



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Stavební fakulta

Katedra hydrauliky a hydrologie

Detekce srážek pomocí alternativních levných senzorů

Diplomová práce

Rainfall detection by low-cost alternative sensors

Diploma Thesis

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Dohnal, Ph.D.

Bc. Veronika Mikešová

Praha 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Mikešová Jméno: Veronika Osobní číslo: 410699
Zadávací katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Detekce srážek pomocí alternativních levných sensorů

Název diplomové práce anglicky: Rainfall detection by low-cost alternative sensors

Pokyny pro vypracování:

Posudte možnosti použití levných autonomních čidel vlhkosti půdy k prostorově rozlišené detekci srážek. Pro posouzení použijte výsledky souběžného měření srážkoměry, laserovým detektorem srážek, vlhkostními čidly TMS a detektory vlhkosti listoví v roce 2015. Navrhněte vlastní algoritmus detekce srážek v některém z vhodných programových prostředků. Klasifikujte přesnost, citlivost a specificitu čidel TMS vzhledem k velikosti srážky, způsobu filtrace základové linie apod. Diskutujte teplotní závislost čidel a její vliv na výsledky. Proveďte citlivostní analýzu vyvinutého algoritmu.

Seznam doporučené literatury:

Schilling, W., 1991. Rainfall data for urban hydrology: what do we need? Atmospheric Research 27, 5–21.
Schleiss, M., Berne, A., 2010. Identification of Dry and Rainy Periods Using Telecommunication Microwave Links, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 7, 611–615.

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Michal Dohnal, PhD.

Datum zadání diplomové práce: 2. 10. 2017 Termín odevzdání diplomové práce: 7. 1. 2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

6. 10. 2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Práce se především zabývá posouzením použitelnosti netradičních levných autonomních senzorů, TMS3 čidel, k detekci srážek. Čidla jsou primárně určena k měření vlhkosti v půdě. Navržen a testován byl algoritmus, který identifikuje začátky a konce srážkových událostí, tedy identifikuje suchá a mokrá období. Výsledky byly srovnávány s detektorem vlhkosti listoví, překlopným srážkoměrem a laserovým detektorem srážek, který byl považován za referenční. Všechny přístroje byly umístěny na experimentální lokalitě v malém urbanizovaném povodí v Praze Letňanech. Společná data všech přístrojů byla k dispozici od 22. května do 13. srpna roku 2015. Pro zlepšení výsledků byla provedena citlivostní analýza některých parametrů algoritmu. Zkoumána byla také doba schnutí čidel, možnost ovlivnění signálu čidel větrem a orientace vůči světovým stranám. Výsledky ukazují, že při vhodném nastavení parametrů algoritmu jsou TMS3 čidla použitelná k detekci srážek. Konkrétně mají výsledky TMS3 čidel obdobnou přesnost jako překlopný srážkoměr, ale výrazně vyšší citlivost. Nicméně falešně negativních hodnot bylo detekováno více než 25 % z deštivých hodnot a citlivost parametru ukázala, že je nutná individuální kalibrace jednotlivých TMS3 čidel. Z těchto důvodů je pravděpodobně vhodnější použít k detekci srážek jiné, standardní či nestandardní detektory srážek.

Klíčová slova

Detekce srážek, netradiční senzory, TMS3 senzory, laserový detektor srážek.

Abstract

The purpose of the study was evaluating the applicability of non-traditional, low-cost and autonomous sensor, namely TMS3 sensors, for detection of precipitation. The sensors are primarily designed to measure soil moisture. The algorithm searching precipitation events was designed and tested. The algorithm searches the beginnings and ends of precipitation events and thus identifies dry and wet periods. The results were compared with Leaf wetness sensor, tipping bucket rain gauge and laser precipitation monitor, which was considered as a reference instrument. All devices were located on an experimental site in a small urban catchment in Prague Letňany. The presented analysis covers the experimental period from May 22, 2015 to August 13, 2015. Sensitivity analysis of selected parameters of the algorithm was performed to improve the detection. Possible influences on sensor readings, i.e., the sensor drying time, the orientation relative to the cardinal directions and the predominant wind direction, were also investigated. The results show that for properly set parameters of the algorithm, the TMS3 sensors are useful for detection of precipitation events. Specifically, the TMS3 sensors produce similar results to tipping bucket rain gauge in terms of accuracy and the sensitivity of TMS3 sensors is significantly higher. However, TMS3 false-negative detections exceeded 25% of received rain, and the parameter sensitivity of the algorithm indicates that TMS3 sensors require individual calibration. These limitations probably make other types of standard or non-standard rain detectors favorable.

Keywords

Rainfall detection, non-traditional sensors, laser precipitation monitor.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pouze za odborného vedení vedoucího práce doc. Ing. Michala Dohnala, Ph.D. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Souhlasím s užitím tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7. 1. 2018

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu doc. Ing. Michalovi Dohnalovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, řadu cenných rad a užitečných připomínek. Při zpracování diplomové práce bylo využito měření a poznatků získaných v rámci projektů Grantové agentury České republiky 14-22978S a 17-16389S. Poděkování za poskytnutá srážkoměrná data patří také společnosti Pražské vodovody a kanalizace, a.s.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Rešerše literatury	10
3	Použité přístrojové vybavení	12
3.1	TMS3 stanice.....	12
3.1	Lasertový detektor srážek	12
3.2	Překlopny srážkoměr, Fiedler.....	14
3.3	LWS senzor, Decagon Devices	14
3.4	Další použité přístroje.....	15
4	Experimentální stanoviště.....	17
4.1	Datový soubor	18
4.2	Získané srážkové epizody.....	19
5	Popis navrženého algoritmu.....	21
5.1	Zpracování signálu ze senzorů TMS3	21
	Prvotní zpracování dat	21
	Vyhlazení dat	22
	Detekce začátku srážkové události	23
	Detekce konce srážkové události.....	23
	Detekce doschnutí čidla	24
5.2	Klasifikace suchých a mokrých období.....	26
5.3	Matice záměn.....	26
6	Výsledky a diskuze	28
6.1	Analýza funkčnosti navrženého algoritmu	28
	Rozdíly začátků a konců srážek s úhrnem vyšším než 2 mm.....	29
6.2	Matice záměn všech TMS3 čidel pro experimentální období.....	32
	Hodnotící klasifikátory pro jednotlivá čidla TMS3	32
	Použití TMS3 čidel v páru	33
6.3	Detekce srážek dle úhrnu.....	34
6.4	Interpretace výsledků dle typu padajících srážek.....	36
6.5	Citlivostní analýza parametrů algoritmu	37
	Parametr B	37
	Citlivost prahu laserového detektoru srážek.....	38
6.6	Vliv orientace TMS3 čidel	40

Vzájemná korelace TMS3 čidel.....	40
Větrná růžice.....	40
Další možné vlivy na měření čidly TMS3	42
6.7 Srovnání s LWS.....	43
Matice záměn LWS dat	43
Doba schnutí	44
6.8 Možnost použití algoritmu na signál LWS.....	45
6.9 Použití algoritmu na surová data	46
7 Závěr a shrnutí	48
8 Seznam obrázků	51
9 Seznam tabulek	53
10 Reference.....	54
Příloha 1	56

1 Úvod

Atmosférické srážky hrají významnou roli v mnoha vědních oborech jako je meteorologie, hydrologie, ekologie, ale také řízení vodohospodářských soustav. Nejdůležitějšími charakteristikami srážek je jejich úhrn, doba trvání a intenzita. Dále je možné zjišťovat typ, velikost a prostorovou variabilitu srážek. Nejzákladnější informací je samotná detekce srážek, protože pro některé účely stačí pouze vědět, zda prší.

V neposlední řadě jsou srážky hlavním vstupem do hydrologických modelů. Zejména modelování v městských povodích vyžaduje podrobné časové a prostorové rozlišení měření srážek. Srážky se běžně měří například překlopnými srážkoměry, váhovými srážkoměry, disdrometry, nebo pomocí meteorologických radarů. Všechny tyto způsoby však kvůli své ceně neumožňují zachycení prostorové variability. Jejich vysoká cena je limitující, aby jich mohlo být na malém území rozmístěno dostatečné množství. Použití netradičních levných čidel je atraktivní právě díky možnosti zachycení prostorové variability srážek rozmístěním velkého množství čidel na místo jediného klasického srážkoměru. Voda, která zůstává na povrchu čidla umožňuje identifikovat začátky a konce srážkových událostí. To znamená levně získávat důležité informace, které tradiční nástroje poskytují pouze v omezeném rozsahu.

Z environmentálního pohledu je poměrně významná doba, po kterou je vegetace pokryta ranní rosou či dešťovou vodou. Předmětem této práce je i zkoumání doby schnutí čidel. Znalost doby schnutí čidla umožňuje určit, kdy na vegetaci byla držena voda a nemohla tak probíhat transpirace rostlin. Voda na povrchu také mění albedo povrchu (míru odrazivosti povrchu). Obě tyto skutečnosti výrazně mění hydrologické a tepelné toky v přízemní vrstvě atmosféry, zejména pak v městských aglomeracích, kde se často vyskytují tepelné ostrovy. Vedle potenciálu levných čidel pro zlepšení detekce srážek a doby transpirace rostlin jsou také čidla perspektivní v souvislosti s internetem věcí.

Cílem práce je především posouzení levných autonomních čidel vlhkosti půdy k prostorově rozlišené detekci srážek. K posouzení jsou použity výsledky souběžného měření vlhkostními čidly TMS3 a klasickým překlopným srážkoměrem, laserovým detektorem srážek (LPM) a detektory vlhkosti listové získané během roku 2015. Podstatou celé práce je navržený algoritmus vyhledávající začátky a konce srážek, tj. umožňující identifikaci srážkových epizod. Dále potom zkoumání doby schnutí čidel.

Pro účely posouzení funkčnosti navrženého algoritmu byla klasifikována přesnost, citlivost a specifická čidel TMS3 vzhledem k velikosti srážky, způsobu filtrace pozadové linie apod. Provedena byla základní citlivostní analýza vybraných parametrů algoritmu, aby bylo možné zhodnotit, které hodnoty parametrů vedou k nejpřesnější detekci srážek. Nakonec byla řešena otázka teplotní závislosti TMS3 čidel.

2 Rešerše literatury

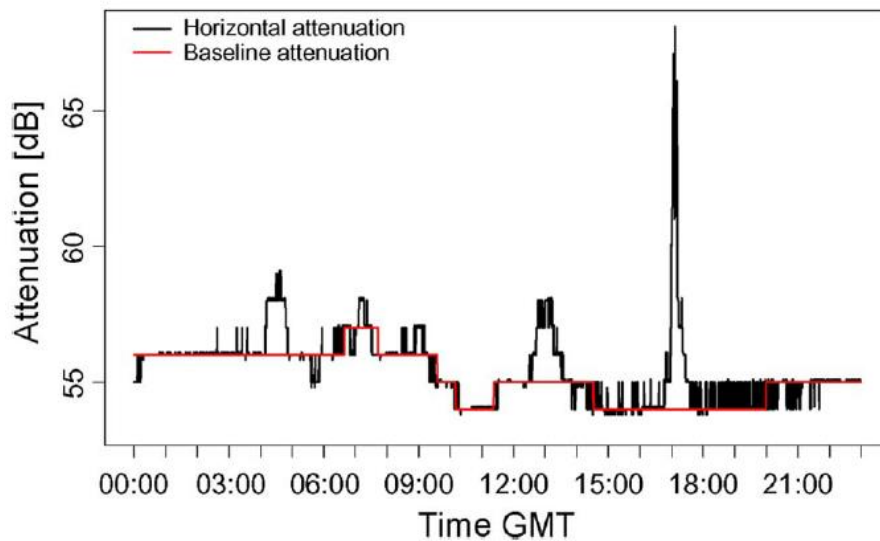
Srážky jsou v hydrologii dlouhodobě předmětem zkoumání. Na Valném shromáždění Evropské geofyzikální unie je jim každoročně věnováno několik vědeckých sekcí. Zároveň jsou srážky nejdůležitější vstupní proměnnou. Spadlé srážky mají vliv na tvorbu a rozložení odtoku. Požadavky na srážková data jsou různé dle jejich plánovaného využití. Například aplikace v městských povodích mají odlišné nároky na data než aplikace v přírodních povodích. Zejména se jedná o časové a prostorové rozlišení srážkových dat. V městských povodích, díky většímu procentuálnímu zastoupení nepropustných ploch, dochází k rychlejší tvorbě povrchového odtoku a celkově vykazují tato povodí kratší doby koncentrace. Městští hydrologové se navíc často zabývají topograficky menšími systémy. Z tohoto důvodu je potřeba větší časové a prostorové rozlišení. To znamená, data z hustých měřických sítí schopných pokrýt srážkovou událost s krátkou dobou trvání a s vysokou intenzitou. O této problematice píše již Schilling (1991) [1]. Existuje velké množství simulačních nástrojů a matematických modelů, které jsou schopny napomoci při řešení celé řady hydrologických problémů. Mnohdy jsou překážkou právě chybějící či nevhodná srážková data. Dlouhé časové kroky měření například systematicky zmenšují simulovanou rychlost odtoku. Data pro dimenzování, analýzu či manipulaci v reálném čase v městské hydrologii by měla ideálně mít časové rozlišení 1 min (a méně), prostorové rozlišení 1 km² (a méně), přesnost objemu lepší než 3%, dobu trvání měření minimálně 20 let. Srážková data by také měla být bez chyb a výpadků měření (Schilling, 1991 [1]).

Přístroje, které se tradičně používají pro měření srážek jsou často nespolehlivé v zaznamenávání začátků a konců srážek. Překlopné srážkoměry jsou náchylné k ucpávání a jejich výsledky jsou spojeny s velkou mírou nejistoty při nízkých intenzitách (z důvodu objemu člunku) a naopak při velmi intenzivních srážkách (z důvodu přetížení mechanismu překlápění). Senzory s laserovým principem měření, disdrometry, dokáží zachytit velmi dobře drobné srážky, ale nedokáží zaznamenávat srážky usazené (například rosu). Navíc při nízkých intenzitách srážek byl zaznamenán velký rozptyl naměřených hodnot způsobený malou záchytnou plochou (Nystuen et al., 1996) [2]. Kromě toho vytvoření a provozování husté sítě disdrometrů, tak aby dobře zachytila prostorovou variabilitu srážek, by bylo velmi nákladné. Použití levných čidel pro klasifikaci suchého a mokrého období je velmi slibné, protože může být použito mnoho čidel namísto jednoho klasického srážkoměru nebo laserového detektoru.

Pro charakterizaci deštových srážek lze použít mnoho odlišných čidel. Chappel et al. (2013) [3] a Gotsch et al. (2014) [4] měřili dobu vlhkosti zaznamenáváním změn dielektrické konstanty, což se využívá pro řízení závlah a větrání skleníků. Srovnávání senzorů založených na změnách elektrického odporu publikovali Santos et al. (2008) [5]. V současné době jsou levné senzory používané např. v tzv. inteligentních budovách.

Identifikaci suchých a mokřích období se věnuje i článek od Schleisse a Berna (2010) [6]. Využívá mikrovlnných spojů mezi základovými stanicemi mobilních sítí. Signál mezi dvěma vysílači je srážkami mezi nimi tlumen. Tento útlum by mohl odpovídat intenzitě deště. Problémem je separace útlumu způsobeného srážkou a útlumu během suchých období (tj. pozadový útlum). Pozadový útlum se v čase mění, kolísá kvůli změnám teploty, vlhkosti a rychlosti větru. Schleiss a Bern (2010) prezentují postup separace suchých a mokřích

období, resp. odhad pozad'ového útlumu. Na Obr. 1 je zobrazen útlum signálu mezi dvěma vysílači a vypočtený pozad'ový útlum, který poté umožňuje identifikaci suchých a mokrých období.



Obr. 1: Ukázka určení pozad'ového útlumu signálu mikrovlnných spojů telekomunikačních mobilních sítí, v tomto případě horizontálního útlumu (Horizontal attenuation). Obrázek převzat z článku Schleisse a Berna (2010) [6].

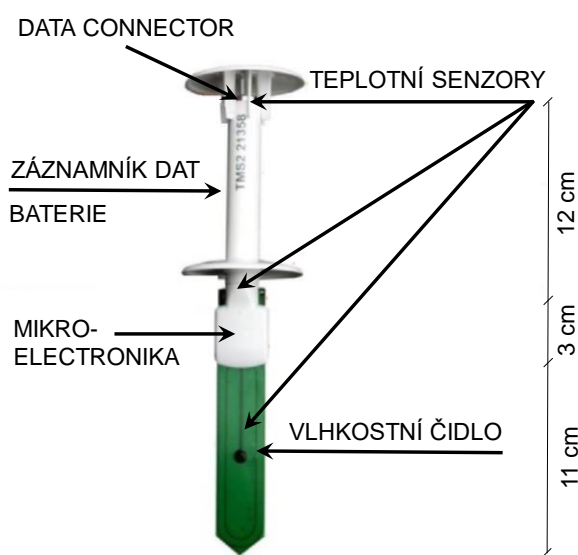
Metoda je založená na rozdílu směrodatných odchylek. Vytvoří se plovoucí okno, ve kterém se počítá směrodatná odchylka (S_w). Pokud je směrodatná odchylka okna menší než směrodatná odchylka celého signálu (S), jedná se pravděpodobně o suché období, je-li naopak větší, pravděpodobně se jedná o srážku. Nevýhodou metody je špatná identifikace slabých srážek. Slabé srážky mohou mít stejnou variabilitu jako suchá období a mohou tak být snadno zaměněny. Pro lepší identifikaci a odstranění chybně identifikovaných suchých období během deště se používá prahová hodnota směrodatné odchylky (S_0) místo směrodatné odchylky celého signálu (S). Obvykle se S_0 volí jako 85-95 % kvantil směrodatných odchylek všech plovoucích oken. Čím menší je kvantil, tím ubývá chybně identifikovaných suchých období během deště a přibývá falešných dešťů v suchých obdobích. Metoda byla aplikována na čtyři mikrovlnné spoje a deset různých srážkových událostí. Výsledky byly porovnávány s měřením z meteorologického radaru. Autoři tvrdí, že jejich algoritmus funguje ve zkoumaném období velmi dobře. V průměru identifikuje 92 % srážkových období, 86 % suchých období a 93 % celkového srážkového úhrnu. Velkou výhodou této metody je, že nevyžaduje další data pro kalibraci. Nevýhodou metody je špatné rozlišení slabých srážek, tedy falešné deště a falešná suchá období.

3 Použité přístrojové vybavení

Experimentální přístrojové vybavení se skládá z několika principiálně odlišných přístrojů umístěných na jednom stanovišti. Přístroje byly nainstalovány a provozovány jako součást širšího výzkumného projektu zaměřeného na predikci odtoku srážkových vod v městském prostředí založené na útlumu telekomunikačních mikrovlnných spojů – TELEMAS [7].

3.1 TMS3 stanice

Hlavní částí této práce bylo zkoumání a analýza dat z přístrojů TMS3, společnosti TOMST [8]. Tato čidla jsou původně vyrobena a určena pro měření vlhkosti v půdě a teploty. Jedná se o autonomní stanice obsahující dataloger a baterii. Výrobce udává, že baterie a paměť datalogeru vydrží více než 1 rok při intervalu měření 1 minuta. Čidla obsahují tři teploměry pro měření teploty vzduchu, v půdě a na rozhraní, Obr. 2. Nejdůležitější částí autonomní stanice je vlhkostní senzor. Vlhkostní senzor je vyroben z velmi pevného sklolaminátu. Výrobní technologie spočívá ve výrobě vícevrstvé desky plošných spojů, přičemž na základní desce je vyleptaný motiv zpoždovací linky, který je pokryt ochrannou vrstvou. Měření vlhkosti je založeno na principu měření transformace pulsu v čase probíhajícího na rozhraní čidla a půdního prostředí (TDT, Time domain transmission method). Přenos pobíhá o frekvencích 100–200 MHz a doba přenosu je závislá právě na obsahu vody v okolí čidla. Výrobce udává, že je měření tímto senzorem závislé na teplotě a slanosti. Chyba měření by však neměla překročit 1 %.

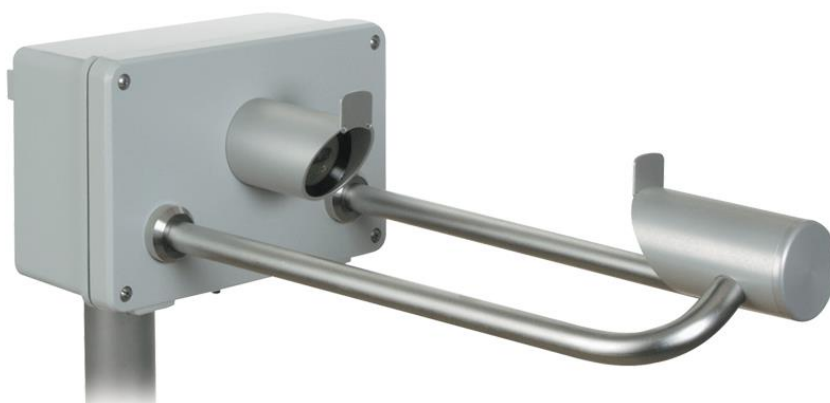


Obr. 2: TMS3 stanice, společnost TOMST s.r.o [8] s popisem jednotlivých částí čidla.

