

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Petr Frolík

Využití extrapolace radarového echa pro kvantitativní předpověď srážek

Katedra meteorologie a ochrany prostředí

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Petr Novák, PhD.
Studijní program: Fyzika, Meteorologie a klimatologie

Děkuji vedoucímu diplomové práce RNDr. Petru Novákovi, Ph.D. za vstřícnost, odborné vedení a v neposlední řadě za poskytnutou literaturu. Dále děkuji Českému hydrometeorologickému ústavu za poskytnutí potřebných dat. Můj vřelý dík patří i všem ostatním, kteří se na vzniku této práce podíleli.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne *1.8.2007*

Petr Frolík

Obsah

	Abstrakt	4
1	Úvod	5
2	Základy radiolokačních měření	7
2.1	Meteorologické radary	7
2.2	Teorie radiolokačních měření	7
2.3	Marshall – Palmerův vztah	9
2.4	Objemová měření	10
2.5	Zdroje chyb radiolokačních měření	11
2.6	Radarové odhady srážek	13
3	Využití radiolokačních měření pro krátkodobou předpověď srážek	14
3.1	Nowcasting srážek	14
3.2	Metoda COTREC	14
3.2.1	Získání pohybového pole	15
3.2.2	Časová extrapolace	16
3.2.3	Zdroje chyb	17
4	Vstupní data	18
4.1	Odhad srážek v ČHMÚ	19
4.1.1	CZRAD	19
4.1.2	Odhad srážek	20
4.1.3	Adjustace radarových odhadů	21
4.1.4	Kombinace radarových odhadů se srážkoměrnými měřeními – merge	21
4.2	Implementace metody COTREC v ČHMÚ	22
4.3	Aladin	24
4.4	Formát vstupních dat	24
5	Výsledky a diskuze	25
5.1	Zpracované období	25
5.2	Metody hodnocení předpovědí	30
5.3	Výsledky	30
5.3.1	Zhodnocení za celé období	30
5.3.2	Vyhodnocení pro jednotlivé měsíce	35
5.3.3	Celé období na jednotlivých povodích	38
5.3.4	Experimenty s daty numerického předpovědního modelu Aladin	47
6	Shrnutí	50
7	Závěr	51
	Reference	52
	Seznam zkratk	55

Název práce: *Využití extrapolace radarového echa pro kvantitativní předpověď srážek*

Autor: *Petr Frolík*

Katedra (ústav): *Katedra meteorologie a ochrany prostředí*

Vedoucí diplomové práce: *RNDr. Petr Novák, PhD., ČHMÚ*

e-mail vedoucího: *petr_novak@chmi.cz*

Abstrakt:

Radiolokační měření jsou v současné době pro meteorologické služby nepostradatelná. Stále častěji se tato data využívají pro kvantitativní předpověď srážek a nebezpečných jevů spojených s konvekcí na velmi krátkou dobu (tzv. nowcasting). Krátkodobá předpověď srážek nalézá své uplatnění mimo jiné v hydrologických aplikacích, kde umožňuje poskytnout včasnou výstrahu před lokálními záplavami i upřesňovat předpověď velkoprostorových srážek. Tato práce se zabývá ověřením využitelnosti nowcastingové metody COTREC založené na extrapolaci radarového echa pro kvantitativní předpověď srážek. Na testovaném období 1.4.-30.9.2006 byla hodnocena kvalita předpovědi metodou COTREC až na 3 hodiny dopředu. Dále bylo provedeno srovnání s výsledky numerického předpovědního modelu Aladin. Důraz byl kladen na ověření využitelnosti výsledků metody COTREC pro hydrologické účely. Pro ověření se proto použily hodinové srážkové úhrny vztažené na jednotlivá povodí. Předpovězené srážkové úhrny pak byly porovnávány s optimálním operačně dostupným odhadem srážek, což je kombinace adjustovaného radarového odhadu s daty ze srážkoměrné sítě.

Klíčová slova: *extrapolace, COTREC, nowcasting, odhad srážek, radar*

Title: *Utilization of radar echo extrapolation for quantitative precipitation forecast*

Author: *Petr Frolík*

Department: *Department of Meteorology and Environment Protection*

Supervisor: *RNDr. Petr Novák, PhD., ČHMÚ*

Supervisor's e-mail address: *petr_novak@chmi.cz*

Abstract:

At present time weather radar data are essential for national meteorological services. Utilization of this data for quantitative precipitation forecast and severe weather prediction for short period (nowcasting) becomes more and more common. Increasing interest for quantitative precipitation forecasts can be noticed in hydrological applications, where it can give early warning on flash floods and can improve large scale precipitation forecasts. This paper verifies usability of COTREC nowcasting method based on extrapolation of radar echo for quantitative precipitation forecast. Quality of COTREC forecast up to 3 hours was investigated on data from 1.4.2006 to 30.9.2006. Comparison of COTREC method with Aladin NWP model forecasts was also made. Hourly mean precipitation estimates on catchments were chosen for comparison because of verification focused mainly on utilization of the forecasts in hydrological applications. Forecasted precipitation estimates were compared with optimal operationally available precipitation estimate – adjusted radar estimate combined with available raingauge measurements.

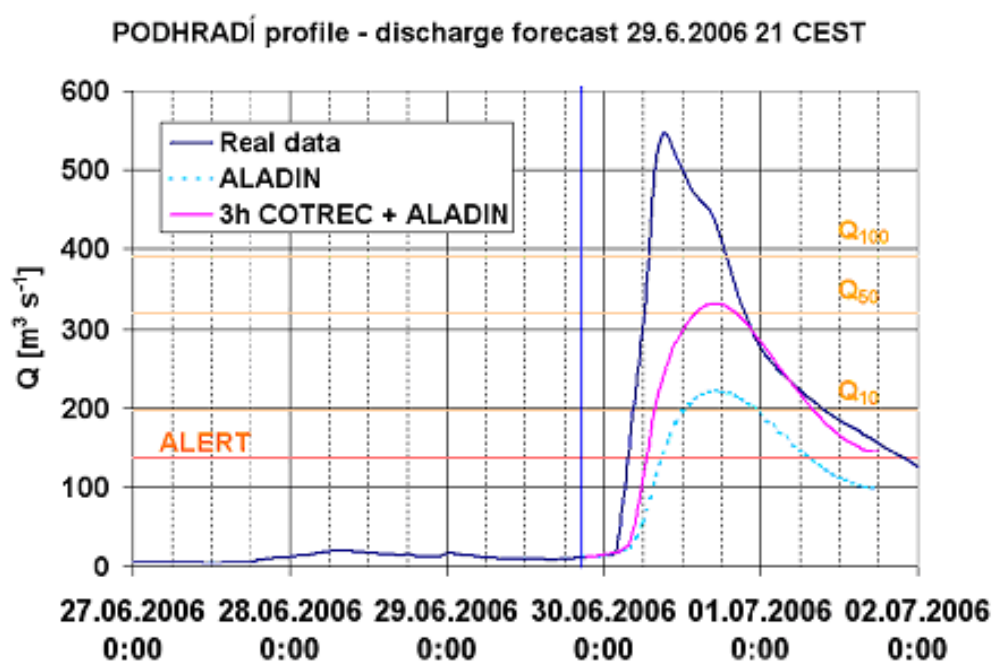
Keywords: *extrapolation, COTREC, nowcasting, precipitation estimates, radar*

1 Úvod

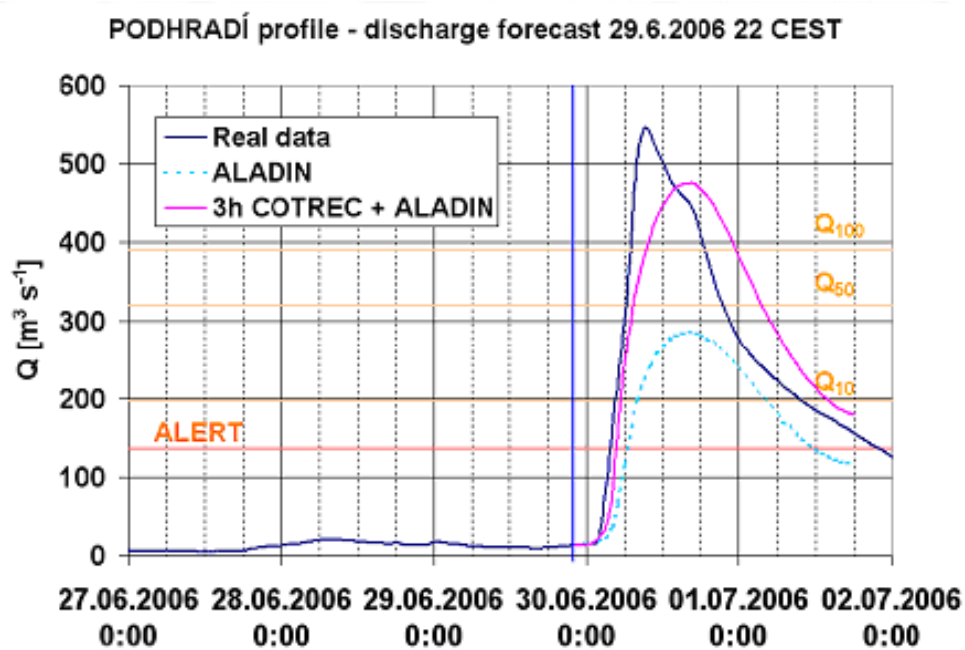
Data z radiolokačních měření jsou v současné době pro meteorologické služby nepostradatelná. Stále častěji se tato data využívají pro kvantitativní předpověď srážek a nebezpečných jevů spojených s konvekci na velmi krátkou dobu (tzv. nowcasting). Krátkodobá předpověď srážek nalézá své uplatnění mimo jiné v hydrologických aplikacích, kde umožňuje poskytnout včasnou výstrahu před lokálními záplavami i upřesňovat předpověď velkoprostorových srážek.

Cílem této práce je vyhodnotit využitelnost předpovědi srážek, založené na extrapolaci radarového echa (konkrétně v ČHMÚ operativně používané metody COTREC), pro kvantitativní předpověď srážek a provést srovnání s výsledky numerického předpovědního modelu Aladin.

V době zadání práce byly v ČHMÚ jako vstupní data do hydrologických modelů využívány předpovědi numerického modelu Aladin [1]. Na několika případových studiích bylo prokázáno, že použitím krátkodobé předpovědi srážek metodou COTREC, jakožto vstupu do hydrologického modelu v několika prvních hodinách jeho běhu, se docílí jistého zlepšení viz obr. 1 [2]. Tato práce by měla výsledky uvedených případových studií potvrdit na statisticky významném vzorku dat.



Obr. 1a



Obr. 1b

Předpověď průtoku s použitím dat pouze z numerického předpovědního modelu Aladin (tyrkysová tečkovaná křivka) a s využitím metody COTREC pro první 3 hodiny předpovědi (růžová křivka). Pro porovnání je modrou křivkou znázorněn skutečný průtok. Převzato z [1].

2 Základy radiolokačních měření

2.1 Meteorologické radary

Meteorologický radar je zařízení určené k detekci oblačných a srážkových částic s dosahem zhruba 100-300 km. Vysílá vysokoenergetické pulsy elektromagnetických vln o vhodně zvolené vlnové délce a přijímá část vyslaného záření, které se zpětně rozptýlí od oblačných a srážkových částic [3]. To umožňuje odhadovat na poměrně rozsáhlém území intenzitu srážek s velkým prostorovým rozlišením (až $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$). Kromě využití při odhadech srážkových úhrnů a při studiu oblačných a srážkových procesů se stále více prosazuje využívání radarových měření pro detekci a předpovědi srážek [4] a nebezpečných jevů spojených s konvektivní oblačností [5] na dobu několika hodin – tzv. nowcasting.

2.2 Teorie radiolokačních měření

Radar můžeme rozdělit na tři základní části – vysílač, anténu a přijímač. Vysílač generuje krátké vysokoenergetické elektromagnetické pulsy, které anténa soustřeďuje do malého prostorového úhlu. Okamžitě po vyslání pulsu se radar přepne do přijímacího režimu. Pokud puls zasáhne kupříkladu oblačnou částici, tak je malá část energie částicí pohlcena a následně vyzářena do všech směrů. Část energie se tak vrátí směrem k radaru, kde je zachycena anténou a vyhodnocena v přijímači. Ten určí jeho výkon a čas od vyslání pulsu. Rychlost šíření pulsu v atmosféře lze považovat za rovnou rychlosti světla, lze tedy snadno vypočítat vzdálenost cíle, který odrazil část vyslaného pulsu:

$$r = \frac{ct}{2} \quad 1$$

kde r je vzdálenost cíle, c rychlost světla a t je čas mezi vysláním pulsu a přijetím zpětně odraženého signálu. Protože současně známe azimut a elevaci antény, máme k dispozici úplnou informaci o poloze cíle v prostoru.

Určení výšky cíle nad zemským povrchem je komplikováno zakřivením zemského povrchu a vertikálním profilem indexu lomu v atmosféře. Za běžných podmínek se radarový paprsek ohýbá směrem k povrchu, tzv. standardní refrakce, viz obr. 2. Jeho křivost je ve srovnání s idealizovaným zemským povrchem menší. Proto se zavádí pojem efektivní poloměr Země, který umožňuje za předpokladu standardní atmosféry považovat radarové paprsky za přímočaré a je definován takto:

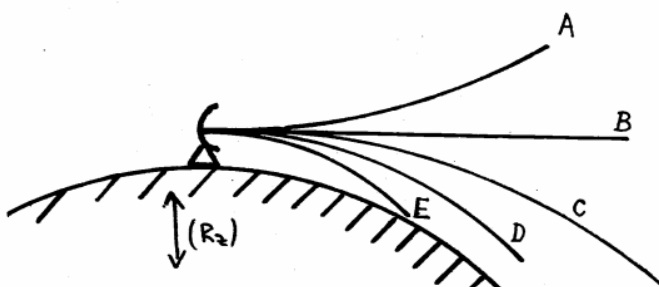
$$R_e = \frac{4}{3} R_z \quad 2$$

kde R_z je skutečný poloměr Země. Pro výšku radarového paprsku nad povrchem Země h , při normální atmosférické refrakci lze následně odvodit vztah:

$$h = r \sin \alpha + \frac{r^2}{2R_e} + h_0 \quad 3$$

kde α je elevační úhel, r je vzdálenost od radaru a h_0 je nadmořská výška antény radaru.

Ve větších vzdálenostech od radaru se i při nulové elevaci paprsek nachází ve výšce několika kilometrů nad povrchem. V případě přízemní teplotní inverze a rychlého úbytku vlhkosti s výškou dochází k tzv. superrefrakci, kdy je paprsek zakřiven více než zemský povrch a v jisté vzdálenosti se dostane zpět k zemskému povrchu [3]. Dojde tak k nežádoucímu pozemnímu odrazu.



Obr. 2 Schématické znázornění šíření mikrovln v atmosféře. Příklad A představuje zápornou refrakci, B znázorňuje nulovou refrakci – index lomu se s výškou nemění, C je standardní refrakce (odpovídá běžným podmínkám v atmosféře) – paprsek se ohýbá směrem k povrchu, avšak má menší křivost než zemský povrch, případ D se nazývá kritická refrakce – křivost paprsku se rovná křivosti země a E představuje superrefrakci – křivost paprsku je větší než křivost zemského povrchu.

Vztah mezi přijatým výkonem a odrazivostí ve vzdálenosti r od radaru udává tzv. radarová rovnice:

$$P = \Pi_M \left(\frac{Z}{r^2} \right) \quad 4$$

kde P je přijatý výkon, Π_M je radarová konstanta popisující technické parametry radaru a prostředí, Z je radarová odrazivost a r vzdálenost od radaru.

Meteorologické cíle považujeme za objemové cíle s homogenně rozloženými částicemi. Dále budeme uvažovat, že tyto částice jsou sférické a vlnová délka radarového pulsu je řádově větší než průměr částic – jsou tedy splněny podmínky Rayleighova rozptylu. Pak lze vyjádřit radarovou odrazivost Z takto:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD \quad 5$$

kde $N(D)$ je rozložení velikosti kapiček a D je průměr kapiček. Protože se v atmosféře mohou vyskytovat také velké vodní kapky a nesférické ledové částice, tak se nejčastěji pracuje s pojmem ekvivalentní radiolokační odrazivost Z_e . Ta je definována jako suma šestých mocnin průměrů kapiček, které by za předpokladu splnění podmínek pro Rayleighův rozptyl zpětně rozptýlily stejný výkon, jako je výkon naměřený [3].

2.3 Marshall – Palmerův vztah

Aby bylo možné na základě radiolokačních měření odhadnout intenzitu srážek, je potřeba znát její závislost na radarové odrazivosti. K tomu lze využít Marshall – Palmerovo rozdělení velikosti kapek [6]:

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D} \quad 6$$

kde $\Lambda = 4,1 I^{0,21}$, I je intenzita srážek a D je průměr částice. Po dosazení do vztahu (vyjádření radarové odrazivosti) a provedení integrace dostaneme:

$$Z = 296 I^{1,47} \quad 7$$

V praxi se běžně používá vztah:

$$Z = a I^b \quad 8$$

kde Z je radarová odrazivost [$\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$], I je intenzita srážek [mm h^{-1}], a i b jsou empiricky určené parametry. Koeficienty a a b se mění v závislosti na geografické oblasti a typu srážek.

V Evropě jsou nejčastěji používány hodnoty $a = 200$ a $b = 1.6$, což je v dobré shodě s teoreticky odvozenými hodnotami (viz rovnice 7).

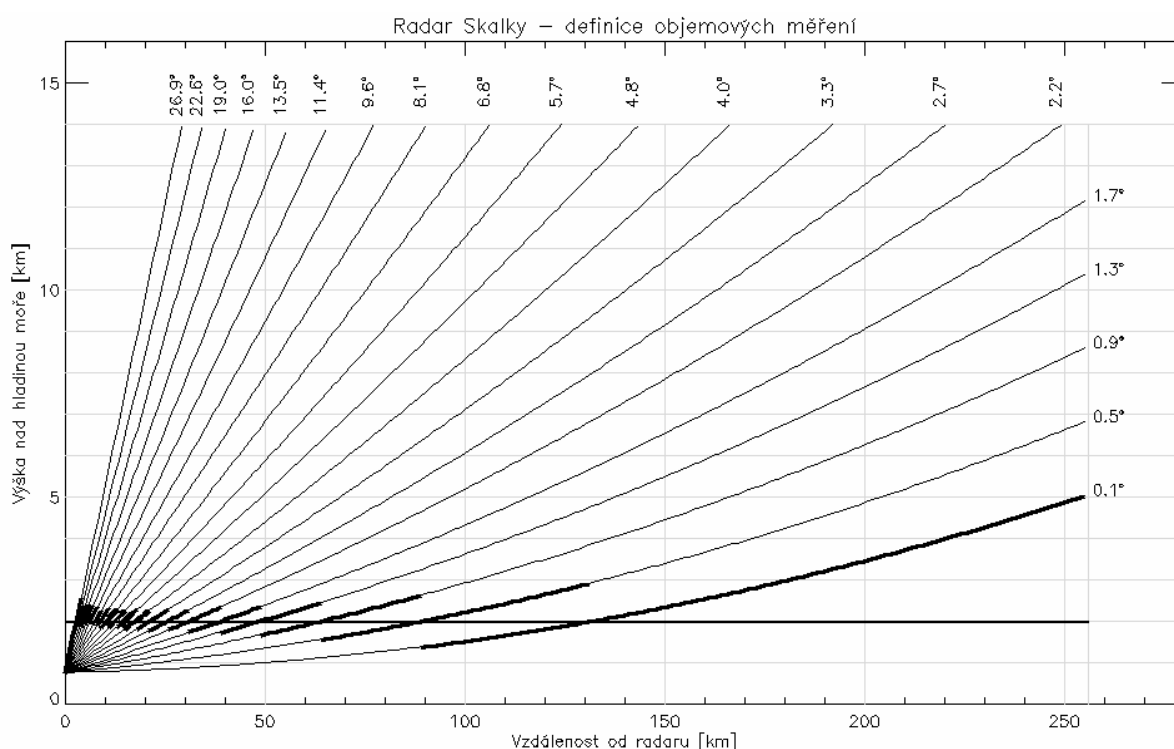
2.4 Objemová měření

Operativní provoz meteorologických radiolokátorů je nejčastěji založen na opakovaném měření v posloupnosti několika elevačních úhlů, které jsou vybrány tak, aby zajistily co nejkvalitnější třírozměrné pokrytí sledované oblasti [3]. Tím vzniknou základní objemová data ve sférických souřadnicích, která bývají následně přepočítána do pseudo-kartézských souřadnic (horizontální kartézské souřadnice x, y a elevační úhel). Z těchto objemových dat jsou poté vytvářeny uživatelské produkty. Mezi základní produkty patří:

PPI Pole odrazivosti na jednotlivých měřených elevačních úhlech.

CAPPI Pole odrazivosti v hladině konstantní nadmořské výšky získaná interpolací ze sousedních hladin PPI. Ve větších vzdálenostech, kde se daná nadmořská výška nachází pod nejnižší PPI hladinou, se někdy místo interpolace používá odrazivost nejnižší PPI hladiny – tak vznikne tzv. pseudoCAPPI (viz obr. 3).

MAX Z Pole maximální odrazivosti ve vertikálním sloupci pro každý plošný element (maximální odrazivost ze všech PPI hladin v daném bodě).

