

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE
Přírodovědecká fakulta
katedra fyzické geografie a geoekologie



CHYBY A OPRAVY MĚŘENÍ ATMOSFÉRICKÝCH SRÁŽEK
ERRORS AND CORRECTIONS OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION
MEASUREMENTS

Diplomová práce

Tomáš Ptáček

2012

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Ivan Sládek, CSc.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího práce RNDr. Ivana Sládka, CSc., a že jsem všechny použité prameny řádně citoval. Jsem si vědom toho, že případné využití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity. Svoluji tuto práci k zapůjčení pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 19. dubna 2012

.....

podpis

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu RNDr. Ivanu Sládkovi, CSc. za obětavou pomoc při řešení této práce. Mé poděkování patří také Dr. Borisi Sevrukovi (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich–Institut für Atmosphäre und Klima) za telefonické konzultace. Za technickou pomoc děkuji Mgr. Pavle Štěpánkové, Ph.D. (Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, Brno), RNDr. Petru Pešicemu, Ph.D. (Ústav fyziky atmosféry) a Mgr. Stanislavě Kliegrové, Ph.D. (Český hydrometeorologický ústav). Chtěl bych zde poděkovat i dalším lidem, kteří mi poskytli cenné informace.

Abstrakt

V předkládané práci je řešena problematika systematických chyb, které vznikají při měření srážek. Vlivem těchto chyb dochází k podhodnocování srážkových úhrnů. Velikost ztrát může dosahovat v naší zeměpisné oblasti i desítek procent. Mezi systematické chyby, které se nejvíce podílejí na výsledném podhodnocení, patří ztráty způsobené omočením stěn srážkoměru, ztráty výparem a ztráty vlivem aerodynamického efektu srážkoměru na srážkové částice. Velkou část práce zaujímá řešeršní část, ve které je o problematice systematických chyb měření srážek obecně pojednáno. Rešerše tak doplňuje v Česku chybějící ucelenou literaturu na toto téma. Ve výzkumné části jsou na vybraných čtyřech stanicích v ČR (Milešovka, Bedřichov – přehrada, Čáslav – Nové Město a Svratouch) aplikovány dvě stávající korekční metody odhadující velikost systematických chyb pro československý manuální srážkoměr Metra (metoda vytvořená v 80. letech Slovenským hydrometeorologickým ústavem a metoda popsána v dizertační práci Radoslava Tihláríka). První zmíněná metoda byla v 90. letech aplikována na všech stanicích na Slovensku, v Česku doposud použita nebyla. Výsledky ukazují, že metoda Dr. Tihláríka vydává podstatně větší korektury než metoda sestavená Slovenským hydrometeorologickým ústavem. Velikost ztrát se pohybuje v závislosti na roční době a nadmořské výšce na vybraných stanicích od 5 do 50 %. Výsledky upozorňují na fakt, že od vyšších poloh je v Česku přítomno výrazné podružné zimní maximum v ročním chodu srážek. Součástí práce je přiložený elektronický soubor, v němž je korigování srážkových úhrnů zdokumentováno.

Klíčová slova: atmosférické srážky, měření atmosférických srážek, chyby a korekce naměřených atmosférických srážek

Abstract

The thesis approaches the problem of systematic errors that arise in measuring precipitation. These errors lead to underestimation of total rainfall. Size of losses can reach in our latitudes even tens of percent. The systematic errors that contribute most to the underestimation include losses caused by the rain gauge walls wetting, evaporation losses and losses due to aerodynamic effects on the rain gauge precipitation particles. A major section of the thesis is formed by background research, which deals with the issue of systematic measurement errors precipitation. The background research tackles the lack of literature on this topic in the Czech Republic. In the research section of the thesis, two existing correction methods for estimating the size of systematic errors for the Czechoslovak manual rain gauge Metra (method developed in the 80's by Slovak Hydrometeorological Institute and the method described by the dissertation thesis Radoslav Tihlárík) were applied to data of selected four stations in the Czech Republic (Milešovka, Bedřichov - Přehrada, Čáslav - Nové Město and Svratouch). The first mentioned method was applied to all stations in the Slovak Republic in the nineties. Nevertheless, it has not been used in the Czech Republic so far. The results show that the Tihlárík method gives substantially larger corrections than the correction method constructed by the Slovak Hydrometeorological Institute. Size of losses varies according to seasons and altitude at selected stations from 5 to 50 %. The results also highlight the fact that in higher altitudes in the Czech Republic, dual annual course of precipitation with a strong incidental peak occurs in winter months. A part of the thesis is the attached electronic file that is documenting the precipitation correcting.

Key words: atmospherical precipitations, measurement of atmospherical precipitations, errors and corrections of atmospherical precipitations measurement

Obsah

Seznam obrázků, tabulek a grafů	7
1. ÚVOD	10
2. REŠERŠNÍ ČÁST	13
2.1. Měření srážek	13
2.2 Systematické a nesystematické chyby při měření srážek	16
2.3. Parametry srážkoměru ovlivňující měření	21
2.4. Srážkoměry a automatická měření srážek	26
2.5 Historický přehled	29
2.5.1 Mezinárodní srovnávací měření	30
2.5.2 Srovnávací měření v ČSSR	33
2.6 Chyby způsobené omočením	35
2.6.1 Postup při určování velikosti omočení	35
2.6.2 Odhad ztrát způsobených omočením pro srážkoměr Metra (metoda SHMÚ)	38
2.7 Chyby způsobené výparem	41
2.7.1 Odhad ztrát způsobených výparem pro srážkoměr Metra (metoda SHMÚ)	42
2.7.2 Odhad počtu hodin od konce padání srážek po jejich měření	45
2.8 Chyby způsobené účinky větru	45
2.8.1 Fyzikální pozadí problematiky	46
2.8.2 Metody výzkumu - přehled	49
2.8.3 Konverzní faktor pro kapalné srážky	51
2.8.4 Intenzita srážek jako faktor spektra kapalných srážek	53
2.8.5 Parametr N - odhad podílu srážek s intenzitou $I \leq I_{pr}$	56
2.8.6 Konverzní faktor pro tuhé a smíšené srážky	58
2.8.7 Odhad parametru Q	60
2.8.8 Přepočet rychlosti větru na výšku zachytné plochy a rychlost větru v době padání srážek	64
2.8.9 Poznámka k výpočtům	67
2.8.10 Shrnutí a omezení plynoucích z výpočtů	68

3 KOREKČNÍ METODY PRO SRÁŽKOMĚR METRA.....	68
3.1. Metoda SHMÚ.....	68
3.1.1 Aplikace metody SHMÚ na území Slovenska.....	72
3.2. Metoda Tihláríka (1995).....	77
3.2.1 Výpočet konverzního faktoru k_{lq} pro kapalné srážky.....	77
3.2.2 Výpočet konverzního faktoru k_{s+m} pro tuhé a smíšené srážky.....	80
3.2.3 Výsledky oprav metodou Tihláríka (1995).....	84
3.3 Aplikace Tihláríkovy metody na území ČR.....	84
4. HODNOCENÍ KVALITY POUŽITÝCH DATOVÝCH ŘAD A POSTUP PRÁCE....	87
4.1 Použitá data.....	87
4.2 Postup korektur na jednotlivých stanicích.....	89
4.2.1 Milešovka.....	90
4.2.2 Bedřichov.....	93
4.2.3 Čáslav.....	95
4.2.4 Svratouch.....	96
5. VÝSLEDKY.....	96
5.1 Parametr N	97
5.2 Přepočet rychlosti větru.....	97
5.3 Rychlost větru v době srážek.....	98
5.4 Srovnání korigovaných úhrnů denních, měsíčních a sumárních oprav.....	99
5.5 Srovnání úhrnů srážek korigovaných metodou SHMÚ a metodou Tihláríka.....	100
5.6 Modifikovaná metoda SHMÚ.....	102
5.7. Zhodnocení výsledků.....	102
5.7.1 Milešovka.....	102
5.7.2 Bedřichov.....	103
5.7.3 Čáslav.....	104
5.7.4 Svratouch.....	105
5.8 Shrnutí výsledků.....	106
5.9. Oblasti s předpokládaným velkým podhodnocením srážek.....	108
6. DISKUZNÍ ČÁST.....	110

7. SHRNU TÍ.....	115
8. ZÁVĚR.....	117
9. SEZNAM LITERATURY.....	119

Seznam obrázků, tabulek, grafů a map

Obrázky

Obr. 1a Srážkoměr Metra	11
Obr. 1b Srážkoměrná souprava srážkoměru Metra	14
Obr. 2 Numerická simulace směru a rychlosti větru nad záchytnou plochou srážkoměru	17
Obr. 3 Závislost tvaru srážkoměru na velikosti deformace proudění nad jeho záchytnou plochou.....	21
Obr. 4 Různé tloušťky a tvary horních okrajů srážkoměrů projevující se na velikosti Reynoldsova čísla.....	23
Obr. 5 Průměrné zrychlení proudění nad záchytnou plochou čtyř různých srážkoměrů se stejně velkou záchytnou plochou 200 cm ²	23
Obr. 6 Doporučená hloubka nálevky ve srážkoměru.....	24
Obr. 7 Nipherova ochrana (vlevo) a Treťjakovova ochrana (vpravo).....	25
Obr. 8 Příklady automatických srážkoměrů.....	28
Obr. 9 Jamový srážkoměr s mřížkou.....	31
Obr. 10 Srážkoměr Treťjakovova obklopený soustavou plotů (srážkoměr DFIR).....	32
Obr. 11 Okolí stanice Bratislava – Koliba.....	34
Obr. 12 Modelované trajektorie srážek v okolí srážkoměru Mk2 při rychlosti větru 3 m·s ⁻¹	50
Obr. 13 Výpočet úhlů α	65
Obr. 14 Umístění stanic v ČR.....	88
Obr. 15 Fotografie meteorologických stanic.....	89
Obr. 16 Změna polohy srážkoměru na Milešovce.....	90

Tabulky

Tab. 1 Přehled o mezinárodních srovnávacích měřeních srážkoměrů.....	33
Tab. 2 Výsledky experimentů za účelem určení velikosti omočení pro srážkoměr Metra.....	39
Tab. 3 Intervaly intenzit srážek.....	54
Tab. 4 Rovnice pro výpočet parametru Q (podíl tuhých srážek na celkových srážkových úhrnech – v %) vyjádřeného pomocí průměrné měsíční teploty t a nadmořské výšky H	62
Tab. 5 Velikost parametr Q (podíl tuhých srážek na celkových srážkových úhrnech – v %) vyjádřeného pomocí průměrné měsíční teploty a nadmořské výšky.....	62

Tab. 6 Výsledky srovnávacích měření nadzemních a jamových srážkoměrů v letním období a srážkoměrů s protivětrnou ochranou v zimním období na stanici Bratislava Koliba.....	70
Tab. 7a Srovnání denních úhrnů tuhých srážek vyšších než 0,1 mm na stanici Bratislava – Koliba pro období od roku 1978 do března 1993 (bez roku 1980).....	70
Tab. 7b Srovnání denních úhrnů tuhých srážek vyšších než 0,2 mm na stanici Bratislava – Koliba pro období od listopadu 1977 do března 1986 a od listopadu 1987 do března 1993.....	71
Tab. 8 Korekční koeficienty K pro nadmořské výšky 100 až 1200 vypočítané pomocí regresní rovnice (3.6) na území Slovenska.....	77
Tab. 9 Odhad proměnných potřebných pro výpočet konverzního faktoru k_{lq}	80
Tab. 10 Porovnání zachytu tuhých a smíšených srážek v sezóně XII – III. za roky 1986-93 srážkoměrem DFIR a Metra (2 m).....	82
Tab. 11 Součty úhrnů z tabulky 10.....	83
Tab.12 Výsledky korigovaných průměrných úhrnů srážek ve třech sezónách: rok, teplý půlrok a chladný půlrok a jejich procentuální porovnání s původními údaji pro období 1919-1960.....	84
Tab. 13 Průměrné hodnoty vybraných charakteristik srážek na Milešovce pro období 1951-1960.....	86
Tab. 14 Výpočet parametru Q (%) pro Milešovku (1956-1996) různými metodami.....	92
Tab. 15 Výpočet parametru Q (%) pro Bedřichov (1981-1990) různými metodami.....	94
Tab. 16 Výpočet parametru Q (%) pro Čáslav (1970-1979) různými metodami.....	96
Tab. 17 Velikost parametru N na vybraných stanicích.....	97
Tab. 18 Přepočtení rychlosti větru na stanici Bedřichov vztahy.....	98
Tab. 19 Srovnání korigovaných úhrnů po opravě metodou SHMÚ a metodou Tihlárka na Milešovce za období 1961-1990.....	101
Tab. 20 Srovnání naměřených a korigovaných srážkových úhrnů na stanicích Milešovka, Bedřichov-přehrada a Čáslav-Nové Město.....	107

Grafy

Graf 1 Roční chod systematických chyb na několika stanicích ve Švýcarsku.....	20
Graf 2 Ztráta omočením a pro Hellmannův srážkoměr na jednu srážkovou událost jako funkce srážkového úhrnu P	36
Graf 3 Průměrné ztráty omočením ΔP_{1+2} srážkoměru Metra pro simulované úhrny srážek P	40
Graf 4 Regresní rovnice závislosti průměrné hodinové intenzity výparu i_{ch} ze srážkoměru Metra na průměrné teplotě v čase od začátku padání srážek do doby jejich měření.....	44
Graf 5 Rozdělení velikosti srážkových částic deště.....	47
Graf 6 Korelace mezi gradienty měsíčních ztrát zachytu srážkoměru y s měsíčními charakteristikami struktury srážek p_i a Q_m	55
Graf 7 Vliv intenzity srážek i [$mm \cdot h^{-1}$] na velikost ztrát způsobených vlivem větrem (%) při rychlostech větru u	56
Graf 8 Porovnání vztahů Sevruka (2.18) a Bogdanové (2.15) na výpočet parametru N , jako funkce průměrné měsíční intenzity srážek I	58

Graf 9 Závislost rychlosti větru v úrovni srážkoměru v době padání tuhých srážek na konverzním faktoru k , udávajícím velikost ztrát způsobených vlivem větru.....	60
Graf 10 Závislost korekčního koeficientu K_x na rychlosti větru v době vypadávání srážek u_2 měřeného ve výšce 2 m pro tuhé T , smíšené S a kapalné srážky K	72
Graf 11 Závislosti záchytu srážkoměru Metra (1 m) v porovnání se srážkoměrem Hellmann (0 m) na rychlosti větru v době srážek.....	79
Graf 12 Křivka regresní rovnice 3.8. vypočítaná z bodových hodnot z tabulky 11.....	83
Graf 13 Průměrný roční chod srážek na stanicích Brno-Tuřany, Milešovka a Lysá Hora za období 1961-2000.....	85
Graf 14 Závislost mezi průměrnými hodinovými rychlostmi větru měřenými na věži observatoře 22,5 m nad zemí (x) a na úrovni záchytné plochy srážkoměru 1 m nad zemí (y) od listopadu 1996 do března 1997.....	86
Graf 15a Roční chod průměrných měsíčních ztrát na omočení, výpar a aerodynamický efekt srážkoměru na Milešovce (1956-1996).....	103
Graf 15b Roční chod průměrných měsíčních ztrát na omočení, výpar a aerodynamický efekt srážkoměru v Bedřichově (1981-1990).....	104
Graf 15c Roční chod průměrných měsíčních ztrát na omočení, výpar a aerodynamický efekt srážkoměru v Čáslavi (1970-1979).....	105
Graf 15d Roční chod průměrných měsíčních ztrát na aerodynamický efekt srážkoměru na Svratouchu (1961-1990).....	106

Mapy

Mapa 1 Průměrná rychlost větru v zimě (prosinec, leden, únor) ve výšce 10 m (1961-2000)....	108
Mapa 2 Průměr sezónních úhrnů výšky nového sněhu (1961-2000).....	109
Mapa 3 Stanice s vyrovnaným poměrem srážkových úhrnů za zimní a letní půlroku.....	109

1. ÚVOD

Atmosférické srážky jsou základním meteorologickým a klimatologickým údajem. Měření úhrnu srážek na zemském povrchu je pak primárním zdrojem dat pro další výpočty nejen v oblasti meteorologie a klimatologie, ale i hydrologie, agronomie i jiných dotčených disciplín. V praxi se jedná především o nalezení srážko-odtokových rovnic, kde jsou srážky hlavním vstupním činitelem. Se srážkami a odtokem souvisí pak dva nebezpečné jevy, které srážky doprovázejí: povodně a sucho.

Každé měření je zatíženo různě velkou nejistotou a je v našem zájmu tyto nejistoty popsat, co nejpřesněji určit a posléze eliminovat. Srážky vstupují do mnoha analýz a je proto vhodné znát velikosti chyb při jejich měření.

Atmosférické srážky dělíme obecně do dvou kategorií, na srážky vertikální (padající), k nim patří déšť, mrznoucí déšť, mrholení, mrznoucí mrholení, sníh, sněhové krupky, sněhová zrna, krupky, zmrzlý déšť, ledové jehličky a kroupy. Dále na srážky horizontální (usazené) mezi něž patří rosa, jíní, námraza a ledovka (Kopáček a Bednář, 2005, s. 115). Horizontální srážky mohou dosahovat na hřebenech našich hor až hodnot přes 200 mm ze rok (Lapin a kol., 1991). Jejich měření je složité a provádí se pouze na vybraných lokalitách. Do celkových srážkových úhrnů se horizontální srážky nezapočítávají.

Měření srážek se provádí buďto bodově (srážkoměry) nebo plošně (radary). Radarové odhady srážek jsou v poslední době progresivním odvětvím meteorologie. Srážková data naměřená bodovou metodou jsou získávána po delší období a mají stále svůj význam pro kontinuální měření v klimatologii ale i pro kalibraci a reanalýzu radarových dat. V ČR se tímto problémem zabývá například Šálek (2010) nebo Sokol, Řezáčová, Pešice (2003).

Bodové hodnoty úhrnů srážek můžeme získat manuálně nebo automaticky. Princip manuálního měření srážek spočívá v zachytávání srážek nádobou. Od dob počátků měření se princip neměnil, měnily se pouze srážkoměrné nádoby, do kterých srážky padají. Jednotlivé manuální srážkoměry se liší pouze tvarem a velikostí. Měření se provádí zpravidla jednou denně.

Tato práce pojednává o systematických chybách při měření srážek manuálními srážkoměry a budou studovány výlučně chyby bodového měření srážek manuálním srážkoměrem Metra (užívaný v ČR a SR)..

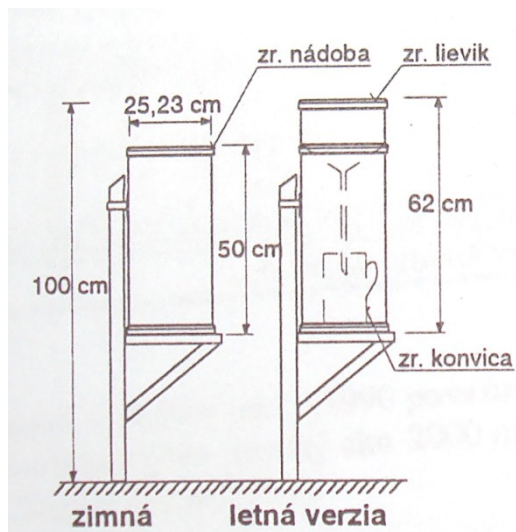
Mezi nejjednodušší automatické srážkoměry patří ombrograf, který je založen na manuálním převodu výšky hladiny vody ve srážkoměrné nádobě na otáčející se papír. Ombrografická měření jsou mnohdy zatížena velkými chybami a přerušeními (Květoň, Zahradníček, Žák, 2004). Měření automatickými srážkoměry umožňují kontinuálnější měření srážek. Vyhodnocují tedy i intenzitu padajících srážek. S rozvojem počítačové

techniky a elektroniky se objevují další sofistikovanější automatické srážkoměry – člunkové, váhové, disdrometry aj. Pojednáno o nich je v kapitole 2.4. Existuje tedy více odlišných typů měření automatickými srážkoměry. Hlavním jednotícím prvkem všech automatických srážkoměrů je měření po krátkých intervalech.

V současné době je naprostá většina dat v České republice z manuálních měření. Ombrografická měření jsou k dispozici na vybraných stanicích, jejich kvalita je ovšem ve většině případů dost nevyhovující (Květoň, Zahradníček, Žák, 2004). Automatické srážkoměry se do sítě v ČR začaly dodávat v roce 1997. Dnes jsou na všech klimatologických a automatických stanicích. Zároveň však na většině stanic probíhá i kontinuální měření se starým typem manuálního srážkoměru Metra. Jejich vyhodnocení je k dispozici v pracích (Burda, 2006) nebo v (Gajdušková, 2006 a Gajdušková, 2009).

V bývalém Československu se používal a dodnes používá již zmíněný srážkoměr Metra 886 (dále jen Metra). V literatuře se můžeme setkat i s psaním velkými písmeny: METRA. Název Metra je odvozen od podniku vyrábějícím měřicí přístroje. V zájmu zachování kontinuity měření se na něm neprováděly od roku 1946, kdy se u nás celostátně zavedl, žádné velké úpravy. Záchytnou plochu má 500 cm^2 (velikost plochy, kam dopadají srážkové částice). Viz obrázek (1a) a (1b).

Obr. 1a Srážkoměr Metra. Převzato z (Tihlárík, 1995, s. 32)



Při měření manuálními srážkoměry dochází k různým chybám. Chyby měření dělíme na systematické a nesystematické (nahodilé). K nesystematickým chybám dochází jen občas, zatímco systematické chyby se vyznačují delším trváním. Nahodilé chyby jsou obecně největší u dobrovolnických srážkoměrných stanic, nejmenší pak u profesionálních stanic. Část nahodilých chyb je odstraněna při revizi, popř. digitalizaci dat jako např. v (Coufal, Langová, Míková, 2002). Některé systematické chyby (dále

v textu někdy jen chyby) jsou fyzikálně determinovatelné a lze je tedy určit a „odstranit“. Jedná se především o 1, chyby způsobené strháváním srážkových částic vlivem zesílení větru nad srážkoměrem (dále někdy jen chyba způsobená vlivem větru, nebo větrem), 2, výparem vody ze srážkoměru a 3, ulpíváním vody na nádobách srážkoměru tzv. omočením. Používá se i výraz smáčení (Brázdil, Štěpánková, 1998). V této práci jsem zvolil výraz omočení, protože lépe vystihuje daný jev. Smáčení je proces, při kterém dochází ke styku vody s nějakým materiálem, omočení je výsledkem ulpění zbytků vody na materiálu vlivem adhezivních sil po odejmutí vody.

Celková velikost těchto chyb se pak pohybuje v našich podmínkách nejčastěji za rok od 12 – 15 % naměřeného úhrnu, což není zanedbatelné číslo (Lapin a kol., 1991).

S nadmořskou výškou chyby narůstají a mohou v polohách nad 1000 m dosahovat hodnot dokonce přes 20 % (Lapin, Faško, Košťálová, 1990). Srážkové úhrny jsou prakticky za každých okolností podhodnocené a platí pravidlo, že srážkoměr, který naměří větší množství srážek je lepší.

Postupem času se vyvinula korekční metoda, jak výše zmíněné systematické chyby odhadovat. Díky korekcím se můžeme dovědět o přibližném úhrnu srážek, které srážkoměrem nenaměříme. Při všech analýzách, kde srážky vstupují, by měla být brána v potaz velikost těchto korekturami zjištělých chyb.

Korekce výše zmíněných třech hlavních systematických chyb se většinou neprovádí a distribuovaná srážková data nejsou o tyto chyby ve většině zemí světa opravena. Česká republika není výjimkou. Je to způsobené tím, že tyto korekce nemohou být od své podstaty přesné a seznamují nás spíše s odhady zkoumaných chyb. Korekční metody není vhodné aplikovat na krátkodobé údaje (dny), ale spíše na delší období. Význam mají tedy v současné době spíše pro klimatology a hydrology.

Úkolem předkládané práce je v úvodní rešeršní části seznámit čtenáře s historií, principem a příklady korektur systematických chyb měření atmosférických srážek a posléze provést používané korekční metody pro srážkoměr Metra. Korekce budou aplikovány na stanicích Milešovka, Bedřichov – přehrada, Čáslav-Nové Město a Svatouch. Pro srážkoměr Metra existují dvě metody na korigování srážkových úhrnů (korekční metody), které se liší pouze přístupem k opravám chyb způsobených vlivem větru.

1. Starší metoda vypracovaná v rámci výzkumné státní úlohy II-5-1 (dále uváděná pod názvem metoda SHMÚ – Slovenského hydrometeorologického ústavu). Pracovníci SHMÚ i ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav) tehdy na základě dlouholetých experimentů určili korekční regresní rovnice pro srážkoměr Metra. Metodu oprav posléze aplikovaly na všechny slovenské stanice (Lapin a kol. 1991).

2. Metoda vypracovaná Tihláríkem (1995), (dále v textu jen Tihláríkova metoda) pro oblast Vysokých Tater a aplikovaná v mírně pozměněné podobě Brázdilem a Štěpánkovou (1998) na data z Milešovky a další dvě stanice v Česku (Atlas podnebí Česka, 2007).

V České republice se první metoda doposud v plné míře nepoužila. Nelze jednoznačně určit, která metoda je přesnější. Porovnány budou výsledné korigované úhrny s původními naměřenými. V diskuzi bude objektivně posouzena věrohodnost provedených korekcí. V závěru se zmiňuji o doporučeních, plynoucích z výsledků práce a o návrzích, které nebylo možné v rámci diplomové práce provést.

Předkládaná práce je chronologicky strukturovaná podle obecně platných norem na část pojednávající o stávající literatuře k danému tématu následovaná popisem použitých metod, vyhodnocením a porovnáním výsledků. Na ně navazuje diskusní část, shrnující část a závěr. Práce se zabývá nepříliš diskutovanou problematikou, proto je řešeršní část obsáhlejší. Pro pochopení korekčních rovnic opravujících srážkové úhrny je hlubší seznámení se s daným problémem nevyhnutelné.

K problematice přesnosti měření srážek jsem se dostal při vypracovávání své bakalářské práce (Ptáček, 2010), kde se operovalo s denními úhrny srážek. Seznámil jsem se tehdy poprvé s problematikou chyb, jež při měření srážek vznikají. Zaujalo mě, jak mohou být srážky, zvláště na horách, silně podhodnocené (až o 100 % za měsíc). Jako většina odborné veřejnosti jsem do té doby považoval údaje o srážkách za relativně věrohodné. Srážkoměry jsou totiž běžně viděny jako přístroje zaznamenávající přesné bodové úhrny srážek a např. Sevruk a Klemm (1989a, s. 18) píší: „není dobře známo mnoha uživatelům srážkoměrných dat, že tato data publikovaná v ročenkách národních meteorologických ústavů stále reprezentují jenom neopravené srážky, které jsou více či méně podhodnoceny“.

Na závěr této kapitoly by bylo vhodné zopakovat hlavní cíle výzkumné části předkládané práce: Porovnat výsledky korigovaných srážek o systematické chyby na stejných datech (stejně stanice a období) podle metody SHMÚ a Tihlárka (1995) pro srážkoměr Metra. Vyslovit, která metoda vypočítává důvěryhodnější korigované úhrny srážek, porovnat zmíněné metodiky z hlediska jejich použitelnosti na území České republiky. Vybrány byly čtyři stanice reprezentující horské i nížinné podmínky: stanice Milešovka, Bedřichov, Čáslav a Svratouch.

2. REŠERŠNÍ ČÁST

2.1. Měření srážek

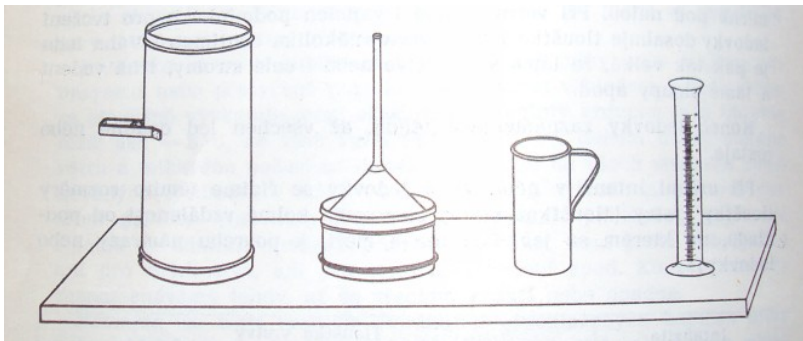
Na tomto místě bude vhodné seznámit se nejdříve s technickým popisem srážkoměru Metra a principem měření srážek obecně.

Srážkoměr Metra byl vyráběn národním podnikem METRA, a od něj má i svůj název. Metra, přesněji řečeno srážkoměrná souprava, se skládá ze čtyř plechových součástí (galvanicky pozinkovaných) a skleněné odměrky, viz Obr. 1b. Nálevka a srážkoměrná nádoba jsou opatřeny vstupním prstencem s ostrou ohraničující hranou, přičemž vnitřní průměr je volen tak, aby záchytná plocha (plocha příčného průřezu) měla

500 cm². Odměrka slouží ke změření množství spadlých vodních srážek. Na místech, kde sněhová pokrývka v průměru přesahuje 40 cm, se používá zvýšených podstavců, u kterých je zachytná plocha srážkoměru ve výšce 1,5 m nebo výše. Tím se zabrání, aby se sníh nenavál ze země do srážkoměru (upraveno podle: SHMÚ, 1972). V novějších návodech se nepíše o žádných změnách (ČHMÚ, 2003) nebo (ČHMÚ, 1994)

Rozlišujeme zimní a letní verzi srážkoměru. V letním období, kdy lze předpokládat výlučně dešťové srážky, se na srážkoměrnou nádobu nasadí nálevka a dovnitř se umístí konvice, do které voda stéká a kde se hromadí. Zimní verze je jen prostá srážkoměrná nádoba, viz Obr. 1a., umožňující akumulaci spadlého sněhu. Zimní verze je o něco nižší než letní. V roce 1960 proběhla určitá modifikace srážkoměru Metra spočívající např. v nepatrném zvýšení nádoby (Obr. 1a).

Obr. 1b Srážkoměrná souprava srážkoměru Metra. Převzato z (SHMÚ, 1972, s. 132)
zleva: srážkoměrná nádoba, zachytávající část – nálevka, konvice (cca 2 l) a skleněná odměrka



Horní hrana srážkoměru má být podle předpisu v letní verzi umístěná ve výšce 1 m nad terénem. V zimě se připouští zdvihnutí srážkoměru o něco výše v případě vysoké sněhové pokrývky, kdy by mohlo docházet k navívání sněhu z okolí do srážkoměru. (SHMÚ, 1972). Protivětrné ochrany (štíty) se v ČR při měření nepoužívají (více o protivětrných ochranách v kapitole 2.3).

Měření srážek se provádí jednou denně v 7 h ráno místního času. Padají-li v době měření intenzivní srážky, přenášejí se nádoby přikryté. Při měření letní verze se konvice vyjme a vyprázdní do odměrky, na které se přečte množství srážek s přesností na desetiny milimetru. Čte se výška nejnižší části hladiny (po okrajích nádob voda vzlíná). Pozorovatel má k dispozici dvě srážkoměrné nádoby a po každém měření by měl vrátit na místo nádobu suchou.

V zimním období se vylévají kapalně srážky z nádoby přímo do odměrného válce, což je poměrně náročný úkon, při kterém může docházet k rozlití vody, proto pozorovatelé používají vlastní nálevku. Pokud jsou ve srážkoměru tuhé nebo smíšené srážky, tak pozorovatel přenese srážkoměr do vytopené místnosti, kde srážky roztají (doporučuje se, aby místnost nebyla příliš vytopená, kvůli výparu). Pokud je potřeba srážky změřit rychle,

přilije se do srážkoměru odměřené množství teplé vody, kterou sníh roztaje. Hodnota přilité vody se pak při měření odečte (upraveno podle SHMÚ, 1972).

Datum výměny letní/zimní verze je stanoveno v ČR na 15. duben a 15. říjen (cca od roku 1990). Je velice důležité znát datum této výměny, protože při zimní a letní verzi dochází k různému výparu z nádoby a i k různě velkému omočení. Výparná plocha je totiž u zimní verze až 10x větší než u letní (Lapin, Priadka, 1987, s. 11).

V průběhu druhé poloviny 20. století se přístup k hranici této výměny měnil. Ve starším návodu pro pozorovatele (Hrubeš, Kocourek, 1955, s. 80) je uvedeno, že zimní verze se má používat v období, kdy se dají očekávat sněhové srážky. Termíny nebyly v tomto období přesně stanovené a závisely na úsudku pozorovatele. V dalším vydání (SHMÚ, 1972, s. 136) je již z textu vyrozuměno, že doba výměny je pro většinu stanic 15. duben a 15. říjen a jen některé stanice mají dané jiné pevně zvolené datum (jedná se pravděpodobně o vysokohorské stanice). Tihlárík (1995, s. 33) uvádí, že by bylo vhodné předpokládat datum výměny u starších dat podle výskytu mrazů. Některé stanice si vedou staniční deník, ze kterého je možno informaci o výměně srážkoměru dohledat.

Ještě poznámka k registraci malých a velkých úhrnů srážek. Zápis 0,0 mm, znamená, že buď byly pozorovány srážky a ve srážkoměru není stopy po vodě nebo že úhrn je pod 0,05 mm (většinou pouze ovlhnutý srážkoměr). Při vysokých úhrnech (nad cca 40 mm), kdy přeteče voda konvici, se měří samozřejmě všechna voda, co je ve srážkoměru.

Na velkém počtu stanic v Česku se měří výška sněhové pokrývky a její vodní hodnota. Sněhová pokrývka nám může v některých případech pomoci jednoduše změřit úhrn srážek (pokud je teplota vzduchu i půdy pod bodem mrazu). Této možnosti se může v našich zeměpisných šířkách využívat pouze vybrané dny v roce. Při korekturách systematických chyb se této možnosti využívá především ve vysokohorských oblastech (Sevruk, 2004).

Při korigování srážkových úhrnů na stanicích se využívá také měření z blízkých totalizátorů. Totalizátor je akumulární srážkoměr. Úhrn srážek se měří jednou za půl roku. Výparu se zabraňuje tak, že se hladina pokryje speciálním olejem. Proti zamrznutí je chráněn přidáním nemrznoucí kapaliny. Navíc mívá okolo nádoby zabudovaný protivětrný štít, který zpomaluje proudění nad záchytnou plochou a zmírňuje tak strhávání srážkových částic mimo otvor srážkoměru do závětrí. Totalizátory naměří většinou více srážek než okolní stanice. Lapin a kol. (1991, s. 217) srovnali za období 1971-1985 naměřené půlroční úhrny z totalizátorů v polohách kolem 1800 m n. m. s úhrny z blízkých stanic. V teplém pololetí naměřily totalizátory o 35-70 % více srážek, v chladném pololetí pak o 55-190 % více srážek než srovnávané stanice. Z výsledků jejich práce je patrné, že s nadmořskou výškou poměr mezi úhrny z totalizátorů a běžných srážkoměrů narůstá.

2.2 Systematické a nesystematické chyby při měření srážek

Jak již bylo řečeno v úvodu, chyby vznikající při měření srážek se rozdělují do dvou kategorií, na chyby systematické a nesystematické. Hlavní rozdíl mezi systematickými a nesystematickými chybami tkví v tom, že k systematickým chybám dochází pravidelně, zatímco nesystematické chyby se vyskytují nahodile. Čistě nesystematické chyby jsou například ojedinělé rozlití srážkové vody pozorovatelem při měření. Dalším příkladem může být, pokud se do srážkoměrné nádoby dostane cizí předmět (utonulý pták a podobně). Příkladem nahodilé chyby je případ, který jsem zaznamenal od jednoho pozorovatele, který mi vyprávěl, že si kolemjdoucí „civilisté“ pletou jeho srážkoměr s odpadkovým košem. Často v něm nacházel různé odpadky. Tyto chyby není možné nijak kvantifikovat, ale mohou být odhaleny při revizi dat Českým hydrometeorologickým ústavem a následně „opraveny“ díky srovnání s úhrny z okolních stanic. Systematická chyba může vzniknout z původně nesystematické chyby, jejíž průběh se stal dlouhodobým (například perforace srážkoměru vlivem koroze a následné dlouhodobé malé úniky vody z nádoby). Ve světě obecně platí, že poskytovaná srážková data nejsou korigována o systematické chyby, kterým se věnuje tato práce. Operativní korektury se prováděly například v Sovětském svazu na omočení (Gruza, Meščerskaja a kol., 2008).

(Sevruk, 2004, s. 94) vyděluje dvě základní kategorie systematických chyb vyskytujících se při měření srážek, a to:

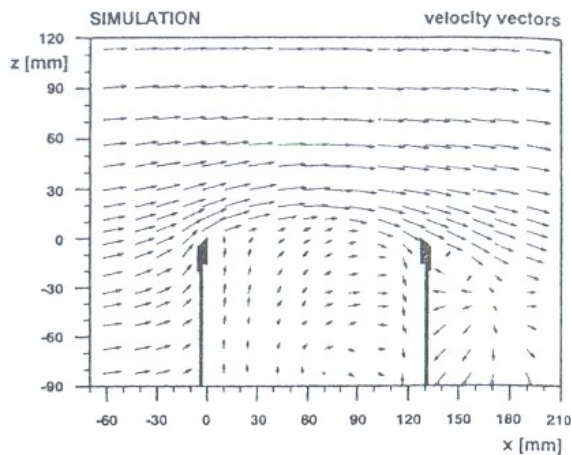
- 1, chyby způsobené parametry srážkoměru
- 2, chyby zapříčiněné ovlivněním měření meteorologickými prvky a jejich variabilitou

Mezi základní systematické chyby, které se nejvíce podílejí na podceňování srážkových úhrnů, patří:

1. Chyba způsobená strháváním srážkových částic mimo otvor srážkoměru vlivem zesílení větru nad záchytnou plochou. Zkráceně se této chybě říká chyba způsobená vlivem větru (v literatuře také jako chyba způsobená aerodynamickým efektem srážkoměru). Srážkoměr působí na proudění vzduchu jako překážka, proudnice se proto nad srážkoměrem zhušťují a rychlost větru zesiluje (Obr. 2). Některé srážkové částice jsou pak strhávány vlivem tohoto zesíleného proudění nad srážkoměrem mimo záchytnou plochu do závětrí. Množství strhávaných částic závisí na rychlosti větru a hmotnosti a rychlosti těchto částic. Nejméně jsou takto ovlivněny velké dešťové částice za bezvětří. Největší podceňování srážkového úhrnu lze očekávat při silném větru a sněžení za nízkých teplot, kdy vypadávají lehké sněhové vločky (Lapin a Priadka, 1987, s. 9). Sevruk (2004, s. 95) uvádí,

že pro déšť dosahuje tato chyba 2-15 % naměřeného úhrnu a pro sníh 10-50 % i více. Z uvedeného vyplývá, že k největším chybám v důsledku větru bude docházet v místech s vysokými rychlostmi větru a velkým podílem tuhých srážek. Na horách jsou proto tyto chyby daleko vyšší než v nížinách. V zimě jsou pak tyto chyby obecně větší než v létě.

Obr. 2 Numerická simulace směru a rychlosti větru nad záchytnou plochou srážkoměru, simulovaná rychlost počátečního proudění je $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nad prostředkem srážkoměru je patrné největší zrychlení větru, převzato z (Nespor, 1993, s. 130)



Velikost těchto chyb zjišťujeme v případě dešťových srážek především empiricky, srovnáním úhrnů z jamového srážkoměru s běžným nadzemním. Při zemi je totiž vliv tření tak velký, že zde není prakticky žádný nebo jen slabý vítr. V případě sněhových a smíšených srážek se používá srovnávacího měření srážkoměru s protivětrnou ochranou a bez. Jamový srážkoměr se v zimním období nemůže použít, protože by se do

něj mohl navívat sníh z okolní sněhové pokrývky.

Jak již bylo řečeno, tato chyba je způsobena také velikostí (hmotností) srážkových částic. Protože hmotnost srážkových částic není měřena, hledaly se běžně měřené meteorologické prvky, které by s hmotností částic korelovaly. Pro dešťové srážky to je intenzita deště (povětšinou platí, že při intenzivnějším dešti vypadávají větší těžší částice), pro tuhé srážky je patrná korelace s teplotou. S ubýváním teploty jsou sněhové vločky většinou lehčí.

Kromě srovnávacích měření se srážkoměry mohou instalovat do větrných tunelů, kde je měřena rychlost větru nad záchytnou plochou. Z výsledků rychlosti větru ve větrném tunelu se můžeme dovědět, jak tvar srážkoměru ovlivňuje výsledné vektory proudění v okolí srážkoměru. V posledních desetiletích se provádějí také matematicko-fyzikální simulace simulující celý proces strhávání srážkových částic mimo záchytnou plochu (Nespor, 1993), (Nespor, Sevruc, 1999).

2. Chyba způsobená výparem srážkové vody ze srážkoměru po dobu tzv. zdržení srážek, tj. do doby měření pozorovatelem. Zkráceně chyba způsobená výparem. Velikost těchto ztrát je závislá na době, po jakou jsou srážky v nádobě vystaveny výparu a na intenzitě výparu. Intenzita výparu je závislá na teplotě vzduchu, sytostním doplnku a rychlosti větru. Velikost výparu ze srážkoměru se zjišťuje pouze experimentálně. Zjišťuje se závislost na teplotě a sytostním doplnku. Lapin a Priadka (1987, s. 11) při

experimentech zjistili, že v chladném období roku je nejtěsnější vztah mezi výparem a globálním zářením ($r^2 = 0,52-0,85$) a v teplém období roku mezi výparem a sytostním doplňkem ($r^2 = 0,49-0,72$). Podle nich dochází k podhodnocení úhrnů vlivem výparu o 3-10 %. Pro většinu dalších manuálních srážkoměrů je tato hodnota však díky řešení konstrukce menší (např. Hellmann používaný v Německu, Polsku i jinde). Sevruk (2004, s. 95) uvádí, že pro většinu srážkoměrů je tato ztráta pouze 1-2 % v ročním úhrnu.

3. Chyba způsobená adhezivní schopností vody ulpívat na površích nádoby, nálevky, měřicího válce, tzv. ztráta způsobená omočením. Její velikost se zjišťuje také pouze experimentálně a dosahuje obvykle 2-10 % (Sevruk, 2004, s. 95). Lapin a Priadka (1987, s. 11) uvádějí pro náš srážkoměr Metra hodnoty do 5 %.

Z výše uvedených informací je důležité si uvědomit, že velikost chyb není konstantní a že je závislá od dalších meteorologických prvků – především rychlosti větru, sytostním doplňku, teplotě apod.

Korekce zmíněných systematických chyb se provádějí výhradně zpětně na naměřených datech. Byla snaha naměřené úhrny i operativně korigovat (WMO, 1989).

Existují i další systematické chyby, ale není jim věnována velká pozornost. Příkladem je chyba způsobená navíváním nebo vyvíváním sněhu do/ze srážkoměrné nádoby. Stanovení takového množství sněhu je velice nejisté. Vyvívání sněhu ze srážkoměru se děje tehdy, pokud je sníh lehký a vítr ho může z nádoby odváet. Jedná se o velice nevyzpytatelnou záležitost, kdy se může sníh za sněhové pokrývky navívat za větrného počasí do srážkoměrné nádoby. Z tohoto hlediska jsou rizikové zejména horské oblasti, kde je vysoká sněhová pokrývka. Srážkoměr se za takových podmínek instaluje do vyšší výšky.

Touto chybou se důkladněji zabývali v Rusku od 60. let (Bogdanova, Golubev, 2002) a to pouze navíváním sněhu do srážkoměru. Výsledky jejich práce jsou podrobněji rozepsány v práci Sevruka (1982, s. 23). Odlišili dva případy navívání - při sněhové bouři a při bezsrážkovém počasí. Vyzozorovali, že k navívání sněhu dochází za sněhových bouří při rychlostech větru nad $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (měřeno anemometrem ve standardní výšce 10 m), za 1 h trvání bouře přičítávají maximálně 0,1 mm. Od rychlosti $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ může být sníh zanášen větrem do nádoby i za bezsrážkového počasí. Významněji však až od průměrných rychlostí nad $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. I v tomto případě stanovili „falešný“ úhrn na 0,1 mm za hodinu. (Sevruk, 1982, s. 23). Nověji pak Bogdanova, Golubev (2002).