3.1 Laserový detektor srážek

Dalším využívaným přístrojem byl laserový detektor srážek (laser precipitation monitor, dále LPM), Obr. 3. Výrobce používaného detektoru je společnost Thies Clima [10]. LPM obsahuje laserový vysílač a přijímač. Laserový vysílač vysílá signál, infračervený paprsek, o vlnové délce 785 nm, který je přijímán laserovým přijímačem. Principem měření srážek pomocí LPM je měření změny intenzity paprsku při průchodu hydrometeorů srážek. Z doby trvání redukováného signálu je určena rychlost pádu vodních částic. Průměr vodní částice

propadající laserovým paprskem je vypočítán z amplitudy snížení signálu. Typ srážek je určen porovnáním průměru a rychlosti padající částice (více např. Gunn a Kinzer, 1949) [9]. Použitý LPM rozeznává 20 rychlostí padajících vodních částic (0.2 až 20 mm/s) a 22 průměrů vodních částic (0.16 až 8 mm). Tento přístroj je schopen zaznamenávat srážky s minimální intenzitou asi 0.005 mm/hod (v závislosti na typu srážek) a srážky s maximální intenzitou až 250 mm/hod. Všechny údaje jsou detektorem posílány a záznamovým zařízením ukládány každou minutu. V této práci byl použit LPM se zachytnou plochou laserového paprsku 45,6 cm². Díky své přesnosti byl LPM považován za přístroj referenční. Všechny informace o tomto přístroji jsou převzaty z manuálu poskytovaného výrobcem Thies Clima [11].



Obr. 3: Laserový detektor srážek společnosti Thies Clima [10].

Mimo jiné LPM rozeznává typy srážek dle SYNOP. Například mrholení, mrznoucí mrholení, déšť, kroupy, sněhové kroupy atd. Všechny typy srážek jsou uvedeny v Tab. 1. Každý typ srážky je dále specifikován podle intenzity deště a velikosti padajících vodních částic. Jedná se buďto o déšť lehký, mírný, nebo hustý.

Tab. 1: Rozdělení rozeznávaných typů srážek dle intenzity deště a velikosti padajících vodních částic. Údaje převzaty z manuálu výrobce Thies Clima [11].

Typ deště (mm/hod)	Lehký	Mírný	Hustý
Mrholení			
Mrznoucí mrholení	< 0.2	0.2-0.5	> 0.5
Mrholení s deštěm			
Déšť			
Mrazivý déšť			
Déšť a mrholení se sněhem	< 0.5	0.5-4.0	> 4.0
Sníh			
Sněhová zrna			
Ledové kroupky	< 2.4	2.4-12.0	> 12.0
Ledové krystaly/jehličky			
Sněhové kroupy	Částice < 8 mm	Částice > 8 mm	
Kroupy			
Chyba senzoru	-	-	-
Sucho	-	-	-

Důležitou roli hraje správné umístění laserového detektoru srážek, protože rychlost vodních částic propadající skrze paprsek je silně ovlivňována směrem a rychlostí větru. V našem případě byl LPM umístěn na střeše panelového domu společně s ostatními přístroji. Z tohoto důvodu byla k přístroji nainstalována větrná zábrana (volitelné příslušenství LPM). Větrná zábrana zajišťuje aby, srážky klesaly přes měřicí systém téměř bez víření.

3.2 Překlopný srážkoměr, Fiedler

Nevyhříváný překlopný srážkoměr SR03 společnosti Fiedler AMS s.r.o. [12] (Obr. 4) byl instalován přibližně dva metry od LPM. Principem měření srážek u překlopného srážkoměru je mechanismus překlápěcího člunku. Člunek je umístěn pod výtokem nálevky, ze které vytéká srážková voda do horní poloviny člunku. Po naplnění člunku dojde k jeho překlopení a záznamu o překlopení (jeden puls). Výstupní data jsou alternativně čas překlopení nebo počet překlopení za definovaný časový interval. Data z překlopného srážkoměru, která byla použita v této práci, jsou minutová. Záchytná plocha srážkoměru je 500 cm² a rozlišovací schopnost, tj. objem člunku je 0.1 mm (jeden puls). Tyto parametry vyhovují světové meteorologické organizace (WMO, 1983) [15]. Srážkoměr byl před měřicí kampaní dynamicky kalibrován a pravidelně kontrolován, zda nedošlo k jeho ucpání například listím, úlomky větví nebo hmyzem.



Obr. 4: Překlopný srážkoměr SR03 Fiedler se záchytnou plochou 500 cm². Vyobrazení převzato z webových stránek společnosti Fiedler AMS s.r.o. [12].

Výrobce udává tři hodnoty přesnosti měření zachycených srážek při různých intenzitách srážky. Při srážce s intenzitou do 30 mm/hod je přesnost měření ± 5 %. Při srážce s intenzitou do 100 mm/hod ± 10 % a při srážkách s intenzitou do 200 mm/hod ± 15 %.

3.3 LWS senzor, Decagon Devices

Jako alternativa k posouzení detekce srážek senzorem TMS3 byl použit také senzor detekující vlhkost listoví Leaf Wetness Sensor, Obr. 5, (dále jen LWS) od společnosti Decagon Devices [17]. Tento senzor je primárně určen k měření a detekci padajících srážek

nebo kondenzované vlhkosti usazené na listech rostlin. Běžně se instaluje do korun stromů, na stožáry meteorologických stanic nebo do polí a skleníků mezi vegetací. LWS měří dielektrickou konstantu tenké laminátové destičky, která svými vlastnostmi co nejvíce odpovídá skutečnému listu. Těmito vlastnosti jsou především specifické teplo a tepelná kapacita, ale i hustota a tloušťka. Měření probíhá v zóně do 1 cm nad povrchem destičky. Měření je umožněno rozdílností dielektrické konstanty kapalné vody, vzduchu a ledu. Vzduch má dielektrickou konstantu 1, oproti tomu voda asi 80 a led cca 5. Senzor je velmi citlivý a rozpoznává na svém povrchu velmi drobné kapičky vody.



Obr. 5: LWS Leaf wetness senzor. Vyobrazení převzato z online katalogu UMS společnosti Decagon Devices [18].

Pomocí tohoto senzoru se primárně určuje, zda je na povrchu listů zadržena voda. Výrobce udává, že suchému stavu odpovídají surové hodnoty měření kolem 445. Jako jednotky surových hodnot výrobce uvádí „counts“. Dále udává dvě prahové hodnoty pro určení srážky a to 450 a 460 counts, podle stupně kontaminace senzoru aerosoly.

3.4 Další použité přístroje

Dalšími přístroji instalovanými během měřicí kampaně na experimentálním místě byl Snímač W2. Snímač W2 od společnosti Fiedler [13], (Obr. 6) měří okamžité rychlosti a směr větru. Rozsah měření rychlosti větru výrobce udává 0,7-30 m/s a rozsah měření směru větru 0-360° (rozlišení 10°).



Obr. 6: Snímač rychlosti a směru větru W2 od společnosti Fiedler. Vyobrazení převzato z webových stránek společnosti Fiedler [13].

Posledním použitým přístrojem je vlhkoměr RVT10 také od společnosti Fiedler. Vlhkoměr je určen pro měření relativní vlhkosti a teploty vzduchu. Vlhkoměr byl umístěn do radiačního krytu. Přesnost měření relativní vlhkosti vzduchu je výrobcem deklarovaná do 1.8 % v rozsahu od 10 do 90 % relativní vlhkosti.



Obr. 7: Vlhkoměr RVT10 s radiačním krytem od společnosti Fiedler. Vyobrazení převzato z webových stránek společnosti Fiedler [14].

4 Experimentální stanoviště

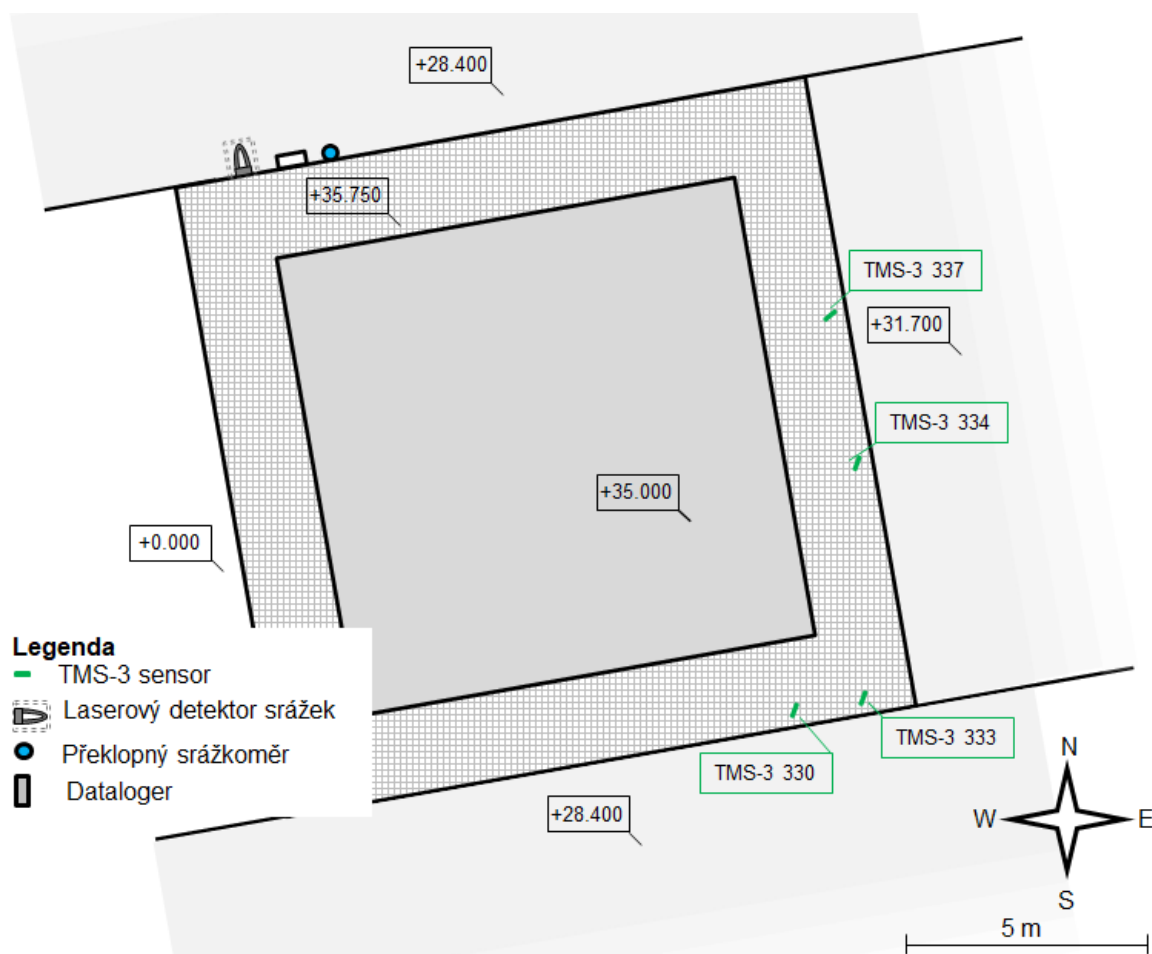
Experimentální místo se nachází v Praze Letňanech. Jedná se o malé povodí Mratínského potoka s plochou 2.3 km², které se nachází severovýchodně od centra hlavního města v okrese Praha-východ. Vlastní experimentální měření probíhá na střeše 35 m vysokého panelového domu. Zde byly instalovány všechny použité přístroje, tedy LPM, překlopný srážkoměr, LWS senzor a čtyři TMS3 čidla (TMS3 č. 330, č. 333, č. 334 a č. 337). Na Obr. 8 je laserový detektor srážek (LPM) s větrnou ochranou umístěný na střeše panelového domu.



Obr. 8: Laserový detektor srážek umístěný na experimentálním místě, na střeše panelového domu o výšce cca 35 m. Praha Letňany, rok 2015.

Všechny přístroje byly připevněny na ocelovou plošinu určenou pro telekomunikační antény. Orientace TMS3 senzorů vzhledem ke světovým stranám byla následující: TMS3 č. 330 a č. 333 na jihozápad (JZ), TMS3 č. 334 na východo-jihovýchod (VJV) a TMS3 č. 337 na severo-severozápad (SSZ). Umístění všech přístrojů je schematicky znázorněno na Obr. 9.

Všechna TMS3 čidla byla umístěna ve vodorovném směru vzhledem k delší straně čidla. Radiální sklon byl zvolen cca 45°. Experimentální stanoviště je na nejvyšší budově v blízkém okolí. Vliv sousedních budov na měření je tedy vyloučen. Na druhou stranu jsou data zcela jistě ovlivněna výškovým umístěním. V úrovni 35 metrů nad terénem je vyšší rychlost větru a nižší vlhkost vzduchu, což znemožňuje přistupovat k měření jako ke standardnímu.



Obr. 9: Schéma experimentálního místa, střecha panelového domu v Praze Letňanech.

4.1 Datový soubor

Jak již bylo uvedeno výše, datový soubor se skládá z měření provedenými sedmi přístroji: z dat čtyř TMS3 čidel, jednoho LPM, jednoho překlopného srážkoměru a jednoho LWS senzoru.

Data z LPM a čidel TMS3 jsou registrována v minutovém intervalu. Překlopení člunku překlopného srážkoměru je zaznamenáváno v přesném čase, do minutových intervalů jsou překlopení převáděna následovně: Intenzita srážek mezi jednotlivými překlopeními se předpokládá konstantní, pokud je interval mezi překlopeními kratší než 15 min. Delší intervaly se považují za období s nulovou intenzitou srážky. Data jsou následně převedena na běžné časové řady pomocí průměru intenzit srážek v každé minutě.

Experimentální období bylo od 25. dubna do 2. října roku 2015, ale vzhledem k mnoha výpadkům jsou společná data všech přístrojů pouze od 22. května do 13. srpna roku 2015.

Data z překlopného srážkoměru jsou ve středoevropském čase (SEČ). Data z TMS3 čidel jsou registrována v koordinovaném světovém čase (UTC), LWS ve středoevropském letním čase (SELČ) a LPM středoevropském čase (SEČ). Při analýzách a srovnávání byla data vždy přepočtena do středoevropského času (SEČ).

4.2 Získané srážkové epizody

Jak již bylo zmíněno, LPM je velmi přesný přístroj a dokáže registrovat velmi drobné srážky. Z tohoto důvodu byla data z tohoto přístroje považována za referenční měření. Začátek srážky z LPM byl určen v minutě, kdy intenzita deště překročí hodnotu 0.012 mm/hod a zároveň 60 minut před tím nepršelo (intenzita nepřekročila danou hodnotu). Konec epizody byl definován obdobně, a to v minutě, kdy je intenzita deště větší nebo rovna hodnotě 0.012 mm/hod a zároveň hodinu poté intenzita deště tuto hranici nepřekročí. Tímto způsobem bylo v datovém souboru identifikováno 25 srážkových událostí, epizod s úhrnem větším než 0.1 mm. Tento úhrn byl zvolen z důvodu rozlišení překlopného srážkoměru. Jedno naplnění člunku překlopného srážkoměru totiž odpovídá srážkovému úhrnu 0.1 mm. Průměrný srážkový úhrn vyhledaných 25 epizod je přibližně 2.38 mm, doba trvání srážky je od 5 do 892 minut. Maximální intenzita 99.89 mm/hod byla zaregistrována 8. července 2015, během srážkové události č. 16. Detailnější informace o jednotlivých epizodách jsou v Tab. 2.

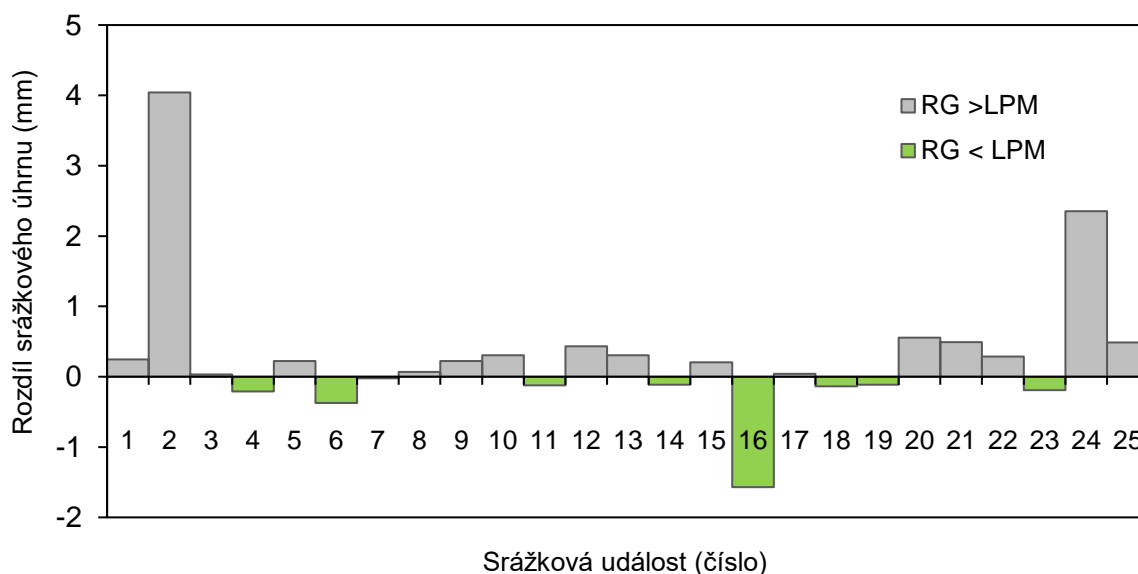
Tab. 2: Soubor srážkových epizod z LPM s úhrnem větším než 0.1 mm. Srážky z období 22. května až 13. srpna roku 2015.

Číslo	Datum	Srážkový úhrn (mm)	Doba trvání (min)	Maximální intenzita (mm/hod)	Typ deště
1	29. května	0.33	49	2.73	Slabý až mírný déšť
2	29. května	3.55	49	18.64	Mírný déšť, měkké kroupy
3	1. června	0.16	6	5.82	Mírné mrholení s deštěm
4	8. června	23.32	900	36.65	Mírný déšť
5	13. června	1.94	177	11.66	Slabý déšť
6	18. června	0.73	83	4.78	Slabý déšť
7	20. června	0.94	218	2.41	Slabý déšť
8	20. června	0.26	13	5.27	Mírné mrholení
9	20. června	0.1	22	1.04	Mírné mrholení
10	22. června	0.65	126	2.16	Mírné mrholení až slabý déšť
11	23. června	4.16	209	5.4	Slabý až mírný déšť
12	23. června	0.52	100	3.19	Slabý déšť
13	23. června	0.86	21	8.83	Mírný déšť, měkké kroupy
14	27. června	1.44	106	8.83	Mírný déšť
15	6. července	0.18	29	10.67	Silný déšť
16	8. července	7.06	70	99.89	Mírný až silný déšť s kroupami
17	9. července	0.25	70	2.32	Mírné mrholení
18	12. července	0.42	153	4.58	Slabý déšť
19	14. července	0.39	247	1.56	Mírné mrholení a slabý déšť
20	14. července	1.1	42	12.62	Mírný déšť
21	25. července	2.02	82	4.54	Mírný déšť
22	25. července	0.57	33	4.83	Silné mrholení až slabý déšť
23	27. července	0.54	64	2.44	Slabý až mírný déšť
24	27. července	1.79	28	30.72	Mírný déšť, měkké kroupy
25	29. července	2.13	101	13.87	Mírný déšť

Srážky z překlopného srážkoměru (RG) byly definovány podobným způsobem. Začátek srážky je v minutě, kdy došlo k překlopení srážkoměru a zároveň hodinu předtím k překlopení nedošlo. Konec je definován v minutě, kdy došlo k překlopení a zároveň hodinu poté k překlopení nedošlo.

Takto vyhledané srážky z LPM a překlopného srážkoměru mají podobné úhrny, Obr. 10. Rozdíl jejich úhrnů je průměrně 0.3 mm. Až na tři výjimky nepřekračuje rozdíl hodnotu 0.5 mm. U srážkových epizod č. 2, 16 a 24 byla registrována jednak krátká doba trvání, velký úhrn s vysokou maximální intenzitou a také výskyt krup a vítr o rychlosti vyšší než 12 m/s. Tyto faktory naznačují, že mohlo být měření obou přístrojů zatíženo značnou nejistotou.

Přesto, že ve většině případů registruje větší úhrn RG, považujeme LPM za přesnější. Není možné vyloučit, že LPM srážku z hlediska úhrnu mírně podceňuje, na druhou stranu však ukazuje daleko podrobnější průběh srážky a je z podstaty měření citlivější na detekci srážek.



Obr. 10: Porovnání srážkových úhrnů epizod s úhrny většími než 0.1 mm z laserového detektoru srážek (LPM) a překlopného srážkoměru (RG). Epizody z období 22. května až 13. srpna roku 2015.