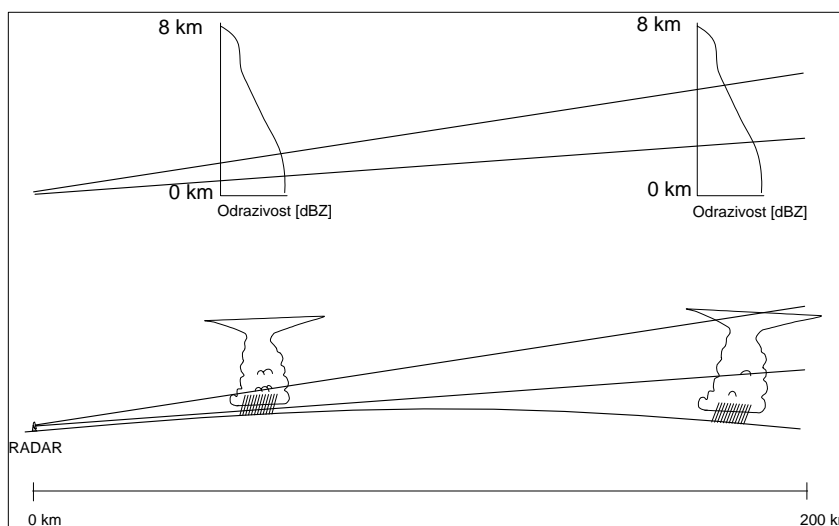


Obr. 3 Schéma znázorňující jednotlivé PPI hladiny, kde jsou tučně zvýrazněny části, ze kterých se počítá pseudoCAPPI 2 km. Převzato z [14].

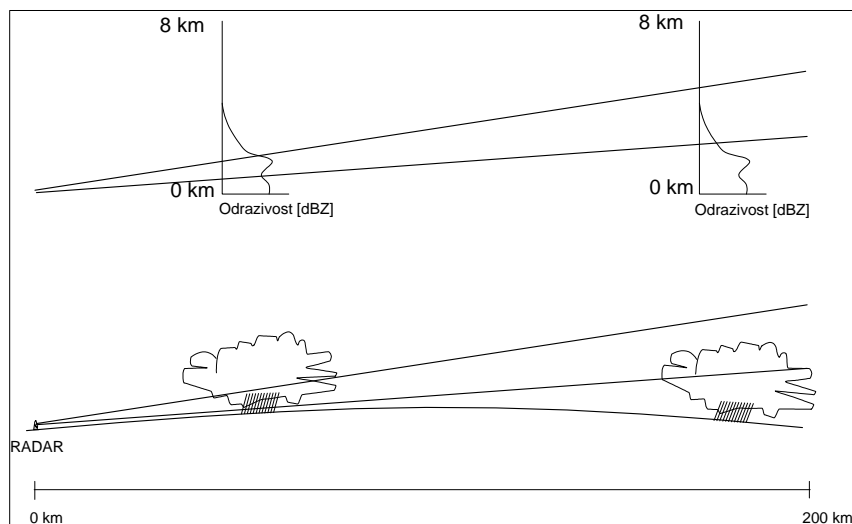
2.5 Zdroje chyb radiolokačních měření

Mezi nejdůležitější jevy, které vnášejí chyby do radiolokačních odhadů srážek patří podhodnocování srážek vlivem rostoucí výšky radarového paprsku nad zemským povrchem. Radar ve větší vzdálenosti nevidí část atmosféry u zemského povrchu, kde jsou jinak detekovány nejvyšší hodnoty odrazivosti viz obr. 4. Tuto chybu částečně eliminují radarové produkty korigované pomocí vertikálního profilu odrazivosti – VPR (neviditelné oblasti jsou dopočítávány z vyšších hladin). S rostoucí výškou radarového paprsku nad zemí také souvisí neviditelnost orografického zesilování srážek. Dále pak hraje značnou roli rozšiřování paprsku se vzdáleností od radaru. Tím se zvyšuje hodnota minimálního zachytitelného signálu a pravděpodobnost jen částečného zaplnění radarového pulsu srážkovými částicemi. To vede k podhodnocování srážek.

Při průchodu atmosférou také dochází k útlumu radarového paprsku, přičemž nejvýznamnější faktor, vedoucí k útlumu radarového paprsku, jsou srážky. Velikost tlumení značně závisí na použité vlnové délce, jak je patrné z obr. 5. V případě intenzivních srážek může nastat tak silné tlumení, že dojde k výraznějšímu podhodnocení, či dokonce úplnému zastínění vzdálenějších srážek.

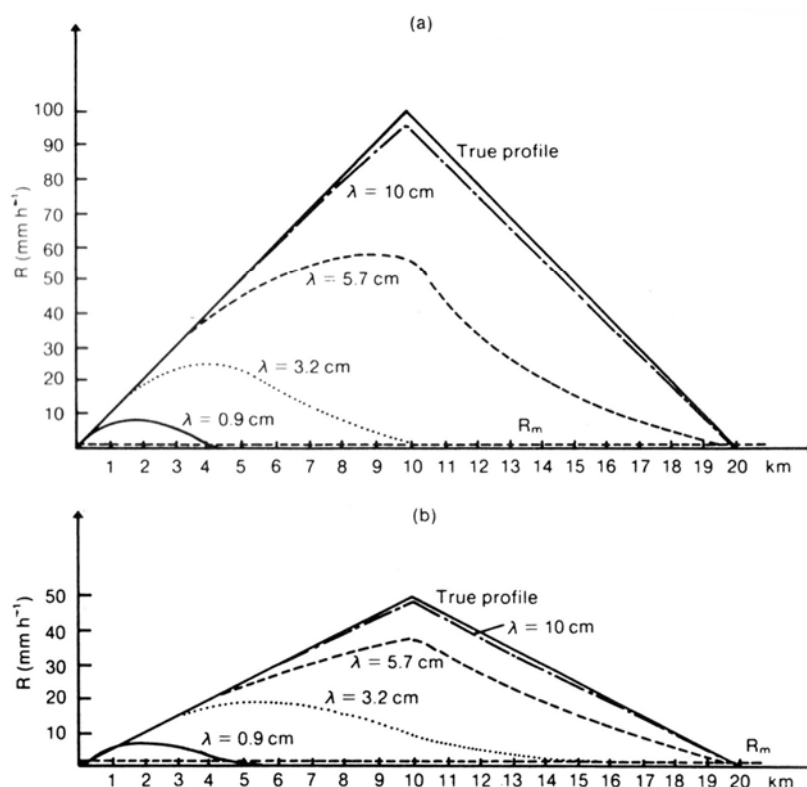


Obr. 4a



Obr. 4b

Schématické znázornění typického průběhu odrazivosti s výškou u konvektivní (a) a stratiformní (b) oblačnosti. Neviditelnost spodních partií srážkové oblačnosti vlivem rostoucí výšky radarového paprsku nad zemí způsobuje podhodnocování radarového odhadu srážek.



Obr. 5 Křivky radarem naměřené intenzity srážek v porovnání se skutečným profilem intenzity srážek dokumentují závislost útlumu radarového paprsku v atmosférických srážkách na použité vlnové délce .

Převzato z [24]

V případě stratiformních srážek se často na nízkých hladinách PPI a produktu maximální odrazivosti objevuje tzv. bright band, což je nadměrně zesílená odrazivost v zóně tání pevných srážek pod nulovou izotermou [3]. K nadhodnocování srážek také může docházet při výskytu krup, nebo obecně při výskytu většího množství relativně velkých částic, což je dáno závislostí odrazivosti na šesté mocnině průměru částic (viz rovnice 5) a tím, že se využívá Marshall-Palmerův vztah odvozený pro stratiformní srážky.

Dalším zdrojem chyb zejména na nižších elevacích jsou pozemní odrazy. Moderní dopplerovské radary jsou však schopné pozemní cíle velmi účinně filtrovat. Tyto radary jsou schopné kromě odrazivosti cíle měřit i jeho radiální rychlost a filtr poté vyřazuje z dalšího zpracování odrazy s radiální rychlostí blízkou nule [3].

2.6 Radarové odhady srážek

Pro odhad srážek je nejprve nutné vybrat vhodný produkt odvozený z objemových dat radarové odrazivosti. Je výhodné srážkové úhrny počítat z dat pořízených co nejbližší zemskému povrchu, avšak bez pozemních odrazů a podobných nežádoucích artefaktů. Nejčastěji se proto používají nízkohladinové PPI nebo CAPPI (někdy doplněné v neviditelné oblasti nejnižší PPI hladinou – tzv. PseudoCAPPI nebo pomocí korigované pomocí vertikálního profilu odrazivosti – VPR) [3], případně MAX Z.

Radarovou odrazivost pak z vybraného produktu pomocí Marshall-Palmerova vztahu převedeme na intenzitu srážek a následně integrujeme za určité časové období, čímž získáme radarový odhad srážek za dané období. Takto získaný odhad nabízí detailní strukturu srážkového pole jak v prostorovém tak časovém rozlišení, ale kvantitativní odhady jsou z různých důvodů méně přesné než bodová srážkoměrná měření [7]. Metody, které jsou používány v ČHMÚ ke zpřesnění kvantitativních odhadů srážek, budou zmíněny v kapitole 4.

3 Využití radiolokačních měření pro krátkodobou předpověď srážek

3.1 Nowcasting srážek

Nowcasting je definován jako detailní analýza současného stavu počasí spolu s předpovědí na několik hodin dopředu, která vychází z extrapolace trendu vývoje [8]. Při nowcastingu srážek je především využíváno informací z distančních pozorovacích metod (meteorologický radar, družice, případně systém detekce blesků), které se případně kombinují s pozemními pozorováními a výstupy numerických modelů. Na základě informací z radarových měření jsou založeny metody, které:

- a) identifikují konvektivní buňky a předpovídají jejich pohyb
- b) předpovídají vývoj radarového echa v celé radarové doméně

Dále se budeme zabývat metodami předpovídajícími vývoj v celé radarové doméně. Tyto metody jsou založeny na principu extrapolace radarového echa na základě znalosti pohybového pole. K získání pohybového pole lze využít dva základní postupy:

- a) výstup numerického modelu (většinou proudění v hladině 700 hPa, což je hladina tzv. řídicího proudění, nebo vrstvy 700-500 hPa, tj. výška zhruba 3 km respektive 3-5,5 km)
- b) analýza po sobě jdoucích obrazů radarového echa (např. metoda COTREC)

V obou případech se k následné extrapolaci nejčastěji využívá metody zpětných trajektorií. Výhodou takových metod je snadná implementace a transparentnost. Faktory limitující kvalitu takové předpovědi jsou časový vývoj srážkové činnosti a pohybového pole [9]. Rychlost, kterou klesá kvalita předpovědi, tedy značně závisí na charakteru povětrnostní situace.

3.2 Metoda COTREC

Metoda COTREC je jednou z nejpoužívanějších metod extrapolace radarového echa. Jedná se o rozšíření metody TREC [19], které je publikováno v [20]. Metoda nejprve vypočte pohybové pole a v dalším kroku extrapoluje aktuální radarový obraz.

3.2.1 Získání pohybového pole

Nejprve se posunováním aktuálního obrazu radarového echa přes obraz předcházející nalezne vektor posunutí celé radarové domény. Hledáme vektor posunutí, kde bude kritérium podobnosti dosahovat absolutního maxima. Jako kritérium podobnosti se používá nejčastěji korelační koeficient. Lze však užít veličiny jako střední absolutní odchylka, směrodatná odchylka a další [17].

V dalším kroku se rozdělí radarová doména na několik menších obdélníků, a ty opět posouváme po předcházejícím obrazu radarového echa za účelem maximalizace kritéria podobnosti. Velikost a směr vektoru posunutí těchto menších obdélníků jsou omezeny pomocí podmínky, mimo jiné využívající již spočtený vektor posunutí celé radarové domény.

Absence takovéto podmínky by mohla způsobit výpočet chybného pohybového pole díky fluktuacím a časovým (neadvěkním) změnám radarového echa.

Dále je potřeba provést test věrohodnosti – kritérium podobnosti by mělo nabývat vyšší hodnoty než vhodně nastavená prahová hodnota. Například korelační koeficient vyšší než 0.7 [20]. Další vhodná podmínka je, že daný obdélník by měl obsahovat určitý počet pixelů obsahujících radarové echo. Pokud by některá z těchto podmínek nebyla splněna, pro daný obdélník použijeme vektor posunutí spočítaný pro celou radarovou doménu.

Stejným postupem lze přejít k ještě menším obdélníkům pro získání detailnější informace o pohybovém poli. Minimální velikost obdélníku by ale měla být dostatečně velká, aby obdélník dokázal obsáhnout typické tvary radarového echa. Minimální rozměr by neměl být menší než 10×10 km [21].

Nyní je k dispozici kompletní pohybové pole získané metodou TREC. V dalším kroku se toto pole shladí pomocí postupu popsáno v [20]. Hlavní myšlenkou je upravit pohybové pole tak, aby byla splněna podmínka kontinuity a zároveň se zachovala co největší podoba s původním pohybovým polem. Pro tento účel se minimalizuje funkce:

$$J(\mathbf{u}) = \int_S (|\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}|^2 + \lambda \nabla \cdot \mathbf{u}) dx dy \quad 9$$

kde $\tilde{\mathbf{u}}$ značí pohybové pole získané metodou TREC, \mathbf{u} je výsledné pohybové pole po shlazení a S označuje celou plochu radarové domény. Řešením je Poissonova rovnice pro Lagrangeův multiplikátor λ :

$$\nabla^2 \lambda = -2 \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} \quad 10$$

s okrajovou podmínkou:

$$\lambda|_{\partial S} = 0 \quad 11$$

kteřá je numericky řešitelná například algoritmem SOR [22]. Výsledné shladené pohybové pole poté získáme z rovnice:

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{u}} + \frac{1}{2} \nabla \lambda \quad 12$$

Nyní je tedy k dispozici vektor posunutí, resp. vektor rychlosti pro každý dílčí obdélník tvořící radarovou doménu.

3.2.2 Časová extrapolace

Časová extrapolace vychází z předpokladu, že pohybové pole je stacionární (s časem se nemění) a že radarové echo neroste, ani nezaniká (je pouze advehováno prouděním). Pro časovou extrapolaci se využívá metoda zpětných trajektorií. Pro každý pixel předpovídaného obrazu radarového echa se určí výchozí bod na aktuálním obrazu radarového echa a do daného pixelu se dosadí radarová odrazivost interpolovaná ze čtyř nejbližších pixelů tohoto výchozího bodu [17]. Souřadnice výchozího bodu se vypočítají podle vztahu:

$$\mathbf{s}(t_0) = \mathbf{r}_{i,j} + \int_t^{t_0} \mathbf{u}(t_0, \mathbf{s}(t')) dt' \quad 13$$

kde t_0 je čas aktuálního obrazu radarového echa, $\mathbf{r}_{i,j}$ jsou souřadnice pixelu pro který hledáme výchozí bod, $t-t_0$ je doba extrapolace a $\mathbf{u}(t_0, \mathbf{s}(t'))$ je vektor proudění v daném místě trajektorie v čase t_0 . Pro získání vektoru rychlosti proudění v konkrétním místě je potřeba přejít od vyjádření vektoru rychlosti v jednotlivých obdélnících, na které byla rozdělena radarová doména v metodě TREC, ke spojitému poli rychlosti proudění. Předpokládá se, že vektor rychlosti proudění spočtený metodou TREC pro daný obdélník přesně odpovídá proudění uprostřed tohoto obdélníku. Pokud je potřeba získat vektor rychlosti proudění v jiném místě, provede se interpolace ze čtyř okolních středů obdélníků. Integrace vztahu 13 se provádí numericky a délka kroku Δt musí být dostatečně malá pro zachování numerické stability. Takto se získá obraz radarového echa v čase t .

3.2.3 Zdroje chyb

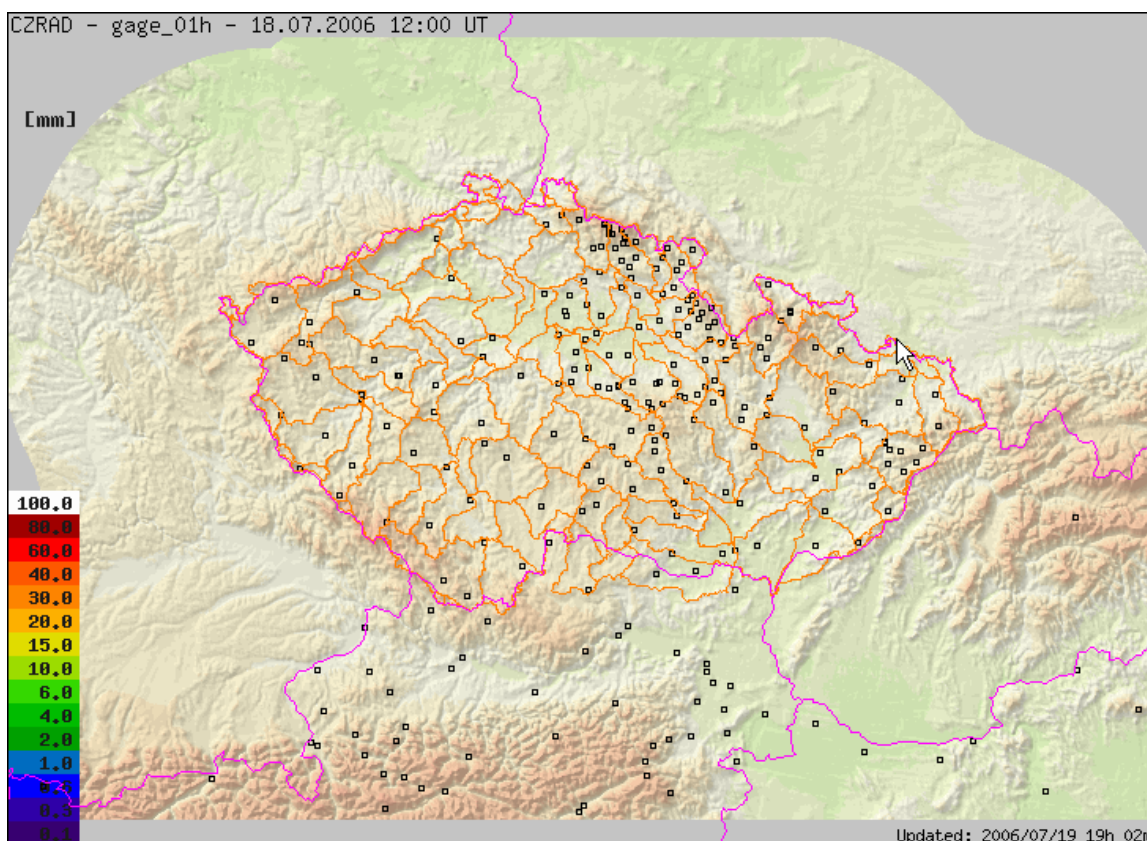
Největším problémem extrapolace je časový vývoj radarového echa. Zde je do budoucna prostor pro vývoj nelineárních metod extrapolace růstu či zanikání radarového echa. Nabízí se použití dat z numerických modelů, či využití koncepčních modelů konvekce. Dosavadní pokusy však nepřinesly přesvědčivé pozitivní výsledky.

Dále je třeba, aby časový interval mezi dvěma posledními obrazy radarového echa byl menší než časové měřítko vývoje radarového echa. V opačném případě může například dojít k tomu, že zánik jedné konvektivní buňky a vznik jiné v její blízkosti může být považován za pohyb jediné konvektivní buňky. Zároveň je žádoucí, aby rozměr obdélníků, na které rozdělíme radarovou doménu, byl schopen obsáhnout typické tvary radarového echa v dané situaci. Nesplnění této podmínky může opět vést k určení chybného pohybového pole. Ke zjištění vhodné velikosti dílčích obdélníků je možné využít například spektrální analýzu obrazu radarového echa [17].

4 Vstupní data

Vyhodnocení využitelnosti předpovědi odhadu srážek založené na extrapolaci radarového echa (metoda COTREC) a srovnání s výsledky numerického předpovědního modelu Aladin bylo provedeno na datech získaných od ČHMÚ. V této kapitole se proto zmíníme o metodice výpočtu odhadů srážek na základě radarových měření používané v ČHMÚ, dále o konkrétní implementaci metody COTREC a okrajově se zmíníme také o numerickém předpovědním modelu Aladin.

Vyhodnocování bylo prováděno mimo jiné za účelem ověření vhodnosti použití předpovědi srážek metodou COTREC jakožto vstupních dat pro hydrologické modely na statisticky významném vzorku dat. Jako vhodná data proto byly vybrány hodinové úhrny vztažené na jednotlivá povodí využívaná v aplikaci JS Precipview (viz obr. 6). Povodí je 119 a rozloha se pohybuje od jednotek km² až do téměř 2000 km². Výsledky předpovědi byly porovnávány s adjustovaným radarovým odhadem kombinovaným se srážkoměrnými měřeními – tzv. merge (viz kapitola 4.1.4).



