of Climatology. Springer, Berlin, Heidelberg, 1002 s. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/x5830w2672482025/?p=72c61dc75c5d462ab0e705a8d941810d&pi=0>>. [CIT: 25. 4. 2008].

-
- Mathew, S. (2006): *Wind energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 256 s. Chapter 3, Analysis of wind regimes [online], s. 45–88. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/lm8x50671t260502/fulltext.pdf>>. [CIT: 2. 4. 2009].
- Štekl, J. (2008): Časová variabilita rychlosti větru a předpověď výroby větrnými elektrárnami [online]. Konference ČK CIRED 2008, Tábor, Sekce 4 – Rozptýlená výroba, užití elektřiny, č. referátu 1. CIRED, Tábor, 16 s. Dostupný z WWW: <http://litovany.ic.cz/index_soubory/down/s4_01_08.pdf>. [CIT: 1. 8. 2009].

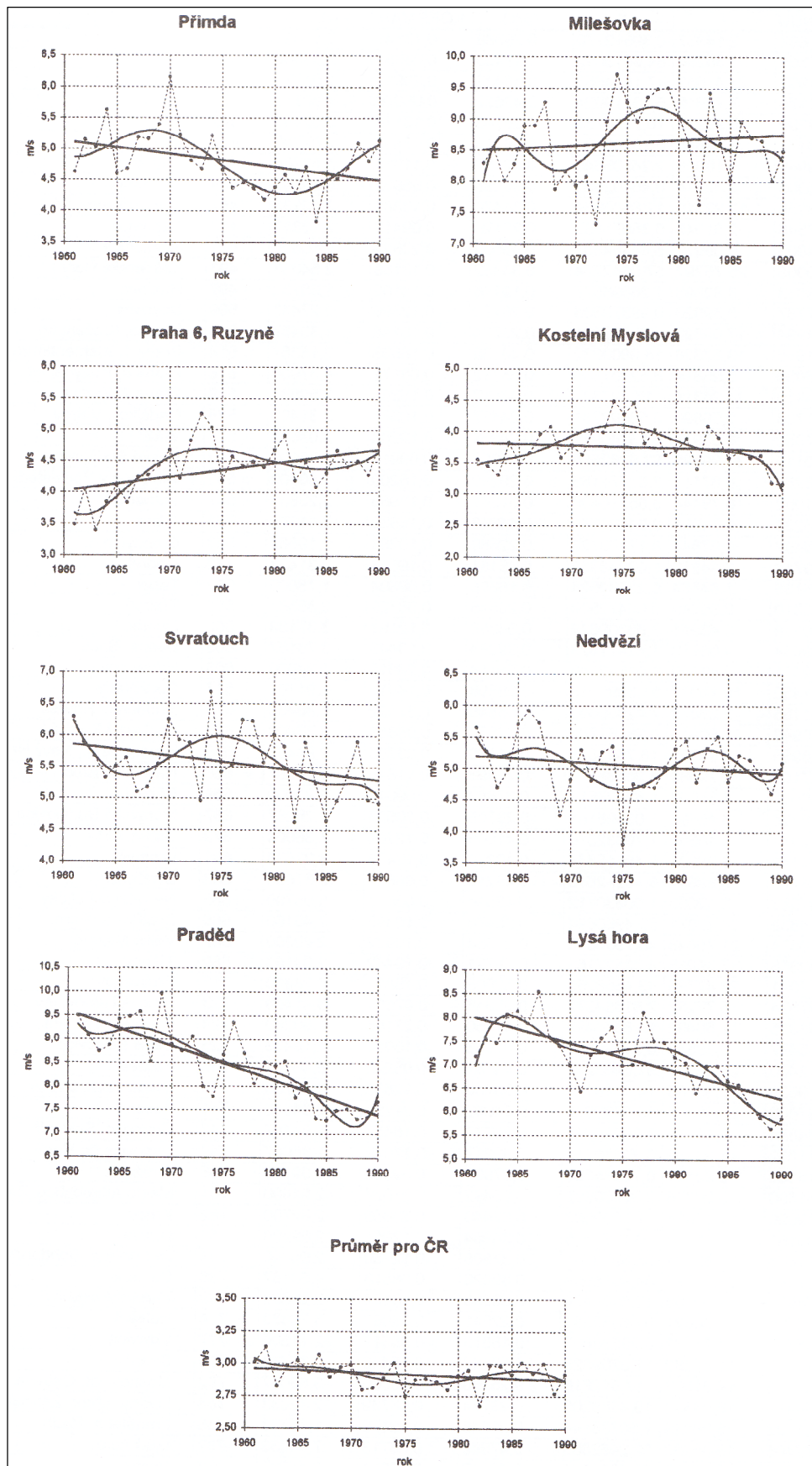
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1	Průměrná rychlost větru ve výšce 800 m n. m. v chladném půlroce	11
Obr. 2	Průměrné termínové rychlosti větru na vybraných meteorologických stanicích a průměrná rychlost větru v ČR	13
Obr. 3	Průměrný denní chod rychlosti větru (1994 – 2006)	14
Obr. 4	Průměrný vertikální profil rychlosti větru, Praha-Libuš (1971–1991)	15
Obr. 5	Turbulence vyvolaná překážkou v proudění vzduchu	16
Obr. 6	Sezónní a roční průměry indexu cyklonality	18
Tab. 1	Směrnice lineárního trendu indexu cyklonality	19
Obr. 7	Test homogenity časové řady rychlosti větru Milešovky (1905–2007)	26
Obr. 8	Test homogenity časové řady rychlosti větru Milešovky (1956–2007)	26