5 Popis navrženého algoritmu

5.1 Zpracování signálu ze senzorů TMS3

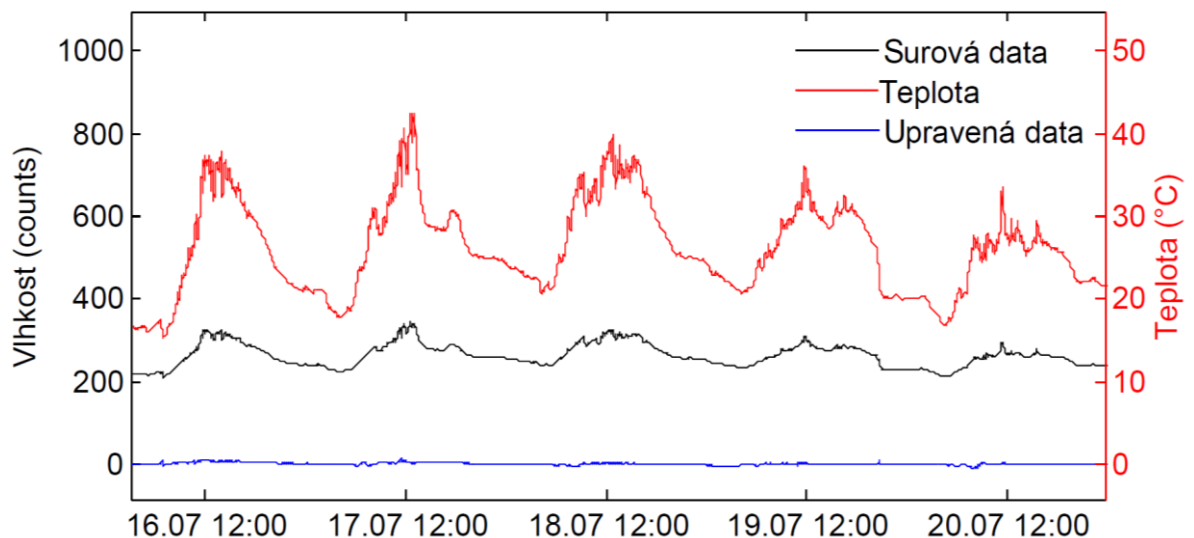
Prvotní zpracování dat

Senzory TMS3 slouží k měření vlhkosti v půdě, ale i při instalaci na vzduchu dobře reagují na změny vlhkosti vzduchu. Nicméně problémem je skutečnost, že na vzduchu navíc reagují na změny teploty. Na Obr. 11 jsou surová data naměřená čidlem TMS3 č. 330 a aktuální teplota měřená stejným čidlem. Teplotní závislost je jednoznačně patrná. S rostoucí teplotou vzduchu je vlhkost nadhodnocována a opačně.

Z tohoto důvodu byla pro další zpracování použita data upravená. Úpravu provedl Ing. Martin Fencl, Ph.D. v rámci svojí disertační práce. Na základě laboratorních testů navrhl jednoduchý lineární model pro odhad „pozaďové linie“ dat $B(-)$

$$B = (b + aT) \quad (1)$$

kde $T(^{\circ}C)$ je okolní teplota vzduchu měřená čidlem TMS3. $a(^{\circ}C)$ a $b(-)$ jsou empirické parametry, které stanovil z měření, kdy byla čidla instalována v suchém prostředí v laboratoři. Pozaďová hodnota vlhkosti při stejné teplotě se v terénních podmínkách v čase mění, proto jsou také parametry funkcí času. To znamená, že se v čase pozaďová hodnota měření mění. Pravděpodobně je to způsobeno prachovými částicemi, které se postupně usazují na povrchu vlhkostního senzoru a při dešti jsou zase spláchnuty.



Obr. 11: Teplotní závislost čidla TMS3 (surová data) a data upravená lineárním modelem (částečně zbavená teplotní závislosti). Data čidla TMS3 č. 330 z roku 2015.

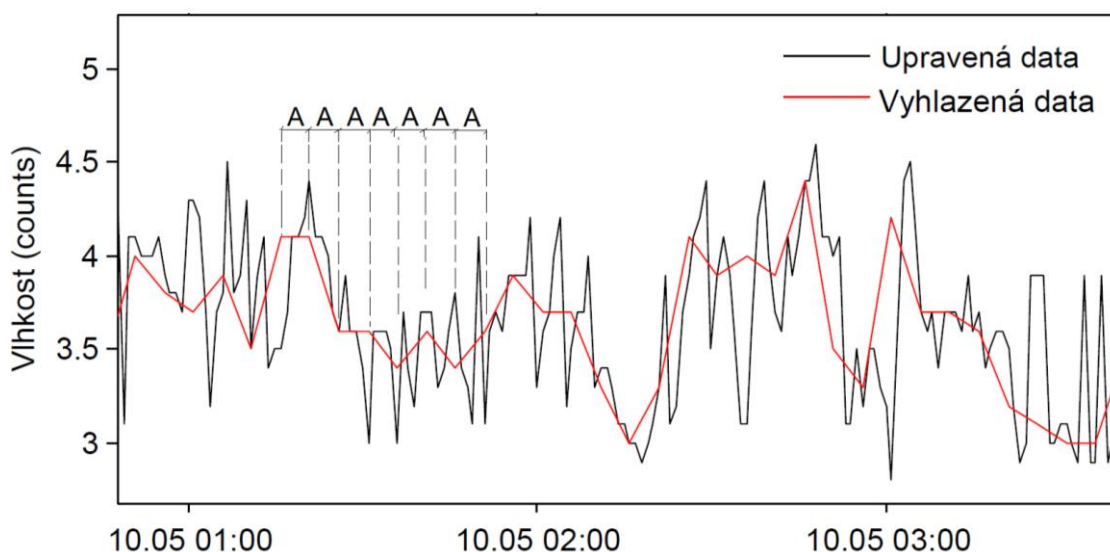
Proto bylo potřeba parametry stanovit pomocí suchých čtení. K tomuto účelu byl použit algoritmus plovoucích oken, který navrhli Schleiss a Berne (2010) [6]. Jak již bylo popsáno v kapitole 2, jedná se o identifikaci suchých a mokrých období pomocí směrodatné odchylky. Pokud je směrodatná odchylka větší, než zvolená hranice jedná se o hodnotu z mokrého období a opačně. Délka plovoucího okna byla nastavena na 11 hodnot (tj. 11 minut) a byla zarovnána na střed. Prahová hodnota byla následně zvolena poměrně

přísně $S_0 = 80\%$. Cílem bylo, aby tato hodnota minimalizovala počet falešně pozitivních údajů o bezdeštných obdobích. Parametry a a b z rovnice (1) byly následně optimalizovány a optimalizovaný model byl poté aplikován na surová data čidel TMS3. Výsledkem jsou upravená data, částečně zbavena teplotní závislosti (na Obr. 11 jsou zobrazena modrou čarou).

Přesto, že byla data takto upravena, nelze stanovit žádnou hodnotu, při jejímž překročení by se jednalo s jistotou o srážku. A naopak při hodnotách nižších by se jednalo o suchá období. Požadovaná hodnota měření jednotlivých čidel se nadále v čase mění, a navíc je značně rozdílná čidlo od čidla. Každé čidlo má jinou reakci na srážkovou událost, tj. každé ukazuje jiné hodnoty vlhkosti. Data také vykazují velké oscilace. Všechny tyto problémy byly důvodem, proč byl navržen vlastní algoritmus identifikace srážkových událostí. Tento algoritmus je schopen vyhledávat začátky, konce srážkových událostí a také dobu, za kterou čidlo po srážkové události doschlo.

Vyhlazení dat

První důležitou součástí algoritmu je metoda filtrace oscilací. V datech s velkými oscilacemi lze jen těžko přesně vyhledávat začátky srážky charakteristické náhlým nárůstem měřených hodnot. Na data byl aplikován tzv. mediánový filtr. Mediánový filtr využívá plovoucího okna, ve kterém se spočte medián měřených hodnot. Použití mediánu je výhodnější než použití např. běžného aritmetického průměru. Pokud je v intervalu jedno výrazně odlišné číslo, výsledek to na rozdíl od aritmetického průměru neovlivní. Plovoucí okno bylo zarovnáno dozadu. To znamená, že hodnota vyhlazených dat v dané minutě je počítána z A předchozích hodnot. A je parametr velikosti plovoucího okna, a byl v této práci uvažován hodnotou 5. V minutových datech, která byla k dispozici, se tedy jedná o pětiminutové okno. Vyhlazená data, která jsou zobrazena na Obr. 12, jsou pětiminutová. Na obrázku je dobře patrné, že se tímto způsobem podařilo docílit celkového vyhlazení. Zároveň byla data zbavena lokálních odlišných hodnot.

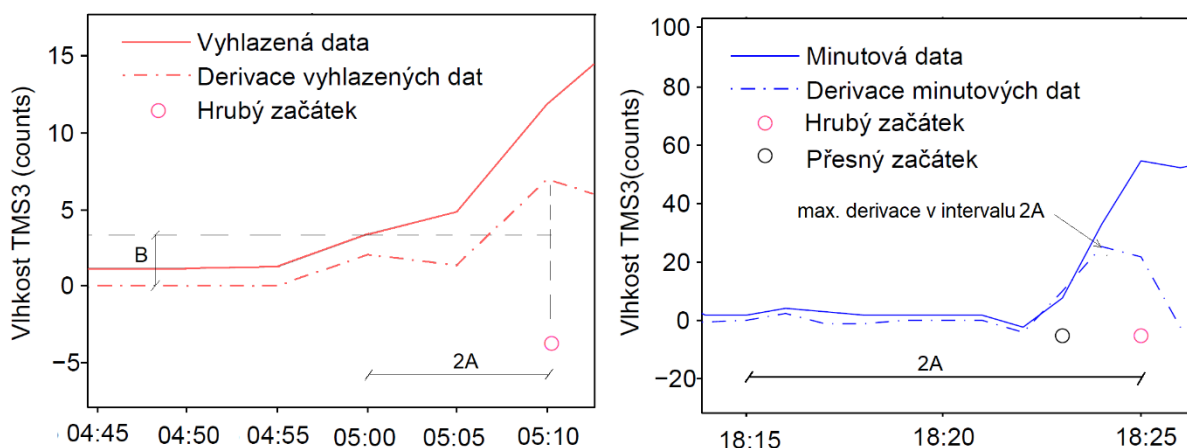


Obr. 12: Upravená data TMS3 (očistěná od vlivu teploty lineárním modelem) a data vyhlazená mediánovým filtrem s vyznačeným parametrem A . Data z čidla TMS3 č. 330 naměřena 10. května 2015.

Detekce začátku srážkové události

Po vyhlazení dat je možné začátek srážkové události hledat podle způsobeného náhlého nárůstu čidlem měřených hodnot. Nárůst lze obecně rozpoznat z prvních derivací měřených hodnot. Z tohoto důvodu byly vypočteny derivace vyhlazených pětiminutových dat. Jako „hrubý“ začátek byl označen čas, kdy první derivace vyhlazených dat překročila definovanou hodnotu parametru B . To znamená, že je v daném čase vypočtená derivace větší než B a v čase o úroveň menším je naopak menší než hodnota parametru B . Zároveň musí být splněna podmínka, že maximální hodnota derivace vyhlazených dat z intervalu $2A$ před „hrubým“ začátkem je menší než B . Parametr B byl nastaven na hodnotu 3 a $A = 5$. Takto vyhledaný začátek srážkové události je označen jako „hrubý“, protože je vyhledáván pomocí vyhlazených dat, která jsou pouze pětiminutová. Schéma vyhledání hrubého začátku je na Obr. 13 vlevo.

Přesný začátek je dále upřesňován pomocí prvních derivací minutových dat. V časovém intervalu $2A$ hodnot před „hrubým“ začátkem (10 min) jsou spočteny derivace minutových dat, za „přesný“ začátek je potom označen čas 1 minutu před časem s největší hodnotou derivace. V dané minutě totiž měřená vlhkost nejvíce vzrostla, proto lze předpokládat, že v této minutě začalo pršet. Příklad vyhledání „přesného“ začátku je na Obr. 13 vpravo.



Obr. 13: Vlevo vyhledaný „hrubý“ začátek z vyhlazených dat a vyznačený parametr B . Data čidla TMS3 č. 330 ze dne 26. května roku 2015. Vpravo je vyhledaný „hrubý“ i „přesný“ začátek (z minutových dat). Data ze dne 13. června 2015, čidlo TMS3 č. 330.

Detekce konce srážkové události

Abychom byli schopni čidly TMS3 detekovat srážky, potřebujeme identifikovat kromě začátků také konce srážkových událostí. V tomto případě není úkol tak jednoduchý. K hledání začátků bylo využito náhlého vzestupu hodnot vlhkostí asociovaného se smáčením povrchu čidla. U konců srážkových událostí však často nepřestává pršet v jednom okamžiku, zejména u intenzivních srážek přechází déšť ke konci události do menších intenzit. Hodnoty měřené vlhkosti mohou lokálně klesat a klesají, přestože stále prší (jen s menší intenzitou). Konec srážkové události je nicméně přesto hledán na základě poklesu měřených hodnot. Za konec srážkové události je považována minuta, ve které jsou splněny podmínky dané nerovnicemi (2), (3) a (4). Nerovnice vyjadřují předpoklad, že čidlo začíná schnout v časové úrovni, kdy derivace vyhlazených dat mění znaménko z kladné na záporné.

$$\text{derivace vyhlazených dat}(i) > 0 \quad (2)$$

$$\text{derivace vyhlazených dat}(i + 1) < 0 \quad (3)$$

Dalším nutným kritériem zahrnutým v algoritmu je kritérium pro hodnoty vyhlazených dat. Aplikace dvou předchozích podmínek (derivace mění znaménko) by vedla k nalezení velkého množství falešných konců v časech, kdy nepršelo a jedná se tak o suchá období. Z tohoto důvodu byla zavedena poslední podmínka pro detekci konce srážky. Vyhlazená data v čase konce srážkové události, tedy v čase i , musí být větší než empirický parametr K (rovnice (4)).

$$\text{vyhlazená data}(i) > K \quad (4)$$

Hodnota tohoto parametru byla metodou pokus-omyl určena na hodnotu 1. Hodnota parametru odpovídá přibližně 65 % dolnímu kvantilu minutových dat vlhkostí čidel TMS3. To znamená, že je nastaven dostatečně přísně, aby nedocházelo k nacházení konců v bezdeštných obdobích.

Detekce doschnutí čidla

V neposlední řadě lze z čidel TMS3 získat informaci o době schnutí. Po konci srážky jsou měřené hodnoty vlhkosti stále relativně vysoké, teprve po několika minutách až hodinách čidlo dosychá. Algoritmus umožňuje vyhledat po srážkové události čas, kdy čidlo doschlo. Opět nelze určit jednoznačnou hranici, tj. hodnotu měřené vlhkosti, při jejímž překročení čidlo dosychá. Především z důvodu nestacionární požadové linie. Pokud by taková hranice byla zvolena, mohlo by docházet k tomu, že by u některých srážkových událostí bylo doschnutí identifikováno dříve a u jiných by zase nebylo nalezeno vůbec. V těchto případech by bylo čidlo nesprávně považováno za mokré.

Pro zjištění času doschnutí bylo proto zavedeno několik kritérií. Prvním kritériem je zavedení hraniční hodnoty pro minutová data. Doschnutí je v algoritmu umožněno pouze v případě, že jsou měřené hodnoty minutových dat menší než 25 counts (nerovnice (5)). Pokud je hodnota vyšší nemůže se jednat o suché čidlo. Hodnota byla určena pro odfiltrování vysokých vlhkostí.

$$\text{hum} < 25 \quad (5)$$

Další dvě kritéria pro detekci schnutí se týkají derivací vyhlazených dat, rovnice (6) a (7). Absolutní hodnota průměru definovaného počtu hodnot derivací vyhlazených dat před doschnutím musí být menší než volitelný parametr G .

$$|\text{průměr}(\text{der. vyhl}(i - 3; i))| < G \quad (6)$$

$$|\text{průměr}(\text{der. vyhl}(i-2; i))| < G \quad (7)$$

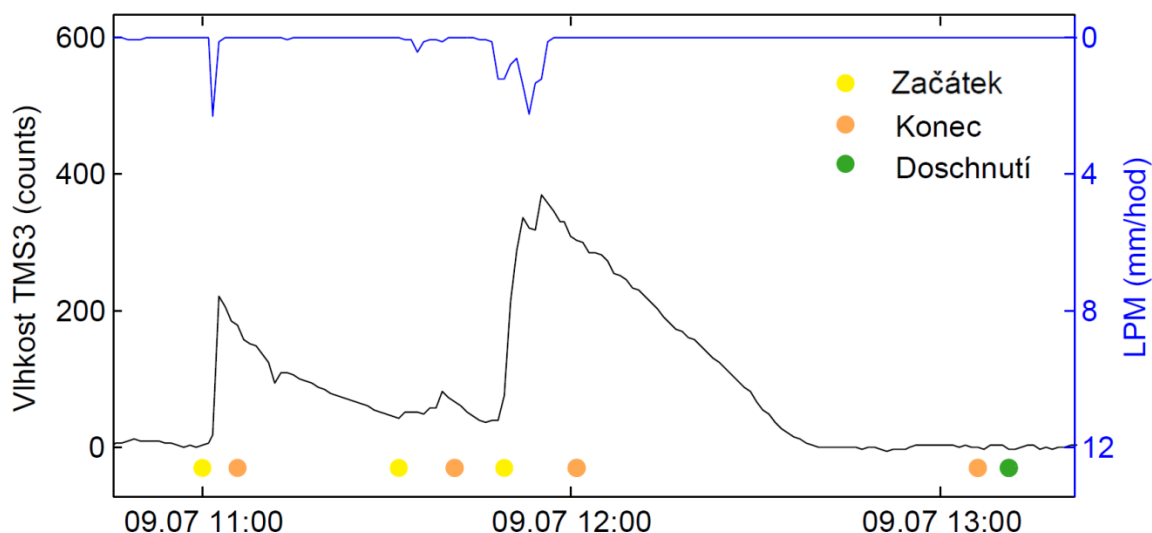
kde *der. vyhl* jsou derivace vyhlazených dat a *G* je kritická hodnota derivací vyhlazených dat. Parametr *G* byl v této práci nastaven na hodnotu 5.

Nerovnice (7) byla do podmínek přidána, aby byly z výběru doschnutí odstraněny časy, kdy hodnoty měřené vlhkosti stále klesají, a přesto je splněna podmínka nerovnice (6) tj. průměr hodnoty v dané minutě a tří předcházejících hodnot derivací vyhlazených dat je menší než hodnota *G*. Tato podmínka může být splněna, pokud je malá derivace vyhlazených dat (menší než *G*) způsobena pouze jejich symetrií a průchodem skrze nulu. Pokud je spočítán i průměr derivace v dané minutě a ze dvou předchozích hodnot bude v případě symetrie čtyř derivací průměr tří derivací větší než hodnota *G*. K nalezení doschnutí tedy v případě takové symetrie nedojde.

Tato kritéria (nerovnice (5),(6) a (7)) mohou splňovat také časy, kdy má srážka sice nízkou, ale po nějakou dobu konstantní intenzitu. Hodnoty mohou být menší než 25 a derivace jsou blízké nule, a tedy nižší než parametr *G*. Proto bylo přidáno dodatečné kritérium. Kritérium využívá směrodatných odchylek vyhlazených dat (*sd*) a udává variabilitu hodnot kolem průměru. Doschnutí je identifikováno pouze v bodě, kde platí, že směrodatná odchylka je menší než parametr *H*, nerovnice (8). Směrodatná odchylka je počítána z mediánových dat a vždy ze tří předchozích hodnot. Parametr *H* byl nastaven na hodnotu 2.

$$sd < H \quad (8)$$

Díky takto definovaným kritériím lze identifikovat suchá a mokrá období lépe než, kdyby byla zvolena pevná hranice, při jejímž překročení by se jednalo o mokré období. Například srážková událost zobrazená na Obr. 14 je *de facto* složena ze dvou menších srážek. Konkrétně se jedná o srážku ze dne 9. července 2015 čidla č. 330, epizoda č. 17 v Tab. 2. Po prvním konci srážky čidlo začíná schnout, a ještě, než dojde k doschnutí, začíná opět pršet. Pokud by začátky a konce nebyly hledány výše navrženým algoritmem, ale pomocí pevné hranice, mezi prvním koncem a druhým začátkem by vzniklo přibližně půl hodinu trvající nesprávně identifikované mokré období. Další nesprávně určené mokré období by vzniklo po posledním konci, kdy čidlo opět dosychá. Obr. 11 je zároveň ukázkou, že navržený algoritmus dokáže dobře detekovat srážky.



Obr. 14: Ukázka identifikace začátků, konců a doschnutí srážkové události pomocí navrženého algoritmu. Srážková epizoda č. 17 ze dne 9. července 2015, čidlo TMS3 č. 330.

5.2 Klasifikace suchých a mokrých období

Z výše popsanych vyhledaných začátků, konců a doschnutí čidla, byla vytvořena matice o třech sloupcích obsahující časy začátků a konců srážek, a časů doschnutí po konci srážky. Byl zaveden předpoklad, že 2.5 % minut určitě prší a jsou to ty minuty s největší naměřenou vlhkostí. To znamená, že za mokré období je označena ta minuta, která spadá do intervalu mezi začátkem a koncem, anebo ta, která překročila 97.5 % percentil dat vlhkosti čidla.

