

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA HYDROMELIORACÍ A KRAJINNÉHO INŽENÝRSTVÍ



HABILTAČNÍ PRÁCE

2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ

AKREDITOVANÝ OBOR: VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ A VODNÍ STAVBY



## **POVRCHOVÝ ODTOK– dopad srážkových extrémů**

měření, modelování a data pro návrh opatření

AUTOR:           ING. PETR KAVKA, PH.D.

## Poděkování

Výčet těch, kterým bych měl poděkovat, je dlouhý. Tato práce je vyústěním mnoha okolností a nedovedu si představit, že by vznikla bez podpory rodiny v mém pracovním životě, bez kolegů i studentů, se kterými jsem měl tu čest se během dosavadní práce setkat. A pravděpodobně by nevznikla bez návyků a přijímání zodpovědnosti, kterou jsem se naučil během působení ve skautském hnutí.

V první řadě bych poděkoval nejbližším – Majdo, mamko, tatko, vám patří velký dík za podporu a prostor, který je mi díky vám na práci umožněn.

Děkuji všem členům katedry a kolegům, se kterými jsem měl možnost spolupracovat na řešení grantů. Velké díky tak patří Davidovi, Luďkovi, Martinům, Honzům, Lence, Tereze, Jirkovi, Pavle, Adamům, Petrovi, Vaškovi, Josefům, Mileně, Michalům, Kubům, Ondrovi, Tomášům, Janám a dalším, včetně mnoha studentů. A velký dík pak patří oběma vedoucím katedry, pod kterými jsem měl tu čest pracovat a kteří mě jako mladého studenta přijali. Tomáši, Karle děkuji. Práce širokého týmu není automatickou součástí a cením si toho, že tato pracovní skupina funguje, i když to není vždy jednoduché. Speciální poděkování patří těm, kteří se podíleli, podílejí a doufám že i do budoucna se budou podílet na personálně i časově náročném experimentálním výzkumu dešťovými simulátory.

Také bych chtěl poděkovat „vývojářské skupině“ za spolupráci při vývoji modelu, a to jak z naší katedry, tak z katedry Geomatiky. Mílovi, Markovi, Vojtovi z ÚFA děkuji za spolupráci na potřebných srážkových datech, Hance, Danovi z VÚMOP za spolupráci na odvození půdních map.

Bez vás všech by tato práce nevznikla, tak vám ještě jednou děkuji.

**Autorské prohlášení a poděkování za finanční podporu**

Prohlašuji, že tuto práci jsem napsal samostatně, s využitím řádně ocitovaných vlastních prací. Práce se případně odkazuje na řadu výstupů pořízených v rámci vědecko-výzkumných grantů, ve kterých jsem byl buď přímo řešitelem, nebo jsem se významnou mírou podílel na jejich řešení. Další publikace a použité zdroje jsou citovány a uvedeny v seznamu literatury.

Samotná habilitační práce byla podpořena zejména výzkumnými projekty QK1910029 - Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích (2019-2022), QJ1520265 - Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině (2015-2017), TH02030428 - Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí (2017-2020), TJ01000270 - Atlas HYDROLOGIE - moderní nástroj pro výpočet smyvu, odtoku a dimenzování prvků protierozní ochrany (2018-2019), TJ02000234 - Fyzikální a hydrologické vlastnosti půd ČR (2019-2021).

V Praze dne 17. 5. 2022

Petr Kavka

### **Abstrakt**

Tato habilitační práce shromažďuje výsledky v oblasti výzkumu povrchového odtoku a navrhování opatření na snížení jeho negativních dopadů. Práce sleduje dvě linie problematiky, které vyžadují technické řešení. Těmi jsou vodohospodářská opatření v ploše povodí a pak také opatření na svazích pozemních komunikací.

V rešeršní části se práce soustředí nejen na popis samotného procesu povrchového odtoku ve vztahu k dalším v přírodě probíhajícím procesům, ale také na další dva aspekty. Tím prvním je legislativní rámec, do kterého je problematika zasazena a který do určité míry vymezuje oblasti využití hydrologického modelování odtoku v ploše povodí. Tím druhým je pak rozbor samotných hydrologických modelů, principů řešení a možností jejich využití pro získání návrhových veličin zejména vodohospodářských staveb v krajině.

V experimentální části práce obsahuje výčet metod využívaných k získání poznatků o procesu povrchového odtoku a na něj navazující problematiku eroze. Rozsah experimentů je značný a v této práci jsou publikovány výsledky tak, aby postihovaly širší problematiku a aplikaci experimentálních metod. Hlavním využitím experimentálního měření je získání dat pro kalibraci a případnou validaci fyzikálně založeného modelu SMODERP. Práce navazuje na dlouholetý výzkum, který vyústil v prostorově distribuovaný fyzikálně založený model s aplikací do několika směrů. Součástí práce je představení historického vývoje modelu, způsoby jeho kalibrace a příklady jeho využití pro návrhy opatření v ploše povodí i pro posuzování ohroženosti odtokem a erozí liniových staveb.

Závěrečná část práce je soustředěna na zdrojová data v měřítku celé ČR. Dostatečně podrobná, a především aktuální data jsou základem širšího využívání hydrologických modelů. V práci je popsán znalostní posun v oblasti návrhových srážek a půdních dat pro aplikaci modelů v měřítku malých povodí, která jsou zároveň zpřístupněná na webovém portálu, což zvyšuje aplikační potenciál modelů. Potřeba modelů pro návrh opatření v povodí je motivována také analýzou zahrnutou v této části práce, která vymezuje a klasifikuje malá horní povodí do velikosti pět kilometrů čtverečních a která tvoří téměř 80 % území ČR, což lze považovat za motivaci do další vědecko-výzkumné práce.

### **Abstract (EN)**

This habilitation thesis presents results from a specific research area on surface runoff and a design of measures to reduce its negative impacts. The work concentrates on two different problems that require technical solutions. The first one covers spatial soil conservation and water management measures in the catchment area, the second one focuses on technical measures on slopes along linear structures.

The work also elaborates on the legislative framework, which to some extent defines the areas of application of hydrological modelling in the catchment area. The hydrological models themselves, the principles of the solutions and the possibilities of their use for design of water management structures and erosion control measures are also discussed.

The experimental part of the thesis contains a list of methods used to study the surface runoff process and the related soil erosion. Development and use of rainfall simulators is of particular interest. The scope of the experiments is in general wide and the results that are published in this thesis only indicate potential application of the rainfall simulators. The dataset of the experimental measurements is further used for the calibration and eventual validation of the physically based model SMODERP. This part of the work is based on many years of previous research that has resulted in a spatially distributed physically based model, which has been applied in several ways. The thesis includes an introduction to the historical development of the model, principles of calibration, and examples of its use for designing catchment area measures as well as for assessing runoff and erosion vulnerability of linear structures.

The final part of the thesis focuses on the source data on the scale of Czechia. Sufficiently detailed and up-to-date data are the basis for the correct use of hydrological models. The thesis describes the knowledge shift in a definition of design precipitation of specific return periods and soil data for the application of models at the small catchment scale. Data availability on a web portal increases the application potential of the models. The need of the models for the design of the mitigation measures in the catchment is motivated by the presented analysis and classification of small catchments, that fill almost 80 % of the area of the Czechia, which can be also considered as a motivation for further scientific research.

# Obsah

Úvod .....	7
<b>1 Popis problematiky a současný stav poznání.....</b>	<b>8</b>
1.1 Vodní bilance na povrchu a vznik povrchového odtoku .....	8
1.2 Typy povrchového odtoku.....	11
1.2.1 Plošný odtok .....	12
1.2.2 Odtok v rýhách .....	12
1.2.3 Odtok v drahách soustředěného odtoku.....	13
1.2.4 Související procesy spojené se vznikem povrchového odtoku .....	13
1.3 Opatření pro snížení negativních dopadů povrchového odtoku .....	19
1.3.1 Vodohospodářská opatření v krajině .....	19
1.3.2 Návrhy ochrany umělých svahů v okolí liniových staveb .....	20
1.4 Modelování povrchového odtoku .....	22
1.4.1 Základní rozdělení modelů .....	22
1.4.2 Rozdělení modelů z hlediska principů řešení .....	24
1.4.3 Komentář k aplikaci modelů v českém prostředí.....	29
<b>2 Experimentální měření povrchového odtoku v různých měřících .....</b>	<b>31</b>
2.1 Dlouhodobý monitoring .....	31
2.2 Dešťové simulátory .....	33
2.2.1 Vývoj a aplikace dešťových simulátorů na ČVUT v Praze .....	34
2.3 Využití DPZ a leteckého snímkování pro detekci výskytu soustředěného odtoku.....	38
2.4 Vybrané ukázkové výsledky experimentálního měření .....	39
2.4.1 Vliv velikosti zadešťované plochy .....	39
2.4.2 Vazba mezi povrchovým a mělkým podpovrchovým odtokem. ....	41
2.4.3 Efektivita geteoxtilních protierozních opatření pomocí stabilního dešťového simulátoru	42
<b>3 Vývoj a aplikace fyzikálně založeného modelu SMODERP.....</b>	<b>46</b>
3.1.1 Historický vývoj modelu SMODERP.....	46
3.1.2 Fyzikální báze modelu.....	49
3.2 Vstupy modelu.....	55
3.3 Výstupy modelu .....	58
3.4 Kalibrace a validace modelu.....	59
3.4.1 Validace modelu pro sklony umělých svahů .....	59
3.4.2 Porovnání chování modelu s jinými modely a citlivostní analýza na vstupy do modelu	61
3.5 Aplikace modelu SMODERP.....	66
3.5.1 SMODERP 2D – získání návrhových dat v malém povodí.....	66
3.5.2 SMODERP Line – upravený model pro hodnocení ohrožení svahů liniových staveb	70

<b>4</b>	<b>Vstupní data pro využití fyzikálních modelů v návrhové praxi a jejich zpřístupnění odborné veřejnosti .....</b>	<b>75</b>
4.1	<i>Srážková data .....</i>	76
4.1.1	<i>Průběh návrhových srážek .....</i>	77
4.1.2	<i>Zastoupení tvarů návrhových srážek na území ČR .....</i>	78
4.1.3	<i>Předchozí nasycenost na počátku návrhových srážek .....</i>	82
4.1.4	<i>Porovnání zdrojů srážkových dat .....</i>	83
4.2	<i>Půdní data .....</i>	87
4.3	<i>Odvození a klasifikace malých zdrojových povodí .....</i>	92
4.4	<i>Technologické zázemí poskytování dat .....</i>	97
<b>5</b>	<b>Další směřování výzkumu .....</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>Seznamy a zdroje .....</b>	<b>100</b>
6.1	<i>Řešené projekty a publikace autora – komentář .....</i>	100
6.2	<i>Publikace použité v této práci .....</i>	101
6.3	<i>Seznamy .....</i>	106
<b>7</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>108</b>



# Úvod

Tato práce shrnuje několik let vědecko-výzkumných aktivit, které se z různého pohledu a v různém měřítku zabývají procesem plošného odtoku v nezastavěných územích. Tento proces je projevem extrémních srážek a je jedním z hlavních složek rychlého odtoku. Souvisejícími negativními dopady jsou pak smyv půdy – eroze, ale i bleskové povodně. Právě ve spojení s erozí ovlivňuje povrchový odtok nejen krajinu, sídla ale například i výstavbu liniových staveb. Vzhledem ke změnám klimatu, které se projevují extremitou počasí, lze očekávat větší výskyt těchto jevů a je třeba vytvářet nástroje a opatření pro jejich zmírnění a pro zadržení vody v krajině.

Povrchový odtok je dynamický proces epizodního charakteru a jeho měření a sledování v přirozených podmínkách je poměrně náročné a závislé na počasí. Jednou z klíčových metod měření jsou dešťové simulace, které slouží k získávání konzistentní sady pozorování. V posledních letech jsou metody sledování projevů (zejména) koncentrovaného plošného odtoku rozšířeny o využívání bezpilotních prostředků, což umožňuje detekci negativních projevů, jako jsou erozní rýhy a změny ve struktuře půdy.

Vývoj dešťových simulátorů anebo dlouhodobá pozorování povrchového odtoku a monitoring dopadů slouží k verifikaci hydrologických modelů. A to jak pro popis procesů, které modelem simulujeme a také pro jejich využití jakožto aplikačních nástrojů pro navrhování opatření v krajině pro snížení výše uvedených negativních dopadů.

Několikaletý výzkum předcházející habilitační práci byl zaměřen na vývoj metod měření tohoto procesu, v druhé rovině pak na tvorbu aplikačních nástrojů pro jeho modelování a v neposlední řadě na dostupnost návrhových dat pro využití těchto aplikačních nástrojů. Práce navazuje také na doktorské studium, jehož náplní byl vývoj fyzikálně založeného modelu povrchového odtoku – SMODERP. Aktivity je možné rozdělit do několika směrů:

- vývoj metod měření povrchového odtoku, zejména pomocí dešťových simulátorů,
- sledování a měření povrchového odtoku na zemědělsky obdělávaných pozemcích a na svazích liniových staveb,
- pokračující vývoj modelu SMODERP a využívání měřených dat pro jeho verifikaci,
- tvorba a poskytování vstupních dat pro aplikační využití epizodních hydrologických modelů a klasifikace malých povodí.

Samotná práce je rozdělena do čtyř hlavních částí. Rešeršní část obsahuje popis vzniku a formy povrchového odtoku a také možná technická opatření pro snížení jeho dopadu. Jsou zde uvedeny hydrologické modely se zřetelem na aplikované přístupy využívané v českém prostředí. Druhá, experimentální část práce, popisuje metody výzkumu v několika měřících vývoje těchto metod. V této práci uvedené výsledky doposud nebyly publikovány v odborných časopisech. Primárním cílem experimentálního měření je získání dat pro kalibraci a validaci fyzikálního popisu procesu povrchového odtoku. V tomto případě jsou data využita pro pokračující vývoj modelu SMODERP, čemuž je věnována třetí kapitola. Zásadním posunem v případně vyvíjeného modelu SMODERP je přechod z 1D řešení do prostorového plně distribuovaného (2D) modelu v návaznosti na využívání prostorových dat a geografických informačních systémů (GIS). Druhý posun spočívá v plošné znalosti povrchových procesů a v oddělení plošného a rýhového odtoku, které se liší svou dynamikou.

