



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

AUTOMATIZOVANÉ PLOŠNÉ MĚŘENÍ INTENZITY SRÁŽEK PROSTŘEDNICTVÍM SÍTĚ MIKROVLNNÝCH SPOJŮ

AUTOMATED AREA MEASUREMENT OF PRECIPITATION INTENSITY VIA A NETWORK OF MICROWAVE LINKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Bubniak

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. et Ing. Petr Musil

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Milan Bubniak

ID: 197708

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Automatizované plošné měření intenzity srážek prostřednictvím sítě mikrovlnných spojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce nastudujte vliv primárně dešťových atmosférických srážek na šíření rádiových vln u mikrovlnných spojů typu bod-bod. Provedte rešerši současného stavu výzkumu na poli metod odhadu dešťové intenzity dle změn parametrů signálu mikrovlnných spojů. Výstupem této diplomové práce bude aplikace vypočítávající odhad dešťových úhrnů, jejíž vstupem budou signálové a provozní parametry mikrovlnných spojů. Výstupem této aplikace bude dvourozměrná grafická mapa srážek s projekcí dešťových úhrnů na trase mikrovlnných spojů na mapový podklad odpovídající skutečné geografické poloze těchto spojů. Hodnoty dešťových úhrnů v prostoru mezi jednotlivými spoji získáte v aplikaci vhodnou interpolační metodou. Hotová aplikace by měla disponovat přívětivým uživatelským rozhraním, umožňujícím zobrazení vypočítaných dešťových úhrnů jak staticky ve zvoleném čase, tak i na delším zvoleném časovém úseku formou grafické animace. Vypočítané dešťové úhrny validujte naměřenými hodnotami úhrnů, získanými prostřednictvím klasických meteorologických metod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] CHWALA, Christian a Harald KUNSTMANN. Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges. *Wiley Interdisciplinary Reviews* [online]. Hoboken: Wiley Subscription Services, 2019, 6(2) [cit. 2021-3-26]. Dostupné z: doi:10.1002/wat2.1337
- [2] UIJLENHOET, Remko, Aart OVEREEM a Hidde LEIJNSE. Opportunistic remote sensing of rainfall using microwave links from cellular communication networks. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. Hoboken, USA: John Wiley, 2018, 5(4), n/a-n/a. ISSN 2049-1948. Dostupné z: doi:10.1002/wat2.1289

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: Ing. et Ing. Petr Musil

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Mikrovlnné spoje typu bod-bod mohou být použity jako rozlehlá sensorová síť pro měření dešťových srážek. Tato práce se zabývá aplikací tohoto postupu v praxi.

V první části práce je pojednáno obecně o atmosférických srážkách a standardních metodách jejich měření; je rozebráno šíření mikrovlnného signálu a různé příčiny jeho tlumení, se zaměřením na útlum způsobený deštěm a doporučení ITU-R P.838. Následuje přehled stavu výzkumu problematiky měření srážek mikrovlnnými spoji.

Ve druhé části práce je proveden ruční postup výpočtu srážek z dat mikrovlnných spojů, s ohledem na velikost útlumu vlhkou anténou. Poté práce popisuje vytvoření podpůrného nástroje v jazyce C#, pro dodání dat funkcím knihovny RAINLINK, provádějícím plošný výpočet srážek. Následuje několik výpočtů srážek, které jsou validovány fyzickými srážkoměry. Dále je v jazyce Python vytvořena vlastní aplikace Telcorain pro výpočet srážek, založená na knihovně pycomlink, disponující grafickým uživatelským rozhraním vytvořeným v PyQt. Opět je provedeno několik výpočtů srážek validovaných srážkoměry, a výsledky jsou porovnány s knihovnou RAINLINK.

KLÍČOVÁ SLOVA

mikrovlnný spoj, linka bod-bod, srážky, déšť, intenzita deště, srážkoměr, meteorologický radar, rádiový signál, útlum, RAINLINK, pycomlink, útlum mokrou anténou, InfluxDB, C#, .NET, Python, PyQt, matplotlib

ABSTRACT

Point-to-point microwave links can be utilized as a large sensor network to measure rainfall. This work deals with the application of this procedure in practice.

The first part of the thesis deals with atmospheric precipitation in general and standard methods of their measurement; and the propagation of the microwave signal and various causes of its attenuation, focusing on the attenuation caused by rain and the recommendation ITU-R P.838. This is followed by a state of the art summarization of the measurement of rainfall by microwave links.

In the second part of the work, a manual procedure for calculating rainfall from microwave link data is performed, taking wet antenna attenuation into account. Then the creation of a support tool in the C# language is being described, which supply the data to the functions of the RAINLINK rainfall calculation library. Several rainfall calculations that are validated by physical rain gauges are performed. Furthermore, the own Telcorain application for rainfall calculation is created in the Python language, based on the pycomlink library. It has a graphical user interface created in PyQt. Several rainfall calculations validated by rain gauges are performed again, and the results are compared with the RAINLINK library.

KEYWORDS

microwave link, point-to-point link, precipitation, rainfall, rain intensity, rain gauge, meteorological radar, radio signal, attenuation, RAINLINK, pycomlink, wet antenna attenuation, InfluxDB, C#, .NET, Python, PyQt, matplotlib

BUBNIAK, Milan. *Automatizované plošné měření intenzity srážek prostřednictvím sítě mikrovlnných spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 127 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Petr Musil

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Milan Bubniak
VUT ID autora:	197708
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	Automatizované plošné měření intenzity srážek prostřednictvím sítě mikrovlnných spojů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. et Ing. Petru Musilovi, za odborné vedení, konzultace, a především pak trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat své partnerce a nejbližší rodině, za neutuchající podporu při tvorbě této práce.

Obsah

Úvod	16
1 Srážky	17
1.1 Úhrn a intenzita srážek	18
1.2 Měření srážek	19
1.2.1 Srážkoměry	19
1.2.2 Meteorologické radary	21
1.2.3 Satelitní měření	25
1.2.4 Výpočet plošného odhadu srážek	26
2 Mikrovlnné spoje	28
2.1 Frekvenční pásma	28
2.2 Hardware	29
2.3 Antény	29
2.4 Důležité parametry	30
3 Šíření rádiových vln a zdroje útlumu	32
3.1 Fresnelovy zóny	33
3.2 Zdroje útlumu	34
3.2.1 Útlum atmosférickými plyny	34
3.2.2 Útlum mnohocestným šířením	35
3.2.3 Útlum difrakcí	36
3.2.4 Další zdroje útlumu	36
3.3 Útlum atmosférickými srážkami	38
3.3.1 Doporučení ITU-R P.838	39
3.3.2 Doporučení ITU-R P.530	41
4 Odhad srážkového úhrnu	43
4.1 Stav výzkumu problematiky	46
4.2 Útlum mokrou anténou	50
4.2.1 Vybrané studie problematiky WAA	51
4.3 Knihovna RAINLINK	54
4.3.1 Struktura knihovny	55
4.4 Knihovna pycomlink	58
4.4.1 Struktura knihovny	59

5	Aplikované měření intenzity srážek	65
5.1	Ruční výpočet a měření WAA	65
5.1.1	Metodika a výsledky	66
5.1.2	Zhodnocení	69
5.2	Automatizace výpočtů knihovnou RAINLINK	71
5.2.1	Databázové úložiště InfluxDB	71
5.2.2	Nástroj pro předpřípravu dat	73
5.2.3	Příprava interpolační mřížky	77
5.2.4	Nastavení vlastních parametrů	77
5.3	Výsledky výpočtů knihovnou RAINLINK	79
5.3.1	Bilance vstupních dat	79
5.3.2	První etapa	80
5.3.3	Druhá etapa	84
6	Vývoj vlastní aplikace	87
6.1	Charakteristika použitých technologií	88
6.1.1	PyQt a Qt	88
6.1.2	Matplotlib	89
6.1.3	Xarray a numpy	89
6.2	Vnitřní struktura	90
6.2.1	Soubory influx_manager.py a sqlite_manager.py	91
6.2.2	Soubor linksets_manager.py	91
6.2.3	Soubor main_window.py	92
6.2.4	Soubor calculation.py	93
6.2.5	Soubor results_widget.py	100
6.3	Uživatelské rozhraní	102
6.3.1	Ovládací panel	102
6.3.2	Aplikační log	103
6.3.3	Panel s výsledky	105
6.4	Výsledky výpočtů aplikací Telcorain	106
6.4.1	Děšť srpen	106
6.4.2	Děšť srpen II	109
6.4.3	Děšť březen	110
	Závěr	112
	Literatura	115
	Seznam symbolů a zkratk	124

Seznam obrázků

1.1	Dosahy meteorologických radarů sítě CZRAD	21
1.2	Závislost intenzity srážek R na radarové odrazivosti Z dle Marshall–Palmerova vztahu	24
1.3	Ukázka výstupu maximálních odrazivostí MAX_Z_3D z radarové sítě CZRAD	25
1.4	Porovnání odhadů srážkových úhrnů v systému MERGE2	27
3.1	Závislost útlumu L_{vp} ve volném prostoru na vzdálenosti d	32
3.2	Závislost průměru první Fresnelovy zóny na vzdálenosti d	34
3.3	Závislost absorpce mikrovlnného signálu kyslíkem a vodní párou v atmosféře na frekvenci mikrovlnného signálu	35
3.4	Závislost difrakčního útlumu L_{dif} na míře zastínění v	37
3.5	Tvar dešťových kapek v závislosti na jejich velikosti	39
3.6	Závislost útlumu deštěm A na intenzitě deště R dle ITU-R P.838	39
3.7	Hodnota koeficientu k dle ITU-R P.838 v závislosti na frekvenci pro horizontální a vertikální polarizaci	40
3.8	Hodnota koeficientu α dle ITU-R P.838 v závislosti na frekvenci pro horizontální a vertikální polarizaci	40
3.9	Závislost hodnoty distančního faktoru r na délce spoje pro různé hodnoty frekvencí f a intenzit srážek R	42
4.1	Ukázka dlouhodobého kolísání výkonové úrovně přijímaného signálu	45
4.2	Ukázka krátkodobého kolísání výkonové úrovně přijímaného signálu, korelujícího s teplotou jednotky	45
5.1	Průběh kalibrační dešťové události na spoji č. 1	67
5.2	Průběh kalibrační dešťové události na spoji č. 2	68
5.3	Průběh kalibrační dešťové události na spoji č. 3	68
5.4	Průběh kalibrační dešťové události na spoji č. 4	68
5.5	Průběh validační dešťové události na spoji č. 1	69
5.6	Průběh validační dešťové události na spoji č. 2	70
5.7	Průběh validační dešťové události na spoji č. 3	70
5.8	Průběh validační dešťové události na spoji č. 4	70
5.9	Struktura databázových položek v InfluxDB	71
5.10	Struktura databázových položek v InfluxDB	72
5.11	Vývojový diagram metody Main nástroje RainlinkImportMaker	76
5.12	Poloha spojů zahrnutých při výpočtech knihovnou RAINLINK	80
5.13	Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů RAINLINKu v porovnání s hodnotami MERGE2. První etapa, srpen	81

5.14	Korelační diagramy interpolovaných výstupních hodnot z RAINLINKu s hodnotami srážkoměrů ČHMÚ. První etapa, srpen	81
5.15	Srovnání 24h odhadu za období 31.07.2021 23:00 – 01.08.2021 23:00. První etapa, srpen	81
5.16	Ukázka srážkových map RAINLINK s 10m krokem	82
5.17	Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů RAINLINKu v porovnání s hodnotami MERGE2. První etapa, srpen II	83
5.18	Korelační diagramy interpolovaných výstupních hodnot z RAINLINKu s hodnotami srážkoměrů ČHMÚ. První etapa, srpen II	83
5.19	Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů RAINLINKu v porovnání s hodnotami MERGE2. Druhá etapa, srpen	84
5.20	Korelační diagramy interpolovaných výstupních hodnot z RAINLINKu s hodnotami srážkoměrů ČHMÚ. Druhá etapa, srpen	84
5.21	Srovnání 24h odhadu za období 31.07.2021 23:00 – 01.08.2021 23:00. Druhá etapa, srpen	85
5.22	Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů RAINLINKu v porovnání s hodnotami MERGE2. Druhá etapa, březen	86
5.23	Korelační diagramy interpolovaných výstupních hodnot z RAINLINKu s hodnotami srážkoměrů ČHMÚ. Druhá etapa, březen	86
6.1	Vztahový diagram aplikace Telcorain	87
6.2	Vývojový diagram interpolační fáze výpočtu	99
6.3	Schéma rozložení prvků ovládacího panelu výpočtů aplikace Telcorain	102
6.4	Ovládací panel výpočtů aplikace Telcorain	103
6.5	Výběrčí kanálů na seznamy aplikace Telcorain	104
6.6	Aplikační log Telcorain	104
6.7	Výstupní panel výpočtů aplikace Telcorain	105
6.8	Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů Telcorainu v porovnání s hodnotami MERGE2. Déšť srpen	107
6.9	Korelační diagramy výstupních hodnot z Telcorainu s hodnotami srážkoměrů ČHMÚ. Telcorain, déšť srpen	107
6.10	Srovnání 24h odhadu za období 31.07.2021 23:00 – 01.08.2021 23:00. Telcorain, déšť srpen	107
6.11	Ukázka srážkových map Telcorain s 10m krokem	108
6.12	Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů Telcorainu v porovnání s hodnotami MERGE2. Déšť srpen II	110
6.13	Korelační diagramy interpolovaných výstupních hodnot z Telcorainu s hodnotami srážkoměrů ČHMÚ. Telcorain, déšť srpen II	110
6.14	Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů Telcorainu v porovnání s hodnotami MERGE2. Déšť březen	111

6.15 Korelační diagramy interpolovaných výstupních hodnot z Telcorainu s hodnotami srážkoměrů ČHMÚ. Telcorain, déšť březen	111
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Seznam tabulek

1.1	Parametry meteorologických radarů sítě CZRAD	23
4.1	Vybrané studie problematiky měření srážek mikrovlnnými spoji . . .	47
4.2	Vybrané studie problematiky útlumu mokrou anténou	51
5.1	Výsledky kalibračního měření WAA dne 4. 3. 2021, s validací oproti srážkovým úhrnům ze systému MERGE2	66
5.2	Výsledky ověřovacího měření WAA dne 1. 8. 2021, s validací oproti srážkovým úhrnům ze systému MERGE2	67
5.3	Vrcholové souřadnice interpolační sítě metropolitní oblasti Prahy . . .	78
5.4	Výchozí a vlastní změněné hodnoty parametrů algoritmu RAINLINK	78
6.1	Hodnoty parametrů výpočtu srážek v aplikaci Telcorain	106

Seznam výpisů

4.1	Struktura Dataset obsahující vstupní parametry mikrovlnných spojů .	60
4.2	Detekce „mokrých“ a „suchých“ období	61
4.3	Původní struktura Dataset doplněná o výstupní parametry výpočtu .	64
6.1	Přepočet srážkové intenzity na srážkový úhrn	98
A.1	Obsah tabulky MwLink v databázi SQLite	127

Úvod

Rozmach celulárních mobilních sítí v 90. letech 20. století, přinesl nejen zásadní změnu do života lidí a způsobu, jakým lidstvo komunikuje, ale na technickém pozadí urychlil nasazení i další významné technologie, která zůstává neznalým lidem skryta. Touto technologií jsou mikrovlnné datové spoje. Nastalá potřeba pokrýt obyvatelstvo mobilním signálem z vysílačů, protkala území států mnoha tisíci bezdrátovými směrovými spoji, operujícími na mikrovlnných rádiových frekvencích, sloužícími k propojení základnových stanic mobilní sítě s páteří sítí telekomunikačních operátorů. Současně probíhal také komerční rozvoj internetu, který nasazení mikrovlnných spojů umocnil ještě více, neboť mikrovlnné datové spoje jsou nasazovány všude tam, kde propojení prostřednictvím optických či metalických datových spojů není možné anebo výhodné, ať už z technických, či ekonomických důvodů.

Mikrovlnný signál je tlumený atmosférickými srážkami, což má za následek degradující kvalitu spojení během zhoršeného počasí. Nebylo by možné, tento na první pohled zřejmý nedostatek, přetavit ve výhodu tím, že síť mikrovlnných spojů bude využita také jako rozlehlá senzorická síť pro měření intenzity a množství srážek?

Měření srážek prostřednictvím mikrovlnných spojů se jeví jako perspektivní možnost, jak více zpřesnit již existující meteorologické metody měření, tedy například jako vhodný doplněk k radarovým měřením. Mikrovlnné spoje totiž zachytávají srážky v přízemních hladinách atmosféry, zatímco meteorologické radary měří stav srážek v mnohem vyšších vrstvách atmosféry, ve výškách vyšších než jeden kilometr nad terénem. Mohou také zajistit provádění srážkových měření v rozvojových zemích, kde klasická meteorologická radarová infrastruktura není dostupná, avšak telekomunikační sítě jsou zde běžně využívány.

Tato práce si klade za cíl získat aktuální poznatky o měření dešťových srážek mikrovlnnými spoji, a na základě těchto informací vytvořit aplikační řešení, provádějící automatizovaný výpočet dešťových srážek podle dat z mikrovlnných spojů, s funkcí uživatelsky přívětivé prezentace těchto výpočtů. Cílem práce je tedy generování srážkových map s obdobnou funkcí, jako jsou radarové odrazy v populárních meteorologických aplikacích.

Vypočítané srážkové mapy budou také následně porovnávány s měřeními z klasických srážkoměrů, či s daty ze systémů pro srážkový odhad na základě interpolací měření z meteorologických radarů a srážkoměrných stanic.

1 Srážky

Srážky jsou vodní částice, vzniklé kondenzací vodní páry v atmosféře. V závislosti na místě vzniku jsou rozdělovány do dvou skupin, a to atmosférických (vertikálních) srážek, a usazených (horizontálních) srážek. Vyskytují se v kapalném či pevném skupenství. Srážky spadají do skupiny hydrometeorologických jevů nazývaných jako hydrometeory, přičemž ne všechny hydrometeory jsou srážkami (za srážky není považována např. mlha, kouřmo, aj.). [1, 2, 3, 4]

Podmínkou pro vznik srážek i ve vzduchu nedosahujícím 100 % relativní vlhkosti je výskyt tzv. kondenzačních, případně desublimačních jader, okolo kterých dojde obklopením vzduchem částečně nasyceným vodní párou k vytvoření srážkového kondenzátu. [2, 4] Kondenzační jádra jsou malé aerosolové částice, např. zplodiny hoření, půdní mikročástice, krystalky mořské soli, bakterie, aj., o velikostech řádově 100 nm až 1 μm . [2, 5]

- Mezi **atmosférické (vertikální) srážky** je řazen:
 - **děšť** – kapky padající z oblaků, o průměru 0,5 mm až 7 mm;
 - **mrholení** – drobné kapky padající z oblaků, o průměru $< 0,5$ mm;
 - **sníh** – tuhé srážky z ledových krystalů, resp. jejich shluků, větší shluky sněhových vloček se vytvářejí při teplotách mezi -5°C a 0°C ;
 - **kroupy** – tuhé kuličky, kusy, či úlomky ledu o průměru 5 mm až 50 mm, padají výhradně při přeháňkách z bouřkových oblaků;
 - **sněhové krupky** – tuhé srážky z neprůhledných ledových částic o průměru 2 mm až 5 mm, vytváří se při přeháňkách za teplot kolem bodu mrazu;
 - **sněhová zrna** – tuhé srážky z ledových částic o průměru < 1 mm;
 - **námrazové krupky** – tuhé srážky ze sněhových zrn obalených vrstvou ledu, o průměru asi 5 mm, vytvářející se za teplot kolem bodu mrazu;
 - **zmrzlý déšť** – tuhé srážky z průhledných ledových zrn o průměru asi 5 mm, vzniká zmrznutím dešťových kapek;
 - **ledové jehličky** – tuhé srážky z jednoduchých ledových krystalů ve tvaru jehlic, ve středních zeměpisných šířkách pouze v silných mrazech. [1]
- Mezi **usazené (horizontální) srážky** je řazena:
 - **rosa** – kapalná usazenina vody ve formě drobných kapek na zemském povrchu, rostlinách a předmětech. Vzniká při poklesu teploty pod teplotu rosného bodu, zejména ve večerních časech a v noci v teplém období;
 - **jinovatka** – tuhá usazenina se zřetelnou jemnou krystalickou strukturou, vzniká při silných mrazech;

- **námraza** – tuhá bílá zrnitá usazenina na návětrné straně předmětů, vzniká nejčastěji během mlhy při teplotách mezi -10°C a -2°C ;
- **ledovka** – tuhá souvislá průhledná usazenina ledu, vzniká zmrznutím kapek při mrhnutí či dešti dopadem na předměty, jejichž teplota je pod bodem mrazu;
- dále **náledí, zmrazky, zmrzlá rosa, jíní**. [1]

Jádrem této práce jsou především srážky atmosférické, tj. takové, jejichž částice se vyskytují v prostoru nad zemským povrchem mezi koncovými body mikrovlnných spojů. Případně podrobněji nspecifikované zmínky o srážkách v této práci odkazují právě na srážky atmosférické. Existenci srážek usazených však nelze opomenout, a to z toho důvodu, že mezi objekty které postihují patří i antény mikrovlnných spojů. Silná námraza, ledovka, ale i rosa na povrchu antény mohou negativně ovlivnit přenosové parametry mikrovlnného spoje, viz kapitola 4.2.

1.1 Úhrn a intenzita srážek

Množství srážek spadlých na zemský povrch se udává v milimetrech vodního sloupce, přičemž platí, že 1 mm srážek odpovídá objemu 1 l na ploše 1 m^2 . Množství srážek spadlých za delší časové období (den, měsíc, rok) se označuje jako srážkový úhrn. [1] Derivací srážkového úhrnu podle času je získána intenzita srážek, značená jako R , vyjadřovaná obvykle v mm/h, udávající míru srážkové činnosti v daný časový okamžik. V praxi se intenzita srážek počítá jako podíl srážkového úhrnu za časový interval o délce jednotek až desítek minut. [6]

Srážky se rozdělují na konvekční a trvalé. **Konvekční srážky** vypadávají z tzv. kupovité oblačnosti, mají přehánkový nebo lijákový charakter, krátkou dobu trvání a často velkou intenzitu. Mohou být součástí bouře. Nejsilnějšími konvekčními srážkami jsou přívalové deště, tj. velmi vydatné krátkodobé deště, zasahující malé plochy. Intenzita srážek přívalových dešťů během jejich trvání kolísá, resp. bývá největší po začátku deště a s jeho trváním klesá. Na zasaženém území je rozložena nerovnoměrně, nejvyšších hodnot nabývá intenzita srážek v jádru deště, k jeho okrajům se snižuje. [2, 3]

Naproti tomu **trvalé srážky** (též regionální) padají po delší dobu s víceméně stálou intenzitou z tzv. vrstevnatých oblaků a vyskytují se nad většími územními celky. Jejich plošné rozložení je poměrně rovnoměrné. Trvají až několik hodin, výjimečně i dní. Pakliže dochází na určitou dobu k přerušení trvalých srážek, označují se jako **srážky občasné**. [2, 3]

1.2 Měření srážek

Měření srážek je jedním z nejdůležitějších měření v meteorologii i hydrologii. Jedná se o klíčový podklad pro meteorologické předpovědi a predikci extrémních hydrologických situací. Získání kvalitních dat není jednoduchý proces z důvodu vysoké variability srážkové činnosti v čase i prostoru, protože jsou meteorology žádány zejména informace o prostorovém rozložení srážek. Toto prostorové měření zajišťuje síť meteorologických radarů. Nezastupitelné místo v disciplíně měření srážek však mají i klasické pozemní srážkoměry. Dále lze měření srážek doplnit i pomocí satelitních snímků z družic, které však nezaznamenávají srážkové úhrny, nýbrž vývoj oblačnosti, která je nicméně se srážkovou aktivitou úzce spjata. [2, 4]

1.2.1 Srážkoměry

Pro pozemní měření srážek v jednom bodě slouží srážkoměry, neboli **ombrometry**. Klasické manuální srážkoměry fungují na jednoduchém principu zachytávání srážek do nálevky, odkud stékají do sběrné nádoby. V ČR jsou standardně používány nálevky o ploše 500 mm, umístěné ve výšce 1 m nad úrovní terénu. Pro provoz těchto srážkoměrů je nutná lidská obsluha, která v pravidelných intervalech měří a zaznamenává objem zachycených srážek. Toto měření je standardně prováděno každý den v čase 7:00. [2, 4]

Dokonalejším typem srážkoměru je **ombrograf**. Ze záchytné nálevky v nich voda stéká do nádoby s plovákem, na kterém je umístěn zapisovací hrot, který se dotýká papíru navinutého na otáčivém bubnu. Tím je zajištěn záznam srážkového úhrnu spojitě v čase, přičemž derivací záznamu lze získat i informaci o intenzitě srážek. [2, 4]

Modernějším elektronickým typem srážkoměru jsou **srážkoměry člunkové** (též impulsní, překlopné; v angl. *tipping-bucket gauges*). V těchto srážkoměrech jsou srážky nálevkou vedeny do jedné ze dvou nádržek o známém objemu. Srážkoměr detekuje stav naplnění nádržek – jakmile dojde k naplnění aktivní nádržky, je aktivován překlopný mechanismus, obsah aktivní nádržky je vyprázdněn a její pozici pod nálevkou zaujme druhá nádržka. Opět je sledován stav naplnění, po jehož detekci jsou nádržky znovu překlopeny, a tento proces se neustále opakuje. [2, 4, 6] V každý okamžik překlopení je digitálně zaznamenán přesný čas překlopení, a to buďto odesláním přenosovým médiem ke sběrné stanici, anebo záznamem do souboru na lokálním úložišti. Nevýhodou je nemožnost časově spojitého záznamu – hodnoty srážkových intenzit mezi překlopeními nejsou známy, s čímž se pojí i nepřesnost při nízkých srážkových intenzitách (k naplnění nádržky může dojít až po delší době). Přibližný spojitý průběh srážkové intenzity je tak nutno interpolovat ze zaznamenaných časů překlopení.

Váhové srážkoměry (v angl. *weighing gauges*) jsou dalším typem digitálních srážkoměrů. Srážky jsou nálevkou vedeny do nádoby, pevně spočívající na elektrickém tenzometru měřícím hmotnost nádoby. Srážkoměr detekuje stav naplnění nádoby a v případě jejího naplnění aktivuje elektronicky řízenou výpusť. Hmotnost nádoby je s nastavenou vzorkovací frekvencí zaznamenávána, tj. při zvolení dostatečně vysoké frekvence lze dosáhnout zdánlivě spojitého záznamu (nepřesnost mezi jednotlivými záznamy lze zanedbat). Naměřená data jsou opět odesílána přenosovým médiem ke sběrné stanici či zaznamenávána na lokální úložiště. [4, 6].

Jednotlivé dokonalejší typy srážkoměrů mohou být i vytápěny pro celoroční provoz. [2, 4] Existují i elektronické optické srážkoměry [4] či srážkoměry akustické pro měření srážek na moři.

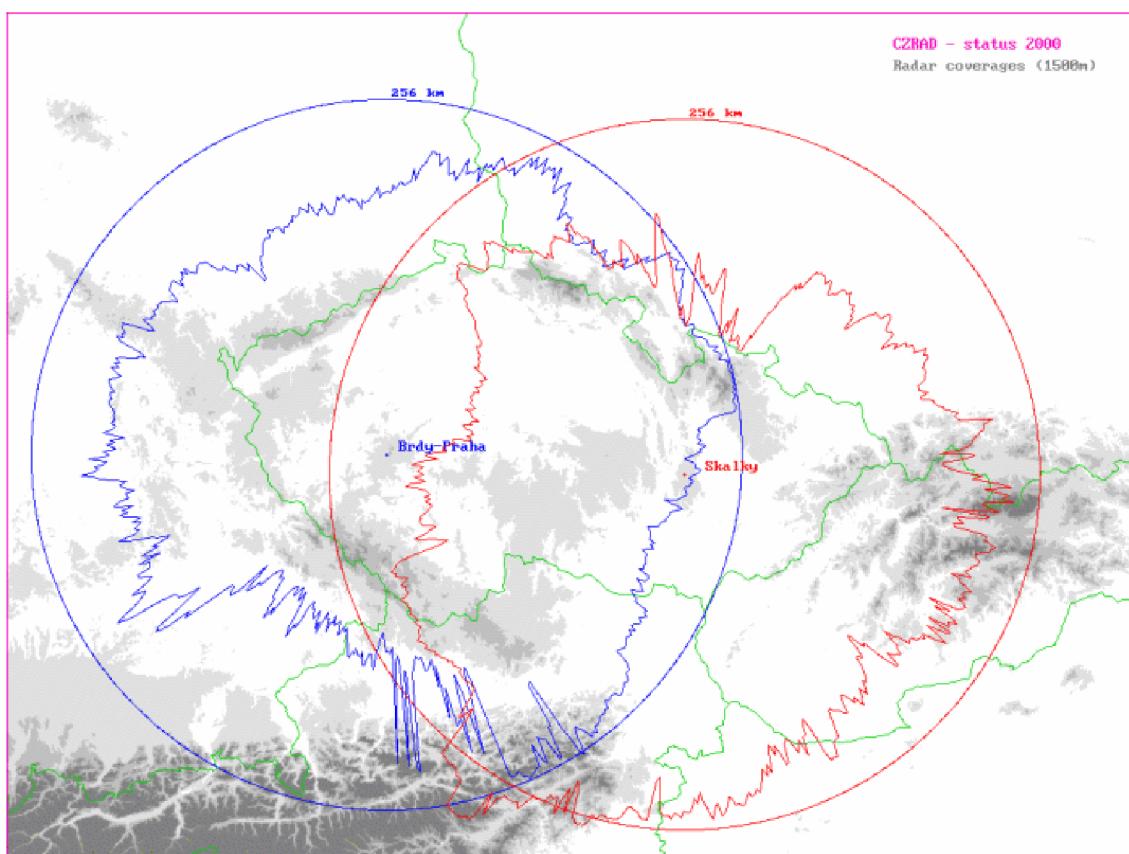
Při měření srážek prostřednictvím pozemních srážkoměrů hrozí riziko vyšších chyb měření. Jedním ze zásadních problémů je malá plocha nálevky srážkoměrů, v případě např. působení větru se jedná o významný faktor ovlivňující přesnost měření srážkoměrů. Z toho důvodu mohou být u srážkoměrů instalovány větrné clony pro zamezení případných větrných turbulencí. V letních měsících je pak přesnost měření ovlivňována výparem z nádržek srážkoměrů. Tomu je u některých typů zabráňováno přidáním olejů vytvářejících na hladině nádržek nepropustný mastný film. [2, 4] Poměrně velká chyba nastává při deštích s malou intenzitou a malým celkovým srážkovým úhrnem. V případě velmi malých srážek už nejsou srážkoměry vůbec schopny správně měřit. [4] Dle světové meteorologické organizace (WMO) mohou dílčí relativní chyby při měření prostřednictvím pozemních srážkoměrů dosahovat

- 2 % až 10 % pro déšť, a 10 % až 50 % pro sníh, a to u chyby způsobené působením větru na padající srážky nad nálevkou srážkoměru;
- 2 % až 15 % v letním období, a 1 % až 8 % v zimním období, u chyby způsobené zbytkovou vlhkostí na stěnách zachytné nádržky při jejím vyprazdňování;
- 0 % až 4 % u chyby způsobené vypařováním zachycených srážek;
- 1 % až 2 % u chyby způsobené rozptylováním kapaliny při dopadu deštových kapek. [6]

Pomocí bodových srážkoměrných dat lze i extrapolovat plošnou srážkovou činnost na území v okolí srážkoměru. Vzhledem však k prostorové variabilitě srážek je zřejmé, že bodová měření nemohou podat kvalitní informace o rozložení a intenzitě srážek na větších územních celcích, a tyto extrapolace jsou tak zatíženy vysokou chybou, zejména při konvekčních srážkách. [2]

1.2.2 Meteorologické radary

Informace o plošném rozložení srážkových úhrnů je klíčovým podkladem pro meteorologickou a hydrologickou předpovědní i varovnou službu. [7] K měření tohoto rozložení slouží primárně meteorologické radary. Jejich funkce spočívá na principu odrazení elektromagnetických vln v rádiovém spektru, konkrétně mikrovln, od překážek v atmosféře, tedy primárně atmosférických srážek. Dosah radarů se pohybuje mezi 100 až 260 km, v závislosti na parametrech radaru a především terénním profilu zemského povrchu na trase radarového paprsku. Horní hranice dosahu je dána zakřivením zemského povrchu. Dosahy českých meteorologických radarů v síti CZRAD (viz dále) jsou vykresleny na obrázku 1.1. Kruhy znázorňují maximální teoretický dosah, křivky pak skutečný dosah ovlivněný zemským reliéfem, při zachycení srážek ve výšce alespoň 1500 m (a výše) nad zemským povrchem. [1, 2, 8]



Obr. 1.1: Dosahy meteorologických radarů sítě CZRAD. Zdroj: ČHMÚ [8].

Moderní digitální radary jsou tzv. pulzního typu. Vysílají krátké mikrovlnné impulzy (v rozmezí 0,5 až 2 μ s) o velmi vysokém výkonu ve stovkách kW. Po vyslání impulzu se radar přepne do přijímacího režimu a detekuje odražený signál, který se vrací po odrazu od překážky (atmosférické srážky). Část signálu se na srážkách

pohlí a rozptýlí všemi směry, většina signálu putuje dál. Podle času uplynulého od vyslání impulsu do přijetí odraženého signálu je možné určit přesnou vzdálenost srážek. Důležitým parametrem je volba optimální frekvence vysílaných mikrovlnných impulsů, při nízkých frekvencích by radar nebyl schopen detekovat drobnější kapičky, kdežto vyšší frekvence pak dosahují příliš vysokého útlumu ve srážkách – radar by tak nebyl schopen proniknout do hloubky srážkových oblastí. V ČR je pro radarová měření používáno pásmo 5 GHz. [9, 10]

Míra odrazivosti je dána hustotou deště a především velikostí kapek (v případě dešťových srážek). Dle azimutu a elevace antény je určován směr zachycení. V každém směru je vyslán impuls mikrovln v úzkém svazku a zachycen kuželovitý řez atmosférou – parabolická anténa radaru je nejprve zafixována pod startovním elevačním úhlem, poté pomalým otáčením opíše kružnici 360° , elevační úhel se změní o nastavený krok, anténa opět opíše kružnici 360° , a stejným způsobem měření pokračuje až do konečného elevačního úhlu. Tímto způsobem je získáno přesné horizontální i vertikální umístění srážek ve trojrozměrném prostoru. Radary sítě CZRAD provozují měření v pětiminutových intervalech, během kterých vystřídají 12 elevačních úhlů, přičemž měřicí cyklus začíná vždy v nejvyšší elevaci a postupně klesá, a to z důvodu největší cennosti dat ze spodních vrstev atmosféry. Tím je zajištěno, že na konci měřicího cyklu jsou tato data nejaktuálnější, zatímco data z horních vrstev atmosféry mohou být až 5 minut stará. [9, 10]

Na základě dopplerovského efektu lze zjistit, kterým směrem se částice srážek pohybují, a také lze odlišit srážkové cíle od ostatních nežádoucích cílů – signál se totiž odráží i od dalších překážek, např. vrcholů kopců. Moderní radary provádí měření v obou polarizacích (horizontální i vertikální), jelikož signál z různých polarizací se mírně liší, a to v závislosti na tvaru srážkových částic. Lze tak měřením rozlišit i déšť, kroupy, či ledové krystalky. [9, 10]

Vlivem atmosférické refrakce a zakřivení země se radarový signál s rostoucí vzdáleností od radaru vzdaluje od zemského povrchu do vyšších nadmořských výšek. Ve větších vzdálenostech se tedy již výrazněji projevuje podceňování srážek vlivem přílišné výšky nejnižšího radarového signálového svazku. Například i při teoretickém namíření radarového signálu na samotný horizont, se bude střed signálového svazku již ve vzdálenosti 90 km od radaru nacházet ve výšce 1 km nad zemským povrchem (při zanedbání zemského reliéfu). Při elevaci o pouhém 1° to budou již 2 km ve vzdálenosti 90 km, při elevaci 2° pak 4 km ve vzdálenosti 100 km atd. Z toho vyplývá, že i při nejmenších elevacích radar není schopen ve větších vzdálenostech změřit srážkovou činnost v nejnižších vrstvách atmosféry. Podceňování pozemních srážek ve větších vzdálenostech od radaru je eliminováno pomocí kombinace měření z tuzemských i sousedních radarů, a při následném odhadu srážkových úhrnů pak kombinací s naměřenými údaji z pozemních srážkoměrů, viz kapitola 1.2.4. [10, 11]

Na území ČR jsou Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ) provozovány dva meteorologické radary, které jsou dohromady označovány jako síť CZRAD. Jejich základní parametry jsou uvedeny v tab. 1.1.

Tab. 1.1: Parametry meteorologických radarů sítě CZRAD. Zdroj: ČHMÚ [8].

Lokalita:	Skalky	Brdy
Oblast:	střední Morava	střední Čechy
Nadmořská výška:	730 m	860 m
Interval měření:	5 min	
Model radaru:	Vaisala WRM200	
Polarizace:	horizontální, vertikální	
Frekvence:	5645 MHz	5630 MHz
Impulzní výkon:	250 kW	
Délka impulzu:	0,5 – 2 μs	
Průměr antény:	4,5 m	
Zisk:	46 dB	
Min. detekovatelný signál:	−117 dBm	
Dynamický rozsah:	101 dBm	
Max. detekovatelná vzdálenost:	260 km	

Měření meteorologické radary provádí v jednotkách radarové odrazivosti Z , jejíž fyzikální rozměr jest mm^6m^{-3} . Je definována vztahem 1.1 jako:

$$Z = \frac{\sum_j D_j^6}{V} \quad (\text{mm}^6\text{m}^{-3}), [10] \quad (1.1)$$

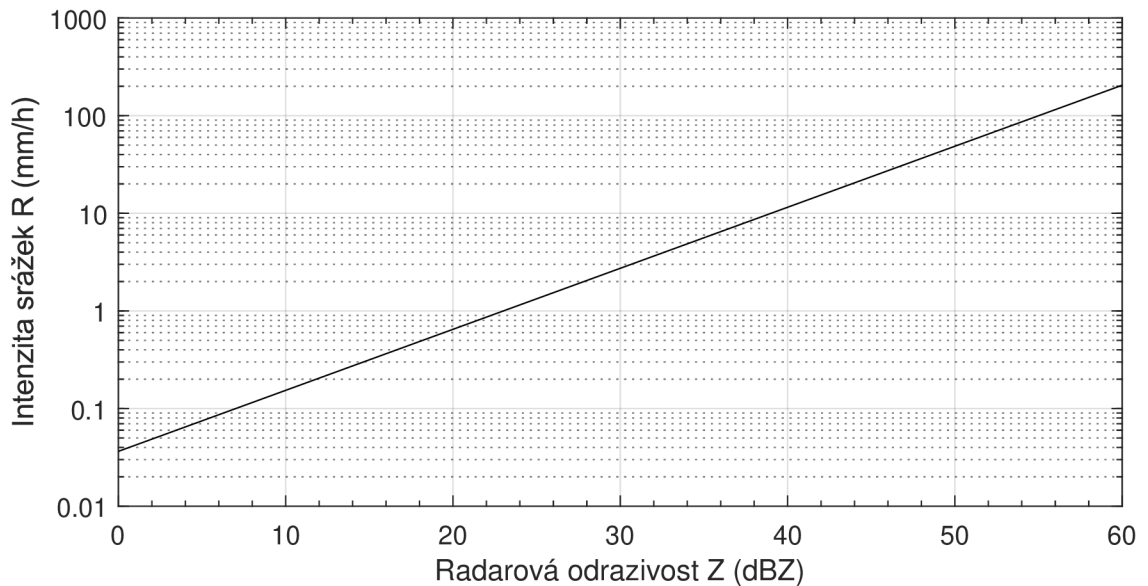
kde Z je rovno sumě šestých mocnin velikostních průměrů D srážkových kapek v uvažovaném prostoru, dělených objemem V uvažovaného prostoru. Výsledná odrazivost Z však nabývá velkého rozsahu hodnot, proto se v praxi používá výlučně jednotka dBZ s logaritmickým přepočtem dle vztahu 1.2:

$$Z [\text{dBZ}] = 10 \log \left(\frac{Z}{1 \text{ mm}^6\text{m}^{-3}} \right) \quad (\text{dBZ}). [10] \quad (1.2)$$

Vztahů pro přepočet odrazivosti Z na intenzitu deště R existuje větší množství, lišících se v hodnotách empiricky získaných koeficientů v závislosti na podnebí a ročním období. Žádný ze vztahů však nelze považovat za jednoznačný. U nejnovějších typů radarů lze výpočet koeficientů zajišťovat i dynamicky algoritmy na základě měření z různých polarizací. [10] V případě klasického způsobu je nejpoužívanějším Marshall–Palmerův přepočet, viz vztah 1.3, jehož funkční průběh je vykreslen obrázku 1.2. Tento vztah je používán i pro přepočet srážek na českých radarech

CZRAD, a to v rozmezí odrazivostí Z 7 dBZ až 55 dBZ, což odpovídá intenzitám srážek R o 0,1 mm/h až 99,9 mm/h. Pro odrazivost menší než 7 dBZ je intenzita srážek ponechána nulová, což eliminuje falešné slabé srážky. Maximální intenzita srážek je nastavena na 99,9 mm/h, aby bylo eliminováno přeceňování intenzity srážek vlivem přítomnosti krup. [11]

$$R = \left(\frac{10^{(Z_{dBZ}/10)}}{200} \right)^{\frac{5}{8}} \quad (\text{mm/h}). \quad [10] \quad (1.3)$$

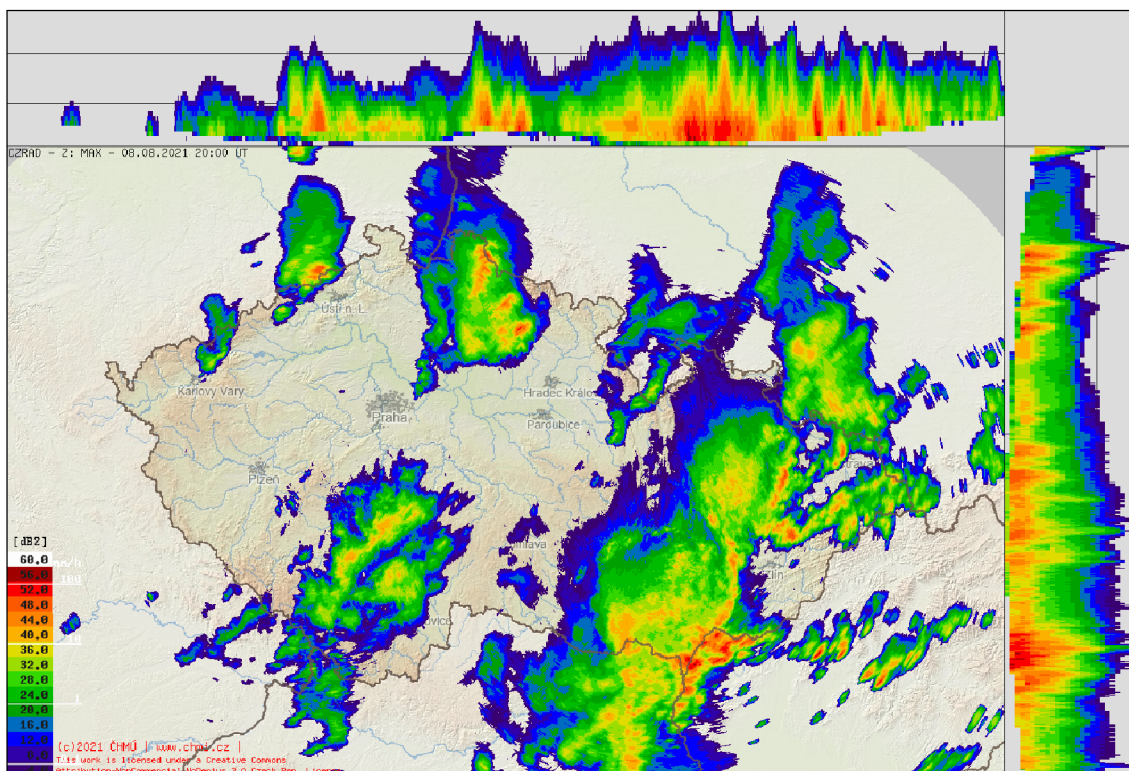


Obr. 1.2: Závislost intenzity srážek R na radarové odrazivosti Z dle Marshall–Palmerova vztahu. Osa intenzity srážek R je v logaritmickém měřítku.