K podobnému procesu jako v případě sněhu může docházet i v případě deště. V literatuře se hovoří o rozstřících vody. Pokud je nálevka srážkoměru (Obr. 6) mělce posazená, může docházet za deště k rozstřiku vody o stěnu nálevky k odvívání kapek mimo srážkoměr. U srážkoměrů blízko zemského povrchu může docházet k přibývání

vody ve srážkoměru díky rozstříku z okolní půdy. Sevruk (2004, s. 95) uvádí velikosti těchto chyb za rok $\pm 2\%$.

Navívání sněhu a rozstřík vody o okolní půdu jsou tak jedinými chybami zde vyjmenovanými, které vedou k navýšení úhrnů srážek.

Další systematické chyby už nebyly zkoumány, ale evidentně jich může být více. Lapin a Priadka (1987, s. 9) uvádějí: nakloněnou záchytnou plochu srážkoměru, nestandardní nátěr, perforovaný nebo mrazem poškozený srážkoměr, nedodržování metody měření se také většinou projevuje jako systematické podhodnocování srážkových úhrnů. Patří sem časté zanedbávání malých úhrnů srážek, nesprávný postup při měření tuhých a smíšených srážek ponecháním velké nádoby s roztávajícími srážkami v teplé a suché místnosti delší dobu atd.

Výše vyjmenované chyby byly způsobené podmínkami v daném bodě měření srážek. Důležitým aspektem měření bodových úhrnů srážek je jejich reprezentativnost k okolním srážkovým poměrům. Velice důležitá je proto dobře zvolená lokalita, kde se srážky měří a mikroklimatické podmínky (vliv okolních budov, stromů na rychlost větru a „stínění“ padajících srážek). Protože nám jde v praxi o nalezení plošných úhrnů srážek, je dobré mít vhodně rozestavenou staniční síť.

(Sevruk, 2004, s. 93) shrnuje chyby ovlivňující výsledný naměřený srážkový úhrn takto:

1. vliv instrumentu (proporce)
2. vliv variability meteorologických prvků (vítr, výpar, podíl sněhových srážek)
3. vliv špatné metody měření (měření srážek pozorovatelem)
4. vliv stanoviště (nerepresentativnost stanoviště, stínění srážek)

Otázkou je také časová homogenita srážkových dat. Okolí srážkoměru se v průběhu času mění, což vede k postupné proměně rychlostí větru a změně velikosti srážkových úhrnů. V českých podmínkách dochází k častému přesunu především srážkoměrných stanic. Stanici zůstává její název, ale mění se její poloha. V praxi je to způsobené např. úmrtím nebo výměnou pozorovatele. Srážkoměrné stanice se často nacházejí na soukromých pozemcích. Homogenita datové řady je pak výrazně narušena. Významným zásahem do homogenity byla i automatizace měření srážek ve staniční síti ČHMÚ od roku 1997 (Gajdušková, 2009).

Shrnutě lze konstatovat, že na prostorové nehomogenity srážkových dat mají vliv podle (WMO, 1993, s.15-19):

1. Rozdílné typy srážkoměrů na zvoleném území a výměny srážkoměrů, změny stanovišť
2. Změna expozice (otevřené prostranství nebo les či zástavba) – vliv na rychlost větru

3. Roční období a nadmořská výška (v zimě dochází k daleko vyšším podhodnocením ve vyšších nadmořských výškách, v létě jsou chyby daleko vyrovnanější), což názorně dokumentuje Graf 1.

Graf 1 Roční chod systematických chyb na několika stanicích ve Švýcarsku (v % naměřených srážek). Korektury byly provedeny za období 1951-1980. Převzato z (WMO, 1993, s. 19)

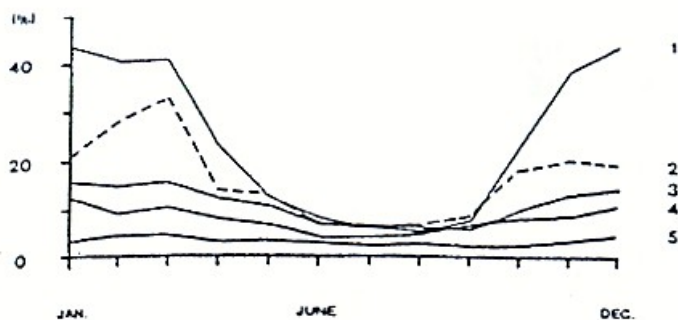


Fig. 12 Monthly mean values of the systematic error of precipitation measurement for five representative Swiss stations: 1 - San Bernardino (1628 m a.s.l.); 2 - Davos (1580 m a.s.l.); 3 - Geneva (416 m a.s.l.); 4 - Zurich (416 m a.s.l.) and 5 - Locarno (336 m a.s.l.).

Na závěr kapitoly ještě několik postřehů. Experimentální pokusy a matematické modely ukazují, že malá změna parametrů tvaru srážkoměru může výrazně ovlivnit rychlost proudění nad záchytnou plochou (Sevruk, 2004, s. 78-79). Proto nelze v zásadě přebírat korekční koeficienty stanovující ztráty způsobené větrem mezi srážkoměry. V případě srážkoměru Metra je možná shoda s automatickým srážkoměrem MR3H, který se v naší síti už hojně rozšířil. Oba srážkoměry mají stejně velkou záchytnou plochu i podobné výškové rozměry. Dalším automatickým srážkoměrem je u nás používaný váhový MRW 500. Jeho tvar je natolik odlišný od Metry, že nelze předpokládat shodný průběh velikosti ztrát způsobených strháváním srážkových částic (Obr. 3).

Zvláštní pozornost si zaslouží sledování rozdílů mezi takzvaným meteorologickým a hydrologickým deštěm. Za hydrologický dešť se považuje úhrn srážek dopadajících na terénní plochu, v případě meteorologického deště se jedná o úhrny dopadající na vodorovnou plochu. Rozdíly nastávají při měření ve sklonitém terénu. Srážkoměry, které mají sklon stejný se svahem a jsou v návětrné straně, naměří více srážek, než srážkoměry instalované vodorovně. Na závětrné straně to platí naopak. Proto je potřeba se v horských oblastech vyvarovat instalování srážkoměru do prudkého svahu (Sevruk, 2004, s. 63-64).

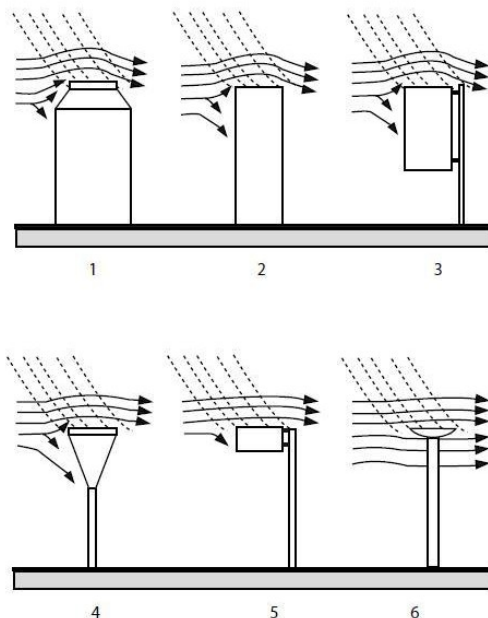
2.3. Parametry srážkoměru ovlivňující měření

Následující podkapitola pojednává o parametrech, které mohou ovlivňovat naměřené úhrny srážek a o možné eliminaci nežádoucích tvarů srážkoměrů podílejících se na vzniku systematických chyb. Jednotlivé body jsem sestavil ze dvou publikací (Sevruk, Klemm, 1989b) a (WMO, 2008).

1. Celkový tvar srážkoměrné nádoby

Podstatnou a diskutovanou problematikou je tvar srážkoměru. Na Obr. 3 jsou seřazeny různé typy tvarů srážkoměrů podle velikosti deformace proudění nad zachytnou plochou. Platí pravidlo, že čím je poměr výška/šířka menší, tím je srážkoměr lépe obtékán vzduchem a tím je i zrychlení větru nad srážkoměrem menší (Sevruk, 2004, s. 79). Nejhůře jsou na tom srážkoměry, které jsou celým objemem posazeny na zem. Nad jejich zachytnými plochami se dá očekávat silné zrychlení proudění. Nejlépe jsou obtékány srážkoměry s malou vertikální výškou. Toho se využívá i při konstrukci protivětrných štítů, kdy se dosahuje lepších poměrů výška/šířka. Úzké srážkoměry s malou zachytnou plochou proto nejsou nejvhodnější (Sevruk, Klemm, 1989a, s. 15)

Obr. 3 Závislost tvaru srážkoměru na velikosti deformace proudění nad jeho zachytnou plochou. Plné linie představují proudnice, přerušované čáry značí dráhu srážkových částic. K největší deformaci proudění dochází v případě 1, k nejmenší deformaci v případě 6. Převzato z (Sevruk, 2004, s. 79)



2. Velikost záchytné plochy

U tekutých srážek nehraje velikost záchytné plochy významnější roli, ale tam, kde je významný podíl tuhých srážek se doporučuje velikost záchytné plochy alespoň 200 cm², a maximálně 500 cm² (WMO, 2008, s. 138). Matematicko-fyzikální simulace ukazují, že nejlepší velikost záchytné plochy je kolem 200 cm² (Nešpor, Sevruc, 1999).








3. Tloušťka a tvar horního okraje srážkoměru

Na výslednou rychlost proudění nad záchytnou plochou má podle experimentálních měření ve větrném tunelu vliv i tvar a tloušťka lemu okolo záchytné plochy (rozuměj zakončení horní části srážkoměru). Čím tlustší je tento okraj, tím větší je zrychlení větru nad srážkoměrem. Maximální zrychlení větru nad srážkoměrem se pak pohybuje od 30 -50 % (Sevruc, Klemm, 1989a, s. 14). (Sevruc, 1993, s.17) upozorňuje na fakt, že ve Švýcarsku došlo po zavedení automatického člunkového srážkoměru ASTA do staniční sítě k podhodnocování srážek. K úbytkům došlo pravděpodobně vlivem zdánlivě „banální“ záležitosti tloušťky rámu srážkoměru. Nový člunkový srážkoměr ASTA má oproti původnímu srážkoměru Hellmann horní zakončení velice silnější. Například na stanici umístěné na ženevském letišti byl patrný na kumulativním grafu pokles srážek o 15 %. Také měření ve větrném tunelu prokázala, že srážkoměr s nejtlustším rámem (ASTA) má největší zrychlení větru nad záchytnou plochou a naopak nejnižší zrychlení nad záchytnou plochou měl starý finský srážkoměr typu Wild s nejužším rámem (Sevruc, Klemm, 1989a, s.14). Příklady průřezu horními okraji srážkoměrů jsou na Obr. 4. Z obrázku je patrné, že srážkoměr ASTA má tento průřez nejtlustší. Na Obr. 5 je graficky znázorněno zrychlení proudění nad záchytnou plochou v závislosti na tloušťce horního okraje srážkoměru. Obecně pak platí, čím užší je tloušťka horního okraje srážkoměru, tím menší jsou deformace větrného pole.

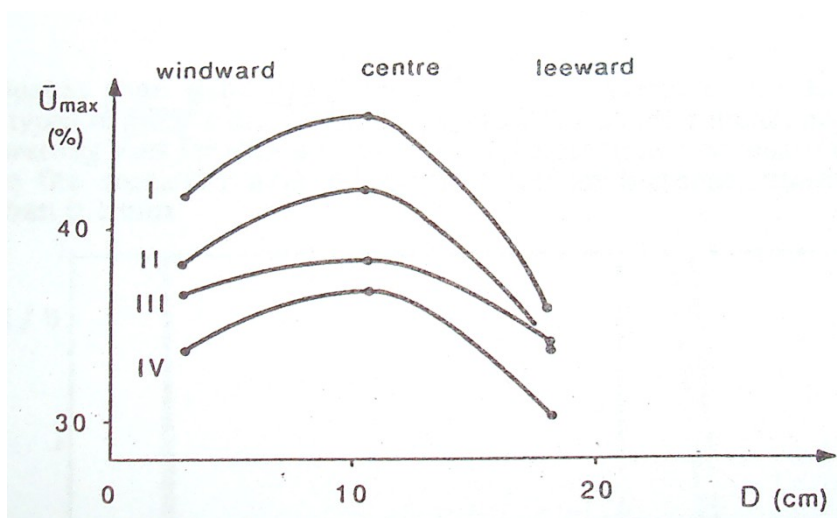
4. Hloubka srážkoměru po nálevku

Podle doporučení (WMO, 2008, s. 139) by nálevka měla být uložena co nejhlouběji ve srážkoměru, aby nedocházelo k odvívání rozstříknuté vody o nálevku ze srážkoměru. Podle doporučení WMO by neměla pomyslná linie svírající pravý úhel s plochou nálevky vybíhat mimo srážkoměr. Z toho také vyplývá, že čím strmější je nálevka uložená ve srážkoměru, tím méně jsou možné případy rozstříků dopadající vody. Obr. 6 to ilustruje.

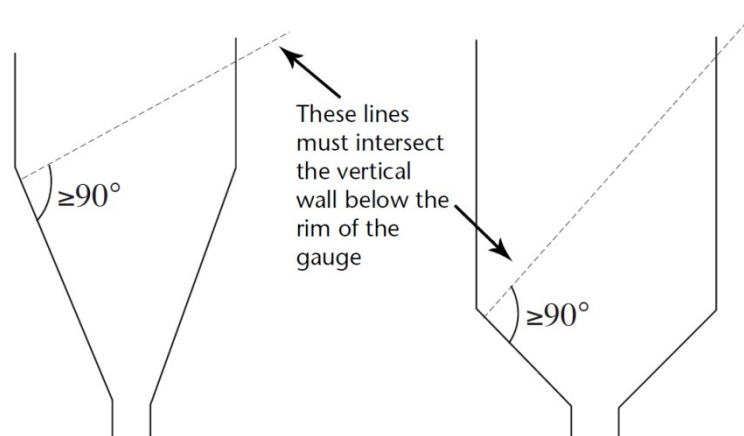
Obr. 4 Různé tloušťky a tvary horních okrajů srážkoměrů projevující se na velikosti Reynoldsova čísla Re (v 10^4) udávajícím „obtékateľnosť“ tělesa. Vyšší číslo znamená, že proudění může těleso snadněji obtékat.

Rank	Type of gauge	Orifice area [cm ²]	Height [cm]	Re (10 ⁴)	Cross-section of orifice rim
I	ASTA*	200	46	2.9	 with bird protection ring
II	ASTA	200	46	2.9	 no bird protection ring
III	Hellmann	200	48	2.6	 "--"
IV	Tretyakov	200	39	2.2	 "--"
V	Mk2	127	40	1.8	 "--"
VI	China	315	60	2.7	 "--"
VII	Wild	500	36	3.5	 "--"

Obr. 5: Průměrné zrychlení proudění nad zachytnou plochou čtyř různých srážkoměrů se stejně velkou zachytnou plochou 200 cm² (v procentech počátečního proudění). I ASTA s kruhem okolo horní hrany proti ptákům, II ASTA bez této ochrany, III Hellmann, IV Treťjakov. Rychlosti byly počítány na okrajích a uprostřed a spojeny linií.



Obr. 6: Doporučená hloubka nálevky ve srážkoměru. Převzato z (WMO, 2008, s. 139)



5. Protivětrné ochrany (štíty)

Protivětrné štíty se používají ke zpomalení rychlosti větru nad zachytnou plochou. Ochrany proti větru můžeme rozdělit do dvou kategorií, na štíty obepínající samotný srážkoměr a na štíty ve formě plotu či plotů okolo srážkoměru.

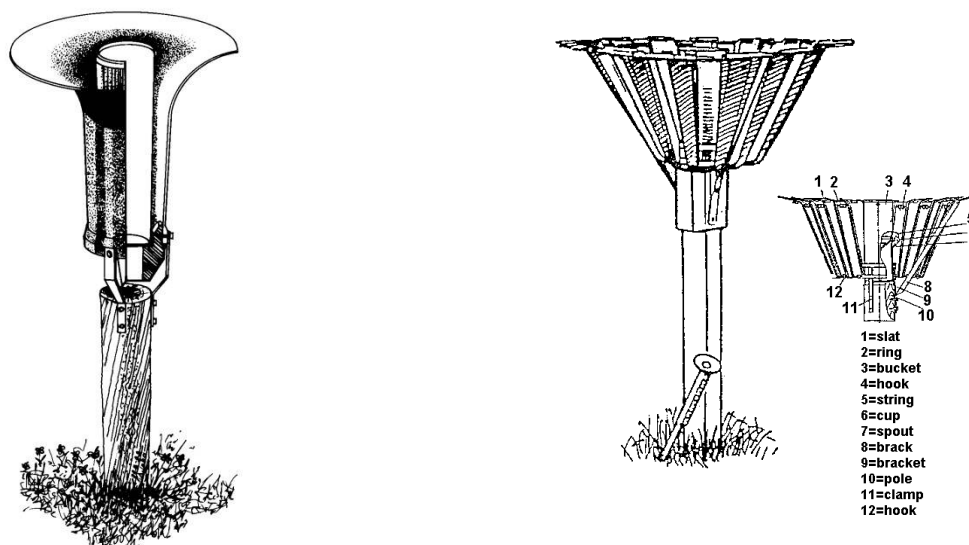
Ochrany obecně zlepšují poměr výšky ku šířce srážkoměru (horizontálně ho prodlužují), čímž dochází ke zpomalení větru nad zachytnou plochou a k menšímu strhávání srážek mimo otvor srážkoměru.

První ochrana proti větru byla vytvořena Henrym roku 1853 (Sevruk, 1982, s. 4). Dále Nipherem v roce 1878. Nipherova ochrana a její modifikace se používají dodnes např. v Kanadě nebo ve Švédsku. Nipherova ochrana má kónický tvar (Obr. 7), který srážkoměr rozšiřuje do délky. Další ochranu zkonstruoval roku 1937 Alter, dále Treťjakov (1952). Dnes nejrozšířenější jsou ochrany Nipherova, Alterova a Treťjakovova (Obr. 7). Treťjakovova se používá v Rusku a obecně se soudí, že je ze všech ochran nejúčinnější (Sevruk, 2004).

Proti větru se konstruují i rozsáhlejší systémy, např. ploty okolo srážkoměru. První ploty se začaly objevovat v 19. století: Buchan 1874 a Wild 1885. Wildova ochrana, Wyomingská ochrana a DFIR jsou nejznámější ochrany proti větru tohoto druhu. Ilustrace také ochrany je na Obr. 10.

Účinnost protivětrných ochran se různí a je proměnlivá s rostoucí rychlostí větru. Např. Treťjakovova ochrana je velmi účinná pro rychlosti větru do $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Lapin, 1993). V České republice se žádné ochrany nepoužívají. Užívat by se mohly, ale tím by se narušila homogenita datových řad (Lapin, Priadka, 1987, s. 14).

Obr. 7: Nipherova ochrana (vlevo) a Tret'jakovova ochrana (vpravo)



6. Barva a materiál

Barva a materiál, ze kterého je srážkoměr vyroben, hrají podstatnou roli při vypařování vody. Srážkoměry mají většinou světlou barvu, aby nedocházelo k akumulaci tepla uvnitř nádoby.

7. Výška záchytné plochy nad zemí

S rostoucí výškou od země roste průměrná rychlost větru, proto je vhodné umístit srážkoměr (záchytnou plochu) do co možná nejnižší výšky od země. Musí to být ovšem taková výška, kdy nehrozí navívání sněhu a vliv přízemních „živlů“ či objektů – zvířat, hmyzu, listů apod. Obvyklá výška srážkoměru je 1 m, na horách, kde hrozí vysoká sněhová pokrývka, se umísťují i výše.

8. Ochrana proti ptákům

Má pravděpodobně vliv na rychlost větru nad záchytnou plochou. Ochrana proti ptákům slouží k tomu, aby pták nemohl dosednout na hranu srážkoměru (srážkoměry obvykle ptáky lákají, protože se v nich zdržuje voda, kterou pijí). Taková ochrana má tvar připevněného kola okolo horní hrany nádoby.

9. Okolí srážkoměru

Růst stromů a zástavby vede ve většině případů ke zvýšení úhrnů srážek, díky menším rychlostem větru. Především je to patrné v zimních měsících, kdy je proudění rychlejší než v létě. Dlouhodobě pak může docházet k mírnému narůstání naměřených

úhrnů. Pokud dojde k opačnému efektu (vymýcení stromů apod.) efekt je opačný. (Sevruk, Zahlavova, 1993, s. 17)

Sevruk a Záhlavová (1993) se tímto problémem ve Švýcarsku zabývali. Studovali problematiku přepočtu rychlosti větru z hladiny anemometru (10 m) na výšku 1 m (horní okraj srážkoměru). Předpokládali, že díky různým prostředím v okolí srážkoměrů ve staniční síti se mohou vyskytnout prostorové nehomogenity. Vypozorovali, že s nadmořskou výškou klesá ve Švýcarsku počet stanic s chráněnou expozicí. Souvisí to s tím, že mají mnoho stanic nad horní hranicí lesa. V Českých poměrech tato závislost pravděpodobně nebude, protože jen málo stanic je nad horní hranicí lesa. Navíc nízko položené stanice bývají často na otevřených prostranstvích.

2.4. Srážkoměry a automatická měření srážek

Následuje krátký přehled o měřidlech, kterými můžeme srážky měřit. Přehled všech manuálních srážkoměrů je v práci Sevruka (2004, s. 42-43). Mezi nejrozšířenější patří srážkoměry Snowdon, Hellmann, Nipher, Treťjakov a Alter. Nejčastější velikost zachytné plochy je 200 cm². U našich sousedů se používá srážkoměr Hellmann s velikostí zachytné plochy 200 cm² (v Německu a modifikovaný v Polsku). Má také jako Metra zimní a letní verzi, ovšem výpar je z něj oproti srážkoměru Metra minimální.

Druhy automatických srážkoměrů:

1, Srážkoměr měřící na principu překlápějícího se člunku.

Jedná se o velice rozšířený typ automatického srážkoměru. Pracuje na principu překlápějícího se člunku. Pod nálevkou je umístěn člunek, který se plní srážkami a při nahromadění určitého množství vody se překlápí. Zároveň se spojí kontakt a je vyslán elektrický impulz, který se zaznamenává. Vyrábějí se typy s překlopením po 0,1 mm nebo 0,2 mm, někdy i 0,5 mm. Měření sněhových srážek se provádí tak, že nádoba, kde je sníh nahromaděný se zahřívá, aby sníh roztál, ale zároveň aby se příliš nevypařil. V současnosti je tento typ srážkoměru na našich stanicích velice hojný a nahrazuje manuální srážkoměr Metra. Vyrábí ho společnost Meteoservis se sídlem ve Vodňanech (srážkoměr typu MR3H). Firmu jsem osobně navštívil, abych se dověděl více podrobností o současných srážkoměrech v naší meteorologické síti a jejich chybách měření. Člunkový srážkoměr je vyráběn tak, aby byly minimalizovány ztráty na omočení všech částí nádoby, taktéž je zkoumána optimalizace vytápění a zpřesňování měření intenzivnějších srážek. Podle Gajduškové (2009) i vyjádření výrobce, MR3H ve výsledku jen mírně podhodnocuje úhrny srážkoměru Metra. V současnosti jsou člunkové srážkoměry nejrozšířenějšími mezi automatickými na světě. MR3H je na Obr. 8.

2, Váhový srážkoměr

Pracuje na jednoduchém principu vážení spadlé vody nebo sněhu. Princip měření omezuje vliv výparu a omočení na minimum. Pokud je srážkoměr navržen tak, aby byly chyby způsobené o vítr minimální, je velice účinný. Meteoservis vyrábí váhové srážkoměry s označením MRW500. Tento srážkoměr byl na základě mezinárodního srovnávacího laboratorního měření zvolen jako jeden z nejlepších automatických srážkoměrů vůbec (WMO, 2005). Váhový srážkoměr má také zabudované topení pro roztátí nahromaděného sněhu. Výhodou je, že spadlý sníh změří (zváží) hned po spadnutí do nádoby, kdežto u člunkového srážkoměru musí nejdřív sníh postupně roztát. MRW500 je na Obr. 8. Specifickou systematickou chybou, která měření váhovými srážkoměry provází je nadzvedávání celé nádoby vlivem podtlaku při silnějším proudění. Tato chyba se projevuje zdánlivým poklesem srážkových úhrnů a je softwarově postihnutelná. Problémem jsou také různé objekty, které se do srážkoměru mohou dostat (hmyz, organický materiál, prach). V současnosti byl tuto zimu instalován váhový srážkoměr s Treťjakovovou ochranou na Lysé hoře. Výsledky měření budou známy na jaře 2012.

3, Optický disdrometr

Pracuje na základě optického měření. Jeden nebo dva tenké laserové paprsky jsou vyslány k „registru“. Příchozí paprsky jsou v době vypadávání srážek tlumeny srážkovými částicemi. Měří se většinou částice od 0,2 mm do 8 mm. Výsledný srážkový úhrn se počítá od velikosti a počtu změřených částic. Přístroj se používá ke zjišťování spektrálních velikostí dešťových částic (využití při radarových měřeních). Přeceňování úhrnů mohou způsobit dvě či více kapek blízko sebe, které přístroj registruje jako jednu velkou. Více například (WMO, 2005). Jejich nevýhodou je to, že dosud neměří přesně intenzity deště do 0,05 mm/h (Sevruk, 2004, s.103). Příklad disdrometru je na Obr. 8. Jejich hlavním úkolem je měření spektra velikosti srážkových částic.

4, Drop counters.

Snímají opticky kapky deště dopadající na nakloněnou plochu. Je vyhodnocován počet kapek a jejich objem.

5, Impaktní disdrometr.

Zatím ve vývojové fázi. Na membránu z plastu nebo kovu dopadají kapky deště nebo vločky sněhu a citlivý přístroj zaznamenává akusticky jejich počet a hmotnost. Neumí měřit lehké částice (cca pod 0,3 mm v případě dešťových kapek). Více (WMO, 2005).

6, Vektopluviometr.

Měří srážky dopadající na vertikální plochu. Užívá se ve stavebním inženýrství, zkoušení stavebních materiálů apod.

Samostatnou kapitolou měření srážek jsou meteorologické radary. Ty odhalují rozložení a výskyt srážek na různé velké ploše (od řádu kilometrů po řád desetitisíců km²). V současné době se jedná o nejdynamičtěji se rozvíjející odvětví měření srážek. Výhodou je měření plošných srážek, intenzity deště a vertikálních profilů intenzity deště. Nevýhodou je nepřesnost měření. Ke zpřesňování měření radarem se používají pozemní měření z bodových srážkoměrů (Šálek, 2010).

Na stejném principu se měří srážky i ze satelitů. Měří se buď aktivně (radarem obdobným tomu na Zemi) nebo pasivně (pomocí emitace mikrovlnného záření srážkovými kapičkami). Více informací je například v publikaci Řezáčové a kol. (2007).

Obr. 8 Příklady automatických srážkoměrů. Vpravo nahoře člunkový MR3H (převzato z Gajdušková, 2009), vlevo váhový MRW500 (vlastní fotografie na stanici Desná –Souš, 2009) a vpravo dole disdrometr, převzato z (Chvíla, Sevruk, 2008)



2.5 Historický přehled

Srážky patří k úplně prvním měřeným meteorologickým prvkům. Je to dáno jednoduchostí jejich měření. (Sevruk, 2004, Anhang s. 29-49) uvádí vyčerpávající přehled vývoje měření a poznávání chyb při měření od starověku po současnost. Pro účely této práce postačí pouze uvést historický výtah a vypsát zásadní práce věnující se chybám měření srážek.

Nejstarší záznamy měření srážek pocházejí ze staré Indie a Číny (raný středověk a středověk). V novověku se objevují první dlouhodobější záznamy měření srážek. První zmínky o chybách měření srážek se také objevují poměrně brzy. Jako první byl sledován problém výparu, v 18. století byly odhaleny už všechny základní systematické chyby kromě vlivu větru.

Výpar je zmiňován už v 17. století. Srážkoměry byly od počátků měření v Evropě upravovány tak, aby byl výpar malý. V 19. století se začala provádět porovnávací měření za účelem zjištění ztrát výparem (Mordecai v roce 1838). Fletcher v roce 1870 dokonce i opravil měsíční výkazy srážek o výpar. Od konce 19. století se prováděly aktivní pokusy měření výparu (Hjeltström se srážkoměrem Hellmann v roce 1885) pomocí simulovaných úhrnů srážek ponechaných výparu určitou dobu. Garnett se roku 1794 poprvé zmiňuje o omočení, Flaugergues stanovuje roku 1815 laboratorně velikost omočení na jedno měření francouzského srážkoměru na 0,15 mm.

Otcem srovnávacích měření srážkoměrů byl pravděpodobně Heberden svojí prací datovanou k roku 1769. Objevil, že srážkoměry blíže zemi naměří více srážek než srážkoměry více nad zemí. Nevěděl ovšem pravou příčinu. Na chyby způsobené strháváním srážek větrem se přišlo až o pár desítek let později v první polovině 19. století. V roce 1855 Maille píše o ovlivnění velikosti částic a efektu větru na srážkoměr (Sevruk, 1982, s. 3). Symons se v roce 1870 zmiňuje o tom, že rychlost větru a podíl srážek mezi srážkoměrem zemním a nadzemním spolu souvisí (Sevruk, 1982, s. 4).

První progresivní práce vznikají až v 60. a 70. letech 20. století. V této době se začínají objevovat první významnější metodiky korigování srážkových úhrnů. Zakladatele korigování systematických chyb je možno považovat v bývalém Sovětském svazu (Struzer, Golubev, Bogdanova), kteří jako první provedli opravy všech zmíněných chyb pomocí regresních rovnic. V současné době tuto metodiku aktualizovali (Bogdanova, Golubev, 2002). Další metody vznikly v Dánsku (Allerup, Madsen, 1980) – a posléze ve Švýcarsku (metodika je shrnuta v knize: Sevruk, 2004). Ve Švýcarsku byla vytvořena mapa korigovaných ročních srážkových úhrnů za období 1951-1980 pomocí interpolací z bodových měření srážek (Kirchhofer, Sevruk, 1992). V současnosti proběhlo i korigování srážek pro celé území Číny za období 1951-1998 (Ye a kol., 2004)

Shrnující prací pojednávající o dosavadním poznání v oblasti systematických chyb měření srážek a jejich korigování je titul od Sevruka (2004), napsaný pouze v němčině. Z této publikace jsem ve své práci také hodně čerpal. Dr. Sevruc organizoval také dvě nejvýznamnější mezinárodní konference na téma chyb měření srážek a jejich oprav: (WMO, 1989) - konaná ve Svatém Mořici ve Švýcarsku a společně s Lapinem pak konferenci v Bratislavě věnovanou tuhým srážkám (WMO, 1993).

Dlouholetý mezinárodní výzkum probíhá v Arktidě. Po celé Arktidě jsou rozmístěny srážkoměry, naměřené úhrny se korigují o systematické chyby. V této oblasti to má určitě veliký význam, protože podhodnocení naměřených srážek je zde největší díky velkému podílu sněhových srážek a silným větrům. Navíc Arktida je v současnosti místo s nejdynamičtější změnou klimatu na Zemi. V seznamu literatury je uveden internetový odkaz na stránky tohoto projektu (Yang a kol.).

Dalším současným mezinárodním projektem, který se mj. zabývá korekcemi srážkových dat je BALTEX (Baltic Sea Experiment). Hlavním objektem zkoumání byl hydrologický cyklus v oblasti celého úmoří Baltského moře. V rámci projektu se prováděly korekce srážek i z vybraných stanic v Česku, ale vzhledem k zjednodušení byla metoda oprav pro náš srážkoměr Metra shodná s metodou pro německý srážkoměr Hellmann. Korektury a výsledky jsou popsány např. v článku Rubela a Hantela (1999).

2.5.1 Mezinárodní srovnávací měření

Vzhledem k tomu, že existuje po světě mnoho typů národních srážkoměrů, je neustále vyvíjen tlak na jejich srovnávací měření. Srovnávací měření manuálních srážkoměrů probíhají tak, že se na jedno stanoviště umístí několik druhů srážkoměrů (většinou i do různých elevací – 0,5 m, 1 m, 1,5 m apod.) a po několik let probíhá simultánní měření. Na stanovišti se měří rychlost větru v úrovni srážkoměrů a další meteorologické prvky a jevy. Většinou se určí tzv. referenční srážkoměr, který je přítomen na každém stanovišti. Srovnáním dlouhodobých úhrnů z různých národních srážkoměrů zjistíme případné odchylky a můžeme tím lépe pochopit případné nesrovnalosti při vytyčování izohyet na hranicích mezi státy. Obecně platí, že srážkoměr, který zachytí nejvíce srážek je nejlepší.

První srovnávací měření se prováděla už od konce 17. století. Srovnávací měření s mezinárodním ohlasem provedl např. Symons ve druhé polovině 19. století s britským srážkoměrem Snowdon. „Od té doby proběhlo několik dalších srovnávacích měření. Nejlepší však v bývalém Sovětském svazu v 60. letech pod vedením L. R. Struzera. Hlavním cílem tehdy bylo získat více přesnou představu o hydrologické bilanci pomocí korekcí naměřených srážek. Na základě porovnávacích měření vyvinuli sovětští vědci

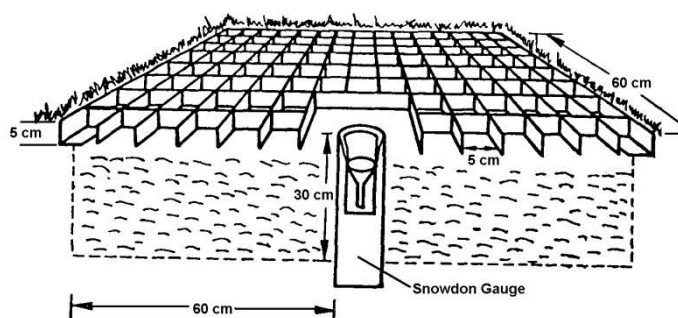
poprvé v historii korekční postupy pro všechny systematické chyby (omočení, výpar, vítr, navívání sněhu). Symons a Struzer tak představují průkopníky v této oblasti“ (Sevruk, 1993, s. 120).

Světová meteorologická organizace (WMO) zorganizovala několik mezinárodních srovnávacích srážkoměrných měření (Tab. 1), s úmyslem porovnat jednotlivé národní srážkoměry a nalézt regresní rovnice, umožňující opravy chyb způsobených vlivem větru.

1. První srovnávací měření s mezinárodním dopadem zorganizoval Poncelet v roce 1959. Na organizaci akce se podílela WMO a International Association of Hydrological Sciences (IAHS). Jako referenční srážkoměr byl zvolen Mk 2 gauge chráněný proti větru Alterovou ochranou v úrovni zemského povrchu. Participující země jsou uvedeny v Tab. 1.

2. Druhé mezinárodní porovnávací měření proběhlo v letech 1972-1976. Základním úkolem těchto měření bylo nalézt korekční koeficienty odhadující chyby způsobené aerodynamickým účinkem srážkoměru (vlivem větru) při kapalných srážkách pro jednotlivé národní srážkoměry. Na stanicích se jako nadstandardní prvek měřila rychlost větru v úrovni srážkoměru a intenzita deště. Navíc byla častější pozorování skupenství srážek. V Tab. 1 je shrnutí k tomuto měření. Referenčním srážkoměrem, který byl přítomný na všech experimentálních plochách, byl jamový srážkoměr Mk 2. Podobně jako na Obr. 9 byl obklopen mřížkou zpomalující proudění při zemském povrchu a zabraňující taktéž vstříku vody z okolní půdy. Výsledky potvrdily závislost korekčních koeficientů na rychlosti větru a intenzitě deště. Experimenty se prováděly na 52 stanicích ve 21 zemích. V Československu probíhala podobná měření o něco později.

Obr. 9 Jamový srážkoměr s mřížkou. Převzato z (WMO, 1998, s.3)

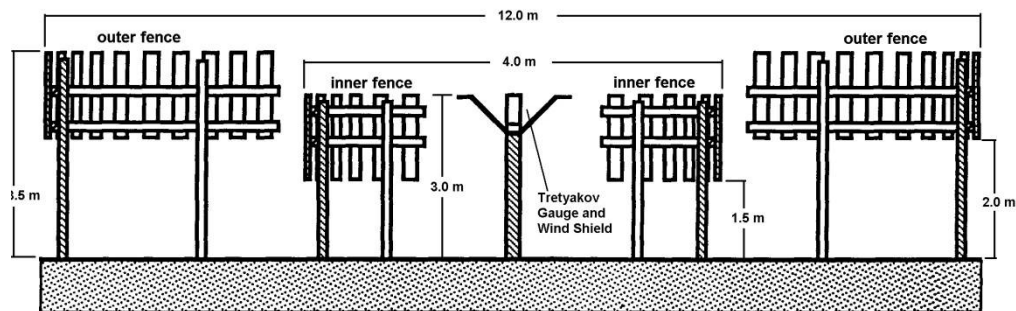


3. Dovršením porovnávacích měření manuálních srážkoměrů bylo třetí mezinárodní srovnávací měření, tentokrát zaměřené na chyby způsobené vlivem větru při vypadávání tuhých srážek. Byl hledán referenční srážkoměr s nejúčinnější ochranou, který by dokázal zachytit co nejvíce tuhých srážek. Po dlouhé debatě byl nakonec zvolen Treťjakovův srážkoměr obklopený ploty (obr. 10) a nazvaný DFIR (Double-Fence International Reference). Tento srážkoměr byl nejúčinnější, původně byl součástí srážkoměrů v rámci tzv. Valdajského kontrolního systému v Rusku. Valdajský kontrolní systém je experimentální povodí, bude o něm ještě pojednáno. Příklad účinnosti DFIR byl

měřen na německé stanici Harzgerode, kde byl simultánně měřen vítr uvnitř DFIR, v okolí Treťjakovova srážkoměru a mimo DFIR. Bylo uskutečněno 2300 měření. Bylo zjištěno, že účinnost ochrany proti větru narůstá s rychlostí proudění. Např. při rychlosti větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je snížení o 40 %, při rychlosti $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je to 65 % oproti místa mimo DFIR. (WMO, 1998, s.147 a 149).

Mezinárodního srovnávacího projektu se účastnilo 10 zemí, výsledkem srovnávacích měření národních srážkoměrů s DFIR byly regresní rovnice umožňující odhad chyb na nechráněných národních srážkoměrech. Odvozeny byly opravy o omočení a výpar. Srovnávací měření probíhala v letech 1986-1993. Závěrečná zpráva je citována pod titulem (WMO, 1998). Výsledky potvrdily závislost korekčních koeficientů na rychlosti větru a teplotě vzduchu.

Obr. 10 Srážkoměr Treťjakovova obklopený soustavou plotů (srážkoměr DFIR), převzato z (WMO, 1998, s. 3)



4. Srovnávací měření proběhlo v letech 2004-2005. Měření probíhala v laboratoři a venku na přirozených stanovištích. Měla za úkol stanovit i mechanické přístrojové chyby několika automatických srážkoměrů (člunkových a váhových). Je známo, že člunkové srážkoměry nejsou schopny měřit dostatečně přesně intenzivní srážky, protože člunek se nestíhá při intenzivních deštích překlápět. Váhový srážkoměr je zas ovlivněn při velikých rychlostech větru vlivem nadzvedání srážkoměru vlivem podtlaku, který v nádobě vzniká. Samozřejmě i tyto srážkoměry, pokud jsou nad zemí, jsou ovlivněny chybami způsobenými strháváním srážkových částic zesíleným prouděním nad srážkoměrem.

Účastny byly i naše dva srážkoměry společnosti Meteoservis. Člunkový srážkoměr MR3H a váhový MRW500. Jak již bylo zmíněno, ve srovnání s ostatními oba obstály dobře, váhový srážkoměr byl dokonce vybrán jako referenční pro následovná terénní měření (WMO, 2005) nebo (Wauben, 2008).

Mezinárodní srovnávací měření automatických srážkoměrů probíhala také na Slovensku na Bratislavě Kolibě a v Bohunicích (Sevruk, Chvíla, Ondráš).

V současné době připravuje WMO další mezinárodní srovnávací měření, tentokrát s automatickými srážkoměry pouze v terénních podmínkách.

Tab. 1 Přehled o mezinárodních srovnávacích měřeních srážkoměrů, (WMO, 1998, s. 14)

Comparison	I	II	III	IV
Subject	Precipitation	Rain	Snow	Rain intensity
Period	1955–1975	1972–1976	1986–1993	2004–2008
Purpose	Reduction coefficients between the catches of various types of national gauges	Rain catch differences between various types of national gauges and the pit gauge (Fig. 1). Correction procedures developed	Wind-induced error and standard correction procedures. (Wetting and evaporation losses considered)	Performance of different principles used to measure rainfall intensity (inherent mechanical and electronic errors)
Reference standard (Fig. 1)	Mk 2 gauge ^a elevated 1 m above the ground and equipped with the Alter wind shield	Pit gauge (Mk2) ^a installed in a pit, the orifice flush with ground and surrounded by anti-splash grid	Double-Fence Inter-national Reference, DFIR (Fig. 1)bc	Calibration in three independent laboratories in France, Italy and Netherlands for different rain intensities and field tests in Italy
Participants	Belgium, Czechoslovakia, Hungary, Israel, USA, Russia	Basic stations: 22 countries. Evaluation stations: Australia, Denmark, Finland, USA	Canada, China, Croatia, Denmark, Finland, Germany, Norway, Russia, Sweden, USA	12 tipping-bucket gauge models, 5 weighing gauges and 2 water level gauges, all from 15 countries ^d
Results	Non-conclusive	Wind-induced loss depends on wind speed, rain intensity and type of gauge. It amounts on average to 3% (up to 20%) and to 4–6% if wetting and evaporation losses are accounted for	Wind-induced loss depends on wind speed, temperature and type of gauge. Non-shielded gauges show greater losses as shielded ones (up to 80% vs. 40% for wind speed of 5 m/s and $t > -8$ °C)	Tipping-bucket gauges where no proper correction software was applied had larger errors than the weighing gauges. Problems of water storage in the funnel also occurred that could limit the range of measurements
Reference	Poncelet (1959) Struzer (1971)	Sevruk and Hamon (1984)	Goodison et al. (1998)	Lanza et al. (2005)

^a British Meteorological Office standard gauge of Snowdon type.

^b The Tretyakov gauge is the Russian standard gauge.

^c The diameter of inner fence is 4 m and of the outer fence is 12 m. The respective heights are 3 and 3.5 m above ground (Fig. 1). The Tretyakov gauge without fence is the secondary standard.

^d Australia, Austria, Canada, Czech Republic, Finland, France, Germany, India, Italy, Japan, Norway, Slovakia, Switzerland, UK, USA. The types of gauges are shown in Sevruk and Klemm (1989).