I když je práce zaměřena na modelování plošného odtoku, což je lokální problematika řešená v lokálním měřítku konkrétních pozemků nebo malých povodí, tak pokud má model

sloužit širší odborné veřejnosti, limituje zvolené metody řešení a využití modelu dostupnost a kvalita vstupních dat. Tvorbě vstupních dat pro snadnou aplikaci hydrologických modelů v měřítku celé České republiky je věnována poslední část práce. Jedním z cílů bylo zpřístupnit vstupní data do modelu SMODERP pro stanovení návrhových parametrů vodohospodářských staveb v ploše povodí a na drobných vodních tocích a tím umožnit širší využití tohoto modelu.

# 1 Popis problematiky a současný stav poznání

Úvodní část práce je věnována především popisu vzniku sledovaného procesu povrchového odtoku. První část je věnována podmínkám, za kterých tento proces vzniká, a souvisejícím procesům, které vstupují do vodní bilance. Dále pak jednotlivým režimům povrchového odtoku z hlediska proudění, na což jsou navázány další procesy.

V další části jsou pak z různých pohledů rozebírány přístupy k hydrologickému modelování a k aplikacím konkrétních modelů ve vztahu k navrhování konkrétních technických opatření v krajině.

## 1.1 Vodní bilance na povrchu a vznik povrchového odtoku

Na rozdíl od proudění ve vodních tocích, které jsou dotovány i v bezdeštných obdobích podzemní vodou, povrchový odtok vzniká tam, kde se z několika příčin vyskytne voda na povrchu mimo stálé vodní toky a vodní plochy. Z hlediska dlouhodobých bilancí vody se jedná o relativně rychlý proces epizodního charakteru.

Na povrchový odtok je navázána celá řada dalších procesů, které formují zemský povrch. Zejména se jedná o uvolnění a transport půdy a dalších látek. Uvolnění, transport a následná sedimentace částic vytváří proces nazývaný vodní eroze, která je s povrchovým odtokem významně svázána.

Protože povrchový odtok vzniká krátkodobě, popis celého procesu je možné považovat za epizodní. Příčiny samotného vzniku závisí na kombinaci celé řady faktorů. Povrchový odtok je svázán nejen s dalšími procesy na půdním povrchu ale i s celou řadou procesů, které se dějí pod povrchem, zejména pak s procesy v nenasycené zóně.

Popis povrchového odtoku vychází ze dvou základních principů a) bilance vody na povrchu (vznik výtopy) a b) popis proudění vody po povrchu. Za obecnou počáteční podmínku při popisu procesu povrchového odtoku je možné považovat běžný stav, kdy na povrchu žádná povrchová voda neproudí, půda má určitou volnou infiltrační kapacitu a povrch a vegetace mají schopnost zachytit část srážky svými retenčními vlastnostmi. Množství vody, která se může zúčastnit povrchového odtoku, tak vychází z bilanční rovnice a je dána kladnou zásobou vody na povrchu. Tento vztah lze vyjádřit bilancí výšek hladiny.

$$\frac{dh}{dt} = Ref + q_{in} - (q_{out} + Inf - evp) + gw_{in}$$

[1]

kde:

dh rozdíl zásoby vody na povrchu [mm]

Ref efektivní srážka

q<sub>in</sub> přítok povrchové vody

Q<sub>out</sub> odtok

Inf infiltrace

gwin voda obsažená v půdě dosahující povrchu

evp výpar

Složka výparu bývá vzhledem k relativní rychlosti procesu povrchového odtoku zanedbávána. Povrchový odtok může nastat z několika základních příčin (Beven and Kirkby, 1979), schematicky naznačeno na Obr. 1:

- efektivní srážka je větší než infiltrační schopnost půdy, tzv. Hortonovský typ povrchového odtoku,
- půdní profil je nasycen prouděním v nenasycené zóně,
- půdní profil je nasycen vystoupaním hladiny pozemní vody,
- speciální příčiny, které mají za následek vznik povrchového odtoku.

Jednotlivé příčiny vzniku povrchového odtoku jsou popsány dále. V reálném přírodním prostředí se může také jednat o kombinaci dále uvedených příčin. Pro vznik odtoku platí podmínka vzniku výtopy a navazujícího procesu odtoku. Dále popsané příčiny vzniku povrchového odtoku závisí na lokálních podmínkách, a především na intenzitě příčinné srážky.

### **Intenzita srážky převyšuje infiltraci**

V tomto případě se jedná o tzv. hortonovský přístup, který popsal Horton již v roce 1933, převzato z Arguelles (Arguelles *et al.*, 2013), a vychází z představy, že intenzita srážky je větší než infiltrace vody do půdy. Infiltrace vody do půdy je proces, při kterém je voda díky gravitačním a kapilárním silám vsakována do půdy, viz kapitola 1.2.4.2. Dále je buď využita rostlinami pro transpiraci, nebo je vertikálně dále transportována do podloží kde se zúčastňuje podpovrchového odtoku.

Z hlediska tohoto přístupu platí:

$$R_{ef} > I_{nf} \Rightarrow \frac{dh}{dt} > 0$$

[2]

kde:

Ref efektivní srážka [mm/dT]

Inf infiltrace [mm/dT]

Vznik tzv. hortonovského odtoku je tak podmíněn vazbou mezi aktuální infiltrační schopností půdy a intenzitou srážky. V českém prostředí se jedná k v drtivé většině o konvektivní (bouřkové) srážky.

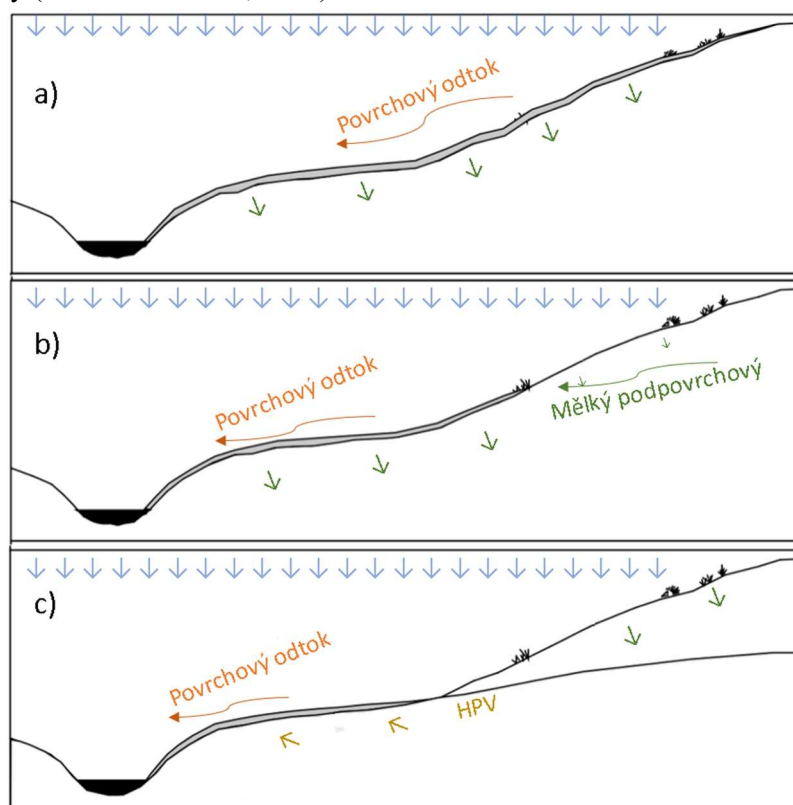
### **Mechanismus nasycení profilu**

Proces infiltrace je závislý na gravitaci a na přirozeném pohybu vody, která teče vždy ve směru nejmenšího odporu – směrem největšího rozdílu potenciálu. V půdním profilu tak není pohyb vody pouze vertikální, ale voda se pohybuje i v tzv. nenasycené zóně v preferenčních drahách půdních makropórů. Tento vertikální pohyb může ve směru po svahu způsobit snížení infiltrační kapacity půdního profilu a i při nižší srážkové intenzitě dojde ke kladné vodní bilanci na povrchu, nebo dojde k lokálnímu nasycení půdního profilu (Betson, 1964).

V Českém prostředí tento proces nastává především při déletrvajících frontálních srážkách a také v jarních měsících při tání sněhu.

### Vznik povrchového odtoku nastoupaním hladiny podzemní vody

Třetí příčinou vzniku povrchového odtoku je plné nasycení půdního profilu podzemní vodou. Hladina podzemní vody (HPV) není konstantní. Kolísá v závislosti na chodu srážek. Podzemní voda tak může dosáhnout půdního povrchu a ovlivnit procesy na povrchu. K této situaci může docházet při déletrvajících stratiformních srážkách v místech zvýšené hladiny podzemní vody (Dunne and Black, 1970).



Obr. 1: Schematizace příčiny vzniku odtoku a) hortonovský přístup, b) nasycení profilu, c) nastoupaní HPV ((Beven, 2010)

### Další příčiny vzniku povrchového odtoku

#### Voda přitékající z okolí

K povrchovým procesům může také docházet v místech, kde nedojde ani k jednomu z předchozích případů. Příkladem může být přítok povrchové vody z okolí. Tyto situace mohou vznikat v zemědělské krajině tam, kde dochází k přechodu mezi dvěma typy využití území a různým vlastnostem půdy. Může se jednat o protierozní opatření pomocí přerušujících pásů nebo o zatravnovací pásy podél vodních toků, které mají za cíl zachytit sediment před jeho vstupem do vodních toků.

#### Kompakce a krustace půdního povrchu

Kompakce půdního povrchu se vyskytuje hlavně na zemědělských anebo přetvořených půdách. Může být způsobena agrotechnikou (pojezdy kol atp.), ale i kinetickou energií deště. Krustace je způsobena deštěm, kdy na holou půdu dopadají dešťové kapky a ty utužují půdní povrch. To se týká především zemědělsky využívaných pozemků, které jsou v určité fázi roku bez vegetace anebo jsou na těchto pozemcích vysázeny tzv. širokořádkové plodiny, u kterých je v rané fenofázi půda téměř holá. Kompakce i krustace má za následek snížení hydraulické

vodivosti velmi tenké povrchové vrstvy půdy a snížení infiltrace. I méně intenzivní srážky díky této velmi tenké vrstvě, ve které je výrazně snížena infiltrační vlastnost půdy, mohou způsobit hortonovský typ vzniku povrchového odtoku (Cerdan *et al.*, 2002). Může se jednat i o lokální výskyt tohoto jevu například v kolejových rádcích pojezdů zemědělské techniky.

### Snížení infiltrace mrazem

Zmrzlá voda v půdních pórech snižuje anebo zcela eliminuje infiltrační schopnosti půdy. A i méně intenzivní srážky nebo tající sníh tak mohou vyvolat vznik povrchového odtoku (Dunne and Black, 1971; Stähli, Jansson and Lundin, 1999). Ve zcela zmrzlé půdě se pak jedná spíše o hortonovský princip vzniku povrchového odtoku. V případě, že je pod bodem mrazu pouze spodnější část půdního povrchu, což je typickou situací při oblevách, může dojít k nasycení půdního profilu a příčina vzniku povrchového odtoku je nasycením půdního profilu. Extrémní situací je akcelerace tání sněhu vlivem deště. Dešť díky své teplotě rozpouští část sněhu a je tím navyšováno množství vody na povrchu.

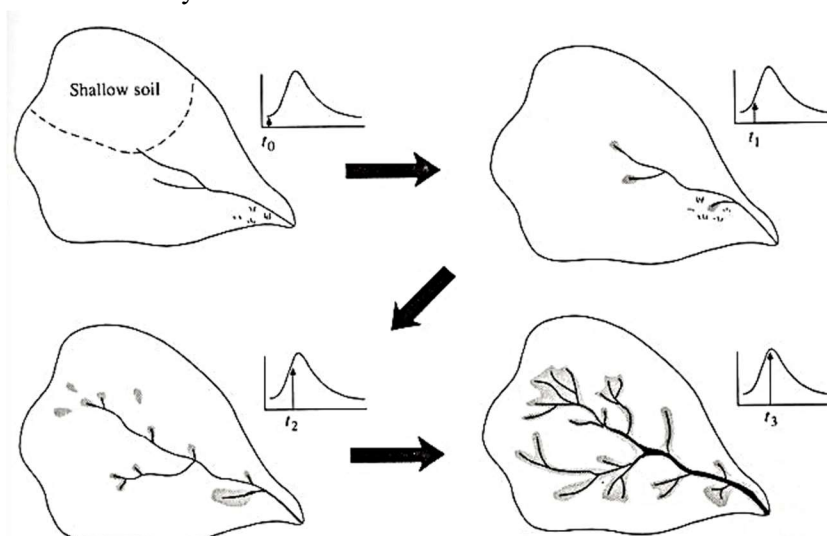
## 1.2 Typy povrchového odtoku

Při splnění bilančních podmínek (rovnice [1]) může nastat samotný proces proudění vody po půdním povrchu. Jednotlivé typy povrchového odtoku jsou svázány s různými typy eroze, kterým je věnována kapitola 1.2.4.4.

Existují tři základní formy odtoku, které se v určitých parametrech liší od proudění ve vodních tocích. Povrchový odtok lze rozdělit na tři základní formy a to:

- plošný odtok – vzniká po překonání bilance vody na povrchu prakticky na celé ploše a je spojen se selektivní erozí (Žížala, Kapička and Novotný, 2016),
- odtok v rýhách – vyskytuje se za specifických rychlostních podmínek a sklonech také na celé ploše a je spojen s rýhovou erozí (Cerdan *et al.*, 2006),
- odtok v drahách soustředného odtoku – morfologicky podmíněný povrchový odtok, který se vyskytuje v místech přirozené koncentrace odtoku (Bocco, 1991).