Naměřená radarová data ČHMÚ jsou zpracovávána do několika výstupních produktů. Tím nejuniverzálnějším je výstup `MAX_Z_3D` – pole maximálních odrazivostí s bočními průměry [8], jehož aktuální snímky (poslední 2 hodiny s krokem po 10 minutách) jsou veřejně k dispozici na webu ČHMÚ¹ či v jejich mobilní aplikaci. Při výpočtu odhadu srážek v aplikacích ČHMÚ je používán výstup `PseudoCAPPI 2 km`, viz kapitola 1.2.4. Ten zobrazuje odrazivost ve výšce 2 km nad mořem, přičemž ve vzdálených oblastech, kde i nejnižší radarový paprsek je nad touto hladinou, je dosažena odrazivost z nejnižší dostupné hladiny. [7, 11]

Na území ČR mohou být provozovány i další neveřejnoprávní sítě malých meteorologických radarů o menším výkonu, ve vlastnictví soukromých institucí, pro jejich vlastní či obchodní potřebu.

¹<https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/inca-cz/short.html>



Obr. 1.3: Ukázka výstupu maximálních odrazivostí MAX_Z_3D z radarové sítě CZRAD. Zdroj: ČHMÚ.

1.2.3 Satelitní měření

Informaci o potenciálním výskytu srážek lze nepřímo získat i ze satelitních snímků z meteorologických družic. V ČR jsou využívány snímky z družic americké organizace NOAA – Národního úřadu pro oceán a atmosféru, a evropské mezivládní organizace EUMETSAT – Evropské organizace pro výzkum meteorologickými satelity. NOAA provozuje družice na polární oběžné dráze, jejíž sklon vůči rovině zemského rovníku je 98° až 99° , a výška dráhy se pohybuje v rozmezí 810 km až 870 km. EUMETSAT provozuje družice METEOSAT na geostacionární dráze, díky čemuž mohou konstantně snímat stejnou oblast. Aktuálně je v provozu jejich druhá generace pod názvem MSG, se čtyřmi družicemi MSG-1 až MSG-4. Aktuální snímky z družic NOAA² i MSG³ jsou stejně jako u radarových měření veřejně přístupné na webu ČHMÚ. Meteorologické družice poskytují informace o okamžitém výskytu a vývoji oblačnosti nad sledovaným územím, přičemž výskyt oblačnosti je předpokladem pro vznik srážkové činnosti. Toho lze využít zejména při predikci srážek, a minimalizaci chyb jiných srážkoměrných metod. [1, 2, 4]

²https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/sat/data_jsavhrrview.html

³https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/sat/data_jsmsgview.html

1.2.4 Výpočet plošného odhadu srážek

Pro výpočet kombinovaného plošného odhadu srážek v ČHMÚ, na základě vstupních dat ze srážkoměrných stanic a měření z meteorologických radarů, byl vyvinut systém MERGE2, podrobně popsany v článku č. [7]. Výstupy systému MERGE2 jsou dostupné skrze webovou grafickou aplikaci JSPrecipView, nacházející se v interní síti ČHMÚ.

Systém MERGE2

Výstupem systému MERGE2 jsou čtyři různé srážkové odhady na celém území ČR pro plovoucí časová okna 1 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h, 48 h a 72 h, s 10 minutovým krokem, s prostorovým rozlišením 1×1 km:

- **RADAR_ORIG** – čistě radarový odhad,
- **RADAR_ADJ** – adjustovaný radarový odhad,
- **GAGE** – čistě srážkoměrný odhad,
- **MERGE** – kombinovaný odhad. [7]

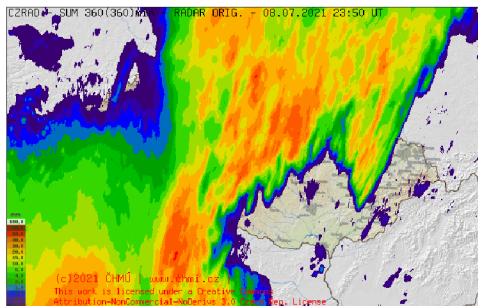
Vstupem algoritmu MERGE2 jsou data ze srážkoměrů a surový radarový srážkový odhad **CZRAD-EXT**, vypočítaný ze sloučených dat radarů sítě CZRAD, tj. Skalky a Brdy, a z dat zahraničních radarů v okolních zemích, tj. polských radarů Pastewnik, Ramza a Bzucharnia, slovenského radaru Malý Javorník a německých radarů Dresden, Neuhaus, a Eisberg. [11] Data z okolních radarů zvyšují přesnost v pohraničních horských oblastech (zmírňují problém neviditelnosti spodních hladin atmosféry ve větších vzdálenostech od radaru) a poskytují alternativní pokrytí za silných konvekčních bouří, kdy dochází k silnému útlumu radarového signálu intenzivními srážkami. Při výpočtu jsou použita data o odrazivosti ve výšce 2 km nad mořem (**PseudoCAPPI 2 km**), přičemž okamžité intenzity srážek jsou časově integrovány na srážkový úhrn za 1 h. Prostorové rozlišení všech radarových produktů i srážkových odhadů je 1×1 km. Ačkoli české radary CZRAD měří v intervalu 5 min, dostupnost odhadu **CZRAD-EXT** je v 10minutových intervalech, z důvodu rozdílného intervalu aktualizace dat v okolních zemích. Radarový odhad **CZRAD-EXT** je však v dalším korku algoritmu následně interpolován do minutových časových kroků, čímž je získán interpolovaný odhad **CZRAD-EXT-1min**. Relativní rozdíl mezi interpolovaným a neinterpolovaným hodinovým úhrnem byl naměřen větší než 10 % v 9,4 % případů, přičemž největší absolutní rozdíl dosáhl hodnoty 7,5 mm/h. Součtem interpolovaných minutových úhrnů je získán čistě radarový srážkový odhad **RADAR_ORIG**. [7, 11]

Vstupní data z přibližně 500 srážkoměrů provozovaných ČHMÚ či spolupracujícími organizacemi jsou k dispozici jako srážkové úhrny v 10minutových intervalech, vzhledem k povaze některých odlehlých lokalit je však nutno počítat s případným zpožděním či výpadky přenosu dat. Jelikož jsou radarová měření k dispozici v řádu

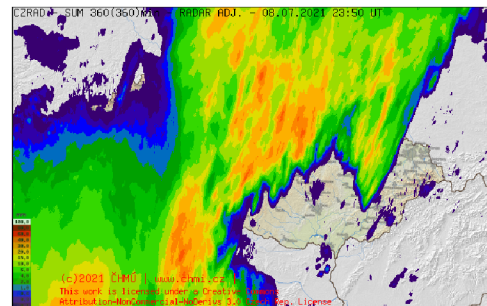
jednotek minut, je určujícím elementem času provádění výpočtu odhadu **MERGE** právě čekání na přenos dat z dostatečného počtu srážkoměrů. První výpočet srážkoměrného a kombinovaného odhadu je tak prováděn ve 24. minutě po termínu měření, přičemž v 99. minutě po termínu měření je zahájen další přepočít, kdy se již předpokládá doplnění chybějících dat ve 23. minutě. Součtem 10minutových srážkových úhrnů do hodinových úhrnů a prostorovou interpolací metodou běžného krigování (v angl. ordinary kriging), je z bodových srážkoměrných měření získán prostorový čistě srážkoměrný srážkový odhad **GAGE**. [7]

Před výpočtem samotného kombinovaného odhadu **MERGE** je provedena adjustace čistě radarového odhadu **RADAR_ORIG**. Výpočet adjustačního koeficientu je proveden jako získání průměru hodnot poměrů čistě srážkoměrného úhrnu a čistě radarového úhrnu (z odhadu **RADAR_ORIG**) v jednotlivých bodech umístění srážkoměrů. Započítány jsou nejen aktuální hodnoty, ale i historické hodnoty, viz článek č. [7]. Vynásobením odhadu **RADAR_ORIG** vypočteným adjustačním koeficientem je získán adjustovaný radarový odhad **RADAR_ADJ**. Lze tedy konstatovat, že radarové měření je kalibrováno srážkoměrným měřením. [7]

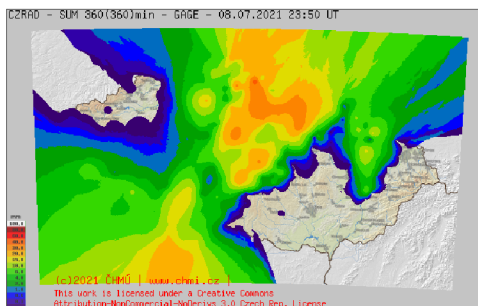
Hledaný kombinovaný srážkový úhrn **MERGE** je pak vypočten z adjustovaného radarového odhadu **RADAR_ORIG** a bodových úhrnů ze srážkoměrů interpolační metodou krigování s externím driftem (KED). [7] Ukázka grafického porovnání jednotlivých výstupních srážkových odhadů v systému **MERGE2** je na obrázku 1.4.



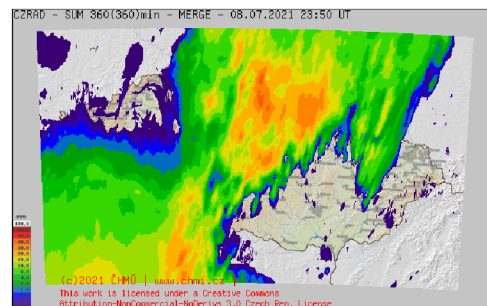
(a) originální radarový odhad



(b) adjustovaný radarový odhad



(c) srážkoměrný interpolovaný odhad



(d) kombinovaný interpolovaný odhad

Obr. 1.4: Porovnání odhadů srážkových úhrnů v systému **MERGE2**. Zdroj: ČHMÚ.

2 Mikrovlnné spoje

Jako mikrovlnné spoje jsou nazývána bezdrátová rádiová spojení mezi dvěma body, operující na frekvencích standardně vyšších než 1 GHz. Jedná se tedy o dvoubodovou topologii, často označovanou anglickým výrazem *point-to-point*, tedy bod-bod. Jednotky mikrovlnných spojů využívají směrových antén, na protější bod jsou tudíž směřovány v úzkém vyzařovacím svazku. Mikrovlny nemají schopnost ohybu okolo překážek či zemského povrchu, pro kvalitní dvoubodový spoj je tedy podmínkou dosažení přímé viditelnosti mezi spojovanými body.

Historicky lze mikrovlnné spoje rozdělit na

- analogové spoje (využívající analogovou modulaci),
- digitální spoje (využívající digitální modulaci),

od konce 20. století jsou však již využívány pouze spoje digitální. Důležité rozdělení z pohledu administrativy je dle využívaného frekvenčního pásma na

- bezlicenční spoje ve volných frekvenčních pásmech,
- licenční spoje ve frekvenčních pásmech podléhajících licenci ČTÚ [12].

Mikrovlnné spoje se používají všude tam, kde propojení lokalit pomocí optických či metalických kabelových spojů není ekonomicky či technicky proveditelné. Mohou být využívány jako poslední míle¹, ale i jako technologie páteřních a distribučních datových okruhů poskytovatelů telekomunikačních služeb, či technologie pro připojení základnových stanic celulárních mobilních sítí (BTS, Node B, či eNodeB) k páteřním sítím mobilních operátorů. [14]

2.1 Frekvenční pásma

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny rádiového spektra s frekvencí od 300 MHz do 300 GHz [12]. Rozdělení jednotlivých částí rádiového spektra do frekvenčních pásem je na národní úrovni úlohou Českého telekomunikačního úřadu (ČTÚ), který přejímá normy Mezinárodní telekomunikační unie (ITU). Pro oblast mikrovlnných spojů jsou podstatná následující pásma:

- Volná: 2,4; 5; 10; 17; 24; 60 (57–71); a 80 (71–76; 81–86) GHz.
- Licencovaná: 3,5; 3,8–4,2; 6; 7; 11; 13; 15; 18; 23; 26; 32; 38; 42; 48–50; 51–52 GHz [14, 15, 16, 17].

Licencovaná pásma podléhají získání licence od ČTÚ, tj. nutné registraci provozatele a hrazení pravidelných licenčních poplatků, jejichž výše se odvozuje od vybraného pásma, délky spoje, vysílacího výkonu a šířky použitého kanálu.

¹Poslední míle, často též angl. *Last Mile*. Jedná se o poslední úsek na trase mezi uzlem distribuční sítě poskytovatele telekomunikačních služeb (PE – *Provider Edge*) a fyzickou lokalitou zákazníka, resp. směrovačem v této lokalitě (CE – *Customer Edge*).

Pro spoje na větší vzdálenosti (více než 25 km) je doporučována volba nižších pásem (do 8 GHz). Do vzdálenosti 25 km je možno použít pásma 10 či 11 GHz. Pro menší vzdálenosti (méně než 15 km) lze použít pásma nad 11 GHz [12].

Volné frekvenční pásmo 5 GHz využívají i české meteorologické radary, které jsou podrobně rozebírány v kapitole 1.2.2. Jedná se konkrétně o frekvence 5630 MHz radaru Brdy a 5645 MHz radaru Skalky. Provozovatelé bezdrátových spojů operujících v tomto frekvenčním pásmu² mají povinnost zajistit, aby jejich spoje nerušily měření prováděné meteorologickými radary. Bohužel i přesto dochází k zarušení radarových měření těmito signály. ČHMÚ tudíž nárazově provádí měření rušení a zveřejňuje³ MAC adresy bezdrátových přístupových bodů jež jsou zdrojem tohoto rušení, a případně i SSID, jsou-li k dispozici. Provozovatelé inkriminovaných přístupových bodů mají následujících 48 hodin na přeladění spojů a odstranění rušení. Pakliže zdroje rušení nejsou do dané lhůty odstraněny, je situace předána k řešení ČTÚ. [18]

2.2 Hardware

Hardware stanic mikrovlnných spojů sestává z vnitřní jednotky (IDU, z angl. *Indoor Unit*), venkovní jednotky (ODU, z angl. *Outdoor Unit*) a parabolické antény [12]. Populárním řešením je koncepce „full-outdoor“, kdy je IDU i ODU sloučena do jediné kompaktní venkovní jednotky. Možná, avšak ne obvyklá, je i koncepce „full-indoor“, kdy se IDU i ODU nachází ve vnitřním prostředí, kde s anténou je tato vnitřní jednotka propojena vhodným vlnovodem.

2.3 Antény

Anténa vyzařuje do prostoru elektromagnetický mikrovlnný signál generovaný ve vysílači ODU a přivádí přijímaný mikrovlnný signál do přijímače ODU. U antén dvoubodových spojů je vyžadováno, aby anténa měla vyzařovací diagram s malými postranními vyzařovacími laloky a co největší účinnost. Většinou jsou navrženy tak, aby mohly pracovat se všemi kanály v daném frekvenčním pásmu [12]. Nejčastěji mají podobu rotačních parabolických reflektorů (zrcadel), s přímým nebo Cassegrainovým napáječem [13]. Lze se však setkat i s anténami trychtýřovými.

Přímý napáječ je u parabolických antén realizován tak, že reflektor ve formě rotačního paraboloidu z vysoce odrazného materiálu, je ze svého ohniska ozařován trychtýřovým zářičem. Dochází zde však k částečnému zastínění a bočnímu vyzařování, jelikož zářič musí být napájen vlnovodem, který svým umístěním protíná

²Nejčastěji se jedná o bezdrátové spoje založené na standardu IEEE 802.11, známé jako Wi-Fi.

³<https://radar4ctu.bourky.cz/Ruseni.html>

výstupní vlnu. Tento efekt je potlačován tzv. límcem – válcovitým přesahem po obvodu reflektoru, který zmírňuje vyzařování v nežádoucích směrech. V případě Cassegrainova napáječe, se ústí zářiče nachází ve středu reflektoru, který je zpětně ozařován subreflektorem v podobě rotačního hyperboloidu, umístěným v jeho ohnisku. Díky tomu, že vlnovod zářiče nezasahuje do vyzařovacího prostoru antény, má takováto anténa příznivější vyzařovací diagram [13].

Antény většiny dvoubodových mikrovlnných spojů jsou dále ještě kryty plastovým krytem, tzv. radomem, sloužícím k ochraně antény a jejího zářiče před nepříznivými vlivy počasí a mechanickým poškozením.

2.4 Důležité parametry

Úroveň vysílaného signálu – Transmitted Signal Level

Jedná se o výkonovou úroveň vysílaného mikrovlnného signálu vyzářeného do prostoru. Na mikrovlnných jednotkách bývá také často označována jako Tx Power (*Transmit Power*). Je standardně udávána v jednotkách dBm, udávajících logaritmický poměr vůči výkonové úrovni 1 mW, výjimečně se lze i setkat se zápisy přímo v jednotkách watt. U běžných mikrovlnných spojů typu bod-bod se pohybuje v rozmezí od -10 do 20 dBm.

Jeho maximální hodnota je přísně regulována ze strany ČTÚ, v závislosti na frekvenčním pásmu. Např. pro spoje operující ve volném pásmu 10 GHz je stanoveno, že hodnota středního výkonu dodávaného mikrovlnnou jednotkou do anténního napáječe nesmí překročit úroveň 2 mW, tj. cca 3 dBm [16], zatímco pro dvoubodové spoje operující v pásmu 60 GHz je tento práh stanoven na 10 dBm [17].

Moderní mikrovlnné jednotky často disponují funkcí automatické regulace vysílaného výkonu – ATPC (*Automatic Transmit Power Control*), která dynamicky navyšuje vysílací výkon v případě útlumu atmosférickými srážkami.

Úroveň přijímaného signálu – Received Signal Level

Jedná se o výkonovou úroveň přijímaného mikrovlnného signálu. Na mikrovlnných jednotkách bývá označována jako RSL, či častěji Rx Power (*Receive Power*). Je měřena opět v jednotkách dBm. U dvoubodových mikrovlnných spojů se pohybuje typicky v rozmezí od -70 dBm do -30 dBm. Tento parametr je nosnou veličinou pro výpočet srážek z dat mikrovlnných spojů.

Odstup signál-šum – Signal-to-Noise Ratio

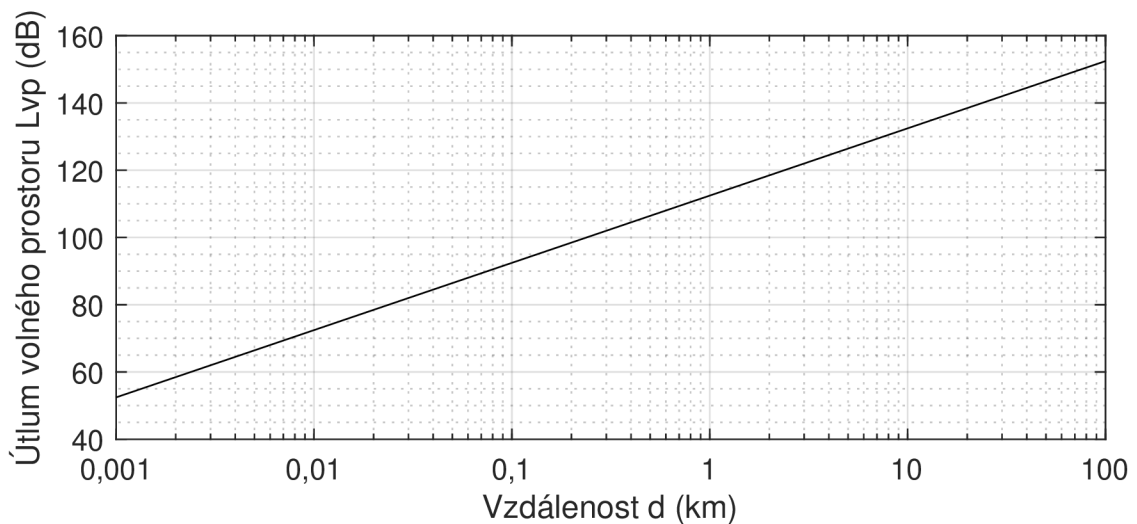
Odstup signál-šum, označovaný zkratkou SNR či S/N. Vyjadřuje poměr výkonové úrovně užitečného přijímaného signálu vůči přijímané výkonové úrovni šumu. Udává se v jednotkách dB. Za šum lze považovat veškeré signály zasahující do spektra užitého mikrovlnného kanálu. Tento parametr lze v případě srážkových výpočtů využít při posuzování kvality a spolehlivosti spoje.

3 Šíření rádiových vln a zdroje útlumu

Celková energie elektromagnetické vlny, šířící se volným prostorem v ideálním prostředí, je konstantní. Jejím postupným šířením však dochází k jejímu rozprostírání do většího prostoru, tj. výkon přijímaného elektromagnetického vlnění na přijímači je nepřímo úměrný vzdálenosti od zdroje (vysílače). Tato ztráta se nazývá ztrátou volného prostoru, a je základním stavebním prvkem radiokomunikační rovnice (viz dále). O ztrátě ve volném prostoru a útlumech rádiového signálu obecně pojednávají doporučení ITU-R P.525 [20] a ITU-R P.341 [21]. V případě vysílání izotropní anténou umístěnou v dokonale dielektrickém a homogenním prostředí je útlum výkonu L_{vp} na přijímací izotropní anténě v tomto prostředí roven vztahu 3.1: [12, 19, 21]

$$L_{vp} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (\text{dB}), [21] \quad (3.1)$$

kde d je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem, a λ je vlnová délka vysílané elektromagnetické vlny. Ukázka závislosti útlumu L_{vp} na vzdálenosti d v kilometrech pro elektromagnetické vlny o frekvenci 10 GHz je na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Závislost útlumu L_{vp} ve volném prostoru na vzdálenosti d .

Použitím směrových antén (viz kapitola 2.3) se ziskem G_t (dB) na vysílací straně a G_r (dB) na straně přijímací, lze elektromagnetické vlny soustředit pouze v jednom směru, čímž je při dosazení výpočtu útlumu ve volném prostoru L_{vp} a vysílání o výkonu P_t (dBm) sestavena energetická bilance výkonové úrovně P_r (dBm) přijímaného signálu, uvedená ve vztahu 3.2: [21]

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L - 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (\text{dBm}). [21] \quad (3.2)$$

Vztah 3.2 je v různých podobách (logaritmických, nelogaritmických) znám jako radiokomunikační rovnice. L v něm zastupuje vyjma útlumu volného prostoru sumu útlumů ze všech ostatních příčin, jež jsou jednotlivě vyjmenovány v kapitole 3.2.

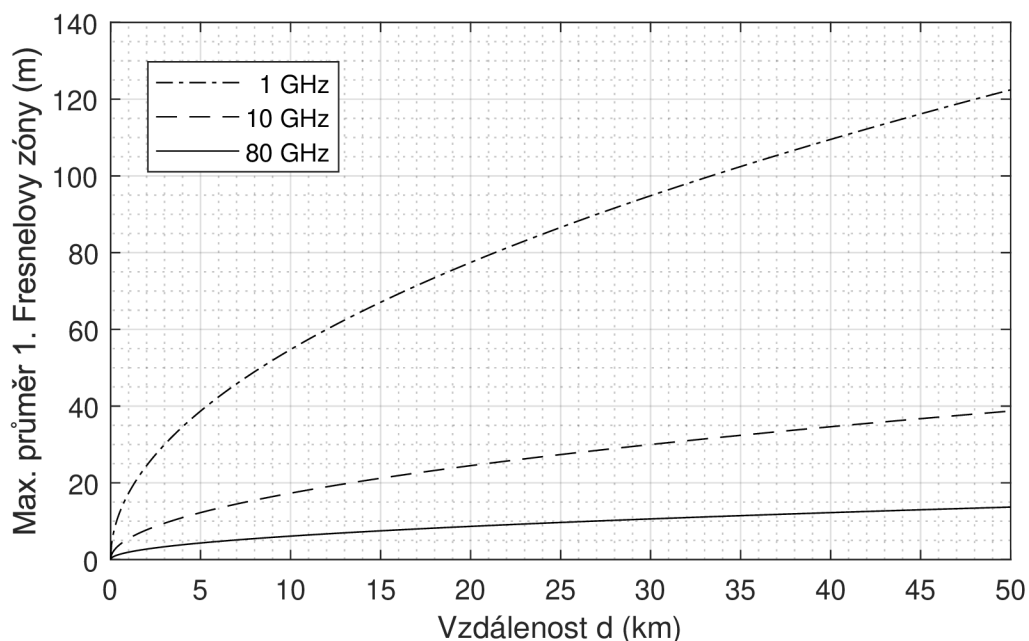
3.1 Fresnelovy zóny

Fresnelovy zóny jsou prostorovým útvarem ve tvaru rotačního elipsoidu, vzniklým rotací tzv. Fresnelovy elipsy okolo spojnice středů antén směrového rádiového dvoubodového spoje. Body ležící na Fresnelově elipse jsou rozhraním, ze kterého je odražená vlna fázově zpožděna právě o celočíselný násobek půlvlny vysílaného signálu. V ohniscích této elipsy se nachází antény směrového spoje, tudíž ve všech bodech elipsy je součet vzdáleností k oběma anténám konstantní. Pořadí Fresnelových elips (resp. zón) označuje počet půlvln, o které je signál při odrazu na bodech Fresnelovy elipsy fázově zpožděn. V případě jedné půlvlny se jedná o první Fresnelovu elipsu (zónu), v případě dvou půlvln o druhou Fresnelovu elipsu (zónu), atd. Za prostor N -té Fresnelovy zóny se pak považuje prostorový útvar vzniklý odečtením $N - 1$ -té Fresnelovy zóny od N -té Fresnelovy zóny, atd. Poloměr N -té Fresnelovy zóny b_N v bodě D , jež leží v libovolném bodě spojnice vysílací a přijímací antény (tj. spojnice ohnisek Fresnelova elipsoidu), odkud vzdálenost k první anténě je rovna d_1 a vzdálenost ke druhé anténě pak d_2 , je roven vztahu 3.3:

$$b_N = \sqrt{\frac{d_1 d_2 N \lambda}{d}} \quad (\text{m}), [24] \quad (3.3)$$

kde N je pořadí Fresnelovy zóny, λ je vlnová délka a d je vzdálenost mezi anténami (ohnisky), tj. součet vzdáleností d_1 a d_2 . Při přepočtu na průměr je na obrázku 3.2 zobrazena závislost velikosti průměru první Fresnelovy zóny ve středu spojnice antén (tj. v bodě kdy $d_1 = d_2$), na velikosti této spojnice, tj. délce směrového spoje, a to pro ukázkové frekvence 1 GHz, 10 GHz a 80 GHz. [12, 22, 24]

Vlivem rozdílu drah elektromagnetického vlnění v sousedních Fresnelových zónách rovného jedné půlvlně jsou sousední zóny v opačné fázi a jejich příspěvky se vzájemně odečítají. První Fresnelova zóna je však největší a přenáší se v ní více než 70 % celkové energie signálu [23], tudíž její průchodnost bez překážek je pro spolehlivou funkci směrového spoje nejpodstatnější. [12] Při narušení Fresnelových zón překážkami dochází k útlumu difrakcí (viz kapitola 3.2.3) či k odrazu a útlumu mnohocestným šířením (viz kapitola 3.2.2).



Obr. 3.2: Závislost průměru první Fresnelovy zóny na vzdálenosti d .

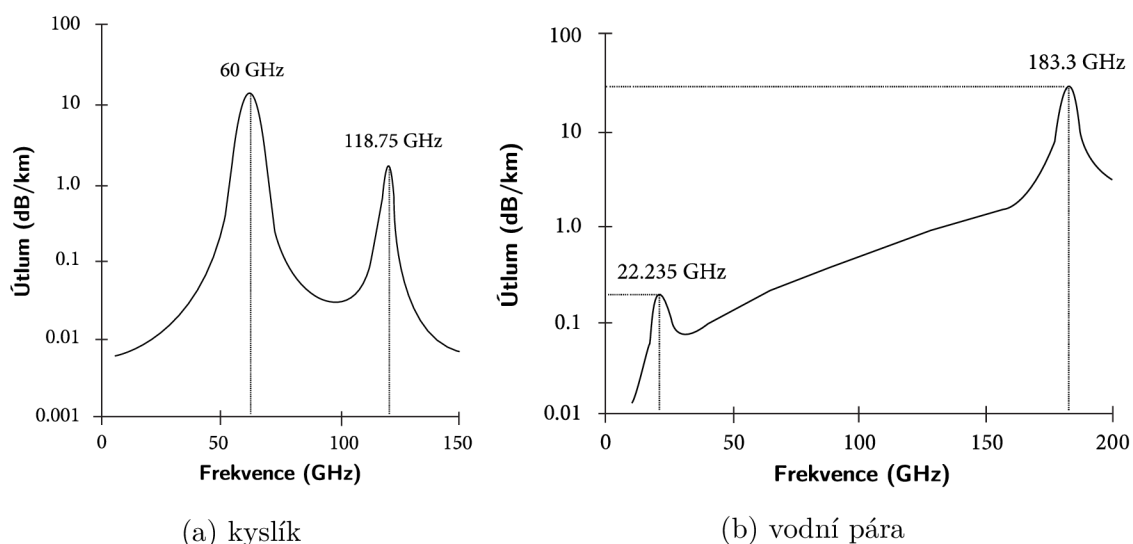
3.2 Zdroje útlumu

Řada příčin útlumů je nahodilá, časově nestálá a mění se s časem v závislosti na okolních podmínkách. Lze je tak postihnout pouze statisticky. Kolísání úrovně přijímaného rádiového signálu v důsledku útlumů za určitý časový úsek je nazýváno jako únik. Pro zajištění spolehlivého chodu směrových rádiových (mikrovlnných) spojů je žádoucí ponechání dostatečné rezervy v úrovni přijímaného signálu pro jeho případný pokles – jedná se o tzv. rezervu na únik. O výpočtu různých typů útlumů, resp. jejich statistické predikci podrobně pojednává mimo jiné doporučení ITU-R P.530 [25]. [12]

3.2.1 Útlum atmosférickými plyny

Jedná se o tzv. absorpční ztráty. Molekuly plynů obsažených v atmosféře různou měrou absorbují šířící se elektromagnetické vlny, a to v závislosti na blízkosti frekvence vlnění a rezonanční frekvence molekul jednotlivých plynů. Šíření rádiových vln svými absorpčními schopnostmi ovlivňují molekuly kyslíku a vodní páry. Na rozsahu do 200 GHz je u kyslíku tento absorpční projev nejvýraznější okolo frekvencí 60 GHz (zde dochází k velice silnému útlumu až 10 dB v nulové nadmořské výšce), a 118,75 GHz. U vodní páry dochází k relativnímu nárůstu útlumu na frekvenci 22,235 GHz, s rostoucí pak dojde k mírnému poklesu a k návratu na předchozí úroveň dochází okolo 65 GHz, přičemž nového vrcholu útlum nabývá na frek-

venci 183,3 GHz. Jednotlivé průběhy útlumů kyslíkem a vodní párou na frekvenčním spektru jsou zobrazeny na obrázku 3.3. S rostoucí nadmořskou výškou tento útlum klesá, vlivem nižších koncentrací molekul plynů v atmosféře, tento efekt se však výrazněji projevuje až ve výškách od 1 km výše. Podrobně se útlumem atmosférickými plyny zabývá doporučení ITU-R P.676 [26]. U frekvencí pod 12 GHz nabývá tento útlum velmi nízkých hodnot (okolo 1 dB na vzdálenosti 50 km pro frekvenci 12 GHz) a lze jej zcela zanedbat. [12, 27, 28]



Obr. 3.3: Závislost absorpce mikrovlnného signálu a) kyslíkem a b) vodní párou v atmosféře na frekvenci mikrovlnného signálu. Zdroj: Miacci (2018) [27].

3.2.2 Útlum mnohocestným šířením

Pakliže se na trase rádiového signálu, resp. v některé jeho Fresnelově zóně, nachází překážka, může při vhodném tvaru překážky dojít k difrakci (viz 3.2.3), ve většině případů však dochází k odrazu dopadající vlny. Dochází tak k tomu, že na přijímací anténu dopadá spolu s původním vyslaným signálem i více odražených signálů s vzájemně rozdílnou fází a velikostí, a oslabují tak původní žádaný signál.

Výpočet útlumu mnohocestným šířením je komplexním tématem, přičemž neexistuje jeho jednoznačné či obecné řešení, tudíž ukázka výpočtu je nad rámec této práce. Statistický výpočet tohoto útlumu řeší například kapitola 2.4 v doporučení ITU-R P.530 [25].

3.2.3 Útlum difrakcí

Útlum difrakcí je způsobený ohybem elektromagnetické vlny okolo překážek vyplývajícím z Huygensova principu. Vzniká při vniknutí ostré překážky (předmětu, budovy, konstrukce, ostrého vrcholu kopce atd.) do trajektorie směrového rádiového signálu, resp. narušováním jeho Fresnelových zón. [12]

Ostrá překážka nacházející se ve vertikální rovině spojnice antén rádiového spoje, má uvažovanou výšku h . Tato výška h prozatím nedosahuje výškové hladiny spojnice antén (tj. nachází se „pod“ úrovní spoje), avšak narušuje některou z Fresnelových zón spoje (těch je v teorii nekonečný počet). Zakrýváním určité části prostoru Fresnelových zón ostrá překážka způsobuje útlum, který, v určitých polohách, může nabýt i záporných hodnot, jelikož účinky jednotlivých Fresnelových zón se navzájem kompenzují. Od určité vzdálenosti mezi výškou překážky h a spojnicí antén začíná útlum strmě klesat, přičemž pakliže výška překážky h dosáhne výškové hladiny spojnice antén, tj. zakrývá přesně polovinu první Fresnelovy zóny, útlum je roven 6 dB. Při dalším růstu výšky překážky h tato překážka zakrývá více jak polovinu první Fresnelovy zóny (tj. nachází se „nad“ úrovní spoje), a útlum dále rapidně roste. [12]

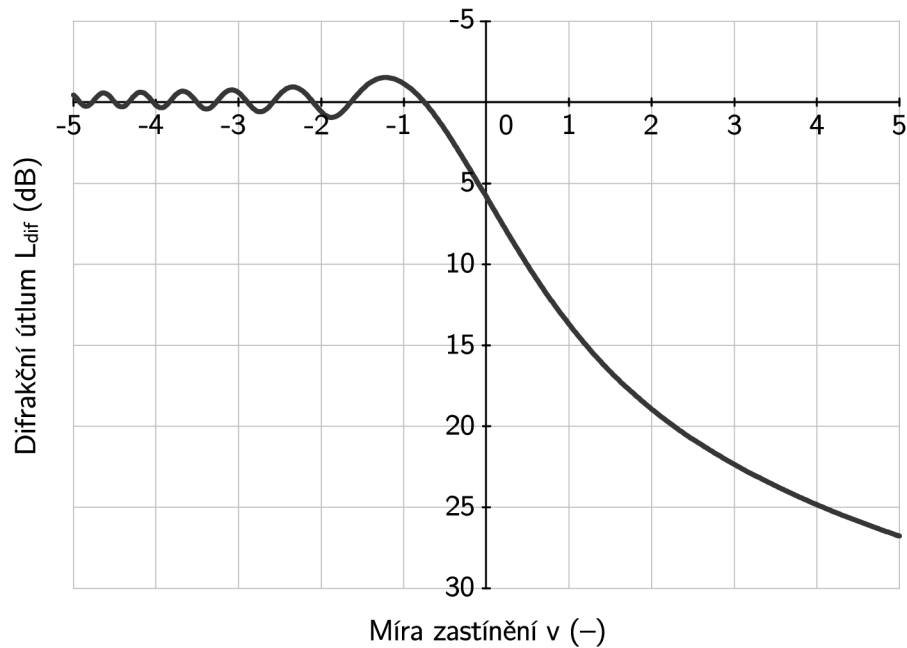
Vyčíslit útlum difrakcí je možné prostřednictvím veličiny v – tzv. míry zastínění, a příslušné funkce $L_{\text{dif}}(v)$, definované v doporučení ITU-R P.526 [24], které se podrobně zabývá tímto typem útlumu. Pro výpočet zastínění v lze použít vztah 3.4:

$$v = 0,0316 h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (-), [24] \quad (3.4)$$

kde h je výška překážky v metrech, d_1 je vzdálenost od vrcholu překážky do středu první antény v kilometrech, d_2 je vzdálenost od vrcholu překážky do středu druhé antény v kilometrech, a λ je vlnová délka v metrech. Ukázka průběhu závislosti útlumu L_{dif} na míře zastínění v je na obrázku 3.4.

3.2.4 Další zdroje útlumu

Existuje několik dalších zdrojů potenciálních útlumů na rádiových systémech, případně lze rozlišovat různé příčiny útlumu mnohocestným šířením, např. odrazy od zemského povrchu, atd. Smyslem této práce však není podrobný popis všech těchto jednotlivých jevů, přičemž též ne všechny jevy jsou relevantní ve vztahu ke směrovým spojmům v mikrovlnném pásmu. Pro kompletaci výčtu však lze jmenovat např. následně uvedené útlumy.



Obr. 3.4: Závislost difrakčního útlumu L_{dif} na míře zastínění v .

- Útlum atmosférickými srážkami – pro tuto práci stěžejní a také nejčastější zdroj útlumu na směrových mikrovlnných spojích. Pojednává o něm následující samostatná kapitola 2.3.
- Útlum oblačností a mlhou – oblačnost a mlha sestávají z velmi malých částic tekuté vody (obvykle menších než 0,1 mm). Mají tedy na útlum rádiových vln obdobný vliv jako atmosférické srážky, avšak vzhledem k výrazně menší hustotě vody na jednotku objemu atmosféry je i jimi způsobený útlum výrazně menší. Oblačnost ovlivňuje především satelitní spoje, mlha pak pozemní spoje na frekvencích nad 100 GHz – útlum na nižších frekvencích lze při uvažování hustoty $0,05 \text{ g/m}^3$ pro střední mlhu (viditelnost na 300 m) až hustoty $0,05 \text{ g/m}^3$ pro silnou mlhu (viditelnost na 50 m) zanedbat. [29]
- Atmosférická refrakce – rozlišuje se refrakce troposférická a ionosférická. Vzniká proměnným indexem lomu v různých vrstvách atmosféry a způsobuje zakřivení dráhy rádiových vln. [3, 12]
- Ztráty na vysílacích/přijímacích obvodech, anténních vlnovodech, atd. – útlum na rádiových jednotkách, příčinou mohou být výrobní vady či poruchy. [21]
- Ztráty nepřesným zaměřením antény, polarizační ztráty – příčinou je špatně nasměrovaná anténa, vysílající/přijímající např. jen jedním z vedlejších vyzařovacích laloků, což má za následek úbytek výkonu. Polarizační ztráty jsou způsobené rozdílnou polarizací vysílací a přijímací strany, tj. špatným natočením antén.

3.3 Útlum atmosférickými srážkami

Atmosférické srážky absorbují a rozptylují energii elektromagnetických vln, pakliže je jejich vlnová délka menší než 5 cm, tj. frekvence vyšší než 6 GHz. Pro nižší frekvence lze tento útlum zanedbat. [12] Následující kapitoly se budou zabývat výhradně srážkami dešťovými. Útlum způsobený ostatními srážkami, nejčastěji v zimních měsících srážkami sněhovými, je výrazně ovlivňován podmínkami za daného stavu počasí, to jest vznikem ledových vrstev či sněhových pokrývek na anténách, což způsobuje výrazný přídavný útlum a znemožňuje odlišení mezi jednotlivými zdroji útlumu. [25] V této verzi práce jsou tak nadále uvažovány srážky dešťové, přičemž úspěšná identifikace a práce se sněhovým útlumem zůstává výzvou pro další vývoj.

Pro dešťové srážky lze stanovit okamžitý měrný útlum deštěm A následujícím odvozeným vztahem 3.5:

$$A = 8,686 \cdot 10^3 \cdot \frac{2\pi}{k} \cdot \Im \int_0^\infty \mathbf{f}(\mathbf{D}) \cdot N(D) dD \quad (dB/km), [30] \quad (3.5)$$

kde $\mathbf{f}(\mathbf{D})$ je komplexní rozptylová funkce dešťové kapky, D (mm) je efektivní průměr dešťové kapky, k (m^{-1}) je vlnové číslo dané vztahem $k = 2\pi/\lambda$, kde λ (m) je vlnová délka tlumené elektromagnetické vlny, a $N(D)$ je spektrum dešťových kapek. Hodnoty komplexní rozptylové funkce dešťové kapky $\mathbf{f}(\mathbf{D})$ se liší v závislosti na tvaru dešťových kapek, lze je získat z tabulek, či např. výpočtem algoritmem Gustava Mie pro kulovitou aproximaci tvaru kapky, popsáným v článku (Fišer, 1993) [31]. Součin $N(D) \cdot dD$ pak udává počet kapek o úruměrech v intervalu D až $D + dD$ na jednotku objemu, což lze pro průměrné deště v mírném podnebném pásmu aproximovat Marshall–Palmerovým vztahem 3.6:

$$N(D, R) = 8000 \cdot e^{\frac{-4,1 \cdot D}{R^{0,21}}} \quad (-), [32] \quad (3.6)$$

kde R (mm/h) je intenzita srážek. Okamžitý měrný útlum deštěm A lze stanovit i jinými způsoby, například vyjádřením pomocí extinčního koeficientu, které však dosahuje stejných výsledků, jako výše uvedený vztah. [3, 30, 31, 32, 33, 34]

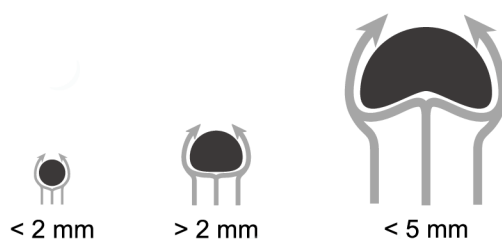
Výše uvedený výpočet je v praktických aplikacích aproximován pomocí empirických rovnic. Nejpoužívanějším je výpočet uvedený v doporučení ITU-R P.838 [35].

