



**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**  
**Fakulta aplikované informatiky**

**Informační podpora krizového řízení kraje  
z hlediska hodnocení výskytu povodní**

**Information Support for Crisis Management of the Region in  
Terms of Evaluation of Flood Events**

Dizertační práce

Autor: **Ing. David Šaur**

Studijní program: Inženýrská informatika  
Studijní obor: Inženýrská informatika

Školitel: doc. Ing. Luděk Lukáš, CSc.

Zlín, 2017

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma Informační podpora krizového řízení kraje z hlediska hodnocení výskytu povodní vypracoval samostatně pod vedením pana docenta Lud'ka Lukáše za použití literatury a zdrojů, které jsou k dispozici v seznamu použité literatury a zdrojů na konci disertační práce.

Ve Zlíně dne:

## **ABSTRAKT**

Disertační práce je zaměřena na návrh informační podpory krizového řízení kraje z hlediska hodnocení výskytu povodní. Součástí informační podpory je především „Algoritmus předpovědi bouří“, jehož výstupem je soubor předpovědních informací o výskytu konvektivních srážek a nebezpečných doprovodných jevů. Účelem Algoritmu je zpřesnění předpovědi na úrovni územního celku obce s rozšířenou působností, včetně jejich regionů s dostatečnou dobou předstihu pro možnosti realizace preventivních protipovodňových opatření. Algoritmus předpovědi bouří je založen na principu analýzy a cíleného hodnocení výstupních meteorologických prvků a parametrů z numerických modelů předpovědi počasí, včetně hodnocení vlivu reliéfu na vznik a vývoj konvektivních srážek v cílové oblasti. Hodnocení se také opírá o analýzu historických povětrnostních situací a vybraných povodní vyvolaných přívalovým deštěm za účelem vytvoření doplňující zpřesněné předpovědi k výstražným informacím od Českého hydrometeorologického ústavu.

Klíčová slova: povodeň, přívalový déšť, konvektivní srážky, krizové řízení.

## **ABSTRACT**

The dissertation is focused on the proposal of information support of the crisis management of the region in terms of evaluation of flood events. Part of the information support is mainly the "Algorithm of Storm Prediction ", the output of which is a set of predictive information on the occurrence of convective precipitation and dangerous accompanying phenomena. The purpose of the Algorithm is to refine the forecast at the level of the territorial unit of the municipality with extended powers, including their regions, with sufficient time in advance for the possibility of implementing preventive flood control measures. Algorithm of Storm Prediction is based on the analysis and targeted evaluation of output meteorological parameters and parameters from numerical weather prediction models, including evaluating the impact of the relief on the formation and development of convective precipitation in the territory. The evaluation is also based on an analysis of historical weather events and selected floods caused by torrential rainfall in order to create additional refined forecasts for warning information from the Czech Hydrometeorological Institute.

Keywords: flood, torrential rainfall, convective precipitation, crisis management.

# OBSAH

ÚVOD .....	9
1. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU .....	10
1.1 Úvod do problematiky .....	10
1.1.1 Význam krizového řízení ve vztahu k nebezpečným meteorologickým jevům .....	11
1.1.2 Informační podpora krizového řízení krajského územního celku ...	14
1.2 Předpověď výskytu a vývoje konvektivní srážkové oblačnosti v České republice .....	15
1.2.1 Předpověď srážek prostřednictvím nowcastingu .....	15
1.2.2 Radarové měření srážek .....	16
1.2.3 Meteorologické družice .....	17
1.2.4 Metoda detekce blesků .....	17
1.2.5 Metody nowcastingu .....	17
1.2.6 Nowcastingové a diagnostické systémy v České republice .....	18
1.2.7 Numerické modelování předpovědi počasí .....	19
1.2.8 Numerické modely předpovědi počasí v České republice .....	20
1.3 Předpověď konvektivní srážkové oblačnosti ve světě .....	21
1.3.1 Expertní meteorologické systémy .....	21
1.3.1.1 Koncepční modely .....	22
1.3.2 Numerické modely předpovědi počasí ve světě .....	23
1.3.3 Shrnutí .....	25
1.3.4 Flash Flood Guidance System .....	25
1.4 Projekty a aplikace pro odhad rizika přívalových povodní v České republice .....	26
1.5 Dílčí závěr .....	27
2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE .....	29
3. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ .....	30
4. TEORETICKÝ RÁMEC .....	31
4.1 Teorie vzniku konvektivní bouře .....	31

4.1.1	Základní terminologie.....	31
4.1.2	Atmosférická konvekce .....	32
4.1.3	Podmínky vzniku silných bouří.....	35
4.1.3.1	Instabilita atmosféry .....	36
4.1.3.2	Spouštěcí a podpůrné faktory konvekce.....	39
4.1.3.3	Střih větru .....	42
4.1.3.4	Podmínky podporující organizaci a pohyb konvektivní bouře .....	43
4.1.4	Potenciální spouštěcí mechanismy konvekce přízemní a mezní vrstvě atmosféry .....	45
4.1.4.1	Teplotní a vlhkostní vlivy v přízemní vrstvě atmosféry.....	45
4.1.4.2	Vlivy proudění vzduchu v přízemní vrstvě atmosféry .....	48
4.1.4.3	Orografické vlivy.....	49
4.2	Nebezpečné jevy, spojené s výskytem konvektivních bouří .....	51
4.2.1	Přívalový déšť.....	52
4.2.2	Krupobití.....	53
4.2.3	Silné nárazy větru spojené s konvektivní bouří.....	54
4.2.4	Tornádo.....	57
4.2.5	Elektrické atmosférické výboje .....	59
5.	HLAVNÍ VÝSLEDKY VÝZKUMU .....	60
5.1	Algoritmus předpovědi bouří.....	60
5.1.1	Zpracování předpovědních fází Algoritmu .....	64
5.1.2	Vstupní data Algoritmu předpovědi bouří.....	67
5.1.3	1. fáze Algoritmu – Předpověď času výskytu srážek podle NWP modelů 69	
5.1.3.1	Analýza podmínek pro pokračování předpovědi Algoritmu.....	70
5.1.4	2. fáze - Obecná charakteristika předpovídané povětrnostní situace	71
5.1.5	3. fáze Algoritmu - Předpověď vlastností atmosféry .....	72
5.1.6	4. fáze Algoritmu - Předpověď potenciálních spouštěčů konvekce v přízemní a mezní vrstvě atmosféry (Lokální podmínky).....	73
5.1.6.1	Teplotní vlivy v přízemní vrstvě atmosféry .....	74

5.1.6.2	Přízemní vlhkost ve 2 metrech nad zemí .....	75
5.1.6.3	Vlivy proudění vzduchu v přízemní vrstvě atmosféry.....	76
5.1.6.4	Orografické vlivy zemského povrchu .....	77
5.1.7	5. fáze Algoritmu - Předpověď intenzity bouří.....	78
5.1.8	6. fáze Algoritmu - Předpověď pravděpodobnosti výskytu nebezpečných doprovodných jevů podle vlastností atmosféry .....	80
5.1.9	7. fáze Algoritmu - Předpověď podle statistik historických situací	84
5.1.10	8. fáze Algoritmu - Sloučení předpovědních fází .....	86
5.1.11	9. fáze Algoritmu - Předpovědní zpráva .....	90
5.1.11.1	Klasifikace nebezpečného jevu „Bouřka“ a návrhy preventivních protipovodňových opatření .....	91
5.2	Verifikace předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů .....	94
5.2.1	Přesnost předpovědi (Accuracy) .....	98
5.2.2	Bias Score (BIAS).....	104
5.2.3	Probability of Detection (POD) .....	105
5.2.4	False Alarm Ratio (FAR).....	106
5.2.5	Critical Success Index (CSI).....	107
5.2.6	Heidke Skill Score (HSS) .....	108
5.2.7	Probability Skill Score (PSS).....	109
5.2.8	True Skill Statistics (TSS).....	110
5.2.9	Závěr verifikace předpovědí Algoritmu a NWP modelů.....	111
5.2.10	Hodnocení úspěšnosti předpovědních parametrů NWP modelů ...	113
5.3	Verifikace předpovědí povodňových situací.....	115
5.3.1	Povodňová událost ze dne 24. července 2015 .....	115
5.3.2	Povodňová událost ze dne 5. srpna 2016 .....	118
5.3.3	Povodňová událost ze dne 22. července 2017 .....	120
5.3.4	Závěr verifikace předpovědí povodňových událostí z let 2015 až 2017	123
5.4	Prostorová analýza charakteristik reliéfu .....	124
5.4.1	Úvod k prostorové analýze charakteristik reliéfu .....	126

5.4.2	Metody prostorové analýzy .....	126
5.4.2.1	Metoda nejmenších čtverců (Ordinary Least Squares) .....	127
5.4.2.2	Prostorová autokorelace (Moranovo I kritérium).....	130
5.4.2.3	Hot Spot Analýza (Getis-Ord $G_i^*$ statistika) .....	132
5.4.3	Hodnocení korelační závislosti modelovaných proměnných.....	133
5.4.4	Závěr hodnocení prostorové analýzy.....	137
5.5	Statistika rozložení konvektivních srážek ve Zlínském kraji .....	138
5.5.1	Výsledky statistiky rozložení konvektivních srážek .....	139
5.5.2	Závěr statistiky rozložení konvektivních srážek ve Zlínském kraji	144
6.	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI.....	146
6.1	Přínos práce pro vědu.....	146
6.2	Přínos práce pro praxi .....	147
	ZÁVĚR.....	148
	SEZNAM LITERATURY.....	149
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	158
	SEZNAM TABULEK .....	160
	SEZNAM GRAFŮ .....	162
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	163
	PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA .....	167
	PROFESNÍ ŽIVOTOPIS.....	170



## ÚVOD

Předpověď přívalového deště, včetně možné povodňové odezvy, je aktuálním problémem současné meteorologie a hydrologie z hlediska jeho společenského dopadu. Vznik těchto extrémních povětrnostních jevů je úzce spojen s tvorbou konvektivní srážkové oblačnosti o rozloze několika čtverečních kilometrů a ojediněle až stovek km<sup>2</sup>, v době trvání několika minut až hodin. A právě tato charakteristika konvektivní srážkové oblačnosti je zásadním problémem současných předpovědních systémů.

Předpověď konvektivních srážek je realizována prostřednictvím metod nowcastingu s využitím meteorologických radarů, popř. jiných metod distančního měření srážek a oblačnosti, při nichž můžeme získat předpověď s dobou předstihu maximálně na dvě hodiny. Druhý přístup se opírá o kvantitativní hodnocení podmínek konvektivní srážkové oblačnosti s využitím numerických modelů předpovědi počasí a statistiky historických situací. Kvantitativního hodnocení je zaměřeno na odhad budoucího vývoje počasí na delší dobu, řádově od 6 do 12 hodin (orientačně do 24 hodin). Tento přístup je dále rozvíjen v rámci disertační práce. Hlavním přínosem je prodloužení doby předstihu a zpřesnění předpovědi z hlediska menších územních celků než je kraj. Součástí této práce je také návrh informační podpory krizového řízení pro účely prevence a připravenosti před mimořádnou událostí. Nástrojem kvantitativního hodnocení podmínek pro posouzení vzniku a vývoje konvektivních srážkových oblaků je návrh Algoritmu předpovědi bouří, jehož výstupy je možné aplikovat pro potřeby krizového řízení kraje a menších územních celků.

V současnosti jsou předpovědní výstražné informace na nebezpečný jev Bouřka distribuovány prostřednictvím Systému integrované výstražné služby Českého hydrometeorologického ústavu (dále SIVS ČHMÚ) pro území krajů a okresů. Zároveň, v rámci experimentálního režimu, ČHMÚ poskytuje informace o riziku vzniku přívalové povodně prostřednictvím Indikátoru přívalových povodní pro území obcí s rozšířenou působností (dále ORP) jednotlivých krajů. Návrh algoritmu počítá předpověď také pro území ORP a současně pro regiony ORP. Velikost jednoho regionu tvoří jednu třetinu velikosti území ORP. Zájmové území je vybráno území Zlínského kraje z důvodu častého výskytu přívalových povodní v historii a současně příznivých podmínek, podporujících počáteční vznik atmosférické konvekce z hlediska orografie reliéfu.

# 1. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

## 1.1 Úvod do problematiky

V současnosti svět čelí hrozbám a dopadům globálního oteplování, které má vliv na celou řadu procesů a jevů nejen v samotné přírodě, ale i na lidskou činnost. Kromě zvyšování povrchové teploty, očekávanými důsledky jsou například rozšiřování subtropických pouští (Lu a kol., 2007); tání ledovců, věčně zmrzlé půdy a mořského ledu, což bude doprovázeno zvýšením srážek a hladiny moří (phys.org, 2015). Změny, související s globálním oteplováním, jsou nerovnoměrné a budou se lišit region od regionu po celém světě (ipcc.ch, IPCC AR4 WG1, 2007). Na základě toho lze očekávat zvýšení krátkodobých extrémů z hlediska extrémních projevů počasí, mezi které patří například přívalový déšť, krupobití, silné nárazy větru, tornáda a bleskové elektrické výboje. Tyto jevy jsou součástí projevů konvektivních bouří<sup>1</sup>, které se běžně vyskytují na našem území každý rok (Šaur, 2013).

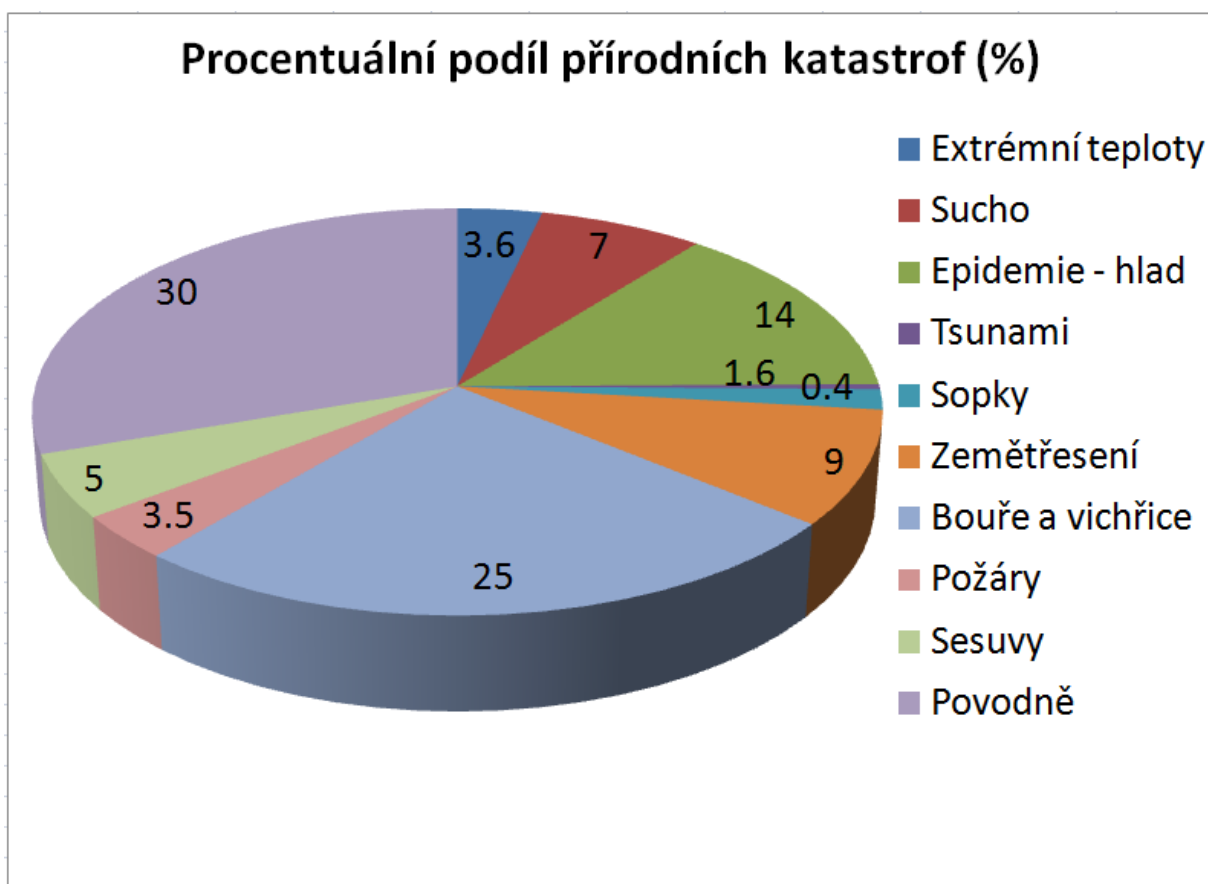
Kromě fenoménu globálního oteplování mají vliv na naše klima v Evropě i další klimatologické faktory jako např. severoatlantická oscilace (NAO)<sup>2</sup>; zejména střídáním jejich dvou cyklů – pozitivní a záporné severoatlantické oscilace. Povodně způsobené plošnými a déletrvajícími srážkami, ale i přívalovým deštěm, jsou převážně způsobeny zápornou negativní oscilací.

Přírodní katastrofy ve světě mají podobné zastoupení jako v České republice. Z obrázku 1.1 vyplývá, že největší podíl přírodních katastrof tvoří katastrofy způsobené počasím. Jedná se především o povodně, bouře a vichřice. Povodně představují pro Českou republiku jedno z největších přímých nebezpečí, při nichž dochází k významným ztrátám na životech a ekonomickým ztrátám. V posledních letech nás značně ovlivnily povodně způsobené přívalovým deštěm, které způsobily lokální záplavy. Vzniklá přívalová vlna může značně poškodit budovy, mosty, ohrozit dopravu a omezit průmyslovou činnost. Jelikož vliv globálního oteplování bude i nadále pokračovat, tak lze předpokládat, že naše území bude častěji ovlivňováno stále větším množstvím povodní tohoto typu. Proto výzkum v oblasti meteorologie a vývoj nových předpovědních systémů bude hrát hlavní roli při snižování následků přírodních katastrof (Procházková, 2007; Obrusník, 2006).

---

<sup>1</sup> „Konvektivní bouře je souhrnné označení pro meteorologické jevy, které se vyskytují při vývoji konvektivních oblaků typu Cumulonimbus nebo jejich soustav“ (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

<sup>2</sup> „Severoatlantická oscilace (NAO) je klimatický jev, pozorovaný na severu Atlantického oceánu a spojený se změnami tlaku mezi tlakovou níží nad Islandem a tlakovou výší u Azorských ostrovů“ (vitejtenazemi.cz, 2008).

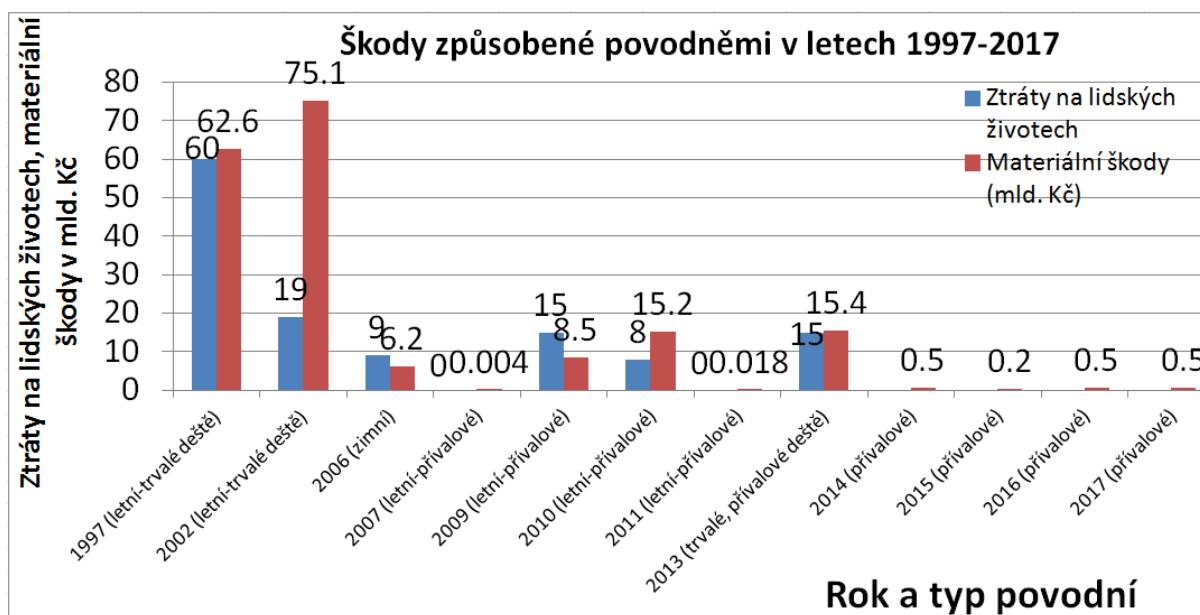


*Obr. 1.1: Druhy a zastoupení přírodních katastrof ve světě 1960 - 2006  
(převzaté od Obrusník, 2006)*

### 1.1.1 Význam krizového řízení ve vztahu k nebezpečným meteorologickým jevům

Včasné varování před povodněmi představuje velmi obtížnou úlohu, která vyžaduje spolupráci odborníků z oboru meteorologie a hydrologie. Kromě těchto dvou disciplín je důležité napojení na krizové řízení a integrovaný záchranný systém. Včasné varování je zajištěno Předpovědní výstražnou službou Českého hydrometeorologického ústavu (Obrusník, 2006).

Česká republika byla zasažena osmi povodněmi za 15 let, z čehož povodně z let 1997 a 2002 dosáhly katastrofálních rozměrů. Český hydrometeorologický ústav získával zkušenosti z těchto let, aby mohl využít získané poznatky a zkušenosti pro zlepšování metodiky vydávání výstražných informací a vazby PVS ČHMÚ na krizové řízení a integrovaný záchranný systém. Právě tato vazba je velmi slabá v mnoha zemích, což má za následek, že předpovědi a výstrahy se téměř nedostanou ke koncovým uživatelům a úroveň povodňové připravenosti občanů a podniků je tímto velmi nízká (Obrusník, 2006).

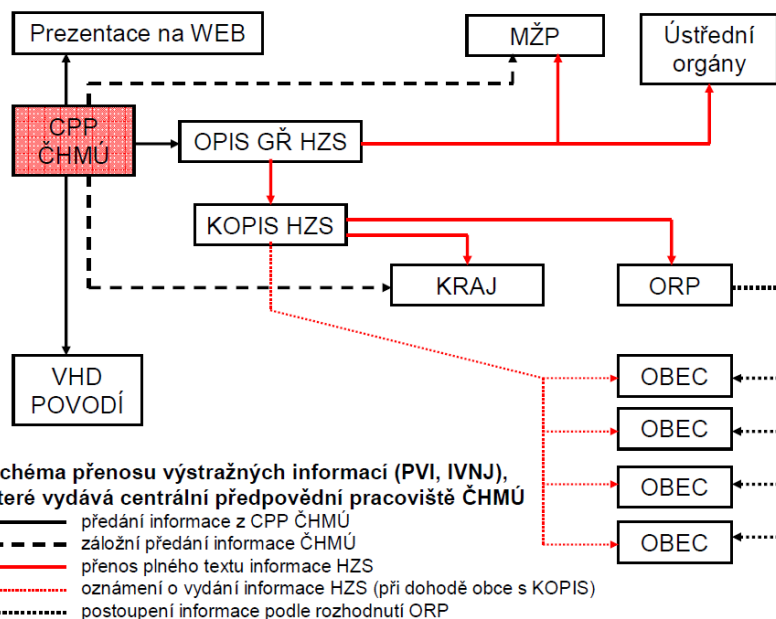


Graf 1.1: Srovnání povodňových škod a ztrát na lidských životech v letech 1997-2017 pro území České republiky (Procházková, 2007; ČHMÚ, 1997-2017)

Z grafu 1.1 vyplývá, že letní povodně, způsobené trvalým deštěm v letech 1997 - 2006, způsobily největší materiální škody a nejvyšší ztráty na lidských životech. Tento typ povodní byl specifický mimořádnou intenzitou srážek a délkou trvání, řádově několika dnů až týdnů. Naopak od roku 2007 je patrný nárůst letních povodní způsobených přivalovým deštěm s lokálním charakterem výskytu. Tento typ povodní se vyznačuje prudkým vzestupem zasažených vodních toků ve velmi krátké době.

„PVS ČHMÚ zahrnuje vzájemně propojené Centrální předpovědní pracoviště ČHMÚ s šesti regionálními pracovišti (RPP). Systém je navržen také, aby co nejlépe fungoval pro předpovědní povodňovou službu, ale dobře slouží i v případě jiných druhů přírodních pohrom“ (Obrusník, 2006).

Tento systém využívá data z oblasti hydrologie (pozorování vodních stavů), které jsou doplněna o data z metod dálkové detekce (radarová a družicová měření) a numerických modelů předpovědi počasí. Úspěšnost předpovědi s delším časovým horizontem rapidně klesá, proto základním pilířem jsou tzv. hydrologické předpovědi vydávané na 48 hodin dopředu (Obrusník, 2006).



*Obr. 1.2: Schéma přenosu výstražných informací vydávaných Centrálním předpovědním pracovištěm (Kubát, 2011)*

Obrázek 1.2 uvádí schéma přenosu předpovědních výstražných informací, které jsou společně s hydrologickými informacemi distribuovány centrálním předpovědním pracovištěm ČHMÚ na operační a informační střediska krajů a generálního ředitelství HZS ČR a na celostátní povodňové orgány. Regionální pracoviště zasílají informace na operační a informační střediska HZS krajů. Odtud jsou informace přeposílány na krajské, městské a obecní povodňové orgány. Tyto povodňové orgány zřizují orgány státní správy jako své výkonné složky k organizaci a realizaci záchranných a likvidačních prací. Na ostatní obce lze předat pouze zkrácenou podobu této výstrahy ČHMÚ (např. SMS zpráva pomocí krizových mobilních telefonů), e-mail, pokud je to uvedeno v příslušném povodňovém plánu obce. Požadavek se uplatňuje u územně příslušné obce s rozšířenou působností, která způsob předání projedná s HZS kraje. Výstrahy informační zprávy ČHMÚ a předpovědi předávají předpovědní pracoviště ČHMÚ také přímo na Vodohospodářský dispečink Povodí, který spolupracuje na vydávání hydrologických předpovědí pro předpovědní profily, zejména na tocích ovlivněných provozem nádrží (Obrusník, 2006).

Při distribuci informací docházelo, dochází a bude docházet k řadě problémů, kterými jsou například:

- Omezení funkčnosti systému včasného varování lidským faktorem (problém upřednostňování jiných zájmů před zájmy týkající se protipovodňové ochrany).
- Dodání nepřesných nebo neúplných informací příslušným orgánům a složkám.

- Špatné komunikaci mezi krajskými a obecními orgány s celostátními orgány, která se nejvíce projevila při povodních v roce 2013(Šaur, 2013).

Plošná distribuce výstražných a předpovědních informací je realizována v současnosti veřejnoprávními sdělovacími prostředky (televizí a rozhlasem), dále také formou SMS zpráv a přes Internet. Na Internetu jsou veřejně k dispozici výstražné a předpovědní informace v *Systému integrované výstražné služby (SIVS)* se třemi druhy zpráv:

- předpovědní výstražná informace (PVI),
- informace o výskytu nebezpečných jevů (INVJ),
- informační zprávu Hlásné a předpovědní povodňové služby ČHMÚ (ČHMÚ – Systém integrované výstražné služby (SIVS), 2004).

Tyto zprávy obsahují informace o výskytu nebezpečného jevu (teplota, vítr, sníh, námraza, bouřka, déšť, povodeň a požáry); místa a času jeho výskytu včetně stručného popisu příčiny synoptického vývoje a hydrologické situace a autora zprávy.

Kromě SIVS ČHMÚ existují i další veřejně dostupné zdroje výstražných informací o nebezpečných jevech pro evropské země:

- METEOALARM - poskytuje informace potřebné pro prevenci před následky extrémních projevů počasí v rámci Evropy. Součástí jsou mapy se čtyřmi stupni nebezpečných jevů s aktuálním stavem počasí a předpovědí na jeden den dopředu. Tento projekt byl vyvinut organizací EUMETNET, sdružující evropské meteorologické služby (meteoalarm.eu, 2008).
- ESTOFEX (European Storm Forecast Experiment) - je projekt, který vznikl v roce 2002 na základě iniciativy týmu evropských meteorologů a studentů oboru meteorologie. Tato platforma poskytuje informace o výskytu konvektivních bouří a jejich nebezpečných doprovodných jevů (krupobití, silné nárazy větru, přívalový déšť a tornáda), charakterizovaných třemi stupni pravděpodobnosti jejich výskytu pro celou oblast Evropy (Brooks et.al., 2011).

Základem zvládnutí budoucích povodňových situací je nutnost vzájemné spolupráce a vazeb mezi ČHMÚ a národními systémy krizového řízení včetně státní administrativy, ale také vědeckou komunitou, mezivládními a nevládními organizacemi, soukromým sektorem, různými druhy médií a zejména veřejností. Zajištěním této úzké vazby je možné přispět ke snížení následků katastrof vyvolané extrémním počasím (Obrusník, 2006).

### **1.1.2 Informační podpora krizového řízení krajského územního celku**

*„Informační podpora řízení představuje proces podporující řízení po informační stránce. Subjekt řízení má zajistit splnění úkolu a tím dosáhnout*

vytyčeného cíle prostřednictvím řízení objektu řízení. K zajištění stavu subjekt řízení využívá informační systém. Informační podpora zde slouží pro vytvoření obrazu o stavu plněného procesu. Pro splnění cíle vydá subjekt řízení potřebné příkazy k usměrnění činnosti na základě získaných znalostí. Příkazy mohou mít podobu zpráv nebo změn dat v databázi informačního systému. Na závěr informační podpora řízení zajistí dokončení procesu a splnění vytyčeného cíle“ (Lukáš et. al., 2008).

Informační podporu krizového řízení územního celku lze chápat jako předpovědní systém v podobě softwarové aplikace, jejíž součástí bude analyticko-hodnotící nástroj. Cílem bude sdílení veřejně dostupných dat z Internetu (data pro aktuální stav a předpověď počasí), které budou následně analyzovány a vyhodnocovány za účelem vytvoření zprávy o předpovědi počasí konvektivních srážek a nebezpečných jevů. Tato zpráva bude dále distribuována jednotlivým obcím s rozšířenou působností.

Podobným příkladem tohoto návrhu je projekt RESPO, který pracuje na podobném principu s rozdílným zaměřením (na oblast dodávek elektrické energie). Jádrem je analyzátor, vstupními daty jsou data z Hasičského záchranného sboru ČR, které jsou zpracovány do závěrečné zprávy za účelem poskytnutí scénářů budoucího vývoje. Koncovými uživateli jsou objekty kritické infrastruktury (Fröhlich a Pavlíková, 2011).

## **1.2 Předpověď výskytu a vývoje konvektivní srážkové oblačnosti v České republice**

Tato kapitola pojednává o současném stavu předpovídání výskytu a vývoje konvektivní srážkové oblačnosti v České republice. Tvorba předpovědí je realizována prostřednictvím dvou základních systémů – nowcastingových systémů, využívajících zejména radarové měření srážek, popř. další metody dálkové detekce srážek a numerických modelů předpovědi počasí, které generují krátkodobé až střednědobé předpovědi.

### **1.2.1 Předpověď srážek prostřednictvím nowcastingu**

*„Nowcasting je definován jako detailní analýza současného stavu počasí v mezosynoptickém měřítku<sup>3</sup> spolu s předpovědí na několik hodin dopředu. Délka předpovědi se v závislosti na používané metodě a předpovídané veličině může měnit“ (Řezáčová et al., 2007).*

Z výsledků projektu COST-78 vyplývá, že za nowcasting byla považována předpověď na dobu 0 až 6 hodin s upřesněním předpovědi až na dobu 6 až 12

---

<sup>3</sup> Mezosynoptické měřítko – je měřítko atmosférických jevů s horizontálními rozměry  $10^0$  až  $10^2$  km, což odpovídá rozměrům místních cirkulačních systémů, například mezosynoptických konv. systémů, konvektivním bouřím, konvektivním oblakům (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

hodin. Spolehlivost nowcastingu rychle klesá s rostoucím časem. Základní podmínka využití těchto předpovědí spočívá v časté aktualizaci, rychlosti výpočtu a bezodkladné distribuci koncovým uživatelům. (Řezáčová et. al., 2007, s. 507; Novák, 2006).

Detailní analýza aktuálního stavu počasí je realizována prostřednictvím metod dálkové detekce (data z meteorologických radarů, družic a systému detekce blesků, které jsou kombinovány s daty aerologického měření a numerických modelů předpovědi počasí).

Hlavním přínosem metod dálkové detekce pro účely předpovědí je:

- detekce konkrétních jevů (např. silné konvektivní srážky),
- využití pro nowcasting (velmi krátkodobou předpověď) prostřednictvím extrapolačních metod (Šálek, 2012).

### 1.2.2 Radarové měření srážek

Meteorologické radary patří k důležitému a standardnímu vybavení všech pokročilých meteorologických služeb. Meteorologický radar je zařízení, které slouží k detekci srážkové oblačnosti až do vzdálenosti cca 250 km.

Princip radaru je založen na vysílání vysokoenergetických pulsů elektromagnetických vln s vysokým okamžitým výkonem, vlnové délce v řádu jednotek centimetrů a příjmu části vyslaného záření, jež se zpětně rozptýlí od oblačných a srážkových částic, popř. od nemeteorologických cílů (terén, letadla, apod.). Poloha cíle se určuje podle polohy antény a času mezi vysláním a příjmem pulsu. Meteorologická měření jsou opakována každých 5 až 15 minut při 10 až 20 otáčkách antény s proměnným výškovým úhlem (elevací) pro zajištění nejkvalitnějšího třírozměrného pokrytí sledované oblasti. Množství odražené energie je úměrné radiolokační odrazivosti cíle uváděné v odborné literatuře v dBZ jednotkách.

V rámci České republiky je pro radarová měření určena síť CZRAD. K měření jsou využívány dva meteorologické radary ČHMÚ umístěných v Brdech u Prahy (Středočeský kraj) a Skalky u Protivanova (Jihomoravský kraj), prostřednictvím kterých se vytváří sloučený radarový snímek. Tvorba sloučené radarové informace ČR z dat radarové sítě CZRAD se provádí každých 5 minut centrálně na serveru na pracovišti v Praze-Libuši. Pro veřejnost jsou dostupná radarová data prostřednictvím interaktivních prohlížečů, kterým je například JSRadView (Novák a Kyznarová, 2016; Novák et al., 2008).

V současnosti se u radarů využívá principu Dopplerova efektu pro vyhodnocení vertikálního profilu větru. Při tomto měření se využívá horizontálně homogenní pole rychlosti při konstantním elevačním úhlu. Prostřednictvím různých výpočetních metod (např. metody Velocity-Azimuth Display VAD) je možné odvodit na základě homogenity pole větru vektor proudění v jednotlivých výškových hladinách a rekonstruovat vertikální profil



větru. Dále je možné detekovat horizontální stříh větru a zjišťovat příznaky rotace a divergence proudění vzduchu (Řezáčová et. al., 2007, s. 305, 307).

### 1.2.3 Meteorologické družice

Meteorologické družice jsou specializovanou kategorií umělých družic Země, které jsou zaměřeny na monitorování horní hranice oblačnosti. Jejich hlavní využití spočívá ve zpřesňování analýzy aktuálního počasí a jeho předpovědi; a to jak formou obrázků pro interpretaci jednotlivých snímků a jejich animací, tak formou vstupu do numerických modelů předpovědi počasí. Kromě využití v meteorologii, mají tyto družice značný význam v klimatologii pro dlouhodobé sledování zemské atmosféry, dále v hydrologii, oceánologii, ekologii a při monitorování živelných katastrof (Řezáčová et. al., 2007, s. 313).

V rámci České republiky jsou používána družicová data z těchto družic:

- geostacionární družice MSG – Meteosat druhé generace,
- družice NOAA s polární drahou letu a geostacionární družice GOES,
- družice Metop s polární drahou letu (Řezáčová et. al., 2007, s. 315).

### 1.2.4 Metoda detekce blesků

System detekce blesků je přístrojová metoda, určená pro zjišťování výskytu, polohy, času a dalších charakteristik bleskových výbojů. Detekce blesků dělíme na pozemní detekci blesků a družicovou detekci blesků (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

Účelem této metody je určení zdroje výboje, resp. polohy blesku z hlediska aktuálního vývoje bleskové aktivity v atmosféře. Hlavním prvkem jsou detekční čidla, která jsou vhodně rozmístěna na zájmovém území. Detekční čidla zachycují elektromagnetické záření vyzářeného bleskovým výbojem. Čidla určí směr, ve kterém došlo k výboji, nebo dobu zachycení signálu synchronizovanou prostřednictvím GPS. Data z čidel jsou zasílána do centrálního počítače, který tato data vyhodnotí a určí, zda šlo o bleskový výboj (pokud ano, tak určí, kde se vyskytl). Zároveň je možné určit i typ blesku (oblak-oblak, oblak-země), polaritu a velikost elektrického proudu ve výboji (Starý, 2005).

### 1.2.5 Metody nowcastingu

*„Prvním krokem v metodách nowcastingu se stává včasné rozpoznání výskytu nebezpečného jevu“* (Starý, 2005). Včasné varování obsahuje informace podstatné pro vývoj počasí v následujících 12 hodinách. Jedná se o předběžný odhad získaný prostřednictvím předpovědi numerických modelů předpovědi počasí a analýzou celkové synoptické situace. Pro včasné varování jsou použita data z těchto zdrojů:

- základní výstup numerického modelu (meteorologické veličiny – atmosférický tlak, teplota vzduchu, relativní vlhkost a míra instability),

- lokální výstup numerického modelu formou meteogramů (předpověď pro jednotlivé lokality) a
- synoptická a aerologická data (Starý, 2005).

Nowcasting pracuje se dvěma základními přístupy:

1. plošná extrapolace srážek a
2. extrapolace konvektivních buněk.

Plošná extrapolace srážek je zaměřena na výpočet pohybového pole, které je použito pro extrapolaci posledního dostupného radarového snímku. Výpočet je realizován například prostřednictvím metod COTREC a numerického modelování. Plošná extrapolace se provádí metodou zpětných trajektorií, pomocí které je možné určit trend zesilování a zeslabování jader jednotlivých konvektivních buněk (nelze však určit vznik nové konvektivní oblačnosti).

Extrapolace konvektivních buněk (např. algoritmus CELLTRACK) spočívá v identifikaci bouřkových jader z radarových snímků a přiřazení odpovídajících jader na následujících snímcích. Extrapolace je prováděna metodou přímých trajektorií. Pomocí této metody je možné určit trend zesilování a zeslabování jednotlivých jader, avšak výsledné pole srážek nedává příliš dobré výsledky (Šálek, 2012).

Pro výpočet pohybového pole srážek se kromě extrapolačních metod využívají i výstupy z numerického modelu předpovědi počasí (model ALADIN). Pohyb srážek a oblačnosti je vyhodnocován v hladině řídicího proudění v hladinách 700 až 500 hPa, tj ve výškách 3 až 5,5 km, který je interpolován do projekce radarového snímku. Nevýhodou extrapolačních metod je obtížnost přesného určení vývoje oblačnosti, její zesílení nebo zeslabení (Řezáčová et. al., 2007, s. 508).

### 1.2.6 Nowcastingové a diagnostické systémy v České republice

Velmi krátkodobá předpověď srážek (nowcasting) je realizována prostřednictvím diagnostických a nowcastingových systémů INCA\_CZ, COTREC\_CZ a MERGE\_CZ radarové sítě CZRAD, provozované Českým hydrometeorologickým ústavem (dále jen ČHMÚ). Nowcastingové systémy INCA\_CZ, COTREC\_CZ a diagnostický systém MERGE\_CZ jsou součástí aplikace nowcastingového webportálu ČHMÚ. Aplikace zobrazuje měřená data (radarové odrazy, blesky, staniční měření), analýzy a z nich odvozené předpovědi prostřednictvím těchto tří výše uvedených nowcastingových systémů.

Nowcastingový systém INCA\_CZ je určen pro zpřesnění teplotního pole a pole větru vypočteného numerickým modelem ALADIN na základě působení orografie a aktuálních měření z pozemních meteorologických stanic.

Nowcastingový systém COTREC\_CZ pracuje s analýzou radarového echa a vytváří předpověď pohybu srážkových polí na 30 až 60 minut dopředu. U

radiolokačního měření jsou k dispozici dva radarové produkty – MAX Z a CAPPI 2 km.

Diagnostický systém MERGE\_CZ je určen pro odhad srážek, k čemuž je využívána kombinace radarového odhadu srážek a srážkoměrných stanic na 1, 3, 6 a 24 hodin (Frolík, 2007; Novák, 2014; Šaur, 2014).

### **1.2.7 Numerické modelování předpovědi počasí**

Numerické modely předpovědi počasí (Numerical Weather Prediction – NWP) jsou informaticko-technické prostředky určené pro sběr dat, jejich zpracování, vyhodnocení a tvorbu předpovědi počasí. Hlavním výstupem NWP modelů jsou mapy a grafy, popisující budoucí stav vývoje počasí. Numerické modely vytváří předpovědi počasí na období 1 až 10 dnů, popř. až 16 dnů.

Všeobecně, numerické modely předpovědi počasí lze rozdělit na modely:

- deterministické,
- stochastické.

Deterministické modely jsou takové modely, kde pro určitý časový krok existuje právě jeden nový stav, který vychází z aktuálního stavu zemské atmosféry. Stochastické modely jsou modely, které obsahují určitý náhodný prvek (Starý, 2005; Šaur, 2013).

NWP modely dále dělíme na tzv. globální – Global Area Model a regionální modely - Limited Area Model (LAM). Jedním z hlavních parametrů numerických modelů předpovědi počasí je rozlišení modelové sítě gridů. Globální modely pracují s horizontálním rozlišením 10 až 250 km, regionální modely pod 10 km. Regionální modely vycházejí a přebírají data od globálních modelů (např. regionální model Aladin vychází z dat z globálního modelu ECMWF) a provádí jejich upřesnění a doplnění. Výpočetní modely počasí se skládají z těchto komponent a fází:

- Vstupní data – současný stav atmosféry (data získaná pozorováním a měřeními z pozemních meteorologických stanic, letadel, balonových sond, satelitů a radarů).
- Analýza a kontrola kvality dat – kontrola vstupních dat, prováděná kompetentním meteorologem (oprava chyb) a testy zaměřené na relevanci a přesnost.
- Předpovědní a výpočetní komponenty systému – komponenty (numerický model, asimilační systém a vyhodnocovací systém fyzikálních a dynamických atmosférických procesů), určených pro výpočet současného a budoucího stavu.
- Následné zpracování – zpracování neupravených výstupů do formátu použitelného pro meteorology.
- Systém výstupů modelu – výstupy jsou v podobě křivek veličin nebo modelové sítě gridů. Grid obsahuje meteorologická data v horizontálním a ve vertikálním směru.

- Statistické podklady – pro určování některých citlivých povětrnostních prvků (dohlednost, bouřky, apod.).
- Centralizované podklady – doporučení pro meteorology jako podpůrný nástroj (předpovědi a varování např. před hurikánem).
- Pozorování – pro zvýšení spolehlivosti analýzy nebo předpovědi (Jaroš, 2010; Šaur, 2013).

Pro tvorbu přesných předpovědí nestačí mít pouze numerický model předpovědi počasí s vysokým rozlišením, ale také znalosti a zkušenosti meteorologa.

### 1.2.8 Numerické modely předpovědi počasí v České republice

V České republice se využívají pro předpověď počasí tyto numerické modely předpovědi počasí:

- **Model ALADIN** – lokální předpovědní model, určený pro krátkodobou předpověď na dva dny dopředu. Model byl vyvíjen od roku 1991 v mezinárodní spolupráci s francouzskou povětrnostní službou Météo-France. Původně byl tento model koncipován jako adaptace výsledků předpovědi globálního modelu ARPEGE. Tento model je určen pro krátkodobou předpověď (54 hodin dopředu) s rozlišením 4,7 km (Starý, 2005; Šaur, 2013).
- **Model MM5 (PSU/NCAR) – projekt Medard**. Tento model byl vytvořen v USA, avšak jeho aplikace (v ČR známý pod projektem Medard) jsou rozšířené po celém světě. Součástí tohoto modelu je také chemický transportní model CAMx pro modelování kvality ovzduší. K dispozici jsou na výběr předpovědi teploty, srážek (po jedné hodině), větru, tlaku a oblačnosti na 72 hodin dopředu (medard-online.cz, 2015; Projekt Medard, 2005 - 2017).

Předpověď konvektivní srážkové oblačnosti v České republice je realizována prostřednictvím nowcastingových systémů ČHMÚ na několik hodin dopředu a numerického modelu ALADIN s rozlišením 4,7 km. Dobré výsledky předpovědi konvektivních srážek poskytuje také numerický model MM5 (PSU/NCAR) s předpovědí na 3 dny.

### 1.3 Předpověď konvektivní srážkové oblačnosti ve světě

Předpověď konvektivních srážek ve světě je realizována nowcastingovými systémy a numerickými modely předpovědi počasí s podobnými funkčními principy, používanými v České republice. Nejčastěji jsou používány expertní systémy kombinující metody extrapolace s metodami koncepčních modelů. Tyto expertní systémy zpracovávají data z metod dálkové detekce, nowcastingových systémů a koncepčních modelů.

Jedním z příkladů expertních systémů používaných pro předpověď bouřek v USA je dříve používaný Thunderstorm Intelligence Prediction System (TIPS), který kombinoval principy umělé inteligence, statistiky, pravděpodobnosti a topografických vlastností terénu (Lee, 1993).

#### 1.3.1 Expertní meteorologické systémy

Expertní systémy v meteorologii kombinují tyto systémy pro předpověď konvektivních srážek:

1. koncepční modely,
2. extrapolační metody spojené s nowcastingem,
3. metody dálkové detekce (radarové a družicové měření, systémy detekce blesků),
4. aerologická a staniční měření,
5. numerické modely předpovědi počasí.

Hlavním principem těchto systémů je extrapolace empiricky získaných poznatků. Teoreticky lze určit trend v zesilování nebo zeslabování radarového echa i možný vznik nové oblačnosti za podmínky podrobné analýzy proudění. Při testování byly dosaženy rozporuplné výsledky, zejména u velmi krátkodobých předpovědí velmi silné konvekce (Šálek, 2012).

Nejnámějšími expertními systémy, používanými pro předpověď konvektivních srážek ve světě, jsou:

- **Systém GANDOLF** (Generating Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Land-based flood Forecasts) je expertní systém, vedený pod správou meteorologické služby MetOffice Velké Británie. Jednotlivé bouřkové (konvekční) cely jsou identifikovány prostřednictvím tohoto systému s využitím vstupních dat z radarového a družicového měření (tepelný a viditelný kanál družice Meteosat) a předpovědí z numerického modelu NIMROD s velmi jemným rozlišením. Ve spojení s koncepčním modelem konvektivního systému (objektově-orientovaný koncepční model - OOM) předpovídá pohyb konvektivních srážek na tři hodiny s časovým krokem 10 minut a prostorovým rozlišením 2 km. Hlavním přínosem je možnost předpovědi vzniku, vývoje a rozpadu konvektivní buňky. Nedostatky tohoto systému se projevíly při předpovědích životního cyklu

multicelárních bouří z hlediska vlivu mateřské buňky a její vliv na vznik dalších buněk (Pierce, 2000; Řezáčová et. al., 2007, s. 510).

- **NORA (Nowcasting of Orographic Rainfall by means of Analogues)** - výstupem jsou předpovědi, generované ze statisticko-analytického modelu s využitím empirických poznatků orografie Italských Alp (Panziera, 2011).
- **Systém AutoNowCaster (ANC)** - pracuje na podobném principu jako systém GANDOLF. Tento systém je používán americkou a australskou meteorologickou službou. Jeho specializací je identifikace oblastí konvergence s možností potenciálního výskytu nových konvektivních buněk. Systém ANC se skládá z mnoha automatizovaných aplikací, které generují předpověď konvektivních buněk na základě vstupních staničních, radarových a družicových dat, výstupů numerického modelu předpovědi počasí a předpovědi meteorologa. Tento systém pracuje s algoritmy fuzzy logiky a modelem životního cyklu konvektivní buňky. ANC generuje jednohodinové předpovědi. V současnosti jsou tyto předpovědi zasílány v reálném čase na meteorologická centra v Chicagu a Melbourne (Lakshmanan, 2012; Řezáčová et. al., 2007, s. 510).
- **COALITION (Context and Scale Oriented Thunderstorm Satellite Predictors Development)** - umožňuje automaticky detekovat silné konvektivní srážky v počáteční fázi prostřednictvím radarových, předpovědních systémů a konvektivních prediktorů, kterými jsou indexy instability, stříh větru a orografické efekty v oblasti švýcarských Alp (Nisi, 2014).

V expertních meteorologických systémech jsou aplikovány také výsledky výzkumu, zaměřeného na studium vlivu orografie na vznik a vývoj konvektivních srážek. Vznik hluboké atmosférické konvekce v Andách a jeho závislost na orografických spouštěcích mechanismech byl ověřen výpočtem modelu WRF ve studii (Hierro a kol., 2012). Numerické modelování konvektivních srážek a vliv orografických efektů v kombinaci s vlhkostními parametry nad Středozemním mořem (Sardinie, Korsika) bylo prokázáno ve studii (Ehmele a kol., 2014).

### 1.3.1.1 Konceptní modely

Konceptní modely byly sestaveny za účelem popisu atmosférických jevů z hlediska jejich základních vlastností a procesů, které se při těchto jevech odehrávají. Dále také poskytují konceptní a metodické nástroje pro formulaci hypotéz a teorií. Konceptní modely v oblasti meteorologie popisují pole základních meteorologických prvků a poskytují návod pro předpověď meteorologických situací. Tyto modely jsou určeny také jako podpora fungování numerických modelů předpovědi počasí a umožňují rozeznat chyby a nepřesnosti v předpovědích (Pokorný, 2008).

Koncepční modely jsou nástrojem, popisujícím struktury a životní cykly různých atmosférických jevů.

Obecnými příklady koncepčních modelů jsou:

- 1) Koncepční modely atmosférických front:
  - a) Koncepční modely teplé fronty.
  - b) Koncepční modely studené fronty.
  - c) Koncepční modely okluzní fronty s teplým a studeným přenosovým pásmem.
- 2) Koncepční modely cyklón.
- 3) Koncepční modely konvektivních systémů (Pokorný, 2008).

### 1.3.2 Numerické modely předpovědi počasí ve světě

Numerickými modely předpovědi počasí, používanými nejen v mnoha zahraničních meteorologických službách, ale také v České republice, jsou:

- **Model GFS** (Global Forecast System) - je globální model, provozovaný americkou agenturou pro výzkum a vývoj atmosféry NOAA v USA. K dispozici jsou mapy celého světa. Tento model je zejména určen pro krátkodobou a střednědobou předpověď (až na 16 dní dopředu) a operuje s rozlišením 25 až 50 km.
- **Model ECMWF** (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) – je globální model, vyvinutý mezinárodní organizací ECMWF v rámci států Evropské unie se sídlem v Anglii. Součástí celého systému je komplex jednoho z největších superpočítačů včetně největšího světového archivu dat předpovědi počasí. Z modelu ECMWF vychází krátkodobá a střednědobá předpověď Českého hydrometeorologického ústavu a Slovenského hydrometeorologického ústavu. Jádro tohoto modelu tvoří tzv. ansámblové předpovědi<sup>4</sup>, jejichž princip spočívá ve spočítání 50 (v současnosti experimentálně až 100) nepatrně pozměněných předpovědí (Šaur, 2013).

Hlavními kritérii výběru NWP modelů pro předpověď konvektivních srážek v rámci této práce je dostatečně vysoké horizontální rozlišení (nejlépe pod 25 km), časový krok, včetně implementace nehydrostatických rovnic. Na základě těchto kritérií byly vybrány tyto NWP modely, použité pro předpověď pravděpodobnosti místa a času výskytu srážek:

---

<sup>4</sup> *Ansámblová předpověď je sada různých předpovědí počasí platných pro daný předpovědní čas. Ansámblová předpověď se používá kvůli postižení dvou základních nejistot numerické předpovědi počasí: 1) použití nedokonalých počátečních podmínek, které popisují výchozí stav atmosféry. Počáteční podmínky pro předpověď se pozměňují malými, ale dynamicky aktivními perturbacemi spočtenými pro danou situaci, např. metodou singulárních vektorů (ECMWF), nebo jinou. 2) použití nepřesných formulací v numerickém modelu předpovědi počasí, které jsou způsobeny aproximací nebo zjednodušením popisu fyzikálních procesů v modelu (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).*

- **Model ALADIN (ČHMÚ).**
- **Model ALADIN (SHMÚ).**
- **Model GDPS** (Global Deterministic Prediction System) - model předpovědi počasí pod správou kanadské meteorologické služby s rozlišením 25 km, čtyřdenní aktualizací a předpovědí na 10 dní dopředu pro Severní Ameriku, Evropu, severní a jižní polokouli (Pagé a Caron, 1995 - 2017).
- **Model EURO4** – model předpovědi počasí meteorologických služeb Velké Británie (UK Met Office, North Atlantic European Model) s rozlišením 11 km, čtyřdenní aktualizací a předpovědí na dva dny dopředu pro celou oblast Evropy (weatheronline.de, 1999 - 2017).
- **HIRLAM** (High Resolution Limited Area Model) – model, vytvořený konsorciem meteorologických služeb v Evropě (Německo, Estonsko, Finsko, Island, Irsko, Holandsko, Norsko, Španělsko, Švédsko a Litva). Horizontální rozlišení modelu je 10 km s předpovědí na 3 dny, s čtyřdenní aktualizací pro celou Evropu (weatheronline.de, 1999 - 2017).
- **Model WRF ARW** – model, vytvořený ve spolupráci amerických meteorologických center, s rozlišením 4 km pro oblast střední Evropy; s rozlišením 12 km pro ostatní oblasti Evropy. Aktualizace modelu je dvakrát denně s předpovědí na 3 dny. (modellzentrale.de, 2014) Tento model používá nehydrostatické rovnice s možností nastavení hydrostatické verze modelu (mmm.ucar.edu, 2017).
- **Model WRF NMM (v 3.4)** – model s rozlišením 3 km pro oblast České republiky, 4 km pro oblast střední Evropy. Model je aktualizován dvakrát denně. Délka předpovědi pro území České republiky je 3 dny, území pomezí ČR a Slovenska na 2 dny a území střední Evropy na 4 dny (flymet.meteopress.cz, 2006 - 2017). Stejně jako model WRF ARW pracuje s nehydrostatickými rovnicemi (dtcenter.org, 2017).

Všechny výše uvedené NWP modely využívají parametrizaci konvekce, určenou pro modelování konvektivních srážek. Poslední dva NWP modely používají nehydrostatické rovnice, jejichž základem je aproximace nehydrostatická<sup>5</sup>. Ostatní modely, včetně již čtyř uvedených, mají vysoké rozlišení, které se pohybuje od 3 do 10 km. Tyto NWP modely jsou primárně určeny pro orientační předpověď času a místa výskytu konvektivních srážek.

---

<sup>5</sup> „Aproximace nehydrostatická je aproximace, která umožňuje při modelování atmosférických procesů počítat s odchylkami od stavu hydrostatické rovnováhy, a zahrnout tak do výpočtů např. působení archimédovských vztlakových sil. (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).



### 1.3.3 Shrnutí

Expertní systémy v meteorologii mají ve světě široké zastoupení. Hlavní přínosem je využití koncepčních modelů z hlediska modelování vzniku, vývoje a zániku konvektivní buňky, popř. modelování trendu zesilování a zeslabování srážkového pole konvektivní buňky.

Často používanými numerickými modely předpovědi počasí jsou modely GFS a ECMWF pro predikci synoptického vývoje na několik dní dopředu. Expertní systémy v meteorologii i numerické modely předpovědi počasí však nedosáhly uspokojivých výsledků při hodnocení úspěšnosti předpovědí konvektivních srážek kvůli nedostatečnému množství pozemních meteorologických a aerologických stanic (vstupní data), včetně rozlišení (nad 10 km).

### 1.3.4 Flash Flood Guidance System

Flash Flood Guidance System (FFGS) byl navržen hydrologickým výzkumným centrem a neziskovou organizací v San Diegu, USA. Podnět ke vzniku FFGS byl dán sepsáním memoranda v roce 2009 mezi Světovou meteorologickou organizací a institucemi v USA.

FFGS je důležitým nástrojem, který zajišťuje v reálném čase informace o rizicích přívalové povodně pro orgány krizového řízení. FFGS využívá metod dálkové detekce, numerického modelování předpovědi počasí, hydrologických modelů včetně analýzy potenciální nasycenosti půd a zkušeností meteorologa pro zajištění co nejpřesnější informace o budoucím vývoji situace. Aktualizace předpovědí je po šesti, ale i jednododinových intervalech. Výstraha na pravděpodobný vznik přívalové povodně je vydána při překročení limitů předpovídaných nebo pozorovaných meteorologických a hydrologických prvků a parametrů (Flash Flood Guidance System, wmo.int, 2017).

V rámci globálního FFGS jsou realizovány regionální projekty v těchto oblastech:

- Černého moře a středního východu,
- Střední Asie,
- Střední Ameriky,
- Jižní Ameriky a jižní Asie,
- Jihovýchodní Asie a Oceánie a
- Jihovýchodní Evropy a dalších regionálních oblastí (Flash Flood Guidance System, wmo.int, 2017).

FFGS je rozvíjen v mnoha státech v Evropě a ve světě. V rámci České republiky byl vytvořen podobný projekt s názvem Flash Flood Guidance-CZ (FFG-CZ), jehož správcem je ČHMÚ.