Vznik jednotlivých typů odtoku a hydrologická odezva je dána kombinací mnoha faktorů. Z hlediska odtoku z povodí se ihned nezapojuje celá plocha povodí, ale postupně jeho části podle možných příčin a v různé formě. Koncept zapojení jednotlivých částí povodí do formování odtoku je zobrazen na následujícím obrázku, kdy dochází k postupnému zapojování částí povodí a procesů do odtokové odezvy.



Obr. 2: Koncept zapojení jednotlivých částí svahu a typu odtoku z hlediska hydrologické odezvy (Chow et al., 1988)

### 1.2.1 Plošný odtok

Iniciální fází povrchového odtoku je právě plošný odtok. Pro vznik plošného odtoku musí být splněny podmínky popsané v kapitole 1.1. Samotný popis proudění vychází z předpokladu, že voda proudí po půdním povrchu v rovnoměrné tenké vrstvě. Průtočný profil je tak možné definovat pouze jeho výškou na jednotku šířky.

V případě plošného odtoku lze k popisu proudění využít zjednodušení v podobě kinematické vlny (Singh, 1994, 2002) Z hlediska geometrie průtočného profilu šířka profilu výrazně převažuje nad jeho výškou. Hydraulický poloměr je možné nahradit výškou hladiny pro uvažovaný profil jednotkové šířky. Omočený obvod je v tomto případě šířkou profilu.

V případě kinematické vlny vycházející z Chézyho rovnice s Manningovým součinitelem, pak platí:

$$q' = v \cdot A = C \cdot \sqrt{R \cdot i^0} \cdot A \cong h \cdot C \cdot \sqrt{h} \cdot \sqrt{i^0} \cdot h = \frac{1}{n} \cdot h^{3/2} \cdot i^{0^{1/2}} \quad [3]$$

kde:

$q'$	jednotkový průtok [m <sup>3</sup> /s/m']
$i^0$	sklon [m/m]
$h$	výška hladiny
$n$	drsnostní součinitel

### 1.2.2 Odtok v rýhách

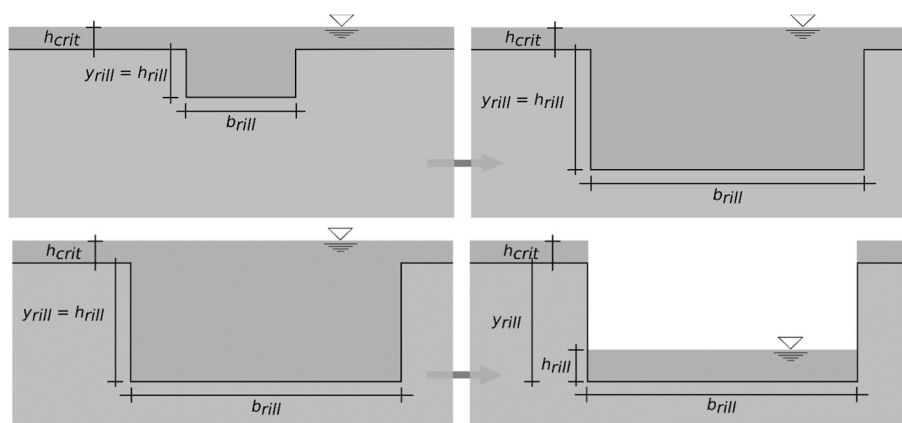
Ve vazbě na unášecí sílu způsobenou proudící vodnou může začít vznikat povrchové preferenční proudění, kde se díky mikrotopografii koncentruje větší množství vody. V případě, že dojde k překročení kritické rychlosti anebo kritického tečného napětí, dojde ke vzniku soustředěného odtoku, což má za následek vznik erozních rýh. Nejedná se o erozi selektivní, ale rýhovou, která vzniká společně se soustředěním odtoku v rýhách. Rýhový proces vzniká při překročení limitních hodnot proudění vycházejících jak z tečných sil, tak z unášecích rychlostí. Kritickou výšku plošného odtoku pro vznik rýh je možné určit pro tečné napětí podle vztahu:

$$\tau = h \cdot \rho \cdot g \cdot i_0 \Rightarrow h_{crit} = \frac{\tau_{crit}}{\rho \cdot g \cdot i_0} \quad [4]$$

a pro rychlost proudění pak z původního vztahu pro rychlost podle Manninga (Manning, 1891) pro plošný odtok ve tvaru:

$$v = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{R \cdot i^0} \Rightarrow h_{crit} = \frac{\sqrt{v_{crit} \cdot n}}{i_0}, \text{ při } h \approx R \quad [5]$$

Proces vzniku rýh pak lze popsat tak, že hladina plošného odtoku nestoupá nad kritickou mez, ale objem vody nad touto kritickou hodnotou odpovídá objemu erozní rýhy. Při zvyšování objemu vody nad kritickou mez pak dochází k postupnému zvětšování rýh. V případě poklesu hladiny pod maximální dosaženou úroveň se již rýha dále nezvětšuje a dochází k poklesu hladiny v rýze. Pro obdélníkovou schematizaci vzniku rýhy je proces zvětšování naznačen na následujícím obrázku.



Obr. 3: Schematizace vzniku odtoku v rýhách (Návod programu SMODERP, 2022)

Hodnoty kritických neboli limitních rychlostí a tečných napětí, jsou odvozeny pro různé půdy a povrchy. V reálných situacích tak rýhový odtok může na jedné části pozemku vzniknout a níže po svahu zaniknout. Kritická výška – rovnice [4] a [5], se mění jak při změně sklonu, tak při změně rychlosti, respektive drsnosti povrchu. Dopady jsou také patrné u tzv. sedimentačních kuželů. Ukázka sedimentačního kuželu je na Obr. 11 na straně 38. Snížení rychlosti proudění se využívá také u přerušujících pásů.

### 1.2.3 Odtok v drahách soustředěného odtoku

Morfologicky podmíněné části svahu, kde dochází k přirozené koncentraci povrchového odtoku, jsou v čase prakticky neměnné. Jedná se tzv. dráhy soustředěného odtoku, typickým příkladem jsou údolnice. Na rozdíl od rýh, které jsou dočasně charakteru, proudění v drahách soustředěného odtoku svým charakterem spíše připomíná proudění v korytě. Z hlediska popisu proudění se jedná o dočasný tok s nulovým základním průtokem. Souvisejícím erozním procesem je výmolová, respektive stržová eroze.

Na rozdíl od plošného odtoku a odtoku v rýhách, jsou polohy drah soustředěného odtoku redukovatelné například z digitálních modelů reliéfu. Je tak možné zajistit stabilizaci těchto drah z hlediska další propagace. V extrémních případech se pak jedná o stabilizaci strží a bystřin. Novou publikací na tomto poli je Technická doporučení pro hrazení bystřin a strží (Vokurka and Zlatuška, 2020).

### 1.2.4 Související procesy spojené se vznikem povrchového odtoku

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, povrchový odtok, především jeho vznik, je spojen s celou řadou dalších v přírodě probíhajících přirozených procesů. Tyto jednotlivé procesy jsou klíčové pro popis povrchového odtoku.

#### 1.2.4.1 Efektivní srážka

Srážka je hlavní příčinou vzniku povrchového odtoku. Před tím, než voda dopadne na půdní povrch, je část srážky zachycena vegetací a nezúčastňuje se dalších popisovaných procesů. Za efektivní srážku lze považovat tu její část, které dopadne na půdní povrch. Poměr zachycení a celkové množství vody závisí na aktuálním stavu konkrétní vegetace. Poměr zachycení se nejčastěji vyjadřuje pomocí poměrné indexu listové plochy (LAI – Leaf Area Index) (Bréda, 2003), který lze definovat plochy listů nad určitou jednotkou povrchu půdy. LAI se využívá k

určování biologických a fyzikálních procesů spojených s vegetací, jako je například transpirace nebo evapotranspirace. Z hlediska tvorby odtoku a bilance srážkové vody se jedná o množství zachycené srážkové vody. Hodnoty LAI tak mohou nabývat hodnot od nuly (pro případ holé půdy) až po hodnoty převyšující jedna (pro porosty s celkovou větší plochou listů, než je půdorysná plocha).

$$\text{LAI} = \text{listová plocha} / \text{půdorysná plocha}$$

[6]

Každý typ vegetace má schopnost zachytit jen určité množství celkové srážky. Tato charakteristika se nazývá potenciální intercepce. V případě, že je hodnota této potenciální intercepce překonána, a vegetace již nemá kapacitu zachytit další srážku, tak z hlediska množství dopadající srážky na půdní povrch již vegetace nemá vliv. Transpirační vlastnost rostlin, která také vstupuje do vodní bilance, je možné, vzhledem k epizodnímu charakteru povrchového odtoku, zanedbat.

#### 1.2.4.2 Infiltrace

Infiltrace je zásadním procesem na rozhraní atmosféry a pedosféry. V této práci omezme definici infiltrace jako průtok vody skrz půdní povrch. Dochází při ní k zasakování vody z povrchu do půdy. Ta se na povrch dostává jako déšť, tající sníh nebo tekoucí voda. Tento proces je rozhraním mezi povrchem a půdou a zásadně ovlivňuje navazující povrchové procesy (odtok, eroze), ale i podpovrchové procesy (sycení půdního profilu, proudění vody v nenasycené zóně, změny hladiny podzemní vody). Z hlediska povrchových procesů je infiltrace po srážce zásadní složkou bilance vody na půdním povrchu. Infiltrační proces a pohyb vody v půdním prostředí je předmětem samostatného výzkumu. Pro srozumitelnost textu této práce jsou v této kapitole popsány pojmy a podmínky důležité pro pochopení infiltračního procesu ve vazbě na procesy na povrchu. Samotný průtok povrchem do půdního prostředí nazývejme rychlostí infiltrace a celkové množství vody nazývejme kumulativní infiltrace. Rychlost infiltrace není konstantní a její průběh je ovlivněn celou řadou vlivů na samotném půdním povrchu, ale i změnami v půdním profilu.

##### **Popis infiltrace**

I když se jedná o relativně zřejmý a viditelný proces jeho matematický popis až tak jednoznačný není. Infiltrace je v podstatě popis proudění v porézním prostředí, které je navíc ovlivněno jeho značnou proměnlivostí (objemová hmotnost, preferenční makropóry, složení edafonu), ale i samotného povrchu (krustace, utužení anebo naopak rozvolnění povrchu způsobená agrotechnikou nebo mrazem). V případě půdy se navíc jedná o unikátní prostředí, které obsahuje všechna tři skupenství, která se vzájemně ovlivňují. Jedná se tak o jeden z nejkompexnějších toků vody v přírodě, který je ovlivněn gravitačními, tlakovými a retenčními silami. Infiltrací a pohybem vody v půdním prostředí se zabývá celá řada autorů z českých například prof. Císlarová, prof. Vogel a jejich pracovní týmy (Císlarová, Šimůnek and Vogel, 1988; Vogel, Van Genuchten and Císlarova, 2000).

Z hlediska popisu procesu jsou uvažovány dva základní typy infiltrace stacionární a nestacionární. U stacionární infiltrace, která se v přírodním prostředí nevyskytuje je rychlost infiltrace konstantní a existují pro ni analytická řešení. U nestacionární infiltrace existují dva případy okrajových podmínek:



- Neumanova okrajová podmínka, kdy je povrch skrápěn vodou, ale nedochází k výtopě,
- Dirichletova okrajová podmínka, u které se předpokládá výtopa a existuje tak tlaková výška vody na povrchu.

Tyto dvě podmínky odpovídají reálným stavům zvlhčování půdního povrchu před a po dosažení výtopy. Stejně jako v jiném prostředí i pro vodu v půdě nebo na jejím povrchu platí, že se voda pohybuje z míst s větším potenciálem do míst s potenciálem menším, což pro proudění v nasyceném porézním prostředí popisuje Darcyho zákon

$$q = -K \frac{\partial H}{\partial z} \quad [7]$$

kde:

$q$	objemový tok skrze jednotkovou plochu za jednotkový čas [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$H$	tlaková výška + gravitační složka [ $m$ ]
$z$	geodetická výška [ $m$ ]
$K$	nasycená hydraulická vodivost [ $m \cdot s^{-1}$ ]

Pro popis proudění vody v nenasyčeném porézním prostředí byla v roce 1931 odvozena tzv. Richardsova rovnice. Jejím základem je právě Darcyho zákon a rovnice kontinuity. V případě jednorozměrného proudění, za které je možné infiltraci považovat, má Richardsova rovnice tvar:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} + K_p \right) \quad [8]$$

kde:

$\theta$	objemová vlhkost [ $m^3/m^3$ ]
$t$	čas ( $s$ )
$K_p$	hydraulická vodivost [ $m \cdot s^{-1}$ ]

První člen popisuje proudění způsobené gravitací, druhý pak vysvětluje vliv gradientu tlaku. Gravitační člen je v čase v konstantní. Druhý člen rovnice je v čase proměnný. V případě suchého povrchu, tedy v počátcích srážky je tak dominantní tlakový gradient. Z tohoto důvodu je počáteční infiltrace v běžných podmínkách větší než přirozené deště a k povrchovému odtoku za běžných situací nebo nižších srážkových intenzitách nedochází. Naopak v případě částečně nasyceného povrchu již může převládat gravitační člen této rovnice, při plném nasycení pak zůstává pouze gravitační člen.

Počáteční fázi infiltrace je tak zásadně ovlivněna stave povrchu z hlediska nasycení a je zásadní pro další průběh popisu infiltrace. Určení této tzv. počáteční podmínky je z hlediska modelování procesů infiltrace a následně i povrchového odtoku zásadní. Z hlediska aplikace do praktického využití hydrologických modelů se pak jedná o určení počátečních stavů modelovaných teoretických návrhových srážek (detailněji je tato problematika rozebrána v kapitole 4.1).