3.3.1 Doporučení ITU-R P.838

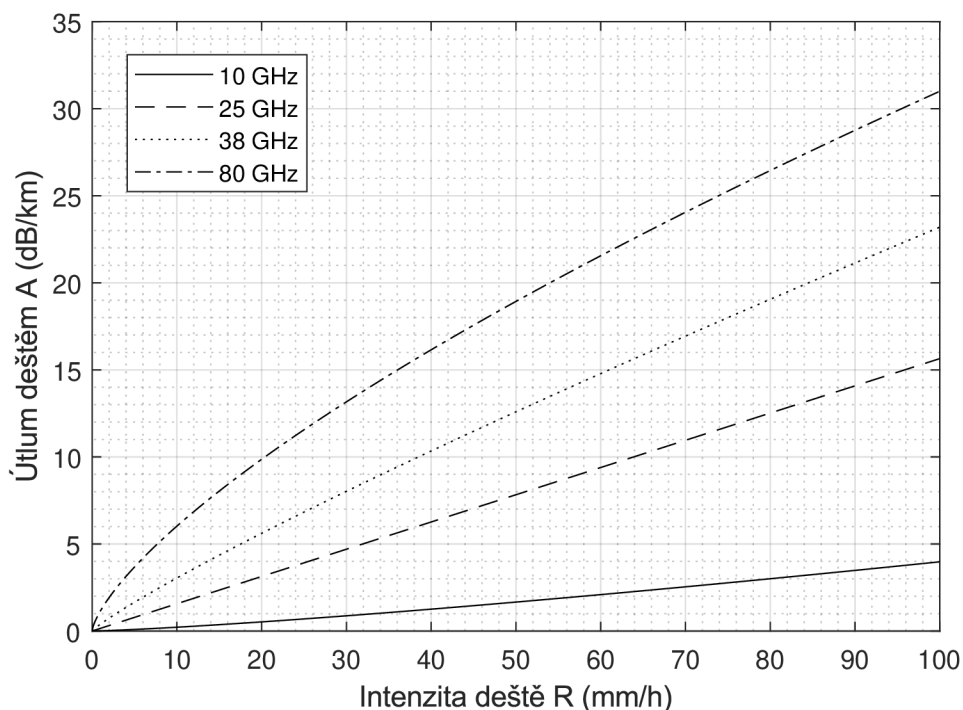
Toto doporučení stanovuje výpočet měrného útlumu deštěm A jako vztah 3.7:

$$A = k R^\alpha \quad (\text{dB/km}), [35] \quad (3.7)$$

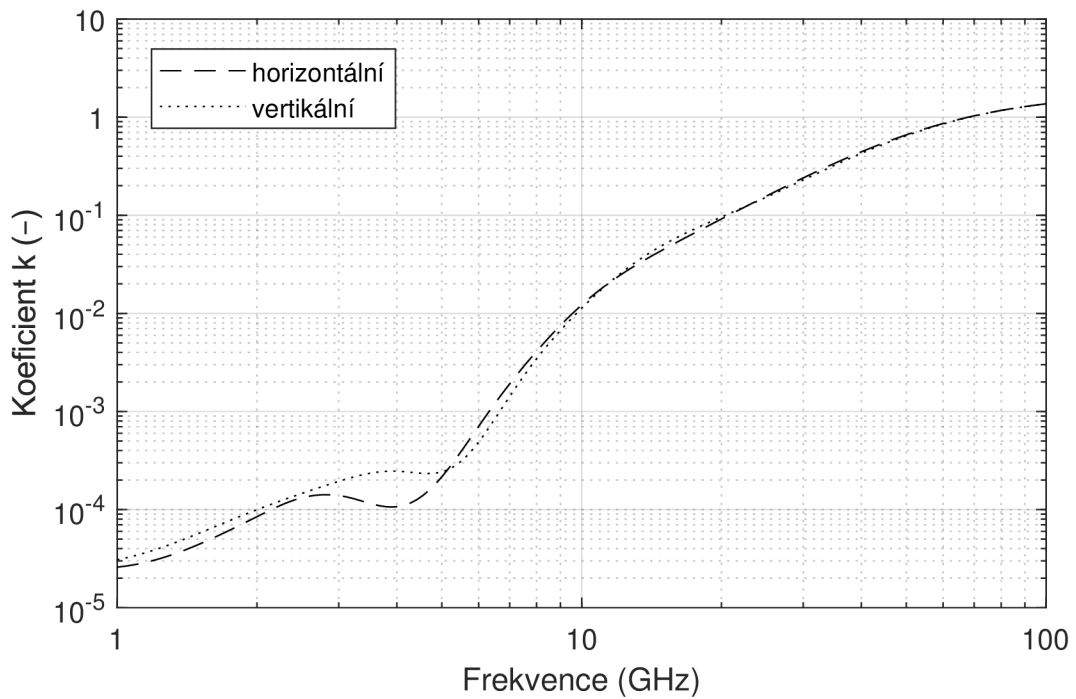
kde R (mm/h) je intenzita srážek a k , α jsou koeficienty lišící se pro různou frekvenci a polarizaci spoje, získané z empiricky sestavených rovnic uvedených v tomto doporučení. Vedle samotné frekvenční závislosti jsou hodnoty útlumu A obecně vyšší při horizontální polarizaci, oproti polarizaci vertikální. To je způsobeno tím, že malé dešťové kapky mají tvar přibližně kulovitý, zatímco větší kapky nabývají vlivem vzdušného proudění tvaru horizontálně zploštělého (viz obrázek 3.5), což má za následek vyšší interakci s elektromagnetickou vlnou v rovině horizontální polarizace.



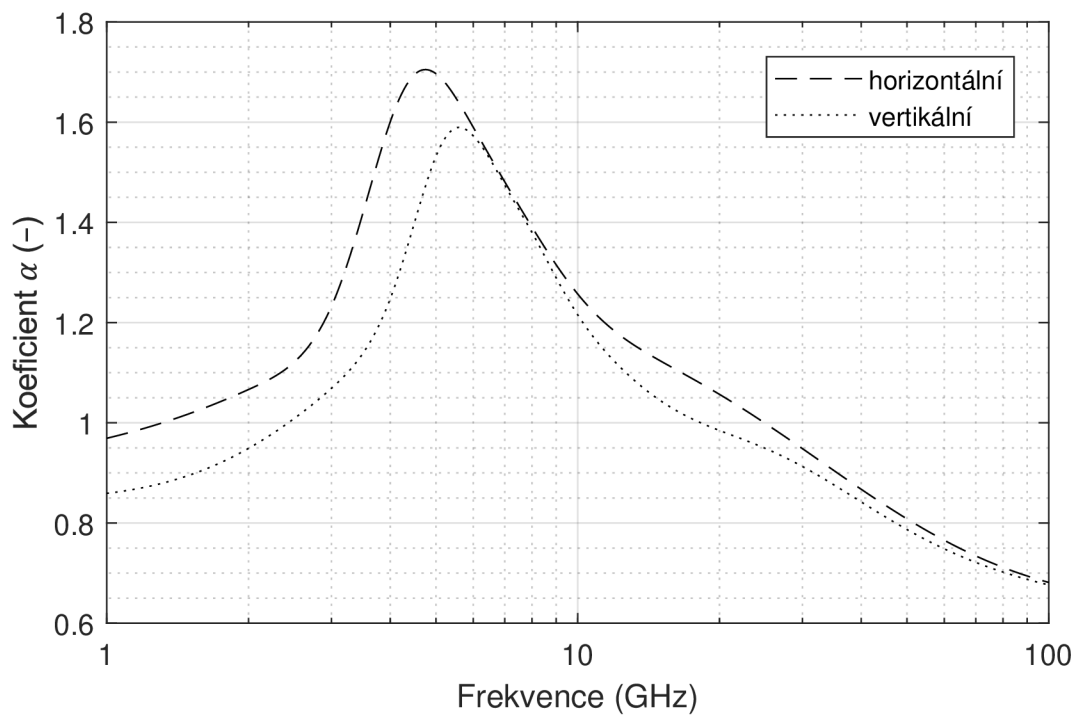
Obr. 3.5: Tvar dešťových kapek v závislosti na jejich velikosti. Zdroj: Commons [36].



Obr. 3.6: Závislost útlumu deštěm A na intenzitě deště R dle ITU-R P.838.



Obr. 3.7: Hodnota koeficientu k dle ITU-R P.838 v závislosti na frekvenci pro horizontální a vertikální polarizaci.



Obr. 3.8: Hodnota koeficientu α dle ITU-R P.838 v závislosti na frekvenci pro horizontální a vertikální polarizaci.

Na obrázku 3.6 je zobrazena závislost útlumu deštěm A na intenzitě deště R dle tohoto doporučení, a to v případě horizontální polarizace pro frekvence 10 GHz, 25 GHz, 38 GHz a 80 GHz. Na obrázcích 3.7 a 3.8 jsou pak zobrazeny závislosti koeficientů k a α použitých pro výpočet, a to na frekvenčním rozsahu 1 GHz až 100 GHz.

Na základě průběhů zobrazených na obrázku 3.6 lze konstatovat, že ačkoli se útlum deštěm měřitelně projevuje již na frekvencích okolo 10 GHz, významných hodnot útlum nabývá až od 20 GHz výše, což je pak i hlavním omezujícím faktorem délky mikrovlnných spojů operujících na těchto frekvencích.

3.3.2 Doporučení ITU-R P.530

Toto doporučení se vedle jiných útlumů poměrně rozsáhle věnuje i zpracování útlumu atmosférickými srážkami. Konkrétně popisuje statistickou metodu pro výpočet útlumu způsobeného kombinací dešťových i sněhových srážek, překročeného pro dané procento času (nebere však v potaz potenciální vznik ledových vrstev na anténě, viz úvod kap. 3.3), dále specifikuje vztahy pro přepočtení srážkového útlumu mezi různými frekvencemi a polarizacemi, upřesňuje vliv srážek na spojích s retranslací¹, či statisticky určuje pravděpodobnost nedostupnosti spoje z důvodu srážkového útlumu. [25]

Především pak ale toto doporučení upřesňuje výpočet útlumu definovaný v předchozím doporučení ITU-R P.838, resp. se snaží kompenzovat fakt, že vliv srážek není konstantní na celé trase mikrovlnného spoje, nýbrž je proměnný v jeho délce. Kompenzace je uskutečněna tzv. distančním faktorem r , jímž je násobena skutečná vzdálenost mikrovlnného spoje. Pro výpočet r doporučení udává empiricky získaný vztah 3.8:

$$r = \frac{1}{0,477d^{0,633} \cdot R^{0,073 \cdot \alpha} \cdot f^{0,123} - 10,579(1 - e^{-0,024d})} \quad (-), [25] \quad (3.8)$$

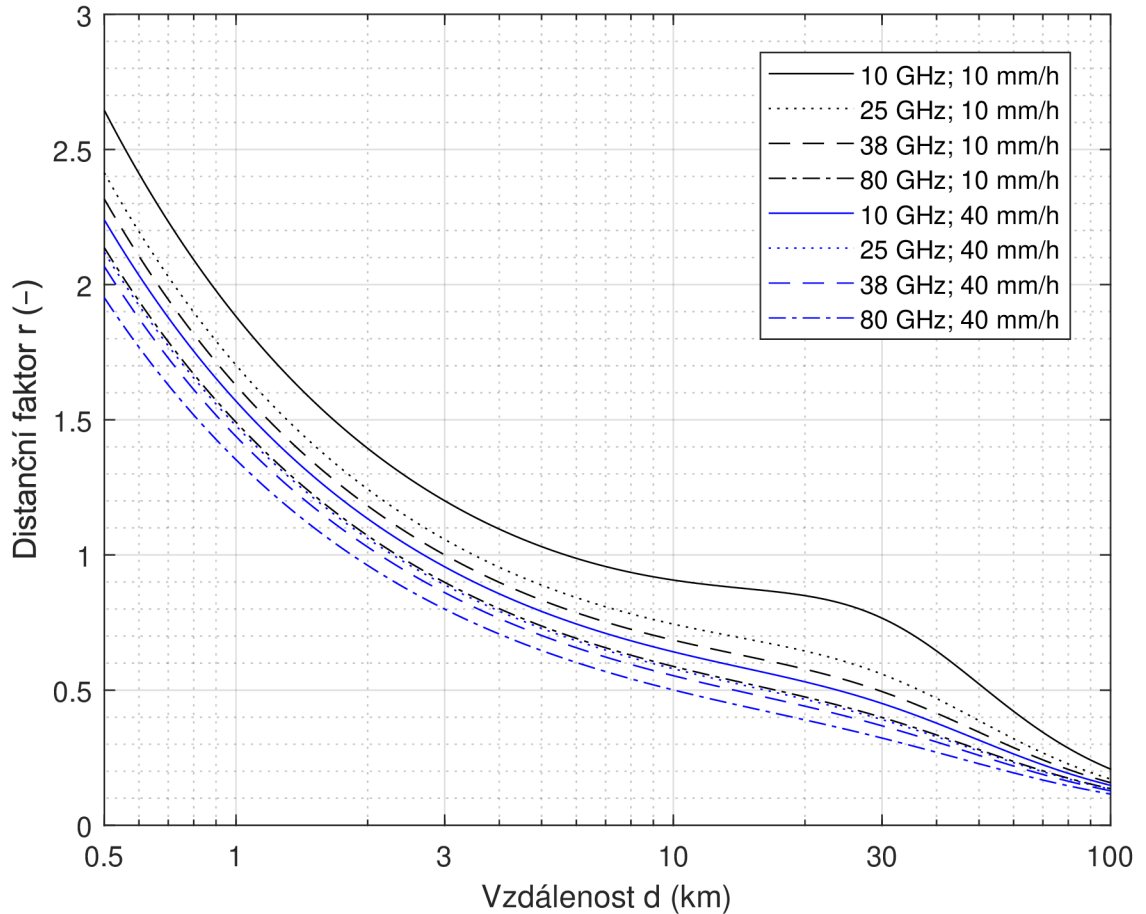
kde f (GHz) je frekvence spoje, d (km) je délka spoje, R (mm/h) je intenzita deště v nejpostiženějším místě trasy, a α je koeficient získaný při výpočtu měrného útlumu A dle vztahu 3.7. Pakliže je hodnota r rovna 2,5 či vyšší, operuje se dále pouze s hodnotou 2,5. Konečný útlum spoje na celé své trase vlivem deště je pak získán výpočtem 3.9:

$$L_{\text{dest}} = A \cdot d \cdot r \quad (dB), [25] \quad (3.9)$$

kde A je vypočítaný měrný útlum získaný dle vztahu 3.7, d (km) je délka spoje a r je vypočítaný distanční faktor.

¹Bezdrátové spoje typu bod–bod s dalšími pasivními či aktivními mezilehlými (retranslačními) body, prodlužujícími dráhu spoje.

Obrázek 3.9 ilustruje vliv hodnoty r na velikost srážkového útlumu – zobrazena je závislost hodnoty r na skutečné délce spoje d při mírné intenzitě deště 10 mm/h, a při silném dešti o intenzitě 40 mm/h, a to pro frekvence 10 GHz, 25 GHz, 38 GHz a 80 GHz.



Obr. 3.9: Závislost hodnoty distančního faktoru r na délce spoje pro různé hodnoty frekvencí f a intenzity srážek R .

Z průběhů na obrázku 3.9 je patrné, že distanční faktor r kompenzuje lokální extrém v prostorovém rozložení intenzity srážek tím, že útlum na kratších spojích je pro danou intenzitu deště nadhodnocován ($r > 1$), zatímco na delších spojích je útlum podhodnocován ($r < 1$), přičemž hodnota zlomu ($r = 1$) jednotlivých průběhů se liší v závislosti na frekvenci a intenzitě deště.

4 Odhad srážkového úhrnu

Měření intenzity a úhrnů srážek na základě útlumu přijímaného signálu na mikrovlnných spojích je v současnosti aktuálním předmětem výzkumů. Stejně jako u dedikovaných meteorologických metod měření srážek popsaných v kapitole 1.2 se i při překonání všech výzev, které tato metoda obsahuje, však stále jedná z povahy plošného měření srážek o odhad hodnot srážkových intenzit a úhrnů. Cílem současného bádání je kvalitativní vyrovnání srážkových odhadů z mikrovlnných spojů odhadům z měření meteorologickými radary, a vyplnění mezery v meteorologických výpočtech, kde měření intenzity srážek mikrovlnnými spoji může poskytnou cenná data o srážkové činnosti v nejnižší vrstvě atmosféry (v řádu desítek metrů nad zemí), která radarová měření nemohou poskytnout a jiný zdroj dat, nežli interpolovaná data z bodových měření srážkoměry, zde ani není k dispozici (podrobný popis meteorologických radarů je v kapitole 1.2.2).

Perspektivní je měření srážek prostřednictvím mikrovlnných spojů i díky tomu, že využívá již existujících sítí spojů poskytovatelů telekomunikačních služeb, kdy na všech jednotkách takovýchto spojů standardně probíhá monitorování a záznam přenosových parametrů, jakou jsou síla přijímaného signálu, vysílaný výkon, odstup signálu od šumu, atd., a to v rámci dohledových systémů poskytovatelů služeb. To s sebou nese nulové investiční náklady do hardwarového vybavení, jelikož se jedná pouze o využití již v současnosti shromažďovaných dat na těchto spojích. [37]

Stavebním kamenem je při výpočtu dešťových srážek vyjádření intenzity deště R z rovnic 3.7 a 3.9 pro výpočet útlumu dešťovými srážkami dle ITU-R P.838, viz kapitola 3.3.1. Pro R pak platí vztah 4.1:

$$R = \sqrt[\alpha]{\frac{L_{\text{dest}}}{k \cdot d}} \quad (mm/h), [32] \quad (4.1)$$

kde L_{dest} je útlum způsobený deštěm, d je délka spoje a α , k jsou koeficienty z kap. 3.3.1. [39] Volitelně lze na výpočet aplikovat i redukční faktor r popsaný v kap. 3.3.2, jímž je násobena délka r .

Obecným postupem pro měření dešťových srážek mikrovlnnými spoji je následující posloupnost kroků:

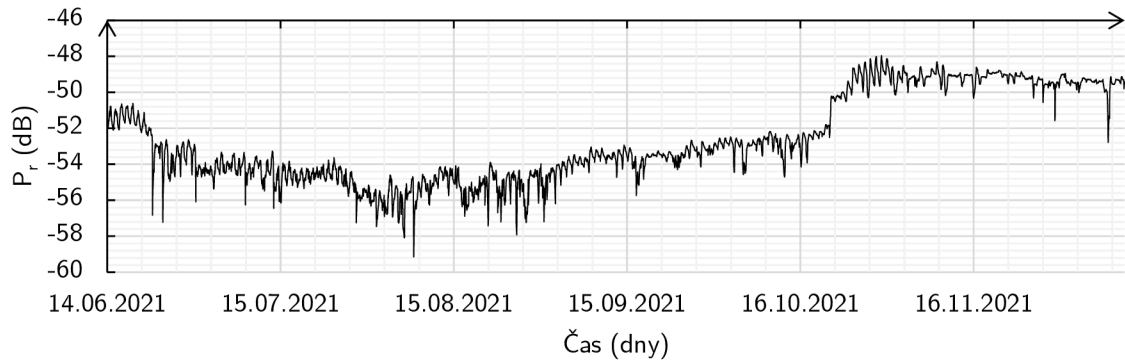
1. **Získání a načtení dat** – načtení zaznamenaných dat mikrovlnného spoje z databáze, souboru, či v případě výpočtu v reálném čase vyčtením dat přímo z mikrovlnných jednotek (např. protokolem SNMP).
2. **Identifikace dešťových událostí** – získaná data o síle přijímaného signálu z mikrovlnných jednotek mohou obsahovat poklesy signálu způsobené dešťovou (srážkovou) činností, ale i dalšími zdroji útlumů (viz kapitola 3.2), mohou obsahovat náhodný šum, atd. Účelem tohoto kroku je stanovení, zda je každý jednotlivý pokles signálu způsoben dešťovou činností, či jinou příčinou.

Je nutno nastavit meze takovým způsobem, aby se dosáhlo kompromisu mezi četností falešných detekcí (příliš nízká mez), a chybějícími dešťovými událostmi (příliš vysoká mez). Dále je v tomto kroku nutno vymezit začátek a konec dešťové události v průběhu času.

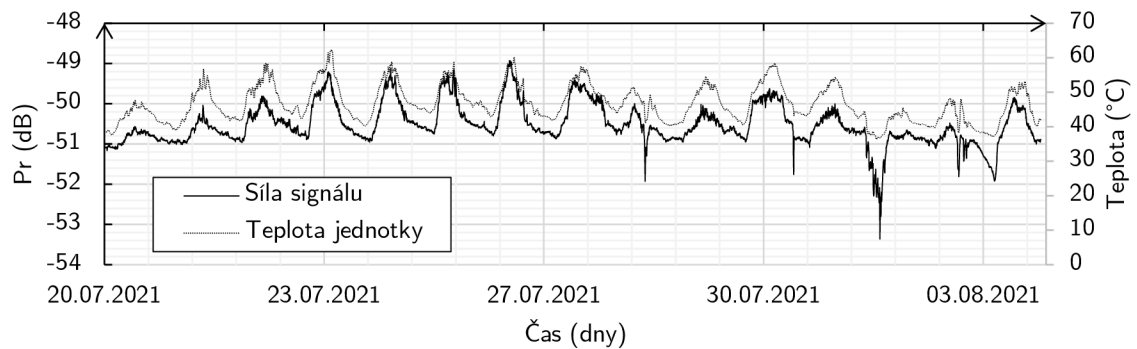
3. **Stanovení výchozí vztažné hodnoty signálu** – v tomto kroku je stanovena hodnota přijímaného signálu, vůči které je vypočítán útlum deštěm L_{dest} . V ideálním případě se jedná o hodnotu signálu těsně před začátkem dešťové události.
4. **Výpočet hodnoty útlumu deštěm a přepočítání na intenzitu deště** – výpočet intenzity srážek R na základě hladiny útlumu L_{dest} dle rovnice 4.1. Dále je provedená případná kompenzace parazitních útlumů (útlum efektem mokré antény, viz kapitola 4.2).
5. **Interpolace plošných dat** – v případě provádění výpočtu pro dvourozměrnou oblast, tj. nikoli jen pro body na trase spojů, je v tomto kroku provedena interpolace dat pro stanovení hodnot intenzity deště R i pro body ležící v meziprostoru mezi trasami jednotlivých spojů.
6. **Generování výstupu** – v závěrečném kroku je proveden přepočítání dat dle zadaných parametrů, např. výpočet srážkového úhrnu za určitý časový interval (je-li třeba), a případné vygenerování grafických výstupů (je-li žádoucí), tj. grafy průběhů dešťových událostí pro jednotlivé trasy spojů či dvourozměrná mapa intenzit srážek v jednotlivých bodech v případě plošné interpolace dat.

Cílem **identifikace dešťových událostí** je stanovení na celém výpočetním časovém úseku tzv. „suchých“ a „mokrých“ období, což může být u některých spojů komplexní úlohou. Výrazné útlumy, např. ty způsobené mnohocestným šířením signálu (jehož příčinou jsou fyzické změny ve Fresnelových zónách spoje), či fyzickým rozladěním spoje (pootočení antén vlivem silného větru atd.), lze snadněji identifikovat jako podezřelé vyřadit je z výpočtu, a to jednak filtrací extrémních změn hodnot, ale také porovnáním hodnot s ostatními spoji v nejbližším okolí (je předpokladem, že např. útlum mnohocestným šířením postihne pouze daný konkrétní spoj). Složitější situace nastává u méně výrazných změn v řádu desetin či jednotek dB, kdy se sice jedná o nevýznamné změny pro korektní chod samotného spoje, ale při výpočtu dešťové intenzity R se může jednat o jednotky, nebo i desítky milimetrů srážek za hodinu, a to především při měření na nízkých frekvencích (pod 20 GHz). Tyto nevýrazné změny mohou být způsobeny změnou koncentrace vodní páry v atmosféře, ale také změnou teploty vzduchu a slunečním zářením působícím na vysokofrekvenční elektronické obvody v mikrovlnných jednotkách. [37]. U těchto poklesů lze rozlišovat periodický a neperiodický charakter, a také dlouhodobé působení (kolísání během ročních období) a krátkodobé působení (kolísání během denní

doby, či během týdne). Na obrázku 4.1 je zobrazena ukázka dlouhodobého kolísání hodnoty přijímaného signálu na reálném spoji, a to během půl roku, a na obrázku 4.2 pak ukázka krátkodobého periodického kolísání signálu během 14 dní. Data pochází ze spojů použitých pro výpočty v rámci této práce, specifikovaných v kapitole 5.



Obr. 4.1: Ukázka dlouhodobého kolísání výkonové úrovně přijímaného signálu.



Obr. 4.2: Ukázka krátkodobého kolísání výkonové úrovně přijímaného signálu, korelujícího s teplotou jednotky.

V případě krátkodobého kolísání na obrázku 4.2 je zobrazena i teplota rádiové jednotky na této straně spoje. Lze pozorovat výraznou korelaci obou průběhů (hodnota korelace $R^2 = 0,913$). Pravděpodobně se jedná o teplotní nestabilitu elektronických vysokofrekvenčních obvodů přijímací mikrovlnné jednotky.

Stanovení výchozí vztažné hodnoty signálu je úkonem stanovení referenční hodnoty signálu P_{ref} pro výpočet útlumu L_{dest} . Pakliže se jedná o spoj s proměnným vysílacím výkonem, vychází se z radiokomunikační rovnice 3.2, kdy je třeba odečíst od hodnoty vysílacího výkonu P_t prosti stranné jednotky hodnotu výkonu přijímaného signálu P_r . Hodnotu vysílacího výkonu protistrany je pak třeba sledovat i při každé iteraci výpočtu útlumu během výpočtu hodnoty intenzity srážek, a s každou

změnou vysílacího výkonu P_t je nutno o tuto změnu upravit referenční hodnotu signálu P_{ref} . Výzvou v tomto procesu jsou kolísavé jevy popsány u předchozího kroku. Pakliže na spoji dochází ke krátkodobému kolísání hodnot za suchých období, lze předpokládat, že toto kolísání pokračuje i za mokrých období, kdy však již není možné rozlišit zdroje útlumu. Tuto skutečnost lze buďto zanedbat či postižené spoje vyřadit z výpočtu, a to v závislosti na charakteru kolísání a poměru mezi délkou trvání mokrého období a délkou periody kolísavých jevů. V případě periodického kolísání s předvídatelným charakterem se lze pokusit toto kolísání kompenzovat, což však do výsledků zanáší další míru nejistoty.

Výpočet hodnoty útlumu deštěm a přepočítání na intenzitu deště je výzvou zejména z důvodu výskytu útlumu způsobeného efektem mokré antény. O tomto útlumu je více pojednáno v samostatné kapitole 4.2. Finální útlum L_{dest} je stanoven dle vztahu 4.2 jako:

$$L_{\text{dest}} = P_{\text{ref}} - P_{\text{rec}} - L_{\text{wet}} \quad (dB), [32] \quad (4.2)$$

kde P_{ref} je referenční hodnotou signálu, P_{rec} je přijímaná hodnota signálu a L_{wet} je útlum efektem mokré antény. Přepočítání na intenzitu deště R je provedeno dle vztahu 4.1.

4.1 Stav výzkumu problematiky

Přestože je absorpce mikrovlnného signálu atmosférickými srážkami předmětem výzkumů již od poloviny 20. století, a v 90. letech 20. století došlo díky rozmachu digitálních mobilních sítí i k masivnímu nasazení mikrovlnných spojů jakožto přípojné technologie základnových stanic těchto sítí (BTS, Node B, eNodeB), první praktický experiment s měřením srážek prostřednictvím mikrovlnných spojů proběhl až v roce 2006 v Izraeli (Messer, Zinevich, Alpert, 2006) [38]. Brzy následovaly další výzkumy.

Jedněmi z prvních a dosud nejaktivnějších přispěvatelů v této oblasti jsou nizozemští výzkumníci Remko Uijlenhoet, Aart Overeem, Hidde Leijnse, a jejich kolektiv. Ti na téma měření srážek mikrovlnnými spoji publikovali řadu článků a provedli několik praktických experimentů, a jako první sestavily a publikovaly pro účel výpočtu srážek algoritmus, resp. knihovnu funkcí RAINLINK (Overeem, Leijnse, Uijlenhoet, 2016) [44], naprogramovanou v jazyce R, jejíž zdrojové kódy jsou veřejně přístupné a bude o ní více pojednáno v kapitole 5.2. V roce 2018 publikovali souhrnný článek sumarizující aktuální výzkum v oblasti měření srážek mikrovlnnými spoji (Overeem, Leijnse, Uijlenhoet, 2018) [46]. Přehled vybraných článků těchto i jiných autorů je uveden v tabulce 4.1.

Tab. 4.1: Vybrané studie problematiky měření srážek mikrovlnnými spoji.

Autoři:		Rok:	Název studie:	Ref.:
Goldshtein, Messer, Zinevich		2009	Rain Rate Estimation Using Measurements From Commercial Telecommunications Links	[39]
Matzler, Koffi, Berne		2009	Monitoring rain rate with data from networks of micro. trans. links	[40]
Leijuse, Uijlenhoet	Stricker	2007	Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks	[41]
	Overeem	2011	Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks	[42]
		2012	Country-wide rainfall maps from cellular communication networks	[43]
		2016	Retrieval algorithm for rainfall mapping from microwave links in a cellular communication net.	[44]
		2018	Rainfall Monitoring Using Microwave Links from Cellular Communication Networks: The Dutch Experience	[45]
		2018	Opportunistic remote sensing of rainfall using microwave links from cellular communication net.	[46]
		2019	Rainfall Estimation Accuracy of a Nationwide Instantaneously Sampling Commercial Microwave Link Network: Error Dependency on Known Characteristics	[47]
	Imhoff, et al.	2020	Rainfall Nowcasting Using Commercial Microwave Links	[48]
	Leth, et al.	2021	Tropical rainfall monitoring with commer. micro. links in Sri Lanka	[49]
	Pudashine, et al.	2021	Rainfall retrieval using commercial microwave links: Effect of sampling strategy on retrieval accuracy	[50]
Chwala, Kunstmann	Hipp, et al.	2012	Precipitation observation using commercial microwave comm. links	[51]
		2018	Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges	[37]
	Graf, Polz	2020	Rainfall est. from a German-wide comm. micro. link net.: optimized process. and val. for 1 year of data	[52]

Dalšími aktivními badateli v této oblasti jsou němečtí výzkumníci Christian Chwala, Harald Kunstmann, a jejich kolektiv, kteří mimo jiné v roce 2018 taktéž publikovali souhrnný článek rekapitulující celou problematiku (Chwala, Kunstmann, 2018) [37]. Stejně jako nizozemská skupina, i tato vyvinula své vlastní programové řešení pro automatizaci výpočtu srážek. Jedná se o knihovnu `pycomlink`, napsanou v jazyce Python, a také o ní bude více pojednáno v další kapitole 4.4.

První článek nizozemských autorů (Leijnse, Uijlenhoet, Stricker, 2007) [41] se věnoval výpočtu srážek na datech ze dvou 38 GHz mikrovlnných spojů a potvrdil možnost perspektivního využití spojů pro tuto oblast. Vlivem nepřesných zdrojových dat a nízkého počtu spojů bylo dosaženo pouze nízké průměrné korelace s údaji z blízkého srážkoměru $R^2 = 0,26$.

Dalším z prvních článků na poli výzkumu je článek izraelských autorů (Goldstein, Messer, Zinevich, 2009) [39], kde bylo k měření využito 22 mikrovlnných spojů na frekvencích okolo 20 GHz. Ačkoli nejsou poskytnuty údaje o korelaci mezi vypočítanými a srážkoměrnými daty, z uvedených časových průběhů charakteristik je patrné, že při vrcholné srážkové aktivitě jsou vypočítané 10minutové úhrny o 50 % nadhodnoceny oproti srážkoměrným úhrnům.

Posledním uvedeným článkem z raného období je článek švýcarských autorů (Matzler, Koffi, Berne, 2009) [40], shrnující koncept výpočtu srážkových úhrnů z mikrovlnných spojů.

Pozdější článek nizozemských autorů (Overeem, Leijnse, Uijlenhoet, 2011) [42] již používá 57 spojů pro výpočet na frekvencích od 13 GHz do 39 GHz. Zde již bylo dosaženo výrazně vyšší průměrné korelace s údaji z radarových měření $R^2 = 0,72$. Následující článek (Overeem, Leijnse, Uijlenhoet, 2012) [43] již zahrnuje množství průměrně 1514 spojů mobilního operátora T-Mobile NL napříč celým Nizozemskem, jejichž data jsou automatizovaně zpracovávána ranou verzí algoritmu RAINLINK. Bylo dosaženo průměrné korelace s údaji z radarových měření $R^2 = 0,73$ pro denní úhrny srážek, a $R^2 = 0,49$ pro 15minutové úhrny srážek, přičemž výstupem byla denní a 15minutová mapa srážkových úhrnů pro území celého Nizozemska s plošným interpolačním rozlišením 9×9 km.

Článek (Overeem, Leijnse, Uijlenhoet, 2016) [44] podrobně popisuje algoritmus RAINLINK, který zde při stejné celoplošné aplikaci na spoje pokrývající celé území Nizozemska dosahuje korelace $R^2 = 0,73$ pro denní úhrny srážek a $R^2 = 0,48$ pro 15ti minutové úhrny srážek.

Souhrnný článek nizozemských autorů (Overeem, Leijnse, Uijlenhoet, 2018) [45] sumarizuje výsledky předchozích experimentů. Článek (Overeem, Leijnse, Uijlenhoet, 2019) [47] představuje nové výsledky nasazení algoritmu RAINLINK na datech vyčítaných v reálném čase, s korelací $R^2 = 0,63$ pro denní úhrny srážek a $R^2 = 0,30$ pro 15ti minutové úhrny srážek.

Experiment v článku rozšířeného kolegia nizozemských autorů (Imhoff, Overeem, Brauer, et al., 2020) [48] se pokouší o časově dopřednou extrapolaci naměřených srážkových dat, pro krátkodobou předpověď srážek, s využitím algoritmu RAINLINK pro výpočet srážkových dat a aplikace pySTEPS pro výpočet extrapolací. Extrapolace z mikrovlnných spojů dosahují dobrých výsledků blížících se radarovým extrapolacím, při slabších srážkových událostech však nedosahuje přesnosti radarových odhadů.

Článek (Overeem, Leijnse, Leth, et al., 2021) [49] představuje výsledky z nasazení algoritmu RAINLINK na 1326 spojích v tropických oblastech Šrí Lanky, operujících na frekvencích mezi 17 GHz a 19 GHz, s korelací $R^2 = 0,79$ pro denní úhrny srážek a $R^2 = 0,57$ pro hodinové úhrny srážek.

Posledním zde uvedeným článkem nizozemských autorů je (Pudashine, Guyota, Overeem, et al., 2021) [50], věnující se testování algoritmu RAINLINK na více než 100 australských spojích v metropolitní oblasti města Melbourne, operujících na frekvencích 10 GHz až 40 GHz. Bylo dosaženo korelace $R^2 = 0,3$ na 15minutových datech, $R^2 = 0,63$ na hodinových datech, $R^2 = 0,76$ na 3h datech a $R^2 = 0,79$ na denních datech deštových úhrnů. Dále bylo ověřeno, že vstupní data pro algoritmus RAINLINK ve formě minimální a maximální hodnoty signálu za časový interval 15 minut vedou k lehce přesnějším srážkovým odhadům, nežli vstupní data ve formě 15minutové průměrné hodnoty signálu.

Článek německých autorů (Chwala, Kunstmann, Hipp, et al., 2012) [51] popisuje výpočet srážkových úhrnů na datech z pěti mikrovlnných spojů, přičemž je dosaženo dobrých korelací $R^2 = 0,80$ pro srážkoměrná a $R^2 = 0,84$ pro radarová data.

Velmi obsáhlým je jejich další, zde poslední předložený článek (Graf, Chwala, Polz, Kunstmann, 2020) [52], který se věnuje zpracování dat ze 3904 mikrovlnných spojů společnosti Ericsson, pokrývajících území celého Německa, s časovým rozlišením jedné minuty, a to v období pokrývajícím jeden rok. Na tomto rozsáhlém souboru dat byl proveden výpočet srážek prostřednictvím jejich vlastní knihovny pycomlink (viz kap. 4.4) a výsledná data byla validována oproti srážkovým datům ze systému RADOLAN-RW, což je německá obdoba českého interpolačního systému MERGE2 (viz kap. 1.2.4). V tomto výzkumu bylo dosaženo taktéž dobrých korelací, s výjimkou zimních měsíců, kdy dochází k (v současné době) nevypočitatelným pevným srážkám, kdy následné tání sněhu a ledu značně nadhodnocuje naměřený útlum. Ve zkoumaném období mezi květnem a zářím 2018 se hodnota korelačního koeficientu R^2 pohybovala mezi 0,79 a 0,83. Spoje v tomto výzkumu operovaly na frekvencích od 10 do 40 GHz, a většina z nich dosahovala délky mezi 5 a 10 km.

4.2 Útlum mokrou anténou

Dešťové srážky, kromě samotného útlumu signálu v prostoru mezi koncovými body spoje, ovlivňují vlastnosti mikrovlnných jednotek i jinými způsoby. Tím nejpodstatnějším vlivem, který v současnosti představuje největší výzvu v celé oblasti měření srážek mikrovlnnými spoji, je tzv. útlum mokrou anténou, označovaný často zkratkou WAA, z angl. *Wet Antenna Attenuation*. [46, 37, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59]

Jedná se o útlum způsobený tenkou vrstvou vody (tloušťka v řádu desítek až stovek mikrometrů), tvořící se během dešťů na radomovém krytu antény. I přes to, že je WAA předmětem výzkumů již od 80. let 20. století (zejména z důvodu útlumu vznikajícího na radomových krytech meteorologických radarů), nebyl dosud standardizován žádný model ani způsob výpočtu tohoto jevu. V doporučeních ITU-R P.530 a ITU-R P.838 je působení efektu WAA zcela vypuštěno. To lze odůvodnit tím, že potřeba skutečně plné definice vlivu WAA vyvstála až s počátkem experimentování s měřením srážek mikrovlnnými spoji. Meteorologické radary totiž pracují na nižších frekvencích než mikrovlnné spoje a mají jinak tvarovaný radomový kryt, tudíž samotný efekt WAA na jejich měření nemá až tak významný vliv. [56]

Modely popisující velikost i časový průběh změny hodnoty WAA se různí. Základní metodou je prosté odečtení konstantně definované hodnoty WAA od naměřeného útlumu spoje L_{dest} . Některé studie shledávají, že škálování WAA závisí na intenzitě deště R a odvozují mocninnou funkcí jeho okamžité hodnoty. Další modely odvozují velikost WAA mocninnou funkcí celkového útlumu L_{dest} , což činí výslednou hodnotu závislou na délce trasy mikrovlnného spoje. Další způsob parametrizace efektu WAA je časově zpožděný exponenciální nárůst hodnoty WAA na definovanou maximální úroveň WAA_{max} po začátku dešťové události, a stejně tak opožděný pokles této hodnoty po konci deště. Ve většině modelech je zahrnutý strop WAA_{max} , tj. maximální hodnota WAA, která může být dosažena.

K vyčíslení WAA, resp. parametrů dosazovaných do výše zmíněných modelů, lze také přistupovat různými způsoby – lze:

- vycházet pouze z parametrů poskytnutých samotným mikrovlnným spojem, tj. naměřená hodnota útlumu a pevně dané parametry (délka spoje, frekvence);
- vycházet z parametrů výše avšak s kalibrovanými parametry modelu WAA na základě provedených historických měření;
- pro výpočet parametrů modelů závislých na intenzitě deště R využít jiného referenčního zdroje srážkoměrných dat, tím se však celý výpočet stává závislým na tomto zdroji. [59]

Další faktor, který ovlivňuje výslednou přesnost vyčíslení WAA, je fakt, že pršet nemusí začít na obě dvě antény na koncích mikrovlnného spoje současně, nýbrž jen na jednu, či míra deště v koncových lokalitách může být rozdílná a s tím i hodnota WAA na jednotlivých anténách. Pravděpodobnost tohoto efektu se zvyšuje zejména na delších spojích. Většina provedených studií však vzhledem k obtížnosti stanovení rozdílu ve smáčení antén uvažuje rovnoměrné smáčení obou antén. [53]

Dále lze uvažovat, že na efekt WAA může mít zásadní vliv materiál radomového krytu antény, resp. jeho stárnutí a změna vlastností s tím spojených, což může mít za následek rozdílné rozložení tenké vodní vrstvy na radomových krytech napříč různými jednotkami mikrovlnných spojů. [54]

4.2.1 Vybrané studie problematiky WAA

V tabulce 4.2 je uvedeno několik vybraných studií publikovaných v posledních letech.

Tab. 4.2: Vybrané studie problematiky útlumu mokrou anténou.

Autoři:	Rok:	Název studie:	Ref.:	
Schleiss, Rieckermann, Berne	2013	Quantification and Modeling of Wet-Antenna Attenuation for Commercial Microwave Links	[53]	
Chwala, Moroder, Siart, et al.	2019	Modeling of Wet Antenna Attenuation for Precipitation Estimation From Microwave Links	[54]	
Fencel, Bareš	Valtr	2018	Quantifying Wet Antenna Attenuation in 38-GHz Commer. Microwave Links of Cellular Backhaul	[55]
		2019	Excess Attenuation Caused by Antenna Wetting of Terrestrial Microwave Links at 32 GHz	[56]
	Pechač	2019	On Distance Factor in Rain Atten. Predictions	[57]
	Pastorek, Rieckermann	2020	The importance of adequate correction for the wet antenna effect when predicting urban rainfall-runoff using microwave link data	[58]
		2022	Precipitation Estimates From Commercial Microwave Links: Practical Approaches to Wet-Antenna Correction	[59]

V roce 2013 nizozemští autoři (Schleiss, Rieckermann, Berne, 2013) [53] publikovali článek, ve kterém předkládají svůj model WAA, testovaný na mikrovlnném spoji v pásmu 38 GHz. Tento model předpokládá definované maximum WAA_{\max} , přičemž této hodnoty nabývá opožděně v čase – po začátku deště dochází k exponenciálnímu nárůstu, a naopak, po konci deště tato hodnota opět exponenciálně klesá. Vstupním parametrem tohoto modelu je kromě WAA_{\max} čas τ , udávající dobu, po které je dosaženo 95 % hodnoty WAA_{\max} . Dále parametr Δ_t udávající délku časového intervalu mezi jednotlivými výpočty (vzorky vstupního signálu). V referenční studii [53] byla hodnota WAA_{\max} vyčíslena na 2,3 dB a hodnota τ na 15 minut.

Článek německých autorů (Moroder, Siart, Chwala, et al., 2019) [54] pojednává o laboratorním měření útlumu WAA. V tomto článku se podařilo změřit závislost WAA na hodnotách reflektivity antény mikrovlnného spoje. Měření reflektivity na současných jednotkách mikrovlnných spojů v běžných podmínkách však není možné, a představovalo by implementaci speciálního hardwaru do mikrovlnných jednotek právě pro tento účel. V tomto článku se tak jedná o nastínění možného budoucího vývoje pro vyřešení této problematiky.

Jedněmi z výzkumníků, kteří se dlouhodobě věnují problematice WAA a útlumu způsobeného srážkami obecně, jsou Pavel Valtr, Pavel Pechač, Martin Fencl, Vojtěch Bareš a spol., působící na FEL a FSv ČVUT v Praze. V článku (Fencl, Valtr, Bareš, 2018) [55] se věnují kvantifikaci WAA na mikrovlnných spojích operujících v Praze na frekvencích okolo 38 GHz. Porovnáním naměřeného útlumu s daty z blízkých srážkoměrů a provedením teoretického výpočtu odpovídajícího srážkového útlumu bylo odhadnuto, že útlum způsobený efektem WAA může dosahovat 1,5 dB až 2,0 dB při mírných deštích s intenzitou $R < 2$ mm/h. Při silných intenzitách však dosahuje hodnot 2,8 dB až 5,3 dB, a při extrémních intenzitách $R > 70$ mm/h dokonce i 6 dB až 9 dB.

Článek (Valtr, Fencl, Bareš, 2019) [56] specifikuje na základě empirického měření na spojích operujících na frekvenci 32 GHz, principově shodného s měřením v minulém článku, nový model pro stanovení WAA, daný jako funkci intenzity deště R , kdy útlum A_a udávající útlum efektem WAA pro jednu anténu spoje je dán vztahem 4.3:

$$A_a = 0,68R^{0,34} \quad (dB). \quad [32] \quad (4.3)$$

Upravená rovnice 3.9 pro celkový útlum způsobený deštěm je pak dána vztahem 4.4

$$L_{\text{dest}} = A \cdot d \cdot r + 2 \cdot A_a \quad (dB), \quad [32] \quad (4.4)$$

kde A je měrný útlum deštěm daný rovnicí 3.7 dle ITU-R P.838, d je délka spoje, r je distanční faktor (volitelně) a A_a je vypočítaný útlum WAA na jedné straně spoje. Tento výpočet pro udává celkový útlum na spoji způsobený efektem WAA zhruba 2 dB pro deště s intenzitou R menší než 4 mm/h, 4 dB pro silné deště s intenzitou R okolo 30 mm/h a 6 dB pro extrémní deště s intenzitou R okolo 100 mm/h.

Další článek (Valtr, Pechač, 2019) [57] potvrzuje výrazné podhodnocení vypočítaných teoretických útlumů dle doporučení ITU-R P.838, a to i při zahrnutí výpočtu distančního fakturu r udaným doporučením ITU-R P.530 (viz kapitola 3.3.2), oproti naměřeným hodnotám. Rozdíl je způsoben chybějící kompenzací útlumu WAA.

Čtvrtý článek (Pastorek, Fencl, Bareš, et al., 2020) [58] porovnává přesnost měření srážek prostřednictvím sítě mikrovlnných spojů v Praze, s využitím dvou způsobů kompenzace útlumu WAA, s validací dat oproti srážkoměrům a odtokovým

senzorům městského odvodnění. Prvním způsobem kompenzace je útlum WAA daný konstantní hodnotou. Druhým způsobem je využití vztahu 4.3 z výzkumu v minulém článku. Výsledky ukazují, že použití konstantní hodnoty útlumu WAA vede ke zkresleným výsledkům, podhodnocujícím intenzity slabých dešťů, a naopak nadhodnocujícím intenzity silných dešťů. Naopak využití výpočtu dle vztahu 4.3, resp. 4.4, vedlo k poměrně přesným predikcím srážkových úhrnů, resp. hodnot vodních odtoků na daném povodí.