Úspěšnost takto navrženého algoritmu neboli úspěšnost detekce srážek pomocí TMS3 čidel byla posuzována metodou testování statistických hypotéz. Tato metoda se často využívá například v lékařství nebo při hodnocení dopadů aplikace hypotéz, výběr nejlepších způsobů, testování rukopisů, stanovení autorství dokumentů apod. V tomto testování statistických hypotéz je referenční měření LPM považováno za nulovou hypotézu. Chyba prvního druhu představuje chybné odmítnutí nulové hypotézy. TMS3 čidlo společně s navrženým algoritmem identifikuje srážku, ale referenční LPM nikoli. Tyto případy označujeme jako „falešně pozitivní“. Chyba druhého typu spočívá v nesprávném zachování nulové hypotézy. To jsou časy, kdy TMS3 ukazuje suché období a LPM registruje srážkovou událost, mokré období. Tato období označujeme jako „falešně negativní“. Období, kdy se TMS3 a LPM shodují, tedy obě ukazují mokré, respektive suché období, označujeme jako „pravdivě pozitivní“, respektive „pravdivě negativní“.

5.3 Matice záměn

Matice záměn (confusion matrix) jsou specifické matice. Je to způsob vyjádření správně a nesprávně zařazených předpovědí. Konkrétní skupiny (falešně pozitivní, falešně negativní, pravdivě pozitivní a pravdivě negativní) jsou v matici uspořádány tak, že umožňují zobrazit přehled správnosti predikce TMS3 čidla. V jednotlivých sloupcích je počet pozitivních/negativních předpovědí, v řádcích je počet skutečných pozitivních/negativních hodnot, viz Tab. 3.

Tab. 3: Matice záměn, vysvětlení jednotlivých polí matice

	předpovídaný pozitivní	předpovídaný negativní
skutečně pozitivní	<i>pravdivě pozitivní</i>	<i>falešně negativní</i>
skutečně negativní	<i>falešně pozitivní</i>	<i>pravdivě negativní</i>

Algoritmus identifikující suchá a mokrá období lze považovat za binární klasifikátor a matice záměn je potom způsob hodnocení tohoto binárního klasifikátoru. Dalšími hodnotícími klasifikátory v této práci byly přesnost (accuracy, Acc), citlivost (sensitivity, Se) a specifická (specificity, Sp), rovnice (9),(10) a (11).

$$Acc = \frac{P_{poz} + P_{neg}}{P_{poz} + P_{neg} + F_{poz} + F_{neg}} \quad (9)$$

$$Se = \frac{P_{poz}}{P_{poz} + F_{neg}} \quad (10)$$

$$Sp = \frac{P_{neg}}{P_{neg} + F_{poz}} \quad (11)$$

kde $P_{poz/neg}$ je pravdivě pozitivní, resp. negativní a $F_{poz/neg}$ je falešně pozitivní, resp. negativní.

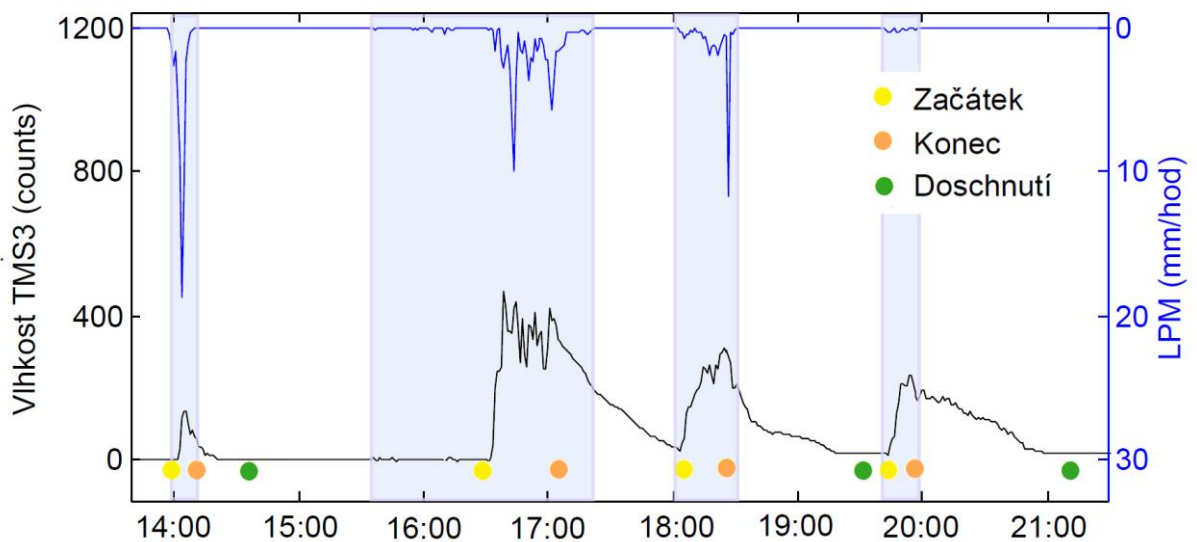
Přesnost nebo správnost (accuracy) vyjadřuje procento správné, pravdivé klasifikace. Citlivost (sensitivity) udává poměr pozitivních, které jsou identifikovány správně a specifická (specificity) zase podíl správně identifikovaných negativních hodnot.

6 Výsledky a diskuze

6.1 Analýza funkčnosti navrženého algoritmu

Díky měření vlhkosti na povrchu čidel TMS3 a použití výše navrženého algoritmu je možné identifikovat začátky a konce srážek a získávat tak důležitou binární informaci, která je často dostupná pouze v omezeném rozsahu. Jak dobře dokáží TMS3 čidla srážky detekovat bylo posuzováno několika způsoby. Prvním způsobem je grafické srovnání se srážkami z LPM.

Na Obr. 15 je ukázka funkčnosti algoritmu. Srážka je ze dne 13. června 2015 registrovaná čidlem TMS3 č. 330. Jedná se o komplexní srážkovou událost tvořenou čtyřmi menšími částmi, jejichž celkový srážkový úhrn byl 2.9 mm/hod. První část srážky je krátká a má poměrně vysokou okamžitou minutovou intenzitu (1.4 mm/hod) už ve druhé minutě. Dle měření LPM začíná v 13:58 a končí v 14:11. Obdobně rozpoznává dešť v tomto případě také TMS3 (od 13:59 do 14:11). Poté následuje krátké období beze srážek, čidlo stačí doschnout a v 15:35 začíná drobné mrholení (průměrná intenzita 0.07 mm/hod). Toto mrholení TMS3 nerozpoznává. Další začátek srážky registruje TMS3 až v 16:28, kdy intenzita deště překračuje 0.5 mm/hod. Konec této druhé části srážky registruje TMS3 asi o 15 min dříve než LPM. Konkrétně konec této části srážky ztotožní s největším poklesem intenzity z 2 mm/hod na 0.3 mm/hod. U třetí části srážky nastupuje začátek měřený LPM opět dříve (17:55). Čidlo TMS3 identifikuje začátek až v 18:05, kdy intenzita deště opět překročila 0.5 mm/hod. Konec druhé části srážky TMS3 opět registruje dříve než referenční měření (při poklesu intenzity z 12 mm/hod na 0.3 mm/hod).



Obr. 15: Ukázka funkce algoritmu vyhledávající začátky, konce srážek a doschnutí čidla. Srážka ze dne 13. června 2015, čidlo č. 330.

Poslední čtvrtá část srážkové události je zajímavá tím, že její průměrná intenzita je 0.14 mm/hod, maximální 0.4 mm/hod, ale odezva TMS3 je výrazná. Hodnoty vlhkosti vystoupají k vyšším hodnotám než při podobně intenzivním dešti na začátku druhé části srážky. Algoritmus proto čtvrtou srážku detekuje poměrně dobře. LPM udává časy 19:42 až 19:59 a TMS3 potom 19:43 až 19:56.

Z výše uvedeného vyplývají dva problémy. Prvním problémem je, že reakce čidla není konzistentní. V některých případech měří vysoké hodnoty vlhkosti a někdy při stejném dešti nereaguje téměř vůbec, nebo jen zcela málo. Druhý problém v identifikaci představuje drobný, málo intenzivní déšť. Odezva vlhkostí je potom téměř vždy malá a TMS3 srážku nedokáže identifikovat (často srážky s nižší intenzitou než 0.5 mm/hod). Při nízkých intenzitách TMS3 srážku nerozeznává bez ohledu na to, zda je tato intenzita spojena s identifikací začátku nebo konce srážky.

Rozdíly začátků a konců srážek s úhrnem vyšším než 2 mm

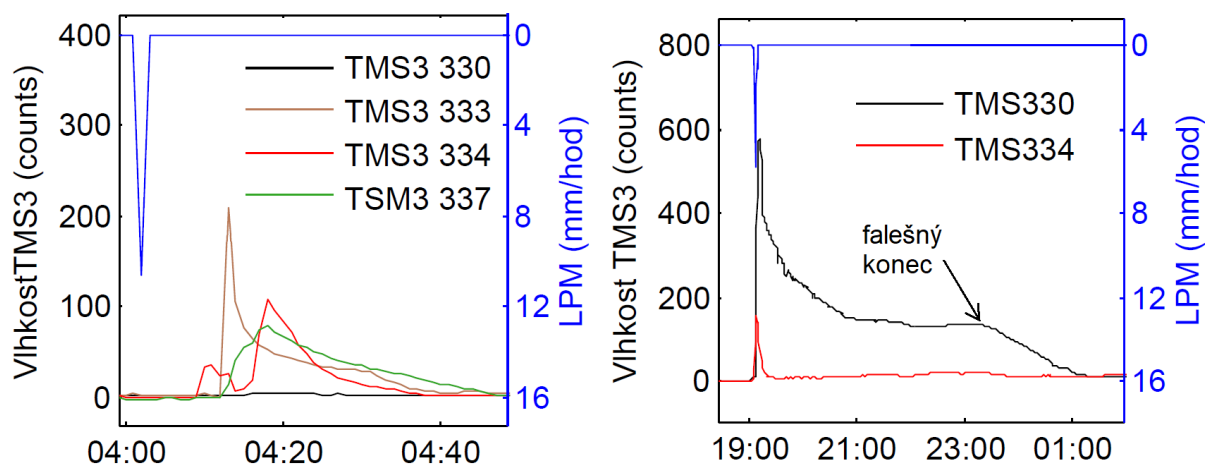
Podle výsledků srovnání jedné srážky nelze dělat závěry obecně platné pro identifikaci všech srážek. Pro lepší zhodnocení byly z období, které bylo k dispozici, vybrány všechny srážkové epizody s úhrnem vyšším než 0.1 mm, srážky z Tab. 2. Výběr epizod je popsán v kapitole 4.2. U těchto srážek byly vypočteny časové rozdíly začátků a konců oproti začátkům a koncům z referenčního měření LPM. Tyto rozdíly jsou uvedeny v Tab. 4. V Tab. 4 jsou pro srovnání kromě rozdílů TMS3 čidel uvedeny také rozdíly v identifikaci těchto srážkových událostí v případě překlopného srážkoměru.

Tab. 4: Časové rozdíly začátků a konců identifikovaných pomocí TMS3 čidel a překlopného srážkoměru (RG) oproti referenčnímu měření LPM. Srážky s úhrnem vyšším než 0.1 mm z období 22. května až 13. srpna v roce 2015. Kladné znaménko znamená zpoždění oproti LPM, záporné znaménko značí začátek/konec z přístroje dříve než LPM. Podtržení značí opoždění kvůli slabé intenzitě, červené písmo špatnou reakci čidel, zelené písmo problém nastavení parametru algoritmu a modré písmo chybu způsobenou dlouho mokřým čidlem.

Číslo	Začátek/konec epizody (LPM)	Rozdíly oproti LPM začátek. / konec (min)				
		RG	TMS3 330	TMS3 333	TMS3 334	TMS3 337
1	15:51 / 16:40	<u>-26</u> / 6	<u>-21</u> / 4	<u>-16</u> / 9	<u>-24</u> / 4	<u>-22</u> / 4
2	22:12 / 23:01	-1 / 3	2 / 5	3 / 10	2 / 0	2 / 0
3	19:05 / 19:11	-2 / 3	0 / <u>-250</u>	4 / -5	0 / 0	0 / 0
4	19:55 / 10:55	-4 / 173	10 / 139	-3 / -51	<u>-17</u> / 174	0 / 69
5	15:35 / 18:32	<u>-66</u> / 7	<u>-53</u> / 6	<u>-46</u> / 16	<u>-55</u> / 11	<u>-55</u> / 6
6	20:31 / 21:06	<u>-65</u> / <u>-39</u>	<u>-52</u> / 118	<u>-27</u> / <u>12</u>	<u>-147</u> / <u>38</u>	<u>0</u> / <u>38</u>
7	2:09 / 5:47	<u>-51</u> / 30	<u>-155</u> / 21	-84 / 28	<u>-149</u> / 36	<u>-145</u> / 51
8	12:05 / 12:18	3 / 5	-5 / -3	<u>-33</u> / <u>-28</u>	0 / 2	-5 / -3
9	21:16 / 21:38	143 / 7	-9 / -3	-9 / 2	<u>153</u> / 3	1 / 2
10	13:36 / 15:42	<u>-77</u> / <u>74</u>	3 / <u>70</u>	<u>-74</u> / <u>75</u>	<u>-112</u> / <u>75</u>	<u>-64</u> / <u>100</u>
11	0:14 / 3:43	<u>-19</u> / 14	<u>-12</u> / 2	-1 / -3	<u>-131</u> / 22	<u>-20</u> / -3
12	10:30 / 12:10	-4 / -61	2 / -1	8 / -1	1 / 4	2 / -6
13	15:52 / 16:13	-4 / 4	-3 / 7	10 / <u>-43</u>	3 / 7	10 / 2
14	16:11 / 17:57	-3 / <u>81</u>	-1 / <u>81</u>	-3 / <u>46</u>	1 / <u>81</u>	1 / <u>91</u>
15	3:33 / 4:02	-40 / -26	<u>n/a</u> / <u>n/a</u>	-29 / -14	-36 / -19	-31 / -19
16	0:52 / 2:03	-2 / 9	11 / 6	10 / <u>-69</u>	6 / 6	6 / <u>21</u>
17	10:47 / 11:57	-61 / 1	-13 / -4	<u>n/a</u> / <u>n/a</u>	-62 / 1	2 / 1
18	22:01 / 0:34	-10 / 15	-9 / 23	-9 / <u>138</u>	-9 / <u>138</u>	-9 / 18
19	2:28 / 6:35	-14 / <u>61</u>	<u>-67</u> / 5	-7 / 4	<u>-102</u> / -1	<u>-101</u> / <u>54</u>
20	18:16 / 18:58	-14 / -87	-8 / 12	-8 / 22	-7 / 12	1 / 12
21	5:48 / 7:10	-1 / 17	-2 / 29	13 / 18	-2 / 34	-2 / 13
22	14:11 / 14:44	-2 / 3	3 / 3	-10 / 7	4 / 3	0 / 2
23	1:31 / 2:35	-6 / 38	-2 / 34	0 / 3	<u>-13</u> / <u>44</u>	<u>n/a</u> / <u>n/a</u>
24	15:44 / 16:12	-1 / -3	4 / 21	-2 / 15	-1 / 21	-2 / 15
25	17:09 / 18:50	-12 / 13	-45 / 19	-5 / 18	<u>-51</u> / 39	-2 / 43

Problém nastává již u první srážkové epizody. Testovaná čidla detekují začátek zhruba o 20 minut později než referenční LPM. Důvodem je již zmíněná malá intenzita deště. Těchto 20 minut prší průměrnou intenzitou cca 0.2 mm/hod. Druhým takovým případem je epizoda číslo 5 ze dne 13. června. Dle definice srážky z měření LPM je začátek této epizody v 15:35, ale všechna čidla i překlopný srážkoměr detekují srážku téměř o hodinu později, kdy začíná pršet větší intenzitou, viz Obr. 15. Stejně tak je tomu u epizody 11. Čidla detekují srážku zhruba o 20 min později, protože prší průměrnou intenzitou 0.2 mm/hod (maximální 0.4 mm/hod).

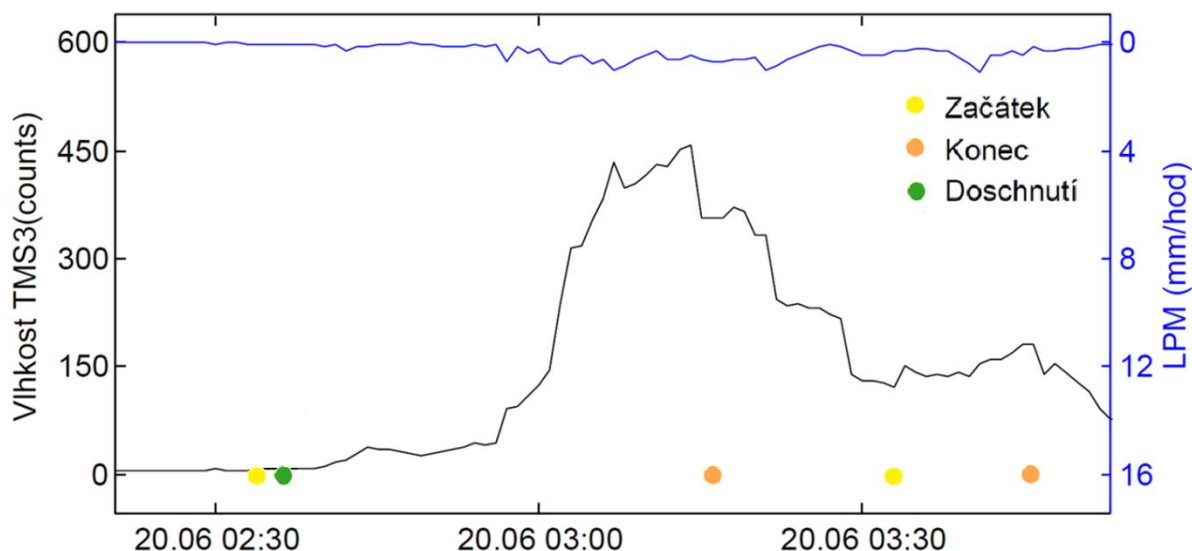
Druhým typem problému při identifikaci pomocí navrhovaného algoritmu je špatná, nebo žádná reakce čidla TMS3 na srážku. Dobrým příkladem chyby čidla je Obr. 16 vlevo. Zobrazuje srážkovou epizodu č. 15 ze dne 6. července 2015. TMS3 č. 330 na srážku nereaguje. Ostatní čidla na tuto epizodu reagují opožděně. Další případy, kdy některé z čidel na srážku nereaguje, jsou v Tab. 4.



Obr. 16: Vlevo: srážková epizoda č. 15 ze dne 6. července 2015. Příklad špatné reakce čidel TMS3. Vpravo: Falešně určený konec způsobený dlouho mokrým čidlem a náhlým schnutím. Epizoda č. 3 ze dne 1. června 2015. Čidla č. 330 a 334.

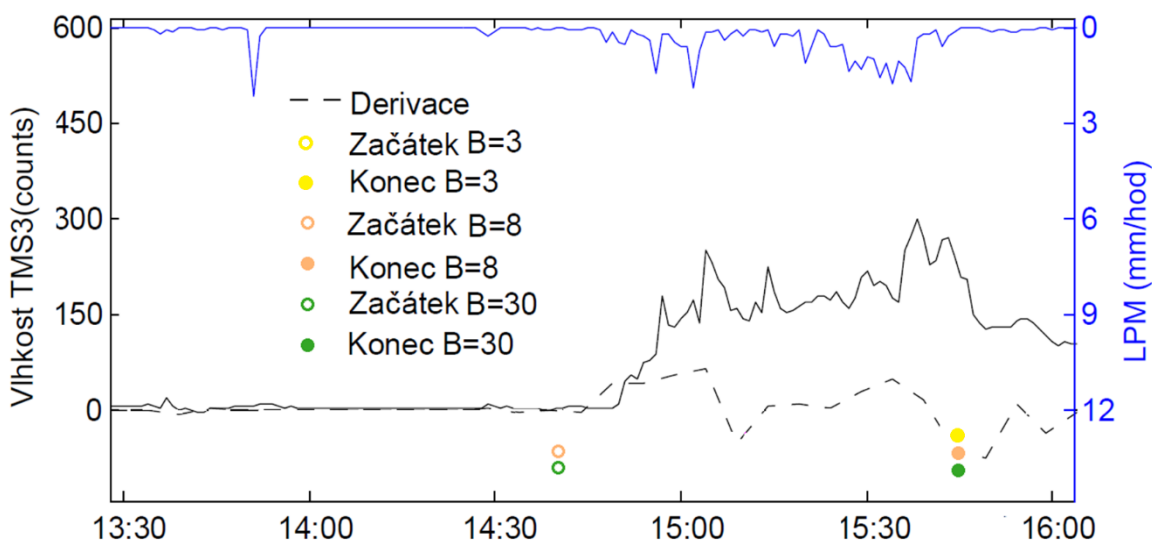
Ve třech případech se vyskytuje chyba spojená s dlouhým dosycháním. Čidlo je po srážce mokré (hodnoty vlhkosti jsou vysoké), a poté začíná rychle schnout. Algoritmus tento čas falešně označí za konec srážky. Tato situace nastala v případě epizody 3, čidla TMS3 č. 330, epizody 13 a 16, u čidla TMS3 č. 333. Obr. 16 vpravo zobrazuje epizodu č. 3 registrovanou čidly č. 330 a 334. Z obrázku je dobře patrné, že čidlo č. 334 reaguje spolehlivě a umožňuje správnou detekci. Zatímco čidlo TMS3 č. 330 po srážce ukazuje stále vysoké hodnoty. Pravděpodobně z tohoto čidla nestekly a zůstaly na něm kapičky vody, kterým vysoká vzdušná vlhkost poté neumožnila se vypařit. Čidlo tak zůstalo několik hodin mokré.