Výše uvedená Richardsova rovnice je sice základem modelování infiltrace, ale pro samotné řešení této rovnice neexistují blízká analytická řešení a numerická řešení jsou náročná výpočetně. Navíc pro aplikační využití této rovnice jsou potřeba detailní data což snižuje využití této metody. Existují tak zjednodušená analytická řešení, ustálilo se využití dvou hlavních Philipova rovnice (Philip, 1957) a Green-Amptova (Maidment, 1993), které jsou využívány také v aplikační praxi.

### Philipova rovnice

Philipova rovnice je jedním z velmi známých řešení. Princip odvození rovnice vychází z podmínek nekonečné hloubky půdního profilu s jednotnou počáteční vlhkostí ve tvaru

$$Inf(t) = \frac{1}{2}S_p t^{-1/2} + K_p: \quad [9]$$

kde:

$S_p$  půdní sorptivita [ $m \cdot s^{-1/2}$ ]

$t$  čas [s]

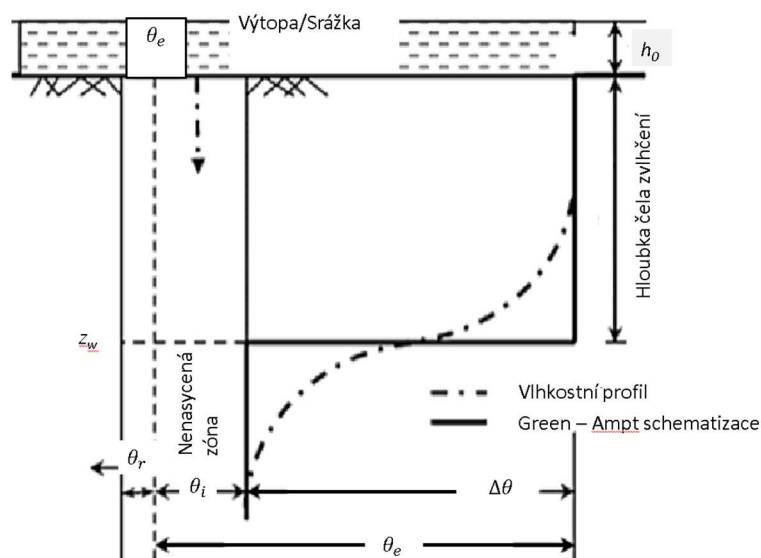
$K_p$  hydraulická vodivost [ $m \cdot s^{-1}$ ]

První člen rovnice ([9]) je výsledkem analytického řešení Richardsovy rovnice. Parametrem tohoto členu rovnice je půdní sorptivita, která je jen přibližně definovanou veličinou. Lze ji interpretovat jako rychlost, kterou bude voda čerpána do nenasycené půdy za absence gravitačních sil. Druhý člen je hydraulická vodivost, která se pro aplikační účely uvažuje jako nasycená hydraulická vodivost. Ze samotného odvození rovnice je zřejmé, že sice postihuje počáteční stav nasycení půdního profilu, ale infiltrace v čase klesá bez ohledu na bilanci množství vody, která do procesu vstupuje. Omezením této metody je při proměnlivých srážkách s nízkou počáteční intenzitou deště, kdy metoda nepředpokládá postupné sycení povrchu a pomalejší nárůst infiltrace. Dále tato metoda nepostihuje obnovení infiltrační kapacity v případě poklesu intenzity deště, což je jejím omezením především při déle trvajících srážkách.

### Green-Amptova rovnice infiltrace

Druhou často využívanou metodou analytického řešení rovnice [8] je Green-Amptův model (G-A) (Green and Ampt, 1911; Esteves *et al.*, 2000). Základem modelu je Darcyho zákon a rovnice kontinuity ve formě konečných diferencí. Jedná se o aproximační řešení Richardsovy rovnice za předpokladu Dirichletovy podmínky, tedy ve stavu výtopy. V reálných situacích nejprve dochází k postupnému zvlhčování půdního povrchu a až následně k výtopě. Mein and Larson (Mein and Larson, 1973) upravili podvodní G-A rovnici pro nenasycený povrch.

Základním předpokladem metody je rozdělení prostředí na nasycenou a nenasycenou část. Model předpokládá v počátečních podmínkách homogenní půdní profil se stejnou počáteční vlhkostí a stejnou rychlostí infiltrace. Z této představy pak vychází zjednodušení vlhkostního profilu na krabicový. V této představě tak voda infiltruje rovnoměrně jako písek. Řešení tak předpokládá výskyt dvou zón plně nasycenou a s nasycením odpovídajícímu původnímu nasycení před srážkou. Rozhraní mezi nasycenou a nenasycenou zónou se nazývá čelo zvlhčení. Do rovnice tak vstupují parametry nasycené hydraulické vodivosti, gradient tlaku na čele zvlhčení, počáteční nasycenost půdy. Gradient tlaku na čele zvlhčení je spíše abstraktní pojem.



Obr. 4: Schematizace profilu podle Metody Greena a Ampta s potenčním vlhkostním profilem (Kale and Sahoo, 2011)

Pokud známe úhrn srážek v čase  $t$ , hodnotu počátečního nasycení a maximálního možného nasycení – nasycenou objemovou vlhkost, je možné určit polohu čela zvlhčení pro daný časový krok. Hodnota maximálního možného nasycení – nasycená objemová vlhkost vychází z pórovitosti půdy. Počáteční nasycení určuje aktuální stav půdy.

Základní rovnice Greena a Ampta, vychází z Darcyho rovnice a rychlost infiltrace je popsána rovnicí:

$$f = K_e \left( 1 + \frac{\psi \Delta \theta}{F_t} \right) \quad [10]$$

kde:

- $f$  infiltrační rychlost [ $\text{mm h}^{-1}$ ],
- $K_e$  efektivní hydraulická vodivost [ $\text{mm h}^{-1}$ ],
- $\psi$  matriční potenciál na čele zvlhčení [ $\text{mm}$ ],
- $\Delta \theta$  rozdíl mezi nasycenou a počáteční objemovou vlhkostí [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ],
- $F_t$  celkové množství infiltrace [ $\text{m}^3$ ]

Infiltrační rychlost v podstatě odpovídá intenzitě srážek, tudíž pokud známe tuto intenzitu, můžeme vypočítat polohu čela zvlhčení, a to podle rovnice:

$$F_s = \frac{\Delta \theta}{P/K_s} \quad [11]$$

kde:

- $P$  intenzita srážek [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $K_s$  nasycená hydraulická vodivost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $\Delta \theta$  rozdíl mezi nasycenou a počáteční objemovou vlhkostí [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ]

### 1.2.4.3 Retence na povrchu

Obecně je za retenci považované jakékoli zadržení vody. Z hlediska vodní bilance na půdním povrchu lépe vystihuje pojem retence anglický výraz „depression storage“. Jedná se o zachycenou vodu na nerovném zvlněném povrchu – mikrodepresích. Na hladkém povrchu by voda odtékala rovnoměrně, na zvlněném se může část vody zadržet. Z hlediska bilance se tak jedná o část srážky, která neinfiltuje, ale zároveň se nezúčastňuje dalších povrchových procesů. Aby došlo k povrchovému odtoku, tak kromě bilance efektivní srážka – infiltrace, je nutné překonat tuto retenci nerovného povrchu.

Povrchová retence se uvádí v mm jako průměrné číslo pro daný povrch a je značně variabilní. U relativně hladkých povrchů, včetně například hladkého půdního povrchu, se pohybuje v řádech mm až po hodnoty přesahující 10 cm například u lesních půd anebo, v případě zemědělství, například hluboké orby. Hodnoty povrchové retence jsou udávány tabelárně, a nebo ve vztahu k povrchové drsnosti. Například Onstad (Onstad, 1984) uvádí vztah:

$$DS = 0.112 \cdot RR + 0.031 \cdot RR^2 - 0.012 \cdot RR \cdot S \quad [12]$$

kde:

DS maximální retence [cm]

RR drsnost index [-]

S sklon [%]

Z hlediska dlouhodobé bilance se voda v těchto mikrodepresích buď infiltuje do půdy anebo se vypaří.

### 1.2.4.4 Povrchová drsnost

Drsnost povrchu má zásadní vliv na dynamiku odtokového procesu. Povrchové proudění je možné v drtivé většině případů považovat za říční proudění. Už samotný fakt, že povrchový odtok je dynamický a krátkodobý proces jen podtrhuje skutečnost, že se jedná o neustálené proudění. Navíc je třeba z hlediska vazby na další procesy rozlišovat, zdali se jedná o laminární či turbulentní proudění pomocí Reynoldsova čísla.

$$Re = \frac{v_s d}{\nu} \quad [13]$$

kde:

d hydraulický průměr

$v_s$  střední hodnota rychlosti proudění kapaliny

$\nu$  kinematická viskozita.

Laminární proudění nastává při hodnotách Re menších než cca 500 a turbulentní proudění při hodnotách větších než 3450 v otevřených korytech. Mezi těmito hodnotami je tzv. přechodná oblast.

Hydraulický popis plošného odtoku je na rozdíl od proudění v korytech ovlivněn nízkou hladinou. Při uvažovaném plošném odtoku drsnost povrchu způsobuje, že jsou v průřezovém profilu různé hloubky a voda neproudí celým profilem rovnoměrně. Kombinace měnícího se povrchu vlivem deště a drsnosti vegetace problematiku popisu proudění ještě zesložituje.

V detailním měřítku se vlivem drsnosti na povrchový odtok zabýval například Lawrence (Lawrence, 2000).

Vzhledem ke komplexnosti pozorovaných procesů jsou voleny spíše empirické přístupy k hodnocení plošného odtoku na základě pozorování a hodnocení dopadů.

Drsnost vstupuje do zjednodušených vztahů proudění jako je například všeobecně rozšířený Manningův součinitel drsnosti používaný v Chézyho rovnici (viz rovnice [3] až [5]). Jeho hodnota je pro širokou paletu materiálů, včetně půdních povrchů a různých typů vegetace, empiricky určena.

## 1.3 Opatření pro snížení negativních dopadů povrchového odtoku

Povrchový odtok negativně ovlivňuje zejména prostředí volné zemědělské krajiny. Opatření v ploše povodí, které mají za cíl redukovat negativní dopady extrémních srážek, patří mezi vodohospodářská opatření. Slouží pro zvýšení retence, přerušování drah soustředěného odtoku a bezpečné převedení povodňových průtoků.

Dále je problematika negativních projevů plošného odtoku spojována se zemními tělesy v okolí liniových staveb, zde se jedná většinou o opatření v celých plochách těchto umělých svahů pomocí stabilizačních materiálů.

### 1.3.1 Vodohospodářská opatření v krajině

Dnes prováděné technické zásahy do krajiny mají splnit celou řadu funkcí a kritérií. Nejčastěji jsou navrhovány zásahy vedoucí k ochraně pozemků před nepříznivými vlivy povrchových vod. Vodohospodářská opatření jsou součástí plánu společných zařízení v rámci pozemkových úprav, projektů vedoucích k ochraně povodí, zadržování vody v krajině, zlepšení odtokových poměrů, nebo jsou součástí návrhů přírodě blízkých protipovodňových opatření. Konkrétně se jedná o prvky, které mají protierozní funkci, nebo prvky sloužící k bezpečnému zadržení vody v ploše povodí či odvedení extrémních odtoků z řešené lokality. V rámci plánu společných zařízení jsou tato opatření navrhována také v souvislosti se silniční a cestní sítí a dále je možné tyto prvky spojit s vymezením koridorů v rámci Územního systému ekologické stability (ÚSES). Prvky ÚSES jsou primárně určeny pro migraci živočichů, ale při vhodné orientaci a dimenzích je možné vytvářet koridory a plochy, které budou mít zároveň i funkci vodohospodářskou.

Konkrétní typy opatření jsou popsány v předcházejících publikacích (Janeček, 2012; Kadlec *et al.*, 2014).. Jednotlivé typy opatření jsou podle své funkce projektovány na jeden či více návrhových parametrů. Zde je uveden pouze výčet opatření v tabelární podobě s určením klíčového návrhového parametru (viz Tab. 1). Pro dimenzování protierozních i drobných vodohospodářských staveb je nutná znalost celkového objemu odtoku v případě retenčních a akumulacních prvků (např. retenčních příkopů), kulminačního průtoku v případě odváděcích prvků (odváděcí příkopy, propustky apod.), znalost celého průběhu hydrogramu je pak nutná při návrhu retardačních opatření (např. suchá nádrž).

Tab. 1: Přehled technických opatření v krajině a uvažovaný parametr pro návrh

Opatření	Návrhový objem	Návrhový průtok	Návrhová vlna
zasakovací příkop	X		
zasakovací průleh	X		
odváděcí průleh		X	
odváděcí příkop		X	
ochranné hrázky	X		
ochranné nádrže	X		
cesty s protierozní funkcí	X	X	
objekty na hydrografické síti (propustek, mostek atp.)		X	
suchá nádrž			X

Stavby na ochranu proti přívalovým povodním mají charakter technických protierozních opatření, která zachycují povrchově odtékající vody a převádí co největší část povrchového odtoku na vsak do půdního profilu se současným snížením rychlosti odtékající vody. Vzhledem k charakteru řešené problematiky je výčet opatření zúžen na ta opatření, jejichž dimenzování je přímo ovlivněno hodnotou návrhové srážky a jejího průběhu. Výčet prvků také neobsahuje úpravy samotného vodního toku (revitalizační úpravy, stupně ve dně, prvky zajišťující stabilitu dna atp.).

