

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PLÁNOVÁNÍ KRAJINY A SÍDEL



**Varovné protipovodňové systémy jako
ochrana před přívalovými povodněmi**

Flood warning systems as flash flood protection

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bakalant: Jan Čejka

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Kalibová, Ph.D.**

©2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Čejka

Environmentální vědy

Aplikovaná ekologie

Název práce

Varovné protipovodňové systémy jako ochrana před přívalovými povodněmi

Název anglicky

Early warning systems for flash floods

Cíle práce

Cílem práce je rešeršní formou poskytnout teoretické zázemí o principu fungování protipovodňových varovných systémů (dále jen PVS) a představit nově navržený PVS vyvinutý v rámci výzkumného projektu TA ČR TH02010802 „Systém včasné predikce přívalových povodní založený na přímém měření infiltrace“, založený na přímém měření infiltrace.

Metodika

Formou literární rešerše bude popsán srážko-odtokový proces v povodí a princip fungování varovných protipovodňových systémů (dále jen PVS) používaných v ČR i zahraničí. Na pilotním testování v terénu bude ověřen metodický manuál pro prototyp kontinuálního infiltrometru vyvinutého v rámci výzkumného projektu TA ČR TH02010802 „Systém včasné predikce přívalových povodní založený na přímém měření infiltrace“. Diskutován bude rozdíl mezi PVS dosud užívanými a nově navrhovaným PVS založeným na přímém měření infiltrace s využitím kontinuálního infiltrometru.

Doporučený rozsah práce

dle Nařízení děkana č. 1/2020 – Metodické pokyny pro zpracování bakalářské práce na FŽP

Klíčová slova

Infiltrace, infiltrometr, bleskové povodně, simulovaný déšť, varovný protipovodňový systém

Doporučené zdroje informací

Daňhelka, J., Janál, P., Šercl, P., (2015): Možnosti predikce přívalových povodní v podmínkách České republiky. Edice Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu Praha, 50 stran, ISBN 978-80-87577-27-1, ISSN 0232-0401

Davis R.S., (2001): Flash Flood Forecast and Detection Methods. In: Doswell C.A. (eds) Severe Convective Storms. Meteorological Monographs. American Meteorological Society, Boston, MA

Ferraris, L., Rudari, R., Siccardi, F., (2002): The Uncertainty in the Prediction of Flash Floods in the Northern Mediterranean Environment. Journal of Hydrometeorology (3), 714-727.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jana Kallbová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra plánování krajiny a sídel

Elektronicky schváleno dne 24. 1. 2023

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 25. 1. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 04. 02. 2023

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Varovné protipovodňové systémy jako ochrana před přívalovými povodněmi“ vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souladu s GDPR.

V Praze dne 30. 3. 2023

.....

Jan Čejka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucí mé bakalářské práce paní Ing. Janě Kalibové, Ph.D., za její odbornou pomoc, konzultace, udání směru mé práce a za poskytnutí řady cenných rad při jejím zpracování.

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce má za cíl rešeršní formou poskytnout teoretické zázemí o principu fungování protipovodňových varovných systémů (dále jen PVS) a představit nově navržený PVS vyvinutý v rámci výzkumného projektu TA ČR TH02010802 „Systém včasné predikce přívalových povodní založený na přímém měření infiltrace“. Tento cíl byl naplněn skrze uvedení základních teoretických informací v první části samotné práce se zaměřením na přívalové povodně a povodňová opatření, a to v literární rešerši. V literární rešerši byl popsán koncept PVS na území ČR a v zahraničí, konkrétně byla pro srovnání vybrána oblast USA. V poslední kapitole literární rešerše byly popsány lokální varovné systémy (LVS) a stručně charakterizován přístroj využitý v rámci této práce, který byl porovnán s jinými LVS působícími na našem území i mimo něj. Následující druhá část práce, část praktická, využije přístroj navržený agenturou TA ČR TH02010802, který je pro potřeby této práce vyzkoušen a jsou otestovány jeho funkce, způsob měření a způsob jakým vyhodnocuje povodňovou hrozbu. V diskuzi jsou poté uvedeny nejvýznamnější rozdíly mezi jednotlivými zeměmi ve využívání PVS a je zmíněn smysl i přínos celého projektu a aktuálního stavu přístroje.

Klíčová slova: infiltrace, infiltrometr, bleskové povodně, simulovaný déšť, varovný protipovodňový systém

Abstract

The aim of the presented bachelor's thesis is to provide a theoretical background on the principle of operation of flood warning systems (hereinafter referred to as PVS) and to present a newly designed PVS developed as part of the TA CR research project TH02010802 "A system for early prediction of flash floods based on direct infiltration measurement". was fulfilled thanks to the introduction of basic theoretical information in the first part of the work itself, focusing on flash floods and flood measures, in the literature search. In the literature search, the PVS concept was described in the territory of the Czech Republic and in horticulture, specifically the region of the USA was selected for comparison. chapter of the literature review, local warning systems (LVS) were described and the device used in this work was briefly characterized, which was compared with other LVS operating in our territory and beyond. The following is the second part of the work, part of the practical device designed by the TAČR agency TH02010802, which is tested for the needs of this work, its functions, methods and the way it evaluates the flood threat measurement are tested. The discussion then presents the most significant differences between individual countries in the use of PVS, the mentioned meaning, as well as the contribution of the entire and current state of the device.

Keywords: infiltration, infiltrometer, flash floods, simulation rain, flood warning system

Obsah

1	Úvod	10
2	Cíle práce	11
3	Literární rešerše.....	12
3.1	Atmosférické srážky	12
3.1.1	Typy atmosférických srážek.....	12
3.1.2	Dešťové srážky	13
3.2	Odtokový proces.....	13
3.2.1	Vznik povrchového odtoku srážkové vody	15
3.2.2	Kritické hodnoty hydraulických charakteristik povrchového odtoku srážkové vody po půdě	15
3.2.3	Součinitel drsnosti	16
3.2.4	Protierozní opatření	16
3.3	Infiltrace	17
3.4	Metody měření infiltrace	19
3.5	Povodně	20
3.5.1	Přívalová povodeň	22
3.5.2	Srovnání regionální a přívalové povodně.....	24
3.5.3	Prevence před povodněmi a protipovodňová opatření	24
3.6	Varovné protipovodňové systémy.....	26
3.6.1	Varovné protipovodňové systémy v České republice	27
3.6.2	Varovné protipovodňové systémy v USA.....	29
3.7	Lokální výstražné systémy (LVS).....	31
3.7.1	Lokální výstražný systém použitý v práci	31
3.7.2	Srovnání lokálních varovných systémů používaných u nás	32
3.7.3	Srovnání s lokálními varovnými systémy používanými v zahraničí	33
4	Protipovodňová ochrana – přívalové povodně.....	34
4.1	Faktory ovlivňující celkové riziko	34
4.2	Analýza rizik	34
4.3	Řešení rizik.....	36
5	Metodika.....	38
5.1	Popis přístroje.....	38

5.1.1	Nastavení přístroje použitého v rámci práce	41
5.1.2	Proces měření infiltrace	43
5.1.3	Příprava prstence a místa k měření.....	44
5.1.4	Příprava měření a kalibrace	44
5.1.5	Měření	45
5.1.6	Zpracování dat	45
6	Diskuze výsledků práce	47
7	Závěr	50
8	Seznam použitých zdrojů	52
9	Seznam obrázků	59
10	Seznam tabulek	59

1 Úvod

Voda je nositelkou života, je obsažena ve všech živých organismech na Zemi. Stejně jako může být blahodárná, může být i nebezpečná, schopná napáchat ohromné škody. Tato práce bude rešeršní formou pojednávat o přívalových povodních, o problémech a škodách, které způsobují, o možnostech jejich predikce a způsobech ochrany před nimi.

Přívalové povodně jsou charakteristické svým nečekaným a rychlým nástupem a velkými škodami. Hlavní problém spočívá ve velkém množství srážek v krátkém časovém intervalu. Vzhledem k probíhajícím změnám klimatu a postupně se zvyšujícím teplotám je v budoucích letech předpokládán vyšší výskyt přívalových dešťů (European Commission ©2009).

Aby se zamezilo škodám na infrastruktuře a zdraví osob, je zapotřebí tyto povodně předpovídat. K tomu už v minulosti docházelo a stále dochází, ale vzhledem k velké nepřesnosti předpovědí je potřeba neustále vyvíjet nové metody a postupy měření. Z toho důvodu začaly vznikat výzkumné projekty, jež mají v budoucnu chránit ohrožené úseky tím, že budou takové typy povodní předpovídat s větší přesností.

Většina metod předpovídá povodeň pouze v řádech několika minut, nanejvýš dvou hodin (ČHMÚ ©2010). Slibný pokrok představuje použití infiltrometrů, které mají být nainstalovány nad kritickými body v ploše povodí po celé republice a na základě informací o aktuálním nasycení půdy v zájmových povodích pomůžou tuto problematiku účinněji řešit. Podrobněji se této informativní metodice věnuje např. výzkumný projekt TA ČR TH02010802 „Systém včasné predikce přívalových povodní založený na přímém měření infiltrace“, o němž pojednává tato bakalářská práce. Pro měření infiltrace byl použit prototyp infiltrometru vyrobený v rámci tohoto výzkumného projektu. Tento typ infiltrometru by měl v budoucnu tvořit základ varovného protipovodňového systému. Je schopen simulovat déšť o konstantní i proměnné intenzitě.

2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je rešeršní formou poskytnout teoretické zázemí o principu fungování protipovodňových systémů (dále jen PVS) a představit nově navržený PVS vyvinutý v rámci výzkumného projektu TA ČR TH02010802 „Systém včasné predikce přívalových povodní založený na přímém měření infiltrace”.

Dalším cílem práce je v rámci literární rešerše popsat metody, postupy a stručně i typy infiltrometrů, se kterými se měřilo v minulosti až do současnosti. Popsán bude proces srážko-odtokového systému povodí, řešena bude infiltrace a problematika povodní se zaměřením na bleskové povodně.

Posledním cílem v rešeršní části práce bude popsat obecný koncept varovných protipovodňových systémů a srovnat je s těmi, které se používají na území USA s návazností na lokální varovné systémy a srovnání se systémy používanými na území ČR i v zahraničí.

Cílem je v praktické části popsat práci a zkušenosti s přístrojem a následně diskutovat o jeho aktuálním stavu.

3 Literární rešerše

V této kapitole bude formou literární rešerše popsán srážko-odtokový proces, infiltrace a způsoby jejího měření, budou zde představeny různé typy infiltrometrů, popsány povodně vyskytující se na našem území s důrazem na povodně přívalové a bude rovněž věnován prostor varovným protipovodňovým systémům v Česku, které budou srovnány se systémy v USA. Poslední část si klade za cíl definovat lokální varovné systémy a srovnat je s těmi, které se využívají na našem území a v zahraničí.

3.1 Atmosférické srážky

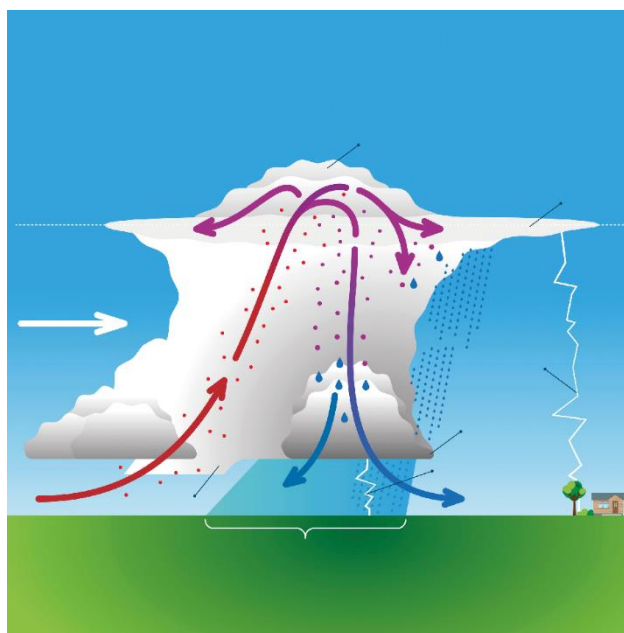
Atmosférické srážky lze definovat jako vodní kapky nebo ledové částice vzniklé následkem kondenzace nebo desublimace vodní páry v ovzduší. Jde tedy o všechnu atmosférickou vodu v kapalném nebo tuhém skupenství vypadávající z různých druhů oblaků vlivem přitažlivosti na Zemi. Srážky jsou jednou z hlavních částí koloběhu vody v přírodě (Husa 2018).

3.1.1 Typy atmosférických srážek

Atmosférické srážky se rozlišují na základě skupenství na kapalně (déšť, mrholení, rosa), tuhé (mrznoucí déšť, sníh, kroupy, jinovatka) a na srážky smíšené (při teplotách kolem 0 °C). Dělí se dle toho, jak padají z oblaků, a to na srážky vertikální (déšť a sníh) (Učebnice horské služby ©2020) a horizontální, tj. vzniklé na zemském povrchu – rosa, jinovatka, námraza a ledovka (Kropáček, Bednář 2005). Pro účely této práce mají největší význam srážky dešťové. O vývoji bouřky a dopadu srážek na zemský povrch pojednává obrázek 1.

Když teplý vzduch stoupá vzhůru (na obrázku znázorněno červenými šipkami), dochází ke kondenzaci – zkapalňování par a tvorbě oblaků. Při silné konvekci (proudění) dojde k vytvoření kumulonimby – vysoký mrak s typickou kovádlinou, k poklesu studeného vzduchu směrem dolů a k dešti. Ve stadiu, kdy sestupné proudy ukončí přísun teplého vzduchu se oblak začne rozpadat, čímž dojde i k přerušení deště (VŠCHT ©2017).

Obr. 1 – Vývojový cyklus bouřky



Zdroj: (Krasnýrok ©2021)

3.1.2 Dešťové srážky

Děšť tvoří vodní kapky větší než 0,5 mm s maximální velikostí 7 mm, při dopadu na zemský povrch se kapky rozpadají na menší částice (Řezáčová a kol. 2007), dešťové srážky vypadávají z mraků nimbostratus a cumulonimbus (VŠCHT ©2017).

Podle intenzity rozeznáváme dešť slabý, mírný, silný, prudký, liják, přívalový a průtrž (VŠCHT ©2017). Podle příčin rozdělujeme deště na orografické, konvektivní a cyklonální (Bednář 2003). Orografické deště vznikají převážně kvůli terénním překážkám (kopce, hory). Ohroženy povodní jsou tedy zejména oblasti vyskytující se pod případnou překážkou. Konvektivní deště mají většinou velkou intenzitu a krátkou dobu trvání, zasahují menší oblasti, svou intenzitou mohou způsobit rychlé nasycení půd, výtopu a odtok (svým charakterem splňují definici přívalové srážky). Cyklonální srážky vypadávají v oblasti tlakové níže a jejich intenzita závisí na vlhkosti vzduchu (čím větší vlhkost, tím větší intenzita) jsou charakteristické zejména pro tropy (Techmania ©2017).