Poslední uvedená studie (Pastorek, Fencl, Rieckermann, Bareš, 2022) [59] porovnává účinnost celkem šesti modelů WAA, zahrnujíc časově závislý model Schleiss uvedený výše (Schleiss, Rieckermann, Berne, 2013) [53], dále model Valtr (Valtr, Fencl, Bareš, 2019) [56] uvedený výše, jednoduchý konstantní model, a starší model Kharadly–Ross, odvozující hodnotu WAA z celkového útlumu trasy L_{dest} . K tomuto modelu dále představuje jeho modifikaci označenou jako Kharadly–Ross-alt, ve které závislost na celkovém útlumu L_{dest} je nahrazena za závislost na intenzitě deště R , přičemž takto modifikovaný model má pro hodnotu WAA označenou A_a výsledný tvar dle vztahu 4.5:

$$A_a = WAA_{\text{max}}(1 - \exp(-dR^z)) \quad (dB), [59] \quad (4.5)$$

kde WAA_{max} je maximální dosažitelná hodnota A_a a d a z jsou parametry mocninné funkce, přičemž za d je dosazována pevná hodnota $d = 0, 1$. Hodnoty WAA_{max} a z jsou ve studii kalibrovány individuálně pro jednotlivé spoje, případně pro jednotlivá frekvenční pásma. Článek představuje také modifikaci modelu Valtr, označovanou jako Valtr-alt, kde v původním vztahu č. 4.3 uvedeném výše je intenzita deště R zaměněna za měrný útlum deštěm A , čímž je ve studii porovnáván vliv této záměny na výslednou hodnotu WAA u spojů pracujících v různých frekvenčních pásmech.

Studie porovnává výše uvedené modely na 16 mikrovlnných spojích během 53 dešťových událostí. Dochází k závěru, že modely, které závisí na intenzitě deště R (Kharadly–Ross, Kharadly–Ross-alt, Valtr, Valtr-alt) podávají přesnější výsledky, než časově závislý model (Schleiss) a model konstantní. Dále se ukazuje, že modely přímo závislé na intenzitě deště R (Kharadly–Ross-alt, Valtr) jsou univerzálněji přenositelné mezi spoji operujícími na různých frekvenčních pásmech. Nejlepší výsledky dosahovaly maximálního relativního rozdílu ve vypočítaných srážkových hodnotách pod 5 % oproti referencím, a mediánu absolutních odchylek 1 mm/h. [59]

4.3 Knihovna RAINLINK

RAINLINK, celým názvem *RAINLINK: Retrieval algorithm for rainfall mapping from microwave links in a cellular communication network*, je opensource algoritmus, resp. knihovna funkcí a šablona skriptu napsaná ve statistickém programovacím jazyce R (v terminologii jazyka R je knihovna nazývána jako balíček – *package*). Je výsledkem dlouhodobého úsilí nizozemských výzkumníků Remko Uijlenhoeta, Aart Overeema, a Hidde Leijnseho, jejichž poznatky v oblasti výzkumu měření srážek mikrovlnnými spoji byly přeneseny i do podoby nástroje pro praktický výpočet srážek, a to prostřednictvím této knihovny. Kompletní fungování knihovny je podrobně popsáno v článku (Overeem, Leijnse, Uijlenhoet, 2016) [44] a také v příloženém PDF manuálu ve veřejném repozitáři knihovny, přístupném na úložišti GitHub¹, společně s kompletním zdrojovým kódem knihovny publikovaným pod licencí GNU General Public License v3.0.

Vstupem vzorového skriptu jsou data z mikrovlnných spojů, kdy vstupní soubor obsahuje tabulku s údaji o frekvenci daného spoje, jeho délce, zeměpisných souřadnicích koncových bodů A a B, polarizaci, unikátní ID, a především pak hodnoty P_{\min} a P_{\max} , udávající maximální a minimální hodnotu úrovně přijímaného signálu (označovanou také jako RSL, *Received Signal Level*, viz kap. 2.4) na daném kanálu mikrovlnného spoje, a to za časový interval, daný konstantními časovými rozestupy jednotlivých řádků se záznamy.

Jednotlivé kanály mikrovlnného spoje, tj. první kanál zahrnující vysílání z jednotky A do jednotky B, a druhý kanál s vysíláním opačným, figurují na vstupu samostatně, a v průběhu výpočtu je na ně pohlíženo jako na samostatné spoje, tj. entity kanálů a spojů jsou na stejné úrovni.

Výstupem vzorového skriptu jsou dvourozměrné mapy srážkových úhrnů pro dané území, o rozloze a rozlišení v závislosti na definované interpolační mřížce. Pro interpolaci srážkových úhrnů na mezilehlých bodech nacházejících se mezi trasami mikrovlnných spojů, lze v algoritmu RAINLINK vybrat buďto interpolační algoritmus vážených inverzních vzdáleností (IDW, z angl. *Inverse Distance Weighting*), anebo interpolační algoritmus běžného krigingu (OK, z angl. *Ordinary Kriging*). Grafický výstup je vykreslován na mapové podklady Stamen Design, které jsou k dispozici pod licencí CC BY 3.0., využívající data OpenStreetMap.

Pro spuštění funkcí RAINLINKu je nutno mít nainstalován interpret jazyka R. Pro aktuální verzi RAINLINKu 1.21 je třeba použít starší verzi interpretu 3.x, jelikož nové verze 4.x nejsou podporovány, z důvodu nekompatibilních knihoven (balíčků), které RAINLINK vnitřně využívá. Jmenovitě jsou to knihovny proj4 a gdal, které je nutno mít nainstalovány ve verzi 5 či starší (proj4), resp. 2 a starší (gdal).

¹<https://github.com/overeem11/RAINLINK>

4.3.1 Struktura knihovny

V hlavním repozitáři RAINLINK je obsažen soubor `Run.R`, který obsahuje vzorová volání funkcí knihovny. Dále je v repozitáři obsažen soubor `Config.R`, obsahující parametry těchto funkcí. Soubor `Config.R` je načten na počátku průchodu souborem `Run.R`. Ten lze v interpretu R spustit jako skript. Na vstupu je třeba mít nachystána data mikrovlnných spojů, např. v textovém formátu `.csv`². Ta je nutno načíst před spuštěním skriptu do vnitřní datové struktury Data Frame funkcí `read_csv()`. Vstupní datový soubor musí obsahovat následující sloupce:

1. `Frequency` – rádiová frekvence kanálu mikrovlnného spoje (v GHz);
2. `DateTime` – časová značka záznamu (řádku) ve formátu `RRRRMMDDHHmm`;
3. `Pmin` – min. hodnota přijímané úrovně signálu za daný čas. interval (v dBm);
4. `Pmax` – max. hodnota přijímané úrovně signálu za daný čas. interval (v dBm);
5. `PathLength` – délka trasy mikrovlnného spoje (v km);
6. `XStart` – zeměpisná délka jednotky A;
7. `YStart` – zeměpisná šířka jednotky A;
8. `XEnd` – zeměpisná délka jednotky B;
9. `YEnd` – zeměpisná šířka jednotky B;
10. `ID` – unikátní celočíselný identifikátor kanálu;
11. `Polarization` – polarizace vln kanálu (V či H);
12. `WAA` – tento sloupec není v originální knihovně podporován, byl doplněn v rámci této práce pro individuální kalibraci hodnot WAA zpracovávaných spojů. Každému kanálu spoje, resp. časovému záznamu kanálu, je tak možno přiřadit individuální hodnotu WAA (v dB).

Dále je nutno mít vytvořenou interpolační mřížku pro vypočítávané území v souborech `InterpolationGrid.dat` a `PolygonsGrid.dat`. První soubor obsahuje středové zeměpisné souřadnice interpolovaných prostorových dlaždic (polygonů), zatímco druhý soubor obsahuje vrcholové souřadnice těchto dlaždic.

Nejdůležitější obsažené knihovní funkce lze šesti obecným fázím výpočtu popsaným v kap. 4 přiřadit následovně:

Fáze č. 1: Získání a načtení dat

Zdrojová data je nutno si předzpracovat externími nástroji do požadovaného `.csv` formátu uvedeného výše. RAINLINK nijak neřeší změnu úrovně vysílaného signálu na příslušném kanálu, tento případný projev je nutno řešit ještě v rámci předzpracování, tj. spárovat jednotky A/B s patřičnými kanály a provést vzájemný odečet úrovně přijímaného signálu od úrovně vysílaného signálu.

²*Comma-separated values*, neboli hodnoty oddělené čárkami. Jednoduchý textový formát pro přenos tabulkových dat mezi různými systémy.

Není li řečeno jinak, funkce dále popisované zpracovávají vstupní data po jednotlivých kanálech mikrovlnných spojů.

Po hotovém předzpracování je funkce `PreprocessingMinMaxRSL` první volanou funkcí z knihovny RAINLINK. Zajišťuje kontrolu konzistence vstupních dat, tj. odstranění duplicitních časových záznamů kanálu; odstranění kanálů, jejichž statické parametry (souřadnice, frekvence, délka spoje) nejsou konstantní; a nakonec odstranění řádků s neznámými hodnotami.

Fáze č. 2: Identifikace dešťových událostí

V této fázi je volána funkce `WetDryNearbyLinkApMinMaxRSL`. Funkce určuje, zda se zpracovávané časové intervaly nacházejí v tzv. „suchém“ či „mokrém“ období. Tato klasifikace je nutná pro správné určení výchozí hodnoty úrovně signálu, a to z důvodu, že na mikrovlnných spojích dochází ke kolísání přijímané úrovně signálu z různých jiných důvodů než výskytu srážek (odrazy, rosa, atd., silné kolísání je však výrazným problémem popsáním v kap. 4). Implementace je následující: v časovém okně definovaném parametrem `PeriodHoursPmin` jsou vyhledány poklesy signálu, přesahující práh nastavený parametrem `ThresholdMedian`. Zpracovávaný interval je označen za „mokrý“ tehdy, je-li zmíněný práh přesažen a zároveň ke stejnému poklesu došlo alespoň na polovině mikrovlnných spojů nacházejících se v okolním rádiu o rozsahu definovaném parametrem `Radius` (v kilometrech).

Fáze č. 3: Stanovení výchozí vztahné hodnoty signálu

Funkce `RefLevelMinMaxRSL` stanovuje výchozí referenční hodnotu signálu, která je v další fázi zpracování použita k výpočtu útlumu deštěm. Hodnoty signálu pod referenční úrovní jsou považovány za projevy srážkové činnosti. Referenční hodnota je stanovena jako medián hodnot z časového intervalu o délce udané parametrem funkce `PeriodHoursRefLevel`. Je hledáno takové nejbližší časové okno, kde všechny hodnoty pocházejí ze „suchého“ období, a je také splněna podmínka stanovená parametrem `HoursRefLevel`, uvádějícím počet hodin předcházejících tomuto časovému oknu, během kterých se také musí jednat o „suché“ období.

Fáze č. 4: Výpočet hodnoty útlumu deštěm a přepočet na intenzitu deště

V této fázi je voláno několik funkcí. První z nich je `OutlierFilterMinMaxRSL` odstraňující z výpočtu kanály, jejichž rozdíl úhrnného poklesu hodnoty přijímané úrovně signálu za předchozích 24 hodin, oproti okolním spojům vyhledaným předchozí funkcí `WetDryNearbyLinkApMinMaxRSL`, přesahuje stanovenou mez dodanou parametrem `FilterThreshold`.

Poté je volána funkce `CorrectMinMaxRSL`, provádějící korekci vstupních hodnot `Pmin` a `Pmax` tak, aby žádná z nich nepřesahovala referenční hodnotu danou výstupem funkce `RefLevelMinMaxRSL` ve fázi č. 3. Pakliže některá z nich referenční hodnotu přesáhne, je jí přiřazena tato referenční hodnota.

Následuje funkce `RainRetrievalMinMaxRSL`, přiřazující zpracovávanému intervalu koeficienty a a b pro výpočet intenzity deště R dle doporučení ITU-R P.838 (viz kap. 3.3.1). Uvnitř této funkce je pak volána podfunkce `MinMaxRSLToMeanR` provádějící samotný výpočet R . Výpočet je prováděn samostatně pro hodnoty `Pmin` a `Pmax` – nejprve je vypočítán útlum `Amin` a `Amax`, a to odečtením hodnot `Pmin` a `Pmax` od referenční hodnoty signálu. Následně je od hodnot `Amin` a `Amax` odečtena (konstantní) hodnota `WAA`, dodaná do funkce parametrem `Aa`. Je-li některá hodnota útlumu `Amin` či `Amax` menší než `Aa`, je výpočet R v daném intervalu vynechán, resp. hodnota R je nulová. Po odečtení `Aa` již následuje samotný výpočet R dle ITU-R P.838, čímž jsou získány hodnoty `Rmax` a `Rmin`. Nakonec je vypočítána výsledná poměrová hodnota `Rmean`, vzniklá zprůměrováním hodnot `Rmax` a `Rmin`, v poměru dodaném parametrem `alpha`, dle vzorce 4.6:

$$R_{\text{mean}} = (1 - \alpha) \cdot R_{\text{min}} + \alpha \cdot R_{\text{max}} \quad (\text{mm/h}). \quad (4.6)$$

Fáze č. 5: Interpolace plošných dat

V této fázi dochází k interpolaci ve dvourozměrném prostoru sestávajícím z bodů o zeměpisných souřadnicích, obsažených ve výše uvedeném vstupním souboru `InterpolationGrid.dat`, a to voláním funkce `Interpolation`, přičemž interpolace probíhá v krocích po jednotlivých vstupních časových intervalech. Nejprve jsou vypočítané hodnoty `Rmean` z předchozí fáze, udávající průměrnou hodnotu intenzity deště na celé trase mikrovlnného spoje (resp. kanálu), přiřazeny ke středové souřadnici daného spoje, resp. kanálu. Pakliže jsou zpracovávány oba dva kanály spoje, je výsledná hodnota R na dané souřadnici průměrována z hodnot obou dvou kanálů. Toto zajišťuje podfunkce `IntpPathToPoint`. Následně proběhne jedna ze dvou interpolačních metod, dle nastavené hodnoty parametru `IntpMethod`:

- Metoda vážené inverzní vzdálenosti (*inverse distance weighting*) – ozn. **IDW**. Tato metoda funguje na principu vážení vzdáleností bodu od ostatních interpolovaných bodů. Čím vyšší je váha, tím menší je ovlivnění ostatními body, přičemž síla váhy klesá se vzdáleností od bodu. Metoda je rychlá, projevuje se však u ní vytváření tzv. „smyček“ okolo zdrojových bodů. [60] Tato metoda je zastoupena podfunkcí `IDW`, které je třeba kromě samotných dat dodat také parametr `idp`, udávající mocninu výpočtu metodou `IDW`. Zvyšování hodnoty `idp` má za následek větší vliv zdrojových bodů na hodnoty nejbližších interpolovaných bodů.

- Metoda běžného krigování (*ordinary kriging*) – ozn. **OK**.

Druhá interpolační metoda běžného krigování k váhování přistupuje prostřednictvím funkce, tzv. variogramu, charakteristického třemi parametry: práh (*sill*), dosah (*range*), a zbytkový rozptyl (*nugget*). Tato metoda je zastoupena podfunkcí `OrdinaryKriging`, využívající sférický model variogramu, přičemž parametry této funkce jsou právě `Sill`, `Range` a `Nugget`. Za tyto parametry mohou být dosazeny vlastní hodnoty, anebo je lze odvodit prostřednictvím další podfunkce `ClimVarParam` na základě ročního období interpolovaných srážkových dat. Jako zdroj dat pro funkci `ClimVarParam` slouží variogram kalibrovaný srážkoměrnými měřeními v Nizozemsku za dobu 30 let. [44, 60]

Fáze č. 6: Generování výstupu

Ve finální fázi dochází ke generování výsledných grafických srážkových map. Cyklickým voláním funkce `RainMapsLinksTimeStep` jsou nejprve data z interpolační fáze přepočítána z dešťové intenzity R na srážkové úhrny za daný časový interval zpracovávaných dat, a následně jsou tyto úhrny vykresleny na polygony definované ve vstupním souboru `PolygonsGrid.dat`. Vykreslování je prováděno na mapový podklad `OpenStreetMap` či `Stamen`. V originálním kódu lze definovat jeden bod, na jehož místě na mapovém podkladu bude vykreslen definovaný znak spolu se srážkovou hodnotou v daném bodě. V rámci této práce byla funkcionalita upravena tak, aby bylo možno vykreslit větší množství těchto bodů (v lokalitách fyzických srážkoměrů).

Dále může být volána funkce `RainMapsLinksDaily`, která je funkčně shodná s funkcí `RainMapsLinksTimeStep`, generuje však 24h srážkové úhrny ze zpracovávaného období.

4.4 Knihovna `pycomlink`

Knihovna `pycomlink` je druhou existující knihovnou pro výpočet srážkových údajů z dat mikrovlnných spojů. Nejznatelnějším rozdílem oproti knihovně `RAINLINK` je programovací jazyk, resp. vývojová platforma, kdy u knihovny `pycomlink` jím je jazyk Python a celý ekosystém příslušných knihoven. Je stále vyvíjena německými výzkumníky Christianem Chwalou, Maximilianem Grafem, Juliem Polzem a Nico Blettnerem. [61] Knihovna (stejně jako u jazyka R, i v terminologii Pythonu nazývána jako balíček – *package*) je veřejně přístupná na úložišti `GitHub`³, pod licencí `BSD 3-Clause`.

³<https://github.com/pycomlink/pycomlink>

Pro běh pycomlinku je doporučeno mít nainstalován oficiální interpret jazyka Python (CPython) alespoň ve verzi 3.6, kompatibilita se staršími verzemi či alternativními implementacemi Pythonu není zaručena. [61] Knihovnu, resp. balíček, je možné nainstalovat pomocí správce balíčků Conda či Pip.

Oproti balíčku RAINLINK, pycomlink neobsahuje žádný výchozí spustitelný skript. Jedná se tak skutečně pouze o sadu funkcí, určenou ke zpracování ve vlastním skriptu, v interaktivním programovacím prostředí (např. Jupyter Notebook), či k implementaci ve vlastní komplexnější aplikaci. Pycomlink také neobsahuje žádné integrované funkce pro grafické vykreslování srážkových map, tuto funkcionalitu je nutno realizovat dalšími knihovnami jazyka Python, např. knihovnou Matplotlib. Co se týče dokumentace pycomlinku, lze čerpat z ukázkového zpracování vzorových dat v sešitu Jupyter Notebook přiloženého v repozitáři knihovny, či z popisu samotných funkcí ve zdrojovém kódu.

4.4.1 Struktura knihovny

Knihovní funkce jsou rozděleny do šesti skupin (adresářů): `io`, `processing`, `spatial`, `tests`, `util`, `validation`. Nejdůležitější funkce se nacházejí ve skupině `processing`, skupina `io` obsahuje funkci pro načtení vstupních dat ze souboru (viz dále) a také vzorová data, `spatial` obsahuje interpolační funkce. Zbytek skupin obsahuje pouze podpůrné testovací a validační funkce.

Z hlediska návrhu funkcí pycomlinku a zpracování dat mikrovlnných spojů obecně, je ideálním způsobem k přechování zpracovávaných informací v Pythonu datová struktura `Dataset` knihovny `xarray`. Jedná se o mnohazměrnou slovníkovou⁴ variantu struktury `DataArray` téže knihovny. Každý `Dataset` sestává ze čtyř atributů:

- `dims` (*dimensions*) – rozměry struktury. Jedná se o seznam parametrů typu `coords`, které obsahují více než jednu hodnotu, kdy každá přídavná hodnota tvoří další rozměr struktury
- `coords` (*coordinates*) – jedná se o značkovací informace přiřazené k hodnotám `data_vars`. Více hodnot jednoho parametru `coords` tvoří odpovídající počet rozměrů struktury.
- `data_vars` (*data variables*) – datové hodnoty struktury.
- `attrs` (*attributes*) – metadata struktury. [62]

`Dataset` je také paměťovou (uloženou v operační paměti) reprezentací souborového formátu `netCDF` (*Network Common Data Form*), vycházejícího z formátu `HDF` (*Hierarchical Data Format*).

⁴Slovník, angl. *dictionary* – datová struktura sestávající z množiny unikátních klíčů (*keys*) a množiny hodnot (*values*), kde každý klíč je asociován s prvkem z množiny hodnot.

Ve výpisu 4.1 lze vidět ukázkou struktury `Dataset` obsahující vstupní parametry sady mikrovlnných spojů, připravenou na zpracování a výpočet srážkových dat:

Výpis 4.1: Struktura `Dataset` obsahující vstupní parametry mikrovlnných spojů

```

1 Dimensions:          (channel_id: 2, cml_id: 110, time: 72)
2 Coordinates:
3   * channel_id      (channel_id) <U11 'A(rx)_B(tx)' 'B(rx)_A(tx)'  

4   * time            (time) datetime64[ns] 2021-08-01T00:10:00 ...
5   * cml_id          (cml_id) int64 50236 50462 50483 ...
6     site_a_latitude (cml_id) float64 50.61 50.65 50.46 ...
7     site_b_latitude (cml_id) float64 49.79 50.34 50.86 ...
8     site_a_longitude (cml_id) float64 14.85 14.14 14.99 ...
9     site_b_longitude (cml_id) float64 14.21 14.53 14.27 ...
10    frequency        (cml_id, channel_id) float64 26.43 25.42 ...
11    polarization     (cml_id) <U1 'V' 'V' 'V' 'H' 'V' ...
12    length           (cml_id) float64 3.635 7.964 1.617 ...
13 Data variables:
14     tsl              (cml_id, channel_id, time) float64 3.0 3.0 3.0 ...
15     rsl              (cml_id, channel_id, time) float64 -46.0 -46.0 ...

```

První řádek obsahuje informaci o počtu rozměrů dané struktury `Dataset`. Ke každému rozměru přísluší množina hodnot z části `Data variables`. V tomto případě se jedná o 110 unikátních spojů (položka `cml_id`), 2 kanály na každý spoj (položka `channel_id`), a 72 časových značek (položka `time`). Každý parametr z části `Data variables` tak v této struktuře obsahuje 15 840 hodnot ($110 \cdot 2 \cdot 72 = 15\,840$). Zde se jedná o parametry:

- `tsl` – vysílaná úroveň signálu (v dBm),
- `rsl` – přijímaná úroveň signálu (v dBm).

V popisné části `Coordinates` jsou pak obsaženy položky tvořící již zmíněné rozměry (položky označené hvězdičkou), dále však i jednorozměrné položky:

- `site_a_latitude` – zeměpisná šířka jednotky A,
- `site_b_latitude` – zeměpisná šířka jednotky B,
- `site_a_longitude` – zeměpisná délka jednotky A,
- `site_b_longitude` – zeměpisná délka jednotky B,
- `frequency` – rádiová frekvence kanálu (v GHz),
- `polarization` – polarizace vln kanálu,
- `length` – délka spoje (v km).

U každé položky v části `Coordinates` i `Data variables` je v závorce uvedeno, na kterých rozměrech je daná položka závislá. Zatímco např. `rsl` a `tsl` obsahuje rozdílné hodnoty pro všechny tři rozměry `cml_id`, `channel_id` a `time`, položka `length` je závislá pouze na `cml_id`, atd.

Samotné funkce `pycomlink` lze, podobně jako u knihovny `RAINLINK`, přiřadit do šesti fází zpracování a výpočtu srážkových dat:

Fáze č. 1: Získání a načtení dat

Skupina `io` obsahuje jedinou funkci `read_cmlh5_file_to_xarray`. Tato funkce načítá soubor ve formátu `cmlh5` a jeho obsah převádí do struktury `xarray.Dataset`, se kterou je možno dále pracovat. Základ `cmlh5` tvoří formát `HDF` verze 5, rozšířený o pevnou definici struktury, odpovídající požadavkům mikrovlnných spojů. Autory tohoto formátu jsou Christian Chwala a Martin Fencel [63] a definice formátu je veřejně přístupná na úložišti `GitHub`⁵.

Data z jiných zdrojů je nutno předzpracovat a načíst vlastními nástroji tak, aby odpovídala doporučené struktuře `xarray.Dataset`. `Pycomlink` neobsahuje žádnou funkci pro kontrolu konzistence dat, tu je nutno implementovat ve vlastním kódu.

Pro další zpracování je vhodné v této fázi provést korekci přijímané úrovně signálu (`rsl`) jejím odečtením od vysílané úrovně signálu (`tsl`). To lze díky knihovně `xarray` provést prostým odčítáním a uložením nově vzniklého pole typu `DataArray` pojmenovaného jako `trsl` do existující pracovní struktury `xarray.Dataset`, zde nazvané jako `link_data`:

```
link_data['trsl'] = link_data.tsl - link_data.rsl
```

Stejný způsob ukládání do struktury `Dataset` lze použít i při výpočtu všech ostatních parametrů.

Fáze č. 2: Identifikace dešťových událostí

`Pycomlink` neobsahuje dedikovanou funkci pro určení „suchých“ a „mokrých“ období (v angl. *Wet/Dry detection*). Místo toho je možné využít funkci plovoucího okna nad časovými hodnotami `rolling`, která je součástí knihovny `xarray`. Nad tímto plovoucím oknem je pak možné vypočítat směrodatnou odchylku, a to prostřednictvím funkce `std` knihovny `numpy` pro matematické výpočty v `Pythonu`. Tuto hodnotu odchylky je pak možné porovnat se stanoveným prahem, a pakliže je tento práh překročen, je uložena pro daný časový interval log. hodnota 1, a dané období je považováno za „mokré“. Naopak „suchému“ období přísluší log. hodnota 0.

Výpis 4.2: Detekce „mokrých“ a „suchých“ období

```
1 link_data['wet'] = link_data.trsl.rolling(  
2     time=rolling_vals,  
3     center=True  
4     ).std(skipna=False) > wet_dry_deviation
```

⁵<https://github.com/cmlh5/cmlh5>

Ve výpisu 4.2 je ukázka implementace této funkcionality. `link_data` je opět struktura `Dataset`, hodnota `rolling_vals` je počet časových hodnot `time`, nad kterými je vytvořeno plovoucí okno, a `wet_dry_deviation` je stanovený práh standardní odchylky. Její hodnota je vhodná k individuální kalibraci pro konkrétní spoj, v ukázkovém výpočtu byly získány dobré výsledky s hodnotou okolo 0,8. [61]

Fáze č. 3: Stanovení výchozí vztažné hodnoty signálu

Pro stanovení referenční hodnoty signálu lze využít dvě funkce obsažené v modulu `baseline.py`. První z nich je `baseline_constant`, která referenční hodnotu určuje jako konstantní hodnotu danou průměrem n posledních hodnot signálu, předcházejících „mokrému“ období. Hodnota n je určena parametrem `n_average_last_dry`. Druhou funkcí je `baseline_linear`, vypočítávající referenční úroveň jako proměnlivé hodnoty, dané lineární interpolací od poslední známé hodnoty signálu na začátku „mokrého“ období, k první známé hodnotě na konci „mokrého“ období.

Fáze č. 4: Výpočet hodnoty útlumu deštěm a přepočítání na intenzitu deště

V této fázi je nejprve vypočítána hodnota WAA. Pycomlink implementuje v modulu `wet_antenna.py` tři metody výpočtu, z nichž dvě jsou popsány již v kap. 4.2: časově závislá metoda Schleiss, a metoda Kharadly–Ross-alt, odvozující WAA z intenzity deště R .

Metoda Schleiss je zastoupena funkcí `waa_schleiss_2013`, jíž vstupní parametry jsou kromě signálových dat `waa_max`, označující maximální dosažitelnou hodnotu WAA, `delta_t` udávající časový interval výpočtu a `tau` udávající čas, ve kterém je dosaženo 95 % hodnoty `waa_max`.

Funkce `waa_pastorek_2021_from_A_obs` je implementací metody Kharadly–Ross-alt, modifikovanou tak, že intenzita deště R je odvozena z naměřeného celkového útlumu `trsl`. Dalšími parametry této funkce, jsou kromě frekvence a délky spoje také `A_max`, stanovující opět dosažitelný strop WAA, a parametry `zeta` a `d`, odpovídající parametrům mocninné funkce tohoto modelu. Tyto parametry odpovídají definici modelu v kap. 4.2.

Třetí metoda vychází z článku (Leijnse, Uijlenhoet, Stricker, 2008) [64]. Tento model je z předchozího popisu vynechán z důvodu závislosti na parametrech indexu lomu a tloušťky anténního krytu (radomu), které však na spojích zpracovávaných v rámci této práce nejsou známy. Tato metoda je v knihovně zastoupena funkcí `waa_leijnse_2008_from_A_obs`.

Po výpočtu WAA je v rámci této fáze proveden výpočet čistého útlumu deštěm odečtením referenčních hodnot a hodnot WAA od hodnot `trsl`:

```
link_data['A'] = link_data.trsl - link_data.baseline - link_data.waa
```

Posledním krokem v rámci této fáze je výpočet intenzity deště R na trase spoje z útlumu A , získaného v předchozím kroku, protože je volána funkce `calc_R_from_A` z modulu `k_R_relation.py`. Tato funkce provádí přepočítání na intenzitu R dle doporučení ITU-R P.838 (viz kap. 3.3.1), a jejími parametry jsou kromě útlumu A také délka a frekvence spoje.

Fáze č. 5: Interpolace plošných dat

Před samotnou interpolací je nutno přepočítat koncové souřadnice jednotlivých spojů na jejich středové souřadnice. To lze provést jednoduše sečtením zeměpisné šířky koncových bodů A a B a následným vydělením dvěma, a následným analogickým provedením se zeměpisnými délkami.

Interpolaci zajišťují třídy nacházející se v modulu `interpolator.py` skupiny `spatial`. Z abstraktní třídy `PointsToGridInterpolator` dědí:

- třída `IdwKdtreeInterpolator`, provádějící interpolaci metodou vážené inverzní vzdálenosti (IDW),
- a také třída `OrdinaryKrigingInterpolator` implementující metodu běžného krigování (OK).

Interpolační metody jsou tedy shodné s metodami obsaženými v knihovně RAINLINK. Při volání interpolačních metod uvedených tříd je nutno v parametrech předat souřadnice středových bodů spojů a vypočítanou intenzitu deště. Dále metody obsahují volitelné parametry `xgrid` a `ygrid`, jedná se o pole horizontálních, resp. vertikálních souřadnic (zem. šířka a délka), tvořících dohromady výslednou interpolační mřížku. Pakliže tyto parametry dodány nejsou, je nutno dodat parametr `resolution`, obsahující hodnotu – desetinné číslo v jednotkách stupňů určující velikost lineárního kroku, se kterým má být interpolační mřížka vytvořena automaticky, a to s ohraničením daným nejzazšími polohami středových souřadnic spojů.

Při vytváření instancí jedné z výše uvedených tříd, je také nutno konstruktorem předat parametry dle zvolené interpolační metody. U metody IDW jsou to mocnina funkce `p`, parametr `nnear` a parametr `max_distance`.

Pro metodu OK je zadáván druh variogramu v parametru `variogram_model`. Knihovna `pykrige`, kterou k `pycomlink` používá k provádění krigování, podporuje následující hodnoty parametru: *linear*, *power*, *gaussian*, *spherical*, *exponential*, a *hole-effect*. Naproti tomu vlastnosti variogramu – práh (*sill*), dosah (*range*), a zbytkový rozptyl (*nugget*), nelze v parametrech volání `OrdinaryKrigingInterpolator` předat. Ačkoli je knihovna `pykrige` podporuje, tvůrci `pycomlink` je nezahrnuli do vnitřního předání parametrů funkce. Řešením je tuto funkcionalitu realizovat vlastní cestou.

Fáze č. 6: Generování výstupu

Pycomlink neobsahuje žádné integrované funkce pro grafické vykreslení vypočítaných dat. Pro tento účel je nutno využít jiné knihovny či vlastního řešení.

Tvar výstupní struktury Dataset

Tvar původní struktury Dataset obsahující vstupní data mikrovlnných spojů, lze po průchodu všemi fázemi vidět ve výpisu 4.3. Zatímco v části Coordinates a v rozměrech struktury nedošlo k žádné změně, část Data variables byla rozšířena jak o konečný výpočet intenzit R , tak i o veškeré mezivýsledky předchozích fází.

Výpis 4.3: Původní struktura Dataset doplněná o výstupní parametry výpočtu

```
1 Dimensions:          (channel_id: 2, cml_id: 110, time: 72)
2 Coordinates:
3   * channel_id      (channel_id) <U11 'A(rx)_B(tx)' 'B(rx)_A(tx)'  
4   * time            (time) datetime64[ns] 2021-08-01T00:10:00 ...  
5   * cml_id          (cml_id) int64 50236 50462 50483 ...  
6   site_a_latitude  (cml_id) float64 50.61 50.65 50.46 ...  
7   site_b_latitude  (cml_id) float64 49.79 50.34 50.86 ...  
8   site_a_longitude (cml_id) float64 14.85 14.14 14.99 ...  
9   site_b_longitude (cml_id) float64 14.21 14.53 14.27 ...  
10  frequency        (cml_id, channel_id) float64 26.43 25.42 ...  
11  polarization     (cml_id) <U1 'V' 'V' 'V' 'H' 'V' ...  
12  length           (cml_id) float64 3.635 7.964 1.617 ...  
13 Data variables:  
14   tsl              (cml_id, channel_id, time) float64 3.0 3.0 3.0 ...  
15   rsl              (cml_id, channel_id, time) float64 -46.0 -46.0 ...  
16   trsl            (cml_id, channel_id, time) float64 49.0 49.0 ...  
17   wet              (cml_id, channel_id, time) bool False False ...  
18   wet_fraction    (cml_id) float64 1.057 1.057 1.057 ... 0.0 0.9459  
19   baseline        (cml_id, channel_id, time) float64 49.0 49.0 ...  
20   waa              (cml_id, channel_id, time) float64 0.0 0.0 0.0 ...  
21   A~(cml_id, channel_id, time) float64 0.0 0.0 0.0 ...  
22   R                (cml_id, channel_id, time) float64 0.0 0.0 0.0 ...
```

5 Aplikované měření intenzity srážek

V dalších částech této práce jsou k výpočtům využity skutečné mikrovlnné spoje společnosti CBL Communication by light s.r.o., která pro účely tohoto výzkumu poskytla přístup ke svým shromažďovaným datům s periodicky vyčítanými parametry mikrovlnných spojů. Společnost pokrývá svými spoji především větší města, s nejhustší sítí spojů nacházející se v Praze. Ve všech částech práce jsou tudíž z důvodu hustoty pokrytí zpracovávány spoje v Praze a blízkém okolí.

5.1 Ruční výpočet a měření WAA

Tato část práce popisuje ruční výpočet a měření hodnoty WAA, a to na konkrétním typu mikrovlnných jednotek, operujícím v bezlicenčním pásmu 10 GHz. Výhodou tohoto modelu je konstantní vysílací výkon (nedisponují funkcí ATPC¹). Odpadá tak nutnost zahrnování do výpočtu vysílacího výkonu protistrany. Nevýhodou těchto modelů je nízké frekvenční pásmo na kterém operují, tj. 10 GHz, jež je považováno za spodní hranici pro úspěšné měření dešťů.

Ruční výpočet dešťových srážek byl proveden dle vzorců uvedených v doporučeních ITU-R P.838 (viz kapitola 3.3.1) a ITU-R P.530 (viz kapitola 3.3.2). Cílem bylo ověření teoretických poznatků o výpočtu srážek na skutečných mikrovlnných spojích, a průzkum míry ovlivňování spojů této konkrétní technologie efektem útlumu mokrou anténou (WAA), resp. změření tohoto útlumu. Identifikace „mokrého“ období byla v této části provedena ručně, stejně tak určení referenční úrovně signálu.

Spoje v této kapitole využívaly antény o průměru 0,6 m na stranách A i B, a také všechny operovaly ve vertikální polarizaci. Pro výpočet jsou použity průměrné hodnoty přijímaného signálu za časový interval 5 minut, na základě těch je dle rovnice 3.9 vypočítána průměrná hodnota intenzity deště R za daných 5 minut. Takto získané 5minutové intenzity jsou poté integrovány do hodinových dešťových úhrnů, a to v plovoucím časovém okně po 10 minutách. Je vypočítána čistá hodnota dešťového úhrnu, i hodnota ovlivněná aplikací distančního faktoru r dle ITU-R P.530 na základě vztahu 3.8. Vypočítané hodnoty jsou validovány hodnotami ze systému kombinovaného odhadu srážek MERGE2, provozovaného ČHMÚ (více o systému a způsobu výpočtu dat je pojednáno v kapitole 1.2.4), a to konkrétně hodnotou kombinovaného srážkového úhrnu ze srážkoměrného i radarového měření, a to v koncovém bodě A i B mikrovlnného spoje. Ve výpočtech byl vždy zahrnut jeden kanál mikrovlnného spoje.

¹ *Automatic Transmit Power Control* – automatická regulace vysílaného výkonu.

5.1.1 Metodika a výsledky

Výpočet proběhl na dvou deštových událostech. První nastala v Praze na jaře 2021, v konkrétním časovém intervalu 04.03.2021 18:00 – 05.03.2021 02:00 UTC. Tato událost slouží jako kalibrační, tj. volba hodnoty útlumu WAA byla provedena empiricky tak, aby vypočítaný průběh dešťového úhrnu s kompenzací WAA a faktorem r maximálně koreloval alespoň s jedním z průběhu (průběh strany A či B) z aplikace MERGE2. Druhá dešťová událost nastala rovněž v Praze, v časovém intervalu 01.08.2021 04:00 – 01.08.2021 11:00 UTC. Tato událost slouží jako validační, tj. byla aplikována stejná konstanta pro výpočet WAA, jako při kalibračním měření, a následně byly porovnány výsledné průběhy.

Při kalibračních výpočtech byl zvolen vlastní model výpočtu WAA: byl stanoven procentuální koeficient $WA_{\%}$, kterým je vynásoben původní celkový útlum spoje deštěm L_{dest} . Takto získaná hodnota je považována za útlum WAA, a je odečtena od původního útlumu L_{dest} . Zbývající hodnota útlumu je považována za prošlou korekcí WAA, a z této hodnoty je následně proveden výpočet intenzity deště R dle ITU-R P.838. Z toho vyplývá, že hodnota WAA pro aktuální časový interval se dynamicky poměrně mění dle aktuální hodnoty celkového útlumu spoje, tj. jedná se o model přímo závislý na útlumu.

Např. surová maximální hodnota útlumu L_{dest} na spoji zobrazeném na obr. 5.1 je rovna 1,97 dB, přičemž kalibrací bylo zjištěno, že nejlepší korelace s průběhy MERGE2 je dosaženo při hodnotě WAA odpovídající 65 % z daného surového útlumu, tedy v tomto případě 1,28 dB připadá na útlum WAA, a zbytek surového útlumu 0,69 dB připadá na samotný útlum deštěm na trase spoje.

Souhrnné výsledky s deštovými úhrny za kalibrační událost jsou uvedeny v tabulce 5.1, a výsledky za validační událost pak v tabulce 5.2, společně s mírou korelace R^2 mezi úhrny naměřenými mikrovlnnými spoji a úhrny z kombinovaného systému MERGE2. Uvedena je také aplikovaná hodnota procentuálního koeficientu $WA_{\%}$ a maximální dosažená absolutní hodnota WAA na daném spoji.

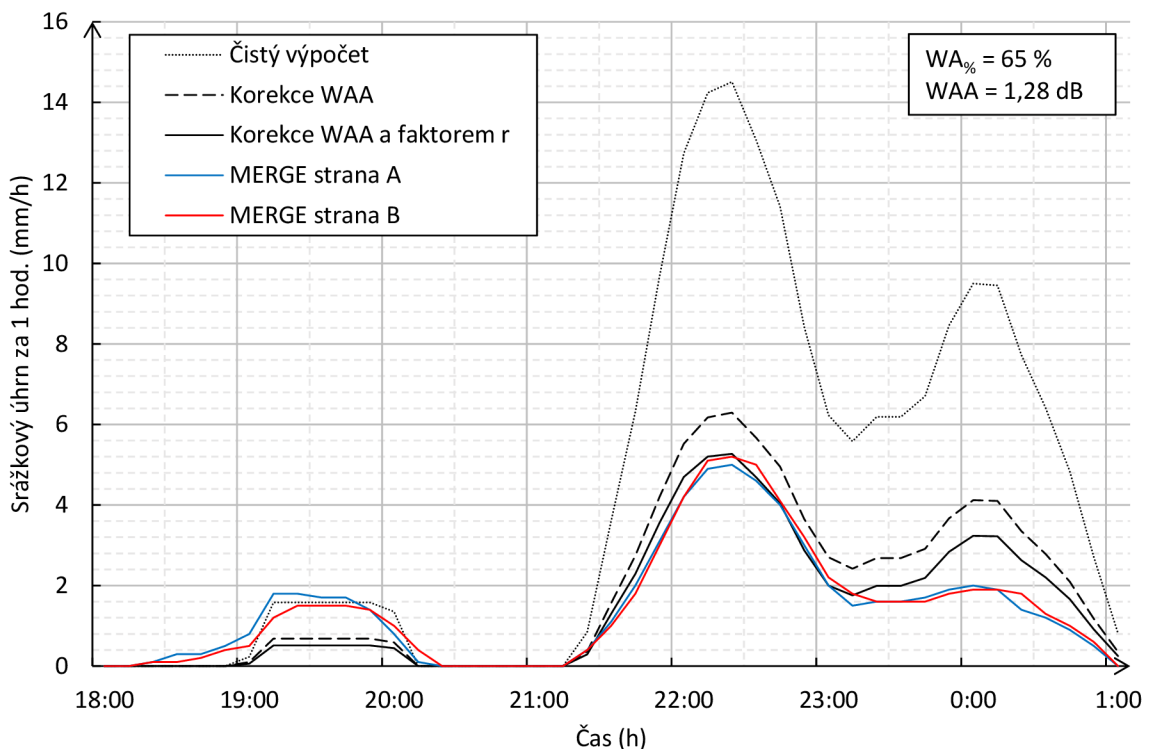
Tab. 5.1: Výsledky kalibračního měření WAA dne 4. 3. 2021, s validací oproti srážkovým úhrnům ze systému MERGE2.

Č.	Úhrn · r (mm)	Úhrn (mm)	MER. A (mm)	MER. B (mm)	R^2 s A (-)	R^2 s B (-)	WAA (%)	WAA (dB)	d (km)
1	10,4	13,1	9,8	9,4	0,92	0,94	65	1,28	3,28
2	10,5	13,2	10,0	9,3	0,91	0,93	63	1,30	3,41
3	10,9	13,0	11,5	9,8	0,87	0,93	60	1,47	6,14
4	15,3	17,7	12,6	9,4	0,87	0,92	60	1,80	6,85

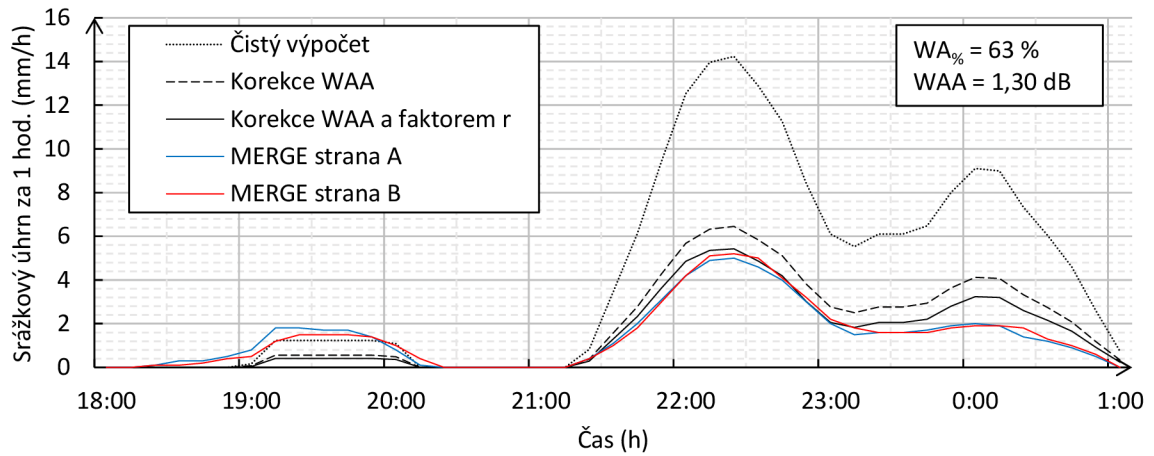
Tab. 5.2: Výsledky ověřovacího měření WAA dne 1. 8. 2021, s validací oproti srážkovým úhrnům ze systému MERGE2.