### 1.3.2 Návrhy ochrany umělých svahů v okolí liniových staveb

Povrchový odtok a s ním spojená problematika eroze se netýká jen volné krajiny a zemědělské půdy, ale týká se také liniových staveb. Srážky a jimi vyvolaný povrchový odtok ohrožuje zemní tělesa z hlediska jejich smykové stability a také způsobují vodní erozi. Stavby nových především rychlostních silnic a železničních koridorů v morfologicky členitém terénu a rozšiřování stávajících úseků kladou často velké nároky na terénní úpravy. Jedním z následků realizací těchto staveb je právě větší množství hlubokých zářezů a vysokých násypů, které jsou potenciálním kritickým místem nejen z hlediska stability, ale i z hlediska ohrožení okolí stavby odnosem půdy – erozí. Na rozdíl od zemědělské půdy, kde jsou náchylná především místa s koncentrovaným odtokem, u liniových staveb je zásadním problémem velký sklon svahu. Důsledkem je ohroženost v celé délce těchto prvků. Ve velkých sklonech je i na relativně krátkých svazích překročena limitní rychlost a nebo nevymílací tečné napětí povrchové vody (Castillo, Martinez-Mena and Albaladejo, 1997) a odtok je velmi rychle soustředěn do rýh. Vzniká tak kromě plošného i tzv. rýhový odtok. Kritický stav je především během realizace a těsně po dokončení stavby, až do doby, než je plně zapojena vegetace (Miller, Fischenich and Thornton, 2012). Čas potřebný k zapojení vegetace je závislý na lokálních klimatických podmínkách, ale i na termínu dokončení stavby v rámci roku. Pro zmírnění účinků vodní eroze jsou na strmé svahy instalována technická opatření s využitím geotextilií – Rolled Erosion Control Product (RECP) (Carroll, Rodencal and Collin, 1992). Aplikace těchto materiálů navíc podporuje celkovou stabilitu svahu. Výrobků různých výrobců je poměrně široká škála. Rozdělení RECP je uvedeno dále.

Určení erozního ohrožení těchto svahů vychází z fyzikálního přístupu překročení přípustných (limitních) hodnot tečného napětí a maximální rychlosti uváděná například v ASTM 6460 (ASTM, 2019). Tato metoda je v českém prostředí popsána v metodice „Ochrana umělých svahů před erozí a stabilizace povrchové vrstvy“ (Kavka, P.; Vaníček, M.; Dufka, 2021). Opatření jsou volena většinou jako plošná jak z umělých, tak přírodních materiálů.

### **Přehled způsobů technické protierozní ochrany svahů dopravních staveb**

„Svahy pozemních komunikací jsou uměle budované konstrukce, které plní řadu funkcí. Nejčastěji jsou budovány jako zemní tělesa. Jak z estetického, tak funkčního pohledu je cílovým stavem ozeleněný svah se zapojeným kořenovým systémem. Cílová vegetace tak zajišťuje finální, stabilní a dlouhodobou ochranu svahů před účinky přívalových dešťů. V případě ohumusování svahu s následným osetím, je finálním stavem plně zapojený travní drn, který zároveň podporuje stabilitu celého svahu. Podle charakteru humózní vrstvy, roční doby realizace díla a zvoleného osetí je třeba zajistit také dočasnou ochranu povrchu do plného zapojení ozelenění. Typy ozelenění a vhodnost příslušných směsí travin je popsána ve stávající TP 53, případně u konkrétních výrobců travních směsí.

Během výstavby a po jejím dokončení až do vzrůstu vegetace, je třeba zajistit dočasnou, případně i trvalou ochranu. Mezi technické požadavky na zvolený RECP jsou:

- materiál nebo jejich směs,
- tloušťka prvku a jeho hmotnost,
- maximální tečné napětí a maximální rychlost způsobená povrchovým odtokem,
- pevnost a průtažnost,
- délka ochranného účinku a degradace materiálu,
- způsob kotvení.

Způsoby ochrany je možné rozdělit z několika hledisek:

- plošné opatření a liniová opatření,
- dočasné a trvalé,
- podle typu a struktury materiálu.

Detailně jsou jednotlivé technické materiály rozčleněny:

- přírodní materiály – výrobky zejména z kokosu, juty, slámy a jejich kombinací:
  - síťové materiály (například K400, K700 a K900, J 500),
  - plošné materiály (například Biomac CC),
  - liniové materiály (například slámové válce),
- umělé materiály – výrobky zejména z Polyamidu, Polypropylénu a dalších,
  - geomříže ploché, geomatrace a další specializované materiály,
  - netkané geotextilie.

Mezi další způsoby pak patří klejonáž a mulčování, ale i liniová potření (plůtky, válce atp.). Výhodou těchto metod je využití místních, často náletových dřevin, které jsou odklizeny během stavby. Speciálním způsobem ochrany je využití hydroosevu. Hydroosev je způsob ochrany povrchů spojený s jejich osetím, při kterém se směs hydraulicky rovnoměrně nanáší postříkem. Směs tvoří osivo, voda, umělé hnojivo, organické hmoty (rašelina, řezanka, kaly, sláma), stabilizující a protierozní pomocné přísady. Pro navrhování z hlediska protierozní ochrany platí stejné principy posouzení jako pro jiné způsoby plošné ochrany uvedených dále.“ Převzato a kráceno z výše uvedené metodiky (Kavka, P.; Vaníček, M.; Dufka, 2021) jejíž je autor této práce rovněž autorem.

### Návrh opatření

Samotný návrh opatření vychází z posouzení vypočteného tečného napětí ( $\tau_0$ ) a rychlosti ( $v$ ) na konkrétním svahu, který musí být menší než kritické tečné napětí ( $\tau_{crit}$ ) nebo maximální přípustná rychlost ( $v_{crit}$ ) pro daný způsob ochrany.

$$\tau_{crit} > \tau_0 \quad [14]$$

$$v_{crit} > v \approx \frac{1}{n} h^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad [15]$$

Pro jednotlivé skupiny technických materiálů jsou orientační hodnoty uvedeny v příslušné metodice. Pro konkrétní vybrané materiály jsou relevantní parametry dané výrobcem. V případě instalace dočasné ochrany, například pomocí přírodních materiálů, musí být zajištěna a prokázána trvalá ochrana vegetací. Minimální hodnoty kritického tečného napětí a rychlosti pro travní směsi by měl uvádět její dodavatel pro konkrétní zeminu. Hodnoty kritické rychlosti pro vzrostlou vegetaci se pohybují od 0,95 do 2 m/s.

## 1.4 Modelování povrchového odtoku

Výše uvedená opatření v krajině i na svazích komunikací slouží pro redukcii anebo bezpečné odvedení povrchových vod. Musí být navrhovaná funkčně a bezpečně. Aplikační hydrologické modely jsou jednou z možností, jak návrhové parametry získat. Cílem této kapitoly je představení uceleného přehledu metod – modelů se zřetelem na jejich uplatnění v českém prostředí. Dále pak pro zasazení vyvíjeného modelu, představeného dále v této práci, do kontextu hydrologického modelování pro potřeby návrhu opatření.

### 1.4.1 Základní rozdělení modelů

„Modelů, dotýkajících se srážkoodtokových vztahů, byla v minulosti vytvořena celá řada, a i do budoucna budou modely nadále vyvíjeny. Každý model je určen k zcela specifickému účelu, a již při volbě modelu je třeba mít na paměti jeho základní koncept a budoucí využití. V zásadě lze modely dělit podle několika kritérií.

Z hlediska popisovaných veličin existují dva základní přístupy. Deterministický, kdy na základě vstupních podmínek lze jednoznačně určit výsledek daného procesu a nezáleží na náhodných veličinách. Druhým přístupem je přístup stochastický, kde některé proměnné mají náhodný charakter a jsou tedy stanoveny na základě určité pravděpodobnosti vyhodnocených statistických dat.

Na jakoukoli problematiku lze v zásadě nahlížet dvěma způsoby. U empirických modelů (black box) je na proces pohlíženo jako na uzavřený systém, což znamená, že není důležité, jak vnitřní proces probíhá. Není tedy cílem zkoumat vnitřní zákonitosti mezi jednotlivými veličinami, ale posuzovat vztah mezi vstupem a výstupem a vlastní proces je tedy opomenut. Tento typ modelů je využíván tam, kde neexistuje fyzikální popis vnitřních vztahů. Případně jsou tyto vztahy příliš komplikované pro matematický popis a jejich zjednodušení by nepřineslo zlepšení výsledků. Fyzikálně založené modely (white box) mají naopak fyzikální popis všech vnitřních veličin a vztahů, a lze tedy do vnitřního procesu dobře nahlížet. Vnitřní proces je zcela transparentní. Mezi těmito dvěma základními typy stojí kombinované modely (gray box). Modely



tohoto typu jsou postaveny na fyzikálních základech, ale část jejich vnitřních vztahů je empiricky odvozena. Při rozdělení modelu na určité procesy jsou některé z nich typu „white box“ a některé „black box“. Mezi tyto modely můžeme řadit fyzikálně založené modely, které využívají zjednodušujících předpokladů a zároveň využívají fyzikální principy řešení.

Dalším možným dělicím kritériem je náhled na prostorové dělení modelu. Celistvé modely (Lumped) neuvažují prostorové dělení řešené oblasti a její vnitřní nehomogenitu. Naproti tomu tzv. geometricky dělené modely (Distributed) rozdělují oblast do sítí, buněk či jiných elementů, které jsou homogenní. Částečně dělené modely (Semidistributed) představují prostor, který je částečně dělen na menší, v určitém kritériu homogenní celky, homogenita jiných vlastností je opomenuta.

Z prostorového hlediska je také možné modely rozdělovat podle množství rozměrů, ve kterých model pracuje. V této práci bude za jednorozměrný model považován ten, ve kterém je pohyb částic řešen pouze v jednom směru. Příkladem může být model pracující v charakteristických profilech a řezech. Za dvojrozměrné modely jsou považovány takové, ve kterých je uvažován a popisován pohyb ve dvou směrech. Příkladem mohou být rastrově orientované modely. Za trojrozměrný je pak považován model, který řeší pohyb ve všech třech prostorových osách. Někdy je za dvourozměrný model považován model pracující v charakteristických profilech, kde rovina řezu je považována za dvourozměrný prostor. Obdobně jsou za trojrozměrné modely považovány ty, které pracují například s prostorovým modelem terénu, ale pohyb částic je řešen jen ve dvou směrech, ty jsou v předchozím názvosloví považovány za dvourozměrné.

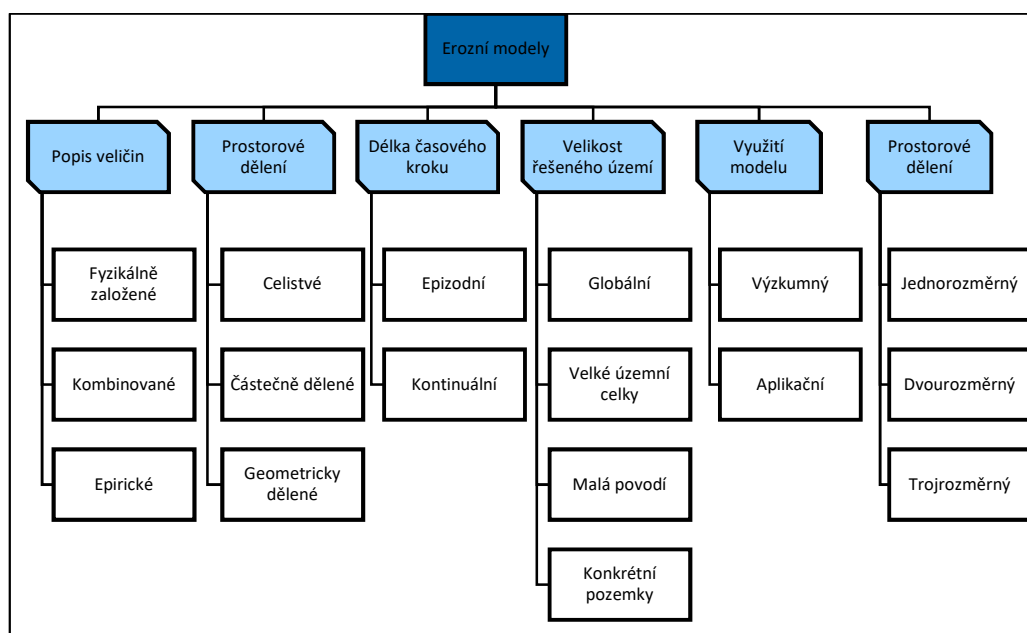
Při konstrukci modelu je také nutné zohlednit, pro jak dlouhý časový úsek bude model využit. Může se jednat o událost relativně krátkodobou, jako je například modelování jedné srážkové události. Tyto modely se pak nazývají epizodní, protože popisují osamocenou událost v relativně krátkém časovém úseku. Naproti tomu model kontinuální pracuje s delším časovým úsekem, ve kterém je například zohledněno několik událostí nebo slouží k vyhodnocení dlouhodobých bilancí.

Podle velikosti řešeného území jsou v hydrologii a klimatologii modely rozděleny do několika kategorií. Nejmenším řešeným celkem jsou konkrétní pozemky nebo svahy v určitém povodí. Modely řešící vztahy pro malá povodí, slouží pro řešení problematiky na povodích do zhruba 10 km<sup>2</sup>, což přibližně odpovídá území zasaženému konstantní návrhovou srážkou. Pro celá povodí říčních systémů se užívají modely pro velké územní celky. Poslední kategorií jsou globální modely sloužící pro bilanci na celých kontinentech nebo pro celou planetu.

Posledním zde uváděným dělením je dělení podle uvažované skupiny uživatelů. V případě, že mluvíme zde o výzkumných modelech, je jejich hlavním cílem zjišťovat, jak zkoumaný jev funguje. Takový typ modelu vyžaduje přesné vstupy a jejichž získání může být složité a pro běžnou praxi prozatím neaplikovatelné. Využití těchto modelů je pro poměrně malou skupinu uživatelů, kteří jsou s danou problematikou podrobně seznámeni. Aplikační modely jsou využívány v odborné technické praxi. Modely tohoto typu musí zohlednit rutinní používání a omezenější možnost získání vstupů. Uživatelsky je třeba model zjednodušit, vstupní hodnoty je nutno kategorizovat. Kvalitu vstupů je třeba vyvážit s ohledem na dopad, který mají na funkčnost výpočtů a správnost výsledků. Také je nutné vytvořit pracovní prostředí, ve kterém se uživatel dobře orientuje.