3.2 Odtokový proces

Odtok je objem vody, který odečte z povodí za jednotku času. Celkový odtok lze rozdělit na přímý (povrchový a hypodermický) a základní (ze zásob podzemní vody). Odtok vzniká spadnutím srážek na povrch, kde nejprve vzniká odtok nesoustředěný, který poté vlivem terénu

přechází na odtok soustředěný hromadící vodu v potůčcích a následně v řekách (ČSN 750110 2010). Odtok se utvoří v případě, kdy dojde k nasycení půdního profilu a nahromaděná voda začne odtékat do okolí (ČSN 750110 2010). Odtok taktéž vzniká, pokud dojde k nasycení půdy po dlouhém dešti nebo je-li nějakým způsobem omezena schopnost půdy vodu infiltrovat (Hubačíková 2015). Obrázek 2 zjednodušeně zobrazuje celý proces.

Obr. 2 – Odtokový proces



Zdroj: (Langhammer 2007)

Dle Langhammera se dělí odtok na Hortonovský a Nehortonovský, podrobněji popsáno níže.

Hortonovský odtok

Hortonovský odtok vzniká převážně z vodních srážek, které se již nebyly schopny infiltrovat do půdy v případě, že intenzita deště byla větší nežli infiltrační kapacita půdy. Vyskytuje se zejména v oblastech s vysokou intenzitou srážek, aridních oblastech a oblastech s tenkou vrstvou půdy s malou infiltrační kapacitou. Omezujícími podmínkami pro hortonovský odtok jsou vysoká infiltrační schopnost půd a prostorová omezenost odtoku (odtok se generuje jen na určitých částech povodí) (Langhammer 2007).

Nehortonovský odtok

Nehortonovský odtok je odtok ze saturace (nasycené) půdy. Hlavní proces tvoří podpovrchový odtok v půdě. Stačí malá intenzita srážek v místech, kde při dešti dochází k rychlému nasycení půdy. Na rozdíl od hortonovského odtoku je omezen na menší plochy. Důležitost hraje zejména při vzniku povrchového odtoku konkávních částí svahů (koncentrují vodu, zůstávají nasycené ještě dlouho po dešti) (Langhammer 2007).

Na odtok má vliv spousta faktorů, např. geologické faktory (rašeliny, které zadržují vodu), pedologické faktory (po zamrzlé půdě probíhá odtok prakticky bez vsaku), vegetační faktory (protierozní činitelé) a zásahy člověka (stavba nádrží) (Tlapák a kol. 1992).

Podle způsobu odtoku rozdělujeme celkový odtok na:

1. povrchový odtok – který představuje tu část celkového odtoku, která odtéká z povodí po povrchu terénu;
2. podpovrchový odtok – nazývaný také hypodermický odtok, představuje část celkového odtoku, která odtéká z povodí pod povrchem terénu;
3. podzemní odtok – nazývaný také základní odtok, představuje část celkového odtoku, která odtéká z povodí jako součást podzemní vody (Chmi ©2022).

Největší význam má povrchový odtok z kapalných srážek, zejména vyvolaný tzv. přivalovým deštěm, tj. dešť, který trvá krátkou dobu a má vysokou intenzitu a plošný rozsah (APFM 2006).

3.2.1 Vznik povrchového odtoku srážkové vody

Při vztahu mezi intenzitou deště a charakteristikami vsakovací křivky mohou nastat tři charakteristické případy, přičemž každý má jiný vliv na vznik a charakteristiky povrchového odtoku.

1. Intenzita deště se rovná, nebo je menší než ustálená intenzita infiltrace, bez ohledu na trvání srážek. Tehdy povrchový odtok dešťové vody nevzniká.
2. Intenzita deště je rovna, nebo větší než počáteční intenzita infiltrace, pokud zanedbáváme povrchovou retenci dešťové vody. Zde povrchový odtok nastává bezprostředně po začátku deště.
3. Intenzita deště je větší než ustálená intenzita infiltrace, ale je zároveň menší než počáteční intenzita infiltrace. Povrchový odtok nastane, pokud doba trvání deště je větší než doba začátku tvoření kaluží před tzv. dobou výtopy (Vítek a kol. 2015).

3.2.2 Kritické hodnoty hydraulických charakteristik povrchového odtoku srážkové vody po půdě

V procesu rozrušování půdy, jejího přemísťování a ukládání je nejdůležitějším činitelem srážková voda. Část vody stéká po povrchu a po dosažení kritické hodnoty tangenciálního napětí začne rozrušovat půdu a přemísťovat ji. Účinkem toho se znehodnocuje půdní fond,

zhoršují se fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Srážková voda při erozi splachuje značné množství svrchní humusové půdy a odhaluje spodní vrstvy, což zhoršuje úrodnost (Toy 2002). Intenzitu vodní eroze můžeme ovlivňovat také úpravou délky svahu, vegetačního krytu a návrhem vhodných protierozních opatření. Přípustná délka je definována jako vzdálenost od rozvodnice, na které se povrchový plošný odtok mění na soustředěný, tedy na které se plošná eroze mění na výmlovou, resp. na které eroze dosahuje hodnoty přípustné intenzity eroze. Z toho vyplývá, že není jednoznačná. Vychází se z kritické rychlosti, kritického tangenciálního napětí a z přípustné intenzity eroze. Drsnost povrchu se vyjadřuje pomocí Bazinova součinitele drsnosti γ nebo Manningova součinitele drsnosti n (Toy 2002).

3.2.3 Součinitel drsnosti

Vliv součinitele drsnosti na přesnost výpočtu je podstatný. Jedná se o povrchový odtok dešťové vody po půdě probíhající v podmínkách, podobným pohybu vody v otevřeném korytě, ve kterém hloubka vody převyšuje nerovnosti v korytě i vegetaci. Při odtoku po půdě je výška nerovnosti obvykle větší než hloubka proudící vody, občas se zde může vyskytnout vegetace v různém stupni vývoje. Vegetace zvyšuje drsnost toku a snižuje rychlost povrchového odtoku. Přímo se to projevuje ochranou půdy před destruktivním působením dopadajících dešťových kapek a zpomalováním rychlosti odtoku (Toy 2002).

Nepřímo působením na půdní vlastnosti jako pórovitost a nepropustnost včetně snižování možnosti zanášení pórů jemnými částicemi a mechanickým zpevněním kořenovým systémem. Ochranný vliv je přímo úměrný pokryvnosti a hustotě porostu v době deště. Proto protierozní ochranu představuje především zapojený vegetační pokryv s dobře vyvinutým kořenovým systémem (např. traviny a jeteloviny). Běžné pěstování širokořádkových plodin (kukuřice, okopaniny, sady a vinice) chrání půdu nedostatečně (Toy 2002).

3.2.4 Protierozní opatření

V souvislosti s povrchovým odtokem velmi úzce souvisí téma protierozních opatření. Tato opatření – protipovodňová a protierozní se v mnoha oblastech v rámci jejich účinku prolínají či doplňují. Vazba protierozních opatření spočívá v tom, že bleskové povodně jsou často mimo hlavní vodní toky. Opatření proti erozi tak mají zásadní vliv na tvorbu povrchového odtoku (MŽP ©2016).

Protierozní opatření jsou zaměřena na zmírnění negativních projevů vody a větrné eroze v přírodě. Pro jejich návrh je nutné znát zejména tyto charakteristiky povrchového odtoku:

1. objem povrchového odtoku z uvažovaného deště,
2. výšku povrchového odtoku,
3. roční (nebo návrhový) průtok,
4. hydrogram povodňové vlny vyvolané uvažovaným deštěm (Toy 2002).

Vzhledem k tomu, že návrh protierozních opatření se ve většině případů týká takových ploch, na kterých neexistují přímá hydrologická pozorování, musíme si výše uvedené charakteristiky povrchového odtoku určit nepřímou, a to nejčastěji výpočtem. Charakteristiky povrchového odtoku se pro potřeby protierozní ochrany půdy nejčastěji určují následujícími způsoby:

- pomocí vzorce intenzivního typu (tzv. racionální metoda) – jedná se o relativně jednoduchý způsob odhadu eroze a porovnání pravděpodobnosti přínosů jednotlivých ochranných postupů;
- pomocí kombinace vzorců genetického a intenzivního typu (tzv. Hrádkova metoda) – využití vzorce pro stanovení kulminačního průtoku v malých povodích, a to za pomoci doby doběhu a doby koncentrace povrchového odtoku;
- pomocí odtokových křivek (tzv. CN-metoda) – srážkoodtokový model využitelný pro stanovení objemu přímého odtoku a kulminačního průtoku, který je způsoben přívalovým deštěm o zvolené pravděpodobnosti výskytu v rámci povodní do velikosti 10 km²;
- pomocí matematických modelů – jedná se o model určený pro velká, zemědělsky využívaná povodí, cílem modelu je vyhodnotit dopad zemědělského hospodaření na odtokové poměry, erozní proces či transport splavenin (Hrádek, Kuřík 2001).

3.3 Infiltrace

Infiltrací rozumíme vsakování kapaliny do půdy či propustných hornin. Jedná se o jeden z nejdůležitějších procesů tvorby zásob podzemní vody. Množství vody, které se vsákne do půdy za jednotku času, nazýváme intenzitou vsaku/infiltrace. Intenzita infiltrace je nejvyšší na jejím počátku, postupně klesá, až se stane konstantní (ustálená). Infiltrace závisí na mnoha faktorech, jimiž jsou intenzita srážek, minerální skladba půdy a hornin, počáteční vlhkost půdy, zastoupení půdních organismů a jejich druhů a nekapilární vodivost (Kutílek 1978).

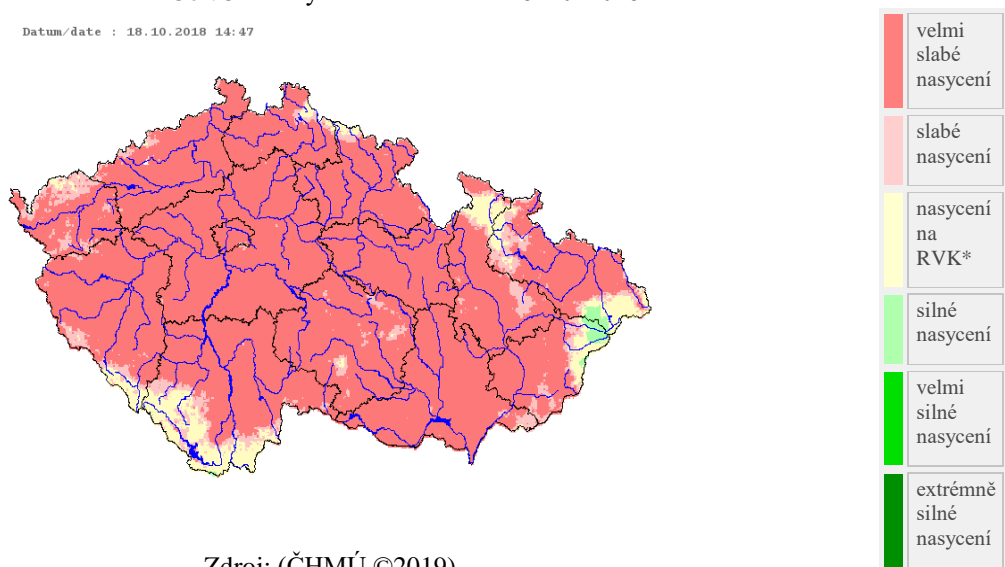
Největší schopnost infiltrovat vodu mají pásma porostlá lesy, jež zadržují velké množství vody, následují travnaté plochy a louky. Naproti tomu nejméně vody zadržují půdy bez vegetace (Hrkal 2010).

Obecně je nejvýhodnější infiltrační rychlost střední až vysoká, díky čemuž dojde k minimalizaci povrchového odtoku a vodní eroze půdy. Extrémně vysoká infiltrační rychlost může mít za následek odplavování živin a polutantů do povrchových vod. Největší propustnost mají půdy písčité a štěrkovité ($> 0,20$ mm/min), což je způsobeno velkou pórovitostí půdní struktury. Nejmenší propustnost mají jílovité půdy a půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody či vrstvou jílu na povrchu nebo pod ním a mělké půdy s nepropustným podložím ($< 0,05$ mm/min) (Vumop ©2013).

Infiltrovaná voda se může dostat do pásma aerace (provzdušnění), kde ji využijí stromy a rostliny. Z nich se poté voda dostane transpirací opět do ovzduší. Z pásma aerace poté zbytek vody pronikne do pásma saturace, kde doplní zásoby podzemních vod (Ruda 2014).

Infiltraci můžeme rozdělit na přirozenou a umělou. Přirozená infiltrace je běžnou součástí koloběhu vody, umělou infiltraci řídí člověk umělým zaplavením povrchu země (Ambrožová 2007). Nejvíce nasycená území bývají horské oblasti, avšak i ty byly roku 2018 významně postiženy suchem, což lze vidět na obrázku 3, na kterém je zobrazena nasycenost území ČR k datu 18. 10. 2018.

Obr. 3 – Nasycenost území ČR 18. 10. 2018



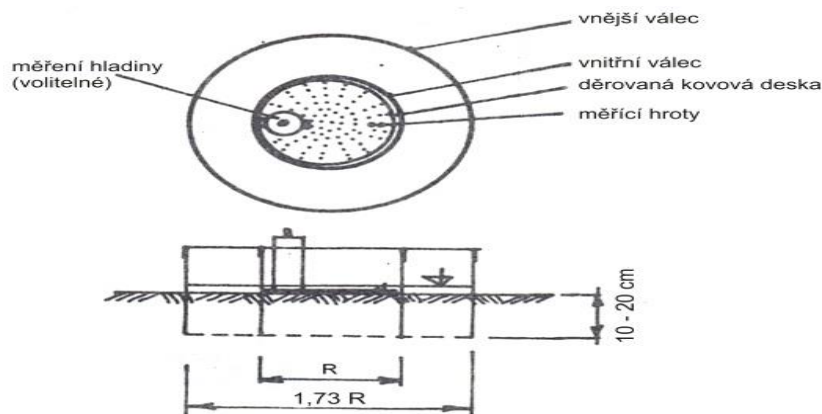
3.4 Metody měření infiltrace

K měření infiltrace se používá velké množství přístrojů a metod, většina z nich funguje na jednoduchém a podobném principu jako infiltrometr představený v této práci. Každá metoda má svá specifika a odlišné využití, která budou postupně představena v dalším textu.

1) Dvouválcové infiltrometry

Princip práce s dvouválcovými infiltrometry spočívá ve sledování poklesu hladiny vody ve válci ve stanoveném intervalu (Kutílek 1978). Schémata dvou dvouválcových infiltrometrů lze vidět na obrázku 4 a 5. Tato metoda se podobá způsobu měření použitému v této práci, avšak s tím rozdílem, že není tak efektivní a automatizovaná. Oproti infiltrometru použitému v tomto výzkumu má také obrovskou spotřebu vody.

Obr. 4 – Schéma dvouválcového výtopového infiltrometru



Zdroj: (Báťková a kol. 2013)

Obr. 5 – Dvouválcový infiltrometr



Zdroj: (Báťková a kol. 2013)

2) Jednoduchý tlakový infiltrometr

Jednoduchý tlakový infiltrometr je typ pracující na mechanicko-hydraulickém základě. Jedná se o infiltrometr Mariottova typu (Meter group ©2021).