Č.	Úhrn · r (mm)	Úhrn (mm)	MER. A (mm)	MER. B (mm)	R ² s A (-)	R ² s B (-)	WAA (%)	WAA (dB)	d (km)
1	21,8	27,1	21,6	18,6	0,91	0,95	65	1,35	3,28
2	21,4	26,6	21,8	19,1	0,93	0,94	63	1,23	3,41
3	25,1	28,2	22,2	21,1	0,93	0,95	60	1,63	6,14
4	18,5	21,8	20,2	12,8	0,93	0,88	60	1,33	6,85

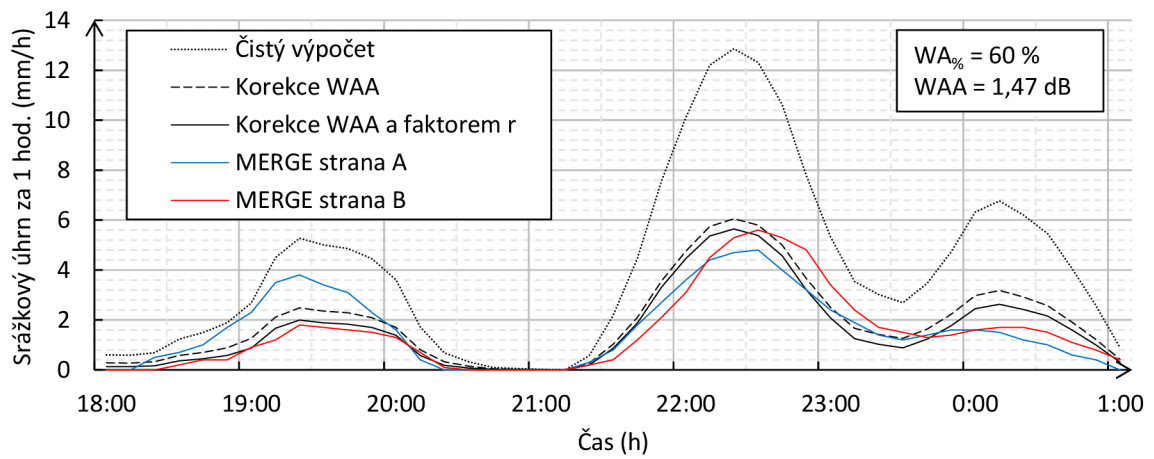
V grafech na obrázcích 5.1, 5.2, 5.3, a 5.4 jsou vykresleny průběhy kalibračních dešťů na mikrovlnných spojích; na obrázcích 5.5, 5.6, 5.7, a 5.8 se pak nacházejí průběhy validačních dešťů na daných spojích. Na jednotlivých grafech je tečkovanou černou čarou zobrazen časový průběh čistého výpočtu dešťového úhrnu bez aplikace korekce WAA a faktoru r . Přerušovanou černou čarou je zobrazen průběh vypočítaného dešťového úhrnu s korekcí WAA. Plnou černou čarou je zobrazen průběh dešťového úhrnu s korekcí WAA vynásobený faktorem r . Modrá plná čára znázorňuje odečtený dešťový úhrn v aplikaci MERGE2 v místě koncového bodu A mikrovlnného spoje, červená plná čára pak dešťový úhrn v místě koncového bodu B.



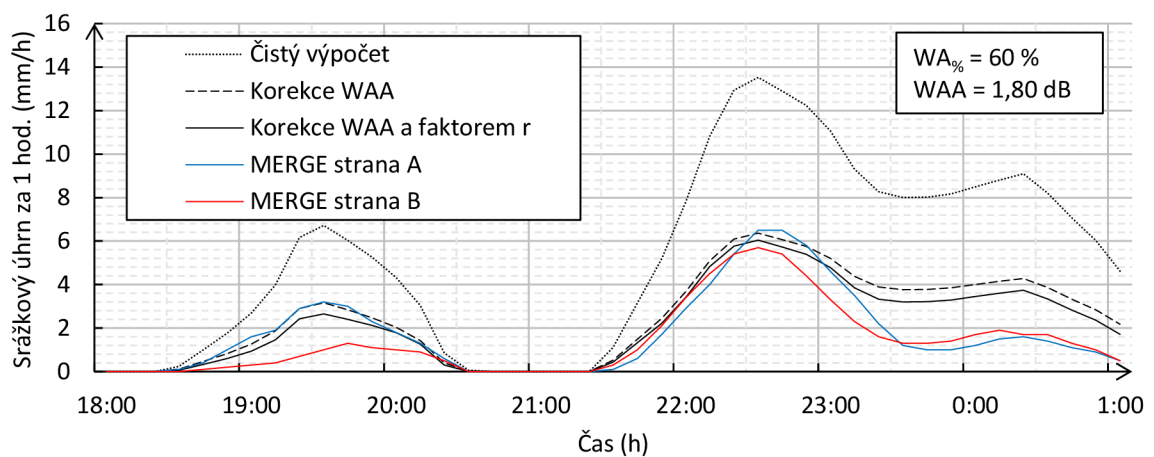
Obr. 5.1: Průběh kalibrační dešťové události na spoji č. 1.



Obr. 5.2: Průběh kalibrační dešťové události na spoji č. 2.



Obr. 5.3: Průběh kalibrační dešťové události na spoji č. 3.

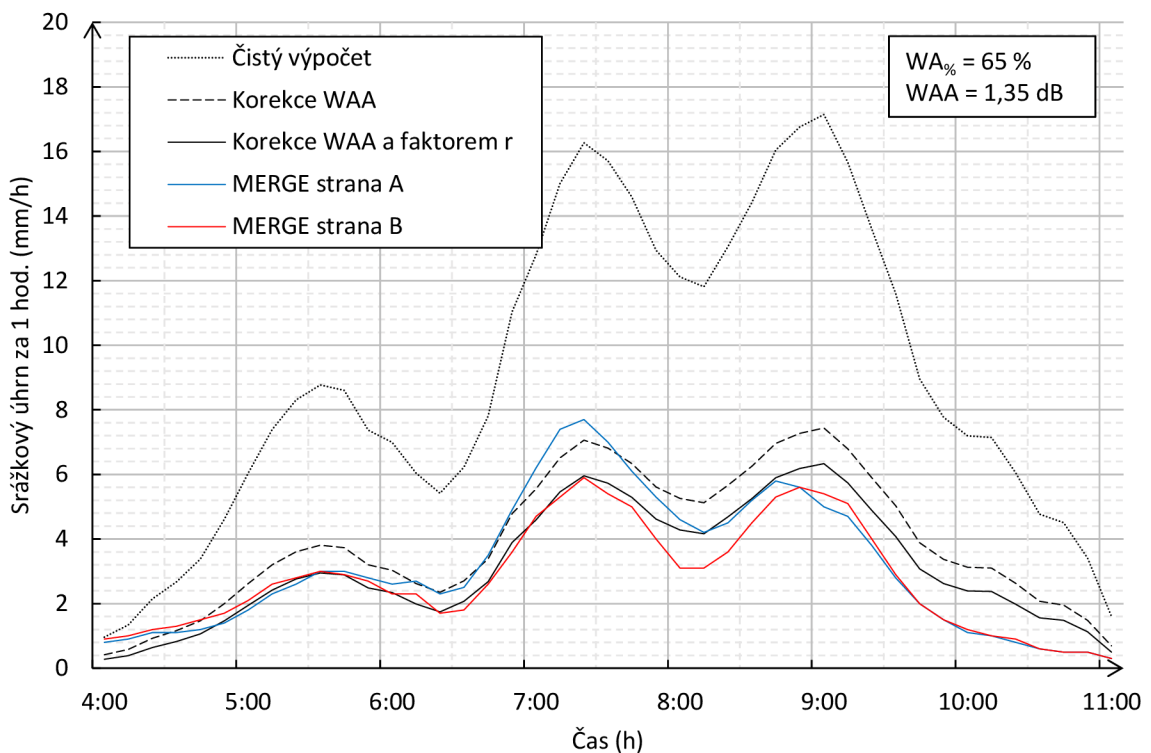


Obr. 5.4: Průběh kalibrační dešťové události na spoji č. 4.

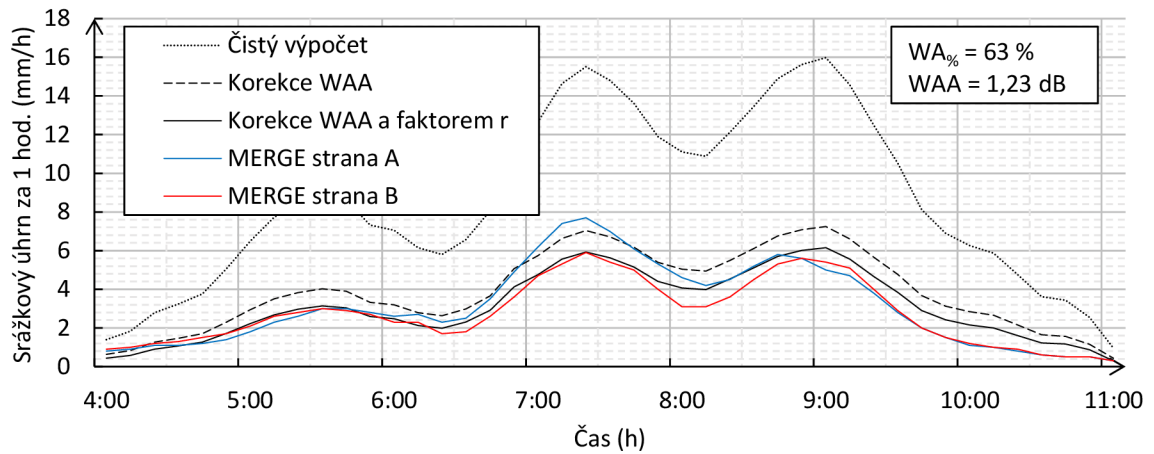
5.1.2 Zhodnocení

Jak lze vidět v tab. 5.1, hodnota procentního koeficientu určujícího, jaká část původního útlumu připadá na WAA, se mezi jednotlivými spoji mírně liší a pohybuje se mezi 60 % a 65 %, přičemž absolutní hodnoty WAA dosahují od 1,28 dB do 1,80 dB při kalibračním dešti. Z údajů v tab. 5.2 je patrné, že při zachování stejných procentních koeficientů jsou absolutní hodnoty rozdílné (jelikož jsou závislé na celkovém surovém útlumu, a tím i intenzitě daného deště), a pohybují se mezi 1,23 dB a 1,63 dB. Při kalibračním i validačním dešti však bylo dosaženo poměrně vysokých korelací, a to hodnot R^2 od 0,87 do 0,94; resp. od 0,88 do 0,95 pro dešť validační.

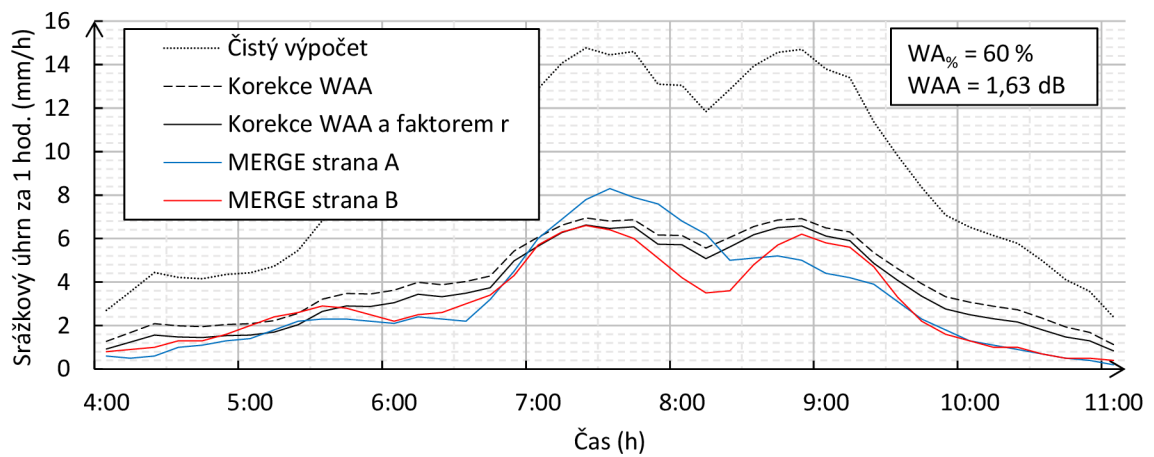
Průměrná naměřená hodnota WAA z výše uvedených výsledků je 1,42 dB. To je výrazně méně, než obvyklá hodnota získaná ve studiích uvedených v kap. 4.2, která se pohybovala okolo 2,3 dB. Možná důvod této odchylky může být frekvenční pásmo 10 GHz, přičemž publikované studie WAA prováděly měření vždy na spojích ve vyšších licenčních pásmech. Chování a vyčíslení útlumu WAA na 10 GHz prozatím tedy nelze srovnat s jinými výsledky.



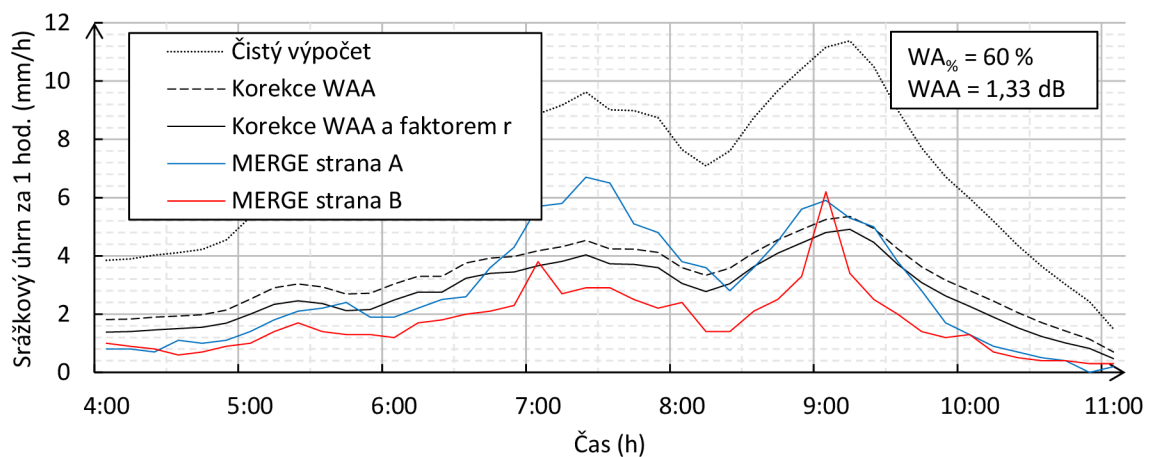
Obr. 5.5: Průběh validační dešťové události na spoji č. 1.



Obr. 5.6: Průběh validační dešťové události na spoji č. 2.



Obr. 5.7: Průběh validační dešťové události na spoji č. 3.



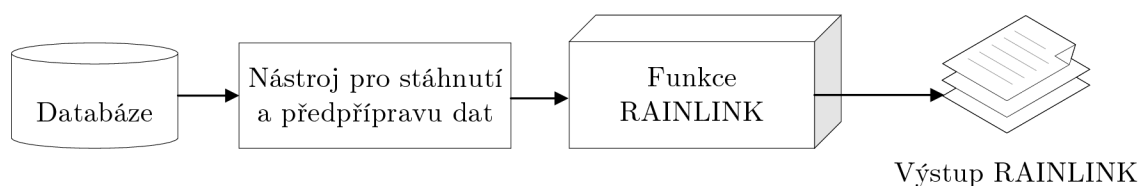
Obr. 5.8: Průběh validační dešťové události na spoji č. 4.

5.2 Automatizace výpočtů knihovnou RAINLINK

Pro zautomatizování postupu výpočtu bylo nejprve nutno přejít od jednorázových databázových exportů k systematickému řešení. Jednak z důvodu zjednodušení celého procesu předpřípravy dat pro výpočet, především pak ale z důvodu umožnění korekce vysílané úrovně signálu (Tx) na úrovni přijímaného signálu (Rx) jednotlivých kanálů mikrovlnných spojů. Byly provedeny dva kroky:

- vytvoření vlastního databázový serveru s daty mikrovlnných spojů,
- vytvoření nástroje pro předpřípravu dat pro průchod funkcemi RAINLINK.

Po těchto krocích lze získat datový řetězec odpovídající obrázku 5.9:



Obr. 5.9: Struktura databázových položek v InfluxDB.

5.2.1 Databázové úložiště InfluxDB

Od provozovatele mikrovlnných spojů byl obdržen databázový export parametrů všech mikrovlnných spojů, za období cca dvou let (pokrývající roky 2020 a 2021). Tato data jsou v textovém formátu `.csv`, mají časové rozlišení 5 minut, a v tomto formátu dosahují velikosti několika desítek gigabajtů. Data jsou indexována prostřednictvím unikátních IP adres jednotek, a obsahují vyexportované parametry:

- `rx_power` – přijímaná úroveň signálu mikrovlnné jednotky,
- `tx_power` – vysílaná úroveň signálu mikrovlnné jednotky,
- `modulation` – aktuální modulace vysílání,
- `snr` – odstup signál-šum přijímané úrovně signálu,
- `temperature` – teplota venkovní rádiové jednotky.

InfluxDB

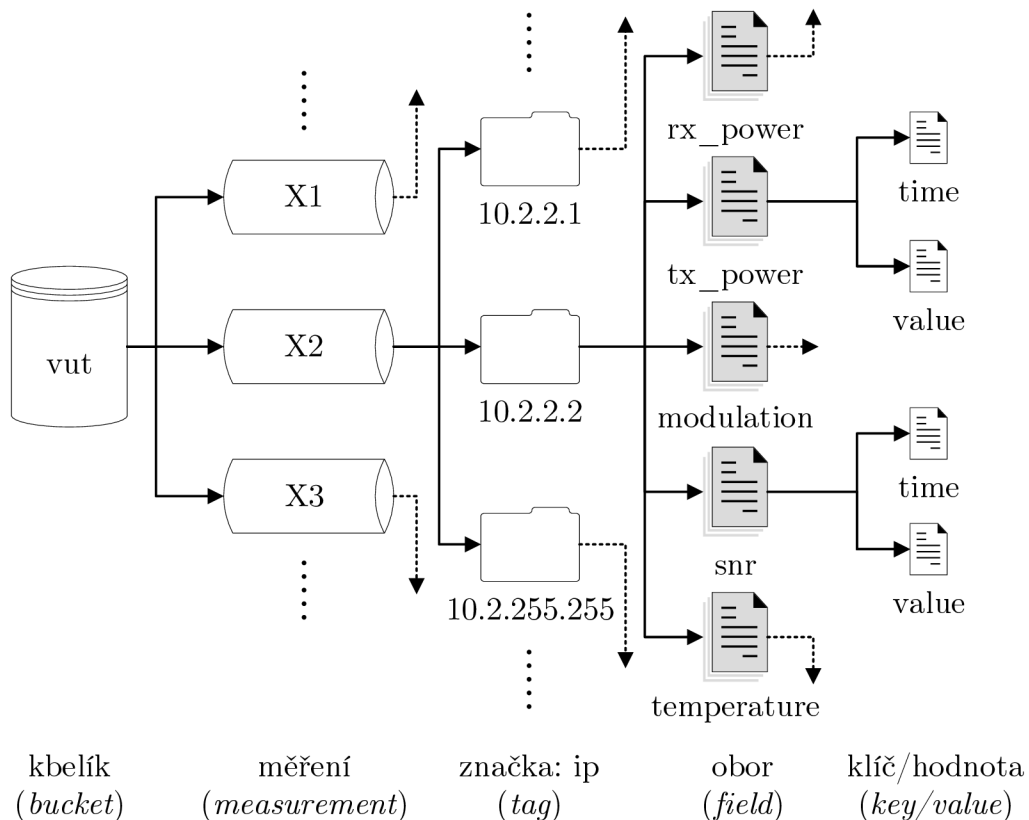
InfluxDB je specializovaná otevřená databázová platforma pro ukládání a práci s daty časových řad (*time-series data*). Vyznačuje se vysokým výkonem a účinnou kompresí těchto dat. Je vyvíjena společností InfluxData a uvolněna pod licencí MIT. Bývá řazena do kategorie tzv. „NoSQL“ databází. [65, 66]

InfluxDB je vyvíjena ve dvou větvích:

- 1.x (poslední verze 1.8) – využívá starší architekturu rozdělení na logické databáze a retenční politiky, jazykem dotazů je InfluxQL, jehož syntaxe přímo vychází z SQL. Nejsou již přidávány nové funkce, pouze bezpečnostní aktualizace.
- 2.x (poslední verze 2.2) – aktuální vývojová větev, databáze a retenční politiky nahradila jednotná terminologie „kbelíky“, neboli *buckets*, dotazovacím jazykem je jazyk Flux s vlastní syntaxí, mnoho nových funkcionalit, a průběžně jsou přidávány další. [66]

Import dat do InfluxDB

Pro efektivní uložení vyexportovaných parametrů spojů byla zvolena InfluxDB v aktuální verzi 2.1.1 (v době vývoje). Data byla do databáze naimportována dle schématu odpovídajícímu obr. 5.10:



Obr. 5.10: Struktura databázových položek v InfluxDB.

Pro korektní import bylo nutno provést nejprve opravu časových značek originálních `.csv` souborů, jelikož na exportním řetězci došlo k nesprávnému posuvu časových zón. Namísto UTC+1, resp. UTC+2 pro letní čas, byly vyexportovány hodnoty s časy UTC-1, resp. UTC-2. Pro tento účel byl naprogramován opravný skript² v jazyce C#.

Nejvyšší entitou v hierarchii InfluxDB je tzv. kbelík (*bucket*), odpovídající úrovni databáze u běžných systémů. U kbelíků se nastavuje doba retence, tzn. po jak dlouhé době se mají začít mazat nejstarší záznamy v kbelíku. Pro import byl vytvořen nový kbelík, pojmenován `vut`, s neomezenou dobou retence.

Kbelík obsahuje jedno, či několik měření (*measurements*). Na úrovni těchto měření jsou rozřazována data dle příslušnosti k určitému modelu mikrovlnné jednotky. V této práci jsou používána data celkem čtyř modelů (technologií) jednotek. Z důvodu ochrany vnitřních informací provozovatele mikrovlnných spojů, jsou tyto modely v práci označovány pouze jako X1, X2, X3 a X4.

Měření obsahují sadu značek (*tags*) a oborů (*fields*). Všechny obory sestávají z dvojic klíč/hodnota (*key/value*), přičemž klíčem je zpravidla časový údaj. Obory reprezentují samotnou zaznamenanou informaci (síla signálu, teplota, apod.), zatímco značky tyto informace kategorizují. Ke každé dvojici klíč/hodnota zaznamenané v oboru, může být přiřazena jedna nebo více značek. Importované parametry (`tx_power`, atd.) jsou reprezentovány obory a jsou uloženy v měření odpovídající dané jednotce. Vždy je ke každému záznamu v oboru přiřazena značka s IP adresou dané jednotky.

5.2.2 Nástroj pro přípravu dat

Tento nástroj musí zajišťovat načítání parametrů z databáze a jejich zpracování tak, aby byl výstup zpracovatelný funkcemi knihovny RAINLINK. Pro daný účel byla vytvořena aplikace `RainlinkImportMaker`, s rozhraním v příkazové řádce – CLI (*Command Line Interface*), naprogramovaná v jazyce C# a běžící v prostředí .NET. Zdrojové kódy vytvořeného nástroje jsou veřejně přístupné na úložišti GitHub³.

Veškeré statické parametry mikrovlnných spojů (dále nazývané jako definice), jsou uloženy v lokální databázi SQLite. Nástroj přijímá řídicí parametry z příkazové řádky, mezi nimi i cestu k seznamu mikrovlnných jednotek ve formátu `.csv`. Parametry jednotek jsou dynamicky načítány z databáze InfluxDB. Na výstupu aplikace generuje `.csv` soubor, se strukturou požadovanou funkcemi RAINLINK.

²Skript je přiložen v elektronické příloze práce.

³<https://github.com/milbub/RainlinkImportMaker>

Užité technologie

.NET (dříve .NET Core) je multiplatformní varianta aplikačního rámce .NET Framework společnosti Microsoft. V současnosti je již vyvíjena pouze multiplatformní větev, která byla přejmenována na zkrácený název .NET. Jedná se o sadu knihoven pro vývoj aplikací napříč různými programovacími jazyky, k nimž náleží také prostředí pro běh těchto aplikací – virtuální stroj (CLR), provádějící překlad z bajtkódu (CIL) do strojového kódu. [67]

SQLite je kompaktní systém relační databáze, jehož databázový stroj je distribuován přímo s aplikací která jej využívá, prostřednictvím přiložené knihovny. Je nenáročný a bezúdržbový – nevyžaduje žádnou konfiguraci ze strany uživatele. Celá SQLite databáze je na disku uložena v jediném souboru. [68]

Práci nad SQLite databází v nástroji RainlinkImportMaker zprostředkovává knihovna SQLite-net, uvolněná pod licencí MIT. [69]

Konektivitu k datbázi InfluxDB v nástroji zajišťuje oficiální knihovna influxdb-client-csharp společnosti InfluxData, uvolněná taktéž pod licencí MIT. [70]

Struktura nástroje

Nástroj sestává z následujících tříd:

- **Program** – obsahuje metodu `Main` tvořící hlavní smyčku aplikace,
- **LinksLoader** – obsahuje metodu `LoadSelectedLinks` pro načtení dat z databázového souboru SQLite,
- **InfluxManager** – obsahuje metody `QueryUnitMean` a `QueryUnitMinMax` pro načtení parametrů jednotek z databáze InfluxDB,
- **MwLink** – modelová třída mikrovlnného spoje,
- **MwUnit** – modelová třída mikrovlnné jednotky,
- **MwDataset** – datová třída pro zapouzdření parametrů jednotek.

Funkce nástroje

Vývojový diagram metody `Main` hlavní třídy `Program` je zobrazen na obr. 5.11. Po startu dochází nejprve k parsování⁴ a kontrole platnosti vstupních argumentů. Následně je načten vstupní soubor `.csv`, jehož cesta je specifikována argumentem programu, a který obsahuje seznam spojů a jejich kanálů, které mají být zahrnuty do výpočtu. Následně jsou definice jednotek těchto spojů načteny z databáze SQLite do paměti. Pro celkový počet načtených jednotek i , je pak od nuly volán inkrementační cyklus, zahrnující dále uvedené funkce.

⁴Parsování – rozřazení vstupních prvků do předem dané struktury.

Je kladena podmínka, zda aktuálně zpracovávaná jednotka i je model s volatílní úrovní vysílaného signálu (Tx) – tj. s funkcí ATPC. Pakliže ano, jsou z InfluxDB načítány pouze průměrné hodnoty signálu, tedy jedna hodnota na interval. Pokud by byly načítány hodnoty minimální a maximální, vzhledem k rozdílnému zaznamenávání v čase na vysílací a přijímací jednotce, by změny vysílaného signálu (Tx) nemusely časově korespondovat se změnami přijímaného signálu (Rx), resp. s jeho vzorky v rámci jednoho zpracovávaného intervalu. Tento problém sice není při průměrování hodnot na daném intervalu zcela vyřešen, ale je částečně potlačen. Pakliže daná jednotka nedisponuje funkcí ATPC, jsou z databáze načteny jak minimální, tak maximální hodnoty, avšak pouze signálu Rx.

V případě volatílního Tx, jsou z databáze nejprve načteny průměrné hodnoty signálu Rx, a poté průměrné hodnoty signálu Tx protější jednotky. Poté proběhne kontrola a z výpočtu jsou vyřazeny všechny časové intervaly, ve kterých nejsou k dispozici hodnoty Tx protější jednotky. Následně je provedena korekce úrovně přijímaného signálu, a to odečtením hodnot vysílané úrovně signálu (Tx) od hodnot přijímané úrovně signálu (Rx).

Nakonec jsou získaná data zapsána do výstupního souboru `.csv`, jehož název je jedním ze vstupních argumentů programu. Struktura obsahu souboru odpovídá definici vstupního souboru RAINLINK, popsané v kap. 4.3.1.

Vstupní argumenty nástroje

Vstupní argumenty programu se udávají v příkazové řádce v následujícím pořadí:

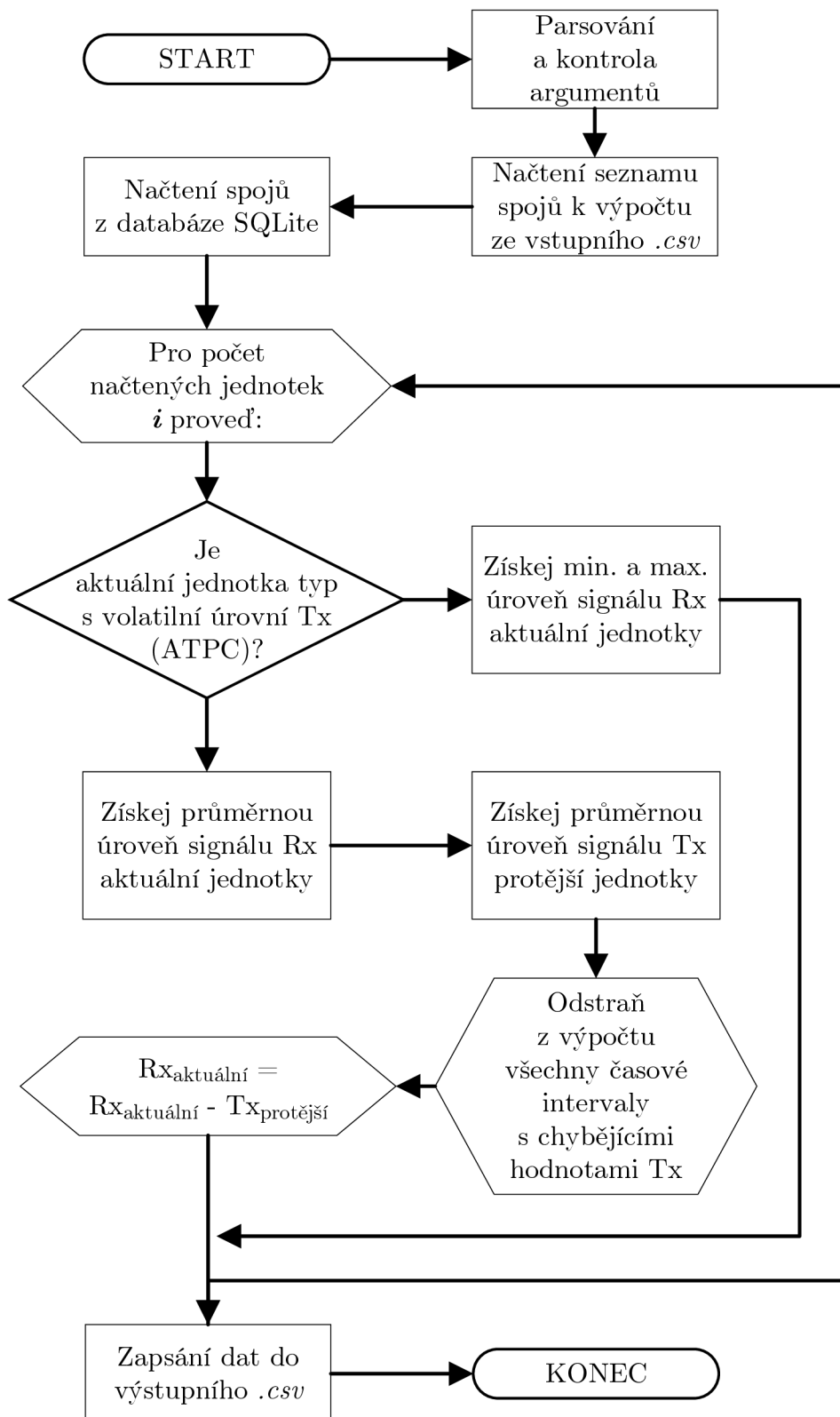
```
RainlinkImportMaker.exe <seznam> <start> <konec> <interval> <výstup>
```

- `seznam` je cesta k souboru `.csv`, obsahujícím spoje a kanály k načtení,
- `start` a `konec`, jedná se o časové značky dle RFC 3339⁵, udávající začátek, resp. konec časového intervalu pro výpočet srážek,
- `interval` udává časovou periodu, se kterou se mají hodnoty z databáze vyčíst,
- `výstup` je cesta k souboru `.csv`, který bude naplněn výstupními daty.

Vstupní soubor `.csv` se seznamem spojů k načtení, na každém řádku obsahuje záznam ve formátu: `<ID>, <příznak>`, kde ID označuje identifikátor spoje korespondující s údajem v databázi SQLite, a příznak označuje, které kanály mají být zpracovány, přičemž může nabýt hodnoty:

- `a` – do výpočtu bude zahrnut pouze kanál z B (Tx) do A (Rx),
- `b` – do výpočtu bude zahrnut pouze kanál z A (Tx) do B (Rx),
- `ab` – do výpočtu budou zahrnuty oba dva kanály.

⁵Standard RFC 3339 specifikuje pro zápis času v UTC tvar `YYYY-MM-DDTHH:mm:ssZ`, tedy např. `2021-07-31T12:45:55Z`, případně `2021-07-31T14:45:55+02:00` v čas. zóně UTC+2. [71]



Obr. 5.11: Vývojový diagram metody Main nástroje RainlinkImportMaker.

Cesta k souboru s databází SQLite se v argumentech neuvádí, jelikož je v konstantě `Path` třídy `LinksLoader` napevno nastavena na řetězec „Links.db“, tj. ve stejném adresáři, jako se nachází spustitelný soubor programu. Databázový soubor obsahuje jednu tabulku `MwLink`. Její struktura je definována v příloze A.1.

5.2.3 Příprava interpolační mřížky

RAINLINK je uvolněn spolu se vzorovými daty nizozemských mikrovlnných spojů, pokrývajících rovnoměrně prakticky celé území Nizozemska. Výchozí interpolační mřížka knihovny je tomu přizpůsobena, a pokrývá území Nizozemska o rozlišení 9×9 km. Při využití knihovny pro vlastní výpočty je tak nejprve nutno zajistit vytvoření vlastní interpolační mřížky, a spolu s tím i příslušné vykreslovací polygonové mapy. Interpolační mřížka je uložena v souboru `InterpolationGrid.dat`, který obsahuje na každém jednom řádku dvojici souřadnic `X,Y` ve formátu WGS84, tj. zeměpisná *délka*, zeměpisná *šířka* (`longitude`, `latitude`). Souřadnice každého jednoho řádku jsou středem příslušného interpolačního polygonu, jehož hranice je také nutno vytvořit, a to v souboru `PolygonsGrid.dat`. Tento soubor obsahuje skupiny souřadnic po pěti řádcích, jež představují vrcholy interpolačního polygonu (čtverce). O pět řádků se jedná z důvodu potřeby uzavření obrazce, tudíž ohraničení polygonu procházejícími všemi čtyřmi vrcholy interpolačního čtverce musí být zakončeno ve startovním bodě.

Pro účely této práce byla prostřednictvím lineárního kroku vytvořena interpolační mřížka o rozměrech 35×35 km, pokrývající kompletně území Prahy a blízkého okolí, s prostorovým rozlišením 100 m. Délka strany jednoho interpolačního polygonu tedy odpovídá 100 m, což je zároveň i vzdáleností sousedních interpolačních bodů. $10\times$ jemnější rozlišení oproti výchozímu stavu (100 m oproti 1 km) bylo zvoleno mimo jiné proto, že výchozí výpočty byly prováděny pro data spojů rozložených na území celého Nizozemí, zatímco v této práci bude primárním záměrem měření srážek v metropolitní oblasti Prahy. Vygenerovaná interpolační mřížka pro Prahu obsahuje celkem 122 500 interpolačních polygonů a pokrývá oblast $1\,225\text{ km}^2$.

5.2.4 Nastavení vlastních parametrů

Při prvotním zkušebním výpočtu srážkových úhrnů nad vlastními daty bylo zjištěno, že výchozí parametry pro výpočet srážek nad daty z nizozemských spojů, operujících na vyšších frekvencích a interpolovaných na celostátním území, jsou pro výpočet srážek lokálního charakteru ne zcela vyhovující. První vygenerované mapy srážek byly silně podhodnoceny, vlivem zejména vysokého konstantního parametru `WAA`, jehož velikost v RAINLINKu udává konstanta `Aa`. Její původní hodnota se ukázala jako příliš vysoká, viz měření v kap. 5.1. Nejlepších výsledků bylo dosaženo

Tab. 5.3: Vrcholové souřadnice interpolační sítě metropolitní oblasti Prahy.

X: 14.216468, Y: 50.228413	350 × 100 m = 35 km	X: 14.706043, Y: 50.228413
350 × 100 m = 35 km	Praha	
X: 14.216468, Y: 49.915056		X: 14.706043, Y: 49.915056

s hodnotou WAA 1,55 dB, což odpovídá intervalu naměřenému v kap. 5.1. Dále byly přizpůsobeny hodnoty vlastních parametrů interpolace běžným krigingem, jelikož výchozí hodnoty a variogram kalibrovaný nizozemskými měřeními vykazoval vysoké zkreslení způsobené rozdílnými hodnotami útlumu WAA na některých anténách. Nastavením velmi nízkých hodnot SILL a NUGGET došlo k potlačení těchto lokálních extrémů a zároveň bylo dosaženo rozložení srážkové intenzity interpolací do širších oblastí. Kompletní výčet všech nejdůležitějších změněných hodnot podstatných pro výpočet a interpolaci srážek je v tabulce 5.4.

Tab. 5.4: Výchozí a vlastní změněné hodnoty parametrů algoritmu RAINLINK.

Parametr	Výchozí nastavení	Vlastní nastavení
MaxFrequency	40,5 GHz	80,0 GHz
MinFrequency	12,5 GHz	5,0 GHz
Radius	15 km	30 km
ThresholdMedian	-1,4 dB	-0,8 dB
ThresholdMedianL	-0,7 dB/km	-0,4 dB/km
ThresholdWetDry	2 dB	-1,4 dB
HoursRefLevel	-2,5 h	-12 h
FilterThreshold	$-32,5 \frac{dB/km}{h}$	$-10 \frac{dB/km}{h}$
Aa	2,3 dB	1,55 dB
Variogram	ClimVar	Manual
NUGGET	0,37 mm ²	0,005 mm ²
SILL	3,7 mm ²	0,005 mm ²
RANGE	18,7 km	30 km

5.3 Výsledky výpočtů knihovnou RAINLINK

5.3.1 Bilance vstupních dat

Ve vytyčené oblasti Prahy se nachází celkem 211 mikrovlnných spojů provozovatele, jejichž data byla poskytnuta pro účely této práce. Tyto spoje do daného sektoru zasahují alespoň jednou ze dvou koncových jednotek. Z toho 138 spojů je postavených na technologii X1, operující v pásmu 10 GHz s konstantní úrovní vysílaného výkonu, zbylých 73 spojů pak pracuje na technologiích X2, X3 a X4, operujících v různých frekvenčních pásmech (včetně 10 GHz) a s proměnnou úrovní vysílaného výkonu.

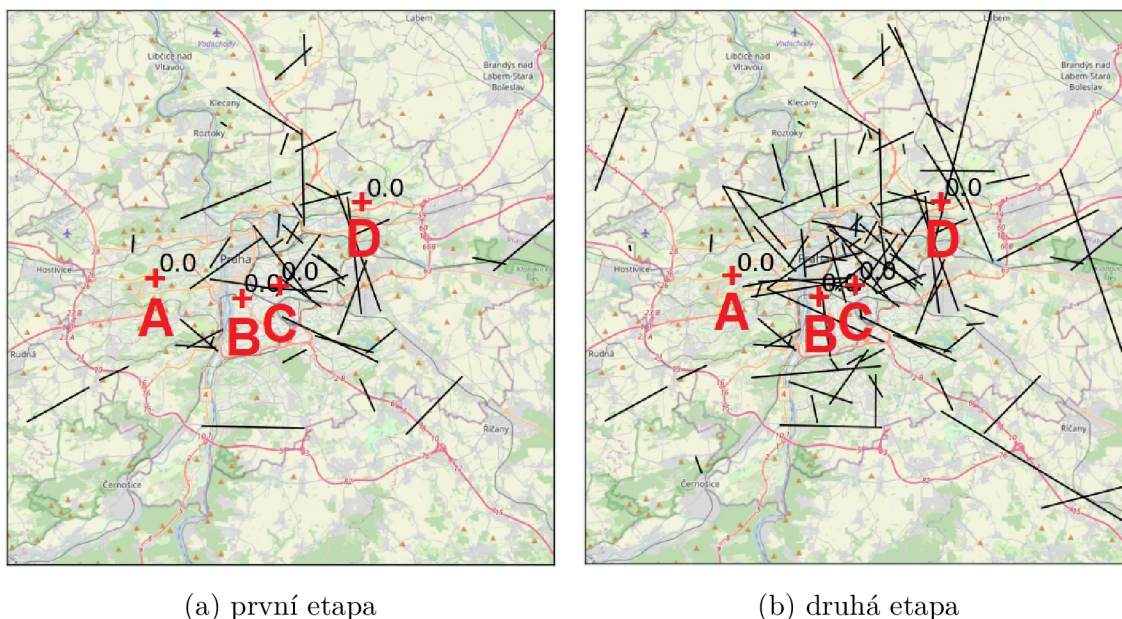
Výpočty probíhaly ve dvou etapách. V **první etapě** byly do výpočtu zahrnuty pouze jednotky X1, z důvodu tehdejší nepřipravenosti nástroje RainlinkImportMaker a nemožnosti hromadné korekce vysílaných výkonů. Dále z původního počtu dostupných dat z celkem 138 spojů, bylo pro výpočet ponecháno pouze 39. Tento výrazný úbytek byl způsoben vyfiltrováním spojů, jejichž data přijímaného signálu nebyla využitelná, a to buď z důvodu výpadku jednotky v daném čase, anebo, téměř ve všech případech z důvodu výrazného krátkodobého kolísání síly signálu, s častou korelační vazbou na teplotu jednotky. Tyto spoje vzhledem k tomu, že v pásmu 10 GHz je každá desetina decibelu útlumu rovna v přepočtu nezanedbatelným srážkovým intenzitám, příliš zkreslovaly výsledný výpočet, proto bylo rozhodnuto, že do vyřešení případné kompenzace jejich teplotního kolísání budou z výpočtu vyřazeny. Více o teplotním kolísání bylo pojednáno v kapitole 4. Dále v této etapě chybělo několik spojů, které spadaly do oblasti pouze jednou koncovou jednotkou.

Ve **druhé etapě** výpočtu je zahrnuto všech 39 spojů z první etapy, dalších 7 spojů X1 přesahujících hranici oblasti, a především pak všech 73 spojů X1, X2 a X3. Celkem bylo v těchto výpočtech tedy zahrnuto 119 spojů, o různých technologiích a frekvenčních pásmech. U všech spojů X1, X2 a X3 byly do výpočtů zahrnuty oba dva kanály, spojů X1 bylo symetricky zahrnutých 27, u 9 spojů byl zahrnut pouze kanál z B (Tx) na A (Rx), a u 10 spojů to byl pouze kanál z A (Tx) na B (Rx).

Na obrázku 5.12 je zobrazena mapa vstupních spojů RAINLINKu v obou etapách.⁶ Písmena A, B, C, D, označují polohy srážkoměrů ČHMÚ, oproti kterým jsou validována vypočítaná data srážkových úhrnů:

- **A** – Praha, Břevnov,
- **B** – Praha, Karlov,
- **C** – Praha, Vinohrady,
- **D** – Praha, Kbely.

⁶Z důvodu ochrany vnitřních informací provozovatele spojů, nejsou na všech mapách v této práci zobrazené dráhy spojů skutečné. Souřadnice jsou randomizovány tak, aby nebylo možné na základě těchto map určit polohy jednotek. Pro názornost je však zachován přibližný charakter vstupních dat.



Obr. 5.12: Poloha spojů zahrnutých při výpočtech knihovnou RAINLINK.