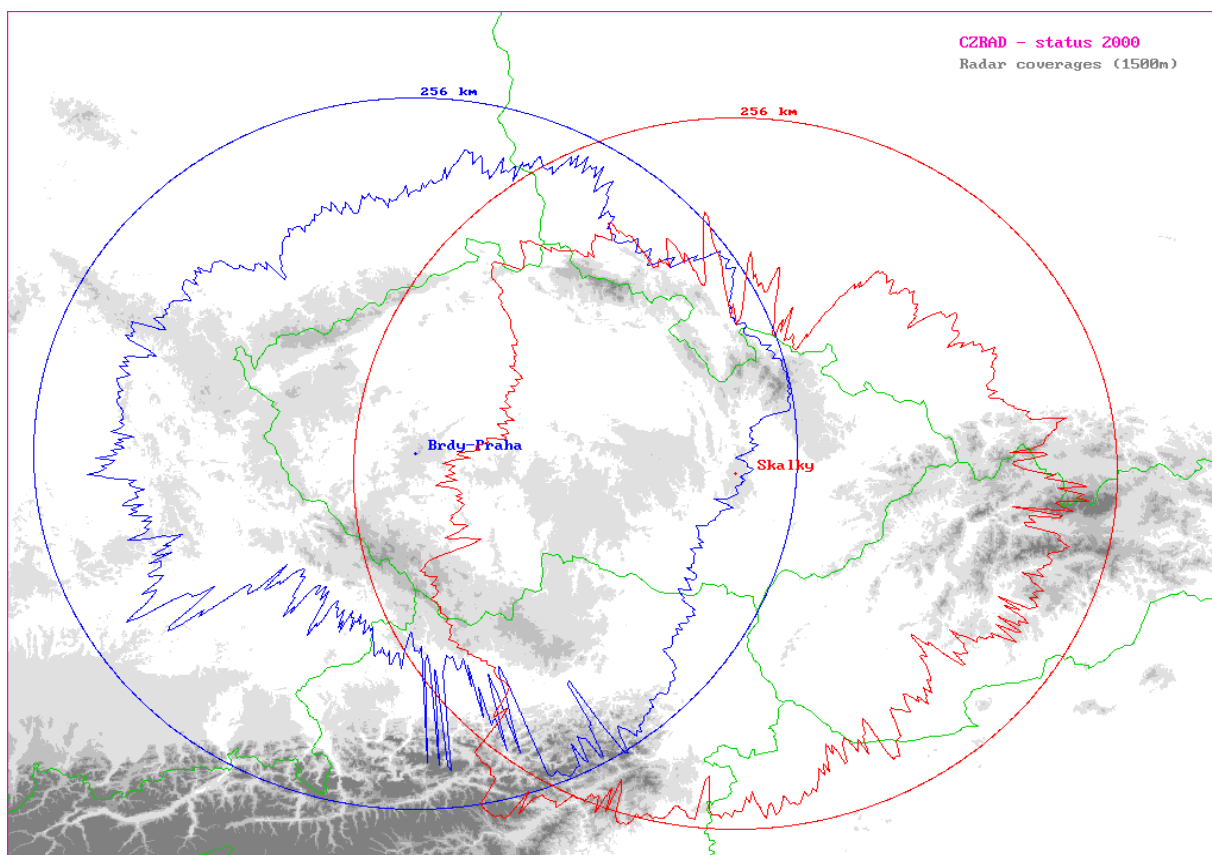
Obr. 6 Rozložení povodí (žlutě ohraničené) a rozmístění operativně využitelných srážkoměrných stanic (černé čtverečky)

4.1 Odhad srážek v ČHMÚ

4.1.1 CZRAD

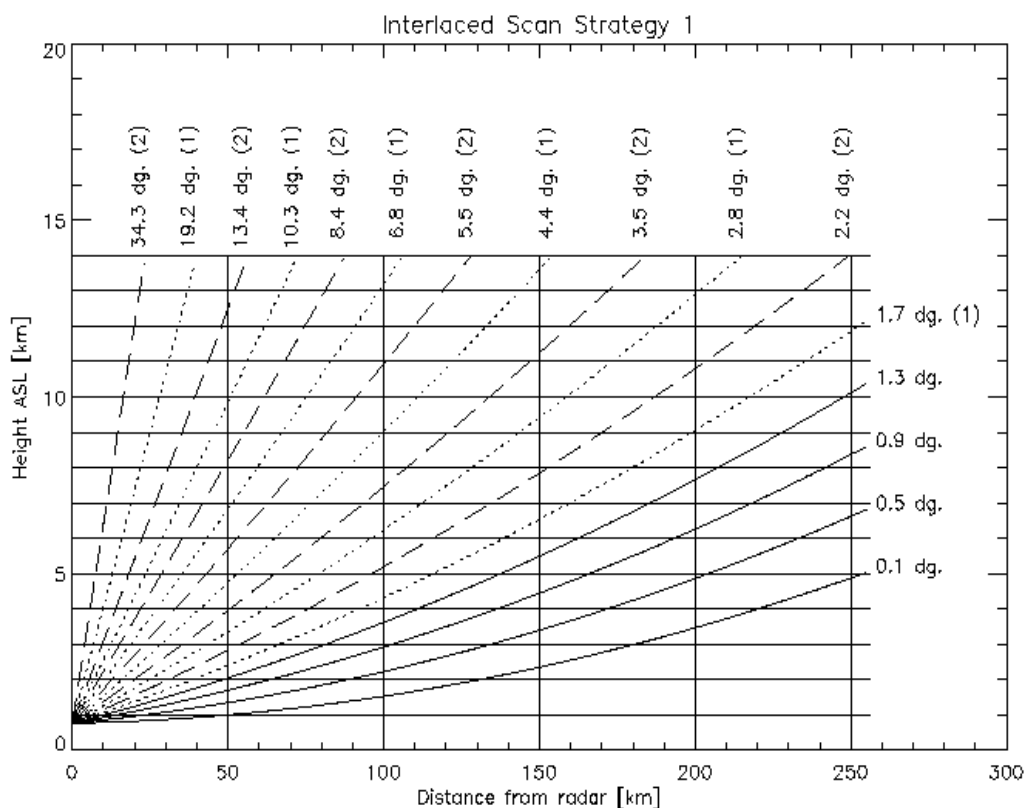
Radarová síť provozovaná v rámci ČHMÚ pod názvem CZRAD se v současné době skládá ze dvou dopplerovských meteorologických radarů:

- Skalky [11]
- Brdy [12]



Obr. 7 Maximální dosah meteorologických radarů ze sítě CZRAD (kruhy) a pokrytí území, kde je nejnižší použitelný radarový paprsek 1500 m nad zemí. Převzato z [4].

Jejich vhodné rozmístění (obr. 7) zaručuje pokrytí měřením celého území ČR. Měří se na 16-ti elevacích (viz obr. 8) a poté se z naměřených dat každých 5 minut (pro období zpracovávané v této práci byla data k dispozici každých 10 minut) generuje celá řada produktů v horizontálním rozlišení 1×1 km. Při vytváření sloučené informace z obou radarů se postupuje tak, že pro pixely, kde jsou k dispozici data z obou radarů se použije vyšší hodnota odrazivosti.



Obr. 8 Skenovací strategie ČHMÚ. Každých 5 minut je proveden subscan obsahující 4 nejnižší elevace a polovinu zbývajících (tečkované nebo čárkované křivky). Převzato z [4].

4.1.2 Odhad srážek

V ČHMÚ se operativně využívá pro odhad srážek pseudoCAPPI hladina 2 km a CAPPI 2 km korigovaná pomocí VPR [10]. Dále se s ohledem na návaznost dat počítá pole maximální odrazivosti (Z-MAX), což byl v době začátku výpočtů srážkových úhrnů na základě radiolokačních měření (polovina 90. let minulého století) nejvhodnější dostupný, nikoliv však ideální produkt [13]. Tyto produkty jsou v současné době k dispozici s horizontálním rozlišením 1×1 km každých 5 minut.

Pro převod radarové odrazivosti na intenzitu srážek se využívá Marshall-Palmerův vztah s parametry $a = 200$, $b = 1,6$ [10]. Dále jsou hodnoty odrazivosti menší než 7 dBZ položeny rovny hodnotě 0 z důvodu potlačení „nesrážkových“ odrazů a odrazivosti větší než 55 dBZ se položí rovny hodnotě 55dBZ, což do jisté míry zabrání přeceňování srážek z důvodu výskytu krup [14]. Časovou integrací se pak počítají srážkové úhrny za 1, 3, 6 a 24 hodin.

4.1.3 Adjustace radarových odhadů

Dalším krokem zpracování radarových odhadů srážek v ČHMÚ je tzv. adjustace pomocí adjustačního koeficientu vypočteného jako podíl srážkoměrných měření a územně příslušných radarových odhadů. Jedná se o jednu z metod používaných pro zkvalitnění kvantitativního odhadu srážek. V ČHMÚ se využívá metoda zanedbávající prostorovou proměnlivost adjustačního koeficientu, která v celé radarové doméně vynásobí radarový odhad jedním koeficientem. I takto jednoduchá adjustace vede k nezanedbatelné redukci chyby odhadu (viz graf 1) [7].

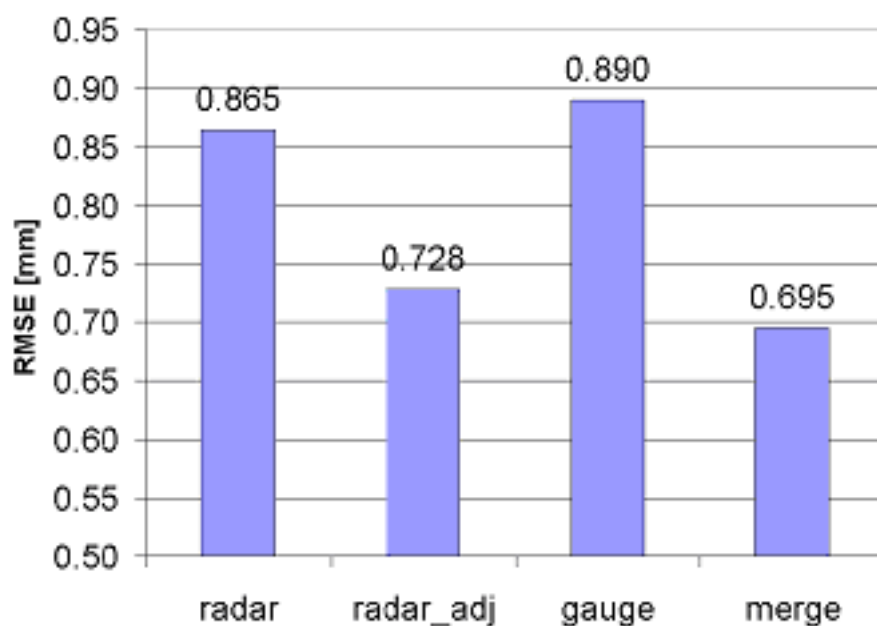
Tento koeficient se zpravidla počítá za delší časové období. Teoreticky by měla být délka období, ze kterého počítám tento koeficient co nejdelší, ale z praktického hlediska je nutné také uvažovat variabilitu druhů srážek. Jejich charakter závisí nejen na ročním období, ale také na povětrnostní situaci, měnící se typicky během několika dní [7]. Většinou se pro výpočet adjustačního koeficientu bere v úvahu několikadenní až několikátýdenní klouzavé časové okno [15]. Adjustační koeficient (*bias*) se v ČHMÚ počítá podle následujícího vzorce:

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (\sum_{j=1}^m G_j)_i}{\sum_{i=1}^n w_i (\sum_{j=1}^m R_j)_i} \quad 14$$

kde G_j , resp. R_j , jsou denní úhrny srážkoměrných měření, resp. radarových odhadů na místě srážkoměrných stanic a w_i jsou váhy určené tak, aby jejich součet byl 1 a zároveň poslední použité denní srážkové sumy měly váhu 0.05. Pokles vah s časem je dán negativně exponenciálním vztahem [10].

4.1.4 Kombinace radarových odhadů se srážkoměrnými měřeními – merge

Adjustovaný radarový odhad se dále upřesňuje pomocí údajů ze srážkoměrů. V ČHMÚ se operativně používá zjednodušená metoda optimálního odhadu autora D.J. Seo [16]. V bodech, kde je k dispozici srážkoměrné měření, platí údaj ze srážkoměru, v ostatních bodech je výsledný odhad počítán jako lineární kombinace srážkoměrných měření a adjustovaných radarových odhadů. Váhy srážkoměrných měření klesají s rostoucí vzdáleností od srážkoměrných stanic podle negativně exponenciální funkce [10]. Merge je v současné době nejpresnější operativní odhad srážkových úhrnů dostupný v ČHMÚ [10], viz graf 1.



Graf 1 RMSE hodinových radarových odhadů srážek (radar), adjustovaných radarových odhadů srážek (radar_adj), srážkoměrných odhadů (gauge) a kombinovaných odhadů (merge) pro lokality ombrografických stanic (územní elementy 1×1 km) za období 6.-16.8.2002. Převzato z [10].

4.2 Implementace metody COTREC v ČHMÚ

Algoritmus používaný v ČHMÚ vychází z prací [17] (popsáno v kapitole 3.2) a [18]. Jako kritérium podobnosti se používá střední absolutní odchylka a pro výpočet pohybového pole se využívá produkt maximální radarové odrazivosti Z-MAX. K výpočtu se používají obrazy radarového echa časově vzdálené 10 minut. Před samotným výpočtem pohybového pole metodou COTREC je na data produktu Z-MAX aplikován mediánový filtr a jsou oříznuty hodnoty menší než 0 dBZ.

V prvním kroku se počítá vektor posunutí přes celou radarovou doménu. Pak se celá oblast rozdělí na čtverce o rozměru 220×220 km. Za podmínky, že daný čtverec obsahuje minimálně 900 pixelů s radarovým echem, se vypočítá vektor posunutí tohoto čtverce. V tomto kroku se neuvažuje žádná podmínka podobnosti mezi vektorem posunutí celé domény a dílčích čtverců, protože jsou dostatečně velké a poskytují tedy dobrou informaci o pohybovém poli. Ve čtvercích kde není dostatečný počet pixelů s radarovým echem se použije vektor posunutí celé domény.

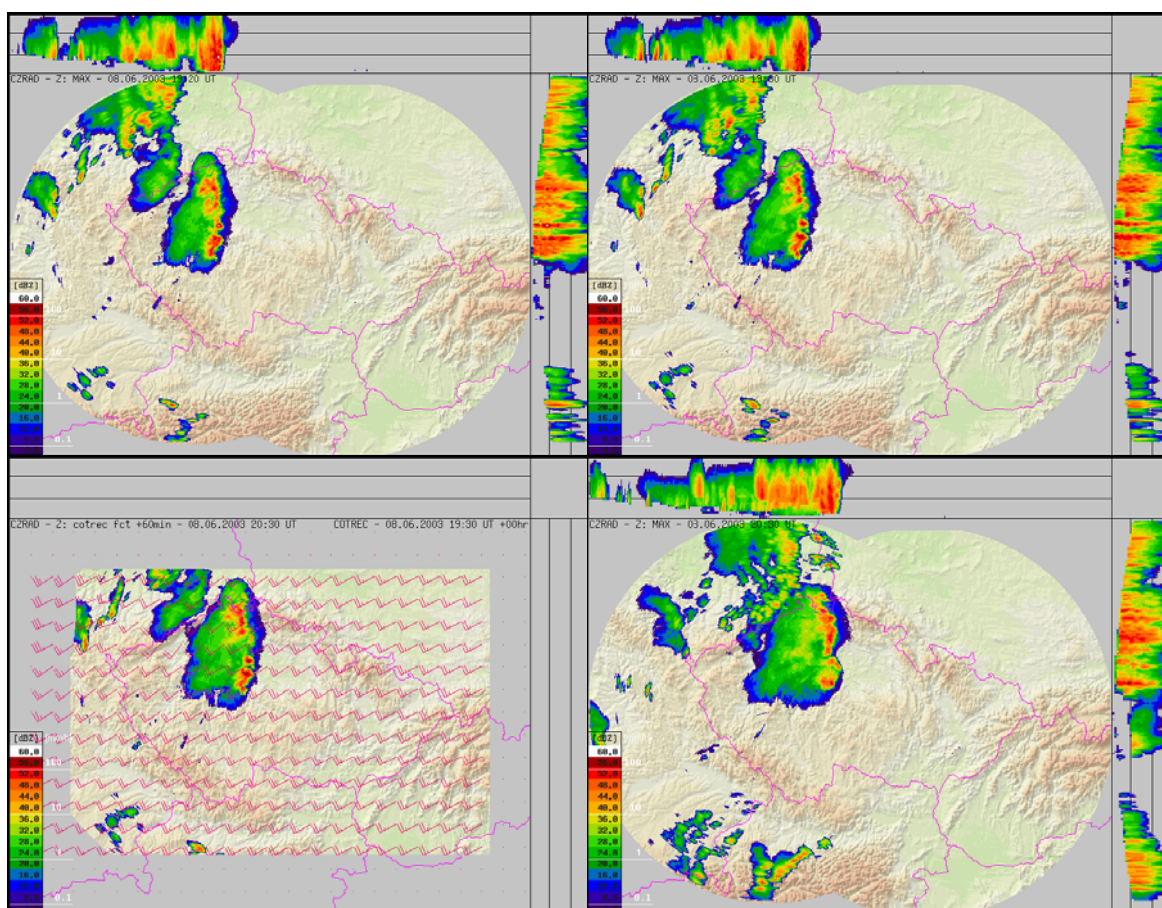
Následně se rozdělí celá oblast na čtverce o rozměru 44×44 km. Vektor posunutí se v těchto čtvercích počítá pokud obsahují více než 150 pixelů s radarovým echem. Vektor

rychlosti proudění vypočtený z vektoru posunutí malých čtverců musí splňovat následující podmínky:

$$u + 10 \geq u_2 \geq u - 10 \quad 15$$

$$v + 10 \geq v_2 \geq v - 10 \quad 16$$

kde u a v [ms^{-1}] jsou složky vektoru proudění platné pro příslušný větší čtverec a u_2 a v_2 [ms^{-1}] jsou složky vektoru proudění spočtené pro malý čtverec. V malých čtvercích, kde není dostatek pixelů, se opět použije vektor posunutí z jím nadřazených větších čtverců. Takto získané pole je pak shlazeno a pomocí bilineární interpolace jsou všem pixelům přiřazeny vektory proudění.



Obr. 9 Nahoře jsou po sobě jdoucí obrázky radarového echa ze kterých vychází metoda COTREC, vlevo dole pohybové pole spočtené metodou COTREC a předpověď na 60 minut dopředu. Vpravo dole pro srovnání radarové echa ze stejného termínu. Převzato z [10].

Na základě takto získaného pohybového pole je možné provádět extrapolaci jakéhokoliv produktu radarové odrazivosti (obr. 9). Pro předpověď srážek se používá pseudoCAPPI hladina 2 km. Pro každý pixel výsledného předpovězeného pole se numericky počítá zpětná trajektorie (explicitní Eulerovou metodou) a je mu dosazena hodnota odrazivosti výchozího pixelu. Následně jsou vypočteny sumy srážek za 0-1 h, 1-2 h a 2-3 h. Pro zpřesnění předpovědi se takto předpovězené úhrny srážek násobí adjustačním koeficientem platným v době počítání předpovědi. V ČHMÚ se adjustační koeficient počítá z několikadenního klouzavého časového okna a proto se jeho hodnota během jednotek hodin nijak výrazně nemění.

4.3 Aladin

Numerický předpovědní model Aladin je operativně počítán v rámci ČHMÚ. Byl vyvíjen od začátku 90. let minulého století v mezinárodní spolupráci vedené francouzskou povětrnostní službou Météo-France a jeho vývoj stále pokračuje.

Jedná se o lokální model, jako okrajové podmínky jsou využívána data z globálního modelu ARPEGE. Numerický model Aladin pracuje v mezo-beta měřítku (horizontální rozlišení řádově 10 km) a v testovaném období počítal každých 12 hodin (termíny 0 a 12 hodin) předpověď počasí na 2 dny dopředu. Výsledky jsou operativně dostupné o zhruba 3 až 4 hodiny později. V této práci se uvažovala dostupnost výsledků ve 3, respektive v 16 hodin.

4.4 Formát vstupních dat

Jak již bylo zmíněno, ke zpracování byla vybrána data v podobě hodinových úhrnů srážek vztažených na jednotlivá povodí. V případě radarových odhadů a předpovědí metodou COTREC se jednoduše každému pixelu v doméně přiřadilo povodí, do kterého náleží. Pro každé povodí se pak udává průměrný srážkový úhrn a maximální srážka na povodí.

Data z numerického předpovědního modelu Aladin bylo potřeba nejprve převést do stejné projekce a sítě uzlových bodů jako radarová data (byla použita bilineární interpolace). Pak se stejným postupem jako u radarových dat a u předpovědí metodou COTREC získaly hodnoty průměrného srážkového úhrnu a maximální srážky na povodí.