## 1.4 Projekty a aplikace pro odhad rizika přívalových povodní v České republice

Nejbližším projektem k FFGS u nás je systém FFG-CZ - Indikátor přívalových povodní (Flash Flood Guidance), který byl vytvořen Českým hydrometeorologickým ústavem, konkrétně kolektivem, vedeným Petrem Šercl. Hlavním úkolem FFG-CZ je odhad rizika přívalové povodně. Tento systém vychází z aktuálního stavu nasycenosti území, vypočteného na základě fyzicko-geografických charakteristik území, metod dálkové detekce s využitím nowcastingu, staniční sítě, NWP modelů a srážkoodtokového modelu (Šercl, 2015).

Systém FFG-CZ generuje tyto hlavní výstupy:

- aktuální nasycenosti území podle stupně nasycení,
- potenciální rizikové srážky v době trvání 1, 3 a 6 hodin,
- odhad aktuálního rizika přívalové povodně prostřednictvím radarových odhadů srážek v rámci mapové aplikace Indikátoru přívalových povodní pro území ORP (Šercl, 2015).

Výstupy jsou počítány každý den v 8, 11 a 14 hodin SELČ. Zobrazení dat je realizováno prostřednictvím platformy ArcGIS s využitím skriptů jazyka Python (Šercl, 2015).

Systém FFG-CZ má omezené možnosti předpovědi na delší dobu z důvodu využití meteorologických radarů a metod nowcastingu s dobou předstihu řádově několika minut až 2 hodin. A proto je v současnosti distribuován pouze odhad aktuálního rizika přívalové povodně.

Druhým nástrojem odhadu rizika přívalové povodně je fuzzy model, vytvořený Petrem Janálem a kolektivu pracovníků ČHMÚ. Tento model byl kalibrován prostřednictvím genetických algoritmů a metod umělé inteligence pro odhad kulminačního odtoku vody z povodí. Vstupními veličinami fuzzy modelu jsou intenzita a doba trvání srážek, ukazatel předchozích srážek UPS, plocha povodí [ $\text{km}^2$ ], součinitel tvaru povodí, sklonitost a lesnatost povodí. Fuzzy model využívá také výstupů hydrologického modelu HYDROG pro upřesnění hydrologických podmínek v daném povodí (Janál, 2009).

Tabulka 1.1 Klasifikace výstupní veličiny fuzzy modelu (Janál, 2009, s. 146)

Stupeň	Kulminační odtok [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]	Charakteristika
1	0 až 0,3	Bez ohrožení s lokálním vybřežením
2	0,3 až 2	Velká povodeň (ohrožení zástavby)
3	2 až 4	Katastrofální povodeň
4	nad 4	Totální katastrofální povodeň, přetvářející zemský povrch

Jádro modelu pracuje s tzv. maticí vzorů, která představuje soubor historických událostí. Fuzzy model byl programován v MATLABU, s využitím metod fuzzy logiky. Výstupní veličinou je hodnota kulminačního odtoku [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ], podle které je určen stupeň ohroženosti povodí (Janál, 2009, s. 146).

Úspěšnost testovaného modelu na vzorovém povodí dosáhla velkého podílu falešných poplachů na úkor počtu hitů. A proto tento model i nadále zůstává v experimentálním režimu a jeho nasazení do předpovědní praxe se v nejbližší době neočekává. Jedním z důvodů je velmi malá doba předstihu (cca 1 - 2 hodiny), závislá na výstupech metod nowcastingu.

Třetím nástrojem byl návrh metodiky kvalitativního hodnocení rizika přívalové povodně od Petra Rapanta a kolektivu z Vysoké školy báňské a technické v Ostravě. Opět jako v předchozích případech jde o odhad aktuálního rizika přívalové povodně. Vstupními daty jsou data z meteorologických radarů sítě CZRAD, konkrétně radarového produktu SUM\_Z\_CAPPI020. Jedná se o sumu srážek za pět minut, odvozené ze Z-R vztahu mezi radiolokační odrazivostí a intenzitou srážek (Rapant, 2017).

Postup metodiky je sekvenčně realizován v těchto krocích:

- výpočet klouzavého součtu úhrnu srážek za poslední půl hodinu,
- sumace součtů srážek, týkajících se jednotlivých povodí,
- konverze sumy součtů na daný vodní tok,
- přepočítání šíření srážek po proudu vodního toku,
- klasifikace říční sítě podle stupně nebezpečí (Rapant, 2017).

Při tomto postupu se neuvažují např. předpovědi hydrologických i NWP modelů, hranice záplavového území, apod. Hlavním předpokladem pro zjednodušení celého procesu je maximální nasycení povodí. Cílem je identifikace oblastí zasažených intenzivními srážkami prostřednictvím měření meteorologických radarů. Výstupem je relativní ocenění množství spadlých srážek a v případě zvýšeného rizika je vydána výstraha (Rapant, 2017).

V České republice, ale i ve světě, bylo vytvořeno velké množství systémů pro předpověď rizika přívalové povodně. Nicméně, většina z těchto nástrojů pracuje s výstupy metod dálkové detekce, zejména pak metod nowcastingu s dobou předstihu maximálně na dvě hodiny dopředu. Využití NWP modelů bude diskutováno v následujících kapitolách této práce.

## 1.5 Dílčí závěr

Předpověď konvektivních bouří, spojených s výskytem nebezpečných jevů, je jedním z nejsložitějších problémů v současné meteorologii z hlediska předpovědi místa a času výskytu těchto bouří, včetně dostatečné doby předstihu.

Hlavními nedostatky v předpovědi konvektivních srážek u jednotlivých předpovědních systémů a numerických modelů jsou:

1. Nowcastingové systémy – chyby radarového měření (závislost na vzdálenosti od radaru, útlum na velmi intenzivních srážkách aj.), omezená délka použitelné předpovědi zpravidla pouze na několik hodin dopředu. Tyto systémy neumožňují předpovídat dynamický vývoj konvektivních srážek. V současnosti se využívá statistický model, který modeluje životní cyklus (vznik, vývoj ani zánik konvektivní buňky) pouze na základě statistik.
2. Numerické modely předpovědi počasí – nedostatečná rozlišovací schopnost modelu (některé konvektivní buňky mají velikost v řádu čtverečních kilometrů) pro vystižení vývoje konvektivní oblačnosti a nedostatečně podrobná vstupní data (počáteční podmínky). Délka předpovědi 0 až 3 dny, resp. i více dnů (s rostoucí dobou rapidně klesá úspěšnost předpovědí).
3. Expertní systémy v meteorologii – nevýhody expertních systémů se odráží ve využití nowcastingu, numerických a koncepčních modelů. Délka předpovědi je 0 až 12 hodin.

Na základě výše uvedených nedostatků předpovědních systémů a NWP modelů je navržen Algoritmus předpovědi bouří, jehož cílem je poskytnout kvalitnější předpovědní informace pro účely krizového řízení kraje.

Hlavním přínosem Algoritmu předpovědi bouří je:

- předpověď místa a času výskytu konvektivních srážek a nebezpečných jevů pro území menší než je krajský územní celek (území ORP, popř. menší oblasti) a
- doby předstihu předpovědi na 6 až 12 hodin, orientačně na 24 hodin.

## 2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Téma dizertační práce je zaměřeno na návrh informační podpory krizového řízení kraje z hlediska hodnocení výskytu povodní. Mezi nejvýznamnější přírodní hrozby z hlediska četnosti výskytu patří povodně způsobené přívalovým deštěm. Minimalizace dopadů tohoto typu povodní úzce souvisí s jejich včasnou a přesnou předpovědí. Data z numerických modelů předpovědi počasí, statistických a historických údajů z Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) budou systematicky analyzována a vyhodnocována za účelem vytvoření zprávy o budoucím výskytu konvektivních srážek a nebezpečných jevů pro potřeby orgánů krizového řízení.

Cíle disertační práce jsou:

1. Návrh Algoritmu předpovědi bouří pro účely krizového řízení kraje.
2. Analýza území vybraného kraje pro zpracování statistik historických povětrnostních situací.

Algoritmus předpovědi bouří bude navržen pro výpočet zpřesněné předpovědi s dobou předstihu předpovědi na 6 až 12 hodin (orientačně na 24 hodin). Tento Algoritmus vychází z principů analýzy a cíleného hodnocení výstupních meteorologických prvků a parametrů z numerických modelů předpovědi počasí, včetně hodnocení vlivu reliéfu na vznik a vývoj konvektivních srážek.

Hodnocení vlivu reliéfu a dalších charakteristik se opírá o prostorovou analýzu reliéfu a analýzu historických povětrnostních situací, včetně vybraných přívalových povodní za účelem vytvoření doplňující zpřesněné předpovědi k výstražným informacím od Českého hydrometeorologického ústavu.

### 3. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Pro zpracování a dosažení cílů dizertační práce jsou použity tyto metody vědecké práce:

- *Metoda analýzy* - používá principy logiky pro dosažení stanoveného cíle. Prostřednictvím analýzy je zkoumaný celek rozložen na jednotlivé části, u kterých se zjišťují vzájemné vztahy mezi prvky. Metoda analýzy je využita při studiu principů vzniku atmosférické konvekce, předpovědi počasí a zpracování statistik historických povětrnostních situací.
- *Metoda indukce* - slouží ke zkoumání skutečnosti, tvorby hypotézy ze získaných faktů. Indukce je považována za metodu, při níž se vychází z empiricky zjištěných faktů a dochází k obecným závěrům. Indukce se dále dělí na úplnou a neúplnou. V této práci je využita zejména neúplná indukce, která je statistickým zobecněním a má pravděpodobnostní charakter (zpracování statistik povětrnostních situací, tvorba předpovědi konvektivních srážek).
- *Metody prostorové analýzy* – je určena pro analýzu charakteristik reliéfu z hlediska výskytu silných konvektivních srážek pro vybrané povodňové události. Hlavními použitými metodami jsou Metoda nejmenších čtverců, Prostorová autokorelace a Hot Spot analýza. Výstupem těchto analýz bylo stanovení vah charakteristik reliéfu, z nichž byly vypočítány výsledné hodnoty charakteristik reliéfu pro předpověď potenciálních spouštěcích mechanismů v přízemní a mezní vrstvě atmosféry.
- *Metoda multikriteriálního hodnocení* - je metoda, která je určena pro rozhodování mezi několika variantami. Tato metoda je použita pro výpočet všech dílčích předpovědí a předpovědních výstupů v Algoritmu.
- *Experiment* – je použit při konfiguraci limitů předpovědních parametrů, rozdělených podle stupně intenzity bouřek, včetně hodnot jednotlivých charakteristik reliéfu. Experimentálně stanovené váhy nebezpečných doprovodných jevů a váhy suché a vlhké varianty rizika přívalových povodní jsou součástí výpočtu hlavních výstupů Algoritmu.

## 4. TEORETICKÝ RÁMEC

### 4.1 Teorie vzniku konvektivní bouře

V úvodu této kapitoly je uvedena teorie týkající se terminologie bouřek a konvektivních bouří, včetně popisu vzniku atmosférické konvekce. Velká část textu je věnována teorii vzniku konvektivní bouře, kde jsou uvedeny charakteristiky jednotlivých předpovědních parametrů Algoritmu.

#### 4.1.1 Základní terminologie

V meteorologické terminologii rozlišujeme tyto základní pojmy týkající se problematiky atmosférické konvekce:

- **Bouřka** - soubor elektrických, optických a akustických jevů, které doprovázejí elektrické výboje uvnitř oblaku, mezi oblaky navzájem nebo mezi oblaky a zemí. Bouřky se vyskytují v oblacích druhu cumulonimbus, případně cumulus congestus a nimbostratus. Podle synoptické situace, bouřky dělíme na bouřky frontální a bouřky uvnitř vzduchové hmoty (nefrontální). Frontální bouřky jsou bouřky, které se vyskytují převážně na studené a teplé frontě (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).
- **Bouře konvektivní** je souhrnné obecné označení pro meteorologické jevy, které se vyskytují při vývoji konvektivních oblaků druhu cumulonimbus nebo jejich soustav. Zahrnuje například výskyt bouřky, krup, tornáda, prudkého nárazovitého větru nebo přívalového deště (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).
- **Mezosynoptický konvektivní systém MCS** (Mesoscale Convective System) je souhrn konvektivních bouří, které vytváří souvislou oblast konvektivních srážkové oblačnosti o horizontálním rozměru 100 km a více alespoň v jednom směru (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). MCS mohou zahrnovat konvektivní bouře typu multicelárních a supercelárních bouří, jejichž struktura se během určité doby mění a vyvíjí. Kromě konvektivní oblačnosti se vyskytuje i vrstevnatá oblačnost v týlu MCS, na níž se může vyskytnout trvalý déšť po dobu několik hodin. Příkladem lineární struktury MCS je tzv. squall-line, oválné struktury jsou označovány jako MCC (Mesoscale Convective Complex). Doba trvání MCS je několik hodin. Nad oceánem se MCS mohou transformovat do tropických cyklon.
- *„Squall line je silná forma čára instability (konvergence) s výskytem více či méně lineárně uspořádaných silných konvektivních bouří“* (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017). Squall line je součástí organizované MCS, jejíž jednotlivé konvektivní buňky vzájemně interagují nebo jsou vzájemně propojeny působením jednotlivých gust front na čele bouře. Čára instability se může vyskytnout 50 až 100 km před

studenou frontou v teplém sektoru tlakové níže nebo výjimečně za ní. Výskyt squall line před studenou frontou je spjatý s výraznými projevy nebezpečných doprovodných jevů, zejména přivalového deště a silných nárazů větrů než na samotné studené frontě (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Nejvyšších intenzit konvektivních srážek bývá dosaženo při pomalém až stacionárním pohybu, způsobeném vyššími hodnotami vertikálního stříhu větru. Squall-line tak může bez pohybu setrvávat na jednom místě i několik hodin bez pohybu. Příkladem tohoto typu MCS jsou povodně z roku 2009, kdy na severní Moravě spadlo přes 200 mm srážek během několika hodin a způsobilo rozsáhlé přivalové povodně.

- **Supercelární bouře** je konvektivní bouře velmi silné intenzity, která se skládá zpravidla z konvektivní buňky s jedním hlavním výstupným proudem. Hlavní vzestupný proud je charakteristický svým rotačním pohybem v důsledku vlivu výrazného vertikálního stříhu větru. Doba trvání supercely je několik hodin a bývá doprovázena přivalovým deštěm, krupobitím, silnými nárazy větru a zejména tornády. V České republice se tento typ konvektivní bouře vyskytuje velmi vzácně (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

#### 4.1.2 Atmosférická konvekce

*„Atmosférickou konvekcí jsou v meteorologii vzestupné a kompenzační sestupné pohyby vzduchu v atmosféře, přičemž vzestupné pohyby mívají větší rychlost“* (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017).

*„Atmosférická konvekce představuje důležitý mechanismus vertikální výměny tepla a vlhkosti v troposféře. Konvekční výstupné proudy dopravují teplý a vlhký vzduch z přízemních hladin vzhůru a vyvolávají tím kompenzační sestupné proudy, které se mohou projevit ve spodních hladinách jako silný nárazový vítr“* (Řezáčová et al., 2007, s. 233).

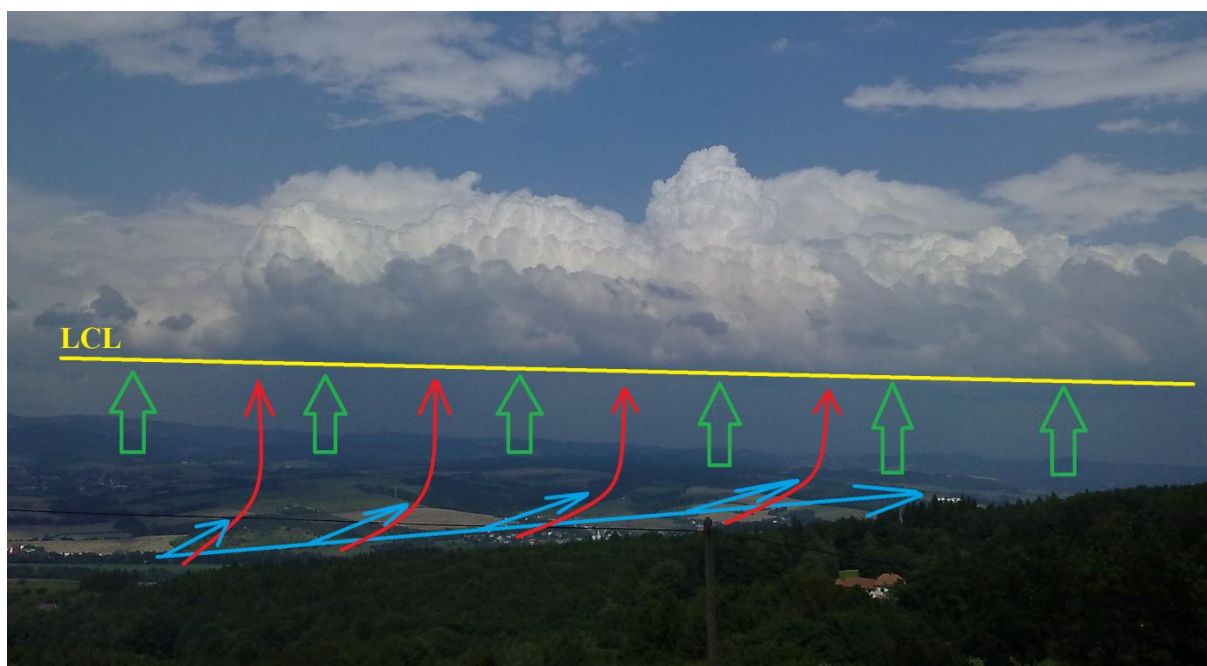
Vývoj konvekční oblačnosti je spojen na základě vzájemné kombinace tří základních podmínek:

1. Existuje proces, který vyvolá vznik výstupných konvekčních pohybů a je prvním impulsem pro její další vývoj.
2. Vertikální profil teploty a vlhkosti v troposféře podporuje další zrychlení výstupného proudu.
3. Vzduch proudící vzhůru je dostatečně teplý a vlhký, aby zajistil přísun vody potřebné pro vývoj oblaku (Řezáčová et. al., 2007, s. 234).

První podmínka je zaměřena na proces, který vyvolá vznik výstupných konvekčních pohybů z hlediska potenciálních spouštěcích mechanismů konvekce (dále „spouštěč konvekce“). Jedním z těchto spouštěčů je například termika, která vychází z principu konvekce termické, vyvolané působením



archimédovských vztlakových sil, vzniklých následkem nerovnoměrného radiačního ohřívání zemského povrchu (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Vznik těchto teplotních nehomogenit je dán typem povrchu, kterým je například údolní oblast s rozsáhlými ornými plochami v kombinaci s velký podílem zastavěných ploch, které vytváří teplotní kontrast oproti svému okolí. Kombinace teplotních a vlhkostních vlivů vytváří příznivé podmínky pro vzestupný pohyb částic vzduchu. Kromě teplotních a vlhkostních vlivů, dalším důležitým faktorem je vítr. Vyšší rychlost větru v přízemní vrstvě atmosféry může podpořit výstupné pohyby vzduchu. Zrychlení částice může také podpořit v některých lokalitách orografie terénu, zejména na návětrných i závětrných stran kopců a pohoří v kombinaci s údolními větry (Sulan, 2009). Vliv těchto potenciálních spouštěčů konvekce se nejvíce projevuje při vzniku bouřek uvnitř vzduchové hmoty (orografických bouřek) a linie konvergence, které se vyskytují nad danou oblastí bez vazby na atmosférické fronty (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).



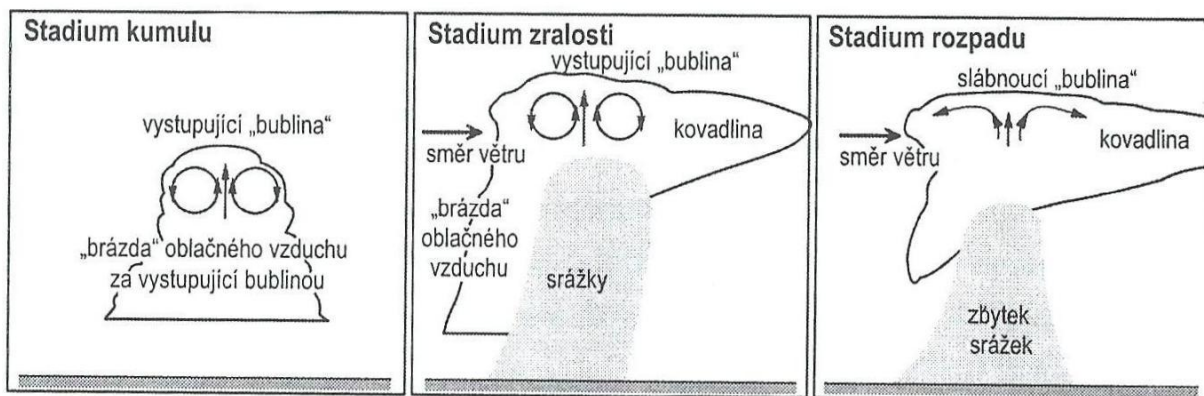
*Obr. 4.3: Ukázka vlivu potenciálních spouštěcích mechanismů konvekce. Červené šipky představují teplý a vlhký stoupající vzduch, modré šipky vítr v přízemní vrstvě atmosféry, zelené šipky orografické vlivy a žlutá čára vzestupnou kondenzační hladinu (vlastní zdroj).*

Kombinace teplotních, vlhkostních a větrných podmínek v přízemní vrstvě atmosféry napříč údolím měst Zlín – Vizovice, podpořená vynuceným výstupem na návětrné straně Hostýnsko-vsetínské hornatiny, je znázorněna na obrázku 4.3. Toto zjednodušené schéma dokumentuje představu o potenciálních spouštěcích mechanismech a jejich vlivu na vznik a vývoj konvektivní oblačnosti.

Velmi častým spouštěčem v letním období jsou atmosférické fronty (v letním období nejčastěji fronta studená nebo okluzní), která způsobí v dané oblasti vynucený výstup teplého vzduchu před předpřítékajícím studeným vzduchem. Dalším spouštěčem konvekce je gust fronta<sup>6</sup>, která podporuje výstupný pohyb částic prostřednictvím výtoků studeného vzduchu z blízké konvektivní buňky (Sulan, 2009).

Poslední dvě základní podmínky vzniku atmosférické konvekce jsou demonstrovány na základě schématu životního cyklu jednoduché konvekční cely, která je nejjednodušším typem konvekční bouře a současně je základní strukturální jednotkou multicelární bouře. Životní cyklus jednoduché konvekční cely má tři vývojová stádia:

1. *Stádium kumulu* s převládajícím vzestupným proudem trvá 10 až 15 minut.
2. *Stádium zralosti* se současnou přítomností výstupného a sestupného proudu v různých částech oblaku (doba trvání 15 až 30 minut).
3. *Stádium rozpadu* se sestupným proudem trvá kolem 30 minut (Řezáčová et al., 2007, s. 417).



Obr. 4.4: Schéma vývojových stádií jednoduché konvekční cely (Doswell, 2001; Řezáčová et al., 2007, s. 418)

Obrázek 4.4 ilustruje schéma jednotlivých vývojových stádií konvekční cely. *Stádium kumulu* je charakteristické s jedním výstupným proudem vzduchu, který vyvolá růst vodních kapek (ve vyšších vrstvách k růstu ledových krystalků) a tím způsobí růst oblaku. Okolní vzduch pak vtéká do oblaku i po stranách výstupného proudu. Současně s tím, vodní kapky se vzájemně srážejí a spojují, čímž vznikají větší oblačné a srážkové kapky. Jakmile kapky a ledové krystalky dosáhnou určité velikosti, kdy jejich pádová rychlost je vyšší než rychlost výstupného proudu, tak začnou padat jako proud srážkových částic. (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017; Řezáčová et al., 2007, s. 417). Tím je započato *stádium zralosti*. Toto stádium je charakteristické

<sup>6</sup> „Gust fronta je přední okraj studeného vzduchu vytékajícího z konv. bouře. Zdrojem studeného vzduchu je sestupný proud, který se po dosažení zemského povrchu roztéká do stran a proniká pod okolní teplejší vzduch. Gust fronta je charakteristická prudkou změnou rychlosti a směru větru, tlaku a teploty vzduchu“ (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017).

přítomnosti výstupného a sestupného proudu. Sestupný proud společně se srážkami dosahuje zemského povrchu jako výtok studeného vzduchu, který se projevuje silnými nárazy větru. Roztékající sestupný proud pak může odříznout vtékající teplý a vlhký vzduch a tím nastává *stádium rozpadu*. Při tomto stádiu dochází postupně k zániku výstupného a sestupného proudu (Řezáčová et. al., 2007, s. 418).

#### 4.1.3 Podmínky vzniku silných bouří

Podmínky vzniku silných bouří charakterizují vlastnosti atmosféry, příznivé pro vznik a vývoj konvekce.

Podmínkami vzniku silných bouří jsou:

1. vertikální instabilita atmosféry,
2. spouštěcí a podpůrné faktory konvekce,
3. stříh větru,
4. rychlost pohybu bouře.

Hlavním předpokladem vzniku konvektivní bouře, doprovázené přívalovým deštěm, je průnik všemi čtyřmi podmínkami vzniku silných bouří. Princip průniku podmínek vzniku silných bouří je uplatněn v předpovědi intenzity bouří (pátá fáze Algoritmu předpovědi bouří).

*„Vertikální instabilita atmosféry je instabilita určité vrstvy atmosféry vůči posunutí vzduchové částice ve vertikálním směru, způsobená charakteristickým teplotním zvrstvením atmosféry. Instabilita atmosféry popisuje podmínky v atmosféře, které jsou příznivé pro realizaci konvektivních procesů“* (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Instabilita atmosféry je podmíněna vysokou vlhkostí ve spodních a vyšších hladinách atmosféry v kombinaci s intenzivním prohříváním okolního vzduchu. Míra instability atmosféry je posuzována podle výstupů aerologického diagramu na základě hodnoty suchoadiabatického gradientu, minimálního rozdílu mezi teplotou a teplotou rosného bodu a podle některých indexů instability z NWP modelů (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

První množinou spouštěcích faktorů konvekce jsou faktory, které podporují vývoj výstupného proudu vzduchu nad i pod vzesupnou kondenzační hladinou. Mezi tyto faktory patří atmosférické fronty, gust fronty, jet- stream, anomálie potenciální vorticity a advekce cyklonální vorticity (Sulan, 2009).

Druhou množinou spouštěcích faktorů jsou faktory, které iniciují počáteční vznik a vývoj atmosférické konvekce v přízemní a mezní vrstvě atmosféry:

- orografie reliéfu zemského povrchu,
- teplotní vlivy v přízemní vrstvě atmosféry,
- vlhkostní vlivy vzduchu přízemní vrstvě atmosféry,
- vlivy proudění vzduchu přízemní vrstvě atmosféry.

Třetím faktorem je vertikální stříh větru. „*Stříh větru je prostorová změna vektoru rychlosti proudění připadající na jednotkovou vzdálenost*“ (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Stříh větru při existenci výrazné instability atmosféry a spouštěcích mechanismů konvekce může významně podpořit vznik konvekčních bouří typu multicel a supercel. U multicel zajišťuje organizaci konvekčních cel. Stříh větru je jednou z příčin vzniku nebezpečných doprovodných jevů vyskytujících se u těchto typů konvekčních bouří.

Poslední skupinou faktorů, ovlivňujících vývoj konvekce a množství spadlých srážek, jsou podpůrné faktory pohybu konvektivní bouře. Hlavním předpokladem vlivu tohoto faktoru je, že s rostoucí rychlostí pohybu bouře, klesá množství spadlých srážek a naopak.

#### 4.1.3.1 Instabilita atmosféry

Potenciální míru instability atmosféry lze odhadnout prostřednictvím indexů instability, na základě kterých lze získat orientační přehled o podmínkách teplotního a vlhkostního zvrstvení atmosféry.

Tyto indexy instability jsou součástí předpovědi vlastností atmosféry:

- CAPE a její modifikace MLCAPE a MUCAPE,
- CIN a její modifikace MLCIN a MUCIN,
- Lifted Index (LI),
- Showalter Index (SI),
- Totals totals index (TT index),
- K-Index,
- Vertikální gradient teploty v hladinách 850-500 hPa,
- Vlhká potenciální teplota v hladině 850 hPa.

**Convective Available Potential Energy (CAPE)** - je jedna z nejpoužívanějších charakteristik atmosféry, interpretujících instabilitu atmosféry. Tato charakteristika je velmi důležitá pro odhad vývoje konvekce po zahájení kondenzace vodní páry. Pokud je této energie dostatečné množství, pak oblačnost může růst až do horních vrstev troposféry a vytvářet podmínky pro výskyt nebezpečných doprovodných jevů. V aerologickém výstupu je CAPE vyjádřena jako plocha tzv. druhé kladné plochy (Bluestein, 1993):

$$CAPE = g \int_{HVK}^{HNV} \frac{(\bar{T}_V - T_V)}{T_V} dz, \quad (4.1)$$

kde  $g$  je konstanta gravitačního zrychlení,  $HNV$  je hladina nulového vztlaku,  $HVK$  je hladina volné konvekce a  $T_v$  je virtuální teplota<sup>7</sup>. V atmosféře s výraznou instabilitou atmosféry nad určitými oblastmi se hodnoty CAPE pohybují v řádech tisíců J/kg (V ČR nad 1 000 J/kg a víc, v USA až nad 3 000 J/kg a víc). Hodnoty CAPE je nutné brát orientačně z hlediska předpovědi konvekce, protože na vývoj termické konvekce se podílí mnoho dalších faktorů, které je nutné do předpovědi zahrnout. Hluboká konvekce se může vytvářet za ostatních příznivých podmínek a současně i za nízkých hodnot CAPE. (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017; Bluestein, 1993). Aplikace CAPE je zaměřena na předpověď podmínek vzestupného proudu vzduchu, krupobití a silných nárazů větru (ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).

**Convective INhibition (CIN)** – je další charakteristikou atmosféry, určenou pro předpověď podmínek vzestupných pohybů vzduchu. Jedná se o energii nutnou pro vyzdvižení vzduchové částice do hladiny volné konvekce, kde prostřednictvím CAPE je podporována k výstupným pohybům v atmosféře. CIN se uvádí se záporným znaménkem a je analogická k CAPE. Platí, že čím nižší jsou hodnoty CIN, tím jsou lepší podmínky pro tvorbu konvekce a naopak. Pro výpočet CIN platí podobný vzorec, jako pro výpočet CAPE:

$$CIN = g \int_{z_0}^{HVK} \frac{(\bar{T}_V - T_V)}{T_V} dz, \quad (4.2)$$

kde  $z_0$  je počáteční hladina výstupu vzduchové částice (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

**Mixed Layer Convective Available Potential Energy (MLCAPE)** - je modifikací CAPE a vyjadřuje míru instability ve spodní vrstvě atmosféry, tj. 50 hPa – 0 až 400 metrů nad zemí (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Tato modifikace CAPE je jedním z parametrů, určených pro předpověď denní instability atmosféry.

**Most Unstable Convective Available Potential Energy (MUCAPE)** - je maximální hodnotou CAPE, která je dosažena při výstupech vzduchové částice z bodů sondážní křivky ve spodních 300 hPa (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). MUCAPE je jedním z parametrů, určených pro předpověď noční instability atmosféry.

**Mixed Layer Convective INhibition (MLCIN)** - je modifikací CIN a představuje energii, nutnou pro vyzdvižení vzduchové částice nad hladinu přízemní inverze ve spodní hladině atmosféry, tj. 50 hPa – 0 až 400 metrů nad

---

<sup>7</sup> Virtuální teplota je teplota suchého vzduchu, který má stejnou hustotu jako vzduch vlhký; při skutečné teplotě  $T$  a za normálních podmínek na povrchu Země. (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017)

zemí (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Tato modifikace CIN je jedním z parametrů, určených pro předpověď denní instability atmosféry.

**Most Unstable Convective INhibition (MUCIN)** - je maximální hodnotou CIN, která je dosažena při výstupech vzduchové částice z bodů sondážní křivky ve spodních 300 hPa (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). MUCIN je jedním z parametrů, určených pro předpověď noční instability atmosféry.

**Lifted Index (LI)** – je jednoduchým ukazatelem míry instability atmosféry, avšak jen pro hladinu 500 hPa. LI porovnává teplotu vystupující vzduchové částice od zemského povrchu s teplotou v hladině 500 hPa (Vasquez, 2003). Výpočet Lifted Index je dán tímto vzorcem:

$$LI = T_{500 \text{ hPa}} - T_{\text{povrch} \rightarrow 500 \text{ hPa}} \quad (4.3)$$

Negativní hodnoty indikují instabilní podmínky vzdušné masy; hodnoty LI pod -4 °C značí zvýšenou pravděpodobnost výskytu silné konvekční srážkové oblačnosti. Nevýhoda tohoto indexu spočívá v uvažování výstupu od zemského povrchu v denních hodinách, při němž se nedají zohlednit noční bouřkové a frontální situace. V předpovědních mapách většiny výpočetních modelů předpovědi počasí bývá zobrazován v kombinaci s MLCAPE (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017; Vasquez, 2003).

**Showalterův index (SI)** - je index instability, definovaný jako rozdíl mezi teplotou vzduchu v hladině 500 hPa a teplotou, kterou bude mít vzduchová částice vyzdvižená z hladiny 850 hPa do kondenzační hladiny a přemístěna do hladiny 500 hPa. Showalterův index lze vypočítat podle níže uvedeného vzorce:

$$SI_{850 \text{ hPa}} = T_{500 \text{ hPa}} - T_{850 \rightarrow 500 \text{ hPa}} \quad (4.4)$$

Stabilní zvrstvení atmosféry je charakterizováno kladnými hodnotami SI. Naopak záporné hodnoty SI představují instabilní zvrstvení atmosféry. Tento index je používán především pro předpověď nočních frontálních bouřek v kombinaci s indexem MUCAPE. Aplikace SI a LI je zaměřena na předpověď podmínek vzestupných pohybů vzduchu, krupobití a silných nárazů větru. (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017; ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017)

**K-index (KI)** - je index instability, který vyjadřuje podmínky prostředí, příznivé pro vznik a vývoj konvektivní srážkové oblačnosti uvnitř vzduchové hmoty. Tento faktor zahrnuje rozdíl teplot a vlhkostí mezi jednotlivými hladinami 850, 700 a 500 hPa. Výpočet KI je dán vzorcem:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + (T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})) \quad (4.5)$$

kde  $T_{850hPa}$  je teplota v hladině 850 hPa a  $T_d$  je teplota rosného bodu v příslušné hladině. Hodnoty K-Indexu nad 32 lze považovat za podmínky, příznivé pro tvorbu konvektivní srážkové oblačnosti (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

**Total Totals Index (TT)** – je index instability, používaný v různých částech světa. TT index se skládá z indexu *CT* (Cross Totals) a indexu *VT* (Vertical Totals). Totals Total index je definován vztahem:

$$\begin{aligned} TT &= CT + VT = (T_{d850} - T_{500}) + (T_{850} - T_{500}) \\ &= T_{d850} + T_{850} - 2T_{500} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Vysoké hodnoty TT indexu byly detekovány velmi často v chladné instabilní vzduchové hmotě. A proto, při použití tohoto indexu, je téměř vždy nutné přihlídnout k hodnotám LI. Někdy se stává, že hodnota TT překračuje hodnotu 50, avšak žádné bouřky se zde nevyskytují. Obecně lze říci, že spolehlivost TT indexu vzrůstá, pokud vzrůstají hodnoty CT (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

**Vertikální teplotní gradient GRAD 850 - 500 hPa** - je parametr, který je definován jako pokles teploty mezi tlakovými hladinami 850 a 500 hPa. Teplotní gradient nám určuje teplotní zvrstvení atmosféry v rozdílu těchto hladin, které jsou důležité pro posouzení míry instability atmosféry nad hladinou LCL. Tento parametr je používán pro předpověď vlastností vzestupného proudu, výskytu krup a silných nárazů větru stejně jako v případě modifikací CAPE; LI a SI (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017; ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).

**Vlhká potenciální teplota v hladině 850 hPa** - je parametr, určený pro posouzení teplotních a vlhkostních podmínek ve spodních a středních hladinách atmosféry. Tento index je určen především pro předpověď frontálních bouřek, ale také linie konvergence, které se vytváří v mělkých brázdách nízkého tlaku vzduchu nejčastěji před studenou frontou. Vlhká potenciální teplota je udávána v Kelvinech (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017; ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).

#### 4.1.3.2 Spouštěcí a podpůrné faktory konvekce

V rámci této kapitoly je popsána množina spouštěcích faktorů konvekce, které mají vliv na vývoj výstupného proudu nad i pod výstupnou kondenzační hladinou. Tyto parametry charakterizují vlastnosti atmosféry, podstatné pro vývoj konvektivní srážkové oblačnosti:

- relativní vlhkost vzduchu 1000-300 hPa,



- srážková voda - Precipitable water ( $P_{\text{water}}$ ),
- relativní vorticitu v hladině 850 hPa,
- parametr frontogeneze v hladině 850 hPa,
- teplota v hladině 850 hPa,
- vertikální teplotní gradient 925 až 700 hPa,
- směšovací poměr v hladinách 0 - 1 km,
- rozdíl tlaku MSLP v hPa,
- Moisture Convergence (MOCON) a Moisture Flux Divergence (MFDIV) v hladinách 0-1 km,
- Orographic Lift (MTV Vektor a Orographic Lifting).

**Relativní vlhkost vzduchu RH** (Relative Humidity) - je charakteristika vlhkosti vzduchu, měřená na meteorologických stanicích a vyjadřuje stupeň nasycení vodní párou. Tento faktor je definován jako poměr skutečné hustoty vodní páry  $\rho_v$  a hustoty nasycené vodní páry při dané teplotě  $\rho_{v,x}$ , udávaný v procentech (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Z hlediska předpovědi, čím je hodnota relativní vlhkosti v přízemní hladině vyšší, tím jsou podmínky pro vznik konvekce příznivější. Naopak, velmi vysoké hodnoty relativní vlhkosti (nad 90 %) v ostatních hladinách atmosféry mohou vznik konvekce tlumit (Sandeov, 2013). Relativní vlhkost je důležitým meteorologickým prvkem používaným pro předpověď charakteristiky vzestupného proudu a přívalových srážek ve spodních hladinách atmosféry (ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).

**Voda srážková potenciální (precipitable water)** - je množství vody, vyjádřené v mm vodního sloupce, které bychom získali, kdyby všechna vodní pára obsažená ve sloupci vzduchu jednotkového průřezu mezi dvěma tlakovými hladinami zkondenzovala a vypadla ve formě atmosférických srážek. Matematicky lze množství vysrážitelné vody  $W$  ve sloupci mezi dvěma isobarickými hladinami  $p_1$  a  $p_2$  vyjádřit tímto vztahem:

$$W = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} r dp, \quad (4.7)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení a  $r(p)$  je směšovací poměr (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Ve srážkových oblacích je hodnota srážkového úhrnu za dobu existence oblaku zpravidla vyšší než celková vysrážitelná voda. Hodnota srážkové vody je udávána v mm. Srážková voda je aplikována zejména pro předpověď přívalových srážek (ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).

**Relativní vorticitu v hladině 850 hPa** – je parametrem, určený pro posouzení vlivu míry vorticity v blízkosti základny konvektivní oblačnosti,



včetně předpovědi organizace a uspořádání a pohybu konvektivní bouře. Záporné hodnoty relativní vorticity vyjadřují divergenci proudění, která je opakem konvergentního proudění podporujícího vzestupné pohyby vzduchu (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

**Parametr frontogeneze v hladině 850 hPa** - je signifikantním faktorem pro předpověď frontálních konvektivních srážek. Tento parametr zohledňuje podmínky instability a vlhkosti atmosféry v hladině 850 hPa, která je velmi důležitá pro předpověď dalšího vývoje konvektivní srážkové oblačnosti v atmosféře.

**Teplota v hladině 850 hPa** - je parametrem, určeným pro posouzení vlivu výstupného proudu ve spodních hladinách troposféry z hlediska množství tepelné energie, která je spotřebovávána při pohybu vzhůru. Obecně platí, že čím vyšší teplotu v této hladině konvektivní bouře bude mít, tím více bude podpořen vzestupný proud k rozvoji konvekce.

**Vertikální teplotní gradient GRAD 925 až 700 hPa** - je parametrem, vyjadřujícím míru instability atmosféry ve spodních a středních hladinách atmosféry. Tento faktor je používán pro předpověď teplotních a vlhkostních podmínek atmosféry, spojených s orografickými vlivy. Současně, tento parametr je aplikován pro předpověď podmínek vzestupného proudu, krupobití a silných nárazů větru.

**Směšovací poměr MIXR** (Mixing Ratio) v hladině 1000 hPa je definován jako podíl hmotnosti vodní páry  $m_v$  k hmotnosti suchého vzduchu  $m_d$  v daném objemu vzduchu:

$$w = \frac{m_v}{m_d} \quad (4.8)$$

Směšovací poměr je bezrozměrná veličina, která je udávána v jednotkách  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Číselnou hodnotou se směšovací poměr blíží hodnotě měrné vlhkosti vzduchu. Směšovací poměr v hladině 0 - 1 km se využívá zejména pro posouzení vlastností vzestupného proudu a předpověď podmínek výskytu přívalového deště a krupobití (ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).

**Rozdíl tlaku MSLP v hPa** - je parametrem, posuzovaným jako rozdíl poklesu tlaku vzduchu, který indikuje vznik výstupných pohybů v atmosféře. Čím vyšší je tento rozdíl, tím vyšších hodnot nabývá koeficient rozdílu tlaku v hPa. Naopak, nárůstu tlaku je přiřazen nulový koeficient, což znamená zlepšení stavu počasí a vznik sestupných pohybů vzduchu v přítomnosti tlakové výše, které brání dalšímu rozvoji konvekce.

**Moisture Convergence (MOCON)** - je signifikantním parametrem, určeným pro předpověď podmínek vhodných pro vznik konvektivní srážkové oblačnosti, zejména uvnitř vzduchové hmoty. Parametr MOCON kombinuje vlastnosti proudění v přízemní vrstvě atmosféry a relativní vlhkosti:

$$MOCON = -\nabla_H \cdot (r\mathbf{v}) = -r\nabla_H \cdot \mathbf{v} - \mathbf{v} \cdot \nabla_H r, \quad (4.9)$$

kde  $r$  je směšovací poměr ve výšce 2 metry nad zemí,  $\mathbf{v}$  je vektor větru v 10 metrech nad zemí (Sulan, 2004). Druhý člen na pravé straně rovnice představuje advekci vlhkosti, která je řádově menší než první člen, který popisuje konvergenci proudění. V místech, kde jsou kladné hodnoty MOCON, tam roste konvergence proudění podporující vzestupné pohyby vzduchu. Naopak, záporné hodnoty znamenají výskyt divergentního proudění, charakterizující sestupné pohyby vzduchu. Obdobným faktorem je tzv. **Moisture Flux Divergence (MFDIV)** v hladinách 0 - 1 km, který počítá advekci vlhkosti, kombinované s prouděním vzduchu mezi spodními hladinami a přízemní vrstvou atmosféry. MFDIV vyjadřuje divergenci a konvergenci proudění opačnými znaménky než u MOCON (Sulan, 2004).

**Orographic Lifting a Moisture Transport Vectors (MTV) v hladinách 0-2 km** - je parametrem, který poskytuje informaci o pravděpodobnosti vlivu orografického návětrného efektu. Tento výstup je kombinován s polem relativní vlhkosti v hladinách 1000 až 600 hPa. Druhým obdobným parametrem je Orographic lifting. Oba tyto parametry kombinují vliv vlhkosti vzduchu s rychlostí větru v hladině 850 hPa (modelzentrale.de, 2014 - 2017; Van Der Velde, 2001).

#### 4.1.3.3 Střih větru

Střih větru je jedním ze signifikantních faktorů, ovlivňujícím organizaci konvektivní srážkové oblačnosti. Střih větru je definován jako vektorový rozdíl rychlosti proudění, připadající na jednotkovou vzdálenost. Vertikální střih větru představuje parciální derivaci vektoru rychlosti proudění ve vertikální souřadnici (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017).

Střih větru charakterizuje organizaci bouří. Typ konvektivní bouře je dán vertikálním střihem větru podle rozmezí jednotlivých hladin atmosféry:

- **0 - 6 km – DLS (Deep Layer Shear)** vyjadřuje vertikální střih větru od zemského povrchu po hladinu 6 km, udávaný v jednotkách m/s. DLS je hlavním indexem, podle kterého posuzujeme organizaci a uspořádání konvektivní bouře, např. zda se jedná o unicelární, multiceleární nebo supercelární bouři. Příliš vysoké hodnoty DLS, cca nad 35 m/s, konvektivní bouře obvykle ničí (Sandev, 2013). Index DLS je také používán pro předpověď výskytu krup a silných nárazů větru.
- **0 - 3 km** je rozmezí hladin na úrovni výtoku studeného vzduchu a potenciálu vhodného pro regeneraci bouřek. Kromě předpovědi krupobití a silných nárazů větru je určen také pro předpověď tornád.
- **0 - 1 km – LLS (Low Level Shear)** vyjadřuje vertikální střih větru od zemského povrchu po hladinu 1 km v jednotkách m/s. Využití indexu LLS

spočívá v předpovědi výskytu krup a silných nárazů větrů, včetně tornád (ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).

Předpověď pravděpodobnosti vzniku nebezpečných doprovodných atmosférických jevů je doplněna o tyto parametry:

- Storm Relative Helicity (SREH) v hladinách 0 - 3 km a 0 - 1 km,
- Střih větru v hladině 0 - 1 km,
- SWEAT index.

**SREH (Storm Relative Helicity)** - je parametr, který vyjadřuje míru vorticity (rotace) v souvislosti s vtokem teplejšího vzduchu do bouřky. SREH představuje tendenci vzduchové částice vykonávat rotační pohyb ve vertikálním směru podle vzorce:

$$SREH = \int_0^h k \cdot (v - c) \cdot \frac{\partial v}{\partial z} dz, \quad (4.10)$$

kde  $h$  je předpokládaný vertikální rozsah vtoku do bouře, počítaný s hodnotou 3 km,  $v$  je vertikální profil větru,  $c$  je vektor rychlosti pohybu bouře a  $k$  je jednotkový vertikální vítr. SREH v hladinách 0 - 3 km je používán pro předpověď supercelárních bouří a s nimi spojených tornád, krupobití a silných nárazů větru (Řezáčová et al., 2007, s. 285).

**SWEAT index** – kombinuje parametry teplotního a vlhkostního zvrstvení atmosféry, včetně směru a rychlosti střihu větru:

$$SWEAT = 20(TT - 49) + 12T_{D850} + 2V_{850} + V_{500} + 125[\sin(\Delta V_{500-850}) + 0,2], \quad (4.11)$$

kde  $TT$  je index Total Totals,  $T_{D850}$  je teplota rosného bodu v hladině 850 hPa,  $V_{850}$  ( $V_{500}$ ) jsou rychlosti větru v uzlech v hladinách 850 (500) hPa a  $\Delta V_{500-850}$  je rozdíl hodnot směru větru v hladinách 850 a 500 hPa. Využití tohoto indexu spočívá v předpovědi podmínek vzestupného proudu, organizace a uspořádání konvektivní bouře a nebezpečných doprovodných jevů. Hlavní důraz je kladen na předpověď výskytu supercelárních bouří a s nimi spojených tornád (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

#### 4.1.3.4 Podmínky podporující organizaci a pohyb konvektivní bouře

Podmínky, podporující organizaci a pohyb bouře jsou velmi důležité jak z hlediska předpovědi rizika výskytu nebezpečných jevů, tak ovlivňují i celkovou intenzitu bouře. Zejména rychlost pohybu bouře je signifikantním faktorem, ovlivňujícím riziko přívalových povodní.

Kombinace těchto podmínek, včetně stříhu větru v hladině 0 - 6 km, které významným způsobem podporuje organizaci a pohyb konvektivní bouře. Tyto podmínky lze rozdělit do dvou základních skupin:

1. Faktory ovlivňující organizaci konvektivní bouře – rychlost větru v hladině 850 a 300 hPa.
2. Faktory ovlivňující pohyb konvektivní bouře – MCS vektor pohybu konvektivní bouře, Vektor pohybu bouře (Corfidi) a Směrový stříh větru v hladinách 1000 - 300 hPa.

**Rychlost větru v hladině 300 hPa – Jet Stream (tryskové proudění)** - je silné proudění vzduchu ve tvaru zploštělé trubice s rychlostí nad 30 m/s. Tryskové proudění se nachází ve výšce 10 - 11 km a je charakterizováno nejen vysokými rychlostmi, ale také výraznými horizontálními a vertikálními stříhy větru. Tryskové proudění je jeden z prvků, při jehož přítomnosti včetně ostatních prvků, je pravděpodobný výskyt nebezpečnějších doprovodných jevů (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017). Pokud je přítomná i výrazná potenciální vorticity, stříh větru a helicity, pak lze s vysokou pravděpodobností očekávat výskyt nejnebezpečnějších doprovodných jevů, například tornád (Sandev, 2013).

**Rychlost větru v hladině 850 hPa (nízkohladinový jet)** - při vzniku nízkohladinového tryskového proudění se mohou uplatňovat některé orografické vlivy. Například, v oblasti návětrí pod zesíleným prouděním ve vyšších vrstvách troposféry, vane-li vítr pod malým úhlem k pohoří za výskytu výškové inverze teploty. Rychlost proudění vzduchu v této hladině je přímo úměrná zrychlení vzduchové částice při vynuceném výstupu přes terénní překážku (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Nízkohladinový jet má význam pro předpověď organizace, uspořádání a pohyb konvektivní bouře. Dále je určen pro odhad pravděpodobnosti výskytu přívalového deště, silných nárazů větrů a tornád.

**MCS Propagation Vector** - je vektor pohybu bouří, na základě kterého posuzujeme směr a rychlost šíření pohybu konvektivní bouře. Pro vznik přívalové povodně je velmi důležitý velmi pomalý až stacionární pohyb bouře.

Pohyb konvektivní bouře je klasifikován těmito čtyři druhy pohybů:

1. Dopředný pohyb, kdy konvektivní bouře postupuje vpřed (od západu na východ).
2. Retrográdní (zpětný) pohyb, kdy konvektivní bouře se vrací zpět.
3. Kvazi-stacionární pohyb, kdy konvektivní bouře se pohybuje velmi pomalu nebo nemá žádný směr ani rychlost pohybu.
4. Regenerace konvektivní bouře, při nichž se vyvíjí dvě a více konvektivních bouří na stejném místě po delší dobu (řádově několik hodin až 24 hodin).

Kvazi-stacionární pohyb a Regenerace konvektivní bouře jsou typy pohybu konvektivní bouře, které mohou v kombinaci s přivalovým deštěm vyvolat přivalové povodně právě v důsledku nepřítomnosti pohybu konvektivní bouře (Mesoscale Convective System Propagation, 2011).

**Vektor pohybu bouře (Corfidi)** - vyjadřuje rychlost pohybu bouře. Vektor pohybu bouře je vypočítán dle rovnice:

$$\sum n_{CORFIDI} = \bar{V}_{850-300} - (V_{850} - \bar{V}_{850-300}), \quad (4.12)$$

kde  $\bar{V}_{850-300}$  je průměr rychlosti větru v hladinách 850, 700, 600, 500, 400 a 300 hPa a  $V_{850}$  je rychlost větru v hladině 850 hPa. Vektor pohybu bouře je udáván v jednotkách m/s (estofex.org - Flash Flood, 2014 - 2017).

**Směrový stříh větru v 1000 - 300 hPa** je stanoven na základě směrů větru v jednotlivých výškových hladinách atmosféry. Maximální směrový stříh větru je dán rozdílnými (protichůdnými) směry větru v přízemních a vyšších hladinách atmosféry a naopak.

#### **4.1.4 Potenciální spouštěcí mechanismy konvekce přízemní a mezní vrstvě atmosféry**

Pro iniciaci výstupného proudu vzduchu jsou nezbytné určité fyzikální podmínky atmosféry v blízkosti zemského povrchu. Za prvé, vzduchová částice musí získat určitý přebytek tepelné energie. V druhé řadě musí existovat vhodný spouštěcí mechanismus konvekce, který je zároveň počátečním impulsem ke spuštění konvekce a vzniku výstupného proudu v blízkosti zemského povrchu. Příklady spouštěcího mechanismu konvekce jsou teplotní rozdíly zemského povrchu, mechanická turbulence, sbíhavost přízemního proudění vzduchu a orografické vlivy. Hlavní význam těchto faktorů se odráží v předpovědi termicky podmíněné konvekce uvnitř vzduchové hmoty.

##### **4.1.4.1 Teplotní a vlhkostní vlivy v přízemní vrstvě atmosféry**

Teplotní a vlhkostní vlivy jsou potenciálními spouštěcími mechanismy ovlivňující počáteční vznik konvekce. Termická konvekce je vyvolána archimedovskými vztakovými silami, které vznikají působením horizontálních teplotních nehomogenit v důsledku nerovnoměrného radiačního ohřívání zemského povrchu (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

Nerovnoměrné ohřívání zemského povrchu je závislé na denním a ročním chodu teploty zemského povrchu. Denní chod teploty zemského povrchu půdy představuje při neměnných meteorologických podmínkách periodické kolísání teploty s minimem kolem východu Slunce a s maximem okolo 13 hodiny místního času.

Denní amplituda teploty na povrchu půdy je vždy podstatně větší než amplituda teploty vzduchu. Především v létě, při intenzivním ohřívání půdy slunečním zářením, je tento jev markantní. Denní amplitudy teploty povrchu půdy bývají v létě až 20 °C a v některých oblastech i vyšší (Kopáček, et al., 2005, s. 67).

Na základě výsledků výzkumu bylo zjištěno, že hlavními faktory teplotních a vlhkostních vlivů zemského povrchu, jsou:

- sklonitost svahů,
- orientace svahů,
- světelnost od jihozápadu,
- vegetace na zemském povrchu,
- teplotní gradient podle poloh nadmořských výšek,
- tepelné vyzařování typů zemského povrchu,
- *teplota ve 2 metrech nad zemí,*
- *relativní vlhkost ve 2 metrech nad zemí, včetně sumy srážek spadlých za 24 hodin a*
- *stupeň pokrytí oblačností.*

**Sklonitost svahů** - je charakteristika reliéfu, která do určité míry ovlivňuje tepelné podmínky zemského povrchu z hlediska intenzity vyzařování tepla. Sklonitost svahu je úhel sevřený terénní čarou reliéfu a vodorovnou rovinou. Tato charakteristika reliéfu představuje změnu výšky terénu ve směru jeho největšího spádu. Obecně platí, že čím je vyšší sklonitost (např. skály, strmé kopce a hory), tím větší teplo je vyzařováno. Tato podmínka se uplatňuje v kombinaci působení dalších faktorů, kterými jsou tzv. albedo půdy, ale také i orientace svahů. Sklonitost svahů je vypočítána funkcí Slope, která je součástí prostorové analýzy využitím nástroje GIS (Průchová, 2010, s. 41).

**Orientace svahů** - je další charakteristikou reliéfu, která v kombinaci se sklonitostí svahů a dalších charakteristik vytváří příznivé tepelné podmínky zemského povrchu pro počáteční inicializaci konvekce. Nejpříznivější tepelné podmínky jsou na svazích orientovaných na jih nebo jihozápad v kombinaci s jejich vyšší sklonitostí. Tento faktor určuje orientaci ke světovým stranám a podle jeho největšího spádu je obvykle měřen od severu ve směru hodinových ručiček. Jedná se o úhel, který svírá průmět spádové přímky roviny s přímkou vedoucí k severu. Tento úhel je vyjádřením orientace, vyjádřený ve stupních 0° (sever) -360° (sever). Orientaci svahů lze vypočítat prostřednictvím funkce Aspect (Průchová, 2010, s. 42).

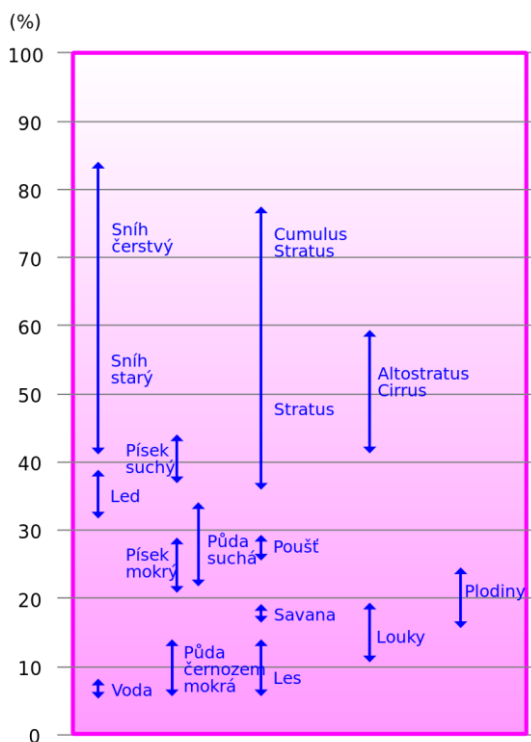
**Světelnost od jihozápadu** nebo tzv. osvětlení (hillshading) je využíváno pro analýzu zastínění terénu při dané poloze slunce. Nejčastějším směrem používaným pro prostorové analýzy reliéfu je jihozápad z důvodu vlivu maximálních tepelných účinků zemského povrchu v odpoledních hodinách.