5.3.2 První etapa

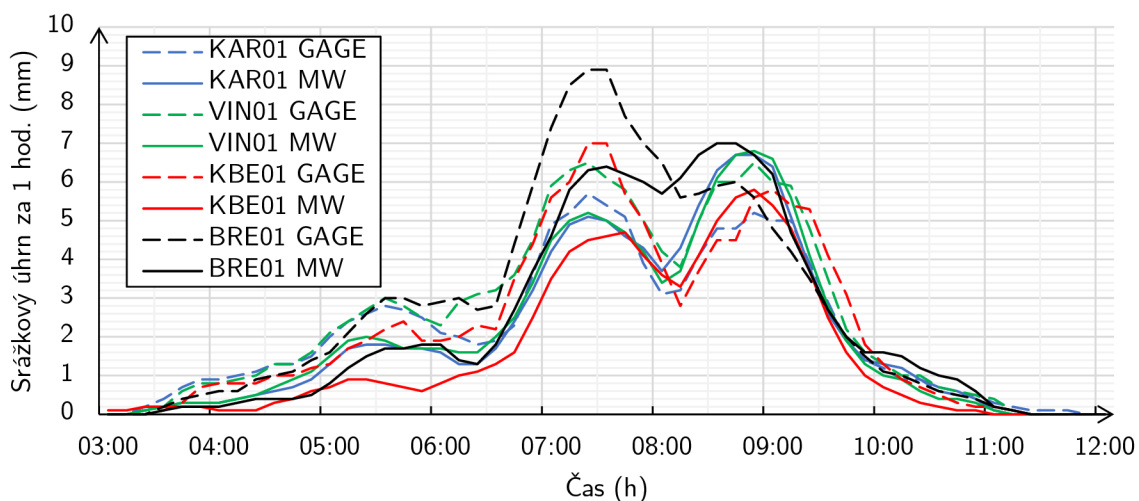
Děšť srpen

Tato dešťová událost proběhla na počátku srpna: 01.08.2021 03:00 – 01.08.2021 12:00 UTC. Jednalo se o středně silný konvekční déšť s dvojitým vrcholem. Časové průběhy výstupních hodnot pro vybraná umístění jsou zobrazeny na obrázku 5.13. Z výstupních dat RAINLINKu jsou vyčteny interpolované bodové hodnoty srážek v polohách srážkoměrů ČHMÚ, oproti kterým jsou tato data validována.

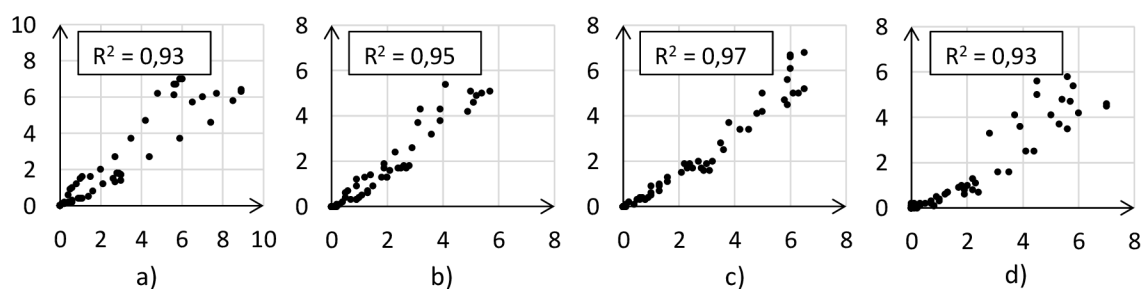
Na obrázku 5.14 jsou vyneseny korelační diagramy R^2 interpolovaných výstupních hodnot z RAINLINKu oproti srážkovým úhrnům na čtyřech sledovaných srážkoměrech ČHMÚ. Pro tyto čtyři sledované srážkoměrné lokality, lze pozorovat velmi dobré shody, s hodnotou R^2 pohybující se mezi 0,93 a 0,97.

Na obrázku 5.15a je zobrazen výstupní 24hodinový srážkový úhrn vypočítaný funkcemi RAINLINK, v porovnání s hodnotami 24hodinového srážkového úhrnu na výše uvedených čtyřech srážkoměrech ČHMÚ, zobrazeným na obrázku 5.15b. Vlivem nedostatečné hustoty mikrovlnných spojů v okrajových částech sledované oblasti je úhrn ze srážkoměru Kbely mírně podhodnocen. Zbylé hodnoty v místech srážkoměrů se pohybují v rámci tolerance. Rozdílné zbarvení je způsobeno odlišným graduováním stupnic.

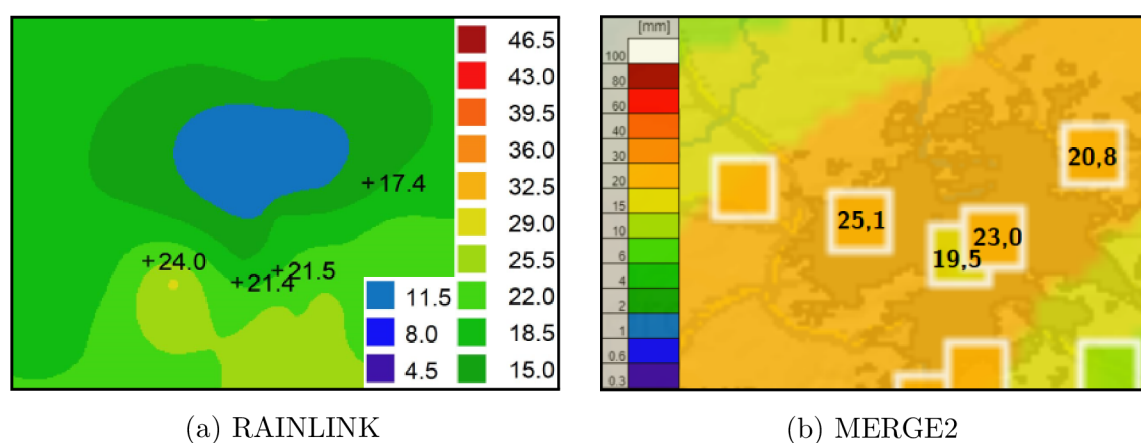
Na sérii obrázků 5.16 je pro ukázkou zobrazen vybraný úsek výstupních dešťových map z knihovny RAINLINK, ve formě hodinové posloupnosti vývoje deště po desetiminutových krocích.



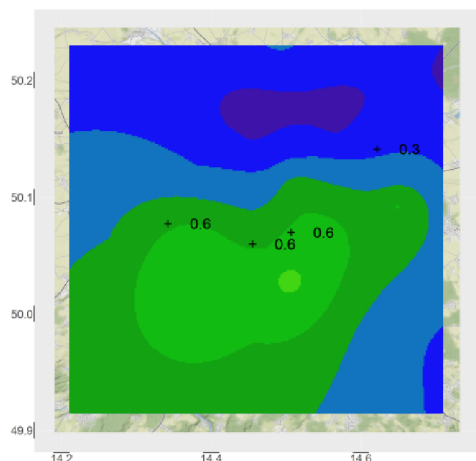
Obr. 5.13: Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů RAINLINKu v porovnání s hodnotami MERGE2. První etapa, srpen.



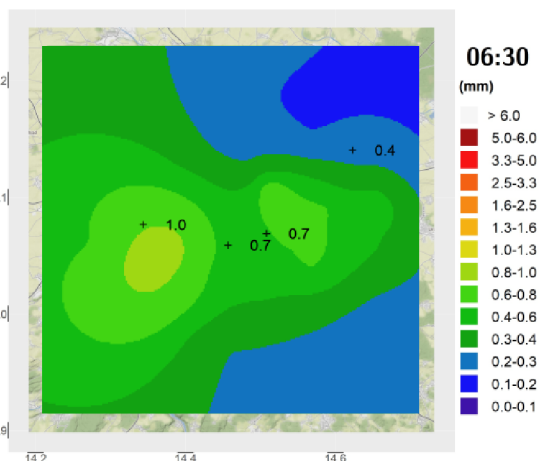
Obr. 5.14: Korelační diagramy interpolovaných hodnot s hodnotami srážkoměrů ČHMÚ. Stanice: a) Břevnov, b) Karlov, c) Vinohrady, d) Kbely. První etapa, srpen.



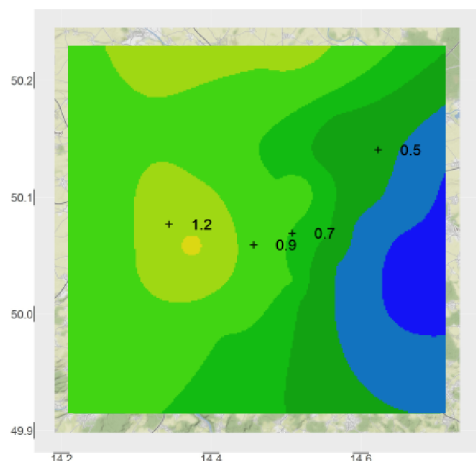
Obr. 5.15: Srovnání 24h odhadu za období 31.07.2021 23:00 – 01.08.2021 23:00 UTC. První etapa, srpen.



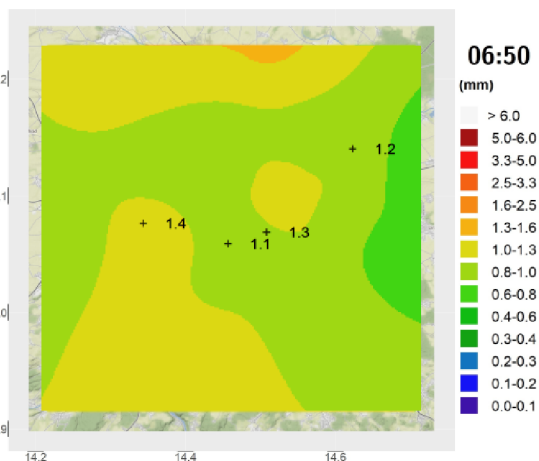
(a) 01.08.2021 06:10 – 06:20 UTC



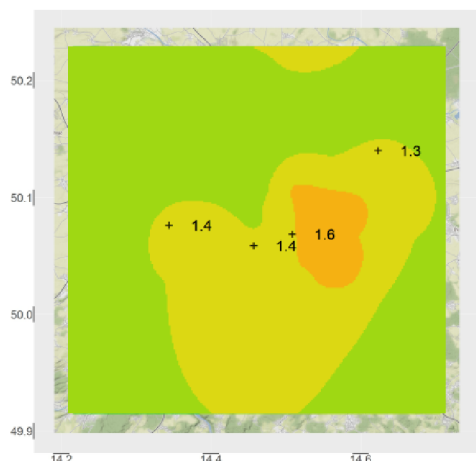
(b) 01.08.2021 06:20 – 06:30 UTC



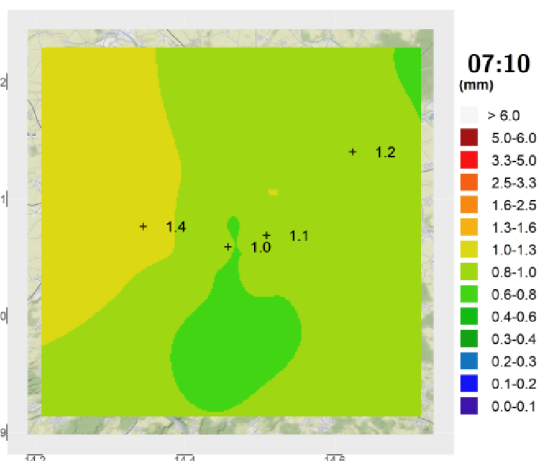
(c) 01.08.2021 06:30 – 06:40 UTC



(d) 01.08.2021 06:40 – 06:50 UTC



(e) 01.08.2021 06:50 – 07:00 UTC



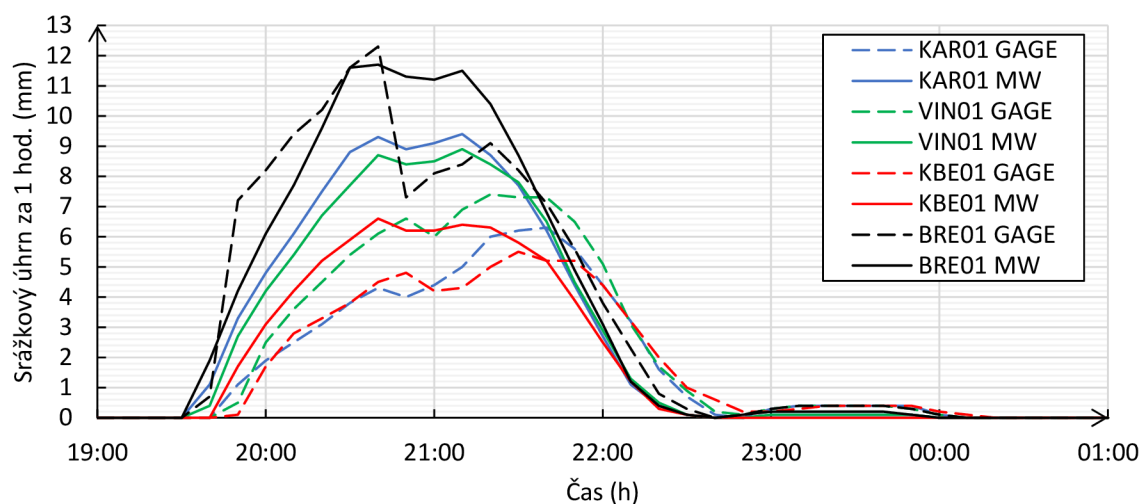
(f) 01.08.2021 07:00 – 07:10 UTC

Obr. 5.16: Ukázka srážkových map RAINLINK s 10m krokem.

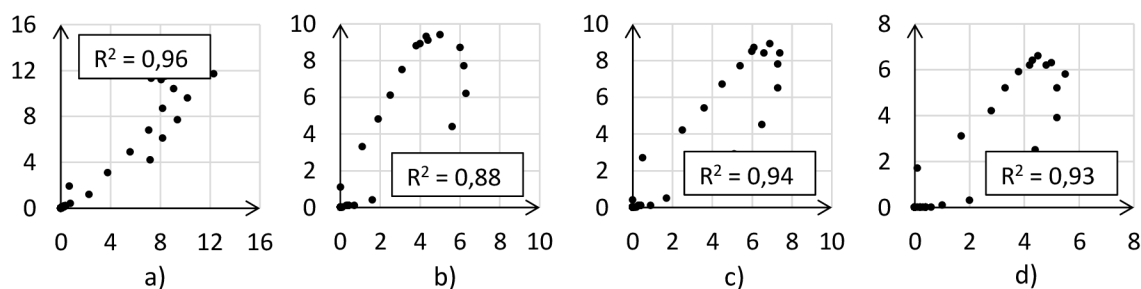
Děšť srpen II

Tato dešťová událost proběhla v první třetině srpna: 07.08.2021 19:00 – 08.08.2021 01:00 UTC. Jednalo se o středně silný konvekční déšť. Časové průběhy výstupních hodnot pro vybraná umístění jsou opět zobrazeny na obrázku 5.17.

Na obrázku 5.18 jsou vyneseny korelační diagramy R^2 interpolovaných výstupních hodnot z RAINLINKu oproti srážkovým úhrnům na čtyřech sledovaných srážkoměrech ČHMÚ. Pro tento déšť jsou shody horší, s hodnotou R^2 pohybující se mezi 0,88 a 0,94, nejlepší pak dosahuje 0,96. Na srážkoměrných bodech B, C a D lze pozorovat trend, kdy v první fázi při náběhu deště dochází k nadhodnocení ze strany spojů, a po překonání vrcholu se stav obrací. Dále je též znatelný lokální propad na srážkoměru A – Břevnov na vrcholu deště, který výpočtem zachycen nebyl.



Obr. 5.17: Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů RAINLINKu v porovnání s hodnotami MERGE2. První etapa, srpen II.



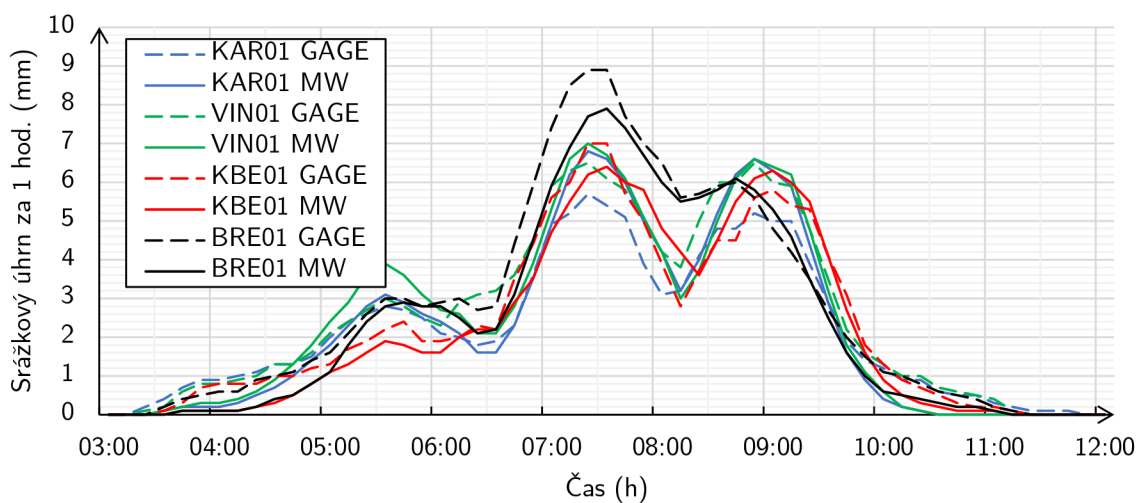
Obr. 5.18: Korelační diagramy interpolovaných hodnot s hodnotami ČHMÚ. Stanice: a) Břevnov, b) Karlov, c) Vinohrady, d) Kbely. První etapa, srpen II.

5.3.3 Druhá etapa

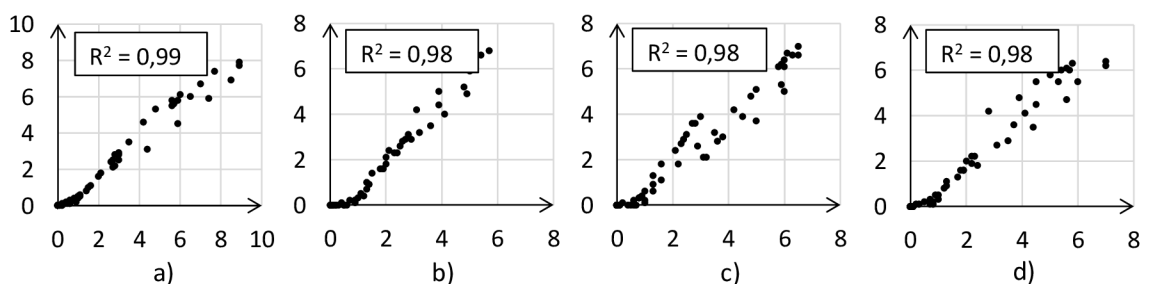
Děšť srpen

V tomto výpočtu jsou již zahrnuty spoje X2, X3 a X4, operující v různých frekvenčních pásmech. Jedná se o stejnou dešťovou událost jako v první etapě, tj. počátek srpna: 01.08.2021 03:00 – 01.08.2021 12:00 UTC, středně silný, konvekční déšť. Časové průběhy pro vybraná umístění jsou opět zobrazeny na obrázku 5.19.

Na obrázku 5.20 jsou vyneseny korelační diagramy R^2 interpolovaných výstupních hodnot z RAINLINKu oproti srážkovým úhrnům na čtyřech sledovaných srážkoměrech ČHMÚ. V tomto případě lze pozorovat ještě lepší shody, než tomu bylo v předchozí etapě. Hodnoty korelací R^2 dosahují velmi vysokých hodnot 0,98 a 0,99.

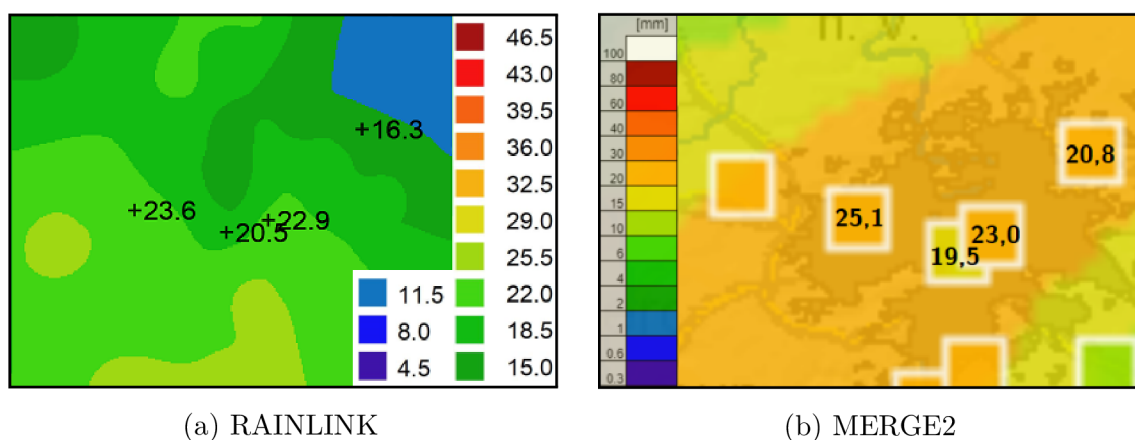


Obr. 5.19: Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů RAINLINKu v porovnání s hodnotami MERGE2. Druhá etapa, srpen.



Obr. 5.20: Korelační diagramy interpolovaných hodnot s hodnotami srážkoměrů ČHMÚ. Stanice: a) Břevnov, b) Karlov, c) Vinohrady, d) Kbely. Druhá etapa, srpen.

Na obrázku 5.21 se nachází opět srovnání 24h srážkového úhrnu z tohoto období. Oproti předchozí etapě lze pozorovat rovnoměrnější interpolaci, s výraznějším rozdílem pouze v pravém horním rohu, resp. na srážkoměru D.



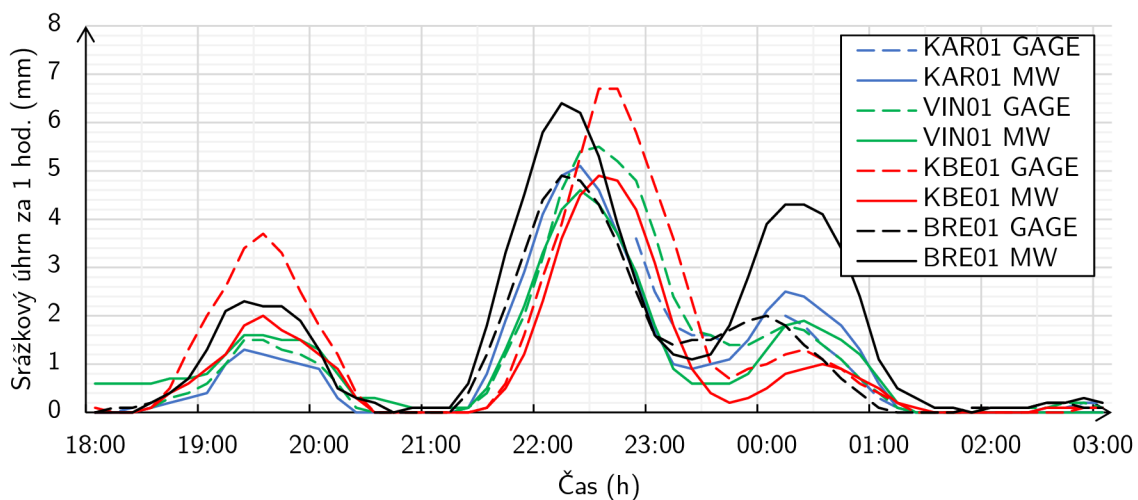
Obr. 5.21: Srovnání 24h odhadu za období 31.07.2021 23:00 – 01.08.2021 23:00 UTC. Druhá etapa, srpen.

Děšť březen

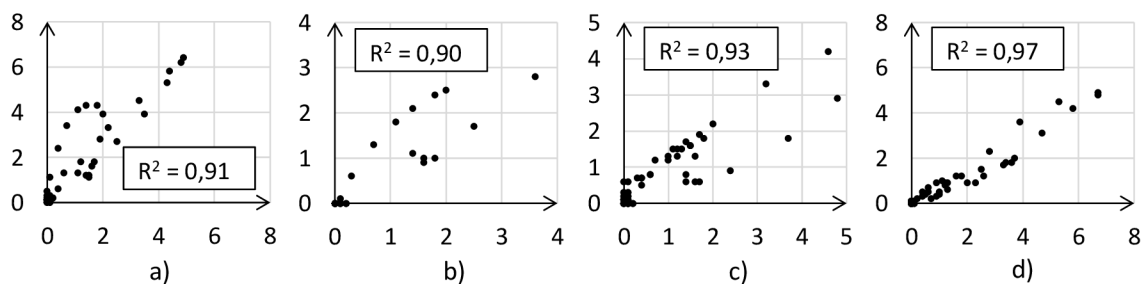
Tento déšť nastal na počátku března: 04.03.2021 18:00 – 05.03.2021 03:00 UTC. Na rozdíl od ostatních dešťů, se zde jednalo o brzký jarní déšť slabší intenzity, s ne zcela určitým vymezením začátku a konce, jelikož velmi slabé srážky jsou v okolních hodinách zachyceny i na fyzických srážkoměrech. Lze navíc předpokládat, že před i po tomto dešti panovalo mlhavé počasí a zvýšená vlhkost vzduchu ve větší míře, než tomu bylo u srpnových letních dešťů. Časové průběhy pro vybraná umístění jsou opět zobrazeny na obrázku 5.22.

Na obrázku 5.23 jsou vyneseny korelační diagramy R^2 interpolovaných výstupních hodnot z RAINLINKu oproti srážkovým úhrnům na čtyřech sledovaných srážkoměrech ČHMÚ. Ve dvou případech lze pozorovat podhodnocení ze strany spojů (C – Vinohrady a D – Kbely), bod A – Břevnov naopak vykazuje lehké nadhodnocení. V bodě B – Karlov bohužel v nejdůležitějších úsecích chybí data ze srážkoměru ČHMÚ.

Na těchto průbězích však lze velmi dobře pozorovat postupný přesun deště ze západu na východ během nejintenzivnějšího (prostředního) vrcholu, aktivita nejdříve začíná v bodě A – Břevnov, následně déšť putuje přes lokality B a C a jako poslední je nárůst v lokalitě D – Kbely.



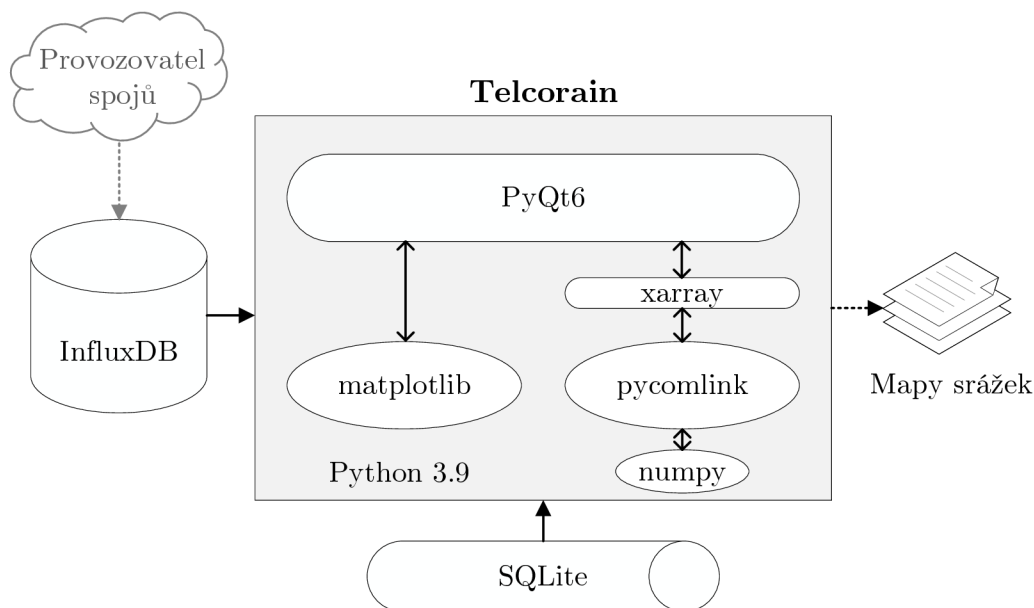
Obr. 5.22: Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů RAINLINKu v porovnání s hodnotami MERGE2. Druhá etapa, březen.



Obr. 5.23: Korelační diagramy interpolovaných hodnot s hodnotami ČHMÚ. Stanice: a) Břevnov, b) Karlov, c) Vinohrady, d) Kbely. Druhá etapa, březen.

6 Vývoj vlastní aplikace

Pro vývoj vlastního aplikačního řešení dle zadání práce, se využití funkcí knihovny RAINLINK jevílo jako příliš těžkopádné a integračně složité. Druhá alternativa ve formě knihovny pycomlink (viz kap. 4.4) s celým ekosystémem knihoven jazyka Python, se jevíla jako perspektivnější i s ohledem na další rozšiřování a vývoj aplikace v budoucnu. Na obr. 6.1 lze vidět vztahový diagram nejdůležitějších komponent využitých pro stavbu aplikace pojmenované **Telcorain**.



Obr. 6.1: Vztahový diagram aplikace Telcorain.

Aplikace je naprogramována v jazyce Python, pro její chod je tak nutno mít nainstalován interpret jazyka Python, přičemž funkčnost je zaručena na oficiálním interpretu CPython ve verzi 3.9. Aplikace je k dispozici na veřejném úložišti GitHub¹, a pro svůj chod využívá několik knihoven, z nichž nejdůležitější jsou:

- **PyQt**, nasazeno v aktuální verzi 6 – sada knihoven (aplikační rámec) pro tvorbu multiplatformního grafického uživatelského rozhraní, jedná se o propojení s „klasickými“ knihovnami Qt naprogramovanými v C++;
- **pycomlink** – knihovna funkcí pro výpočet srážkových informací z dat mikrovlnných spojů, viz kap. 4.4;
- **matplotlib** – univerzální knihovna pro vykreslování a vizualizaci dat;
- **xarray** – knihovna pro vytváření značkových mnohazměrných datových struktur a práci s nimi;
- **numpy** – knihovna pro vědecké výpočty v Pythonu.

¹<https://github.com/milbub/Telcorain>

Externě aplikace komunikuje s databázemi **InfluxDB** a lokální **SQLite**. Struktura (a obsah) těchto databází je zcela shodná s databázovou strukturou pro nástroj RainlinkImportMaker, tudíž jejich popis lze nalézt již v kapitolách 5.2.1 a 5.2.2. InfluxDB obsahuje parametry mikrovlnných spojů vyčtené v čase, lokální SQLite databázový soubor pak uchovává statické parametry (definice) mikrovlnných spojů.

Architektura s databází InfluxDB byla zvolena i pro možnost případného výpočtu srážkových dat v reálném čase. Databázi může plnit přímo provozovatel mikrovlnných spojů, či může poskytnout přístup do své sítě pro databázový sběrač dat (např. na bázi protokolu SNMP²), který by se mikrovlnných jednotek dotazoval na aktuální hodnoty jejich parametrů, a tyto pak ukládal do InfluxDB. Krajní alternativní možností je připojení aplikace Telcorain přímo k vnitřní databázi InfluxDB provozovatele (pakliže takovou provozuje), takové řešení je však pro stranu provozovatele bezpečnostně značně rizikové.

6.1 Charakteristika použitých technologií

6.1.1 PyQt a Qt

PyQt je sada knihoven pro Python, propojujících volání Pythonu s hlavní knihovnou Qt naprogramovanou v C++. Umožňuje tvořit grafické uživatelské rozhraní v Pythonu stejným způsobem, jako při nativním programování v C++ s Qt. PyQt obsahuje propojení všech standardních funkcí jednotlivých widgetů (viz dále). PyQt, stejně jako samotný Python a Qt, je multiplatformní, a lze tak v rámci jednoho aplikačního rámce vytvářet grafické aplikace pro Microsoft Windows, Linux, Apple macOS, ale i Android a Apple iOS. PyQt je v současnosti vyvíjeno společností Riverbank Computing, která jej pro nekomerční použití bezplatně poskytuje pod licencí GNU GPL v3. [72]

Qt je komplexní aplikační rámec pro multiplatformní vývoj aplikací s grafickým uživatelským rozhraním. Bylo vytvořeno již v roce 1999 společností Trolltech, která byla v roce 2008 odkoupena firmou Nokia. Ta Qt vlastnila a vyvíjela do roku 2011, než došlo k dalšímu odkupu společností Digia. V současnosti je Qt vyvíjeno firmou The Qt Company, a společně s konkurenčním aplikačním rámcem GTK se jedná o jednu z nejpobulárnějších platform pro vývoj grafických aplikací pro stolní počítače. Qt je možno pro nekomerční využití bezplatně využít pod licencí LGPLv3, s některými součástmi v GPL. [73]

Všechny komponenty tvořící grafické prvky v Qt jsou označovány jako widgety. Nacházejí se ve jmenném prostoru `Qt.GUI` a jejich základním stavebním prvkem je třída `QWidget`, ze které všechny ostatní třídy grafických komponent (widgety) dědí.

²*Simple Network Management Protocol* – síťový protokol pro dohled a správu zařízení v síti.

Samotný objekt `QWidget` představuje prázdnou plochu, na které lze zobrazit další podřízené widgety (*childrens*). Pakliže instance objektu `QWidget` není podřízena instanci jiného objektu `QWidget` (v terminologii označovaného jako *parent*), stává se `QWidget` samostatným oknem. Veškeré entity v Qt se kterými je pracováno, včetně `QWidget`, jsou pak potomky jaderného objektu `QObject`. Pro ukázkou mějme instanci klasického grafického tlačítka, v Qt pojmenovaného jako `QPushButton`. Posloupnost dědičností tohoto objektu je následující:

```
QPushButton <- QAbstractButton <- QWidget <- QObject
```

Podobným způsobem jsou odvozeny i všechny ostatní grafické widgety Qt. [74]

6.1.2 Matplotlib

Matplotlib je knihovna pro grafické vykreslování matematických funkcí, statistických dat, datových polí a struktur, a to ve 2D i ve 3D. Funkcionalita je analogická s vykreslovacím modulem prostředí MATLAB, či programem GNUplot. Matplotlib podporuje integraci do všech populárních grafických knihoven jazyka Python, včetně PyQt. Je volně šiřitelný, uvolněn pod vlastní variací BSD-kompatibilní licence PSF. [75]

Základním kamenem hierarchie objektů v matplotlib je obrazec, reprezentovaný objektem `Figure`. Na jednom obraze se může nacházet jedna nebo více sestav os, reprezentovaných objektem `Axes`. Na samotnou instanci `Axes` již lze vykreslovat jednotlivé datové objekty, např. jednoduchou funkci metodou `plot`. Při propojení s rozhraním Qt je nutné obrazec `Figure` dále ještě umístit na plátno `FigureCanvasQTAgg`, se kterým pak lze již nakládat jako s jakýmkoli jiným widgetem dědicím z objektu `QWidget`, tj. vkládat jej do jiných nadřazených widgetů Qt.

6.1.3 Xarray a numpy

`Xarray` je knihovna pro práci s mnohazměrnými značkovanými poli, resp. strukturami. Vychází z jiné knihovny pro práci s daty v Pythonu – `pandas`, a také ze souborového formátu `netCDF`. Základními datovými strukturami v `xarray` jsou `DataArray` a `Dataset`, přičemž ukázkou práce s nimi byla již uvedena v kapitole věnující se knihovně `pycomlink`, viz kap. 4.4.1. `Xarray` je volně šiřitelný, dostupný pod licencí Apache. [76]

`Numpy` je knihovna pro Python, poskytující množství vědeckých matematických funkcí a objektů mnohazměrných datových polí. Umožňuje různorodé operace, např. aritmetické, logické, manipulaci s rozměry, třídění, výběr, diskrétní Fourierovu transformaci, lineární algebru, statistické operace, a mnohé další. `Numpy` je volně šiřitelné, dostupné pod modifikovanou BSD licencí. [77]

6.2 Vnitřní struktura

Zdrojové soubory Telcorain jsou vnitřně uspořádány následovně:

- adresář `gui` – obsahuje zdrojové kódy s logikou uživatelského rozhraní, vykreslováním dat a definicemi stylů oken;
 - adresář `Icons` – obsahuje ikony uživatelského rozhraní³;
 - soubor `FormDialog.ui` – definice stylu formulářového dialogu;
 - soubor `MainWindow.ui` – definice stylu hlavního okna a ovládacího panelu výpočtu;
 - soubor `ResultsWidget.ui` – definice stylu panelu s výsledky výpočtu;
 - soubor `SelectionDialog.ui` – definice stylu okna pro výběr kanálů;
 - soubor `form_dialog.py` – aplikační logika formulářového dialogu;
 - soubor `main_window.py` – aplikační logika aplikace jako celku, hlavního okna a ovládacího panelu výpočtu;
 - soubor `results_widget.py` – aplikační logika panelu s výsledky výpočtu;
 - soubor `selection_dialog.py` – aplikační logika okna pro výběr kanálů;
- adresář `input`; – obsahuje zdrojové kódy pro načítání pracovních dat;
 - soubor `influx_manager.py` – funkce pro obsluhu InfluxDB;
 - soubor `sqlite_manager.py` – funkce pro obsluhu SQLite;
- adresář `procedures`; – obsahuje zdrojové kódy pro zpracování dat;
 - soubor `calculation.py` – úloha výpočtu srážek, spouštěna na pozadí skrze fond vláken (*thread pool*);
- adresář `writers`; – obsahuje zdrojové kódy pro načítání a zápis konfiguračních informací a uložených stavů;
 - soubor `linksets_manager.py` – funkce pro správu seznamů spojů uložených v souboru `.ini` v adresáři aplikace;
 - soubor `log_manager.py` – třída pro správu a zápis logů, přesměrování výstupu konzole do uživatelského prostředí;
- soubor `telcorain.py` – vstupní bod aplikace, vytváří instanci hlavního okna aplikace a instanci objektu `QApplication`, kterému předává další vykonávání programu voláním jeho metody `exec`.

³Jedná se o ikony Material Icons společnosti Google, volně dostupné pod licencí Apache 2.0.

6.2.1 Soubory `influx_manager.py` a `sqlite_manager.py`

Soubor `influx_manager.py` obsahuje třídy `InfluxManager` a `InfluxChecker`. První jmenovaná třída obsahuje metodu `query_signal_mean`, která pro vstupní seznam IP adres a časový interval ohraničený časovými parametry `start` a `end` navrací mnohozměrnou slovníkovou strukturu s hodnotami `rx_power` a `tx_power` klíčovými dle času, získanými z InfluxDB, a průměrovanými po intervalu, udaným parametrem `interval`. Třída `InfluxChecker` je spouštěna na pozadí skrze fond vláken, a slouží k pravidelnému dotazování se na dostupnost databázového serveru.

Připojení k serveru InfluxDB je realizováno skrze HTTP(S) REST API⁴. Konfigurační parametry pro připojení k databázi jsou načítány ze souboru `config.ini`, ze sekce `[influx2]`. Zde je definována adresa databázového serveru, organizace (jednotka v hierarchii InfluxDB), přístupový klíč k API, časový limit požadavků, a v případě aktivního zabezpečeného spojení cesta k ověřovacímu certifikátu.

Soubor `sqlite_manager.py` obsahuje třídu `SqliteManager` a také třídu `MwLink`. První jmenovaná obsahuje metodu `load_all`, která načte všechny jednotky uložené v lokální SQLite databázi do paměti. Návrátovou hodnotou metody je slovníková struktura, klíčená dle ID jednotky, jejíž hodnoty jsou objekty `MwLink`, nesoucí informace o jednotlivých mikrovlnných spojích.

Připojení do InfluxDB je realizováno skrze oficiálního klienta `influxdb-client-python` od společnosti InfluxData, volně dostupného na úložišti GitHub pod licencí MIT. Práce s databází SQLite je realizována prostřednictvím modulu `sqlite3`, který je součástí standardních předinstalovaných knihoven jazyka Python.

6.2.2 Soubor `linksets_manager.py`

Tento soubor obsahuje třídu `LinksetsManager`, obsahující metody pro správu seznamů spojů. Seznamy definují výběr mikrovlnných spojů, resp. jejich kanálů, které mají být použity při výpočtu srážek. Jsou ukládány do souboru tak, aby byly přítomny i při dalších spuštěních aplikace.

Ukládání je realizováno skrze modul `configparser`, který je součástí standardních předinstalovaných knihoven. Tento modul obsahuje třídu `ConfigParser`, pomocí které lze ukládat, nebo naopak načítat textová (obvykle konfigurační) data, a to z textových souborů standardně majících příponu `.ini`. Z konfiguračních souborů typu `.ini` je přejata i struktura vytvářených textových souborů. Soubory sestávají z textových klíčů, následovaných znakem rovnosti a textovou hodnotou. Tyto unikátní dvojice `klíč = hodnota` se nacházejí vždy na novém řádku.

⁴REST (*Representational State Transfer*) API (*Application Programming Interface*) je model jednoduchého strojového přístupu k informacím, případně jejich zápisu, prostřednictvím standardních volání protokolu HTTP(S).

Dvojice jsou navíc rozděleny do množin, nazývaných jako sekce, které jsou v souborech označovány v hranatých závorkách na samostatných řádcích, předcházejících prvkům dotyčné množiny. Každý seznam spojů je definován jako samostatná sekce v konfiguračním souboru `linksets.ini`. Tento soubor je při každém startu aktualizován tak, aby obsahoval aktuální seznam všech spojů. Záznamy v souboru sestávají z unikátního ID spoje, a z příznaku, určujícího, jak má být se spojením naloženo, stejně jako tomu bylo u nástroje `RainlinkImportMaker` (viz kap. 5.2.2):

- příznak 0 – do výpočtu není zahrnut žádný kanál spoje,
- příznak 1 – do výpočtu je zahrnut kanál z B (Tx) do A (Rx),
- příznak 2 – do výpočtu je zahrnut kanál z A (Tx) do B (Rx),
- příznak 3 – do výpočtu jsou zahrnuty oba dva kanály.

V souboru `linksets.ini` je obsažena výchozí sekce `[DEFAULT]`, obsahující všechny spoje, načtené z databáze SQLite, a to s příznakem 3. Tato sekce tedy koresponduje s výchozím seznamem spojů `<ALL>`, nacházejícím se vždy v uživatelském rozhraní. Všechny ostatní sekce v souboru `linksets.ini` zahrnují vždy i klíče s hodnotami sekce `[DEFAULT]`, pakliže nejsou uvnitř vlastní sekce přepsány jinou hodnotou. Ukládání seznamů spojů tedy funguje na rozdílovém principu, tj. uvnitř souboru jsou do sekce daného seznamu spojů zapsány pouze ty spoje, u kterých nejsou zahrnuty oba dva kanály, a to včetně příznaku 0, kdy není zahrnut ani jeden kanál.

6.2.3 Soubor `main_window.py`

Soubor obsahuje třídu hlavního okna `MainWindow`, která má na starost, krom samotné obslužné logiky grafického rozhraní, i zavádění všech ostatních modulů, jelikož objekt hlavního okna je vytvářen jako první, po převzetí řízení ze strany objektu `QApplication` za vstupním bodem aplikace. Konstruktor třídy tedy obsahuje mimo jiné posloupnost následujících kroků:

1. Přesměrování konzolového výstupu do objektu `LogManager`.
2. Inicializace fondu vláken (*thread pool*). Tento fond spravuje trvale několik rezervních vláken, na kterých je možné během chodu aplikace spouštět úlohy na pozadí, tak, aby nedošlo k blokování hlavního vlákna („zamrzání“), které zpracovává události z uživatelského rozhraní. Udržováním fondu jsou navíc odbourány režijní prostředky, vzniklé vytvářením vláken nových.⁵

⁵Oficiální interpret jazyka Python (CPython) ve skutečnosti nepodporuje skutečné zpracování úloh na více než jednom vlákně současně. Tato vlastnost je označována jako GIL – *Global Interpreter Lock*, tedy globální interpretový zámek. Mnoha vláknové zpracování úloh, v rámci jednoho spuštěného procesu interpretu CPython, je tedy pouze zdánlivé, ve skutečnosti dochází k přepínání vytvořených „virtuálních“ vláken v rámci jednoho skutečného vlákna. Problematika GILu je nad rámec této práce, obecně však lze tento problém obejít implementací mnoha procesového zpracování (*multiprocessing*), které je na seznamu funkcí k budoucí implementaci. [78]

3. Vytvoření instancí tříd definujících signály prostředí Qt, a propojení těchto signálů s odpovídajícími funkcemi. Signály představují techniku komunikace mezi různými vlákny, ale i částmi aplikace, postavené na knihovně Qt. V určitém místě kódu lze vyvolat tzv. signál, který je zachycen propojenou funkcí, která na tento signál může dále reagovat a zpracovat případná předaná data. Aplikace Telcorain v současnosti definuje vlastní signály pro úlohu výpočtu srážek a pro úlohu kontroly spojení s InfluxDB.
4. Vytvoření a spuštění časovače `QTimer`, v pravidelných intervalech spouštějící úlohu třídy `InfluxChecker` ve fondu vláken. Úloha kontroluje dostupnost databázového serveru InfluxDB, pakliže ten není dostupný, uživatel je informován a je zablokováno startování výpočtů do doby, než je spojení do databáze při další kontrole opět obnoveno.
5. Vytvoření objektu `SqliteManager` a načtení definic spojů.
6. Vytvoření objektu `LinksetsManager` a načtení seznamů spojů.