Volba konkrétního modelu je tedy závislá především na tom, k jakému účelu má sloužit. V přípravné fázi, při vytváření základní koncepce jakéhokoli modelu, je třeba zahrnout všechny

okolnosti a plánované využití modelu. Rozdělení modelů je patrné z následujícího obrázku,“ převzato z vlastní doktorské práce (Kavka, 2012).



Obr. 5: Schématické rozdělení modelů (Kavka, 2012)

## 1.4.2 Rozdělení modelů z hlediska principů řešení

Krom uvažovaných modelů implementovaných do českých národních předpisů je v zahraničí samozřejmě celá řada dalších modelů jak na komerční, tak na nekomerční bázi. Výpis těchto modelů není pro další práci zcela klíčový. Některé jsou uváděné i ve výše zmíněných metodikách např. EROSION (von Werner, 2006), WEPP (Laflen *et al.*, 1997), ale i dalších jako například EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998), KINEROS (Woolhiser *et al.*, 1989), prostředí HEC-HMS (USACE, 2000), SWAT (Arnold *et al.*, 2012). Přehledem modelů se zabýval například Pandey (Pandey *et al.*, 2016), který uvádí 50 modelů. Vybrané modely byly analyzovány z hlediska používaných výpočetních metod a detailní podoby požadovaných vstupů.

Při podrobnějším pohledu na principy fungování modelů se modely rozpadají do několika skupin. Zdánlivě široký výběr modelů je tak možné redukovat a vyloučit ty s identickým řešením a podrobněji zkoumat jejich charakteristiky. Vyloučené modely buď nezohledňovaly požadovanou podrobnost vstupů, nebo se jednalo o komplexní softwarové prostředky (často komerční) pouze integrující jednoduché modely dostupné samostatně. Každý z modelů uvedených v Tab. 2 byl zařazen do výběru z hlediska přístupu k popisované problematice (empirický, konceptuální, fyzikální), podle časového a prostorového měřítka, zjišťována byla podrobnost srážkových vstupů, metoda stanovení efektivní srážky a metoda výpočtu časového průběhu odtoku (routing) a doplňkově byly zjišťovány základní výstupní veličiny. Pro klasifikaci modelů byla za hlavní kritérium vybrána metoda výpočtu efektivní srážky a routing odtoku v ploše povodí.

Tab. 2: Přehled posuzovaných modelů a základní charakteristiky

Model	Prostorové dělení a měřítko	Časové měřítko	Parametry srážky	Metoda ef. srážky	Routing v ploše
AGNPS	distrib, velká území	epizodní/ kontinuální	4 typické průběhy H24 dle SCS	B	D
Erosion 2D	regionální	epizodní	hyetogram	A2	B3
Erosion 3D	regionální	epizodní	hyetogram	A2	B1
WEPP	regionální / lokální	epizodní/ kontinuální	hyetogram	A2	B3
DesQ/MaxQ	1 nebo 2 desky, povodí do 10 km <sup>2</sup>	epizodní	blokový déšť	B	B2
Smoderp 1D	1D svah	epizodní	hyetogram	A1	B3
Smoderp 2D	2D mikropovodí, distrib	epizodní	hyetogram	A1	B1
SWAT	povodí, HRU – semidistrib	kontinuální	řada úhrnů	A2 / B	D
KINEROS	semidistrib	epizodní	hyetogram	C	B2
TOPKAPI	plně distrib	kontinuální/ epizodní	řada	D	B1
TOPmodel	povodí, semidistrib	kontinuální/ epizodní	řada	D	C
MikeSHE	půdní profil až povodí, plně distrib	epizodní/ kontinuální	hyetogram / řada / mapy	A2 / A3	A
HEC	celistvý, semidistrib	epizodní (kontinuální)	hyetogram	A2 / B / C	B1/D
Sacramento	celistvý, velká povodí	kontinuální/ real-time	řada úhrnů	E	E
KINFIL	povodí, semidistrib, kaskáda desek	epizodní	hyetogram	A2	B2
HYDROG	povodí, soustavy	kontinuální/ real-time		C	D
MMF – SAGA	distrib.	libovolné, spíše kontinuální	úhrn, intenzita, trvání, časový krok	C	
HYDROCAD	malé povodí	epizodní	hyetogram	B	D

Tab. 3 Legenda k Tab. 2 – klíčové parametry pro klasifikaci modelů

Metoda ef. srážky		Routing v ploše	
<b>A1</b>	fyzikální, inf. dle Philipse	<b>A</b>	fyzikální, dif. vlna
<b>A2</b>	fyzikální, inf. dle G&A	<b>B1</b>	fyzikální, kinem. vlna na reálném 2D povrchu
<b>A3</b>	fyzikální, inf. dle Richardse	<b>B2</b>	fyzikální, kinem. vlna na koncept. povrchu
<b>B</b>	konceptuální (např. SCS-CN)	<b>B3</b>	fyzikální, kinem. vlna na 1D profilu
<b>C</b>	jednoduchá konceptuální (exponenc. pokles...)	<b>C</b>	typ Topmodel (travel time function)
<b>D</b>	typ Topmodel	<b>D</b>	hydrogram
<b>E</b>	konc., systém nádrží	<b>E</b>	konc., systém nádrží

Modely byly dále seskupeny podle podobnosti použitých přístupů a je možné uvažovat o následujících reprezentativních modelech: a) převážně konceptuální HEC integrující řadu metod včetně SCS-CN, na konceptu laterálního podpovrchového odtoku postavený TOP-MODEL a fyzikálně založené modely SMODERP a MIKE-SHE.

Z výše uvedeného vyplývá, že strukturou a šíří využití modely sahají na jedné straně od konceptuálních a hojně využívaných modelů (metoda SCS-CN například implementována v modelu HMS, po fyzikálně založené a původně spíše výzkumné modely (například SMODERP, KINFIL). Principů řešení je výrazně méně než publikovaných modelů.

### **SCS-CN v kombinaci s jednotkovým hydrogramem**

Metoda odtokových křivek SCS-CN (SCS, 1986) je v českých podmínkách jednou z nejrozšířenějších metod pro výpočet úhrnu efektivní srážky. Tato metoda byla integrována do řady komerčních i otevřených modelových prostředků, např. volně dostupného HEC-HMS či Atlas HYDROLOGIE. Výpočetní vztahy lze nalézt v metodikách (Janeček, 2012; Kavka, Muller and Strouhal, 2018)

#### **Objem přímého odtoku**

Metoda CN odvozuje výšku přímého odtoku ze zákona zachování objemu a z předpokladu, že poměr odtokové výšky k srážkovému úhrnu bez počátečních ztrát (intercepce, povrchová retence) je roven poměru infiltrované části srážky k maximální potenciální retenci. Základní vztah pro určení odtokové výšky uvádí následující rovnice:

$$H_o = (H_s - I_a)^2 / (H_s - I_a + A) \quad [16]$$

kde:  $H_o$  výška přímého odtoku (mm),  
 $H_s$  celkový úhrn srážky (mm),  
 $I_a$  počáteční ztráty (mm),  
 $A$  maximální potenciální retence (mm)

Z rovnice je zřejmé, že metoda CN nezohledňuje průběh vstupní srážky. S využitím vstupního hyetogramu příčinné srážky lze sice touto metodou odvodit i hyetogram efektivní srážky (rozdělení odtokových výšek vznikajících v jednotlivých časových krocích), celková odtoková výška ze dvou srážek s totožným úhrnem, ale odlišnými průběhy, je však vždy stejná. Metoda nerozlišuje mezi příčinnou srážkou v podobě rovnoměrného deště nízké intenzity a přívalovou srážkou, což neodpovídá fyzikálním principům tvorby přímého odtoku.

Počáteční ztráty  $I_a$  se vyjadřují jako procentuální podíl maximální potenciální retence  $A$  podle:

$$I_a = \lambda \cdot A \text{ [mm]} \quad [17]$$

Jako poměrový koeficient  $\lambda$  je osvědčená hodnota 0,2, ale v odůvodněných případech lze použít jinou. Např. pro urbanizovaná hladká povodí bez výrazné vegetace ve výši 10 %, pro povodí s členitým povrchem a hustou vegetací ve výši 25 %.

Maximální potenciální retence  $A$  se určí na základě čísla odtokové křivky CN pro zvolený stupeň předchozího nasycení podle vztahu:

$$A = 25,4 (1000 / CN_{IPS} - 10) \quad [18]$$

Stupeň předchozího nasycení je charakterizován pětidenním indexem předchozích srážek (IPS) a nabývá hodnot 1–3. Hodnoty  $CN_2$  se odvozují na základě tabelovaných kombinací hydrologické skupiny půdy A–D a kategorií půdního pokryvu. Lze je nalézt v platných metodikách, např. Janeček (Janeček, 2012). Nové poznatky z analýzy výskytu různých typických průběhů srážek (Kavka, Muller and Strouhal, 2018) ukazují, že ve významném množství případů dochází k výskytu intenzivních srážek za vlhkých podmínek. V těchto případech je vhodné předpokládat pro výpočet i třetí, nasycený stav daný IPS 3. Naopak uvažovat stav povodí jako zcela nenasyčený ( $CN_1$ ) se na základě provedených analýz jeví jako neopodstatněné.

#### Kulminační průtok, hydrogram odtoku

Pro odvození návrhového kulminačního průtoku nabízí Janeček (Janeček, 2012) do českých podmínek lokalizovanou grafickou metodu podle SCS-CN. Pro kulminační průtok podle ní platí jednoduchý vztah v následujícím tvaru:

$$Q = 0,00043 \cdot q_{pH} \cdot P_p \cdot H_o \cdot f \quad [19]$$

kde:

$q_{pH}$  jednotkový kulminační průtok [ $m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2} \cdot mm^{-1}$ ], který vychází z doby koncentrace

$P_p$  plocha povodí ( $km^2$ ),

$H_o$  odtoková výška (mm),

$f$  opravný součinitel pro rybníky a mokřady (-)

Korektnější alternativou je stanovení průběhu odtoku, potažmo kulminačního průtoku, transformací hietogramu efektivní srážky do odtokové odezvy. K tomu je možné využít různé formy parametrizovaných hydrogramů např. metodu jednotkového hydrogramu. Jedná se o jedno- či víceparametrickou matematickou funkci rozkládající každý srážkový impuls do dílčí odtokové vlny, výsledný hydrogram pak vzniká jejich součtem. Tímto způsobem se průběh příčinné srážky, resp. její efektivní části, promítne do průběhu a kulminace odtokové odezvy. Pro ruční výpočet je možné použít originální metodiky, pro větší efektivitu je doporučeno využít simulačních nástrojů, např. volně dostupný HEC-HMS.

Parametrem určujícím tvar hydrogramu je nejčastěji doba zpoždění  $T_{lag}$ , případně doba koncentrace  $T_C$ . Příkladem je například vztah implementovaný i do prostředí Atlas HYDROLOGIE:

$$T_{lag} = Fl_{max}^{0.8} \cdot \frac{(S + 1)^{0.7}}{1900 \cdot \sqrt{Y}} \quad [20]$$

kde:

$T_{lag}$  doba zpoždění (hod)

$Fl_{max}$  délka nejdelší odtokové dráhy (feet)

$Y$  průměrný sklon povodí [-]

$S$  maximální retence (inch)

Jako vstupní parametry jsou pak po uživateli požadovány zpravidla jen běžné morfologické charakteristiky povodí jako je průměrný sklon či maximální délka odtokové dráhy, které lze snadno odvodit z běžných datových podkladů v kterémkoliv prostředí GIS.

### **DesQ-MaxQ**

Komerční software DesQ-MaxQ (Hrádek, 1998) je jednoduchý nástroj pro odvození objemu odtoku metodou CN a průběhu odtoku metodou jednotkového hydrogramu. Kvůli nedostatkům metody CN nezohledňuje tento nástroj průběh příčinné srážky při výpočtu objemu odtoku. Z hlediska určení kulminačního průtoku má jistá omezení. Úhrn návrhové srážky odvozuje metodou redukce uživatelem zadaných 24hodinových maximálních úhrnů na zvolenou dobu trvání. Zadání tvaru návrhového hierogramů ale DesQ-MaxQ neumožňuje, a protože tak uvažuje intenzitu příčinné srážky za konstantní, není možné pomocí tohoto modelu věrně simulovat odezvy na časově proměnlivé srážky.

### **Erosion 2D/3D**

Fyzikálně založený Erosion (von Werner, 2006) je epizodní distribuovaný model srážko-odtokových vztahů, erozních a transportních procesů, primárně odvozený pro prostředí Saska. Tento model je zaměřen především na erozní problematiku, ale lze jej použít i pro výpočet množství protékající vody v každém výpočetním elementu zvolené oblasti.

Výstup z modelu tvoří soubor rastrových vrstev pro jednotlivé výstupní veličiny, mimo jiné i objem odtoku a průtok. Tyto vrstvy je možné ukládat pro každý časový krok simulace. V případě použití dodatečného modulu pro sledování odtoku je možné definovat profily (buňky rastru), z nichž jsou hodnoty výstupních veličin ukládány jako časové řady v tabelované podobě.

Soustředěný povrchový odtok je simulován odděleně od plošného povrchového odtoku, tím je umožněno sledovat průtok například v korytě vodního toku. Geometrie koryta a jeho další hydraulické vlastnosti však nejsou do modelu nijak zadány a pohyb vody po povrchu je simulován pouze modelem kinematické vlny na buňkách rastru, což je nutné zohlednit při vyhodnocení výsledků spojených se soustředěným odtokem.