Zařízení měří kumulativní infiltraci v infiltračním válci o průměru 15 cm. V terénu se upraví přebytná vegetace tak, aby nenarušovala podmínky měření (zastříhnutí vysoké trávy), poté se zarazí infiltrační válec do půdy v úrovni vodoznaku (Matula, Kozáková 1997).

3) Kompaktní přetlakový infiltrometr

Kompaktní přetlakový infiltrometr se používá při stanovení hydraulické vodivosti jednotlivých půdních horizontů, jež dohromady tvoří půdní profil (Kulhavý a kol. 2007).

Měření pomocí dešťového simulátoru

Měření pomocí dešťového simulátoru má oproti uvedeným infiltrometrům velké výhody. Ty spočívají hlavně v menší spotřebě vody, přesnosti a taktéž v částečné automatizaci měření.

Nevýhodou může být malá rozloha půdní sondy oproti dvouválcové metodě, která je však kompenzována poměrně krátkou dobou měření, umožňující vícero opakování a tím i pokrytí heterogenity půdního profilu v zájmové lokalitě. Další rozdíl je možnost simulace zátěžového deště, odpovídající svou intenzitou dešti, který předpovídá ČHMÚ. Jedná se o typ měření, který se používá v této práci. V budoucnu by se měl stát součástí varovných protipovodňových systémů.

V rámci odtokového procesu je nutné hovořit také o vzájemném působení intenzity srážek a intenzity infiltrace. Infiltrační kapacitu lze definovat jako maximální možnou intenzitu vsakování dešťové vody. Lze ji vyjádřit jako výšku vodního sloupce za určitý čas. Pokud je intenzita srážek nižší, či rovna infiltrační kapacitě daného povrchu, nedojde k vytvoření povrchového odtoku. Pokud je však intenzita srážek větší než infiltrační kapacita, dojde k výskytu povrchového odtoku. Povrchový odtok tak lze definovat jako rozdíl mezi intenzitou srážek a infiltrační kapacitou daného povrchu (Chmi ©2022).

3.5 Povodně

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách v § 64 definuje povodeň jako přechodné výrazné zvýšení hladiny vodního toku nebo jiných povrchových vod, při kterém voda zaplavuje území mimo své koryto a může způsobit škody.

Povodní se rozumí i stav, kdy voda nemůže přirozeným způsobem odtékat nebo je její odtok nedostatečný, případně dochází k zaplavení území v soustředěném toku srážkových vod (Zákon č. 254/2001 Sb.).

Naše země byla v posledních letech vystavena několika typům povodní, z nichž každá probíhá a vzniká jiným způsobem. Celkově u nás rozlišujeme 5 typů povodní, a to povodně ledové, povodně z tání, povodně letní přívalové (bleskové), povodně letní (dešťové) a povodně zvláštní (Chmi ©2016).

Ledové povodně

Vznikají s oblevou po období mrazu. U vodních toků, na kterých se předtím vytvořil ledový pokryv, dochází k jeho rozlámání a následnému pohybu. Problémy nastávají v místě zúžení toku, v mělkém dnu či překážkách, kde se kry začínají hromadit a hladina vody se vzdouvá, čímž zaplavuje blízké okolí. Tyto povodně u nás nejsou příliš časté (ČHMÚ ©2018e).

Povodně z tání sněhu

Vznikají nejčastěji začátkem jara. Nebezpečí hrozí hlavně ve středních a nižších nadmořských výškách při rychlém oteplení. Poslední velká povodeň tohoto typu u nás byla roku 2006 (National Weather Service ©2012).

Letní přívalové povodně

Letní přívalové povodně jsou obvykle výsledkem intenzivních bouří, kdy za krátkou periodu dopadne na určitý prostor velké množství srážek. Přívalové povodně vznikají téměř bez varování a dosahují své maximální intenzity za pár minut (State of New Jersey ©2018). Půda nestačí rychle se hromadící vodu vsakovat, a tak dochází na jejím povrchu k odtoku. Často je odnášen půdní materiál způsobující erozi. Zasažená oblast většinou není velká, ale ničivá síla je vzhledem k rychlosti proudění vody značná. Poslední velká povodeň tohoto typu zastihla území ČR v roce 2009 (ČHMÚ ©2018e).

Dešťové (letní) povodně

Dešťové povodně vznikají vlivem intenzivních srážek trvajících několik dní. Princip je stejný jako u přívalových povodní. Půda přesycená vodou již není schopna absorpce a voda se začne hromadit na jejím povrchu a odtékat. Na rozdíl od přívalových povodní postihuje tento typ většinou velké plochy. Největší povodeň tohoto typu u nás byla roku 2002, kdy postihla i značnou část Prahy (ČHMÚ ©2018e).

Zvláštní povodně

Vznikají havárií vodních děl, jako je protržení hrází, rybníků a přehrad, jsou velmi nebezpečné, naštěstí však výjimečné (Chmi ©2016).

3.5.1 Přívalová povodeň

Blesková povodeň je stručně řečeno náhlá lokální povodeň velkého objemu a krátkého trvání, která následuje během několika (obvykle méně než šesti) hodin po vydatných nebo nadměrných srážkách, popř. v důsledku selhání hráze, či náhlého uvolnění vody. Blesková povodeň může být způsobena intenzivním deštěm, zejména pokud k ní dojde v nasycené oblasti, po předchozím dešti nebo kde je zmrzlá půda (Association of British Insurers 2004).

Za těchto podmínek další déšť stéká po povrchu a hromadí se v potocích a řekách zrychleným tempem. Silné deště, nejčastěji spojené s konvekční oblačností, pokrývají malé oblasti a jsou krátkodobé (několik minut až několik hodin), ale velmi intenzivní. Další příčinou bleskových povodní zejména ve vysokohorských oblastech může být tání sněhu ve spojení s dešťovými srážkami. Po vydatném sněžení v zimě způsobí náhlý nárůst teploty a srážek v zimním/jarním období urychlení soutoku deště a tání sněhu a následně povodeň. Blesková povodeň může také vzniknout v důsledku selhání přehrad, hrází nebo jiné hydraulické infrastruktury (Slovak Hydro-Meteorological Institute 2006).

Dalšími příčinami mohou být průtrže ledovcových jezer nebo průtrže přirozených přehrad vytvořených sesuvy půdy. Občas se mohou plovoucí úlomky nebo led nahromadit na přírodní či uměle vytvořené překážce, jako je most, a omezit tok vody (také označované jako ledové zácpy nebo záseky klád). Voda zadržaná ledovou zácpou nebo troskovou hrází může způsobit záplavy proti proudu. Následné bleskové záplavy mohou nastat po proudu, pokud by se překážka náhle ztratila. Na základě zkoumání hydrometeorologických podmínek, je možné určit, kde se přívalové povodně pravděpodobněji vyskytnou (Black et al. 2002).

Výskyt přívalových povodní tedy lze díky předpovědi mapovat. Problém však spočívá v jejich včasné předpovědi. Je nutné brát v potaz, že přívalové povodně se mohou vyskytnout prakticky kdekoli, a to i mimo síť trvalých vodních toků. K výtopě a následnému vzniku povodně tak může dojít i na obyčejné louce s nevhodným podložím, která není schopna dostatečně infiltrovat velké množství srážek za krátký časový úsek. Pro zastavěné oblasti, ve kterých mohou povodně z přívalových srážek způsobit velké škody, jsou stanoveny tzv. kritické body (MŽP ©2016).

Mezi faktory, které určují trvání srážek, patří terén, přítomnost půdní vlhkosti nebo geologických vrstev a tvar pevniny. Kromě toho mohou délku srážek ovlivnit topografické prvky, jako jsou strmé svahy, úzká údolí, nebo hřebeny. To může způsobit častější výskyt bleskových povodní (například když jsou rokle a údolí úzké).

K riziku přívalových povodní tedy přispívají různé faktory, z nichž některé jsou ovlivněny lidským zásahem a jiné jsou zcela nezávislé na lidské činnosti. Fenomén přívalových povodní je jedním z nejobtížněji předvídatelných přírodních nebezpečí z hlediska času a místa výskytu.

Blesková povodeň tedy může proběhnout v délce, která se počítá v minutách, a to jen několik hodin od události, která ji způsobila (nadměrné srážky, porucha hydraulické infrastruktury atd.). Při bleskové povodni dochází k náhlému vzestupu hladiny v řekách a potocích (i mimo ně) a rychlost proudění může být velmi vysoká. Síla vody může být tak velká, že trhá balvany, vyvrací stromy a ničí mosty i budovy, které jí stojí v cestě (Berkes a kol. 2003).

Prudká voda často mění koryto řeky, a proto se může objevit i v místech, ve kterých se to obvykle neděje. Tak tomu bylo při povodni v Gorzanowě (jihozápadní Polsko) v roce 1997 – řeka Nysa Klodzka tekla ve dvou korytech – obvyklém a dalším vytvořeném uprostřed obce (Brammer 2010).

Voda o hloubce 1 m a rychlosti 1 m/s může pro dospělého člověka představovat smrtelné nebezpečí, zatímco bleskové povodně často proudí výrazně vyšší rychlostí, a proto je velmi nebezpečná hladina pouhých 12 cm. Včasná varování by mohla být klíčovým prvkem při snižování rizik pro životy a majetek. Hydrologové a meteorologové tvrdí, že při současném pokroku v technologiích měření a předpovědí je přesné místo a čas výskytu povodně známo pouze hodinu před jejím vypuknutím (Doughty 2016).

Například NOAA (Národní úřad pro oceán a atmosféru) může vydávat varování v průměru 43 minut před událostí (Slovenský hydrometeorologický ústav, 2006). To výrazně omezuje možnosti včasného varování krizových služeb a obyvatel, zejména s ohledem na skutečnost, že v mnoha zemích mají meteorologické hydrologické služby k dispozici omezený rozsah měřicích a předpovědních nástrojů. Zbývající doba odezvy je tak velmi omezená. Varování často přicházejí příliš pozdě, nebo nejsou dodána vůbec, buď kvůli nedostatku předpovědí, nebo z důvodů komplikací při šíření varování, např. během noci (Brammer 2010).

3.5.2 Srovnání regionální a přívalové povodně

Jako regionální povodeň se definuje povodeň, která zasahuje území v rádech až několika desítek km² (Kolejka a kol. 2015).

Na rozdíl od bleskové povodně zasahuje regionální povodeň poměrně rozsáhlou oblast, taktéž předpovězení tohoto typu povodně je díky jejímu pomalejšímu nástupu jednodušší. Naproti tomu přívalové povodně jsou charakteristické spíše menší zasaženou plochou, ale velmi rychlým nástupem (Kolejka a kol. 2015). Svým charakterem regionální povodeň odpovídá povodni dešťové.

Rozdíly spočívají jak v zasažené ploše, tak analýze podmínek a příčin vzniku takových povodní, modelování jejich průběhu a rozsahu (Jeníček, 2009; Kienberger, 2014), přičemž získané znalosti mají sloužit k prevenci, ale i ke včasnému varování před nimi.

Vzhledem k dosavadní četnosti (a také vývoji klimatu) se dá předpokládat, že výskyt regionálních, ale zejména přívalových povodní v budoucnosti vzroste (Kolejka a kol. 2015).

3.5.3 Prevence před povodněmi a protipovodňová opatření

Přívalovým povodním nelze zabránit, avšak můžeme zmenšit jejich dopad na lidi, jejich majetek a domovy tím, že se na ně lépe připravíme a především, že je budeme lépe a přesněji předpovídat.

V rámci kapitoly o prevenci před povodněmi a protipovodňových opatřeních jsou důležitá také preventivní opatření na zadržování vody v krajině a zpomalení povrchového odtoku. Mezi nejzásadnější nástroje prevence patří obnova přirozených koryt vodních toků, následně také obnovení meandrů a vyzvednutí koryt, která byla zahloubena zpět na povrch. Některá z koryt vodních toků byla ať již narovnána, zahloubena či v mnoha případech vybetonována a byla z nich vytvořena spíše síť kanálů. Kvůli zahloubení dochází k odvodňování krajiny po celé délce daného toku a následně pak není možné, aby se srážková voda dostatečně rychle vsakovala a vznikají tak rozlivové zóny (pravidelně zaplavovaná území kolem vodního toku), způsobené absencí říční sítě (Suchovkrajine ©2018).

Z dalších příkladů prevence lze uvést také regeneraci zemědělské krajiny, která je po delší dobu již spíše plochou, jež není schopna vsakovat srážky v dostatečném množství. Řešením je například rozdělení velkých ploch za pomoci remízků, mezí či stromů, dále zavádění organické složky do půdy, rozvážené střídání plodin a umožnění pastvy zvířat (Suchovkrajine ©2018).

Dalším z možných opatření je přerušování odvodňovacích potrubí a vyvedení drobných vodních toků a pramenišť zpět na povrch. S ohledem na změnu klimatu a snížení množství vody je nutné zavést do krajiny a zejména zemědělských oblastí zpětné vyvedení pramenů na zemský povrch, které je v současné době schováno v rámci dřívějšího systematického odvodňování. Posledním zmíněným možným opatřením pro prevenci před povodněmi je obnova mokřadních ploch. Právě mokřady jsou jedním z nejvýznamnějších aspektů pro zásoby vody pro krajinu a v případě dešťů jsou schopny nasáknout přebytek vody a následně tento přebytek využít v případě potřeby (Suchovkrajine ©2018).

S dnešními technologiemi lze přívalové povodně předvídat poměrně úspěšně. Problém spočívá v určení přesné lokality jejich výskytu, délky trvání a intenzity srážek. Z hlediska predikce vývoje se sledují indikátory jejich vzniku na stránkách ČHMÚ. Tyto indikátory jsou sledovány od dubna do října (MŽP ©2016).

Indikátory přívalových povodní: reprezentují aktuální nasycení půdy vodou. Červená území představují oblasti s nedostatkem vody, zelená pak území s vláhovým přebytkem. Vysoká nasycenost značí riziko tvorby povrchového odtoku, a tím i povodně. Na druhou stranu problém nastává i při příliš velkém suchu, kdy je půda vyprahlá a není schopna infiltrovat příliš velké množství srážek v krátkém časovém horizontu. Škody přívalových povodní mohou být zmírněny systémem povodňových opatření, která můžeme rozdělit na přípravná opatření, opatření při povodni a opatření po povodni (MŽP ©2016).

Přípravná opatření: organizační a technická příprava, školení pracovníků povodňové služby, provádění povodňových prohlídek.

Opatření při povodni: zabezpečovací povodňové práce, záchranné povodňové práce, náhradní doprava, činnost předpovědní povodňové služby, informační služby a ostatních účastníků povodňové ochrany (TAČR ©2015).

Opatření po povodni: obnovení narušených funkcí v postiženém území, zjišťování a oceňování povodňových škod, evidenční a dokumentační práce, vyhodnocení průběhu povodně.