Třída hlavního okna spravuje i prvky rozhraní, příslušící záložce ovládacího panelu (*Control Panel*) parametrů výpočtů srážek. Výsledky výpočtů jsou zobrazovány na nových, dynamicky vytvářených, samostatných záložkách, jejichž obsah je vykreslován třídou `ResultsWidget`, nacházející se v souboru `results_widget.py`.

6.2.4 Soubor `calculation.py`

Soubor obsahuje stejnojmennou třídu `Calculation`, která dědí ze třídy `QRunnable`. Jedná se tak o třídu určenou ke spuštění na samostatném vlákně, či skrze fond vláken. Třída obsahuje konstruktor a metodu `run`, která je volána při zahájení práce vlákna. Třída zajišťuje celý proces výpočtu srážek, a hotové výsledky předává k vykreslení příslušnému panelu `ResultsWidget`. Každá instance třídy `Calculation` dostává přiděleno v rámci běhu aplikace unikátní ID, prostřednictvím kterého se identifikuje při zpětné komunikaci s uživatelským rozhraním. Stejně ID má přiděleno i příslušný panel `ResultsWidget`. Architektura výpočtu je navržena tak, aby s budoucí implementací mnoha procesového zpracování bylo možné výpočty spouštět simultánně. To lze koneckonců provádět již nyní, avšak z důvodu přítomnosti globálního interpretového zámku jazyka Python, taková činnost nepřináší žádný benefit (výpočet se naopak zpomalí, vlivem režijního přepínání mezi „virtuálními“ vlákny).

Konstruktoru třídy jsou předány všechny parametry zvolené na ovládacím panelu (*Control Panel*) výpočtu, nacházejícím se v hlavním okně aplikace. Konstruktor tyto parametry ukládá jako atributy objektu, aby s nimi bylo možné pracovat i v metodě `run`. Voláním této metody je výpočet spuštěn. Výpočet sestává ze čtyř fází: získání dat, kontrola a rozřazení dat do příslušných kanálů, výpočet srážek, a dvourozměrná interpolace výsledků.

Získání dat

V této fázi je dotazována databáze InfluxDB, skrze objekt `InfluxManager`, na signálové úrovni jednotek, pro které má být výpočet srážek proveden. Nejprve je proveden průchod předaným seznamem spojů a jejich kanálů, zahrnutých do výpočtu. Pakliže se jedná o mikrovlnný spoj s aktivním ATPC, tj. kolísající úrovní vysílaného signálu (Tx), jsou do databázového dotazu vždy zahrnuty obě dvě koncové jednotky, a to i v případě, že jedna z nich není do výpočtu zahrnuta, jelikož pro korekci přijímané úrovně signálu (Rx) je třeba znát i úroveň Tx protější jednotky. Pakliže se nejedná o spoj s aktivním ATPC, je v případě, že je do výpočtu zahrnuta jen jedna jednotka spoje, i do databázového dotazu zahrnuta ze spoje pouze tato jednotka, pro urychlení procesu.

Následně je proveden databázový dotaz skrze objekt `InfluxManager` a čeká se na jeho dokončení. Poté se prochází získaná data a zjišťuje se, zda data některé jednotky ve vypočítávaném časovém intervalu chybí. Pakliže ano, je o tom uživatel informován v záznamu, a ID mikrovlnného spoje je přidáno na seznam `missing_links`.

Kontrola a rozřazení dat do kanálů

V této části je iterováním po jednotlivých spojiích zahrnutých do výpočtu prováděna kontrola dat, a jejich převod do struktury `Dataset` knihovny `xarray`.

Nejprve probíhá opět kontrola, zda jsou data obou koncových jednotek obsažena v databázových výsledcích. Pakliže ne, a chybí data pouze jedné z jednotek, a zároveň se jedná o spoj s neaktivním ATPC, jsou data dané jednotky ve výpočtu ponechána. V opačném případě je daný spoj z výpočtu vyřazen, z důvodu nemožnosti provést korekturu dle změn úrovně vysílaného signálu.

Následně probíhá obdobná kontrola, v tomto případě je však zjišťováno, zda výsledky obsahují konkrétní parametr `tx_power`. Rozhodovací logika je podobná jako v předchozím případě, nachází se zde však výjimka. Během vývoje bylo zjištěno, že při exportu databázových dat ze strany provozovatele spojů došlo k chybě, kdy hodnoty vysílané úrovně signálu (Tx) rovné hodnotě 0 dBm v exportu zcela chybí. Vzhledem k tomu, že se jedná o logaritmickou jednotku vztaženou k výkonové úrovni 1 mW, kdy hodnota 0 dBm je rovna právě hodnotě 1 mW, se jedná o vážný problém. Analýzou dat bylo zjištěno, že tento stav nastává převážně u jednoho typu mikrovlnných jednotek, kdy ostatní typy mají vysílaný výkon obvykle vyšší. Tento typ je tedy přidán na seznam výjimek, kdy pokud chybí pouze hodnoty `tx_power` a jedná se o daný typ výjimečné jednotky, dá se předpokládat, že se jedná o chybu databázového exportu, a tyto hodnoty jsou dodatečně doplněny nulami.

V dalším kroku je provedena kontrola, zda počet záznamů parametru `rx_power` odpovídá počtu záznamů parametru `tx_power`, a data jsou tak na celém intervalu konzistentní. Pakliže ano, dochází k samotnému přiřazení dat do kanálu a vytvoření struktury `Dataset` pro daný kanál, voláním metody `_fill_channel_dataset`.

Nejprve je vytvářen `Dataset` pro kanál z B (Tx) do A (Rx), tj. příznaky spoje nastavené na 1 či 3. V případě příznaku 1, tj. zpracování pouze tohoto kanálu, je vytvořen i `Dataset` ke druhému kanálu z A (Tx) do B (Rx), je však vyplněn pouze nulami (vytvoření obou kanálů je nutné pro kompatibilitu s funkcemi `pycomlink`). Zcela obdobným způsobem je posléze zpracován v případě nastavených příznaků 2 či 3 i kanál z A (Tx) do B (Rx). Pakliže v jednom z kanálů nejsou k dispozici hodnoty `tx_power` a nedošlo přitom k vyřazení spoje při předchozích kontrolách, jsou hodnoty `tx_power` při vytváření struktury `Dataset` doplněny nulami.

Po vytvoření struktur `Dataset` pro oba dva kanály, jsou následně tyto dvě struktury funkcí `xarray.concat` sloučeny do sjednocené struktury `Dataset` pro daný spoj, s dvourozměrným atributem `channel_id` typu `Coordinate` (více o této funkcionalitě knihovny `xarray` bylo pojednáno v kap. 4.4.1. Tato sjednocená struktura, reprezentující jeden mikrovlnný spoj, je nakonec přidána do seznamu `calc_data`. Iterace cyklu končí a dochází ke zpracování dalšího spoje zahrnutého do výpočtu.

Výpočet srážek

Kroky v této části odpovídají přibližně obecnému postupu výpočtu pro knihovnu `pycomlink`, popsanému v kap. 4.4.1.

Nejprve je v cyklu procházen seznam `calc_data`. Z dat vysílané úrovně signálu (Tx), označených ve struktuře `Dataset` jako `ts1`, jsou zde funkcí `xarray.where` vyfiltrovány chybné hodnoty (přesahující úroveň 99 dBm). Stejně tak z dat přijímané úrovně signálu (Rx), označených jako `rs1` jsou vyfiltrovány hodnoty rovné 0 dBm nebo menší než -80 dBm. Poté je vypočítána vykompenzovaná úroveň signálu `trsl` odečtením hodnot `rs1` od hodnot `ts1`:

```
link['trsl'] = link.ts1 - link.rs1
```

Tím je iterace tohoto cyklu ukončena a dochází ke zpracování dalšího spoje v seznamu `calc_data`.

Poté jsou v novém cyklu, opět po jednotlivých spojích v `calc_data`, vykonávány jednotlivé funkce knihovny `pycomlink`. Nejprve jsou určena „suchá“ a „mokrá“ období prostřednictvím plovoucího časového okna, tj. funkce `xarray.rolling`. Poté je určena referenční hodnota signálu funkcí `pycomlink` `baseline_constant`. Následuje výpočet WAA, kdy v současnosti je do uživatelského rozhraní implementována pouze podpora časově závislé metody Schleiss, a to funkcí `pycomlink` `waa_schleiss_2013`.

Následuje výpočet útlumu deštěm na trase spoje L_{dest} :

```
link['A'] = link.trsl - link.baseline - link.waa
```

Nakonec je proveden výpočet intenzity deště R , na trase daného spoje, funkcí `pycomlink calc_R_from_A`. Tím je iterace i tohoto cyklu ukončena a dochází ke zpracování dalšího spoje v seznamu `calc_data`. Všem výše uvedeným funkcím v části výpočtu srážek, jsou předávány parametry z uživatelského rozhraní, a to z prvků ovládacího panelu (*Control Panel*).

Dvourozměrná interpolace výsledků

V této části dochází k plošné interpolaci vypočítaných srážkových intenzit R jednotlivých mikrovlnných spojů. Nejprve jsou vypočítané hodnoty v seznamu `calc_data` převzorkovány na hodnoty s časovým rozlišením 1 hodiny, funkcí `xarray.concat` jsou pak jednotlivé prvky seznamu typu `Dataset` sloučeny do jediného mnoharozměrného prvku `Dataset` dle atributu `cml_id`, tedy ID jednotlivých spojů, a nakonec je tato nově vzniklá struktura uložena do proměnné `calc_data_1h`. Samotné převzorkování je provedeno funkcí `xarray.resample`, a je vypočítáno jako průměr původních hodnot, spadajících do nově vzniklých hodinových intervalů.

Následně jsou vypočítány středové souřadnice spojů, které jsou použity jako ohniska srážkových hodnot v interpolačních mechanismech, a je vytvořen objekt `interpolator` funkcí `pycomlink IdwKdtreeInterpolator`, s parametry převzatými z ovládacího panelu. Poté je vypočítána interpolační mřížka. Jsou použity stejné hraniční konstanty, jako v případě RAINLINKu v kap. 5.2.3, to jest:

`X_MIN = 14.216468` -> min. zeměpisná délka

`X_MAX = 14.706043` -> max. zeměpisná délka

`Y_MIN = 49.915056` -> min. zeměpisná šířka

`Y_MAX = 50.228413` -> max. zeměpisná šířka

Jedná se o zeměpisné souřadnice vymežující oblast Prahy a blízkého okolí, o rozměrech 35×35 km.⁶ Souřadnicová síť mezi těmito hraničními souřadnicemi je dynamicky vypočítána funkcí `numpy.arrange` na základě kroku `interp_res`, definovaného uživatelem v ovládacím panelu. Ve výchozím nastavení aplikace se jedná o krok $0,001^\circ$, aplikovaný na zeměpisnou šířku i délku, přičemž v případě zeměpisné délky, se v oblasti okolo 50° s. š., jedná o absolutní rozlišení zhruba 71 m.

⁶Souřadnice jsou v současnosti napevno nastavené v kódu aplikace, spolu s cestou k mapovému podkladu, který je vykreslován na srážkové mapy. Tyto parametry, i mnoho dalších, je v plánu při dalším vývoji přesunout do konfiguračního souboru, odkud budou načítány, a v případě potřeby centrálně měněny.

Pro univerzální výpočet této délky d platí vztah 6.1:

$$d = 40\,075\,016,7 \cdot \frac{k}{360} \cdot \cos s \quad (m), \quad (6.1)$$

kde k je dosazovaný krok interpolace ve stupních, a s je zeměpisná šířka uvažované lokality. Naproti tomu přesnost zeměpisné šířky je na zeměpisné délce nezávislá, jelikož délka všech poledníků je shodná. Při rozlišení $0,001^\circ$ tak absolutní rozlišení zeměpisné šířky činí konstantně 111,14 m. To má za následek disproporci v absolutních rozměrech generované souřadnicové mřížky, což je vykompenzováno při vykreslení mřížky v panelu `ResultsWidget`, kdy je vykreslování prováděno na plochu čtverce, tedy s pevně nastaveným poměrem stran 1:1, čímž dojde i k přepočtu absolutních délek mezi souřadnicemi. Jelikož je vykreslování prováděno na mapový podklad v projekci Web Mercator, promítající kulovitý povrch země na rovinatý povrch, dochází k přirozenému souladu mezi souřadnicovou mřížkou a mapovým podkladem, kdy již dále pro korektní zobrazení není třeba nic přepočítávat.

Po vytvoření interpolační mřížky je vypočítán první interpolační snímek voláním objektu `interpolator`, a to celková suma srážek za vypočítávané období, tj. součet převzorkovaných hodinových dešťových intenzit R ze struktury `calc_data_1h`. V případě, že jsou k dispozici data z obou kanálů na jednom mikrovlnném spoji, jsou výsledné intenzity R dvou kanálů zprůměrovány.

Po výpočtu snímku je odeslán Qt signál `overall_done_signal`, společně se souřadnicovou mřížkou a mřížkou dešťových úhrnů. Signál je zachycen hlavním oknem, a předán příslušnému panelu `ResultsWidget` k vykreslení. Následně nastává podmínka, zda uživatel při nastavování výpočtu v ovládacím panelu aktivoval volbu „*Calculate only overall rainfall total*“. Pakliže tato volba byla aktivována, výpočet odesláním sumárního snímku končí. Toto slouží jako možnost pro zrychlené výpočty, kdy je postačující „náhledová“ informace o celkové sumě srážek. Pakliže tato volba aktivována nebyla, pokračuje se výpočtem snímků po definovaných časových intervalech.

Pro výpočet krokovaných snímků jsou podstatné dva parametry. Prvním je hodnota `output_step`, udávající délku časového intervalu v minutách, po kterém mají být vykresleny výstupní snímky. Druhým je logická hodnota `is_output_total`, která určuje, zda mají být výstupní hodnoty na krokovaných snímcích ve formě srážkového úhrnu udávaného v milimetrech, či zda se má jednat o srážkovou intenzitu R , udávanou v milimetrech za hodinu. Surová data ve struktuře `calc_data` jsou ve formě srážkových intenzit R , je tedy případně nutné provést adekvátní přepočet.

Pokud je hodnota `output_step` rovna 60, jedná se o hodinové kroky a jsou použity již existující údaje z `calc_data_1h`. Pakliže je hodnota `output_step` vyšší než vstupní rozlišení dat, dané parametrem `interval`, je provedeno opět převzorkování intenzit R na cílovou hodnotu `output_step` funkcí `xarray.resample`. Pakliže jsou hodnoty `output_step` a `interval` shodné, nedochází k žádné změně intenzit. Hodnota `output_step` nemůže být nižší než hodnota `interval`, toto je ošetřeno v uživatelském rozhraní, a pakliže by tato situace nastala, je vyvolána výjimka `ValueError`. Hodnoty jsou uloženy do nové proměnné `calc_data_steps` jako struktura `Dataset`, sloučená v nejvyšším rozměru `cml_id`.

Pakliže je aktivní volba `is_output_total`, je proveden jednoduchý přepočítání na srážkový úhrn, dle následujícího komentovaného kódu 6.1:

Výpis 6.1: Přepočítání srážkové intenzity na srážkový úhrn

```

1 # výpočet úhrnů namísto intenzit, je-li požadováno
2 if self.is_output_total:
3     # výpočet přepočítového poměru
4     # 60 min = 1 hodina -> intenzita je měřena v-mm/h
5     time_ratio = 60 / self.output_step
6     # přepiš původní hodnoty intenzit hodnotami úhrnů
7     calc_data_steps['R'] = calc_data_steps.R / time_ratio

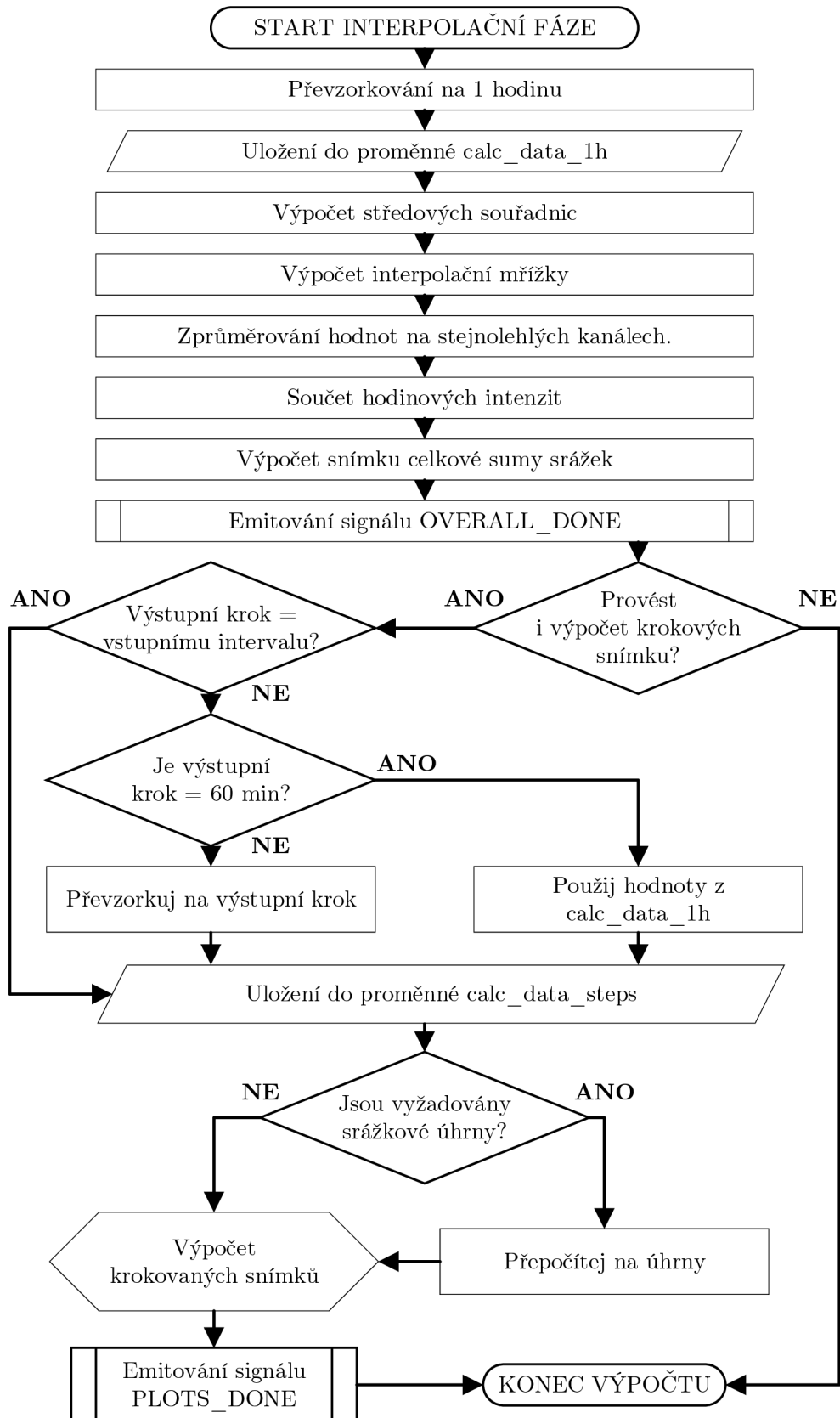
```

Nakonec je v cyklu, po časových hodnotách obsažených v `calc_data_steps`, provedeno volání objektu `interpolator`, a výsledná mřížka s dešťovými hodnotami daného snímku, je vložena do seznamu `animation_rain_grids`. Tento seznam je pak po dokončení průchodu cyklem, spolu s ostatními parametry, emitován Qt signálem `plots_done_signal`, který je zachycen hlavním oknem a parametry jsou předány příslušnému panelu `ResultsWidget` k vykreslení.

Na obrázku 6.2 je zobrazen zjednodušený vývojový diagram interpolační fáze výpočtu srážek v metodě `run` objektu `Calculation`.

Uživatelská hlášení

V průběhu celého výpočtu je pravidelně emitován signál `progress_signal`, nesoucí informaci o aktuálním stavu postupu výpočtu, a to od číselné hodnoty 0 na počátku výpočtu, po hodnotu 99, které je dosaženo po dokončení části s výpočtem srážek. Pakliže procedura pokračuje prostorovou interpolací výsledků, je tento signál znovu emitován od 0 do 99, s aktualizací po každém vypočítaném snímku. `progress_signal` je zachycován hlavním oknem, které na jeho základě aktualizuje grafický ukazatel `QProgressBar`. Dále jsou průběžně s každým krokem vypisována oznámení (a případná varování či chyby), která jsou zobrazována na záložce `System Log` hlavního okna aplikace.



Obr. 6.2: Vývojový diagram interpolační fáze výpočtu.

6.2.5 Soubor `results_widget.py`

Soubor obsahuje třídy `Canvas` a `ResultsWidget`. První jmenovaná dědí z plátna `FigureCanvasQTAgg` knihovny `matplotlib`, a předpřipravuje na tomto plátně obrazec `Figure`. Na tomto obrazci je vytvořena jedna sada os `Axes`, s ohraničeními odpovídajícími souřadnicovým konstantám `X_MIN`, `X_MAX`, `Y_MIN` a `Y_MAX`. Obrazci je dále nastavena stylizace okrajů, a nakonec je na pozadí promítnut mapový podklad funkcí `matplotlib.pyplot.imread` s parametrem cesty k PNG souboru, obsahujícím mapový snímek vypočítávané oblasti. V aplikaci je použit snímek o rozlišení 713×713 pixelů, z projektu otevřených mapových podkladů projektu `OpenStreetMap`.

Konstruktor třídy `ResultsWidget` je volán ještě těsně před zahájením výpočtu srážek v objektu `Calculation`, ze třídy hlavního okna. Konstruktoru jsou z ovládacího panelu předány parametry nutné pro vykreslení map, ale i ostatní parametry pro informování uživatele o vlastnostech proběhlého výpočtu. Třída `ResultsWidget` dědí ze třídy `QWidget`, a je koncipována jako panel otevíraný na samostatných záložkách, obsahující veškeré výsledky proběhlého dešťového výpočtu. Obsahuje dvě vykreslovací plátna výše uvedeného typu `Canvas`, a to hlavní, větší plátno `animation_canvas` v levé části panelu, kde jsou přepínány dešťové snímky interpolované po krocích, a menší plátno `overall_canvas` v pravé části panelu, kde je zobrazen jediný interpolovaný snímek, znázorňující celkový dešťový úhrn za vypočítávané období.

Hlavní plátno `animation_canvas`, jak je z názvu patrné, disponuje možností animace vykreslených snímků. K tomuto účelu je nad plátnem zobrazen kontrolní panel animace, sestávající z tlačítek spuštění/pozastavení, předchozího/následujícího snímku, a prvního/konečného snímku, a dále také ovládací posuvník typu `QSlider`, indikující polohu aktuálního snímku v časové řadě, a umožňující přeskakovat na jiná místa v čase. Posledním prvkem ovládacího panelu je značka, ukazující aktuální zobrazený čas. Tyto ovládací prvky jsou provázány s metodami třídy `ResultsWidget`:

- `start_pause_fired` – pozastavení či spuštění animace,
- `next_animation_fig` – přepnutí na následující snímek,
- `prev_animation_fig` – přepnutí na předchozí snímek,
- `first_animation_fig` – přepnutí na první snímek,
- `last_animation_fig` – přepnutí na poslední snímek,

Funkcionalitu posuvníku je nutno rozdělit na tři fáze obslužných metod:

- `_slider_pressed` – posuvník stisknut tlačítkem myši,
- `_slider_moved` – posuvník byl přesunut do jiné polohy,
- `_slider_released` – uvolnění tlačítka myši nad posuvníkem.

Předchozí uvedené metody dále vnitřně využívají dalších dvou privátních metod:

- `_update_animation_time` – aktualizace zobrazeného času,
- `_update_animation_fig` – aktualizace zobrazeného snímku.

Hlavní okno aplikace volá na základě příchozích signálů z objektu `Calculation` metody:

- `render_overall_fig` – voláno pro vykreslení souhrnného snímku,
- `render_first_animation_fig` – voláno pro vykreslení prvního z krokovaných snímků.

Záložka s instancí panelu výsledků `ResultsWidget` se stane v hlavním okně viditelnou až po vykreslení souhrnného snímku metodou `render_overall_fig`. Do té doby panel existuje v paměti, ale není zobrazen, dokud není alespoň z části naplněn obsahem.

Nejdůležitější metodou pro vykreslení interpolovaných snímků je privátní metoda `_refresh_fig`. Vstupními parametry jsou vykreslovací plátno, souřadnicová mřížka, mřížka s hodnotami deště, a logická hodnota indikující, zda se jedná o srážkový úhrn či intenzitu. V metodě nejprve proběhne kontrola, zda plátno již obsahuje vykreslené informace. Pakliže ano, je stávající obsah odstraněn.

Poté je vykreslena samotná barevná vrstva, dle souřadnicových mřížek a dešťových hodnot v daných bodech, a to metodou `pcolormesh` objektu sady `os Axes` na daném vykreslovacím plátně. Dalšími parametry této metody jsou kromě souřadnicových mřížek jsou ještě objekt barevné mapy `Colormap`, nastavení logaritmické barevné škály hodnot objektem `Normalize`, a konstanta průhlednosti barevné vrstvy. Nakonec je upraven popisek popisného barevného pruhu, dle toho, zda se jedná o srážkový úhrn, či intenzitu.

Barevná mapa typu `Colormap` je předpřipravena v konstruktoru `ResultsWidget`. Mapa vychází z jedné z barevných map knihovny `matplotlib`, pojmenované `turbo`. Tato mapa je po rozdělení na 15 diskretních dílů, a při použití logaritmického měřítka, téměř identická s barevnou mapou, užívanou v aplikacích ČHMÚ.

Dále panel `ResultsWidget` obsahuje také tlačítko pro uložení aktuálního zobrazeného snímku, a tlačítko pro otevření složky s uloženými snímky. Tlačítko pro uložení volá třídní metodu `save_fired`, která po provedení všech kontrol spojených s vytvářením cílové složky a generováním názvu souborů, využívá funkce `print_figure` knihovny `matplotlib` k uložení snímku. Ukládání je podporováno do rastrových i vektorových formátů, na ovládacím panelu hlavního okna si lze zvolit, jaké typy souborů mají být uloženy, a také zde lze navolit cílovou cestu, do které má být obsah uložen. K té je vždy ještě přidán adresář s časovou značkou spuštění daného výpočtu. Při uložení prvního snímku je zároveň uložen i snímek se sumární mapou dešťového úhrnu. Soubory jsou ukládány pod časovou maskou: `yyyy-MM-dd_HH-mm-ss` a příponou `_, či _.`

6.3 Uživatelské rozhraní

Ústředním uživatelským rozhraním aplikace je její hlavní okno. To sestává se záhloví s názvem programu, menu s nabídkami, hlavního záložkového panelu a stavové lišty. Stavová lišta obsahuje v pravé části grafický indikátor průběhu výpočtu. Dále obsahuje indikaci stavu spojení s InfluxDB, a zbytek levého prostor stavové lišty je rezervován pro oznámení.

Hlavní záložkový panel obsahuje:

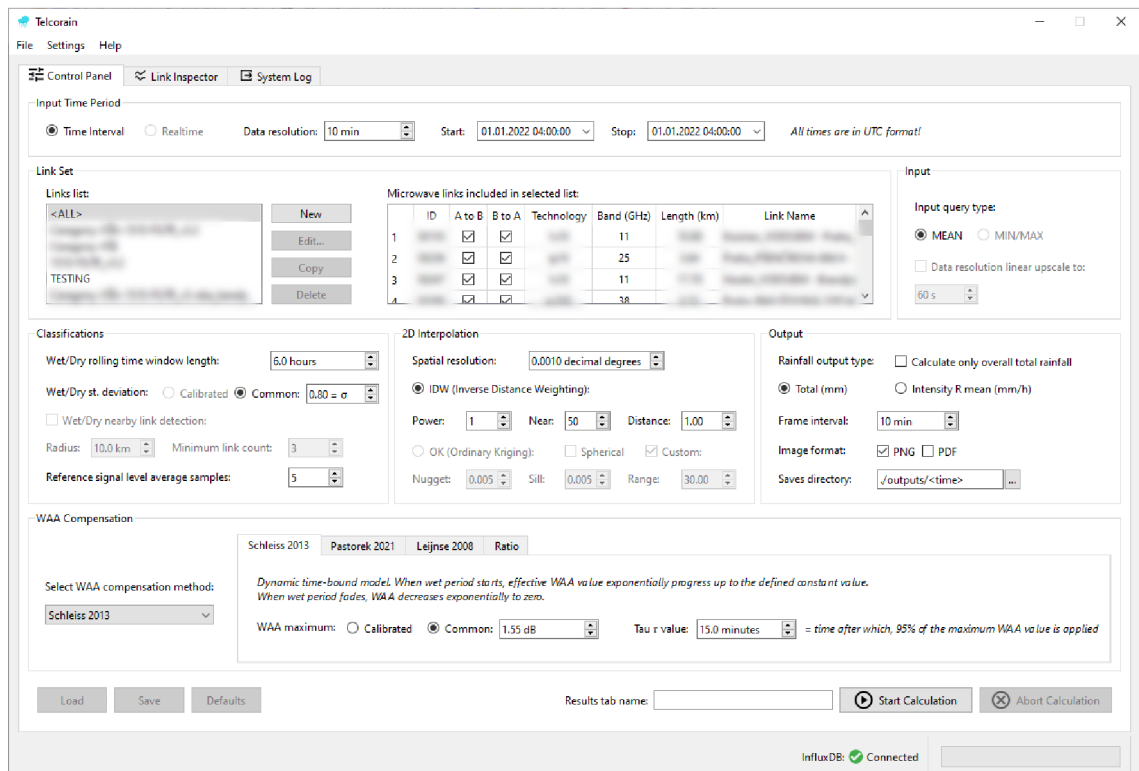
- *Control Panel* – ovládací panel výpočtu,
- *System Log* – aplikační záznamník – log,
- *Results* – dynamicky vytvářené panely s výsledky – zobrazují se po dokončení výpočtu. Panely s výsledky je možné i zavírat, a tlačítkem Close Result z vnitřní strany panelu.

6.3.1 Ovládací panel

V rámci ovládacího panelu probíhá nastavování veškerých parametrů výpočtu. Panel sestává ze sektorů zobrazených na obrázku 6.3. Skutečné rozložení prvků lze pak vidět na snímku obrazovky na obrázku 6.4.

Nastavení vstupního časového intervalu: start , stop , rozlišení dat		
Seznamy spojů	Výpis spojů aktuálního seznamu spojů	Nastavení vstupních hodnot (<i>neaktivní</i>)
Detekce mokrého a suchého období + určení referenční hodnoty signálu	Nastavení 2D plošné interpolace	Nastavení výstupu (krok snímků, formát, úhrn/intenzita, atd.)
Nastavení WAA		

Obr. 6.3: Schéma rozložení prvků ovládacího panelu výpočtů aplikace Telcorain.



Obr. 6.4: Ovládací panel výpočtů aplikace Telcorain.

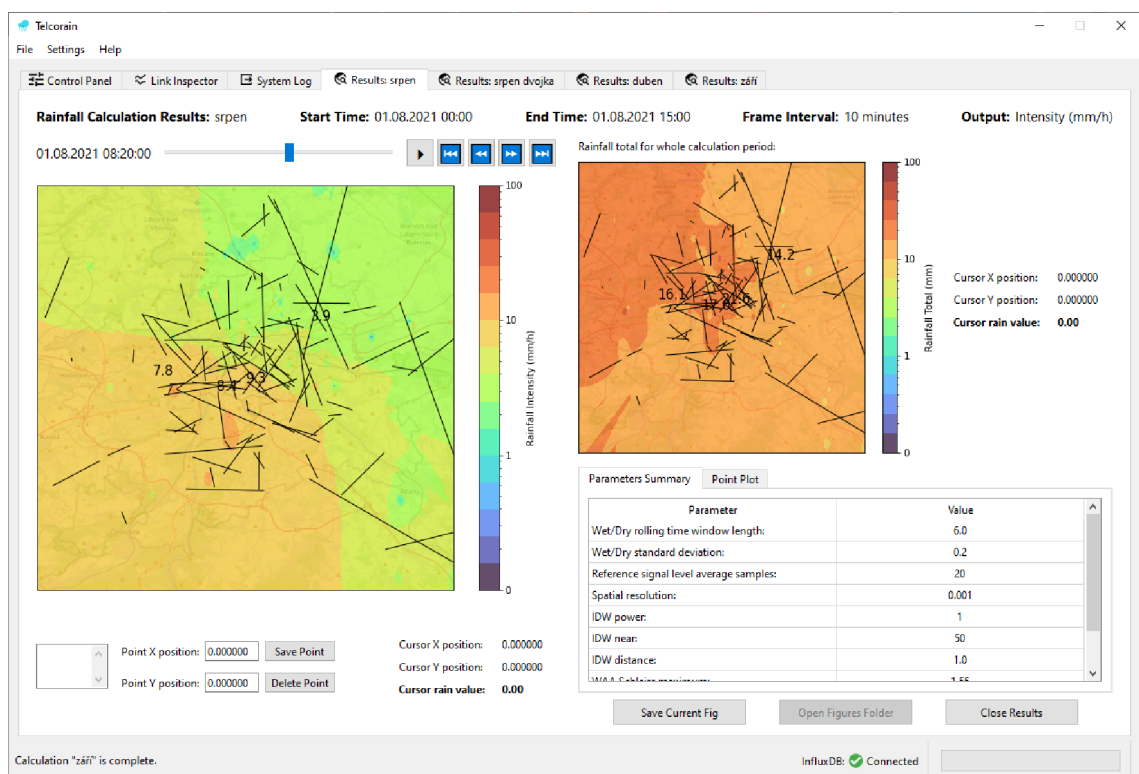
Link lists jsou seznamy zařízení definující, které mikrovlnné jednotky, a které jejich kanály, mají být zahrnuty do výpočtu. Seznamy lze vytvářet, editovat, kopírovat a mazat tlačítka k tomu určenými. Po stisknutí tlačítka *Edit* se otevírá výběrčí kanálů, zobrazen na snímku 6.5. Zde jsou zobrazeny všechny spoje obsažené v lokální SQLite databázi. Uživatel může libovolně zatrhnávat, které kanály si přeje mít obsažené v daném seznamu.

6.3.2 Aplikační log

Tato záložka obsahuje záznamy všech programových hlášení od spuštění aplikace. Hlášení z jednotlivých výpočtů jsou vždy uvozena štítkem [CALC ID: X], kde číslice X označuje identifikátor daného výpočtu (obnovuje se na hodnotě jedna s každým startem aplikace). Ukázka logu je na snímku 6.6.

6.3.3 Panel s výsledky

Na snímku 6.7 je zobrazen výstupní panel s výsledky výpočtů. V záhlaví panelu se nachází základní informace o výpočtu. V levé části je zobrazeno animované plátno krokovaných dešťových úhrnů či intenzit. V pravé části panelu je zobrazen úhrnný snímek, udávající celkové množství srážek spadlé za celý časový interval daného výpočtu. Pod tímto snímekem se nachází informativní seznam, obsahující seznam nastavených parametrů, se kterými byl daný výpočet proveden. Ještě níže pod seznamem se pak nacházejí ovládací tlačítka pro uložení snímků, otevření složky se snímky, a zavření záložky.



Obr. 6.7: Výstupní panel výpočtů aplikace Telcorain.

Nad animovaným plátnem se nachází ovládání snímků a animace. Posuvníkem se lze přesouvat po časové ose výpočtu, zatímco tlačítka lze animaci pozastavit, spustit, a přepínat se mezi jednotlivými snímky.

6.4 Výsledky výpočtů aplikací Telcorain

Výpočty aplikací Telcorain byly uskutečněny na stejné množině zařízení, jako výpočty prostřednictvím funkcí knihovny RAINLINK. Konkrétně se jedná o zařízení ze druhé etapy, viz bilance vstupních zařízení v kap. 5.3. Několik málo spojů bylo dodatečně ze seznamu vyřazeno, či naopak do něj bylo přidáno.

V aplikaci Telcorain se výrazněji projevila potřeba kalibrace jednotlivých spojů, pro dosažení nejlepších výsledků. Jako poměrně citlivá na individuální nastavení se ukázala být detekce „suchých“/„mokrých“ období, fungující na principu výpočtu směrodatné odchylky na hodnotách útlumu v plovoucím časovém okně. Na případnou kalibrovatelnost již koneckonců upozorňují i samotní autoři knihovny pycomlink. Z časových důvodů byly provedeny pouze výpočty s globálně nastavenými parametry, a nikoli kalibrovanými. Stejně tak byla otestována prozatím pouze jedna metoda kompenzace WAA, a to časově závislá metoda Schleiss (viz kap. 4.2.1).

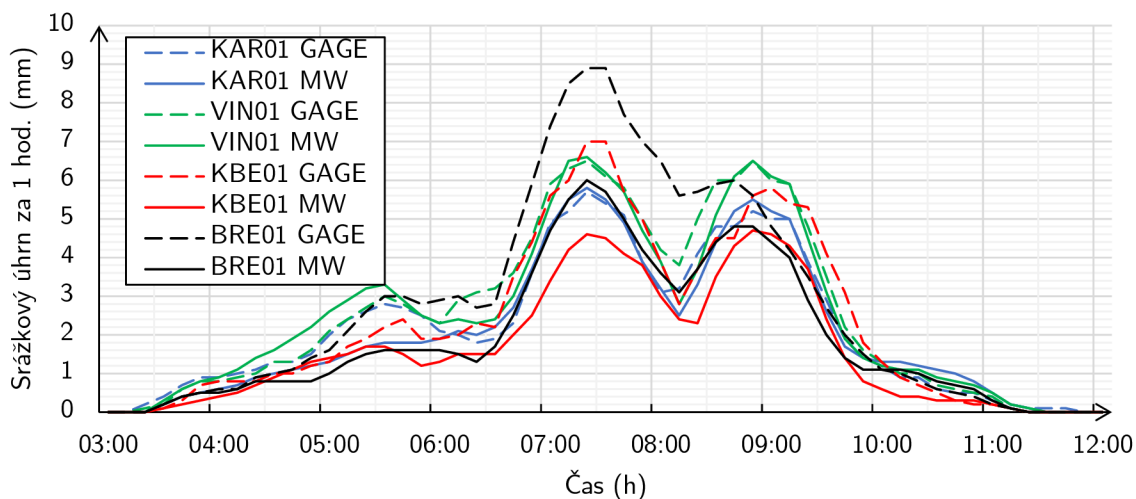
V této kapitole jsou pro porovnání uvedeny výsledky výpočtů pro stejné tři dešťové události, které byly uváděny i v kap. 5.3. Pro všechny tři výpočty byla použita shodná sada parametrů, uvedená v tab. 6.1 níže.

Tab. 6.1: Hodnoty parametrů výpočtu srážek v aplikaci Telcorain.

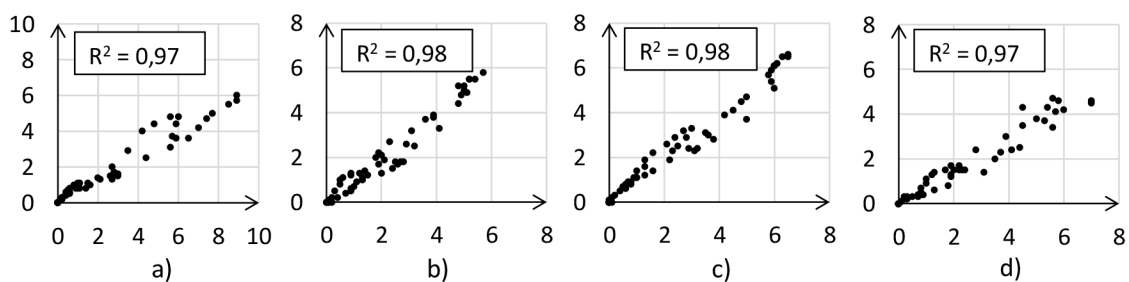
Parametr	Nastavení
Délka plovoucího okna detekce mokrých období	6 h
Směrodatná odchylka detekce mokrých období	0,2
Počet průměrovaných vzorků signálu tvořících referenci	20
Interpolační rozlišení	0,001 °
Interpolační technika:	IDW
Mocnina IDW:	1
IDW <i>n</i> near:	50
IDW <i>max</i> _distance:	1
Metoda kompenzace WAA:	Časová (Schleiss)
WAA Schleiss WAA_{max} :	1,55 dB
WAA Schleiss τ :	15 min

6.4.1 Déšť srpen

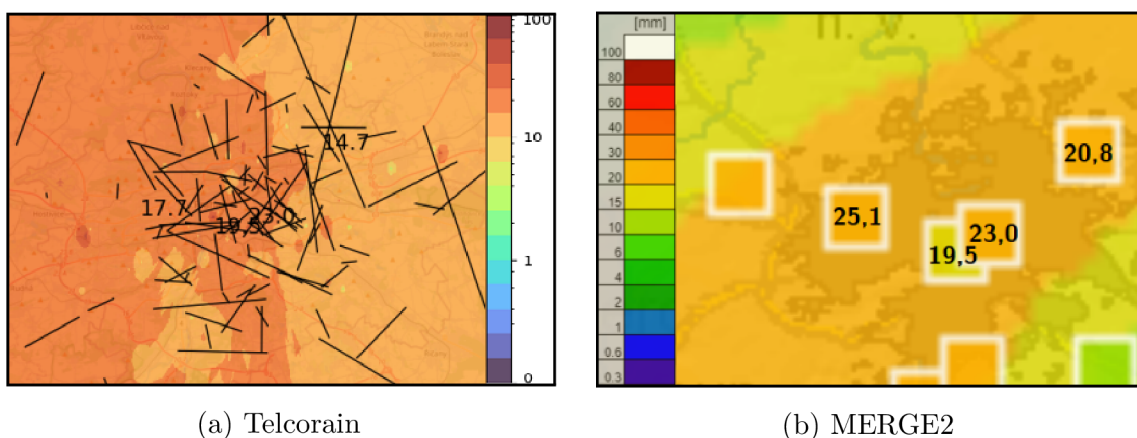
Jedná se o déšť z 01.08.2021 03:00 – 01.08.2021 12:00 UTC. Na následujících obrázcích jsou vyneseny stejné průběhy, jako v případě výpočtu v kap. 5.3. Na obr. 6.8 lze tak vidět průběhy srážkoměrů v lokalitách Břevnov, Karlov, Vinohrady a Kbely, společně s průběhy odečtenými z bodů na výstupních mapách aplikace Telcorain.