**Stupeň vegetačního pokrytí zemského povrchu** - je dalším konstantním faktorem, ovlivňujícím tepelné poměry zemského povrchu. Rostlinný porost

zmírňuje oteplování půdy slunečním zářením v denních teplotách, kdy v létě může být holá půda až o 10°C teplejší než půda s rostlinnou vegetací. Zároveň v nočních hodinách je ochlazování půd s rostlinnou vegetací zeslabováno. Tento faktor se opět váže na oblasti, kde se nachází lesní a rostlinný porost. To znamená, že nejvyšší hodnoty koeficientu pokrytí vegetace připadají na údolní oblasti, pokryté ornou půdou s velkou koncentrací zastavěných ploch měst a obcí. Naopak, nejnižší hodnoty tohoto koeficientu se vážou na oblasti pokryté lesy a loukami ve vrchovinách a hornatinách.

**Teplotní gradient podle poloh nadmořských výšek** - zvýrazňuje vliv údolí a poloh s nízkou nadmořskou výškou. Čím nižší je nadmořská výška, tím vyšší hodnotu nabývá koeficient teplotního gradientu nadmořských výšek. Koeficienty teplotního gradientu stejně jako u stupně vegetačního pokrytí jsou stanoveny na základě nejčtenějšího výskytu tohoto faktoru ve zkoumané oblasti.

**Tepelné vyzařování typů zemského povrchu** - vychází z charakteristiky albeda půdy, které je definováno jako poměr množství slunečního záření odraženého a dopadlého. Albedo půdy je také dáno velikostí ztráty tepelné energie způsobené odrazem slunečního záření. Z obrázku 4.5 vyplývá, že půda s menším albedem (asfalt, beton, kámen, borovicové lesy, apod.) odráží méně slunečního záření, takže denní vzestup a maxima teploty povrchu půdy jsou větší než u ostatních povrchů.



Obr. 4.5: Albeda jednotlivých typů povrchů a oblaků na Zemi (Odrazivost různých typů povrchů a oblaků na Zemi, 2017)

Podíl jednotlivých typů zemského povrchu bylo vypočítáno z rastru Corine Land Cover (CLC 2012, 2017). Výsledkem je koeficient poměru zastoupení jednotlivých typů zemského povrchu.

*Teplota ve 2 metrech nad zemí* - je vyhodnocována z meteogramu modelu ALADIN jako maximální hodnota v daném tříhodinovém časovém intervalu. „Teplotní rozdíly ve 2 metrech“ nad zemí je meteorologický prvek, který má vliv na počáteční vznik konvekce. Jednotlivé koeficienty, charakterizující počet stupňů rozdílu teploty vzduchu, jsou přiřazeny na základě srovnání teplot vzduchu s okolními oblastmi. Všeobecně platí, že největší tepelné kontrasty vznikají mezi údolními a polohami s nejnižší nadmořskou výškou oproti okolnímu terénu (kopce, pohoří se zalesněným terénem).

*Relativní vlhkost ve 2 metrech nad zemí* - tvoří v kombinaci s ostatními vlivy příznivé podmínky pro počáteční vznik konvekce v blízkosti zemského povrchu. Relativní vlhkost ve 2 metrech nad zemí je proměnným meteorologickým prvkem, který je určen z výstupu meteogramu ALADIN pro daný region ORP jako průměr hodnot relativních vlhkostí v tříhodinovém intervalu. Relativní vlhkost je také ovlivněna výskytem srážek za posledních 24 hodin.

*Stupeň pokrytí oblačností* - vyjadřuje, jak dlouho působilo infračervené tepelné záření na zemský povrch z hlediska výskytu oblačnosti všech pater. Obecně platí, že efektivní vyzařování zemského povrchu závisí na stupni pokrytí oblačností. Při jasné obloze dochází v důsledku radiace (vyzařování) teploty ze zemského povrchu k podstatně rychlejšímu ochlazení, popř. oteplování než při zatažené obloze. Při bezoblačném počasí je denní amplituda teploty povrchu větší než při zatažené obloze.

Tato kapitola byla zaměřena na popis nejdůležitějších faktorů, ovlivňujících teplotní a vlhkostní vlivy zemského povrchu. Vzájemná kombinace a interakce všech těchto faktorů vytváří příznivé tepelné a vlhkostní podmínky pro počáteční vznik atmosférické konvekce v přízemní vrstvě. Nicméně, nejpříznivější podmínky pro iniciaci konvekce nastávají souběžně při působení větrných a orografických vlivů.

#### **4.1.4.2 Vlivy proudění vzduchu v přízemní vrstvě atmosféry**

Dalším velmi důležitým potenciálním spouštěcím mechanismem je přízemní konvergence proudění vzduchu vyjadřující větrné vlivy zemského povrchu. V případě proudění přes překážku se jedná o tzv. orografickou konfluenci, která se projevuje horizontálním nebo vertikálním zhuštěním proudnic (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Orografická konfluenci vzniká nejčastěji v horských průsmycích na návětrné straně hor a za orografickou překážkou obtékanou studeným vzduchem na závětrné straně.

Vlivy proudění vzduchu v přízemní vrstvě atmosféry závisí na těchto faktorech:



- Geografický sídelní útvar.
- Šířka údolí.
- Obtékání izolovaných překážek.
- Rychlost a směr větru.

**Geografický sídelní útvar** - představuje překážku v proudění za podpory tepelného ostrova města.

**Šířka údolí** – je parametr, který významně ovlivňuje konvergenci proudění vzduchu v údolních oblastech. Úzké údolí s šířkou 0 až 1 km vytváří ideální podmínky pro konvergenci proudění v přízemní hladině od zemského povrchu do 10 metrů. Naopak, příliš široké údolí nad 5 km nevytváří vhodné podmínky pro zrychlení částice.

**Obtékání izolovaných překážek** - je parametr, při němž dochází k přízemní konvergenci proudění v závětrí překážky. Nejvhodnější podmínky vznikají při obtékání osamocených kopců, které nejsou součástí hřebene, včetně většího podílu měst a obcí.

**Rychlost a směr větru v 10 metrech nad zemí** – je parametr, který je hodnocen na základě výstupů z meteogramu ALADIN. Rychlost větru je nutná pro vznik mechanické turbulence v přízemní vrstvě a pro následné odtržení vzduchových částic od zemského povrchu směrem vzhůru. Naopak, nejméně příznivé podmínky nastávají při bezvětrí, velmi slabém větru nebo silném větru s rychlostí nad 7 m/s. Takto vysoká rychlost větru může mít destruktivní účinky na počáteční vznik atmosférické konvekce.

#### 4.1.4.3 Orografické vlivy

Orografická konvektivní srážková oblačnost vzniká častěji v horských oblastech než v nížinách. Orografická konvektivní srážková oblačnost vzniká za přítomnosti těchto podmínek:

- podmíněné instability atmosféry,
- stavu nasycení vodní párou a
- termickými a větrnými podmínkami.

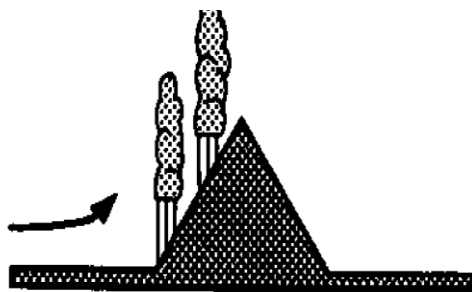
*„Podmíněná instabilita atmosféry je vertikální instabilita atmosféry, která se uplatňuje při nasycení vystupující vzduchové částice, pokud hodnota vertikálního teplotního gradientu v dané vrstvě atmosféry leží mezi hodnotami suchoadiabatického a nasyceně adiabatického teplotního gradientu. Sledovaná vrstva je tedy stabilní vzhledem k suchému vzduchu, ale instabilní vzhledem k nasycenému vzduchu, jehož výstup se po dosažení hladiny volné konvekce zrychluje“* (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

**Termické a větrné podmínky** - doplňují množinu podmínek pro vznik orografické konvektivní oblačnosti. Denní vývoj kupovité oblačnosti je ovlivněn

ohříváním zemského povrchu, expozicí návětrných stran jižním směrem v kombinaci s vysokým sklonem povrchu, vlhkostí půdy a vegetačním pokryvem. Termicky podmíněný výstup vzduchových částic může do jisté míry ovlivnit a urychlit vývoj konvektivní oblačnosti.

Orografické vlivy zemského povrchu jsou jedním z významných spouštěcích mechanismů konvekce, který se nejvíce projevuje zejména v oblastech s výskytem kopcovitého a hornatého terénu. Orografické proudění přes překážky může vyvolat, ovlivnit vývoj srážkových oblaků nebo zesílit konvektivní srážky. Při orografickém proudění se nejčastěji uplatňují tyto spouštěcí mechanismy:

- **Vznik konvekce při vynuceném výstupu** – schopnost vynuceného výstupu vyvolat konvekci při proudění do svahu je zřejmá, jestliže je proudící vzduch dostatečně vlhký a instabilní (Řezáčová et al., 2007, s. 407; Houze, 2012, s. 531-532). Princip tohoto mechanismu je znázorněn na Obrázku 4.6:



Obr. 4.6: Vznik konvekce při vynuceném výstupu (Houze, 2012, s. 531)

- **Vznik konvekce konvergencí proudění na závětrné straně** - je výsledkem proudění orografické konfluence kolem izolovaných překážek. Jedním z důsledků odbočení obtékajícího proudění je vývoj konvekce v závětrní překážky (Řezáčová et al., 2007, s. 408-409; Houze, 2012, s. 531-532).
- **Zesílení konvekce na závětrné straně** - je výsledkem kombinace vlivu výstupného pohybu ve středních hladinách spojeného s vertikálně se šířícími vlnami v proudění přes hřeben a do svahu vyvolaného termálními vlivy ve spodních hladinách atmosféry (Řezáčová et al., 2007, s. 408-409; Houze, 2012, s. 531-532). Princip tohoto mechanismu je ilustrován na Obrázku 4.6:



Obr. 4.7: Vznik konvekce konvergencí proudění na závětrné straně (Houze, 2012, s. 531)

Kromě těchto spouštěcích orografických mechanismů mají vliv na vznik a vývoj srážek tyto faktory:

**Poloha nadmořské výšky** - je parametrem, který může významně podpořit orograficky podmíněnou konvekci. Obecně platí, že čím vyšší nadmořskou výšku má zkoumaný reliéf, tím lepší jsou podmínky pro počáteční vznik konvekce.

**Hřeben** - je dalším faktorem s konstantní hodnotou, která je nastavena z mapy stínovaného reliéfu pro ČR z geoportálu CENIA. Vliv šířky hřebenu a výšky pohoří na vznik orografické srážkové oblačnosti byl studován v mnoha zahraničních pracích. Rozměrová analýza ve studii prokázala, že maximum srážkové úhrnu závisí na výšce pohoří v úrovni volného proudění a poměru stran hřebene.

Ve studii (Miglietta a Rotunno, 2009) bylo prokázáno, že umístění srážkového maxima z hlediska šířky pohoří je charakteristické podle:

- 1) Úzkého hřebene, kde srážkové maximum je ve většině případů blízko vrcholu kopce, tyto hřebeny způsobují výstup vzduchu, který rychle slábne a srážkový úhrn je spíše menší.
- 2) Širokého hřebene – srážkové maximum se nachází na návětrné straně svahu (ve dvou třetinách cesty k vrcholu hřebene); výstupné proudění má delší trvání a srážky jsou podstatně vydatnější než u úzkého hřebene.
- 3) Dvou hřebenů za sebou – v tomto případě může dojít ke kondenzaci i na závětrné straně, ale sestupné proudění a odpařování často zabraňuje srážkám (Průšová, 2010; Miglietta a Rotunno, 2009).

Dalším významným parametrem, ovlivňujícím rozdílné rozložení srážek, je rychlost proudění (rychlost větru v hladině 850 hPa).

- Při nízké rychlosti proudění (pod  $10 \text{ ms}^{-1}$ ) se maximální srážky vyskytují na návětrné straně svahu bez ohledu na šířku a výšku pohoří.
- Při vysoké rychlosti proudění (nad  $20 \text{ ms}^{-1}$ ) se srážky vytváří na návětrné straně vysoké a široké bariéry (Průšová, 2010; Miglietta a Rotunno, 2009).

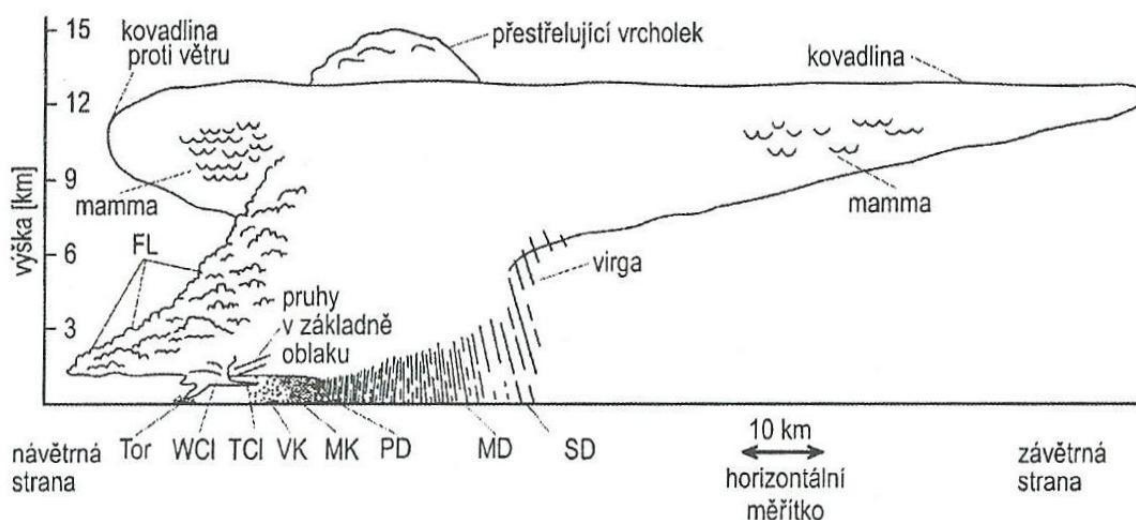
Výše uvedené poznatky jsou implementovány v rámci konfigurace charakteristik reliéfu, která je součástí čtvrté fázi Algoritmu předpovědi bouří.

## 4.2 Nebezpečné jevy, spojené s výskytem konvektivních bouří

Hlavním důsledkem působení konvektivních bouří je výskyt těchto nebezpečných atmosférických doprovodných jevů:

1. přívalový déšť,
2. krupobití,
3. silné nárazy větru,
4. tornáda,

## 5. elektrické atmosférické výboje.



Obr. 4.8: Schéma supercelární bouře, spojené s výskytem nebezpečných jevů. Tor – poloha tornáda; WCI (wall cloud) – rotující oblak, který se nachází pod základnou bouře; TCl (tail cloud) – výběžek oblačnosti; FL (flanking line) – pás oblačnosti na boku bouře; VK – velké kroupy; MK – malé kroupy; PD – přívalový déšť; MD – mírný déšť; SD – slabý déšť. Upraveno podle (Bluestein a Parks, 1983 a Řezáčová et. al, 2007, s. 432).

Obrázek 4.8 znázorňuje uspořádání nebezpečných jevů, spojených s výskytem zralé supercelární bouře. Stojíme-li čelem k blížící se bouři, pak nejprve můžeme registrovat silný nárazový vítr, který je spojený s výtokem studeného vzduchu před bouří. V případě supercelární bouře je vyšší pravděpodobnost výskytu tornád, které lze zaznamenat jako druhý jev v pořadí výskytu nebezpečných jevů. Poté následuje pravděpodobný výskyt intenzivního krupobití a na závěr přívalového deště. U konvektivních bouří nižší intenzity se všechny nebezpečné jevy podle obrázku 4.8 nezbytně vyskytnout nemusí. Pořadí výskytu nebezpečných jevů však zůstává stejné.

### 4.2.1 Přívalový déšť

„Přívalový déšť je déšť velké intenzity a v našich oblastech převážně krátkého trvání v řádu několika desítek minut až hodin, a malého plošného rozsahu v  $\text{km}^2$ “ (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

Přívalový déšť je převážně ovlivněn těmito faktory:

- **Srážková účinnost konvekčního systému** - vyjadřuje, do jaké míry je množství vodní páry vystupující nad vzestupnou kondenzační hladinou transformováno na srážku dopadající na zemský povrch.
- **Doba setrvání srážkových částic v oblaku** - podporuje srážkový potenciál.
- **Hloubka teplé fáze oblaku a nulová izoterma** – čím níž se nachází hladina nulové izotermy s mělkou kapalnou vrstvou, v níž se srážková

voda vytváří přechodem přes ledovou fázi, tím je nižší její srážková účinnost.

- **Výška vzestupné kondenzační hladiny (LCL)** – riziko přívalového deště je tím vyšší, čím níže je oblačnost nad terénem, což indikuje velký vertikální rozsah a velké množství vody v oblačnosti.
- **Vertikální stříh větru** - určuje organizaci a uspořádání konvektivní bouře, včetně rychlosti pohybu bouře (Řezáčová et. al., 2007, s. 446-448), estofex.org, 2014-2017, Flash Flood; ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).
- Dalším faktorem, ovlivňujícím vývoj přívalového deště, je **gust fronta**. Jednotlivé gust fronty se mohou navzájem propojit a v kombinaci s dostatečným vertikálním stříhem větru výrazně zpomalit pohyb bouře, což může vést ke vzniku přívalových povodní.
- **Orografie terénu** je dalším významným faktorem, který může významně podpořit vývoj přívalového deště z hlediska příznivého směru proudění, kde mohou jednotlivé konvektivní buňky vznikat nad daným místem vlivem vynuceného výstupného pohybu v kombinaci s přízemní konvergencí proudění vzduchu (Řezáčová, 2007, s. 446-451).

#### 4.2.2 Krupobití

Krupobití je srážka tvořená kroupami, což jsou kulové, kuželovité nebo nepravidelné kusy ledu. Krupobití se vyskytuje v konvektivních bouřích s vysokou rychlostí výstupného proudu. „*Trvá několik minut, výjimečně až půl hodiny a zasahuje velmi omezené území. Vyskytuje se zpravidla v letním období v odpoledních hodinách. Někdy má charakter živelních pohrom, zvláště při značné hustotě a velikosti krup a v případě, že je zasažena rozsáhlejší oblast hlavně před sklizní. K včasné identifikaci krupobití slouží meteorologické radiolokátory*“ (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

Důležitými faktory, které mohou podpořit a detekovat vznik krup v oblaku, jsou:

- **Vertikální rozsah oblaku** - na základě kterého s určitou pravděpodobností je definován potenciál vzniku krup v oblaku. Jestliže má konvektivní oblačnost dostatečnou vertikální mohutnost, pak kroupy setrvávají v oblaku delší dobu a mohou narůstat do větších rozměrů.
- **Výstupná rychlost v oblaku** – je jedna z podmínek, důležitých pro rozvoj krup. Výstupná rychlost pohybu v oblaku by měla být co nejvyšší (několik desítek m/s). Přesto podmínky vertikálního rozsahu a velké výstupné rychlosti nemusí znamenat s jistotou tvorbu krup o velkých rozměrech.
- **Velmi vysoká hodnota radiolokační odrazivosti (přes 60 dBz)**, u kterých je předpoklad, že čím větší je množství odražené energie od srážkových (ledových) částic, tím je vyšší pravděpodobnost výskytu krupobití.

- **Hladina nulové izotermy** – je jedna z dalších podmínek pro vznik a vývoj krup. Pravděpodobnost výskytu krup je tím vyšší, čím výše je hladina nulové izoterma položena. Tento předpoklad je využit v rámci radarového měření srážek, konkrétně v radarovém produktu HAIL PROB. V knižní publikaci (Řezáčová a kol., 2007, s. 298) je uvedeno o produktu HAIL PROB, že „pravděpodobnost výskytu krup danou výskytem vysoké radiolokační odrazivosti (nad 45 dBZ) v hladinách nad nulovou izotermou; předpokládá se nulová pravděpodobnost při výšce menší než 1,625 km nad nulovou izotermou a stoprocentní pravděpodobnost, pokud tato výška přesáhne 5,5 km“.
- Kombinace hodnot **indexů konvekce CAPE a vertikálního stříhu větru** – poskytují informaci o podmínkách v atmosféře, příznivých pro výskyt krup. V mnoha případech bylo zjištěno, že pokud tyto indexy instability nabývají vysokých hodnot za splnění dalších podmínek důležitých pro vznik a vývoj krup, pak pravděpodobnost jejich výskytu se zvyšuje (Řezáčová, 2007, s. 454).
- **Srážková voda** - je dalším faktorem, ovlivňujícím pravděpodobnost výskytu krupobití. Kroupy potřebují vysoký obsah vody v oblaku pro svůj růst, včetně výrazného výstupného proudu, který udrží kroupy v oblasti oblaku s přechlazenou vodou o teplotě -10 až -20 °C.
- Dostatečné množství **vlhkosti** v atmosféře je dalším signifikantním faktorem, ovlivňujícím vznik krupobití. Vznik krup v supercelárních bouřích je podmíněn přítomností vysoké vlhkosti ve spodních hladinách atmosféry (Řezáčová et. al., 2007, s. 451 - 454; estofex.org, 2014-2017, Large hail; ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).
- **Significant Hail Parametr (SHIP)** – kombinuje výše uvedené charakteristiky atmosféry a další parametry pro stanovení výsledné pravděpodobnosti výskytu krupobití. Obecně platí, že hodnoty SHIP nižší než 1 představují nízké riziko výskytu krupobití; hodnoty SHIP nad 2 velmi vysoké riziko krupobití.

#### 4.2.3 Silné nárazy větru spojené s konvektivní bouří

Náraz větru je krátkodobé zvýšení rychlosti větru, neboli krátkodobý odklon od trvalejšího směru větru, s hodnotami vyššími než  $15 \text{ ms}^{-1}$ . Silné nárazy větru jsou důsledkem působení sestupných proudů vzduchu v blízkosti atmosférických front a gust front (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

Hlavními faktory, podle kterých můžeme s určitou pravděpodobností předpokládat výskyt silných nárazů větru v souvislosti s výskytem konvektivní bouře, jsou:

- Kombinaci **MLCAPE a LI** pro předpověď podmínek instability atmosféry v denních hodinách; **MUCAPE a SI** v nočních hodinách. Přítomnost

dostatečně silného výstupného proudu zvyšuje pravděpodobnost vzniku silných sestupných proudů (downburstu<sup>8</sup>) a nárazů větru.

- **Vertikální teplotní gradient 925 až 700 hPa** – vývoj downburstu (a následných nárazů větru) závisí také na stabilitě nebo instabilitě spodních hladin troposféry. Míra stability ovlivňuje vznik suchého nebo vlhkého downburstu<sup>9</sup>. Čím je vyšší stabilita, tím se zvyšuje možnost vývoje vlhkého microburstu společně s větší spotřebou srážkového ledu (Řezáčová et. al., 2007, s. 458).
- Vysoký obsah **srážkové vody** v blízkosti základny oblaku je jedním z dalších významných předpokladů pro optimální vývoj downburstu.
- **Relativní vlhkost vzduchu v hladinách 1000 až 850 hPa** - je další podmínkou, při níž platí, že s klesajícími hodnotami relativní vlhkosti, se zvyšuje pravděpodobnost výskytu suchého downburstu, včetně splnění ostatních podmínek. Suchý vzduch ve spodních hladinách atmosféry způsobuje odpařování vodních kapiček a podporuje vliv těchto sestupných pohybů vzduchu.
- **Výška vzestupné kondenzační hladiny (LCL)** by se měla nacházet nad hranicí 1500 metrů pro dostatečný vývoj downburstu. Tento předpoklad platí zejména u suchého downburstu, při němž nevypadávají srážky v důsledku silného odpařování srážek.
- **Vertikální stříh větru DLS a LLS v kombinaci SREH 0 - 3 a SREH 0 - 1 km** je používán v praxi pro předpověď pravděpodobnosti výskytu silných nárazů větru a tornád. Vysoké hodnoty stříhu větru v kombinaci s výraznou helicitou ve středních a spodních hladinách vytváří příznivé podmínky pro vznik silných nárazů větru.
- **SWEAT index** je určen pro posouzení jednotlivých charakteristik atmosféry včetně vlastností výstupného proudu. Jestliže se vyskytuje dostatečně silný vzestupný proud, určující mohutnost konvekčního oblaku, tak musí existovat kompenzační sestupné pohyby vzduchu s odpovídající intenzitou jejich projevu v blízkosti zemského povrchu.
- **Nízkohladinový jet v hladině 850 hPa** je dalším faktorem, ovlivňujícím vznik downburstu ve spodních hladinách atmosféry stejně jako v případě stříhu větru a helicity v hladině 0 - 1 km (ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).
- **Index DTHE (Delta-THETA)** charakterizuje vlastnosti sestupného proudu vzduchu v denních hodinách; v nočních hodinách není tento parametr

---

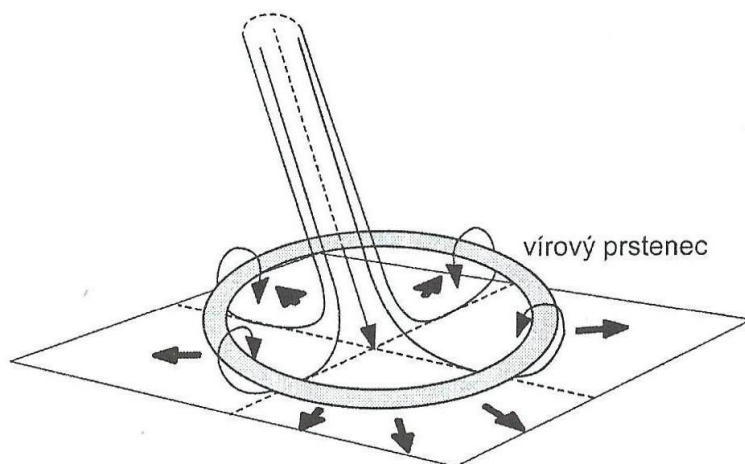
<sup>8</sup> „Downburst je extrémně silný sestupný proud u konv. bouře, který je příčinou vzniku ničivých divergujících větrů u zemského povrchu“ (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017).

<sup>9</sup> Vlhký downburst je silný sestupný proud, který se vyskytuje v kombinaci se srážkami o úhrnu nad 25 mm nebo při radarové odrazivosti nad hodnotu 35 dBZ.

Při suchém downburstu nejsou dosaženy hodnoty intenzity srážek jako v případě vlhkého microburstu (Řezáčová, 2007, s. 454).

dostatečně reprezentativní. Hodnoty DTHE vyšší než 10 stupňů představují vhodné podmínky pro vznik downburstu a tedy silných nárazů větru.

- **Downdraft CAPE (DCAPE)** je energie sestupného proudu, která je spojována s výtoky chladného vzduchu. Hladina LFS je udávána společně s DCAPE jako hladina počátku vzniku downburstu (estofex.org, 2014-2017, Straight-line winds).



Obr. 4.9: Princip vzniku gust fronty a s ní spojené silné nárazy větru (Řezáčová et. al., 2007, s. 457)

Obrázek 4.9 ilustruje roztékající studený vzduch při zemském povrchu, který nabývá prstencovitého vzhledu, tvořeného rotorovou hlavou. Rozhraní mezi studeným a okolním vzduchem se nazývá gust fronta, která je doprovázena prudkým poklesem teploty vzduchu a silným nárazovitým větrem. Kromě těchto uvedených případů se někdy vyskytnou rozsáhlé multiceární bouře, které se zpočátku jeví jako jedna buňka, která se následně rozvine do prohnutého pásu linie srážek s nejintenzivnějšími srážkami uprostřed. V přední části se vyskytuje velmi silný nárazový vítr. Tento jev je známý jako tzv. derecho a vyskytuje se především v USA (Řezáčová et. al., 2007, s. 454 - 459).

Jev, vyvolaný lokálním propadem, je označován jako downburst (Řezáčová et. al., 2007, s. 455).

Downburst lze rozčlenit podle velikosti zasažené oblasti a délky trvání na:

- **Macrobursty** - zasahující území většího měřítka o rozměrech větších než 4 km s délkou trvání 5 - 30 min.
- **Microbursty** - s velikostí zasaženého území menších než 4 km a doby trvání 2 - 5 minut (Řezáčová et. al., 2007, s. 455).

Macrobursty se často vyskytují na rozsáhlých liniích konvergence a multiceárních bouřích, kde vytváří systém větrných obloukovitých útvarů, pozorovatelných prostřednictvím družicového měření oblačnosti. Naopak,



microbursty se vyskytují u konvektivní oblačnosti a multiceleárních bouří menšího měřítka.

#### 4.2.4 Tornádo

Tornádo je definováno jako vertikálně rotující vír vzduchu s minimální rychlostí větru 33 m/s (117 km/hod.) podle Fujitovi stupnice (F0) a s minimální rychlostí 17 - 24 m/s podle stupnice TORRO (T0), který dosáhne zemského povrchu a následně způsobí hmotné škody. Vysoká pravděpodobnost vzniku tornáda je spojena s výrazně rotujícím wall cloudem<sup>10</sup> (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017). Vznik tornád je z velké části vázán na výskyt supercelární bouře, nicméně byl zaznamenán výskyt i nesupercelárních tornád. Tento typ tornád má nižší intenzitu, avšak podobné ničivé účinky jako supercelární tornádo. Hlavními podmínkami vzniku je silný vzestupný proud, který se vyskytuje na linii konvergence s charakteristickým pohybem směrem vzhůru, až dosáhne základny oblaku (Řezáčová et. al., 2007, s. 467-468).

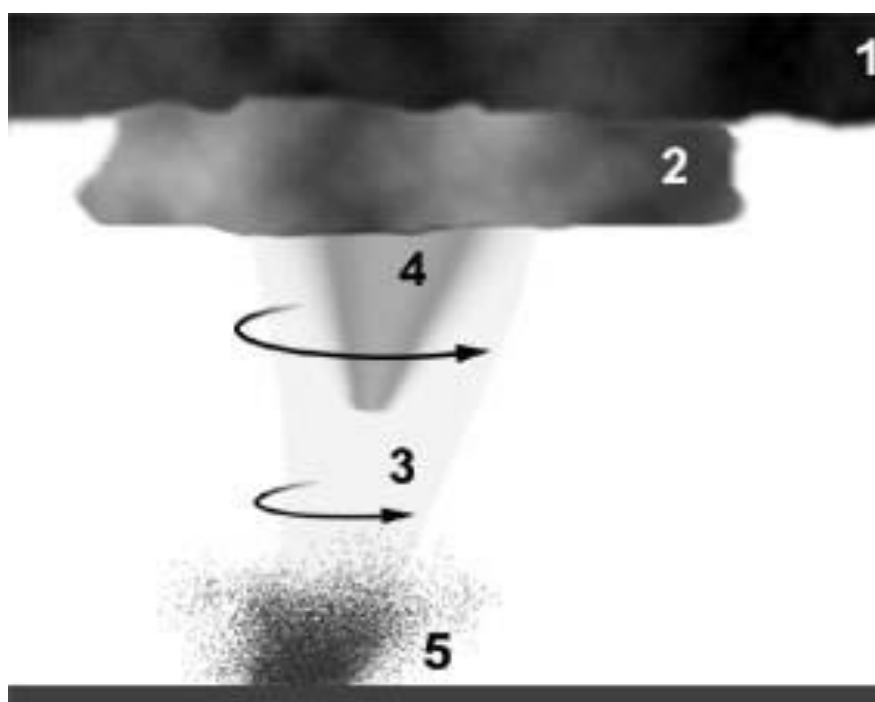
Signifikantními parametry, spojené s pravděpodobností výskytu, včetně měření podmínek příznivých pro výskyt tornád, jsou:

- **Index instability Surface-Based CAPE (SBCAPE) v hladinách 0 - 2 km** – vyjadřujícího podporu vývoje vzestupného proudu ve spodních vrstvách atmosféry. Dostatečná velikost SBCAPE může zajistit příznivý potenciál pro vznik a vývoj tornád.
- **Vertikální střih větru LLS v kombinaci s indexy SREH 3 km a SREH 1 km** - charakterizuje podmínky ve spodních hladinách troposféry, ve kterých se tornáda nejčastěji vyskytují. Indexy SREH 3 km a SREH 1 km poskytují informaci o prostředí příznivém pro vznik rotace vzestupného proudu nad i pod hladinou LCL. Přítomnost vyšších hodnot (nad 150 J/kg) indikuje zvýšenou pravděpodobnost tvorby mezocyklony supercelární bouře, pod níž se tornáda vyskytují.
- **SWEAT index** - kombinuje teplotní, vlhkostní a větrné charakteristiky atmosféry a je současně velmi důležitým parametrem pro posouzení prostředí vzniku supercelárních bouří a tornád.
- **Vzestupná kondenzační hladina (LCL)** - je jeden z faktorů, charakterizující prostředí, vhodné pro výskyt tornád. Čím je výška této hladiny níže položená, tím jsou příznivější podmínky pro vznik tornád.
- **Nízkohladinový jet (vítr v hladině 850 hPa)** - je dalším významným meteorologickým prvkem, ovlivňujícím vznik tornád ve spodních hladinách atmosféry (ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017; estofex.org, 2014-2017, Tornadoes – Supercell tornadoes).

---

<sup>10</sup> „Wall cloud je lokální snížení základny oblaku druhu cumulonimbus s horizontálním rozměrem okolo kilometru. Indikuje výskyt mohutného výstupného konvektivního proudu, především v supercelách. Vzniká vtahováním vlhkého a chladného vzduchu ze srážkových oblastí do výstupného proudu“ (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017).

- **Significant Tornado Parameter (STP)** – je parametr, určený přímo pro předpověď pravděpodobnosti výskytu tornád. Tento parametr, stejně jako Significant Hail Parameter (SHIP), kombinuje výše uvedené indexy, například SREH 1km, LCL a SBCAPE. Hodnoty STP vyšší než 1 představují vysoké riziko výskytu tornád.
- **Velmi vysoké hodnoty radiolokační odrazivosti (nad 60 dBz) a detekce BWER a HOOK s využitím meteorologických radarů** – prvním parametrem je vysoká hodnota radiolokační odrazivosti nad 60 dBz, charakterizující výskyt přivalového deště a krupobití, která se nachází až v zadní části postupující supercely. Před touto oblastí se obvykle vyskytuje oblast tzv. snížené radiolokační odrazivosti, známá jako Bounded Weak Echo Region (BWER) a hákovité echo (HOOK) v podobě zatočené linie. Tyto charakteristiky lze detekovat prostřednictvím radarového produktu Range Height Indicator (RHI) ve výškových hladinách 2 až 4 km. Výskyt rotace je také možné změřit Dopplerovskými radary, které umožňují detekovat rychlost proudění uvnitř konvektivní bouře, včetně konvergentních a divergentních pohybů (Řezáčová et. al., 2007, s. 433).



*Obr. 4.10: Schéma základní struktury tornáda: 1) základna oblačnosti bouře, 2) wall cloud – rotující oblačnost pod základnou bouře, 3) tornádo jako rotující sloupec vzduchu, 4) nálevkovitý kondenzační chobot, 5) vířící prach a trosky (Řezáčová et. al., 2007, s. 460)*

Obrázek 4.10 ilustruje schéma struktury tornáda. Tornádo vzniká pod pomalu rotující oblačností (wall cloudem), která je pod základnou bouře. Pod wall cloudem se vytváří tzv. kondenzační chobot, který visí od základny s oblačnosti

směrem k zemskému povrchu a vířící oblak prachu a trosek. Jakmile rotující vír dosáhne zemského povrchu a začne působit škody na vegetaci a majetku, pak je označován jako tornádo (Řezáčová et. al., 2007, s. 460). Jestliže rotující vír nedosáhne zemského povrchu, pak je definován jako tromba.

#### 4.2.5 Elektrické atmosférické výboje

Elektrický výboj je atmosférický nebezpečný doprovodný jev spojený s výskytem bouřky. „*Elektrina bouřková vzniká v oblaku druhu cumulonimbus v důsledku elektrické indukce, vzájemných srážek a tříštění vodních kapek a krystalků ledu, fázových změn vody, vertikálních pohybů v oblaku, apod.*“ (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Nosičem nábojů bouřkové elektřiny nemusí být pouze voda ve všech fázích, ale mohou jím být i zrnka písku nebo rozžhavené částice spojené se sopečnou erupcí.

V oblaku druhu cumulonimbus se nacházejí dvě centra elektrických nábojů opačné polarity. Mechanismus separace nábojů podle polarity lze vysvětlit podle několika teorií. Hlavní dvě teorie popisují vznik bouřkové elektřiny na termoelektrických vlastnostech ledu. Při nárazech a odrážení menších částic na větších ledových částicích dochází k výměně elektrického náboje. Malé narůstající částice se nabíjejí kladně, velké ledové částice záporně. V druhém případě dochází k výměně elektrického náboje prostřednictvím iontů solí mezi záporně nabitými ledovými částicemi a kladně nabitými narůstajícími částicemi. „*V tíhovém poli Země dochází ke gravitačnímu oddělování a formování horního (dolního) centra a záporného (kladného) elektrického náboje*“ (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017). Bleskové výboje pak vznikají za podmínek dostatečné lokální předionizace vzduchu. Elektrický výboj dosahuje hodnot desítek tisíc  $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$  elektrického gradientu (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

Na základě četnosti výskytu elektrických výbojů můžeme odhadnout intenzitu bouřky. V praxi je rozlišována bouřka slabá, mírná až silná; nikoli však intenzita ostatních nebezpečných doprovodných jevů, kterými jsou přívalový déšť, krupobití, silné nárazy větru nebo tornáda.

Intenzita bouřkové činnosti je parametr stanovený z dlouhodobého pozorování bouřek s využitím systému detekce blesků, který vychází z průměrného počtu dní s bouřkou na stanici nebo vzdálenou bouřkou za rok. Intenzita bouřkové činnosti je základní charakteristikou, která vyjadřuje četnost škod, způsobených na elektrotechnických nebo technických zařízeních (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

## 5. HLAVNÍ VÝSLEDKY VÝZKUMU

V rámci této kapitoly jsou shrnuty hlavní výsledky výzkumu, zaměřené na předpověď konvektivních srážek, nebezpečných doprovodných jevů a jejich dopadů v podobě přívalových povodní v těchto podkapitolách:

1. Algoritmus předpovědi bouří,
2. verifikace předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů,
3. verifikace předpovědi povodňových událostí,
4. prostorová analýza charakteristik reliéfu,
5. statistika rozložení konvektivních srážek ve Zlínském kraji.

### 5.1 Algoritmus předpovědi bouří

Za posledních dvacet postihlo Českou republiku několik povodní, vyvolaných plošnými srážkami, které způsobily škody za necelých 150 mld. Kč. Od roku 2007 do současnosti se začaly pravidelně vyskytovat povodně způsobené, přívalovým deštěm v kombinaci s ostatními nebezpečnými jevy. Tento typ povodně sice nezpůsobil škody v takovém rozsahu a výši jako v případě prvního typu povodní, nicméně díky své vysoké četnosti výskytu, se stal aktuální hrozbou pro celou společnost.

Předpověď výskytu přívalového deště je značně komplikovaná z hlediska velmi rychlého vzniku intenzivních srážek na malé, ale i větší ploše území<sup>11</sup>, přičemž předpovědní výstražné informace na jev „Bouřka“ jsou v současnosti vydávány pouze pro území krajského územního celku a okresů. Zvládnutí důsledků tohoto typu povodně přitom závisí na včasném varování před možností výskytu těchto nebezpečných jevů, včetně následných protipovodňových opatření.

Včasné varování před těmito nebezpečnými jevy závisí na aspektech:

- Dostatečné doby předstihu předpovědi pro zajištění protipovodňových opatření, včetně včasného varování obyvatelstva.
- Zpřesněné předpovědi pro menší území než jsou území krajů.
- Maximálně přesných předpovědních informací o nebezpečných jevech, které mohou vyvolat přívalovou povodeň.

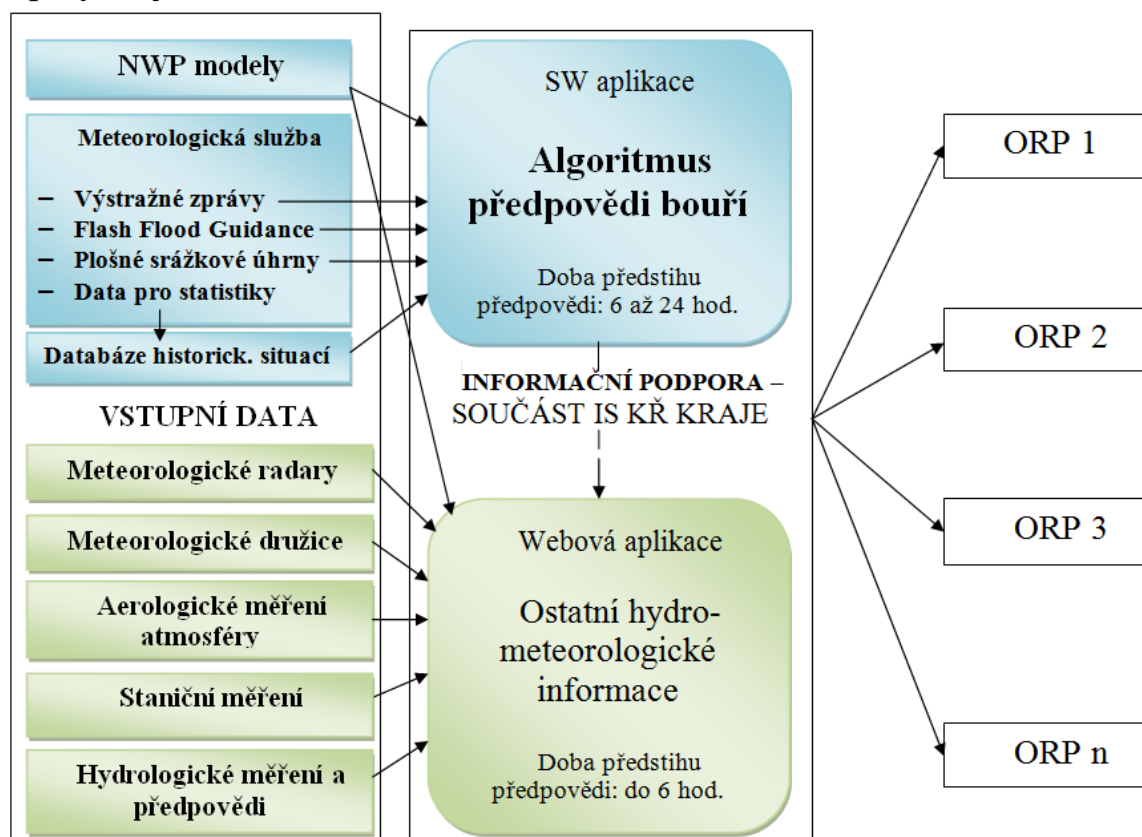
Algoritmus předpovědi bouří (dále jen Algoritmus) je navržen tak, aby v maximální míře naplnil tyto aspekty. Doba předstihu předpovědi Algoritmu je počítána na 6 až 12 hodin (orientačně až na 24 hodin), což je srovnatelné s předpovědní praxí ČHMÚ, které vydává výstrahy na 6 až 36 hodin. Druhý aspekt z hlediska Algoritmu se liší oproti ČHMÚ, které vydává předpovědní

---

<sup>11</sup> *Intenzivní konvektivní srážky, které mohou vyvolat přívalový dešť, se mohou vyskytnout v měřítku mezo- $\gamma$  (2 - 20 km), ale také měřítku mezo- $\beta$  (20 - 200 km) v případě mezoměřítkového konvektivního systému (MCS).*

výstražné informace pro celé území ČR. Algoritmus počítá zpřesněnou předpověď pro území obcí s rozšířenou působností a jejich regionů<sup>12</sup>. Kvalitní a přesná předpovědní informace je ovlivněna přesností jednotlivých předpovědních parametrů NWP modelů.

Algoritmus předpovědi bouří je navržen jako softwarová aplikace v podobě analyticko-hodnotícího nástroje, který podle návrhu bude součástí informační podpory kraje.



Obr. 5.11: Schéma návrhu využití Algoritmu předpovědi bouří v rámci informační podpory krizového řízení kraje (vlastní zdroj).

Na obrázku 5.11 je uvedeno obecné schéma návrhu informační podpory, která je součástí informačního systému krizového řízení kraje. Součástí návrhu informační podpory je softwarová aplikace Algoritmus předpovědi bouří a webová aplikace, sdružující nejdůležitější hydrometeorologické informace v podobě webových odkazů. Vstupními daty Algoritmu jsou nyní výstupy z veřejně dostupných NWP modelů<sup>13</sup> a výstupy meteorologické služby (institutu) daného státu. Tyto vstupní data jsou analyzována, zpracována a

<sup>12</sup> Region je experimentálně stanovená oblast, které je součástí území obce s rozšířenou působností. Každá obec s rozšířenou působností je rozdělena na jeden až tři regiony v závislosti na velikosti jejich území.

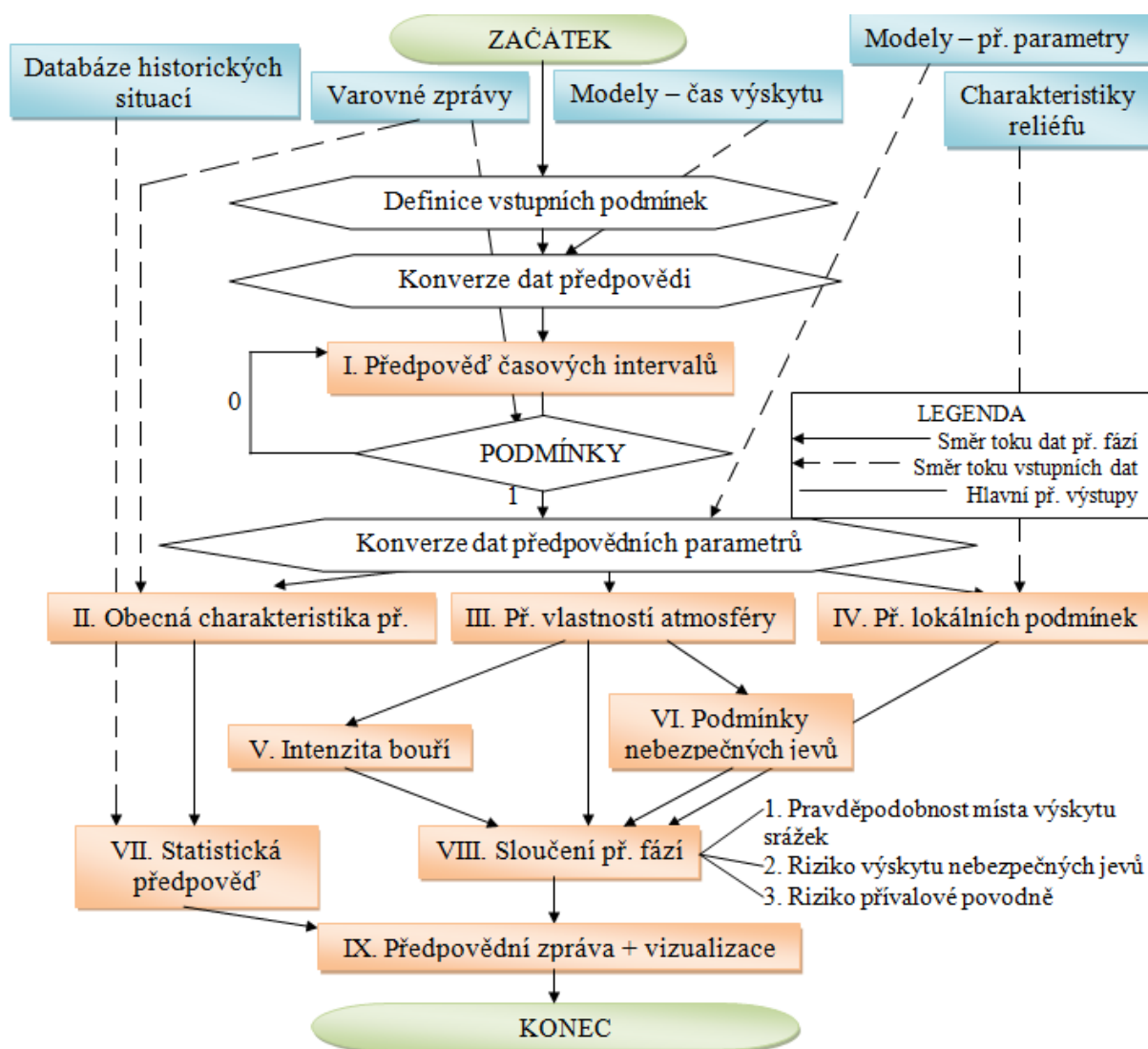
<sup>13</sup> V budoucnosti bude hlavním zdrojem vstupních dat model ALADIN za účelem sjednocení výstupů z hlediska jednotné aktualizace času vydávaných výstupů a vysokého rozlišení modelu.

vyhodnocována Algoritmem, jehož výstupem je předpovědní zpráva. Předpovědní informace jsou následně doplněny o data z meteorologických radarů, družic, aerologického měření atmosféry, staničního měření meteorologických prvků a hydrologického měření a předpovědi, včetně aktualizovaných výstupů z NWP modelů. Tyto informace nám mohou poskytnout obraz budoucího stavu počasí do 6 hodin a například prostřednictvím meteorologických radarů ještě více zpřesnit předpověď výskytu konvektivních srážek. Výstupy informační podpory jsou odkazy webové aplikace na uvedené měřicí a předpovědní systémy, včetně předpovědní zprávy Algoritmu. Tyto výstupy jsou dále distribuovány jednotlivým obcím s rozšířenou působností, kde jsou prostřednictvím skupiny pracovníků krizového řízení a starosty ORP dále vyhodnocovány pro jejich další využití. Například, výstupy z předpovědní zprávy Algoritmu současně při vydání výstrah ČHMÚ, bude možné použít pro realizaci protipovodňových opatření.

Algoritmus předpovědi bouří generuje předpovědní zprávu na základě osmi předpovědních fází, které na sebe vzájemně navazují (devátá předpovědní fáze není výpočetní fází, pouze sumarizuje předpovědní výstupy Algoritmu):

1. fáze: Předpověď pravděpodobnosti času a místa výskytu konvektivních srážek podle vybraných NWP modelů,
2. fáze: Obecná charakteristika předpovídané situace,
3. fáze: Předpověď vlastností atmosféry,
4. fáze: Předpověď potenciálních spouštěčů konvekce v přízemní a mezní vrstvě atmosféry (Lokální podmínky)
5. fáze: Předpověď intenzity bouří,
6. fáze: Předpověď pravděpodobnosti výskytu nebezpečných jevů podle vlastností atmosféry,
7. fáze: Předpověď pravděpodobnosti času a místa výskytu konvektivních srážek podle statistiky historických povětrnostních situací,
8. fáze: Sloučení předpovědních fází,
9. fáze: Předpovědní zpráva a klasifikace jevu „Bouřka“ podle SIVS ČHMÚ a doporučení na ochranu před dopady nebezpečných doprovodných jevů.

Předpovědní fáze jsou sice počítány jako pravděpodobnost hodnoceného výstupu, nicméně výsledek těchto pravděpodobností je převáděn na hodnoty koeficientů od 0 do 3. Důvodem je jednotná struktura hodnot předpovědních výstupů pro účely vizualizace dat.



Obr. 5.12: Vývojový diagram cyklu Algoritmu předpovědi bouří pro jeden tříhodinový časový interval (modré obdélníky představuje vstupní data, oranžové obdélníky jsou předpovědní fáze Algoritmu a bílé šestiúhelníky jsou přípravné fáze a podmínky. (vlastní zdroj)

Na obrázku 5.12 je uveden vývojový diagram cyklu Algoritmu předpovědi bouří, ve kterém jsou znázorněny toky vstupních dat pro předpovědní fáze za účelem tvorby předpovědní zprávy. Předpovědní výstupy Algoritmu jsou počítány na základě zadaných vstupních podmínek, mezi které patří například definice zájmového území (rozdělení území kraje na území ORP a jejich regionů), čas aktualizace NWP modelů, apod. V rámci přípravných fází (bílé šestiúhelníky) jsou konvertovány vstupní data z NWP modelů pro předpověď času a místa výskytu srážek, včetně předpovědních parametrů vlastností atmosféry. Výpočet je realizován pro danou aktualizaci NWP modelů<sup>14</sup> a

<sup>14</sup> Aktualizace většiny NWP modelů je po šesti hodinách (existují i NWP modely s tříhodinovou aktualizací, nicméně pro sjednocení výstupů je použita právě šestihodinová aktualizace).

tříhodinové časové intervaly. V rámci konverze předpovědi srážek NWP modelů je výskyt srážek vyjádřen hodnotou koeficientu 1 pro dané území ORP (nepřítomnost srážek je vyjádřena nulovou hodnotou koeficientu).

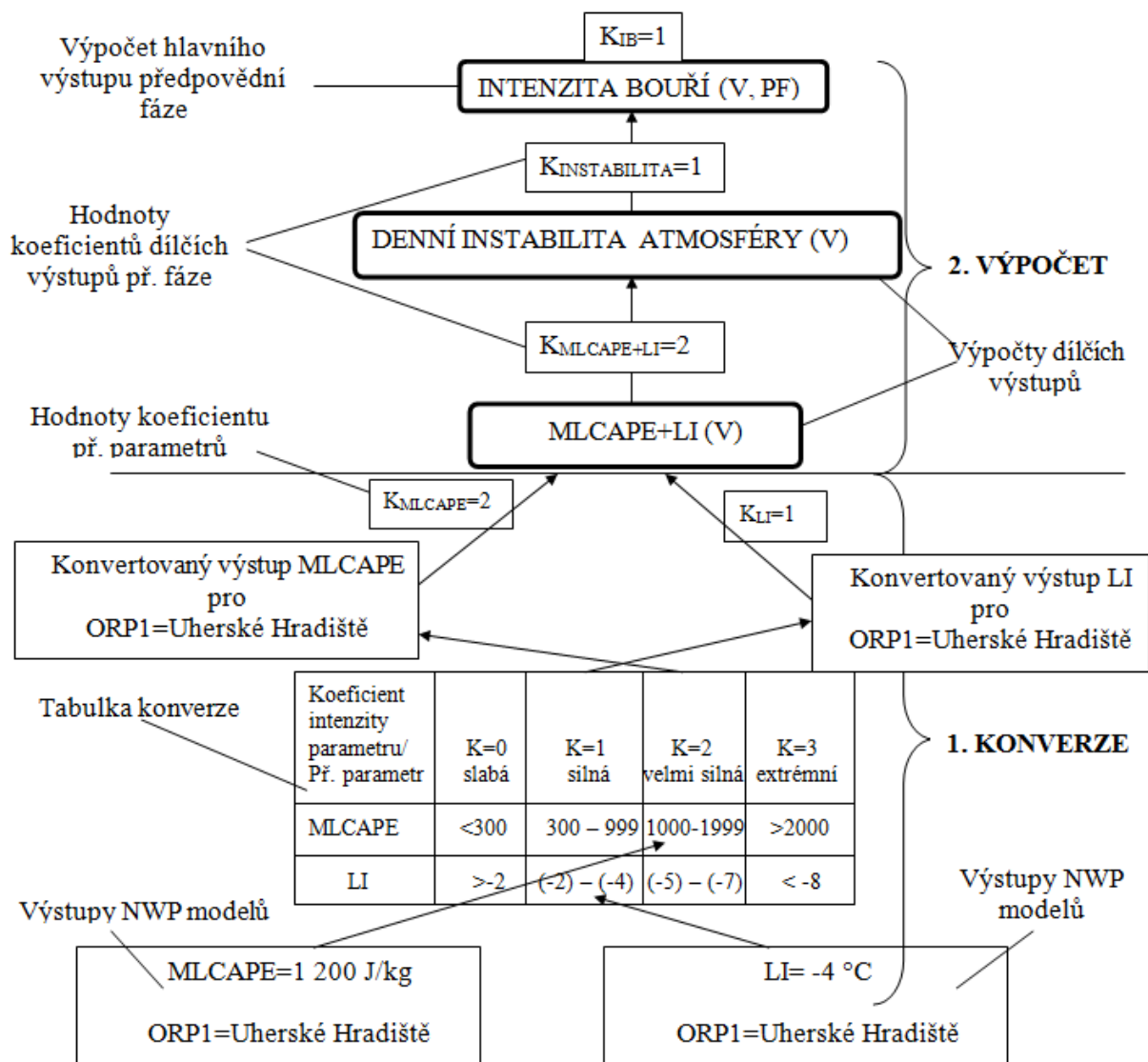
V první fázi je vypočítána předpověď času a místa výskytu srážek za účelem stanovení tříhodinových časových intervalů z výstupů NWP modelů. Současně, v rámci této fáze je provedena analýza podmínek času výskytu a výstražných informací pro pokračování výpočtů následujících předpovědních fází. Na základě stanovených intervalů je proveden základní sběr informací v rámci obecné charakteristiky povětrnostní situace. V rámci třetí fáze je následně vypočítána předpověď vlastností atmosféry. Čtvrtá fáze je zaměřena na předpověď lokálních podmínek, které mohou ovlivnit počáteční vznik konvekce. Výpočet lokálních podmínek (předpověď potenciálních spouštěcích mechanismů konvekce) je realizován prostřednictvím množiny předpovědních prvků z meteogramů modelu ALADIN a 11 charakteristik reliéfu. Pátá a šestá fáze vychází z výstupů jednotlivých předpovědních parametrů vlastností atmosféry za účelem stanovení výsledné intenzity bouří a pravděpodobnosti výskytu nebezpečných jevů. Sedmá fáze obsahuje výstupy ze statistik rozložení konvektivních srážek z let 2011 - 2016 včetně nejvýznamnějších povodňových událostí z let 2007 - 2016. Osmá fáze slučuje výstupy předchozích fází za účelem výpočtu předpovědi pravděpodobnosti výskytu srážek, rizika výskytu nebezpečných jevů a rizika přívalových povodní. Cílem deváté fáze je sumarizace všech vypočtených výstupů do předpovědní zprávy. V rámci poslední fáze jsou uvedeny doplňující informace o klasifikaci nebezpečného jevu „Bouřka“ a možných doporučení pro ochranu před nebezpečnými jevy, které mohou vyvolat přívalovou povodeň. Po ukončení poslední fáze, další cyklus Algoritmu je zahájen od „Konverze předpovědi srážek na základě následující aktualizace NWP modelů“.