Obr. 9	Test homogenity časové řady rychlosti větru Prahy-Libuše (1974–2007)	26
Obr. 10	Test homogenity časové řady rychlosti větru stanice Szrenica (1961–1990)	26
Obr. 11	Průměrná rychlost větru v termínových pozorováních (1981–1990)	27
Obr. 12	Roční chod denních průměrů rychlosti větru na Milešovce v klimatických termínech (1905–2007)	27
Obr. 13	Roční chod denních průměrů rychlosti větru (1981–1990)	28
Obr. 14	Histogram rychlosti větru	29
Obr. 15	Roční průměry rychlosti větru v klimatických termínech na Milešovce (1905–2007)	30
Obr. 16	Diference ročních termínových průměrů na Milešovce (1905–2007)	31
Obr. 17	Směrodatné odchyly rychlosti větru v klimatických termínech na Milešovce (1905–2007)	31
Obr. 18	Roční průměr a směrodatná odchylnka rychlosti větru, Praha-Libuš (1974–2007)	32
Obr. 19	Roční průměr a směrodatná odchylnka rychlosti větru, Szrenica (1961–1990)	32
Obr. 20	Srovnání ročních průměrů rychlosti větru na vybraných stanicích	33
Obr. 21	Průměrná denní maxima a minima a absolutní maxima, Praha-Libuš (1974–2007)	34
Obr. 22	Průměrná denní maxima a minima a absolutní maxima, Szrenica (1961–1990)	35
Obr. 23	Průměrná denní maxima a minima a absolutní maxima, Milešovka (1956–2007)	36
Obr. 24	Trendy rychlosti větru pro klouzavá 60denní období, Praha-Libuš (1974–2007)	37
Obr. 25	Trendy rychlosti větru pro klouzavá 60denní období, Szrenica (1961–1990)	38
Obr. 26	Trendy rychlosti větru pro klouzavá 60denní období, Milešovka (1956–2007)	38