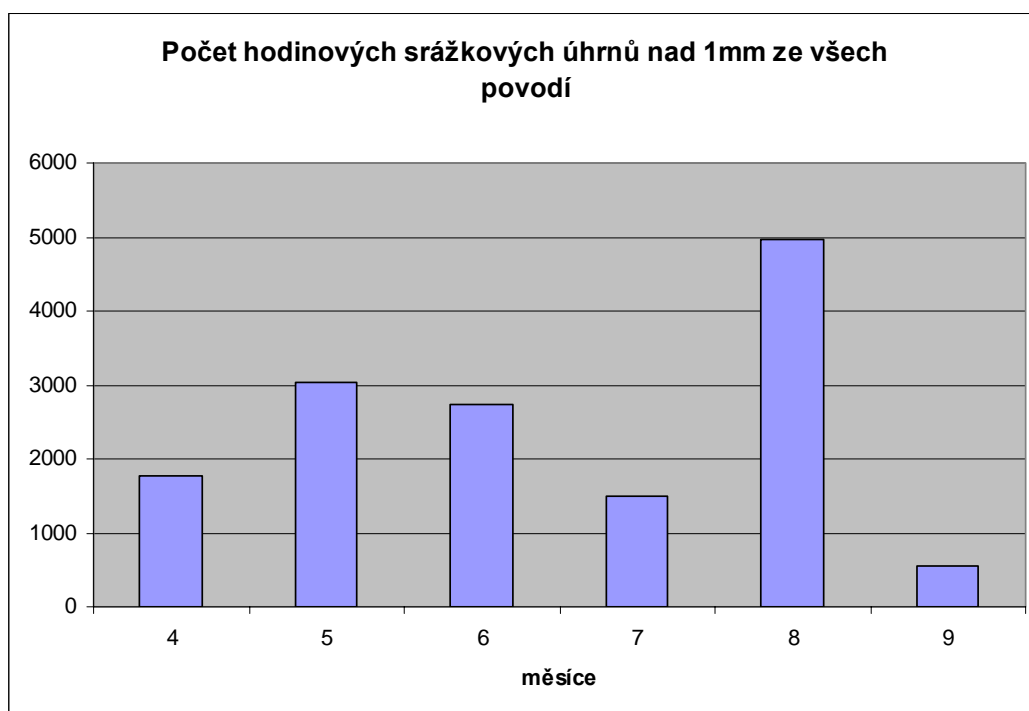
5 Výsledky a diskuze

5.1 Zpracované období

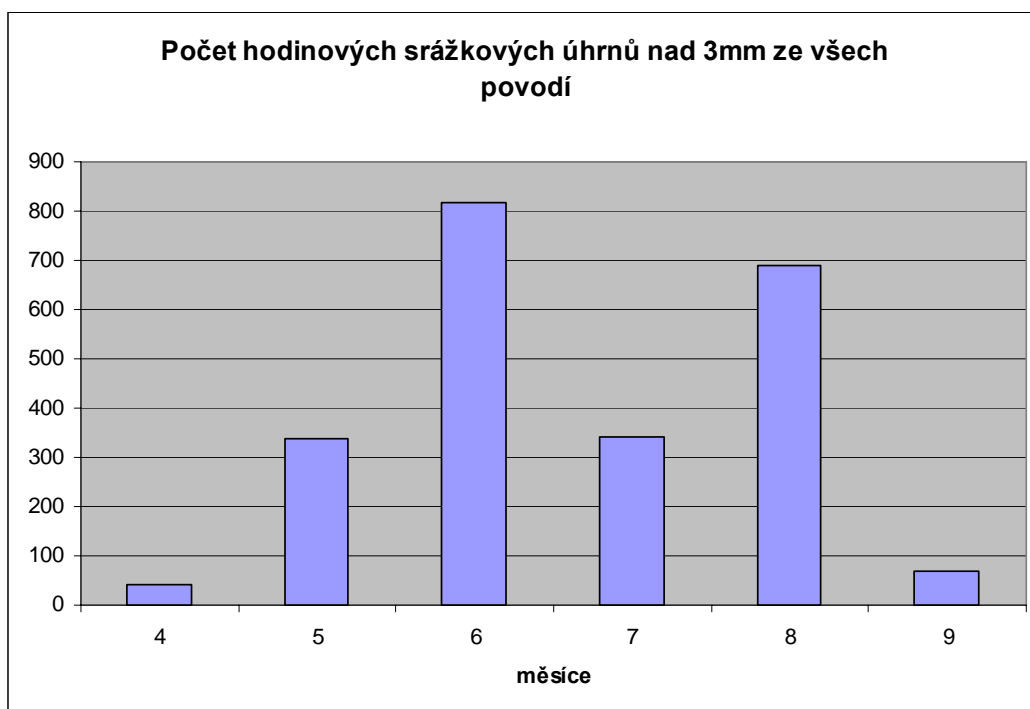
Pro zpracování bylo vybráno období 1.4.-30.9.2006. S ohledem na to, že tato práce má za úkol verifikovat vhodnost použití krátkodobých odhadů srážek metodou COTREC pro hydrologické účely, je právě teplá polovina roku hlavním předmětem zájmu. Srovnání bylo prováděno na průměrných hodinových úhrnech vztažených na jednotlivá povodí.

Graf 2 ukazuje počet „skutečných“ (merge) průměrných hodinových srážkových úhrnů ze všech povodí přesahujících 1 mm, resp. 3 mm, v jednotlivých měsících zkoumaného období. Měsíc červenec byl z hlediska srážek podprůměrný, což se projevilo v následném srovnání předpovědí.

Na grafech (3a-g) je zobrazen histogram relativní četnosti průměrných hodinových srážkových úhrnů vztažených na povodí za celé zkoumané období. Již na první pohled je z grafů patrné, že numerický model Aladin předpovídá výrazně vyšší počet termínů s malými srážkovými úhrny než odpovídá skutečnosti a na druhé straně vykazuje nižší relativní četnost intenzivních srážek (průměrný hodinový srážkový úhrn na povodí >3 mm).

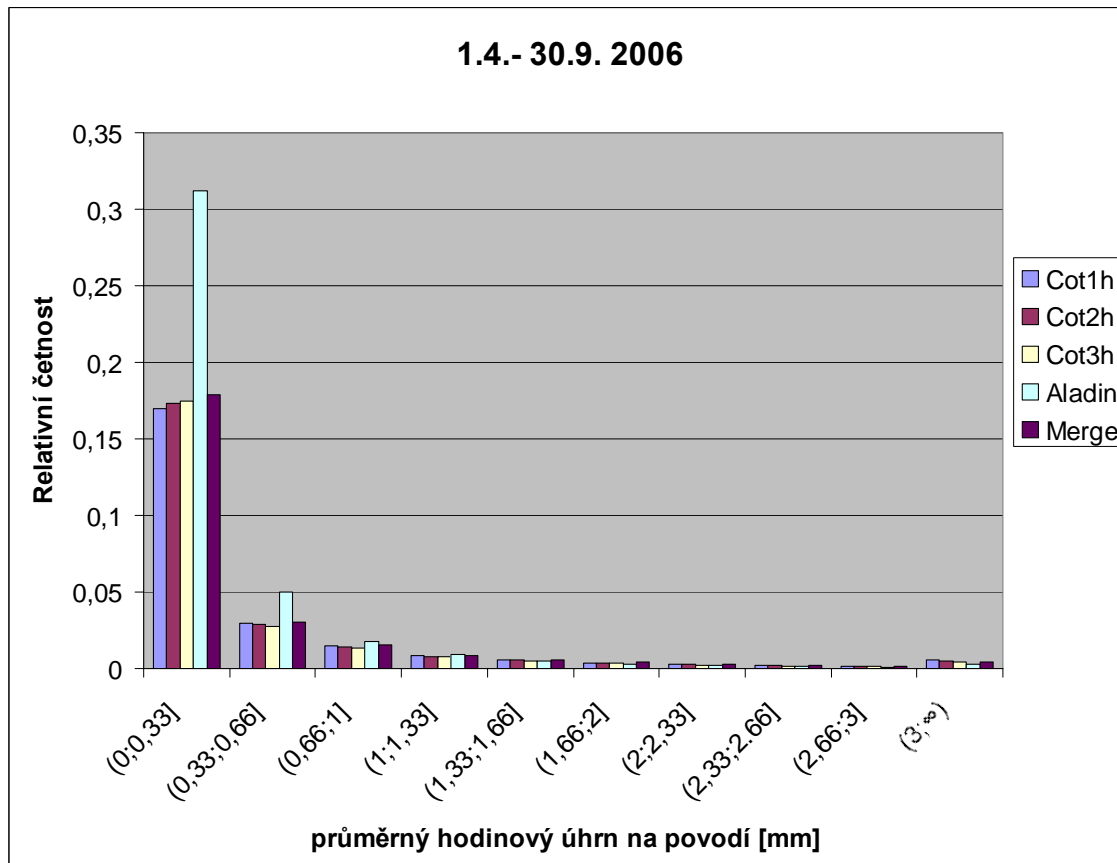


Graf 2a

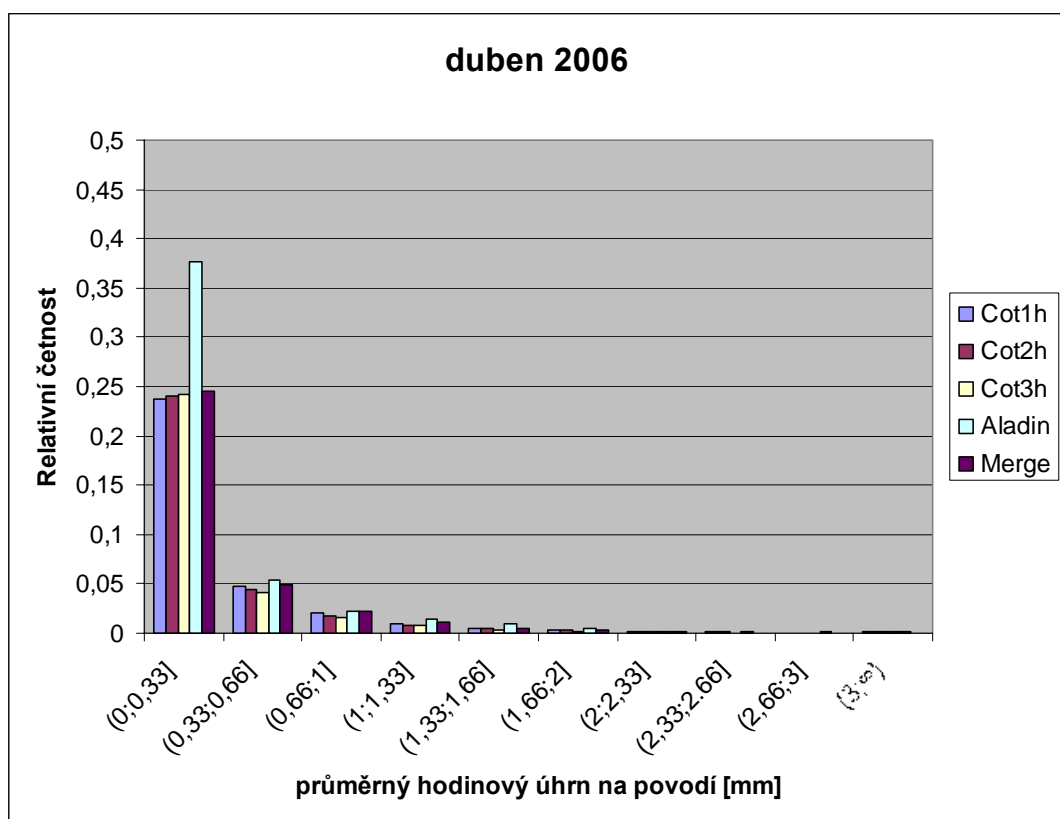


Graf 2b

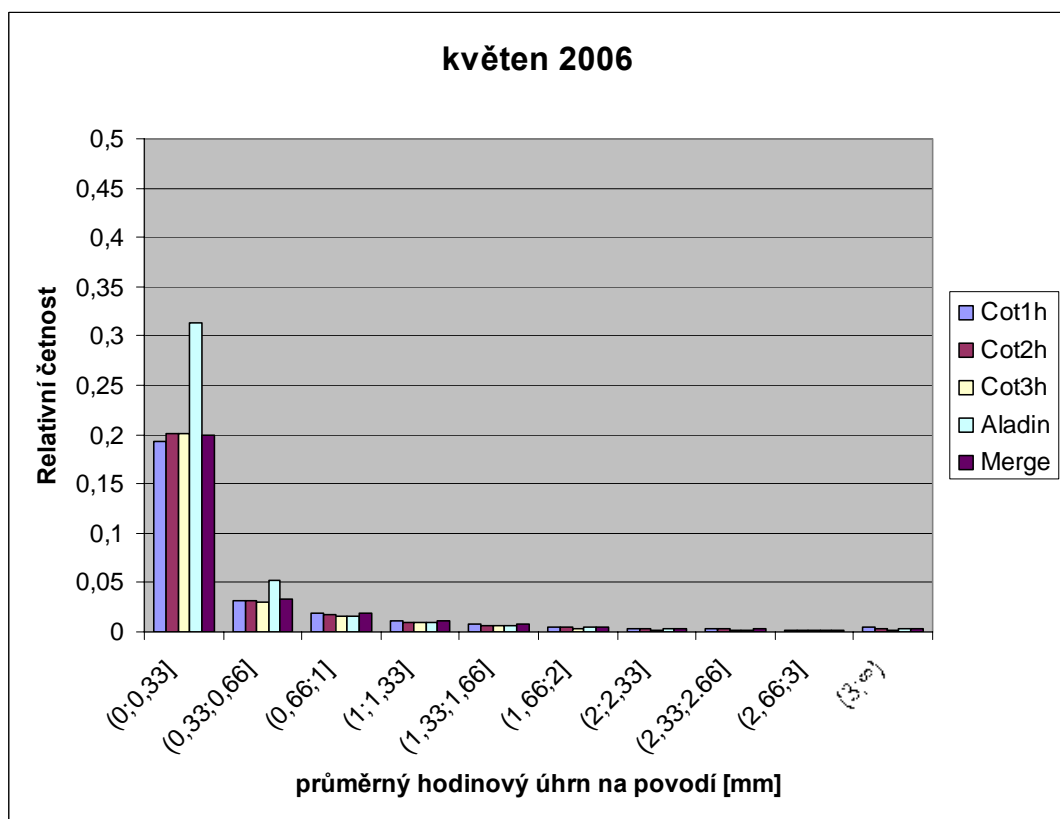
Grafy znázorňují měsíční četnost průměrných hodinových srážkových úhrnů na povodí větších než 1 mm (a) respektive větších než 3 mm (b).



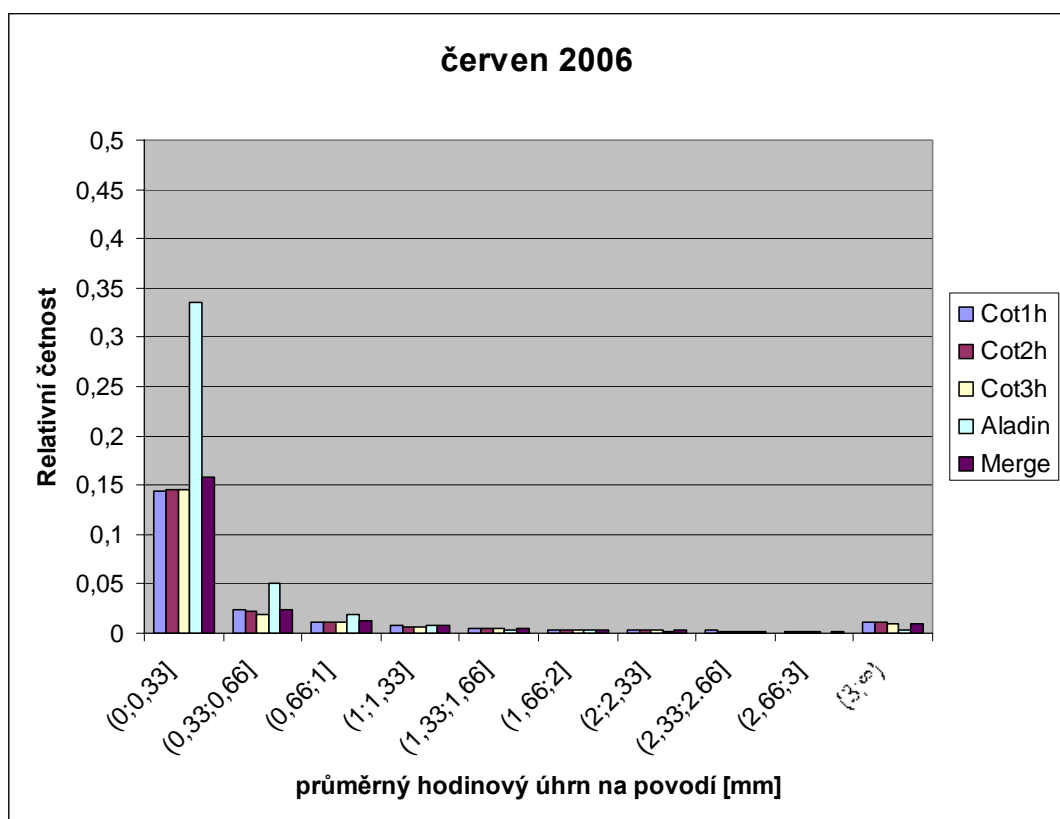
Graf 3a



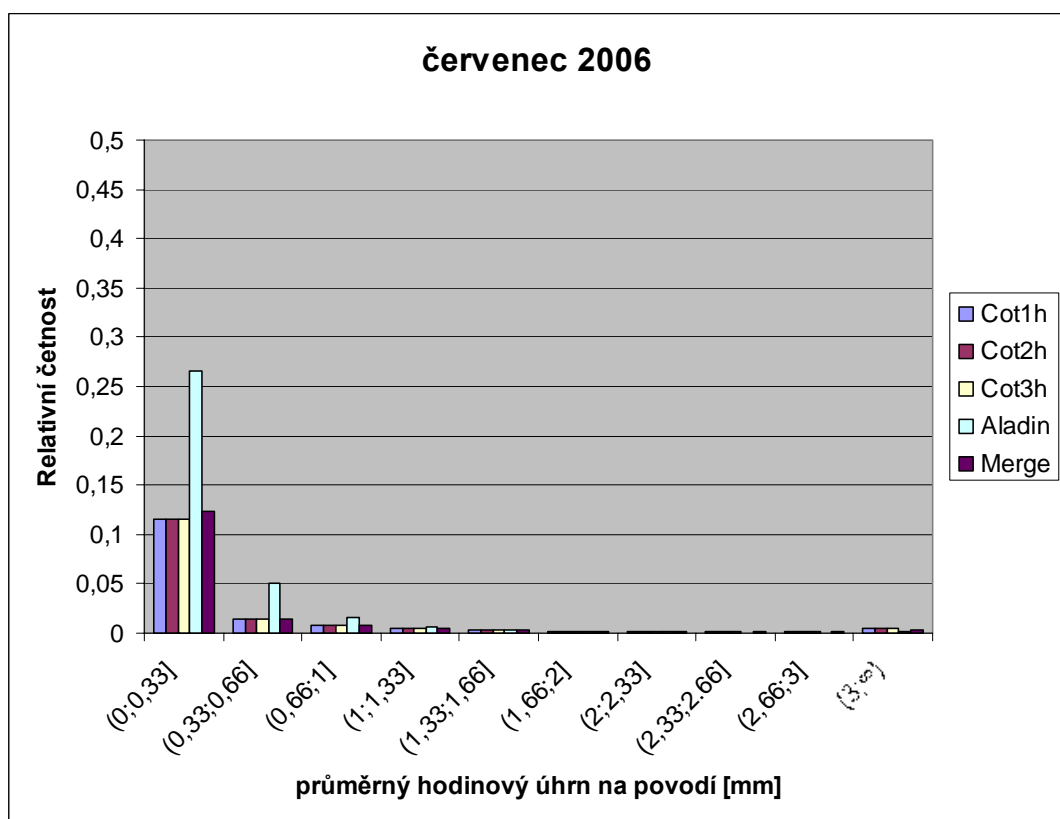
Graf 3b



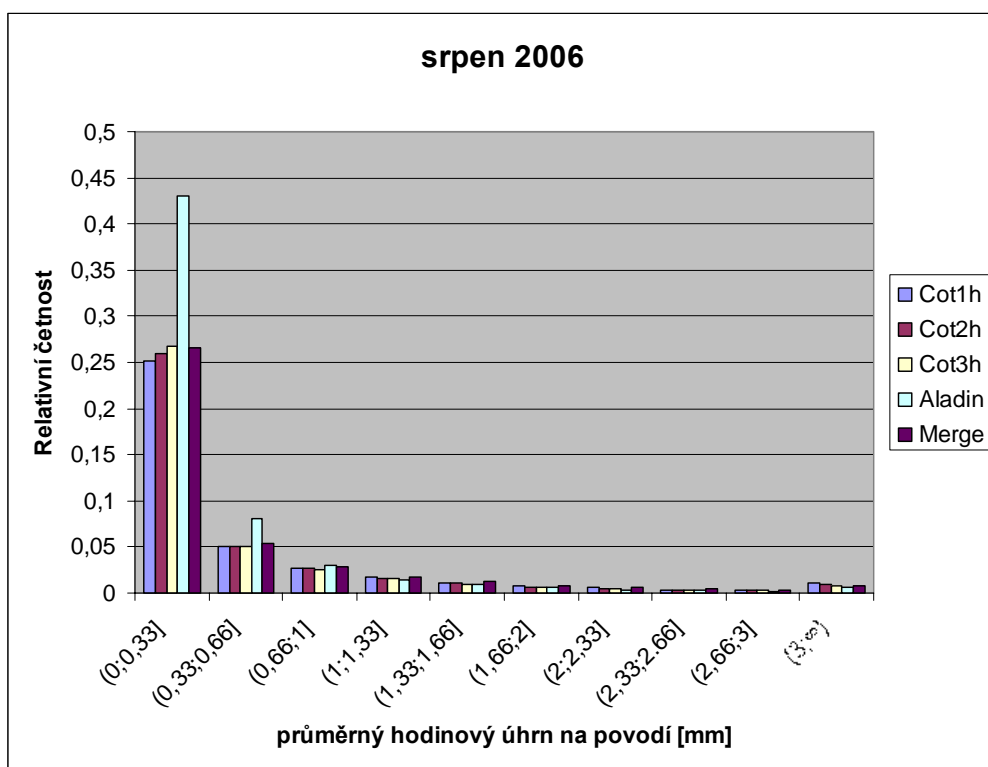
Graf 3c



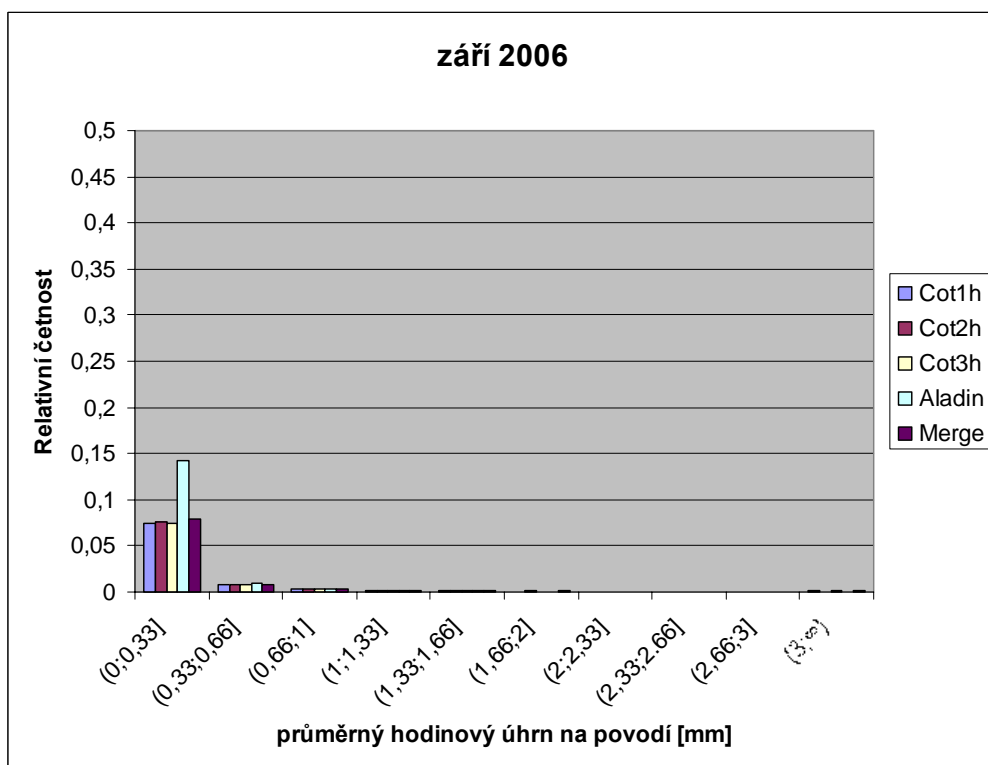
Graf 3d



Graf 3e



Graf 3f



Graf 3g

Grafy znázorňují relativní četnost průměrných hodinových srážkových úhrnů za celé období – 1.4.2006-30.9.2006 (a) a za jednotlivé měsíce (b-g). Cot1, Cot2 a Cot3 jsou předpovědi metodou COTREC na 0-1 h, 1-2 h a 2-3 h.