Ukázka výpočtu předpovědi konvektivních srážek je součástí „Přílohy\_CD\_disertační\_práce“ (příloze) v souboru Vzorová\_předpověď.xlsx. V následujících dvou kapitolách jsou popsány metody výpočtů předpovědních fází, včetně vstupních dat Algoritmu.

### **5.1.1 Zpracování předpovědních fází Algoritmu**

V rámci této kapitoly je popsán návrh postupu kvantitativního hodnocení předpovědi konvektivních srážek a nebezpečných jevů prostřednictvím Algoritmu předpovědi bouří. Vstupní data v podobě předpovědi srážek a parametrů z NWP modelů jsou konvertována, analyzována a vyhodnocována v předpovědních fázích Algoritmu. Nejprve, vstupní data jsou konvertována z výstupů NWP modelů na hodnoty koeficientů od 0 do 3 za účelem sjednocení hodnot všech předpovědních parametrů Algoritmu. Následně jsou prováděny výpočty dílčích a hlavních výstupů předpovědních fází prostřednictvím multikriteriálního hodnocení. Schéma zpracování předpovědních fází z hlediska kroků „Konverze“ a „Výpočtu“ je uvedeno na obrázku 5.13:





Obr. 5.13: Schéma zpracování vybrané předpovědní fáze Algoritmu (vlastní zdroj)

Obrázek 5.13 dokumentuje schéma zpracování páté předpovědní fáze „Intenzita bouří“ (na obrázku 5.13 je uveden výpočet pouze přes parametry MLCAPE a LI<sup>15</sup>). Schéma zpracování vybrané předpovědní fáze je znázorněno od spodu nahoru. Toto schéma ilustruje sekvenci kroků „Konverze“ a „Výpočtu“, včetně jejich prvků:

- **Výstupy NWP modelů** – poskytují vstupní data předpovědních parametrů do Algoritmu. Tyto výstupy jsou veřejně k dispozici na Internetu ve standardních obrázkových formátech, např. JPEG, PNG, GIFF a další.
- **Krok „Konverze“** - je postup, při kterém dochází k převodu hodnoty jednotky předpovědního parametru na hodnotu koeficientu podle tabulky

<sup>15</sup> Algoritmus používá více parametrů pro výpočet předpovědi Denní instability atmosféry a Intenzity bouří, které jsou uvedeny v třetí fázi „Předpověď vlastností atmosféry“.

konverze. Tento krok je zahájen sběrem vstupních dat ze serveru příslušného NWP modelu a následným zpracováním na hodnotu koeficientu.

- **Tabulka konverze** – je tabulka, určená pro převod z hodnoty jednotky předpovědního parametru na hodnotu koeficientu. Tabulka konverze obsahuje klasifikaci jednotlivých předpovědních parametrů podle jejich intenzity (viz. Koeficienty předpovědních parametrů), jejíž limity byly experimentálně stanoveny podle orientačních limitů, uvedených v dokumentech (Sandeve et al., 2013, ČHMÚ – Check-list bouřek, 2017) a na základě verifikace předpovědních parametrů s výstupy aerologické sondáže. Ukázka orientačních limitů předpovědních parametrů je k dispozici v příloze souboru Specifikace\_výstupů\_Algoritmu.xlsx, v sešitu „Vlastnosti\_atmosféry“.
- **Konvertovaný výstup předpovědního parametru** - je výsledek převodu hodnot z jednotek předpovědního parametru na koeficienty podle tabulky konverze. Výsledek bude možné zobrazit jako pole hodnot koeficientů pro jednotlivá území ORP včetně jejich regionů.
- **Koeficienty předpovědních parametrů** - nabývají hodnot od 0 do 3, které odpovídají jejich intenzitě srážek podle kritérií klasifikace jevu „Bouřka“ SIVS ČHMÚ:
  - Koeficient 0 - slabé bouřky s intenzitou srážek 0 – 29 mm/hod.
  - Koeficient 1 - silné bouřky s intenzitou srážek 30 - 49 mm/hod.
  - Koeficient 2 - velmi silné bouřky s intenzitou srážek 50 - 89 mm/hod.
  - Koeficient 3 - extrémně silné bouřky s intenzitou srážek nad 90 mm/hod.
- **Krok „Výpočet“** - je zaměřen na výpočty dílčích výstupů (oranžová barva) a hlavního výstupu předpovědní fáze, které jsou realizovány prostřednictvím metody multikriteriálního hodnocení. Dílčím výstupem je předpověď kombinace předpovědních parametrů nebo dílčích kroků. Hlavní výstup předpovědní fáze je buď jeden z hlavních předpovědních výstupů, nebo je tento výstup použit pro výpočet dalších výstupů.

Stanovení koeficientu dílčího nebo hlavního výstupu je realizováno ve třech výpočetních krocích:

1. krokem je provedena část výpočtu prostřednictvím metody multikriteriálního hodnocení, která je zaměřena na stanovení ohodnocené  $i$ -té varianty  $h_i$  podle vzorce 5.13:

$$h_i = \sum_{j=1}^k v_j y_{ij}, \quad (5.13)$$

kde  $y_{ij}$  jsou hodnoty kritériální matice  $Y$  (hodnoty koeficientů, konvertovaných předpovědních parametrů z NWP modelů) a  $v_j$  je váha  $j$ -

tého kritéria (Hovorka, 2013), což jsou váhy hodnot koeficientů předpovědních parametrů. Váhy předpovědních parametrů NWP modelů týkajících se první fáze Předpovědi času výskytu srážek a třetí fáze Předpovědi vlastnosti atmosféry jsou rovny 1. Váhy předpovědních parametrů, určených pro výpočet Předpovědi pravděpodobnosti výskytu nebezpečných jevů podle vlastností atmosféry a Předpovědi rizika přívalových povodní nabývají hodnot od 0 do 3. Váhy rizika přívalové povodně byly stanoveny na základě analýzy vybraných povodňových situací za léta 2015 až 2017, u nichž byl potvrzen výskyt nebezpečných jevů.

2. Druhým krokem je stanovena pravděpodobnost  $P$  ohodnocené varianty  $h_i$ :

$$P_{h_i} = \frac{h_i}{\sum n}, \quad (5.14)$$

kde  $\sum n$  představuje sumu předpovědních parametrů v rámci jednoho dílčího nebo hlavního výstupu Algoritmu.

3. Posledním krokem je určení koeficientu dílčího nebo hlavního výstupu předpovědní fáze Algoritmu prostřednictvím klasifikační tabulky, která je uvedena v rámci výpočtu daného dílčího nebo hlavního výstupu Algoritmu.

DENNÍ INSTABILITA		Dílčí výstup:					Klasifikační tabulka		
MLCAPE+LI		MLCAPE	LI	$h_i$	$\sum n$	$P_{h_i}$	MLCAPE+LI (KOEFIICIENT)	$P_{h_i}$	MLCAPE+LI
Území ORP									
Uh. Hradiště	1	1	2	6	33	1		0-24	0
Otrokovice	1	1	2	6	33	1		25-49	1
Kroměříž	1	1	2	6	33	1		50-74	2
Holešov	1	1	2	6	33	1		75-100	3
Zlín	1	1	2	6	33	1			
Bystřice	1	1	2	6	33	1			
Valmez	1	1	2	6	33	1			
Rožnov	1	1	2	6	33	1			
Vsetín	1	1	2	6	33	1			
Vizovice	1	1	2	6	33	1			
Val. Klobouky	1	1	2	6	33	1			
Luhačovice	1	1	2	6	33	1			
Uherský Brod	1	1	2	6	33	1			

Obr. 5.14: Ukázka tabulky výpočtu dílčího výstupu MLCAPE + LI

Na obrázku 5.14 je uvedena ukázka výpočtu dílčího výstupu MLCAPE a LI. Nejprve je vypočítána pravděpodobnost daného výstupu, která je následně převedena na koeficienty podle klasifikační tabulky pro jednotlivá ORP nebo regiony. Podle tohoto principu jsou počítány všechny dílčí a hlavní výstupy Algoritmu.

### 5.1.2 Vstupní data Algoritmu předpovědi bouří

Vstupní data pro Algoritmus předpovědi bouří jsou získávána z těchto zdrojů:

1. NWP modelů (citace NWP modelů jsou uvedeny v popisu tabulky 5.2),

2. předpovědní výstražné informace SIVS ČHMÚ (Král & ČHMÚ, 2010-2012), METEOALARMu (meteoalarm.eu, 2009-2017) a ESTOFEXu (estofex.org, 2002-2017),
3. data z aplikace Flash Flood Guidance FFG-CZ (ČHMÚ – Indikátor přívalových povodní, 2006-2017),
4. kombinovaného radarového odhadu a pozemních srážkoměrů, včetně plošných srážkových úhrnů (ČHMÚ – Srážky na území ČR, 2006-2017),
5. data pro statistiky, které jsou uloženy v databázi historických situací.

Tabulka 5.2 Charakteristika NWP modelů (citace NWP modelů zleva doprava: wetter3.de, 2014-2017; meteomodel.pl, 2012-2017; weatheronline.de, 1999-2017; Pagé a Caron, 2017; modelzentrale.de, 2014-2017; flymet.meteopress.cz, 2006-2017)

<b>NWP modely</b>	<b>GFS</b>	<b>GDPS</b>	<b>EURO4</b>	<b>HIRLAM</b>	<b>ALADIN (ČHMÚ, SHMÚ)</b>	<b>WRF ARW</b>	<b>WRF NMM v 3.4</b>
Země původu	USA	Kanada	Velká Británie	Evropské státy	ČR, SR	USA	USA
Horizontální rozlišení (km)	25, 50	25	11	10	4,7	4	3
Oblast predikce	Svět	Severní Amerika, Evropa, severní a jižní polokoule	Evropa	Evropa	ČR a Slovensko	Evropa	Střed.Evropa
Časový krok (hod.)	00, 06, 12, 18	00, 06, 12, 18	00, 06, 12, 18	00, 12	03, 06, 12, 24	00, 12	00, 12
Délka př.	16	10	2	7	3	3	2

NWP modely jsou hlavním zdrojem vstupních dat pro výpočet většiny předpovědních výstupů Algoritmu. Tyto data jsou nyní získávána z veřejně

dostupných zdrojů v podobě webových odkazů na servery od různých meteorologických služeb, institucí a organizací.

NWP modely GFS, WRF ARW a NMM v 3.4 jsou použity jako zdroj dat pro předpověď vlastností atmosféry. Cílem modelů WRF ARW, WRF NMM v 3.4 a meteogramy modelu ALADIN je výpočet potenciálních spouštěcích mechanismů konvekce v přízemní vrstvě atmosféry. Všechny modely, uvedené v Tabulce 5.2 s výjimkou modelu GFS, jsou určeny pro předpověď času výskytu srážek. Model GFS je převážně využíván jako datový zdroj pro předpovědní parametry výpočtu předpovědi vlastností atmosféry a dalších výstupů Algoritmu.

Předpovědní výstražné informace jsou publikovány ve druhé fázi „Obecná charakteristika předpovídané situace“ a využity pro posouzení pokračování výpočtů Algoritmu v třetí fázi. Data z Flash Flood Guidance, kterou jsou standardně zobrazována v podobě výstupů stupně nasycení území a sumy potenciálně rizikových srážek za 24 hodin, jsou součástí výpočtu rizika přívalových povodní. Plošné srážkové úhrny a kombinované výstupy radarového a srážkoměrného měření, jsou součástí výpočtu podmínek vlhkosti v přízemní vrstvě atmosféry jako suma srážek za posledních 24 hodin. Data pro statistiky, například staniční, radarová, družicová, aerologická, jsou využity pro zpracování statistik rozložení konvektivních srážek pro dané území. Statistiky jsou součástí databáze historických situací, utrčené pro statistickou předpověď konvektivních srážek.

### **5.1.3 1. fáze Algoritmu – Předpověď času výskytu srážek podle NWP modelů**

Tento první krok je primárně určen pro předpověď tříhodinových časových intervalů z výstupů vybraných NWP modelů, z nichž jsou následně vypočítány hlavní i doplňkové předpovědní výstupy. Vybranými NWP modely jsou modely z Tabulky 5.2, bez modelu GFS.

Předpověď času výskytu srážek je realizována prostřednictvím těchto sekvenčních kroků:

- konverzí dat NWP modelů na hodnoty koeficientů jednotlivých předpovědních parametrů,
- předpovědi pravděpodobnosti času výskytu tříhodinových intervalů,
- předpovědi pravděpodobnosti místa výskytu srážek podle NWP modelů.

Předpověď času výskytu srážek podle NWP modelů je značně komplikovaná u některých povětrnostních situací, zejména u frontálních systémů. Výzkumem bylo zjištěno, že různé typy front se pohybují různou rychlostí a konvektivní srážky se mohou vyskytnout v čase před předpovídanými časovými intervaly NWP modelů. Z těchto důvodů je výpočet předpovědních výstupů prováděn pro 4 časové intervaly před stanovenými intervaly a 2 časové výstupy po intervalech

NWP modelů. Pro tyto intervaly je pak nezbytně nutné provést analýzu podmínek pro pokračování předpovědi za účelem jejich vyloučení.

Pravděpodobnost času a místa výskytu konvektivních srážek je vypočítána podle tohoto vzorce:

$$P_{\text{čas}} = \frac{\sum m}{n} \quad (5.15)$$

kde  $\sum m$  je suma místa výskytu konvektivních srážek pro dané území ORP (suma časových intervalů) a  $n$  je celkový počet NWP modelů. Intenzita předpovídaných srážek musí být vyšší než 1 mm/3 hod.

Pravděpodobnost místa výskytu poskytuje orientační předpověď lokalit, kde se srážky dle NWP modelů nejpravděpodobněji vyskytnou. Zároveň je určena pro verifikaci a hodnocení úspěšnosti předpovědí NWP modelů za účelem srovnání s úspěšností předpovědí Algoritmu.

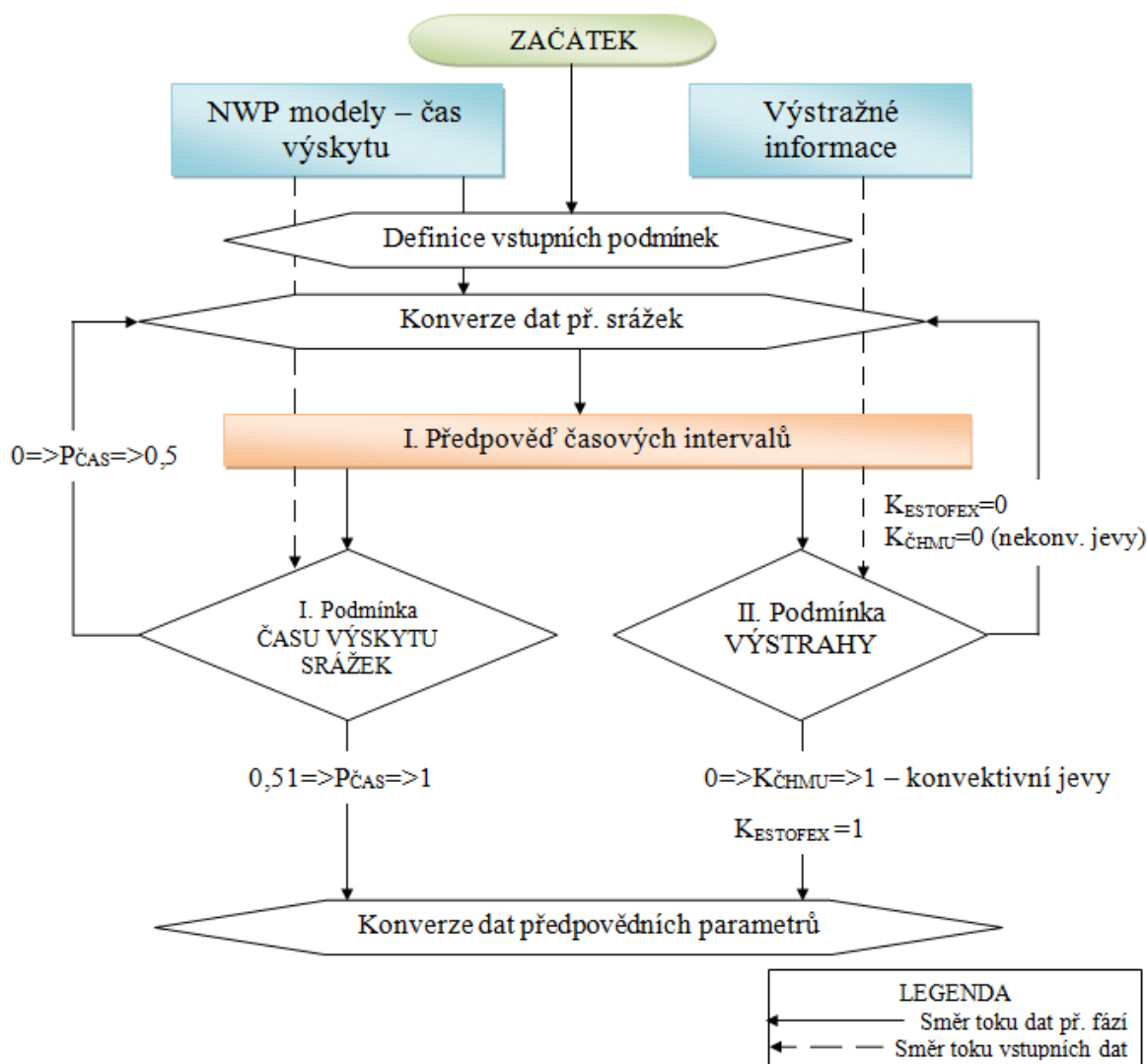
Ukázka předpovědi podle NWP modelů je součástí přílohy souboru Specifikace\_výstupů\_Algoritmu.xls, v sešitu „NWP modely“.

### 5.1.3.1 Analýza podmínek pro pokračování předpovědí Algoritmu

Analýza podmínek pro pokračování předpovědí Algoritmu je důležitým krokem pro filtraci událostí s malou pravděpodobností výskytu konvektivních srážek a současně událostí, při nichž nebyla vydána předpovědní výstražná informace. Vyhodnocení obou podmínek probíhá paralelně. V případě nesplnění obou podmínek, výpočet dalších předpovědních fází je ukončen a vrácen ke konverzi dat předpovědi srážek pro následující aktualizaci NWP modelů (po šesti hodinách). V opačném případě (při splnění obou podmínek) je provedena konverze dat předpovědních parametrů pro výpočet následujících fází.

Obrázek 5.15 dokumentuje analýzu podmínek pro pokračování výpočtu předpovědních fází Algoritmu. Pro pokračování předpovědí Algoritmu následujících musí být splněna alespoň jedna z těchto dvou podmínek:

- Pravděpodobnost času výskytu konvektivních srážek musí být vyšší než 0,5.
- V případě, že předpovědní výstražné informace od SIVS ČHMÚ a METEOALARMu na nebezpečné jevy (ne)jsou vydány, pak je splněna podmínka. V případě výstrah na ostatní nebezpečné jevy (například vydatný déšť, apod.), které nejsou spojené s výskytem bouří, podmínka není splněna. Předpověď pravděpodobnosti výskytu bouří a jejich nebezpečných doprovodných jevů, vydaných organizací ESTOFEX, musí být vydány pro splnění podmínky.



Obr. 5.15: Analýza podmínek pro pokračování předpovědi Algoritmu (vlastní zdroj).

Důvodem nastavení vyšší priority u předpovědních výstražných informací na nebezpečné jevy, vydávaných organizací ESTOFEX, je poměrně vyšší úspěšnost předpovědi pravděpodobnosti výskytu konvektivních bouří. Průměrná úspěšnost vydaných výstrah u ESTOFEXu byla 88 % za léta 2015 až 2017, přičemž rozdíl oproti ČHMÚ činil 22 %. Důvod nižšího podílu falešných poplachů z hlediska předpovědních výstražných informací na výskyt konvektivních bouří a nebezpečných jevů vedl ke stanovení druhé podmínky této rozhodovací fáze Algoritmu.

#### 5.1.4 2. fáze - Obecná charakteristika předpovídané povětrnostní situace

Druhý předpovědní krok obsahuje informace o předpovídané situaci. Hlavním cílem je získat základní informace o předpovídané situaci, které jsou pak využity pro výpočet následujících předpovědních fází Algoritmu.

Obecná charakteristika předpovídané povětrnostní situace obsahuje tyto informace, uvedené v Tabulce 5.3:

Tabulka 5.3 Charakteristika druhé předpovědní fáze Algoritmu.

<b>Charakteristika</b>	<b>Účel</b>	<b>Zdroj informací</b>
Datum	Statistická předpověď	Internet (čas)
Směr pohybu srážek (směr větru v 700 - 500 hPa)	Statistická předpověď	model WRF NMM v 3.4
Výstraha SIVS CHMU	Predikce intenzity bouří	portál ČHMÚ
Výstraha METEOALARM	Predikce intenzity bouří	portál METEOALARMu
Výstraha ESTOFEX	Predikce intenzity bouří	portál ESTOFEXu
Slovní předpověď	Doplňující informace	portál ČHMÚ
Synoptická předpověď pro Evropu	Statistická předpověď	portál ČHMÚ
Aktuální synoptická situace nad Evropou	Statistická předpověď	portál ČHMÚ

Informace a data jsou získávána z veřejně dostupných zdrojů na Internetu. Například, informace o směru pohybu srážek, který je představuje průnik směrů větru v hladinách 700, 600 a 500 hPa, je získána z modelu WRF NMM v 3.4. Směr pohybu srážek je vypočítán na základě četnosti daného směru větru v uvedených hladinách atmosféry. Dále jde o předpovědní výstražné informace s webovým odkazem na jednotlivé portály; slovní a synoptická předpověď a aktuální synoptická situace přímo z portálu ČHMÚ.

Podrobnější informace o jednotlivých zdrojích obecné charakteristiky, včetně tabulky statistiky potenciálního rizika podle směrů proudění jsou k dispozici v souboru Specifikace\_výstupů\_Algoritmu.xls, v sešitu „Obecná charka“.

### 5.1.5 3. fáze Algoritmu - Předpověď vlastností atmosféry

Předpověď vlastností atmosféry je jedna z hlavních předpovědních fází Algoritmu. Vlastnosti atmosféry jsou počítány z předpovědních parametrů NWP modelů a určují potenciál atmosféry příznivý pro vznik a vývoj konvektivních srážek, včetně nebezpečných jevů. Výstupy této fáze jsou součástí předpovědi intenzity bouří a pravděpodobnosti výskytu nebezpečných doprovodných jevů podle vlastností atmosféry.

Předpověď vlastností atmosféry je dána těmito *dílčími předpověďmi* a sumou jejich předpovědních parametrů:

1. *Denní instabilita atmosféry*: dílčí předpověď MLCAPE+LI, parametry MLCIN, TT index, K-Index, Teplotní gradient GRAD 850 - 500 hPa, Vlhká potenciální teplota 850 hPa.
2. *Noční instabilita atmosféry*: dílčí předpověď MUCAPE+SI, parametry MUCIN, TT index, K-Index, Teplotní gradient GRAD 850 - 500 hPa, Vlhká potenciální teplota 850 hPa.



3. *Spouštěcí mechanismy konvekce* (podmínky vzdušné masy): parametry Rozdíl tlaku MSLP<sup>16</sup>, Parametr Frontogeneze 850 hPa, dílčí předpovědi Orografická podpora konvekce a Relativní vlhkost 1000 - 300 hPa.
  - a. *Orografická podpora konvekce* (podmínky vzdušné masy): parametry Teplotní gradient GRAD 925 - 700 hPa, Směšovací poměr MIXR 0-1 km, dílčí předpovědi KONV+/DIV- 0 - 1 km a Orografický výstup:
    - i. KONV+/DIV-: parametry MOCON a MFDIV 0 - 1 km.
    - ii. Orografický výstup: parametry MTV vektor a Potential orographic lifting.
4. *Podpurné mechanismy konvekce* (podmínky vzdušné masy): dílčí předpověď Relativní vorticity 850, 500 a 300 hPa, parametry Srážková voda (Pwater) a Teplota 850 hPa.
5. *Střih větru*: parametr Střih větru v hladině 0 - 6 km (DLS)
6. *Mechanismy, podporující výskyt nebezpečných doprovodných jevů*: parametry Střih větru v hladině 0 - 1 km (LLS), Relativní helicity SREH 0 - 3 km, Relativní helicity SREH 0 - 1 km, SWEAT index.
7. *Mechanismy, podporující organizaci<sup>17</sup> konvekce*: parametry Rychlost větru v hladině 300 hPa a Rychlost větru v hladině 850 hPa.
8. *Mechanismy, podporující pohyb bouří (dále jen „Rychlost pohybu bouří“)*: parametry MCS Propagation Vector, dílčí předpověď Směrový střih větru pro hladiny 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400 a 300 a Vektor pohybu bouře pro rychlost větru v hladinách 850, 700, 600, 500, 400 a 300 hPa.

#### **5.1.6 4. fáze Algoritmu - Předpověď potenciálních spouštěčů konvekce v přízemní a mezní vrstvě atmosféry (Lokální podmínky)**

Čtvrtá předpovědní fáze je zaměřena na předpověď lokálních podmínek počátečního vzniku konvekce s využitím potenciálních spouštěcích mechanismů konvekce.

Hlavním cílem tohoto předpovědního kroku je předpověď podmínek příznivých pro počáteční iniciaci konvekce pro území menší než je velikost území kraje, tj. území obcí s rozšířenou působností (ORP) a jejich regiony. Rozdělení územních celků Zlínského kraje je součástí přílohy souboru Specifikace\_výstupů\_Algoritmu.xls, sešitu „Lokální podmínky“.

Počáteční impuls atmosférické konvekce je pravděpodobně dán vzájemnou interakcí těchto potenciálních spouštěcích mechanismů konvekce:

<sup>16</sup> Rozdíl tlaku MSLP (hPa) je stanoven rozdílem atmosférického tlaku, přepočteného na mořskou hladinu pro každý interval zvlášť. Hlavním ukazatelem je pokles hodnot tlaku MSLP s 12hodinovou historií pro daný interval. Klasifikace tohoto prvku je uvedena v příloze Specifikace\_výstupů\_algoritmu.xls, v sešitu „Podmínky\_vzdušné\_masy“.

<sup>17</sup> Kromě výše uvedených prvků, organizaci konvekce podporují další mechanismy podle Check listu ČHMÚ, například. Střih větru 0 - 6 km, Střih větru 0 - 3 km a index SWEAT. Tyto mechanismy nejsou zahrnuty do této dílčí předpovědi z důvodu opakování těchto mechanismů v ostatních dílčích předpovědích.

1. teplotních vlivů v přízemní vrstvě atmosféry,
2. přízemní vlhkosti ve 2 metrech nad zemí,
3. vlivů proudění vzduchu v přízemní vrstvě atmosféry,
4. orografických vlivů zemského povrchu.

### 5.1.6.1 Teplotní vlivy v přízemní vrstvě atmosféry

Teplotní vlivy obsahují soubor charakteristik reliéfu a prvků, které vyjadřují pravděpodobnost tepelného impulsu, podporujícího vznik kladné aerostatické vztlakové síly.

Charakteristiky reliéfu, ovlivňující tepelné podmínky počátečního vzniku atmosférické konvekce při zemském povrchu, zahrnují:

- sklonitost svahů,
- orientace svahů,
- světelnost od jihozápadu,
- pokrytí vegetací,
- tepelný kontrast typů zemského povrchu a
- teplotní gradient podle nadmořské výšky.

Charakteristiky reliéfu byly stanoveny na základě vah statistiky prostorových dat s využitím platformy ArcGIS a nabývají konstantních hodnot.

Ostatní předpovědní parametry, které se podílejí na podpoře tepelných podmínek, jsou Teplotní rozdíl ve 2 metrech nad zemí a Stupeň pokrytí oblačností. Tyto předpovědní parametry se na rozdíl od charakteristik reliéfu mění v závislosti na výstupech meteogramů modelu ALADIN.

Koeficient Teplotní rozdíl ve 2 metrech nad zemí je počítán z meteorologického prvku teplota ve 2 m nad zemí pro jeden region ORP jako průměr hodnot koeficientů teplot sousedních regionů ORP a ostatních ORP podle vzorců:

$$TR_{0 \rightarrow 3} = \frac{\sum K_m}{\sum n} = \frac{(m_1 - m_2) + (m_k - m_l)}{\sum n} \quad (5.16)$$

kde  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_k$  a  $m_l$  jsou teploty sousedních regionů ORP a  $n$  je suma počtu sousedních regionů ORP. Teplotní rozdíl ve 2 m nad zemí je stanoven pouze pro předpovídaný interval. Výčet regionů a jejich sousedních regionů je součástí přílohy sešitu Lokální podmínky.

Předpovědní prvek Stupeň pokrytí oblačností je pro daný region vypočítán průměrem koeficientů stupně pokrytí oblačností z předpovídaného časového intervalu a časového intervalem před předpovídaným intervalem. To znamená, že stupeň pokrytí oblačností pro interval 12 - 15 hod. je počítán jako průměr stupňů pokrytí z intervalů 09 - 12 hod. a 12 - 15 hod.

Tabulka 5.4 Klasifikace prvků dílčí předpovědi Teplotní vlivů přízemní vrstvy atmosféry.

<b>Parametry/ koeficienty teplotních vlivů</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Teplotní rozdíly vzduchu 2 m nad zemí	X=0	X=1	X=2	X=3
Pokrytí oblačností	$7/8 \leq X \leq 8/8$	$5/8 \leq X \leq 6/8$	$4/8 \leq X \leq 3/8$	$2/8 \leq X \leq 0/8$

Klasifikace časových intervalů obou prvků včetně hodnot konstant charakteristik a ostatních charakteristik jsou k dispozici v souboru Specifikace\_výstupů\_Algoritmu.xls, sešitu „Teplotní vlivy“.

Dílčí předpověď Teplotní vlivy je počítán pouze pro tzv. denní časové intervaly. Pro noční časové intervaly 21 - 24, 00 - 03, 03 - 06 není proveden výpočet z důvodu minimální efektivity tepelného vyzařování zemského povrchu a jeho vlivu na počáteční vznik atmosférické konvekce.

#### **5.1.6.2 Přízemní vlhkost ve 2 metrech nad zemí**

Dílčí předpovědi lokálních podmínek jsou Vlhkostní vlivy zemského povrchu, které se v kombinaci s teplotními vlivy podílejí na počáteční iniciaci atmosférické konvekce v přízemní vrstvě atmosféry.

Vlhkostní vlivy zemského povrchu jsou předpovídány prostřednictvím těchto prvků:

- relativní vlhkost ve 2 metrech nad zemí,
- KONV+/DIV- s prvky MOCON a MFDIV v 0 - 1 km,
- vlhkostní podmínky v předchozích 24 hodinách.

Koeficient Relativní vlhkosti ve 2 metrech nad zemí je počítán jako průměr maximální a minimální hodnoty relativní vlhkosti pro předpovídaný časový interval.

Dílčí předpověď podmínek přízemní konvergence nebo divergence proudění je určena již z předpovědi podmínek vzdušné masy. Tyto předpovědní prvky kombinují přízemní vlhkost s vektorem větru a jsou vhodnými ukazateli podmínek v přízemní hladině atmosféry. Klasifikace prvků vlhkostních vlivů je uvedena v tabulce 5.5:

Tabulka 5.5 Klasifikace prvků dílčí předpovědi Vlhkostní vlivy zemského povrchu.

<b>Parametry /koeficienty vlhkostních vlivů</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Relativní vlhkost 2m (%)	$X < 40$	$40 \leq X < 70$	$70 \leq X < 80$	$80 \leq X < 100$
MOCON	$X \leq 0$	$0,5 \leq X \leq 1$	$1,5 \leq X < 2,5$	$X = 2,5$
MFDIV 0-1 km	$X \leq 0$	$-2 \geq X \geq -28$	$-2 \geq X \geq -28$	$-130 \geq X \geq -160$
Srážkový úhrn (mm/hod.)	0 - 29	30 - 49	50 - 89	nad 90
Radary a stanice; pouze stanice (mm)	0 - 1	2 - 5	6 - 10	nad 11

Vlhkostní podmínky v předchozích 24 hodinách jsou stanoveny z koeficientů těchto parametrů:

- hodinový srážkový úhrn ze staničního měření podle klasifikace nebezpečného jevu „Bouřka“ SIVS ČHMÚ,
- kombinace radarového odhadu a srážkoměrných stanic,
- staniční měření.

Hodinový srážkový úhrn je získán z pozemních meteorologických stanic a je klasifikován podle kritérií SIVS ČHMÚ na nebezpečný jev Bouřka. Srážkoměrné stanice nejsou sice zastoupeny pro všechny regiony ORP, a proto jsou použity staniční výstupy sousedních regionů ORP. Druhý a třetí prvek jsou výstupy plošného odhadu srážek na portálu Hlásné, předpovědní a povodňové služby. Druhý prvek kombinuje výstupy radarového a staničního měření srážek prostřednictvím metody regresního krigování (Šálek, 2010). Třetí prvek je určen pro plošný odhad srážek pouze prostřednictvím srážkoměrné sítě (ČHMÚ, 1997-2017). Vlhkostní podmínky v předchozích 24 hodinách jsou počítány vždy pouze pro první předpovídaný časový interval.

### 5.1.6.3 Vlivy proudění vzduchu v přízemní vrstvě atmosféry

Vlivy proudění vzduchu v přízemní vrstvě atmosféry jsou určeny prostřednictvím vybraných charakteristik reliéfu a předpovědních prvků z meteogramů ALADIN. Větrné podmínky mohou významně podpořit počáteční vznik konvekce z hlediska udělení vyššího zrychlení částice vzduchu při působení kladné vztlačkové síly.

Větrné vlivy v přízemní hladině atmosféry jsou počítány na základě hodnot koeficientů těchto charakteristik reliéfu a předpovědních parametrů:

- geografický sídelní útvar,
- šířka údolí,
- obtékání překážky,
- rychlost větru 10 metrů nad terénem.

První tři prvky jsou charakteristiky reliéfu, dané jejich konstantami. Koeficient rychlosti větru v 10 metrech nad terénem je určen jako průměr maximálních a minimálních hodnot rychlosti větru v 10 m nad terénem pro předpovídaný časový interval. Zdrojem dat jsou meteogramy ALADIN.

Tabulka 5.6 Klasifikace prvků dílčí předpovědi Větrné vlivy v přízemní hladině atmosféry.

<b>Parametry /koeficienty vlivů proudění</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Rychlost větru 10 m (m/s)	$0 \leq X \leq 1$ AND $X \geq 7$	$2 \leq X \leq 3$	$4 \leq X \leq 5$	$X \geq 6$

Z tabulky 5.6 vyplývá, že čím vyšší rychlost vítr bude mít, tím jsou příznivější podmínky z hlediska vyššího zrychlení částice vzduchu. Nicméně, při vyšších rychlostech větru dochází často k narušení procesu počátečního vzniku konvekce. Hodnoty konstant charakteristik reliéfu a další specifikace, týkající se konfigurace větrných vlivů je součástí přílohy Specifikace\_výstupů\_Algoritmu.xls, sešitu „Vlivy\_proudění\_vzduchu“.

V budoucnosti je uvažováno zařazení směru větru v 10 m nad zemí. Tento parametr nebyl dostatečně ověřen pro předpovědní účely z důvodu nízkého počtu analyzovaných povětrnostních situací pro jednotlivé směry proudění.

#### 5.1.6.4 Orografické vlivy zemského povrchu

Orografické vlivy zemského povrchu vytváří podmínky, podporující celkové zrychlení částice vzduchu při výstupných pohybech vzduchu. Dílčí předpověď je počítána sloučením dvou základních typů orografických efektů:

1. návětrný efekt,
2. závětrný efekt.

Klasifikace návětrného efektu vychází z orografických spouštěcího mechanismu, kterým je zesílení konvekce na návětrné straně. Koeficient návětrného efektu je vypočítán na základě těchto charakteristik reliéfu a parametrů:

- nadmořská výška,
- šířka hřebene,
- teplotní gradient 925 - 700 hPa,
- směšovací poměr 0 - 1 km,
- KONV+/DIV- (prvky MOCON a MFDIV 0-1 km),
- orografický výstup a
- rychlost větru v hladině 850 hPa.

Nadmořská výška a šířka hřebene jsou charakteristiky reliéfu, ostatní jsou předpovědní parametry NWP modelů. Koeficienty návětrného efektu jsou počítány při různých směrech proudění (pohybu srážek) pro různé regiony ORP. Směry proudění jsou rozděleny do čtyř směrů proudění:

1. skupina – jihozápadní, jižní a jihovýchodní proudění,
2. skupina – severozápadní, severní a severovýchodní proudění,
3. skupina – západní proudění,
4. skupina – východní proudění.

Toto rozdělení je dáno prostorovým uspořádáním polohy návětrné strany hodnoceného geomorfologického celku. Klasifikace jednotlivých regionů návětrných stran je součástí přílohy v souboru Specifikace\_výstupů\_Algoritmu.xls, sešitu „Orografické\_vlivy“.

Předpokládanými orografickými spouštěcími mechanismy konvekce závětrného efektu jsou Zesílení konvekce na závětrné straně a Konvergence proudění na závětrné straně. Předpovědními parametry závětrného efektu jsou:

- teplotní gradient 850 - 500 hPa,
- KONV+/DIV- (prvky MOCON a MFDIV 0-1 km),
- rychlost větru 10 metrů nad terénem.

Zdrojem těchto předpovědních prvků jsou NWP modely GFS, WRF ARW a meteogramy modelu ALADIN. Výpočet koeficientů Závětrného efektu závisí na výběru regionů s jejich návětrnými stranami geomorfologických celků.

### **5.1.7 5. fáze Algoritmu - Předpověď intenzity bouří**

Předpověď intenzity bouří je hlavním výstupem, který slučuje dílčí předpovědi předchozí fáze Algoritmu. Cílem této fáze je určit výsledný potenciál konvektivních srážek silné, velmi silné až extrémně silné intenzity, které mohou být jednou z příčin vzniku přívalových povodní.

Výstupem této fáze je předpověď intenzity bouří, která je vypočítána na základě těchto dílčích předpovědních výstupů:

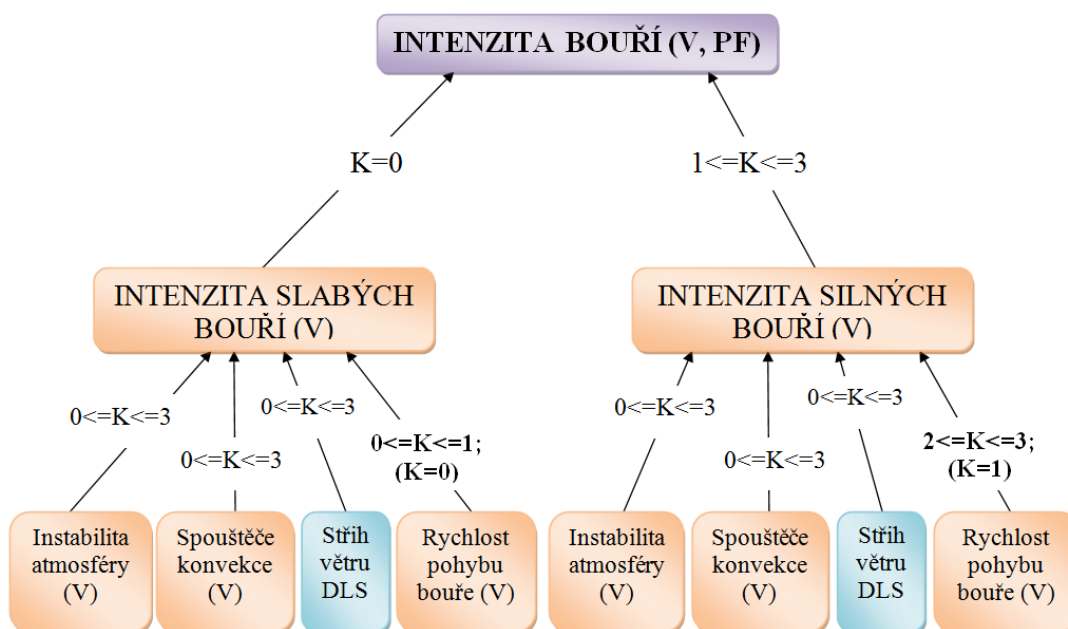
1. denní/noční instabilita atmosféry,
2. komplexní podpora mechanismů konvekce,
3. stříh větru v hladinách 0 - 6 km a

#### 4. rychlost pohybu bouří.

Komplexní podpora mechanismů konvekce obsahuje tyto dílčí předpovědi podmínek vzdušné masy:

- spouštěcí mechanismy konvekce vzdušné masy,
- podpůrné mechanismy konvekce vzdušné masy,
- podpůrné mechanismy konvekce nebezpečných doprovodných jevů,
- mechanismy podporující organizaci konvekce a
- mechanismy podporující pohyb bouří.

Předpověď intenzity bouří je implementována v rámci dalších předpovědních výstupů, například předpovědi pravděpodobnosti místa výskytu srážek, rizika výskytu nebezpečných jevů a rizika přívalových povodní. Předpověď intenzity bouří je použita také pro komparaci úspěšnosti předpovědi Algoritmu a předpovědních výstražných informací na nebezpečný jev „Bouřka“ podle SIVS ČHMÚ.



Obr. 5.16: Schéma předpovědi intenzity bouří (vlastní zdroj)

Z obrázku 5.16 vyplývá, že signifikantním faktorem je zejména rychlost pohybu bouře. Výpočtem 63 situací za léta 2015 až 2017 bylo ověřeno, že v případě vyšší rychlosti pohybu bouře (hodnoty koeficientů 0 až 1) a to i za předpokladu vysokých hodnot koeficientů ostatních faktorů vlastností atmosféry, bylo naměřeno malé množství spadlých srážek. V opačném případě, pomalý nebo stacionární pohyb srážek (hodnoty koeficientů 2 až 3) byl jednou z hlavních příčin vzniku přívalových povodní v letech 2015 a 2017 ve Zlínském kraji.

### 5.1.8 6. fáze Algoritmu - Předpověď pravděpodobnosti výskytu nebezpečných doprovodných jevů podle vlastností atmosféry

Šestá předpovědní fáze je určena k předpovědi pravděpodobnosti výskytu nebezpečných těchto jevů:

1. přívalový déšť,
2. krupobití,
3. silné nárazy větru spojené s výskytem konvektivní bouře,
4. tornáda.

Předpověď pravděpodobnosti výskytu nebezpečných jevů je vypočítána sloučením těchto výstupů:

- vah vybraných předpovědních parametrů a
- průměrné intenzity předpovědních parametrů pro jednotlivé nebezpečný doprovodný jev.

Váhy předpovědních parametrů byly stanoveny na základě:

- dokumentu Check-listu od ČHMÚ,
- procentuálního podílu výskytu předpovědních parametrů nebezpečného jevu a
- váhy parametrů, stanoveného na základě odborné literatury.

Check-list (ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017) byl prvním výchozím dokumentem počátečního výběru parametrů pro předpověď nebezpečných jevů. Tento dokument obsahuje záložky se seznamem parametrů a modelovaných hodnot. Základem Check-listu je tabulka s orientačními limity parametrů pro předpověď intenzity bouřek, včetně nebezpečných doprovodných jevů. Váhy parametrů Check-listu byly stanoveny podle počtu jejich aplikací.

Aplikace prvků obsahují tyto informace:

- Upd\* – souvisí se vzestupným proudem,
- Down\* - souvisí se sestupným proudem,
- Org\* - souvisí s organizací bouřek,
- Sup\* - předpověď supercelárních bouří,
- Mov\* - souvisí s pohybem bouřek,
- GR - předpověď krup,
- SQ - předpověď nárazu větru,
- RA - předpověď přívalových srážek,
- FC - předpověď tornád (ČHMÚ - Check-list bouřek, 2017).

Procentuální podíl výskytu parametrů byl určen na základě analýzy přibližně 50 povětrnostních situací s pravděpodobným výskytem nebezpečných jevů. Hodnota váhy byla tím vyšší, čím větší byl průměrný podíl výskytu parametrů u všech hodnocených situací.



Váha parametru byla stanovena na základě odborné literatury, článků a výukových webových portálech. Nebezpečné doprovodné jevy. Podrobnější informace a data jsou k dispozici v souborech „Nebezpečné\_jevy.xls“.

Prvním nebezpečným jevem je přívalový déšť. Předpovědními vstupními prvky přívalového deště jsou uvedeny v tabulce 5.7:

Tabulka 5.7 Váhy kritérií nebezpečného jevu přívalový déšť.

<b>Předpovědní parametry</b>	<b>Aplikace Check-listu</b>	<b>Váhy Check-listu</b>	<b>Podíl výskytu param.</b>	<b>Váha param.</b>	<b>Výsledná váha</b>
Srážková voda	RA	3	2	3	3
Relativní vlhkost 1000-850 hPa	Upd*, RA	2	2	3	2
Směšovací poměr (0-1 km)	Upd*, RA, GR	1	2	1	1
Vzestupná kondenzační hladina	Upd*, RA, FC	1	2	3	2
Rychlost větru v 850 hPa	Org*, Mov*, RA, SQ, FC	1	2	1	1
Hloubka teplé fáze oblaku	Upd*, RA	2	2	3	2
Střih větru 0-6 km	Mov*, RA	2	2	2	2
MCS vektor propagace bouře	Mov*, RA	2	3	3	3
Změna směru větru	Mov*, RA	2	2	3	2

Z tabulky 5.7 vyplývá, že zásadní vliv na výskyt přívalového deště mají prvky Srážková voda (Precipitable water) a MCS vektor propagace pohybu bouře. Kromě těchto prvků mají důležitý význam například prvky Vzestupná kondenzační hladina, kde platí, že čím je níže položena základna kupovitých oblaků, tím je vyšší pravděpodobnost přívalového deště.

Druhým hodnoceným nebezpečným jevem je krupobití, které se velmi často vyskytuje v kombinaci s ostatními jevy. Samotné krupobití přívalovou povoděň nevyvolá, ale může způsobit značné škody na majetku.

Pravděpodobný vznik krupobití je dán celkovým vertikálním rozsahem bouřkového oblaku, silných vzestupných proudů s delší dobou trvání. Tvorba velkých krup je ovlivněna přítomností vysokých hodnot potenciální dostupné energie MLCAPE, silného střihu větru v hladinách 0 - 6 km a vysoké vlhkosti vzduchu ve spodních hladinách atmosféry. Zejména pak přítomnost vyšší

rychlosti větru v hladině 300 hPa indikuje vysokou pravděpodobnost výskytu krupobití a tornád.

Tabulka 5.8 Váhy kritérií nebezpečného jevu krupobití.

Předpovědní parametry	Aplikace Check listu	Váhy Check listu	Podíl výskytu prvků	Váha parametru	Výsledná váha
MLCAPE/ MUCAPE	Upd*, GR, SQ	2	2	3	3
Lifted Index	Upd*, GR, SQ	2	1	1	1
Showalter Index	Upd*, GR, SQ	2	1	1	1
Teplotní gradient 850-500 hPa	Upd*, GR, SQ	2	3	2	2
Relativní vlhkost 1000-850 hPa	Upd*, RA	3	3	3	3
Srážková voda	RA	3	2	3	3
Směšovací poměr (0-1 km)	Upd*, RA, GR	2	3	2	2
Rychlost větru v 300 hPa	Org*, GR	3	1	3	3
Stříh větru 0-6 km	Org*, SQ, GR,	2	1	3	3
Relativní helicity SREH 0-3 km	Sup*, GR, SQ, FC	1	1	2	1
SWEAT index	Upd*,Org*, GR, SQ, FC	1	2	2	2
SHIP	GR	3	2	3	3

Třetím hodnoceným nebezpečným jevem jsou nárazy větru, definované jako krátkodobé zvýšení rychlosti větru s hodnotami vyšších než  $15 \text{ ms}^{-1}$ . Silné nárazy větru přívalovou povodeň sice nevyvolají, ale stejně jako krupobití mohou způsobit značné škody na majetku (tabulka 5.8).

Silné nárazy větru vznikají při sestupném proudě, který dopadne na zemský povrch a začne se roztékat do stran. Z tabulky 5.8 vyplývá, že pravděpodobnost vzniku silných nárazů větru je charakterizována podobnými prvky jako u krupobití, tzn. vysokou instabilitou a stříhem větru v hladinách 0 - 6 km a 0 - 1 km. Kromě těchto prvků je důležitá přítomnost vyšší rychlosti větru ve spodní a střední hladině atmosféry, výše položené vzestupné kondenzační hladiny a suchého vzduchu ve spodních hladinách atmosféry. Důležitým prvkem silných nárazů větru je také parametr Delta-Theta-E (DTHE).

Tabulka 5.9 Váhy kritérií nebezpečného jevu silné nárazy větru.

<b>Předpovědní parametry</b>	<b>Aplikace Check listu</b>	<b>Váhy Check-listu</b>	<b>Podíl výskytu prvků</b>	<b>Váha parametru</b>	<b>Výsledná váha</b>
MLCAPE	Upd*, GR, SQ	2	3	3	3
Lifted Index	Upd*, GR, SQ	2	2	2	2
Showalter Index	Upd*, GR, SQ	2	1	2	2
Teplotní gradient 850-500 hPa	Upd*, GR, SQ	2	3	1	2
Relativní vlhkost 1000-850 hPa	Upd*, RA	3	3	3	3
Vzestupná kondenzační hladina	Upd*, RA, FC	3	3	3	3
Střih větru 0-6 km	Org*, SQ, GR,	2	2	3	2
Střih větru 0-1 km	SQ, FC	3	1	3	2
Relativní helicity SREH 0-3 km	Sup*, GR, SQ, FC	1	1	1	1
SWEAT index	Upd*,Org*, GR, SQ, FC	1	1	2	1
Rychlost větru v 850 hPa	Org*, Mov*, RA, SQ, FC	1	3	3	2
DTHE	Down	3	3	3	3

Posledním hodnoceným nebezpečným jevem je tornádo, spojené s přítomností supercelární bouře. Tornádo je vertikálně rotující vzdušný vír, který způsobuje hmotné škody na zemském povrchu.

Tabulka 5.10 uvádí, že přítomnost vysokých hodnot SBCAPE 0-2 km nad zemí v kombinaci se silným střihem větru a vysokou rychlostí větru ve spodních hladinách atmosféry vytváří příznivé podmínky pro výskyt tornád. Kromě těchto prvků, signifikantními ukazateli podmínek vzniku tornád jsou SWEAT index a relativní helicity v hladinách 0-3 km.

Tabulka 5.10 Váhy kritérií nebezpečného jevu tornádo.

Předpovědní parametry	Aplikace Check listu	Váhy Check-listu	Podíl výskytu prvků	Váha parametru	Výsledná váha
SBCAPE 0-2 km		2	2	3	3
LLS	SQ, FC	3	2	3	3
SREH 3 km	Sup*, GR, SQ, FC	2	1	3	2
SREH 1 km	Sup*, GR, SQ, FC	3	1	3	2
SWEAT	Upd*, Org*, GR, SQ, FC	2	1	3	2
Rychlost větru v 850 hPa	Org*, Mov*, RA, SQ, FC	2	3	3	3
LCL	Upd*, RA, FC	1	1	3	1
STP	FC	3	3	3	3

V rámci této kapitoly byly uvedeny výsledné váhy jednotlivých nebezpečných jevů, na základě kterých je vypočítána pravděpodobnost jejich výskytu. Tento výstup, včetně dalších výstupů slouží pro stanovení rizika výskytu nebezpečných jevů a následně rizika přívalových povodní.

### 5.1.9 7. fáze Algoritmu - Předpověď podle statistik historických situací

Předpověď pravděpodobnosti místa a intenzity konvektivních srážek podle statistiky historických situací je doplňkovým výstupem, který slouží pro porovnání s hlavním výstupem Algoritmu „Předpověď pravděpodobnosti místa výskytu srážek“. Tato fáze generuje tyto dva dílčí výstupy:

1. výběr směru proudění a dané dráhy bouřek,
2. výběr historické povětrnostní situace k předpovídané situaci.

Hlavním zdrojem dat jsou výstupy z kapitoly „Statistiky rozložení konvektivních srážek“. Cílem prvního výstupu je poskytnout méně zpřesněnou informaci o pravděpodobném rozložení konvektivních srážek pro celé území kraje nebo jeho část. Druhý výstup je zaměřen na výběr historické události prostřednictvím definovaných vlastností atmosféry a dalších charakteristik. Hlavním účelem je získat přesnější informaci o rozložení srážek pro ORP a jejich regiony.

Jednou z hlavních vlastností atmosféry je průměr směrů větru v hladinách 700, 600 a 500 hPa, určujícím směr pohybu srážek, která je součástí Obecné charakteristiky povětrnostní situace. Pokud k danému směru proudění existuje možnost výběru dané dráhy bouřek, tak jsou použita tato dvě kritéria:

- Výběr dané dráhy bouřek je realizována na základě Předpovědi pravděpodobnosti místa výskytu konvektivních srážek, vypočtené Algoritmem.
- Doplňující informací je synoptická předpověď pro celou Evropu. Rozložení atmosférických front nad územím Evropy je určeno prostřednictvím synoptické předpovědi. Tato charakteristika je uvedena v tabulce 5.40.

Druhé kritérium je podstatně komplikovanější z hlediska přítomnosti odborníka na problematiku synoptické meteorologie. Tento druhý výstup by byl použitelný v případě, že by nemohl být proveden výpočet předpovědí Algoritmu kvůli omezení přístupu ke vstupním datům NWP modelů. Nicméně, za běžného stavu, výběr drah bouřek bude realizován prostřednictvím prvního kritéria.

Hlavním výstupem první fáze je statistika pravděpodobností místa a intenzity výskytu konvektivních srážek pro daný směr proudění nebo dráhu bouřek.

Druhá fáze je primárně zaměřena na výběr statistiky ze skupiny konkrétních historických povětrnostních situací, která je dána těmito kritérii:

1. Směr pohybu srážek (směr větru v hladině 700, 600 a 500 hPa).
2. Meteorologické prvky, charakterizující vlastnosti atmosféry:
  - a. teplota v hladinách 1000, 925, 850, 700 a 500 hPa,
  - b. relativní vlhkost v hladinách 1000, 925, 850, 700, 500 a 300 hPa,
  - c. směr větru v hladinách 1000, 925, 850, 700, 500 a 300 hPa,
  - d. rychlost větru v hladinách 1000, 925, 850, 700, 500 a 300 hPa.
3. Lokální podmínky – orografické vlivy zemského povrchu, teplotní, vlhkostní a vlivy proudění vzduchu v přízemní a mezní vrstvě atmosféry.

Hlavní metodou určení matematické závislosti mezi směrem proudění, předpovídanými a historickými meteorologickými prvky, včetně lokálních podmínek byl vybrán Pearsonův korelační koeficient, daný vzorcem:

$$\rho_{X,Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)}\sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}} \quad (5.17)$$

kde náhodné veličiny  $X=E(X^2)$  a  $Y=E(Y^2)$ . Koeficient korelace nabývá hodnot z intervalu -1 až 1, kde hodnoty blíží se -1 jsou nejméně závislé a hodnoty blíží se k 1 zvyšují závislost (cit.vfu.cz, Lineární korelační závislost). Pro účely komparace a srovnání byl experimentálně vybrán interval od 0,5 do 1 z hlediska vyjádření pozitivní korelační závislosti mezi hodnocenými kritérii. Ukázka výběru konkrétní statistiky historické povětrnostní situace je k dispozici v příloze Specifikace\_výstupů\_algoritmu.xls, sešitu „Statistika“.

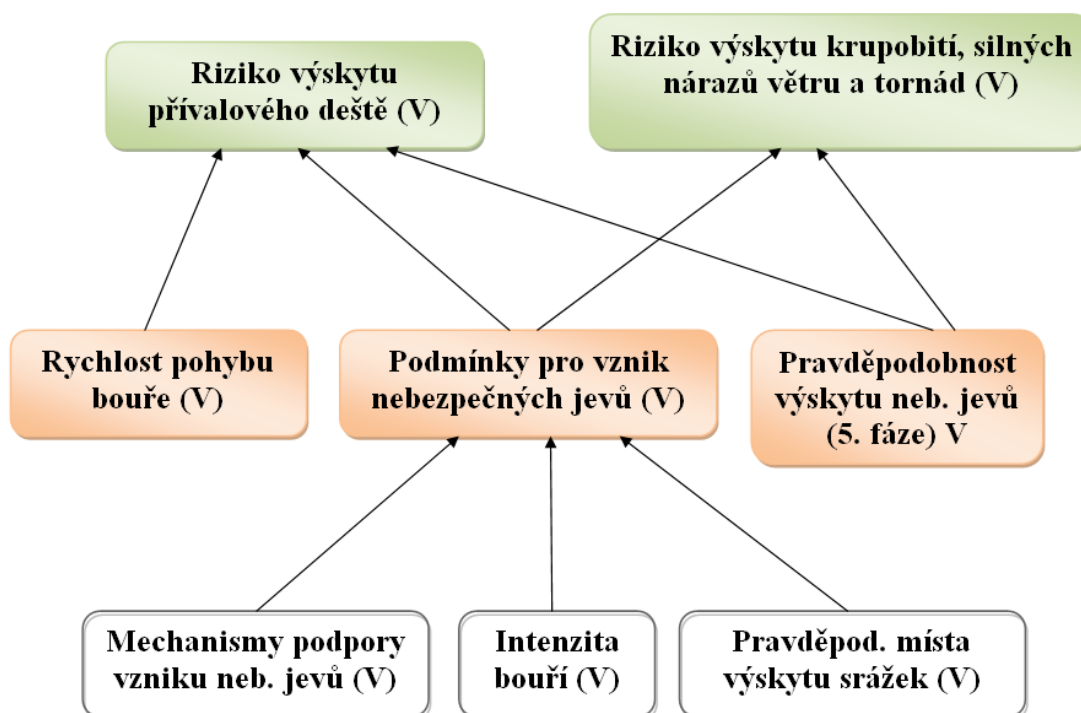
### 5.1.10 8. fáze Algoritmu - Sloučení předpovědních fází

Hlavním cílem tohoto předpovědního kroku je sloučit výstupy z předchozích předpovědních fází za účelem výpočtu hlavních výstupů Algoritmu:

1. předpověď pravděpodobnosti místa a intenzity výskytu konvektivních srážek,
2. předpověď rizika výskytu nebezpečných jevů,
3. předpověď rizika přívalových povodní.