2.5.2 Srovnávací měření v ČSSR

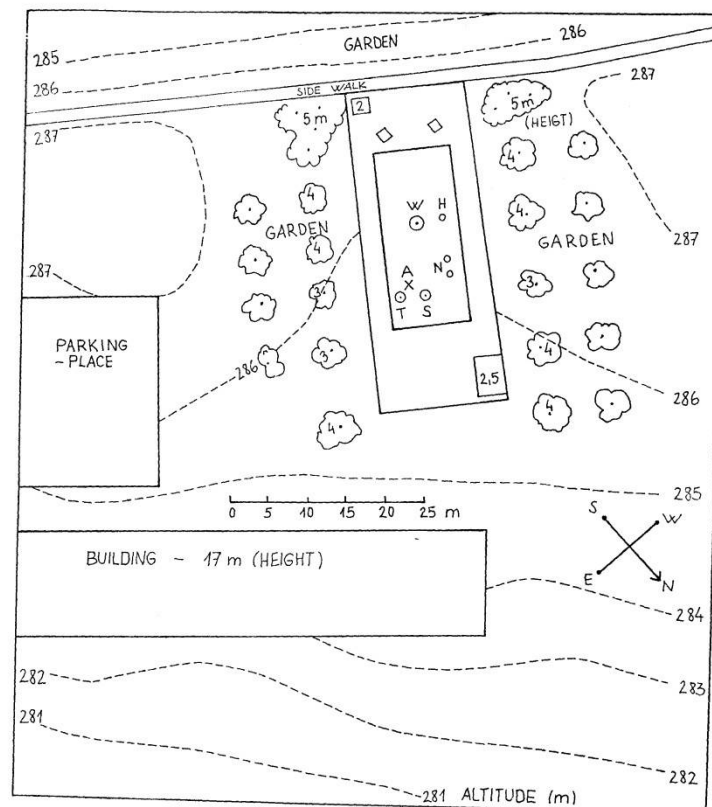
Československo bylo zemí, která se, jak jsem z literatury vyrozuměl, přímo neúčastnila druhého mezinárodního srovnávacího měření, ale podobný výzkum zde paralelně probíhal. Ve třetím mezinárodním srovnávacím měření se ČSSR účastnila, výzkum však probíhal pouze na Slovensku a Slovensko také vypracovalo závěrečnou zprávu. Proto je uváděno jako participující země v Tab. 1 Slovensko.

V rámci státní úlohy II-5-1: Vliv klimatických prvků na hydrologické procesy, se uskutečňovala porovnávací měření. Hlavní měření probíhala v letech 1973-1985, po tomto roce už v omezené míře. Základní stanicí se stala větrná stanice Bratislava Koliba. V zahradě tamní ústřední observatoře SHMÚ, 284 m n. m., na mírném severovýchodním svahu, bylo umístěno 16 srážkoměrů s horním otvorem ve 3 výškových hladinách (0, 1, 2 m). V každé hladině bylo umístěno po třech srážkoměrech Metra 500 cm², Hellmann 200 cm² a WMO (srážkoměr navrhovaný jako světový standard Světovou meteorologickou organizací se záchytnou plochou 127 cm²). Pro jamové srážkoměry (úroveň 0 m) byly vyhloubeny šachty 120x120 cm vyzpevněné betonem. Šachty byly

pokryty mřížkou proti vstříkovaní vody z ocelového plechu. V úrovni 1 m a 2 m byly instalovány srážkoměry s protivětrnou ochranou i bez ní. V 1 m byly instalovány 4 srážkoměry Metra potřeny různou barvou (zelenou, černou, bílou a originální kovovou šedí), aby se zjistila velikost výparu v závislosti na barvě srážkoměru. Srážkoměr DFIR nebyl instalován, protože kvůli jeho rozměrům ho nebylo kam zasadit. Instalována byla ovšem speciální dvojitá Tretjakovova ochrana proti větru. V letním období bylo měření zaměřeno na porovnání úhrnů z jamového srážkoměru s nadzemními, v zimním období při vypadávání tuhých srážek bylo měření zaměřeno na měření srážek ze srážkoměrů s ochranou a bez. Ve 2 m nad zemí se měřil nepřetržitý záznam o rychlosti větru (Priadka, Lednický, 1976). O výsledcích těchto měření bude podrobněji pojednáno v kapitole 3.1. Představu okolí stanice nastiňuje Obr. 11.

Další stanicí účastnou úlohy byla klimatologická stanice Ostrava-Poruba, na zahradě v areálu stanice, 240 m m. m bylo instalováno 18 srážkoměrů. Umístěny byly taktéž dva jamové srážkoměry Metra a Hellmann. Výsledky z této stanice nejsou veřejně k dispozici. V omezeném rozsahu se prováděla porovnávací měření na dalších 3 stanicích SHMÚ (Stropkov, Banská Bystrica, Hurbanovo) a 3 stanicích ČHMÚ. Závěrečnou zprávu vypracoval SHMÚ, tato zpráva je ovšem po mém i Tihláríkově (1995) dlouhém pátrání nedostupná (Lapin a kol., 1985).

Obr. 11 Okolí stanice Bratislava – Koliba (Převzato z WMO – Goodison, 1998, s.84)



2.6 Chyby způsobené omočením

Voda má svými adhezivními schopnostmi tendenci ulpívat na většině materiálů. Tato vlastnost způsobuje, že část vody zůstane na vnitřní stěně srážkoměru na nálevce, část v tubusu nálevky (dohromady zachytávající část srážkoměru). Další část vody zůstane ve sběrné nádobě (konvici) při jejím vylévání v době měření srážek. V případě zimní verze srážkoměru dochází k omočení pouze při vylévání obsahu srážkoměru. Voda ulpívající na srážkoměru se po ukončení srážek vypařuje a může se i úplně odpařit. Ztráta omočením se děje ve dvou fázích

- ulpíváním vody do měření srážek
- ulpíváním vody při měření srážek, při vylévání z konvice nebo srážkoměrné nádoby

Celková ztráta omočením závisí pak na:

- materiálu a tvaru jednotlivých částí srážkoměru (konvice, nálevky) a na stáří srážkoměru. Leštěné povrchy mají podstatně menší ztráty na omočení než lakované. K největšímu omočení dochází na galvanizovaných površích (Sevruk, Klemm, 1989a, s. 16-17)
- množství, druhu a frekvenci srážek

Stanovení ztrát omočením se provádí pomocí experimentálních měření. Některé postupy vyžadují ombrografické záznamy. Pro sněhové srážky je omočení zpravidla menší, protože k omočení dochází až po roztátí sněhu při měření (Sevruk, Klemm, 1989a, s. 16).

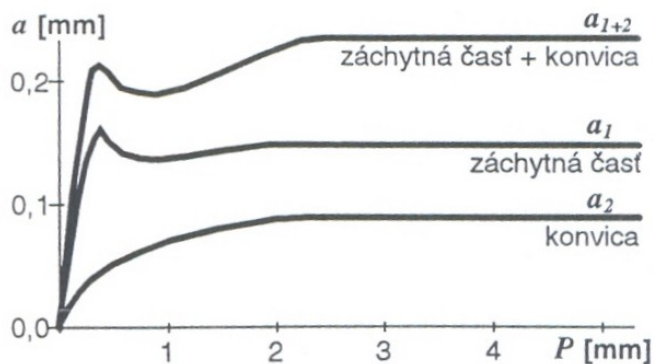
2.6.1 Postup při určování velikosti omočení

Hodnoty omočení se stanovují zvlášť pro zachytávající část a_1 a pro sběrnou nádobu a_2 . Většinou i zvlášť pro tuhé a kapalné srážky. Podle Tihláríka (1995, s. 37-38) existují dvě možnosti, jak experiment provést. V prvním případě se vnitřní stěny srážkoměru a nádob postříkají sprchou nebo stříkačkou. V momentě, kdy voda přestane z nálevky odkapávat, se srážkoměr zváží, vysuší, a opět zváží. Rozdílem vah se získá a_1 . Druhou možností je předem zvážit množství vody, kterou se zvlhčí zachytávající část, po odkapání vody se stečená voda opět zváží a z rozdílu vah určí a_1 . Pokus je vhodné opakovat vícekrát, alespoň 20 x, nejlépe však podle zprávy (WMO, 2008) 40 x. Pro sněhové srážky se do srážkoměru vloží odvážené množství sněhu, nechá se roztát, voda se vylije a odváží. Rozdíl vah opět udává a_1 , které je obvykle menší než u kapalných srážek. Pro sběrnou nádobu (konvici) se používá obdobné metody, kdy se do konvice vlije odvážené množství vody, která se posléze vylije a odváží. Tím se dá zjistit velikost a_2 .

Tento pokus je potřeba opakovat s rozdílným množstvím vody, aby se dala najít závislost mezi srážkovým úhrnem a velikostí omočení a_2 . Pro smíšené srážky se používají stejné hodnoty jako pro dešťové srážky.

Hodnoty a_1 , a_2 jsou po určité hranici ovlivňované množstvím spadlých srážek, nad touto hranicí je velikost omočení možné považovat za konstantní. Tato hranice se pro jednotlivé srážkoměry liší. Například pro Hellmann a Tret'jakovův srážkoměr je tato hranice 0,4 mm (Sevruk, 1982, s. 18), viz Graf 2.

Graf 2: Ztráta omočením a pro Hellmannův srážkoměr na jednu srážkovou událost jako funkce srážkového úhrnu P . Převzato z (Tihlárík, 1995, s. 37)



Celkovou hodnotu ztrát omočením ze zachytávající části srážkoměru ΔP_1 je možné obecně vyjádřit následovně:

$$\Delta P_1 = a_1 \cdot n_1 \quad (2.1)$$

ΔP_1 - celková ztráta omočením za zachytávající část srážkoměru [mm]

a_1 - je experimentálně určená průměrná velikost omočení zachytávající části srážkoměru na srážkovou událost pro daný úhrn a skupenství srážek [mm]

n_1 - je počet srážkových událostí v daném pozorovacím období s intervaly mezi srážkami většími, než je průměrný čas potřebný na vysušení vnitřních stěn zachytávající části srážkoměru (k přesnému určení n_1 je potřeba ombrografický záznam)

Uvažuje se tedy, že stěny srážkoměru mohou mezi jednotlivými srážkovými událostmi vyschnout a znovu se omočit, proto je potřeba znát počet srážkových událostí.

Pro celkovou hodnotu ztrát omočením ΔP_2 za sběrnou nádobu (konvici) platí:

$$\Delta P_2 = a_2 \cdot n_2 \quad (2.2)$$

ΔP_2 - celková ztráta omočením pro sběrnou část srážkoměru [mm]

a_2 – odhadnuté množství ztrát omočením při vylévání vody ze sběrné nádoby (konvice)

n_2 – počet dní, ve kterých se vyskytly srážky po předcházejícím vyprázdnění v časovém úseku delším než je průměrná doba vysušení konvice (konvice umístěná ve srážkoměru zůstane po měření omočená).

Ztráty omočením závisí dále na čase τ_d , za který stěny srážkoměru vyschnou. Stěny srážkoměru mohou totiž mezi jednotlivými srážkovými událostmi vyschnout a znovu se omočit. Velikost omočení proto závisí také na frekvenci srážek. Pro výše zmíněné vztahy je tedy potřeba ještě znát průměrný počet srážkových událostí za měsíc a průměrnou dobu, za kterou stěny srážkoměru vyschnou.

Odhad τ_d je bez přímých pozorování prakticky nemožný, protože τ_d se mění v průběhu dne a roku. Doba τ_d se také mění s různými materiály, ze kterých jsou stěny srážkoměru, nálevka a konvice vyrobeny.

Stanovením τ_d se zabývali Allerup a Madsen (1979). Doba τ_d stanovili z přímých pozorování. Pokusy byly prováděny v Německu a Dánsku a jsou platné pro srážkoměr Hellmann. Zmínění autoři našli vztahy mezi τ_d a velikostí sytostního doplňku po dešti d_e a vztah τ_d k potenciální evapotranspiraci E_p , více Allerup a Madsen (1979) nebo Tihlárík (1995) nebo Sevrúk (1982).

Tímto přístupem se směřuje do bodu, kdy by bylo potřeba chyby způsobené omočením měřit kontinuálně po každé přehánce. Proto se přistupuje ke zjednodušení vztahů pro určení celkového omočení. Nejčastější způsob určení odhadu ztrát omočením se počítá pro měsíční nebo delší období:

1. Odhad ztrát pro srážkoměrnou nádobu (stěny srážkoměru a nálevky)

$$\Delta P_1 = \bar{a}_1 \cdot q \quad (2.3)$$

ΔP_1 – měsíční ztráta omočením stěn srážkoměru [mm]

\bar{a}_1 - průměrná denní ztráta omočením stěn srážkoměru [mm]

q - počet dní se srážkami

2. Odhad ztrát pro konvici (sběrnou nádobu)

$$\Delta P_2 = \bar{a}_2 \cdot q \quad (2.4)$$

ΔP_2 – měsíční ztráta omočením konvice [mm]

\bar{a}_2 - průměrná denní ztráta omočením konvice [mm]

q - počet dní se srážkami v daném měsíci

Celkové měsíční ztráty pak mohou být odhadnuty zjednodušeně takto:

$$\Delta P_{1+2} = \Delta P_1 + \Delta P_2 = \bar{a}_{1+2} \cdot q \quad (2.5)$$

\bar{a}_{1+2} – je průměrné množství [mm] omočení na srážkoměrnou nádobu i konvici.

K výpočtu ztrát omočením podle rovnice 2.5 potřebujeme znát denní úhrny srážek, popř. i skupenství srážek. Podle WMO No. 21 (Tihlárík, 1995, s. 40) se hodnoty \bar{a}_{1+2} mezi srážkoměry v různých oblastech a nadmořských výškách příliš nemění od stanoveného průměru, a to ani při kratších časových úsecích. Ve Švýcarsku bylo zjištěné na 12 stanicích používajících Hellmannův srážkoměr rozpětí \bar{a}_{1+2} 0,28 - 0,33 mm pro kapalně srážky za období 6 let. Maximálním roční rozpětí činilo 0,3 - 0,38 mm (Sevruk 1982, s. 20). (Sevruk 1982, s. 20) doporučuje provádět opravy na omočení na delších časových úsecích.

Pro naprostou většinu manuálních srážkoměrů se velikost \bar{a}_{1+2} pohybuje na jedno měření mezi 0,2-0,3 mm (Sevruk, 1982, tabulka XI, s.17).

2.6.2 Odhad ztrát způsobených omočením pro srážkoměr Metra (metoda SHMÚ)

Problémem určení průměrných ztrát na omočení se u nás zabýval nejdříve Šamaj (1973), který odhadl tuto ztrátu na 0,25 mm pro jedno měření (0,15 mm pro konvici a 0,10 mm pro nádobu). Vycházel přitom z rozborů zahraničních experimentů. Mendel (1975) stanovil ztrátu omočením na 0,2 mm na jedno měření, vycházel přitom z prací ruských autorů, jež měřili velikost omočení pro Treťjakovův srážkoměr.

Lednický a Priadka (1979) provedli zatím nejkompexnější a nejhodnotnější experimenty. Simulovali různě velké srážkové úhrny a vliv rozličných podmínek na ztráty omočením. Použili 20 nových srážkoměrných souprav, které očíslovali. Celkem 5 x opakovali experiment při simulovaných srážkách různé velikosti: 1, 2, 5, 10 mm. Do

suché nádoby srážkoměru se nalila příslušná množství 20 °C teplé destilované vody. Po 15 minutách byla voda ze srážkoměru vylita a jejím zvážením a porovnáním s původní hodnotou nalité vody byla určena hodnota ztráty omočením stěn srážkoměrného přístroje. (Lednický, Priadka, 1979, s. 2).

V průměru činí ztráta na omočení u nového přístroje na nádobu: 0,13-0,20 mm na jedno měření v závislosti na velikosti srážek, extrémní hodnoty pro nádobu jsou od 0,06-0,25 mm. Pro konvici a nálevku (letní verze) je to průměrně 0,07-0,10 mm, v extrémních případech 0,05-0,14 mm.

„Z předložených pokusů je vidět, že pro zimní období, kdy jsou srážky zachytávány pomocí srážkoměrné nádoby, je nutné při srážkách do velikosti 1 mm denního úhrnu počítat s chybou na každé měření 0,1 mm, a při srážkách vyšších než 1 mm se ztrátou 0,2 mm. V létě je potřeba počítat pro každé měření srážek bez ohledu na velikost srážkového úhrnu 0,1 mm“ (Lednický, Priadka, 1979, s. 3)

Posléze použili zmiňovaní autoři 12 dlouhodobě používaných přístrojů na stanicích (nemohli však určit přesnou dobu používání přístrojů). Srážkoměry neočistili. Experimenty ukázaly, že ztráty na omočení jsou u používaných srážkoměrů vyšší. Rozptyl hodnot je také vyšší. Doporučují proto srážkoměry alespoň 2x ročně čistit (Lednický, Priadka, 1979, s. 3).

Provedena byla také porovnávací měření s polským a sovětským srážkoměrem (5 nových kusů od každého). Experimenty na těchto srážkoměrech provedli stejným způsobem jako pro Metru a zjistili, že v porovnání s našim srážkoměrem mají nižší hodnoty (o 46-77 % oproti Metře) (Lednický, Priadka, 1979, s. 4). Z hodnot podle Tabulky 2 a Grafu 2, je patrné, že ztráty omočením se při vyšších úhrnech stabilizují, což potvrzuje tvrzení v publikaci Sevruka (1982). Na Grafu 3 je také dobře vidět, že ztráty na omočení jsou v průměru u používaného srážkoměru o něco vyšší než u nového.

Tab. 2: Výsledky experimentů za účelem určení velikosti omočení pro srážkoměr Metra, podle Lednického a Priadky (1979).

NOVÉ SRÁŽKOMĚRY (20 KUSŮ)				
Množství vody napodobující srážky	1 mm	2 mm	5 mm	10 mm
Srážkoměrná nádoba- zimní verze				
průměr	0,13	0,17	0,19	0,2
maximum	0,2	0,22	0,24	0,25
minimum	0,06	0,12	0,13	0,15
Nálevka s konvicí - letní verze				
průměr	0,07	0,08	0,09	0,1
maximum	0,1	0,12	0,13	0,14
minimum	0,05	0,05	0,06	0,07

POUŽÍVANÉ (12 KUSŮ)				
Množství vody napodobující srážky	1 mm	2 mm	5 mm	10 mm
Srážkoměrná nádoba -zimní verze				
průměr	0,18	0,21	0,22	0,24
maximum	0,28	0,28	0,28	0,3
minimum	0,11	0,12	0,13	0,13
Nálevka s konvicí - letní verze				
průměr	0,09	0,1	0,11	0,12
maximum	0,16	0,18	0,2	0,2
minimum	0,06	0,07	0,08	0,09

Pro zimní verzi srážkoměru pak doporučují:

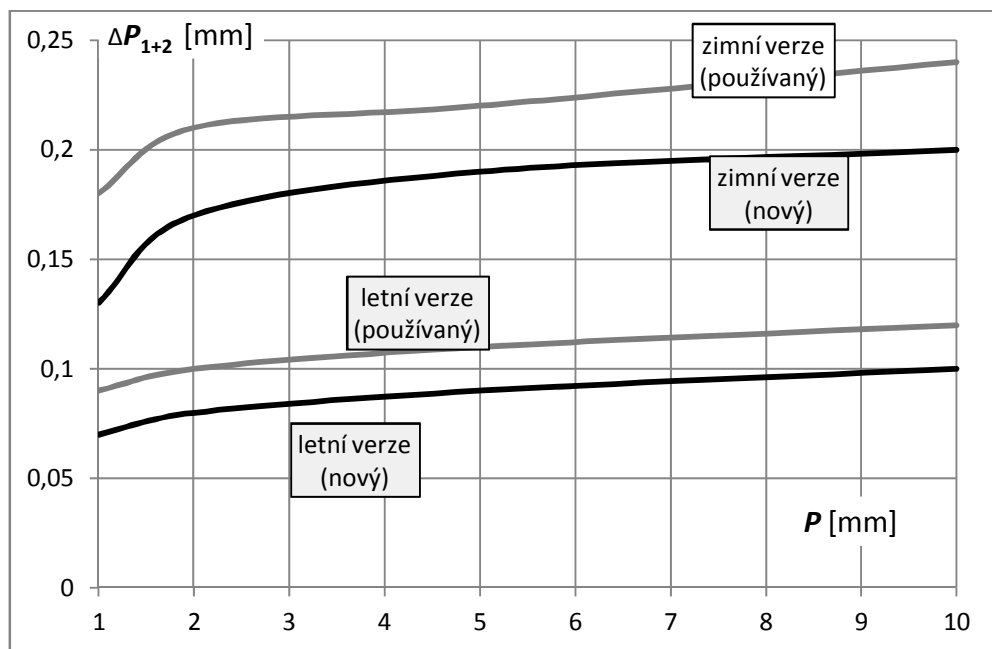
$\Delta P_{1+2} = 0,1$ mm pro denní úhrny 0,0-1,0 mm

$\Delta P_{1+2} = 0,2$ mm pro denní úhrny $\geq 1,1$ mm

Pro letní verzi pak:

$\Delta P_{1+2} = 0,1$ mm na jedno měření.

Graf 3: Průměrné ztráty omočením ΔP_{1+2} srážkoměru Metra pro simulované úhrny srážek P



Výsledky těchto experimentů byly aplikovány při pozdějších korigováních srážkových úhrnů Lapinem a kol. (1987,1990, 1991) a Tihláríkem (1995).

Pro určení velikosti chyb způsobených omočením srážkoměru Metra je tak potřebné znát:

- denní úhrny srážek
- datum výměny zimní verze srážkoměru za letní a naopak

Tato podkapitola byla upravena podle práce Tihláríka (1995).

2.7 Chyby způsobené výparem

Systematická chyba způsobená výparem z naakumulovaných srážek ve srážkoměru je nejdéle známou chybou. Pro většinu manuálních srážkoměrů je výpar malý až zanedbatelný. Sevruk (2004, s. 95) uvádí hodnoty do 2 %. Problematika výparu není ve světě příliš diskutována, protože se jedná o zanedbatelné ztráty (Sevruk, 2004, s. 97). Náš srážkoměr Metra je výjimkou, protože chyby způsobené výparem jsou u něj vyšší.

Principiálně můžeme ztrátu výparem ΔP_3 [mm] stanovit z následující rovnice:

$$\Delta P_3 = i_e \cdot t_e \quad (2.6)$$

i_e – intenzita výparu [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$]

t_e – doba trvání výparu [h]

Dobou t_e rozumíme zjednodušeně v praxi dobu od ukončení srážkové události do měření srážek. Výpar ze srážkoměru nelze považovat za shodný s výparem z vodní hladiny, která se měří na některých meteorologických stanicích, protože podmínky pro výpar jsou v nádobě a venkovním prostředí různé.

Intenzita výparu závisí především na:

- konstrukci srážkoměru, jeho barvě a materiálu
- druhu a množství srážek
- rychlosti větru v úrovni otvoru srážkoměru v době výparu, sytostním doplňku, teplotě vzduchu

- intenzitě globálního záření po skončení srážkové události (taktéž záleží na expozici srážkoměru)

Odhadnout intenzitu výparu i_e je obtížné a proto vznikly zjednodušující závislosti z empirických měření vázané na jednotlivé typy srážkoměrů. Doba trvání výparu t_e se určuje z pozorování ombrografem nebo z meteorologických pozorování na stanici. Někteří autoři korekčních metod určují i_e na základě korelace s rychlostí větru, jiní s vlhkostí vzduchu či průměrnou teplotou (Sevruk, 1982). V citované publikaci je na stránce 21 graf znázorňující velikost výparu pro nejznámější světové srážkoměry na velikosti sytostního doplňku. Se vzrůstajícím sytostním doplňkem a rychlostí větru v úrovni srážkoměru velikost výparu narůstá. Rozpětí hodnot se pro většinu standardně používaných srážkoměrů pohybuje od 0,0 do 0,15 mm·h⁻¹.

Experimentální odhady určení intenzity výparu i_e mohou být uskutečněny dvěma způsoby, aktivně nebo pasivně.

1. aktivní způsob

Měří se výpar ze simulovaných srážek ve venkovním přirozeném prostředí. Experiment probíhá s různě velkými simulovanými úhrny a za různého bezesrážkového počasí. Právě tato podmínka vede pravděpodobně k přeceňování výparu, protože výpar je při bezesrážkovém počasí (menší oblačnost a vlhkost) obecně vyšší, než ve dnech se srážkami, kdy se předpokládá více oblačnosti a vyšší vlhkost vzduchu (Sevruk, 1982).

2. Pasivní způsob

Velikost výparu se stanovuje pomocí minimálně dvou srážkoměrů stejného typu umístěných ve stejné výšce nad zemí. V jednom se srážky měří okamžitě po ukončení srážkové události a ve druhém v době běžného měření srážek. Z rozdílu mezi naměřenými úhrny se stanoví průměrné i_e po dobu od ukončení srážek po jejich změření. Předpokládá se, že hodnota omočení při vylévání nádob je stejná.

V obou případech se souběžně měří teplota, vlhkost vzduchu a rychlost větru

2.7.1 Odhad ztrát způsobených výparem pro srážkoměr Metra (metoda SHMÚ)

O výparu ze srážkoměru Metra se zmiňuje Mendel (1975). Vlastní pokusy ale neprováděl, pouze vycházel z empirických rovnic určených Struzerem v 60. letech pro Treťjakovův srážkoměr. Do těchto rovnic vstupují parametry v podobě sytostního doplňku

a rychlosti větru.

Zatím jediné experimenty za účelem zjištění intenzity výparu i_e ze srážkoměru Metra se v Československu uskutečnily v 70. letech v rámci tehdy probíhající státní úlohy II-5-1. Hlavní stanicí, kde se porovnávací měření prováděla, byla stanice Bratislava Koliba. Zde se také probíhaly experimenty pro určení výparu ze srážkoměru Metra. Použita byla aktivní metoda. Celkem bylo provedeno 233 měření se simulovanými srážkami od 0,1 mm do 10 mm a expozicí 24 hodin v přirozených venkovních podmínkách za různého bezesrážkového počasí (Lapin, Priadka, 1987, s.11). Se zimní verzí bylo učiněno 43 % a s letní 57 % pokusů. Průměrné hodinové ztráty při zimní verzi srážkoměru činily 0,011-0,029 mm·h⁻¹, při letní verzi (od 16 dubna do 14 října): 0,010-0,021 mm·h⁻¹.

Analyzovány byly také korelační závislosti mezi výparem ze srážkoměru a dalšími meteorologickými prvky. V chladném období roku se zjistil nejtěsnější vztah mezi výparem a globálním zářením ($r^2 = 0,52-0,85$) a v teplém období roku mezi výparem a sytostním doplňkem ($r^2 = 0,49-0,72$). „Získané korelační závislosti potvrzují, že v chladném období roku, kdy je při používání odkryté velké nádoby srážkoměru vypařující se plocha srážkové vody asi 10x větší než v teplém období roku, je pro výpar rozhodující přehřátí srážkoměru vlivem slunečního záření, protože jinak sytostní doplněk nemůže dosáhnout při nízkých teplotách pro podmínky výparu výraznější hodnotu. Při používání zimní verze srážkoměru může za slunečných dní v březnu a první polovině dubna výpar ze srážkoměru dosáhnout podstatně vyšší hodnoty, než výpar z půdy“. (Lapin, Priadka, 1987, s.11).

Původně řešili zmínění autoři odhad intenzity výparu pasivním přístupem a snažili se zhotovit Metra s nulovým výparem, ale pro technické potíže se tento výzkum přerušil a přešlo se na méně vypovídající aktivní přístup (Lapin, Priadka, 1987, s.12).

Citovaná autoři experimentů vsadili na jednoduchost a vyjádřili závislost výparu na teplotě, ačkoliv mezi teplotou a výparem ze srážkoměru nebylo dosaženo tak vysoké korelace jako u sytostního doplňku nebo globálního záření. Pro opravy měsíčních úhrnů srážek by tato závislost měla být postačující. Nelze ji aplikovat na opravu denních úhrnů srážek, ve smyslu pro opravu krátkého několikadenního období, jak sami píší: „tato metoda není použitelná pro opravy jednotlivých denních úhrnů srážek. Sumarizací denních oprav za měsíc nebo delší období se eliminují individuální nepřesnosti“ (Lapin, Priadka, 1987, s. 12). „Při opravách úhrnů srážek za měsíční a delší období se individuální nepřesnosti korekční metody eliminují, i když se dělají po jednotlivých dnech“. (Lapin, Priadka, 1987, s.14).

Vyjádřili regresní rovnice zvlášť pro letní a zimní verzi srážkoměru. Z experimentů vyplynulo, že závisí též na množství zachycených srážek ve srážkoměru, proto existují vždy tři závislosti pro denní naměřené úhrny srážek. Výsledné rovnice jsou na Grafu 4.

K výpočtu denní hodnoty korekce je potřebné určit počet hodin od začátku padání srážek. Tuto dobu je možné určit z ombrografického měření. Ovšem ombrografická měření nejsou vždy dostupným údajem a mají častá přerušení. Proto se Lapin a Priadka rozhodli určit zjednodušenou průměrnou dobu (hodinu) začátku padání srážek platnou pro celé území. Studovali oblast celého Slovenska a určili pro nižší polohy průměrný začátek padání srážek ve srážkových dnech na 15 hodinu v chladném půlroku (říjen-březen) a na 17 hodinu v teplém půlroku (duben-září).

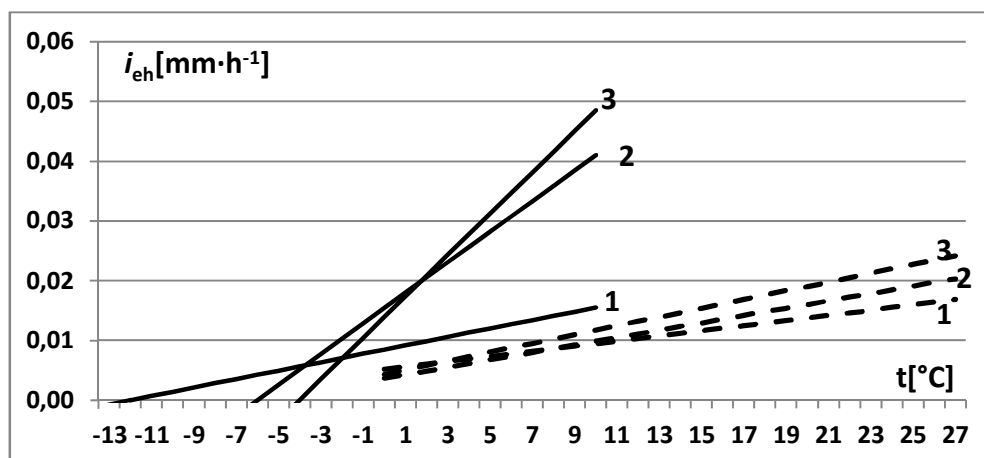
Při srážkách je v uvedeném čase v teplém půlroku teplota vzduchu asi o 2° nižší a v chladném půlroku asi o 0,5 °C vyšší. Posléze provedli opravy na Slovenských stanicích měřících teplotu vzduchu a určili korekční koeficient pro výpar na 5,5 % ročně (platí pro nížiny), (Lapin, Priadka, 1987, s.14), více v kapitole 3.1.1.

Pro určení výparu ze srážkoměru Metra je tak potřebné znát:

- denní úhrny srážek (velikost denního úhrnu pro určení intervalu na Grafu 4)
- odhad počtu hodin od začátku padání srážek po jejich měření*
- odhad průměrné teploty od začátku padání srážek do doby jejich změření*
- datum výměny zimního verze srážkoměru za letní a naopak

*Pozn. hodnoty se však většinou počítají až po ukončení vypadávání srážek, protože se předpokládá, že výpar je při srážkách (vlhkosti okolo 100 % velice malý), (Sevruk, 1982) a Tihlárík (1995).

Graf 4: Regresní rovnice závislosti průměrné hodinové intenzity výparu i_{eh} ze srážkoměru Metra na průměrné teplotě v čase od začátku padání srážek do doby jejich měření. Plné čáry – zimní verze srážkoměru, přerušované čáry – letní verze srážkoměru, 1 – pro denní úhrny srážek $\leq 0,9$, 2 – pro 1-4,9 mm, 3 – pro ≥ 5 mm. Níže je přiložena tabulka regresních rovnic z grafu (y značí i_{eh}). (Adaptované podle Lapin, Priadka, 1987, s.10)



Verze srážkoměru	Interval denních úhrnů srážek [mm]		
	≤ 0,9	1,0-4,9	≥ 5
Letní	$y = 0,000431t + 0,00521$	$y = 0,000617t + 0,0037$	$y = 0,000733t + 0,0044$
Zimní	$y = 0,000705t + 0,0085$	$y = 0,002563t + 0,0154$	$y = 0,003464t + 0,0139$

2.7.2 Odhad počtu hodin od konce padání srážek po jejich měření

V České republice dominují v letním období srážky konvektivního původu, které kulminují v odpoledních hodinách, zatímco v zimě srážky frontální. V zimě je chod srážek méně vyrovnaný. Lapin, Faško, Košťálová (1990, s. 102) píše: „V databázi jsou pouze údaje o výskytu srážek ze čtyř období dne, které nedostačují na spolehlivé určení začátku padání srážek. Proto jsme použili na základě výpočtů z omezeného počtu měsíců a stanic jednotně pro chladný půlrok čas 15.00 h SMČ a pro teplý půlrok 17.00 h SMČ. V jednotlivých dnech jsou pochopitelně značné odchylky od těchto termínů, ale v měsíčních průměrech je začátek padání srážek s velkou většinou v rozmezí ± 2 hodiny, což pro daný účel představuje dostatečnou přesnost“. Důležité je, že stanice byly vybrány na území Slovenska.

Průměrnou teplotu vzduchu t pro jednotlivé dny určili ze vztahu:

$$t = \frac{t_{14} + 2t_{21} + t_7}{4} \quad (2.7)$$

kde t_7 je teplota následujícího dne.

Tato podkapitola byla upravena podle práce Tihláríka (1995).

2.8 Chyby způsobené účinky větru

Je obecně známo, že největších chyb je dosahováno vlivem větru a tak je zapotřebí se této problematice náležitě věnovat. Strhnuté srážkové částice mimo zachytané plochy srážkoměrů mají za následek podhodnocení srážek o 2-15 % v případě deště a 10-50 % i více v případě sněžení (Sevruk, 2004, s. 95).

Problematika zrychlení větru nad záchytnou plochou už byla diskutována, zde bude rozvinuta. Kontinuita vzdušného proudu (kapaliny) má tu vlastnost, že se snaží přemístit stejné objemy za jednotnou vzdálenost, překážky způsobují zrychlení proudění nad i pod srážkoměrem (pokud není posazen přímo na zem). Některé srážkové částice jsou strhávány do závětrí. V potaz je ovšem nutné brát i větrné turbulence v okolí srážkoměru malých i velkých rozměrů, které jsou nezachytitelné, v mikroklimatickém měřítku záleží také na směru proudění – tuto problematiku jde ve výsledku těžko determinovat.

2.8.1 Fyzikální pozadí problematiky

Pro pochopení problematiky je nezbytné vědět něco o srážkových částicích jako takových. Z knihy: Fyzika oblaků a srážek (Řezáčová a kol., 2007) jsem vybral několik zásadních informací.

Nejdříve k tekutým srážkám: srážkové částice se od oblačných částic liší svojí velikostí, jako hraniční kritérium se bere poloměr 0,1 mm, nad tímto rozměrem se už jedná o srážkové částice, které se nevznášejí ve vzduchu jako oblačné, ale padají k zemi. Kapičky mrholení mají poloměry od 0,1 – 0,25 mm, nad touto hranicí mluvíme o dešti. Do poloměru 0,28 mm mají kapky deště sférický kulový tvar a začínají se při pádu deformovat, zplošťovat. Velikost zploštělých kapek se uvádí v ekvivalentním průměru koule o stejném objemu (Řezáčová a kol., 2007, s.134). Kapky o ekvivalentním poloměru nad 10 mm jsou nestabilní a při dopadu se tříští (Řezáčová a kol., 2007, s.144). K rozstříku srážkové vody (příčině jedné z uvedených systematických chyb) dochází tedy jen v případě velkých kapek.

Pro určení míry strhávání částic je důležité znát spektrum velikosti dešťových kapek. Čím větší částice je, tím méně je její trajektorie ovlivňována prouděním. V praxi se měří spektrum srážkových částic distrometry. Například v Hradci Králové proběhlo v letech 1998-1999 měření spektra velikosti dešťových srážek pomocí vysokofrekvenčních snímkování (Graf 5). Tato měření mají praktický dopad na optimalizaci parametrů užívaných při výpočtu srážkových úhrnů z radarů (Fišer a kol., 2002).

Měření obecně ukazují, že s rostoucí intenzitou se mění spektrum kapek a přibývá velkých kapek.

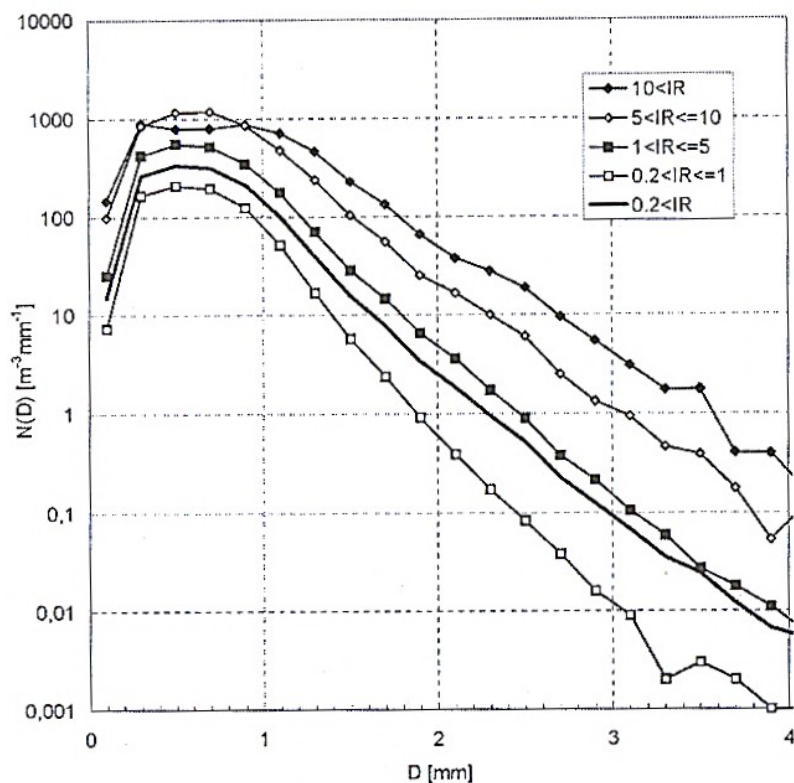
Nejčastěji užívaným klasickým vyjádřením spektra velikosti srážkových částic je Marshall-Palmerovo rozdělení z konce 40. let, které má tvar:

$$n_D(D) = N_0 e^{(-AD)} \quad (2.8)$$

kde n_D je počet kapek o průměru D , N_0 a A jsou parametry, parametr rozdělení $N_0 = 8000 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ a $A = 4,1I_R - 0,21 \text{ mm}^{-1}$ (I_R je intenzita deště v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Toto vyjádření není však dostatečně obecné a proto jsou upravovány parametry N_0 a A pro jednotlivé typy srážek (mrholení, déšť, intenzivní déšť), (Řezáčová a kol., 2007 s. 146). Jak vidno z rovnice (2.8), rozdělení velikostí srážkových částic má exponenciální charakter.

Pro rozdělení spektra velikostí dešťových kapek je typické rychlé narůstání velikosti od poloměru 0,1 mm do hodnot kolem 0,5 mm a pak pozvolný pokles. Na Grafu 5 vidíme závislost rozdělení spektra velikostí částic pro jednotlivé intenzity deště. Z grafu je patrné, že s vyšší intenzitou deště narůstá počet větších částic v souboru, což je velice důležité zjištění, na němž jsou korektury chyb způsobených aerodynamickým efektem postavené (viz kapitola 2.8.4). Záznamy z disdrometrů nám říkají, že intenzita srážek a jejich velikostní spektrum je silně proměnlivé v řádech minut (Řezáčová, 2007, s.147).

Graf 5 Rozdělení velikosti srážkových částic deště (osa x: $D =$ průměr částic, osa y: koncentrace částic N o průměru D [$\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$]). Jednotlivými čarami jsou vyjádřeny spektra pro naměřené intenzity IR [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$] označené v rámečku. Hodnoty spojené do čar jsou brány jako středové pro dané intenzity deště. Plná čára vyznačuje průměr za celý sledovaný datový soubor. Práh detekce odpovídal kapkám o průměru přibližně 0,1 mm. Grafy jsou výsledkem 150 h měření v období vypadávání srážek. (Převzato z upraveného grafu Řezáčovou a kol. , 2007, s. 148, původní autoři: Fišer a kol., 2002)



V případě smíšených a tuhých srážek platí také Marshall-Palmerovo rozdělení, ovšem s jinými parametry. Pádová rychlost vloček závisí na rozdíl od deště na hustotě a tvaru krystalů. Předpokládá se, že sněhové vločky s dendrickým (rozvětveným) tvarem kladou větší odpor a padají pomaleji, mohou být pak účinněji strhávány prouděním, i když jsou poměrně velké (Řezáčová a kol., 2007, s. 164). Pádová rychlost závisí silně na tvaru částice (Řezáčová a kol., 2007, s. 135).

Tuhé částice rozdělujeme na:

1. sníh: jednotlivé krystaly různých tvarů se shlukují a vytvářejí sněhovou vločku, sněhové vločky se vyskytují převážně nad -5°C . Charakteristická velikost vloček je okolo 2-5 mm, výjimečně 15 mm (Řezáčová a kol., 2007).
2. sněhová zrna (dříve krupice), obvykle padají jen z nízké vrstevnaté oblačnosti stratus nebo z mlhy, jsou obvykle menší než 1 mm.
3. sněhové krupky, mají průměr až 5 mm, vyskytují se při přízemních teplotách kolem 0°C ve sněhových přeháňkách, nebo v přechodu mezi deštěm a sněhem.
4. kroupy: mají velikosti nad 5 mm.
5. zmrzlý déšť – průhledné zmrzlé kapky, průměr nepřesahuje 5 mm, vznikají mrznutím dešťových kapek, nebo částečně roztátých vloček v blízkosti zemského povrchu.

Pravděpodobnost shlukování (agregace) sněhových krystalů je největší při teplotách kolem 0°C , pak schopnost agregace klesá, sekundární maximum je opět kolem -15°C . Maximální rozměry sněhových vloček jsou při teplotách kolem 0°C . Schopnost agregace je závislá také na tvaru krystalků, které sněhové vločky tvoří. Sloupkové krystaly a ledové jehly tvoří malé vločky, dendrity velké. Obecně platí, že čím jsou teploty nižší, tím menší a lehčí jsou sněhové vločky. Sněhové srážky vypadávají v o řád nižší intenzitě než déšť (Řezáčová a kol., 2007, s.156).

Shrnutí – co ovlivňuje výsledný počet stržených srážek mimo otvor srážkoměru:

1. hmotnost částice (těžší částice lépe odolávají strhávání, lehké sněhové částice jsou strhávány snadněji)
2. tvar částice: týká se sněhových vloček (rozvětvené vločky mají menší pádovou rychlost a jejich trajektorie jsou lehce ovlivnitelné prouděním)
3. rychlost padání částice (rychle padající částice potřebují delší čas na změnu své trajektorie a vychýlení je pozvolnější než v případě pomalých částic, rychlost pádu je

úměrná hmotnosti částice, v případě sněhu je rozhodující i tvar), rychlost částice závisí i na tlaku a teplotě (Řezáčová a kol., 2007)

4. parametry srážkoměru (celkový tvar, velikost zachytné plochy a tloušťka a tvaru horního rámu)

5. rychlost větru nad zachytnou plochou srážkoměru

6. teplota vzduchu (v případě tuhých srážek je patrná závislost ubývání velikosti a hmotnosti sněhových vloček s klesající teplotou)

2.8.2 Metody výzkumu - přehled

Na úvod je nutné zmínit, že korigování srážek se provádí zvlášť pro tuhé a kapalné srážky (někdy i zvlášť pro smíšené srážky) v důsledku rozdílných vlastností srážkových částic, které byly předcházejících odstavcích vysvětleny.

Nyní následuje přehled o studiu větrného pole v oblasti zachytné plochy srážkoměru, po té podkapitola přechází přímo k problematice korekčních rovnic stanovujících odhad velikosti chyb způsobených větrem. Za touto částí jsou podkapitoly věnované výpočtům parametrů těchto rovnic.

Proudění okolo srážkoměru můžeme sledovat několika způsoby.