Hlavním rizikovým faktorem se stává lidské chování. Jde především o nedostatečnou zkušenost s povodněmi tam, kde k jejich výskytu nedochází tak často. Pak tento jev můžeme nazvat jako tzv. **povodňovou paměť**. Lidé zapomínají na to, jaké škody je přívalová povodeň schopna napáchat, a nejsou na ni dobře připraveni (Čamrová, Jílková 2006).

Protipovodňová opatření

Ochrana před povodněmi nikdy nemůže být dokonalá, nicméně škody způsobené povodněmi je možné snížit důslednou prevencí a opatřeními proti povodním.

Tato opatření můžeme rozdělit do dvou skupin: technická a netechnická.

1. Technická opatření (strukturální):

- Retenční nádrže (užívají se k zachycení vody z povodí a zpomalení vodního toku);
- Zvyšování kapacity koryt a stabilizace;
- Výstavba ochranných hrází;
- Kroky vedoucí ke snížení eroze půdy a zvýšení retence povodí.

2. Netechnická opatření (nestavební):

- Zaplavování zón a jejich právní zajištění;
- Předpovědní a varovné systémy a výchova veřejnosti při povodňových situacích.

Na tocích, na kterých je doba odpovědi kratší než 3 hodiny, hrají větší roli technická opatření. Je to zejména kvůli příliš krátké době předpovědi deště, která plní nedostatečně funkci varovného systému (Gymberoun ©2013).

Mobilní protipovodňové hrazení

Jsou technická opatření, která se uplatní především k usměrnění toku vody a odklonění přívalové vlny. Díky tomu je možnost odstranit, nebo alespoň výrazně snížit negativní dopady povodní. Výhodou protipovodňových zábran je také to, že jsou snadno manipulovatelné a lze je při nastávající hrozbě rychle využít (Školník 2018).

3.6 Varovné protipovodňové systémy

Z hlediska ochrany zdraví a životů lidí není důležité jen povodňovým událostem předcházet, ale také před nimi účinně varovat. K tomuto účelu jsou budovány varovné protipovodňové systémy. Ty se zabývají monitoringem oblasti, informováním, testováním produktu a proškolením uživatelů. Pro umístění srážkoměrných a hladinoměrných čidel jsou zohledněna tři kritéria, a to hydrometeorologické, kdy je systém provozuschopný a odborně bez závad, rozpočtové, kdy při zvyšování počtu čidel nejsou nijak enormně navyšovány náklady a územní, kdy jsou čidla umístěna na území obce tak, aby bylo možné zajistit včasné varování obyvatelstva. Varovné protipovodňové systémy sestávají nejen z monitorovacích prvků, jakými jsou srážkoměry, hladinoměrná čidla či automatické stanice, které pracují na různých principech, aby tak předcházely případné hrozbě, ale také z informačních systémů a povodňových plánů (Školník 2018).

Pro potřeby této práce budou v následujících dvou podkapitolách stručně popsány varovné protipovodňové systémy používané v České republice a USA, přičemž rozdíly budou následně analyzovány v kapitole „Diskuze výsledků práce“.

3.6.1 Varovné protipovodňové systémy v České republice

V této podkapitole budou uvedeny základní informace o varovných systémech v ČR, převážně o monitorovacích modulech, způsobu zpracování dat a způsobu varování obyvatel před povodní. Součástí varovných protipovodňových systémů na území ČR jsou i automatické měřicí stanice, které budou podrobněji popsány v kapitole 3.7.

Měření a výstraha

Jako prevence před povodněmi je v České republice využíváno široké spektrum různých systémů. Základní položkou varovného protipovodňového systému jsou hladinoměrné stanice, které využívají buď manometrické čidlo s GSM komunikací, nebo ultrazvukové čidlo. Srážkoměrná stanice se uplatní i mimo vodní toky (Školník 2018). Srážkoměrné stanice informují o hrozícím nebezpečí jako první a činí tak odesláním alarmových zpráv o překročené nedefinované mezní hodnotě srážek, následně vodoměrné stanice zaznamenají vzestup hladiny na toku způsobený srážkovou činností. Pokud dojde k překročení zvolených stupňů povodňové aktivity vydají vodoměrné stanice varování, které obdrží oprávněné osoby, jakou je např. starosta obce (Kocman a kol. 2011).

Zpracování dat

Jednotlivá výše uvedená zařízení jsou vždy spojena s příslušným počítačem či jiným typem sítě, které následně přenáší informace k osobě, která má na starost analýzu získaných dat a případné uvedení informací o potřebě varování obyvatelstva či složek IZS (Integrovaný záchranný systém) a o možnosti vzniku povodní a přípravy na ně. Jedním z nejvyužívanějších ústavů pro tyto potřeby je Hydrometeorologický ústav. V rámci České republiky jsou v každém kraji, okrese a většině měst tato data zpracovávána pravidelně (Školník ©2018).

Varování obyvatelstva

Protipovodňový systém mimo monitorovací oblast řeší také potřebu pořízení místního informačního systému. Pro umístění těchto systémů je v rámci České republiky zapotřebí souhlas krajského ředitelství HZS (Hasičského záchranného sboru). Pro vyrozumění obyvatelstva je po celé České republice rozvedena síť tzv. místního informačního systému (MIS). MIS lze definovat jako bezdrátový obecní rozhlas, který slouží k varování obyvatelstva

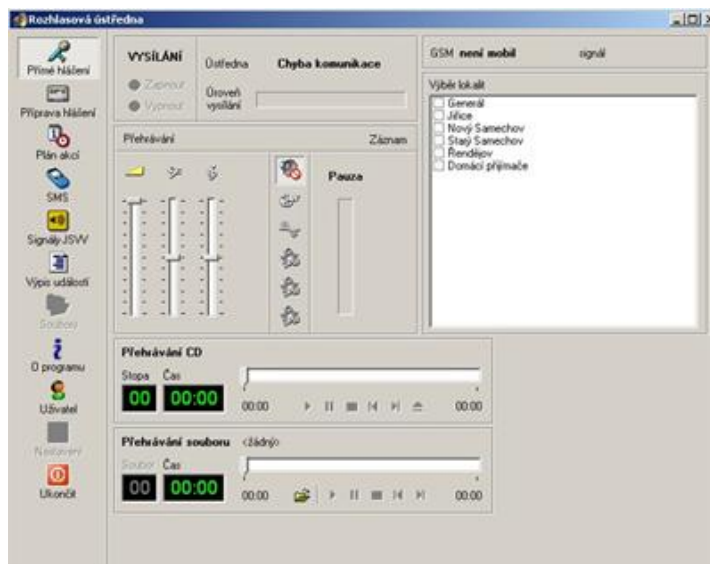
v případě vzniku mimořádné události. Nejedná se pouze o povodně, ale například i radiační havárii, požáry atd. Právě rychlost rozšíření informace o mimořádné události je jednou z nejzásadnějších oblastí pro záchranu lidských životů a majetku při rychlejšímu postupu povodní. V rámci MIS jsou tak obyvatelé informováni velmi rychle a rozsáhle o typu mimořádné události a zejména o potřebných krocích, které musí v danou chvíli podniknout – evakuace, ukrytí (Pozary ©2022).

Místní informační systém (MIS) představuje novou generaci bezdrátového obecního rozhlasu a systému varování obyvatelstva, skládá se z několika následujících částí:

- centrální technologie: zabezpečuje ovládání z JSVV (jednotného systému varování a vyrozumění);
- místní ovládání z dotykového pultu místního ovládání;
- z PC s programem místního ovládání;
- ze záložního pultu a autonomního ovládání prostřednictvím mobilního telefonu.

Systém je možno rozšířit o zobrazovací informační panel a bluetooth. Obrázek 6 znázorňuje pracovní prostředí programu. Přenosová část je digitální, může být simplexní (přenos v jednom směru) a duplexní (přenos v obou směrech). Výhodou tvoří otevřenost systému a jeho budoucí zdokonalování (Školník 2018).

Obr. 6 – Rozhlasová ústředna MIS – software



Zdroj: (Školník 2018)

Koncové prvky MIS

- a. Venkovní přijímače – slouží k ozvučení měst a obcí. Instalují se na sloupy veřejného osvětlení.

- b. Přijímače do domácností – mohou sloužit imobilním občanům či členům povodňové komise.
- c. Elektronická siréna – je určena k ozvučení obcí buď samostatně, nebo interakcí s MIS (Školník 2018).

Monitorovací moduly

Tvoří samostatnou část MIS, modul pomocí GPS nebo rádiového kanálu komunikuje s vysílací ústřednou. Jeho využití se předpokládá hlavně v nezastavěných částech měst a obcí. Nastavení se provádí dle dlouhodobých záznamů v lokalitě, přibližně po jednoročním zkušebním provozu, poté je upravováno dle místních podmínek (Školník 2018).

Postup přenosu výstražné informace:

1. zasláním SMS vybraným osobám a skupinám (povodňová komise, hasiči, radní zastupitelé apod.), možnost zaslání i ohroženým obyvatelům;
2. vyhodnocení reálnosti hrozby a poté předání ohroženým skupinám obyvatelstva;
3. pokud nejsou k dispozici pověřené osoby, dojde k automatickému zaslání obyvatelům obce (Školník 2018).

3.6.2 Varovné protipovodňové systémy v USA

Tato podkapitola bude věnována varovným protipovodňovým systémům v USA, které se v mnohém liší od těch, které jsou využívány na území ČR. Ve Spojených státech spolupracují US Geological Survey (USGS) a National Weather Service (NWS) – jakožto součást National Oceanic a Atmospheric Administration na vzájemném udržování systémů varování před povodněmi po celé zemi. Konkrétně USGS působí jako hlavní zdroj údajů o povrchových a podzemních vodách a provozuje více než 85 procent stanic pro měření toku v USA. NWS používá výše uvedená data a údaje k následnému vydávání předpovědí a varování před povodněmi. Je tedy možné říci, že NWS vydává povodňové výstrahy ať již na úrovni okresů, nebo pro konkrétní řeky či potoky. Tyto výstrahy jsou rozděleny do několika základních kategorií (Nexsens ©2019).

Měření a výstraha

V rámci nabídky existuje velmi rozsáhlá škála automatických měřidel toku, které mohou přenášet data na úrovni toku prostřednictvím telemetrie (technologie umožňující dálkový přenos dat), avšak nejčastějšími systémy na území Spojených států jsou systémy vyvinuté dle

protokolu NWS ALERT. Ty mají tu výhodu, že fungují podle společných standardů komunikačních kritérií, takže ačkoliv široká škála výrobců vyvíjí a vyrábí vlastní hardware a software i monitorovací zařízení, tak je většina těchto produktů vzájemně kompatibilní. Některé měřicí systémy také poskytují informace specifické pro dané místo. Pokročilejší měřidla mohou být vybavena snímači teploty a rychlosti větru. Automatizované systémy varování před povodněmi ve většině případů využívají rádiovou, mobilní, nebo satelitní telemetrii pro komunikaci s hlavním počítačem nebo sítí. Některé systémy, ty novější a ve většině případů dražší, využívají rádiové frekvence. Automatické systémy varování před povodněmi všeho druhu také vyžadují napájení. Zatímco měřidla instalovaná v blízkosti rozvinutých komunit mohou být napájena připojením ke komerční elektrické síti, měřidla umístěná v odlehlých oblastech obecně spoléhají při provozu svých telemetrických zařízení na kombinaci baterie a solární energie (Nexsens ©2019).

Zpracování dat

Tak jako v Česku i v USA jsou jednotlivá zařízení napojena na ústav, který tato data vyhodnocuje, poskytuje veřejnosti předpovědi, varuje před nebezpečnými událostmi, jako jsou povodně a hurikány za účelem ochrany a bezpečnosti, touto institucí je NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) (NOAA ©2023). Nicméně software používaný ke shromažďování a zpracování dat z přístrojů se bude lišit v závislosti na potřebách a preferencích uživatele. Mnoho výrobců přístrojů nabízí svůj vlastní software pro vzdálené prohlížení dat. Nejužitečnější software pro zpracování umožní více uživatelům přistupovat k datům současně a sledovat více měřidel najednou. Systém protipovodňových opatření a varování vyžaduje pozornost ke třem základním faktorům: Shromažďování dat pomocí měření a jejich zpracování, požadovaný hardware a software, a šíření informací o varování před povodněmi (Nexsens ©2019).

Varování obyvatelstva

V rámci varování obyvatelstva v USA působí jeden integrovaný veřejný výstražný a varovný systém (IPAWS – Integrated Public And Warning System), vytvořený FEMA (Federal Emergency Management Agency), který využívá národní nouzové komunikační kanály, jako jsou nouzové výstražné systémy (EAS – Emergency Alert System), bezdrátová nouzová upozornění, meteorologická rádia, veřejné TV a značení k poskytování výstrah pro konkrétní oblast v době, kdy dochází k mimořádným událostem – požáry, povodně atd. Systém umožňuje oslovit velké množství lidí, včetně těch, kteří se dříve nepřihlásili k odběru nouzových oznámení, jako jsou např. turisté (Fema ©2022).

3.7 Lokální výstražné systémy (LVS)

V této kapitole budou poskytnuty základní informace o funkci a rozdělení LVS. Následně bude navázáno LVS používanými u nás i v zahraničí. Základem lokálního výstražného systému jsou srážkoměry a vodoměrné stanice. Funkcí srážkoměrných stanic je měření dešťových srážek za časový úsek. Vodoměrné stanice měří hladinu vodního toku a stupně povodňové aktivity. Řadí se sem i automatické měřicí systémy, což je i případ infiltrometru popsaného v práci (Kocman a kol. 2011).

Lokální výstražné systémy i místní informační systémy (MIS) spolu navzájem spolupracují. Jedná se o dvě samostatné složky tvořící ucelenou část varovného protipovodňového systému. Zatímco cílem LVS je analýza dat a jejich zpracování, tak účelem MIS je tuto hrozbu především včas oznámit obyvatelům ohrožené obce. Lokální výstražné systémy se dělí na základní, rozšířené a komplexní (Kocman a kol. 2011).

Systém popsaný v práci se řadí mezi komplexní, jelikož je propojený s dalšími prvky, jejichž cílem je vzájemná integrita a včasné varování obyvatel obce, ve které je systém rozmístěn.