5.2 Metody hodnocení předpovědí

Výsledky předpovědí byly porovnávány s nejlepším operativně dostupným odhadem srážek – tzv. merge (viz. kapitola 4.1.4). Pro hodnocení kvality předpovědí byly vybrány běžně používané veličiny RMSE, korelační koeficient a dále skill score *POD*, *FAR* a *CSI*. Jednotlivá skill score jsou definována následovně:

$$\begin{aligned} POD &= \frac{a}{a+b} \\ FAR &= \frac{c}{a+c} \\ CSI &= \frac{a}{a+b+c} \end{aligned} \quad 17$$

kde a je počet úspěšných předpovědí, b je počet událostí, které nebyly předpověděny, a c je počet předpovězených událostí, ke kterým ve skutečnosti nedošlo. V případě hodnocení kvantitativních předpovědí srážek je nutné zvolit prahovou hodnotu úhrnu srážek, jejíž překročení předpovídáme.

Veličina *POD* nabývá hodnot mezi 0 a 1 a představuje podíl počtu úspěšných předpovědí ku celkovému počtu případů kdy nastane daný jev. *FAR* také nabývá hodnot od 0 do 1 a představuje podíl předpovědí jevu, který ve skutečnosti nenastal ku celkovému počtu předpovědí daného jevu. *CSI* je veličina často používaná v meteorologii k hodnocení předpovědí a lze ji vyjádřit pomocí *POD* a *FAR* podle následujícího vzorce:

$$CSI = \left[(POD)^{-1} + (1 - FAR)^{-1} - 1 \right]^{-1} \quad 18$$

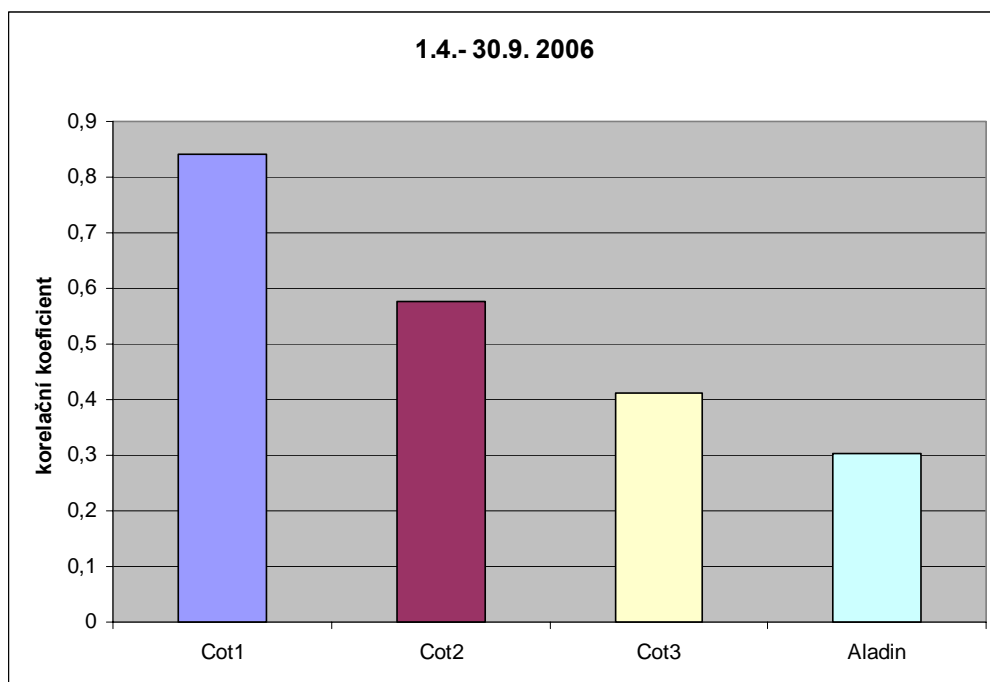
CSI nabývá hodnot mezi 0 a 1 a čím více se blíží 1, tím je předpověď lepší.

5.3 Výsledky

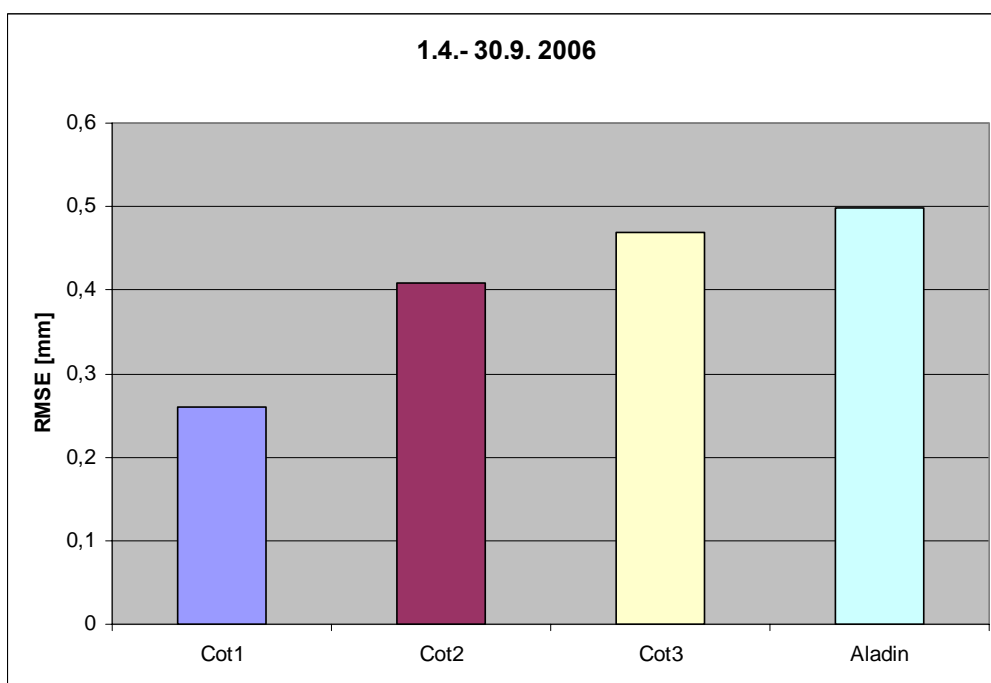
5.3.1 Zhodnocení za celé období

Nejprve bylo celé období vyhodnoceno jako celek. Byly tedy spočítány všechny veličiny zvolené pro porovnání kvality předpovědí pro celé období, ze všech povodí dohromady (graf 4a-e, graf 5a-c). Předmětem srovnávání byly průměrné srážkové úhrny vztažené na povodí. Všechna porovnání ukázala, že metoda COTREC na 1-3 hodiny dopředu dává v průměru lepší výsledky než numerický model Aladin.

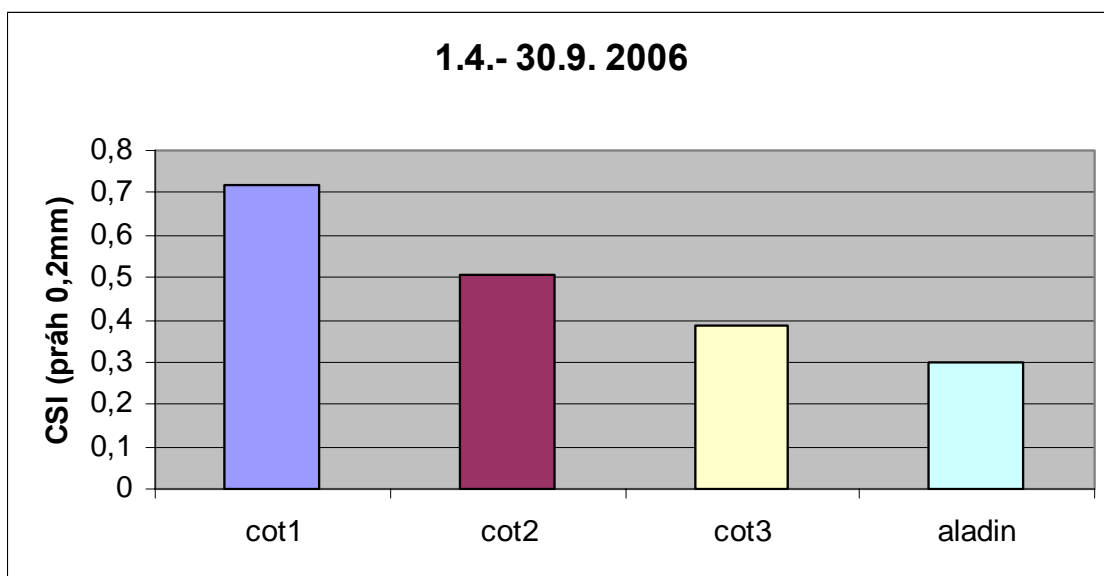
Na grafu znázorňujícím skill score s prahovou hodnotou hodinového úhrnu srážek 0,2 mm je opět vidět, že Aladin četnost slabých srážek přeceňuje.



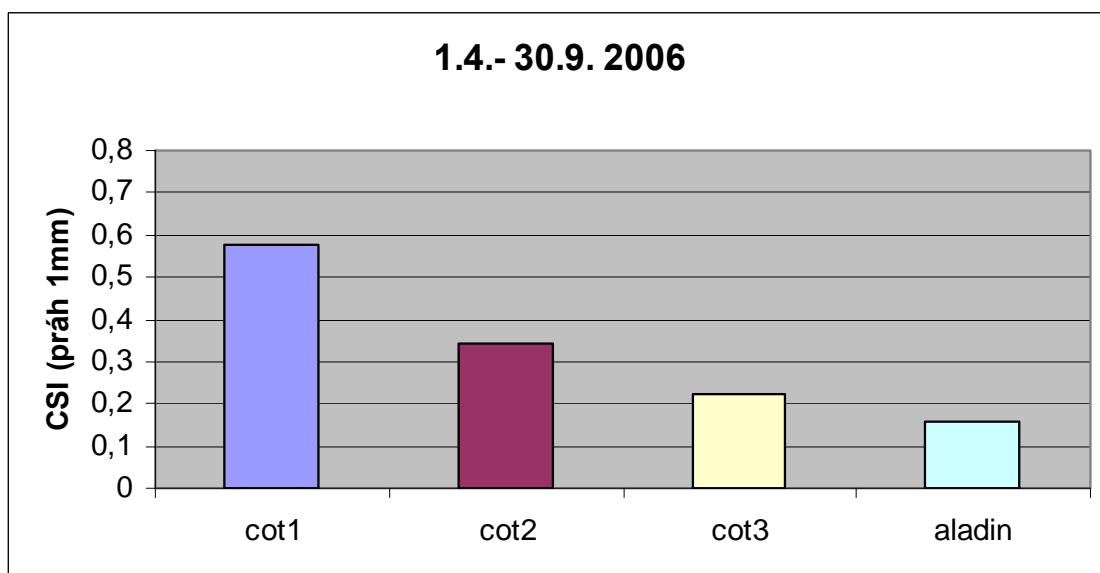
Graf 4a



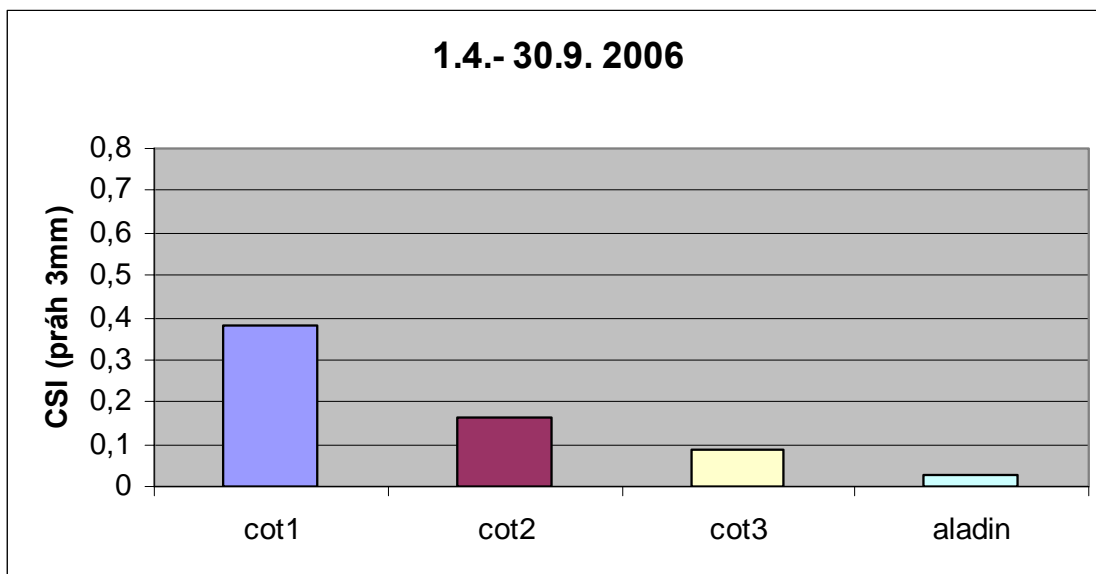
Graf 4b



Graf 4c

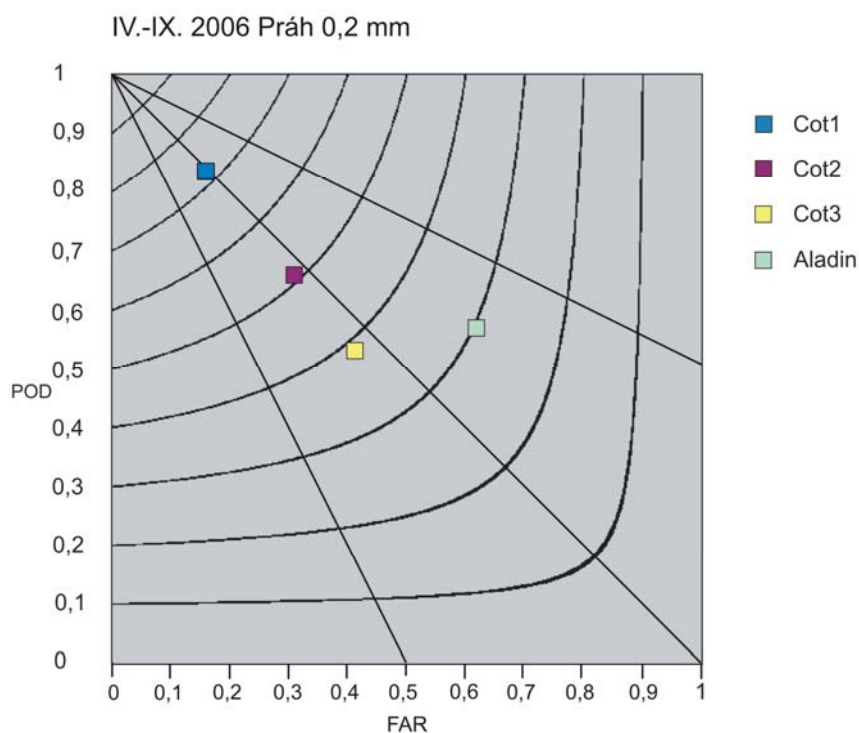


Graf 4d

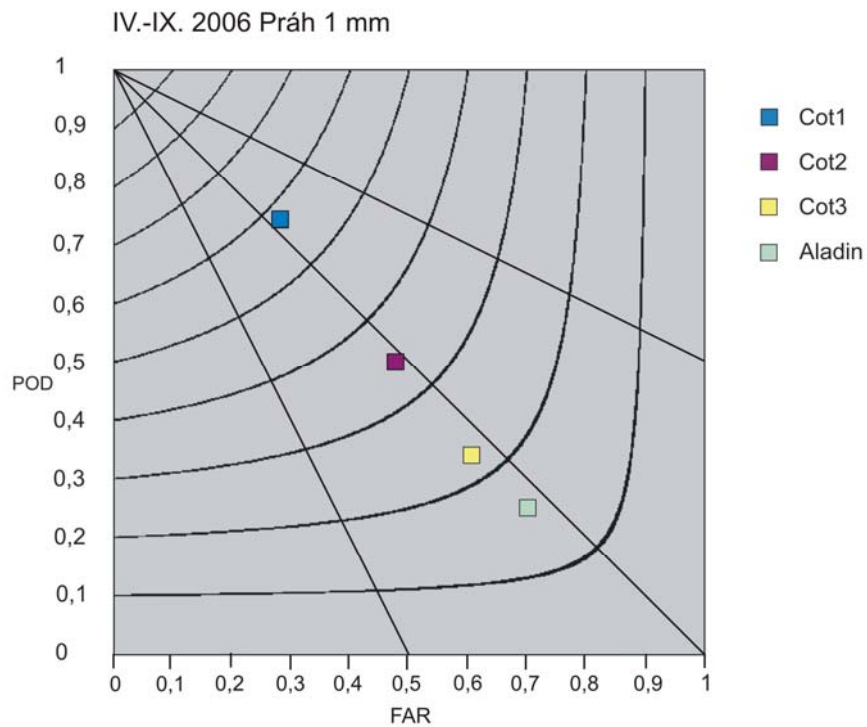


Graf 4e

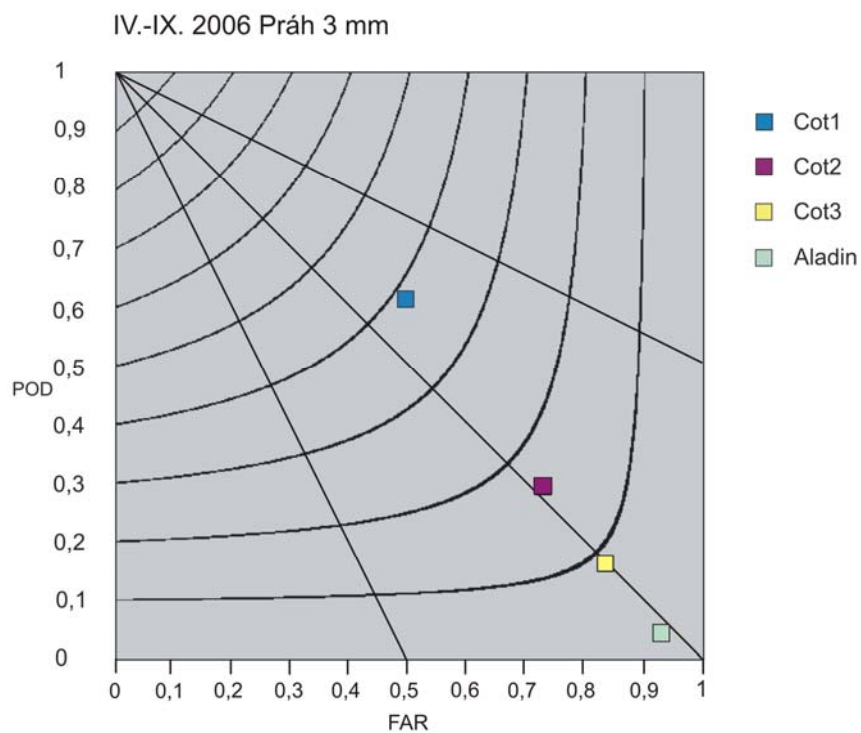
Porovnání předpovědí za celé zkoumané období ze všech povodí dohromady – korelační koeficient (a), RMSE (b) a *CSI* s prahovou hodnotou 0,2 mm (c), 1 mm (d) a 3 mm (e). Cot1, Cot2 a Cot3 jsou předpovědi metodou COTREC na 0-1 h, 1-2 h a 2-3 h.