Předpověď pravděpodobnosti místa a intenzity výskytu konvektivních srážek je vypočítáno z Předpovědi intenzity bouřek a Lokálních podmínek, charakterizujících potenciální spouštěcí mechanismy konvekce v přízemní a mezní vrstvě atmosféry.

Prvním vstupem předpovědi rizika výskytu nebezpečných jevů jsou Podmínky pro vznik nebezpečných jevů, které jsou vypočítány prostřednictvím dílčí předpovědi Mechanismů podpory vzniku nebezpečných jevů v rámci čtvrté předpovědní fáze, hlavního předpovědního výstupu Intenzity bouří a Pravděpodobnosti místa výskytu srážek. Druhým vstupem je pravděpodobnost výskytu nebezpečných jevů, který je počítán na základě vah pro jednotlivé nebezpečné jevy.



Obr. 5.17 Schéma výpočtu rizika výskytu přívalového deště a ostatních nebezpečných jevů (vlastní zdroj)

Výpočet rizika výskytu krupobití, silných nárazů větru a tornád vychází z obrázku 5.17 ze stejných předpovědních výstupů jako riziko přívalového deště, pouze s tím rozdílem, že riziko tohoto nebezpečného jevu je doplněno o dílčí předpověď mechanismů, podporujících pohyb bouře (rychlost pohybu bouře).

Předpověď rizika přívalových povodní je dána:

- stupněm nasycení území,
- sumou potenciálně rizikových srážek za 1 hodinu,
- pravděpodobností místa výskytu konvektivních srážek,
- intenzitou bouří,
- mechanismy, podporující pohyb konvektivních bouří a
- sumarizací nebezpečných jevů.

**Ukazatel nasycení** - reprezentuje odhad aktuální nasycenosti území vodou k určité hodině místního času. Vysoká nasycenost představuje potenciální riziko zvýšeného povrchového odtoku při větších srážkových úhrnech.

**Suma potenciálně nebezpečného úhrnu srážek pro vznik významnějšího odtoku za 1, 3 a 6 hodin** - představuje potenciálně rizikové úhrny srážek za danou dobu trvání. Tyto úhrny jsou odvozovány denně k 6 hodině místního času prostřednictvím srážko-odtokového modelu s nastavenou prahovou hodnotou. Hodnoty představují úhrn srážek pro území velikosti 3x3 km, který potenciálně mohl způsobit povrchový odtok z daného území s dobou opakování 2 - 5 let. Suma úhrnu srážek za 1 hodinu je použita pro výpočet podmínek nasycenosti území. Data stupně nasycení a sumy srážek jsou získávána z aplikace Indikátoru přívalových povodní FFG-CZ. Klasifikace rizika přívalové povodně je zveřejněna v Tabulce 5.11:

Tabulka 5.11 Klasifikace rizika přívalových povodní podle nasycení území

<b>Koeficient rizika přív. povodní</b>	<b>Riziko přív. povodní</b>	<b>Nasycenost půd</b>	<b>Suma srážek za 1 hodinu</b>
0	Velmi nízké	Velmi slabá, slabá	nad 30 mm
1	Nízké	Retenční vodní kapacita (RVK)	20 - 30 mm
2	Vysoké	Silná, velmi silná	15 - 20 mm
3	Velmi vysoké	Extrémně silná	pod 15 mm

**Pravděpodobnost místa výskytu srážek** - je hlavní předpovědní výstup, který poskytuje informaci o místě výskytu a tříhodinové intenzitě srážek. Tříhodinová intenzita srážek je vyjádřena pravděpodobností místa výskytu. Škála tříhodinových intenzit se pohybuje v rozsahu od 0 do 29 mm. Tento výstup, společně s předpovědí intenzity bouří, popisuje budoucí stav srážkového potenciálu v atmosféře.

**Intenzita bouří** - je hlavní předpovědní výstup, zaměřený na stanovení srážkového potenciálu z hlediska klasifikace nebezpečných jevů pro jev „Bouřka“ podle kritérií SIVS ČHMÚ. Škála hodinových intenzit srážek má podstatně větší rozsah než v případě intenzit tříhodinových; pohybuje se v rozsahu od 0 do 90 a více mm za hodinu.

**Mechanismy, podporující pohyb konvektivních bouří** - je dílčí předpovědní výstup, který popisuje podmínky v atmosféře z hlediska rychlosti pohybu bouří. Nejvyšší riziko přívalové povodně je při velmi pomalém až stacionárním pohybu bouře. Naopak, se zvyšující se rychlostí pohybu toto riziko rapidně klesá. Význam tohoto dílčího výstupu je zdůrazněn také při výpočtu intenzity bouří.

**Sumarizace nebezpečných jevů** - je výstupem, zahrnujícím hlavní předpovědní výstupy předpovědi přívalového deště, krupobití a silných nárazů větru. Přívalový déšť je sice jednou z hlavních příčin vzniku přívalových povodní, nicméně ostatní nebezpečné jevy mohou podpořit vývoj přívalové povodně a způsobit rozsáhlé škody na infrastruktuře a obecním majetku, včetně ztráty lidských životů.

Předpověď rizika přívalové povodně je počítána:

- vlhkou variantou,
- suchou variantou.

Každé variantě jsou přiřazeny váhy předpovědních výstupů rizika přívalové povodně na základě analýzy povodňových situací z let 2015 až 2017. Z tabulky 5.12 vyplývá, že suchá varianta rizika přívalové povodně silně závisí na výskytu a intenzitě srážek, včetně velmi pomalého až stacionárního pohybu bouře. Vlhká varianta je závislá na velmi příznivých podmínkách nasycenosti půd, výskytu a intenzity srážek a částečně rychlosti pohybu bouře. Na základě analýzy těchto tří povodní, způsobených nebezpečnými jevy, byly stanoveny váhy pro výpočet suché a vlhké varianty.

Výpočet suché nebo vlhké varianty je dán stupněm nasycení. Například, suchá varianta je vypočtena na základě podmínky méně než 50 % výskytu regionů ORP při stupni nasycení větším než nulová hodnota koeficientu a současně podle stupně nasycení, které je menší než je hodnota koeficientu 2 (silné nasycení). Pro vlhkou variantu platí tato podmínka opačně. V rámci přílohy „Vzorová\_předpověď.xlsx“ je uveden výpočet předpovědi rizika přívalové povodně s předpovědními parametry a dílčími předpověďmi Algoritmu bez jejich vah pro účely komparace s výstupem používajícím váhy.



Tabulka 5.12 Váhy suché a vlhké varianty př. parametrů a dílčích předpovědí rizika přívalové povodní z let 2015 až 2017.

Povodeň	Nasyce- ní	Sum a 1h.	Místo srážek	Intenzita	Pohyb	Neb. jevy
24. 7. 2015 (S)	RVK (1)	0	Zlín	10-29 (2)	bez pohybu (3)	vysoké (2)
22. 7. 2017 (S)	0	0	Luha- čovice	30-49 (3)	bez pohybu (3)	vysoké (2)
5. 8. 2016 (V)	extrémní (3)	3	Val. Klo- bouky	10-29 (2)	nízká rychlost (2)	nízké (1)
Váhy suché varianty	1	1	3	3	3	2
Váhy vlhké varianty	3	3	3	3	2	1

Jednotlivým stupňům rizika jsou přiřazeny tyto návrhy preventivních opatření a doporučení pro orgány krizového řízení kraje:

- **Stupeň velmi nízký a nízký** – riziko je téměř zanedbatelné, není nutné provádět preventivní opatření.
- **Stupeň vysoký** – riziko je vysoké a je nutné věnovat vyšší pozornost sledování předpovědí a výstrah ČHMÚ nebo dalších informačních zdrojů, kterými jsou NWP modely, aerologické měření atmosféry, meteorologické družice, apod. Důležitým zdrojem jsou meteorologické radary, které kromě měření aktuálního stavu poskytují velmi krátkodobou předpověď na do 2 hodin. Pro Zlínský kraj byla vytvořena Metodika využití meteorologického radaru MMR50 pro účely krizového řízení, kde je uveden postup činnosti v případě obdržení varovné SMS zprávy na výskyt silných srážek. Tato metodika je součástí elektronické přílohy pod názvem „Metodika\_využití\_meteorologického\_radaru\_Zlínského\_kraje\_pro\_potřeb\_y\_krizového\_řízení.pdf“. V rámci doporučených preventivních opatření je možné provést kontrolu připravenosti sil a prostředků, přípravu aktivizace jednotek HZS a realizovat některá technická protipovodňová opatření, například kontroly koryt menších vodních toků, kanalizační sítě ve městech a obcích, vybavení jednotek profesionálních a dobrovolných hasičů, apod.
- **Stupeň velmi vysoký** – riziko je bezprostřední a je nutné neprodleně postupovat dle metodiky, sledovat výstupy informačních zdrojů jako u stupně vysokého rizika. Preventivní protipovodňová opatření jsou prováděna ve stejné nebo vyšší míře jako u vysokého rizika.

### 5.1.11 9. fáze Algoritmu - Předpovědní zpráva

Devátá fáze generuje zprávu, která sumarizuje předpovědní výstupy Algoritmu, seřazených podle jejich důležitosti z hlediska potřeb orgánů krizového řízení v případě potenciální hrozby přívalové povodně:

1. obecná charakteristika předpovídané situace,
2. předpověď rizika přívalových povodní,
3. předpověď intenzity bouří (srovnání s př. výstrahami SIVS ČHMÚ),
4. předpověď pravděpodobnosti místa a intenzity konv. srážek (Algoritmus),
5. předpověď pravděpodobnosti času a místa konv. srážek (NWP modelů),
6. předpověď rizika nebezpečných doprovodných jevů a
7. předpověď pravděpodobnosti místa a intenzitou konv. srážek (statistika).

Tabulka 5.13 Klasifikace hlavních předpovědních výstupů Algoritmu.

Koeficient výstupu	Riziko přívalových povodní	Pravděpodobnost místa výskytu srážek	Intenzita bouří (mm/hod.) – SIVS ČHMÚ	Intenzita výskytu srážek (mm/3 hod.)
0	Velmi nízké	0-0,24	Slabé bouřky (0 - 29)	Velmi slabá (0 - 2)
1	Nízké	0,25-0,49	Silné bouřky (30 - 49)	Slabá (3 - 9)
2	Vysoké	0,50-0,74	Velmi silné bouřky (50 - 89)	Mírná (10 - 29)
3	Velmi vysoké	0,75-1	Extrémně silné bouřky (nad 90)	Silná (nad 30)

Hlavními výstupy předpovědní zprávy jsou obecná charakteristika př. situace, riziko přívalových povodní, intenzita bouří, pravděpodobnost místa (Algoritmus) a času výskytu konv. srážek (NWP modely). Tučně znázorněné koeficienty představují vysoké až velmi vysoké riziko přívalových povodní, při jejichž stanovení by bylo možné zahájit realizaci preventivních protipovodňových opatření.

Poslední dva výstupy poskytují doplňující informaci o riziku výskytu nebezpečných jevů a pravděpodobnosti výskytu konvektivních srážek podle statistiky. Poslední výstup je primárně určen pro srovnání s předpovědi Algoritmu a sekundárně jako záloha v případě ztráty připojení k Internetu. Vizualizace předpovědi Algoritmu bude zajištěna pomocí nástroje GIS pro tvorbu mapových výstupů.

### 5.1.11.1 Klasifikace nebezpečného jevu „Bouřka“ a návrhy preventivních protipovodňových opatření

Klasifikace nebezpečného jevu „Bouřka“ je podrobně popsána na webových stránkách Systému Integrované Výstražné Služby ČHMÚ.

Tabulka 5.14 Klasifikace jevu „Bouřka“ podle kritérií SIVS ČHMÚ (SIVS - kód V ČHMÚ, 2006 - 2017)

<b>Stupeň intenzity bouřek</b>	<b>Klasifikace kritérií stupňů nebezpečí</b>	<b>Specifikace dopadů výskytu nebezpečných jevů</b>
Slabé bouřky	srážky >30 mm, vítr >15 m/s (50 km/hod)	<i>Elektrické výboje</i> – menší škody na elektrickém vedení, domech, požáry
Silné bouřky	srážky ≥30 mm, vítr >20 m/s (70 km/hod)	<i>Elektrické výboje a přívalový déšť</i> – škody na elektrickém vedení, domech, požáry v kombinaci se slabšími lokálními povodněmi
Velmi silné bouřky	srážky ≥50 mm, vítr >25 m/s (70 km/hod)	<i>Přívalový déšť</i> – lokální povodně, vytopení sklepů, silnic, domů, vodní eroze půd
Velmi silné bouřky s přív. deštěm	srážky ≥50 mm, vítr >25 m/s (90 km/hod), kroupy ≥2 cm	<i>Krupobití</i> – materiální škody na předmětech, zdravotní problémy
Extrémně silné bouřky	srážky ≥90 mm, vítr >30 m/s (110 km/hod), kroupy ≥4 cm	<i>Nárazovitý vítr (húlavy)</i> - ulámání velkých větví, vyvracení stromů, materiální škody – poškození střech
Extrémně silné bouřky s přív. deštěm	srážky ≥90 mm, vítr >30 m/s (110 km/hod), kroupy ≥4 cm	<i>Vertikální vzdušné víry</i> v podobě tornád, vodních smrštů – velké materiální škody, poškození střech, zdi obytných domů, vyvracení stromů

Kromě této klasifikace jsou pro každý stupeň nebezpečí vydávána doporučení na tyto nebezpečné doprovodné jevy:

1) Přívalový déšť:

- Vyhnout se malým vodním tokům, které se mohou během krátké doby přeměnit v nebezpečný živel.

- Opatrný pohyb v postižené oblasti a důsledné dodržování pokynů příslušného IZS a odpovědných orgánů.
  - Nezdržovat se v blízkosti letních stanových táborů, kempů a chatových oblastí, které se nacházejí v údolních nivách.
- 2) Krupobití:
- Vyhledat bezpečný úkryt, kde je nutné setrvat až do úplného odeznění bouřky.
  - V případě řízení automobilu zastavit na bezpečném místě.
  - Poskytnout pomoc postiženým osobám v terénu.
- 3) Nárazový vítr, tornádo:
- Zajištění oken, dveří a odstranění volně uložených předmětů ve venkovním prostředí za účelem omezení škod na majetku.
  - Nezdržovat se v blízkosti větších stromů, kde hrozí vyvrácení nebo ulámání větších větví.
  - Omezení pohybu v blízkosti vysokých budov, drátů elektrických rozvodů.
  - Při řízení automobilu snížit rychlost, hrozí neovladatelnost vozidla kvůli náhlým bočním nárazům větru.
  - Rychlý přesun na břeh v případě, že se nacházíme na vodní hladině (to platí jak pro plavce, tak pro lodě).
  - V případě výskytu tornáda, co nejrychleji nalézt bezpečný úkryt v podobě sklepů, suterénních místností a jádra domů, nebo terénních prohlubní v případě volného prostranství.
- 4) Elektrické výboje:
- Omezení pohybu v otevřené krajině, zejména pod vzrostlými stromy, horském hřebeni a vrcholů hor.
  - Omezení pobytu na vodní hladině, v blízkosti stožárů, sloupů veřejného osvětlení a elektrického vedení; pod skalními převisy, jeskyní a šachet.
  - Omezení jízdy na jízdních kolech, motocyklech a jiných otevřených dopravních prostředcích.
  - Nepoužívat telefon nebo mobil, nepracovat s elektrospotřebiči.
  - Omezit tělesný kontakt s vodou z vodovodních rozvodů (SIVS - kód V ČHMÚ, 2006 - 2017).

Podle zákonných podmínek<sup>18</sup> není v současnosti možné provádět protipovodňová opatření proti vzniku přívalových povodní a rozhoduje pouze úroveň trvalé připravenosti (SIVS - kód V ČHMÚ, 1997 - 2017).

---

<sup>18</sup> Podmínky vydávání předpovědí a výstrah jsou uvedeny v zákoně č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). Hlavní institucí oprávněnou k vydávání předpovědí a výstrah je Český hydrometeorologický ústav.

Úroveň trvalé připravenosti lze vztáhnout na tato preventivní opatření:

- zajištění včasných informací od Předpovědní a hlásné povodňové služby ČHMÚ,
- vypracování povodňových plánů,
- zajištění pozorovacích a povodňových hlídek.
- revitalizace krajiny a vodních toků,
- technická opatření protipovodňové ochrany (Šaur, 2013).

Úkolem předpovědní a hlásné služby je poskytnout včasné a kvalitní informace o budoucím vývoji počasí. Kromě této služby je možné vyhledat orientační předpovědní informace z NWP modelů, např. modelu ALADIN, nebo jiných informačních zdrojů.

Dalším důležitým opatřením je revitalizace krajiny pro zvýšení retenční schopnosti krajiny. Cílem revitalizace je návrat krajiny do původního stavu. Příkladem revitalizace krajiny a vodních toků je změna skladby lesů s vyšším podílem listnatých lesů, omezení kácení lesů, usměrnění zemědělské činnosti, zvýšení podílu travnatých ploch a přirozených překážek (remízky, příkopů, atd.) a hrazení bystřin (Šaur, 2013).

Předposledním preventivním opatřením je příprava pozorovacích a povodňových hlídek, jejímž úkolem je kontrola stavu koryt, zejména pak menších vodních toků a bystřin v exponovaných oblastech s častým výskytem přívalových povodní v minulosti.

Další možností prevence jsou technická protipovodňová opatření:

- Výstavba a obnova vodních a protierozních nádrží a poldrů.
- Zajištění stavebních úprav v krajině pro zadržení povodňové vlny.
- Čištění a prohlubování koryt včetně ochrany před výskytem odplavitelných materiálů.
- Rozšíření a pravidelná údržba kanalizace a jímek.
- Revize vybavení a doplnění zásob profesionálních a dobrovolných jednotek hasičů, například pytlů s pískem, mobilních protipovodňových bariér, vysokotlakých čerpadel, apod.

V současnosti je na území ČR pěstován velký podíl zemědělských plodin a lesních kultur, například řepky olejné, kukuřice a smrků, které mohou významně podpořit vznik a průběh přívalové povodně, včetně lokální eroze půd. Tyto plodiny jsou často pěstovány za účelem dosažení ekonomického zisku na úkor zhoršených srážkoodtokových procesů v krajině. Dalším podpurným faktorem, ovlivňujícím vznik přívalové povodně, je velký podíl hustě zastavěných a urbanizovaných ploch. Všechny tyto faktory negativně působí na hydrologické a půdní poměry v krajině, a proto by zde měla existovat snaha jak od veřejné správy, tak soukromých podniků navracet krajinu do původního stavu.

## 5.2 Verifikace předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů

„Úspěšnost předpovědi je vyjádření přesnosti vydané předpovědi počasí a jejím následným porovnáním s pozorovanými hodnotami meteorologických prvků v příslušném období nebo daným územím“ (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2017). Hlavním účelem hodnocení úspěšnosti předpovědi je ověřit vhodnost použitých předpovědních metod.

Hlavními důvody pro ověření předpovědi jsou:

- Sledování kvality předpovědi udává míru přesnosti prognóz a jejich zlepšení v průběhu času.
- Zlepšování kvality předpovědi je určeno pro odhalení chyb v předpovědi za účelem zvýšení kvality dané předpovědi.
- Porovnání kvality ostatních předpovědních systémů (cawcr.gov.au, 2017).

Existuje mnoho způsobů hodnocení úspěšnosti předpovědi, které se vyjadřují často v procentuální míře splnění předpovědi (Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 1993 - 2017).

V rámci této práce, úspěšnost předpovědi bouřek a vydaných předpovědních výstražných informací byla hodnocena pro:

- Algoritmus předpovědi bouřek,
- numerické modely předpovědi počasí,
- Systém Integrované Výstražné Služby ČHMÚ.

Hlavními vstupními daty pro verifikaci předpovědi Algoritmu byla data z:

- pozemních meteorologických stanic ve Zlínském kraji,
- kombinovaného radarového odhadu a pozemních srážkoměrů,
- meteorologického C-pásmového radaru Skalky a X-pásmového radaru MMR50 Zlínského kraje,
- aerologické sondáže v Prostějově a
- Indikátoru přívalových povodní ČHMÚ.

Úspěšnost předpovědi Algoritmu byla počítána pro větší územní celky (13 obcí s rozšířenou působností Zlínského kraje) a menší územní celky (35 regionů ORP Zlínského kraje), kde každé ORP Zlínského kraje bylo rozděleno na 3 regiony, kromě ORP Otrokovice a Holešov.

V rámci verifikace byly hodnoceny tyto předpovědní výstupy Algoritmu:

1. pravděpodobnost místa výskytu konvektivních srážek,
2. tříhodinová intenzita bouřek,
3. pravděpodobnost místa výskytu bouřek na základě statistik historických povětrnostních situací,
4. intenzita bouřek na základě statistik historických povětrnostních situací,
5. riziko přívalových povodní,

6. intenzita bouří,
7. riziko nebezpečných doprovodných jevů,
8. pravděpodobnost času a místa výskytu bouřek na základě výstupů NWP modelů (ALADIN ČHMÚ a SHMÚ, EURO4, GEM, HIRLAM, WRF-ARW a WRF v 3.4-NMM) s rozlišením pod 11 km.

V rámci verifikace bylo vyhodnoceno celkem 63 situací (83 tříhodinových intervalů) za léta 2015 až 2017, u nichž se vyskytly konvektivní srážky s intervaly intenzit od 0 do 36 mm/hod. U tří povětrnostních situací se vyskytly přívalové povodně, které způsobily materiální škody v řádech desítek miliónů korun ve Zlínském kraji.

Celkový seznam povětrnostních situací za léta 2015 až 2017 je rozdělen do osmi směrů proudění pohybu srážek:

- Jihozápadní proudění pro dny: 14. 6. 2015 (18-21 h.), 8. 7. 2015 (03-06 h.), 23. 7. 2015 (09-12 h.), **24. 7. 2015 povodeň (15-18; 18-21 h.)**, 28. 5. 2016 (12-15; 15-18; 21-24 h.), 13. 6. 2016 (12-15 h.), 30. 6. 2016 (18-21; 21-24 h.), 2. 7. 2016 (21-24 h.), 12. 7. 2016 (06-09, 09-12 h.), 24. 7. 2016 (18-21; 21-24 h.), 27. 7. 2016 (12-15; 15-18 h.), **5. 8. 2016 povodeň (18-21; 21-24 h.)**, 9. 8. 2016 (15-18 h.), 29. 8. 2016 (12-15 h.), 23. 5. 2017 (12-15 h.), 4. 6. 2017 (12-15; 15-18 h.), 10. 7. 2017 (18-21 h.), 20. 7. 2017 (21-24 h.), 21. 7. 2017 (03-06 h.), **22. 7. 2017 povodeň (15-18 h.)** a 10. 8. 2017 (03-06; 18-21 h.).
- Severozápadní proudění pro dny: 9. 6. 2016 (18-21 h.), 25. 7. 2016 (18-21 h.), 7. 5. 2017 (15-18 h.), 13. 5. 2017 (12-15 h.), 23. 5. 2017 (15-18 h.), 12. 6. 2017 (15-18 h.) a 16. 6. 2017 (12-15 h.).
- Jihovýchodní proudění pro dny: 11. 8. 2015 (15-18; 18-21 h.), 17. 8. 2015 (18-21 h.), 31. 5. 2016 (15-18 h.), 1. 6. 2016 (12-15; 15-18 h.), 19. 6. 2016 (15-18 h.) a 5. 5. 2017 (12-15; 15-18 h.).
- Severovýchodní proudění pro dny: 3. 8. 2015 (12-15; 15-18 h.), 12. 8. 2015 (12-15; 15-18 h.), 3. 5. 2016 (15-18 h.), 9. 5. 2016 (18-21 h.) a 5. 6. 2016 (15-18 h.).
- Jižní proudění pro dny: 15. 8. 2015 (15-18; 18-21; 21-24 h.), 30. 5. 2016 (00-03 h.), 26. 6. 2016 (00-03 h.), 15. 6. 2016 (09-12; 12-15 h.), 6. 5. 2017 (18-21 h.), 6. 6. 2017 (18-21 h.), 24. 7. 2017 (15-18 h.), 10. 8. 2017 (21-24 h.), 11. 8. 2017 (00-03; 21-24 h.) a 12. 8. 2017 (00-03 h.).
- Východní proudění pro dny: 24. 5. 2016 (12-15 h.), 2. 6. 2016 (12-15 h.) a 4. 4. 2017 (15-18 h.).
- Severní proudění pro den 25. 5. 2016 (12-15 h.) a 15. 7. 2017 (12-15 h.).
- Západní proudění pro dny: 27. 7. 2015 (18-21; 21-24), 10. 6. 2016 (12-15 h.), 29. 7. 2016 (12-15 h.), 14. 8. 2016 (15-18; 18-21 h.), 29. 8. 2016 (21-24 h.), 23. 6. 2017 (03-06 h.), 28. 7. 2017 (12-15 h.) a 27. 8. 2017 (15-18 h.).

Pro verifikaci modelových výstupů předpovědi srážek byla použita staniční data s tříhodinovým intervalem. Hodnocení úspěšnosti výstrah na nebezpečný jev „Bouřka“ bylo realizováno prostřednictvím vydané výstrahy SIVS ČHMÚ, předpovědních výstupů Intenzita bouřek a staničních výstupů pozemních meteorologických stanic ve Zlínském kraji.

Předpovědi počasí (konvektivních srážek) lze verifikovat těmito metodami:

- 1) Standardní metody s verifikačními kritérii:
  - „Eyeball“ verifikace,
  - dichotomické metody (ANO/NE) – kontingenční tabulky,
  - metody pro multikategorické předpovědi,
  - metody předpovědi spojitých proměnných a
  - metody pro pravděpodobnostní předpovědi
- 2) Nestandardní metody s využitím radarových odhadů srážek (cawcr.gov.au, 2017).

Předpověď konvektivních srážek a její verifikace z hlediska posouzení kvality předpovědi byla zkoumána prostřednictvím verifikačních kritérií Skill Scores například v pracích (Huntrieser et al., 1997; Henry, 2000; Zacharov a Řezáčová, 2005). Pro zkoumaná data byla sestavena kontingenční tabulka, která se skládá ze čtyř polí. Tato tabulka je zobrazena na obrázku 5.18 a uvádí četnosti případů, kdy jev byl/nebyl předpovídan a ve skutečnosti nastal/nenastal, a to ve všech možných vzájemných kombinacích (Zacharov, 2004, s. 19 - 20).

Obr. 5.18: Kontingenční tabulka ve standardní metodě verifikace předpovědi srážek (Zacharov, 2004, s. 20).

		Předpověď	
		+	-
Měření	+	<b>a</b> <b>Zásah</b>	<b>b</b> <b>Chyba</b>
	-	<b>c</b> <b>Falešný poplach</b>	<b>d</b> <b>Správné vyloučení</b>

kde *a*, *b*, *c*, *d* jsou tyto kategorie:

- *a-Zásah (HIT)* je počet případů, kdy jev byl předpovídan a skutečně nastal (správná předpověď jevu).
- *b-Chyba (MISS)* je počet případů, kdy jev nebyl předpovídan a skutečně nastal (chybná předpověď jevu).
- *c-Falešný poplach (FALSE ALARM)* - je počet případů, kdy jev byl předpovídan a ve skutečnosti nenastal (chybná předpověď jevu).



- *d-Správné vyloučení (CORRECT REJECTION)* - je počet případů, kdy jev nebyl předpovídan a ve skutečnosti nenastal (správná předpověď jevu) (Zacharov, 2004, s. 20).

Z kontingenční tabulky lze vyčíst, že kategorie *a* a *d* jsou pro předpověď příznivé, naopak *b* a *c* nepříznivé. Hodnota *d* velmi často převyšuje hodnotu *a* v případě výskytu extrémních jevů.

Pro verifikaci předpovědí bouřek byly použity tyto kritéria:

- Přesnost (Accuracy) předpovědi,
- Bias score (BIAS),
- Probability Of Detection (POD),
- False Alarm Ratio (FAR),
- Critical Success Index (CSI),
- Heidke Skill Scores (HSS),
- Probability Skill Score (PSS) a
- True Skill Statistics (TSS).

Tabulka 5.15 Verifikační kritéria, Skill Score (Zacharov, 2004, s. 22; cawcr.gov.au, 2017)

Verifikační kritérium	Kód	Rovnice	Hranice
Accuracy	A	$\frac{a + d}{a + b + c + d}$	$0 \leq A \leq 1$ $0 \leq A \leq 100$
Bias score	BIAS	$\frac{a + c}{a + b}$	$0 \leq \text{BIAS} < \infty$
Probability of Detection	POD	$\frac{a}{a + b}$	$0 \leq \text{POD} \leq 1$
False Alarm Ratio	FAR	$\frac{c}{a + c}$	$0 \leq \text{FAR} \leq 1$
Critical Success Index	CSI	$\frac{a}{a + b + c}$	$0 \leq \text{CSI} \leq 1$
Heidke Skill Score	HSS	$\frac{2(ad - bc)}{[(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)]}$	$-1 \leq \text{HSS} \leq 1$
Probability Skill Score	PSS	$\frac{a + d}{a + b + c + d}$	$0 \leq \text{PSS} \leq 1$
True Skill Statistics	TSS	$\frac{a}{a + b} - \frac{c}{c + d}$	$-1 \leq \text{TSS} \leq 1$

Výpočet jednotlivých verifikačních kritérií je realizován pro každý interval povětrnostní situace zvlášť, jak pro regiony ORP, tak ORP a místo výskytu konvektivních srážek sedmi NWP modelů podle:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5.18)$$

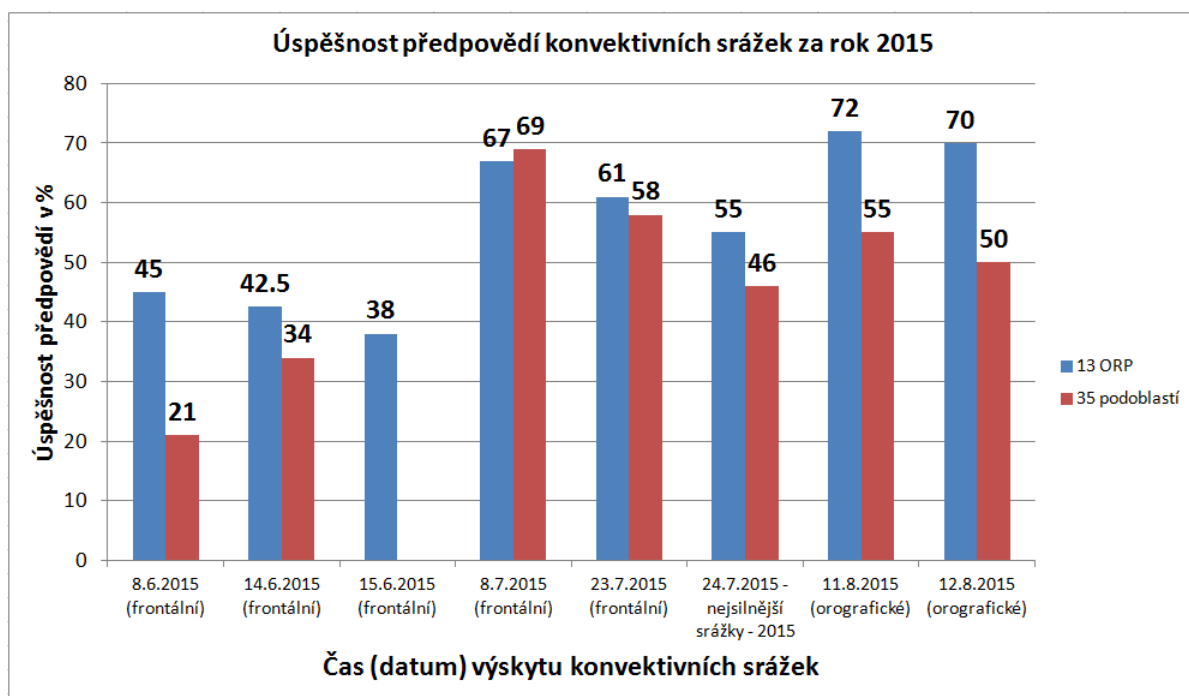
kde  $\sum x_i$  je suma kategorií *a*, *b*, *c*, *d* je vyhodnocena zvlášť pro každý 3hodinový interval povětrnostní situace. V grafech je pak uváděna průměrná hodnota verifikačního kritéria všech 63 povětrnostních situací (83 tříhodinových intervalů) počítaných pro intervaly hodinových intenzit 0 - 2 mm/hod., 3 - 9 mm/hod., 10 - 29 mm/hod. a 30 - 49 mm/hod.

### 5.2.1 Přesnost předpovědi (Accuracy)

Přesnost předpovědi (Accuracy) je jedním z hlavních verifikačních kritérií vyjadřujících poměr „správných“ předpovědí kategorie **a** a **d** k sumě všech kategorií (cawcr.gov.au, 2017). V níže uvedených grafech je vyjádřena v procentech. Při porovnání s ostatními výstupy verifikačních kritérií Skill Scores je dána rozsahem pravděpodobností s hodnotami od 0 do 1.

Přesnost předpovědi (Accuracy) v rámci celkového hodnocení úspěšnosti zahrnuje největší množství těchto výstupů:

- průměrná přesnost předchozí verze Algoritmu předpovědi bouří pro Regiony ORP a ORP za rok 2015,
- průměrná přesnost předpovědních výstupů Algoritmu pro regiony ORP,
- průměrná přesnost předpovědních výstupů Algoritmu pro ORP,
- průměrná úspěšnost předpovědi času výskytu srážek podle NWP modelů,
- průměrná přesnost předpovědi místa výskytu srážek podle NWP modelů,
- průměrná přesnost Algoritmu předpovědi denního a nočního výskytu srážek pro Regiony ORP,
- průměrná přesnost Algoritmu předpovědi denního a nočního výskytu srážek pro ORP,
- průměrná přesnost denního a nočního výskytu srážek (NWP modely) pro ORP,
- průměrná úspěšnost předpovědních výstražných informací (Intenzity bouřek) Systému Integrované Výstražné Služby ČHMÚ, Algoritmu předpovědi bouřek a European Storm Forecast Experiment (ESTOFEX).



*Graf 5.2: Přesnost předpovědí předchozí verze Algoritmu předpovědi bouřek na vybraných povětrnostních situacích za rok 2015 (vlastní zdroj)*

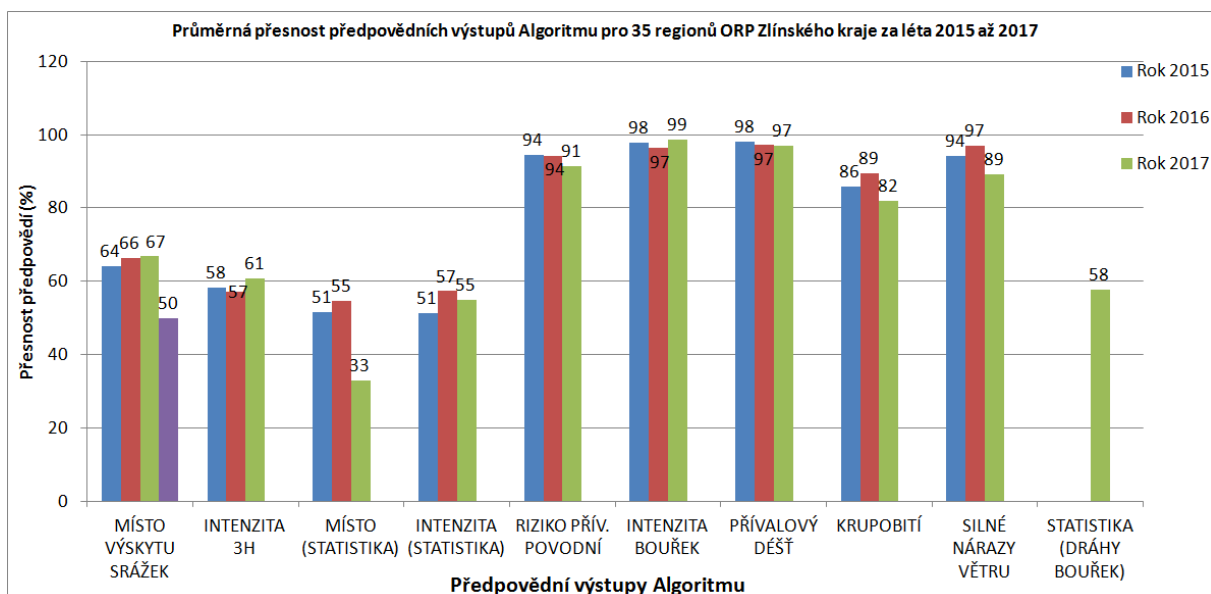
Z grafu 5.2 vyplývá trend růstu přesnosti předpovědí Algoritmu. V počátcích vzniku Algoritmu byly hodnoty úspěšnosti poměrně nízké. V průběhu postupného vyladování Algoritmu, přesnost předpovědí postupně narůstala v průměru až na 60 – 70 %. Nejvyšších hodnot přesnosti bylo dosaženo u posledních dvou situací, u nichž se vyskytly orografické bouřky.

Tabulka 5.16 ilustruje trend vývoje přesností předpovědí místa výskytu bouřek pro Algoritmu a NWP modelů. Oproti roku 2015 došlo u současné verze Algoritmu k 16 % nárůstu úspěšnosti předpovědí, což bylo dáno rozsáhlou optimalizací předpovědních parametrů Algoritmu.

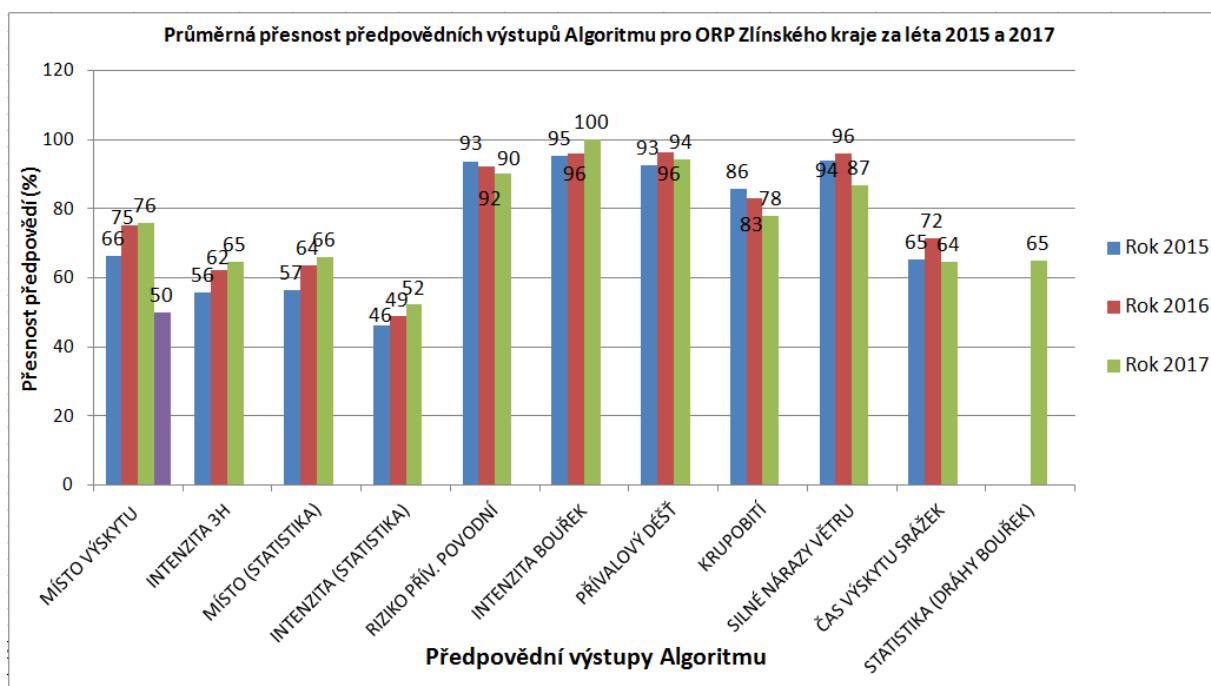
Tabulka 5.16 Vývoj přesnosti předpovědí místa výskytu bouřek u předchozí a současné verze Algoritmu a NWP modelů za léta 2015 a 2016.

Místo výskytu bouřek	Rok 2015	Rok 2016
Verze Algoritmu	Původní verze	Současná verze
ORP (ALG)	59	74
Regiony ORP (ALG)	48	68
Model ALADIN	40	49

Dalšími výstupy je **Průměrná přesnost Algoritmu předpovědi srážek pro Regiony ORP a ORP** za léta 2015 až 2017:



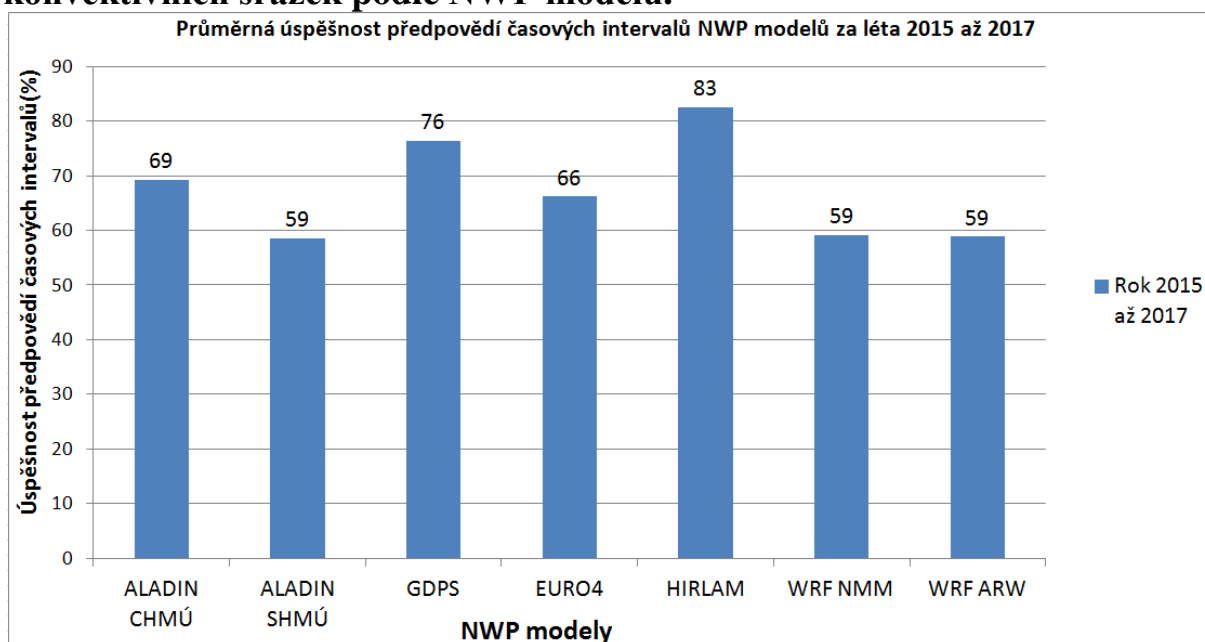
Graf 5.3: Průměrná přesnost předpovědních výstupů Algoritmu pro regiony ORP (vlastní zdroj)



Graf 5.4: Průměrná přesnost předpovědních výstupů Algoritmu pro ORP (vlastní zdroj)

Grafy 5.3 a 5.4 dokumentují průměrnou přesnost Algoritmu pro ORP, která byla o 5 až 10 % vyšší než u regionů ORP z důvodu větší předpovídané plochy zájmového území. Naopak, přesnost předpovědi nebezpečných jevů dosáhla vysokých hodnot kvůli vysokému podílu kategorie *d*.

Čtvrtým výstupem byla **Průměrná úspěšnost předpovědi času výskytu konvektivních srážek podle NWP modelů.**

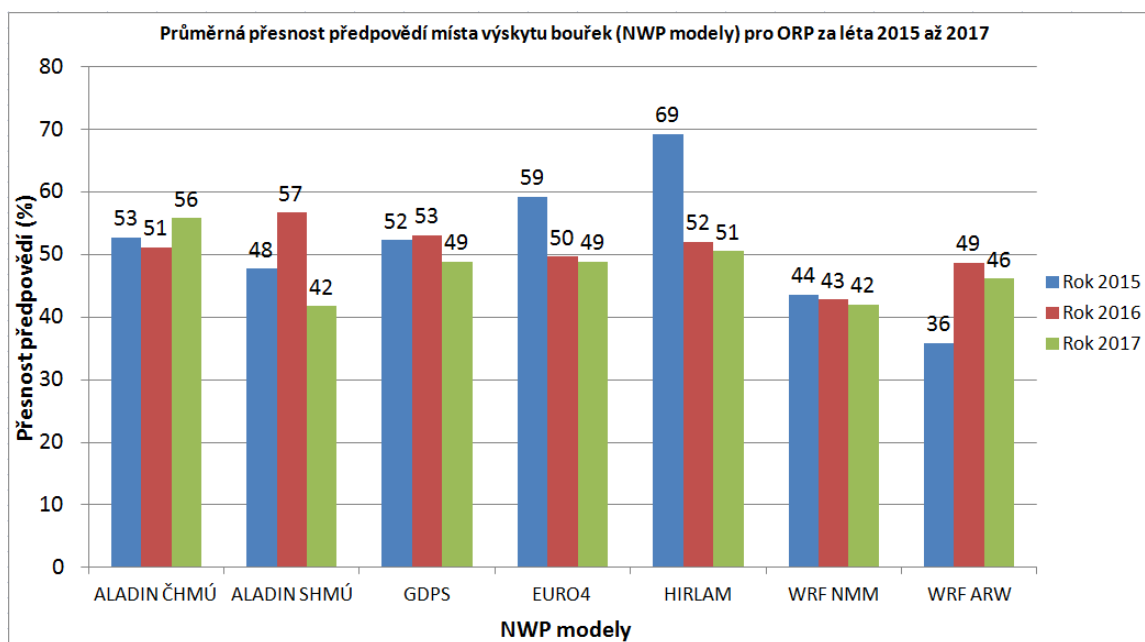


Graf 5.5: Průměrná úspěšnost předpovědi času výskytu srážek podle NWP modelů (vlastní zdroj)

Graf 5.5 uvádí výsledky hodnocení úspěšnosti předpovědi času výskytu srážek podle NWP modelů. Modely ALADIN pro Českou a Slovenskou republiku dosáhly nejvyšší úspěšnosti v roce 2016, kdy bylo nejvíce bouřkových situací. Modely WRF NMM a ARW sice používají nehydrostatické rovnice, paradoxně však měly nižší úspěšnost než u ostatních modelů. Důležitou informací je, že průměrná úspěšnost dosáhla 67 % pro všechny NWP modely za léta 2015 až 2017, což je více než u předpovědi místa výskytu srážek (NWP modely dosáhly za stejné období pouze 50 %). Vyšší úspěšnost předpovědi času výskytu je významná hlavně z hlediska stanovení časových intervalů, pro které jsou počítány všechny předpovědní výstupy Algoritmu.

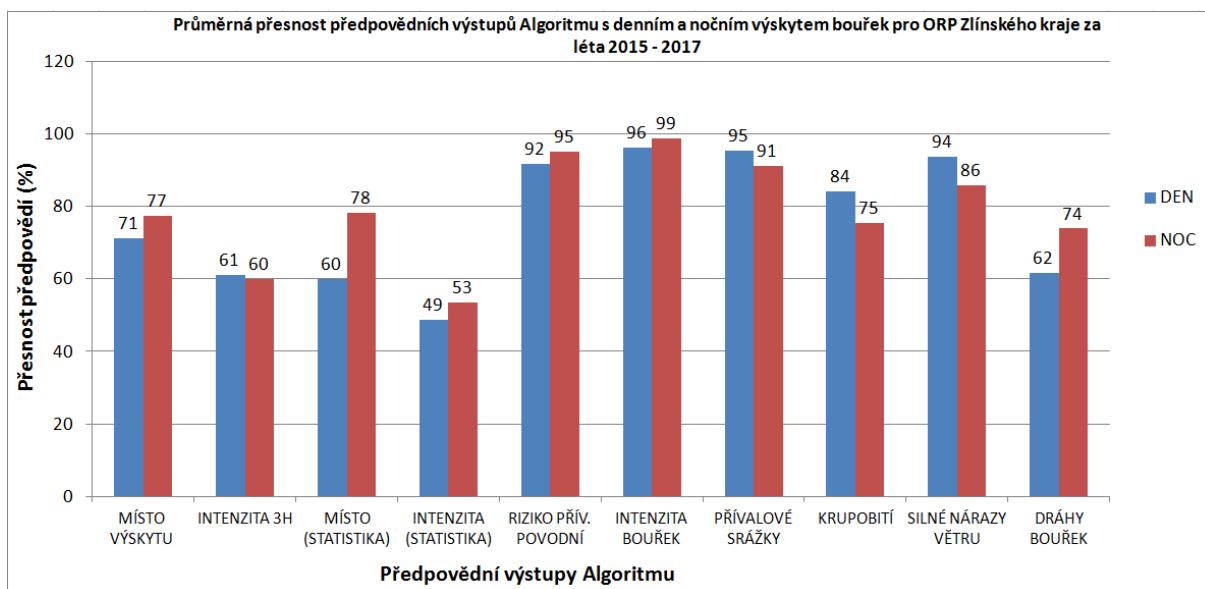
Z grafu 5.6 vyplývá, že nejvyšších hodnot přesnosti předpovědi místa výskytu bouřek pro ORP bylo dosaženo u NWP modelů HIRLAM a ALADIN ČHMÚ, i přestože tyto modely nemají nehydrostatické jádro. Naopak, model WRF, jehož jádro tvoří nehydrostatický model, nedosáhl hranice 50 %. Model ALADIN získal 55 % úspěšnost, což pro orientační předpověď postačuje.

Následující výstupy se týkají hodnocení **přesnosti předpovědi pro denní a noční výskyt bouřek za léta 2015 až 2017 (ORP).**



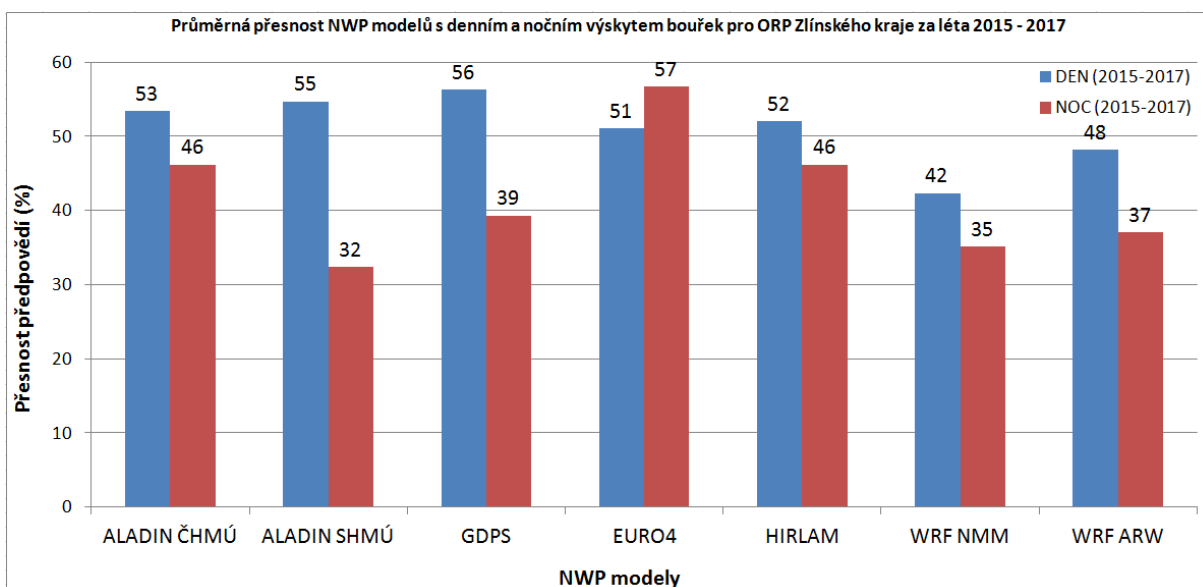
Graf 5.6: Průměrná přesnost předpovědí místa výskytu srážek NWP modelů pro ORP (vlastní zdroj)

Graf 5.7 uvádí, že přesnost předpovědí nočního výskytu bouřek u Algoritmu byla o několik procent vyšší než u denního výskytu bouřek. Mimo jiné, tento trend je pozitivní také z toho hlediska, že výskyt nočních bouřek bývá v praxi obtížněji předpověditelný.



Graf 5.7: Průměrná přesnost předpovědí denního a nočního výskytu srážek pro ORP (vlastní zdroj)

Pro srovnání s úspěšností denního a nočního místa výskytu bouřek je uveden také graf s **průměrnou přesností denního a nočního výskytu bouřek NWP modelů pro území ORP**:

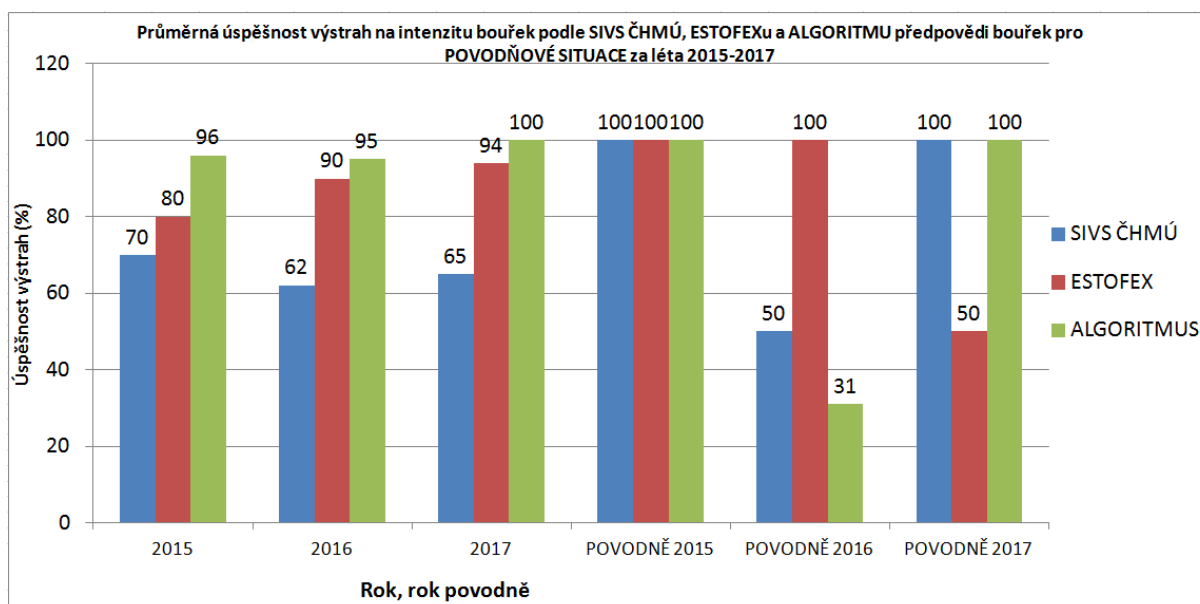


Graf 5.8: Průměrná přesnost předpovědí denního a nočního výskytu srážek (ORP) (vlastní zdroj)

Graf 5.8 dokumentuje trend průměrných hodnot přesností předpovědí denního a nočního výskytu bouřek, který byl opačný oproti výstupům Algoritmu. Předpověď denního výskytu bouřek byla podstatně přesnější než u nočního výskytu, zejména u nehydrostatických modelů WRF NMM a WRF ARW. Tento efekt se také výrazně projevil u modelu ALADIN, kde rozdíl činil 7 %.

Posledním výstupem je hodnocení úspěšnosti vydaných výstrah na nebezpečný jev Bouřka podle klasifikace nebezpečných jevů Systému Integrované Výstražné Služby ČHMÚ. Toto hodnocení se neopírá o verifikační kritérium Accuracy, nýbrž je počítáno jako aritmetický průměr úspěšností výstrah vydaných pro konkrétní dny. Úspěšnost výstrah byla srovnávána pro:

- Algoritmus předpovědi bouří, konkrétně pro předpovědní výstup Intenzity bouřek,
- předpovědní výstražnou informaci na jev „Bouřka“ Systému Integrované Výstražné Služby ČHMÚ (Meteoalarmu.eu),
- předpovědní Výstražnou informaci European Storm Forecast Experiment (ESTOFEX).