SEZNAM PŘÍLOH

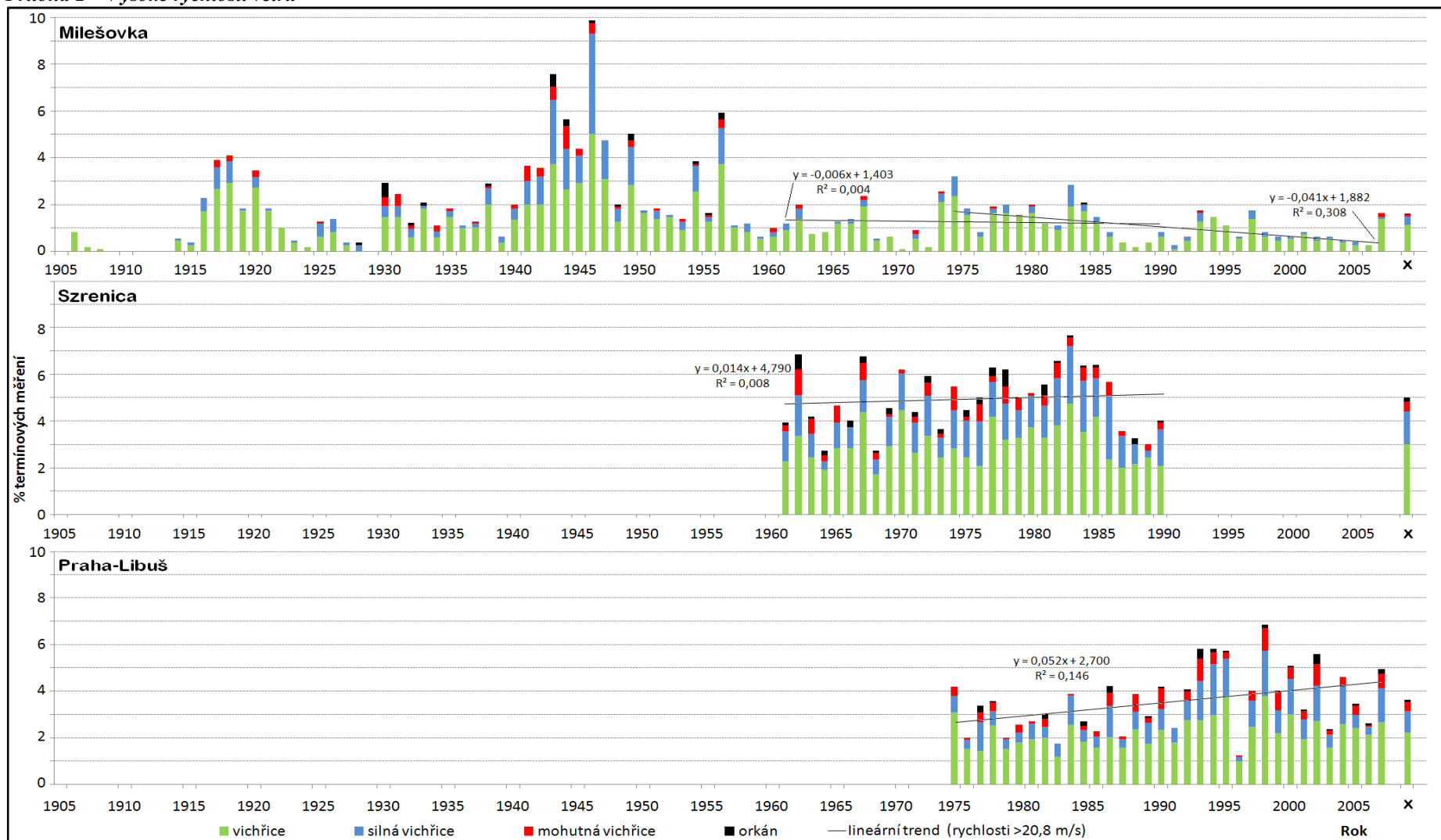
- Příloha 1 Trendy rychlosti větru na osmi stanicích Česka
Příloha 2 Vysoké rychlosti větru

Příloha 1 – Trendy průměrných ročních rychlostí větru na vybraných stanicích ČR



Zdroj: Sobišek, 2000

Příloha 2 – Vysoké rychlosti větru



Poznámky: X reprezentuje průměr příslušné řady, rozsah (m/s) rychlostí je: vichřice (20,8–24,4), silná vichřice (24,5–28,4), mohutná vichřice (28,5–32,6) a orkán (>32,6)
Zdroje dat: ČHMÚ, ÚFA AV ČR, KÚWU