3.7.1 Lokální výstražný systém použitý v práci

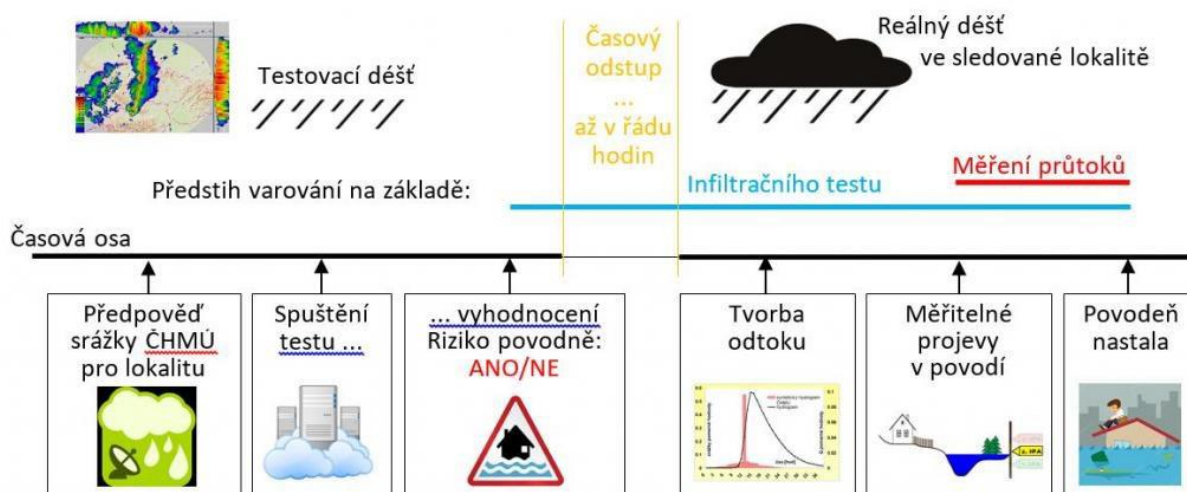
Je systém založený na přímém měření infiltrace srážek využitelný zejména v oblastech (obce, průmyslové objekty nacházející se v rizikových oblastech malých povodí), kde nelze účinně aplikovat jiné typy varovných systémů.

Princip varování přístroje popsaného v práci spočívá v tom, že změří dobu výtopy a porovná ji s dobou trvání předpovídané srážky. Pokud je doba výtopy kratší než doba navrhované srážky, je tu reálné riziko vzniku povodně. Přístroj následně odešle informaci odpovědným osobám, nejčastěji starostovi obce, který analyzuje situaci a postupuje dle povodňového plánu. Během celého procesu stanovení rizika jsou realizovány kontrolní testy, minimalizující případná falešná varování. Přístroj využívá výsledky přímého měření infiltrace v konkrétních podmínkách stanoviště, které jsou pro každou lokalitu specifické (Vumop ©2022).

Tento postup je u většiny varovných systémů podobný, jak je popsáno v kapitole 3.6, ve které je popsána integrita s informačními systémy, jež přenášejí varování k občanům zasažené obce. Na obrázku 7 lze vidět jednoduchý postup, který byl popsán v této kapitole. Dochází zde díky infiltračnímu testu a měření průtoků k předčasnému varování zasažené obce, která má dostatek času na provedení případných protiopatření. Dle časové osy začíná celý proces od předpovězení srážky ČHMÚ pro lokalitu přes následný test přístroje až do potvrzení, či vyvrácení ohrožení

lokality přívalovou povodní. Přístroje tohoto typu by měly v budoucnu tvořit síť, díky které bude předpovídání přívalových povodní (a i regionálních) mnohem efektivnější než dosud.

Obr. 7 – Způsob vznesení výstrahy před povodní



Zdroj: (Vumop ©2020)

3.7.2 Srovnání lokálních varovných systémů používaných u nás

Na území ČR je rozmístěno mnoho lokálních varovných systémů. Většina z nich funguje na principu srážkoměrných a vodoměrných stanic.

Příkladem takového typu přístroje je např. varovná protipovodňová hladinoměrná stanice od společnosti Fiedler Company. Pokud hladina vody dosáhne stanovené úrovně, přístroj vydá varování (ve formě SMS), díky čemuž se lze na povodeň s určitým předstihem připravit (Fiedler.com ©2022). Podobný typ přístroje lze uplatnit při regionální i přívalové povodni.

Rozdíl oproti systému použitému v práci spočívá v tom, že se takto koncipované systémy nehodí na umístění pro menší obce a průmyslové objekty, nacházející se v horních a středních částech povodí, které ohrožuje přítok vody z jednotlivých pozemků či jiných drobných vodních toků (Adcis ©2020). Problém spočívá také v tom, že takový systém nemůže předpovědět srážku s přesností a předstihem, protože nezohledňuje heterogenitu půdy (Vumop ©2022).

Z toho důvodu dochází v období možného výskytu přívalových povodní k možným falešným poplachům, kdy je povodeň ohlášena, ale nakonec k ní nedojde. Varování přichází často jen několik desítek minut, nanejvýš hodin před povodní. Přístroj popsáný v práci je schopen varovat i s více než 24hodinovým předstihem. Dává tak daleko větší časovou rezervu na to, zaujmout protipovodňová opatření, než systémy pracující na principu hladinoměrných a srážkoměrných

stanic, které se uplatní spíše při předvídání regionálních typů povodní. Starší systémy rozmístěné na území ČR také nejsou schopny měřit proměnnou intenzitu srážky, která více odpovídá reálné srážce (Vumop ©2022).

3.7.3 Srovnání s lokálními varovnými systémy používanými v zahraničí

Tak jako u nás i v zahraničí fungují systémy, které se snaží co nejpřesněji a s co největším předstihem předvídat povodně. Většina z nich funguje na principu instalace srážkoměrných a vodoměrných stanic (tak jako systémy v ČR), kdy je měřen průtok vody a úhrn srážky za určitý časový úsek, na jehož základě vydá přístroj varování. Příkladem je přístroj StormLink vyvinutý společnostmi One rain a AEM board (Onerain ©2022). Některé varovné systémy jsou založené na principu automatických meteorologických stanic, které monitorují klimatické podmínky v okolí a na základě překročení prahové srážky vydají varování.

Příkladem je systém iMETOS (Strompraha ©2022), který má široké využití, avšak tak jako u předchozího modelu je nevýhoda v tom, že nedochází k varování s dostatečným předstihem. Většina metod se tedy spoléhá na varování pomocí srážkoměrných a vodoměrných stanic instalovaných na ohrožených úsecích, kde monitorují hladinu vody v říční síti, nebo srážkový úhrn za daný časový úsek. Liší se tím od přístroje popsaného v práci, který se snaží simulovat předvídanou srážku a vychází z aktuálního stupně nasycení půdy s cílem zjistit, jestli je oblast, kde je umístěn, povodní ohrožená. Přístroje je možné vybavit velkým množstvím nejrůznějších senzorů a čidel, a tím lze předpověď upřesnit a předejít tak falešným poplachům, avšak to s sebou nese vždy vyšší náklady.

4 Protipovodňová ochrana – přívalové povodně

4.1 Faktory ovlivňující celkové riziko

Plánování omezování povodňových škod a volba vhodných metod ke snižování ztrát způsobených přívalovými povodněmi vyžaduje vyhodnocení úrovně povodňového rizika v dané oblasti. Míra rizika je obsažena v informacích o dopadu povodně s definovanou pravděpodobností na lidi, životní prostředí a majetek, tedy popisuje potenciální ztráty, které může povodeň způsobit. Povodňové riziko lze charakterizovat mnoha způsoby, ale rozhodující jsou tři prvky: nebezpečí, expozice a zranitelnost.

„Nebezpečím“ obecně rozumíme velikost povodně s definovanou pravděpodobností výskytu. Tyto informace lze převést do map zobrazujících hranice ohroženého terénu, jakož i hloubky inundace a související rychlosti. „Expozice“ popisuje lidskou činnost a prostředí v nebezpečné zóně (kdo je povodní ohrožen). Třetím parametrem, který charakterizuje obecný pojem rizika, je „zranitelnost“ daného regionu vůči povodňovým škodám (Black a kol. 2002).

V současné době se používají různé definice tohoto parametru v závislosti na potřebách. Jedna z nich se týká náchylnosti regionu k povodním a obsahuje geofyzikální, ekonomické a společenské atributy regionu. Musí být provedena důkladná analýza rizik, která zahrnuje posouzení nebezpečí, zranitelnosti komunity a požadavků na rozvoj pro budování odolnosti společnosti (Association of British Insurers 2004).

Rozšířený a stále více používaný výklad pojmu zranitelnost se týká potenciální schopnosti komunity vyrovnat se s krizí, kterou by způsobila povodeň, a vzpamatovat se z ní. Ukazateli jsou často sociální (vzdělání, pohlaví, délka místního pobytu atd.) a politicko-ekonomické (struktura majetku, úroveň rozvoje atd.) charakteristiky (Black a kol. 2002).

4.2 Analýza rizik

Povodňovým nebezpečím obecně rozumíme pravděpodobnost, že povodeň nastane na určitém místě v určitou dobu. Informace o nebezpečí jsou uvedeny na mapách. Minimálně zahrnují hranice území ohroženého „referenční povodní“ – obecně povodně s definovanou pravděpodobností výskytu. Může se také jednat o oblasti ohrožené několika typy povodní (stanoveno v návrhu povodňových směrnic).

Kromě čar vymežujících rozsah povodní obsahují rizikové mapy často informace o hloubce a rychlosti vody, informace o možné erozi břehů a o sesuvných terénech. Mapy povodňových

rizik pro terény na březích řek jsou vypracovány v mnoha zemích na základě modelových analýz nebo historických povodní. Při zakládání oblastí ohrožených přívalovými povodněmi musíme počítat s jinými zdroji nebezpečí, než je rozliv řeky, jako je řetězový efekt bouřek, rychlost srážek a rychlost pohybu jednotlivých bouřek (Black a kol. 2002).

Meteorologická a hydrologická data – tyto informace nám umožňují s poměrně vysokou přesností vyhodnotit, kde k povodním došlo a jaký byl jejich rozsah. Pro oblasti ležící daleko od řek nám umožňují pouze odhadnout, jaké intenzity a trvání daná srážka bude (Corkindale, 2004).

Analýza potenciálních havárií hydrotechnologických areálů – pro většinu hydrotechnologických areálů, jako jsou přehrady, jsou ve fázi návrhu zpracovány zprávy o možných důsledcích jejich havárie. Obsahují údaje o rychlosti průběhu jevu, rozsahu potenciálních záplavových území a popisují varovný systém pro obyvatele a vlastníky ohrožených nemovitostí. Tyto údaje mohou pomoci při identifikaci oblastí ohrožených bleskovými povodněmi. Standardním postupem pro vytyčování těchto ploch je kombinace hydrologického a hydraulického modelování s prostorovými analýzami GIS (databáze). To usnadňuje nejen vytyčení rizikových oblastí, ale také analýzu toho, kdo a co je v nebezpečí (Corkindale, 2004).

Tyto analýzy stojí za to ověřit a doplnit. K tomu lze využít místní zkušenosti, pokud je to možné, k zapsání rozsahu historických povodní do mapy. To lze zlepšit společně s místními službami nebo s obyvateli vybrané lokality. Rozumným řešením v této oblasti je zavedení směrnice o povodních.

Před posouzením jakéhokoli povodňového rizika musí hodnotitelé rizik zvážit dopady minulých povodní na životní prostředí, ekonomiku, zdraví a kulturní dědictví. Toto je první krok k určení povodňového nebezpečí a rizika. Dále se hodnotitelé podívají na historické údaje o povodních, aby určili, které oblasti představují vysokou pravděpodobnost záplav nebo představují významné riziko záplav. Na základě těchto informací se každá země rozhodne, které oblasti představují významná povodňová rizika nebo možnosti záplav. A pro tyto oblasti by měly být připraveny mapy povodňového nebezpečí a mapy povodňových rizik (Black a kol. 2002).

Není možné vypracovat standardní seznam indikátorů, které by měly být brány v úvahu při hodnocení zranitelnosti komunity (nebo regionu) vůči povodním. To ostatně závisí na cíli, pro

jehož realizaci je analýza zranitelnosti nezbytná. Můžeme si představit mnoho rozhodovacích úkolů, kterým by taková analýza mohla sloužit, což ilustrují následující otázky:

- Kde by měla být umístěna nová stavba nebo prvky infrastruktury, aby se minimalizovala zranitelnost regionu vůči povodním?
- Jaké aktivity by měly být zahájeny na pomoc sociálním skupinám, které jsou nejvíce ohroženy povodněmi?
- Které oblasti v regionu vyžadují zvláštní pozornost při navrhování systémů varování a reakce na povodně? (Corkindale, 2004).

4.3 Řešení rizik

V rámci nejistot a rizik vyvolaných možnými povodněmi je nutné zaměřit svoji pozornost zejména na období před vznikem povodně, tedy na její předpověď. Právě samotná předpověď díky informacím, které z ní získáme, může napomoci k navržení protipovodňových opatření, která pro danou oblast možného výskytu povodní nebyla do dané doby zajištěna.

V provozní praxi meteorologické a hydrologické služby jsou deterministické předpovědi zpracovány bez vyhodnocení jejich nejistoty. Vyhodnocení nejistoty předpovědí není výzvou pouze pro meteorologický ústav. Uživatelé předpovědí jsou také zvyklí na kategoricky formulované předpovědi a nový produkt jako pravděpodobnostní předpovědi bude vyžadovat školení, alespoň pro krizové služby.

Jde o dilema, jak se na jedné straně vyhnout falešným poplachům a na druhé straně podpořit varování obyvatel před povodní, která se blíží (Boet, a kol. 2020).

To je důvod, proč meteorologické a hydrologické ústavy kvalifikují úroveň nebezpečí meteorologického jevu. Pro případ povodňového nebezpečí je příkladem takového hodnocení níže uvedená čtyřbodová škála, která se vztahuje jak k velikosti ohrožení, tak k pravděpodobnosti jeho výskytu:

- sledování situace – varování před atmosférickými a hydrologickými podmínkami, které by mohly vést k povodni;
- varování před povodněmi – varování před nevyhnutelnou povodní, která má nastat;
- varování před záplavami – varování před nevyhnutelnými katastrofickými záplavami, které vyžadují okamžitou evakuaci obyvatel;
- Vše v pořádku – zrušení varování, když nebezpečí pomine nebo když selepší meteorologické a hydrologické podmínky (Corkindale, 2004).

Pro potřeby této práce je nutné uvést také rozdíl mezi záplavou a povodní. Záplava je souvislá vodní plocha, která určitou dobu stojí, nebo proudí a může být způsobena i jinými zdroji než z vodních toků, např. dešťovými srážkami či táním ledu.

Povodní se rozumí zaplavení menších, či větších územních celků vodou vylitou z břehů vodních toků či nádrží (Pojištění ©2021).

Nicméně toto dělení se zohledňuje spíše na úrovni pojistných událostí, jelikož přívalová povodeň vzniká velice často z intenzivního deště a opakuje se s určitou periodou na postižené lokalitě.

Ne všechny meteorologické stanice však poskytují takto diverzifikované hodnocení situace, a to zejména u přívalových povodní, a navíc prostorové rozlišení výstrah zpracovaných na národní úrovni může být pro místní potřeby nedostatečné. Z tohoto důvodu je potřeba vyhodnotit povodňová rizika a vytvořit systémy varování, reakce a plány na místní úrovni. Tyto plány mají hlavní funkci vyjasnit role a odpovědnosti, jakož i postupy, které je třeba dodržovat, aby bylo možné s dostupnými prostředky co nejúčinněji a efektivněji reagovat při záchraně života a majetku.

Nejistota ohledně situace v povodí se týká nejen budoucnosti, ale i současné povodňové situace. Specialisté na prognózy, krizové služby a všichni ohrožení mají omezené a různorodé znalosti o aktuální situaci. A to nejen z hlediska hydrologicko-meteorologické situace, ale také informací, jakými jsou rozsah a druh ničení, bezpečné evakuační trasy atd. Jednou z metod řešení tohoto druhu nejistoty je efektivní výměna informací mezi těmito skupinami. Užitečný je otevřený přístup k datům měření v reálném čase. Obousměrná komunikace přináší ještě lepší výsledky (Boet, a kol. 2020).