Graf 5.9: Srovnání úspěšnosti vydaných výstrah na jev „Bouřka“ (vlastní zdroj)

Z grafu 5.9 vyplývá, že předpovědi a výstrahy na nebezpečný jev Bouřka byly v mnoha případech SIVS ČHMÚ nadhodnocovány, čímž průměrná úspěšnost byla se pohybovala pouze mezi 60 – 70 %. Podstatně vyšší úspěšnosti bylo dosaženo Algoritmem u výstupu „Intenzita bouřek“ s průměrnou úspěšností 90 – 100 %. Takto vysoké úspěšnosti bylo dosaženo poslední optimalizací Algoritmu z hlediska doplnění výpočtu intenzity bouří o dílčí výstup „Rychlost pohybu bouří“. Úspěšnost výstrah vydaných ESTOFEXem nabývala v průměru podobných hodnot jako v případě SIVS ČHMÚ. Povodňová událost z roku 2016 byla charakteristická nižšími hodnotami u Algoritmu oproti ČHMÚ a ESTOFEXu. Paradoxní bylo, že i když se přívalová povodeň se vyskytla, tak maximální srážkové úhrny nedosáhly 30 mm/ hod., tudíž podle tohoto kritéria výstraha být vydána neměla.

### 5.2.2 Bias Score (BIAS)

Bias Score (BIAS) je verifikačním kritériem, který vyjadřuje poměr četnosti předpovídaných událostí k četnosti pozorovaných událostí.

BIAS udává informaci o tom, zda daný předpovědní systém předpověď podhodnocuje ( $BIAS < 1$ ) nebo nadhodnocuje ( $BIAS > 1$ ). Toto verifikační kritérium nehodnotí, do jaké míry předpověď odpovídá naměřeným hodnotám, měří pouze jejich relativní četnosti (cawcr.gov.au, 2017).



Tabulka 5.17 Průměrné hodnoty BIAS předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.

<b>Interval intenzity srážek (mm/hod.)/předpovědní výstupy Algoritmu</b>	<b>0 až 2</b>	<b>3 až 9</b>	<b>10 až 29</b>	<b>30 až 49</b>
Místo výskytu (Algoritmus)	1.10	1.05	1.02	0.96
Místo výskytu (ALADIN ČR)	0.24	0.30	0.32	0.04
Intenzita srážek (mm/3h)	0.97	0.89	0.79	0.42
Místo výskytu (statistika)	1.51	1.46	1.02	0.88
Intenzita 3h. (statistika)	1.49	1.32	0.80	0.42
Riziko přívalových povodní		1.00	1.59	1.08
Intenzita bouří				1.67
Přívalový déšť				3.67
Krupobití	2.79	1.56	1.63	0.50
Silné nárazy větru		2.00	1.10	

Z tabulky 5.17 vyplývají pro kritérium BIAS tyto hlavní závěry:

- Nejvyšší podíl nadhodnocených předpovědí Algoritmem se týkal předpovědí velmi slabých přeháněk s intenzitou 0 až 2 mm. Nejpriznivějšího skóre BIAS bylo dosaženo u intenzit 10 až 29 mm, při nichž se mohou za předpokladu extrémní nasycenosti půd vyskytnout přívalové povodně. Míra podhodnocenosti předpovědí byla nejvyšší u silných bouřek s intenzitou nad 30 mm/hod.
- Předpověď nebezpečných jevů, intenzity bouří a rizika přívalových povodní byla ve většině případů značně nadhodnocená. Nejlepšího skóre bylo dosaženo u místa výskytu srážek. Vysokou míru nadhodnocení měla předpověď rizika povodní, intenzity bouří a přívalových srážek.
- NWP modely podhodnocovaly předpověď místa výskytu srážek až o 60 až 70 % oproti Algoritmu.

### 5.2.3 Probability of Detection (POD)

Probability of Detection (POD) - pravděpodobnost detekce hitů je verifikačním kritériem, která je charakterizována jako podíl správných předpovědí k celkovému počtu předpokladů, že jev nastane. Toto kritérium je citlivé na výskyt kategorie *a* a ignoruje výskyt falešných poplachů. POD je vhodným kritériem pro posouzení výskytu vzácných jevů. Současně je velmi často používáno pro pravděpodobnostní předpovědi (cawcr.gov.au, 2017; Zacharov, 2004, s. 20).

Tabulka 5.18 Průměrné hodnoty POD předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.

<b>Interval intenzity srážek (mm/hod.)/předpovědní výstupy Algoritmu</b>	<b>0 až 2</b>	<b>3 až 9</b>	<b>10 až 29</b>	<b>30 až 49</b>
Místo výskytu (Algoritmus)	0.71	0.73	0.79	0.96
Místo výskytu (ALADIN ČR)	0.24	0.30	0.32	0.04
Intenzita srážek (mm/3h)	0.58	0.57	0.55	0.42
Místo výskytu (statistika)	0.74	0.71	0.75	0.88
Intenzita 3h. (statistika)	0.61	0.58	0.53	0.42
Riziko přívalových povodní			0.43	0.50
Intenzita bouří				0.67
Přívalový déšť				0.67
Krupobití	0.50	0.24	0.37	0.41
Silné nárazy větru		1.00	0.40	

Tabulka 5.18 uvádí průměrné hodnoty POD v závislosti na intervalech intenzity srážek pro předpovědní výstupy Algoritmu týkající se území ORP Zlínského kraje.

Hlavními závěry v hodnocení poměru správných předpovědí (POD) k předpovědním výstupům algoritmu a modelu ALADIN jsou:

- Místo výskytu srážek u Algoritmu a statistiky má podobný trend průměrných hodnot POD. Čím vyšší je intenzita srážek, tím je vyšší POD pro předpověď místa výskytu.
- Předpověď krupobití a rizika přívalových povodní měla mírně rostoucí trend hodnot POD pro ORP Zlínského kraje.
- Průměrné hodnoty POD u NWP modelu ALADIN dosahovaly při intenzitách 3 až 29 mm/hod. nízkých hodnot, kolem 0,2 - 0,3.
- Úspěšnost poměru hitů u povodňových situací měla podobný trend jako u souhrnného přehledu všech předpovědních výstupů Algoritmu za léta 2015 a 2016.

#### 5.2.4 False Alarm Ratio (FAR)

False Alarm Ratio (FAR) – poměr falešných poplachů je verifikačním kritériem, definující podíl falešných poplachů k celkovému počtu předpověděných jevů. Toto kritérium je citlivé na výskyt falešných poplachů a ignoruje výskyt chyb. FAR by měl být používán v kombinaci s kritériem POD (cawcr.gov.au, 2017; Zacharov, 2004, s. 20).

Průměrné hodnoty FAR v závislosti na intervalech intenzity srážek jsou uvedeny v Tabulce 30 pro předpovědní výstupy týkající se ORP Zlínského kraje.

Tabulka 5.19 Průměrné hodnoty FAR předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.

<b>Interval intenzity srážek (mm/hod.)/předpovědní výstupy Algoritmu</b>	<b>0 až 2</b>	<b>3 až 9</b>	<b>10 až 29</b>	<b>30 až 49</b>
Místo výskytu (Algoritmus)	0.24	0.26	0.19	0.00
Místo výskytu (ALADIN ČR)	0.45	0.32	0.18	0.00
Intenzita srážek (mm/3h)	0.25	0.33	0.25	0.00
Místo výskytu (statistika)	0.47	0.34	0.21	0.00
Intenzita 3h. (statistika)	0.52	0.37	0.26	0.00
Riziko přívalových povodní	0.67	1.00	0.90	0.54
Intenzita bouří	1.00	1.00	1.00	0.60
Přívalový déšť	0.86	1.00	1.00	0.82
Krupobití	0.61	0.85	0.64	0.18
Silné nárazy větru	0.75	0.92	0.91	1.00

Z tabulky 5.19 vyplývají tyto hlavní závěry:

- Trend vývoje hodnot FAR v závislosti na intenzitě srážek je u většiny předpovědních výstupů velmi podobný. S rostoucí intenzitou srážek současně rostl poměr falešných poplachů. Nejlepšího skóre FAR bylo dosaženo u intenzity srážek nad 30 mm/hod.
- Předpovědní výstupy rizika přívalových povodní a nebezpečných jevů měly zpočátku velmi vysoký podíl falešných poplachů (0,7 až 1). Hodnoty FAR se postupně snižovaly, stejně jako v případě předpovědi místa a intenzity výskytu srážek, což je důležitá pozitivní vlastnost u Algoritmu pro předpověď nebezpečných jevů, které mohou vyvolat přívalové povodně.
- Trend průměrných hodnot FAR pro model ALADIN měl podobný vývoj jako u výstupů Algoritmu. Čím vyšší intenzitu srážky měly, tím hodnoty FARu byly nižší.
- Předpovědní výstupy místa a intenzity bouří dosáhly nejnižších hodnot FARu. Vysoké hodnoty FARu se vyskytly u rizika přívalových povodní a nebezpečných jevů. Průměrná hodnota FAR u modelu ALADIN byla na rozdíl od předchozích kritérií téměř shodná s podílem falešných poplachů jako u Algoritmu.

### 5.2.5 Critical Success Index (CSI)

Critical Success Index (CSI) je verifikačním kritériem, která vyjadřuje podíl správných předpovědí k celkovému počtu jevů (N). CSI je citlivý na výskyt hitů a současně zohledňuje výskyt chyb a falešných poplachů. Toto kritérium je určeno především pro hodnocení úspěšnosti předpovědi řídkých jevů, jelikož

čím řidší jev se vyskytuje, tím se rozdíl N-d zmenšuje a CSI zvětšuje. CSI je tedy závislé na frekvenci výskytu předpovídaného jevu (cawcr.gov.au, 2017; Zacharov, 2004, s. 21).

Tabulka 5.20 Průměrné hodnoty CSI předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.

<b>Interval hodinové intenzity (mm/hod.)/Předpovědní výstupy pro ORP Zlín. kraje</b>	<b>0 až 2</b>	<b>3 až 9</b>	<b>10 až 29</b>	<b>30 až 49</b>
Místo výskytu (Algoritmus)	0.55	0.57	0.68	0.96
Místo výskytu (ALADIN ČR)	0.17	0.24	0.29	0.04
Intenzita srážek (mm/3h)	0.42	0.44	0.47	0.42
Místo výskytu (statistika)	0.46	0.47	0.63	0.88
Intenzita 3h. (statistika)	0.33	0.37	0.44	0.42
Riziko přívalových povodní	0.00	0.00	0.07	0.23
Intenzita bouří	0.00	0.00	0.00	0.33
Přívalový déšť	0.00	0.00	0.00	0.17
Krupobití	0.17	0.07	0.18	0.35
Silné nárazy větru	0.00	0.08	0.08	0.00

Hlavními závěry v hodnocení podílu správných předpovědí k celkovému počtu jevů (CSI) k předpovědním výstupům Algoritmu a modelu ALADIN, plynoucí z tabulky 5.20, jsou:

- Hodnoty CSI předpovědi místa výskytu s rostoucí intenzitou má vzestupný trend. Naopak, předpověď obou výstupů intenzity srážek mírně klesá nebo zůstává konstantní.
- Většina předpovědních výstupů mimo předpověď silných nárazů větru měla vzestupný trend průměrných hodnot CSI v závislosti na rostoucí intenzitě.
- Hodnoty CSI dosáhly nejvyšších hodnot při intenzitách srážek 3 až 9 a 10 až 29 mm/hod. Naopak, při velmi slabých srážkách a současně při intenzitě silných bouří, hodnoty CSI byly nejnižší.
- Maximálních průměrných hodnot CSI (0,96 při intenzitě nad 30 mm/hod.) bylo dosaženo u předpovědi místa výskytu. Minimální hodnoty CSI byly zaznamenány u rizika přívalových povodní a nebezpečných jevů.

### 5.2.6 Heidke Skill Score (HSS)

Heidke Skill Score (HSS) je verifikačním kritériem, které je zaměřeno na frakční zdokonalování prognózy prostřednictvím standardních metod. HSS je jedno z nejpoužívanějších verifikačních kritérií, nicméně není jednoduše

vysvětlitelné jako v případě ostatních kritérií TSS a CSI. HSS není závislé na frekvenci předpovídaných jevů. Toto kritérium se používá zejména v klimatologii, tudíž není ideálním kritériem pro hodnocení vzácných jevů (cawcr.gov.au, 2017; Zacharov, 2004, s. 21).

Tabulka 5.21 Průměrné hodnoty HSS předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.

<b>Interval intenzity srážek (mm/hod.)/předpovědní výstupy Algoritmu</b>	<b>0 až 2</b>	<b>3 až 9</b>	<b>10 až 29</b>	<b>30 až 49</b>
Místo výskytu (Algoritmus)	0.30	0.27	0.16	0.00
Místo výskytu (ALADIN ČR)	0.06	0.09	0.03	0.00
Intenzita srážek (mm/3h)	0.21	0.14	0.01	0.00
Místo výskytu (statistika)	0.12	0.16	0.16	0.00
Intenzita 3h. (statistika)	0.01	0.11	0.07	0.00
Riziko přívalových povodní	0.00	-0.01	0.06	0.00
Intenzita bouří	0.00	0.00	0.00	0.34
Přívalový déšť	0.00	0.00	0.00	-0.04
Krupobití	0.19	0.07	0.15	-0.05
Silné nárazy větru	0.00	0.10	0.09	0.00

Z tabulky 5.21 vyplývají tyto hlavní závěry v hodnocení kritéria HSS k předpovědním výstupům Algoritmu a modelu ALADIN:

- Trend průměrných hodnot HSS lineárně klesal od intervalu intenzit 3 - 9 mm/hod. Čím vyšší intenzitu srážky měly, tím nižší byly hodnoty HSS.
- Hodnoty HSS u předpovědních výstupů rizika přívalových srážek a nebezpečných jevů byly velmi nízké (záporné hodnoty při maximální intenzitě srážek). Prudký růst hodnot HSS vykázal pouze předpovědní výstup intenzita bouří, u kterého byla zaznamenána hodnota 0,34 při intenzitě nad 30 mm/hod.
- Model ALADIN dosáhl nejvyšší hodnot HSS při slabých intenzitách do 9 mm/hod. S rostoucí intenzitou srážek mírně klesaly hodnoty HSS.

### 5.2.7 Probability Skill Score (PSS)

Probability Skill Score (PSS) je verifikačním kritériem, které vyjadřuje poměr správných předpokladů k celkovému počtu jevů. PSS dává stejnou váhu kategoriím *a* i *d*, na rozdíl od kritéria HSS. PSS je o něco vhodnějším kritériem pro hodnocení řídkých jevů než HSS z hlediska citlivosti na hity a správné vyloučení (cawcr.gov.au, 2017; Zacharov, 2004, s. 21).

Tabulka 5.22 Průměrné hodnoty PSS předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.

<b>Interval intenzity srážek (mm/hod.)/předpovědní výstupy Algoritmu</b>	<b>0 až 2</b>	<b>3 až 9</b>	<b>10 až 29</b>	<b>30 až 49</b>
Místo výskytu (Algoritmus)	0.69	0.69	0.69	0.96
Místo výskytu (ALADIN ČR)	0.49	0.57	0.50	0.04
Intenzita srážek (mm/3h)	0.59	0.58	0.58	0.42
Místo výskytu (statistika)	0.56	0.54	0.54	0.88
Intenzita 3h. (statistika)	0.45	0.45	0.45	0.42
Riziko přívalových povodní	0.83	0.91	0.91	0.69
Intenzita bouří	0.96	0.94	0.94	0.85
Přívalový déšť	0.81	0.81	0.81	0.62
Krupobití	0.71	0.76	0.76	0.73
Silné nárazy větru	0.86	0.94	0.94	0.54

Tabulka 5.22 uvádí tyto hlavní závěry v hodnocení kritéria PSS k předpovědním výstupům Algoritmu a modelu ALADIN:

- Konstantní vývoj trendu s mírným růstem u intenzity nad 10 mm/hod. byl zaznamenán u většiny předpovědních výstupů mimo tříhodinovou intenzitu srážek, u které hodnoty PSS klesaly při nejvyšší intenzitě srážek.
- S rostoucí intenzitou, zejména u intenzity nad 30 mm/hod., mírně klesala průměrná hodnota PSS.
- Průměrné hodnoty PSS předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů měly u povodňových situací opačný trend oproti průměrnému přehledu. Předpověď místa výskytu a intenzit dosahovala průměrně hodnot 0,7 až 0,9, ostatní výstupy 0,4 až 0,8. Velký rozdíl v hodnotách PSS byl zaznamenán mezi Algoritmem a NWP modely u předpovědi místa výskytu.

### 5.2.8 True Skill Statistics (TSS)

True Skill Statistics (TSS) je verifikačním kritériem, které je definováno jako rozdíl kritérií pravděpodobností detekce (POD) a pravděpodobností falešného alarmu (POFD). TSS je citlivé na hity a falešné poplchy. Současně velmi málo zohledňuje kategorii *d*, tudíž není příliš vhodným kritériem pro předpověď vzácných jevů (cawcr.gov.au, 2017; Zacharov, 2004, s. 21).

Tabulka 5.23 Průměrné hodnoty TSS předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.

<b>Interval intenzity srážek (mm/hod.)/předpovědní výstupy Algoritmu</b>	<b>0 až 2</b>	<b>3 až 9</b>	<b>10 až 29</b>	<b>30 až 49</b>
Místo výskytu (Algoritmus)	0.28	0.24	0.19	
Místo výskytu (ALADIN ČR)	0.06	0.13	0.05	
Intenzita srážek (mm/3h)	0.22	0.08	0.00	
Místo výskytu (statistika)	0.06	0.10	0.20	
Intenzita 3h. (statistika)	-0.11	0.00	0.04	
Riziko přívalových povodní		-0.08	0.23	0.00
Intenzita bouří				0.37
Přívalový déšť				-0.23
Krupobití	0.30	0.10	0.18	-0.09
Silné nárazy větru		0.82	0.29	

Hlavními závěry v hodnocení kritéria TSS k předpovědním výstupům Algoritmu a modelu ALADIN, které vychází z Tabulky 5.23, jsou:

- Trend vývoje hodnot TSS byl u většiny výstupů podobný, s typickým poklesem při výskytu nejvyšších intenzit srážek (mimo výstupy místa výskytu a intenzity srážek).
- S rostoucí intenzitou nad 10 mm/hod. současně klesaly průměrné hodnoty TSS. Nejvyšší hodnotu TSS (až 0,82) dosáhla předpověď silných nárazů větru v závislosti na rostoucí intenzitě srážek. Opačná tendence byla zaznamenána u předpovědi intenzity bouří, kde úspěšnost rostla v závislosti na vzestupných hodnotách intenzity srážek.
- Rostoucí trend hodnot TSS u modelu ALADIN nastal při nízkých intenzitách do 9 mm/hod. Sestupnou tendenci hodnot TSS byla charakteristická při rostoucí intenzitě srážek.

### 5.2.9 Závěr verifikace předpovědí Algoritmu a NWP modelů

Závěrem jsou uvedeny hlavní poznatky týkající se verifikace předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů pro léta 2015 až 2017.

Přesnost Algoritmu předpovědi bouřek byla potvrzena 66 % průměrnou úspěšností pro regiony ORP a 73 % pro předpověď místa výskytu konvektivních srážek za léta 2015 - 2017. Předpověď intenzity bouří dosáhla průměrně 97 % úspěšnosti a 92 % úspěšnosti předpovědi rizika přívalových povodní. Úspěšnost předpovědi místa výskytu srážek u povodňových událostí dosáhla průměrně kolem 82 %, intenzity bouří 100 % a rizika přívalové povodně 82 %. Ve srovnání se sedmi NWP modely s horizontálním rozlišením pod 11 km je

úspěšnost předpovědi místa výskytu konvektivních srážek Algoritmu přibližně o 20% vyšší, čímž naplňuje minimální podmínku 50 % přesnosti předpovědi pro prognostické účely. Současně s tím, úspěšnost předpovědi intenzity bouřek činí v průměru 97 %. A to je ve srovnání s 66 % úspěšnosti vydaných výstrah SIVS ČHMÚ poměrně výrazný rozdíl z hlediska počtu falešných poplachů na vydané výstrahy pro nebezpečný jev „Bouřka“.

Průměrné hodnoty BIAS pro předpovědní výstupy Algoritmu, zejména pak u předpovědi místa výskytu, ale i některých nebezpečných jevů, byly charakterické minimálním rozdílem podhodnocených a nadhodnocených předpovědí. NWP modely dosáhly v průměru podstatně horších výsledků z hlediska podhodnocování předpovědí než u Algoritmu.

Předpovědní výstupy Algoritmu předpovědi bouří dosáhly celkem dobré úspěšnosti poměru předpovědi správných předpovědí k celkovému počtu předpokladů, že jev nastane. Hodnoty POD byly vyšší u předpovědi místa výskytu než u celkové intenzity bouřek, rizika přívalových povodní a nebezpečných jevů. Tato skutečnost vyplývá ze samotné definice kritéria POD.

Většina předpovědních výstupů Algoritmu dosáhla společně s výstupy NWP modelů, mimo předpověď nebezpečných jevů rizika přívalové povodně a intenzity bouří, poměrně nízkých hodnot FARu. Podíl falešných poplachů byl nízký v kontrastu s vysokými hodnotami kritéria POD (0,8-1). S rostoucí intenzitou srážek podíl falešných poplachů klesal téměř lineárně a tím narůstal podíl správných předpovědí.

Tabulka 5.24 Průměrné hodnoty verifikačních kritérií předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů pro 63 situací za léta 2015 až 2017.

<b>Výstupy/ verif. kritéria</b>	<b>Accuracy</b>	<b>BIAS</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>	<b>HSS</b>	<b>PSS</b>	<b>TSS</b>
Místo výskytu (Algoritmus)	0.73	1.03	0.77	0.21	0.64	0.21	0.73	0.23
Intenzita 3h.	0.61	0.88	0.62	0.24	0.50	0.10	0.61	0.11
Místo výskytu (statistika)	0.64	1.15	0.74	0.24	0.58	0.16	0.65	0.16
Riziko přív. povodní	0.92	1.61	0.70	0.88	0.08	0.06	0.90	0.17
Intenzita bouří	0.97			0.85		0.05	0.97	
Přívalový déšť	0.94			0.96		0.02	0.95	
Krupobití	0.82	0.96	0.42	0.70	0.10	0.07	0.83	0.07
Nárazy větru	0.92	1.26	0.51	0.74	0.21	0.08	0.91	0.12
Dráhy bouřek (statistika)	0.65	1.24	0.75	0.27	0.55	0.17	0.65	0.18
Výskyt srážek (m. ALADIN)	0.52	0.45	0.37	0.35	0.28	0.09	0.52	0.13
NWP modely	0.50	0.51	0.41	0.36	0.29	0.07	0.50	0.10



Tabulka 5.24 uvádí nejvyšší hodnoty CSI, kterých bylo dosaženo pro předpověď místa výskytu a částečně intenzity srážek v kontrastu s velmi nízkými hodnotami CSI u výstupů rizika přívalových srážek, celkové intenzity bouřek a nebezpečných jevů. Trend růstu hodnot CSI předpovědi místa a intenzity srážek byl stejný pro regiony ORP a ORP. Rostoucí trend byl současně zaznamenán i pro druhou skupinu předpovědních výstupů mimo předpověď silných nárazů větru. NWP modely vykázaly opačný trend vývoj hodnot CSI, kdy hodnoty zpočátku rostly, avšak při maximální intenzitě prudce klesaly.

Mezi celkovým přehledem předpovědních výstupů a povodňových situací byly značné rozdíly v hodnotách HSS. Rozdíl hodnot HSS, cca až 20 %, se týkal především předpovědních výstupů rizika přívalových povodní, intenzity bouřek, krupobití a silných nárazů větru. Obecným trendem u většiny grafů byl pokles hodnot HSS s rostoucí intenzitou srážek. Z celkového hodnocení vyplývá, že u všech předpovědních výstupů byly zjištěny poměrně nízké hodnoty HSS, které nepřesáhly hranici 0,35 ve srovnání s ostatními kritérii, u kterých byly hodnoty podstatně vyšší.

Předpověď místa výskytu pro hodnoty PSS měla rostoucí trend v závislosti na růstu intenzity srážek, a současně klesající trend v případě předpovědi nebezpečných jevů, rizika přívalových povodní a intenzity bouřek. Stejný trend byl detekován i u modelu ALADIN. Průměrné hodnoty PSS byly celkově vyšší než u kritéria HSS, což bylo dáno vysokým podílem kategorie *d*.

Grafy se závislostí hodnot TSS na intenzitě měly stejný průběh, kde platilo, že s intenzitou nad 10 mm/hod. klesaly průměrné hodnoty TSS. V průměru všech výstupů byly hodnoty TSS velmi nízké. TSS se hodnotově velmi podobá kritériu HSS, čímž bylo potvrzeno, že není vhodným kritériem pro hodnocení předpovědi vzácných jevů.

### **5.2.10 Hodnocení úspěšnosti předpovědních parametrů NWP modelů**

Tato kapitola je věnována hodnocení úspěšnosti předpovědních parametrů NWP modelů, které jsou používány pro výpočet výstupů Algoritmu předpovědi bouří. V hodnocení jsou zahrnuty situace, při nichž byl zaznamenán výskyt konvektivních srážek, včetně tří povodňových událostí v letech 2015 až 2017.

Do hodnocení úspěšnosti předpovědi vstupují tyto předpovědní parametry NWP modelů a jejich skupiny:

1. Předpovědní parametry vlastností atmosféry:
  - 26 indexů instability a meteorologických prvků a
  - relativní vlhkost a směr větru v hladinách 1000 – 300 hPa, rychlost větru v hladinách 850 – 300 hPa ve srovnání se sondážními výstupy v Prostějově.
2. Předpovědní parametry přízemní a mezní vrstvy atmosféry (zkráceně „Lokální vlivy“):
  - relativní vlhkost ve 2 m nad zemí ve srovnání se staniční výstupy,
  - rychlost větru v 10 m nad zemí (staniční výstupy),

- konvergence vlhkosti vzduchu v hladině 0 – 1 km nad zemí (kombinace parametrů MOCON – model ALADIN a MFDIV – model WRF ARW) a
- orografických vlivů v mezní a přízemní vrstvě atmosféry (kombinace parametrů MTV orographic lift – model GFS a Orographic lifting – model WRF ARW) ve srovnání s radarovými a staničním měřením srážek.

Průměrná úspěšnost předpovědních parametrů byla stanovena podle vzorce aritmetického průměru a na základě četnosti správných předpovědí vlastností atmosféry. Konvergence proudění a orografické vlivy byly hodnoceny stejnými verifikačními kritérii jako u předpovědních výstupů Algoritmu.

Předpovědní parametry vlastností atmosféry byly hodnoceny pro území obcí s rozšířenou působností a druhá skupina parametrů podle jejich regionů.

Tabulka 5.25 Průměrná úspěšnost předpovědních parametrů NWP modelů.

Vlastnosti atmosféry	Průměrná úspěšnost (%)
Indexy instability, meteorologické prvky	63
Relativní vlhkost 1000-300 hPa	42
Směr větru 1000-300 hPa	86
Rychlost větru 850-300 hPa (m/s)	85
Lokální vlivy	
Přízemní vlhkost ve 2 m nad zemí	60
Rychlost větru v 10 m nad zemí	62

Z tabulky 5.25 vyplývá, že nejvyšší průměrné úspěšnosti dosáhly skupiny parametrů směru a rychlosti větrů v hladinách 1000 – 300 hPa. Tyto skupiny parametrů jsou velmi důležité pro předpověď intenzity bouří, rizika přívalového deště a zejména rizika přívalových povodní. Průměrná úspěšnost všech skupin parametrů přesáhla 50 %, takže tyto parametry je možné využít pro předpovědi konvektivních srážek a nebezpečných jevů v budoucnosti. Podrobnější výsledky hodnocení 26 indexů instability a meteorologických prvků pro léta 2015 až 2017, včetně jednotlivých povodňových událostí, jsou součástí

#### **PŘÍLOHA P 1.**

Druhou hodnocenou skupinou lokálních podmínek jsou vlivy konvergence vlhkosti vzduchu a orografie v přízemní a mezní vrstvě atmosféry, uvedené v Tabulce 5.26:

Tabulka 5.26 Verifikační kritéria vlivu konvergence a orografických vlivů.

Název verifikačního kritéria	Vliv konvergence vlhkosti vzduchu	Orografické vlivy
Accuracy	0.64	0.55
BIAS	1.02	2.99
POD	0.67	0.57
FAR	0.35	0.59
CSI	0.48	0.29
HSS	0.19	0.01
PSS	0.64	0.55
TSS	0.21	0.01

Tabulka 5.26 uvádí průměrné hodnoty jednotlivých verifikačních kritérií pro poslední dvě skupiny parametrů lokálních vlivů, které jsou implementovány v řadě dílčích předpovědních kroků a hlavních předpovědních výstupů. Průměrná přesnost obou skupin parametrů je o trochu nižší ve srovnání například s pravděpodobností místa výskytu srážek Algoritmu. Nicméně, obě skupiny parametrů byly srovnávány se staničními a radarovými výstupy a takto vysoká úspěšnost potvrzuje, že tyto parametry jsou vhodným nástrojem pro zpřesněnou předpověď místa výskytu srážek a dalších předpovědních výstupů Algoritmu.

### 5.3 Verifikace předpovědí povodňových situací

V rámci této kapitoly bylo provedeno hodnocení úspěšností předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů na třech povodňových událostech, které se vyskytly v letech 2015, 2016 a 2017 ve Zlínském kraji. U všech těchto událostí se vyskytly lokální přívalové povodně, doprovázené nebezpečnými jevy, které způsobily škody na majetku v řádech desítek miliónů korun. Předpověď Algoritmu byla počítána z výstupů NWP modelů s 12hodinovým předstihem pro všechny povodňové situace.

#### 5.3.1 Povodňová událost ze dne 24. července 2015

Povodňová událost ze dne 24. července 2015 byla charakteristická svým neočekávaným vznikem a rychlým průběhem, což naplnilo typické znaky přívalové povodně. Předpovědní výstražné informace na nebezpečné jevy nebyla vydána. Nejintenzivnější srážky byly zaznamenány v ORP Vsetín a především v ORP Zlín, kde se vyskytla lokální přívalová povodeň.

Hlavní synoptickou příčinou vzniku přívalové povodně byla zvlněná studená frontě nad západním Slovenskem v teplém a vlhkém jihozápadním proudění.

Faktory, které významně přispěly ke vzniku přívalové povodně v ORP Zlín, byly:

- Intenzivní konvektivní srážky, při nichž se na základě vysoké radiolokační odrazivosti vyskytlo intenzivní krupobití.
- Pomalý pohyb srážek s výrazným stříhem větru.

Tabulka 5.27 Srovnání předpovědních výstupů Algoritmu s reálným stavem pro interval 18 - 21 hod. 24. 7. 2015.

<b>24.7.2015 (18-21:00)</b>	<b>Předpo- věď</b>	<b>Real stav</b>	<b>Před- pověď</b>	<b>Real stav</b>	<b>Předpo- věď</b>	<b>Před- pověď</b>	<b>Před- pověď</b>
ORP Zlínského kraje pro intervaly 18-21:00	Interval intenzity srážek (mm/ 3hod.)	1-hod. srážkové úhrny (stanice)	Inten- zita srážek (mm/ hod.)	Stupeň nasyce- ní území (FFG- CZ)	Rychlost pohybu bouře	Riziko neb. jevů	Riziko příva- lových povodní
Uherské Hradiště	0	7 (Staré Hutě)	0	slabé	nízká	0	0
Otrokovice	3-9	0	0	slabé	nízká	0	nízké
Kroměříž	3-9	6 Kroměříž	0	slabé	bez pohybu	nízké	nízké
Holešov	3-9	6 (Holešov)	0	slabé	bez pohybu	nízké	nízké
<b>Zlín (povodeň)</b>	<b>10-29</b>	<b>23 mm (Zlín)</b>	<b>0</b>	<b>RVK</b>	<b>bez pohybu</b>	<b>vysoké</b>	<b>vysoké</b>
Bystřice	3-9	4 (Bystřice)	0	slabé	bez pohybu	nízké	nízké
Valašské Meziříčí	0	0	0	slabé	bez pohybu	0	nízké
Rožnov	3-9	0	0	RVK	bez pohybu	0	nízké
Vsetín	3-9	12 (Maruška)	0	RVK	bez pohybu	0	nízké
Vizovice	3-9	4 (Vizovice)	0	RVK	nízká	nízké	nízké
Valašské Klobouky	3-9	0	0	slabé	vysoká	0	0
Luhačovice	3-9	0	0	slabé	vysoká	0	0
Uh. Brod	0	0	0	slabé	vysoká	0	0

Tabulka 5.27 uvádí srovnání dílčích výstupů předpovědi rizika příalové povodně Algoritmu s reálným stavem. Přívalová povodeň se vyskytla v ORP Zlín, což bylo těmito výstupy Algoritmu potvrzeno. Zejména pak výstupy stacionárního pohybu bouře v kombinaci s vysokým rizikem výskytu nebezpečných jevů a mírného nasycení predikovaly podmínky, příznivé pro vznik přívalové povodně.

Tabulka 5.28 Verifikační kritéria předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů pro povodňovou událost ze dne 24. 7. 2015

<b>Předpovědní výstup/ verifikační kritérium</b>	<b>Accuracy</b>	<b>BIAS</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>	<b>HSS</b>	<b>TSS</b>
Místo výskytu srážek	0.69	0.82	0.73	0.11	0.67	0.16	0.23
Místo výskytu srážek (model ALADIN)	0.77	0.82	0.90	0.18	0.75	0.26	0.23
Intenzita 3 hod.	0.46	0.55	0.45	0.17	0.42	0.04	-0.05
Výskyt srážek (statistika)	0.46	0.29	0.14	0.50	0.13	0.04	-0.02
Riziko přívalových povodní	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00
Krupobití	0.92	1.33	0.78	0.42	0.50	0.55	0.59
Silné nárazy větru	0.92	1.00	0.80	0.00	0.80	0.83	0.80

Z tabulky 5.28 vyplývá, že většina předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelu ALADIN byla mírně podhodnocená, s výjimkou předpovědi nebezpečných jevů a rizika přívalové povodně. Vysokých hodnot poměru úspěšnosti předpovědi hitů bylo dosaženo u předpovědi místa a intenzity konvektivních srážek. Podíl falešných poplachů byl u většiny výstupů minimální, pouze u statistické předpovědi a krupobití byl vyšší. Nejlepších hodnot verifikačních kritérií bylo dosaženo u předpovědi rizika přívalové povodně, což potvrdil skutečný stav. Důležitým předpovědním výstupem je předpověď času výskytu prostřednictvím NWP modelů, jejíž úspěšnost byla 67 %.

První intenzivní srážky se zpočátku vyskytovaly nad oblastí Nízkých Tater na Slovensku. Při svém postupu na sever srážky se začaly pohybovat proti směru hodinových ručiček. Mezi 15 až 16 hodinou SELČ byly naměřeny srážkové úhrny nad 20 mm/hod. na území ORP Vsetín, konkrétně v údolní oblasti obcí Karolinka a Huslenky. Srážkové pásmo pozvolna postupovalo od severovýchodu dál na jihozápad a mezi 17 až 18 hodinou SELČ zasáhlo centrální část Zlínského kraje. V okolí obcí Slušovice a Hrobice v ORP Vizovice a obcí Lukov a Fryšták v ORP Zlín byl hlášen výskyt intenzivního krupobití v kombinaci s přívalovým deštěm, které způsobily vznik lokální přívalové povodně. V centru Zlína a v městské části Malenovice byly také hlášeny silné nárazy větru, které způsobily značné škody na střešních krytinách. Pásmo intenzivních srážek se následně přesunulo nad území ORP Uherské

Hradiště, kde však velmi rychle zesláblo, a proto zde nebyly hlášeny žádné škody na majetku.

### **5.3.2 Povodňová událost ze dne 5. srpna 2016**

Lokální přívalová povodeň zasáhla krajní jihovýchod a východ Zlínského kraje ve večerních a nočních hodinách dne 5. srpna 2016. Předpovědní výstražná informace od SIVS ČHMÚ na vyšší stupeň nebezpečí před intenzivními bouřkami a jejich doprovodnými jevy vydána nebyla. Nejintenzivnější srážky byly naměřeny v ORP Vsetín a Valašské Klobouky, kde se vyskytla lokální přívalová povodeň.

Hlavní příčinou vzniku přívalové povodně byla zvlněná studená fronta nad východní oblastí Alp, která se v průběhu večera přesunula nad západní Maďarsko a Slovensko. V důsledku vlnícího se efektu, fronta začala ovlivňovat krajní jihovýchod ČR.

Faktory, které významně přispěly ke vzniku přívalové povodně v ORP Valašské Klobouky, byly:

- Opakovaný a déletrvající výskyt srážek s intenzitou 0 - 29 mm/hod.
- Extrémní stupeň nasycení území v regionu obce Brumov-Bylnice v ORP Valašské Klobouky a obce Valašská Senice v ORP Vsetín.
- Pomalý pohyb srážek s výrazným stříhem větru.

Velmi příznivé podmínky vzdušné masy byly v podobě silného stříhu větru s hodnotami až 26 m/s. Na druhou stranu, velmi nízkých hodnot bylo naměřeno u indexu konvekce MLCAPE (pouze 93 J/kg), což v konečném důsledku nenaplnilo u předpovědi i skutečnosti podmínku vzniku silných bouřek s intenzitou nad 30 mm/hod.

Intenzivní srážky na zvlněné studené frontě se vyskytovaly ve třech vlnách. První vlna srážek byla detekována meteorologickými radary krátce po 17 hodině SELČ na jihu a jihovýchodě Zlínského kraje. Druhá vlna srážek se vyskytla po 19 hodině SELČ nejprve na západě Zlínského kraje, postupně pak na zbytku celém území. Maximální hodnoty intenzit srážek byly naměřeny v ORP Bystřice p. Hostýnem a Vizovice. Třetí a současně hlavní vlna srážek postupovala od jihu a opakovaně ovlivňovala zejména východní oblast ORP Zlínského kraje až do půlnočních hodin. Mezi 22 až 23 hodinou byly naměřeny nejintenzivnější srážkové úhrny s hodnotami 23,8 mm/hod. na stanici Valašská Senice v ORP Vsetín a 20,8 mm/hod. na stanici Brumov-Bylnice.

Z tabulky 5.29 vyplývá, že předpověď místa a tříhodinové intenzity srážek korespondovala s reálně naměřeným stavem u většiny případů, zejména s jihovýchodními a východními oblastmi Zlínského kraje. Předpověď jednohodinové intenzity srážek byla nadhodnocená pro většinu ORP. Vysoké riziko přívalové povodně bylo stanoveno na základě kombinace extrémně

silného nasycení území, nízké rychlosti pohybu srážek a nízkého rizika nebezpečných jevů.

Tabulka 5.29 Srovnání předpovědních výstupů algoritmu s reálným stavem pro interval 21 - 24 hod. 5.8.2016.

<b>5.8.2016 (21-24:00)</b>	<b>Předpo- věď'</b>	<b>Real stav</b>	<b>Před- pověď'</b>	<b>Real stav</b>	<b>Před- pověď'</b>	<b>Před- pověď'</b>	<b>Před- pověď'</b>
ORP Zlínského kraje	Interval intenzity srážek (mm/3 hod.)	Srážkové úhrny v mm/ hod. (stanice)	Inten- zita srážek (mm/ hod.)	Stupeň nasyce-ní území (FFG- CZ)	Rych- lost pohybu bouře	Riziko neb. jevů	Riziko přiva- lových povode- ní
Uherské Hradiště	10-29	11 - Staré Hutě	30-49	slabé	nízká	nízké	0
Otrokovice	3-9	8 - Košíky	0-29	slabé	nízká	nízké	0
Kroměříž	3-9	8 - Kroměříž	0-29	RVK	nízká	nízké	0
Holešov	3-9	9 - Holešov	0-29	RVK	nízká	nízké	0
Zlín	3-9	6 - Zlín- Štípa	0-29	RVK	nízká	nízké	nízké
Bystřice p. Hostýnem	10-29	9 - Bystřice	30-49	slabé	nízká	nízké	nízké
Valašské Meziříčí	3-9	7 - Valašské Meziříčí	30-49	RVK	nízká	0	nízké
Rožnov p. Radhoštěm	3-9	15 - Horní Bečva	30-49	extrémně silné	nízká	nízké	nízké
Vsetín	10-29	24 - Val. Senice	30-49	silné	nízká	nízké	vysoké
Vizovice	0-3	9 - Vizovice	30-49	silné	0	0	nízké
<b>Valašské Klobouky (povodeň)</b>	<b>10-29</b>	<b>21 - Brumov- Bylnice</b>	<b>30-49</b>	<b>extrémně silné</b>	<b>nízké</b>	<b>nízké</b>	<b>vysoké</b>
Luhačovice	10-29	14 - Luha- čovice	30-49	silné	nízká	nízké	nízké
Uherský Brod	10-29	14 - Strání	30-49	RVK	nízká	nízké	nízké

Tabulka 5.30 Verifikační kritéria předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů pro povodňovou událost 5. 8. 2016

<b>Předpovědní výstup/ verifikační kritérium</b>	<b>Accuracy</b>	<b>BIAS</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>	<b>HSS</b>
Místo výskytu srážek	1.00	1.00	1.00	0.25	1.00	
Místo výskytu srážek (model ALADIN)	0.31	0.00	0.00		0.00	0.00
Intenzita 3 hod.	0.46	0.46	0.46	0.00	0.46	0.00
Výskyt srážek (statistika)	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	
Riziko přívalových povodní	0.54	1.00	0.89	0.11	0.80	0.65

Tabulka 5.30 uvádí, že předpověď místa výskytu srážek dosáhla nejvyšších hodnot. Vysoký podíl falešných poplachů bylo zaznamenáno u předpovědi intenzity bouřek a nebezpečných jevů. Riziko přívalových povodní bylo vypočteno pro ORP Vsetín a Valašské Klobouky, proto nedosáhlo maximální možné hodnoty. Úspěšnost předpovědi času výskytu NWP modelů byla 67 %.

Povodňová situace ze dne 5. srpna 2016 byla komplikovaná z hlediska opakovaného výskytu konvektivních srážek slabší intenzity, které se vyskytly především na pásmu zvlněné studené fronty mezi 17 a 24 hodinou SELČ. Výstraha na výskyt silných bouřek nebyla vydána, což bylo současně potvrzeno předpovědí Algoritmu. Hlavní příčinou bylo extrémní nasycení území ORP Valašské Klobouky, které bylo způsobeno předchozími srážkovými epizodami za posledních deset dnů. Důsledkem povodně byly škody na obecním majetku v podobě několika poškozených mostů a poničené silniční infrastruktury, včetně škod na majetku obyvatelstva v podobě vytopených sklepů domů.

### 5.3.3 Povodňová událost ze dne 22. července 2017

Lokální přívalová povodeň byla zaznamenána v ORP Luhačovice, v oblasti obcí Horní Lhota a města Luhačovice. Předpovědní výstražná informace na silné bouřky byla vydána SIVS ČHMÚ pro celé území Zlínského kraje od 11 hodiny dopoledne až do půlnoci. Tato povodeň byla charakteristická svým lokálním výskytem v poměrně krátkém časovém úseku. Nejintenzivnější srážky byly naměřeny pouze na jedné stanici, v Horní Lhotě u Luhačovic. Na ostatním území nebyly zaznamenány žádné srážky.

Hlavní příčinou vzniku lokální přívalové povodně v ORP Luhačovice byla okluzní fronta spojená s brázdou nízkého tlaku vzduchu nad střední Evropou. Faktory, které významně přispěly ke vzniku přívalové povodně v ORP Luhačovice, byly:

- Silné konvektivní srážky s intenzitou nad 30 mm/hod.
- Velmi pomalý pohyb srážek s výrazným směrovým stříhem větru.



Vznik a vývoj silných konvektivních srážek byl podpořen také výraznějším vertikálním instabilním zvrstvením atmosféry s hodnotami MLCAPÉ přes 500 J/kg, včetně ostatních indexů instability s hodnotami, odpovídajícími intenzitě srážek nad 30 mm/hod. Střih větru v hladinách 0 až 6 km nebyl příliš výrazný. Nicméně, směrový střih větru s jihovýchodním prouděním v přízemní vrstvě atmosféry a západním prouděním ve vyšších vrstvách atmosféry, indikoval výrazné zpomalení konvektivní bouře.

Tabulka 5.31 Srovnání předpovědních výstupů Algoritmu s reálným stavem pro 15 - 18 hod. 22. 7. 2017

<b>22.7.2017 (15-18:00)</b>	<b>Před- pověď'</b>	<b>Real stav</b>	<b>Před- pověď'/ real stav</b>	<b>Real stav</b>	<b>Před- pověď'</b>	<b>Před- pověď'</b>	<b>Před- pověď'</b>
ORP Zlínského kraje	Interval intenzit y srážek (mm/ hod.)	Srážkové úhrny v mm/3 hod.	Intenzit a srážek (mm/ hod.)	Stupeň nasyce- ní území (FFG- CZ)	Rychlo- st pohybu bouře	Riziko nebez- pečných jevů	Riziko přiva- lových povod- ní
Uherské Hradiště	0	3 - Hluk	0-29	slabé	vysoká	0	0
Otrokovice	0	0	0-29	slabé	vysoká	0	0
Kroměříž	0	0	0-29	slabé	nízká	0	0
Holešov	0	0	0-29	slabé	nízká	0	0
Zlín	10-29	0	0-29	slabé	bez pohybu	vysoké	nízké
Bystřice	0	0	0-29	slabé	vysoká	0	0
Valašské Meziříčí	0	0	0-29	RVK	vysoká	0	0
Rožnov	0	0	0-29	RVK	vysoká	0	0
Vsetín	3-9	3 - Val. Polanka	0-29	RVK	nízká	0	0
Vizovice	3-9	0	0-29	slabé	nízká	0	0
Valašské Klobouky	3-9	0	0-29	RVK	vysoká	0	0
<b>Luhačovice (povodeň)</b>	<b>30-49</b>	<b>36 - Horní Lhota</b>	<b>30-49</b>	<b>slabé</b>	<b>bez pohybu</b>	<b>velmi vysoké</b>	<b>vysoké</b>
Uh. Brod	0	0	0-29	slabé	vysoká	0	0

Z tabulky 5.31 vyplývá, že předpověď rizika přívalové povodně Algoritmu korespondovala se skutečným stavem. Kromě ORP Luhačovice, druhou předpovídanou oblastí bylo ORP Zlín, konkrétně region ZL1 Bohuslavice, kde se také vyskytovaly velmi intenzivní srážky. Nicméně, povodňové škody v tomto regionu nebyly zaznamenány. Předpověď rizika přívalové povodně byla podobná jako u předpovědi rychlosti pohybu srážek a velmi vysokého rizika nebezpečných jevů. Jediným faktorem, který významněji neovlivnil vznik přívalové povodně, bylo nasycení území. To bylo v dotčené oblasti velmi slabé až slabé. Předpověď času výskytu srážek v rámci první předpovědní fáze Algoritmu byla stoprocentní.

Tabulka 5.32 Verifikační kritéria předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů pro povodňovou událost 22. 7. 2017

<b>Předpovědní výstup/ verifikační kritérium</b>	<b>Accuracy</b>	<b>BIAS</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>	<b>HSS</b>	<b>TSS</b>
Místo výskytu srážek	0.77	0.80	0.60	0.25	0.50	0.49	0.48
Místo výskytu srážek (model ALADIN)	0.77	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
Intenzita 3 hod.	0.69	0.60	0.40	0.33	0.33	0.30	0.28
Výskyt srážek (statistika)	0.38	2.50	0.75	0.43	0.27	0.05	-0.03
Riziko přívalových povodní	0.92						
Intenzita bouří	1.00			0.00		0.65	
Přívalové srážky	0.92			0.50			
Krupobití	1.00	1.00	1.00	0.33	1.00	1.00	1.00

Tabulka 5.32 dokumentuje přesnost předpovědi místa výskytu srážek u modelu ALADIN, která sice dosáhla poměrně vysoké hodnoty, avšak ostatní hodnoty verifikačních kritérií nabývaly nulových hodnot. To bylo dáno především vysokým podílem kategorie *d* při předpovědi nulového procenta srážek. Předpověď přívalových srážek měla nejvyšší podíl falešných poplachů oproti předpovědi krupobití, u které byly hodnoty všech kritérií vůbec nejvyšší.

Nejintenzivnější srážky byly naměřeny na stanici Horní Lhota mezi 17 a 18 hodinou s hodnotou 35,8 mm/hod. Tato povodeň způsobila škody na silniční infrastruktuře v podobě zatopeného kruhového objezdu u Luhačovic a několika desítek vytopených sklepů v obci Horní Lhota.

Povodňová situace ze dne 22. července 2017 byla charakteristická z hlediska lokálního výskytu konvektivních srážek silné intenzity, při nichž se vyskytly na okraji okluzní fronty v odpoledních hodinách. Nejvýznamnějšími předpovídanými faktory byla instabilita atmosféry odpovídající intenzitě velmi silných bouřek v kombinaci s téměř stacionárním pohybem srážek, doprovázené přívalovým deštěm a krupobití. Výstraha na silné bouřky byla sice vydána pro celé území Zlínského kraje, nicméně takto vysoká intenzita se vyskytla pouze na

území jediného ORP z celkových třinácti. V tomto případě byl jednoznačně prokázán účel Algoritmu z hlediska poskytnutí kvalitní zpřesněné informace pro menší územní celek, než je území kraje.

### 5.3.4 Závěr verifikace předpovědí povodňových událostí z let 2015 až 2017

V rámci této poslední kapitoly bylo provedeno hodnocení průměrné přesnosti předpovědí povodňových událostí za léta 2015 a 2017. Při tomto hodnocení byly verifikovány předpovědní výstupy Algoritmu a NWP modelů pro tři povodňové situace ve dnech 24. 7. 2015 (18-21 h.), 5. 8. 2016 (21-24 h.) a 22. 7. 2017 (15-18 h.).

Tabulka 5.33 Průměrné hodnoty verifikačních kritérií předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN (ORP) pro povodňové události z let 2015 až 2017

<b>Předpovědní výstup/ verifikační kritérium</b>	<b>Accuracy</b>	<b>BIAS</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>	<b>HSS</b>	<b>TSS</b>
Místo výskytu srážek	0.82	0.87	0.78	0.20	0.72	0.33	0.36
Místo výskytu srážek (model ALADIN)	0.62	0.27	0.30	0.18	0.25	0.09	0.12
Intenzita srážek 3 hod.	0.54	0.54	0.44	0.17	0.40	0.11	0.12
Výskyt srážek (statistika)	0.61	1.26	0.63	0.31	0.47	0.05	-0.03
Riziko přívalových povodní	0.82	1.00	0.95	0.06	0.90	0.83	1.00
Intenzita bouří	1.00						
Přívalový déšť	0.92						
Krupobití	0.96	1.17	0.89	0.38	0.75	0.78	0.80
Silné nárazy větru	0.92	1.00	0.80	0.00	0.80	0.83	0.80

Tabulka 5.33 poskytuje informace o průměrných hodnotách verifikačních kritérií pro předpovědní výstupy Algoritmu a NWP modelu ALADIN, které dosáhly nejvyšších hodnot předpověď místa výskytu srážek, rizika přívalových povodní a intenzity bouří. Tyto předpovědní výstupy byly slabě podhodnocené oproti předpovědi nebezpečných jevů. Podíl falešných poplachů byl nejnižší u rizika přívalových povodní. Celkově, hodnoty verifikačních kritérií dosáhly v průměru vysokých hodnot u hlavních předpovědních výstupů, což je velmi pozitivní pro předpověď budoucích povodňových situací. Výsledky hodnocení úspěšnosti předpovědních parametrů NWP modelů pro jednotlivé povodňové události jsou uvedeny v

**PŘÍLOHA P 1 a PŘÍLOHA P 2.**



Vybrané charakteristiky reliéfu jsou rozděleny podle potenciálních spouštěcích mechanismů konvekce do tří tříd:

1. Teplotní vlivy zemského povrchu – sklonitost a orientace reliéfu, světelnost od jihozápadu, stupeň pokrytí vegetací, teplotní gradient podle nadmořské výšky a tepelné vyzařování zemského povrchu.
2. Větrné vlivy zemského povrchu – podíl výskytu osídlených ploch, šířka údolí a obtékání překážky.
3. Orografické vlivy – poloha nadmořských výšek a typ hřebene.

Většina charakteristik byla analyzována prostřednictvím ArcGIS Spatial Analyst, mimo charakteristiky „Šířka údolí, Obtékání překážky a Hřeben“. Tyto charakteristiky zatím nejsou součástí softwarové výbavy ArcGIS. Jejich konfigurace byla realizována prostřednictvím mapových výstupů Národního geoportálu INSPIRE s využitím dostupných webových nástrojů.

Klasifikace charakteristik reliéfu je uvedena v tabulce 5.34 a 5.35. V tabulce 5.34 je uvedena klasifikace charakteristik reliéfu teplotních vlivů a v tabulce 5.35 charakteristika reliéfu větrných a orografických vlivů v přízemní vrstvě atmosféry.

Tabulka 5.34 Klasifikace charakteristik reliéfu teplotních vlivů

<b>Koefi- cient</b>	<b>Sklonitost reliéfu (°)</b>	<b>Orien- tace reliéfu</b>	<b>Světelnost od jihozápadu</b>	<b>IR kontrast reliéfu</b>	<b>Pokrytí vegetací</b>	<b>Nadm. výška (m.n.m) podle teplot. gradientu</b>
0	0-3 (rovina)	S a SV	Velmi nízká	Louky, listnaté lesy	75-100%	900-1300
1	3-10 (mírný sklon)	SZ	Nízká	Jehličnaté lesy	50-75%	600-900
2	11-21 – (značný sklon)	Z	Dobrá	Pole	25-50%	300-600
3	22-35 - příkrý sklon	JV, JZ	Velmi dobrá	Betonové plochy	0-25%	0-300

Tabulka 5.35 Klasifikace charakteristik reliéfu orografických a větrných vlivů v přízemní vrstvě atmosféry

Charakteristiky větrných vlivů				Charakteristiky orografických vlivů	
Koefi- -cient	Sídelní útvár	Údolní parametry	Obtékání překážky	Hřeben	Polohy nadmořských výšek
0	stavení	velmi široké údolí - 5 km a více	souvislý hřeben	rovina	rovina (0-300m)
1	obec	široké údolí - 2-5 km	nesouvislý hřeben, malý počet obcí	úzký hřeben 0-3 km	pahorkatina (300-600 m)
2	město	úzké údolí - 1-2 km	neuspořádané rozložení kopců, větší počet obcí	dva hřebeny za sebou	vrchovina (600-900m)
3	město, aglomerace	velmi úzké údolí - 0-1 km	osamocené kopce+města	široký hřeben 3 km a více (nejsilnější srážky)	hornatina (900-1 300m)

V následujících podkapitolách je uveden postup realizace prostorové analýzy reliéfu včetně výsledků modelování prostorových vztahů s využitím metod nejmenších čtverců, prostorové autokorelace a analýzy prostorových shluků.

#### 5.4.1 Úvod k prostorové analýze charakteristik reliéfu

Hlavním výstupem prostorové analýzy je hodnocení korelační závislosti intenzivních konvektivních srážek na jednotlivé charakteristiky reliéfu prostřednictvím metod prostorové analýzy s využitím ArcGIS Spatial Analyst; nástrojů Správy dat a Statistiky prostorových dat.

Metodika hodnocení charakteristik reliéfu je specifikována v těchto hlavních bodech:

- příprava dat a podkladových map,
- analýza prostorových dat,
- reklasifikace výstupů analýz jednotlivých charakteristik reliéfu,
- příprava reklasifikovaných výstupů pro statistiku prostorových dat,
- statistika prostorových dat.

#### 5.4.2 Metody prostorové analýzy

Prostorová analýza byla vypočítána na základě těchto tří metod:

1. Metoda nejmenších čtverců při lineární regresi (Ordinary Least Squares),
2. Prostorová autokorelace (kritérium Moran I),
3. Hot Spot Analýza (Getis-Ord  $G_i^*$  statistika).

Hlavním cílem bylo ověřit závislost 11 charakteristik reliéfu Zlínského kraje na intenzivních konvektivních srážkách z pozemních klimatologických stanic pro vybrané povodňové situace v letech 1987 až 2016.

#### 5.4.2.1 Metoda nejmenších čtverců (Ordinary Least Squares)

Metoda nejmenších čtverců (Ordinary Least Squares) je matematicko-statistická metoda pro řešení předurčených soustav lineárních rovnic. V rámci testování závislosti výskytu intenzivních konvektivních srážek na charakteristiky reliéfu byla použita jednoduchá a mnohonásobná lineární regrese.

Jednoduchá lineární regrese je dána regresní přímkou s jednou nezávislou proměnnou podle vztahu:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i, \quad (5.19)$$

kde závislá proměnná  $y_i$  je na vertikální ose a nezávislá proměnná  $x_i$  je na horizontální ose,  $\varepsilon_i$  je chyba (reziduál, odchylka) očekávaného od skutečného  $y_i$  (Milde, 2011). Závislou proměnnou  $y_i$  představuje hodinový srážkový úhrn naměřený na pozemní klimatologické stanici ve Zlínském kraji. V prvním případě, nezávislou proměnnou  $x_i$  je výsledný obalový překryv, vypočítaný podle nástroje Weighted Sum. V druhém případě, nezávislou proměnnou je aritmetický průměr všech charakteristik reliéfu.

Mnohonásobná lineární regrese je zaměřena na analýzu jedné závislé proměnné  $x_j$  na dvou a více nezávislých proměnných  $x_{kj}$  (Milde, 2011).

$$y_j = \alpha + \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \beta_{11} x_{11j} + \varepsilon_j, \quad (5.20)$$

Závislá proměnná je stejná jako u lineární regrese. Nezávislými proměnnými je 11 charakteristik reliéfu Zlínského kraje.