Graf 5a



Graf 5b



Graf 5c

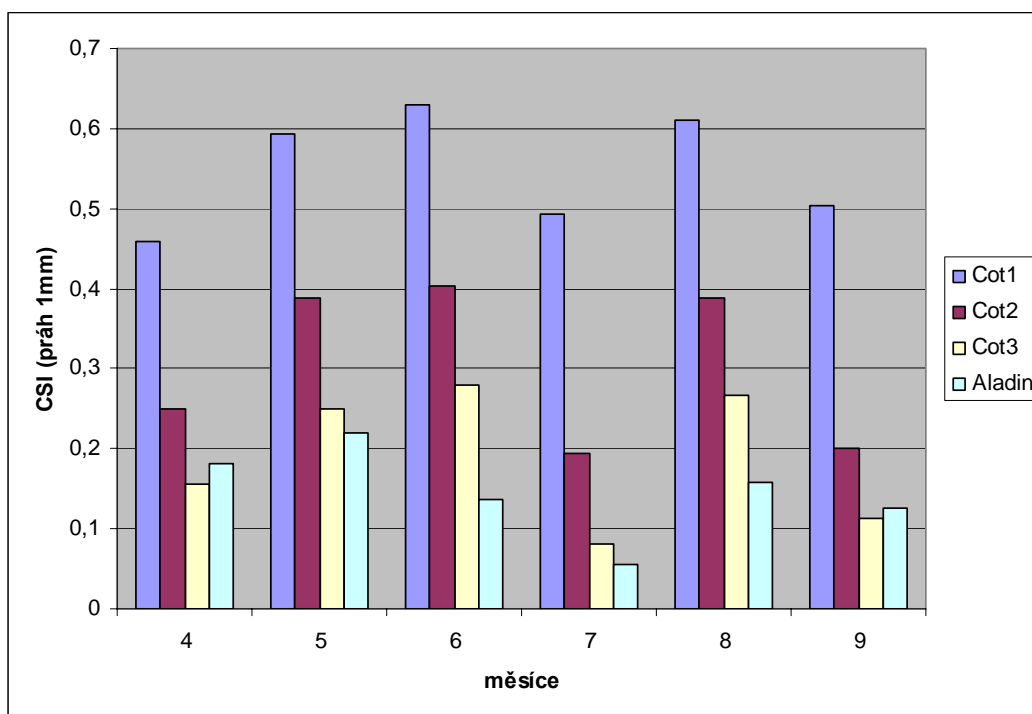
Porovnání předpovědí za celé zkoumané období ze všech povodí dohromady – na ose x jsou vyneseny hodnoty *FAR*, na ose y *POD* a černě jsou vyneseny izočáry *CSI* (od 0,1 do 0,9). Prahová hodnota byla zvolena 0,2 mm (a), 1 mm (b) a 3 mm (c). Cot1, Cot2 a Cot3 jsou předpovědi metodou COTREC na 0-1 h, 1-2 h a 2-3 h.

5.3.2 Vyhodnocení pro jednotlivé měsíce

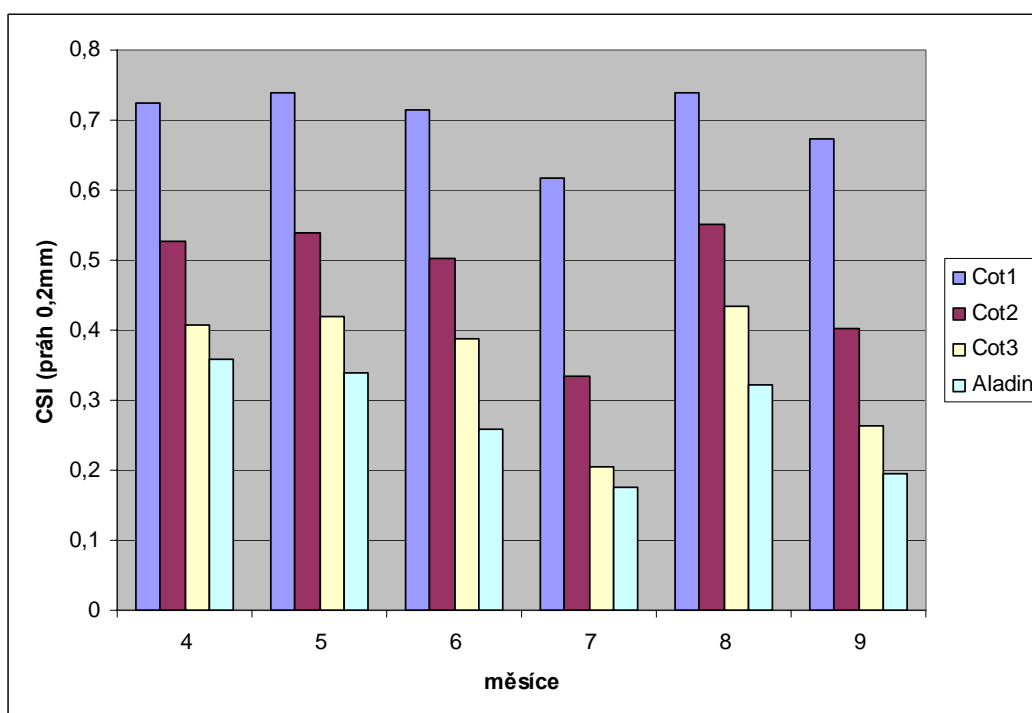
Následně byly spočteny hodnoty *CSI* (prahová hodnota průměrných hodinových srážek na povodí 0,2 a 1 mm), RMSE a korelačního koeficientu po měsících, opět ze všech povodí (Graf 6a-d). Zde už není výsledek tak jednoznačný. Předpověď metodou COTREC na 0-1 h a na 1-2 h poskytuje stále lepší výsledky než model Aladin. Pouze v červenci vykazuje předpověď metodou COTREC na 1-2 h horší výsledek v hodnocení pomocí RMSE. Předpověď na 2-3 h metodou COTREC však v některých měsících (duben, červenec a září) dává srovnatelné, případně trochu horší výsledky než model Aladin.

Očekávalo se, že kvalita předpovědi v létě klesne, především z důvodu intenzivnější konvekce, která je jak extrapolační metodou COTREC tak numerickým modelem Aladin hůře předpovídatelná než stratiformní srážky. To potvrzuje měsíční chod jak RMSE, tak korelačního koeficientu. To, že *CSI* pro prahovou hodnotu 1 mm naopak roste, si vysvětlují tím, že se nejedná o nevychýlenou veličinu. U *CSI* indexu totiž s narůstající frekvencí předpovídaného jevu dochází k přeceňování [23]. Tomu by odpovídal i pokles *CSI* v měsíci červenci, který byl na intenzivnější srážky podprůměrný vůči ostatním letním měsícům z testovaného období.

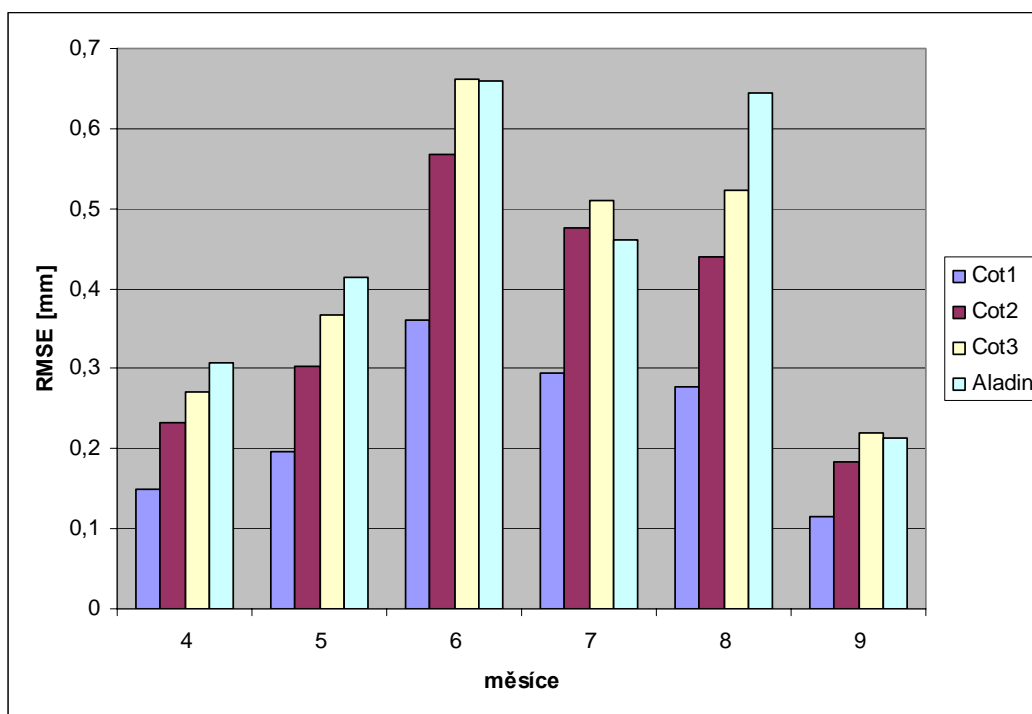
V měsíci červenci je také vidět pokles hodnoty RMSE vůči sousedním měsícům a zároveň i pokles korelačního koeficientu. To je na první pohled v rozporu, ovšem dle mého názoru to lze vysvětlit právě podprůměrností měsíce, co se týče srážkových úhrnů.



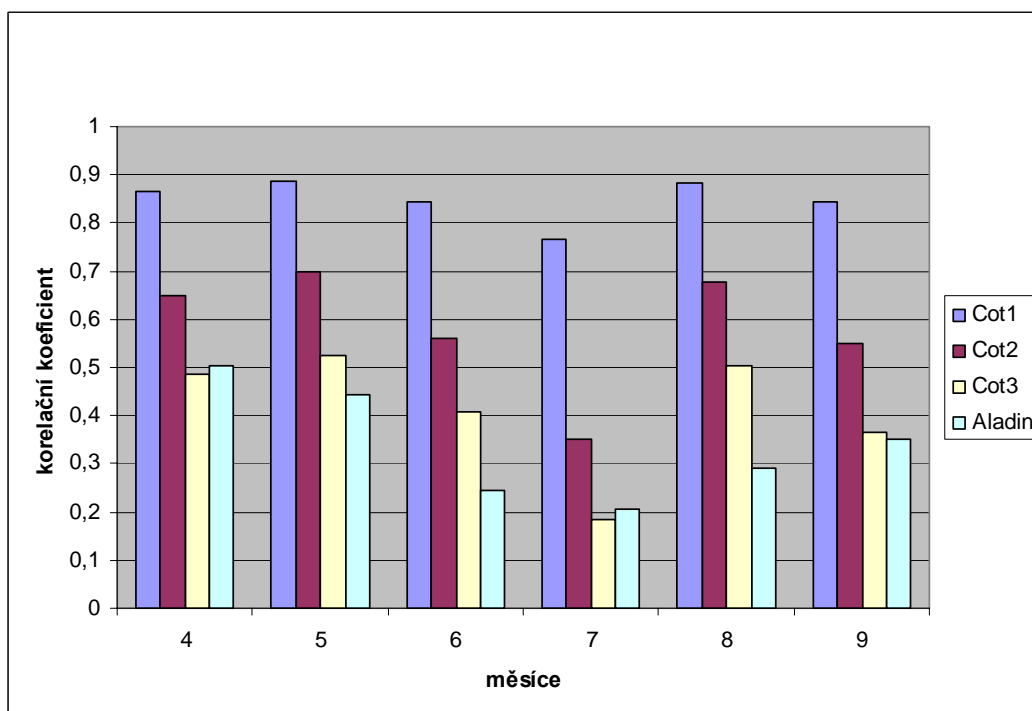
Graf 6a



Graf 6b



Graf 6c

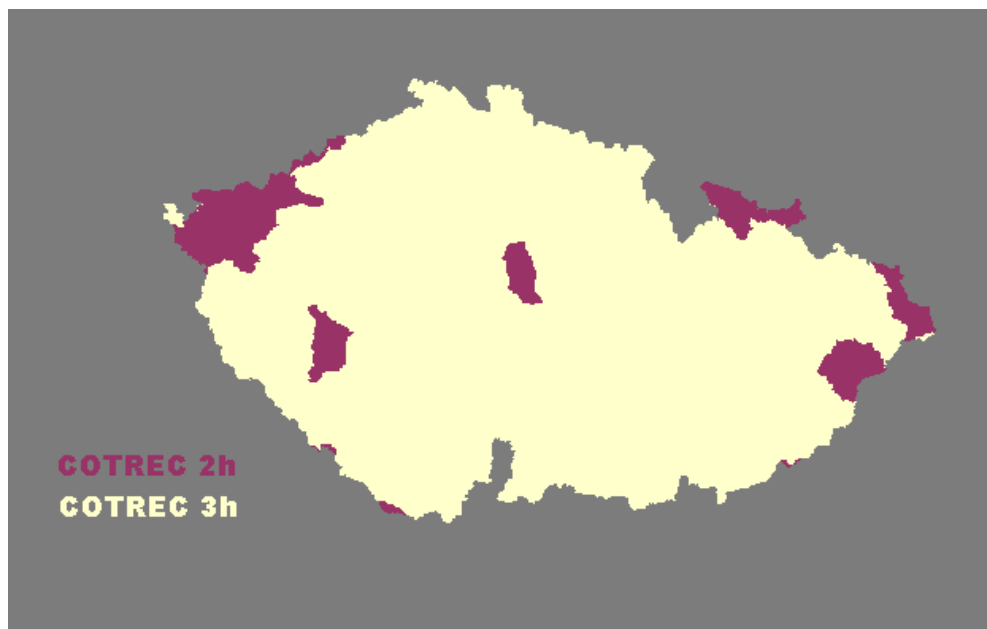


Graf 6d

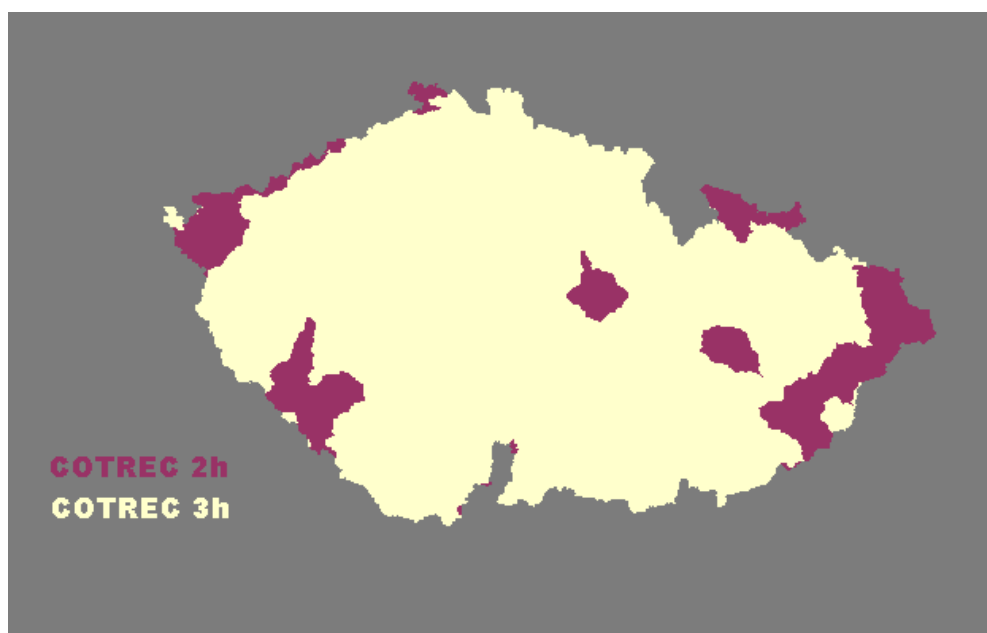
Měsíční srovnání předpovědí ze všech povodí dohromady – *CSI* s prahem 1 mm (a), s prahem 0,2 mm (b), RMSE (c) a korelační koeficient (d). Cot1, Cot2 a Cot3 jsou předpovědi metodou COTREC na 0-1 h, 1-2 h a 2-3 h.

5.3.3 Celé období na jednotlivých povodích

V další fázi byla pozornost věnována variabilitě kvality předpovědi na jednotlivých povodích. Zde byl vybrán pro srovnání korelační koeficient a *CSI* s prahovou hodnotou 1 mm (obr. 11a, 12a, 13a a obr. 14-18).



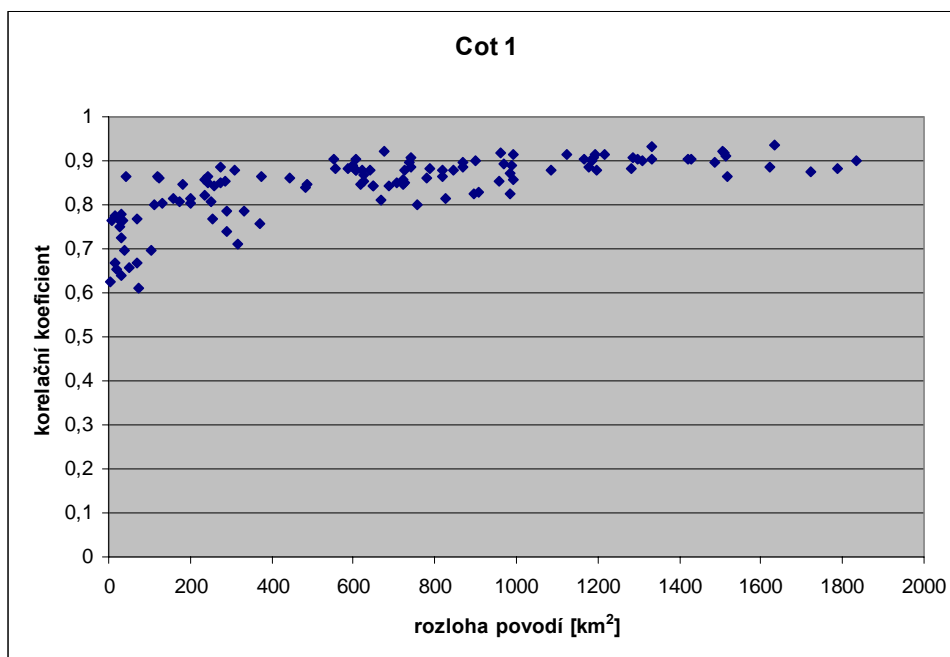
Obr. 10a



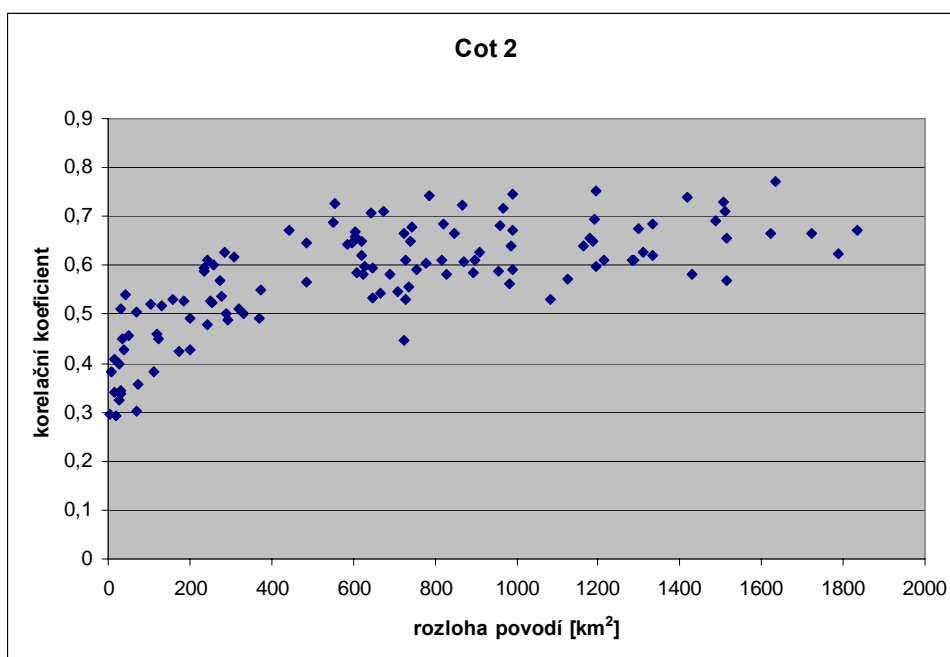
Obr. 10b

Doba (maximálně 3 hodiny) na kterou poskytuje metoda COTREC lepší výsledky než numerický předpovědní model Aladin. Hodnocení bylo provedeno pomocí korelačního koeficientu (a) a podle *CSI* s prahovou hodnotou 1 mm (b).