Další chyba detekce nastala v případě epizody č. 7 ze dne 20. června 2015. Čidlo č. 333 zaznamenalo srážku opožděně, protože hned po začátku data splňují podmínky algoritmu pro detekci jeho doschnutí. Algoritmus tak vyhodnotí doschnutí čidla dříve než konec srážky. Jestliže čidlo doschne dříve, než přestane pršet, dle nastavených podmínek algoritmu vůbec pršet nezačalo. Za pravý začátek je označen až další vyhledaný začátek, který však ve skutečnosti odpovídá druhému vrcholu srážky. Tato chybná identifikace je zobrazena na Obr. 17.



Obr. 17: Ukázka chyby identifikace. Srážková epizoda č. 7 ze dne 20. června 2015, čidlo 333. Chybně vyhledané doschnutí.

Příčinou dalšího typu chyby je nastavení parametru B algoritmu. Parametr B je kritická hodnota derivací vyhlazených dat, která musí být překročena, aby byl v okolí nalezen začátek. To znamená, že v daném čase musí být hodnota derivace větší, ale dvě hodnoty předtím musí být zároveň menší (tj. při nastavení parametru $A = 5$ předcházejících 10 min). Tato podmínka při nastavení malé hodnoty parametru nemusí být vždy splněna. Například v situacích, kdy má déšť pozvolnější nástup. Derivace nejprve rostou, následně klesnou pod danou hranici, ale pouze v jedné hodnotě (jednom pětiminutovém okně) a poté se opět začínají zvedat. Příkladem této chybné identifikace je Obr. 18.



Obr. 18: Srážka č. 10, ze dne 22. června 2015, čidlo 334 se zobrazením vyhledaných začátků a konců při různém nastavení parametru B .

Na Obr. 18 je srážková epizoda č. 10, čidla TMS3 č. 334. Při nastavení parametru B na hodnotu 3 algoritmus začátek neidentifikuje. Při vyšších hodnotách parametru B je začátek detekován. Tato skutečnost byla mimo jiné důvodem, proč byl tento parametr dále

optimalizován. Velké rozdíly v detekci způsobené nastavením parametru B jsou v Tab. 4 zvýrazněny zeleně.

Pokud bychom z výpočtů vyřadili tyto problémové epizody. Začátek srážky TMS3 detekuje průměrně o 2 minuty později než LPM, překlopný srážkoměr potom o 13 minut později.

6.2 Matice záměn všech TMS3 čidel pro experimentální období

Abychom dostali představu o celkové schopnosti algoritmu detekovat srážky (nejen velké) byla provedena analýza na celém datovém souboru. Použita byla všechna společná data přístrojů TMS3 a LPM, tj. v období od 22. května do 13. srpna 2015. Vypočtena byla procenta času, kdy měření TMS3 ve srovnání s referenčním přístrojem LPM spadají do jednotlivých kategorií: falešně pozitivní, falešně negativní, pravdivě pozitivní a pravdivě negativní. Kategorizace minutových měření byla provedena pro všechna čtyři čidla a procentuální zastoupení jednotlivých skupin je na Obr. 19 ve formě matic záměn. Matice záměn a jednotlivé skupiny, které je tvoří, jsou popsány v teoretické části.

TMS 330	2.00	1.60	TMS 333	2.03	1.58
	1.32	95.05		1.36	95.03
TMS 334	1.78	1.82	TMS 337	2.04	1.56
	1.12	95.27		1.32	95.08

Pravdivě pozitivní	Falešně negativní	Falešně pozitivní	Pravdivě negativní
--------------------	-------------------	-------------------	--------------------

Obr. 19: Matice záměn vyjadřující procento času, které spadá do příslušné kategorie. Počítáno z minutových dat čidel TMS3 330, 333, 334 a 337 ve srovnání s referenčním LPM.

Nejvíce zastoupenou skupinou jsou přirozeně pravdivě negativní. To je vzhledem k charakteru podnebí na našem území logické – časové úseky, kdy se vyskytují srážky, zaujmají jen zlomek času. Většinu času (podle LPM asi 96.4%) ke srážkové činnosti nedochází. Zbytek času, tj. dle LPM 3.6 %, je klasifikován jako mokré období. Z těchto 3.6 % minut čidla správně identifikují cca 2 %. Zbylé období, tj. cca 1.6 % času, TMS3 nesprávně registrují jako negativní, tedy suchá období. Pravděpodobně se jedná o srážky s nízkou intenzitou.

Jak již bylo zmíněno, déšť nízké intenzity TMS3 nerozpoznává. Na druhou stranu tyto deště nerozpoznává ani překlopný srážkoměr. Přístroj k měření srážek určený. Problémem jsou falešně pozitivní hodnoty. Asi zhruba 1.3 % času čidla TMS3 registrují falešně za srážkovou. Tuto skupinu dat tvoří pravděpodobně z velké části chyby popsané výše (viz Obr. 16, Obr. 17 a Obr. 18).

Hodnotící klasifikátory pro jednotlivá čidla TMS3

Z předchozích výpočtů zastoupení skupin matice záměn byly vypočteny sumární hodnotící klasifikátory. Přesnost, citlivost a specificita nám umožňují komplexnější informaci o schopnosti detekce čidel TMS3. V Tab. 5 jsou tyto hodnotící klasifikátory vypočtené pro všechna čidla TMS3 a překlopný srážkoměr (RG). Přesnost, jež udává

procento správně zařazených minut, byla u všech čidel včetně RG asi 97 %. Toto poměrně vysoké číslo je způsobeno početně zastoupenou skupinou pravdivě negativních měření. Citlivost TMS3 čidel se pohybuje kolem 56 % (kromě čidla 334, které má citlivost pouze 49%). Citlivost představuje poměr správně určených pozitivních hodnot a všech minut, kdy opravdu pršelo. To znamená, že detekuje-li LPM déšť, v 56 % času jej registruje také čidlo TMS3. Naproti tomu překlopný srážkoměr vykazuje citlivost pouze 11.7 %. To znamená, že TMS3 čidla mají citlivost téměř pětinasobně vyšší.

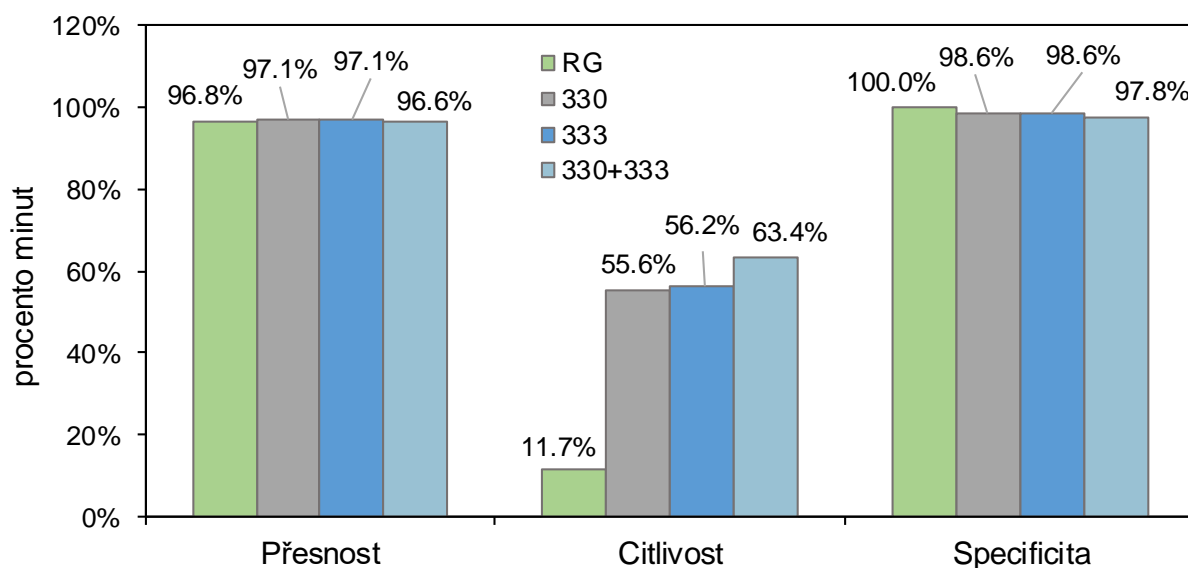
Posledním hodnotícím klasifikátorem je specifická. Jedná se o poměr správně identifikovaných negativních hodnot a všech dat, kdy opravdu nepršelo. Pro použitou datovou sadu srážek platí, že pokud suché období identifikuje LPM, v 98.6 % jej identifikuje správně také TMS3. Překlopný srážkoměr má specificku rovných 100 %, což vyplývá z podstaty měření. Pokud neprší, není možné, aby do překlopného srážkoměru natekla voda a jeho člunek se překlopil.

Tab. 5: Klasifikátory hodnocení v procentech času.

	TMS3 330	TMS3 333	TMS3 334	TMS3 337	RG
Přesnost	97.1	97.1	97.1	97.1	96.8
Citlivost	55.6	56.2	49.4	56.7	11.7
Specifická	98.6	98.6	98.8	98.6	100.0

Použití TMS3 čidel v páru

Spolehlivost detekce může být mírně vylepšena použitím dvou čidel na místo jednoho. Při použití dvou čidel bylo zavedeno následující pravidlo: ukazuje-li alespoň jedno čidlo (tj. jedno, druhé nebo obě), že prší, považujeme danou minutu za TMS3 pozitivní. S takto vytvořeným vektorem byla provedena stejná analýza jako při použití jednoho čidla. Na Obr. 20 můžeme vidět všechny tři hodnotící klasifikátory při použití vždy jen jednoho čidla (konkrétně jen č. 330 a jen č. 333). Zároveň jsou na Obr. 20 také hodnotící klasifikátory při použití těchto dvou čidel současně (tj. č. 330 i 333). Pro srovnání jsou uvedeny i klasifikátory dat překlopného srážkoměru. Je zřejmé, že při použití dvou čidel současně výrazně vzroste citlivost. Citlivost čidla TMS3 č. 330 je 53.2 % a citlivost TMS3 č. 333 je 57.2 %. Použijeme-li obě čidla současně, dostáváme citlivost 63.4 %.



Obr. 20: Klasifikátory hodnocení při použití jednoho čidla nebo překlopného srážkoměru a při použití dvou čidel TMS3 současně.

Hodnotící klasifikátory pro všechny kombinace čtyř čidel jsou zobrazeny v Tab. 6. Přesnosti všech kombinací se pohybují mezi 96.6-96.9 %, což je o 0.2-0.5 % méně než při použití jednoho čidla. Je to způsobené tím, že při použití dvou čidel nepatrně vzroste skupina falešně pozitivních minut. Poklesne také specifická (cca o 0.2-0.3 %). To je nepřímou opět způsobené tím, že vzrostla skupina falešně pozitivních, protože vzrostla na úkor pravdivě negativních.

Nejhorší hodnoty klasifikátoru citlivosti vyšly u kombinací dvojic s čidlem č. 334. Na druhou stranu u těchto dvojic byl zaznamenán nejmenší pokles přesnosti a specifický.

Tab. 6: Klasifikátory hodnocení při použití dvou čidel TMS3 souběžně. Všechny kombinace čidel. Jednotlivé klasifikátory jsou uvedeny v %.

	330-333	330-334	330-337	333-334	333-337	334-337
Přesnost	96.6	96.8	96.8	96.6	96.9	96.9
Citlivost	63.4	60.1	63.1	62.1	63.1	58.6
Specifická	97.8	98.2	98.1	97.9	98.1	98.3

6.3 Detekce srážek dle úhrnu

V této kapitole je popsán rozdíl v detekci srážek s různým úhrnem. Především bylo zkoumáno, zda TMS3 lépe a spolehlivě identifikují intenzivní deště s vysokým úhrnem nežli srážky málo intenzivní s menším úhrnem. Bylo zkoumáno, do jaké míry jsou čidla TMS3 schopna detekovat slabé či mírné deště.

Nejprve byla z dat LPM vybrána srážková data, tj. když LPM registruje jakoukoliv kladnou hodnotu. Srážková data byla sloučena a považována za jednu srážku, pokud byl mezi nimi interval kratší než 30 min. Minuty, ve kterých přšlo s menší intenzitou než 0.012 mm/hod, byly označeny za bezdeštné. U takto vybraných srážek byl spočten jejich

srážkový úhrn. Srážky byly následně rozděleny do tří skupin dle velikosti jejich úhrnu. První skupinu tvoří srážky s úhrnem vyšším než 0.1 mm (25 srážek), v druhé skupině jsou srážky menší než 0.1 mm a větší dobou trvání než 1 minuta (102 srážek). Do třetí skupiny patří osamocené srážkové hodnoty (47 hodnot). To znamená, že LPM v dané minutě registruje kladnou intenzitu deště, ale v 30 minutách před touto minutou ani po této minutě nikoliv. Tyto osamocené srážkové hodnoty představují velmi nízké srážkové intenzity, nejčastěji cca 0.002 mm/hod. Tyto hodnoty nejsou v této analýze považovány za srážky a analýza se jimi dále nezabývá.

S prvními dvěma skupinami byl proveden analogicky stejný výpočet jako v předchozí kapitole (kapitola 6.2). Vypočteny byly skupiny matic záměn a z nich hodnotící klasifikátory, které jsou zobrazeny v Tab. 7.

Tab. 7: Hodnotící klasifikátory (přesnost, citlivost a specifická) pro všechna data, srážky s úhrnem >0.1 mm a srážky s úhrnem <0.1 mm. TMS3 čidlo č. 333.

	Všechna data	Úhrn > 0.1 mm (%)	Úhrn < 0.1 mm (%)
Přesnost	97.1	71.7	66.4
Citlivost	56.2	74.1	44.1
Specifická	98.6	66.3	85.6

Přesnost je u srážek s úhrnem > 0.1 mm a u srážek s úhrnem < 0.1 mm nižší než při použití všech dat. Důvodem jsou pravdivě negativní hodnoty, kterých je u všech dat většina, naproti tomu u dat vybraných srážek pouze minimum. U velkých srážek je přesnost vyšší než u malých srážek. To potvrzuje předpoklad, že srážky s vyšším úhrnem jsou lépe detekovány.

Citlivost je u srážek s vyšším úhrnem vyšší než u kompletního datového souboru, cca 74 %. U srážek s nižším úhrnem je naopak menší, asi 44 %. Opět to ukazuje na lepší schopnost detekce srážek s vyšším úhrnem. Specifická je ovlivněna pravdivě negativními hodnotami. Pravdivě negativních hodnot je nejvíce ve všech datech, potom ve výběru srážek s nižším úhrnem, a nakonec nejméně jich je u srážek s vysokým úhrnem. Stejně pořadí mají hodnoty klasifikátoru specifické.

Obdobné hodnoty klasifikátorů vyšly u ostatních čidel TMS3. Přesnost, citlivost a specifická pro velké a malé srážky pro všechna čidla TMS3 jsou v Tab. 8. Ve všech klasifikátorech vychází nejlépe čidlo č. 337. Největší citlivost vykazuje čidlo č. 333. Na druhou stranu má toto čidlo nejnižší specifickou. U všech čidel platí, že velké srážky detekují s větší přesností a citlivostí a s menší specifickou.

Tab. 8 Hodnotící klasifikátory (přesnost, citlivost a specifická) pro velké (srážky s úhrnem > 0.1 mm) a malé srážky (srážky s úhrnem < 0.1 mm). Všechna čtyři čidla TMS3 (č. 330, č. 333, č. 334 a č. 337).

	TMS3 330		TMS3 333		TMS3 334		TMS3 337	
	Velké	Malé	Velké	Malé	Velké	Malé	Velké	Malé
Přesnost	70.7	66.3	71.7	66.4	69.7	63.5	72.9	64.2
Citlivost	68.4	42.0	74.1	44.1	65.4	36.4	71.8	38.1
Specifická	75.9	87.5	66.3	85.6	79.7	87.3	75.5	87.0

6.4 Interpretace výsledků dle typu padajících srážek

Jak již bylo zmíněno u popisu LPM, přístroj je schopný identifikovat kromě intenzity také typ srážky. Data z období od 22. května do 13. srpna byla rozdělena do 15minutových intervalů a v nich byl určen převládající typ srážky. Typy srážek a počet intervalů, které se v tomto období vyskytovali, jsou zobrazeny v Tab. 9. Z Tab. 9 je zřejmé, že při zvolení jednoho převládajícího typu srážky pro celý interval, došlo ke ztrátě suchých období. V případě minutových dat, deštivých období bylo v souboru 3.6 %. V případě 15minutových intervalů je deštivých období 3.7 %. Došlo tedy k jistému zaokrouhlení. Orientačně však má tato analýza potenciál ukázat, zda je některý typ deště pomocí TMS3 lépe detekovatelný.

Převládajícím typem srážkové činnosti je déšť. Necelé jedno procento času (0.69 %) mrholilo a 0.14 % času LPM registruje převládající typ srážky „mrhnutí s deštěm“. Jen zřídka LPM registroval silný déšť, kroupy.

Tab. 9: Rozdělení 15minutových intervalů do jednotlivých typů srážek dle převládajícího typu srážky z LPM dat. Data od 22. května do 13. srpna, 2015.

Typ srážky	Počet intervalů	
	(-)	(%)
Sucho	7728	96.26
Mrhnutí	55	0.69
Mrhnutí s deštěm	11	0.14
Déšť	230	2.86
Silný déšť, kroupy	4	0.05

Skupiny matice záměn (tj. skupina pravdivě pozitivní, falešně negativní, pravdivě negativní a falešně pozitivní) byly vypočtené z 15minutových intervalů přístroje LPM a všech čtyřech čidel TMS3. Zda je v daném intervalu TMS3 pozitivní, bylo vypočteno pomocí modu binárních dat čidla TMS3. To znamená, že pokud je v daném 15minutovém intervalu převládající počet hodnot 1 (1 = prší), je tento interval považován celý za pozitivní. V opačném případě je-li v daném 15minutovém intervalu převládající počet hodnot 0 (0 = neprší), je tento interval celý považován za suché období.

Počet „pravdivě negativních“ a „falešně pozitivních“ intervalů (tj. intervalů, kdy podle LPM nepršelo) nehrají v této analýze velkou roli. Jde především o rozdělení intervalů, ve kterých opravdu pršelo, do jednotlivých skupin typů srážky. Intervaly, ve kterých opravdu pršelo, spadají buď do skupiny pravdivě pozitivní, nebo falešně negativní. Pravdivě negativní skupina matice záměn se pohybuje u jednotlivých čidel TMS3 kolem 95 % a skupina falešně pozitivní okolo 1 %. Dohromady tyto hodnoty udávají procento suchých intervalů 96.26 % (viz Tab. 9).

Pravdivě pozitivní a falešně negativní procentuální rozdělení u jednotlivých typů srážek pro všechna čidla TMS3 je zobrazeno v Tab. 10. Z Tab. 10 je zřejmé, že nejlépe detekovatelný typ deště je „mrhnutí s deštěm“. Čidla TMS3 č. 333 a 337 detekují správně všechny intervaly, ve kterých tento typ deště převládá. Čidla č. 330 a 334 detekují 82 % intervalů deště toto typu. Silný déšť či kroupy jsou také velmi dobře detekovatelné. TMS3 čidlo č. 330 rozpoznalo správně všechny čtyři intervaly, ve kterých byl tento typ převládající. Ostatní čidla silný déšť nebo kroupy rozpoznala ve třech intervalech ze čtyř. „Déšť“ je

nejčastějším typem srážky, který je zhruba v polovině případů identifikován správně a v druhé polovině falešně. To platí pro všechna čidla TMS3. Pokud jen mrholí (typ srážky „mrholení“) je srážka rozpoznána zhruba ve 40 % případů.

Tab. 10: Skupiny matice záměn „pravdivě pozitivní“ a „falešně negativní“ vypočtené s rozdělením dle typu srážky. Typ srážky určen dle kódu dat LPM. Použitá data od 22. května do 13. srpna 2015.