1. Simulací ve větrném tunelu

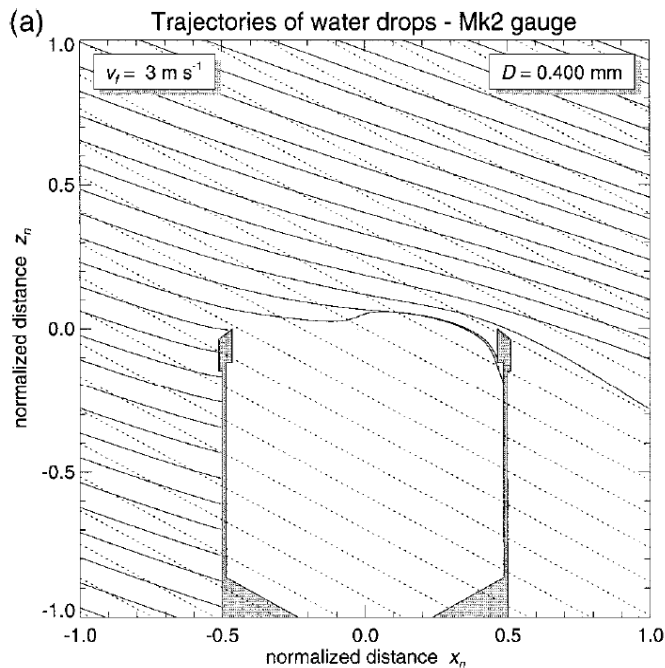
Nejpoužívanější metodou je zkoumání proudění okolo srážkoměru ve větrném tunelu. Srážkoměr se umístí do tunelu, který může mít rozdílně velký průměr (řády metrů) a je obtékán dodávaným vzduchem. Dříve se používalo ke sledování proudnic médií: pilin nebo dýmu, dnes se vítr měří přímo u srážkoměru speciálními velice tenkými čidly v několika řadách (Nespor a Sevruc, 1999).

Simulace umělého deště je velice komplikovaná, a tak tato měření slouží pouze ke zjištění pole větru v okolí srážkoměru (jak již bylo řečeno, spektrum srážkových částic je proměnlivé). Další problém představuje udělení počáteční rychlosti částicím. Problémy jsou i se zachováním laminárního proudění ve větrném tunelu při rychlostech $1-3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, které jsou nejčastěji v reálných podmínkách. Větrný tunel má však výhodu v tom, že víme přesně počáteční rychlost větru. Tyto experimenty slouží tedy jako podpora dalším metodám (Tihlárík, 1995, s. 58). Srážkoměr Metra zatím v tunelu nebyl.

2. matematicko-numerickými modely

Představují další možnost, jak zkoumat obtékání vzduchu okolo srážkoměru. Provedeno bylo několik simulací (Nespor, 1993) nebo (Nespor a Sevruk, 1999), při kterých se simulovala jak rychlost větru, tak i trajektorie srážkových částic (Obr. 12). Při simulacích se determinují parametry a rovnice. Výsledné obtékání vzduchu je počítáno pomocí posuvného 2D gridu. Výsledky simulací potvrzují například tvrzení, že pod intenzitou deště $0,03 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ narůstá silně vliv větru na trajektorii částic.

Obr. 12 Modelované trajektorie srážek v okolí srážkoměru Mk2 při rychlosti větru $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Průměr částic je $0,4 \text{ mm}$. Tlustou čarou jsou znázorněny trajektorie srážek ovlivněných prouděním, přerušovaně hypotetické trajektorie bez přítomnosti překážky v podobě srážkoměru. Převzato z (Nespor a Sevruk, 1999, s 458).



3. Empiricko – statistickými modely

Tento typ modelů je nepoužívanější, protože pracuje s reálnými podmínkami. Předcházející dva přístupy spíše jen podporují výsledky empirických pozorování. Empiricko-statistické modely jsou založené na výpočtu regresních rovnic, které udávají závislost rychlosti větru (popř. i jiné měřitelné veličiny) na korekčním koeficientu. Korekční koeficient se určuje empiricky na základě porovnání naměřených úhrnů z běžného srážkoměru staniční sítě se srážkoměrem chráněným proti větru (jamový nebo

s protivětrnou ochranou). Srovnávací měření se provádějí na vybraných stanicích po určitou dobu (několika let), hlavní mezinárodní srovnávací měření již byla představena.

Opravy je pak možné provádět přímo na všech meteorologických stanicích, kde se měří rychlost větru. Protože srhávání nezáleží pouze na rychlosti větru, ale i na hmotnosti srážkových částic, hledaly se běžně měřené meteorologické veličiny, které by silně korelovaly s empiricky zjištěným korekčním koeficientem. Pro kapalně srážky je to intenzita deště (čím je déšť intenzivnější, tím jsou částice těžší, to dokládají i měření disdrometrem (Řezáčová a kol., 2007), Graf 5. V případě tuhých srážek to je teplota vzduchu, kdy existuje závislost: čím nižší teplota, tím lehčí částice. Ve výsledných regresních rovnicích tak vystupuje rychlost větru, intenzita srážek a teplota. Následuje přehled přístupů pro opravu kapalných srážek:

2.8.3 Konverzní faktor pro kapalně srážky

Jak již bylo řečeno, chyba způsobená aerodynamickým efektem srážkoměru pro kapalně srážky se zjišťuje porovnáním úhrnů z jamového a nadzemního srážkoměru. Podle experimentálních měření v naprosté většině případů naměří více srážek jamový srážkoměr. Dokládají to závěry 2. mezinárodního srovnávacího měření nebo výsledky práce autorů Lapina a Priadky (1987).

Podle světové literatury můžeme v některých případech zaměnit význam slova konverzní faktor za korekční koeficient, avšak v případě korektur SHMÚ a Tihklárika (1995) se jedná o dva různé termíny (rovnice 3.5, 3.7 a 3.8).

Jako první uvádím nejjednodušší způsob určení velikosti chyby způsobené vlivem větru, který vyvinuli Allerup a Madsen z Dánska (Allerup, 1985). Bi-lineární regresní model vychází z empirických pozorování na stanici, kde byl instalován jamový srážkoměr a je určen pro všechny stanice v Dánsku měřící rychlost větru a intenzitu srážek. Svoji podstatou je tento vztah nastaven na dánské podmínky (výška anemometru, výška srážkoměru 1 m, minimální výskyt sněhových srážek). Vztah zní:

$$P_3 = \frac{P_p}{P_e} = e^{\alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln(I_e) + \alpha_2 \cdot u \cdot \ln(I_e) + \alpha_3 \cdot u} \quad (2.9)$$

P_3 – korekční koeficient udávající chyby způsobené větrným polem

P_p – úhrny srážek ze srážkoměru s otvorem v úrovni zemského povrchu [mm]

P_e – úhrny srážek ze srážkoměru umístěného nad zemským povrchem [mm]

I_e – intenzita srážek pro nadzemní srážkoměr [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – parametry udávající okolnosti porovnávacích měření (výška anemometru, typ srážkoměru atd.)

u – rychlost větru ve výšce záchytné plochy srážkoměru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

V rovnici je patrná přímá závislost ztrát záchytu srážkoměru na intenzitě srážek a rychlosti větru. Ostatní přístupy jsou složitější, ale zároveň je možno je aplikovat na rozmanitější podmínky.

Nejpoužívanější korekční schéma bylo vytvořeno v býv. Sovětském svazu v 60. letech. Korekce jsou v tomto případě opět postaveny na empirických porovnávacích měřeních s jamovými srážkoměry v případě tekutých srážek a srážkoměry chráněnými proti větru štíty v případě tuhých srážek. Jejich metoda je typická započítáním parametru N (probrán bude v dalších podkapitolách), který udává podíl srážek pod určitou intenzitou, pod kterou mohou být srážkové částice strhávány. Tento model je ve světě nejpoužívanější, ostatní korekční metodiky z ní vycházejí.

Obecně můžeme korekční regresní rovnici pro kapalně srážky podle ruských autorů vyjádřit takto:

$$k_{lq} = \frac{P_p}{P_e} = \frac{1}{1 - C \cdot N \cdot u} \quad (2.10)$$

k_{lq} - korekční koeficient pro kapalně srážky udávající chyby způsobené vlivem větru

P_p - úhrn srážek z jamového srážkoměru [mm]

P_e - úhrn srážek z nadzemního srážkoměru [mm]

C – konstanta vyjadřující specifikum daného srážkoměru

N - parametr udávající podíl srážek pod intenzitou $0,03 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

u – rychlost větru v úrovni záchytné plochy srážkoměru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Rovnici můžeme názorněji zapsat jako funkci závislosti N s u na k_{lq} :

$$k_{lq} = f(u \cdot N) \quad (2.11)$$

Autoři se snažili zavést rozumnou a obecnou metodu oprav pro stanice, kde P_p není měřené. V rovnici je zanesena rychlost větru v úrovni srážkoměru a podíl srážkových úhrnů s intenzitou pod $0,03 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Hodnota $0,03 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je považována jako prahová intenzita srážek, pod kterou jsou částice lehce ovlivněné prouděním nad srážkoměrem. Byla vypočítána empiricky, viz dále v textu. „Ukazuje se totiž, že závislost hodnoty konverzního faktoru k_{lq} jenom na rychlosti větru není dostatečně reprezentativní.

Struzer a Bogdanova poukázali, že tato závislost je rozličná pro geograficky odlišné polohy stanic v rámci bývalého Sovětského svazu. Je to dané odlišnou strukturou srážek převládající v odlišných geografických podmínkách. Je zřejmé, že vítr způsobuje větší ztráty v době dešťů s menšími kapkami v středních a severních šířkách, než v době dešťů s velkými kapkami v jižních šířkách. Proto je potřebné do závislosti $k_{lq} = f(u)$ přidat i strukturu srážek měnící se podle sezóny roku a regionu“ (adaptováno podle Tihláríka, 1995, s.63). Konstanta C vyjadřuje specifikum daného typu srážkoměru, respektive neměnná čísla vyskytující se v regresní rovnici. Metoda je efektivní pro srážkové úhrny změřené za delší periodu než 24 hodin. Stejný postup použil i Sevruk a Kirchhofer při sestrojování korigovaných srážek v hydrologickém atlasu Švýcarska (Kirchhofer, Sevruk, 1992). Pro výpočet korigovaných úhrnů o systematickou chybu způsobenou aerodynamickým efektem srážkoměru při všech skupenství srážek je nutné v běžné staniční síti znát i rychlost větru v úrovni otvoru srážkoměru (přepočtem rychlosti z anemometru na výšku otvoru srážkoměru), dále podíl tuhých (resp. kapalných srážek) a rychlost větru v době padání srážek.

Velikost konverzního faktoru pro dešťové srážky se pohybuje většinou do 1,1 (nárůst změřených úhrnů o 10 %).

Shrnutě, na výpočet konverzního faktoru pro kapalnou srážku má vliv:

1. větrné pole v okolí otvoru srážkoměru v době srážek
2. hmotnost a rychlost srážkových částic, skupenství částic
3. rozdílný výpar a omočení v jamovém a nadzemním srážkoměru při srovnávacích měřeních
4. podíl kapalných srážek na celkových srážkových úhrnech

Ani jeden z těchto procesů nejsme schopni přesně determinovat. Výpočet parametrů potřebných pro výpočet korigovaných kapalných srážek je v následujícím textu. Tato podkapitola byla upravena podle Tihláríka (1995).

2.8.4 Intenzita srážek jako faktor spektra kapalných srážek

Spektrum velikosti kapek nepatří mezi standardně měřené veličiny, využívá se ho pouze při experimentálních měřeních disdrometry. Bylo tedy potřebné najít vhodný parametr, kterým by se struktura srážek dala dobře vyjádřit. Bogdanova (1966) tvrdí, že vhodným parametrem je intenzita srážek.

Na základě tohoto předpokladu byly provedeny pokusy v šedesátých letech v býv. SSSR na 39 stanicích rovnoměrně rozmístěných po celém území (od Pobaltí po

Zabajkalsko a od Kolského poloostrova po Uzbekistán). Autorka Bogdanova navrhla prahovou hodnotu intenzity srážek I_{pr} , pod kterou se začne projevovat evidentní nárůst ztrát záchytu. Dále odhadla podíl N takových úhrnů na celkových srážkových úhrnech, které padají s intenzitou $I \leq I_{pr}$.

Porovnala měsíční úhrny srážek P_e z nadzemních a P_p z jamových srážkoměrů v letních sezónách za období 1962-64. Z hodinových údajů o rychlosti větru měřeného v době srážkových událostí v úrovni otvoru srážkoměru vypočítala průměrnou měsíční rychlost větru v době padání srážek. Tuto rychlost převedla na jednotnou výšku 2 m (u_{2pg}). S ombrografických záznamů vyjádřila intenzity I_i s desetiminutovým krokem. Pro každou stanici vyčíslila sumu srážek Q_m pro odstupňované intervaly srážkových intenzit (Tab. 3). Intervaly možno vyjádřit, jako: $x_i < I_i \leq x_{i+1}$

Tab. 3: Intervaly intenzit srážek. Upraveno podle Tihlárka (1995, s.64).

Intervaly intenzity srážek [mm·min ⁻¹]	Střední hodnota intervalu I_i
0,000 - 0,005	0,0025
0,005 - 0,015	0,01
0,015 - 0,025	0,02
0,025 - 0,035	0,03
0,035 - 0,045	0,04
0,045 - 0,065	0,550
0,065 - 0,105	0,085

$$p_i = \frac{\Delta P_{o,i}}{P_o} 100 \% \quad Q_m = \sum_{i=1}^m p_i \quad i = 1, n \quad m = 1, n \quad (2.12)$$

p_i – procentuální podíl měsíčních úhrnů pro daný interval v Tab. 3

$\Delta P_{o,i}$ - měsíční srážkové úhrny vyčíslené pro intenzity ve zvolených intervalech v Tab. 3 [mm]

n – počet zvolených intervalů

P_o – celkový měsíční úhrn srážek z ombrografických záznamů [mm]

Dále stanovila veličinu δ , kterou nazvala „celková měsíční ztráta záchytu srážek způsobená vlivem větru“:

$$\delta = \frac{P_p - P_e}{P_p} 100 \% \quad (2.13)$$

P_p – měsíční úhrny ze srážkoměru v úrovni zemského povrchu

P_e – měsíční úhrny srážek ze srážkoměru umístěného nad zemským povrchem

Podle Bogdanové (1966) je závislost $\delta = f(u_{2pg})$ lineární, pro každou stanici s jinou strmostí v závislosti na geografické poloze stanice.

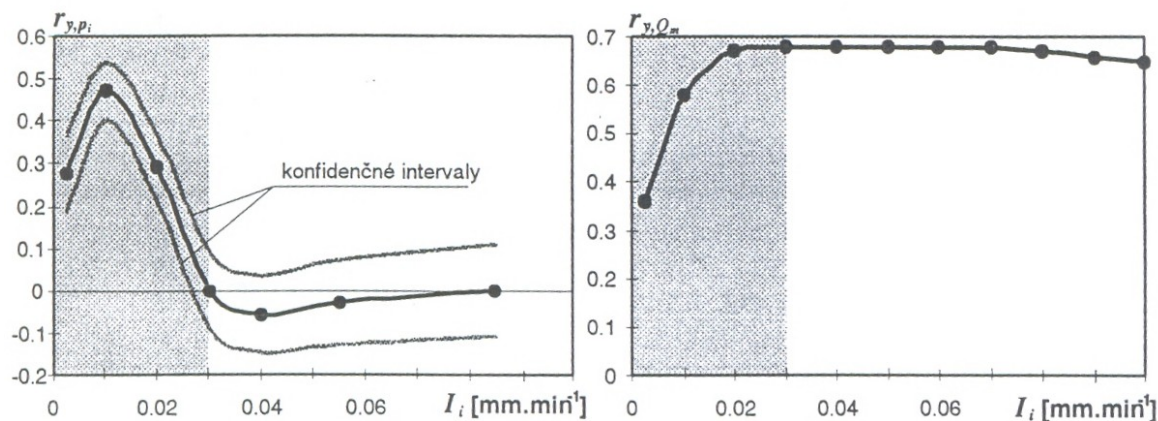
Následně vyčíslila veličinu y , která vyjadřuje gradient ztráty záchytu srážkoměru při změně rychlosti o $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$y = \frac{\delta}{u_{2pg}} \quad (2.14)$$

Pro určení prahové intenzity srážek, pod kterou jsou srážky ovlivňovány větrem, vypočítala pro jednotlivé intervaly intenzit deště korelační koeficienty mezi y a p_i a mezi Q_m a y , viz Graf 6.

Graf 6 znázorňuje korelace mezi gradientem ztrát záchytu y a procentuálního podílu srážek s danou intenzitou p_i resp. Q_m , které vícerozměrně charakterizují souvislosti mezi hodnotami srážkových úhrnů, ztrát záchytů, rychlosti větru a struktury srážek na měsíčních datech ze 39 stanic se širokým geografickým rozpětím poloh. Z grafu je patrný v obou případech práh odpovídající zhruba hodnotě $0,03 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Korelace dostatečně spolehlivě prokázaly, že při srážkách s intenzitou $I \leq 0,03 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ se signifikantně projevuje zkreslení záchytu srážkoměru vlivem větru. Bogdanova tedy stanovila tuto hodnotu na $I_{pr} = 0,03 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, což odpovídá $1,8 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

Graf 6: Korelační koeficienty mezi gradienty měsíčních ztrát záchytu srážkoměru y s měsíčními charakteristikami struktury srážek p_i a Q_m . Převzato z (Tihlárík, 1995, s. 65)



Tihlárík (1995) má k přístupu Bogdanové tyto připomínky:

1. Zanedbání otázky rozdílného výparu z jamového a nadzemního srážkoměru, především v teplejších oblastech.

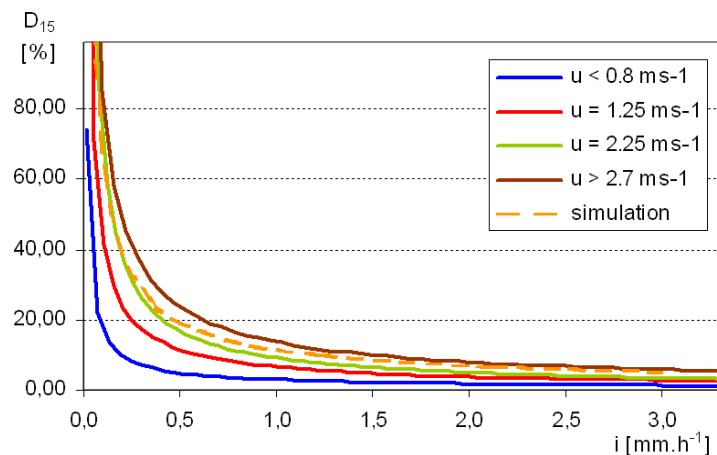
2. Tento postup neumožňuje vyjádřit podíl malých, větrným polem ovlivněných částic v blízkosti srážkoměru

3. korelace mezi y a p_i je nevhodně zvolena, protože y je konstantní (zprůměrované) a p_i je v rámci měsíce proměnlivé.

Přesto je tato mezní hodnota obecně reprezentativní a všeobecně uznávána a používána v korekturách. Tato prahová hodnota byla brána v potaz nejen v ruských korekturách, ale i v korekturách sestavených Sevrukem (2004) a je použita i v dalších metodikách. Výsledky Bogdanové potvrzují také výsledky matematické simulace (Sevruk, Nešpor, 1999, s.461). Na Grafu 7 je rovněž patrné, že od určené prahové intenzity $1,8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ dochází k významnějším ztrátám při záchytu.

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že k nejvíce podhodnoceným úhrnům dochází, pokud je intenzita deště malá a rychlosti větru velké. V delším období dochází k vyrovnání a extrémní hodnoty se eliminují (Sevruk, 2004, s.106).

Graf 7: Vliv intenzity kapalných srážek i [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$] na velikost ztrát způsobených vlivem větru (%) při rychlostech větru u . Výpočet byl brán z intenzit srážek měřených po 15 min. kroku (D_{15}). Ztráty byly určeny jako podíl srážek z nadzemního a jamového srážkoměru. Výsledky jsou za období 2001-2002 na Slovenské stanici Bohunice. Převzato z (Chvíla, Ondráš, Sevruk)



2.8.5 Parametr N - odhad podílu srážek s intenzitou $I \leq I_{pr}$

Nyní je otázkou, jak určit parametr N v běžných podmínkách. Ne každá stanice má totiž dostatečně dlouhý a kvalitní záznam z ombrografu a tak je nutné vypočítat parametr N pomocí regresních rovnic vyjadřujících závislost dostupné veličiny (teplota, počet dní

se srážkami) na intenzitě srážek. Regresní rovnice se vypočítávají empiricky z měření na stanicích, kde se měří intenzity srážek.

Bogdanova odvodila z 10-minutových ombrografických záznamů tuto závislost:

$$N = 45 - 75 \log I \quad (2.15)$$

I – průměrná měsíční intenzita srážek [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$] spočítaná jako podíl měsíčního úhrnu a doby trvání srážek

Při výpočtu tohoto empirického vztahu vycházela z pozorování na 240 stanicích rovnoměrně rozložených po SSSR. Hodnoty N získala ze 60 stanic s ombrografickými měřeními. Podle Bogdanové je možné odhadnout N pro jakékoliv místo SSSR s přesností 7-9 % (Tihlárík, 1995, s. 66). Dlouhodobou průměrnou měsíční intenzitu srážek pak stanovila jako:

$$I = 0,38 + 0,00425e \cdot T \quad (2.16)$$

e – dlouhodobá průměrná měsíční absolutní vlhkost vzduchu [mb]

T – dlouhodobá průměrná měsíční teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

Chyba určení I může dosahovat maximálně $\pm 0,15-0,20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, chyba se zvětšuje při intenzitách větších než $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, tyto intenzity se ovšem podílejí na vzniku chyb jen v malé míře.

Existují i zjednodušené závislosti na průměrné teplotě vzduchu, ovšem s menšími korelačními koeficienty než v případě rovnic 2.15 a 2.16, jako např. vztah od Sevruka (2004)

$$N = 77,5 - 2,7T \quad (r^2=0,66) \quad (2.17)$$

Sevruk dále odvodil parametr N z pozorování na 12 švýcarských stanicích za období 1965-1970 (duben-září) z 30 minutových ombrografických záznamů z týchž stanic. Určil následující vztahy:

$$N = 54 - 118 \log I_{30} \quad (2.18)$$

$$N = 145 - 53 \log \frac{P_e T}{q} \quad (r^2 = 0,84) \quad (2.19)$$

I_{30} – intenzita deště po 30 min. intervalech

P_e – měsíční úhrny srážek ze srážkoměru s otvorem nad zemským povrchem [mm]

T – průměrná měsíční teplota °C

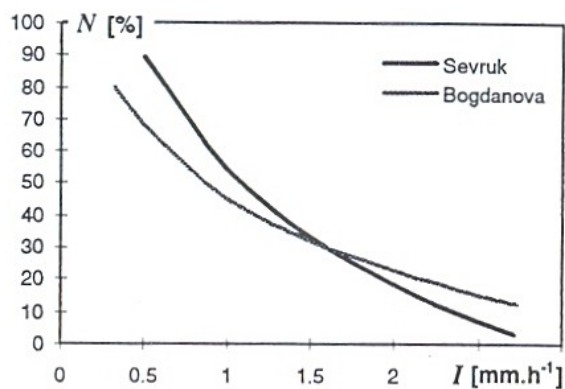
q – počet dní se srážkami v daném měsíci

r – korelační koeficient

Poslední zmíněný Sevrukův vztah je použitelný i na stanicích, které nemají ombrografické záznamy. Má v sobě hrubě zabudované vyjádření intenzity deště (podíl měsíčního úhrnu ku počtu dní se srážkami). Byl použit při korekturách ve Švýcarsku i Tihláríkem (1995).

Graf 8 zobrazuje porovnání rovnic Bogdanové (2.15) a Sevruka (2.18). Sevrukův vztah dává větší hodnoty N při průměrných měsíčních intenzitách menších než $1,5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, což způsobují pravděpodobně specifické podmínky hornatého Švýcarska nebo to může být způsobeno i odlišnými systematickými chybami ombrografů používaných ve Švýcarsku a Rusku (Tihlárík, 1995, s.67).

Graf 8: Porovnání vztahů Sevruka (2.18) a Bogdanové (2.15) na výpočet parametru N , jako funkce průměrné měsíční intenzity srážek I . Převzato z (Tihlárík, 1995, s. 67).



Tihlárík (1995, s. 67) poznamenává: „společným paradoxem výše uvedených prací analyzujících intenzity srážek jsou systematické chyby ombrografů. Kromě chyb způsobených větší náročností provozu ombrografů, musí se na ombrografických záznamech projevit i větrem vyvolané chyby, které následně zkreslují údaje

hlavně při srážkách s malou intenzitou a silným větrem. A o ty šlo právě autorům určujícím parametr N^c .

2.8.6 Konverzní faktor pro tuhé a smíšené srážky

Vliv aerodynamického efektu srážkoměru na tuhé a smíšené srážky je komplikovanější než v případě deště. Sněhové vločky jsou lehké a pomalu padající částice, které jsou snadno ovlivnitelné větrným prouděním. Sněhové srážky navíc vypadávají v nižších intenzitách než srážky dešťové. Jamové srážkoměry jsou pro porovnávání nevhodné a hodí se pouze pro oblasti, kde se nevytváří vyšší sněhová pokrývka, tedy tam, kde hrozí navívání sněhu do srážkoměru. Srovnávací měření probíhají proto s větrnými ochranami (Tret'jakovova nebo rozměrnější DFIR). Naměřené úhrny jsou z chráněných srážkoměrů vyšší než ze srážkoměrů nechráněných. Tret'jakovova ochrana

proti větru je ovšem účinná pouze při nízkých rychlostech větru, uvádí se většinou do $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v úrovni srážkoměru (WMO, 1998) a (Lapin, Priadka, 1987).

Zajímavý experiment proběhl v bývalém Sovětském svazu. Nejlepšího zachytu totiž dosahovaly srážkoměry umístěné v keřovitém porostu. Experiment proběhl v rámci tzv. Valdajského kontrolního systému, což je experimentální povodí řeky Polomeť na ruském Valdaji. Doprostřed křovinatého porostu byl umístěn Treťjakovův srážkoměr s ochranou proti větru (tzv. srážkoměr BUSH). Křovinatý porost byl tvořen převážně vrbami a měl rozměry cca $100\times 100 \text{ m}$. Křoviska byla jednou za rok sestřihávána na výšku 2 metrů. Autoři experimentu (Golubev, Simonenko, 1993) poznamenávají, že za léto mohly ojedinělé stromy narůst až do výšky 6 m (břízy). Uprostřed keřového polygonu byly dva Treťjakovovy srážkoměry s dvojitou protivětrnou ochranou ve výšce 2 m (úroveň keřů) a 4 m (2 metry nad keři). Srážkoměry umístěné v úrovni horní hranice keřů zachytávaly i více srážek než DFIR umístěný na louce poblíž křovinatého porostu (DFIR = 92-96%). Autoři poznamenávají, že keřovitý porost by měl být řídký, aby mohl sníh propadávat a nevytvářet na keřích souvislou sněhovou pokrývku. Zmíněný experiment probíhal v letech 1973-1978.

Pro oblasti, kde převládají v určitém období roku pouze sněhové srážky, představuje měření vodní hodnoty sněhové pokrývky dobrý odhad spadlého množství srážek. V našich podmínkách je to ovšem až na nejvyšší polohy nepoužitelné, protože se teploty v zimě dostávají nad nulu. Více se touto problematikou zabýval např. Sevruk pro oblast švýcarských Alp (Sevruk, 2004, s. 113).

Problém představují smíšené srážky. Podíl tuhé složky je velice proměnlivý a četnost takových srážek není tak velká, aby šlo daný jev spolehlivě determinovat. Někteří autoři smíšené srážky přiřazují k tuhým srážkám (Tihlárík 1995), jiní spíše ke kapalným (Sevruk, 2004). (Lapin, Priadka, 1987) vytvořily regresní rovnice zvláště pro smíšené a tuhé srážky.

Většina korekčních rovnic se snaží vyjádřit závislost korekčního koeficientu nejen na rychlosti větru, ale i na průměrné teplotě vzduchu, protože jak již bylo několikrát zmíněno, s klesající teplotou se intenzita i velikost sněhových vloček zmenšuje a při nižších teplotách dochází k větším ztrátám. Příkladem takové rovnice je ta od Braslavského (2.20) pro Treťjakovův srážkoměr z roku 1975 uvedená v publikaci Sevruka (1982, s. 9). Z rovnice vyplývá, že například při rychlosti větru $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a při teplotě -3°C je konverzní faktor $k = 1,5$, pro stejnou rychlost větru, ale teplotu -13°C je $k = 2,0$ (Sevruk, 1982, s.11). Názorně je vidět závislosti na Grafu 9, při nižších teplotách dosahují systematické chyby daleko vyšších hodnot. V extrémních případech pak mohou dosahovat ztráty i stovek procent (např. pro srážkoměr Hellmann pro rychlost $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a teplotu okolo -15°C $k = 2,6$. Obecně se však takovéto podmínky v Čechách vyjma nejvyšších horských poloh nevyskytují.

$$k = 1 + u_{hp}^{1,2} (0,35 - 0,25 \exp(0,045 t_p)) \quad (2.20)$$

k = konverzní faktor pro tuhé srážky

u_{hp} - rychlost větru v době padání srážek v úrovni srážkoměru [$m \cdot s^{-1}$]

t_p – teplota vzduchu v době padání srážek [$^{\circ}C$]

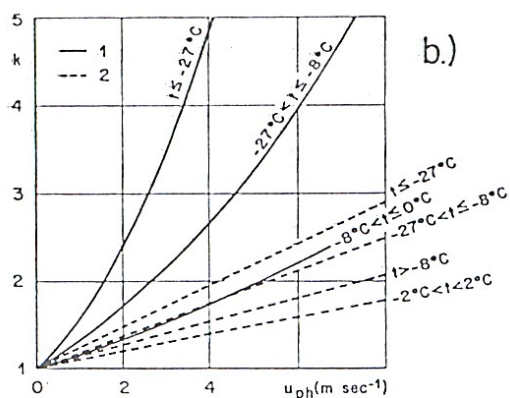
Vztahy pro korekci chyb způsobených vlivem větru pro tuhé srážky můžeme vyjádřit podobně jako u kapalných srážek (2.11) obecně jako funkci:

$$k = f(u_{hp} \cdot t_p) \quad (2.21)$$

t_p průměrná měsíční teplota

Další regresní vztahy pro rozličné srážkoměry je možné najít v publikaci Sevruka (1982) nebo (WMO, 1998). Tato podkapitola byla upravena podle Tihláríka (1995).

Graf 9 Závislost velikosti konverzního faktoru k na rychlosti větru v úrovni srážkoměru v době padání tuhých srážek u_{ph} , udávajícím velikost ztrát způsobených vlivem větru. Čáry představují případy pro různé teploty. Čára č. 1 – srážkoměr Hellmann, čára č. 2 – srážkoměr Tret'jakov. Převzato z (Sevruk, Klemm, 1989a, s. 20).



2.8.7 Odhad parametru Q

Základním předpokladem pro vypracování korektur je znalost o podílu tuhých, kapalných a popř. i smíšených srážek na celkových srážkových úhrnech. Parametr určující podíl určitého skupenství srážek označujeme jako Q . V praxi se zjišťuje podíl tuhých a smíšených srážek Q_{s+m} nebo jen tuhých srážek Q_s . Podíl kapalných se lehce odvodí odečtem (2.22).

Pro účely korektur není možné brát do úvahy vyjádření podílu tuhých srážek jako součtu úhrnů za dny, kdy bylo pozorováno sněžení. Počet dní se sněžením je nevhodný indikátor. Především se to týká dnů, kdy se teplota pohybuje okolo bodu mrazu a skupenství srážek se mění.

$$P - Q_{s+m} = Q_q \quad (2.22)$$

Kde P je celkový naměřený úhrn srážek a Q_{s+m} podíl tuhých a smíšených srážek a Q_q podíl kapalných srážek.

Parametr Q je citlivým indikátorem, který dokáže výsledný odhad chyb způsobených vlivem větru silně ovlivnit, protože pro tuhé srážky jsou korekční koeficienty daleko vyšší než pro tekuté srážky (viz Graf 10). Z tohoto důvodu je potřebné co nejpřesněji znát podíl tuhých srážek na celkových srážkových úhrnech.

Vybral jsem zástupce tří přístupů, které se pro určení podílu tuhých srážek v literatuře vyskytují.

1. Výpočet parametru Q_s pomocí závislosti na teplotě a nadmořské výšce

Sevruk (2004) popisuje na stranách 110-113, jakým způsobem vyjádřil parametr Q_s pro oblast Švýcarska. Podíl tuhých srážek vypočítal třemi způsoby: jako závislost na průměrné měsíční teplotě, nadmořské výšce a na kombinaci nadmořské výšky a průměrné měsíční teploty. Pro obecné určení Q_s platného pro oblast Švýcarska pomocí průměrné měsíční teploty nebo nadmořské výšky zpracoval data se skupenstvím srážek z 54 stanic ve Švýcarsku pro období 1952-1970. Z Tab. 4 je patrné, že nejlepších korelací je v zimních měsících dosahováno při závislosti na nadmořské výšce. Korelační koeficienty r^2 se pohybují v případě závislosti na nadmořské výšce od 0,85 do 0,99, nejvíce v létě, nejméně v zimě. Nízké korelace v případě závislosti na teplotě v zimních měsících přičítá Sevruk (2004) vlivu inverzních situací a fěnu. Problémem je, že nejnižší korelace jsou právě v zimních měsících, kdy vypadávají tuhé srážky.

Sevruk (2004, s. 112) vyjádřil také závislost Q_s na kombinaci nadmořské výšky a průměrné měsíční teploty pomocí 32 stanic ve Švýcarsku za období 1952-1970. Tento vztah je nejrepresentativnější a bude v této práci využit (Tab. 5). Jak autor uvádí, hodnoty by měly být platné i pro oblast střední Evropy.

Výsledky pak Sevruk použil při sestrojování mapy korigovaných srážkových úhrnů pro území Švýcarska (Kirchhofer a Sevruk, 1992).

Tab. 4 Rovnice pro výpočet parametru Q_s (podíl tuhých srážek na celkových srážkových úhrnech – v %) vyjádřeného pomocí průměrné měsíční teploty t nebo nadmořské výšky H . Upraveno podle (Sevruk, 2004, s.113)

měsíc	$Q = f(t)$ [%]	r^2	$Q = f(H)$ [%]	r^2
leden	$Q_t = 36 - 8,7t - 0,2119t^2$	0,68	$Q_H = 2 + 0,078H - 0,000016H^2$	0,86
únor	$Q_t = 51 - 8,5t - 0,3233t^2$	0,82	$Q_H = 2 + 0,073H - 0,000013H^2$	0,91
březen	$Q_t = 65 - 7,3t - 0,3216t^2$	0,87	$Q_H = -18 + 0,088H - 0,000017H^2$	0,91
duben	$Q_t = 71 - 6,6t$	0,93	$Q_H = -10 + 0,042H$	0,94
květen	$Q_t = 63 - 5,3t$	0,93	$Q_H = -27 + 0,036H$	0,90
červen	$Q_t = 66 - 10,4t + 0,4920t^2$	0,97	$Q_H = -38 + 0,029H$	0,94
červenec	$Q_t = 61 - 8,3t + 0,2972t^2$	0,99	$Q_H = -35 + 0,024H$	0,95
srpen	$Q_t = 85 - 13,6t + 0,5743t^2$	0,92	$Q_H = -48 + 0,031H$	0,93
září	$Q_t = 111 - 21,6t + 1,2130t^2$	0,89	$Q_H = -44 + 0,035H$	0,89
říjen	$Q_t = 75 - 9,8t + 0,2801t^2$	0,80	$Q_H = -18 + 0,034H$	0,87
listopad	$Q_t = 50 - 7,2t$	0,85	$Q_H = -4 + 0,036H$	0,91
prosinec	$Q_t = 38 - 7,8t$	0,76	$Q_H = -3 + 0,080H - 0,000016H^2$	0,90

Tab. 5: Velikost parametru Q_s (podíl tuhých srážek na celkových srážkových úhrnech – v %) vyjádřeného pomocí průměrné měsíční teploty a nadmořské výšky. Upraveno podle (Sevruk, 2004, s.112). Uvedeny jsou údaje pro nadmořské výšky, které odpovídají nadmořským výškám stanic, na kterých budou prováděny korekce.

průměrná měsíční teplota (°C)	nadmořská výška stanice (m n. m.)	
	200-500	700-1000
-7	50	80
-6	45	75
-5	45	70
-4	40	70
-3	40	65
-2	35	60
-1	35	55
0	30	50
1	30	45
2	25	40
3	25	40
4	20	35
5	20	30
6	15	25
7	15	20
8	10	15

Parametr Q se snažil odvodit i Tihlárík (1995, s. 68), který pracoval se starými daty z první poloviny 20. století, kdy sice byly k dispozici údaje o skupenství srážek, ale ne v digitální podobě. Počítání by zabralo spoustu času a tak přistoupil k vyjádření Q jinak. Vycházel z prací Petroviče a Coufala (1976), kteří se zabývali podíly tuhých a kapalných srážek na několika stanicích v ČSSR. Z jejich závěrů odvodil vztah pomocí závislosti na nadmořské výšce. Pro oblast Vysokých Tater určil následující vztahy:

$$\begin{aligned} 1. \text{ pod } 1000 \text{ m n. m.: } Q_{s+m} &= 0,000338T^3 - 0,004211T^2 - 0,06546T + 0,8069 \\ 2. \text{ nad } 1000 \text{ m n. m.: } Q_{s+m} &= 0,00101T^2 - 0,005926T + 0,56 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Q_{s+m} – podíl počtu dní s výskytem tuhých a smíšených srážek k celkovému počtu dní se srážkami za měsíc

T – průměrná měsíční teplota

Parametr Q je zde oproti Servukovi vyjádřen jako podíl počtu dní se srážkami, ne jako podíl na celkových úhrnech srážek. Podíl na celkovém úhrnu srážek je reprezentativnější v případě, že byla pro výpočet vzata denní termínová pozorování skupenství srážek.

Výše zmíněné metody jsou vhodné pro korekce delších časových období (alespoň 1 měsíc).

2. Výpočet parametru Q přímo z pozorování

Lapin, Faško a Košťálová (1990) vypočetli Q přímou metodou, protože měli k dispozici údaj o skupenství z databáze. Jakým přesným způsobem určili ze tří denních pozorování skupenství srážek je však nejasné. Problém je v malém počtu pozorování (tři termíny) a větší náročnosti výpočtů, než v případě 1. Problém mohou představovat dny, se změnami skupenství srážek během dne. Z tohoto důvodu se ve většině světové literatury objevuje obecné vyjádření Q pomocí závislosti na nějaké měřené veličině, jako v předešlém případě .

3. Výpočet parametru Q z údajů o denní průměrné teplotě

Třetí přístup, který jsem vybral, použili Ye, Yang a kol. (2004) při korigování srážek za celou Čínu. Skupenství srážek pro daný den určovali pomocí denní průměrné teploty. Tuhé srážky počítali od teploty -2°C , smíšené v intervalu $(-2, 2^{\circ}\text{C})$ a tekuté nad 2°C . Jejich metoda je dosti zjednodušující, ale při použití na velkých datových souborech a při vyjádření výsledných srážek do map malých měřítek, se jedná o vhodné a jednoduché vyjádření .

Na závěr: Forma a struktura srážek (parametr Q a N) představují při korekcích systematických chyb způsobených strháváním částic zrychleným prouděním nad záchytnou plochou srážkoměru dva zásadní vstupní činitele ovlivňující výsledné hodnoty korektur. Dalším zásadním činitelem je přepočet rychlosti větru.

2.8.8 Přepočet rychlosti větru na výšku záchytné plochy a rychlost větru v době padání srážek

Kritickým bodem výpočtu korekcí je přepočet rychlosti větru z hladiny anemometru na hladinu záchytné plochy. Obvyklá výška anemometru bývá ve světě okolo 10 m nad terénem, tak tomu je i v České republice. Ve všeobecnosti je větrné pole při zemském povrchu silně ovlivňováno lokálními podmínkami a navíc rychlost větru je silně proměnlivým prvkem. Někteří autoři korekcí započítávají do rovnic přímo rychlost větru z anemometru, ale většina metod je vypracována tak, že vstupní je rychlost větru v úrovni otvoru srážkoměru. Je to z toho důvodu, že anemometry bývají v různých výškách a také z toho důvodu, že na místech srovnávacího měření se měří rychlost v úrovni otvoru srážkoměru.

Při aplikování korektur na stanice, kde se měří vítr, je při přepočtu nutné brát v potaz i okolí srážkoměru (překážky, drsnost terénu), které mohou přepočet rychlosti větru ovlivňovat. Důležitým aspektem je tedy výška překážek v okolí.

Je prokázáno, že vertikální profil větru má za rovnovážného teplotního zvrstvení logaritmický průběh. Existuje základní logaritmická rovnice popisující tento vztah, rozdílné je pouze určování parametrů. Nejpoužívanější je rovnice 2.24 doporučená WMO (WMO 2008, s. 153):

$$u_{hp} = u_{Hp} \left(\log \frac{h}{z_0} \right) \left(\log \frac{H}{z_0} \right)^{-1} (1 - 0,024\bar{\alpha}) \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{8} \sum_{n=1}^8 \alpha_n \quad (2.24)$$

u_{hp} – rychlost větru v úrovni otvoru srážkoměru [$m \cdot s^{-1}$]

u_{Hp} – rychlost větru v úrovni anemometru [$m \cdot s^{-1}$]

h – výška otvoru srážkoměru [m]

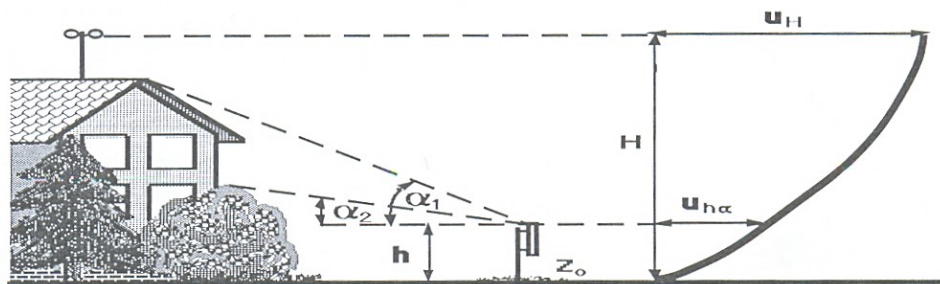
H – výška anemometru [m]

z_0 – koeficient drsnosti terénu, pro zimní období platí v závislosti na výskytu sněhové pokrývky od 0,01-0,03 m a, v létě je pak dosazována hodnota 0,03 m (čím vyšší hodnota, tím větší drsnost)

$\bar{\alpha}$ – je úhel měřený podle obr. 13 [°].

Okolí srážkoměru se rozdělí do osmi oktantů a poté se počítají úhly od otvoru srážkoměru k nejvyšší překážce v okolí (strom, budova, apod.) Následně se vypočítá průměrný úhel z osmi měření (viz rovnice 2.24 a Obr. 13). S větším množstvím vyšších překážek v okolí se poměr rychlostí u_{hp} a u_{Hp} zvětšuje (snižuje se rychlost v úrovni otvoru srážkoměru).