Modelování prostorových vztahů v ArcGIS Desktop bylo realizováno nástrojem Využití metody nejmenších čtverců při lineární regresi (Ordinary Least Squares). Pro analýzu bylo vybráno 12 povětrnostních situací, u nichž se vyskytly konvektivní srážky s intenzitou nad 20 mm/hod. Vybrané povodňové události, u nichž se vyskytly přívalové srážky v kombinaci s ostatními nebezpečnými jevy na území Zlínského kraje, jsou z těchto dnů: 26. 6. 1987, 21. 6. 2007, 24. 6. 2009, 30. 6. 2011, 15. 8. 2011, 9. 8. 2013, 4. 4. 2014, 21. 7. 2014, 31. 7. 2014, 24. 7. 2015 a 5. 8. 2016. Staniční data byla použita z pozemních meteorologických stanic Českého hydrometeorologického ústavu.

Pro každou povodňovou událost byly vytvořeny tři souhrnné zprávy OLS:

- charakteristiky reliéfu,
- charakteristika překryvu,
- charakteristika průměru.

Charakteristiky reliéfu obsahují výsledky metody nejmenších čtverců pro jedenáct charakteristik reliéfu. Charakteristika překryvu je vypočítána nástrojem Weighted Sum, na základě které je vytvořen sloučený výstup všech charakteristik reliéfu. Charakteristika průměru zahrnuje průměrné hodnoty všech charakteristik reliéfu pro všechny regiony ORP Zlínského kraje.

Souhrnná zpráva OLS se skládá z těchto výstupních částí:

1. diagnostické zprávy OLS,
2. rozdělení a vztahy modelových proměnných.

V první části souhrnné zprávy jsou k dispozici tato diagnostická kritéria OLS:

- **AIC (Akaike's Information Criterion)** - je relativní míra výkonu používaná při porovnání modelů. Čím menší hodnota AIC, tím kvalitnější model.
- **AICc (Corrected Akaike's Information Criterion)** - udává korekci druhého řádu pro malé velikosti vzorků. Pro AICc platí stejná úměra jako pro AIC.
- **R<sup>2</sup> (R-Squared, koeficient určení)** - kvantifikuje výkon modelu. Hodnoty R-Squared lze vyjádřit v rozmezí od 0 do 1, nebo od 0 do 100.
- **AdjR<sup>2</sup> (Adjusted R-Squared)** - je upravená hodnota R-Squared. Tento parametr popisuje složitost modelu z hlediska počtu proměnných.
- **F-Stat (Joint F-Statistics)** - je hodnota společné F-statistiky, která se používá pro posouzení celkového významu modelu. Využití společné F-statistiky má význam pouze v případě, že hodnoty Koenker (BP) statistiky jsou statisticky významné s hodnotami menšími než 0,05.
- **F-Prob (Joint F-Statistics Probability – p-value)** - vyjadřuje pravděpodobnost společné F-statistiky, že žádná z nezávislých proměnných nemá vliv na závislou proměnnou.
- **Wald (Wald Statistics)** - je používán pro posouzení celkově robustního významu modelu. Stejně jako v případě F-statistiky platí, že pokud nejsou výstupy Koenker (BP) statistiky významné, pak tuto statistiku nepoužijeme.
- **Wald – Prob (Wald Statistics Probability – p-value)** - je pravděpodobnost, vypočítaná podle robustních standardizovaných reziduálů. Platí, že žádná z nezávislých proměnných nemá vliv na závislou proměnnou.
- **K (BP) - Koenker's studentized Breusch-Pagan Statistic** - tento test je zaměřen na hledání směřodatné odchylky v měření hodnot, u nichž se



vyskytuje heteroskedasticida (nestálý rozptyl). To znamená, že testujeme vztah mezi závislou proměnnou a nezávislými proměnnými z hlediska změny rozptylu reziduí v prostoru a chyb v konfiguraci modelu.

- **K (BP)-Prob - Koenker (BP) Statistic Probability (p-value)** - je pravděpodobnost, že při heteroskedasticidě se nevyskytly standardní chyby spolehlivosti měření. Posuzovaný model při pravděpodobnosti nižší než 0,05 je statisticky významný pro výskyt heteroskedasticidy. V tomto případě posuzujeme současně hodnoty F-Statistiky a Wald Statistiky.
- **JB (Jarque-Bera Statistic)** - je určen pro testování std. reziduálů z hlediska jejich rozložení v normálním rozdělení. Statisticky významné hodnoty tohoto testu mohou být dosaženy při modelování nelineárních vztahů, nepřítomnosti signifikantní proměnné veličině a silné heteroskedasticidě.
- **JB-Prob - Jarque-Bera Probability (p-value)** - je pravděpodobnost, že std. reziduály se vyskytují v normálním rozdělení. Statisticky významných hodnot JB-Prob je dosaženo při hladině nižší než 0,05.
- **Sigma<sup>2</sup> (Sigma – Squared)** - je zaměřena na odhad chyb v modelu (Esri - Interpreting OLS results, 2016).

Tabulka 5.36 Průměrné hodnoty jednotlivých statistických kritérií Metody nejmenších čtverců pro vybrané povodňové situace z let 1987-2016.

<b>Statistická kritéria</b>	<b>Char. reliéfu</b>	<b>Char. překryvu</b>	<b>Char. průměru</b>
AIC	119.42	69.00	69.68
AICc	136.75	69.77	70.45
R <sup>2</sup>	-4.46	0.05	0.03
AdjR <sup>2</sup>	-7.07	0.02	0.00
F-Stat	-0.57	1.78	1.09
F-Prob	0.72	0.32	0.42
Wald	-0.71	2.19	1.18
Wald-Prob	0.70	0.29	0.40
K(BP)	-472.10	2.19	1.10
K(BP)-Prob	0.65	0.40	0.48
JB	15.73	53.54	44.43
JB-Prob	0.10	0.18	0.16
Sigma <sup>2</sup>	4.73	0.50	0.51

Z tabulky 5.36 vyplývá, že hodnoty pro charakteristiky reliéfu byly značně nadhodnocené právě v důsledku aplikace mnohonásobné lineární regrese. Statistické významnosti charakteristik překryvu a průměru bylo dosaženo u kritérií R-Squared, Adjusted R-Squared. Poměrně nízké hodnoty Akaikova kritéria vyjadřují ve srovnání s ostatními modely vysokou míru kvality

testovaného modelu. Nicméně, u ostatních kritérií nebyly zaznamenány statisticky významné hodnoty, tudíž lze považovat tento model za méně statisticky významný z hlediska aplikace Metody nejmenších čtverců. Proto bylo nutné provést další testy pro zjištění vztahů a závislostí mezi výskytem intenzivních konvektivních srážek a charakteristik reliéfu Zlínského kraje.

Výsledky ostatních částí souhrnné zprávy jsou uvedeny v kapitolách Prostorové autokorelace a Hot Spot Analýzy. Hlavním účelem je nalezení souvislostí a vztahů jednotlivých charakteristik reliéfu, ale i překryvu a průměru v návaznosti na výskyt intenzivních konvektivních srážek. Souvislosti a vztahy mezi modelovanými proměnnými jsou kvantifikovány prostřednictvím analýzy korelačních závislostí těchto proměnných.

#### 5.4.2.2 Prostorová autokorelace (Moranovo I kritérium)

Prostorová autokorelace (Moranovo I kritérium) je metodou, která se v praxi současně provádí s Metodou nejmenších čtverců pro splnění předpokladu náhodnosti výběru objektů a jejich vzájemné nezávislosti v rámci regresního modelu.

Cílem této metody je zjistit výskyt:

- negativní autokorelace (disperzního nebo náhodného uspořádání jevu) a
- pozitivní autokorelace (shlukového uspořádání jevu).

Výsledná zpráva Prostorové autokorelace obsahuje tyto výstupy:

- Moranův (I) index,
- Z-skóre,
- P-value (p-hodnoty).

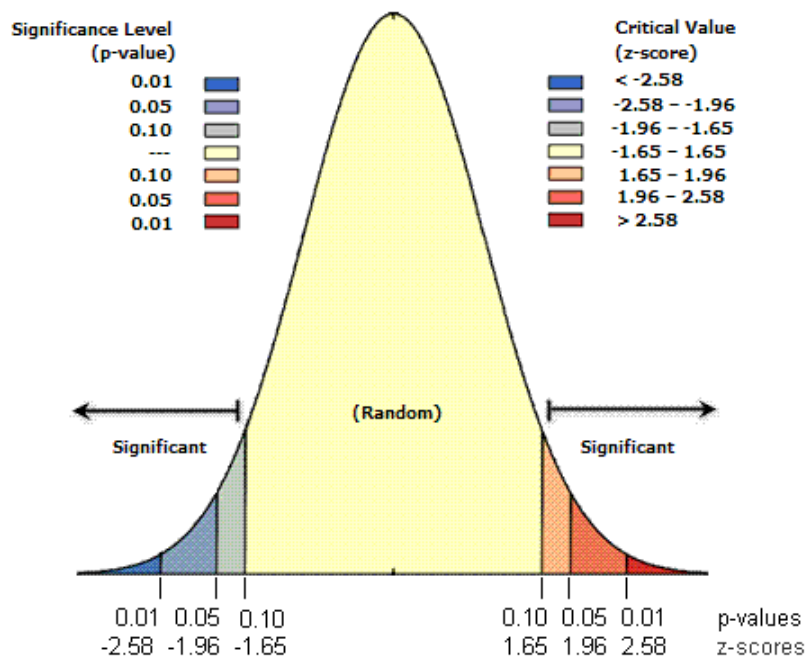
Moranův (I) index vyjadřuje míru prostorové autokorelace plošných jevů a je dán tímto vzorcem:

$$I = \frac{n \sum \sum w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{W \sum (x_i - \bar{x})^2}, \quad (5.21)$$

kde  $x_i$  je nezávislá proměnná,  $w_{ij}$  jsou váhy a  $W$  je matice vah (binární či stochastická). Hodnota indexu kolísá od -1 pro negativní prostorovou autokorelaci do 1 pro pozitivní prostorovou autokorelaci. Moranův (I) index bude nabývat kladných hodnot za předpokladu, že v zájmové oblasti budou převažovat sousedé s podobnými hodnotami (Statistická analýza plošných jevů, 2015).

Z-skóre a p-hodnoty jsou měřítkem statistické významnosti, které indikují přijetí nebo zamítnutí nulové hypotézy. Nulová hypotéza uvádí, že hodnoty spojené s prvky jsou distribuovány nahodilým způsobem. Z-skóre jsou směrodatné odchylky. Velmi vysoké nebo velmi nízké hodnoty Z-skóre, spojené

s velmi nízkými p-hodnotami představují vysokou pravděpodobnost disperzního nebo shlukového uspořádání prvků. P-hodnota je pravděpodobnost výskytu jevu. Velmi nízké p-hodnoty indikují velmi nízkou pravděpodobnost, že pozorovaný prostorový jev je výsledkem náhodných procesů (Statistická analýza plošných jevů, 2015).



Obr. 5.20: Ukázka výstupu Prostorové autokorelace (Esri - Interpreting OLS results, 2016)

Prostorová autokorelace byla vypočítána pro charakteristiky reliéfu, překryvu a průměru všech dvanácti povodňových událostí. Pozitivní autokorelace byla zaznamenána u charakteristik povodňových událostí, uvedených v Tabulce 5.37:

Tabulka 5.37 uvádí, že negativní prostorová autokorelace, spojená s náhodným uspořádáním jevů, byla vypočítána pro ostatní charakteristiky povodňových událostí. Povodňové události, u nichž byl stanoven předpoklad výskytu shluků, byly analyzovány metodou Hot Spot Analysis. Prostorová autokorelace sloužila jako přípravná fáze pro poslední analýzu, prostřednictvím které byl zjištěn výskyt shluků std. reziduálů jednotlivých charakteristik v regionech ORP Zlínského kraje.

Tabulka 5.37 Pozitivní prostorová autokorelace povodňových událostí.

Charakteristika	Výstupy Prostorové autokorelace	Moranův (I) Index	z-score	p-value
Překryv	26.6.1987	0.532403	4.468162	0.000008
Průměr	26.6.1987	0.469334	3.973049	0.000071
Reliéf	21.6.2007	0.570624	4.790402	0.000002
Reliéf	24.6.2009	0.198367	1.830226	0.067216
Překryv	30.6.2011	0.321014	2.772254	0.005567
Průměr	30.6.2011	0.405683	3.432996	0.000597
Reliéf	15.8.2011	0.570624	4.790402	0.000002
Překryv	15.8.2011	0.294991	2.6292	0.008559
Průměr	15.8.2011	0.386702	3.319067	0.000903
Překryv	4.4.2014	0.134338	2.007941	0.044650
Průměr	4.4.2014	0.145628	1.997296	0.045793
Reliéf	24.7.2015	0.215522	1.96434	0.049491
Průměr	24.7.2015	0.254413	2.232252	0.025598
Překryv	5.8.2016	0.326991	2.972187	0.002957
Průměr	5.8.2016	0.323433	2.947996	0.003198

### 5.4.2.3 Hot Spot Analýza (Getis-Ord $G_i^*$ statistika)

Hot Spot Analýza (Getis-Ord  $G_i^*$  statistika) je metoda, která identifikuje statisticky významné shluky vysokých hodnot (hot spoty) a nízkých hodnot (cold spoty) standardizovaných reziduálů. Využitím této metody v prostředí ArcMap lze zobrazit výstupy v mapovém formátu a získat informaci o prostorovém uspořádání výskytu intenzivních konvektivních srážek v závislosti na jednotlivých charakteristikách reliéfu. Výskyt hot a cold spotů je obvykle spojen s výskytem prvků s vysokými nebo nízkými hodnotami, které hot a cold spoty obklopují. Výsledná hodnota je porovnávána globálně s celým zkoumaným souborem. Jedná se tedy o lokální statistiku v globálním kontextu. Getis-Ord  $G_i^*$  statistika je definována vztahem:

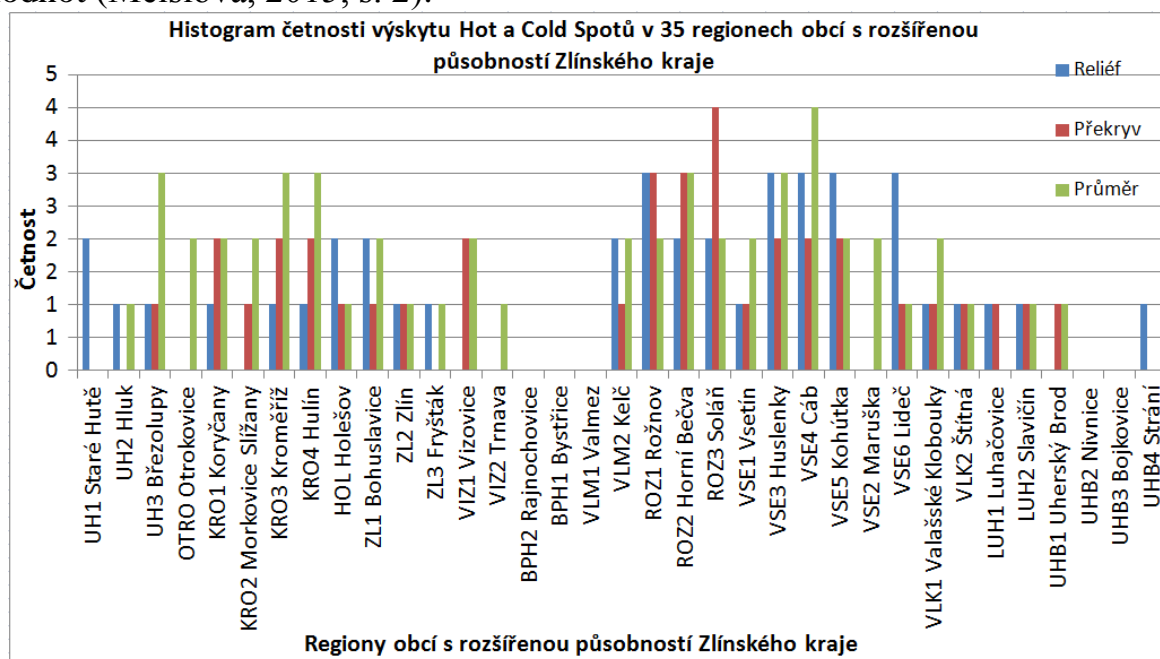
$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{s \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2]}{n-1}}}, \quad (5.22)$$

kde  $x_j$  je hodnota atributu prvku  $j$ ;  $w_{i,j}$  je prostorová váha mezi prvky  $i$  a  $j$  a  $n$  je hodnota celkového počtu prvků (Meislová, 2015, s. 2). Dále platí, že:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (5.23)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{x})^2}. \quad (5.24)$$

$G_i^*$  index je vyjádřen hodnotou Z-score, která společně s p-value určují statistickou významnost prostorového shlukování. Současně platí pro ně stejná pravidla jako u prostorové autokorelace. Nulová hypotéza představuje náhodné uspořádání, tudíž zde neexistuje prostorové shlukování jevů. Vysoká hodnota Z-score a nízká hodnota p-value (pod 0,05) vyjadřuje přítomnost prostorové shluku vysokých hodnot (hot spot). Naopak, nízká záporná hodnota Z-score a nízká hodnota p-value (pod 0,05) indikuje výskyt prostorového shluku nízkých hodnot (Meislová, 2015, s. 2).



Graf 5.10: Histogram četnosti výskytu hot a cold spotů v regionech ORP Zlínského kraje (vlastní zdroj)

Z grafu 5.10 vyplývá, že vysoké a nízké hodnoty standardizovaných reziduálů u charakteristik reliéfu a se nejčastěji vyskytovaly zejména v ORP Rožnov pod Radhoštěm a Vsetín. Charakteristiky průměru dosáhly nejvyšší četnosti výskytu shluků v ORP Uherské Hradiště, Otrokovice, Kroměříž a Vizovice. Naopak, nulová hypotéza byla potvrzena pro ORP Bystřice pod Hostýnem a částečně pro ORP Valašské Meziříčí a Uherský Brod. Výsledky všech analýz jsou uloženy v příloze „Statistika\_prostorových\_dat“.

### 5.4.3 Hodnocení korelační závislosti modelovaných proměnných

Cílem této kapitoly je zhodnotit korelační závislosti intenzivních konvektivních srážek (závislá proměnná) na charakteristikách reliéfu, včetně charakteristik překryvu a průměru reliéfu.

Druhá výstupní část souhrnné zprávy obsahuje informace o korelačních závislostech v podobě bodových diagramů pro každou nezávislou proměnnou zvlášť. Současně je nutné počítat s tím, že většina přírodních jevů má charakter velmi proměnlivý právě z důvodu přítomnosti celého komplexu různých příčin včetně působení náhodných vlivů, které nejsme při sledování schopni vyloučit. Z toho vyplývá, že charakter závislostí mezi jednotlivými veličinami je relativní, a proto pracujeme s tzv. statistickou (stochastickou) korelační závislostí.

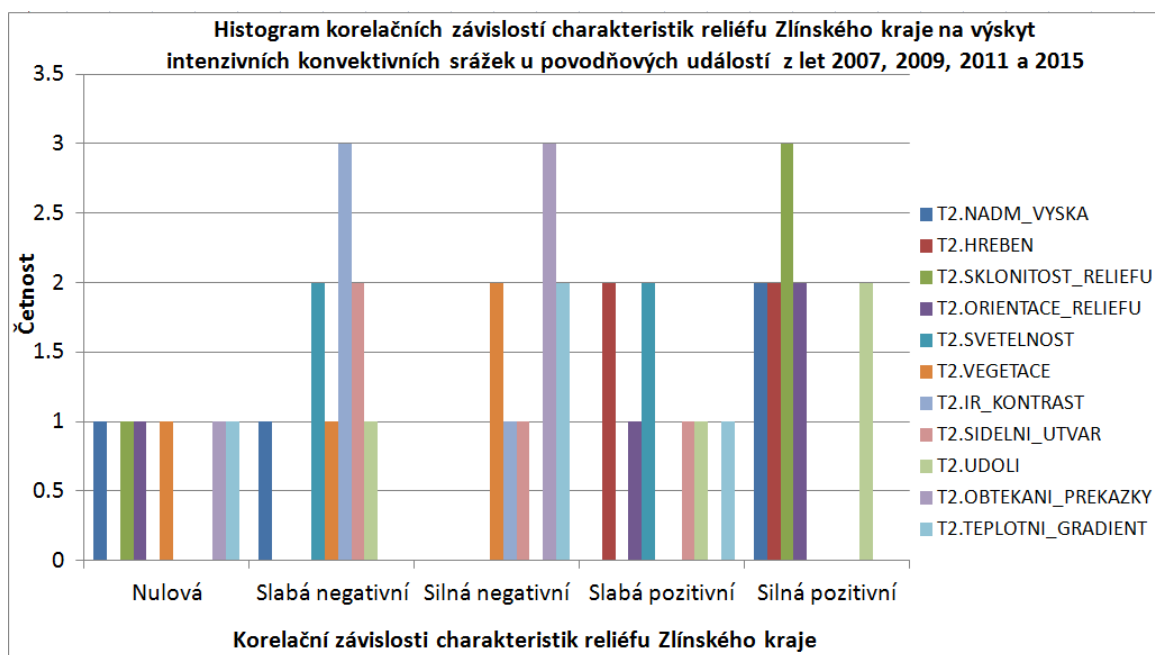
Výstup bodového diagramu je dán rozložením bodů a sklonitostí regresní přímky, která vyjadřuje typ korelační závislosti. Existuje celkem 5 základních typů korelačních závislostí:

- silná negativní korelační závislost,
- slabá negativní korelační závislost,
- nulová korelační závislost,
- slabá pozitivní korelační závislost,
- silná pozitivní korelační závislost.

V případě negativní korelační závislosti platí, že čím jsou hodnoty u prvního jevu vyšší, tím jsou u druhého jevu nižší. Naopak, v případě pozitivní korelační závislosti platí pravidlo, že s rostoucími hodnotami prvního jevu, rostou současně hodnoty druhého jevu. Silná nebo slabá korelační závislost vyjadřuje intenzitu (sklonitost) regresní přímky. U silné korelační závislosti je sklon vyšší, u slabé korelační závislosti menší. U nulové korelační závislosti je přímka vodorovná s osou  $x$  a nevyjadřuje žádný vztah mezi dvěma korelovanými veličinami (cit.vfu.cz).

Korelační závislosti byly vypočítány Metodou nejmenších čtverců pro jednotlivé charakteristiky reliéfu včetně překryvu a průměru pro všechny povodňové situace. Jelikož nebyly vypočteny statistiky prostorových dat pro jednotlivé regiony ORP Zlínského kraje, pak byly analyzovány pouze ty povodňové situace, u nichž bylo nalezeno shlukové uspořádání standardizovaných reziduálů.

Shlukové uspořádání standardizovaných reziduálů bylo vypočítáno pro charakteristiky reliéfu u povodní 21. 6. 2007, 15. 8. 2011, 24. 6. 2009 a 24. 7. 2015.



*Graf 5.11: Histogram korelačních závislostí charakteristik reliéfu Zlínského kraje (vlastní zdroj)*

Graf 5.11 dokládá, že z hlediska silné pozitivní korelace byla vypočítána pro tyto charakteristiky reliéfu:

- sklonitost reliéfu,
- nadmořská výška,
- hřebenové charakteristiky,
- orientace reliéfu,
- údolní charakteristiky reliéfu.

Z výsledků prostorové analýzy vyplývá, že právě u těchto charakteristik reliéfu byla potvrzena silná korelační závislost z hlediska výskytu silných konvektivních srážek ve Zlínském kraji. Současně také z fyzikálního hlediska by se mohly tyto charakteristiky reliéfu ve vzájemné interakci podílet na počátečním vzniku atmosférické konvekce. U slabé pozitivní korelační závislosti byl prokázán určitý vliv na výskyt konvektivních srážek u Světelnosti, Sídelních útvarů a Teplotního gradientu. Ostatní charakteristiky reliéfu při výskytu negativní korelační závislosti nebyly statisticky významné.

Sloučením výsledků grafu 5.10 a 5.11 vyplývají tyto závěry:

- Charakteristiky reliéfu, u nichž byla prokázána pozitivní korelační závislost z hlediska výskytu intenzivních konvektivních srážek, se nejvíce projeví v ORP Rožnov pod Radhoštěm a Vsetín. Tento fakt je potvrzen vysokými hodnotami těchto charakteristik reliéfu (nejvyšší nadmořská výška, sklonitost a orientace reliéfu, údolní a hlavně hřebenové charakteristiky, zejména pak hřeben nad obcemi Huslenky a Velké Karlovice). V těchto

oblastech se statisticky nejčastěji vyskytují intenzivní konvektivní srážky, což bylo prokázáno metodou Hot Spot Analýzy u povodní z let 2007, 2009 a 2011.

- Dalšími významnými oblastmi, kde byl vyhodnocen největší podíl výskytu shluků, byl konkrétně region Staré Hutě v pohoří Chříby, ale také regiony Otrokovice, Holešov, Zlín-Bohuslavice a Vizovice. I v těchto oblastech se uplatnil vliv některých charakteristik reliéfu. V oblastech Hornomoravského úvalu šlo zejména o tepelné a větrné charakteristiky reliéfu jako vysoký podíl jihozápadní a jižní orientace svahů, světelnost od jihozápadu, údolní charakteristiky a sídelní útvary. V oblastech Zlín-Bohuslavice a Vizovice se jednalo o vliv nadmořské výšky v kombinaci se sklonitostí a orientací reliéfu včetně hřebene Vizovické vrchoviny.
- Méně se uplatnily charakteristiky reliéfu, překryvu i průměru v ORP Valašské Klobouky, Luhačovice a Uherský Brod. Žádné hodnoty shluků nebyly zaznamenány pro ORP Bystřice pod Hostýnem. V těchto oblastech z pohledu Hot Spot Analýzy nelze předpokládat významnější vliv charakteristik reliéfu. Vznik intenzivních konvektivních srážek je zde velmi závislý na podmínkách a celkového potenciálu vlastností atmosféry.

U charakteristik překryvu a průměru reliéfu byl zjištěn nejvyšší podíl těchto typů korelačních závislostí:

Tabulka 5.38 Četnost typů korelačních závislostí na charakteristice překryvu a průměru

<b>Korelační závislost</b>	<b>Char. překryvu</b>	<b>Char. průměru</b>
Nulová	0	1
Slabá negativní	0	2
Silná negativní	0	0
Slabá pozitivní	4	2
Silná pozitivní	1	1

Tabulka 5.38 dokládá výsledky pozitivní korelační závislosti, detekované pouze u charakteristiky překryvu pro povodňové události 26. 6. 1987, 30. 6. 2011, 15. 8. 2011, 4. 4. 2014 a 5. 8. 2016 při výskytu shlukového uspořádání standardizovaných reziduálů. Vyšší podíl negativní a nulové korelační závislosti bylo dosaženo u charakteristiky průměru reliéfu. Z důvodu homogenního rozložení četností korelačních závislostí (zejména pozitivní), bude v rámci výzkumu používána charakteristika překryvu.



#### 5.4.4 Závěr hodnocení prostorové analýzy

Cílem této kapitoly je shrnutí hlavních výstupů, týkajících se hodnocení závislosti charakteristik reliéfu na vznik intenzivních konvektivních srážek, které v minulosti vyvolaly přívalové povodně ve Zlínském kraji.

Výsledky provedených analýz potvrdily korelační závislost mezi charakteristikami reliéfu, překryvu a průměru reliéfu na výskyt konvektivních srážek. Současně, tyto výsledky byly implementovány do Algoritmu předpovědi bouřek v podobě konfigurace konstantních hodnot charakteristik reliéfu s využitím násobků jejich vah, stanovených korelační analýzou s využitím metody nejmenších čtverců. Konfigurace charakteristik reliéfu byla realizována pro většinu regionů ORP Zlínského kraje, mimo regiony BPH1 Bystřice p. Hostýnem, BPH2 Rajnochovice, VLM1 ValMez, UHB2 Nivnice a UHB3 Bojkovice. U těchto regionů nebyl zaznamenán výskyt hot (cold) hot spotů, a proto konstantní hodnoty charakteristik reliéfu zůstaly neměnné.

Váhy byly experimentálně nastaveny podle počtu pěti korelačních závislostí:

- silná a slabá negativní korelace včetně nulové korelace s váhou 1;
- slabá pozitivní korelace s váhou 1,25;
- silná pozitivní závislost s váhou 1,5.

Z histogramu korelačních závislostí charakteristik reliéfu Zlínského kraje vyplývá, že stejné hodnoty četností korelací se vyskytují souběžně u některých charakteristik reliéfu. Proto bylo nutné stanovit výslednou korelační závislost u jednotlivých charakteristik reliéfu podle maximální hodnoty její četnosti.

Tabulka 5.39 Výsledné hodnoty vah korelačních závislostí charakteristik reliéfu Zlínského kraje.

<b>Charakteristika reliéfu</b>	<b>Korelační závislost</b>	<b>Váhy korelačních závislostí</b>
Nadmořská výška	Silná pozitivní	1.5
Hřeben	Silná pozitivní	1.5
Sklonitost reliéfu	Silná pozitivní	1.5
Orientace reliéfu	Silná pozitivní	1.5
Světelnost od jihozápadu	Slabá pozitivní	1.25
Pokrytí vegetací	Silná negativní	1
Tepelný kontrast zemského povrchu	Slabá negativní	1
Podíl sídelních útvarů	Slabá negativní	1
Údolí	Silná pozitivní	1.5
Obtékání překážky	Silná negativní	1
Teplotní gradient	Silná negativní	1

Tabulka 5.39 poskytuje informaci o výsledných hodnotách vah charakteristik reliéfu. Tyto váhy reliéfu jsou konstantní, stejně jako hodnoty charakteristik reliéfu. Naopak, nejnižších hodnot nabývají charakteristiky se silně negativní závislostí.

Posledním krokem je stanovení výsledných konstantních hodnot charakteristik reliéfu, které byly získány vynásobením vah korelačních závislostí pro 30 regionů ORP Zlínského kraje. Tabulka výsledných hodnot charakteristiky reliéfu je součástí přílohy souboru „Výsledky\_statistiky\_prostorovych\_dat.xls“.

Hlavním cílem statistiky prostorových dat bylo stanovit závislost charakteristik reliéfu Zlínského na výskytu konvektivních srážek. Silná korelační závislost byla zjištěna především u základních charakteristik reliéfu, tj. nadmořská výška, sklonitost a orientace reliéfu, ale také u speciálních charakteristik hřebene a údolí. Všechny tyto charakteristiky z fyzikální podstaty mají určitý vliv na počáteční vznik atmosférické konvekce, tudíž výsledky prostorové analýzy bylo možné využít pro výpočet lokální předpovědi podmínek zemského povrchu.

## 5.5 Statistika rozložení konvektivních srážek ve Zlínském kraji

Druhým cílem této práce bylo provést analýzu vybraného území kraje za účelem zpracování statistik historických situací. Vybraným územím bylo území Zlínského kraje z důvodu vysoké četnosti výskytu přívalových povodní za posledních deset let. Účelem této statistiky je analýza a hodnocení rozložení konvektivních srážek a v souvislosti orografií terénu zájmového území.

Statistika rozložení konvektivních srážek ve Zlínském kraji je primárně určena jako informační zdroj pro zpracování statistické předpovědi pravděpodobnosti místa a intenzity srážek konkrétní situace. V rámci této práce bylo zpracováno celkem 160 povětrnostních situací za léta 2011 až 2016, přičemž 80 situací spadalo pod období 2011 až 2013 a 80 situací pro léta 2014 až 2016. Pro období let 2011 až 2013 byly vypočítány statistiky pouze pro rozložení četnosti místa výskytu a intenzity konvektivních srážek z důvodu nekompletní sady dat z pozemních meteorologických stanic. A proto, hlavní výstupy pro jednotlivé směry proudění se týkají pouze statistik z let 2014 až 2016.

Vstupními daty těchto statistik jsou data získaná z těchto zdrojů:

- Síť CZRAD, zejména z meteorologického radaru Skalky u Protivanova (ČHMÚ - JSRadView - prohlížeč radarových dat, 2010-2011) a meteorologického radaru Zlínského kraje (Meteoradar KUZK, 2015).
- Kombinovaného radarového odhadu a pozemních srážkoměrů, včetně plošných srážkových úhrnů (ČHMÚ – Srážky na území ČR, 2006-2017).
- 21 pozemních klimatologických stanic a jedné profesionální stanice (Holešov) ve Zlínském kraji (ČHMÚ – Grafy automatických stanic, 2006-

2017; ČHMÚ - Hodinové úhrny srážek ze srážkoměrných stanic, 2006-2017).

- Dat aerologické sondáže v Prostějově (University of Wyoming – Radiosonde Data, 1988-2017) a Prohlížeče aktuálních aerologických sondáží (Rýva, 2017).
- Předpovědní výstražné informace jsou získány z portálu SIVS ČHMÚ (Kráal a ČHMÚ, 2010-2012), METEOALARMu (meteoalarm.eu, 2009-2017) a ESTOFEXu (estofex.org, 2002-2017).
- Aktuální synoptická situace (ČHMÚ – Synoptická situace, 2006-2017).
- Ostatní data jsou získána z modelu GFS (wetter3.de, 2017).

### 5.5.1 Výsledky statistiky rozložení konvektivních srážek

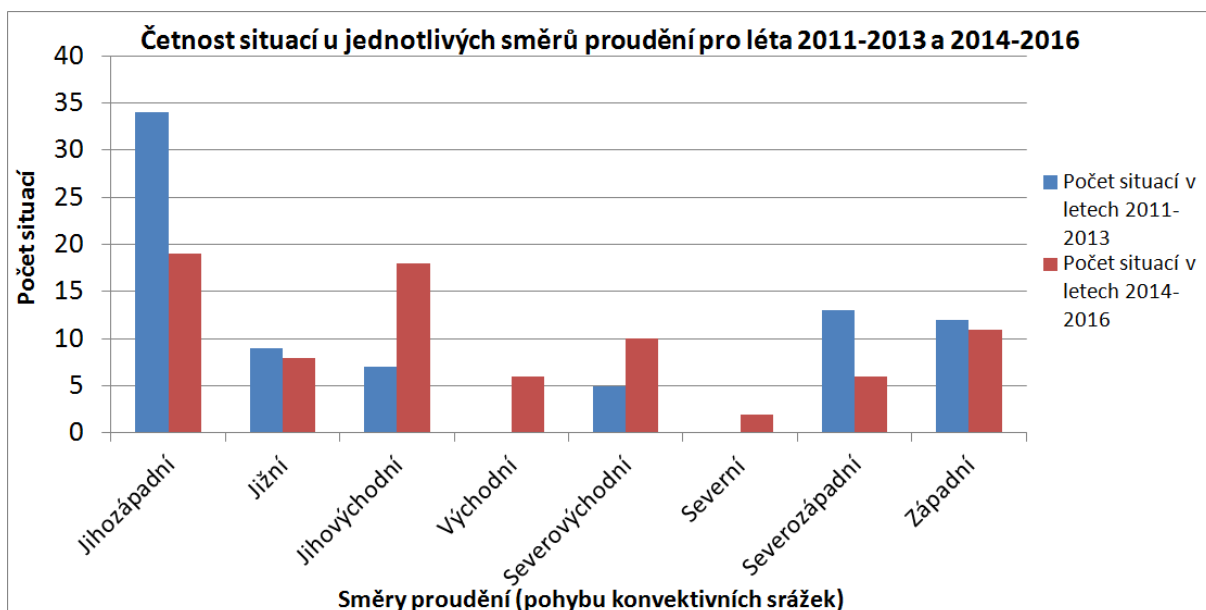
Statistiky rozložení konvektivních srážek byly vypočítány pro osm směrů řídicího proudění<sup>20</sup> (dále „směr proudění“), rozdělených na proudění jihozápadní (JZ), jihovýchodní (JV), jižní (J), západní (Z), severozápadní (SZ), severní (S), severovýchodní (SV) a východní (V), včetně jejich deseti drah bouřek v rámci hodnocení 160 situací ve Zlínském kraji. Zejména pak statistika drah bouřek a směrů proudění slouží pro orientační porovnání s výstupy Algoritmu. Výstupní předpověď statistikou sice nebude ovlivňována, nicméně v případě, že by došlo k výpadku Internetu a selhání dodávky vstupních dat z NWP modelů, pak by tato statistika byla zřejmě jediným výstupem pro stanovení orientační předpovědi místa a intenzity výskytu.

Podrobnější popis a charakteristiky jednotlivých směrů proudění včetně jejich drah bouřek je uveden v příloze dokumentu „Statistika\_rozložení\_konvektivních\_srážek\_ve\_Zlínském\_kraji.pdf“ a ve složce „Statistika\_směrů\_proudění“ (např. JZ\_proudění.xlsx a dalších sedm směrů proudění).

Četnost výskytu situací u jednotlivých směrů proudění je zcela odlišný. Z celkového počtu situací podle grafu 5.12 převládá jihozápadní a jihovýchodní proudění. Nejméně situací se vyskytlo při východním a severním proudění u několika situací za šest konvektivních sezón.

---

<sup>20</sup> Směr řídicího proudění se považuje směr izohyps na mapách absolutní topografie hladin 700 nebo 500 hPa (Meteorologický slovník terminologický a výkladový, 1993 – 2017). Směr řídicího proudění je počítán Algoritmem jako průměr hladin 700, 600 a 500 hPa a představuje směr pohybu srážek, určený podle výstupů meteorologického radaru Skalky sítě CZRAD a meteorologického radaru MMR50 Zlínského kraje.



Graf 5.12: Četnost výskytu situací u jednotlivých směrů řídicího proudění za období let 2011 - 2013 a 2014 - 2016 (ČHMÚ, 1997 - 2017)

Hlavním výstupem statistiky je tabulka 5.40, ve které je uveden spouštěcí mechanismus vzniku konvekce včetně jeho prostorové orientace, nejvyšší pravděpodobnost výskytu konvektivních srážek v obcích s rozšířenou působností Zlínského kraje a nejvyšší stupeň rizika vzniku přívalových povodní.

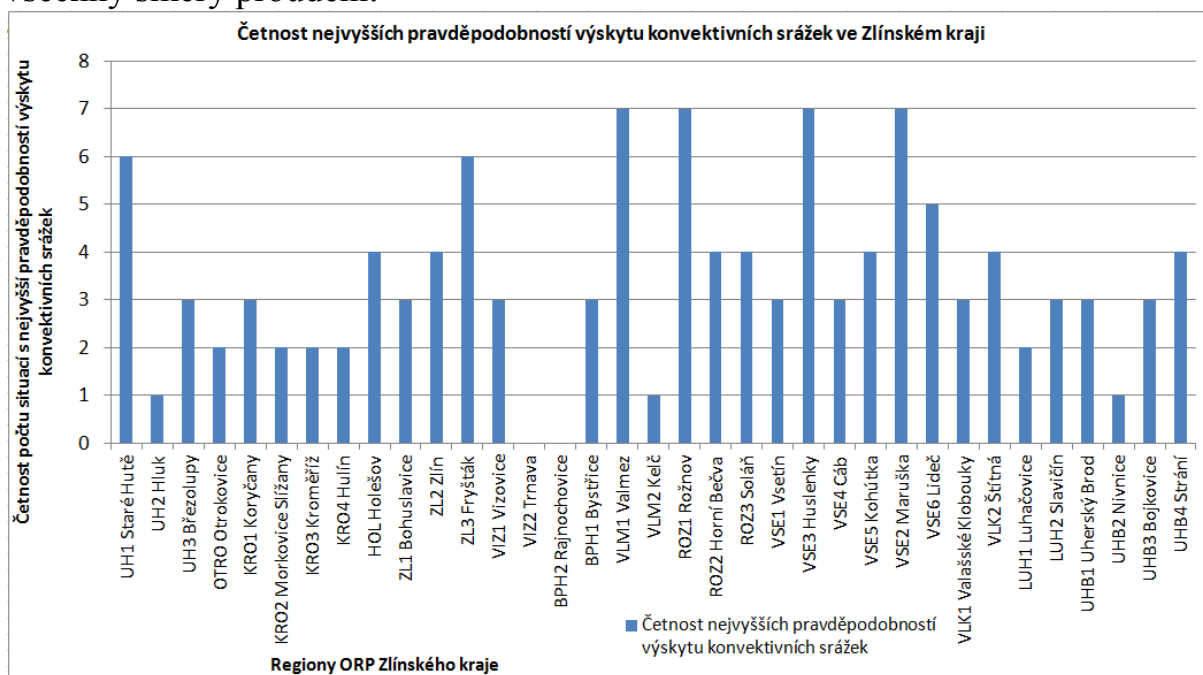
Tabulka 5.40 Statistika rozložení konvektivních srážek.

Směr proudění, dráha bouřek	Spouštěcí mechanismus konvekce a jeho prostorová orientace	Nejvyšší pravděpodobnost výskytu bouřek/nejvyšší stupeň rizika vzniku přívalové povodně v ORP Zlínského kraje
Jihozápad - JZ1 Západ a střed	Brázda T a Zvlněná studená fronta (východ Alp-Moravská brána-Ostrava)	Uherské Hradiště, Kroměříž, Holešov, Zlín, Bystřice p. Hostýnem a Valašské Meziříčí
Jihozápad - JZ1 Východ a střed	Brázda T a Zvlněná studená fronta (Maďarsko-západní Slovensko-jih Polska)	Uherské Hradiště, Valašské Meziříčí, Rožnov p. Radhoštěm, Vsetín a Uherský Brod.
Jih – J1 Západ	Brázda T a Zvlněná studená fronta (východ Rakouska-západ Zlínského kraje)	Uherské Hradiště, Holešov, Zlín, Valašské Meziříčí, <b>Vsetín</b> a Uherský Brod.
Jih – J2 Východ a střed	Brázda T a Zvlněná studená fronta (Maďarsko, západní Slovensko, hranice ČR)	Uherský Brod, Luhačovice, <b>Val. Klobouky, Vsetín</b> , Zlín, Valašské Meziříčí a Bystřice p. Hostýnem

Směr proudění, dráha bouřek	Spouštěcí mechanismus konvekce a jeho prostorová orientace	Nejvyšší pravděpodobnost výskytu bouřek/nejvyšší stupeň rizika vzniku přívalové povodně v ORP Zlínského kraje
Jihovýchod - JV1 Západ a střed	Brázda T/nefrontální bouřky na zadní straně tlakové výše nad jihovýchodní Evropou	Uherské Hradiště, Holešov, Zlín, Vizovice, Vsetín Valašské Klobouky a Luhačovice.
Jihovýchod - JV2 Východ a střed	Brázda T/ nefrontální bouřky na zadní straně tlakové výše nad jihovýchodní Evropou	Rožnov pod Radhoštěm a Vsetín
Východní proudění	Brázda T/ nefrontální bouřky na přední straně tlakové níže nad východní Evropou	Rožnov p. Radhoštěm, Vsetín, Valašské Meziříčí, Vizovice, Zlín, Otrokovice a Luhačovice
Severovýchod - SV1 Sever a střed	Okluzní fronta z jižního Polska, zvlněná studená fronta nad západním Slovenskem/ nefrontální bouřky nad východním Balkánem	<b>Rožnov pod Radhoštěm, Vsetín, Zlín a Vizovice</b>
Severovýchod - SV2 Jih	Okluzní, teplá fronta ze Slovenska/ nefrontální bouřky nad vých. Balkánem	<b>Vsetín, Valašské Klobouky, Luhačovice a Uherský Brod.</b>
Severní proudění	Nefrontální bouřky na přední/zadní straně tlakové níže/výše nad S a SZ Evropou	Holešov, Bystřice pod Hostýnem, Kroměříž a Zlín
Severozápadní proudění	Brázda T a frontální konvekce na přední/zadní straně níže/výše nad severozápadní Evropou	Uherské Hradiště, Kroměříž, <b>Valašské Meziříčí, Valašské Klobouky a Uherský Brod</b>
Západ Z1-Sever	Brázda T a frontální konvekce na přední/zadní straně níže/výše nad severní Evropou	Valašské Meziříčí, Rožnov p. Radhoštěm a Vsetín
Západ Z2-Střed a jih	Frontální konvekce, teplá fronta, teplý sektor tlakové níže nad střední/severní Evropou, supercelární bouře	Uherské Hradiště, Otrokovice, Kroměříž, Zlín, Vizovice, Vsetín a Valašské Klobouky

Každý směr proudění je charakteristický počátečním impulsem vzniku konvekce. U západních a jižních směrů proudění převládá frontální konvekce. V případě východních a severních směrů se jedná o konvektivní srážkovou oblačnost, která se tvoří uvnitř vzduchové hmoty. Speciálním případem je západní proudění, resp. jeho druhá dráha bouřek Z2 Střed a jih, u níž bylo zaznamenáno několik případů výskytu supercelárních bouří, doprovázených trombami nebo tornády.

Pravděpodobnost výskytu konvektivních srážek se liší podle dané dráhy a směru proudění, nicméně v určitých regionech ORP Zlínského kraje se srážky tvoří mnohem častěji. To dokládá níže přiložený graf, který dokumentuje četnost nejvyšších pravděpodobností výskytu konvektivních srážek souhrnně za všechny směry proudění.

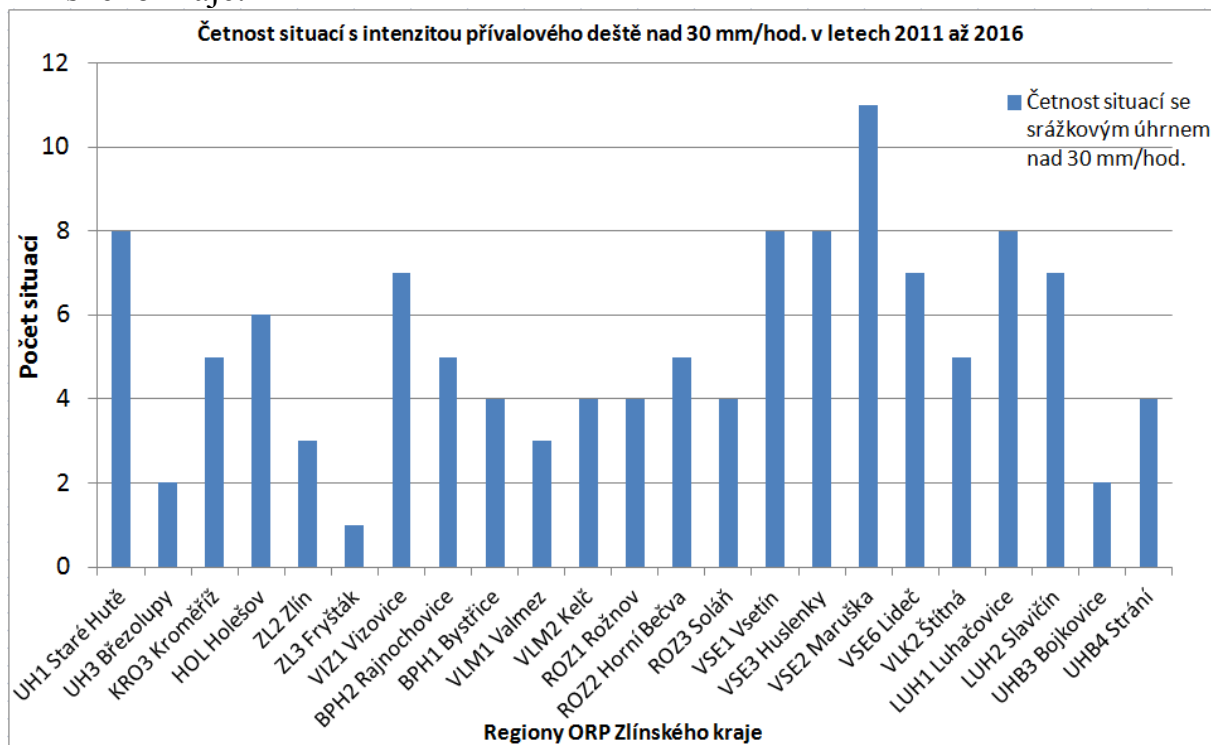


Graf 5.13: Četnost nejvyšších pravděpodobností výskytu konvektivních srážek (ČHMÚ, 1997 - 2017)

Z grafu 5.13 vyplývá, že nejčetnější výskyt konvektivních srážek byl zaznamenán zejména v regionu VLM1 Valmez, ROZ1 Rožnov p. Radhoštěm a regionů ORP Vsetín VSE2 Maruška a VSE3 Huslenky. Na západě konvektivní srážky byly naměřeny v regionu UH1 Staré Hutě v ORP Uherské Hradiště a v centrální části v regionu ZL3 Fryšták ORP Zlín. Nejčastější výskyt konvektivních srážek byl většinou vázán na velmi příznivé podmínky pro tvorbu konvekce. Příkladem příznivých podmínek byly například údolí Rožnovské brázdy, obcí Huslenky-Karolinka a Dolnomoravského úvalu, které vytvářelo ostrý teplotní kontrast s okolním reliéfem pohoří Moravskoslezských Beskyd, Hostýnsko-vestínského hornatiny a Chřibů.

Statistika rizik vzniku přívalových povodní je zhodnocena ve dvou fázích. První fází je analýza četnosti výskytu srážkových úhrnů nad 30 mm/hod., které

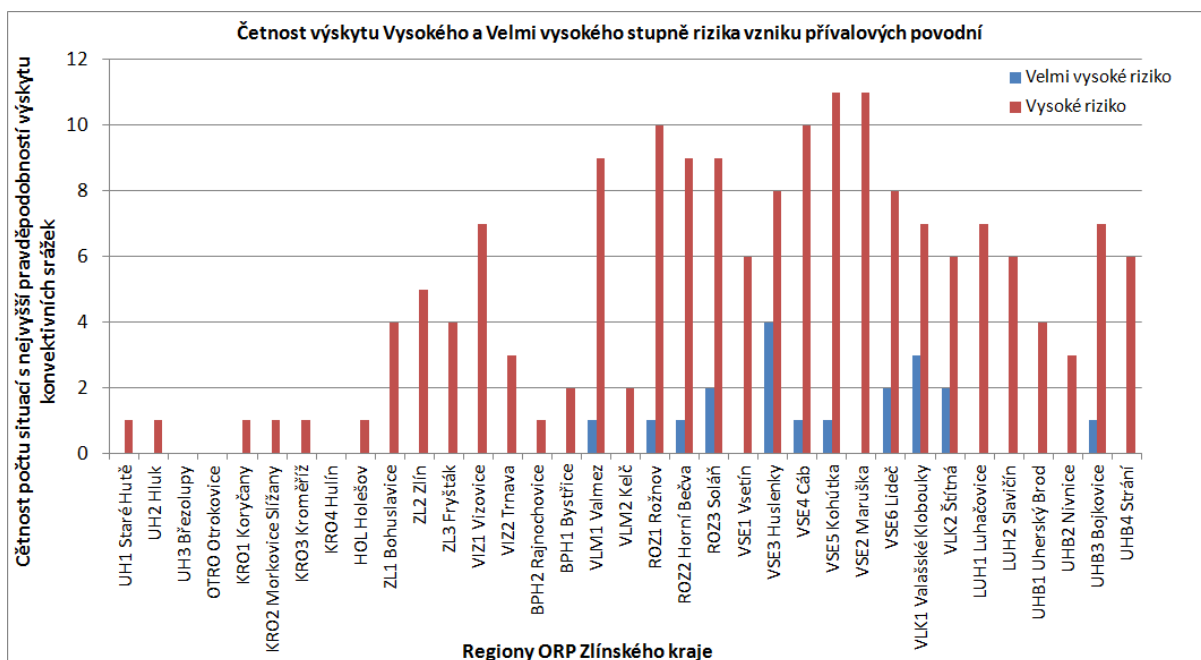
představují zvýšené riziko vzniku přívalové povodně. Statistika srážkových úhrnů se týká povodňových situací ve Zlínském kraji pro období let 1987 - 2016. Druhá fáze je zaměřena na statistiku četnosti Velmi vysokého a Vysokého stupně rizika vzniku přívalové povodně, stanovené v rámci této kapitoly. Cílem je porovnat riziko vzniku přívalových povodní pro jednotlivé regiony ORP Zlínského kraje.



Graf 5.14: Statistika situací s intenzitou srážek nad 30 mm/hod. (ČHMÚ, 1997 - 2017)

V grafu 5.14 byly zaznamenány absolutně nejvyšší hodnoty počtu situací s úhrnem nad 30 mm/hod., které byly naměřeny na stanici Hošťálková v regionu VSE2 Maruška v ORP Vsetín. Současně, i v dalších regionech ORP Vsetín byly detekovány hodnoty přívalového deště, například v regionu VSE1 Vsetín, VSE3 Huslenky a VSE6 Lideč. Jihovýchodní oblasti byly zasaženy nejčastěji v regionech ORP Luhačovice. Na západě to byl region UH1 Staré Hutě v ORP Uherské Hradiště a v centrální části VIZ1 Vizovice.

Nejvyšší stupeň rizika přívalových povodní byl vypočítán pro regiony ORP při výskytu jižního, severovýchodního a severozápadního směru proudění. Četnost výskytu velmi vysokého a vysokého stupně rizika přívalových povodní je zobrazen v grafu 5.15:



*Graf 5.15: Četnost výskytu velmi vysokého a vysokého rizika přívalových povodní ve Zlínském kraji (ČHMÚ, 1997 - 2017)*

Z grafu 5.15 vyplývá, že četnost vysokého stupně rizika vzniku přívalových povodní byla podstatně vyšší než u nejvyššího stupně. To bylo dáno zejména nižšími vstupními hodnotami kritérií Intenzita bouří a Rychlost pohybu srážek pro jednotlivé regiony a směry (dráhy) bouřek. Obou stupňů rizika vzniku přívalových povodní bylo dosaženo s nejvyšším podílem u ORP Rožnov p. Radhoštěm a ORP Vsetín, konkrétně v regionu VSE3 Huslenky. V tomto regionu bylo zaznamenáno v minulosti velké množství případů spojených s přívalovými povodněmi. Dalším významným regionem je VSE6 Lideč, kde byl v minulosti registrován častý výskyt přívalového deště a nebezpečných doprovodných jevů. Třetí oblastí, bohatou na výskyt přívalových povodní v minulosti je ORP Valašské Klobouky. Vysoký a velmi vysoký stupeň rizika byl dosažen mimo východní oblasti Zlínského kraje také v regionu UHB3 Bojkovice v ORP Uherský Brod. Centrální oblasti Zlínského jsou zastoupeny regionem VIZ1 Vizovice a ZL2 Zlín.

### **5.5.2 Závěr statistiky rozložení konvektivních srážek ve Zlínském kraji**

Cílem této kapitoly bylo uvést výsledky statistik rozložení konvektivních srážek z hlediska směrů proudění (směru pohybu srážek). Tyto statistiky byly zaměřeny zejména na analýzu četnosti výskytu konvektivních srážek a jejich prostorovému rozložení na území Zlínského kraje. Z výše uvedených výsledků vyplývá, že konvektivní srážky se nejčastěji vyskytovaly v oblastech s výraznější orografií a to zejména ve východních a severovýchodních oblastech Zlínského kraje.



Závěrem lze konstatovat, že orografie má určitý vliv na vznik a vývoj konvektivních srážek v dané oblasti, což vyplývá z výše uvedených výsledků. Z výpočtu povětrnostních situací za léta 2015 až 2017 bylo zjištěno, že orografie terénu může významně podpořit vznik a vývoj tzv. bouřek z tepla, které se vyskytují nad danou oblastí téměř bez pohybu. Vliv orografie byl také potvrzen u povodňových situací z let 2015 až 2017. Hlavní příčinou vzniku těchto přívalových povodní byly intenzivní konvektivní srážky (v některých případech přívalový déšť), který se vyskytl na zvlněné studené frontě. Přívalové povodně byly zaznamenány v oblastech s kopcovitým a místy až hornatým terénem. Na základě radarového měření srážek u konkrétních situací bylo odhadnuto, že orografie měla menší vliv na vznik a vývoj mezoměřítkových konvektivních systémů, typu MCC a popř. supercelárních bouří, které jsou pravděpodobně více ovlivněny vlastnostmi atmosféry. Na druhou stranu, v roce 2009 byly zaznamenány přívalové povodně v oblasti Dolnomoravského a Hornomoravského úvalu, kde vliv údolí a okolního terénu významně podpořil vznik a vývoj linie konvergence. Podíl vlivu orografie terénu a vlastností atmosféry je u každé situace odlišný. A proto je nutné vyhodnotit každou situaci zvlášť na základě měnících se vlastností atmosféry podle NWP modelů a konstantních hodnot charakteristik reliéfu. Tyto výsledky byly implementovány do čtvrté předpovědní fáze Algoritmu (předpověď potenciálních spouštěcích mechanismů konvekce v přízemní a mezní vrstvě atmosféry) a ověřeny v rámci předpovědi bouří za léta 2015 až 2017. Na základě výsledků výpočtu 62 situací bylo ověřeno, že vliv orografie má svůj význam v předpovědi bouří a v případě, že by tyto faktory nebyly zohledněny, tak by nebyly dosaženy takto vysoké výsledky úspěšnosti předpovědních výstupů Algoritmu.

## 6. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

V rámci této kapitoly je popsán význam návrhu Algoritmu předpovědi bouří pro vědu i praxi z hlediska jejího obsahu a naplněných cílů. Výstupem je popis využití výsledků výzkumu, uvedeného v následujících dvou podkapitolách.

### 6.1 Přínos práce pro vědu

Tato disertační práce je přínosná vědecké komunitě zejména z hlediska uvedení návrhu postupu kvantitativního hodnocení předpovědi konvektivních srážek a nebezpečných jevů včetně výpočtu rizika přívalové povodně. Výstupy těchto postupů byly implementovány do navrženého Algoritmu předpovědi bouří. Algoritmus byl ověřen z hlediska vhodné konfigurace předpovědních fází a parametrů NWP modelů, včetně jednotlivých charakteristik reliéfu na základě 63 vypočítaných předpovědí za léta 2015 až 2017. Tyto charakteristiky byly také ověřeny prostřednictvím metod prostorové analýzy s využitím platformy ArcGIS.