TMS3 č. 330			TMS3 č. 333		
	Pravdivě pozitivní (%)	Falešně negativní (%)		Pravdivě pozitivní (%)	Falešně negativní (%)
Mrholení	38	62	Mrholení	45	55
Mrholení s deštěm	82	18	Mrholení s deštěm	100	0
Děšť	54	46	Děšť	52	48
Silný déšť, kroupy	100	0	Silný déšť, kroupy	75	25

TMS3 č. 334			TMS3 č. 337		
	Pravdivě pozitivní (%)	Falešně negativní (%)		Pravdivě pozitivní (%)	Falešně negativní (%)
Mrholení	42	58	Mrholení	38	62
Mrholení s deštěm	82	18	Mrholení s deštěm	100	0
Děšť	44	56	Děšť	50	50
Silný déšť, kroupy	75	25	Silný déšť, kroupy	75	25

6.5 Citlivostní analýza parametrů algoritmu

Parametr B

Nastavení parametru B se v analýze funkčnosti navrženého algoritmu (kapitola 6.1) ukázalo poměrně problematické. V některých případech nízká hodnota tohoto parametru způsobí, že srážková událost není správně detekována, protože nebyl vyhledán její začátek. Z tohoto důvodu byl parametr B vybrán do citlivostní analýzy.

Matice záměn všech TMS3 čidel vypočtených při nastavení různých hodnot parametru B jsou zobrazeny na Obr. 21. Hodnoty parametru byly testovány tři ($B = 3, 8$ a 30). Pokud je cílem maximalizace počtu pravdivě pozitivních hodnot, jednoznačně nejlepší výsledky dává nastavení parametru $B = 3$. Současně falešně negativních hodnot by mělo být co nejméně. S rostoucím parametrem B skupina falešně negativních hodnot roste (při použití parametru $B = 3$ je falešně negativních hodnot cca o 1 % méně než při použití parametru $B = 30$). To znamená, že z tohoto pohledu je také nejvhodnější hodnota parametru $B = 3$.

	$B=3$		$B=8$		$B=30$	
TMS	2.00	1.60	1.98	1.63	1.89	1.72
330	1.34	95.05	1.29	95.1	1.37	95.03
TMS	2.03	1.58	1.95	1.66	1.85	1.76
333	1.36	95.03	1.27	95.12	1.29	95.1
TMS	1.78	1.82	1.76	1.85	1.70	1.91
334	1.12	95.27	0.91	95.49	0.87	95.52
TMS	1.99	1.62	1.92	1.69	1.91	1.70
337	0.96	95.43	0.93	95.47	0.87	95.52

Pravdivě pozitivní Falešně negativní Falešně pozitivní Pravdivě negativní

Obr. 21: Matice záměn pro různá nastavení parametru B a pro všechny čidla TMS3 (č. 330, 333, 334 a 337).

Falešně pozitivní skupina s rostoucí hodnotou parametru B ve většině případů klesá. To odpovídá situaci, kdy při vyšší hodnotě parametru algoritmus nachází méně srážek, a tedy zároveň méně falešných srážek. U čidel TMS3 č. 330 a č. 333 skupina falešně pozitivních nejprve klesá a při dalším zvyšování parametru roste. Případem falešně pozitivních hodnot způsobených nenalezeným začátkem může být srážková epizoda, která se skládá z několika začátků a konců a mezi nimi jsou krátká suchá období. Není-li nalezen například druhý začátek, konec první části srážky je přiřazen k prvnímu začátku. Celé suché období mezi první a druhou částí je následně označeno falešně jako pozitivní.

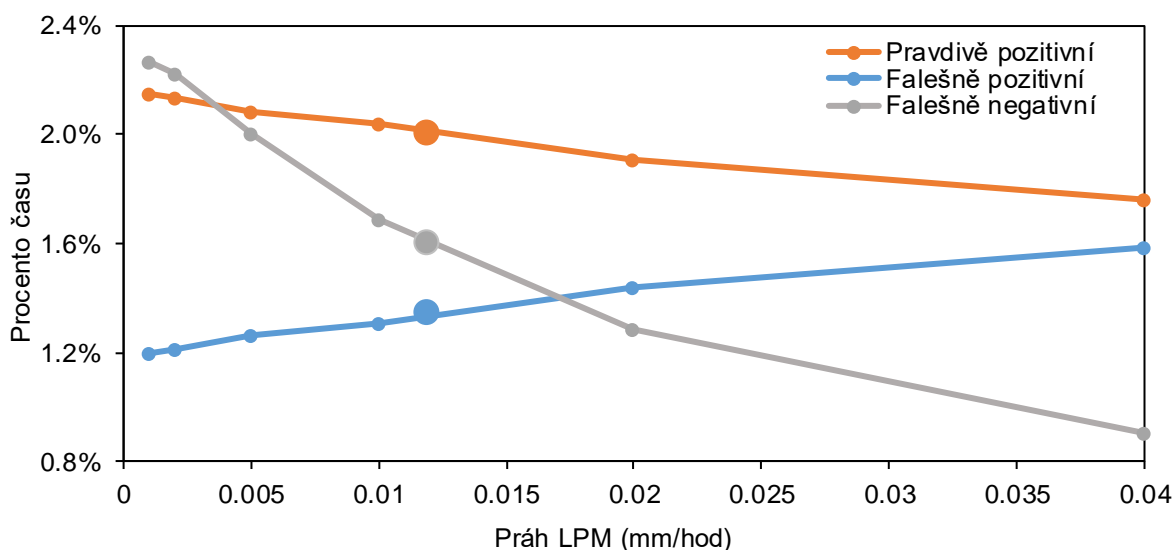
Pravdivě negativní skupina je při nastavení parametru $B = 3$ nejmenší. To je opět způsobeno, tím, že při vyšších hodnotách parametru je nalezeno méně srážek, méně deštivých minut, a tedy méně falešně pozitivních hodnot. Pokles pravdivě negativních hodnot při zvyšování hodnoty parametru je však zanedbatelný.

Z výše popsaných skutečností je zřejmé, že pokud chceme detekovat správně co nejvíce všech srážkových minut, nejlepší nastavení parametru je v našem případě $B = 3$. Pokud bychom chtěli detekovat lépe výhradně srážky s vyšší intenzitou, vhodnější by bylo nastavení vyšší hodnoty parametru.

Citlivost prahu laserového detektoru srážek

Vrátíme-li se opět k analýze funkčnosti algoritmu srážkových událostí s velkým celkovým úhrnem (kapitola 6.1), druhým velmi častým problémem je málo intenzivní déšť na začátku srážky. Déšť s nízkou intenzitou často čidla TMS3 ani klasický překlopný srážkoměr nerozpoznávají. LPM je velmi citlivý přístroj, který zaznamenává i velmi drobné mrhnutí. Proto byla nastavena prahová hodnota LPM dat. Prahová hodnota LPM rozhoduje, která intenzita je již považována za déšť. Minutové časové intervaly s nižší hodnotou intenzity, než je hodnota prahová, jsou označeny za suché. Citlivost algoritmu na prahovou hodnotu LPM byla testována opět za pomoci matic záměn. Skupiny matic záměn byly vypočteny pro různá nastavení prahové hodnoty LPM dat. Hodnoty zvolených prahových

hodnot LPM dat jsou následující: 0.012, 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02 a 0.04 mm/hod. Skupiny matic záměn pravdivě pozitivní, falešně negativní a falešně pozitivní vypočtené při použití těchto prahů LPM a dat TMS3 čidla č. 330 jsou zobrazeny na Obr. 22.



Obr. 22: Skupiny matic záměn při různých nastavení prahu LPM dat. Data LPM, TMS3 č. 330 od 22. května do 13. srpna roku 2015. Body značí zvolené prahové hranice LPM dat. Zvýrazněné body přísluší prahové hodnotě použité v předchozích kapitolách, tj. 0.012 mm/hod.

Pravdivě pozitivní skupina se zvyšováním prahové hodnoty klesá téměř lineárně. Čím vyšší je je práh LPM, tím méně je správně identifikovaných deštivých minut. Opačně je tomu, logicky, u skupiny falešně pozitivních hodnot. S rostoucím prahem LPM rostou falešně pozitivní hodnoty. Tyto dvě skupiny spolu úzce souvisí. Pokud je minuta klasifikována dle TMS3 čidla za deštivou, může spadat buďto do pravdivě pozitivních hodnota, nebo do falešně pozitivních hodnot. Pokud je zvýšen práh LPM může se hodnota z pravdivě pozitivních hodnot přesunout do skupiny falešně pozitivních hodnot. Z obou těchto pohledů je pro optimální detekci vhodné použít nízkou hodnotu prahu LPM. Na druhou stranu při nízkém prahu LPM je nejpočetnější skupina falešně negativních hodnot. Do této skupiny spadá právě výše zmiňovaný mírný, málo intenzivní déšť na počátku či konci srážky, který je v některých případech TMS3 čidly rozpoznán, ale většinou nikoliv.

Jaké nastavení prahu je nejvhodnější, je sporné. Volba prahové hodnoty je kompromisem mezi rozpoznáním všech deštivých minut za cenu zvýšeného množství falešně deštivých hodnot a minimalizací falešných detekcí. Záleží zejména na účelu detekce. Pokud bychom chtěli minimalizovat falešné hodnoty, zvolili bychom práh LPM cca 0.018 mm/hod. To je hodnota, kde se skupiny falešně pozitivních a negativních hodnot protínají. V tom případě bychom ovšem přišli zhruba o 0.3 % pravdivě pozitivních hodnot. V této práci byl práh LPM stanoven na hodnotu 0.012 mm/hod.

6.6 Vliv orientace TMS3 čidel

Vzájemná korelace TMS3 čidel

Lineární regrese čidel TMS3 byly provedeny z důvodu zjevné chybovosti čidel. V některých případech jedno či více čidel na srážku nereaguje, nebo udává výrazně nižší hodnoty než při jiných srážkách podobné intenzity a velikosti.

Vzájemné korelace všech čidel, tj. korelační koeficienty všech kombinací použitých TMS3 čidel, jsou zobrazeny v Tab. 11. Signál produkovaný čidlem TMS3 č. 333 se zdá být odlišný od ostatních čidel. Čidla TMS3 č. 333 a 334 mají nejmenší korelaci. Naopak nejvyšší korelační koeficient vykazuje dvojice TMS3 č. 330 a č. 337. Otázkou je, zda by rozdíl mohl být způsoben orientací čidel vůči světovým stranám, nebo zda se jedná o výrobní rozdíly na povrchu vlhkostních senzorů. Hypotéza vlivu orientace čidel je řešena v následujících kapitolách.

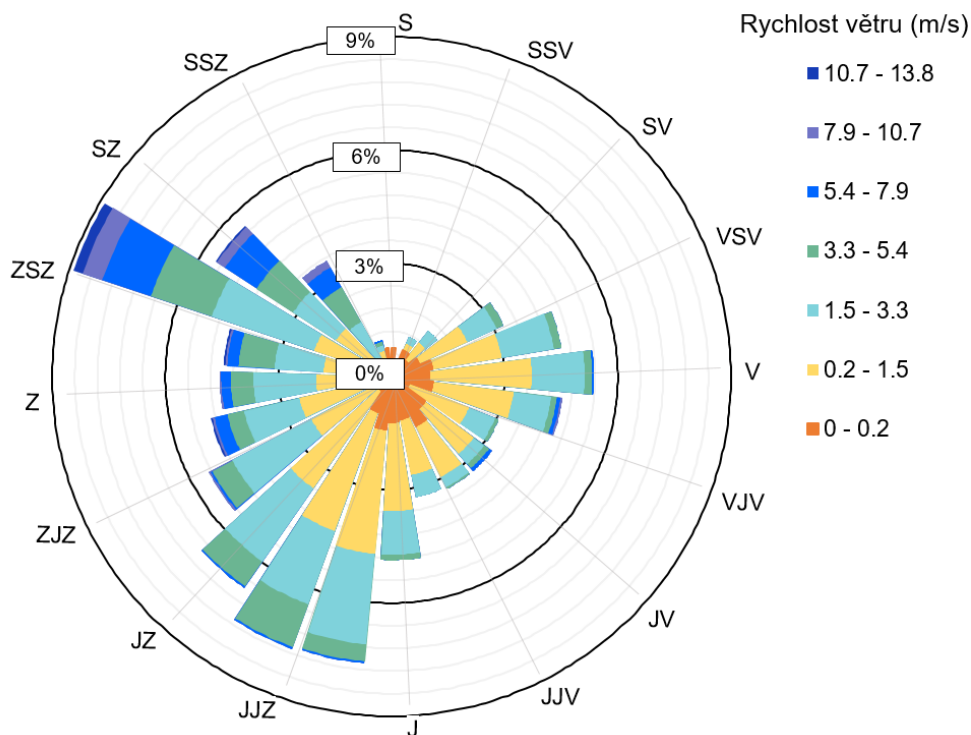
Tab. 11: Vzájemná korelace TMS3 čidel č. 330, 333, 334 a 337. Období od 22. května do 13. srpna 2015.

	TMS3 330	TMS3 333	TMS3 334	TMS3 337
TMS3 330	1	0.79	0.79	0.82
TMS3 333	0.79	1	0.69	0.73
TMS3 334	0.79	0.69	1	0.77
TMS3 337	0.82	0.73	0.77	1

Větrná růžice

V přechozích kapitolách byly prokázány vzájemné odlišnosti TMS3 čidel. Jak již bylo zmíněno, data jsou teplotně závislá. Každé čidlo měří jiné absolutní hodnoty vlhkosti a čidla vykazují různé známky poruchovosti. Z koeficientů vzájemné korelace čidel je patrné, že se každé čidlo chová trochu jinak. Z těchto důvodů bylo zkoumáno, zda má na měření vlhkostí TMS3 čidly vliv také natočení vůči světovým stranám.

Data rychlosti a směru větru byla k dispozici z měření anemometru, snímače W2, který byl instalován na experimentálním místě společně s ostatními přístroji. Z dat směru a rychlosti větru byla vyhotovena podmíněná větrná růžice (Obr. 23).



Obr. 23: Větrná růžice za období od 22. května do 13. srpna v roce 2015. Směr a rychlost větru jsou z anemometru, snímače W2 od společnosti Fiedler [13].

Větrná růžice je spočtena z hodinových průměrů minutových dat anemometru se směrovkou z období od 22. května do 13. srpna roku 2015. Toto období je společné s měřeními TMS3 čidel, LPM a překlopného srážkoměru. Větrná růžice zobrazuje počet hodin v daném období, kdy vítr fouká z určitého směru. Barevná škála větrné růžice udává rozložení rychlosti větru z jednotlivých světových stran.

Orientace TMS3 čidel č. 330 a č. 333 je na jihozápad (JZ). Od jihozápadu vane vítr necelých 7 % času. Vítr z jihozápadu má převážně rychlost mezi 0.2 až 3.3 m/s, což je podle Beaufortovy stupnice síly větru vánek a slabý vítr. Čidlo TMS3 č. 334 je orientováno na východo-jihovýchod (VJV). Z tohoto směru byl naměřen také vánek a slabý vítr, ale pouze cca 4 % času. Poslední čidlo TMS3 č. 337 je orientováno na severo-severozápad (SSZ). Ze severozápadu vane vítr s nejvyšší průměrnou rychlostí. Vánek se z tohoto směru téměř nevyskytuje. Naopak převládá vítr o rychlosti 3.3 až 10.7 m/s. Podle Beaufortovy stupnice se jedná o vítr mírný, dosti čerstvý vítr až čerstvý vítr.

Z tohoto srovnání orientace čidel a větrné růžice by (v případě závislosti měření TMS3 čidel na větru) mělo být nejodlišnější TMS3 čidlo č. 337. Toto čidlo se však z klasifikátorů ani korelací od ostatních čidel výrazně neodlišuje. V analýze matic záměn a hodnotících klasifikátorů se odlišovalo čidlo č. 334. Čidlo č. 334 registrovalo nejméně pravdivě pozitivních hodnot. Všechna ostatní čidla měla pravdivě pozitivních hodnot více než 2 % (čidlo č. 334 pouze 1.79 %). Z tohoto důvodu má čidlo č. 334 také nejmenší citlivost. (méně než 50 %, ostatní čidla vyšší než 55 %). Snížená citlivost by mohla být způsobena skutečností, že od jihovýchodu vane vítr nejméně často. Proudění vzduchu, může usnadnit schnutí čidla. Čidlo nezůstává po srážce dlouho mokré a algoritmus tak nemůže identifikovat falešný konec. Na druhou stranu toto vysvětlení není udržitelné, vzhledem k tomu, že při

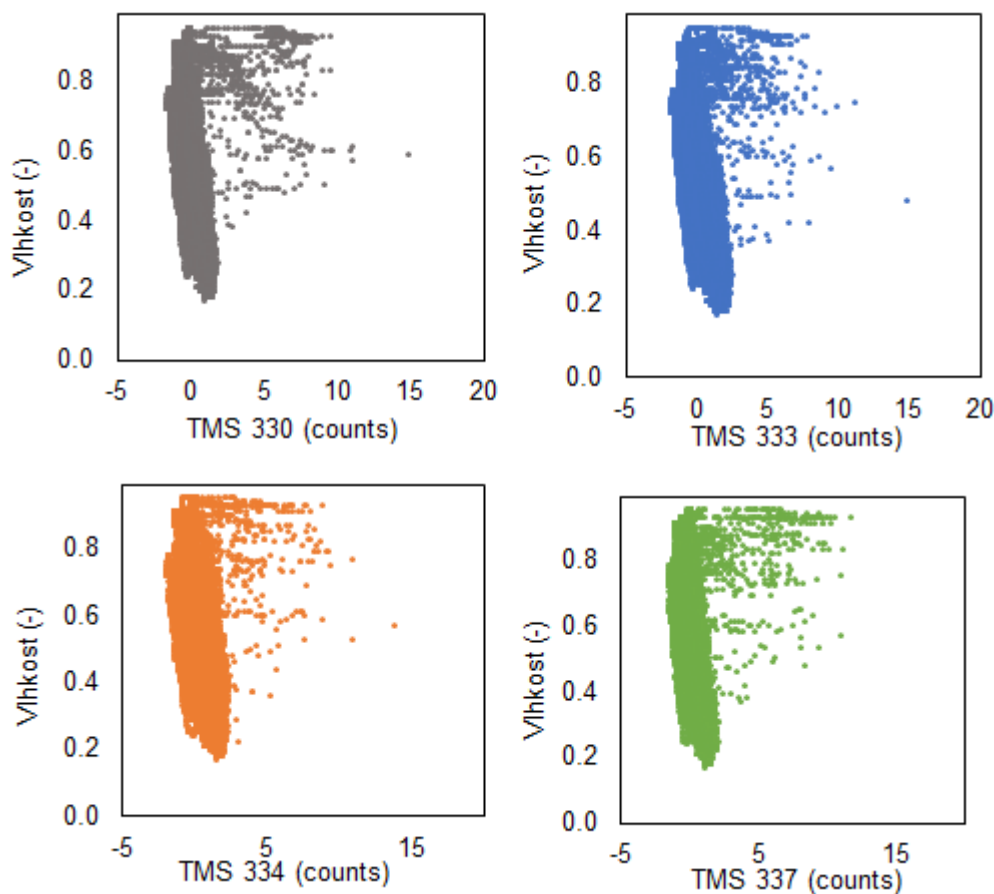
analýze srážek s úhrnem vyšším než 0.1 mm se popisovaná chyba (chyba v důsledku mokrého čidla) stávala pouze u čidel č. 330 a č. 333.

Čidla TMS3 č. 330 a č. 333 by měla mít nejlepší korelaci, vzhledem k tomu, že jsou umístěna v těsné blízkosti a jsou orientována na stejnou světovou stranu (viz Obr. 9). Nejlepší shoda měření oproti očekávání vyšla u dvojice TMS3 čidel č. 330 a č. 337. Závislost orientace čidel nebyla tudíž prokázána.

Další možné vlivy na měření čidly TMS3

Vzhledem k tomu, že závislost na orientaci čidel nebyla prokázána, byly zkoumány další možné závislosti. Možnou příčinou rozdílnosti měření TMS3 čidel v čase je v čase proměnná vlhkost vzduchu.

Měření TMS3 čidel byla nejprve normalizována, aby mohla být porovnána vzájemně mezi sebou. Na Obr. 24 jsou vykreslena jednotlivá normalizovaná měření všech čtyř TMS3 čidel. Z Obr. 24 se jeví nejcitlivější čidlo TMS3 č. 334. To znamená, že hodnoty jím měřené vlhkosti jsou nejvíce závislé na vzdušné vlhkosti. Rozdíl oproti ostatním čidlům není výrazný a ničím podložený. Data čidla TMS3 č. 334 mají naopak nejmenší rozptyl. Podobně nebyla nalezena žádná skutečnost prokazující závislost TMS3 čidel na sytostním doplnku. Sytostní doplněk byl spočten z měření vlhkoměru RVT10 (konkrétně z teploty a vlhkosti pomocí Clausiovy-Clapeyronovy rovnice).



Obr. 24: Závislost TMS3 čidel na relativní vlhkosti vzduchu. Data TMS3 jsou normalizována. Vlhkost je měřena vlhkoměrem RVT10 od společnosti Fiedler [14]. Data z období od 22. května do 13. srpna roku 2015.

Z výše uvedeného vyplývá, že nebyla prokázána žádná další závislost kromě teplotní. Data pravděpodobně nejsou výrazně závislá na orientaci čidel vůči různým světovým stranám, vlhkosti ani sytostnímu doplnku. Rozdílnosti měření TMS3 čidel jsou pravděpodobně způsobeny výrobními rozdíly jednotlivých čidel, především jejich senzory měřící vlhkost, převládá vlastní citlivost čidel.