Obtížnost nasazení modelu pro podmínky v ČR spočívá především v určení vlastností půd. Katalogové parametry vycházejí ze standardu KA4 (AG BODEN, 1994) a jsou odvozeny a kalibrovány na území německého Saska. Adaptace modelu pro prostředí ČR byla řešena v rámci projektu QK1810341. Model Erosion 3D je dostupný pouze v komerční verzi.

### **WEPP**

WEPP (Laflen *et al.*, 1997) je fyzikální model založený na základech hydrologie, znalosti fenofází rostlin, hydraulice a mechanice eroze. Model poskytuje různé druhy výstupů, včetně vodní bilance (povrchový, podpovrchový odtok a evapotranspirace), eroze, transport a sedimentace půdy. Model WEPP se od svého uvedení v roce 1995 nepřetržitě vyvíjí a je použitelný pro celou řadu oblastí (např. zemědělství, lesní hospodářství, lesnictví, rybolov, a další.) Tento model v USA nahrazuje široce rozšířenou rovnici výpočtu ztráty půdy USLE pro výpočet ztráty půdy, lze jej využít i pro stanovení charakteristik odtoku. Model pracuje s celou řadou parametrů, které byly verifikovány pro USA. Chybějící verifikace a vstupní data jeho využití v ČR znesnadňují.

### **SMODERP**

Posledním jmenovaným modelem je fyzikálně založený model SMODERP. Vývoji tohoto modelu je věnována další část práce a je mu věnována celá následující kapitola. Tento fyzikálně založený srážko-odtokový model je přímo zacílen na navrhování drobných staveb v krajině. Jedná se o epizodní model, jehož výsledky lze využít k získání příslušných návrhových parametrů.

### 1.4.3 Komentář k aplikaci modelů v českém prostředí

V literární rešerši jsou použity většinou zahraniční zdroje dostupné v citačních databázích impaktovaných časopisů. Tato předkládaná práce má zároveň svou aplikační rovinu. Smyslem této kapitoly je uceleně a na jednom místě uvést do kontextu využívání hydrologických modelů v českém prostředí při získávání návrhových dat pro navrhování úprav a staveb v krajině. Základním právním rámcem je samozřejmě vodní zákon (254/2001 Sb. *Vodní zákon*, 2001) a na něj navazující další předpisy. Byť je zavedenou praxí a je nejčastěji pro navrhování vodohospodářských staveb v malých povodích využíváno dat poskytnutých podle ČSN 75 1400 – Hydrologické údaje povrchových vod (Kulasová and Fremrová, 2014), tak a) objekty mimo vodní tok nejsou předmětem této normy a data pro povodí do 1 km<sup>2</sup> nemusí být poskytnuta, b) poskytovaná data pro profily v malých povodích jsou v nejnižší třídě přesnosti a jsou také výsledkem modelování, c) nové nároky na management vody v krajině a variantní řešení vyžadují flexibilitu při zpracovávání návrhu. Z těchto důvodů je modelování dopadů srážkových extrémů relevantním přístupem.

Předpoklad využití hydrologického modelování je obsažen v následně uvedených dokumentech s vazbou na obsah práce. Když pomineme modely čistě pro výpočet erozního ohrožení (postavené na bázi rovnice USLE), objevují se hydrologické přístupy k řešení odtoků na malých povodích v následujících publikacích uvedených v časové ose jejich vzniku.

Doporučený standard technický – Hrazení bystřin (ČKAIT, 1998) se věnuje zejména technickému návrhu koryt a objektů bystřin a zmiňuje možnost použití hydrologických modelů jako je HEC či KINFIL, jinak pracuje pouze s termínem návrhového průtoku jako zadaného vstupu.

Doporučený standard technický – Protierozní ochrana (Váška, 2000) jmenuje mezi empirickými modely USLE a dva z ní odvozené modely. RUSLE představuje pouze zpřesnění výpočtu některých faktorů původní univerzální rovnice, MUSLE potom univerzální rovnicí kombinuje s metodou CN. Mezi modely erozních procesů jsou doporučeny modely AGNPS, EPIC, SMODERP, a EROSION 2D a 3D.

Doporučený standard technický – Hydrologické výpočty v protierozní ochraně půdy (Janeček and Váška, 2001) v případech, kdy není nutné či možné použít hydrologické podklady podle ČSN 75 1400, uvádí jako vhodný model metodu CN pro výpočet objemu přímého odtoku. Pro stanovení kulminačního průtoku pak udává nomogram založený na době koncentrace. Poněkud problematická může být kombinace této na empirickém základě založené metody s uváděným přístupem pro výpočet doby koncentrace. V rámci příslušné aktivity projektu bude proto nutné vliv různých vztahů pro stanovení této veličiny ověřit.

Metodika MŽP – odboru ochrany vod (MŽP ČR, 2008) stanovuje postup komplexního řešení protipovodňové a protierozní ochrany pomocí přírodě blízkých opatření. Pro stanovení odtokových poměrů explicitně jmenuje metodu CN v klasické podobě a v modifikaci modelu DesQ-MaxQ.

Totožný přístup jako v DOST je podrobněji rozveden v metodice „Ochrana zemědělské půdy před erozí“ (Janeček, 2007; Janeček, 2012). Tato metodika navazuje na několik předcházejících vydání a je jakým si základem. V ní uvedené přístupy jsou všeobecně přijímány jako etalon. Z větší části se sice tato metodika zabývá erozí, ale je zde uvedena metoda SCS-CN pro určení objemu odtoku a mezi dalšími hydrologickými prostředky zmiňuje simulační modely HYDROCAD, SMODERP, KINFIL, EROSION 2D a 3D a WEPP. Až na první z jmenovaných modelů se jedná o fyzikálně založené modely odtoku. HYDROCAD je komerční americké

modelové prostředí kombinující řadu konceptuálních modelů, obdobný volně dostupnému HEC-HMS.

Česká technická norma ČSN 75 2935 - Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních z roku 2014 (Kaisler *et al.*, 2014) pracuje s termínem Kontrolní povodňová vlna, kterou má zpracovávat ČHMÚ nebo jiné odborné pracoviště. Kromě statistického přístupu je k jejímu odvození možné využít deterministický model a jako příklad norma uvádí HEC-1 nebo frekvenční verzi TOP-MODELU.

Navrhováním konkrétních technických opatření se zabývá metodika Navrhování technických protierozních opatření (Kadlec *et al.*, 2014). Zde jsou uvedeny jak konkrétní prvky ochrany, tak základní postupy návrhu a tehdy aktuální využití modelů.

Jednou z posledních metodik na tomto poli je metodický návod na získání návrhových srážek a jejich implementace do hydrologických modelů s názvem „Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině“ (Kavka, Muller and Strouhal, 2018). Tato metodika vznikla v rámci řešeného projektu autora této práce a podílel se na ní kolektiv pod jeho vedením.

Dále jsou způsoby návrhu konkrétních opatření uváděny v Metodickém návodu k provádění pozemkových úprav (SPU, 2022a) a Technickém standardu plánu společných zařízení v rámci provádění pozemkových úprav (SPU, 2022b), aktuální verze jsou dostupné na stránkách [www.spucr.cz](http://www.spucr.cz). Jejich součástí jsou v rámci tzv. společných zařízení realizovány také vodohospodářské stavby v krajině. Zpracované postupy jsou uvedeny jak v Metodickém návodu k provádění pozemkových úprav a rozvedeny v „Technickém standardu dokumentace plánu společných zařízení v pozemkových úpravách“. V roce 2022 dochází v rámci aktualizace metodického pokynu pro pozemkové úpravy k zásadnímu posunu v pojetí návrhů opatření, a to navrhováním na budoucí klimatické scénáře, které jsou definovány jako indexy posunů intenzit srážek.

Povrchová voda vznikající ve volné krajině není jen součástí zemědělské krajiny, ale dotýká se také ochrany významných liniových staveb jako jsou dálnice, železniční koridory atp. Realizace a provoz těchto děl se řídí na pozemních komunikacích „Technickými předpisy – TP“. Odvodnění samotných zpevněných ploch komunikací je řešeno metodami městského inženýrství. Přílehlé svahy (zářezy či násypy) a voda z přílehlých povodí je řešena v rámci „TP 53 – Protierozní opatření na svazích PK“ (MD ČR, 2003). Tento předpis v současné době prochází úpravou, které předchází metodika „Ochrana umělých svahů před erozí a stabilizace povrchové vrstvy“ (Kavka, P.; Vaníček, M.; Dufka, 2021) a kde jsou využity principy fyzikálního modelování povrchového procesu která vznikla v rámci projektu TA ČR TH02030428 a jsou zde využívány principy stanovení ohroženosti řešením limitních tečných napětí a maximálních rychlostí.



## 2 Experimentální měření povrchového odtoku v různých měřících

Způsobů a nástrojů, jak experimentálně ověřovat proces povrchového odtoku, existuje celá řada. Bodová měření na půdních vzorcích, která se soustřeďují především na určení klíčových hydrologických vlastností půd a určení bilance. Může se jednat například o výtopový experiment, nebo využití specializovaných zařízení jakými jsou například podtlakové infiltrometry. Dynamika procesu se zkoumá již ve větším měřítku sledované plochy. Může se jednat o dlouhodobý monitoring, dešťové simulace nebo detekci změn na konkrétních pozemcích (on-site efekty) či dopady na okolí (off-site efekty). Krom detailnějšího popisu těchto tří principů je součástí této kapitoly popsán vývoje způsobů měření na ČVUT v Praze, který byl součástí vědecko-výzkumné práce autora.

### 2.1 Dlouhodobý monitoring

Vznik a průběh povrchového odtoku z reálných srážkových událostí může být sledován obdobně jako jsou sledovány průtoky na vodních tocích. Princip měření je velmi podobný, sledovány jsou v základním schématu srážky, vznik a průběh odtoku a doplňující informace o změnách vlhkostního režimu v půdě a další bilanční složky (transpirace, radiace atp.). Příkladem mohou být experimentální plochy na následujícím obrázku (Obr. 6), kde je povrchový odtok sledován z vymezených ploch o ploše několika m<sup>2</sup>.

Nevýhodou dlouhodobého monitoringu je poměrně značné úsilí, které je věnováno instalaci systému tohoto monitoringu na straně jedné a nejistotou výskytu přirozeného deště na straně druhé. Příkladem využití těchto ploch je monitoring prováděný v rámci experimentálního povodí Býkovického potoka.

#### Experimentální plochy – Býkovice

V letech 2009 až 2015 byly provozovány experimentální plochy na zemědělských půdách v rámci povodí Býkovice Nejprve byly vytvořeny tři plochy o délce 22 m, což odpovídá standardním plochám na výzkum eroze. Plochy byly s různým způsobem kultivace a sloužily především pro kvantifikaci odtoku a smyvu. Měřicí přístroje instalované pro tyto účely byly během let modernizovány a doplňovány pro získávání podrobnějších dat dle dostupných technologií. Instalace ploch, popis instalovaných přístrojů a metodika následného laboratorního vyhodnocení byla publikována v časopise stavební obzor (Kavka *et al.*, 2011).



Obr. 6: Ukázka dlouhodobého monitoringu na vymezených odtokových plochách – Býkovice.

V průběhu let byly navíc instalovány plochy o velikosti 0,9x4 m pro možné porovnání odezvy s halovým dešťovým simulátorem a o velikosti 2x8 m a 1x1 m využívaných mobilním dešťovým simulátorem. (viz. následující kapitola).

Zaznamenané události uvádí Bauer (Bauer *et al.*, 2014), vybrané události byly využity pro verifikaci modelu SMODERP.

Tab. 4: Příčinné srážky a analyzované výsledky ze čtyřech let měření (Bauer et al., 2014)

Date	Rainfall					Outflow		Soil loss		Runoff coefficient	
	Total rainfall (mm)	Duration (h:min)	Maximum rainfall intensity (mm/hour)			Vegetation - Maize (l)	Fallow (l)	Vegetation - Maize (kg)	Fallow (kg)	Vegetation (-)	Fallow (-)
			10 min	30 min	60 min						
24.5.10	21.6	2:40	61.2	20.4	13.0	8.0	23	-	-	0.7%	2.1%
18.7.10	45.2	18:00	9.6	7.8	6.0	1.0	2.0	-	-	0.0%	0.1%
23.7.10	20.2	2:40	44.4	22.2	16.2	4.0	90	0.7	2.5	0.2%	3.7%
24.7.10	45.8	19:40	18.0	15.6	9.6	4.0	90	0.7	2.5	0.2%	3.7%
2.8.10	29.0	2:10	39.6	39.0	22.2	128	295	1.7	43.9	5.4%	12.5%
7.8.10	77.8	8:55	36.0	34.8	9.6	237	717	2.4	9.7	4.7%	14.2%
14.8.10	17.2	8:00	25.2	15.6	10.2	13	15	0.0	0.2	1.7%	1.9%
						Vegetation - Clover	Fallow	Vegetation - Clover	Fallow		
31.5.11	27.8	4:05	80.4	40.0	24.4	34	14	-	-	2.4%	1.0%
11.6.11	7.8	1:05	19.2	12.0	7.6	1.2	0.0	5.3	110.0	0.3%	0.0%
16.6.11	35.6	2:40	87.6	40.8	20.6	111	654	5.3	110.0	6.2%	2.3%
22.6.11	34.6	1:40	54.0	31.6	27.4	246	765	0.1	-	14.2%	44.0%
10.7.11	34.0	3:05	60.0	28.8	25.4	130	845	0.3	115.8	7.6%	49.5%
20.-21.7.11	42.2	17:00	28.8	20.0	13.8	23	380	0.0	0.1	1.1%	17.9%
25.8.11	11.4	1:45	26.4	17.6	10.6	0.9	2.7	0.0	0.0	0.2%	0.5%
27.8.11	13.2	4:30	10.8	8.4	5.8	0.9	6.6	0.0	0.0	0.1%	1.0%
						Vegetation - Clover	Fallow	Vegetation - Clover	Fallow		
3.7.12	29.4	1:05	108.0	46.4	29.2	-	500	-	201.4	-	33.9%
3.7.12	42.4	8:10	79.2	35.2	17.8						
						Vegetation - Wheat	Fallow	Vegetation - Wheat	Fallow		
2.6.13	78.8	11:55	72.0	50.4	32.4	-	1438	-	8.1	-	36.3%
29.7.13	40.6	2:05	140.4	65.6	37.4	1.6	257	0.0	14.7	0.1%	12.6%
4.8.13	14.6	1:10	76.8	25.6	14.2	7.6	731	0.0	13.0	1.0%	99.7%

## 2.2 Dešťové simulátory

Dešťové simulátory (RS) představují jeden z důležitých nástrojů pro sledování vzniku a dynamiky procesu povrchového odtoku. Existují jak laboratorní, tak mobilní RS a slouží nejen ke sledování procesů povrchového odtoku, ale na vazbu s infiltrací, povrchovou retencí a dalšími faktory, které ovlivňují povrchový odtok. Dešťové simulace srážek umožňují omezit nežádoucí nejistoty a zároveň umožňují replikaci experimentů a sledovat tak vliv jednotlivých parametrů a jejich variabilitu. Simulátor deště tak lze definovat jako zařízení schopné opakovaně generovat srážkové události s přesně definovanými charakteristikami (intenzita, doba trvání, velikost kapek, jejich distribuce a kinetická energie). Za těchto podmínek vykazují podobné účinky na půdu jako přirozený déšť (Hudson, 1971).