Obr. 13 Výpočet úhlů α . Převzato z (Sevruk, 2004, s. 101)



(Lapin, Faško, Košťálová, 1990) použili při opravách pro Slovensko rovnici (2.25) jež je pouhou obměnou předešlé rovnice. Logaritmický vztah je shodný. Rozdílné je pouze určení parametrů. Parametr popisující vliv okolí srážkoměru se nepočítá pomocí úhlů, ale pomocí výšek okolních překážek. Parametr z_0 nabývá jiných hodnot než v případě rovnice (2.24).

$$u_2 = u_z \frac{\ln 2 - \ln z_0}{\ln z - \ln z_0} \quad (2.25)$$

u_z – průměrná denní rychlost větru [$m \cdot s^{-1}$]

u_2 – rychlost větru ve 2 m nad zemí [$m \cdot s^{-1}$]

z – výška anemometru [m]

z_0 - parametr drsnosti vyjádřený jako jedna desetina efektivní výšky překážek v okolí srážkoměru a anemometru [m], nabývá hodnot od 0,01 m do 0,5 m v závislosti na výšce překážek v okolí a výšce sněhové pokrývky. (Lapin, Faško, Košťálová, 1990, s. 102-103) vyčlenili šest intervalů: **0,01 m** – bez překážek v okolí a holá půda nebo vyšší sněhová pokrývka, **0,02 m** – bez překážek v okolí a nízký trávník nebo malá sněhová pokrývka, **0,05 m** – bez překážek v okolí a vysoký trávník, **0,1 m** – efektivní výška překážek v okolí 1 m, **0,2 m** – efektivní výška překážek v okolí 2 m, **0,5 m** – efektivní výška překážek v okolí 5 m. Hodnotu z_0 0,01 m nepřidali žádné stanici, pokud byla sněhová pokrývka vyšší než 5 cm, tak z_0 bylo sníženo o jeden stupeň (například z 0,5 na 0,2 m).

Rovnici 2.24 a 2.25 můžeme obecně vyjádřit takto:

$$u_{hp} = u_{Hp} \left(\frac{\log h - \log z_0}{\log H - \log z_0} \right) \quad (2.26)$$

u_{hp} – rychlost větru v úrovni otvoru srážkoměru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

u_{Hp} – rychlost větru v úrovni anemometru (nejčastěji 10 m) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

h – výška otvoru srážkoměru [m]

H – výška anemometru [m]

z_0 – koeficient drsnosti terénu, nabývá hodnot do 1 m.

Pro přepočítání rychlosti větru existuje i jednodušší vztah odlišný od předešlých:

$$u_{hp} = u_{Hp} \left(\frac{h}{H} \right)^p \quad (2.27)$$

kde parametr p nabývá hodnot 0-1 m, pro výšku 0-2 m nad zemí pak hodnoty 0,25 m (Šefer, Sládek, 1991).

(Lapin, Faško, Košťálová, 1990) si byli vědomi problematiky rychlosti větru při úrovni zemského povrchu, a tak měřili při porovnávacích měřeních vítr ne v 1 m při výšce otvoru srážkoměru, jak je to obvyklé, ale volili vyšší hladinu 2 m, kde je ovlivnění terénu o trochu nižší než v 1 m. Porovnávací měření větru na stanici Bratislava - Koliba potvrdila shodu s výpočty podle použité metodiky (rovnice 2.25). Metodika dává dobré výsledky jen pro u_2 do $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, při vyšších rychlostech se výsledky stávají sporné (Lapin, Faško, Košťálová, 1990, s. 103).

Další neméně důležitou otázkou je i výpočet větru v době padání srážek. Tato rychlost se může výrazně lišit od průměrné denní rychlosti větru. Problém rychlosti větru v době padání srážek je vyřešen, pokud máme k dispozici termínová data s malým krokem, např. po jedné hodině. Pokud ovšem nejsou tato data k dispozici, tak to představuje nesnáze. Tři denní termínová měření nedokážou přesně zodpovědět otázku rychlosti větru v době padání srážek.

Sevruk (2004, s. 102-103) řešil tuto otázku empiricky. Srovnával denní termínové rychlosti větru s rychlostí větru v době padání srážek. Vyjádřil následně faktor L , který vyjadřuje vztah rychlosti větru ze tří termínových měření (7h, 14h a 21h) k rychlosti větru v době padání srážek:

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{L} \cdot \mathbf{u}_3 \quad (2.28)$$

\mathbf{u}_p – průměrná denní rychlost větu v době padání srážek [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

\mathbf{u}_3 – průměr rychlosti větru ze 3 denních termínových měření [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

L - empiricky získaný přepočtový faktor

Velikost L je při měsíčním vyjádření závislá i na skupenství srážek a počtu dní s srážkami (Sevruk, 2004, s. 102). Do úvahy by měly být tedy brány i regionální a sezonní vlivy.

2.8.9 Poznámka k výpočtům

Abychom mohli správně určit konverzní faktor pro kapalné a tuhé a smíšené srážky, je důležité započítat do korekční rovnice i chyby způsobené výparem a omočením. Srovnávací a srovnávaný srážkoměr totiž nebývají stejného typu, navíc se předpokládá, že výpar z jamového srážkoměru je jiný, než z nadzemního srážkoměru. Často však nevíme, jak veliký byl výpar z jamového srážkoměru, a tak se do rovnice bere v úvahu pouze omočení. Pro většinu srážkoměrů je totiž výpar velice malý, Sevruk (2004, s. 95) uvádí do 2 %. Takto upravenou rovnici můžeme aplikovat při sestrojování regresního vztahu, vzniklého z korelování s rychlostí větru, popř. i parametrem N a teplotou.

Rovnici k určení korekčního koeficientu pro kapalné srážky lze pak psát obecně takto:

$$k_{lq} = \frac{P_{plq} + \Delta P_{p1+p2} + \Delta P_{p3}}{P_{elq} + \Delta P_{e1+e2} + \Delta P_{e3}} \quad (2.29)$$

k_{lq} – konverzní faktor pro kapalné srážky

P_{plq} – úhrn kapalných srážek z jamového srážkoměru [mm]

P_{elq} – úhrn kapalných srážek ze srážkoměru umístěného nad zemským povrchem [mm]

ΔP_{p1+p2} – ztráty omočením stěn srážkoměru a nádoby jamového srážkoměru [mm]

ΔP_{e1+e2} - ztráty omočením stěn srážkoměru a nádoby nadzemního srážkoměru [mm]

ΔP_{p3} – ztráty výparem jamového srážkoměru [mm]

ΔP_{e3} - ztráty výparem nadzemního srážkoměru [mm]

Pro tuhé a smíšené srážky je tato rovnice obdobná, akorát místo jamového srážkoměru je užito srážkoměru s protivětrnou ochranou.

2.8.10 Shrnutí a omezení plynoucích z výpočtů

Jak vidno z postupu výpočtu chyb způsobených vlivem větru, není možné výsledky korektur pokládat za přesné. Nejpřesněji jsou vypočítány korekce pouze pro experimentální stanice, kde probíhala srovnávací měření. Pro ostatní stanice vznikají nejistoty při počítání všech parametrů N , Q , L a při přepočtu rychlosti větru na úroveň srážkoměru. Vhodné je proto alespoň na nějaký čas instalovat anemometr do příslušné výškové hladiny (úroveň srážkoměru nebo 2 m) a porovnávat simultánně rychlosti v této hladině se standardním anemometrem, který je ve vyšší výšce, jak to udělali např. (Brázdil, Štěpánková, 1998).

Otázkou je také věrohodnost dat o teplotě a rychlosti větru. Měření teploty lze považovat za bezproblémové, ne však měření rychlosti větru. Měření větru lze na experimentálních stanicích, kde probíhala srovnávací měření, považovat za profesionální s minimálním výskytem chyb. Aplikace na ostatní stanice může přinést v některých případech problémy. Dříve se vítr měřil na klimatologických stanicích 3 krát denně po dobu cca 10 minut nebo i automaticky, dnes je zaznamenáván výhradně automaticky pomocí čidel. Měření rychlosti větru anemometry jsou zatížena především v zimě chybami způsobenými námrazou. Postupem času dochází také k tuhnutí oleje uvnitř přístroje a k pomalejšímu otáčení, pozvolna se tak zaznamenávané rychlosti snižují.

Z povah výpočtů těchto korekcí plyne závěr, že nejsou použitelné pro opravy jednotlivých denních úhrnů, reprezentativnější výsledky máme až při opravách měsíčních nebo delších.

Systematické chyby při měření srážek jsou závislé na variabilitě ostatních meteorologických prvků, často na prvcích, které nejsou běžně měřeny (spektrum velikosti srážkových částic).

3 KOREKČNÍ METODY PRO SRÁŽKOMĚR METRA

Následuje kapitola pojednávající o dosavadních korekturách pro manuální srážkoměr Metra používaný v Česku a na Slovensku. Představeny budou všechny dosavadní práce. Nejdříve je vždy uveden postup výpočtů, po té následuje pojednání o výsledcích korektur.

3.1. Metoda SHMÚ

Nejkomplexnější metoda korektur byla pro náš manuální srážkoměr vypracovaná v 80. letech na základě porovnávacích měření a experimentů zmíněných výše v textu.

Provedeny byly pokusy za účelem určení průměrného omočení na jedno měření a k určení výparu se simulovanými úhrny srážek. Na stanici Bratislava Koliba se po několik let provádělo srovnávací měření s jamovými srážkoměry a posléze i s protivětrnou ochranou (cca do roku 1993). Pro metodu SHMÚ je typické, že se nezapočítává parametr N a vliv teploty při tuhých srážkách. Chyby způsobené větrným prouděním se vyjadřují přímo závislostí pouze na rychlosti větru. Výhodou metody je poměrně dlouhé období srovnávacích měření. Výsledky srovnávacích měření jsou v Tab. 6 a Tab. 7.

Tab. 6 zobrazuje měsíční a roční průměry srážkových úhrnů za sledovaná období. Je rozdělena do 4 oddílů. Od shora: první oddíl představuje srovnání úhrnů dešťových srážek nadzemních a jamových srážkoměrů. Je patrné, že jamový srážkoměr Hellmann byl v záhytu nejúspěšnější. Z dostupných materiálů není jasné, s kterým srážkoměrem byly posléze korelovány úhrny (Hellmann – 0 nebo Metra – 0), ale z výsledné regresní rovnice a její struktury se dá předpokládat, že regresní vztah pro kapalně srážky (Graf 9) byl vytvořen srovnáním denních úhrnů z jamového srážkoměru Metra – 0 s úhrny ze srážkoměru Metra v 1 m.

Následující tři oddíly v Tab. 6 se týkají srovnávacích měření s protivětrnými ochranami, jež byly instalovány na srážkoměrech po celý rok. Výsledky měření jsou v tabulce odděleně pro kapalně, smíšené a tuhé srážky. V případě kapalných a tuhých srážek naměřil celkově nejvyšší úhrny srážkoměr Hellmann s Treťjakovovou ochranou a v případě smíšených srážek měl celkově vyrovnané úhrny se srážkoměrem O-1, smíšené srážky se však vyskytly v nejmenším počtu případů. Do regresní analýzy pro tuhé a smíšené srážky byly pravděpodobně vzaty úhrny ze srážkoměru Metra + T (Graf 10).

Tabulky 7a a 7b zobrazují už pouze případy s výskytem tuhých srážek. Po roce 1984 přestal být na stanici instalován srážkoměr Hellmann s Treťjakovovou ochranou, srovnávány byly však úhrny s Metra + T. V tabulce 7a je patrné, že nad rychlostmi $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a více je k dispozici omezený počet případů, a tak výsledky nad tuto rychlost větru brali autoři jako orientační. „Treťjakovova ochrana je výborná pro rychlosti větru do $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a dobrá pro rychlosti do $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ “ (Lapin, 1993). Z tabulky je dobře vidět, že s rostoucí rychlostí větru zachytával srážkoměr Metra +T více srážek.

Tabulka 7b znázorňuje závislost teploty na záhytu srážek srážkoměrem s ochranou a bez. Autoři zvolili malý počet teplotních intervalů. Přesto je patrný slabý nárůst mezi prvním a druhým intervalem k poměru srážkových úhrnů ve sloupci Metra +T. První dva intervaly nejsou snad ovlivněny rychlostí větru, protože ta byla v průměru v obou případech stejná (poslední sloupec).

Tab. 6 Výsledky srovnávacích měření nadzemních a jamových srážkoměrů v letním období a srážkoměrů s protivětrnou ochranou v zimním období na stanici Bratislava Koliba. Vysvětlivky: 0 - znamená záchytnou plochu v úrovni zemského terénu, + T znamená instalování Tret'jakovovy ochrany na příslušný srážkoměr, 0-1 je sovětský nadzemní srážkoměr. První je vždy uveden úhrn srážkoměru Metra v milimetrech (otvor srážkoměru standardně v 1 m), pod ním jsou úhrny srovnávacích srážkoměrů vyjádřeny v procentech úhrnu Metra. Prezentované úhrny nebyly opraveny o chyby na omočení a výpar. Upraveno podle (Lapin, Priadka, 1989, s. 103)

1975-1984													
srážkoměr	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	rok
METRA (mm)				45,7	56,8	59,8	51,5	58,6	52,1	39,2			362,8
METRA - 0 (%)				105,8	101,6	101,5	101,9	101,1	101,1	103,5			102,2
HELLMANN - 0 (%)				107,5	104,1	104,0	103,8	103,6	103,3	105,5			104,4
1978-1979, 1981-1984													
tekuté													
METRA (mm)	11,9	10,3	21,9	35,9	65,2	56,4	47,2	56,4	58,7	31,8	34,6	17,3	447,6
METRA + T (%)	104,5	106,0	104,2	103,0	102,0	103,1	103,3	103,7	102,3	103,8	102,5	103,4	103,1
HELLMANN + T (%)	117,1	110,0	108,4	103,1	102,7	103,8	104,3	104,0	103,0	103,3	105,3	109,4	104,6
0-1 + T (%)	115,2	105,5	105,3	100,1	101,3	102,4	101,6	102,4	102,4	101,0	104,3	106,0	102,7
smíšené													
METRA (mm)	13,3	9,8	17,4	4,7							19,1	10,4	74,7
METRA + T (%)	108,9	122,7	105,9	107,9							106,8	113,8	108,8
HELLMANN + T (%)	104,5	113,5	111,2	106,8							110,7	114,8	110,4
0-1 + T (%)	100,6	112,7	111,7	108,9							111,6	111,9	110,7
tuhé													
METRA (mm)	17,4	27,6	1,2								5,6	20,7	72,5
METRA + T (%)	135,0	118,1	144,9								124,2	119,1	123,3
HELLMANN + T (%)	133,7	119,7	155,1								126,5	122,0	124,8
0-1 + T (%)	126,3	112,3	127,5								110,0	118,2	117,4

Tab. 7a: Srovnání denních úhrnů tuhých srážek vyšších než 0,1 mm na stanici Bratislava – Koliba pro období od roku 1978 do března 1993 (bez roku 1980). Úhrny jsou rozděleny do intervalů podle rychlosti větru v době srážek. Vysvětlivky: n – počet dní s tuhými srážkami, +T - instalovaná Tret'jakovova ochrana, poslední sloupec znázorňuje průměrný denní úhrn nechráněného srážkoměru Metra. Prezentované úhrny nebyly v Tab. 6 opraveny o chyby na omočení a výpar Upraveno podle (Lapin, 1993, s. 110).

průměrná rychlost větru ve 2 m [$m \cdot s^{-1}$]	n	METRA [mm]	METRA+T (%)	HELLMANN (%)	M/n [mm]
0,0 - 1,0	86	238	110	102,9	2,8
1,1 - 2,0	114	350	114,4	99,4	3,1
2,1 - 3,0	86	261	135,5	99,8	3
3,1 - 4,0	26	93	139,5	91,7	3,6
4,1 - 5,0	10	49	149,7	89,4	4,9
5,1 - 6,0	4	28	119,1	93,6	7
celkem	326	1019	122,9	99	3,1

Tab. 7b: Srovnání denních úhrnů tuhých srážek vyšších než 0,2 mm na stanici Bratislava – Koliba pro období od listopadu 1977 do března 1986 a od listopadu 1987 do března 1993. Úhrny jsou rozděleny do intervalů podle průměrné denní teploty ve dnech s tuhými srážkami. Vysvětlivky: n – počet dní s tuhými srážkami, +T - instalovaná Treťjakovova ochrana, předposlední sloupec znázorňuje průměrný denní úhrn nechráněného srážkoměru Metra a poslední sloupec průměrnou rychlost větru v době padání srážek (opět pro daný teplotní interval). Prezentované úhrny nebyly v Tab. 6 opraveny o chyby na omočení a výpar. Převzato z (Lapin, 1993, s. 110)

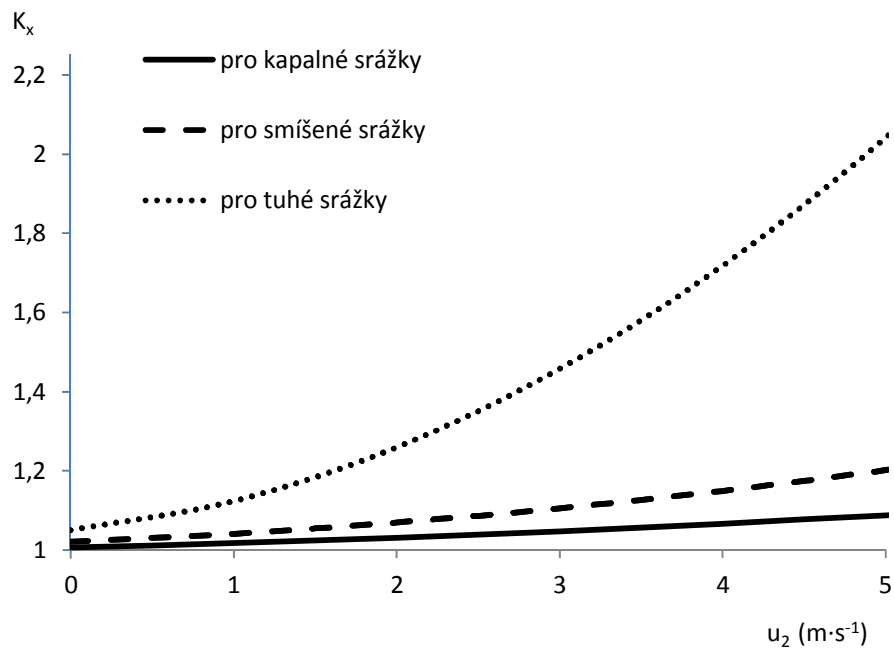
teplota vzduchu [°C]	n	METRA [mm]	METRA+T (%)	M/n [mm]	u [m·s ⁻¹]
> -1,0	102	437	121	4,3	2,2
-4,9 až -1,0	123	426	130	3,5	2,2
< - 4,9	47	113	131	2,4	1,8
celkem	272	976	126	3,6	2,1

V případě chyb způsobených vlivem větru byly vytvořeny tři regresní rovnice. Na Grafu 10 je názorně patrný rozdíl působení větru na strhávání tuhých, smíšených a kapalných srážek. Velikost korekčního koeficientu je při průměrné rychlosti větru 1 m·s⁻¹ pro kapalně srážky 1,02, pro smíšené 1,04 a pro tuhé 1,12; při rychlosti větru 3 m·s⁻¹ je to 1,05, resp. 1,10 a 1,45 (Lapin, Faško, Košťálová, 1990, s. 101).

Regresní rovnice pro tuhé srážky je vhodná pouze pro rychlosti ve 2 m do 3 m·s⁻¹, s rezervou do 5 m·s⁻¹, z důvodu malého množství případů s vyššími rychlostmi větru. Výsledné regresní rovnice jsou podle autorů vhodné pro oblasti do 500 m n. m. vyjma hřebenových poloh (Lapin, Priadka, 1987, s. 13). Metodiku SHMÚ není možné použít pro silně větrné polohy, kde je průměrná rychlost větru ve výšce 2 m v době padání srážek často vyšší než 5 m·s⁻¹ (Lapin, Faško, Košťálová, 1990, s. 101). Přesto vypracovanou metodiku oprav aplikovali dvakrát na území celého Slovenska. Poprvé na souboru všech stanic (cca 700) pro období 1981-1988 (Lapin, Faško, Košťálová, 1990), po druhé na menším souboru 25 stanic pro období 1965-1989 (Lapin a kol., 1991). Ve druhém případě byly provedeny i plošné interpolace a vytvořeny mapky s korigovanými srážkami na Slovensku pro letní a zimní půlrok. Postup korigování byl v obou případech shodný.

V předešlých kapitolách bylo vysvětleno, jakým způsobem získali potřebné korekční rovnice a vztahy pro korigování, nyní následuje oddíl věnovaný přímo postupu korigování systematických chyb popsany v (Lapin, Faško, Košťálová, 1990) a aplikovaný na období 1981-1988.

Graf 10 Závislost korekčního koeficientu K_x na rychlosti větru v době vypadávání srážek u_2 měřeného ve výšce 2 m pro tuhé T, smíšené S a kapalné srážky K, y je hodnota korekčního koeficientu K_x .



$$\begin{aligned}
 \text{pro kapalné srážky: } y &= 0,0013u_2^2 + 0,0097u_2 + 1,0073 \\
 \text{pro smíšené srážky: } y &= 0,004u_2^2 + 0,0161u_2 + 1,0219 \\
 \text{pro tuhé srážky: } y &= 0,0312u_2^2 + 0,0422u_2 + 1,0506
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

3.1.1 Aplikace metody SHMÚ na území Slovenska

Na Slovensku měli k dispozici přibližně 100 stanic měřících teplotu vzduchu, rychlost větru v termínech 7, 14, 21 h a výšku sněhové pokrývky, jež je potřebná pro výpočet koeficientu z_0 v rovnici na přepočet rychlosti větru (2.25). Pro zbylých 600 stanic měřících pouze srážkové úhny dopočítali rychlosti větru, teplotu vzduchu interpolací ze stanic, které tyto prvky měří.

Důležité bylo také určit datum výměny zimní/letní verze srážkoměru Metra. K tomuto uvádějí: „tyto termíny jsou určeny metodickým předpisem poměrně volně s ohledem na konkrétní počasí a nevedou se o tom záznamy. Proto jsme určili za nejpravděpodobnější termíny změn jednotně následující datumy s rozdělením stanic podle nadmořské výšky: do 300 m – 1. duben a 31. říjen, 301-500 m – 16. duben a 15. říjen, 501 až 1000 m – 1. květen a 30. září, 1001 až 2000 – 16. květen a 15. září, nad 2000 m se

celoročně používá zimní verze srážkoměru. Od roku 1990 budou tato data pro změnu verze srážkoměru závazné“ (Lapin, Faško, Košťálová, 1990, s. 102). Opravy se pro 100 stanic měřících teplotu a rychlost větru prováděly po denním kroku, pro zbylé stanice po měsíčním kroku.

Následující text byl upraven podle (Lapin, Faško, Košťálová, 1990).

V prvním kroku výpočtů byly určeny měsíční sumy oprav chyb způsobených omočením jako součty oprav za jednotlivé dny, ve kterých se vyskytnul úhrn padajících anebo usazených srážek ≥ 0 mm pro všechny srážkoměrné stanice na Slovensku, které měly kompletní měření v daném měsíci, tj pro všech 700 stanic.

$$\mathbf{K}_w = \mathbf{R}_1 / \mathbf{R}_0 \quad (3.2)$$

Kde \mathbf{K}_w je korekční koeficient udávající velikost omočení, \mathbf{R}_1 suma srážek po opravě omočením a \mathbf{R}_0 suma naměřených srážek.

Ve druhém kroku se dělal výpočet korekcí chyb v důsledku výparu ze srážkoměru jako suma oprav denních úhrnů padajících srážek po korekci na omočení. Výpočty se dělaly jen pro asi 100 stanic, ze kterých jsou k dispozici údaje teploty vzduchu.

$$\mathbf{K}_E = \mathbf{R}_2 / \mathbf{R}_1 \quad (3.3)$$

Kde \mathbf{K}_E je korekční koeficient udávající velikost ztrát výparem, \mathbf{R}_2 suma srážek po opravě ztrát omočením a výparem a \mathbf{R}_1 suma srážek po opravě omočením.

Velikost korekcí chyb způsobených výparem určili z lineárních regresních rovnic, kde jsou nezávisle proměnné teplota vzduchu a doba od začátku padání srážek po měření (Graf 4).

V databázi jsou pouze údaje o výskytu srážek ze 4 období dne, které nedostačují na spolehlivé určení začátku padání srážek. Proto použili na základě výpočtů z omezeného počtu měsíců a stanic jednotně pro chladný půlrok čas 15.00 h SMČ a pro teplý půlrok 17.00 h SMČ. V jednotlivých dnech jsou pochopitelně značné odchylky od těchto termínů, ale v měsíčních průměrech je začátek padání srážek s velkou většinou v rozmezí ± 2 hodiny, což pro daný účel představuje dostatečnou přesnost.

Průměrnou teplotu vzduchu t pro jednotlivé dny vypočetly podle rovnice 2.7.

Nakonec provedli výpočet korekcí chyb způsobených aerodynamickým efektem vlivu srážkoměru na padající srážky pro 100 stanic, kde jsou k dispozici měření rychlosti větru.

$$\mathbf{K}_x = \mathbf{R}_k / \mathbf{R}_2 \quad (3.4)$$

Kde K_x je korekční koeficient udávající velikost ztrát vlivem větru, R_k suma srážek po opravě na ztráty omočením a výparem a vliv větru a R_2 suma srážek po opravě ztrát omočením a výparem. Opravy provedli podle regresních rovnic druhého stupně na Grafu. 10 zvláště pro kapalné, smíšené, tuhé srážky (měli k dispozici údaj o skupenství z databáze).

Rychlost větru v době padání srážek zjednodušili jako průměrnou denní rychlost větru v době daného dne s výskytem srážky. Pro přepočet rychlosti větru na úroveň 2 m nad terénem použili formuli (2.25), v níž zohlednili výšku sněhové pokrývky při určování parametru drsnosti z_0 . Více informací k přepočtu: (Lapin, Faško, Košťálová, 1990, s.102).

Vzhledem k málo měřením při vyšších rychlostech použili omezení K_x do maximální hodnoty 2,0 (což znamená průměrnou rychlost ve 2 m $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro opravu tuhých srážek).

Z popisu metodiky ze zřejmá následující rovnice:

$$R_k = \frac{\Delta P_{1+2} + R_0}{R_0} \cdot \frac{\Delta P_{1+2} + \Delta P_3 + R_0}{\Delta P_{1+2} + R_0} \cdot \frac{\Delta P_{1+2} + \Delta P_3 + \Delta P_x + R_0}{\Delta P_{1+2} + \Delta P_3 + R_0} = \frac{\Delta P_{1+2} + \Delta P_3 + \Delta P_x + R_0}{R_0} =$$

$$= \frac{R_1}{R_0} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_k}{R_2} \cdot R_0 = K_x \cdot K_E \cdot K_W \cdot R_0 = \frac{R_k}{R_0} \cdot R_0 = K \cdot R_0$$

(3.5)

kde R_k je výsledná suma srážek po opravě systematických chyb a K je celkový korekční koeficient, R_0 je naměřený nekorigovaný úhrn srážek, K_x , K_E , K_W jsou korekční koeficienty spočítané podle rovnic (3.2, 3.3, 3.4). ΔP_{1+2} je ztráta omočením, ΔP_3 je ztráta výparem a ΔP_x je ztráta vlivem větru.

Z rovnice 3.5 je patrné, že jednotlivé ztráty (omočením, výparem, vlivem větru) se pouze sčítají. Takovéto schéma je odlišné od běžně užívaného vzorce, kde se korekčním koeficientem (nazývaný konverzní faktor) násobí součet ztrát způsobených omočením se ztrátami výparem a s naměřeným úhrnem srážek, jako například v rovnici (3.9). Rozdíl mezi rovnicemi (3.9) a (3.5) je pravděpodobně způsoben nezapočítáním chyb na omočení a výpar při srovnávacích měřeních (rovnice 3.5), protože srovnávány byly na Kolibě nejspíše pouze úhrny ze srážkoměrů Metra (Metra jamový a Metra s Treťjakovovou ochranou). V rovnici 2.29, pak zůstanou pouze úhrny z jamového a nadzemního srážkoměru.

Běžně se totiž úhrny získané při srovnávacích měřeních opravují o omočení a výpar, což se posléze projevuje i v rovnici (3.9). Ve výsledku se ovšem jedná o estetické změny s malým dopadem.

K rovnici 3.5 bych měl ještě tento postřeh: výpočet jednotlivých ztrát na omočení, výpar a vliv větru je počítán v opačném směru, než v jakém k těmto ztrátám dochází. Nejdříve se ztratí srážky odvádím do závětrí za nádobu srážkoměru, posléze se vypařují z nádoby a nakonec ulpí část vody na nádobě a konvici. Zvolený opačný postup umožní určit příslušné ztráty na omočení, výpar a vliv větru (K_w , K_E , K_x). V rovnici 3.5 je to znázorněno. Výpar z nádoby se počítá z úhrnu po opravě omočením, ztráty vlivem větru se počítají z úhrnů korigovaných o omočení a výpar.

Po provedení korektur na stovce slovenských stanic, přistoupili autoři ke korigování zbylých 600 stanic. Regresní rovnicí druhého stupně vyjádřili závislost celkových měsíčních korekčních koeficientů na nadmořské výšce. Zjištěné hodnoty aplikovali na zbylé stanice.

Zhodnocení výsledků korektur:

1. ztráty omočením K_w

Průměrné roční koeficienty ztrát omočením se pohybovaly kolem 1,02 – 1,06. V jednotlivých měsících může být rozptyl větší, při malých srážkových úhrnech může za měsíc připadat na ztráty omočením až $K_w = 1,20$. Od května po září se K_w pohybuje nejčastěji v rozmezí 1,01-1,08, od října do dubna v rozmezí 1,01-1,15. S rostoucí nadmořskou výškou rostou i absolutní hodnoty na omočení díky vyšším úhrnům srážek. Tam, kde pozorovatelé zanedbávají malé úhrny srážek 0,0 a 0,1 mm, je K_w nižší než na profesionálních stanicích, kde jsou pozorování kvalitnější.

2. ztráty výparem K_E

Nejvyšších hodnot dosahuje výpar ze srážkoměru na konci a začátku používání zimní verze srážkoměru, kdy jsou poměrně vysoké teploty a kdy může výpar dosahovat více než $K_E = 1,20$. Od května do září se koeficient K_E pohybuje nejčastěji v rozmezí 1,02-1,06 a s nadmořskou výškou mírně klesá. Roční hodnoty dosahují v nížinách okolo 1,07, ve středních polohách okolo 1,05, nad 1000 m jen okolo 1,04.

3. ztráty vlivem větru K_x

V slabě a mírně větrných polohách dosahují roční koeficienty K_x hodnoty okolo 1,04 a s výškou mírně vzrůstají. V případě větrnějších stanic rostou koeficienty K_x s výškou významněji a dosahují v nížinách hodnot okolo 1,06 a ve vyšších polohách většinou víc než 1,20. V měsících bez tuhých srážek jsou K_x menší než 1,04 přičemž s výškou jen nepatrně vzrůstají. V měsících s výskytem tuhých srážek pozorujeme velký rozptyl K_x , přičemž hodnoty K_x nad 1,20 jsou v nadmořské výšce nad 500 m na větrných polohách velmi časté.

Ve slabě a mírně větrných polohách dosahuje roční K_x většinou 1,13, v silně větrných polohách dosahují koeficienty K_x od nadmořské výšky 700 m zpravidla více než 1,20. Od května do září celková měsíční hodnota nepřesahuje při normálních srážkových měsíčních úhrnech většinou hodnotu 1,09.

Autoři dále dodávají: obě dvě korekce K_w i K_E byly ověřené množstvím simulovaných měření srážek za různých podmínek a je možné je považovat za vcelku spolehlivé. V metodice určení K_E nejsou zohledněny vlivy větru a slunečního záření. Je tedy možné, že ve stínových polohách bude K_E o něco menší a v exponovaných slunečních a větrných polohách zase větší. Za vcelku spolehlivé považujeme K_x pro tekuté a smíšené srážky do průměrné rychlosti větru ve výšce 2 m 5 m.s^{-1} a pro tuhé srážky do 3 m.s^{-1} . Pro stanice s velkým podílem vyšších rychlostí větru při padání srážek je nutné považovat korekce K_x jen jako orientační.

Další práce, využívající výše zmíněnou metodiku, byla publikována ve Vodohospodářském časopise (Lapin a kol., 1991) kde se prováděly opravy systematických chyb na 25 slovenských stanicích za období 1965-1989. Výsledky této práce mají vyšší vypovídací hodnotu, protože bylo zpracovááno delší období než v předchozím případě. Následně byly vypracovány schematické mapky s korigovanými úhrny srážek, pro které bylo využito regresní závislosti (3.6). Tato závislost byla vypočítána z výsledků korekcí 25 stanic.

$$K = a_0 + a_1h + a_2h^2 \quad (3.6)$$

K – celkový korekční koeficient

a_0, a_1, a_2 – koeficienty rovnice

h – nadmořská výška [m n. m.]

Z výsledků vyplývá, že korekční koeficienty systematických chyb nerostou rovnoměrně se vzrůstající nadmořskou výškou, viz Tab. 8, ale je patrný jistý pokles od nejnižších nadmořských výšek následovaný významným nárůstem ve vyšších nadmořských výškách. Po korekcích se roční úhrny srážek zvyšují většinou o 12 až 15 %. V chladném půlroce představuje navýšení úhrnů srážek 15 až 30 %, v teplém půlroce jen 7 až 12 %. (Lapin a kol., 1991, s. 207).

V citované práci byla posléze řešena otázka hydrologického bilančního výparu na zvoleném území povodí Nitry nad Nitrianskou Stredou (2093 km^2 , průměrná nadmořská výška 421 m n. m.). Po korekcích došlo ke zvýšení hydrologického bilančního výparu v průměru o více než 100 mm za rok (Lapin a kol., 1991, s.217).

Tab. 8 Korekční koeficienty K pro nadmořské výšky 100 až 1200 vypočítané pomocí regresní rovnice (3.6) na území Slovenska. Upraveno podle (Lapin a kol., 1991, s.210)

nadm. výška	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
leden	1,27	1,28	1,29	1,3	1,32	1,33	1,35	1,36	1,38	1,4	1,42	1,44
únor	1,27	1,27	1,28	1,28	1,29	1,3	1,31	1,32	1,33	1,35	1,36	1,38
březen	1,3	1,29	1,29	1,29	1,29	1,3	1,3	1,31	1,32	1,33	1,34	1,36
duben	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,2	1,21	1,23	1,25	1,27
květen	1,1	1,09	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,1
červen	1,09	1,09	1,08	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,08
červenec	1,1	1,1	1,09	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
srpen	1,09	1,09	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
září	1,1	1,09	1,09	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,1
říjen	1,11	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,2	1,22	1,23
listopad	1,22	1,22	1,22	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,28	1,29	1,31
prosinec	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,29	1,3	1,32	1,34	1,36	1,38	1,4
rok	1,15	1,15	1,14	1,14	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19

3.2. Metoda Tihláríka (1995)

Tihlárík řešil v rámci své disertační práce korekce systematických chyb naměřených srážek v širším zázemí Vysokých Tater. Zpracovával období 1870-1960, s tím, že některé stanice neměly takto dlouhé doby pozorování. Korekce byly provedeny i na starších typech srážkoměrů, od roku 1918 měl srážkoměr už významnější podobnost s Metrou. Autor zvolil zpracovávat měsíční data z časových důvodů, protože údaje byly pouze v rukopisných záznamech. Pro odhad ztrát způsobených omočením a výparem volil metodiku SHMÚ. Protože měl pouze měsíční sumy srážek, musel odhadnout počet dní se srážkami v měsíci a podíl dní se srážkami v měsíci s úhrny v intervalech do 1 mm, 1 -4,9 mm a nad 4,9 mm v měsíci, jak to vyžadují rovnice sestavené v metodě SHMÚ.

Rozdílnou metodu volil Tihlárík v případě určení srážkových ztrát způsobených vlivem větru. Řešil mj. zahrnutí parametru N do výpočtu. Následující text se věnuje tedy pouze chybám způsobeným větrným prouděním.

3.2.1 Výpočet konverzního faktoru k_{lq} pro kapalné srážky

Jak již byl řečeno, Tihlárík (1995) nepoužil regresní vztah sestrojený SHMÚ, který je založen pouze na závislosti konverzního faktoru na rychlosti větru u : $k_{lq} = f(u)$. Opíral se však o to samé porovnávací měření na Bratislavě - Kolibě, závislost pak vyjádřil standardně: $k_{lq} = f(N \cdot u)$.

Výpočet regresní rovnice je založený na porovnání průměrných měsíčních záchyťů srážkoměru Metra s otvorem ve výšce 1 m a srážkoměru Hellmann s otvorem v úrovni

terénu na stanici Bratislava Koliba (Tab. 6) pro období 1975-1984. Prezentované úhrny nebyly v Tab. 6 opraveny o chyby na omočení a výpar a tak je musel autor dopočítat.

K dispozici neměl ani závěrečnou zprávu (Lapin, Lednický, Priadka, 1985), ve které by mělo být více informací z porovnávacích měření na Kolibě. Tuto zprávu se mi nepodařilo v českých a slovenských knihovnách ani u soukromých osob vypátrat. Pro výpočet konverzního faktoru bylo tedy potřebné některé faktory (vstupní hodnoty) odhadnout.

Pro výpočet konverzního faktoru pro kapalné srážky potřeboval autor znát:

1. ztrátu omočením a výparem pro srážkoměr Metra (odhadnuto pomocí metodiky SHMÚ)

2. ztrátu omočením pro srážkoměr Hellmann (výpar je z Hellmanna malý a tak nebyl započítán, navíc srážkoměr byl umístěn v půdě, kde jsou pro výpar horší podmínky). V literatuře se udávají různé hodnoty, ze kterých vytvořil autor průměrnou hodnotu omočení na jedno měření 0,23 mm.

3. hodnoty parametru struktury srážek N platné pro stanici Bratislava Koliba v době srovnávacích měření. Pro výpočet rovnice 3.7 bylo potřeba znát i průměrnou měsíční teplotu, počet dní se srážkami v měsíci a sumu měsíčních srážek na stanici Bratislava Koliba v době srovnávacích měření (rovnice 2.19). Tato data byla plně k dispozici (Tab. 9).

4. rychlost větru v 1m nad zemí v době srážek:

Rychlosti větru z dob porovnávacích měření ve 2 m nad zemí k dispozici nebyly. SHMÚ však poskytl vzorce pro přepočítání větru z hladiny 10 m na 2 m přímo pro stanici Bratislava - Koliba. Z této závislosti posléze odvodil autor rychlosti větru v 1 m. Potom odhadl rychlost větru ve dnech s výskytem srážek.

5. průměrné měsíční úhrny srážek (Tab. 9)

Výsledná rovnice:

$$k_{lq} = 0,03146 (N \cdot u_{hpg})^2 + 0,07398 N \cdot u_{hpg} + 1 \quad (3.7)$$

k_{lq} - konverzní faktor pro kapalné srážky

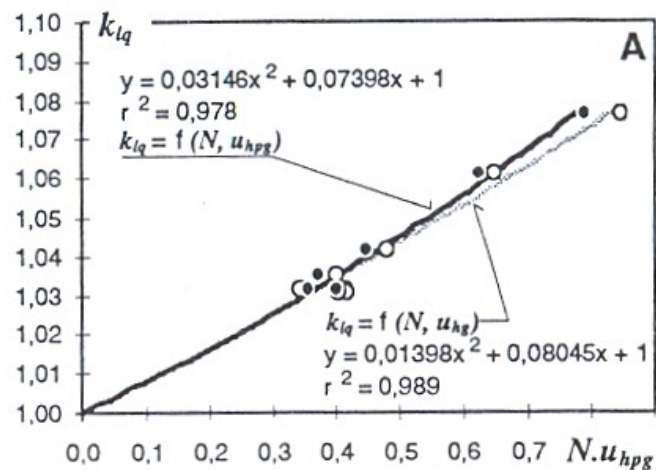
N - parametr struktury srážek

u_{hpg} - rychlost větru v době srážek v úrovni otvoru srážkoměru [$m \cdot s^{-1}$]

Metoda započítává parametr strážek N do regresní rovnice, který se ve světě běžně používá (ruské, švýcarské i jiné korekce). Vlivem nedostatku dat je výsledný vztah zatížen jistými nejistotami při výpočtu rychlostí větru v době padání srážek na Kolibě. Do vztahu byly pravděpodobně také vzaty všechny naměřené úhrny srážek (Tab. 9), což není nejvhodnější. V případech malých úhrnů (cca do 1 mm) dochází k velkému rozptylu naměřených hodnot mezi různými typy srážkoměrů, což je důsledek velkých rozdílů výparu a omočení mezi srážkoměry projevujících se právě při malých úhrnech. Malé úhrny se také hůře odečítají. Tabulka 9 názorně ukazuje potřebná data pro výpočtu parametru N podle rovnice (3.7).

Pro výpočet konverzního faktoru byla použita data za duben až říjen, kdy je jistota vypadávání pouze tekutých srážek. Na Grafu 11 je již výsledný regresní vztah. Po vynesení sedmi hodnot s měsíčními ukazateli k_{lq} , $N \cdot u$ byla provedena regresní analýza a zvolena rovnice (3.7). Na Grafu 11 jsou dvě čáry, černá znázorňuje hledanou rovnici, šedá je pro případ průměrných měsíčních rychlostí větru a ne průměrné rychlosti větru v době dní s výskytem srážek.

Graf 11 Závislosti záhytu srážkoměru Metra (1 m) v porovnání se srážkoměrem Hellmann (0 m) na rychlosti větru v době srážek. Osa y: poměr úhrnů Metra (1 m) a Hellmann (0 m) po opravě na omočení a výpar, osa x: horní graf – násobek N a u_{hpg} (průměrná rychlost větru v době dní se srážkami), u_{hg} je průměrná měsíční rychlost větru. Převzato z (Tihlárík, 1995, s. 79).



Tab. 9 Odhad proměnných potřebných pro výpočet konverzního faktoru k_{lq} . Porovnání záchytů srážkoměrů Metra s otvorem ve výšce 1 m nad terénem a Hellmann ve výšce 0 m v období 1975-1984. převzato z (Tihlárík, 1995, s.80). Vysvětlivky: P_g – měsíční naměřený úhrn srážek, q – počet dní se srážkami, ostatní znaky jsou z tabulky dobře identifikovatelné.