6.7 Srovnání s LWS

Kromě měření LPM, překlopného srážkoměru a čtyř čidel TMS3 je k dispozici také měření senzoru LWS (Leaf Wetness Sensor). LWS je senzor měřící vlhkost listoví. Podle výrobce je možné těmito senzory detekovat déšť. Výrobce udává dvě hodnoty pro určení srážky, 450 a 460 counts. To znamená, že stoupne-li vlhkost naměřená LWS senzorem nad hodnotu 450 (resp. 460) counts, jedná se o začátek srážky. A opačně, klesne-li hodnota pod 450 (resp. 460) counts, srážková událost končí. Tímto způsobem byly vybrány srážkové události dat LWS a porovnány se začátky a konci srážkových událostí z LPM. Srovnání bylo provedeno na srážkách z LPM s úhrnem vyšším než 0.1 mm (25 srážkových událostí).

Z vybraných 25 událostí LWS nerozpoznává osm událostí a to události č. 3, 9, 15, 17, 18, 20, 22 a 23 viz Tab. 2. Nelze říci, že by se jednalo o srážky s nízkou intenzitou nebo jen o určitý typ deště např. mrholení apod. LWS nerozpoznává stejně často mrholení, jako mírný déšť, nebo srážky s nízkou intenzitou a s vyšší intenzitou. Například událost č. 15 ze dne 6. července trvala 29 minut. Maximální intenzita deště byla 10.67 mm/hod. Typ deště byl klasifikován jako „silný déšť“ a přesto hodnoty vlhkosti LWS nevystoupali nad stanovenou hranici 450 counts.

Zbylé srážkové události (17 srážkových událostí), které jsou LWS senzory rozpoznány, mají registrovaný začátek průměrně o čtyři, resp. devět minut později než LPM (při prahu 450, resp. 460 counts). Konce srážkových událostí jsou registrovány průměrně o 25, resp. 18 minut později než konce LPM. Opožděné konce podle LWS jsou nejspíše způsobené dosycháním čidla, které je falešně prahovou hodnotou považováno za srážku. TMS3 čidla detekují průměrně začátek srážky o 2 minuty později a konec o 8 minut dříve (po vyřazení chybných identifikací popsanych v kapitole 6.1 - analýza funkčnosti navrženého algoritmu). To znamená, že TMS3 čidla detekují začátky srážek o pár minut dříve a přesněji než LWS. Konce jsou detekovány TMS3 čidly dříve, než je skutečný konec, a to proto, že je konec hledán pomocí náhlého poklesu hodnot. V řadě případů je na konci srážky výrazný pokles hodnot způsobený pouze sníženou intenzitou deště. Konec podle TMS3 čidel je tak někdy detekován dříve než skutečný. LWS senzor udává konce později, než je skutečný konec, protože je senzor po srážce mokrá a měří vysoké hodnoty vlhkosti.

Matice záměn LWS dat

Pro celkovou představu o schopnosti detekce deště pomocí LWS měření a srovnání s detekcí pomocí TMS3 byly vyhotoveny matice záměn pro LWS data s prahem 450 a 460 counts. Na Obr. 25 jsou zobrazeny matice záměn z LWS dat a pro srovnání i matice záměn

jednoho TMS3 čidla. Konkrétně čidla č. 330, které z testovaných čidel prokazovalo průměrné výsledky.

LWS při nastavení prahu 450 counts má téměř shodné zastoupení pravdivě pozitivní a falešně negativní skupiny jako TMS3 čidlo. Oba přístroje rozpoznávají správně 2 % času, jako dešivé minuty a asi 1.6 % času označují falešně za suché. Rozdíl je v zastoupení falešně pozitivní skupiny. LWS (prahová hodnota 450 counts) zaznamenává 3.68 % minut falešně jako srážková. TMS3 č. 330 detekuje falešně pozitivních hodnot jen 1.34 %. LWS zaznamenává větší množství falešně pozitivních hodnot, protože čidlo je po srážce mokré a měří vysoké hodnoty vlhkosti, které jsou nesprávně klasifikovány jako srážka. Vysoké procento falešně pozitivních hodnot nalezených prahem 450 counts lze snížit zvolením prahu 460 counts. Na druhou stranu se tak sníží skupina pravdivě pozitivní a zvýší skupina falešně negativní.

LWS	2.01	1.59	LWS	1.74	1.87	TMS	2	1.6
450	3.68	92.72	460	2.46	93.94	330	1.34	95.05
Pravdivě pozitivní		Falešně negativní		Falešně pozitivní		Pravdivě negativní		

Obr. 25: Matice záměn LWS dat s prahem 450 a 460 counts a z dat TMS3 č. 330. Referenční data LPM. Období dat od 22. května do 13. srpna rok 2015.

Hodnotící klasifikátory přesnost, citlivost a specifická LWS měření pro detekci deště s použitím dvou prahů (450 a 460 counts) jsou zobrazeny v Tab. 12. Pro srovnání jsou uvedeny hodnotící klasifikátory čidla TMS3 č. 330. Citlivost mají LWS čidla (s prahem 450) a čidlo TMS3 obdobnou. Přesnost a specifická je u LWS menší v obou případech, při použití prahu 450 i 460 counts. Příčinou jsou opět falešně pozitivní hodnoty LWS.

Tab. 12: Hodnotící klasifikátory vypočtené pro LWS s prahem 450 a 460 counts a pro TMS3 čidlo č. 330.

	LWS 450	LWS 460	TMS3 330
Přesnost	94.7	95.7	97.1
Citlivost	55.8	48.2	55.6
Specifická	96.2	97.4	98.6

Doba schnutí

Navržený algoritmus na vyhledávání srážek zaznamenává kromě začátků a konců srážek také doschnutí čidla. Výrobce LWS senzorů udává, že čidlo je suché, pokud jsou hodnoty vlhkosti 445 counts. U 25 srážek vyhledaných pomocí přístroje LPM (s úhrnem vyšším než 0.1 mm) byly vypočteny doby schnutí. LWS senzor průměrně schne téměř tři a půl hodiny. TMS3 čidla schnou v průměru jednu hodinu a 10 minut. Pokud je čidlo suché má lepší dispozici k tomu, aby správně detekovalo další srážku. Na druhou stranu LWS je přístroj určený k měření vlhkosti na listech, proto lze předpokládat, že doba, kdy je na vegetaci držena voda po srážkové události, se spíše blíží době schnutí LWS senzoru.

6.8 Možnost použití algoritmu na signál LWS

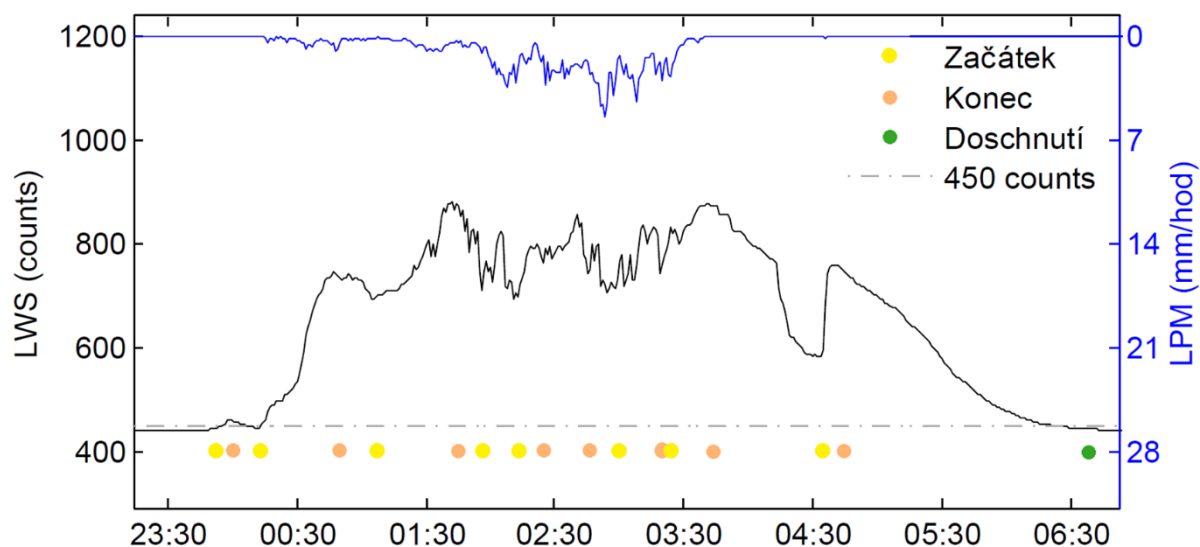
LWS senzor udává hodnoty vlhkosti v jednotkách „counts“ podobně jako TMS3 čidla. Výše navržený algoritmus na detekci srážek ze signálu TMS3 byl alternativně použit také na signál vlhkosti produkovaný LWS čidlem. Důvodem použití algoritmu na LWS data bylo ověření všeobecného použití algoritmu na jakýkoliv relevantní signál. To znamená, že bylo zkoumáno, zda by bylo možné algoritmus použít na libovolné měření vlhkosti. Matice záměn binárních dat LWS získaných pomocí navrženého algoritmu jsou zobrazeny na Obr. 26. Algoritmus lze použít na LWS data, ale detekuje správně pouze asi 1 % pravdivě pozitivních hodnot a zbylé srážkové minuty jsou falešně identifikovány jako suché, falešně negativní. Příčinou velkého množství falešně negativních hodnot je skutečnost, že signál LWS nemá vždy začátek nebo konec spojený s náhlým nárůstem či poklesem hodnot. V některých případech vlhkost stoupá či klesá postupně. Prahová hodnota LWS je při postupném zvyšování vlhkosti LWS překročena, ale algoritmus začátek nenalezne. Správně identifikovaných suchých hodnot je srovnatelně se správně detekovanými negativními minutami z TMS3 čidel. A to o 2 %, resp. 3 % více než při použití výrobcem doporučených prahů (450 resp. 460 counts). Při použití prahových hodnot doporučených výrobcem, jsou tato procenta klasifikována falešně jako srážková. Pravděpodobně se jedná o minuty, kdy čidlo již dosychá, ačkoli podle prahových hodnot stále prší. Falešně pozitivních hodnot je pouze 0.52 %.

LWS	1.03	2.58
	0.52	95.87

Pravdivě pozitivní	Falešně negativní
Falešně pozitivní	Pravdivě negativní

Obr. 26: Matice záměn binárních dat LWS (suché/mokrě období) vytvořených použitím navrženého algoritmu.

Ukázka funkčnosti algoritmu na měření LWS je na Obr. 27, kde je zobrazena srážková událost ze dne 23. června roku 2015. Během srážky je detekováno několik začátků a konců. Mezi předposledním koncem a posledním začátkem je správně rozpoznáno suché období, které by při použití prahu LWS dat rozpoznáno nebylo. Senzor je při překročení určitých hodnot vlhkosti citlivější. S posledním začátkem ve srážkové události vystoupají hodnoty vlhkosti více než při začátku srážky.



Obr. 27: LPM a LWS měření vlhkosti s vyhledanými začátky, konci a doschnutím senzoru použitím algoritmu navrženého na čidla TMS3. Srážková událost ze dne 23. června roku 2015.

Je tedy zřejmé, že algoritmus použit lze, ale detekuje srážky významně hůře než TMS3 čidla a LWS s použitím vlastní detekce a doporučených prahových hodnot. Použití algoritmu na data LWS by vyžadovalo podrobnější analýzu a nastavení specifických hodnot parametrů algoritmu.

6.9 Použití algoritmu na surová data

Algoritmus je navržen tak, že rozpoznává začátky a konce srážek pomocí náhlých změn (nárůst hodnot či pokles hodnot). Srážky nejsou hledány pomocí stanovených limitních hodnot měření. Nabízí se tudíž otázka, zda bylo nutné použít data upravená, částečně očištěná od závislosti na teplotě. Proto byl algoritmus použit na surová data, tzn. data neočištěná od vlivu teploty. Při shodném nastavení parametrů, jako v případě očištěných dat, nachází algoritmus příliš mnoho začátků, ke kterým neexistují konce. Nastavení parametrů bylo proto upraveno, konkrétně parametr B byl zvýšen na hodnotu 15.

Při tomto nastavení parametrů algoritmus prokázal dobrou funkčnost. Například TMS3 čidlo č. 330 při použití surových dat má jen o 0.05 % méně pravdivě pozitivních hodnot než při použití upravených, očištěných dat od vlivu teploty, viz Obr. 28. Falešně pozitivních a falešně negativních hodnot je při použití surových hodnot více. Falešně pozitivních je více o 0.4 % a falešně negativních o 0.6 %. Pravdivě negativních hodnot je o 0.4 % méně. Výsledky čidla TMS3 č. 330 jsou při použití surových dat celkově horší, ale zhoršení není výrazné. Poměrně razantní zhoršení je vidět například u čidla TMS3 č. 333. Falešně pozitivních hodnot je při použití surových dat mnohem více. Při použití očištěných dat bylo falešně pozitivních hodnot kolem 1.3 %, zatímco při použití surových dat je jich přibližně 3.5krát více (4.55 %). K výraznému zhoršení dochází také u čidla č. 334. Při použití surových dat je pravdivě pozitivních hodnot pouze 1.27 % a falešně negativních 2.34 %.

Nejlepší výsledky při použití surových dat dává TMS3 čidlo č. 330. Citlivost se sníží pouze o 1.6 %. Naopak TMS3 čidlům č. 334 a č. 333 se sníží citlivost o 14.3 % respektive 13.5 %. Z toho je možné soudit, že čidlo TMS3 č. 330 je nejméně teplotně závislé.

	Surová data ($B = 15$)		Očištěná data ($B = 3$)	
TMS	1.95	1.66	2	1.6
330	1.38	95.01	1.34	95.05
TMS	1.74	2.34	2.03	1.58
333	4.55	94.14	1.36	95.03
TMS	1.27	2.34	1.78	1.82
334	2.25	94.14	1.12	95.27
TMS	1.65	1.95	2.04	1.56
337	1.39	95	1.32	95.08

Pravdivě pozitivní Falešně negativní Falešně pozitivní Pravdivě negativní

Obr. 28: Matice záměn TMS3 čidel ze surových dat s nastavením parametru $B = 3$ a z dat očištěných od vlivu teploty s nastavením parametru $B = 15$. Data jsou z období od 22. května do 13. srpna roku 2015.

Z výše uvedeného vyplývá, že použití surových dat je možné, ale detekce srážek je horší než při použití upravených, očištěných dat. Surová data čidel TMS3 mají různý charakter. Každé má jinou míru závislosti na teplotě a jejich výsledky bez očištění od vlivu teploty nejsou dostačující.

7 Závěr a shrnutí

Tato práce se zabývá posouzením možnosti detekovat srážky pomocí netradičních levných čidel TMS3 od společnosti TOMST. Čidla jsou původně vyrobena pro měření vlhkosti v půdě. V této práci byla čidla TMS3 instalována na střechu panelového domu a jejich signál byl následně analyzován. Algoritmus na vyhledávání začátků a konců srážkových událostí byl navržen a jeho výsledky byly porovnávány se souběžným měřením laserového detektoru srážek (LPM), překlopného srážkoměru a senzory vlhkosti listoví Leaf Wetness Sensor (LWS). Společná data všech přístrojů byla z období od 22. května do 13. srpna roku 2015.

Nejprve byly porovnávány srážky s úhrnem vyšším než 0.1 mm (vybrané dle měření LPM, který byl pro svou vysokou citlivost a přesnost považován za referenční). Nejčastějším problémem v detekci srážek byla nízká intenzita deště na počátku či na konci srážkové události. Čidla TMS3 často identifikují začátek srážky o několik minut později, teprve když intenzita deště překročí hranice cca 0.5 mm/hod. Na druhou stranu tyto srážky neregistruje ani překlopný srážkoměr.

V některých případech TMS3 čidla detekují srážky menších intenzit uspokojivě. To znamená, že reakce čidla na srážku je nekonzistentní. Jedno čidlo reaguje různě na srážky o přibližně stejné intenzitě. V některých případech měřený signál silně reaguje na srážku nízké intenzity (např. 0.1 mm/hod), v jiných případech hodnoty měřené vlhkosti nevystoupají ani při intenzitách srážky vyšších než jednotky mm/hod.

Ve třech případech je špatná detekce spojena s dlouhým dosycháním čidla. Čidlo je dlouho po srážce mokré a náhle začíná dosychat (hodnoty začnou rychle klesat). Algoritmus tento čas nesprávně označí za konec srážkové události. V ojedinělých případech nastává chyba v detekci způsobená nalezením času doschnutí čidla dříve, než byl nalezen konec srážky. Pokud po vyhledaném začátku srážky data splňují podmínky pro doschnutí, podle algoritmu ke srážkové události nedošlo. Dalším typem chyb v detekci je nenalezení začátku srážky při malé hodnotě parametru B .

Pro porovnávání všech dat byla zvolena metodika využívající matice záměn a výpočet hodnotících klasifikátoru, tj. přesnosti, citlivosti a specifity. Každá minuta byla zařazena do jedné ze skupin matice záměn. Skupiny matice záměn jsou pravdivě pozitivní (TMS3 čidlo správně stejně jako LPM registruje srážku), pravdivě negativní (oba přístroje registrují suchá období), falešně pozitivní (TMS3 registruje srážku a LPM nikoli) a opačně falešně negativní (TMS3 registruje suché období, ale LPM děšť). Nejpočetnější skupinou jsou pravdivě negativní minuty, absence srážek po většinu zkoumaného období (dle LPM 96.4 % času). TMS3 čidla rozpoznávají správně srážkové minuty zhruba ve 2 % z 3.6 % minut, kdy přišlo. Falešně pozitivní minuty registrují čidla TMS3 cca 1.3 % času. Správná detekce negativních, suchých minut nastává ve zbytku suchých minut, průměrně v 95.1 % času.

Přesnost všech TMS3 čidel je 97.1 %. Přesnost TMS3 čidel je však takto vysoká právě díky početné skupině pravdivě negativních hodnot. Citlivost čidel se pohybuje kolem 55-56 % (s výjimkou jednoho čidla, která má citlivost necelých 50 %). Znamená to, že pokud LPM registruje srážku, TMS3 čidla detekují srážku také v 55 %. Tato hodnota není vysoká, ale je téměř pětkrát vyšší než citlivost klasického překlopného srážkoměru. Specifita se

u čidel TMS3 pohybuje okolo hodnoty 98.6 %. Vysoká hodnota specificity je opět způsobena početnou pravdivě negativní skupinou.

Další analýzou bylo zkoumání zlepšení detekce při použití dvou čidel TMS3 v páru. Při použití dvou čidel se zvýší jejich citlivost zhruba o 7 %. Přesnost a specificita při použití dvou čidel klesne o cca 0.3 %, protože při použití dvou čidel vzroste skupina falešně pozitivních identifikací. Každé čidlo detekuje nesprávně srážku v jiný čas.

Při porovnávání začátků a konců srážek (s úhrnem vyšším než z 0.1 mm) z TMS3 čidel se začátky a konci z referenčního měření LPM se v některých případech ukázal parametr B jako problematický. Z tohoto důvodu byl parametr B podroben citlivostní analýze. Z citlivostní analýzy parametru B je zřejmé, že pro detekci srážek vyšších intenzit a s vyšším úhrnem je vhodnější zvolit parametr B vyšší. Pro nejlepší detekci všech srážek, tj. všech minut, je vhodnější nastavení parametru $B=3$. Při tomto nastavení algoritmus rozpoznává nejvíce pravdivých srážkových minut a nejméně falešně negativních hodnot.

Kromě citlivostní analýzy parametru B , byla provedena citlivostní analýza prahové hodnoty LPM. Cílem bylo zjistit, zda TMS3 čidla nerozpoznávají srážky o nižší intenzitě než jistá prahová hodnota. A zároveň platí, že tato prahová hodnota intenzity deště je tak nízká, že lze minuty, kdy prší intenzitou nižší, považovat za suché. Tato hypotéza nebyla potvrzena. Z výsledků se zdá, že v některých případech TMS3 srážky s velmi nízkou intenzitou rozpoznává. Počet pravdivě pozitivních minut při zvyšování prahové hodnoty klesá i při nízkých hodnotách. Oproti tomu výrazně klesá počet falešně negativních hodnot a roste počet falešně pozitivních hodnot. Nastavení nejvhodnější prahové hodnoty tedy záleží na účelu detekce.

Úspěšnost detekce byla porovnávána nejen se všemi daty, ale také samostatně pro srážky s vyšším úhrnem (vyšším než 0.1 mm) a srážky s úhrnem nižším. Sumární klasifikátor citlivosti je výrazně vyšší u srážek s vyšším úhrnem než u srážek s nižším úhrnem (74 % oproti 44 %). Menší srážky o nižších intenzitách TMS3 čidla často nerozpoznávají obdobně jako překlopný srážkoměr. Přesnost je také u srážek s vyšším úhrnem větší než u srážek s nižším úhrnem (cca o 5.5 %).

Analýza funkčnosti algoritmu dle typu padajících srážek ukázala, že nejlépe detekovatelným typem srážky je mrholení s deštěm. Dvě čidla rozpoznávají 100 % takových srážek a dvě 82 %. Dalším dobře detekovatelným typem je silný déšť a kroupy. Silný déšť čidla detekují správně zhruba v 75 %. Naopak nejhorší detekce nastává v případě pouhého mrholení. Tento typ srážek čidla rozpoznávají pouze ve 41 % případů.