5 Metodika

K vypracování praktické části této práce byl poskytnut přístroj, se kterým bylo provedeno několik testovacích měření. Tato kapitola si klade za cíl přístroj, který byl pro účely této práce použit, představit a také definovat způsob, jakým dochází přímým měřením infiltrace k vyhodnocení případné hrozby před povodní. O závěrech práce s přístrojem bude poté pojednáno v kapitole diskuze.

5.1 Popis přístroje

Infiltrometr použitý v této práci byl vyroben jako prototyp v rámci projektu TA ČR TH02010802 ve spolupráci s CZU v Praze a Vumop. Předpokládá se, že v budoucnu bude sloužit k efektivnější a přesnější předpovědi přívalových povodní. Skládá se z kontrolní jednotky, prstence, hrotu, zadeš'ovací trysky, kabelů a přívodních hadiček.

Ad 1) Kontrolní jednotka

Kontrolní jednotka je hlavní pracovní oblast přístroje, přes niž probíhá veškeré nastavení simulace deště. Obsahuje několik tlačítek a dvě světelné diody.

Tlačítka

Run: slouží ke spuštění infiltrometru. ESC: umožní návrat zpět do předchozího kroku, případně do ovládacího menu. F1, F2, F3, F5 slouží pro pohyb v menu přístroje. F6 (ENTER) se používá k potvrzení a ze základní obrazovky se jím můžeme přesunout do dalšího menu, jak lze vidět na obrázku 8.

Obr. 8 – Kontrolní jednotka – tlačítka



Zdroj: vlastní tvorba

Světla

Na kontrolní jednotce svítí dvě světla: zelené „Pump“ a červené „Level“. Zelené světlo je aktivní, pokud čerpadlo pumpuje vodu. Červené světlo se aktivuje, když se hrot dotkne vodní hladiny v prstenci. To znamená, že zaznamená výtopu. Obě světla jsou vyznačena na obrázku 9.

Obr. 9 – Kontrolní jednotka – světla



Zdroj: vlastní tvorba

Ad 2) Prstenec, hrot a zadešťovací tryska

Pro účely této práce byl použit prstenec o průměru 61 mm. Prstenec slouží k vymezení infiltrační oblasti, v níž dochází ke vsakování vody a získu potřebných dat. Je potřeba ho pevně zatlačit do půdy, aby se neviklal a nedocházelo k bočnímu proudění vody, které ovlivní dobu výtopy. V horším případě jí úplně zamezí, a tím znehodnotí celé měření.

Tryska se vsadí do prstence a propojí se s hadičkou přístroje. Tou krátkými pulsy proudí voda do trysky, která simuluje déšť o určité intenzitě do vymezeného prostoru prstence. Trysku s prstencem i hrotem lze vidět na obrázku 10.

Obr. 10 – Prstenec s hrotem a tryskou



Zdroj: vlastní tvorba

Součástí prstence tvoří hladinový hrot, který je propojen elektrickým obvodem s přístrojem a který indikuje hladinu vody o určité výšce. Když vodní hladina dosáhne úrovně hrotu, zaznamená se čas výtopy. Pro tuto práci byl použit hrot ve výšce 5 mm od půdního profilu v prstenci, což je z důvodu nerovností a vegetace. Toto je následně ošetřeno korekcí při finálním zpracování dat.

Poslední kabel slouží k uzemnění prstence, napojí se pod hrotem.

Oba kabely, jak ke hladinovému hrotu, tak k uzemnění, je potřeba připojit ještě před instalací prstence do půdy. Následně to jde jen velmi obtížně.

Ad 3) Kabely a přívodní hadičky

Pro správnou funkčnost infiltrometru se propojí prstenec a jeho součásti s dalším příslušenstvím.

Modré hadičky

Pro práci s přístrojem potřebujeme dvě hadičky. Delší se napojí do vstupu **IN** a druhá, kratší do výstupu **OUT**.

IN označuje vstup, kterým je pumpována voda ze zdroje s vodou do čerpadla infiltrometru. Napojíme na něj delší hadičku, umístíme ji do připravené nádrže s vodou. Následně se otvorem **OUT** odvádí voda do kratší hadičky, která se propojí s tryskou. Ta potom simuluje déšť o určité intenzitě, jež se před měřením nastaví v přístroji.

Kabely

- Kabel reálná srážka – pro tuto práci nebyl využit.

- Kabel simulovaná srážka – slouží pro měření srážky o dané intenzitě.
- Černý kabel – slouží ke stažení naměřených dat do počítače.
- Napájecí kabel – slouží k připojení k přístroji a nabití jeho baterie.

Oba vstupy a výstupy, společně s modrými hadičkami přivádějícími vodu, lze vidět na obrázku 11.

Obr. 11 – Vstupní a výstupní hadičky na kontrolní jednotce



Zdroj: vlastní tvorba

5.1.1 Nastavení přístroje použitého v rámci práce

V této části bude popsáno vstupní nastavení infiltrometru, které bylo použito v rámci měření nastavení přístroje. Podrobný postup ovládání přístroje je zpracován v diplomové práci Denisy Novotné (Novotná 2018). Přístroj má řadu nastavení, jež se dají využít pro různé typy měření.

V rámci práce byla použita jen některá nastavení, přičemž ta budou popsána v této kapitole.

Strom hlavní nabídky obsahuje celkově tři menu, s nimiž je pro obsluhu přístroje nezbytné se seznámit. Jde o nastavení přístroje, nastavení pro měření a ostatní.

Nastavení přístroje:

Na kontrolní jednotce přístroje nastavíme data použitá pro měření.

- Nastavení křivek: přednastavena křivka 1.
- Telefonní čísla: nevyužito.
- Výběr lokality: nevyužito.

- Počet kroužků: nevyužito.
- Reálná srážka: NE.
- Voda v nádrži: 5 litrů.
- Podsvícení LCD: ponecháno na 70 %.
- Kontrast LCD: ponecháno na 70 %.
- Vypínání LCD: ON při dlouhodobé neaktivitě šetří baterii.
- Vypínání LCD: nastavení času, po kterém se displej automaticky vypne.
- Zobrazení čísla hovoru, zobrazení SMS zprávy: nevyužito.
- Data měření na FTP server.

Pro měření byl používán kanystr s kapacitou 5 litrů. Samozřejmě může být použit jiný libovolný zdroj vody, podle něhož se mění i kapacita vody v nádrži. Pracovalo se pouze se simulovanou srážkou, tudíž reálné nastavení není potřeba a nastavení křivek ponecháme na 1. Vypínání displeje je užitečná funkce, kterou oceníme hlavně při dlouhodobém chodu přístroje, protože tím se šetří spotřeba baterie.

Ostatní nastavení:

Následující text stručně vysvětlí jednotlivé funkce.

- Uložit nastavení: ukládá dosud nastavené parametry, případně změny.
- Načíst nastavení: načte poslední uložené nastavení.
- Výchozí nastavení: vrátí přístroj do továrního nastavení.
- Restart: restartuje přístroj, využíváno např. při zamrznutí obrazovky.
- Výpis napětí: stav baterie.
- Čas běhu systému: ukazuje, jak dlouho je přístroj zapnutý.

Další funkce: zapnutí a připojení k PC, síla signálu GSM, GSM/FTP, přepnutí do programovacího módu, systém info, odhlášení, přihlášení.

Nastavení pro měření:

Na kontrolní jednotce přístroje byla nastavena tato data:

- Výška hrotu: 5 mm.
- Průměr prstence: 61 mm.
- Objem: Zadávala se hodnota úhrnu, dle tabulky z programu DES RAIN (45,6 mm pro stoletý déšť).
- Měření fáze 2 – ANO: přístroj pokračuje v měření i po dosažení výtopy.

- Indikace hladiny – ANO: přístroj detekuje hladinu vody, a tím dobu výtopy.
- Indikace periody – ANO: rozsvícení červené diody po kontaktu hrotu s hladinou.
- Inverzní činnost čerpadla – NE: pro potřeby práce nevyužito.
- Počítání korekce – ANO: korekce doby výtopy.
- Detekce hladiny hrotem – ANO: zaznamená dobu výtopy po kontaktu hladiny s hrotem.
- Pro vybrané čerpadlo lokalit – NE: vybrání lokality z databáze přístroje, nevyužito.
- Volba ukončení měření – maximální intenzita: po dosažení výtopy dojde ve zbylém čase k pumpování vody v maximální intenzitě. To je přerušeno vždy, když se hladina vody dotkne hrotu.

Většina nastavení již byla přednastavena, tudíž ho nebylo nutné měnit. Změny je potřeba potvrdit v sekci Ostatní a uložit.

5.1.2 Proces měření infiltrace

Po nastavení přístroje se tlačítkem ESC vrátíme na hlavní obrazovku a tlačítkem ENTER vstoupíme do procesu měření, kde provedeme nejprve zavodnění, poté následuje kalibrace a až nakonec dojde k samotnému měření.

Zavodnění: Provádí se proto, aby se dostala voda z nádoby (v tomto případě kanystru) do čerpadla a zároveň se tím odstraní vzduchové bubliny uvnitř hadiček. Zavodnění se musí provést ještě před začátkem měření.

Kalibrace: Slouží k nastavení množství vody v mililitrech na jeden puls čerpadla. Je potřeba provést třikrát a poté zadat průměr ze všech hodnot. Většinou se pohybuje v rozmezí od 65 do 75 ml. Detailněji je kalibrace popsána v diplomové práci Lucie Hanišové (Hanišová 2018).

Měření: Nastavení doby, po kterou bude přístroj simulovat dešťovou srážku. V rámci této práce se používalo nejprve 90minutové nastavení, poté 60minutové. Pokud nedošlo k výtopě, měřilo se na stejném místě dalších 60 minut.

Dále je potřeba nastavit úhrn. Pro tuto práci se používal úhrn pro stoletý déšť a ten je 45,6 mm dle modelu DES_RAIN (Vaššová, Kovář 2011), jak lze vidět na obrázku 13. Obrázek 12 zobrazuje výstup modelu DES_RAIN, hodnoty maximálních denních úhrnů nastavené dle stanice Mnichovice, jež byla na pokusné lokalitě, ve které se provádělo testování přístroje. Po nastavení všech údajů zapravíme prstenec do půdy (více v kapitole 5.1.3 Příprava prstence k měření) a poté je možno měřit.

Obr. 12 – Tabulka Des Rain stanice – Mnichovice

Číslo Stanice	315
<i>N = 2 roky</i>	39.1 mm
<i>N = 5 let</i>	54 mm
<i>N = 10 let</i>	63.6 mm
<i>N = 20 let</i>	73.6 mm
<i>N = 50 let</i>	85.9 mm
<i>N = 100 let</i>	95.5 mm

Zdroj: (Kalibová 2018)

Obr. 13 – Hodnoty srážkových úhrnů zadané v přístroji (použité v rámci práce)

Srážkové úhrny $H_t.N$ doba trvání srážky t (min)	15	Náhradní intenzity deště $it.N$ doba trvání srážky t (min)	15
<i>N = 2 roky</i>	14.59 mm	<i>N = 2 roky</i>	0.97 mm/min
<i>N = 5 let</i>	21.49 mm	<i>N = 5 let</i>	1.43 mm/min
<i>N = 10 let</i>	26.32 mm	<i>N = 10 let</i>	1.75 mm/min
<i>N = 20 let</i>	32.27 mm	<i>N = 20 let</i>	2.15 mm/min
<i>N = 50 let</i>	39.84 mm	<i>N = 50 let</i>	2.66 mm/min
<i>N = 100 let</i>	45.61 mm	<i>N = 100 let</i>	3.04 mm/min

Zdroj: (Kalibová 2018)

5.1.3 Příprava prstence a místa k měření

Pro úpravu a instalaci prstence na určité místo potřebujeme nůžky, kladivo a prkénko. Nůžkami zastříháme okolní vegetaci, která se nesmí vytrhávat, protože by se tím narušila přirozená struktura půdy a znehodnotily podmínky, při kterých infiltrace probíhá. Než prstenec zatlučeme na určené místo, je potřeba zapojit do něj kabel (se štítkem simulovaná srážka) i hrot, protože po jeho instalaci do půdy bychom to provedli velmi obtížně a mohli bychom tak znehodnotit celé měření. Po zapojení hrotu i kabelu přiložíme na prstenec na prkénko a zatlučeme ho 3–5 cm do země tak, aby byl stabilní a neviklal se. Tím si vymezíme plochu, v níž budeme měřit.

5.1.4 Příprava měření a kalibrace

Nastavíme hrot tak, aby byl 5 mm nad úrovní půdy. To je potřeba hlavně z důvodu nerovností půdního povrchu. Tato chyba je ošetřena při automatickém zpracování dat kontrolní jednotkou. Následně připojíme ke hrotu koncový kabel. V tuto chvíli se hrotu nesmí nic dotknout, aby nedošlo k vyvolání falešného záznamu o výtopě – kontaktu vodní hladiny s hrotem.

Spustíme zavodnění – přístroj začne pumpovat vodu ze zdroje (kanistr s pěti litry vody). Trysku ještě nezavádíme, budeme ji potřebovat na kalibraci.

Nejprve zapneme na přístroji proces zavodnění, poté umístíme trysku do odměrného válce a provedeme kalibraci. Naměřenou hodnotu si vždy zapíšeme, kalibraci opakujeme třikrát. Průměr ze všech hodnot zapíšeme a následně nastavíme na přístroji.

Pokud jsme předtím nastavili úhrn i dobu měření, můžeme se pomocí šipky přesunout na konec nastavení a zahájit samotné měření. Ještě předtím je potřeba umístit trysku do prstence.

5.1.5 Měření

V průběhu měření přístroj zadeštuje půdu v prstenci o nastavené intenzitě (nastaveno na 100letý déšť). V tuto chvíli je potřeba sledovat dobu, kdy dojde k výtopě. Pokud k ní dojde, hodnotu zapíšeme (přístroj výtopu také zaznamenává, ruční psaní slouží jako záloha). Důležité je měření nepřerušit a nechat dojít do konce, protože po zaznamenané výtopě nastává další fáze měření – do ustálení rychlosti infiltrace.

Přístroj bude pumpovat vodu o maximální intenzitě deště, dokud nedojde ke kontaktu hrotu s hladinou, tedy k výtopě. Následně se proces přeruší. Po odtržení hladiny vody od hrotu se znovu spustí na maximální výkon, aby opět nastala výtopa. Poté na displeji oznámí konec měření. Necháme tedy celý proces proběhnout do doby ustálení infiltrace, případně do doby, kterou jsme si stanovili na počátku. V případě této práce se jednalo o 60 minut, jelikož bylo vyzorováno, že k ustálení infiltrace dojde do jedné hodiny.