Zrážkomer (výška otvoru)		jan	feb	mar	apr	máj	jún	júl	aug	sep	okt	nov	dec	suma/ priem.
P_g - METRA (1 m)	mm				45,7	56,8	59,8	51,5	58,6	52,1	39,2			363,7
P_g - Hellmann (0 m)	%				107,5	104,1	104,0	103,8	103,6	103,3	105,5			104,5
P_g - Hellmann (0 m)	mm				49,1	59,1	62,2	53,5	60,7	53,8	41,4			379,8
T - teplota	°C	-0,9	0,1	5,6	9,1	14,6	18,1	19,4	18,9	15,5	10,2	3,7	0,2	9,54
T_g - tepl. počas zráž.	°C	-0,6	0,1	4,4	7,2	11,4	15,9	17,1	16,7	13,6	9,0	3,7	0,7	8,27
q - počet dní		8,3	11,3	11,7	11,1	11,0	12,0	12,5	10,8	10,4	12,3	14,7	15,1	11,8
t - priem. zdržanie	hod	12,5	12,5	12,5	12,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	12,5	12,5	
<i>METRA (1 m): straty omočením ΔP_{1+2} a výparom ΔP_3</i>														
ΔP_{1+2}	mm				1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,0	1,2			8,0
ΔP_3	mm				1,2	1,3	1,7	1,9	1,6	1,3	1,2			10,2
P_g METRA + ΔP_{1+2} + ΔP_3	mm				48,0	59,2	62,7	54,6	61,3	54,5	41,6			381,9
<i>Hellmann (0 m): straty omočením ΔP_{1+2}</i>														
ΔP_{1+2}	mm				2,6	2,5	2,8	2,9	2,5	2,4	2,8			18,5
P_g Hellmann + ΔP_{1+2}	%				107,7	104,2	103,6	103,1	103,1	103,2	106,1			104,4
P_g Hellmann + ΔP_{1+2}	mm				51,7	61,7	65,0	56,3	63,2	56,2	44,2			398,3
<i>Vietor - prepočet rýchlosti vetra zo strechy (SHMÚ Koliba) na 1m nad terénom</i>														
u_h - vietor-strecha	m/s	4,97	4,34	4,43	4,71	4,23	4,15	4,26	3,98	3,99	3,99	4,23	4,82	4,3
korekč. koef. na 2m		0,36	0,38	0,37	0,35	0,30	0,28	0,26	0,27	0,27	0,30	0,34	0,38	
u_{h2} - vietor (2 m)	m/s	1,79	1,65	1,64	1,65	1,27	1,16	1,11	1,07	1,08	1,20	1,44	1,83	1,41
u_{h1} - vietor (1 m)	m/s	1,52	1,40	1,39	1,40	1,08	0,99	0,94	0,91	0,92	1,02	1,22	1,56	1,20
<i>Vietor počas dní so zrážkami v úrovni otvoru zrážkomera</i>														
korekčný koeficient		1,05	1,05	1,05	0,93	0,93	0,93	1,03	1,03	1,03	0,96	0,96	1,05	
u_{hpg} - viet. počas zr.	m/s	1,60	1,47	1,46	1,30	1,00	0,92	0,97	0,94	0,94	0,98	1,17	1,63	1,20
<i>Parameter štruktúry zrážok N a konverzný faktor k_{lq}</i>														
N	%				60,5	44,6	40,3	42,8	37,4	43,8	63,5			
k_{lq}					1,08	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,06			1,04

3.2.2 Výpočet konverzního faktoru k_{s+m} pro tuhé a smíšené srážky

Parametrizace vztahu pro odhad konverzního faktoru k_{s+m} není založena na srovnávacích měřeních na Bratislavě Kolibě, nýbrž na porovnávacích měřeních v německém Harzgerode, které probíhalo v rámci třetího mezinárodního srovnávacího měření tuhých srážek v období 1986–1993. Na německé stanici byl instalován na rozdíl od Koliby referenční srovnávací srážkoměr DFIR (Obr.10). Na stanici byly instalovány i jiné srážkoměry s rozličnými protivětrnými ochranami, ale DFIR zachytával nejvíce srážek. Stanice Harzgerode je situována na náhorní plošině v pohoří Harz ve výšce 404 m n. m. Okolí stanice je bezlesé, s převládajícími loukami (Güther, Graf, 1989). Výška srážkoměru Metra byla na této stanici v nestandardní výšce 2 m nad terénem (standardně

je 1 m).

Podklady pro výpočet regresní rovnice čerpal Tihárik (1995) z práce (Güther, 1993) a (Güther, Graf, 1989). Güther (1993) prezentoval výsledky srovnávacích měření z Harzgerode podle doporučení WMO opravené o ztráty omočením, jak pro srážkoměr Metra, tak pro srážkoměr DFIR. Není ovšem uvedeno, jakým způsobem byly ztráty omočením získány. Úhrny pro srážkoměr DFIR byly též korigovány na úhrn srážkoměru BUSH dle doporučení WMO (BUSH je Treťjakovův srážkoměr umístěný uprostřed křovisek, více v podkapitole 2.8.6). Záchyt DFIR se pohybuje mezi 92-96% BUSH. Na doporučení WMO byly prezentovány pouze úhrny vyšší než 3 mm.

Otázkou bylo, zdali byly počítány i ztráty způsobené výparem (Tihlárík, 1995, s. 81). Tihlárík předpokládal, že ztráty výparem nebyly provedeny a tak je pro Metru provedl (Metra má poměrně vysoké ztráty výparem v porovnání s DFIR). Bohužel v práci (Güther, 1993) nebyly publikovány průměrné teploty vzduchu, které jsou pro výpočet velikosti výparu nezbytné. Údaje o teplotě byly však ve starší práci (Güther, Graf, 1989) pouze pro období prosinec 1986 až březen 1989. Tihlárík (1995) tedy použil pro výpočet výparu toto období 1986-1989. Z jeho práce však není jasné, jaké hodnoty výparu použil na zbývající roky počínaje rokem 1990 a konče rokem 1993.

Tabulka 10 znázorňuje hodnoty potřebné pro výpočet konverzního faktoru pro tuhé a smíšené srážky. Tabulka 11 pak úhrnné součty z tabulky 10 a opravené úhrny o výpar pro Metru. Na Grafu 12 je hledaná korekční polynomická rovnice 3 stupně (3.8) vypočtená regresní analýzou z bodových hodnot pro jednotlivé intervaly rychlosti větru (Tab. 11 poslední sloupec, poměr srážkových úhrnů DFIR ku srážkoměru Metra). Za povšimnutí stojí průběh rovnice, kdy od rychlostí nad $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ hodnoty konverzního faktoru klesají. Podle mého úsudku je to dáno tím, že v intervalu rychlostí větru nad $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je velký podíl smíšených srážek oproti tuhým (Tab. 10), konverzní faktor pro smíšené srážky je totiž daleko nižší než pro tuhé srážky. Za povšimnutí stojí i srovnání záchytu srážkoměru Metra v Tab. 10 s Tab. 6 a 7a, kde je poměr záchytu tuhých srážek Metra + T/Metra 1,22, kdežto v Tab. 10 je poměr úhrnů tuhých srážek DFIR/Metra 2,63 (resp. 38%), což je ohromný rozdíl. Podobně velké rozdíly byly na stanici Harzgerode i po roce 1993 (WMO, 1998).

Výsledná rovnice na korigování tuhých a smíšených srážek:

$$k_{s+m} = -0,004878 u_{hpg}^3 + 0,02206 u_{hpg}^2 + 0,1821 u_{hpg} + 1 \quad (3.8)$$

k_{s+m} - konverzní faktor pro tuhé+smíšené srážky

u_{hpg} - rychlost větru v době srážek v úrovni otvoru srážkoměru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Po prostudování výpočtu konverzního faktoru metodou od Tihláríka (1995) bych uvedl několik postřehů. Především je sporné sjednocení skupenství srážek v Tab. 11 pro výpočet konverzního faktoru. Na stanici Harzgerode je zarážející vysoký podíl smíšených srážek. Je zřejmé, že za smíšené srážky byly často pokládány i srážkové události několik stupňů pod bodem mrazu (WMO, 1998, s. 32).

Díky sjednocení tuhých a smíšených srážek je korektura aplikovatelná v užším smyslu pouze na nižší nadmořské výšky oblasti střední Evropy s podobnými podíly tuhých a smíšených srážek jako v případě Harzgerode. Ve vyšších nadmořských výškách bude podíl sněhových ku smíšeným srážkám větší a korigovaný úhrn pravděpodobně vyšší.

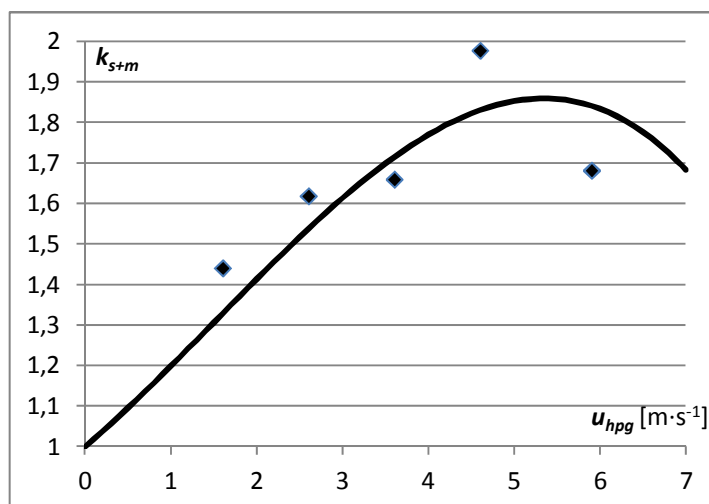
Tab. 10 Porovnání zachytu tuhých a smíšených srážek v sezóně XII – III. za roky 1986-93 srážkoměrem DFIR a Metra (2 m). Rychlost větru byla měřena ve výšce 1 m. Akceptovány byly úhrny nad 3 mm. Údaje jsou korigované o ztráty omočením. Upraveno podle Tihlárík (1995, s. 76), údaje pocházejí z práce (Güther, 1993).

Interval rychlosti větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	počet dní	DFIR [mm]	METRA 2 m (% DFIR)
sníh			
0,0-1,0	0	-	-
1,1-2,0	7	54,0	60,4
2,1-3,0	6	59,9	50,6
3,1-4,0	12	70,1	32,8
4,1-5,0	8	79,0	21,5
5,1-20,0	3	16,4	17,7
0,0-20,0	36	279,4	37,9
sníh s deštěm			
0,0-1,0	1	9,2	44,6
1,1-2,0	8	77,5	70,2
2,1-3,0	8	39,2	54,3
3,1-4,0	8	61,8	45,1
4,1-5,0	9	63,0	35,9
5,1-20,0	7	48,2	38,4
0,0-20,0	41	298,9	49,8
děšť se sněhem			
0,0-1,0	0	-	-
1,1-2,0	5	27,9	78,9
2,1-3,0	8	44,1	77,1
3,1-4,0	19	141,3	75,6
4,1-5,0	14	106,7	75,3
5,1-20,0	11	119,8	70,5
0,0-20,0	57	439,8	74,5

Tab. 11 Součty úhrnů z tabulky 10, ΔP_3 – ztráty způsobené výparem, k_{s+m} - konverzní faktor pro tuhé a smíšené srážky. Upraveno podle Tihláríka (1995, s.82), údaje pocházejí z práce (Güther, 1993).

Interval rychlosti větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	počet dní	DFIR [mm]	METRA + ΔP_3 2 m [mm]	DFIR/METRA + $\Delta P_3 = k_{s+m}$
sníh + sníh s deštěm + déšť se sněhem				
1,1-2,0	20	159,4	110,6	1,441
2,1-3,0	22	143,2	88,5	1,619
3,1-4,0	39	273,2	164,5	1,66
4,1-5,0	31	248,7	125,7	1,978
5,1-20,0	21	184,4	110,6	1,682
0,0-20,0	134	1008,9	599,9	1,676

Graf 12 Křivka regresní rovnice 3.8. vypočítaná z bodových hodnot z Tab. 11 (DFIR/Metra + ΔP_3), k_{s+m} konverzní faktor pro tuhé a smíšené srážky, u_{hpg} rychlost větru v 1 m v době padání srážek.



Dalším sporným bodem je použití srážkoměru Metra v nestandardní výšce 2 m, kde jsou vyšší rychlosti větru a tedy i předpokládané vyšší ztráty vlivem větru než ve standardní výšce 1 m. To by mělo vést k mírnému přecenění výsledných hodnot k_{s+m} . Výhodou je, že byly brány úhrny vyšší než 3 mm, čímž se eliminovaly časté chyby při malých srážkových úhrnech.

Ve výsledné rovnici 3.8 není zahrnut vliv teploty na velikost konverzního faktoru.

Pro přehlednost uvádím konečnou rovnici pro korigování naměřených srážek podle Tihláríka (1995) pro systematické chyby způsobené omočením, výparem a větrem.

$$P_c = k_c \cdot (P_g + \Delta P_{1+2} + \Delta P_3) =$$

$$= k_{s+m} \cdot Q_p \cdot (P_g + \Delta P_{1+2} + \Delta P_3) + k_{lq} \cdot (1 - Q_p) \cdot (P_g + \Delta P_{1+2} + \Delta P_3) \quad (3.9)$$

P_c - korigovaný měsíční úhrn srážek [mm]

P_g - naměřený měsíční úhrn srážek [mm]

ΔP_{1+2} - měsíční suma ztrát omočením [mm]

ΔP_3 - měsíční suma ztrát výparem [mm]

Q_p - podíl úhrnů s tuhými+smíšenými srážkami na celkových měsíčních úhrnech

k_c - celkový konverzní faktor

k_{lq} - konverzní faktor pro kapalně srážky

k_{s+m} - konverzní faktor pro tuhé+smíšené srážky

3.2.3 Výsledky oprav metodou Tihlárika (1995)

V Tab. 12 je příklad výsledků korigovaných srážek. za povšimnutí stojí srovnání korigovaných úhrnů s původními úhrny mezi zimním a letním obdobím. Průměrné roční navýšení srážek o odhad systematických chyb činilo na stanicích ve Vysokých Tatrách 15-30 %.

Tab.12 Výsledky korigovaných průměrných úhrnů srážek ve třech sezónách: rok, teplý půlrok a chladný půlrok a jejich procentuální porovnání s původními údaji pro období 1919-1960. Převzato z (Tihlárik, 1995, s.89).

ROKY	korigované úhrny (mm)			% z pôvod. zráž. úhrnov			korigované úhrny (mm)			% z pôvod. zráž. úhrnov		
	I.-XII.	V.-X.	XI.-IV.	I.-XII.	V.-X.	XI.-IV.	I.-XII.	V.-X.	XI.-IV.	I.-XII.	V.-X.	XI.-IV.
	ORAVSKÝ PODZÁMOK						LIPTOVSKÝ HRÁDOK					
1919	944,9	561,2	383,7	117%	109%	131%	863,9	515,3	342,7	122%	112%	142%
až	POPRAD						SPIŠSKÁ NOVÁ VES					
1960	823,4	483,3	342,2	134%	117%	169%	745,9	505,3	236,6	116%	109%	136%
	STARÝ SMOKOVEC						TATRANSKÁ LOMNICA					
	1093,8	659,9	437,2	119%	110%	135%	940,0	592,7	344,2	116%	109%	131%

3.3 Aplikace Tihlárikovy metody na území ČR

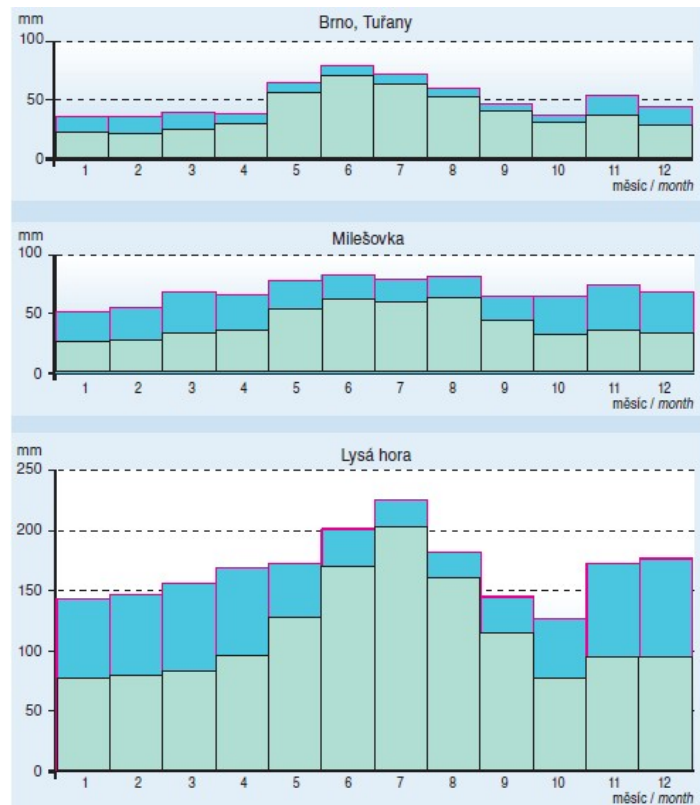
Na území České republiky byly korekce systematických chyb měření srážek pro srážkoměr Metra aplikovány na rozdíl od Slovenska jen jednou, a to na souboru pouze několika stanic. Korigovány byly srážkové úhrny na Lysé hoře, v Brně Tuřanech a na Milešově (Atlas podnebí Česka, 2007) pro období 1961-2000. Před tím byl vydán článek (Brázdil, Štěpánková, 1998), ve kterém jsou výsledky korekcí srážek pro období 1956-1996 a 1961-1990 na Milešově. Výsledky korekcí pro Lysou horu, Brno Tuřany i Milešovku jsou na Grafu 13.

Použitá metoda pro korigování srážkových úhrnů na zmíněných stanicích je prezentována Brázdilem a Štěpánkovou (1998). Metoda, je drobnou modifikací korektur Tihláríka (1995). Je upravena v tom smyslu, že vstupní parametry, jako např. parametr Q , byly počítány pouze pro zmíněné tři stanice. Korigovány byly měsíční úhrny srážek. Zde je uvedeno, jaké vstupní parametry byly zvoleny v případě Milešovky.

1. Omočení

Použita byla metodika SHMÚ. Podíly denních úhrnů srážek o určitém množství (méně než 0,9 mm, 1 - 4,9 mm, a nad 5 mm) na měsíčních srážkových úhrnech byly stanoveny na základě pozorování z let 1905-1994.

Graf 13 Průměrný roční chod srážek na stanicích Brno-Tuřany, Milešovka a Lysá Hora za období 1961-2000, světle zeleně je naměřený úhrn srážek, tmavě zeleně jsou odhadnuté ztráty na omočení, výpar a vliv větru. Převzato z Atlasu podnebí Česka (2007).



2. Výpar

Pro odhad velikosti ztrát výparem je nutné dobře znát dobu zdržení srážek ve srážkoměru a průměrnou teplotu v tomto období. Z pozorování z let 1951-1960 určili Brázdil a Štěpánková (1998) průměrný začátek padání srážek, dobu trvání srážek a tedy i průměrnou dobu zdržení srážek (Tab. 13). Průměrná hodina začátku vypadávání se

významně liší od časů v práci (Lapin, Faško, Košťálová, 1990), kde je doba začátku vypadávání srážek 15 h pro zimní půlrok a 17 h pro letní půlrok pro oblast Slovenska. Je to pravděpodobně způsobeno rozdílnými geografickými polohami.

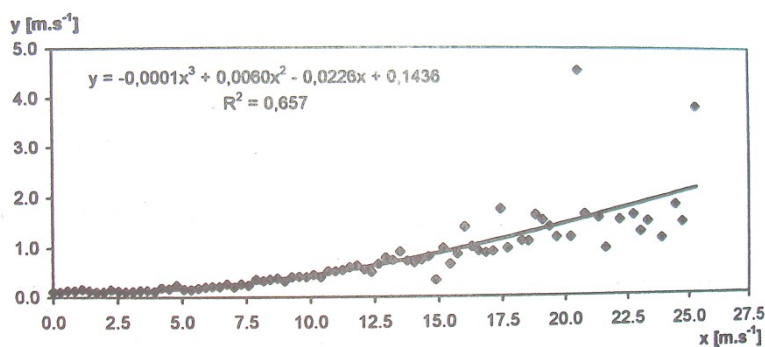
Tab. 13 Průměrné hodnoty vybraných charakteristik srážek na Milešovce pro období 1951-1960. Převzato z (Brázdil, Štěpánková, 1998, s. 143)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Začátek srážek (h)	11.30	11.30	10.30	11.30	13.00	12.30	12.30	13.00	12.30	12.00	11.00	11.30
Trvání srážek (h)	8,5	9,5	8,5	7,0	6,0	4,5	4,0	4,5	5,0	6,5	8,0	8,5
Doba zdržení (h)	11,0	10,0	12,0	12,5	12,0	14,0	14,5	13,5	13,5	12,5	12,0	11,0

3. Vliv větru

Použity byly regresní rovnice vypracované Tihláríkem (1995). Výhodou zpracované studie bylo účelné měření rychlosti větru v úrovni srážkoměru od listopadu 1996 do března 1997. Následně se mohl vyjádřit vztah přepočtu rychlosti větru mezi výškou 22,5 m (výška anemometru) a výškou otvoru srážkoměru (1 m), viz Graf 14.

Graf 14 Závislost mezi průměrnými hodinovými rychlostmi větru měřenými na věži observatoře 22,5 m nad zemí (x) a na úrovni záchytné plochy srážkoměru 1 m nad zemí (y) od listopadu 1996 do března 1997. Převzato z (Brázdil, Štěpánková, 1998, s.145)



$$y = -0,0001x^3 + 0,0060x^2 - 0,0226x + 0,1436 \quad (3.10)$$

Výpočet parametru Q je nejasný a ani sami autoři si již nepamatují, jak k němu dospěli. Pravděpodobně byl však vypočítán z pozorování skupenství srážek, která jsou na stanici Milešovka k dispozici. Vztah pro určení parametru Q nebyl počítán pro každý měsíc zvlášť, rovnice 3.11 je platná pro všechny měsíce v roce.

$$Q_p = 0,0007t^2 - 0,0618t + 0,6885 \quad (3.11)$$

Kde t je průměrná měsíční teplota a Q_p podíl tuhých a smíšených srážek.

Stejnou metodou byly získány i korigované srážkové úhrny na zbývajících stanicích: Lysé Hoře a v Brně Tuřanech.

4. HODNOCENÍ KVALITY POUŽITÝCH DATOVÝCH ŘAD A POSTUP PRÁCE

4.1 Použitá data

Pro účely výzkumné části práce byla získána data ze čtyř stanic: Milešovky (1956-1996), Bedřichova - přehrady (1981-1990) dále jen Bedřichov, Čáslavi - Nového Města, (1970-1979) dále jen Čáslav a Svatouchu (1961-1990). Data za Bedřichov, Čáslav a Svatouch poskytl ČHMÚ, data za Milešovku Ústav fyziky atmosféry AVČR. Stanice Čáslav je nížinná stanice, stanice Bedřichov a Svatouch jsou horské stanice. Stanici Milešovku můžeme považovat za horskou, svým terénem a umístěním je však z klimatologického hlediska jedinečná. Období pro Čáslav, Bedřichov a Svatouch byla brána s ohledem na úplnost a bezporuchovost naměřených dat podle údajů uvedených Coufalem, Langovou, a Míkovou (2002). Desetiletá období by měla stačit k poznání chodu velikostí systematických chyb a ke srovnání dvou korekčních metod. Korigování srážkových úhrnů na Milešovce bude provedeno za shodné období 1956-1996 resp. 1961-1990, jako v práci Brázdila a Štěpánkové (1998).

V datových souborech použitých v této práci nelze vyloučit chyby měření, především v případě měření rychlostí větru. Avšak chyby by měly být eliminovány díky vhodně zvoleným obdobím bez výskytu přerušení a poruch přístrojů.

Poskytnutá data:

1. Milešovka (833 m n. m.) - klimatologická stanice profesionální, data za období 1956-1996: denní termínová teplota vzduchu a rychlost větru, denní úhrn srážek, denní výška sněhové pokrývky.
2. Bedřichov (777 m n. m.)- klimatologická stanice základní, data za období 1981-1990: průměrná denní teplota a rychlost větru, denní úhrn srážek a denní výška sněhové pokrývky.

3. Čáslav (251 m n. m.) - klimatologická stanice základní, data za období 1970-1979: denní termínové teploty vzduchu a rychlosti větru, denní úhrn srážek a denní výška sněhové pokrývky.

4. Svratouch (734 m n. m.) - klimatologická stanice profesionální, poskytnutá data za období 1961-1990: průměrná měsíční teplota, rychlost větru a úhrn srážek

Pozn. termínovými měřeními se myslí klimatické termíny v 7, 14 a 21 hodin SMC.

Bohužel z různých důvodů (hlavně finančních) se nepodařilo získat denní termínové údaje o teplotě a rychlosti větru ze všech použitých stanic. Údaje ze čtyř stanic tak nejsou jednotné, liší se o období, za které byly získány (termínové až měsíční údaje). Srovnání výsledných korigovaných srážek proto bude provedeno pomocí průměrných měsíčních úhrnů za celé sledované období, tedy celkem 12 korekčních koeficientů pro každou metodu a stanici). Kde bylo možné provést kvalitní denní korektury naměřených srážek, tam byly provedeny.

V poskytnutých srážkových datech nebylo možné určit dny, které se zapisují úhrnem 0,0 (neměřitelné množství srážek). Takovým dnům se přiřazuje podle korekcí SHMÚ velikost omočení 0,1 mm. Tento problém se tedy dotýká pouze korektur na omočení a ve výsledku se zdají být takové úhrny zanedbatelné.

Nevýhodný je také samotný termín měření srážek, který připadá na 7 h ráno a který je nekompatibilní s denními průměrnými hodnotami teplot vzduchu a rychlostí větru. Tento problém jsem řešil tak, že úhrn změřený v 7 h ráno se korigoval s využitím denních průměrů předešlého dne (týkalo se pouze Bedřichova).

Na závěr této podkapitoly uvádím mapku umístění stanic v rámci ČR a fotografie stanic.

Obr. 14 Umístění stanic v ČR



Obr. 15 Fotografie meteorologických stanic. Vlevo nahoře stanice Čáslav, Nové Město (fotografováno autorem práce, březen 2012), vpravo nahoře stanice Milešovka (fotografováno ÚFA AV ČR), vpravo níže stanice Bedřichov, přehrada (fotografováno autorem práce, únor 2012), dole Svratouch (fotografováno autorem práce, srpen 2011)



4.2 Postup korektur na jednotlivých stanicích

Ve výzkumné části budou představeny výsledky korigování naměřených srážek manuálním srážkoměrem Metra dvěma metodami (metoda Tihláríkova a metoda SHMÚ) o chyby způsobené omočením, výparem a aerodynamickým efektem srážkoměru (vliv

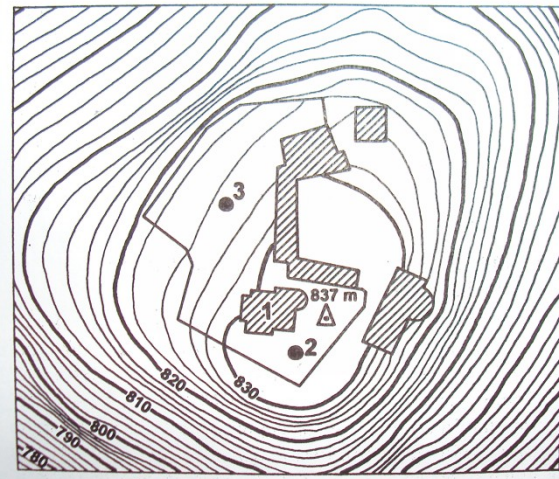
větru). Na Milešovce budou provedeny pouze korekce podle SHMÚ, protože druhou metodu již aplikovali Brázdil a Štěpánková (1998). Metody korektur SHMÚ a Tihlárka se liší pouze přístupem k výpočtu chyb způsobených vlivem větru. Obě metody byly v předcházejících kapitolách již představeny a korekční rovnice diskutovány.

Nyní následuje představení jednotlivých stanic a pojednání o postupu korigování naměřených srážek na těchto stanicích.

4.2.1 Milešovka

Milešovka je nejvyšším vrcholem Českého středohoří, vystupuje do výšky 837 m. Tento ze všech stran izolovaný vrchol výrazně převyšuje okolní terén. Okolní vrchy jsou nejméně o 200 m nižší. Samotný kužel má výšku přibližně 300 metrů. Meteorologická pozorování na Milešovce mají dlouhodobou tradici, pravidelná měření zde začala krátce po vybudování observatoře roku 1904. Denní úhrny srážek pak byly nepřetržitě zaznamenávány od roku 1905. Do roku 1940 byl srážkoměr umístěn na jižní straně vrcholu, od zmíněného roku se srážkoměr přestěhoval na západ-severozápadní svah pod observatoří, kde je dodnes, viz Obr. 16.

Obr. 16 Změna polohy srážkoměru na Milešovce (1 – budova observatoře, 2 – poloha srážkoměru do 31. srpna 1940, 3 – současná poloha srážkoměru, šrafovaně – ostatní objekty), převzato z (Brázdil, Štěpánková, 1998, s.144).



Srovnávací měření prováděná před rokem 1965 s několika srážkoměry umístěnými na různých místech okolo observatoře ukázala, že denní úhrny se mohou lišit až o 25 % (Brázdil, Štekl, 1999).

Studiu srážek na Milešovce bylo doposud věnováno několik prací. Gregor (1954) konstatoval, že Milešovka dostává v ročním průměru o 47,4 % méně srážek než místa v odpovídající nadmořské výšce ve srážkovém závětrí severní části Čech.

Například o 400 m níže ležící Milešov má průměrný roční úhrn srážek o 52 mm vyšší. Uvedená skutečnost byla přičítána trvale větrnému počasí (Gregor, 1954).

Několik statistických testů neprokázalo významnější narušení homogenity srážkové řady (Brázdil, Štekl, 1999, s.175). Další práce věnované pozorování srážek na Milešovce jsou uvedeny v knize (Brázdil, Štekl, 1999, s. 174-175).

Průměrný roční úhrn srážek za roky 1905-1994 je 557 mm, pro zpracovávané období 1956-1996 byl tento průměr 556,3 mm.

K rychlosti větru na Milešovce: Milešovka je považována za jednu z největrnějších stanic v Česku. Je to dáno jednak polohou anemometru na vrcholu kuželovité hory, jednak nestandardní výškou tohoto anemometru, který je 22,5 m nad zemí (standard je 10 m). Rychlost větru se po většinu sledovaného období určovala jako hodinové průměry z anemografu. Prováděna byla také standardní měření každou hodinu po dobu 2 – 10 minut v závislosti na důležitosti termínu (synoptické termíny - 10 minut) (Brázdil, Štekl, 1999, s. 57). Co se týče přístrojů, tak do roku 1969 zde měřil anemometr Fuess, po roce 1969 anemometry Metra. Údaje o rychlosti a směru větru jsou na Milešovce na výborné úrovni (Brázdil, Štekl, 1999, s.56). Dlouhodobá průměrná rychlost větru se pohybuje okolo $8,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Použitelné jsou údaje počínaje rokem 1956, do té doby byly převáděny rychlosti větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) na stupně Beauforta (síla větru). Z tohoto důvodu byly korekce provedeny až od roku 1956 (Brázdil, Štěpánková, 1998).

Datová řada z Milešovky použitá v této práci, představuje nejdelší zpracovávané období. Při korigování jsem využil rovnici (3.10) vyjadřující přepočtení rychlosti větru z 22,5 m na 1 m. Z Grafu 14 je patrné, že rychlosti naměřené ve výšce 1 metru jsou dosti malé. Podle přepočtových rovnic (2.24 až 2.27) by rychlost větru měla být ve výšce 1 metru při průměrné rychlosti kolem $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ asi 5 násobná. Zdá se, že srážkoměr je silně chráněn proti účinkům proudění.

Pro potřeby korektur metodou SHMÚ bylo potřeba vítr přepočítat na hladinu 2 m. Průběh regresní rovnice (3.10) se neshoduje s žádnou rovnicí na přepočtení rychlosti větru. Například pro vztah (2.24) by musel průměrný úhel α dosahovat hodnot kolem 40° , což neodpovídá realitě. Reálný úhel se pohybuje kolem 20° (Brázdil, Štěpánková, 1998, Obr. 1b na straně 144).

Bylo tedy nutné vypočítat rychlost větru ve 2 m metodou kvocientů. Vztah (2.25) byl při přepočtu brán jako výchozí. Nejdříve jsem vyjádřil rychlost větru v 1 m pomocí rovnice (2.25), do níž jsem dosadil hodnotu parametru drsnosti 0,5 (nejvyšší možná podle metodiky SHMÚ). Po té jsem vypočítal rozdíly mezi hodnotami podle rovnice (3.10) a rovnice (2.25). Následně jsem vypočetl podle rovnice (2.25) rychlosti větru ve 2 m a vynásobil je zjištěnými rozdíly. Protože posun byl pouhý jeden metr, bylo možné takovou metodu použít. V elektronické příloze Vysledky_MILESOVKA je celý postup uveden.

Nyní několik důležitých poznámek ke korigování. Datum výměny srážkoměru bylo stanoveno podle výpovědi pozorovatelů na stanici na 15. duben a 15. říjen. Rychlost větru v době srážek byla vypočtena jako průměrná hodnota ze tří termínových údajů (14 h, 21 h a 7 h následujícího dne). Průměrná teplota od začátku padání srážek potřebná pro určení výparu byla vypočítána také z termínů 14 h, 21 h a 7 h následujícího dne, hodnota ve 21 h byla vzata standardně dvakrát.

Největší problém představovalo určení skupenství srážek pro daný den (denní pozorování jsem neměl k dispozici). Parametr Q určený Brázdilem a Štěpánkovou je

aplikovatelný pouze na měsíční průměrné teploty, v tomto případě bylo nutné určit skupenství srážek pro daný den. Dle vzoru Ye, Yang a kol. (2004) jsem určil skupenství srážek na základě teploty vzduchu. Teplota se může vertikálně značně měnit, ale dá se obecně říci, že pokud je ve 2 m změřena teplota pod nulou, lze očekávat tuhé srážky (je nutné si uvědomit, že stanice leží ve výšce, kam často zasahuje spodní hranice oblačnosti). V praxi se jedná o nalezení vhodného intervalu teplot pro smíšené srážky. Snažil jsem se nalézt takový teplotní interval, který by ve výsledku nejlépe odpovídal parametru Q (podíl tuhých a smíšených srážek, rovnice 3.11) určeným Brázdilem a Štěpánkovou (1998). Rozhodl jsem se k tomu využít teplotu ve 14 h, protože podle Tab. 13 je průměrný začátek vypadávání srážek na Milešovce kolem poledne. Je to tedy dříve, než je určeno v metodě SHMÚ (15 h v zimním půlroku a 17 h v letním půlroku). Smíšené srážky jsem nakonec přiřadil ke dni, kdy byla teplota ve 14 h mezi 0,0 – 2,9°C. V sumárních hodnotách se tak výsledný podíl tuhých a smíšených srážek shoduje ve většině měsíců s podíly určenými rovnicí 3.11. (Tab. 14). Podíl tuhých srážek se shoduje s výsledky Sevruka (2004, s.112), viz Tab. 5 a Tab. 14. Shody se týkají měsíců, kdy vypadává nejvíce tuhých i smíšených srážek, na okraji zimní sezóny jsou velké rozdíly. Domnívám se však, že ostatní dva vztahy uvedené v tab. 14 určují kupříkladu pro květen a říjen nadhodnocené podíly příslušného skupenství srážek.

S parametrem Q souvisí ještě jev, který ovšem zohledněn nebyl. Ukazuje se totiž, že na podzim vypadávají při teplotách blížících se nule spíše dešťové srážky, zatímco v jarních měsících tuhé srážky. Je to způsobeno všeobecnou cirkulací atmosféry, kdy na podzim převažuje jihozápadní teplé proudění se stabilním teplotním zvrstvením atmosféry, zatímco na jaře jsou časté vpády instabilního studeného vzduchu od severozápadu až severu, které přinášejí sněhové přeháňky i při nadnulových teplotách ve 2 m.

Tab. 14 Výpočet parametru Q (%) pro Milešovku (1956-1996) různými metodami. T+S – podíl tuhých a smíšených srážek na celkových úhrnech (%), T – podíl tuhých srážek na celkových úhrnech (%), t – průměrná měsíční teplota (°C)

	Podle teploty ve 14 h (T+S)	Podle rovnice 3.11 (T+S)	Podle teploty ve 14 h (T)	Podle Tab. 5 (T)	t
leden	96	97	71	70	-4,1
únor	95	91	66	65	-3,5
březen	68	69	42	50	0,0
duben	30	43	9	35	4,4
květen	4	16	0	10	9,6
říjen	23	36	1	25	5,7
listopad	64	67	31	50	0,5
prosinec	82	87	58	65	-2,8

Základem korigování byly denní korektury. Vypočteny byly také měsíční a sumární korektury.

V měsíčních korekturách bylo užito výsledků denních korektur v případě ztrát omočením a výparem. Spočteny byly průměrné měsíční rychlosti větru v době srážek příslušného skupenství (tuhé, smíšené a kapalné) a následně vypočteny korekční koeficienty podle regresních rovnic 3.1 udávající ztráty vlivem větru.

Podobně byly provedeny i sumární opravy, kdy se aplikovaly korekční rovnice na sumární údaje určené z denních nebo termínových hodnot (sumy, průměry) pro 12 měsíců v roce. Ztráty omočením byly vypočteny jako sumy z denních údajů. Při výpočtu ztráty výparem byly denní hodnoty teploty vzduchu v době srážkových dní zprůměrovány za daný srážkový interval v Grafu 4. Podobně byly vypočteny i průměrné rychlosti větru v době dní s příslušným skupenstvím srážek, jež jsou potřebné pro výpočet ztrát vlivem větru. Postup výpočtu je patrný v elektronické příloze.

4.2.2 Bedřichov

Klimatologická stanice Bedřichov – přehrada se nachází v Jizerských horách asi 20 m na jih od západního okraje hráze přehrady Bedřichov, která je vybudovaná na řece Černé Nise. Stanice leží v nadmořské výšce 777 m n. m., 8 metrů na východ od srážkoměru se nachází asi 8 m vysoká budova. Na ostatní světové strany je otevřené prostranství. Anemometr se nachází na 10 m vysokém stožáru několik metrů od srážkoměru, viz Obr 15. V zimním období se dá předpokládat výška otvoru srážkoměru 1,5 až 2 m nad povrchem země, ovšem při vysoké sněhové pokrývce je skutečná výška nad povrchem snížena.

Aplikovány byly obě korekční metody (SHMÚ a Tihláríkova). S ohledem na polohu stanice byla zvolena doba měření zimní verzi srážkoměru od začátku října do konce dubna. Doba zdržení byla určena podle metodiky SHMÚ (podkapitola 2.7.2). Ztráty omočením byly počítány z denních hodnot, ztráty výparem a vlivem větru pak sumárně za celé období jako v případě Milešovky. Rychlost větru byla přepočítána pro každý srážkový den rovnicí 2.25. Parametr drsnosti byl zvolen s ohledem na výskyt sněhové pokrývky pro listopad až březen 0,1 m, pro zbývající část roku 0,2 m (shodně s metodikou SHMÚ). Rozhodl jsem se v případě Bedřichova i dalších stanic nepoužít do korektur rovnici na přepočet větru (2.24), nýbrž rovnici (2.25). A to z toho důvodu, že měření úhlů α je poměrně sofistikovaná záležitost. Rozhodl jsem se proto použít jednodušší vztah (2.25) s vyjádřením parametru z_0 jako desetiny výšky překážek v bezprostředním okolí srážkoměru.

O měření úhlů α jsem se alespoň pokusil právě na Bedřichově. Pro tuto stanici jsem zkusil vypočítat průměrné měsíční rychlosti větru ve 2 m pomocí rovnic (2.24, 2.25 a 2.27). Výsledky je možné nalézt v elektronické příloze Vysledky_BEDRICHOV a bude o nich ještě pojednáno.

Skupenství srážek pro daný den se určilo na základě průměrné denní teploty. Smíšené srážky byly přiřazeny dni, kdy byla průměrná teplota od - 0,9 do 1,9°C v předešlém dni, než ve kterém byly srážky naměřeny. Tuhé srážky pak byly pod hranicí -1,0 °C a tekuté nad 2,0 °C. Takto získaný vztah dobře odpovídá vztahu Sevruka (Tab. 5) i Brázdila a Štěpánkové (rovnice 3.11), viz Tab. 15. Milešovka se nachází ve stejné nadmořské výšce jako Bedřichov, průměrné měsíční teploty jsou podobné, lze tedy očekávat podobné hodnoty podílů tuhých a smíšených srážek.

Protože výše popsaný postup není úplně standardním řešením, rozhodl jsem se na doporučení Dr. Sevruka použít vztahy z Tab. 5, kde je parametr Q určen pro oblast Švýcarska na základě pozorování z 32 stanic za období 1952-1970. Dostal jsem tak podíl tuhých a kapalných srážek. Následně jsem vypočetl korigované srážkové úhrny ztrátami vlivem větru metodou SHMÚ. Smíšené srážky tak z korektur vypadly. Stejný postup jsem volil i v případě Čáslavi, na Milešovce to nebylo zapotřebí, protože tam byla rozhodující regresní rovnice 3.11.

Korektury metodou Tihlárka vyžadují stanovení parametru N pro daný měsíc. Pro zimní měsíce, kdy je průměrná teplota pod bodem mrazu, nemá vztah 2.19 řešení. Dosadil jsem tedy hodnoty, které pomyslně doplňovaly roční chod parametru N , pro zimní měsíce je to hodnota 0,85 nebo 0,9. Při výpočtu parametru N hraje podstatnou roli počet dní se srážkami v měsíci. S aplikací tohoto parametru se váže upozornění, že poměrně nejisté určení počtu dní se srážkami může přinést nepřesnosti ve výsledném vyjádření N .

Tab. 15 Výpočet parametru Q (%) pro Bedřichov (1981-1990) různými metodami. T+S – podíl tuhých a smíšených srážek na celkových úhrnech (%), T – podíl tuhých srážek na celkových úhrnech (%), t – průměrná měsíční teplota (°C),

	Podle denní teploty (T+S)	Podle rovnice 3.11 (T+S)	Podle denní teploty (T)	Podle Tab. 5 (T)	t
leden	90	98	73	70	-4,5
únor	96	97	75	70	-4,3
březen	69	71	39	50	-0,3
duben	43	46	12	35	3,8
květen	5	14	1	10	10,0
říjen	6	32	1	25	6,4
listopad	62	67	34	50	0,3
prosinec	84	85	64	65	-2,6

V Tab. 15 jsou patrné shody zvolené metodiky určení parametru Q pomocí denních teplot v měsících prosinci až březnu. V ostatních měsících jsou v případě určení Q podle rovnice 3.11 a z Tab. 5 opět dle mého názoru nadhodnocené podíly T+S resp. T (především v říjnu).

4.2.3 Čáslav

Klimatologická stanice Čáslav leží přímo ve městě v nadmořské výšce 251 m n. m. Stanice se nachází v nízké zástavbě v mírném svahu nad údolím říčky Brslenky. Měření na stanici jsou dnes provozována jen omezeně, stanice se přemísťuje do nedaleké zahrady u zemědělské školy. V současnosti zde probíhají srovnávací měření mezi oběma stanicemi. Anemometr se nachází na 10 m vysokém stožáru, který je jen několik metrů od srážkoměru, viz Obr. 15. V bezprostředním okolí srážkoměru nejsou velké překážky, krom několika nízkých keřů. Větší překážky zde nebyly pravděpodobně ani v sedmdesátých letech.

Datum výměny verze srážkoměru bylo stanoveno na 1. duben a 31. říjen. Doba zdržení byla určena podle metodiky SHMÚ (podkapitola 2.7.2). Vypočteny byly denní korigované úhrny podle metodiky SHMÚ a sumární korigované úhrny pro 12 měsíců v roce metodou SHMÚ a metodou Tihláríkovou. Při sumárních korekturách byly využity hodnoty z denních korektur stejně jako v případě Bedřichova a Milešovky s tím rozdílem, že ztráty výparem nebyly znovu pro celé období vypočítány, vzaty byly hodnoty u denních korektur. Přepočet rychlosti větru z výšky 10 m byl odvozen podle rovnice 2.25. Parametr drsnosti povrchu byl po celý rok zvolen 0,1 m, což odpovídá přibližně desetiné výšky překážek v bezprostředním okolí srážkoměru.

Podíl tuhých a smíšených srážek byl určen pomocí teploty ve 14 h a 21 h. Lze totiž očekávat, že srážky vypadávají nejčastěji mezi těmito termíny. Průměr z obou teplot byl určující pro určení skupenství srážek. Smíšené srážky byly přiřazeny průměrné teplotě od 1,0 do 2,9°C. Dolní hranice je o 1°C vyšší než u Milešovky, protože stanice je nízko položená a rozdíl teplot mezi vrstvou oblačnosti a stanicí lze očekávat větší než v případě Milešovky. Zohledněny jsou tak případy vypadávání tuhých srážek při teplotách do 1°C, kdy sníh nestačí ještě při průchodu atmosférou roztát, protože nenulová teplota je pouze v nejnižší vrstvě v při zemi. Horní hranice byla ponechána shodná, protože při průměrné teplotě kolem 3,5 °C v odpoledních a večerních hodinách lze očekávat smíšené srážky pravděpodobně jen zřídka. Navíc korekční křivka pro smíšené srážky má svým průběhem blíže ke křivce pro kapalné, než pro tuhé srážky (Graf 10). Takto zvolený interval dobře koreloval s hodnotami z Tab. 5 (viz Tab. 16).

Protože se takový postup může zdát sporný, využil jsem opět vztahů od Sevruka (Tab. 5), jako v předcházejícím případě na datech z Bedřichova a korekce metodou SHMÚ provedl také pro tuhé a kapalné srážky.