Hlavním cílem navrženého Algoritmu je zpřesněná předpověď místa výskytu srážek pro území menší, než je krajský územní celek. Velikost předpovídané plochy představuje území obcí s rozšířenou působností a experimentálně stanovených regionů ORP. Dalším cílem Algoritmu je prodloužení celkové doby předstihu na 6 až 12 hodin (orientačně až na 24 hodin) prostřednictvím NWP modelů, které tvoří jeden z hlavních zdrojů vstupních dat Algoritmu.

Algoritmus předpovědi bouří byl navržen na základě analýzy dostupných publikačních a knižních výstupů jako logicky uspořádaný celek vstupních dat z NWP modelů a ostatních dat pro účely statistické předpovědi. V rámci výpočtů předpovědí celé řady situací, spojených s výskytem konvektivních srážek, byla otestována celá řada předpovědních výstupů, použitelných v praxi. V první řadě se jedná o parametry určující budoucí vývoj vlastností atmosféry. Zde, kromě tradičních indexů instability, kterými jsou například modifikace CAPE, úspěšně byly testovány další parametry jako Moisture Convergence a Moisture Flux Divergence v hladině 0 - 1 km. Tyto předpovědní parametry byly experimentálně vyvinuty v USA a u nás jsou v předpovědní praxi používány pro orientační odhad podmínek, příznivých pro počáteční vznik konvekce. Nicméně, po jejich důsledném otestování bylo zjištěno, že právě tyto parametry významně ovlivňují vysokou úspěšnost předpovědních výstupů Algoritmu. A proto tyto předpovědní parametry dostaly vyšší prioritu a vyskytují se v mnoha dílčích i hlavních předpovědních výstupech Algoritmu. Dalšími významnými předpovědními parametry jsou mechanismy, podporující pohyb bouře. Na základě výpočtu předpovědí, včetně analýzy skutečného stavu tří povodňových událostí v letech 2015 až 2017, bylo prokázáno, že právě velmi pomalý nebo až stacionární pohyb konvektivních bouří významně podpořil vznik přívalových povodní ve Zlínském kraji. Z těchto důvodů, tento dílčí předpovědní výstup byl implementován do předpovědi intenzity bouří a rizika přívalových povodní.

Výsledky disertační práce v této odborné oblasti byly publikovány v řadě odborných příspěvků v rámci mezinárodních konferencí a recenzovaných časopisech, evidovaných v databázích Scopus a Web of Science.

## 6.2 Přínos práce pro praxi

Hlavní výsledky práce bude možné uplatnit zejména v oblasti krizového řízení jako podpora včasného varování před pravděpodobným nebo již aktuálním výskytem silných konvektivních srážek a nebezpečných doprovodných jevů, které mohou vyvolat přívalové povodně. V budoucnu, přínos této práce bude mít jistě zásadní společenský význam. Hlavním úkolem státu je zajistit bezpečnost občana. Nicméně, současné možnosti státu, ale i vědy a techniky neumožňují realizovat tento úkol v plném rozsahu. Jedním z hlavních přínosů je včasné varování před touto nenadálou mimořádnou událostí. Dalším přínosem je využití v řadě dalších odvětví, například ochrany prvků kritické infrastruktury, zemědělství, dopravě, průmyslové výrobě, pojišťovnictví a všude tam, kde počasí může významně ovlivnit svými negativními projevy lidskou činnost. Přínos této práce může být oceněn jak obyvatelstvem, tak i subjekty soukromého sektoru. Důležitý přínos může mít i v pojišťovnictví, kde by mohla být využita statistika rozložení konvektivních srážek pro hodnocení nejrizikovějších oblastí z hlediska výskytu přívalových povodní, ale také nebezpečných jevů (krupobití, silných nárazů větru, apod.). Jedním z hlavních důvodů, proč je nutné výzkumu této oblasti věnovat zvýšenou pozornost, je kvůli nárůstu četnosti výskytu extrémních projevů počasí, způsobených globální změnou klimatu.

Předpověď konvektivních srážek a nebezpečných jevů s delší dobou předstihu, řádově několika hodin, bude součástí návrhu informačního podpory krizového řízení kraje, jehož účelem bude poskytování informací o budoucím i aktuálním stavu srážkové situace pro jednotlivá ORP v kraji. Tyto výstupy budou následně porovnány s předpovědní výstražnou informací SIVS ČHMÚ. V prvním případě, když výstraha na výskyt nebezpečí silných bouřek nebude vydána, pak budou tyto výstupy sloužit pro orientační náhled na budoucí vývoj situace. V druhém případě, pokud výstraha bude vydána, pak jsou tyto informace cenným zdrojem z hlediska doplňující a zpřesňující předpovědi k výstrahám ČHMÚ. Z hlediska předpovědi s kratší dobou předstihu, maximálně do hodiny, tyto informace budou doplněny o výstupy nowcastingu s využitím meteorologických radarů, včetně dalších informačních zdrojů, například družicového měření oblačnosti, aerologického měření atmosféry, staničního měření meteorologických prvků, popř. hydrologických informací. Tyto výstupy mohou významně podpořit rozhodovací procesy pracovníků krizového řízení při hrozbě povodní, vyvolaných přívalovým deštěm.

## ZÁVĚR

V průběhu řešení dizertační práce byly specifikovány dva cíle, který byly orientovány na návrh kvantitativního hodnocení podmínek, příznivých pro vznik přívalových povodní. Tento typ povodní v posledních letech způsobil značné materiální škody a v důsledku toho stanovil hlavní problém pro orgány krizového řízení. Úkolem těchto orgánů je zajistit včasná preventivní opatření v případě blížící se povodně. Orgány krizového řízení nemají v současnosti dostatek detailních informací o budoucím výskytu intenzivních konvektivních srážek od Českého hydrometeorologického ústavu, který tyto informace poskytuje prostřednictvím Systému integrované výstražné služby. A proto hlavním cílem této práce bylo navrhnout a ověřit algoritmus, který by danou předpověď zpřesnil z hlediska lokálního výskytu těchto nebezpečných jevů s dostatečnou dobou předstihu.

Hlavním přínosem této práce z hlediska novosti je návrh Algoritmu předpovědi bouří, jehož součástí je předpověď podmínek, podporujících počáteční vznik a vývoj konvekce s využitím analýzy zkoumaného terénu vybraného krajského územního celku. Vliv těchto podmínek na výskyt silných konvektivních srážek, které způsobilý přívalové povodně ve Zlínském kraji, byl ověřen prostorovou analýzou jedenácti charakteristik reliéfu. Mimo tyto analýzy byla provedena statistika rozložení konvektivních srážek pro osm směrů proudění, která potvrdila četnost výskytu srážek v souvislosti s vlivy potenciálních spouštěcích mechanismů, podporujících počáteční vznik atmosférické konvekce.

Mimo návrh Algoritmu předpovědi bouří, jakožto jednoho z cílů práce, byla vytvořena „Metodika využití meteorologického radaru Zlínského kraje pro potřeby krizového řízení“. V rámci této metodiky byly implementovány některé postupy kvantitativního hodnocení podmínek pro vznik povodní, včetně poznatků získaných při práci s X-pásmovými, C-pásmovými meteorologickými radary a ostatními meteorologickými měřicími a předpovědními nástroji.

V současnosti, tento Algoritmus zatím nebyl programován z důvodu jeho testování na řadě historických situací a následnou konfigurací předpovědních parametrů a klasifikačních tabulek. V následujících letech proto bude nutné tento Algoritmus prověřit na mnohem větším počtu situací tak, aby byla dostatečně ověřena jeho funkcionality a konfigurace všech předpovědních parametrů. Programování Algoritmu bude řešeno v rámci připravovaných vědeckovýzkumných projektů.

Budoucí výzkum bude zaměřen na revizi poslední optimalizace Algoritmu za účelem nalezení nejvhodnějších předpovědních parametrů a dosažení vyšší úspěšnosti oproti současnému stavu. Hlavním záměrem bude nabídnout tento Algoritmus Českému hydrometeorologickému ústavu pro zařazení do operativního režimu z hlediska vydávání předpovědních výstražných informací na nebezpečné jevy, související s výskytem konvektivních bouří.

# SEZNAM LITERATURY

## Kniha

KOPÁČEK, J. a BEDNÁŘ, J. *Jak vzniká počasí*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2005, příl. ISBN 80-246-1002-7.

LUKÁŠ, L. et. al. *Informační management v bezpečnostních složkách*. 1. vyd. Praha: Ministerstvo obrany České republiky, 2008. 214 s. ISBN 978-80-7278-460-8.

PROCHÁZKOVÁ, D. 2007. *Metodika pro odhad nákladů na obnovu majetku v územích postižených živelní nebo jinou pohromou*. 1.vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě. ISBN 978-80-86634-98-2.

ŘEZÁČOVÁ, D. et. al. *Fyzika oblaků a srážek*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2007. 574 s., Gerstner; sv. 2. ISBN 978-80-200-1505-1.

## Článek v elektronickém časopise

BLUESTEIN H. B., PARKS C. R., A synoptic and photographic klimatology of low precipitation severe thunderstorms in the southern plains. *Mon. Wea. Rev.* 111, 1983, s. 2034-2046.

DOSWELL Ch., A. Severe convective storm. *Meteorolog., Monogr.*, 28, *American Meteorological Society*, 2001, 651 s.

HENRY, N. L. A static stability index for low-topped convection. *Wea. Forecasting.*, 2000, 15, 246-254.

HUNTRIESER, H., SCHIESSER H. H., SCHMID W. A WALDVOGEL A. Comparison of traditional and newly developed thunderstorm indices for Switzerland. 1997. *Wea. Forecasting*, 12, 108-124.

JANÁL, P. a STARÝ M. Fuzzy model use for prediction of the state of emergency of river basin in the case of flash flood. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* [online]. 2009-01-1, 57(3). DOI: 10.2478/v10098-009-0013-1. ISSN 0042-790x. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/johh.2009.57.issue-3/v10098-009-0013-1/v10098-009-0013-1.xml>

OBRUSNÍK, I. 2006. Rizikové situace způsobené počasím. *Meteorologické zprávy: Meteorological Bulletin* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 59(6) ISSN 0026-1173. Dostupné z: [http://iris.env.cz/ris/ekodisk-new.nsf/e75c7074f3a42826c1256b0100778c9a/4ab2c3258d4743aac12576410026f2b0/\\$FILE/MZ%202006\\_6.pdf](http://iris.env.cz/ris/ekodisk-new.nsf/e75c7074f3a42826c1256b0100778c9a/4ab2c3258d4743aac12576410026f2b0/$FILE/MZ%202006_6.pdf)

## Online dostupné verze

BLUESTEIN, H. B. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes*, vol. II (Observations and Theory of Weather Systems). New York: Oxford University Press, 1993. 606 s. ISBN: 0-19-506268-X.

BROOKS, H. E., MARSH P. T., KOWALESKI A. M., GROENEMEIJER P., THOMPSON T. E., SCHWARTZ C. S., SHAFER C. M., KOLODZIEJ A., DAHL N., a kol. Evaluation of European Storm Forecast Experiment (ESTOFEX) forecasts. *Atmospheric Research* [online]. 2011, 100 (4): 538-546 DOI: 10.1016/j.atmosres.2010.09.004. ISSN 01698095. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169809510002425>

ČHMÚ. *Check list bouřek*. Dostupné z: [http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjQ5ubf9qLWAhWCHJoKHR4xAnQQFggmMAA&url=http%3A%2F%2Fportal.chmi.cz%2Ffiles%2Fportal%2Fdocs%2Fmeteo%2Fom%2Fweather\\_links%2FPocasi%2FBourky%2FCheck\\_list\\_bourky.xls&usg=AFQjCNE4T9r5qL8J1\\_3yiajp05o3ywJLuQ](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjQ5ubf9qLWAhWCHJoKHR4xAnQQFggmMAA&url=http%3A%2F%2Fportal.chmi.cz%2Ffiles%2Fportal%2Fdocs%2Fmeteo%2Fom%2Fweather_links%2FPocasi%2FBourky%2FCheck_list_bourky.xls&usg=AFQjCNE4T9r5qL8J1_3yiajp05o3ywJLuQ)

EHMELE, F., BARTHLOTT Ch., CORSMEIER U., DE LA TORRE A., ALEXANDER P., ODIARD A. The influence of Sardinia on Corsican rainfall in the western Mediterranean Sea: A numerical sensitivity study. *Atmospheric Research* [online]., 2015, 153, 451-464, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169809514003731>

HIERRO, R., PESSANO H., LLAMEDO P., DE LA TORRE A., ALEXANDER P., ODIARD A. Orographic effects related to deep convection events over the Andes region. *Atmospheric Research*, 201, 3120-121, 216-225 <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169809512002876>

HOUZE, R. A. *Orographic effects on precipitating clouds*. Reviews of Geophysics [online]. 2012, vol. 50, issue 1, s. DOI: 10.1029/2011RG000365. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2011RG000365>

LAKSHMANAN, V., CROCKETT J., SPEROW K., BA M. a XIN L. 2012. Tuning AutoNowcaster Automatically. *Weather and Forecasting* [online]. 27(6): 1568-1579. DOI: 10.1175/WAF-D-11-00141.1. ISSN 0882-8156. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/WAF-D-11-00141.1>

LEE, R. a. PASSNER, J. E. 1993. The development and verification of TIPS: An Expert System to Forecast Thunderstorm Occurrence. *Weather and Forecasting* [online]. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0434%281993%29008%3C0271%3ATDAVOT%3E2.0.CO%3B2>

LU, J., VECCHI, G. A., REICHLER, T. Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical Research Letters*. 2007, 34 (6). DOI:10.1029/2006GL028443.

MARKOWSKI, P. M., RICHARDSON, Y. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. 1. vyd. Barcelona: Wiley-Blackwell, 2010. 407 s. ISBN: 978-0-470-74213-6

MEISLOVÁ, K. *Prostorové vzorce aktivit vybraných skupin odvětví* [online]. Technologické centrum AV ČR, 2015. Dostupné také z: <https://www.strast.cz/cs/storage/download/67a3cc896326104cbffdcaab6a0fa1404325888f?uid=67a3cc896326104cbffdcaab6a0fa1404325888f>

MIGLIETTA, M. M., a ROTUNNO R. Numerical Simulations of Conditionally Unstable Flows over a Mountain Ridge. *Journal of the Atmospheric Sciences* [online]. 2009, 66(7), 1865-1885 DOI: 10.1175/2009JAS2902.1. ISSN 0022-4928. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009JAS2902.1>

MILDE, D. *Lineární regrese* [online]. 2011. Dostupné také z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/10-linearniregrese-pdf-1321473895.pdf>

NISI, L., AMBROSETI, P., CLEMENTI, L. Nowcasting severe convection in the Alpine region: the COALITION approach. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* [online]. 2014, vol. 140, issue 682, s. 1684-1699 [cit. 2014-12-23]. DOI: 10.1002/qj.2249. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/qj.2249>

NOVÁK, P. a KYZVAROVÁ H. Obnova meteorologické radarové sítě CZRAD v roce 2015. *Meteorologické zprávy* [online]. 2016, (69), 17-24 [cit. 2017-09-22]. Dostupné z: [http://www.cmes.cz/sites/default/files/2016\\_1\\_17-24\\_upr.pdf](http://www.cmes.cz/sites/default/files/2016_1_17-24_upr.pdf)

NOVÁK, P., HAVRÁNEK, P. a KRÁČMAR, J, 2008. Česká meteorologická radarová síť CZRAD v roce 2008. *Meteorologické zprávy*, roč. 61, č. 5, s. 129-136. ISSN 0026-1173.

PANZIERA, L. GERMANN, U., GABELLA, M. P., MANDPAKA, V. "NORA-Nowcasting of Orographic Rainfall by means of Analogues: the COALITION approach. Quarterly" *Journal of the Royal Meteorological Society* [online]. 2011, vol. 137, pp. 661, s. 2106-2123 [cit. 2014-12-23]. DOI: 10.1002/qj.878. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/qj.878>

PIERCE, C. E., HARDAKER P. J., COLLIER C. G. a HAGGETT C. M. GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation. *Meteorological Applications* [online]. 7(4): 341-360. DOI: 10.1017/S135048270000164X. ISSN 13504827. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1017/S135048270000164X>

ZACHAROV, P. a ŘEZÁČOVÁ D. *Srovnání účinnosti diagnostických a prognostických charakteristik konvekčního prostředí* [online]. 2005, **58**, 65-72 [cit. 2017-09-22]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/ris/ekodisk-new.nsf/6d13b004071d0140c12569e700154acb/272beff860536f1dc12573fc00429823/\\$FILE/MZ%202005\\_3.pdf](http://www.mzp.cz/ris/ekodisk-new.nsf/6d13b004071d0140c12569e700154acb/272beff860536f1dc12573fc00429823/$FILE/MZ%202005_3.pdf)

SANDEV, M. a kol. *Předpověď konvektivních jevů: Modelové podklady pro předpovědi bouřek ve VW* [online]. ČHMÚ, 2013. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather\\_links/Pocasi/Bourky\\_s\\_koleni\\_2013/modelove\\_podklady\\_case\\_Sandev.ppt](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Bourky_s_koleni_2013/modelove_podklady_case_Sandev.ppt).

STARÝ, M. *Hydrologie* [online]. ČVUT v Brně, 2005. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BS02-Hydrologie/M02-Hydrologie%20-%20pokracovani.pdf>

SULAN, J. *O spouštění konvekce* [online]. ČHMÚ, 2009. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3282319/>

ŠÁLEK, M. a NOVÁK, P. *Radarová meteorologie-nowcasting* [online]. Český hydrometeorologický ústav, 2012. Dostupné z: <http://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/Z0095/um/nowcasting2012.pdf>

ŠÁLEK, M. 2003. *Předpověď počasí, současné trendy v meteorologii* [online]. Dostupné z: [http://is.muni.cz/el/1431/podzim2006/Z0076/um/Predpoved\\_pocasi\\_-\\_RNDr.\\_Milan\\_Salek\\_\\_2006.txt](http://is.muni.cz/el/1431/podzim2006/Z0076/um/Predpoved_pocasi_-_RNDr._Milan_Salek__2006.txt)

VASQUEZ, T. *Weather map handbook*. 1 vyd. Austin: Weather Graphics Technologies, 2003. 167 s. ISBN: 0-9706840-4-5.

*WRF-ARW V3: User's Guide* [online]. In: . 2017 [cit. 2017-09-13]. Dostupné z: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3.9/ARWUsersGuideV3.9.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.9/ARWUsersGuideV3.9.pdf)

### **Příspěvek do webového sídla (např. příspěvek v online sborníku)**

NOVÁK P., KYZNAROVÁ H.: Cell-oriented forecasts of Czech weather radar data, *ERAD publication series*, 3, Barcelona, Španělsko, 2006, s. 325-328

ŠÁLEK M., 2010: Operational application of the precipitation estimate by radar and raingauges using local bias correction and regression kriging. In: *Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2010)*, National Meteorological Administration of Romania, Sibiu. [cit. 2015-05-10].

ŠAUR, D. Srovnání nowcastingových systémů pro tvorbu předpovědi počasí. Sborník konference: *Interdisciplinární mezinárodní vědecká konference doktorandů a odborných asistentů QUAERE 2014*. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 4. vyd. 2014. ISBN 978-80-87952-04-7, ETTN 085-14-13028-06-2. [cit. 2015-05-11].

ŠAUR, D. Evaluation of the Accuracy of Numerical Weather Prediction Models. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Verlag, s. 181-193. ISBN 978-3-319-18476-0. [cit. 2015-05-11]. Dostupné také z: [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18476-0\\_19](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18476-0_19)



ŠAUR, D. Use of the Radar and Station Precipitation Measurement for Analysis of Orographic Convection. In: *International Conference on Military Technologies*. 2015. Brno, s. 1-7. ISBN: [cit. 2015-05-12].

ŠAUR, D. a LUKÁŠ L. Výpočetní modely předpovědi počasí jako podpůrný nástroj pro krizové řízení. In: *Zborník príspevkov 7.medzinárodnej vedeckej konferencie Bezpečné Slovensko a Európska Únia*. 2013. Košice, Slovensko: Vysoká škola bezpečnostného manažerstva v Košicích, s. 10. ISBN 978-80-89282-88-3. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://conference.vsbm.sk>

## **Webové sídlo**

*Český hydrometeorologický ústav* [online]. © 1997 - 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné také z: <http://portal.chmi.cz/>

*Meteoalarm*. [online]. © 2008 - 2017 [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.meteoalarm.eu/>

*Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)*. [online]. © 1993 - 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné také z: <http://slovník.cmes.cz>

*Wetter3.de* [online]. Bingen, Německo, 2017 [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://www1.wetter3.de/>

## **Webová stránka (nesamostatná část webového sídla)**

*CLC 2012* [online]. 2017 [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012/view>

*European Storm Forecast Experiment: Forecast* [online]. © 2002 - 2017 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: <http://www.estofex.org/>

Flash Flood Guidance System (FFGS) | WMO. *Flash Flood Guidance System (FFGS) with Global Coverage* [online]. © 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: [http://www.wmo.int/pages/prog/hwrf/flood/ffgs/index\\_en.php](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrf/flood/ffgs/index_en.php)

Forecasting severe convective storm. *Finnish Meteorological Institute*. [online]. © 2014 - 2017 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.estofex.org/guide/>

*Forecast Verification methods Across Time and Space Scales* [online]. © 2017 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/#BS>

FRÖHLICH, T. a PAVLÍKOVÁ M. 2015. *RESPO - Projekt na zvýšení spolehlivosti provozu elektrizační soustavy - 2. díl – Koncepce systému pro podporu řešení kritických stavů v elektro-energetice*. [online]. © 2011 [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: [http://www.bozpinfo.cz/win/josra/josra-03-2011/respo-II\\_frohlich-havlova.html](http://www.bozpinfo.cz/win/josra/josra-03-2011/respo-II_frohlich-havlova.html)

*GFS 0.25 deg [240h]* [online]. Francie, © 2017 [cit. 2017-08-30]. Dostupné z: <http://meteomodel.pl/gfs-para/T2M/00>

Grafy automatických stanic [online]. ČHMÚ, © 2006 - 2017 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/grafy-automatickych-stanic>

Hodinové úhrny srážek ze srážkoměrných stanic [online]. ČHMÚ, © 2006 - 2017 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: [http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps\\_act\\_rain.php](http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_act_rain.php)

HORÁK, J. FLYMET.info - předpověď počasí pro plachtaře: Informace o běhu modelu a obvyklých časech aktualizace. *Flymet*. © 2006 - 2017 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://flymet.meteopress.cz/manual.php>

Veterinární a farmaceutická univerzita, Fakulta veterinárního lékařství *Hodnocení závislosti mezi 2 kvantitativními znaky* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/stat/fvl/teorie/predn5/zavislost.html>

Interpreting OLS results. *Esri*. [online]. © 2016 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/what-is-a-z-score-what-is-a-p-value.htm>

*IPCC AR4 WGI*, Technical Summary, sekce TS 5.3. [online]. © 1997 - 2017 [cit. 2017-08-30]. Dostupné z: [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/tssts-5-3.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/tssts-5-3.html)

JSRadView - prohlížeč radarových dat [online]. ČHMÚ, © 2010 - 2017 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/data\\_jsradview.h](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/data_jsradview.h)

*Korelace a elaborace aneb úvod do vztahů proměnných* [online]. © 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3307306/>

VAN DER VELDE O., *Lightning Wizard Maps* [online]. 2001 [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: [www.lightningwizard.com/maps/](http://www.lightningwizard.com/maps/)

*Lineární korelační závislost* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/statpotr/potr/teorie/predn5/linearni.htm>

KRÁL D., ČHMÚ. Počasí a voda - předpovědní výstražné informace [online]. © 2010-2012 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/zpravy/index.html>

*Melting sea ice increases Arctic precipitation, complicates climate predictions*. [cit. 2017-08-30]. Dostupné z: <http://phys.org/news/2015-12-sea-ice-arctic-precipitation-complicates.html>

*Mesoscale Convective System Propagation* [online]. © 2011 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.wxonline.info/topics/mcsprop.html>

Meteoalarm: alerting Europe for extreme weather [online]. Meteoalarm, © 2009-2017 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: <http://www.meteoalarm.eu/>

*Meteoradar KUZK* [online]. Zlínský kraj, © 2015 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: <https://meteoradar.kr-zlinsky.cz/>

*Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)*. Praha: Česká meteorologická společnost (ČMeS), © 2017. Dostupné také z: <http://slovník.cmes.cz>

*Nauka o Zemi: Teoretická část Atmosféra* [online]. [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/jelinek/tc-atmosfera.htm>

NOVÁK, P. Nowcasting webportal. *Český hydrometeorologický ústav*. [online]. © 2014 [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/inca-cz/>

Numerical Weather Prediction using the model WRF (ARW): *WRF-ARW 4km Central Europe* [online]. © 2014 - 2017. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.modellzentrale.de/WRF4km/#0>

*Odrzivost různých typů povrchů a oblak na Zemi, údaj v procentech* [online]. © 1997 - 2011 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Albedo#/media/File:Aldebo\\_povrch%C5%AF.svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Albedo#/media/File:Aldebo_povrch%C5%AF.svg)

PAGÉ Ch. a CARON J., F. *UQAM Weather Centre: CMC-GDPS Explorer* [online]. Francie, © 2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [http://meteocentre.com/numerical-weather-prediction/map-explorer.php?lang=en&map=fr&run=12&mod=gemglb&stn=PNMMPR&comp=1&run2=12&mod2=gemglb&stn2=PNMMPR&hh2=000&fixhh=1&stn2\\_type=prog&mode=latest&yyy=latest&mm=latest&dd=latest&hh=006](http://meteocentre.com/numerical-weather-prediction/map-explorer.php?lang=en&map=fr&run=12&mod=gemglb&stn=PNMMPR&comp=1&run2=12&mod2=gemglb&stn2=PNMMPR&hh2=000&fixhh=1&stn2_type=prog&mode=latest&yyy=latest&mm=latest&dd=latest&hh=006)

*Project MEDARD* [online]. Research group for nonlinear modelling, © 2017 [cit. 2017-09-22]. Dostupné z: <https://www.cs.cas.cz/nlm/medardindex-en.htm>

Přívalové povodně a možnosti jejich predikce. *Hlásná a předpovědní povodňová služba*. [online]. © 1997 - 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/pruvodce\\_vodohospodari\\_ffg.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/pruvodce_vodohospodari_ffg.html)

Radiosonde Data [online]. *University of Wyoming*, © 1988 - 2017 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

RÝVA D. Prohlížeč aktuálních aerologických sondáží [online]. *ČHMÚ*, © 2017 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: <http://sondaze.bourky.cz/>

Severoatlantická oscilace | vzduch. 2013. *Multimediální ročenka životního prostředí* [online]. © 2013 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.vitejtenazemi.cz/vzduch/index.php?article=68>

SIVS - kód V. Bouřkové jevy: Možné škody a doporučení k eliminaci vlivů. *Český hydrometeorologický ústav*. [online]. © 1997 - 2017. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z:

<http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/sivs/bourky.html>

SMOLKA, V. CAPE - co znamená a jak souvisí s bouřkou. *In-počasi* [online]. © 2017 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/cape-22.4.2014>

Srážky na území ČR [online]. ČHMÚ, © 2006 - 2017 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: [http://hydro.chmi.cz/hpps/main\\_rain.php](http://hydro.chmi.cz/hpps/main_rain.php)

*Statistická analýza plošných jevů* [online]. © 2015. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1431/jaro2015/Z6101/um/39007348/Geostatistika\\_2015\\_08\\_sa\\_II.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/jaro2015/Z6101/um/39007348/Geostatistika_2015_08_sa_II.pdf)

SULAN, J. a kol. CAPE - Convective Available Potential Energy: MOCON - Moisture Convergence. ČHMÚ. [online]. © 2004 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/PL/rpp/cape/cape.htm>

Synoptická situace [online]. ČHMÚ, © 2017 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/evropa/synopticka-situace>

System integrované výstražné služby (SIVS). *Český hydrometeorologický ústav*. [online]. © 2004 [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/sivs/sivs.html>

ŠERCL, R.. Indikátor přívalových povodní. In: *Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu - Možnosti predikce přívalových povodni v podmínkách České republiky*, © 2015, sv. 60. s. 10-28, ISBN 978-80-87577-27-1.

WeatherOnline - Profesionální předpověď. *Weatheronline*. [online]. © 1999 - 2017 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.weatheronline.cz/cgi-bin/expertcharts?LANG=cz&CONT=czcz&MODELL=gfs&VAR=prec>

WRF Modeling System Features: NMM Dynamical Solver. *WRF Users Page, DTC* [online]. Boulder, USA, © 2017 [cit. 2017-09-13]. Dostupné z: [http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/overview/wrf\\_overview.php](http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/overview/wrf_overview.php)

## **Kvalifikační, disertační práce a habilitační práce**

FROLÍK, P. *Využití extrapolace radarového echa pro kvantitativní předpověď srážek*. [online]. Praha, 2007. Praha, 2011. [cit. 2015-05-01]. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí práce

RNDr. Petr Novák, Ph.D. Dostupné z:  
<https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/110406/?lang=cs>

JAROŠ, V. *Výpočetní modelování počasí*. [online]. Brno, 2010. [cit. 2015-04-29]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky. Vedoucí práce doc. Mgr. Radek Pelánek, Ph.D. Dostupné z:  
[is.muni.cz/th/140509/fi\\_m/dp140509.pdf](https://is.muni.cz/th/140509/fi_m/dp140509.pdf).

HOVORKA, M. *Využití metod multikriteriálního hodnocení v bezpečnostní praxi*. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce: doc. Ing. Luděk Lukáš, CSc. Dostupné z:  
[http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/25342/hovorka\\_2013\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/25342/hovorka_2013_dp.pdf?sequence=1)

POKORNÝ, M. *Multimediální přehled synoptické meteorologie* [online]. Praha, 2008. [cit. 2016-04-26]. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze. Matematicko-fyzikální fakulta. Katedra meteorologie a klimatologie. Vedoucí práce Mgr. Michal Žák, Ph.D. Dostupné z:  
<https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/47024/>

PRŮCHOVÁ, K. *Vliv orografie na prostorové rozložení silných srážek na severovýchodě ČR*. [online]. Praha, 2010. [cit. 2016-04-27]. Diplomová práce. Univerzita Karlova. Přírodovědecká fakulta. Katedra fyzické geografie a geoekologie. Vedoucí práce RNDr. Miloslav Müller, Ph.D. Dostupné z:  
<https://is.cuni.cz/webapps/zzp/download/120003378/?lang=cs>

PŮČIK, T. *Možnosti predikce nebezpečných bouřkových jevů* [online]. Brno, 2013. [cit. 2017-05-28]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Miroslav Kolář, CSc. Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/270272/prif\\_m/](http://is.muni.cz/th/270272/prif_m/).

ŠAUR, D. *Využití simulace a modelování v problematice tvorby povodňových plánů* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2017-05-29]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Ústav bezpečnostního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Hromada, Ph.D. Dostupné z: <http://theses.cz/id/q9jght/>.

ZACHAROV, P. *Diagnostické a prognostické prekurzory srážkové konvekce* [online]. Praha, 2004. [cit. 2017-05-29]. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí práce Prof. RNDr. Jan Bednář, CSc. Dostupné také z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/44489/?lang=en>.

## **Interní dokumenty**

RAPANT, P. *Možnosti predikce přívalových povodní*. VŠB-TU Ostrava, Ústav geoniky AV ČR, 2017.

ŠAUR, D. *Metodika využití meteorologického radaru Zlínského kraje pro potřeby krizového řízení*. Zlín, Zlínský kraj, 2016.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Druhy a zastoupení přírodních katastrof ve světě 1960 - 2006 (převzaté od Obrušník, 2006).....	11
Obr. 1.2: Schéma přenosu výstražných informací vydávaných Centrálním předpovědním pracovištěm (Kubát, 2011).....	13
Obr. 4.3: Ukázka vlivu potenciálních spouštěcích mechanismů konvekce. Červené šipky představují teplý a vlhký stoupající vzduch, modré šipky vítr v přízemní vrstvě atmosféry, zelené šipky orografické vlivy a žlutá čára vzestupnou kondenzační hladinu (vlastní zdroj). .....	33
Obr. 4.4: Schéma vývojových stádií jednoduché konvekční cely (Doswell, 2001; Řezáčová et al., 2007, s. 418) .....	34
Obr. 4.5: Albeda jednotlivých typů povrchů a oblaků na Zemi (Odrazivost různých typů povrchů a oblak na Zemi, 2017).....	47
Obr. 4.6: Vznik konvekce při vynuceném výstupu (Houze, 2012, s. 531).....	50
Obr. 4.7: Vznik konvekce konvergencí proudění na závětrné straně (Houze, 2012, s. 531).....	50
Obr. 4.8: Schéma supercelární bouře, spojené s výskytem nebezpečných jevů. Tor – poloha tornáda; WCl (wall cloud) – rotující oblak, který se nachází pod základnou bouře; TCl (tail cloud) – výběžek oblačnosti; FL (flanking line) – pás oblačnosti na boku bouře; VK – velké kroupy; MK – malé kroupy; PD – přívalový déšť; MD – mírný déšť; SD – slabý déšť. Upraveno podle (Bluestein a Parks, 1983 a Řezáčová et. al, 2007, s. 432). .....	52
Obr. 4.9: Princip vzniku gust fronty a s ní spojené silné nárazy větru (Řezáčová et. al., 2007, s. 457) .....	56
Obr. 4.10: Schéma základní struktury tornáda: 1) základna oblačnosti bouře, 2) wall cloud – rotující oblačnost pod základnou bouře, 3) tornádo jako rotující sloupec vzduchu, 4) nálevkovitý kondenzační chobot, 5) vířící prach a trosky .	58
Obr. 5.11: Schéma návrhu využití Algoritmu předpovědi bouří v rámci informační podpory krizového řízení kraje (vlastní zdroj). .....	61
Obr. 5.12: Vývojový diagram cyklu Algoritmu předpovědi bouří pro jeden tříhodinový časový interval (modré obdélníky představuje vstupní data, oranžové obdélníky jsou předpovědní fáze Algoritmu a bílé šestiúhelníky jsou přípravné fáze a podmínky. (vlastní zdroj) .....	63

Obr. 5.13: Schéma zpracování vybrané předpovědní fáze Algoritmu (vlastní zdroj) .....	65
Obr. 5.14: Ukázka tabulky výpočtu dílčího výstupu MLCAPE + LI .....	67
Obr. 5.15: Analýza podmínek pro pokračování předpovědi Algoritmu (vlastní zdroj). .....	71
Obr. 5.16: Schéma předpovědi intenzity bouří (vlastní zdroj) .....	79
Obr. 5.17 Schéma výpočtu rizika výskytu přivalového deště a ostatních nebezpečných jevů (vlastní zdroj) .....	86
Obr. 5.18: Kontingenční tabulka ve standardní metodě verifikace předpovědi srážek (Zacharov, 2004, s. 20).....	96
Obr. 5.19: Mapa rozdělení území Zlínského kraje na 35 regionů ORP (vlastní zdroj) .....	124
Obr. 5.20:Ukázka výstupu Prostorové autokorelace (Esri - Interpreting OLS results, 2016).....	131

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Klasifikace výstupní veličiny fuzzy modelu (Janál, 2009, s. 146) .	26
Tabulka 5.2 Charakteristika NWP modelů (citace NWP modelů zleva doprava: wetter3.de, 2014-2017; meteomodel.pl, 2012-2017; weatheronline.de, 1999-2017; Pagé a Caron, 2017; modelzentralle.de, 2014-2017; flymet.meteopress.cz, 2006-2017).....	68
Tabulka 5.3 Charakteristika druhé předpovědní fáze Algoritmu.....	72
Tabulka 5.4 Klasifikace prvků dílčí předpovědi Teplotní vlivů přízemní vrstvy atmosféry. ....	75
Tabulka 5.5 Klasifikace prvků dílčí předpovědi Vlhkostní vlivy zemského povrchu. ....	76
Tabulka 5.6 Klasifikace prvků dílčí předpovědi Větrné vlivy v přízemní hladině atmosféry. ....	77
Tabulka 5.7 Váhy kritérií nebezpečného jevu přívalový déšť. ....	81
Tabulka 5.8 Váhy kritérií nebezpečného jevu krupobití.....	82
Tabulka 5.9 Váhy kritérií nebezpečného jevu silné nárazy větru. ....	83
Tabulka 5.10 Váhy kritérií nebezpečného jevu tornádo. ....	84
Tabulka 5.11 Klasifikace rizika přívalových povodní podle nasycení území ....	87
Tabulka 5.12 Váhy suché a vlhké varianty př. parametrů a dílčích předpovědí rizika přívalové povodní z let 2015 až 2017. ....	89
Tabulka 5.13 Klasifikace hlavních předpovědních výstupů Algoritmu.....	90
Tabulka 5.14 Klasifikace jevu „Bouřka“ podle kritérií SIVS ČHMÚ (SIVS - kód V ČHMÚ, 2006 - 2017) .....	91
Tabulka 5.15 Verifikační kritéria, Skill Score (Zacharov, 2004, s. 22; cawcr.gov.au, 2017) .....	97
Tabulka 5.16 Vývoj přesnosti předpovědí místa výskytu bouřek u předchozí a současné verze Algoritmu a NWP modelů za léta 2015 a 2016. ....	99
Tabulka 5.17 Průměrné hodnoty BIAS předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.....	105
Tabulka 5.18 Průměrné hodnoty POD předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.....	106
Tabulka 5.19 Průměrné hodnoty FAR předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.....	107
Tabulka 5.20 Průměrné hodnoty CSI předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.....	108



Tabulka 5.21 Průměrné hodnoty HSS předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.....	109
Tabulka 5.22 Průměrné hodnoty PSS předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.....	110
Tabulka 5.23 Průměrné hodnoty TSS předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN pro ORP za léta 2015 až 2017.....	111
Tabulka 5.24 Průměrné hodnoty verifikačních kritérií předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů pro 63 situací za léta 2015 až 2017.....	112
Tabulka 5.25 Průměrná úspěšnost předpovědních parametrů NWP modelů. ..	114
Tabulka 5.26 Verifikační kritéria vlivu konvergence a orografických vlivů. ..	115
Tabulka 5.27 Srovnání předpovědních výstupů Algoritmu s reálným stavem pro interval 18 - 21 hod. 24. 7. 2015.....	116
Tabulka 5.28 Verifikační kritéria předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů pro povodňovou událost ze dne 24. 7. 2015.....	117
Tabulka 5.29 Srovnání předpovědních výstupů algoritmu s reálným stavem pro interval 21 - 24 hod. 5.8.2016. ....	119
Tabulka 5.30 Verifikační kritéria předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů pro povodňovou událost 5. 8. 2016.....	120
Tabulka 5.31 Srovnání předpovědních výstupů Algoritmu s reálným stavem pro 15 - 18 hod. 22. 7. 2017 .....	121
Tabulka 5.32 Verifikační kritéria předpovědních výstupů Algoritmu a NWP modelů pro povodňovou událost 22. 7. 2017.....	122
Tabulka 5.33 Průměrné hodnoty verifikačních kritérií předpovědních výstupů Algoritmu a modelu ALADIN (ORP) pro povodňové události z let 2015 až 2017 .....	123
Tabulka 5.34 Klasifikace charakteristik reliéfu teplotních vlivů.....	125
Tabulka 5.35 Klasifikace charakteristik reliéfu orografických a větrných vlivů v přízemní vrstvě atmosféry .....	126
Tabulka 5.36 Průměrné hodnoty jednotlivých statistických kritérií Metody nejmenších čtverců pro vybrané povodňové situace z let 1987-2016.....	129
Tabulka 5.37 Pozitivní prostorová autokorelace povodňových událostí. ....	132
Tabulka 5.38 Četnost typů korelačních závislostí na charakteristice překryvu a průměru.....	136
Tabulka 5.39 Výsledné hodnoty vah korelačních závislostí charakteristik reliéfu Zlínského kraje. ....	137
Tabulka 5.40 Statistika rozložení konvektivních srážek. ....	140

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1.1: Srovnání povodňových škod a ztrát na lidských životech v letech 1997-2017 pro území České republiky (Procházková, 2007; Portal.chmi.cz, 2001-2017).....	12
Graf 5.2: Přesnost předpovědí předchozí verze Algoritmu předpovědi bouřek na vybraných povětrnostních situacích za rok 2015 (vlastní zdroj) .....	99
Graf 5.3: Průměrná přesnost předpovědních výstupů Algoritmu pro regiony ORP (vlastní zdroj).....	100
Graf 5.4: Průměrná přesnost předpovědních výstupů Algoritmu pro ORP (vlastní zdroj).....	100
Graf 5.5: Průměrná úspěšnost předpovědi času výskytu srážek podle NWP modelů (vlastní zdroj) .....	101
Graf 5.6: Průměrná přesnost předpovědi místa výskytu srážek NWP modelů pro ORP (vlastní zdroj).....	102
Graf 5.7: Průměrná přesnost předpovědi denního a nočního výskytu srážek pro ORP (vlastní zdroj).....	102
Graf 5.8: Průměrná přesnost předpovědi denního a nočního výskytu srážek (ORP) (vlastní zdroj).....	103
Graf 5.9: Srovnání úspěšnosti vydaných výstrah na jev „Bouřka“ (vlastní zdroj) .....	104
Graf 5.10: Histogram četnosti výskytu hot a cold spotů v regionech ORP Zlínského kraje (vlastní zdroj).....	133
Graf 5.11: Histogram korelačních závislostí charakteristik reliéfu Zlínského kraje (vlastní zdroj) .....	135
Graf 5.12: Četnost výskytu situací u jednotlivých směrů řídicího proudění za období let 2011 - 2013 a 2014 - 2016 (ČHMÚ, 1997 - 2017) .....	140
Graf 5.13: Četnost nejvyšších pravděpodobností výskytu konvektivních srážek (ČHMÚ, 1997 - 2017) .....	142
Graf 5.14: Statistika situací s intenzitou srážek nad 30 mm/hod. (ČHMÚ, 1997 - 2017).....	143
Graf 5.15: Četnost výskytu velmi vysokého a vysokého rizika přívalových povodní ve Zlínském kraji (ČHMÚ, 1997 - 2017).....	144

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AdjR <sup>2</sup>	Adjusted R-Squared
AIC	Akaike's Information Criterion
AICc	Corrected Akaike's Information Criterion
ANC	AutoNowCaster
ALADIN	Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BIAS	Bias score
BWER	Bounded Weak Echo
CAPE	Convective Available Potential Energy
CELLTRACK	Convective Cell Tracking Algorithm
CIN	Convective Inhibition
COALITION	Context and Scale Oriented Thunderstorm Satellite Predictors Development
CSI	Critical Success Index
CZRAD	Czech Radar Network System
ČR	Česká republika
ČHMÚ	Český Hydrometeorologický ústav
DCAPE	Downdraft Convective Available Potential Energy
DLS	Deep Layer Shear
DTHE	Delta-Theta-E
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EHI	Energy Helicity Index
ESTOFEX	European Storm Forecast Experiment

EUMETSAT	European Organisation for the Expoitation of Meteorological Satelittes
FAR	False Alarm Ratio
FFG	Flash Flood Guidance
F-Prob	Joint F-Statistics Probability
F-Stat	Joint F-Statistics
GANDOLF	Generating Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Land-based flood Forecasts
GFS	Global Forecasting System
GPS	Global Positioning System
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model
HNV	Hladina nulového vztlaku
HOOK	Hook Echo
HSS	Heidke Skill Score
HVK	Hladina volné konvekce
HZS	Hasičský záchranný sbor
INVJ	Informace o výskytu nebezpečných jevů
IZS	Integrovaný záchranný systém
JB	Jarque-Bera Statistic
JB-Prob	Jarque-Bera Probability
km	kilometr
kW	kilowatt
LAM	Limited Area Model
LCL	Lifted Condensation Level
LI	Lifted Index

LLS	Low Layer Shear
MCS	Mesoscale Convective System
MCC	Mesoscale Convective Complex
MFDIV	Moisture Flux Divergence
MOCON	Moisture Convergence
MTV	Moisture Transport Vector
MSG	Meteosat Second Generation
MSLP	Mean Sea Level Pressure
MM5	Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model
MUCAPE	Most Unstable Convective Available Potential Energy
MUCIN	Most Unstable Convective Inhibition
NAO	North Atlantic Oscillation
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NORA	Nowcasting of Orographic Rainfall by means of Analogues
NWP	Numerical Weather Prediction
OLS	Ordinary Least Square
ORP	Obec s rozšířenou působností
POD	Probability Of Detection
PSS	Probablity Skill Score
PVI	Předpovědní Výstražná Informace
PVS	Předpovědní Výstražný Systém
R <sup>2</sup>	R-Squared
RESPO	Resilient Power
RHI	Range Height Indicator

SBCAPE	Surface Based Convective Available Potential Energy
SELČ	Středoevropský letní čas
SHIP	Significant Hail Parameter
SHMU	Slovenský hydrometeorologický ústav
SI	Showalter Index
SIVS	Systém integrované výstražné služby
SR	Storm Relative Helicity
SREH	Success Ratio
SWEAT	Severe Weather Threat Index
TT Index	Totals Totals Index
TIPS	Thunderstorm Intelligence Prediction System
TSS	True Skill Statistics
UTC	Coordinated Universal Time
VAD	Velocity Azimuth Display
VIL	Vertically Integrated Liquid
Wald	Wald Statistics
Wald – Prob	Wald Statistics Probability

## **PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA**

### **Články v recenzovaných časopisech evidovaných v databázi WoS, SCOPUS**

ŠAUR, D. a PLŠEK S. Measurement and prediction of precipitation using a MMR50 Meteorological Radar. *International Journal of Curcuits, Systems and Signal Processing* [online]. 2014, Volume 8, s. 8 [cit. 2015-01-05]. ISSN: 1998-4464. Dostupné

z: <http://www.naun.org/main/NAUN/circuitssystemssignal/2014/a192005-045.pdf>

ŠAUR D., ŽÁK R., ŠVEJDA J. The Use of Radar Data Mining for Forecasting of Convective Precipitation. *International Journal Energy and Environment*. Vol 10, 2016, pp.: 124-131. ISSN 2308-1007.

ŠAUR, D. Methodology of the Use of Meteorological Radar MMR50 and Other Meteorological Systems for Purpose Determination Risk of Flash Floods. *WSEAS Transactions on Computer Research*, 2016, roč. 2016, č. Volume 4, s. 109-122. ISSN 1109-2750.

### **Články přijaté do recenzního řízení v impaktovaném časopise evidovaném v databázi WoS, SCOPUS**

ŠAUR, D. The Algorithm of Storm Prediction as one of the forecasting tools of convective precipitation and dangerous phenomena in the region. *Geografie*. Česká geografická společnost, 2017, 1-22. ISSN 1212-0014.

ŠAUR, D. Correlation dependence of potential triggers for the initial formation of convection and local intense precipitation. *Geografie*. Česká geografická společnost, 2017, 1-22. ISSN 1212-0014.

### **Články ve vědeckých nebo odborných časopisech neevidovaných v databázi WoS, SCOPUS**

ŠAUR, D. Využití informační podpory pro krizové řízení. *Odborný vědecký časopis Trilobit* [online]. 2009-2015, 2/2014 [cit. 2015-02-06]. ISSN: 1804-1795. Dostupné z: <http://trilobit.fai.utb.cz/vyuziti-informacni-podpory-pro-krizove-rizeni>

ŠAUR, D. Využití povodňového simulátoru POSIM pro tvorbu povodňových plánů. *Odborný vědecký časopis Trilobit* [online]. 2009-2015, 2/2014 [cit. 2015-02-06]. ISSN: 1804-1795. Dostupné z: <http://trilobit.fai.utb.cz/vyuziti-povodnoveho-simulatoru-posim-pro-tvorbu-povodnovych-planu>

## Články ve sborníku konference evidovaných v databázi WoS, SCOPUS

ŠAUR, D. a PLŠEK S. *Mobile Meteorological Radar Uses in Crisis Management. LATEST TRENDS on SYSTEMS - VOLUMES I & II* [online]. Santorini Island, Greece, July 17-21, 2014, s. 147-153 [cit. 2014-09-24]. ISBN: 978-1-61804-243-9. ISSN: 1790-5117. Dostupné z: <http://www.europment.org/library/2014/santorini/bypaper/SYSTEMS/SYSTEMS-00.pdf>

ŠAUR, D. a VÁVRA J. *Use of the Radar and Station Precipitation Measurement for Analysis of Orographic Convection*. 2015. Military Engineering, Geospatial and Meteorological Support. Brno: Univerzita obrany v Brně, s. 1-7.

ŠAUR D., ŽÁK R., ŠVEJDA J. *Data Mining from Radar Precipitation Measurement of the CZRAD Network*. 19. International Conference on Systems (CSCC '15), Special Session: Informatics in Control Theory and its Applications – Control Applications. Recent Advances in Systems. Zakynthos Island, Greece, July 16-20, 2015, s. 280-285. ISBN: 978-1-61804-321-4. ISSN: 1790-5117

ŠAUR, D. *Evaluation of the Accuracy of Numerical Weather Prediction Models*. Proceedings of the 4th Computer Science On-line Conference 2015 (CSOC2015), 2015. Springer Verlag, s. 181-193. ISBN 978-3-319-18476-0. Dostupné také z: [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18476-0\\_1](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18476-0_1)

ŠAUR D. *Comparison of Success Rate of Numerical Weather Prediction Models with Forecasting System of Convective Precipitation*. Proceedings of the 5th Computer Science On-line Conference 2016 (CSOC2016), 2016, Vol 1, Springer, pp.: 307-319. ISSN 2194-5357, ISBN 978-3-319-33623-7, doi: 10.1007/978-3-319-33625-1.

ŠAUR D., ĎURICOVÁ L. *Comprehensive System of Intense Convective Precipitation Forecasts for Regional Crisis Management*, The Tenth International Conference on Emerging Security Information, System and Technologies, SECURWARE 2016, IARIA, July 24- 28, 2016, pp. 111-116, ISBN: 978-1-64208-493-0.

ŠAUR D., TOMÁŠEK P. *Monitoring and forecasting of intensive convective precipitation with the use of the mobile meteorological radar (MMR50)*. Matec Web of Conferences, CSCC 2016, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20167605010>

ŠAUR, D. *Forecasting of Convective Precipitation Through NWP Models and Algorithm of Storms Prediction*. Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems: Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). 2017, s. 125-136. DOI: 10.1007/978-3-319-57261-1\_13. ISSN



2194-5365. Dostupné také z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-57261-1\\_13](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-57261-1_13)

ŠAUR, D. *Methods of predicting flash floods*. 2017. Military Engineering, Geospatial and Meteorological Support. Brno: Univerzita obrany v Brně, s. 1-7.

### **Články ve sborníku konference nevidovaných v databázi WoS, SCOPUS**

ŠAUR, D. a LUKÁŠ L. *Výpočetní modely předpovědi počasí jako podpůrný nástroj pro krizové řízení*. In: Zborník príspevkov 7.medzinárodnej vedeckej konferencie Bezpečné Slovensko a Európska Únia. Košice, Slovensko: Vysoká škola bezpečnostného manažerstva v Košicích. 2014, s. 10. ISBN 978-80-89282-88-3.

ŠAUR, D. *Srovnání nowcastingových systémů pro tvorbu předpovědi počasí*. Sborník konference: Interdisciplinární mezinárodní vědecká konference doktorandů a odborných asistentů *QUAERE 2014*. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 4. vyd. 2014. ISBN 978-80-87952-04-7, ETTN 085-14-13028-06-2.

ŠAUR, D. *Využití informační podpory při tvorbě povodňových plánů*. In: Sborník příspěvků z konference Ochrana obyvatelstva 2014. Ostrava: Fakulta bezpečnostního inženýrství Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, s. 11. ISBN 978-80-7385-142-2ISSN 1803-7372.

ŠAUR, D. *Contribution and limitations of the MMR50 Meteorological Radar (Xband) regarding the crisis management of the Zlin Region*. In: 14th EMS Annual Meeting & 10th European Conference on Applied Climatology (ECAC) [online]. Prague, Czech Republic, 06 – 10 October 2014 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: [presentations.copernicus.org/EMS2014-101\\_presentation.pdf](http://presentations.copernicus.org/EMS2014-101_presentation.pdf)

ŠAUR D. a PAVLÍK L. *Využití programu SFÉRA pro účely ochrany kritické infrastruktury*. Bezpečnostní technologie, systémy a management 2015, Sborník příspěvků 5. mezinárodní konference, 19. 11, 2015, Zlín, vyd.: 1., 2015 ISBN:978-80-7454-559-7

### **Interní dokument**

ŠAUR, D. *Metodika využití meteorologického radaru Zlínského kraje pro potřeby krizového řízení*. Zlín, Zlínský kraj, 2016.

# PROFESNÍ ŽIVOTOPIS

## OSOBNÍ ÚDAJE

**JMÉNO A PŘÍJMENÍ**

**MÍSTO A DATUM NAROZENÍ**

**ADRESA**

Ing. David Šaur

Brno, 20.9.1988

Valachův žleb 4893, Zlín

## VZDĚLÁNÍ

**95-00**

**00-08**

**08-13**

**13-17**

18. Základní škola ve Zlíně

Gymnázium T.G.M s právem státní  
jazykové zkoušky Zlín

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,  
Fakulta aplikované informatiky,  
Bezpečnostní technologie, systémy  
a management ve Zlíně, titul  
inženýr

Doktorské studium na Univerzitě  
Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta  
aplikované informatiky, Inženýrská  
informatika

## PRAXE

**16**

Spolupráce se Zlínským krajem –  
Metodika využití meteorologického  
radaru Zlínského kraje pro potřeby  
krizového řízení

## KURZY

**07-08**

**14-15**

**16-17**

Jazykový kurz angličtiny

NAFY43: Aplikovaná meteorologie

NAFY49: Předpovědní a pozorovací  
metody

NMET054: Mat. modelování  
oblačných a srážkových procesů v  
atmosféře

ArcGIS1: Úvod

ArcGIS2: Pracovní postupy

ArcGIS: Online

## JAZYKOVÉ ZNALOSTI

**Anglický jazyk**

**Německý jazyk**

slovem a písmem – B1-B2

slovem a písmem – A2-B1

## ZÁJMY

meteorologie, stolní tenis, cyklistika, volejbal.

**PŘÍLOHA P 1 Průměrné hodnoty úspěšnosti indexů instability a meteorologických prvků pro všechny situace, včetně povodní 2015 až 2017**

Předpovědní parametry NWP modelů	Úspěšnost předpovědi 2015-2017 (%)	24. 7. 2015 (%)	5. 8. 2016 (%)	22. 7. 2017 (%)	Průměr povodňových situací
MLCAPE (J/kg)	45	0	100	100	67
MLCIN (J/kg)	65	0	100	100	67
LI (K)	65	0	100	100	67
KI (K)	55	0	0	0	0
TT (Totals totals) index	48	0	100	100	67
GRAD 850-500 hPa (K/km)	87	100	100	100	100
Vlhká potenciální teplota (K)	77	0	100	0	33
Frontogeneze 850 hPa	71	0	0	100	33
Relativní vlhkost 1000-300 hPa (%)	61	100	100	100	100
Srážková voda (mm)	90	100	100	100	100
Teplota 850 hPa	68	100	100	100	100
GRAD 925-700 hPa (K/km)	58	100	0	100	67
Směšovací poměr 0-1 km	58	0	0	100	33
Rychlost větru v 300 hPa	77	100	0	100	67
Rychlost větru v 850 hPa	65	0	0	100	33
Změna směru větru (1000-500 hPa)	61	100	100	100	100
DLS - Střih 0-6 km (m/s)	55	100	0	100	67
LLS - Střih 0-1 km (m/s)	65	0	0	100	33
SREH 0-3 km (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	71	100	100	100	100
SREH 0-1 km (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	71	100	100	0	67
SWEAT	55	0	100	100	67
Hloubka teplé fáze oblaku (km)	32	0	0	100	33
Nulová izoterma (km)	84	0	0	0	0
Vzestupná kondenzační hladina (m)	16	100	100	100	100
DTHE	42	0	0	0	0
EHI	39	0	0	100	33

**PŘÍLOHA P 2 Průměrné hodnoty úspěšnosti předpovědních parametrů  
NWP modelů pro povodňové události z let 2015 až 2017**

Lokální podmínky	24. 7. 2015	5. 8. 2016	22. 7. 2017
Přízemní vlhkost ve 2 m nad zemí	74	80	29
Vliv proudění vzduchu v přízemní vrstvě atmosféry	77	77	54

Vlastnosti atmosféry	24. 7. 2015	5. 8. 2016	22. 7. 2017
Indexy instability, meteorologické prvky	45	55	79
Relativní vlhkost 1000-300 hPa	17	33	50
Směr větru 1000-300 hPa	100	75	75
Rychlost větru 850-300 hPa (m/s)	100	50	100

Vliv konvergence			
Verifikační kritérium	24. 7. 2015	5. 8. 2016	22. 7. 2017
Accuracy	0.60	1.00	0.77
BIAS	0.74	1.00	1.33
POD	0.57	1.00	0.50
FAR	0.24	0.00	0.63
POFD	0.33		0.17
SR	0.76	1.00	0.38
CSI	0.48	1.00	0.27
HSS	0.21		0.29
PSS	0.60	1.00	0.77
TSS	0.23		0.33

Orografické vlivy			
Vliv konvergence	24. 7. 2015	5. 8. 2016	22. 7. 2017
Accuracy	0.54	0.57	0.63
BIAS		1.52	2.57
POD		0.90	0.86
FAR	1.00	0.41	0.67
POFD	0.46	0.93	0.43
SR	0.00	0.59	0.33
CSI	0.00	0.56	0.32
HSS	0.00	-0.03	0.27
PSS	0.54	0.57	0.63