5.1.6 Zpracování dat

Z měření i doby výtopy byla získána data času dosažení výtop, jež si ale na místě prohlédnout nelze. Tato výstupní data je potřeba nahrát do počítače a zobrazit v programu „Infilter_view“, který je převádí do podoby zpracovatelné v MS excel. V tabulce 1 vidíme příklad těchto dat. Můžeme v ní vidět čas výtopy **tp**, objem celkově infiltrované vody při výtopě **Wtp**, čas infiltrace **t(s)** a infiltraci vody akumulované na povrchu půdy v milimetrech **i(t) (mm)**, což je kumulativní objem vody dodaný po výtopě.

Tabulka 1. Příklad měření kumulativní infiltrace a zpracování dat

Čas [s]	Objem [ml]	Čas infiltrace t [s]	Kumulativní infiltrace i(t) [mm]
239,76	96,04		
249,18	0	9,42	0,54
254,24	100,31		
264,98	0	25,22	1,07
269,88	104,44		

Zdroj: (Kalibová a kol. 2021)

Tučné hodnoty v tabulce odpovídají době výtopy ($t_p = 239,76$) a objemu vody při výtopě ($W_{tp} = 96,04$). Doba infiltrace pro jeden krok (což je doba mezi dosažením výtopy a utržením hladiny od hrotu) se vypočte jako rozdíl dvou po sobě jdoucích záznamů. Tedy např. odečtením hodnot času doby výtop získáme čas infiltrace:

$$249,18 \text{ s} - 239,76 \text{ s} = 9,42 \text{ s}$$

$$264,98 \text{ s} - 239,76 \text{ s} = 25,22 \text{ s}$$

A výpočet kumulativní infiltrace provedeme odečtením hodnot objemu $\times 0,127$ (koeficient pro převod ml na mm). Tedy:

$$(100,31 \text{ ml} - 96,04 \text{ ml}) \times 0,127 = 0,54 \text{ mm}$$

$$(104,44 \text{ ml} - 96,04 \text{ ml}) \times 0,127 = 1,07 \text{ mm}$$

Množství infiltrace pak odpovídá kumulativnímu objemu dodané vody od doby výtopy.

Získaná data můžeme uplatnit při vypočtení nasycené hydraulické vodivosti a pomocí Philipsovy infiltrační rovnice si stanovíme sorptivitu – schopnost materiálu přenášet a absorbovat vodu skrze kapiláry (Scimedirect ©2021), která se stanoví z doby výtopy, intenzity deště a nasycené hydraulické vodivosti. Tím získáme hodnotu sorptivity ještě před dosažením výtopy. Stanovení sorptivity hraje klíčovou úlohu v počátečním stádiu infiltrace v nenasyčeném půdním prostředí a je limitována dobou výtopy. Takto zpracovaná data nám následně pomohou určit riziko povrchového odtoku, a tak i ohrožení přívalovou povodní. Více o inovativním výpočtu sorptivity lze nalézt v archivním ročníku Vodní hospodářství 12/2021 (Kalibová a kol. 2021).

6 Diskuze výsledků práce

Práce měla za cíl poskytnout teoretické zázemí o fungování varovných protipovodňových systémů a představit nově navržený systém vyvinutý v rámci výzkumného projektu TA ČR TH02010802 „Systém včasné predikce přívalových povodní založený na přímém měření infiltrace“. Přímé měření infiltrace je originální a inovativní způsob, jak přesněji a hlavně s větším předstihem předvídat přívalovou povodeň, a to především lokálně, v oblastech, kde se klasické systémy neuplatní (malé obce a průmyslové objekty, nalézající se mimo hlavní vodní toky, pod povodím s minimální rozlohou).

Orientace v nastavení a celková práce s přístrojem je velice jednoduchá. Pro úspěšný a vypovídající test je však potřeba dodržovat předem stanovený postup, jako je např. nastavení hrotu 5mm nad půdní profil kvůli nerovnostem, či přílišné nezasahování do struktury půdy a pravidelné provádění kalibrace, abychom tak měli co nejpřesnější předpověď. Také je potřeba vzít v potaz, že se jedná o poměrně citlivé zařízení, které v sobě obsahuje elektroniku, která je náchylná zejména na vlhkost, proto je zapotřebí jemná manipulace a pravidelná údržba systému (dobíjení baterie, čištění vnitřních hadiček).

Další výhodou je nízká pořizovací cena, přesnost měření a spolehlivost, která minimalizuje falešné poplachy. Po měření, abychom mohli s daty pracovat, je potřeba data přenést do programu „Infilter_view“, který je zpracuje. Výsledné časy výtop se poté porovnají s časem trvání navrhované srážky, z čehož lze následně posoudit, zda hrozí riziko přívalové povodně.

Určitou nevýhodou systému je nemožnost jeho využití v zimních měsících, kvůli riziku destrukce čidel v důsledku mrazu, avšak riziko přívalových srážek je v tomto období poměrně malé (Isvavai ©2021).

V roce 2019 došlo na přístroji k několika inovacím. Ty zahrnovaly doplnění hydraulického prepínače pro zvýšení počtu infiltračních jednotek – což umožňuje zvýšení počtu opakování zkoušky nebo prodloužení doby mezi reinstalacemi přístroje v terénu. Doplněna byla nová kalibrační jednotka, která zvyšuje přesnost měření a umožňuje provádět diagnostiku hydraulického systému (míra opotřebení dílů, vliv extrémních teplot prostředí či zamrznutí systému). Nově byla doplněna i pasivní infiltrační jednotka, která může být instalována do nedaleké dráhy soustředěného odtoku nebo plošného svahového ronu. Provozně ověřovány byly také jiné alternativy hladinového čidla a různé principy měřící dosažení hladiny vody. Přístroj byl prezentován prostřednictvím médií. Při této příležitosti došlo jednak k jeho prezentaci veřejnosti a byla navázána spolupráce s dalšími týmy, a to jak při využívání přístroje,

tak jeho začlenění do sofistikovaných systémů monitoringu a odlišně koncipovaných varovných protipovodňových systémů. Dále probíhaly práce na koncipování a softwarové realizaci dispečerského systému formou síťové aplikace, který bude využívat data podobných informačních systémů (ČHMÚ, VÚMOP). Zmíněné práce směřují k cíli, který byl plánován pro rok 2020 a tím je poloprovoz a dispečink varovného protipovodňového systému. Byly vyrobeny nulté série s aplikací navržených inovací pro testování v posledním roce (Kulhavý 2019).

V závěrečném roku řešení projektu roku 2020 došlo k zahájení ostrého provozu jednotlivých komponent VPS (infiltrometry a dispečink). Do přístroje byl zabudován GPS modul. Pro získání informace o jeho umístění a také o změně jeho pozice (např. v důsledku krádeže), byly dokončeny úpravy softwaru i hardwaru, rozšířeny možnosti připojení dalších čidel (např. srážkoměru). Také došlo k nahrazení fóliové klávesnice bezkontaktní, kapacitní klávesnicí pro zvýšení odolnosti a k testování celého systému v poloprovozu. V rámci poloprovozu došlo ke spuštění databázové aplikace, která shromažďuje informace o uživateli a měřících stanicích.

Systém byl logicky rozdělen na část výstražnou a varovnou. Výstražná část systému vyhodnocuje aktuální stupeň nasycení půdy a případná rizika výskytu kritických srážek, na základě čehož dojde k případnému spuštění infiltračního testu. Následně dojde k vyhodnocení infiltračního testu, pokud se riziko povodně potvrdí je odeslána varovnou částí systému zpráva o hroziící povodni všem uživatelům uloženým v databázi. V průběhu roku 2020 došlo k udělení osvědčení o užitém vzoru. Celý projekt, který probíhal od roku 2017 tak byl rokem 2020 úspěšně ukončen (Kulhavý 2020).

V literární rešerši byl tento systém porovnán s ostatními lokálními varovnými systémy, které se používají na našem území i v zahraničí, kde se využívají především srážkoměrné a vodoměrné stanice. Zjistilo se, že existuje celá řada přístrojů, které využívají různé způsoby měření, avšak nejčastější jsou v ČR srážkoměrné a vodoměrné stanice, které sice mohou plnit svůj účel na vybraných místech (jako je např. měření průtoku toků), avšak v malých obcích či průmyslových oblastech, které leží daleko od hlavních toků postrádají využití.

Celý varovný protipovodňový systém skládající se jak z měřících stanic, tak z informačních systémů (jako např. MIS) byl charakterizován a srovnán se systémem v USA, aby se tak zjistily rozdíly i vzájemné podobnosti. Obě země byly s ohledem na své protipovodňové opatření na daném území podrobeny analýze, která je uvedena v rešeršní části práce. Na základě analýzy bylo zjištěno, že u obou států probíhá předpověď možných povodní na obdobném principu. Oba státy využívají pro předpověď zařízení, která jsou umístěna na tocích – řekách a potocích, jež

jsou pro povodně největším nebezpečím. Obě země ale využívají i zařízení mimo toky. Tato zařízení se neliší v samotném provedení. Ovšem s ohledem na využití na rozdílných kontinentech, a tedy rozdílných přírodních podmínkách, se jedná o specifické přístroje vhodné pro využití v daném státě s ohledem na potřeby státu.

Zpracování dat je opět u obou zemí velmi podobné. Obě země s ohledem na využívaná zařízení na předpověď povodní využívají ke zpracování dat specializovaná pracoviště, která přijatá data z přístrojů zpracovávají a rozhodují o nutnosti využití protipovodňových opatření či jiných akcí, jež budou zajištěna v takovém rozsahu, aby ke vzniku povodní nedošlo, popřípadě byla v dostatečném předstihu informována veřejnost.

Největším rozdílem v rámci protipovodňových opatření je samotné vyrozumění a varování obyvatelstva v případě vzniku povodní, tedy v České republice označované jako mimořádná událost. V USA jsou tyto typy událostí (povodně) ohlašovány skrze televizi, a to za pomoci IPAWS, veřejného integrovaného systému, který za pomoci veřejných kanálů, jakými jsou televize či rádio, oznamuje všem obyvatelům postižených povodní stěžejní informace, jako je například potřeba evakuace a zásobování. V USA je však s ohledem na velikost dané země nutné brát na vědomí, že jsou zde místa, která nejsou podporována měřeními a zajišťováním analýzy možných povodní.

Naopak Česká republika je v rámci vyrozumění a varování obyvatelstva na zcela jiné úrovni než USA. Česká republika s ohledem na možnost mimořádných událostí disponuje v každém městě či vesnici systémem MIS neboli místním informačním systémem, který za pomoci rozhlasu informuje obyvatele daného území o typu nebezpečí a nutnosti případných opatření či doplňujících informací. V České republice je nutnost tohoto systému platná ze zákona pro všechna města a vesnice. Systémem MIS je tak pokryto celé území ČR a v případě potřeby je ho využito.

7 Závěr

Globálně jsou povodně považovány za jedny z největších přírodních katastrof (Livescience ©2022).

Protipovodňová ochrana, jež je ústředním tématem této bakalářské práce, je stěžejním bodem ochrany proti povodním po celém světě a není tomu jinak ani v České republice. Součástí práce je pro bližší porozumění definice jednotlivých typů povodní, ale zejména také protipovodňových systémů a ochrany proti povodním. Důraz je v práci kladen na přívalové povodně, které jsou svou intenzitou jedny z nejničivějších a mají tak výrazný dopad na životy a majetek obyvatel.

Přívalové povodně jsou často způsobovány přívalovými srážkami. Tento typ povodní se může vyskytnout na celém území České republiky i mimo hlavní vodní toky. Přívalová neboli „blesková“ povodeň je typická velmi rychlým nástupem, krátce trvající srážkou, avšak ta je o velké intenzitě. Na předvídání takového typu povodně klasické srážkoměrné a vodoměrné stanice nestačí, protože jednak v obcích položených dále od hlavních toků ztrácejí svou efektivitu a také dokáží případnou povodeň předpovědět většinou jen v řádu minut. Z toho důvodu byl vyvinut lokální varovný systém, který byl pro účely této práce poskytnut. Zmíněný systém byl formou literární rešerše srovnán s jinými lokálními varovnými systémy na našem území i mimo něj. Zjistilo se, že infiltrometr využívá metody, díky kterým je předpovězení případné přívalové povodně nejen přesnější, ale i rychlejší a s větší časovou rezervou, která zasažené oblasti dává více prostoru k reakci na případnou hrozbu.

Zatímco lokální varovné systémy založené na vodoměrných a srážkoměrných stanicích mívají dobu varování většinou jen v řádu minut a uplatní se spíše při regionálních povodních. Systém popsáný v práci se uplatní jak při regionální, tak přívalové povodni, a to hlavně díky způsobu, jakým riziko vyhodnocuje – na základě hydrometeorologické předpovědi spustí test a porovná dobu výtopy s dobou trvání navrhované srážky. Pokud je doba výtopy kratší než doba trvání srážky, je tu reálné riziko ohrožení lokality přívalovou povodní. Systém nalézá využití především v malých obcích a průmyslových objektech situovaných pod povodím s minimální rozlohou nebo v místech s krátkou kulminací průtoku, kde nemohou být rozmístěny vodoměrné a srážkoměrné stanice, popř. zde postrádají svou účinnost. Závěr je, že výhody oproti klasickým systémům, které se používají dnes (a to hlavně v případě přívalových povodní), jsou nesporné a nový typ infiltrometru se uplatní především v lokálně ohrožených oblastech.

Pro potřeby protipovodňových systémů, analýzy půdy a další aspektů, které jsou pro protipovodňovou ochranu zcela zásadní, je využívání infiltrometrů podstatným přínosem a už dnes je jisté, že se lokální varovný systém představený v práci stane součástí širší sítě varovných protipovodňových systémů. Tato síť opatření je v České republice složena z analýzy dat dle srážek a případného vyhodnocení možného vzniku povodní a následné zpracování těchto dat ze strany odborných, vyškolených zaměstnanců a v neposlední řadě vyrozumění a varování obyvatelstva za pomoci MIS, tedy místního informačního systému.

8 Seznam použitých zdrojů

MONOTEMATICKÉ PUBLIKACE

Allen, K. M., 2006: Community-based disaster preparedness and climate adaptation: local capacity-building in the Philippines. *Disasters*, 30(1), 81-101.

Ambrožová J., 2007: Aplikovaná a technická hydrobiologie. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha.

Bednář J., 2003: Meteorologie: Úvod do studia dějů v zemské atmosféře. Portál, Praha.

Brammer, H., 2010: After the Bangladesh flood action plan: Looking to the future. *Environmental Hazards*, 9(1), 118-130.

Boet, O., Arnan, X., & Retana, J., 2020: The role of environmental vs. biotic filtering in the structure of European ant communities: A matter of trait type and spatial scale. *PloS one*, 15(2), 1-18.

Black, A. R. and Burns, J. C., 2002: Re-assessing the flood risk in Scotland. *The Science of the Total Environment*, 294: 169-184

ČSN 750110, 2010: Vodní hospodářství – Terminologie hydrologie a hydrogeologie. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.

Corkindale, J., 2004: *The Land Use Planning System: Evaluating Options for Reform*. The Institute of Economic Affairs, London.

Doughty, C. A., 2016: Building climate change resilience through local cooperation: a Peruvian Andes case study. *Regional Environmental Change*, 16(8), 2187-2197.

Drbal, K., 2012: Hodnocení povodňových rizik. *Vodní hospodářství* 9: 288–294 s.