Ze vzájemné lineární korelace všech dvojic TMS3 čidel se potvrdilo, že každé čidlo má jiný charakter a jejich reakce na srážky jsou mírně odlišné. Korelační koeficient dvojic se pohybuje mezi 0.69-0.82. Závislost natočení čidel vůči světovým stranám ani jiné vlivy měření kromě teplotní závislosti však nebyly prokázány. Odlišnosti měření TMS3 čidel jsou pravděpodobně způsobeny jejich vlastní citlivostí vzniklou při výrobě čidel.

Signál TSMS3 čidel a z nich detekovaná suchá a mokrá období byla, kromě předešlého, srovnávána se záznamem ze senzorů LWS. Sensory LWS s použitím prahových hodnot doporučených výrobcem detekují začátek srážky o několik minut později než TMS3 čidla. Začátek srážky tedy TMS3 čidla detekují blíže začátku z referenčního měření. Konce

detekují LWS senzory v průměru o 18 minut dříve než LPM a TMS3 čidla o 8 minut dříve než LPM. Z tohoto srovnání lepší detekce dosahují TMS3 čidla. Při pohledu na všechna data a porovnávání pomocí matic záměn jsou TMS3 čidla a LWS při použití prahové hodnoty 450 counts srovnatelné. Na závěr bylo ověřováno všeobecné použití algoritmu vyhledávajícího začátky a konce srážek na jakákoli data. Algoritmus byl použit na signál LWS senzorů a surová data TMS3 čidel. Algoritmus lze na signál LWS čidel použít, ale detekce je v tomto případě horší než při prahovém určování srážek doporučeném výrobcem. Použití algoritmu na surová data TMS3 čidel je také možné. Detekce je u jednoho z čidel téměř srovnatelná s detekcí ze signálu očištěného od vlivu teploty lineárním modelem. U ostatních čidel je detekce znatelně horší. Každé TMS3 čidlo se chová jinak, každé reaguje jiným způsobem na srážky a částečné očištění dat od vlivu teploty analýzu negativně neovlivnilo.

Výsledky ukazují, že při řádném nastavení parametrů vykazují čidla přesnější detekci srážek (tj. identifikace jejich začátku a konce v čase) než překlopný srážkoměr a mají pětkrát vyšší citlivost. Detekce TMS3 čidly je navíc minimálně srovnatelná s detekcí LWS senzory. Nicméně falešně negativní detekce TMS3 čidly je vyšší než 1.6 % času (tj. více než 25 % registrovaných srážkových minut). Dalším limitujícím faktorem pro použití TMS3 čidel k detekci srážek je nízká specifita, malá spolehlivost a pravděpodobná nutnost individuální kalibrace jednotlivých čidel prokázaná citlivostí analýzou algoritmu. Všechna tato kritéria ukazují na skutečnost, že je pro detekci srážek pravděpodobně vhodnější použití jiných, standardních detektorů.

8 Seznam obrázků

Obr. 1: Ukázka určení pozadového útlumu signálu mikrovlnných spojů telekomunikačních mobilních sítí, v tomto případě horizontálního útlumu (Horizontal attenuation). Obrázek převzat z článku Schleisse a Berna (2010) [6].	11
Obr. 2: TMS3 stanice, společnost TOMST s.r.o [8] s popisem jednotlivých částí čidla.	12
Obr. 3: Laserový detektor srážek společnosti Thies Clima [10].	13
Obr. 4: Překlopný srážkoměr SR03 Fiedler se zachytnou plochou 500 cm ² . Vyobrazení převzato z webových stránek společnosti Fiedler AMS s.r.o. [12].	14
Obr. 5: LWS Leaf wetness senzor. Vyobrazení převzato z online katalogu UMS společnosti Decagon Devices [18].	15
Obr. 6: Snímač rychlosti a směru větru W2 od společnosti Fiedler. Vyobrazení převzato z webových stránek společnosti Fiedler [13].	16
Obr. 7: Vlhkoměr RVT10 s radiačním krytem od společnosti Fiedler. Vyobrazení převzato z webových stránek společnosti Fiedler [14].	16
Obr. 8: Laserový detektor srážek umístěný na experimentálním místě, na střeše panelového domu o výšce cca 35 m. Praha Letňany, rok 2015.	17
Obr. 9: Schéma experimentálního místa, střecha panelového domu v Praze Letňanech.	18
Obr. 10: Porovnání srážkových úhrnů epizod s úhrny většími než 0.1 mm z laserového detektoru srážek (LPM) a překlopného srážkoměru (RG). Epizody z období 22. května až 13. srpna roku 2015.	20
Obr. 11: Teplotní závislost čidla TMS3 (surová data) a data upravená lineárním modelem (částečně zbavená teplotní závislosti). Data čidla TMS3 č. 330 z roku 2015.	21
Obr. 12: Upravená data TMS3 (očištěná od vlivu teploty lineárním modelem) a data vyhlazená mediánovým filtrem s vyznačeným parametrem A. Data z čidla TMS3 č. 330 naměřena 10. května 2015.	22
Obr. 13: Vlevo vyhledaný „hrubý“ začátek z vyhlazených dat a vyznačený parametr B. Data čidla TMS3 č. 330 ze dne 26. května roku 2015. Vpravo je vyhledaný „hrubý“ i „přesný“ začátek (z minutových dat). Data ze dne 13. června 2015, čidlo TMS3 č. 330.	23
Obr. 14: Ukázka identifikace začátků, konců a doschnutí srážkové události pomocí navrženého algoritmu. Srážková epizoda č. 17 ze dne 9. července 2015, čidlo TMS3 č. 330.	26
Obr. 15: Ukázka funkce algoritmu vyhledávající začátky, konce srážek a doschnutí čidla. Srážka ze dne 13. června 2015, čidlo č. 330.	28
Obr. 16: Vlevo: srážková epizoda č. 15 ze dne 6. července 2015. Příklad špatné reakce čidel TMS3. Vpravo: Falešně určený konec způsobený dlouho mokřím čidlem a náhlým schnutím. Epizoda č. 3 ze dne 1. června 2015. Čidla č. 330 a 334.	30
Obr. 17: Ukázka chyby identifikace. Srážková epizoda č. 7 ze dne 20. června 2015, čidlo 333. Chybně vyhledané doschnutí.	31
Obr. 18: Srážka č. 10, ze dne 22. června 2015, čidlo 334 se zobrazením vyhledaných začátků a konců při různém nastavení parametru B.	31
Obr. 19: Matice záměn vyjadřující procento času, které spadá do příslušné kategorie. Počítáno z minutových dat čidel TMS3 330, 333, 334 a 337 ve srovnání s referenčním LPM.	32

Obr. 20: Klasifikátory hodnocení při použití jednoho čidla nebo překlopného srážkoměru a při použití dvou čidel TMS3 současně.....	34
Obr. 21: Matice záměn pro různá nastavení parametru B a pro všechny čidla TMS3 (č. 330, 333, 334 a 337).	38
Obr. 22: Skupiny matic záměn při různých nastavení prahu LPM dat. Data LPM, TMS3 č. 330 od 22. května do 13. srpna roku 2015. Body značí zvolené prahové hranice LPM dat. Zvýrazněné body přísluší prahové hodnotě použité v předchozích kapitolách, tj. 0.012 mm/hod.	39
Obr. 23: Větrná růžice za období od 22. května do 13. srpna v roce 2015. Směr a rychlost větru jsou z anemometru, snímače W2 od společnosti Fiedler [13].	41
Obr. 24: Závislost TMS3 čidel na relativní vlhkosti vzduchu. Data TMS3 jsou normalizována. Vlhkost je měřena vlhkoměrem RVT10 od společnosti Fiedler [14]. Data z období od 22. května do 13. srpna roku 2015.....	42
Obr. 25: Matice záměn LWS dat s prahem 450 a 460 counts a z dat TMS3 č. 330. Referenční data LPM. Období dat od 22. května do 13. srpna rok 2015.	44
Obr. 26: Matice záměn binárních dat LWS (suché/mokrý období) vytvořených použitím navrženého algoritmu.	45
Obr. 27: LPM a LWS měření vlhkosti s vyhledanými začátky, konci a doschnutím senzoru použitím algoritmu navrženého na čidla TMS3. Srážková událost ze dne 23. června roku 2015.	46
Obr. 28: Matice záměn TMS3 čidel ze surových dat s nastavením parametru $B = 3$ a z dat očištěných od vlivu teploty s nastavením parametru $B = 15$. Data jsou z období od 22. května do 13. srpna roku 2015.	47

9 Seznam tabulek

Tab. 1: Rozdělení rozeznávaných typů srážek dle intenzity deště a velikosti padajících vodních částic. Údaje převzaty z manuálu výrobce Thies Clima [11].	13
Tab. 2: Soubor srážkových epizod z LPM s úhrnem větším než 0.1 mm. Srážky z období 22. května až 13. srpna roku 2015.	19
Tab. 3: Matice záměn, vysvětlení jednotlivých polí matice	27
Tab. 4: Časové rozdíly začátků a konců identifikovaných pomocí TMS3 čidel a překlopného srážkoměru (RG) oproti referenčnímu měření LPM. Srážky s úhrnem vyšším než 0.1 mm z období 22. května až 13. srpna v roce 2015. Kladné znaménko znamená zpoždění oproti LPM, záporné znaménko značí začátek/konec z přístroje dříve než LPM. Podtržení značí opoždění kvůli slabé intenzitě, červené písmo špatnou reakci čidel, zelené písmo problém nastavení parametru algoritmu a modré písmo chybu způsobenou dlouho mokřím čidlem.	29
Tab. 5: Klasifikátory hodnocení v procentech času.	33
Tab. 6: Klasifikátory hodnocení při použití dvou čidel TMS3 souběžně. Všechny kombinace čidel. Jednotlivé klasifikátory jsou uvedeny v %.	34
Tab. 7: Hodnotící klasifikátory (přesnost, citlivost a specificita) pro všechna data, srážky s úhrnem > 0.1 mm a srážky s úhrnem < 0.1 mm. TMS3 čidlo č. 333.	35
Tab. 8: Hodnotící klasifikátory (přesnost, citlivost a specificita) pro velké (srážky s úhrnem > 0.1 mm) a malé srážky (srážky s úhrnem < 0.1 mm). Všechna čtyři čidla TMS3 (č. 330, č. 333, č. 334 a č. 337).	35
Tab. 9: Rozdělení 15minutových intervalů do jednotlivých typů srážek dle převládajícího typu srážky z LPM dat. Data od 22. května do 13. srpna, 2015.	36
Tab. 10: Skupiny matice záměn „pravdivě pozitivní“ a „falešně negativní“ vypočtené s rozdělením dle typu srážky. Typ srážky určen dle kódu dat LPM. Použitá data od 22. května do 13. srpna 2015.	37
Tab. 11: Vzájemná korelace TMS3 čidel č. 330, 333, 334 a 337. Období od 22. května do 13. srpna 2015.	40
Tab. 12: Hodnotící klasifikátory vypočtené pro LWS s prahem 450 a 460 counts a pro TMS3 čidlo č. 330.	44

10 Reference

- [1] Schilling, W., 1991. *Rainfall data for urban hydrology: what do we need?* Atmospheric Research 27, 5–21.
- [2] Nystuen, J.A., J.R. Proni, P.G. Black, J.C. Wilkerson (1996). A Comparison of Automatic Rain Gauges. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 13, 62–73.
- [3] Chappell M., S.K. Dove, M.W. van Iersel, P.A. Thomas, J. Ruter (2013): Implementation of Wireless Sensor Networks for Irrigation Control in Three Container Nurseries. *HortTechnology* 23, 747–753.
- [4] Gotsch S.G., S.D. Crausbay, T.W. Giambelluca, A.E. Weintraub, R.J. Longman, H. Asbjornsen, S.C. Hotchkiss, T.E. Dawson (2014): Water relations and microclimate around the upper limit of a cloud forest in Maui, Hawaii. *Tree Physiol.* doi: 10.1093/trehys/tpu050.
- [5] Santos E.A., P. C. Sentelhas; T. J. Gillespie; J. Lulu (2008): Performance of cylindrical leaf wetness duration sensors in a tropical climate condition. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 65, 1–9.
- [6] Schleiss, M., Berne, A., 2010. *Identification of Dry and Rainy Periods Using Telecommunication Microwave Links*, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 7, 611–615.
- [7] TELEMAS projekt [online]. [cit. 2017-1-12]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/project/TeleMAS>
- [8] TOMST [online]. [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: <http://tomst.com/web/cz/systemy/tms/>
- [9] Gunn R., Kinzer G.D. (1949): The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air. *Journal of Atmospheric Sciences* 6, 243–248.
- [10] Thies Clima [online]. [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: <https://www.thiesclima.com/en/Products/Precipitation-Electrical-devices/>
- [11] Adolf Thies GmbH & Co. KG. *Laser Precipitation Monitor: Instruction for use, 5.4110.xx.x00 V2.4x STD.*
- [12] Fiedler AMS s.r.o překlopný srážkoměr. [online]. [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/snimace-meteorolog-velicin/destove-srazky/srazkomer-sr03>
- [13] Fiedler AMS s.r.o snímač rychlosti a směru větru. [online]. [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/snimace-meteorolog-velicin/rychlost-smer-vetru/anemometr-w2>
- [14] Fiedler AMS s.r.o, vlhkoměr. [online]. [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/meteorologicka-cidla-senzory/relativni-vlhkost-vzduchu/snimace-rvt10-11>
- [15] World Meteorological Organization (1983). *Guide to Hydrological Practices*, vol. II, Analysis, forecasting and other applications, WMO-No. 168, 4th Ed., Geneva, Switzerland.

[16] Fiedler AMS s.r.o elektronika pro ekologii. *Člunkové srážkoměry 500 cm2,SR03,SR03/V: návod k obsluze-verze 1.04*. 2015.

[17] Decagon Devices, Inc. *Dielectric Leaf Wetness Sensor: Operator's Manual*. 2014.

[18] UMS-LWS Leaf Wetness sensor. [online]. [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: <http://www.ums-muc.de/en/products/canopy/lws-leaf-wetness-sensor/>

Příloha 1

Zdrojový kód algoritmu pro detekci srážek ze signálu TMS3 čidel v programu MATLAB 2012

```
% Úvodní procedury
clear variables;
clc;
close all;
%Načtení dat a úprava formátu času
d=x2mdate(4.1818E+04) datestr(d);
TMS333 = dlmread('333.txt');
t = x2mdate(TMS333(:,1));
tep = TMS333(:,3);
hum = TMS333(:,4);
t=t+1/24;

LPM=dlmread('LPM.txt');
tLPM = x2mdate(LPM(:,1));
dataLPM = LPM(:,2);
%Zpracování dat
n = length(t(:,1));
fprintf('zpracovavam data...\n');
% výpočet 1-minutových derivací
d1_hum=zeros(n,1);
    for i=2:1:n
        d1_hum(i)=hum(i)-hum(i-1);
    end
% vyhlazení dat
a=5;
nA=round(n/a);
medA_hum=zeros(nA,1);
tA=zeros(nA,1);
    for i=a:a:n
        medA_hum(i/a)= median(hum(i-a+1:i));
        tA(i/a)=t(i-a+1);
    end
% derivace vyhlazených dat
dmedA_hum=zeros(nA,1);
    for i=2:1:nA
        dmedA_hum(i) = medA_hum(i)-medA_hum(i-1);
    end
% výpočet směrodatné odchylky derivací vyhlazených dat
odchylky=zeros(nA,1);
o=5;
    for i=o+1:1:nA
        vektor=dmedA_hum(i-o:i);
        odchylky(i)=std(vektor);
    end
% výpočet směrodatné odchylky vyhlazených dat
odchylkymed=zeros(nA,1);
o=3;
    for i=o+1:1:nA
        vektor=medA_hum(i-o:i);
        odchylkymed(i)=std(vektor);
    end
```



```

% výpočet směrodatné odchytky minutových dat
odchylkyhum=zeros(n,1);
o=3;
    for i=o+1:1:n
        vektor1=hum(i-o:i);
        odchylkyhum(i)=std(vektor1);
    end
% odchylky minutových a vyhlazených dat
odchHumMed=zeros(nA,1);
    for i=1:1:nA-1
        odchHumMed (i)=medA_hum(i)-hum(i*a);
    end

% detekce začátků srážkových událostí
% detekce hrubých začátků srážek z derivací vyhlazených dat
zac=zeros(1,1);
p=0;
b=3;
    for i=1:1:nA
        PV=dmedA_hum(max([1, i-round(10/a)]:i-1));
        if ((dmedA_hum(i)>b) && (dmedA_hum(i-1)<b) &&
            (max(PV)<b) && (medA_hum(i+1))>15)
            p= p+1;
            zac(p)=(i-1)*a+1;
        end
    end

% detekce přesných začátků v minutových datech
minzac=zeros(p,1);
c=2*a
    for i=1:1:p
        PV=d1_hum (zac(i)-c:zac(i));
        [~, PORADI]=max(PV);
        minzac(i)= zac(i)-c+PORADI-1 ;
        minzac(i)=minzac(i)-1;
    end

% detekce konců srážek
doprselo=zeros(1,1);
kolikratDoprselo=0;
d=60*12;
F=0;
G=0 ;
K=1;
    for i=2:1:p
%pozice začátku v 1-minutových datech
        ilzac=zac(i);
%pozice konce v 1-minutových datech

        ilkonec=zac(i)+d;
% pozice zacatku v A-minutových datech
        iAzac=floor(ilzac/a);
        iAkonec=ceil(ilkonec/a);
        PVD=dmedA_hum1(iAzac-F:iAkonec+F);
        PV=medA_hum1(iAzac-F:iAkonec+F);
        for j=1:1:d/a
            pred=PVD(j:j+F);
            po=PVD(j+F+1:j+2*F+1);

```

```

        if ( (mean(pred)>G) && (mean(po)<G) &&
(PV(j+F)>KritDoprs) && (mean(PVD(max(1,j-1):j)))>0 );
        kolikratDoprselo=kolikratDoprselo+1;
        doprselo(kolikratDoprselo)=(ilzac+a*(j-1));
    end
    end
end

% detekce doschnutí senzoru
uschlo=zeros(p,1);
d=60*24;
F=3;
G=5;
H=2;
for i=1:1:p
    ilzac=zac(i);
    ilkonec=zac(i)+d;
    iAzac=ceil(ilzac/a);
    iAkonec=ceil(ilkonec/a);
    pVder=dmedA_hum1(iAzac-F:iAkonec);
    pVodch=odchylkymed(iAzac-F:iAkonec);
    pVhod=medA_hum1(iAzac-F:iAkonec);
    for j=F+1:1:iAkonec-iAzac
        pred=pVder(j-F+1:j);
        if( abs(mean(pred))<G &&
abs(mean(pred(2:F)))<G && pVodch(j)<H && pVhod(j)<25 )
            uschlo(i)=(ilzac+a*(j-F-1));
            break
        end
    end
end

% přiřazení začátků, konců a doschnutí
ZKU=zeros(p,3); % matice (zacatky, doprselo, uschlo)
% přiřazení začátků
for i=1:1:p
    ZKU(i,1)=minzac(i);
end
for i=2:1:p
    for j=1:1:kolikratDoprselo
        konecCykluJ = 0;
        rozdilZK=minzac(i)-doprselo(j);
        if rozdilZK<0
            if (i==2)
                if(j-1==0)
                    % hodnota představující chybu
                    ZKU(i-1 , 2)=2000;
                    continue;
                end
            % kontrola stejných konců
            elseif (doprselo(j-1)==ZKU(i-2,2))
                ZKU(i-1 , 2)=2000;
                break
            else
                %konec dříve než doschnutí
                if(doprselo(j-1)<uschlo(i-1))
                    ZKU(i-1 , 2)=doprselo(j-1);

```

```

                                break
                                else
% konec později než doschnutí
                                for k=j-2:-1:1
                                if ( doprselo(k)<uschlo(i-1) )
                                    ZKU(i-1 , 2)=doprselo(k);
                                    konecCykluJ = 1;
                                    break
                                end
                                if k==1;
% hodnota chyby
                                    ZKU(i-1 , 2)=1
                                    konecCykluJ = 1;
                                    break
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
                                if konecCykluJ ==1
                                    break
                                end
                                end
                                end
% poslednímu začátku je přiřazeno poslední dopršelo
ZKU(p,2)=doprselo(kolikratDoprselo);
% přiřazení doschnutí
    for i=1:1:p
        ZKU(i,3)=uschlo(i);
    end
% přiřazení časů k pozicím začátků, konců a doschnutí
casZKU=t(ZKU);
casZKU=m2xdate(casZKU);

% vytvoření textového souboru ZKU (matice začátek, konec,
doschnutí)
ZKUtxt = fopen('ZKU.txt','w');%vyrobi se takovy textak
fprintf(ZKUtxt,'zacatky\tdoprselo\tuschlo\n\n');
    for i=1:1:p
        fprintf(ZKUtxt,'%10f\t%.10f\t%.10f\n',casZKU(i,1),casZ
        KU(i,2),casZKU(i,3));
    end
fclose(ZKUtxt);

% konec
disp('----- konec -----')

```