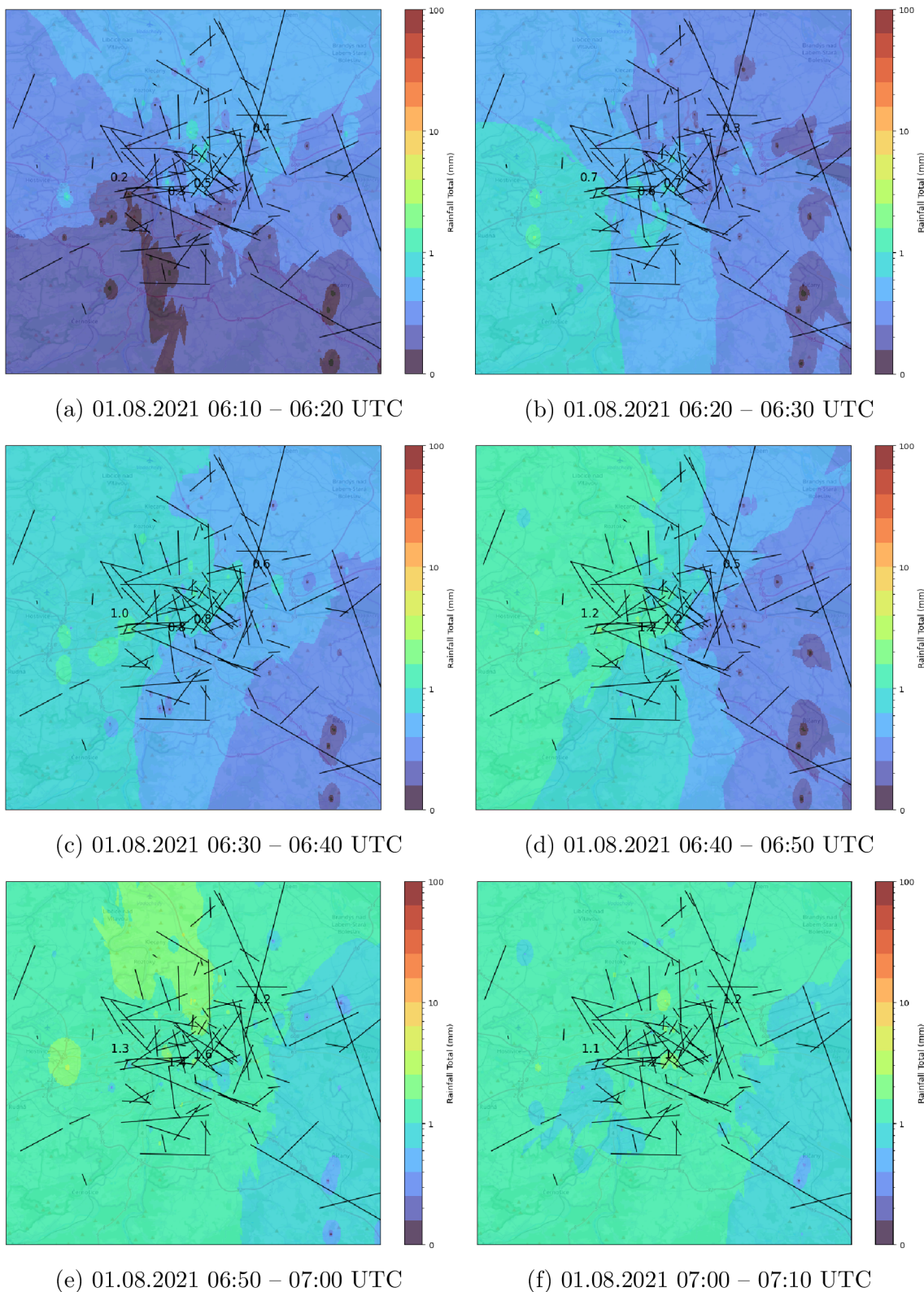
Obr. 6.8: Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů Telcorainu v porovnání s hodnotami MERGE2. Děšť srpen.



Obr. 6.9: Korelační diagramy interpolovaných hodnot s hodnotami ČHMÚ. Stanice: a) Břevnov, b) Karlov, c) Vinohrady, d) Kbely. Telcorain, děšť srpen.



Obr. 6.10: Srovnání 24h odhadu za období 31.07.2021 23:00 – 01.08.2021 23:00 UTC. Telcorain, děšť srpen.



Obr. 6.11: Ukázka srážkových map Telcorain s 10m krokem.

Na obrázku 6.9 jsou vyneseny korelační diagramy R^2 , vyjadřující míru shody vypočítaných hodnot s hodnotami naměřenými srážkoměry. Na obrázku 6.10a je zobrazen výstupní 24hodinový srážkový úhrn z aplikace Telcorain, v porovnání s hodnotami 24hodinového úhrnu na výše uvedených čtyřech srážkoměrech ČHMÚ, zobrazeným na obrázku 6.10b. Nakonec na sérii obrázků 6.11 je opět pro ukázkou zobrazen úsek výstupních dešťových map. Jedná se o identický časový úsek, jako v případě ukázky knihovny RAINLINK, tj. hodinová posloupnost vývoje deště po desetiminutových krocích.

Na grafu 6.8 lze vidět, že srážkový odhad je prakticky přesný v případě prostředních dvou lokalit, tj. B – Karlov a C – Vinohrady, kde také v obou případech dosahuje korelační shody $R^2 = 0,98$. U okrajových lokalit A – Břevnov, a D – Kbely, je v obou případech průběh mírně podhodnocen, ve vrcholu cca o 2 mm, přesto se však i v těchto případech korelace R^2 drží na relativně vysoké hodnotě 0,97.

Výše uvedené je přímo potvrzeno souhrnným 24 hodinovým zobrazením na obrázcích 6.10, kde prostřední lokality B a C vykazují prakticky identický srážkový úhrn 19,5 a 23 mm. Okrajové lokality pak potvrzují podhodnocený trend, se 17,7 mm oproti 25,1 mm, a 14,7 mm oproti 20,8 mm.

6.4.2 Déšť srpen II

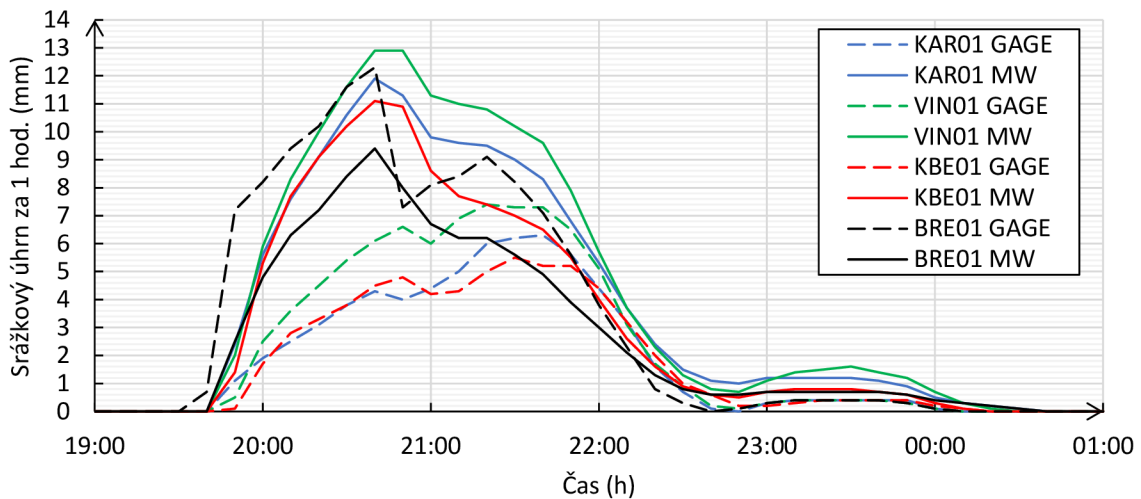
Jedná se o déšť ze 07.08.2021 19:00 – 08.08.2021 01:00 UTC. Průběhy srážkoměrů spolu s vypočítanými průběhy lze vidět na obr. 6.12. Na obr. 6.13 jsou vyneseny korelační diagramy jednotlivých dvojic průběhů.

Tento déšť byl charakteristický poměrně silným náběhem. Stejně jako v případě výpočtu knihovnou RAINLINK, i ve výpočtu aplikací Telcorain je zřetelné poměrně silné nadhodnocení vypočítaných průběhů. Při bližším pohledu je však patrné, že se charakteristiky jednotlivých výsledků liší. Zatímco v případě výpočtu RAINLINKu bylo dosaženo nejvyšší shody u srážkoměru A – Břevnov, a ostatní vypočítané průběhy byly sice nadhodnoceny, avšak pod úrovní průběhu Březnova, ve výsledcích Telcorainu je situace zcela opačná.

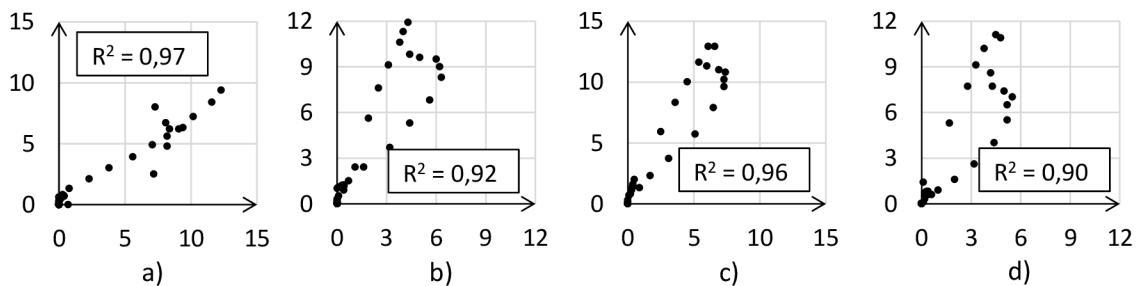
Nejslabším vypočítaným průběhem ve výsledcích Telcorainu, je průběh v bodě lokality A – Břevnov, ten je i pod úrovní naměřeno průběhu srážkoměrem v daném místě, avšak nad úrovní ostatních naměřených průběhů. Zbylé vypočítané průběhy jsou všechny naopak silnější, přičemž paradoxně napodobují průběh srážkoměru v lokalitě Břevnov.

Korelační shoda R^2 má hodnoty 0,97; 0,92; 0,96 a 0,90. V případě výpočtu funkcemi RAINLINK bylo dosaženo hodnot 0,96; 0,88; 0,94; 0,93.

Absolutní odchylky v případě RAINLINKu činily ve vrcholu cca 5 mm pro lokalitu Karlov; 2 mm pro lokalitu Vinohrady; 1,5 mm pro lokalitu Kbely a u lokality Břevnov pak 3 mm, z důvodu náhlého propadu za vrcholem naměřených srážek. Tyto odchylky pak u měření aplikací Telcorain dosáhly hodnoty (ve stejném pořadí) přibližně: 8 mm; 6 mm; 6 mm a 2,5 mm.



Obr. 6.12: Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů Telcorainu v porovnání s hodnotami MERGE2. Déšť srpen II.



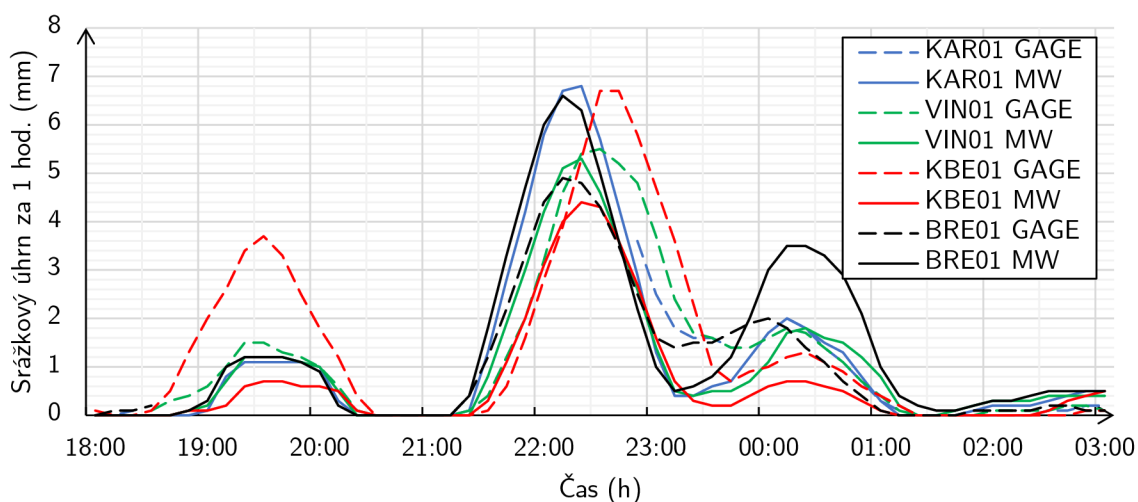
Obr. 6.13: Korelační diagramy interpolovaných hodnot s hodnotami ČHMÚ. Stanice: a) Břevnov, b) Karlov, c) Vinohrady, d) Kbely. Telcorain, déšť srpen II.

6.4.3 Déšť březen

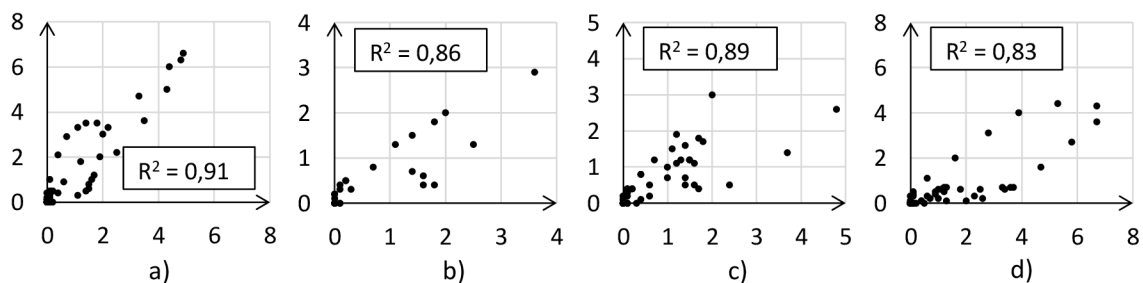
Tento déšť nastal v čase 04.03.2021 18:00 – 05.03.2021 03:00 UTC. Průběhy srážkoměrů spolu s vypočítanými průběhy lze vidět na obr. 6.14 a na obr. 6.15 jsou vyneseny korelační diagramy jednotlivých dvojic průběhů.

Stejně jako ve výstupu z funkcí RAINLINK, i zde lze dobře pozorovat přesun dešťové aktivity ve směru ze západu na východ, tj. od lokality A – Břevnov po lokalitu D – Kbely. Charakteristiky jsou velmi podobné jako u výstupu z RAINLINKu, místy však dochází k výraznějším nadhodnocením/podhodnocením. Lze pozorovat výraznější podhodnocení vypočítaného průběhu v lokalitě Kbely, které v počáteční fázi dosahuje rozdílu až 3 mm. Vypočítaný průběh v lokalitě Břevnov je nadhodnocen v prostředním vrcholu o 1,5 mm, následně se naopak propadá o cca 1 mm, načež v závěru opět dosahuje nadhodnocení o 2 mm. Stejný vypočítaný průběh měla lokalita Břevnov i v případě výsledků z funkcí RAINLINK, kde však ve třetím vrcholu deště dosáhla ještě výraznějšího nadhodnocení.

V tomto výpočtu bylo dosaženo nejnižších korelačních shod R^2 , s hodnotami 0,91; 0,86; 0,89; a 0,83. V případě výstupu z RAINLINKu bylo dosaženo hodnot 0,91; 0,90; 0,93 a 0,97. Největší rozdíl činí především poslední lokalita D – Kbely.



Obr. 6.14: Časové průběhy hodnot bodových srážkových úhrnů Telcorainu v porovnání s hodnotami MERGE2. Déšť březen.



Obr. 6.15: Korelační diagramy interpolovaných hodnot s hodnotami ČHMÚ. Stanice: a) Břevnov, b) Karlov, c) Vinohrady, d) Kbely. Telcorain, déšť březen.

Závěr

Tato diplomová práce se zabývala problematikou měření atmosférických srážek prostřednictvím nepřímé metody, spočívající v jejich výpočtu ze zaznamenaného útlumu rádiového signálu mikrovlnných spojů typu bod-bod. První část práce byla pojata jako komplexní analýza této problematiky, věnující se tématům od fyzikálních vlastností rádiových spojů a vzniku útlumů, přes vztah srážkové intenzity a útlumu, až po současné výzkumy efektu útlumu mokrou anténou. Druhá část práce byla zaměřena na přenesení získaných poznatků do praxe a vývoj aplikačního řešení pro výpočet srážek, které integruje všechny funkční části zpracovávacího řetězce do jednoho celku, který lze snadno prezentovat dalším uživatelům.

Část práce, věnující se šíření mikrovlnného signálu prostředím a útlumu signálu deštěm, ukázala, že ačkoli si lze vztah pro výpočet intenzity deště R na základě útlumu A snadno odvodit úpravou rovnice z obecně platného doporučení ITU-R, určení kvalitních odhadů srážkových intenzit, na základě útlumu signálu mikrovlnných spojů, není tak přímým postupem, jak by se mohlo na první pohled zdát. Přestože se různé výzkumnické komunity tomuto tématu věnují již více než 15 let, stále nebyly uspokojivě vyřešeny všechny výzvy tak, aby se měření dešťů mikrovlnnými spoji ve spolehlivosti vyrovnalo měřením meteorologickými radary (či je dokonce překonalo).

Měření jiných než dešťových srážek, tj. zejména v zimním období, pak momentálně zůstává nedostižnou výzvou, z důvodu vzniku obtížně předvídatelných ledových a sněhových vrstev na samotných anténách mikrovlnných spojů. Řešení tohoto problému se tak pravděpodobně ani v budoucnu neobejde bez fyzických zásahů na anténách, což však odbourává největší potenciální výhodu měření srážek touto metodou, kterou jsou nulové investiční náklady do hardwarového vybavení.

Jednou z překážek většího rozmachu a nasazení této metody měření srážek, může být mimo jiné i dostupnost zdrojových dat. Ačkoli všichni provozovatelé datových a mikrovlnných spojů zaznamenávají potřebné parametry úrovně přijímaného a vysílaného signálu pro svou vlastní potřebu, z důvodů údržby a dohledu kvality sítě, získání přístupu k těmto datům může znamenat problém zejména na obchodní úrovni.

V současnosti největší výzvou v přesném měření dešťových srážek mikrovlnnými spoji, je vliv útlumu způsobeného efektem mokré antény. Ačkoli je tento jev předmětem několika výzkumů v posledních letech, stále nebylo dosaženo jasné shody na tom, jak tento útlum vyčíslit a modelovat jej.

Ve druhé části práce byl proveden nejprve neautomatizovaný výpočet intenzit dešťů, pro ověření nabytých poznatků a vyčíslení útlumu efektem mokré antény (označovaného jako WAA), a to na základě parametrů z mikrovlnných spojů operujících ve frekvenčním pásmu 10 GHz. Při porovnání se srážkovými modely ČHMÚ

bylo zjištěno, že ve všech případech došlo k výraznému, někde i několikanásobnému nadhodnocení srážkových intenzit, což potvrdilo předpokládaný vliv WAA. Při vyčíslení tohoto vlivu byly získány hodnoty WAA od 1,23 dB do 1,80 dB, přičemž byl aplikován jednoduchý model kompenzace tohoto útlumu procentuálně danou konstantou, specifikující poměrnou část dešťového útlumu, připadající WAA. Hodnota této procentuální konstanty byla určena zvlášť pro každý spoj, a pohybovala se mezi 60 a 65 %. Při validačních výpočtech na jiné dešťové události byly získány hodnoty korelačních koeficientů R^2 od 0,88 do 0,95.

Pro další postup práce a umožnění hromadných výpočtů, byl obdržen od provozovatele mikrovlnných spojů historický export parametrů velkého množství reálných mikrovlnných spojů, s 5minutovým rozlišením zaznamenaných dat. Tato data byla uložena v databázovém úložišti InfluxDB, specializovaném na uložení velkých objemů dat časových řad.

Následně byla pro hromadný plošný výpočet srážek z dat mikrovlnných spojů využita knihovna RAINLINK od kolektivu nizozemských autorů Overeem a spol., napsaná v jazyce R. Pro tento účel byl naprogramován nástroj RainlinkImportMaker v jazyce C#, ovládaný z příkazové řádky, sloužící jako most mezi daty v databázi InfluxDB a vstupem skriptu volajícím knihovni funkce RAINLINK. Nástroj využívá načítání spojů z lokální databáze SQLite, a umožňuje prostřednictvím textového seznamu specifikovat, které konkrétní mikrovlnné spoje, a které konkrétní kanály, mají být zahrnuty do výpočtu. Následně provede databázový dotaz a vysílající úroveň signálu vykompenzuje tak, aby její změny neovlivňovaly výpočet útlumu, resp. srážek.

Plošné výpočty byly prováděny pro 119 vybraných mikrovlnných spojů různých modelů, nacházejících se na území Prahy a blízkého okolí, přičemž celková zahrnutá plocha, na které byla prováděna plošná interpolace výsledků, měla rozměry 35×35 km, tj. 1225 km^2 .

Výpočty RAINLINK proběhly nejprve pouze na omezené skupině 10 GHz mikrovlnných jednotek, a posléze byla tato skupina rozšířena i o další jednotky, což zahustilo zdrojovou síť a bylo dosaženo lehkého zvýšení přesnosti dat. Při různých dešťových událostech bylo při validaci srážkoměry ČHMÚ dosaženo korelačních koeficientů R^2 o hodnotách 0,88 až 0,99. Ve výpočtech RAINLINK byl zahrnut nejjednodušší konstantní model kompenzace WAA.

V rámci dalšího postupu práce byla vytvořena aplikace pro stolní PC, s grafickým uživatelským rozhraním, sdružující všechny potřebné nástroje pro výpočet dešťových srážek do jednoho celku, umožňující obsluhu i uživatelům bez znalosti skriptování. Tato aplikace byla pojmenována Telcorain, je naprogramována v jazyce Python, a je postavena na druhé existující knihovně pro výpočet srážek z dat mikrovlnných spojů, kterou je knihovna pycomlink od kolektivu německých autorů Chwala a spol.

Aplikace Telcorain disponuje grafickým uživatelským rozhraním realizovaným multiplatformní knihovnou PyQt. O vykreslování snímků se stará knihovna matplotlib. Aplikace vykonává všechny funkce, které zajišťoval nástroj RainlinkImportMaker, tedy komunikaci s databázovými úložišti a kompenzaci úrovně vysílaného výkonu, a dále umožňuje: uživatelskou volbu všech parametrů výpočtu ovládacími prvky; vytváření a editaci seznamů spojů a kanálů zahrnutých do výpočtu; volbu mezi výpočtem srážkové intenzity či úhrnu; sdružování několika výpočtů na záložkách a přepínání mezi nimi; nastavení časového kroku, po kterém mají být vykreslovány výsledné mapové snímky srážek; animaci těchto snímků; ukládání snímků na disk; a další. Mnohé další funkce jsou připraveny pro pozdější integraci.

Z důvodu nedostatku času pro intenzivnější testování, byla do aplikace Telcorain integrována prozatím pouze základní funkcionalita pro detekci mokrých období, a také způsob kompenzace WAA prostřednictvím, dle aktuálních odborných studií již ne zcela optimální, časově závislé metody, publikované německými autory Schleiss a spol. v roce 2013.

Vlivem těchto skutečností, Telcorain nepodal lepší výsledky při validaci deštových výpočtů, než při výpočtech prostřednictvím funkcí RAINLINK. Při výpočtech identických deštových událostí, byly výsledné odchylky a korelační koeficienty stejné, nebo horší, v porovnání s výsledky získanými funkcemi RAINLINK. Hodnoty korelačních koeficientů R^2 , při validaci daty ČHMÚ, se při výpočtech aplikací Telcorain pohybovaly mezi hodnotami 0,83 a 0,98.

Potenciál může skýtat případný další vývoj aplikace Telcorain, a to jednak v integraci všech zbývajících funkcionalit dle aktuálních poznatků, ale především pak následně i ve vývoji vlastních mechanismů pro zpřesnění výpočtu deštových srážek. Jedněmi z nich může být např. vylepšená metoda plošné interpolace, pracující se zdrojovými body nikoli pouze ve středech spojů, nýbrž po celé délce spojových tras; oddělené posuzování suché/mokré antény na koncových jednotkách dlouhých spojů; či práce s teplotou mikrovlnné jednotky při vyhodnocování kvality spoje, a tedy přidělení případných vah jednotlivých spojům v plošné interpolaci.

Literatura

- [1] VYSOUDIL, Miroslav. *Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a klimatologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3892-4.
- [2] PAVELKOVÁ CHMELOVÁ, Renata a Jindřich FRAJER. *Základy fyzické geografie 1: Hydrologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3843-6.
- [3] *Elektronický meteorologický slovník* [online]. Česká meteorologická společnost, 2019 [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <<http://slovník.cmes.cz/>>.
- [4] STARÝ, Miloš. *Hydrologie* [online]. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2005, 213 s. [cit. 2021-10-23]. Dostupné z: <<http://lences.cz/skola/subory/Skripta/BS02-Hydrologie/M01-Hydrologie.pdf>>.
- [5] ATKINS, Nolan. Formation of Haze, Fog, and Clouds: Condensation Nuclei. *Survey of Meteorology* [online]. Lyndon: Lyndon State College [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <<https://apollo.nvu.vsc.edu/classes/met130/notes/chapter5/ccn.html>>.
- [6] RIBEIRO, A. S., M. C. ALMEIDA, M. G. COX, et al. Role of measurement uncertainty in the comparison of average areal rainfall methods. *Metrologia*. 2021, **58**(4), 044001. ISSN 0026-1394. Dostupné z: doi:10.1088/1681-7575/ac0d49
- [7] NOVÁK, Petr a Hana KYZNAROVÁ. MERGE2 – modernizovaný systém kvantitativních odhadů srážek provozovaný v českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2016, **69**(5), 137-144. ISSN 0026-1173.
- [8] Radarová síť ČHMÚ. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2015 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/index.html>.
- [9] KRČMÁŘ, Petr a Petr NOVÁK. Na návštěvě meteoradaru Skalky: kde se berou radarové mapy srážek. *Root.cz* [online]. 15. 4. 2019 [cit. 2021-11-07]. ISSN 1212-8309. Dostupné z: <<https://www.root.cz/clanky/na-navsteve-meteoradaru-skalky-kdyz-ctvrt-megawattu-sviti-do-mraku/>>
- [10] RAUBER, Robert M. a Stephen William NESBITT. *Radar meteorology: a first course*. Hoboken: Wiley Blackwell, 2018. Advancing weather and climate science. ISBN 978-111-8432-624.

- [11] NOVÁK, Petr a Hana KYZNAROVÁ. Využití radarových měření pro kvantitativní odhady a nowcasting srážek v Českém hydrometeorologickém úřadu. *Meteorologické zprávy*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2013, **66**(6), 175-181. ISSN 0026-1173.
- [12] Principy digitální mikrovlnné komunikace. In: *Alcoma* [online]. Praha: ALCOMA, 2012 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.alcoma.cz/media/document/2-manual-cz-principy-digitalni-mikrovlne-komunikace-2.1.pdf>
- [13] KASAL, Miroslav. *Směrové a družicové spoje: přednášky*. Vyd. 2. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2003. ISBN 80-214-2496-6.
- [14] VODRÁŽKA, Jiří a Zdeněk BRABEC. *Technologie k připojení základnových stanic mobilní sítě k páteřní síti* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra telekomunikační techniky, 2015 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/o-ctu/66411/soubory/cvut-ctubackhaultechnologie70def-tiskkorekce01002-vodafone-4-4-2016.pdf>
- [15] Strategie správy rádiového spektra. *Český telekomunikační úřad* [online]. Praha: Český telekomunikační úřad, 2015 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/stranky/49264/soubory/strategiesprspektra2015.pdf>
- [16] *Všeobecné oprávnění č. VO-R/14/05.2020-7 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení v kmitočtovém pásmu 10 GHz*. In: . Praha: Český telekomunikační úřad, 2020. Dostupné také z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/14/05.2020-7/obrazky/vo-r-14-052020-7.pdf>
- [17] *Všeobecné oprávnění č. VO-R/12/11.2021-11 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4 GHz až 71 GHz*. Praha: Český telekomunikační úřad, 2021. Dostupné také z: https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/vo-r_12-112021-11.pdf
- [18] Rušení meteorologických radiolokátorů CZRAD. *Amatérská meteorologická společnost, z.s.* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://radar4ctu.bourky.cz/Ruseni.html>
- [19] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. *Moderní radiotechnika*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0132-2.

- [20] ITU-R P.525-4. *Calculation of free-space attenuation*. Geneva: International Telecommunication Union, 2019.
- [21] ITU-R P.341-7. *The concept of transmission loss for radio links*. Geneva: International Telecommunication Union, 2019.
- [22] HRISTOV, Hristo D. *Fresnel Zones in Wireless Links, Zone Plate Lenses and Antennas*. Norwood: Artech House, 2000. ISBN 978-0-89006-849-6.
- [23] AHAD, Md Atiqur Rahman, Upal MAHBUB a Tauhidur RAHMAN. *Contactless Human Activity Analysis*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2021. ISBN 978-3-030-68589-8.
- [24] ITU-R P.526-15. *Propagation by diffraction*. Geneva: International Telecommunication Union, 2019.
- [25] ITU-R P.530-18. *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. Geneva: International Telecommunication Union, 2021.
- [26] ITU-R P.676-12. *Attenuation by atmospheric gases and related effects*. Geneva: International Telecommunication Union, 2019.
- [27] MIACCI, Marcelo a Carlos Frederico ANGELIS. Ground-Based Microwave Radiometer Calibration: an Overview. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2018, **10**. ISSN 2175-9146. Dostupné z: doi:10.5028/jatm.v10.927
- [28] LILJEGREN, James C. *Microwave Radiometer Profiler Handbook: Evaluation of a New Multi-Frequency Microwave Radiometer for Measuring the Vertical Distribution of Temperature, Water Vapor, and Cloud Liquid Water* [online]. Lemont: Argonne National Laboratory, 2002 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/268297932_Evaluation_of_a_New_Multi-Frequency_Microwave_Radiometer_for_Measuring_the_Vertical_Distribution_of_Temperature_Water_Vapor_and_Cloud_Liquid_Water_Prepared_by>
- [29] ITU-R P.840-8. *Attenuation due to clouds and fog*. Geneva: International Telecommunication Union, 2019.
- [30] FIŠER, Ondřej. *Interakce elektromagnetického pole s dešťovým prostředím se zřetelem na predikci útlumu deštěm družicových spojů v pásmech nad 10 GHz*. Praha, 1986. Disertační práce. Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze.

- [31] FISER, O. A Simple Generator of Forward Scattering Functions on Spherical Dielectrics. *Radioengineering* [online]. Společnost pro radioelektronické inženýrství, 1993, **2**(1), 21-22 [cit. 2021-12-01]. ISSN 1210-2512. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/58602>
- [32] MARSHALL, J. S. a W. Mc K. PALMER. The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*. 1948, (5), 165-166. Dostupné z: doi:10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2
- [33] KOVALCHUK, Maria. *Analýza průběhů, porovnání metod výpočtu a použití rozptylových funkcí k popisu interakce elektromagnetické vlny s kapkami deště*. Pardubice, 2019. Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a informatiky, Univerzita Pardubice.
- [34] REGONESI, Eric, Lorenzo LUINI a Carlo RIVA. Limitations of the ITU-R P.838-3 model for rain specific attenuation. In: *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Krakow: IEEE, 2019, s. 1-4. ISBN 978-88-907018-8-7.
- [35] ITU-R P.838-3. *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. Geneva: International Telecommunication Union, 2005.
- [36] BROKS, P. Raindrops sizes. *Wikimedia Commons* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2009 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Raindrops_sizes.svg>
- [37] CHWALA, Christian a Harald KUNSTMANN. Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges. *WIREs Water*. 2019, **6**(2). ISSN 2049-1948. Dostupné z: doi:10.1002/wat2.1337
- [38] MESSER, Hagit, Artem ZINEVICH a Pinhas ALPERT. Environmental Monitoring by Wireless Communication Networks. *Science*. 2006, **312**(5774), 713-713. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.1120034
- [39] GOLDSHTEIN, O., H. MESSER a A. ZINEVICH. Rain Rate Estimation Using Measurements From Commercial Telecommunications Links. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2009, **57**(4), 1616-1625. ISSN 1053-587X. Dostupné z: doi:10.1109/TSP.2009.2012554

- [40] MATZLER, Christian, Ernest KOFFI a Alexis BERNE. Monitoring rain rate with data from networks of microwave transmission links. In: *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*. Berlin: IEEE, 2009. ISBN 978-1-4244-4753-4. ISSN 2164-3342.
- [41] LEIJNSE, H., R. UIJLENHOET a J. N. M. STRICKER. Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks. *Water Resources Research*. 2007, **43**(3). ISSN 00431397. Dostupné z: doi:10.1029/2006WR005631
- [42] OVEREEM, A., H. LEIJNSE a R. UIJLENHOET. Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks. *Water Resources Research*. 2011, **47**(12). ISSN 00431397. Dostupné z: doi:10.1029/2010WR010350
- [43] OVEREEM, A., H. LEIJNSE a R. UIJLENHOET. Country-wide rainfall maps from cellular communication networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013, **110**(8), 2741-2745. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1217961110
- [44] OVEREEM, Aart, Hidde LEIJNSE a Remko UIJLENHOET. Retrieval algorithm for rainfall mapping from microwave links in a cellular communication network. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2016, **9**(5), 2425-2444. ISSN 1867-8548. Dostupné z: doi:10.5194/amt-9-2425-2016
- [45] OVEREEM, Aart, Hidde LEIJNSE a Remko UIJLENHOET. Rainfall Monitoring Using Microwave Links from Cellular Communication Networks: The Dutch Experience. *2018 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP)*. IEEE, 2018, 2018, , 110-114. ISBN 978-1-5386-1571-3. Dostupné z: doi:10.1109/SSP.2018.8450708
- [46] UIJLENHOET, Remko, Aart OVEREEM a Hidde LEIJNSE. Opportunistic remote sensing of rainfall using microwave links from cellular communication networks. *WIREs Water*. 2018, **5**(4). ISSN 2049-1948. Dostupné z: doi:10.1002/wat2.1289
- [47] DE VOS, L. W., A. OVEREEM, H. LEIJNSE a R. UIJLENHOET. Rainfall Estimation Accuracy of a Nationwide Instantaneously Sampling Commercial Microwave Link Network: Error Dependency on Known Characteristics. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2019, **36**(7), 1267-1283. ISSN 0739-0572. Dostupné z: doi:10.1175/JTECH-D-18-0197.1

- [48] IMHOFF, R. O., A. OVEREEM, C. C. BRAUER, H. LEIJNSE, A. H. WEERTS a R. UIJLENHOET. Rainfall Nowcasting Using Commercial Microwave Links. *Geophysical Research Letters*. 2020, **47**(19). ISSN 0094-8276. Dostupné z: doi:10.1029/2020GL089365
- [49] OVEREEM, Aart, Hidde LEIJNSE, Thomas C VAN LETH, Linda BOGERD, Jan PRIEBE, Daniele TRICARICO, Arjan DROSTE a Remko UIJLENHOET. Tropical rainfall monitoring with commercial microwave links in Sri Lanka. *Environmental Research Letters*. 2021, **16**(7). ISSN 1748-9326. Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/ac0fa6
- [50] PUDASHINE, Jayaram, Adrien GUYOT, Aart OVEREEM, Valentijn R.N. PAUWELS, Alan SEED, Remko UIJLENHOET, Mahesh PRAKASH a Jeffrey P. WALKER. Rainfall retrieval using commercial microwave links: Effect of sampling strategy on retrieval accuracy. *Journal of Hydrology*. 2021, **603**. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126909
- [51] CHWALA, Christian, Harald KUNSTMANN, Susanne HIPPE, Uwe SIART a Thomas EIBERT. Precipitation observation using commercial microwave communication links. *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2012, 2012, , 2922-2925. ISBN 978-1-4673-1159-5. Dostupné z: doi:10.1109/IGARSS.2012.6350714
- [52] GRAF, Maximilian, Christian CHWALA, Julius POLZ a Harald KUNSTMANN. Rainfall estimation from a German-wide commercial microwave link network: optimized processing and validation for 1 year of data. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020, **24**(6), 2931-2950. ISSN 1607-7938. Dostupné z: doi:10.5194/hess-24-2931-2020
- [53] SCHLEISS, Marc, J. RIECKERMANN a A. BERNE. Quantification and Modeling of Wet-Antenna Attenuation for Commercial Microwave Links. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2013, **10**(5), 1195-1199. ISSN 1545-598X. Dostupné z: doi:10.1109/LGRS.2012.2236074
- [54] MORODER, Clemens, Uwe SIART, Christian CHWALA a Harald KUNSTMANN. Modeling of Wet Antenna Attenuation for Precipitation Estimation From Microwave Links. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2020, **17**(3), 386-390. ISSN 1545-598X. Dostupné z: doi:10.1109/LGRS.2019.2922768

- [55] FENCL, Martin, Pavel VALTR, Milan KVICERA a Vojtech BARES. Quantifying Wet Antenna Attenuation in 38-GHz Commercial Microwave Links of Cellular Backhaul. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2019, **16**(4), 514-518. ISSN 1545-598X. Dostupné z: doi:10.1109/LGRS.2018.2876696
- [56] VALTR, Pavel, Martin FENCL a Vojtech BARES. Excess Attenuation Caused by Antenna Wetting of Terrestrial Microwave Links at 32 GHz. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2019, **18**(8), 1636-1640. ISSN 1536-1225. Dostupné z: doi:10.1109/LAWP.2019.2925455
- [57] VALTR, Pavel a Pavel PECHAČ. On Distance Factor in Rain Attenuation Predictions. In: *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Krakow: IEEE, 2019. ISBN 978-88-907018-8-7.
- [58] PASTOREK, Jaroslav, Martin FENCL, Jörg RIECKERMANN a Vojtěch BAREŠ. The importance of adequate correction for the wet antenna effect when predicting urban rainfall-runoff using microwave link data. *AGU Fall Meeting 2020*. 2020. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.33571.48168
- [59] PASTOREK, Jaroslav, Martin FENCL, Jorg RIECKERMANN a Vojtech BARES. Precipitation Estimates From Commercial Microwave Links: Practical Approaches to Wet-Antenna Correction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022, **60**, 1-9. ISSN 0196-2892. Dostupné z: doi:10.1109/TGRS.2021.3110004
- [60] LANGHAMMER, Jakub a Filip HARTVICH. *Aplikace výpočetní techniky ve fyzické geografii: Hlavní metody interpolace* [online]. Praha: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, 2012 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/vtfg2/prednasky/surfer_1/interpolace/interpolace.html>
- [61] Pycomlink: A python toolbox for deriving rainfall information from commercial microwave link (CML) data. *GitHub* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <<https://github.com/pycomlink/pycomlink>>
- [62] Data Structures: Dataset. *Xarray: N-D labeled arrays and datasets in Python* [online]. 2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <<https://docs.xarray.dev/en/stable/user-guide/data-structures.html>>
- [63] Cmlh5: A file format for commercial (and other) microwave link data based on HDF5. *GitHub* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <<https://github.com/cmlh5/cmlh5>>

- [64] LEIJNSE, H., R. UIJLENHOET a J.N.M. STRICKER. Microwave link rainfall estimation: Effects of link length and frequency, temporal sampling, power resolution, and wet antenna attenuation. *Advances in Water Resources*. 2008, **31**(11), 1481-1493. ISSN 03091708. Dostupné z: doi:10.1016/j.advwatres.2008.03.004
- [65] InfluxDB Time Series Platform. *InfluxData* [online]. San Francisco, 2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <<https://www.influxdata.com/products/influxdb/>>
- [66] InfluxDB: Scalable datastore for metrics, events, and real-time analytics. *GitHub* [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <<https://github.com/influxdata/influxdb>>
- [67] What is .NET? Introduction and overview. *Microsoft Docs* [online]. 2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <<https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/core/introduction>>
- [68] About SQLite. *SQLite* [online]. Charlotte, NC: SQLite Consortium, 2004 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <<https://www.sqlite.org/about.html>>
- [69] SQLite-net: Simple, powerful, cross-platform SQLite client and ORM for .NET. *GitHub* [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <<https://github.com/praeclarum/sqlite-net>>
- [70] Influxdb-client-csharp: InfluxDB 2.x C# Client. *GitHub* [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <<https://github.com/influxdata/influxdb-client-csharp>>
- [71] KLYNE, G. a C. NEWMAN. *Date and Time on the Internet: Timestamps*. Internet Engineering Task Force, 2002. Request for Comments, 3339. Dostupné také z: <<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3339>>
- [72] What is PyQt?. *Riverbank Computing* [online]. Dorchester: Riverbank Computing Limited, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/>>
- [73] History of Qt. *Qt: Cross-platform software development for embedded & desktop* [online]. Helsinki: The Qt Company, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://www.qt.io/company>>
- [74] Qt Widgets. *Qt Documentation* [online]. Helsinki: The Qt Company, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://doc.qt.io/qt-6/qtwidgets-index.html>>

- [75] *Matplotlib: Visualization with Python* [online]. 2021 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://matplotlib.org/>>
- [76] *xarray: N-D labeled arrays and datasets in Python* [online]. 2021 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://docs.xarray.dev/en/stable/index.html>>
- [77] *NumPy documentation* [online]. 2021 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <<https://numpy.org/doc/stable/>>
- [78] GlobalInterpreterLock. *The Python Wiki* [online]. Python Software Foundation, 2020 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <<https://wiki.python.org/moin/GlobalInterpreterLock>>

Seznam symbolů a zkratek

<i>A</i>	měrný útlum deštěm
ATPC	automatická regulace vysílaného výkonu – Automatic Transmit Power Control
BER	poměr chybovosti bitů – Bit Error Ratio
<i>bN</i>	poloměr <i>N</i> -té Fresnelovy zóny
BTS	základnová stanice – Base Transceiver Station
ČHMÚ	Český hydrometeorologický úřad
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
CC	Creative Commons
<i>D</i>	velikostní průměr dešťové kapky; bod na spojnici mikrovlnného spoje
<i>d</i>	vzdálenost
dBZ	log. vyjádření jednotky koeficientu radarové odrazivosti <i>Z</i> (mm^6m^{-3})
eNodeB	Evolved Node B
EUMETSAT	Evropská organizace pro výzkum meteorologickými satelity – European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
<i>f</i>	frekvence
<i>f(D)</i>	komplexní rozptylová funkce dešťové kapky
<i>G_r</i>	zisk přijímací antény
<i>G_t</i>	zisk vysílací antény
<i>h</i>	výška
IEEE	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství – Institute of Electrical and Electronics Engineers
ID	identifikátor

IDU	vnitřní jednotka – indoor unit
IDW	vážené inverzní vzdálenosti – inverse distance weighting
ITU	Mezinárodní telekomunikační unie – International Telecommunication Union
KED	krigování s externím driftem – kriging with external drift
k	vlnové číslo; koeficient dle ITU-R P.838
L	útlum obecný, útlum celkový
L_{vp}	útlum volným prostředím
L_{dest}	útlum deštěm na dráze spoje
L_{wet}	útlum efektem mokré antény
MAC	Media Access Control
METEOSAT	Meteorologický satelit – Meteorological Satellite
MSG	Meteorologický satelit druhé generace – Meteosat Second Generation
N	pořadí Fresnelovy zóny
NetCDF	Network Common Data Form
$N(D)$	spektrum dešťových kapek
NOAA	Národní úřad pro oceán a atmosféru – National Oceanic and Atmospheric Administration
ODbL	Open Data Commons Open Database License
ODU	venkovní jednotka – outdoor unit
OK	běžné krigování – ordinary kriging
P_r, P_{rec}	přijímaný výkon
P_{ref}	referenční hodnota signálu
P_{rmax}	maximální hodnota přijímaného signálu
P_{rmin}	minimální hodnota přijímaného signálu

P_t	vysílaný výkon
PDF	Portable Document Format
PNG	Portable Network Graphics
R	intenzita srážek; programovací jazyk
R^2	koeficient determinace (korelace)
r	distanční faktor
Rx	přijímání – receive
SNMP	Simple Network Management Protocol
SNR	odstup signálu od šumu – signal-noise-ratio
SQL	Structured Query Language
SSID	identifikátor služby – Service Set Identifier
T	čas
Tx	vysílání – transmit
V	objem
v	míra zastínění
WAA, A_a	útlum mokrou anténou – Wet Antenna Attenuation
WAA_{max}	maximální útlum mokrou anténou – Wet Antenna Attenuation
WMO	Světová meteorologická organizace – World Meteorological Organization
Z	radarová odrazivost

A Definice tabulky MwLink

Výpis A.1: Obsah tabulky MwLink v databázi SQLite

```
1 CREATE TABLE "MwLink" (  
2   "id" INTEGER NOT NULL UNIQUE,  
3   "name" TEXT,  
4   "tech" TEXT NOT NULL DEFAULT 'default_tech',  
5   "nameA" TEXT,  
6   "nameB" TEXT,  
7   "freqA" INTEGER NOT NULL DEFAULT 10500,  
8   "freqB" INTEGER NOT NULL DEFAULT 10500,  
9   "polarization" TEXT NOT NULL DEFAULT 'vertical',  
10  "ipA" INTEGER NOT NULL DEFAULT '0.0.0.0',  
11  "ipB" TEXT NOT NULL DEFAULT '0.0.0.0',  
12  "latA" REAL NOT NULL DEFAULT 50.0,  
13  "longA" REAL NOT NULL DEFAULT 15.0,  
14  "latB" REAL NOT NULL DEFAULT 50.1,  
15  "longB" REAL NOT NULL DEFAULT 15.1,  
16  "distance" REAL NOT NULL DEFAULT 13.22,  
17  "WAA" REAL NOT NULL DEFAULT 1.5,  
18  "dummy_latA" REAL NOT NULL DEFAULT 50.0,  
19  "dummy_longA" REAL NOT NULL DEFAULT 15.0,  
20  "dummy_latB" REAL NOT NULL DEFAULT 50.1,  
21  "dummy_longB" REAL NOT NULL DEFAULT 15.1,  
22  PRIMARY KEY("id" AUTOINCREMENT)  
23 );
```