Parametr N jsem vypočetl taktéž se stejnou úpravou pro zimní měsíce jako v případě Bedřichova.

Tab. 16 Výpočet parametru Q (%) pro Čáslav (1970-1979) různými metodami. T – podíl tuhých srážek na celkových úhrnech (%), t – průměrná měsíční teplota (°C)

	Podle teploty ve 14 a 21 h (T)	Podle Tab. 5 (T)	t
leden	33	35	-0,7
únor	26	30	0,9
březen	14	20	4,4
duben	1	10	8,0
listopad	9	20	4,3
prosinec	33	30	1,4

4.2.4 Svratouch

Stanice Svratouch se nachází v nejvyšší části Českomoravské vysočiny poblíž města Svratky v obci Svratouch. Stanice leží na vrcholu kopce Otava 734 m n. m. Kopec není zalesněn, krajinný pokryv tvoří sečené louky a pastviny. Datové řady z této stanice nebyly vhodné na korigování úhrnů o výpar a omočení, proto byly úhrny korigovány pouze o vliv větru. Výsledky ze Svratouchu tak představují doplnění k ostatním stanicím. Použita byla pouze metoda SHMÚ s rozlišením tuhých a kapalných srážek. Podíl tuhých srážek byl určen ze vztahu pro nadmořskou výšku a průměrnou měsíční teplotu podle Tab. 5. Pro přepočet rychlosti větru jsem použil stejný vztah jako v předcházejících případech. Parametr drsnosti jsem s ohledem na okolí srážkoměru zvolil pro zimní období (prosinec až březen) 0,05 m, pro zbyvající část roku 0,1 m. Rychlost větru v době srážek nebyla nijak specifikována, použil jsem průměrné měsíční rychlosti větru. Jak bude v následující kapitole řečeno, rychlost větru ve dnech s tuhými srážkami je shodná nebo mírně menší než průměrná rychlost větru a rychlost větru v době dní s kapalnými srážkami je vyšší než průměrná.

5. VÝSLEDKY

Ve výzkumné části práce budou prezentovány výsledky provedených korektur na čtyřech stanicích. Postup výpočtů je možno nalézt v příložených souborech (Vypocty), kde jsou uvedena surová data, postup a výsledky korigovaných srážek v podobě tabulek. Do textu práce budou vloženy pouze podstatné výsledky (v podobě grafů). Nejdříve však k výsledkům vstupních parametrů:

5.1 Parametr N

Parametr byl vypočítán podle vztahu 2.19, který použil Tihlárík (1995). Z Tab. 17 je patrný slabý trend růstu velikosti parametru N od Čáslavi po Milešovku. Nejvyšších hodnot je dosahováno na Milešovce, prakticky po celé letní pololetí. Veliký podíl srážek s nízkou intenzitou je na Milešovce dán obecně malými úhrny srážek.

Z obecného úsudku by se zdálo, že parametr N klesá v letních měsících se zvyšující se nadmořskou výškou (na horách prší intenzivněji). Ve skutečnosti tomu tak být nemusí, pokud chceme vyjádřit podíly srážek pod danou intenzitou $1,8 \text{ mm}\cdot\text{hod}^{-1}$. Na druhou stranu totiž na horách vypadávají srážky dlouhodoběji, než v nižších polohách. Jedná se o individuální záležitost, která se může pravděpodobně měsíc od měsíce lišit.

Parametr N je citlivý na vstupní hodnoty, především na údaj o počtu dní se srážkami za měsíc (Sevruk, 2004, s. 109). Do vztahu se tak započítávají i velmi nízké hodnoty kolem 0,1 mm (protože k nim se ubírá náš zájem). Tím se vztah komplikuje, protože výskyt úhrnů okolo 0,1-0,5 mm je velmi proměnlivý. Spolehlivěji by se parametr N dal určit z pozorování automatickými srážkoměry, které započalo na stanicích v síti ČHMÚ na konci minulého tisíciletí.

Tab. 17. Velikost parametru N na vybraných stanicích

	Milešovka 1956-96	Bedřichov 1981-90	Čáslav 1970-79
duben	0,88	0,77	0,72
květen	0,61	0,56	0,48
červen	0,52	0,46	0,38
červenec	0,47	0,36	0,41
srpen	0,48	0,35	0,35
září	0,63	0,55	0,55
říjen	0,86	0,66	0,73

5.2 Přepočet rychlosti větru

Na údajích o rychlosti větru ve výšce anemometru (10 m) na stanici Bedřichov jsem vyzkoušel tři různé rovnice na přepočet větru na výšku 2 m nad terénem. K výpočtům jsem použil průměrné měsíční rychlosti větru vypočítané za celé desetileté období. Výsledky jsou v Tab. 18. V prvním sloupci je rychlost větru získaná přepočtovým vztahem 2.25, ve druhém sloupci vztahem 2.24, a ve třetí vztahem 2.27. V rovnici 2.25 byl zvolen parametr drsnosti s ohledem na okolní terén 0,1 m pro zimní období, kdy lze očekávat výskyt sněhové pokrývky (listopad až březen). Pro zbylé období 0,2 m. Pro výpočet rovnice 2.24 jsem na místě odhadl velikost průměrného úhlu α z osmi kvadrantů.

Úhel činí 10°, což je mírně vyšší hodnota. Je to zapříčiněno blízkostí budovy východně od srážkoměru. V 80. letech byl tento úhel pravděpodobně nižší, protože v té době vrcholila lesní kalamita v Jizerských horách zapříčiněná kyselými dešti, stromy byly nižší nebo nebyly vůbec. Parametr z_0 jsem dosadil podle vzoru rovnice 2.24 pro zimní období 0,01 m a letní 0,03 m. Třetí vztah (2.27) je nejjednodušší přepočtová rovnice pro rychlost větru, můžeme říci standard. Velikost parametru p se doporučuje 0,25 m pro přepočet na výšku 0 - 2 metru. Před zhodnocením výsledků v Tab. 18 je důležité upozornit, že i malé změny parametrů výrazně ovlivňují výsledné hodnoty rychlostí větru. Největší rychlosti větru vycházejí použitím rovnice 2.27, nejnižší použitím rovnice 2.24, která se běžně při korekcích užívá. Stejnou tabulku je možné nalézt v elektronickém souboru „Vypocty_BEDRICHOV“.

Tab. 18 Přepočet rychlosti větru na stanici Bedřichov [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

průměrná rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	10 m	2 m vztah 2.25	2 m vztah 2.24	2 m vztah 2.27
leden	3,6	2,3	2,1	2,4
únor	3,7	2,4	2,1	2,4
březen	3,5	2,3	2,0	2,3
duben	3,5	2,1	1,9	2,3
květen	3,2	1,9	1,8	2,1
červen	3,0	1,8	1,7	2,0
červenec	2,9	1,7	1,6	2,0
srpen	2,6	1,5	1,4	1,7
září	2,6	1,5	1,4	1,7
říjen	3,7	2,2	2,0	2,5
listopad	3,7	2,4	1,9	2,5
prosinec	3,9	2,6	2,3	2,6

5.3 Rychlost větru v době srážek

Zajímavé je také sledovat rozdílné rychlosti větru v době srážek různého skupenství. V elektronické příloze je pro stanice Milešovka, Bedřichov a Čáslav na listech s názvem „sumární opravy“ tabulka s rychlostmi větru v době srážek různého skupenství. Z praktických důvodů ji zde nezařazují. Skupenství bylo určeno z průměrných nebo termínových teplot, jak již bylo popsáno výše. V tabulkách jsou prezentovány průměrné měsíční údaje vypočtené za celé sledované období z denních hodnot (rychlosti větru v době dní se srážkami). V naprosté většině případů je rychlost větru ve dnech se srážkami

větší než průměrná rychlost větru. Zajímavé jsou pak zimní měsíce, kdy mohou vypadávat všechny tři skupenství srážek. Za nízkých teplot, při vypadávání sněhu, je rychlost větru srovnatelná s průměrnou měsíční rychlostí nebo je i nižší. To platí pro zimní období, v přechodovém období např. na jaře může být tato rychlost vyšší (vlivem vpádů studeného vzduchu spojeného s velkými rychlostmi větru – může to být způsobeno i malým počtem případů dnů se sněžením v jarních měsících). V zimním období pak byla rychlost větru největší na všech stanicích při vypadávání tekutých srážek (Čáslav nad 130 %, Milešovka okolo 140 %, Bedřichov až 165 % v únoru průměrné měsíční rychlosti větru). Tento jev je způsoben tím, že kapalné srážky vypadávají především na teplých frontách (v teplém sektoru zimních cyklón postupujících od západu je rychlost větru trvale veliká). Na stanicích Bedřichov a Milešovka je nutné počítat s malým počtem případů dnů s kapalnými srážkami v nejstudenějších měsících, to se může výrazně projevit ve výsledku.

V letním období je pak průměrná rychlost ve dnech se srážkami asi o 5-10 % vyšší než průměrná rychlost větru.

5.4. Srovnání korigovaných úhrnů denních, měsíčních a sumárních oprav

Nyní k samotným výsledkům korigovaných úhrnů. Denní korektury byly vypočteny na Milešovce (metoda SHMÚ) a Čáslavi (obě metody), měsíční korektury byly provedeny na Milešovce (metoda SHMÚ) a sumární na všech stanicích (obě metody). Tihláríkovu metodu nelze aplikovat na denní údaje, pouze na měsíční nebo sumární.

Předpokladem bylo, že korigované úhrny denních, měsíčních nebo ročních úhrnů by se neměly významně odlišovat. To se také potvrdilo, protože k výpočtu vstupních parametrů měsíčních a sumárních korektur byly použity denní údaje o rychlosti větru, teplotě vzduchu a skupenství srážek (sumy/průměry). Z povahy metody korigování by mělo platit, že výsledná hodnota korigovaného úhrnu je nejreprezentativnější za sumární období.

Na 41-letém období dat z Milešovky se srovnávaly korektury měsíční a denní pouze pro chyby způsobené vlivem větru. Hodnoty se lišily maximálně o 2 % při srovnání celkových korigovaných úhrnů v případě smíšených srážek, což je pochopitelné, protože dnů se smíšenými srážkami bylo nejméně. V případě výparu bylo u Milešovky možné porovnat pouze korekce denní a sumární. Pro každý měsíc zvlášť jsem hodnoty výparu nepočítal. Celková ztráta výparem byla při denních korekturách větší o 2,3 % než v případě sumárních korektur.

Podobně byly vypočteny rozdíly denních a sumárních oprav na stanici Čáslav, kde bylo ovšem možné srovnat pouze korigované úhrny odhadující ztráty vlivem větru. Zde byly rozdíly největší v případě tuhých srážek, kdy výsledný korigovaný úhrn denních korektur byl o 4 % větší než sumární, u smíšených a kapalných činil rozdíl okolo 1 % ve prospěch denních oprav.

Souhrnně došlo k navýšení průměrných ročních úhrnů srážek na Milešovce o 12,8 % při denních korekturách a o 12,5 % v případě měsíčních i sumárních korektur. Pro Čáslav byly tyto hodnoty u denních i sumárních korektur stejné (14,5 %).

Závěrem lze z výše provedeného výzkumu konstatovat, že výsledky oprav prováděných v denním, měsíčním nebo sumárním kroku se příliš neliší (záleží ovšem na tom, jaká máme vstupní data – termínové, denní hodnoty). Čím delší je korigované období tím menší jsou rozdíly mezi výslednými korigovanými úhrny. Pokud korigujeme období delší přibližně třicet let na stanici s dostatečným počtem srážkových dnů, je možné počítat jakoukoliv korekturu (denní, měsíční, roční). Pokud máme kratší období (nebo malý počet srážkových dnů) tak se výsledky mohou významněji lišit. Denní korektury dávají vždy o něco vyšší hodnoty.

Rozdíl by pravděpodobně nastal, kdybychom porovnávali výsledky korigovaných denních a měsíčních srážkových úhrnů a v případě měsíčních korektur neměli k dispozici např. přesný počet dní se srážkami v měsíci apod.

U jiných typů rovnic s jinými vstupními parametry nelze vyloučit jiné výsledky.

5.5 Srovnání úhrnů srážek korigovaných metodou SHMÚ a metodou Tihláríka

Nejjednodušší srovnání by mohlo být vyjádřené vykreslením příslušných regresních rovnic počítajících ztráty vlivem větru do jednoho grafu. To je ovšem neproveditelné, protože metoda Tihláríka bere do úvahy společně tuhé a smíšené srážky a v případě kapalných srážek navíc parametr N . Nadto jsou regresní rovnice vyjádřené z rychlostí větru v různých výškových hladinách. Proto je nejlepším řešením pro srovnání těchto metod jejich aplikace na reálná data.

V případě Milešovky bylo z dostupných výsledků možno srovnat období 1961-1990 s výsledky Brázdila a Štěpánkové (1998), kteří použili regresní rovnice sestavené Tihláríkem (1995). Jak vidět výsledky v Tab. 19 se příliš neliší, pouze lze konstatovat, že metoda SHMÚ dává vždy nižší korigované úhrny.

Milešovka nebyla stanicí, kde se mohly projevit rozdíly mezi oběma metodami při větších rychlostech větru, protože po přepočtu na 1 nebo 2 m byly tyto rychlosti velice malé.

Rozdíly mezi použitými metodami jsou dobře patrné na Grafech 15b a 15c. Navýšení po korigování metodou od Tihláríka (1995) v případě Bedřichova je značné. V období od listopadu do března je navýšení nad již korigované srážky metodou SHMÚ o 16-21 % naměřeného úhrnu. V případě Čáslavi jsou rozdíly v zimním období podobné (prosinec až únor o 16 – 20 % naměřeného úhrnu). Celkově se úhrny po sumární korekci pro Bedřichov metodou Tihláríka liší od naměřených o 26,9 %, metodou SHMÚ o 17,2 %, pro Čáslav pak o 19 % a 14,5 %.

Metody se tedy významně rozcházejí při korigování tuhých a smíšených srážek. Konverzní faktor k_{s+m} je v případě Tihláríkovy metody vypočten z pozorování na německé stanici Harzgerode, kde byla instalována účinná soustava DFIR.

Tab. 19 Srovnání korigovaných měsíčních úhrnů metodou SHMÚ a metodou Tihláríka na Milešovce za období 1961-1990

pro období 1961-1990	naměřený úhrn [mm]	v % naměřeného úhrnu po korekci metodou SHMÚ	v % naměřeného úhrnu po korekci (Brázdil, Štěp., 1998)
leden	29	123	124
únor	30	123	123
březen	34	119	121
duben	41	112	117
květen	62	107	108
červen	66	107	108
červenec	63	107	106
srpen	72	107	107
září	49	109	110
říjen	33	117	127
listopad	40	120	123
prosinec	37	120	122

5.6. Modifikovaná metoda SHMÚ

Protože určení skupenství srážek nebylo příliš standardní, vypočetl jsem korekce s využitím vztahů od Sevruka (Tab. 5) a to pouze pro korigování metodou SHMÚ v případě sumárních oprav. Regresní rovnice pro smíšené srážky tak nebyla využita. Rychlost větru v době tuhých s kapalných srážek byla vzata z předešlých korektur. Výsledné korigované úhrny se shodovaly s korigovanými úhrny, kde bylo skupenství srážek pro daný den určeno na základě denní nebo termínové teploty (Milešovka: modifikovaná metoda SHMÚ 112,4 %, metoda SHMÚ 112,5%, Bedřichov: modifikovaná metoda SHMÚ 116,6 %, metoda SHMÚ 117,2%, Čáslav: 114,9 % a 114,5%).

5.7. Zhodnocení výsledků

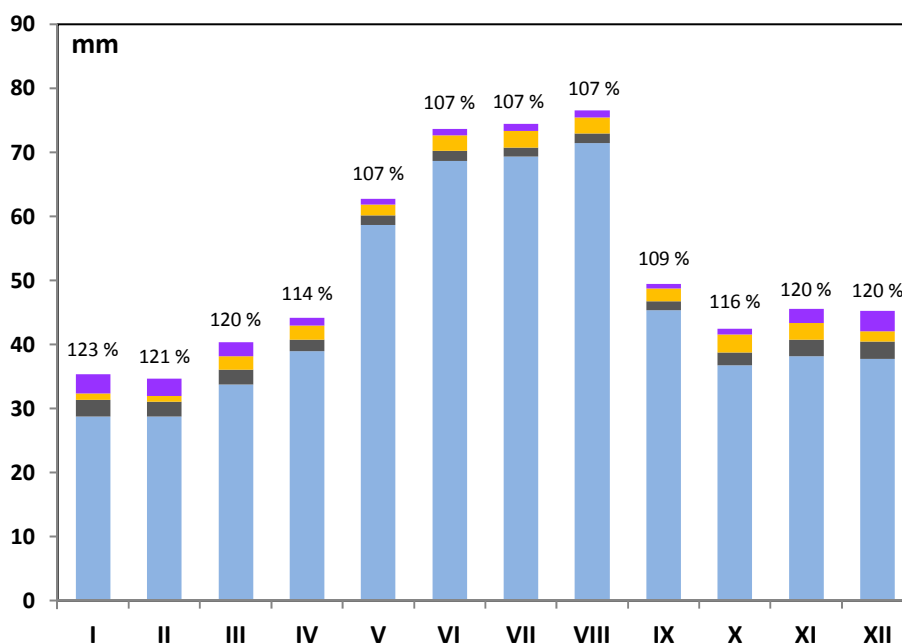
Nejdůležitější výsledky jsou prezentovány na Grafech 15a-15c. Pro každou stanici je vytvořen jeden souhrnný graf, na kterém jsou patrné velikosti naměřených úhrnů a velikosti ztrát vlivem systematických chyb. Tabulky s přesnými hodnotami po opravě jsou v elektronické příloze.

5.7.1 Milešovka

Na Grafu 15a jsou výsledky prezentovány pro jednotlivé měsíce v roce. Velikost ztrát omočením a výparem je shodná s výsledky Brázdila a Štěpánkové (1998). Ztráty omočením jsou významnější v zimních měsících, kdy je používána zimní verze srážkoměru a v některých měsících mohou dokonce převyšovat dvě zbývající systematické chyby. Výpar ze srážkoměrné nádoby je obecně větší v letních měsících. Největší je však dubnu a v říjnu, kdy je po polovinu měsíce užívána zimní verze srážkoměru. Vysvětlení je v teplotě vzduchu, protože ta je především v říjnu ještě poměrně vysoká. Ztráty způsobené strháváním srážkových částic jsou nejvyšší v měsících s nejvyšším podílem tuhých srážek, tj. v lednu a prosinci. Po korekturách je patrné nevýrazné podružné maximum srážkových úhrnů v měsících listopadu až lednu.

Studována byla taktéž podle vzoru Brázdila a Štěpánkové (1998) roční a měsíční variabilita korigovaných úhrnů pro období 1961-1990. Výsledky jsou v souboru „Vypocty_MILESOVKA“ na listě s měsíčními korekturami. Měsíční variabilita byla shodná s modifikovanou metodou Tihlárka, kterou autoři použili. Variační koeficient ročních korigovaných úhrnů byl 21 %, před korigováním 20 %.

Graf 15a Roční chod průměrných měsíčních ztrát na omočení, výpar a aerodynamický efekt srážkoměru na Milešovce (1956-1996). Čísla nad sloupci označují celkový korekční koeficient vyjádřený v procentech.



- navýšení po korekci metodou Tihláríka
- ztráty strháváním srážek (Hmú)
- ztráty výparem (Hmú)
- ztráty smáčením (Hmú)
- naměřený úhrn

5.7.2 Bedřichov

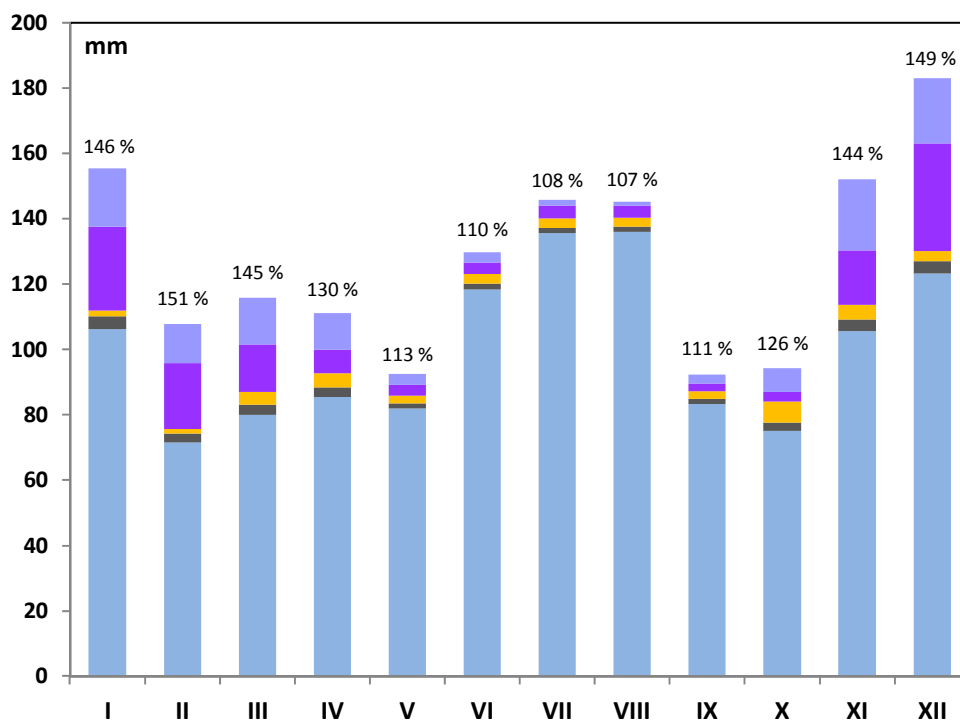
Výsledky jsou prezentovány na grafu 15b. Na Bedřichově byla ztráta omočením největší v zimních měsících, což souvisí s používáním zimní verze srážkoměru a vyšším počtem srážkových dní. Ztráty na výpar jsou nejmarkantnější v říjnu, protože po celý měsíc bylo zvoleno používání zimní verze srážkoměru a průměrná teplota se pohybovala na 5,7°C, navíc doba zdržení byla v říjnu určena na 16 hodin podle vzoru Lapina, Faška, Košťálové (1991). V dubnu je průměrná teplota 2,4°C, takže ztráty na výpar jsou menší, navíc se počítá doba zdržení 14 h. V létě jsou ztráty na výpar a aerodynamický efekt srážkoměru shodné.

Nejviditelnější jsou ztráty způsobené vlivem větru. Jejich velikost je v zimě tak vysoká, že ve výsledku jsou zimní měsíce nejbohatší na srážky v roce. Korigování srážek metodou Tihláríka vede ve výsledku k větším úhrnům než metodou SHMÚ, což je na Grafu 15b také dobře patrné.

Podporovány jsou tak závěry z mé předchozí práce (Ptáček, 2010), která se věnovala zvýšeným úhrnům srážek v zimních měsících na našich horách. Ukazuje se totiž, že roční chod na našich pohraničních horách je typický více či méně výrazným podružným zimním maximem úhrnů srážek.

Desetileté období je dostatečně dlouhé období na prokázání takového jevu. Průměrné měsíční úhrny v jednotlivých letech se významněji neliší od normálu 1961-1990. Výjimkou jsou měsíce květen (o 25% méně srážek za celé desetiletí než je normál 1961-90) leden (o 13% více) a říjen (o 14 % méně). Silně vybočujícím rokem je rok 1982, kdy spadly pouhé dvě třetiny srážek normálu. I přesto můžeme říci, že podobně vysoké hodnoty korigovaných srážek v zimních měsících můžeme očekávat každý rok. Přesné hodnoty pro daný měsíc je možné nalézt v elektronické příloze.

Graf 15b Roční chod průměrných měsíčních ztrát na omočení, výpar a aerodynamický efekt srážkoměru v Bedřichově (1981-1990). Čísla nad sloupci označují celkový korekční koeficient vypočtený metodou Tihláríka a vyjádřený v procentech.



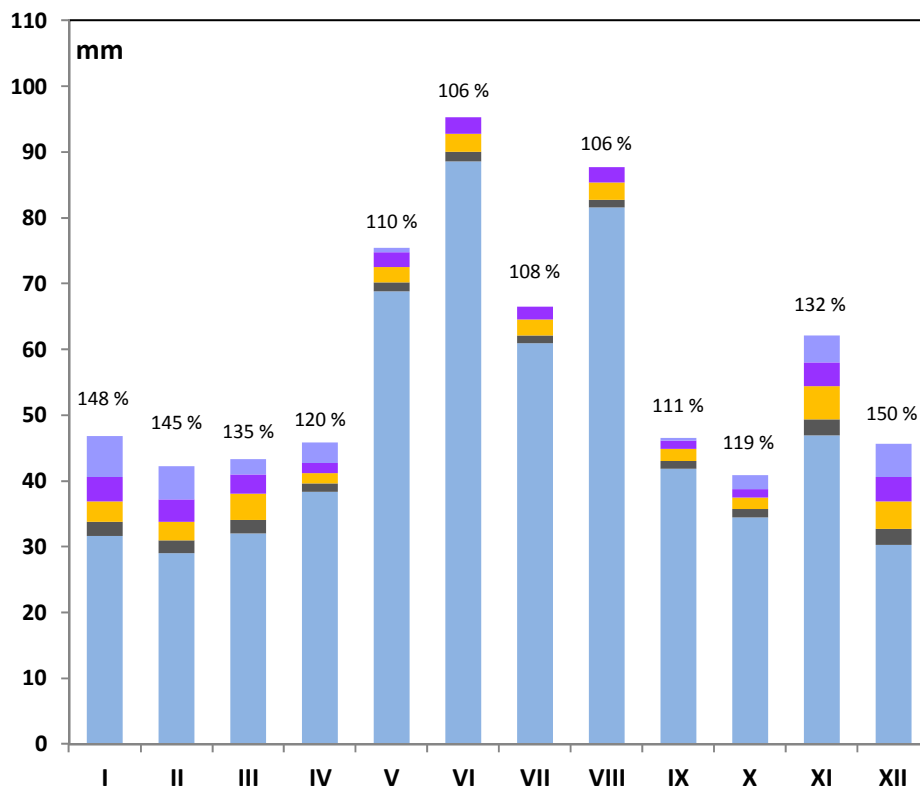
5.7.3 Čáslav

Stanice Čáslav je jediná nízko položená stanice z výběru. Naměřené srážkové úhrny jsou v průběhu roku dosti rozkolísané, což je dané zvýšenou variabilitou ve zvoleném období 1970-1979 (Graf 15c).

Nejvyšších hodnot dosahuje výpar v prosinci, lednu a únoru (navýšení o 10 % naměřených srážek). Ztráty omočením jsou také největší v zimních měsících (navýšení o 8 % naměřených srážek v prosinci). Ztráty strháváním srážkových částic mimo otvor srážkoměru jsou v případě určení metodikou SHMÚ shodné s velikostí ztrát výparem (do

10 %), vyšší hodnoty dává opět Tihláríkova metoda. Ve výsledku je pak procentuální navýšení v zimních měsících srovnatelné jako v případě horské stanice Bedřichov. Je to dáno velkými ztrátami na výpar v případě Čáslavi a velkou větrností dané lokality.

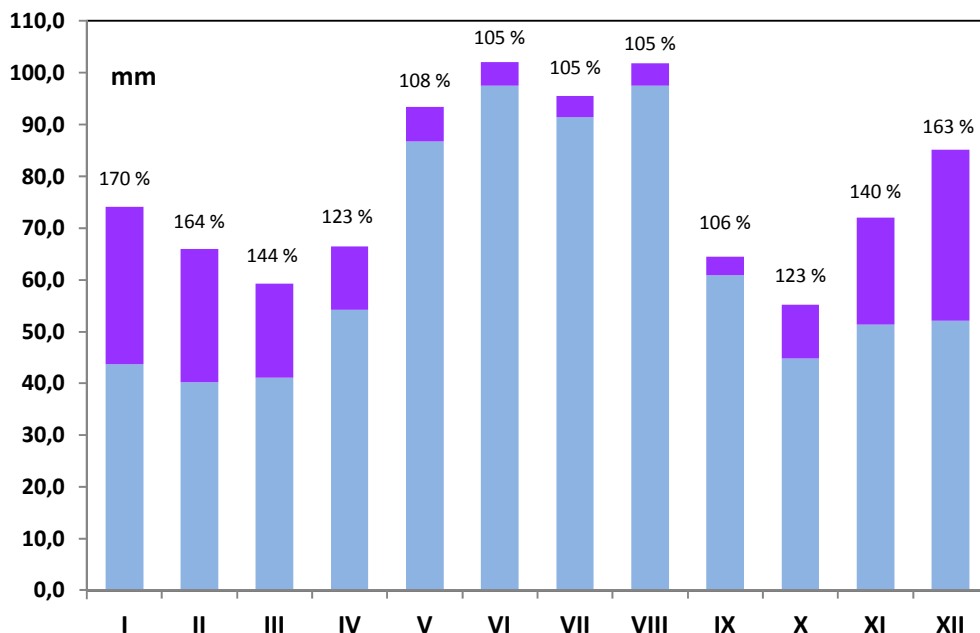
Graf 15c Roční chod průměrných měsíčních ztrát na omočení, výpar a aerodynamický efekt srážkoměru v Čáslavi (1970-1979). Čísla nad sloupci označují celkový korekční koeficient vypočtený metodou Tihláríka a vyjádřený v procentech.



5.7.4 Svratouch

Pro tuto stanici bylo možné provést pouze opravy na vliv větru. Svratouch je velice větrná stanice s umístěním na vrcholu kopce, který není zalesněný. Rychlosti větru ve 2 m byly proto také veliké. Pro úspěšnost aplikování modifikované metody SHMÚ (bez rozlišování smíšených srážek) jsem se rozhodl použít právě tuto metodu pro korigování. Výsledek je prezentován na Grafu 15d. Jak vidno, ztráty vlivem větru jsou značné. Po opravě na omočení a výpar by se zimní úhrny srážek v prosinci pravděpodobně vyrovnaly letním měsícům. To opět nasvědčuje na fakt, že v České republice je ve vyšších polohách významné podružné maximum srážek v zimních měsících. Nutno ovšem počítat s tím, že z povah použitých dat (měsíční průměry) nelze výsledky brát úplně závazně. Otázkou je především rychlost větru v době tuhých a kapalných srážek. V případě Svratouchu jsem byl nucen použít průměrné měsíční rychlosti větru. U ostatních stanic se v době dní se srážkami jeví rychlost větru v naprosté většině případů mírně vyšší. Dají se tak dokonce očekávat ještě větší chyby měření.

Graf 15d Roční chod průměrných měsíčních ztrát na aerodynamický efekt srážkoměru na Svratouchu (1961-1990). Čísla nad sloupci označují celkový korekční koeficient vypočtený modifikovanou metodou SHMÚ a vyjádřený v procentech.



5.8 Shrnutí výsledků

Prezentovány nemohly být všechny výsledky, jednotlivé velikosti ztrát pro daný den či měsíc na omočení, výpar a vítr jsou v v příložených souborech „Vypocty“.

Z výsledků můžeme vyvodit některé obecné závěry. Ztráty omočením jsou ve vyšších nadmořských výškách větší než v nížinách díky většímu počtu srážkových dní, vyšší ztráty jsou pak při používání zimní verze srážkoměru. Naopak ztráty na výpar jsou větší po celý rok v nižších polohách vlivem vyšších teplot. Nejvyšší jsou ztráty na výpar na konci nebo začátku používání zimní verze srážkoměru. Obecně se tyto dvě systematické chyby nemění příliš s nadmořskou výškou a ztráty dosahují za obě systematické chyby kolem 10 % původního naměřeného úhrnu. Naopak ztráty vlivem větru se s nadmořskou výškou a ročním obdobím mění razantně. Na horách vlivem obecně větších rychlostí větru a většího podílu tuhých srážek na celkových srážkách dochází k podhodnocení i přes 25 % jenom na vliv větru.

V Tab. 20 jsou výše diskutované výsledky sumárních korektur přehledně v jedné tabulce.

Tab. 20 Srovnání naměřených a korigovaných srážkových úhrnů na stanicích Milešovka, Bedřichov-přehrada a Čáslav-Nové Město. V prvních třech sloupcích jsou naměřené průměrné srážkové úhrny pro daný měsíc, v dalších sloupcích pak korigované úhrny vyjádřené v procentech naměřených úhrnů. Tučně jsou výsledky získané metodou vypracovanou SHMÚ (Lapin, Faško, Košťálová, 1990) netučně pak metodou Tihlárka (1995).

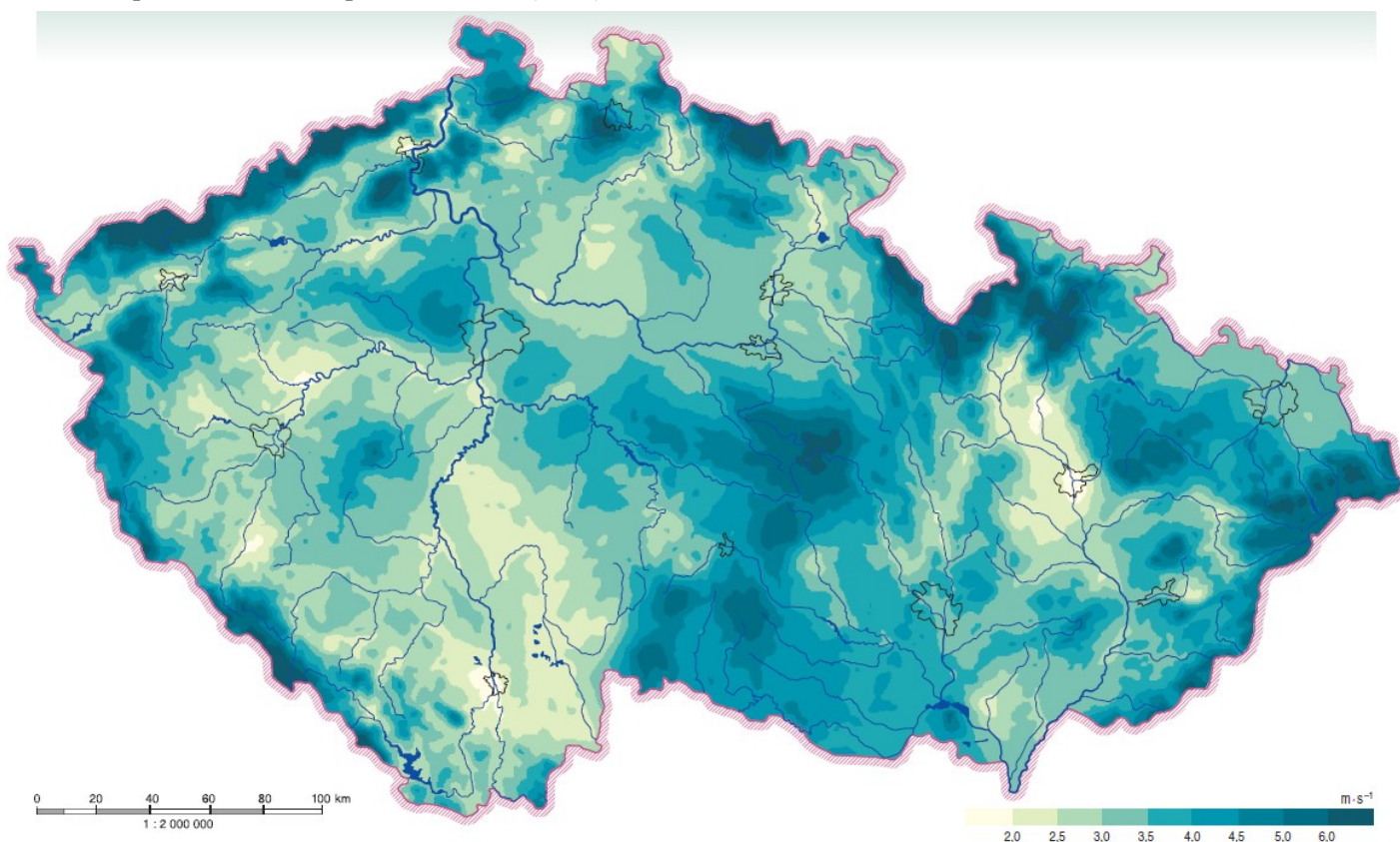
	Milešovka (1956-96) (mm)	Bedřichov (1981-90) (mm)	Čáslav (1970-79) (mm)	Milešovka (1956-96) (%)	Bedřichov (1981-90) (%)		Čáslav (1970-79) (%)	
leden	29	106	32	123	129	146	128	148
únor	29	71	29	121	134	151	128	145
březen	34	80	32	120	127	145	128	135
duben	39	85	38	113	117	130	111	120
květen	59	82	69	107	109	113	109	110
červen	69	118	89	107	107	110	108	106
červenec	69	136	61	107	106	108	109	108
srpen	71	136	82	107	106	107	108	106
září	45	83	42	109	108	111	110	111
říjen	37	75	35	116	116	126	112	119
listopad	38	106	47	120	123	144	123	132
prosinec	38	123	30	120	132	149	134	150
Rok (mm)	556,3	1201	586	625,7	1408,2	1524,7	669,2	695,4

Předkládané korigované srážky na čtyřech stanicích jsou pouhým výtahem z velké staniční sítě v Česku. Reprezentativnější hodnotu by měl větší počet stanic, to ovšem nebylo v možnostech diplomové práce. Vstupní parametry N , Q a L by bylo možné lépe vypočítat s využitím dat po automatizaci měření, se kterou se započalo na konci minulého tisíciletí. Parametr N by bylo možné lépe určit z měření automatickými srážkoměry, které měří i intenzitu deště. Následně by mohla být vytvořena regresní rovnice závislosti na běžně měřené veličině, podobně jako v rovnici 2.19. Parametr Q by bylo možno určit lépe ze staničních výkazů s pozorováním skupenství srážek. Parametr L (rychlost větru v době srážek) je možné také určit pomocí automatických měření. Porovnání průměrných rychlostí větru s rychlostmi větru v době srážek po období několika let by spolehlivě určilo rychlost větru v době srážek.

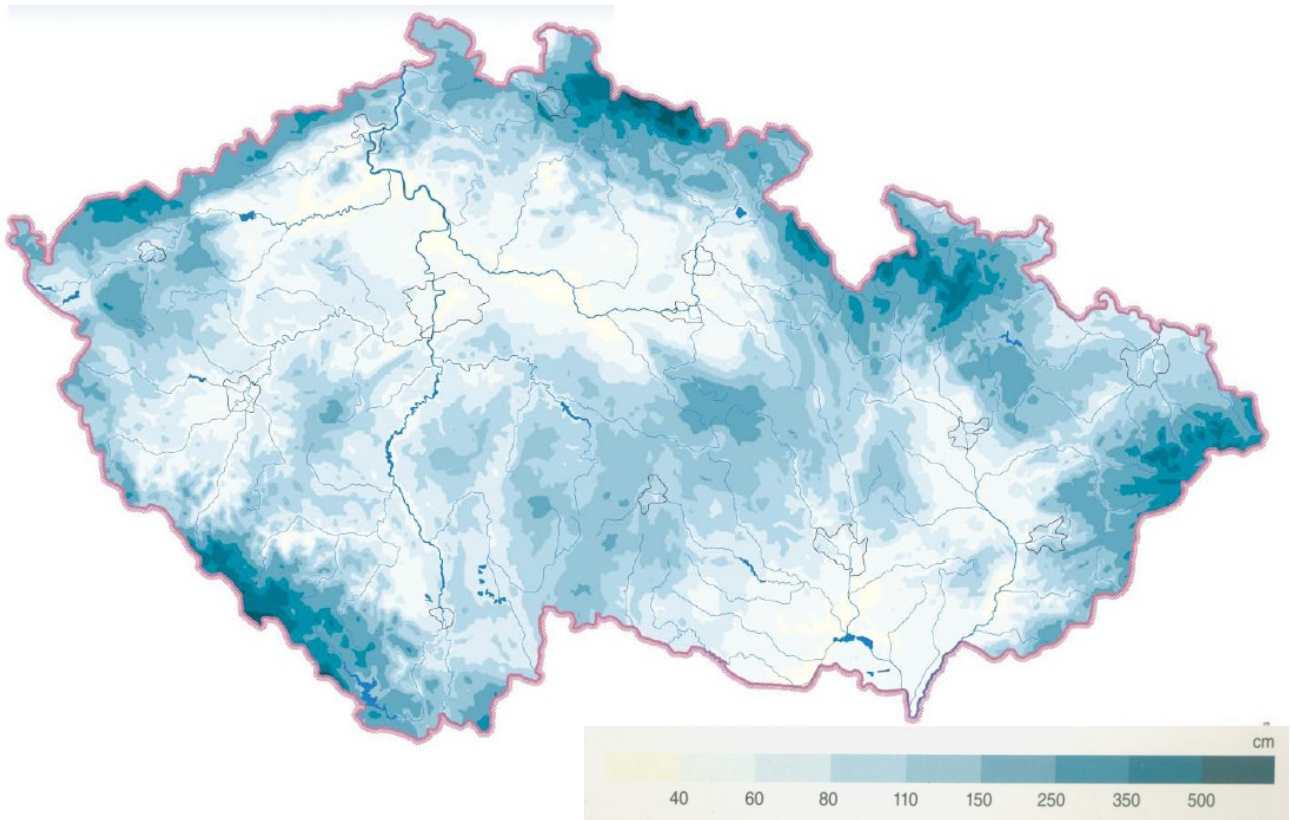
5.9. Oblasti s předpokládaným velkým podhodnocením srážek

Jak již bylo řečeno, nejvíce se na podhodnocení srážkových úhrnů podílejí sněhové srážky v zimním období za větrného počasí. Na závěr kapitoly proto uvádím dvě mapy České republiky (mapa 1, mapa 2), ze kterých by měla být patrná místa s předpokládaným velkým podhodnocením srážek. Mapy byly přejaty z Atlasu podnebí ČR (2007) a měly by daný jev dobře znázornit (průměrná rychlost větru a celkový sezónní úhrn nového sněhu). Celkové množství nové sněhové pokrývky je závislé čistě na nadmořské výšce, rozložení rychlostí větru je složitějším prvkem. Obecně jsou ve vyšších nadmořských výškách větší rychlosti větru, než v nížinách, veliké rychlosti jsou však i například na západ od Prahy a na jižní Moravě a na Ostravsku. V zimním období lze proto pravděpodobně očekávat průměrně větší systematické chyby způsobené aerodynamickým efektem srážkoměru ve zmíněných oblastech, než na většině území v podobné nadmořské výšce. Naopak v horských kotlinách s malými rychlostmi větru budou chyby menší, než by odpovídalo příslušné nadmořské výšce.