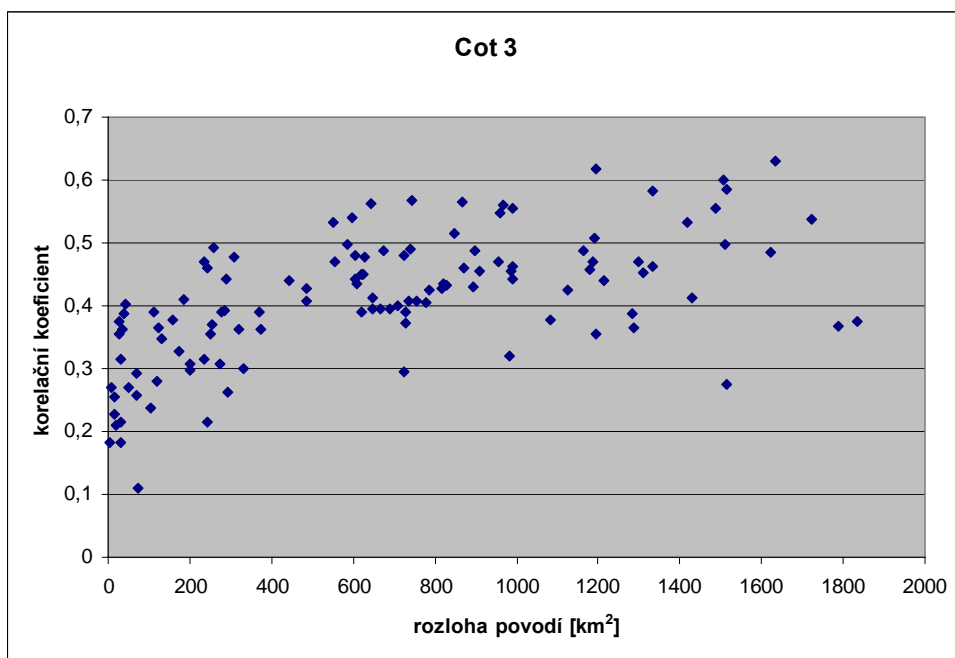
Obrázky 10a a 10b ukazují, že za celé testované období dává metoda COTREC na 2-3 h lepší výsledky než model Aladin s výjimkou několika povodí v pohraničí (pravděpodobné příčiny nižší kvality předpovědi metodou COTREC v těchto oblastech budou diskutovány dále v této kapitole) a v případě několika dalších jednotlivých povodí. Výsledky dále ukazují, že kvalita předpovědi se zvyšuje s rostoucí velikostí povodí, což dokumentují grafy 7a-d. Průměrování srážkových úhrnů z většího území pochopitelně vede k lepším výsledkům.



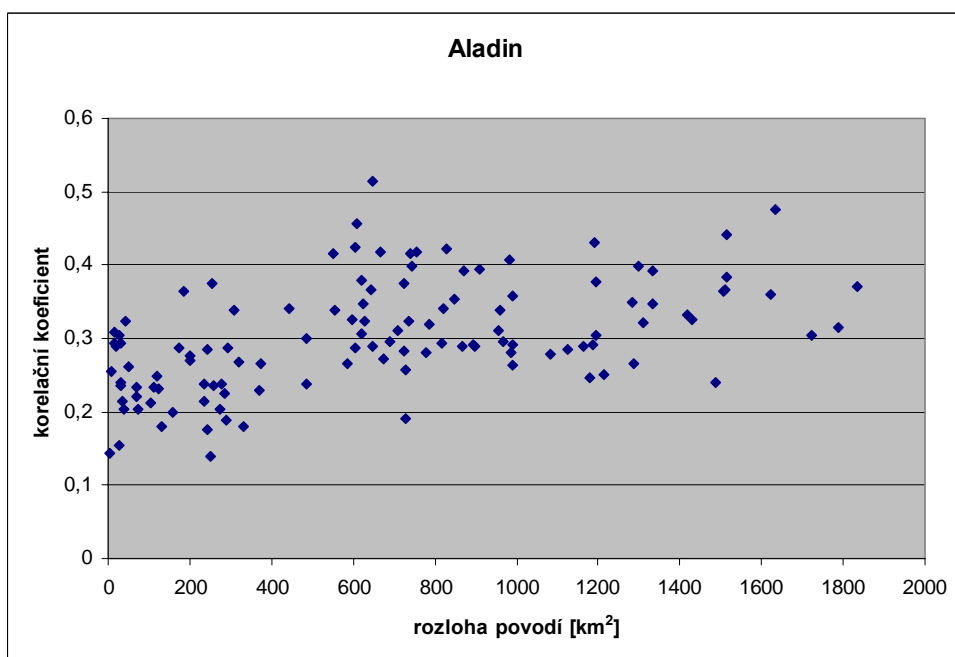
Graf 7a



Graf 7b



Graf 7c

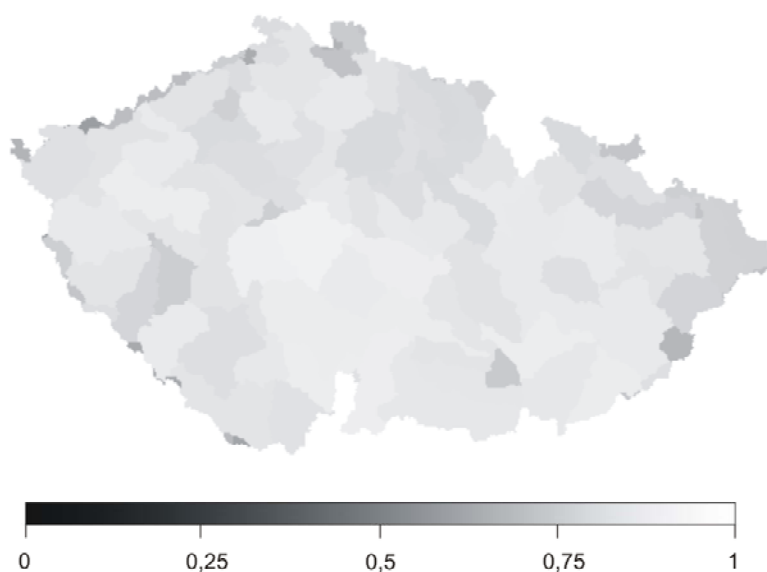


Graf 7d

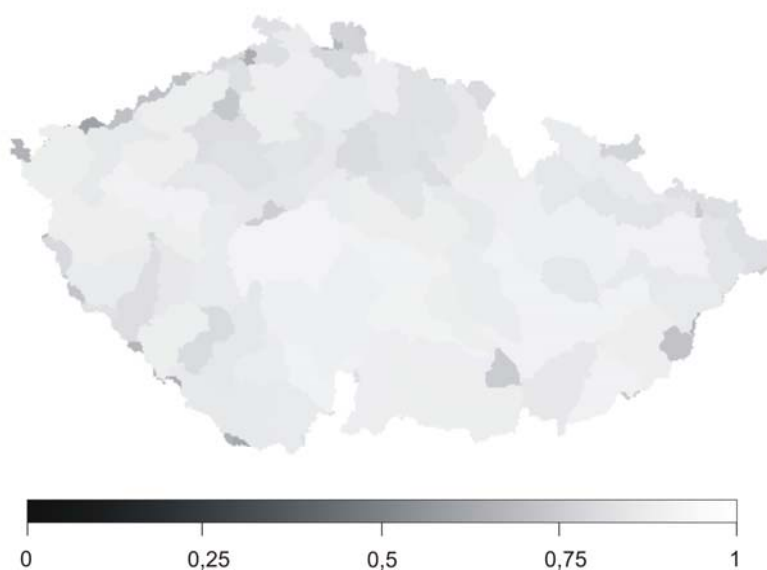
Závislost korelačního koeficientu předpovědi na rozloze povodí.

Dále byl pro celé období spočítán korelační koeficient předpovědi metodou COTREC a adjustovaného radarového odhadu (obr. 11b-13b). To mělo pomoci zjistit do jaké míry je kvalita předpovědi v daném povodí ovlivněna chybou radarového odhadu (rozdíl mezi adjustovaným radarovým odhadem a merge) a jaká část chyby je dána čistě chybou předpovědní metody.

Ukázalo se, že výsledky při srovnání předpovědí s adjustovaným radarovým odhadem se od porovnání předpovědí s merge liší minimálně. V průměru však porovnání s adjustovaným radarovým odhadem vyšlo o něco lépe. Největší rozdíl korelačních koeficientů (korelace předpovědi s adjustovaným radarovým odhadem mínus korelace předpovědi s merge), průměrovaný přes všechna povodí, byl zaznamenán u předpovědi na 1 h. U předpovědi metodou COTREC na 0-1 h činil průměrný rozdíl 0,027, pro předpověď na 1-2 h 0,013 a pro předpověď na 2-3 h jen 0,010.



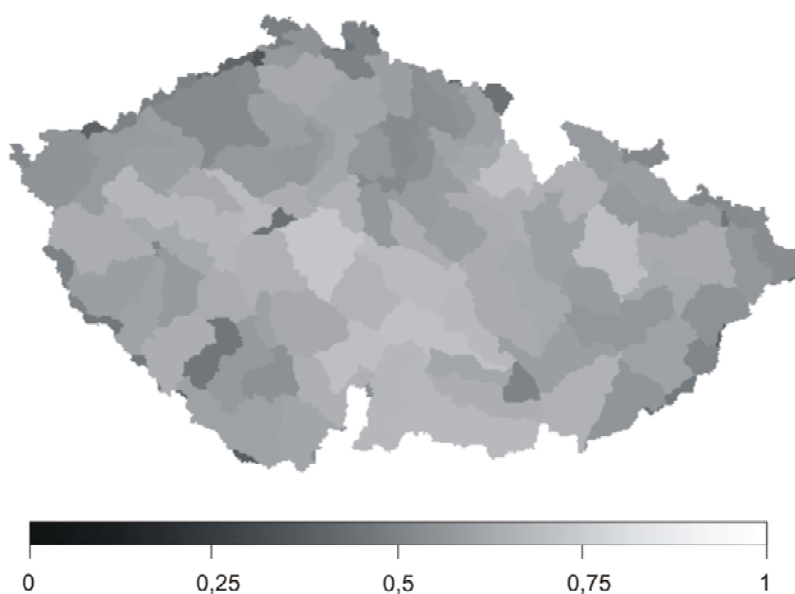
Obr. 11a



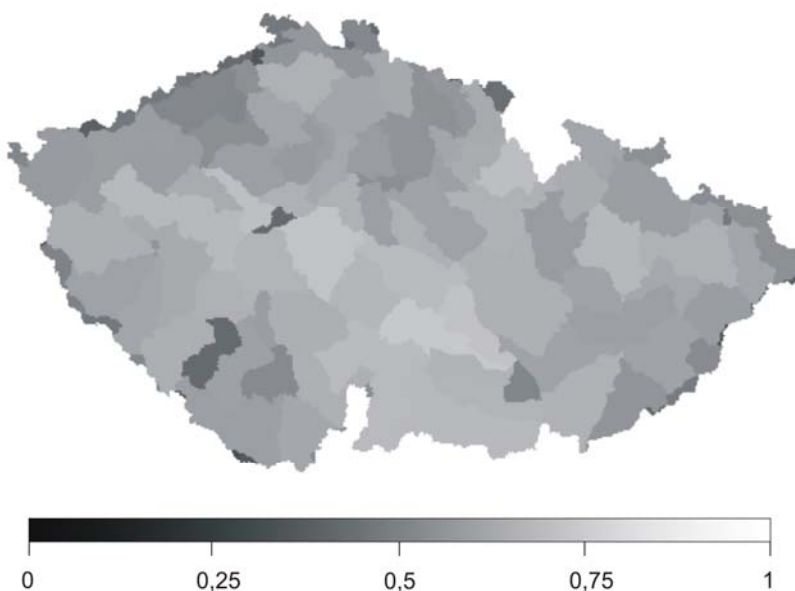
Obr. 11b

Grafické znázornění korelačního koeficientu předpovědi metodou COTREC na 0-1h na jednotlivých povodích (a). Pro srovnání byl vypočten korelační koeficient výsledků metody COTREC s adjustovaným radarovým odhadem (b).

Rozdíly jsou patrné především v oblastech s problematickou viditelností radarem a v místech s relativně hustou srážkoměrnou sítí. To, že je chyba největší právě u předpovědi na nejkratší dobu, lze vysvětlit tím, že na 1 h hodinu dopředu je extrapolace poměrně přesná, zatímco s časem mají chyby spojené s chybně stanoveným pohybovým polem a časový rozvoj srážkových procesů větší váhu při utváření celkové chyby předpovědi.

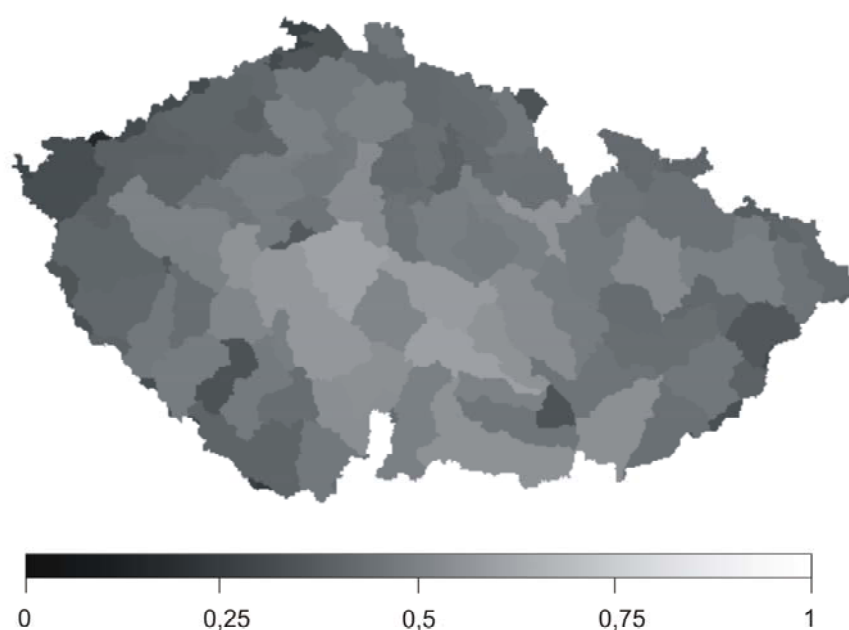


Obr. 12a

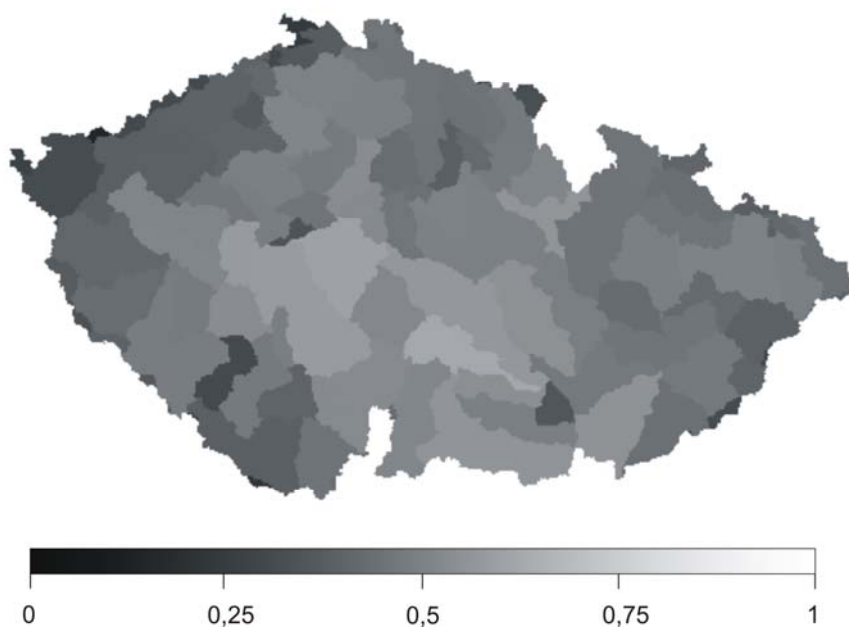


Obr. 12b

Grafické znázornění korelačního koeficientu předpovědi metodou COTREC na 1-2h na jednotlivých povodích (a). Pro srovnání byl vypočten korelační koeficient výsledků metody COTREC s adjustovaným radarovým odhadem (b).

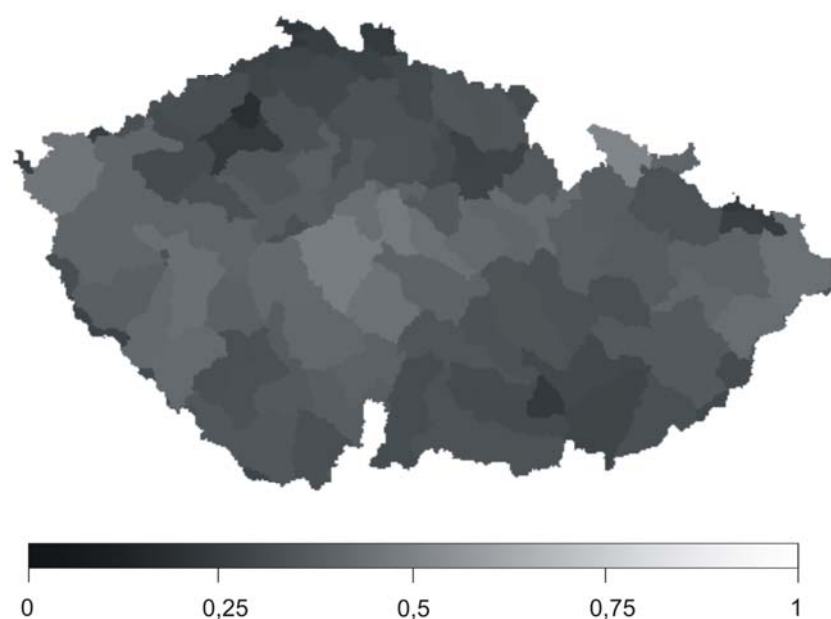


Obr. 13a



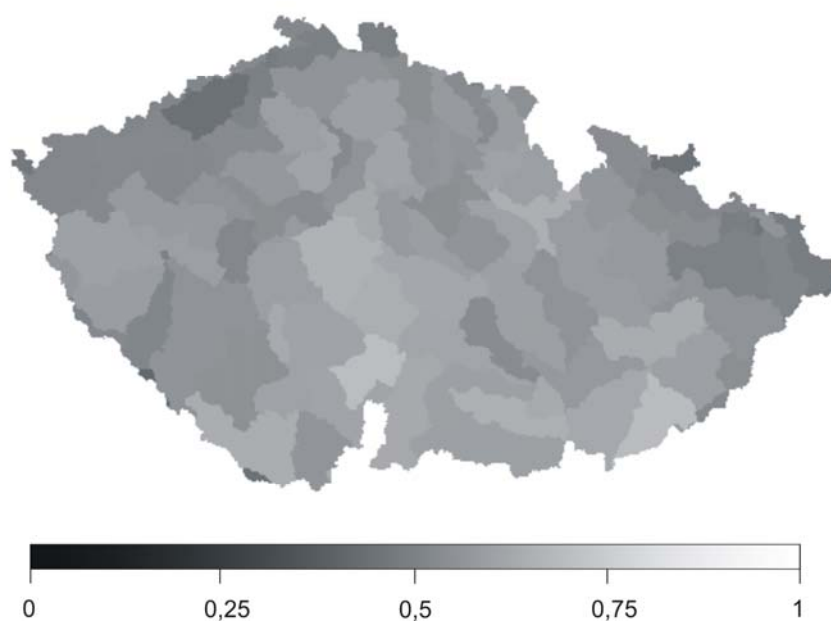
Obr. 13b

Grafické znázornění korelačního koeficientu předpovědi metodou COTREC na 2-3h na jednotlivých povodích (a). Pro srovnání byl vypočten korelační koeficient výsledků metody COTREC s adjustovaným radarovým odhadem (b).



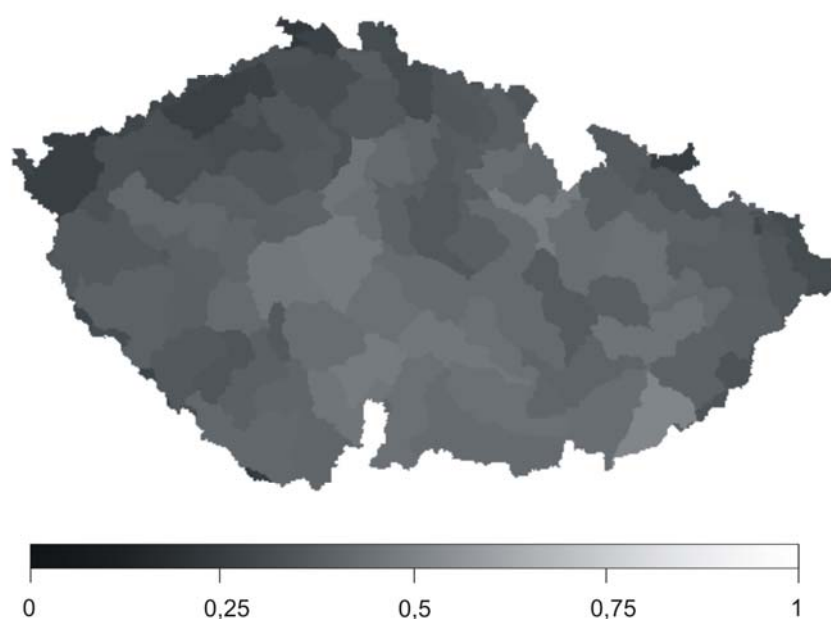
Obr. 14

Grafické znázornění korelačního koeficientu předpovědi numerického modelu Aladin na jednotlivých povodích.