Hanišová, L., 2018: Optimalizace pracovního postupu kontinuálního infiltrometru. ČZU, FŽP, Praha. Vedoucí práce: ing. Jana Kalibová, Ph.D. (diplomová práce).

Hrádek, F. a Kuřík, K., 2001: *Maximální odtok z povodí: teorie svahového odtoku a hydrologický model DesQ-MAX Q*. Praha: Credit, [2001]. ISBN 80-213-0782-.

Hubáčiková, V., 2015: Vodní hospodářství. Mendelova univerzita, Brno.

- Jeníček, M., 2009: Modelování průběhu extrémních povodní v kontextu krajinných změn a integrované protipovodňové ochrany. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Praha. (disertační práce).
- Kalibová, J., 2018: Autorka obrázků. ČZU v Praze, FŽP, KBÚK, nepublikováno.
- Kienberger, S., 2014: Participatory mapping of flood hazard risk in Munamicua, District of Buzi, Mozambique. *Journal of Maps* 10: 269–275.
- Klute, A., 1986: Water retention: Laboratory methods. In: Klute, A., (ed.): *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. ASA and SSSA, Madison. S. 635–662 s.
- Kopáček, J., Bednář J., 2005: *Jak vzniká počasí*. Karolinum, Praha.
- Kulhavý, Z., Soukup, M., Doležal, F., Čmelík, M., 2007: Přetlakový infiltrometr pro terénní stanovení schopnosti půd. VÚMOP, Pardubice.
- Kutílek, M., 1978: *Vodohospodářská pedologie*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.
- Matula, S., Kozáková, H., 1997: A simple pressure infiltrometer for determinativ of soil hydraulic properties by in situ infiltration measurements. *Rostlinná výroba* 43: 405–413 s.
- Novotná, D., 2018: Vliv časového průběhu dešťové srážky na proces infiltrace. ČZU, FŽP, Praha, Vedoucí práce: Ing. Jana Kalibová Ph.D. (diplomová práce).
- Jeníček, M., 2009: Modelování průběhu extrémních povodní v kontextu krajinných změn a integrované protipovodňové ochrany. [Disertační práce]. Praha.
- Řezáčová D., Novák P., Kašpar M., Setvák M., 2007: *Fyzika oblaků a srážek*. Academia, Praha.
- Slovak Hydro-Meteorological Institute, 2006: Forward integration of flood warning in areas prone to flash floods. Country report: Slovak Republic. WMO/GWP Associated Programme on Flood Management.
- Toy, Terrence J., Foster, G. R. a Kenneth, R. G., 2002: *Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control*. New York: Wiley. ISBN 04-713-8369-4.
- Tlapák, V., Šálek, J., Legát, V., 1992: *Voda v zemědělské krajině*. Ministerstvo životního prostředí České republiky, Praha.

Vítek, J., Stránský, D., Kabelková, I., Bareš, V. a Vítek, R., 2015: *Hospodaření s dešťovou vodou v ČR*. Praha: 01/71 ZO ČSOP Koniklec. ISBN 978-80-260-7815-9.

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), v platném znění.

ELEKTRONICKÉ ZDROJE

Adcis, ©2020: Varovný systém lokálních povodní (online) [cit. 2022 12. 28], dostupné z <<http://www.adcis.cz/flashfloods/>>.

APFM, (2006): Social Aspects and Stakeholder Involvement in Integrated Flood Management, Geneva, Switzerland, August 2006 (online) [cit. 2022.12.01], dostupné z <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4280>.

Association of British Insurers, (2004), Turning Back the Tide: The Case for Sustaining Investment in Flood Management and Defences. Technical report, Association of British Insurers, <http://www.abi.org.uk>. Accessed on 05 May 2004

Bát'ková, K., Matula, S., Miháliková, 2013: Popis dvouválcového infiltrometru, jednoduchého tlakového a přetlakového infiltrometru, minidisk infiltrometru, kruhového infiltrometru, nasycená hydraulická vodivost (online) [cit. 2020.03.31], dostupné z <<http://hydropedologie.agrobiologie.cz/index.html>>.

Čamrová L., Jílková J., 2006: Povodňové škody a nástroje k jejich snížení. JDS, Praha.

ČHMÚ, ©2010: Způsob ochrany před povodněmi (online) [cit. 2019.12.27], dostupné z <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/pruvodce_vo_dohospodari_ffg.html>.

ČHMÚ, ©2018e: Typy přívalových povodní a jejich definice (online) [cit. 2020.01.03], dostupné z <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/verejnost_povoden_definice.html#priklad>.

ČHMÚ, ©2019: Mapa nasycenosti území ČR (online) [cit. 2019.10.18], dostupné z <http://hydro.chmi.cz/hpps/main_rain.php?mt=ffg>.

ČHMÚ, ©2023 - Aktuální informace hydrologické předpovědní služby. Hlásná a předpovědní povodňová služba (online) [cit. 07.02.2023], dostupné z: <https://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_act_rain.php>.

Meter group,inc ©2021: Minidisk infiltrometr, users manual versison 10 (online) [cit. 2020.01.04], dostupné z <https://publications.metergroup.com/Manuals/20421_Mini_Disk_Manual_Web.pdf>.

European Commision, ©2009: The climate change challenge for European regions (online) [cit. 2020.04.01], dostupné z <https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/working/regions2020/pdf/regions2020_climat.pdf>.

Fondriest Environmental, Inc. ©2023: Monitoring equipment (online) [cit.2023. 08.02.], dostupné z <<https://www.fondriest.com/environmental-measurements/monitoring-equipment/>>.

FEMA, ©2022: Federal Emergency Management Agency (online) [cit.2023.02.02], dostupné z: <<http://www.fema.gov/>>.

Fiedler Company, ©2009: Lokální varovný systém (online) [cit.2022.12.10], dostupné z <<https://www.fiedler.company/cs/produkty/lvs-lokalni-varovne-systemy>>.

Geotechnici, ©2012: Koeficient nasycené hydraulické vodivosti pro různé typy materiálu (online) [cit. 2019.02.24], dostupné z <<https://geotechnici.cz/>>.

Gyberoun, ©2012: Protipovodňová opatření (online) [cit. 2019.02.22], dostupné z <https://www.gyberoun.cz/uploads/web_files/dud/dud2013/duskovahendrychova/po.html>.

Hrkal, Z., 2010: Zpracování metodiky pro posuzování problematiky umělé infiltrace v ČR (online) [cit. 2020.03.26], dostupné z <http://www.suchovkrajine.cz/sites/default/files/vystup/du1_infiltrace_preklady.pdf>.

Husa, J., 2018: Digitální učebnice v oborové didaktice, 2014: Atmosférické srážky (online) [cit. 2019.11.24], dostupné z <https://docs.google.com/document/d/1e1Q-61qksZsOII5wPEH7cVv27u37b0429A3Si_-fI1o/edit>.

Chmi, ©2016: Typy povodní (online) [cit. 26.10.2022], dostupné z <<https://www.chmi.cz/files/portal/docs/ruzne/vyuka/HYDRO/14.pdf>>.

Chmi, ©2022: Odtokový proces (online) [cit.2023.02.02.], dostupné z <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/runoff_cz/navmenu.php_tab_1_page_1.1.0.1.htm>.

Informační systém výzkumu, vývoje a inovací, ©2021: Systém včasné predikce přívalových povodní založený na přímém měření infiltrace (online) [cit. 26.3.2023], dostupné z: <<https://www.isvavai.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&h=TH02010802>>.

Kalibová, J. Petrů, J., Štibinger, J., Luca, M., 2021: Stanovení sorptivity před nasycením půdy pomocí doby výtopy a nasycené hydraulické vodivosti. Vodní hospodářství (online) [cit. 09.02.2023], dostupné z: <<https://vodnihospodarstvi.cz/archiv-rocniku-2021/>>.

Kolejka, J., Krejčí, T., Rapant, P., Inspektor, T., 2015: Regionální a blesková povodeň jako limitující faktor rozvoje (online), [cit. 10. 12. 2022], dostupné z <<https://is.muni.cz/do/econ/soubory/katedry/kres/4884317/Sbornik2015.pdf#page=611>>.

Kocman, T., Kubát, J. & Musil, P., 2011. Lokální výstražné a varovné systémy v ochraně před povodněmi (online) [cit. 26. 11. 2022], dostupné z <www.povis.cz/mzp/131/LVVS.pdf>

Kulhavý, Z., 2019: Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2019, (online), [cit. 2.2.2023], dostupné z <<https://knihovna.vumop.cz/records/1fbfabe5-9678-4aa7-b835-07b685916c14>>

Kulhavý, Z., 2020: Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2020 (online) [cit. 10.3.2023], dostupné z <<https://knihovna.vumop.cz/records/3bf3fc19-a741-49ef-96ff-cd6589f55457?locale=cs>>

Langhammer, J., 2007: Hydrologie – Odtokový proces (online), [cit. 2018.11.26], dostupné z <https://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/hydro/pdf/Hydrologie_1_Langhammer_odtok_proces.pdf>.

Livescience, ©2022: 10 of the deadliest natural disasters in history (online) [cit.2022.02.08], <dostupné z <https://www.livescience.com/33316-top-10-deadliest-natural-disasters.html>>.

Magistrát HMP, ©2019: Pravidelná zkouška sirén: Elektronická siréna (online) [cit. 2019.09.20], dostupné z <https://bezpecnost.praha.eu/planovane-akce/aktualita-a-planovane-akce_1_7_2019-0>.

Meteo Aktuality, ©2018: Definice train efektu (online) [cit. 2019.02.28], dostupné z <<https://pocasimeteoaktuality.wordpress.com/2018/05/14/train-efekt-v-terminologii-konvekce/>>.

Místopisný průvodce po ČR, ©2020: Informace o obci Svojetice (online) [cit. 2020.01.04], dostupné z <<https://www.mistopisy.cz/pruvodce/obec/9417/svojetice/>>.

MŽP, ©2016: Možnosti predikce přívalových povodní (online) [cit. 2019.03.10], dostupné z <https://www.mzp.cz/cz/privalove_povodne>.

National Weather Service, ©2012: Ice Jams and flooding (online) [cit. 2020.01.03], dostupné z <https://www.weather.gov/media/dmx/Hydro/DMX_InfoSht_IceJamsAndFlooding.pdf>.

Nexsense, ©2016: Flood warning systems (online) [cit. 2023.01.02], dostupné z <https://www.nexsens.com/pdf/Guide_Flood_Monitoring.pdf>.

NOAA, ©2023: About agency (online) [cit. 2023.01.02], dostupné z: <<https://www.noaa.gov/>>.

Onerain, The rainfall company, ©2021: StormLink® Quick Deploy Early Warning System (online) [cit. 2019. 12. 28], dostupné z <<https://onerain.com/wp-content/uploads/2021/09/StormLink-Quick-Deploy-Early-Warning-System-Rev-1.0a.pdf>>.

Pojištění, ©2021: Pojištění a záplava, znáte rozdíl? (online) [cit. 2023. 02.02.], dostupné z <<https://www.pojisteni.cz/2021/06/povoden-a-zaplava>>.

Pozary, ©2022: Jednotný systém varování a vyrozumění v České republice je ověřován první středu v měsíci, sirény slouží především obyvatelstvu (online) [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <<https://www.pozary.cz/clanek/54244-jednotny-system-varovani-a-vyrozumeni-v-ceske-republice-je-overovan-prvni-stredu-v-mesici-sireny-slouzi-predevsim-obyvatelstvu/>>.

Psika, T., 2002: Souvislost přívalových povodní s konvekcí (online) [cit. 2019.12.12], dostupné z <<http://bourky.kvalitne.cz>>.

Ruda, A., 2014: Klimatologie a hydroopedologie pro učitele (online) [cit. 2020.03.26], dostupné z <https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/11podpovrchova-voda.html>.

ScienceDirect, ©2021: Sorptivity (online) [cit. 10.02.2023], dostupné z: <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sorptivity>>.

Shnkar, S., 2012: Reyleigh Bernard convection (online) [cit. 2019.03.04], dostupné z <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/38093-rayleigh-benard-convection>>.

State of New Jersey, ©2018: Flood waters can be extremely dangerous: Vznik přívalové povodně (online) [cit. 2019.12.28], dostupné z <https://www.nj.gov/humanservices/dmhas/home/disaster/resources/Flood_waters_extremely_dangerous.pdf>.

StromPraha, ©2022: Meteostanice Metos (online) [cit.2022.12.10], dostupné z <<https://www.strompraha.cz/meteostanice>>.

Školník, M., 2018: Varovný protipovodňový systém (online) [cit. 2019.10.12], dostupné z <<https://www.povodnovyportal.cz/varovne-systemy>>.

TAČR, ©2015: Základní opatření proti přívalovým povodním (online) [cit. 2019.03.18], dostupné z <https://www.mmr.cz/getmedia/e32acf20-7f24-40ef-a114-869f5311a14d/Methodika_Prevence-a-zmirnovani-nasledku-privalovych-povodni-ve-vztahu-k-pusobnosti-obci_3.pdf>.

Techmania, ©2017: Atmosférické srážky (online) [cit. 2023.01.30], dostupné z <<http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/meteorologie/atmosferi>>.

Učebnice horské služby, ©2020: Srážky a typy srážek (online) [cit. 2020-03-26], dostupné z <<http://ucebnice.horskasluzba.cz/cz/odborna-cast/zaklady-meteorologie/zakladni-meteorologicke-prvky-a-jevy/srazky>>.

Vaššová, D., Kovář, P., 2011: DES_RAIN (online) [cit. 2019.04.09], dostupné z <<http://r.fzp.czu.cz/vyzkum/software.html>>.

VŠCHT, ©2017: Rozdělení deště (online) [cit. 1. 4. 2020], dostupné z <<https://web.vscht.cz/~pokornd/HP/Přednášky/Přednáška%20oblaky,srážky,%20měření%20srážek.pdf>>.

Vumop, ©2020: Varovný systém lokálních povodní založený na přímém měření srážek (online) [cit. 8.12.2022], dostupné z <<https://www.vumop.cz/varovny-system-lokalnich-povodni-zalozeny-na-mereni-infiltrace-srazek>>.

9 Seznam obrázků

Obr. 1 – Vývojový cyklus bouřky	13
Obr. 2 – Odtokový proces	14
Obr. 3 – Nasycenost území ČR 18. 10. 2018	18
Obr. 4 – Schéma dvouválcového výtopového infiltrometru	19
Obr. 5 – Dvouválcový infiltrometr	19
Obr. 6 – Rozhlasová ústředna MIS – software	28
Obr. 7 – Způsob vznesení výstrahy před povodní	32
Obr. 8 – Kontrolní jednotka – tlačítka	38
Obr. 9 – Kontrolní jednotka – světla	39
Obr. 10 – Prstenec s hrotem a tryskou	40
Obr. 11 – Vstupní a výstupní hadičky na kontrolní jednotce	41
Obr. 12 – Tabulka Des Rain stanice – Mnichovice	44
Obr. 13 – Hodnoty srážkových úhrnů zadané v přístroji (použité v rámci práce)	44

10 Seznam tabulek

Tabulka 1. Příklad měření kumulativní infiltrace a zpracování dat	46
---	----