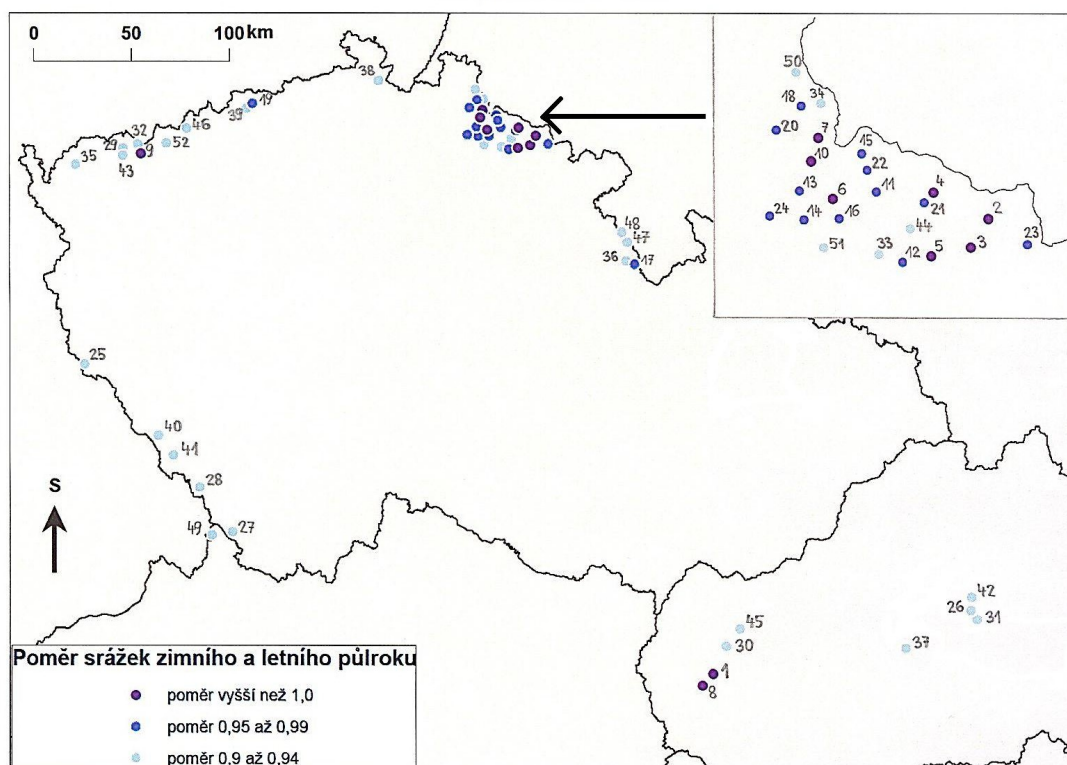
Mapa 1 Průměrná rychlost větru v zimě (prosinec, leden, únor) ve výšce 10 m (1961-2000), převzato z Atlasu podnebí Česka (2007)



Mapa 2 Průměr sezónních úhrnů výšky nového sněhu (1961-2000), převzato z Atlasu podnebí Česka (2007) (měřítko je na předešlé mapě 2)



Mapa 3 Stanice s vyrovnaným poměrem srážkových úhrnů za zimní a letní půlroku (1901-1950), převzato z (Ptáček, 2010)



6. DISKUZNÍ ČÁST

Velká část této práce byla věnována diskuzi světové i domácí literatury na téma chyb měření srážek a jejich korigování. Některé kapitoly se mohou zdát nadbytečné (kapitola věnovaná spektru velikostí srážkových částic). Pro širší pochopení dané problematiky je však nezbytné takové kapitoly uvést.

V praktické části byly aplikovány korektury vytvořené pro manuální srážkoměr Metra užívaný v bývalém Československu, který je v současnosti nahrazován automatickými srážkoměry. Pro automatické srážkoměry užívané v české meteorologické síti nebyly korekční metody ještě vytvořeny.

Metodika korigování byla zvolena taková, jaká byla prezentována v práci Tihláríka (1995), popř. Brázdila a Štěpánkové (1998) a Lapina, Faška a Košťálové (1990). Regresní rovnice byly přejaty v podobě, v jaké byly prezentovány v publikacích, postup byl také shodný.

Diskutovat lze regresní rovnice na opravu chyb způsobených aerodynamickým efektem srážkoměru (vliv větru). V případě metodiky SHMÚ jsou sestrojeny na základě dlouhodobých srovnávacích měření na stanici Bratislavě - Kolibě, což jim dodává významnosti. Chybí jim však začlenění vlivu velikosti srážkových částic (parametr N) do regresní rovnice pro kapalně srážky. Taková rovnice je v užším pohledu použitelná pouze pro nižší polohy, protože stanice Bratislava Koliba je nížinná. V případě rovnice pro tuhé nebo smíšené srážky se zdá být nevýhodou srovnávací měření se srážkoměrem s „pouhou“ Treťjakovovou ochranou, která, byť je ze štítů obepínajících srážkoměr nejúčinnější, tak zdaleka nezachytává takový úhrn jako DFIR. Tyto dva zmíněné nedostatky byly odstraněny v korekturách, které sestrojil Tihlárík (1995). V případě tamních rovnic se však zdá být sporné provedení regresní rovnice pro kapalně srážky, kde je přítomna nejistota způsobená hlavně přepočítáváním rychlosti větru na 1 m na Bratislavě-Kolibě (Tab. 9). V případě rovnice pro tuhé a smíšené srážky je nejistota přítomna vlivem sloučení tuhých a smíšených srážek a umístěním srážkoměru Metra v nestandardní výšce 2 m. Ne všude totiž může být vzájemný poměr tuhých a smíšených srážek při odpovídajících rychlostech větru takový, jaký byl na stanici Harzgerode (Tab. 10 a 11). Lepší by bylo pravděpodobně vzít tuhé a smíšené srážky zvlášť. Důvěryhodnější jsou proto vztahy sestrojené v korekturách SHMÚ.

Metoda SHMÚ, jak její autoři uvádějí, není vhodná pro aplikaci na vyšší polohy (od 500 m n. m. nebo na silně větrná místa s průměrnou rychlostí nad $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Přesto zmínění autoři aplikovali vytvořené rovnice na všechny slovenské stanice (Lapin, Faško, Košťálová, 1990). Neměl jsem tedy důvod je nevyzkoušet i na horských stanicích v Česku. Možné obejítí jejich doporučení je v provedení sumárních korektur, ve kterých je užito hodnot průměrných rychlostí větru, které nejsou většinou ani velké ani malé (okolo

$2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), a tudíž použitelné. Tak tomu bylo v případě Bedřichova. Stanice Svratouch je silně větrná, a výše prezentované výsledky lze brát jen jako orientační, možná nadhodnocené. Není totiž známo chování regresních vztahů při rychlostech nad $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, je možné, že se jejich průběh stabilizuje.

Jak již bylo zmíněno, regresní rovnice od SHMÚ neřeší vliv velikosti částic na jejich strhávání (parametr N). Na druhou stranu započítání parametru N může v některých případech korekturu zkomplikovat svou nejistotou, protože výpočet tohoto parametru je na stanicích bez automatických měření nejistý. Někdy mají jednodušší postupy spolehlivější výsledky. Navíc se ze současných měření spektra velikosti srážek pomocí disdrometrů ukazuje, že malé kapičky jsou přítomny při každé intenzitě deště (malé kapičky snáze odnese urychlené proudění nad zachytnou plochou). Metoda SHMÚ je vhodná ještě tím, že počítá s rychlostí větru ve 2 m a ne v 1 m. Vliv tření u zemského povrchu je obecně ve větší výšce méně výrazný.

Korekční rovnice metody SHMÚ a Tihláríkovy na opravu chyb vlivem větru jsou mezi sebou neporovnatelné (např. v jednom grafu) a jediným možným řešením jejich srovnání byla jejich praktická aplikace. Kromě rozdílné výšky rychlosti větru a odlišností ve skupenství srážek se liší i celková struktura rovnic. Rovnice SHMÚ využívá korekční koeficienty, kdežto Tihláríkovy rovnice konverzní faktory. Rozdíl je, jak již bylo řečeno, způsoben pravděpodobně srovnáváním pouze srážkoměrů Metra v případě metodiky SHMÚ. Avšak srážkoměry Hellmann zachytávaly na Kolibě o něco více srážek (proto také Tihlárík (1995) využil měření jamovým srážkoměrem Hellmann pro výpočet konverzního faktoru pro kapalné srážky). Strukturu rovnic nelze mezi sebou zaměňovat. Zkusil jsem aplikovat rovnici 3.5 na vztah Tihláríka (3.9), výsledky se jen nepatrně liší (do 1 %).

Ve výsledku pak dávají regresní rovnice Tihláríka (1995) především pro tuhé a smíšené srážky daleko větší hodnoty korigovaných úhrnů než metodou SHMÚ. Může se zdát, že až nadhodnocují. Z výpočtu regresního vztahu pro tuhé a smíšené srážky v případě metody Tihláríka lze očekávat nadhodnocené úhrny vlivem umístění srážkoměru Metra ve 2 m v Harzgerode. Jak již bylo zmíněno, ne vždy se také může shodovat vzájemný poměr tuhých a smíšených srážek takový, jaký byl na stanici Harzgerode v době srovnávacích měření. Ve vyšších polohách může být tento poměr jiný, ve prospěch tuhých srážek.

Vhodné se ukázalo sloučení regresní rovnice pro kapalné a smíšené srážky, jejichž průběh je podobný (Graf 10) a využití rozdělení tuhých a tekutých srážek podle Sevruka (Tab. 5) pro oblast Švýcarska v závislosti na průměrné měsíční teplotě a nadmořské výšce stanice.

Diskutovat lze vhodnost užití parametrů drsnosti při přepočtu rychlosti větru. Otázka přepočtu rychlosti větru je nejcitlivějším bodem korigování. Parametry drsnosti jsem volil stejným způsobem, jakým je počítali na stanicích pracovníci SHMÚ při

korigování srážek na Slovensku. O správnosti určení přepočtu lze diskutovat. Je také možné, že v době pořízení dat byly okolní podmínky jiné. Velikou neznámou jsou pak místní mikroklimatické podmínky, větrné turbulence, stínění překážkami a podobně.

Diskutovat lze pak především určení podílů tuhých, smíšených a kapalných srážek, které jsem řešil odlišně, než zmínění autoři. K dispozici jsem neměl pozorování na daných stanicích, musel jsem tedy určit podíl tuhých a smíšených srážek pomocí teploty. Pozorování skupenství srážek by pravděpodobně celou věc zkomplikovala, protože skupenství srážek se může během dne měnit. Bylo jednodušší, než hodnotit každý den zvlášť, vzít závislost k teplotě vzduchu. Pro jednotlivé stanice se určovala tato závislost na různě zvolené teplotě (Milešovka - teplota ve 14 h: zde padají srážky podle pozorování průměrně kolem poledne) na Čáslavi jako průměr z 14 a 21 hodiny (v této době lze nejčastěji srážky očekávat), v Bedřichově z průměrné denní teploty ve srážkovém dni (v tomto případě jsem neměl k dispozici termínové teploty). Určení intervalů teplot bylo takové, aby podíl tuhých srážek co nejvíce odpovídal rozložení parametru Q podle Sevruka (Tab. 5) popř. i podle vztahu 3.11 v případě Milešovky. V měsících duben a říjen byly největší rozdíly, kdy podle zvolené metody vycházely nižší úhrny tuhých a smíšených srážek, než v Tab. 5 nebo ve vztahu 3.11 pro Milešovku. Dle mého názoru hodnoty určené v této práci odpovídají více reálnému stavu, kdy například v říjnu se tuhé srážky na území Česka vyskytují i v nejvyšších polohách jen výjimečně (viz Tab. 14, 15 a 16).

Poznámka k určení počtu hodin zdržení srážek, kdy docházelo k výparu: metodika SHMÚ počítá dobu zdržení srážek od průměrného začátku padání srážek, kdežto metoda sestavená Tihláríkem (1995) počítá s počtem hodin od konce padání srážek, což je pravděpodobně vhodnější řešení. Výpar v době srážek je díky nasycenosti vzduchu vodní parou malý. Neznámou je ovšem samotné určení průměrné doby počátku vypadávání nebo ukončení srážek. V této práci jsem volil stejné průměrné doby začátku padání srážek, jaké byly určeny pro Slovensko (Lapin, Faško, Košťálová, 1990). Je možné, že především v zimních měsících bude doba začátku vypadávání srážek v Čechách o něco dříve.

Všechna zmíněná omezení plynoucí z konstruování korektur nás opravňují použít výsledné korigované úhrny pouze v sumárním vyjádření. Výsledky denních, ba ani měsíčních oprav nemůžeme brát závazně. Počínaje určením doby zdržení srážek a konče určením rychlosti v době vypadávání srážek, to vše přináší určité nejistoty, se kterými je třeba počítat a které se při dlouhodobém průměrování eliminují.

Z výsledků korigování se ukazuje, že pokud použijeme korektury na denních měsíčních nebo sumárních měsíčních datech, výsledky jsou prakticky stejné (musíme ovšem znát patřičné vstupní hodnoty z denních údajů). Výsledky bychom měli prezentovat spíše až v sumárním kroku, protože ty jsou nejreprezentativnější. Význam výše popsaných dvou korektur tkví tedy v klimatologii, ne operativním užití pro meteorologii.

Klimatologický význam mají korigované srážky v případě Milešovky. V ostatních případech nebylo období tak dlouhé, aby mohlo bezpečně prokázat velikosti ztrát, ke kterým na stanicích Čáslav a Bedřichov dochází. Domnívám se však, že desetileté období je postačující pro přiblížení se představě rozdílů mezi naměřenými a korigovanými srážkami na těchto stanicích. V případě stanice Svratouch nejsou výsledky závazné, protože to nedovolovala vstupní data, navíc průměrné měsíční rychlosti větru často přesahovaly $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Korigované srážky prokázaly výrazný výskyt podružných maxim v zimních měsících především na stanici Bedřichov. Jak již bylo řešeno v předchozí práci (Ptáček, 2010), v pohraničních horách Česka, především v severní části Čech je tento jev nejvýraznější (mapa 3, strana 109). Předchozí práce prokázala největší rozdíly mezi úhrny v nižších polohách a na horách při severozápadním a severním proudění, což je náležité, protože vůči tomuto proudění jsou naše hory první vyšší překážkou na pevnině. Zajímavé by bylo srovnání úhrnů z Bedřichova s nějakým blízkým totalizátorem. Ten se poblíž ale nevyskytoval.

Naopak korigováním úhrnů na Milešovce se toto zimní maximum neumocnilo. Stanice má průměrně v roce dokonce méně srážek než Čáslav. Roční chod je zde podobný jako v nížinách. Lze se domnívat, že při západním a severozápadním proudění je značné odstínění Českého středohoří. Nejvíce se orografické působení na srážky projevuje právě v zimě na teplých frontách (Sawyer, 1956, s. 378). To by mělo vysvětlovat veliké snížení srážek v zimě na Milešovce oproti Krušným horám.

Samostatnou záležitost tvoří korigování srážek na Milešovce. Výsledky korigování (Brázdil, Štěpánková, 1998) se shodují s velikostí oprav po korekci SHMÚ (Tab. 19). Znovu připomínám, že metody se liší jen v regresních rovnicích na opravu ztrát způsobených vlivem větru. Evidentně je to zapříčiněno malými rychlostmi větru v úrovni otvoru srážkoměru.

Při přepočtu rychlosti větru na Milešovce byla využita rovnice 3.10 prezentovaná Brázdilem a Štěpánkovou (1998). Simultánní měření mezi anemometrem ve výšce 22,5 m na věži observatoře a anemometrem ve výšce otvoru srážkoměru se uskutečnilo v zimě 96/97. Rychlosti větru v úrovni srážkoměru jsou dosti malé a dokonce až 5 krát nižší, než při aplikaci přepočtových rovnic. O tomto měření jsem se nedověděl bližší podrobnosti. Nelze vyloučit chyby měření, které mohly v zimním období nastat. Mohlo také dojít k tomu, že vlivem sněhové pokrývky byla skutečná výška anemometru ne 1 m nad zemí ale méně. Výška sněhové pokrývky byla např. v prosinci okolo 20 cm. Bylo by vhodné podobné měření zopakovat. I přesto se zdá, že Milešovka a můžeme říci i České středohoří jsou značně ovlivněny srážkovým stínem Krušných hor, čemuž odpovídá průměrná výška sněhové pokrývky na Milešovce, která je v porovnání se stanicemi v podobné nadmořské výšce malá – průměr za období 1960-1996 lednu a únoru je pouhých 18 cm.

Nyní ke srovnání výsledků korektur s výsledky Lapina (1991). Při porovnání výsledků korigovaných úhrnů metodou SHMÚ (Tab. 20) v Čáslavi a Bedřichově, vidíme, že výsledky oprav se do značné míry shodují s Tab. 8 pro příslušnou nadmořskou výšku na Slovensku. Stanice Čáslav vykazuje lehce vyšší hodnoty korekčních koeficientů v zimním období, než by odpovídalo nadmořské výšce, je to dáno pravděpodobně větrností lokality. Naopak v zimním období je na Bedřichově vidět při srovnání menší korekční koeficienty. Opět bude na vině vítr, lokalita klimatologické stanice Bedřichova je chráněna proti větrům od východu.

Podobně můžeme hrubě srovnat velikost korekčních koeficientů mezi výsledky v Tab. 20 a v Tab. 12. Hodnoty přibližně odpovídají nadmořským výškám (Poprad – Bedřichov apod.). Výsledky Tihlárkových korektur dávají vždy vyšší hodnoty, než v případě SHMÚ.

Posoudit, které výsledky mají blíže ke skutečnému úhrnu, není jednoduché. V porovnání s korekturami v blízké cizině (Švýcarsko: Sevruk, 2004) a (Německo: WMO, 1998 – třetí mezinárodní srovnávací měření), se dá konstatovat, že korekce metodou SHMÚ a Tihlárka dávají v případě deště odpovídající výsledky. V případě tuhých a smíšených srážek vypočítává metoda SHMÚ lehce až mírně podhodnocené a metoda Tihlárka odpovídající až nadhodnocené korigované srážkové úhrny. Od větších rychlostí větru v zimním období se obě korekční metody silně rozcházejí (korigované úhrny metodou Tihlárka jsou daleko větší). Je to způsobeno účinnějším zachytem srážkoměru DFIR (srovnávací měření v Harzgerode) v porovnání s Treťjakovovou ochranou (srovnávací měření na Kolibě). DFIR je právě při vyšších rychlostech účinnější v zachytávání srážek (WMO, 1998, s. 31).

Pro srovnání: výsledky několikaletých srovnávacích měření na stanici Harzgerode prezentované v (WMO, 1998) nám mohou přiblížit se představě o skutečném rozdílu naměřených a korigovaných srážek v oblastech nižších poloh střední Evropy. Průměrná rychlost větru v době tuhých srážek byla ve výšce 1 m $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což značí na větrnější lokalitu. Poměr úhrnů DFIR a Hellmann (1 m) byl u tuhých srážek **1,69** a u smíšených **1,46** (převaha tuhé složky) a **1,23** (převaha kapalné složky). Na ostatních stanicích (Finsko, Kanada apod.) byly výsledné rozdíly podobné. Je vidět, že rozdíly jsou opravdu velké, a metodika SHMÚ proto podhodnocuje korigování tuhých srážek.

Nakonec této kapitoly uvádím poznámky Lednického a Priadky (1984, s. 23). Po ukončení hlavních srovnávacích pozorování na Kolibě doporučují pozměnit srážkoměr Metra k podobnosti srážkoměru Hellmann. Nahrazení pozinkované oceli hliníkem by snížilo míru omočení a zamezilo korozi. Zdvojení stěn nádoby by zmírnilo výpar, který je ze srážkoměru Metra až neúměrný. Uprostřed nádoby pak doporučují umístit kříž proti vyvátí sněhu ze srážkoměru. Tato doporučení se neuskutečnila a blízké době se přešlo na automatizaci.

Za uzavřenou podle Lapina a Priadky (1987) je považována problematika omočení a výparu ze srážkoměru. Otázka vlivu větru, který se významně podílí na ztrátách, není ještě uzavřena a bylo by potřeba provést srovnávací měření s Treťjakovovou ochranou na dalších stanicích. Dle mého názoru můžeme za uzavřené považovat i korekce pro kapalné a potažmo i smíšené srážky. Metodika korigování tuhých srážek ještě není vytvořena z vhodných srovnávacích měření, jako v případě kapalných srážek.

7. SHRNUÍ

Korekce systematických chyb naměřených srážkových úhrnů jsou jediným možným odhadem skutečně spadlých srážek. V naprosté většině případů můžeme konstatovat, že změřený úhrn srážek z bodového měření je více či méně podhodnocen. Ještě omezeněji nemůžeme postihnout chyby náhodné, nesystematické, které mohou v ojedinělých případech představovat také dlouhodobé podhodnocování srážek, především při nedodržení metody měření pozorovatelem, nebo při nevhodně umístěném srážkoměru. Rozdíly v podhodnocených úhrnech na jednotlivých stanicích na daném území nám tak mohou přinést zkreslený obraz o srážkovém poli. Korektury se toto snaží napravit.

Z povahy korekčních postupů, jež korigují naměřené srážky, plyne fakt, že nemohou spolehlivě a přesně daný nezměřený úhrn vyjádřit. Je to dané tím, že velikost systematických chyb je přímo ovlivňována dalšími meteorologickými ukazateli, teplotou vzduchu, spektrem velikostí (hmotností) srážkových částic a rychlostí větru. Protože se jedná především u rychlosti větru a spektra velikostí srážkových částic o velice proměnlivé ukazatele, je prakticky nemožné v případě chyb způsobených strháváním srážkových částic mimo otvor srážkoměru daný „ztracený“ úhrn přesně postihnout.

Měření srážek v současné době stále není v takové kvalitě, jaká by byla potřeba například pro účely klimatologické a je v naší snaze ho zlepšovat. Můžeme říci, že měření srážek patří k nejobtížněji měřitelným meteorologickým prvkům. Ačkoliv se bodové měření může znát jednoduché, je zatíženo mnoha chybami, které se například při měření teploty nebo tlaku vzduchu v takové míře nevyskytují.

Problematika, které se celá tato práce věnovala, není světově ani v tuzemsku příliš diskutována, snad proto, že se jedná o komplexní jev a výsledky jsou odhady. Rešeršní část práce tak může posloužit jako souhrnný zdroj informací o dané problematice systematických chyb měření srážek v českém jazyce pro odbornou veřejnost. Za nejvhodnější a nejhodnotnější soudobý zdroj informací považuji knihu Sevruka (2004) napsanou v němčině a obsáhlou závěrečnou zprávu třetího mezinárodního srovnávacího měření (WMO, 1998) napsanou v angličtině.

Výzkumná část této diplomové práce řešila aplikaci korekčních vztahů na určení velikosti ztrát tří hlavních systematických chyb při měření srážek srážkoměrem Metra. Vybrány byly čtyři stanice v Česku, z čehož tři ve vyšších polohách a jedna nízko položená. Výsledky ukázaly, že roční chod ztrát na omočení a výpar je ovlivněn verzí srážkoměru Metra (zimní/letní). Při užití zimní verze jsou ztráty vyšší v obou případech. Úhrnné ztráty na omočení a výpar se příliš nemění a za měsíc činí dohromady 3-8 mm v závislosti na ročním období a nadmořské výšce. Velikost ztrát omočením stoupá s nadmořskou výškou vlivem narůstání počtu srážkových dnů a naopak s výškou klesá výpar vlivem nižších průměrných teplot. Možné jsou pak odchylky v měsících s malým nebo velkým počtem srážkových dní.

Nejviditelnější jsou ztráty způsobené aerodynamickým efektem srážkoměru. Zde je patrná silná závislost s nadmořskou výškou. Na horských stanicích, s vysokým podílem tuhých srážek a vysokými rychlostmi větru mohou pak dosahovat ztráty strháváním částic mimo zachytnou plochu v zimních měsících až 30 % naměřeného úhrnu (Bedřichov). V případě nížinné Čáslavi pak až 15 %.

Ročně se navýšení srážek po opravě na omočení, výpar a vítr projevilo nárůstem přibližně o 14 % na Milešovce, 16 % v Čáslavi, 20 % v Bedřichově a 23 % na Svatouchu (zde bez uvažování ztrát omočením a výparem).

Po korekturách se celkově mění roční chod srážek na všech stanicích. Vždy je přítomno podružné zimní maximum srážek. V horských polohách je dokonce tak výrazné, že v zimních měsících může pravděpodobně spadnout více srážek než v létě. Tento jev by se dal popsat jako střetnutí vlivů oceánického a kontinentálního. V současné době klimatických změn se zdá být oceánský vliv na roční chod srážek umocňován. Ubývá jarních srážek a přibývá zimních. Není to ale zatím průkazné.

Význam korektur je především klimatologický, „zpětný“. Význam mají pro lepší představu srážkového pole, a všude tam, kde se uvažuje vodní bilance v krajině. Význam není v nalezení přesných úhrnů srážek, které nebyly změřeny, ale v přiblížení se skutečnosti. Díky korekcím systematických chyb měření srážek můžeme také reálněji odhalit dlouhodobé trendy ve vývoji srážkových úhrnů. Můžeme také lépe kalibrovat radarové odrazy.

Na závěr bych konstatoval, že korektury mají význam především v letním období, kdy mohou srážky představovat přímé ohrožení v podobě povodní.

8. ZÁVĚR

Závěrem by bylo vhodné se zmínit o tom, kterou ze dvou metod pro korekci chyb způsobených vlivem větru je vhodnější aplikovat na naměřené úhrny srážkoměrem Metra. Obě metody mají své přednosti a nedostatky. Ovšem metoda sestavená SHMÚ se opírá o dosti dlouhá srovnávací měření a její přístup je přímější a jednodušší, což může být bráno jako výhoda. Není však aplikovatelná na vyšší polohy, kde nás korigování srážek zajímá nejvíce. Regresní vztahy Tihláríka jsou aplikovatelné i na vyšší polohy, jejich konstrukce je ovšem složitější, což může přinést jistou míru nejistoty. Navíc výpočet regresních vztahů je méně průhledný. Ve výsledku pak dávají vztahy SHMÚ podhodnocené a vztahy Tihláríka odpovídající, možná až nadhodnocené výsledky. V zimě musíme počítat s různě velkým podhodnocením v případě metodiky SHMÚ. Vždy je však lepší uvažovat např. do hydrologických bilančních rovnic podhodnocené, než nadhodnocené odhady skutečně spadlých srážek.

Metodika SHMÚ může být v přiblížení použita i na vyšší polohy, pokud se aplikují průměrné rychlosti větru, které by však neměly přesahovat $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Celkově se zdá být metoda SHMÚ vhodnější pro tuhé a smíšené srážky, pro kapalné srážky zas regresní rovnice sestavené Tihláríkem za předpokladu přesného určení parametru N .

Na závěr bych se ještě zmínil o terminologii. Ta není ještě v Česku v případě výše probírané problematiky plně vyjasněna. V literatuře se užívá termínů protivětrná ochrana nebo štít proti větru a myslí se tím stejný objekt. Ochranou můžeme nazvat obecně zařízení proti zesílení větru nad záchytnou plochou, štítem pak ochrany připevněné přímo ke srážkoměru, ploty pak ochrany kolem srážkoměru. Dále je přítomno dubletní používání termínů omočení a smáčení. Byť se může zdát výraz omočení „hrubý“, vystihuje lépe daný proces než výraz smáčení. Existuje také několik možných vyjádření problematiky strhávání srážkových částic vlivem zesíleného proudění nad srážkoměrem. Daný proces nelze totiž jednoduše popsat jedním slovem, vhodné je dle mého názoru například užití termínu „aerodynamický efekt srážkoměru“ (Brázdil, Štěpánková, 1998).

V budoucnu by bylo vhodné se zaměřit na zpětné provedení plošných korektur na území Česka pro srážkové úhrny naměřené srážkoměrem Metra. Získali bychom tak lepší pohled na celkové rozložení srážek na našem území v průběhu roku. K tomu by bylo vhodné využít současná automatická měření pro výpočet potřebných parametrů, které do korekčních rovnic vstupují. Jedná se zejména o určení rychlosti větru v době srážek, podíl tuhých, smíšených a kapalných srážek na celkových srážkách, průměrnou dobu zdržení nebo výpočet parametru N pomocí intenzit. Zjištěné hodnoty by bylo možné posléze vyjádřit obecně regresními rovnicemi s využitím korelace s vhodným meteorologickým prvkem. Takovéto vztahy by mohly doplnit stávající model korekcí. K tomu je zapotřebí

velikých objemů dat. V případě spektra velikosti srážkových částic nám mohou pomoci současná měření disdrometry.

Bylo by také nadmíru vhodné provést srovnávací měření automatických srážkoměrů od společnosti Meteoservis, instalovat protivětrné ochrany, a zkoumat rozdíly v naměřených úhrnech. Letošní zimu (2011/2012) probíhalo takové srovnávací měření na Lysé hoře. Na váhový srážkoměr byla nainstalována Treťjakovova ochrana (štít) proti větru. První předběžné výsledky srovnání úhrnů měřených váhovým srážkoměrem s ochranou s manuálními měřeními vypracovala RNDr. Stanislava Kliegrová, Ph.D. z hradecké pobočky ČHMÚ. Z výsledků je patrné, že se zavedením Treťjakovovy ochrany se jen velice nepatrně v zimním období zvýšily úhrny naměřené váhovým srážkoměrem (přibližně o 2 mm měsíčně více oproti manuálu, než před zavedením ochrany). Na vině mohou být rozdílné rychlosti větru u otvoru srážkoměru mezi manuálním a váhovým srážkoměrem, je však také možné, že Treťjakovova ochrana nebyla dostatečně účinná díky tvaru váhového srážkoměru (Obr. 8). Primárně je totiž určena na srážkoměry s celistvým válcovitým tvarem bez zužování se v horní části. Snažil jsem se záležitost podobných srovnávacích měření nějak více podnitit. Společnost Meteoservis by další podobná srovnávací měření v síti stanic ČHMÚ uvítala. Hradecká pobočka ČHMÚ by podobné srovnávací měření chtěla provést na vysokohorských krkonošských stanicích. Vše je ovšem otázka financí, které v současnosti na podobné projekty nejsou, jak mi bylo odpovězeno z oddělení klimatologie ČHMÚ.

Váhový srážkoměr od společnosti Meteoservis se jeví jako velice účinný v zachytávání srážek a s protivětrnou ochranou by byl ještě účinnější.

Protivětrné ochrany se ve světových meteorologických sítích nezavádějí. ČHMÚ i jiné světové ústavy to argumentují tím, že by taková instalace narušila homogenitu měření (Lapin, Priadka, 1987 ,s. 14). Homogenitu přitom narušila již proběhnuvší automatizace. Na stanicích s dlouholetým pozorováním, které má velký klimatologický význam, by mohlo možné měřit srážky s ochranou i bez ochrany, ale na jiných místech se to zdá být zbytečný argument.

V současnosti připravuje Světová meteorologická organizace 5. mezinárodní srovnávací měření, tentokrát se bude konat v terénu, budou srovnávány opět automatické srážkoměry. ČHMÚ již měl obdržet pozvání.

Na závěr bych konstatoval, že vůbec nejdůležitější je, aby bodové měření srážek bylo dostatečně reprezentativní pro své okolí.

9. SEZNAM LITERATURY

Knižní zdroje:

ALLERUP, P., MADSEN, H. (1979): Accuracy of point precipitation measurements. Danish Meteorolog. Inst. Climatolog. Pap., č. 23, s. 205-209

ALLERUP, P., MADSEN, H. (1980): Accuracy of point precipitation measurements, Nord. Hydrol., 11(2), s. 57-70

ALLERUP, P. (1985): On the Construction and Fit of Statistical Model of Aerodynamic Measurement Errors in Point Precipitation Measurement. Correction of Precipitation Measurement. Ziercher Geographische Schriften, No. 23, s.211-216

Atlas podnebí Česka (2007). ČHMÚ, Praha; Univerzita Palackého, Olomouc, 255 s.

BOGDANOVA, E. G. (1966): Isledovanie vetrovoj pogrešnosti izmerenija osadkov in: Trudy GGO 195. Voprosy metodiky izmerenija atmosferných osadiv. Hidrometeoizdat. Leningrad, 1966, s.40-62

BOGDANOVA, E. G., GOLUBEV, V. C. a kol., (2002): Novaja model' korrekcirovki izmerenných osadkov i jeho primenenie v poľarných pajonach Rossii. Meteorologia i Hidrologia, č. 10, s. 68-94

BOGDANOVA, E. G., ILIN, B. N., GAVRILOVA, C. JU. (2007) : Sovremennyye metody korrekcirovki izmerenných osadkov i rezul'taty ich primenenija v poľarných regionach Rossii i Severnoj Ameriki. Meteorologia a gidrologia, č. 4, s. 21-44

BRÁZDIL, R., ŠTĚPÁNKOVÁ, P. (1998): Korekce systematických chyb při měření srážek na Milešovce v období 1956-1996. Meteorologické zprávy, 51, č. 5, s. 142-148

BRÁZDIL, R., ŠTEKL, J, a kol. (1999): Klimatické poměry Milešovky, Academia, Praha, 433 s.

BURDA, V. (2006): Porovnání srážkoměrů na observatoři Libuš srpen 2005–březen 2006. Zpráva ČHMÚ, Praha

COUFAL, L., LANGOVÁ, P., MÍKOVÁ, T. (1992): Meteorologická data na území ČR za období 1961-90. Národní klimatický program ČSFR – svazek 8. ČHMÚ, Praha, 160 s.

ČHMÚ, (1994): Návod pro pozorovatele srážkoměrných stanic, Metodický předpis č. 11a, Praha 1994

ČHMÚ, (2003): Návod pro pozorovatele meteorologických stanic ČSSR, Metodický předpis č. 13, Ostrava 2003

FIŠER, O., SCHÖNHUBER, M., PEŠICE, P., (2002): First results of DSD measurement by videodisdrometer in the Czech Republic in 1998-1999. Studia Geophysica et Geodætica. 46, s. 485-505

GAJDUŠKOVÁ, B. (2006): Hodnocení systematických chyb při měření srážek na stanicích ČHMÚ standardním staničním a automatickým srážkoměrem. Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Brno 2006. 41 s.

GAJDUŠKOVÁ, B. (2009): Porovnání manuálních a automatických měření vybraných meteorologických prvků v síti stanic ČHMÚ. Diplomová práce. Geografický ústav, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita v Brně, 80 s.

GOLUBEV, V. S., SIMONENKO, A. V. (1993): Comparasion Results of Precipitation Maesured by The Similar Type Gauges over the Surfaces With Different Roughness in: WMO - SEVRUK, B., LAPIN, M. (1993): Precipitation Measurement & Quality Control, Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava a Swiss Federal Institute of Technology, Department of Geography, Zurich, s. 103-111

GREGOR, A. (1954): Klimatický kalendář Milešovky. Meteorologické zprávy, 7, č. 4, s. 93-95

GÜNTHER, T., GRAF, B. (1989): Wind Related Errors in Different Methods of Solid Precipitation Measurement in: WMO - SEVRUK, B. (1989): Instruments and Observing Methods, Report No. 48, International Workshop on Precipitation Measurement (St. Moritz, Switzerland, 3-7 December 1989) WMO/TD. No. 328. Secreteriat of the World Meteorological Organization – Geneva, Switzerland, s. 127-133

GÜNTHER, T. (1993): German Participation in the WMO Solid Precipitation Intercomaprison: Final Results. In: WMO - SEVRUK, B., LAPIN, M. (1993): Precipitation Measurement & Quality Control, Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava a Swiss Federal Institute of Technology, Department of Geography, Zurich, s. 93-102

HRUBEŠ, P., KOCOUREK, F., (1955): Návod pro pozorovatele povětrnostních stanic v ČSR, Hydrometeorologický ústav Praha, 160 s.

KOPÁČEK, J., BEDNÁŘ, J. (2005): Jak vzniká počasí. Karolinum, Praha, 226 s.

KVĚTOŇ V., ZAHRADNÍČEK J., ŽÁK, M. (2004): Kontrola kvality a digitalizace ombrogramů v ČHMÚ. Meteorologické zprávy, 57, č. 2, s. 47-52

LAPIN, M., LEDNICKÝ, V., PRIADKA, O., (1985). Upresnenie systematických chýb československých štandardných zrážkometerov METRA 886. [Závěrečná správa výskumnej úlohy II-5-1/01.] Bratislava: SHMÚ.

LAPIN, M., PRIADKA, O. (1987): Korekcie systematických chýb merania atmosférických zrážok. Meteorologické zprávy, roč. 40, č. 1, s. 9-19

LAPIN, M., PRIADKA, O. (1989) : Results of Precipitation Intercomparison Measurements by Various Precipitation Gauges on Polygon Bratislava – Koliba for Period 1975-1988 in: WMO - SEVRUK, B. (1989): Instruments and Observing Methods, Report No. 48, International Workshop on Precipitation Measurement (St. Moritz, Switzerland, 3-7 December 1989) WMO/TD. No. 328. Secreteriat of the World Meteorological Organization – Geneva, Switzerland, s. 101-104

LAPIN, M., FAŠKO, P., KOŠŤÁLOVÁ, J. (1990): Zhodnotenie zrážkových pomerov na území Slovenska po korekcii systematických chýb meraní zrážok. Meteorologické zprávy, 43, č. 4, s. 101-105

LAPIN, M. a kol. (1991): Zhodnotenie zrážkových pomerov na území Slovenska po korekcii systematických chýb meraní zrážok. Vodohospodársky časopis, 39, č. 3, s. 207-220

LAPIN, M. (1993): Solid Precipitation Measurement Intercomparison in Slovakia in: WMO - SEVRUK, B., LAPIN, M. (1993): Precipitation Measurement & Quality Control, Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava a Swiss Federal Institute of Technology, Department of Geography, Zurich, s. 116-119

LEDNICKÝ, V., PRIADKA, O. (1979): Straty zrážok vzniklé omočením srážkoměrných nádob zrážkomera METRA 886. Práce a štúdie 21. Bratislava, SHMÚ, s. 2-9.

NESPOR, V. (1993): Numerical Simulation and Wind Tunnel Measurements: aerodynamics of precipitation gauges in: WMO - SEVRUK, B., LAPIN, M. (1993): Precipitation Measurement & Quality Control, Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava a Swiss Federal Institute of Technology, Department of Geography, Zurich, s. 127-134

NESPOR V., B. SEVRUK, (1999): Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation, J. Atmosf. Ocean. Techn., 16(4), s. 450-464

PETROVIČ, Š., COUFAL, L., (1976): Podíl srážek různého druhu na jejich celkovém množství na vybraných stanicích v ČSSR In: Práce a štúdie 15. Bratislava, SHMÚ, s. 24-36

PRIADKA, O., LEDNICKÝ, V. (1976): Príspevok k problematike presnosti merania zrážok. In: Práce a štúdie 15. Bratislava, SHMÚ, s. 99-117

PTÁČEK, T., (2010): Zvláštnosti režimu atmosférických srážek ve středních a vyšších polohách Česka a Slovenska. Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Praha, 75 s.

RUBEL, F., HANTEL, M., (1999): Correction of Daily Rain Gauge Measurements in the Baltic Sea Drainage Basin. Nordic Hydrology. roč. 30, s. 191-208

ŘEZÁČOVÁ D., NOVÁK, P., KAŠPAR, M., SETVÁK, M. (2007): Fyzika oblaků a srážek, Academia, Praha, 576 s.

SAWYER, J. S. (1956): The Physical and Dynamical Problems of Orographic Rain. Weather, 11, s. 375-381

SEVRUK, B. (1982): Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use. WMO Operational Hydrology Report No. 21. Secretariat of the World Meteorological Organisation. WMO-No.589, 91 s.

SEVRUK, B., KLEMM, S. (1989a): Instruments and Observing Methods Report No. 39. Catalogue of National Standard Precipitation Gauges. World Meteorological Organization, 27 s.

SEVRUK, B., KLEMM, S. (1989b): Types of Standard Precipitation Gauges in: WMO - SEVRUK, B. (1989): Instruments and Observing Methods, Report No. 48, International Workshop on Precipitation Measurement (St. Moritz, Switzerland, 3-7 December 1989) WMO/TD. No. 328. Secretariat of the World Meteorological Organization – Geneva, Switzerland, s. 227-232

SEVRUK, B., ZAHLAVOVA, L. (1993): Estimation of Past Changes in Precipitation Gauge Site Exposure in: WMO - SEVRUK, B., LAPIN, M. (1993): Precipitation Measurement & Quality Control, Proceedings of

the International Symposium on Precipitation and Evaporation. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava a Swiss Federal Institute of Technology, Department of Geography, Zurich, s. 181-182

SEVRUK, B. (1993): WMO Precipitation Measurement Intercomparisons in: WMO - SEVRUK, B., LAPIN, M. (1993): Precipitation Measurement & Quality Control, Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava a Swiss Federal Institute of Technology, Department of Geography, Zurich, s. 120-121

SEVRUK, B., (2004): Niederschlag als Wasserkreislauelement. Theorie und Praxis der Niederschlagsmessung. Zurich-Nitra: Eigenverlag ETH Zurich, 200 s.

SHMÚ, (1972): Návod pro pozorovatele meteorologických stanic ČSSR, sborník předpisů, svazek 7, Slovenský hydrometeorologický ústav Praha

SOKOL, Z., ŘEZÁČOVÁ, D., PEŠICE, P., (2003): Odhad bodových i plošných srážek s využitím srážkoměrných a radarových dat. Meteorologické zprávy, 56, č.1, s. 1-12

ŠAMAJ, F. (1973): Systematické chyby merania zrážok in: Vplyv klimatických prvkov na hydrologické procesy. HMÚ, Bratislava

ŠEFTER, J., I., SLÁDEK, I. (1991): Využití energie větru. SNTL, 266 s.

TIHLÁRIK, R. (1995): Chyby meraní zrážok a ich korekcie. Dizertační práce doktoranského studia. Vedoucí práce: Prof. Ing. Milan Dzubák, Csc. .Stavební fakulta slovenské technické univerzity, Bratislava, 164 s.

WAUBEN, W., 2008: KNMI contribution to the WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges, Instrumental Department, INSA-IO, KNMI, 164 s.

WMO (World Meteorological Organization) - SEVRUK, B. (1989): Instruments and Observing Methods, Report No. 48, International Workshop on Precipitation Measurement (St. Moritz, Switzerland, 3-7 December 1989) WMO/TD. No. 328. Secreteriat of the World Meteorological Organization – Geneva, Switzerland, 584 s.

WMO (World Meteorological Organization) - SEVRUK, B., LAPIN, M. (1993): Precipitation Measurement & Quality Control, Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava a Swiss Federal Institute of Technology, Department of Geography, Zurich

WMO (World Meteorological Organization) - GOODISON, B.E., LOUIE, P.Y.T., YANG, D., (1998): WMO Solid Precipitation Masurement Intercomparison – Final Report, World Meteorological Organization – Instruments and Observing methods, Report No. 67

WMO (World Meteorological Organization) - LANZA, L. a kol., (2005): WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges, De Bilt (The Netherlands), Genoa (Italy), Trappes (France), final report, WMO, s. 63

WMO (World Meteorological Organization), (2008): Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO No.8, Chapter 6, s 135-155

YE, B., YANG, D., DING, Y., HAN, T., KOIKE, T. (2004): A Bias-Corrected Precipitation Climatology for China, Journal of Hyrometeorology, č. 5, s. 1147-1160

Internetové zdroje:

GRUZA, G., V., MEŠČERSKAJA, A. V. a kol., (2008) Izmenenija klimata Rossii za period instrumental'nykh nabljudenij, [on-line], [cit. 2011-10-22], dostupné z:

<http://climate2008.igce.ru/v2008/v1/v1-3.pdf#struments>

CHVÍLA, B., SEVRUK, B.(2008): Intercomparison Measurements by the Ground Level and Elevated Disdrometer, [on-line], [cit. 2011-12-05], dostupné jako soubor MS WORD na internetu.

KIRCHHOFER, W., SEVRUK, B. (1992): Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951-1980. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Part 2.2. Bern, dostupné z:

http://www.hades.unibe.ch/hades_d/index.htm

SEVRUK, B., CHVÍLA, B., ONDRÁŠ, M.: Intercomparison Measurement of Recording Precipitation Gauges in Slovakia, [on-line], [cit. 2011-07-17], dostupné z:

http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-82-TECO_2005/Posters/P3%2829%29_Slovakia_Chvila.pdf

ŠÁLEK, M., (2010): Operational application of the precipitation estimate by radar and raingauges using local bias correction and regression kriging, ERAD 2010 – The Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 6 s., [on-line], [cit. 2012-01-24]dostupné z:

http://www.erad2010.org/pdf/POSTER/01_QPE%281%29/11_ERAD2010_0083_extended_modificat.pdf

The Baltic Sea Experiment (BALTEX) [on-line], [cit. 2011-08-25], dostupné z:

<http://www.baltex-research.eu/>

YANG, D. a kol.: Development of Bias-Corrected Precipitation Dataset and Climatology for the Arctic Regions (dlouhodobý výzkumný projekt), [on-line], [cit. 2012-01-09], oficiální stránky projektu:

http://ine.uaf.edu/werc/people/yang/bcp/project_description.htm

Mapový podklad pro Obr.14: [on-line], [cit. 2012-02-03]

<http://free-top.tym.cz/download.php?ds=slepa-mapa-cr>