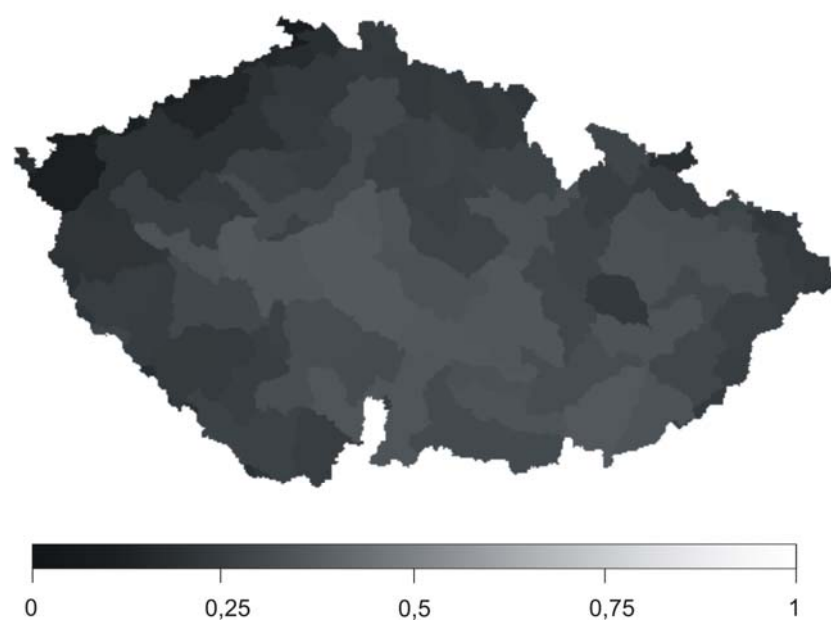
Obr. 15

Grafické znázornění *CSI* indexu s prahovou hodnotou 1 mm předpovědi metodou COTREC na 0-1 h na jednotlivých povodích.



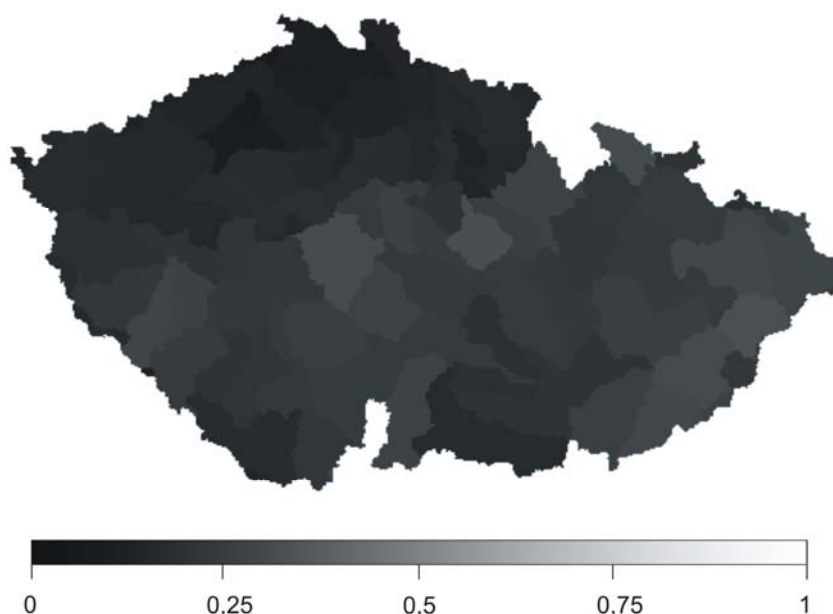
Obr. 16

Grafické znázornění *CSI* indexu s prahovou hodnotou 1mm předpovědi metodou COTREC na 1-2h na jednotlivých povodích.



Obr. 17

Grafické znázornění *CSI* indexu s prahovou hodnotou 1 mm předpovědi metodou COTREC na 2-3 h na jednotlivých povodích.



Obr. 18

Grafické znázornění *CSI* indexu s prahovou hodnotou 1mm předpovědi numerického modelu Aladin na jednotlivých povodích.

U předpovědi na delší dobu (obzvlášť patrné to je u předpovědi na 2-3 h) je rozdíl mezi porovnáním s adjustovaným radarovým odhadem a merge malý, a proto si znatelně horší kvalitu předpovědi, například v oblastech některých pohraničních hor, nelze vysvětlit chybou v radarovém odhadu srážek. Nabízí se několik možností vysvětlujících tento fakt. Jako nejpravděpodobnější se mi jeví následující dvě:

Při přechodu srážkové oblačnosti přes orografii dochází jak k ovlivnění směru a rychlosti postupu, tak k zesilování respektive zeslabování srážkové činnosti. To je nepodchytnuté metodou COTREC, která nepočítá s časovým vývojem radarového echa.

Další možné vysvětlení poskytuje fakt, že při extrapolaci na 2-3 hodiny může urazit radarové echo poměrně značnou vzdálenost. Vzdálená srážková oblačnost, u které v době počítání předpovědi vlivem rostoucí výšky radarového paprsku s vzdáleností nejsou pro radar viditelné spodní partie (s nejvyšší odrazivostí), se dostane do relativní blízkosti radaru, kde může následně dojít k podhodnocení i v porovnání s adjustovaným radarovým odhadem. To odpovídá znatelnému zhoršení předpovědi na 2-3 h v oblasti západních hranic ČR.

5.3.4 Experimenty s daty numerického předpovědního modelu Aladin

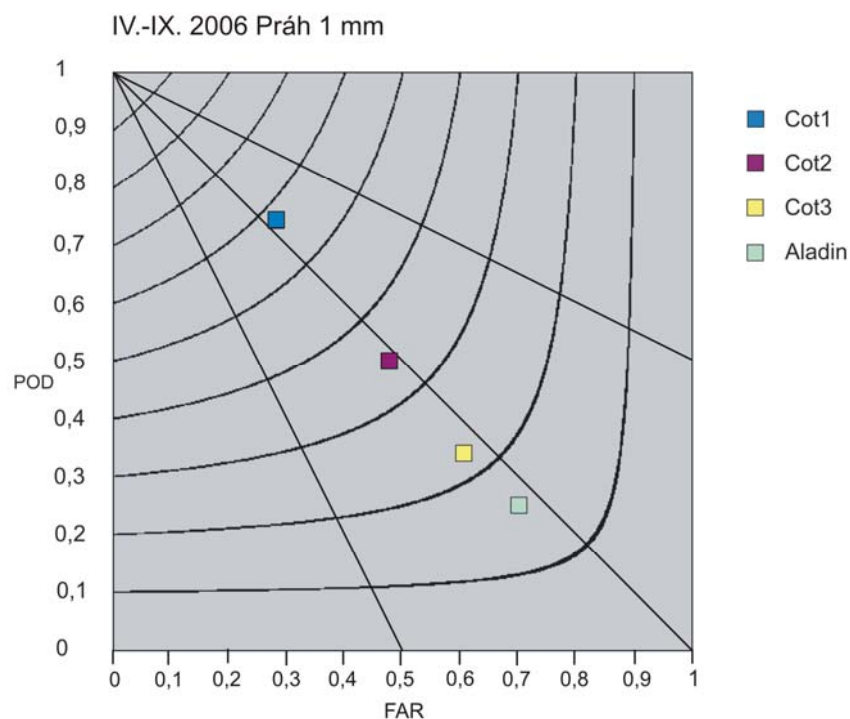
Jako další byl zkoumán vliv prodloužení časového intervalu mezi začátkem výpočtu numerického modelu Aladin a okamžikem, kdy jsou dostupné výsledky pro další zpracování na kvalitu předpovědi. To mělo vyloučit zhoršenou kvalitu předpovědi vlivem spin-up efektu v několika prvních operativně využitelných hodinách běhu modelu. Při srovnávání jsme předpokládali že předpověď z půlnoci je k dispozici ve 3 hodiny a polední v 16 hodin (což jsou typické hodnoty z operativního provozu viz kapitola 4.3. Pro porovnání byly vypočítány hodnoty korelačního koeficientu pro dostupnost předpovědi až v 7 respektive 19 a 11 respektive 23 hodin (viz Tabulka 1).

Tabulka 1

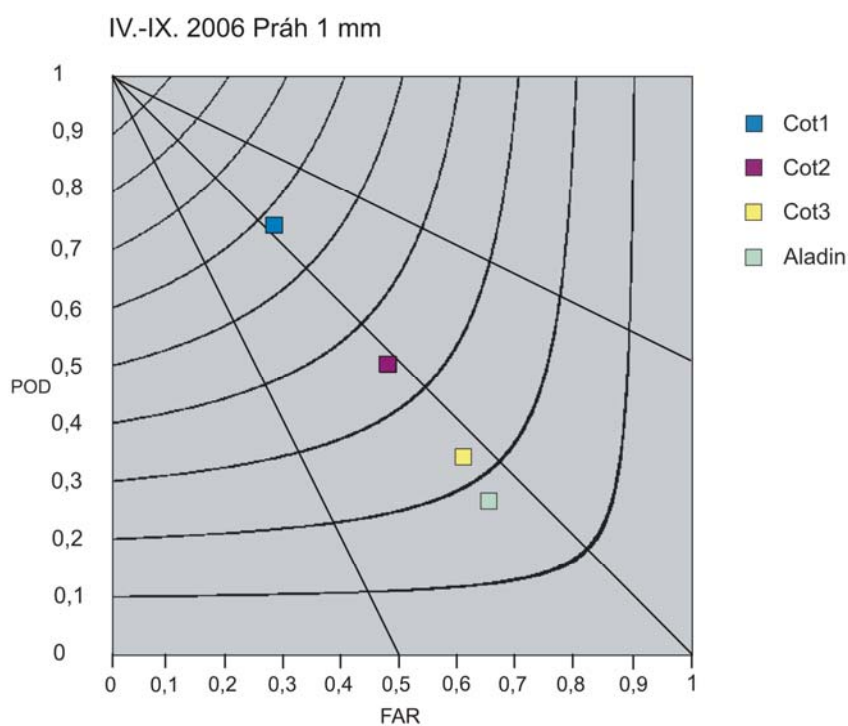
	3 h a 16 h	7 h a 19 h	11 h a 23 h
Korelační koeficient	0,302128	0,291091	0,287847

Výsledky potvrdily očekávání, že se předpověď numerického modelu Aladin s rostoucím časem bude zhoršovat. Rozdíl je ale poměrně malý.

V současné době se numerický předpovědní model Aladin operativně počítá každých 6 hodin. V testovaném období byl však operativní interval 12 hodin mezi jednotlivými výpočty. Byl proto proveden výpočet, který simuluje tyto častější běhy modelu Aladin. Z výpočtu byly vyřazeny všechny termíny, kde je výsledek numerického modelu Aladin starší než 6 hodin od okamžiku kdy jsou výsledky k dispozici. Pro srovnání byla vypočtena skill score s prahovou hodnotou průměrného hodinového úhrnu srážek na povodí 1 mm (graf 8).



Graf 8a



Graf 8b

Srovnání výsledků *POD*, *FAR* a *CSI* (izočáry *CSI* jsou vyznačeny černými křivkami) s prahovou hodnotou 1 mm za celé období (a) s výsledky, kde byly z testovaného období vybrány jen termíny 0-6 hodin od operativní dostupnosti výsledků numerického předpovědního modelu Aladin (b). Cot1, Cot2 a Cot3 jsou předpovědi metodou COTREC na 0-1 h, 1-2 h a 2-3 h.

U modelu Aladin došlo k mírnému zvýšení *POD* a snížení *FAR*, což vede ke zlepšení *CSI* z 0,16 na 0,18. Zajímavé je, že výsledky metody COTREC se v takto vybrané části souboru dat liší od výsledků z celého souboru dat v *CSI* maximálně o 0,01. To vypovídá o statistické významnosti zvoleného souboru dat. Značnou roli hraje fakt, že takto vybraná část dat obsahuje termíny 16-21 h, takže obsahuje jak rozvinutou odpolední konvekci, tak i velká bouřková jádra, která přetrvávají do večerních a nočních hodin.

6 Shrnutí

Za celé testované období (1.4.-30.9. 2006) pro všechna povodí v ČR vyšla předpověď metodou COTREC až na dobu 3 hodin dopředu ve všech zvolených veličinách lépe než numerický předpovědní model Aladin.

Následné hodnocení všech povodí po jednotlivých měsících testovaného období ukázalo, že výsledky metodou COTREC na 0-1 a na 1-2 hodiny vykazují lepší výsledky než numerický model Aladin, předpověď metodou COTREC na 2-3 hodiny v některých měsících dávala výsledky shodné případně nepatrně horší.

Srovnání provedené z celého testovaného období pro jednotlivá povodí ukázalo, že až na několik oblastí v pohraničí a ojedinělé povodí ve vnitrozemí jsou výsledky metody COTREC až na 3 hodiny dopředu kvalitnější než výsledky numerického modelu Aladin. Dále byla nalezena souvislost mezi kvalitou předpovědi a rozlohou daného povodí.

Dále bylo ověřeno, že předpověď srážek numerickým modelem Aladin v několika prvních operativně dostupných hodinách není znatelně ovlivněna spin-up efektem. Vynechání několika prvních operativně dostupných hodin (data jsou operativně k dispozici až několik hodin po zahájení výpočtu – viz kapitola 4.3) běhu modelu a nahrazení o 12 hodin starší předpovědi vedlo ke zhoršení předpovědi.

Byl také nasimulován operativní výpočet numerického předpovědního modelu Aladin po 6-ti hodinách (v testovaném období byl interval mezi výpočty 12 hodin), což vedlo k jistému, nikoliv však zásadnímu zlepšení jeho výsledků.

7 Závěr

Cílem práce bylo ověřit vhodnost použití metody COTREC pro kvantitativní předpověď srážek s důrazem na hydrologické účely. Na testovaném období se ukázalo, že na první 3 hodiny jsou výsledky metody COTREC vhodnější než výstup numerického modelu Aladin. To je plně v souladu s případovými studiemi [2]. Na základě dílčích výsledků této práce publikovaných v [1] a zmíněných případových studií se od jara 2007 začala krátkodobá předpověď srážek metodou COTREC operativně využívat jakožto vstup do hydrologického modelu HYDROG.

Je potřeba zdůraznit, že tato práce vychází z dat a metod operativně používaných mezi 4.-9.2006. Numerický model Aladin se neustále vyvíjí, během testovaného období bylo využíváno diagnostické schéma počítání srážek, od 31.1.2007 se používá schéma prognostické. Dále se neustále pracuje na parametrizacích souvisejících s výpočtem srážek. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, zkrátil se také interval mezi operativními výpočty modelu Aladin z 12-ti na 6 hodin.

Do budoucna se také počítá s vylepšováním radarových odhadů srážek, případně s modifikací metody COTREC. Jako perspektivní se jeví rozeznávání stratiformní a vrstevnaté oblačnosti a následné užívání různých konstant při přepočtu radarové odrazivosti na intenzitu srážek. U metody COTREC by mohlo dojít k zlepšení použitím pohybového pole z modelu Aladin, jakožto prvního odhadu, případně lze uvažovat modifikaci některých konstant, případně tyto konstanty operativně měnit dle charakteru obrazu radarového echa. Značným zlepšením by bylo úspěšné zavedení růstu, či zeslabování radarového echa, avšak zatím nebyly nikde publikovány metody, které by vykazovaly přesvědčivé výsledky.

V rámci této práce byl vytvořen softwarový balík srovnávající kvalitu předpovědi srážek na povodích, což v budoucnu velmi usnadní porovnání nově vyvíjených metod se stávajícími operativně používanými.

Reference:

- [1] Novák P., Březková L., Frolík, P., Šálek M., 2007: Quantitative precipitation forecast using radar echo extrapolation, *extended abstract ECSS 2007, Terst*
- [2] Šálek M., Březková L., Novák P., 2006: The use of radar in hydrological modelling in Czech Republic – case studie sof flash floods, *Natural Hazards and Earth System Science*, 6, str. 229-236
- [3] Řezáčová D., Novák P., Kašpar M., Setvák M., 2007: *Fyzika oblaků a srážek*, Academia, v tisku
- [4] Novák P., 2007: The Czech Hydrometeorological Institute's Severe Storm Nowcasting System, *Atmospheric research*, 83, str. 450-457
- [5] Novák P., Kyznarová H., 2006: Cell-oriented forecasts of Czech weather radar data, *ERAD publication series, Vol. 3, Barcelona*
- [6] Marshall, Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size, *Journal of Meteorology*, 5, str. 165-166
- [7] Wood S.J., Jones D.A., Moore R.J., 2000: Static and dynamic calibration of radar data for hydrological use, *Hydrology and Earth system Science*, 4, str. 545-554
- [8] Conway B.J., 1998: An Owerview of Nowcasting Techniques, *SAF training workshop – Nowcasting and very short range forecasting. Eumetsat Darmstadt*
- [9] German U., Zawadski I., 2004: Predictability of precipitation from continental radar images – a scale – and location – dependent benchmark to evaluace model forecasts, *Proceedings of ERAD 2004*, str. 250-453
- [10] Šálek, M., Novák, P., 2005. Využití meteorologických radiolokátorů pro odhad a nowcasting srážek v ČHMÚ, *Sborník konference Hydrologické dny 2005, Bratislava*

- [11] Havránek P., Kráčmar J., 1996: Nová meteorologická radiolokační stanice na střední Moravě, *Meteorologické zprávy*, 49, str. 81-86
- [12] Kráčmar J., 2000: Nový meteorologický radar Brdy v síti CZRAD, *Meteorologické zprávy*, 53, str. 161-168
- [13] Kráčmar J., Joss J., Novák P., Šálek M., 1999: First Steps Towards Quantitative Usage of Radar Data from Weather Radar Networ, *Final Seminar of COST-75 „Advanced Weather Radar Systems“ – Locarno*, str. 91-101
- [14] Zacharov P., Šálek M., Novák P., 2004: Porovnání různých metod odhadu srážek využívajících radarová a srážkoměrná měření, *Meteorologické zprávy*, 57, str. 157-167
- [15] Gjertsen U., Šálek M., Michelson D.B., 2004: Gauge adjustment of radar-based precipitation estimates, *COST action 717, Use of radar observation in hydrological and NWP models. Review. COST Office, Brussels*
- [16] Seo D.J., 1998: Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data, *Journal of Hydrology*, 208, str. 37-52
- [17] Zgonc A., Rakovec J., 1998: Time extrapolation of radar echo patterns, *Final Seminar of COST-75 „Advanced Weather Radar Systems“ – Locarno*, str. 229-238
- [18] Meklenburg S., Schmidt W., Joss J., 1999: COTREC a simple and reliable method for nowcasting complex radar pattern over complex orography, *Final Seminar of COST-75 „Advanced Weather Radar Systems“ – Locarno*, str. 441-450
- [19] Reinhart R.E., Garvey E.T., 1978: Three dimensional storm motion detection by conventional weather radar, *Nature*, 273, str. 287-289
- [20] Li L., Schmidt W., Joss J., 1995: Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over complex orography, *Journal of Applied Meteorology*, 34, str. 1286-1300

- [21] Rienhart R.E., 1981: A pattern recognition technique for use with conventional weather radar to determine internal storms motion, *Atmospheric Technology*, 13, str. 119-134
- [22] Press W. et al., 1992: Numerical Recipes in C: the Art of Scientific Computing, *CambridgeUuniversity Press*, 2nd edition
- [23] Schaffer J.T., 1990: The critical success index as an indicator of Warning skill, *Weather and forecasting*, 4, str. 570-575
- [24] Collier C.G., 1996: Applications of weather radar systems, *John Wiley & Sons*, *Chichester*

Seznam zkratek a použitých symbolů

c	– rychlost světla
CAPPI	– pole odrazivosti v hladině konstantní nadmořské výšky
CSI	– critical success index
CZRAD	– radarová síť provozovaná v rámci ČHMÚ
D	– průměr kapiček
FAR	– podíl falešných poplachů (z anglického false alarm rate)
G	– denní úhrn srážkoměrných měření
h	– výška nad povrchem
I	– intenzita srážek
MAX Z	– pole maximální odrazivosti ve vertikálním sloupci pro každý plošný element
$N(D)$	– rozložení velikosti kapiček
P	– přijatý výkon
POD	– pravděpodobnost detekce (z anglického probability of detection)
PPI	– pole odrazivosti na jednotlivých měřených úhlech
R	– denní úhrn radarových odhadů na místě srážkoměrných stanic
r	– radiální vzdálenost od radaru
R_e	– efektivní poloměr Země
RMSE	– střední kvadratická chyba (z anglického Root mean square error)
R_z	– skutečný poloměr Země
SOR	– algoritmus successive over-relaxation
t	– čas
\mathbf{u}	– vektor proudění
u, v	– složky vektoru proudění
VPR	– vertikální profil odrazivosti

Z	– radarová odrazivost
Z_e	– ekvivalentní radiolokační odrazivost
α	– elevační úhel
λ	– Lagrangeův multiplikátor
Π_M	– radarová konstanta