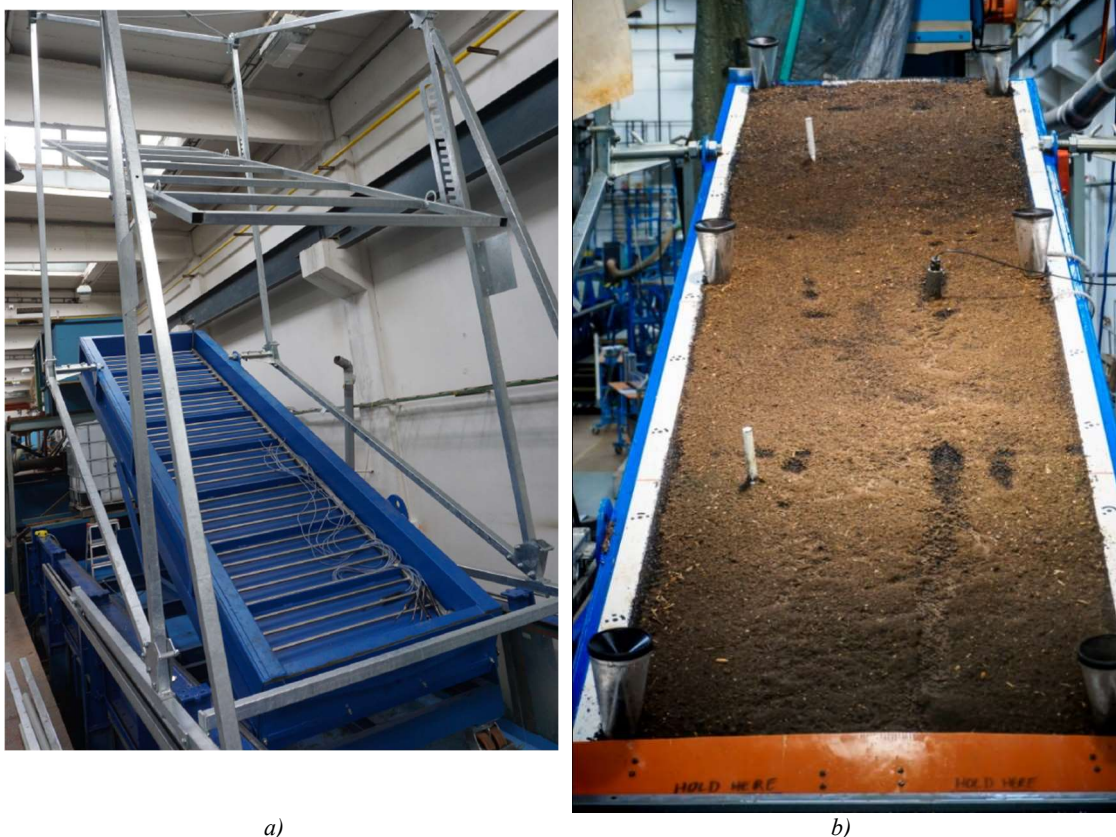
První simulátory deště jsou z 30. let 20. století (Nichols y Sexton, 1932). Od 50. let 20. století slouží simulátory srážek jako standardní metoda, byť se stále jedná o prototypová zařízení spíše pro konkrétní účely. Cílem je reprodukovat přirozené dešťové kapky s podobnou rychlostí pádu jako přirozené srážky (Gunn a Kinzer, 1949). Zadešťovaná plocha je nejčastěji v rádech maximálně jednotek metrů i když existují zařízení se zadešťovanou plochou přes 100 m<sup>2</sup>.

Vývoji simulátorů směřuje k automaticky ovládaným zařízením umožňujícím simulovat nejen konstantní srážky ale i proměnlivé srážky podobné reálným změřeným událostem. Pro popis sledovaných procesů není sledována jen dynamika povrchového odtoku, ale i změny vlhkosti půdy, případně změny sacích tlaků. Detailněji byla rešerše dešťových simulátorů provedena v rámci publikací autora, které jsou uvedeny dále v textu této kapitoly.

### 2.2.1 Vývoj a aplikace dešťových simulátorů na ČVUT v Praze

Ze zkušeností výzkumu povrchového odtoku pomocí dlouhodobého monitoringu je zřejmé, že zásadní nevýhodou jsou výkyvy počasí a relativně značné úsilí pro terénní práci pro zaznamenání epizodních událostí. První halový dešťový simulátor, který byl v provozu od roku 2001 byl umístěn ve vodohospodářské hale FSv na sklopném hydraulickém žlabu. Zadešťovaná plocha byla 0.9x4 m a maximální sklon byl 10°. V zahraničí jsou využívány většinou menší simulátory u kterých je velikost zadešťované plochy cca 1m<sup>2</sup> nebo méně (T Iserloh *et al.*, 2013). U těchto zařízení je pak povrchový proces omezen pouze na plošný odtok. Dynamika odtoku v podobě tvorby soustředěného odtoku zařízením s malou zadešťovací plochou sledovat nelze. Část vědecké práce tak byla věnována vývoji dešťových simulátorů, které umožní sledovat procesy oběhu vody v krajině. A to jak laboratorního dešťového simulátoru, tak mobilních zařízení.

Laboratorní dešťové simulátory jsou vždy umístěny v krytých prostorech a jejich zařízení je zpravidla nepřenosné. Hlavní nevýhodou těchto simulátorů potom je, že půda připravená do erozního kontejneru v laboratoři nedosahuje absolutně stejných podmínek jako vzorek v terénu. Výhodou laboratorních simulátorů oproti mobilním je možnost nastavení sklonu erozního kontejneru díky sklopnému hydraulickému zařízení. Experimenty se tak dají opakovat za stejných počátečních podmínek, avšak při různých sklonech. Dalšími výhodami potom může být potřeba menšího počtu pracovníků a časová úspora při simulacích (simulátor není potřeba převážet a vždy znovu stavět) a dále také nezávislost na vnějších podmínkách (přírodní dešť, vítr). Popis inovativního halového dešťového simulátoru, který je provozován je uveden v publikaci autora (Kavka *et al.*, 2019).



Obr. 7: Halový dešťový simulátor a) půdní kontejner bez zeminy na kterém je patrný rozvod média pro teplotní nastavení půdního vzorku (-15 až 30 °C), b) ukázka simulátoru se zeminou a osazenou sensorikou pro sledování půdní vlhkosti

Mobilní dešťové simulátory jsou určeny pro měření v terénu čemuž musí odpovídat i konstrukce simulátoru a zařízení musí splňovat nároky na přepravu a opakovanou instalaci. Z hlediska samotného měření je nutné sledovat navíc parametry počátečních podmínek, které se při simulacích v terénu mohou lišit více než v laboratoři. Velkou výhodou mobilních dešťových simulací jsou přirozené podmínky a že simulace probíhají v reálných podmínkách stavu vegetace, půdní bioty atp.

Za posledních bez mála deset let prošel vývoj simulátorů na pracovišti značným vývojem. První zařízení bylo sestrojeno v roce 2012 s jednoduchým rozhraním pro generování deště. Postupný vývoj pak vyústil ve dvojnásobný počet zadešťovacích trysek pro dosažení lepší rovnoměrnosti pokryvu, automatizovaný záznam sledovaných veličin atp. Zařízení je využíváno v řadě vědeckovýzkumných projektů. Základní popis a metodologie využití byla publikována v roce 2018 (Kavka *et al.*, 2018).



a)



b)



c)

Obr. 8: Ukázka využití dešťového simulátoru a) vinice, b) tráva na orné půdě (rozdělené plochy jsou součástí testu vlivu velikosti zadešťované plochy), c) holá půda před experimentem

Kombinací zkušeností s halovým simulátorem, který je kyvného typu a mobilním simulátorem, který je pulzního typu vznikl prototypový jedno pulzně kyvný simulátor (Kavka and Neumann, 2021) využívající obou principů generování deště. Tento inovativní přístup je zároveň chráněn jako užitný vzor (č. CZ 34224).



a)

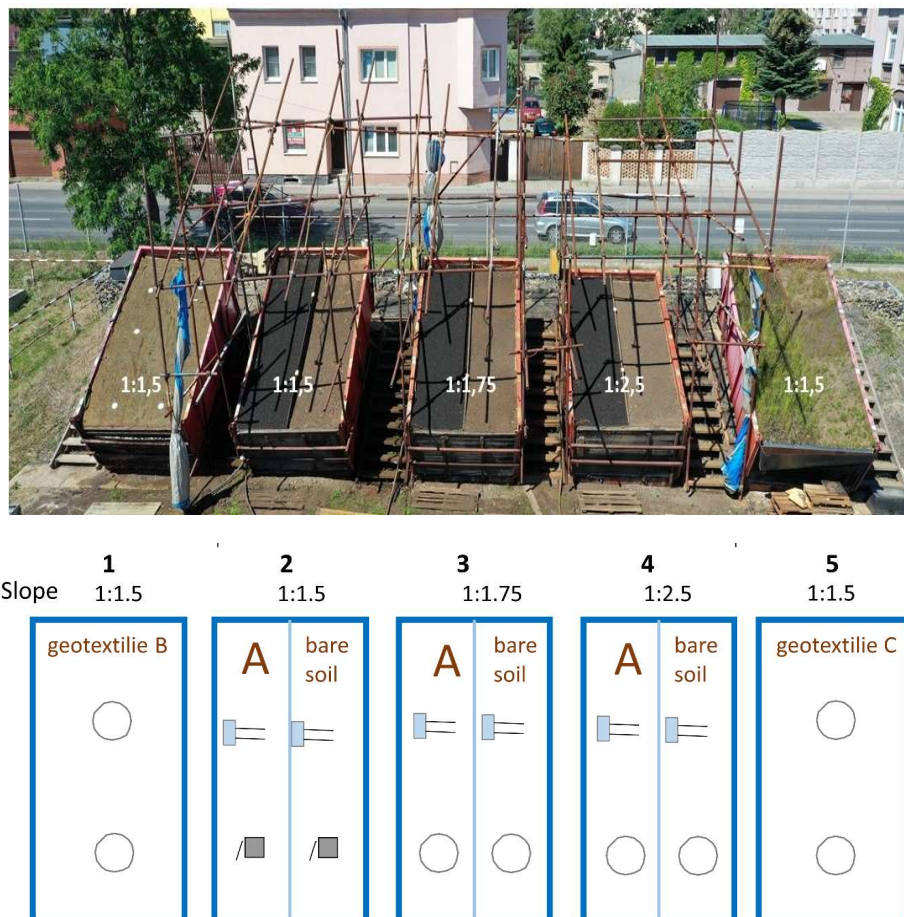


b)

Obr. 9: Ukázka využití malého dešťového simulátoru a) pohled a simulátor a zadešťovanou plochu, b) detail pulzně-kyvné hlavy simulátoru

Speciální kombinací přístupu halového a mobilního přístupu je stacionární dešťový simulátor umístěný v Jirkově a vyvinutý pro potřeby zadešťování umělých strmých svahů podél liniových staveb. Jedná se o na jednom místě umístěný simulátor ve vnějším prostředí, a půdní vzorek je tak vystaven přírodním podmínkám. Aplikace a metodika měření vznikla v rámci

řešeného projektu TA ČR TH02030428. Zadešťovány byly tři plochy, každá s rozměry 4,25x2,4 m. Sklony jednotlivých ploch byly upraveny tak, aby odpovídali limitním sklonům pro konstrukce násypů a zářezů dle ČSN 73 6133 – “Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací” a to 1:1,5; 1, 75 a 1:2,5. Schéma umístění ploch je zobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 10).



Obr. 10: Fotografie umístění ploch (nahore) a schéma rozdělení ploch a zapojení vlhkostních čidel ve svrchním horizontu (dole)

Před instalací ploch do patřičného sklonu, byly kontejnery vyplněny ve spodní části v tloušťce  $\frac{1}{4}$  výšky kontejneru (cca 40 cm) Liaporem, aby byla zajištěna vertikální propustnost profilu a tak byly simulovány přírodní podmínky. Střední části profilu byla vyplněna cca 4 x 30 cm vrstvami zeminy. Po nasypání každé vrstvy mocnosti max. 30 cm byla vrstva přehutněna hutnicí deskou. Zemina se standardně využívá při tvorbě násypů a zároveň reprezentuje odhalené kompaktní zářezy. Tento postup odpovídá běžně využívaným postupům v inženýrské praxi při stavbě liniových staveb. Svrchní část pak byla ohumusována 15 cm běžné ornice, také postupem, který odpovídá zavedené praxi.

## 2.3 Využití DPZ a leteckého snímkování pro detekci výskytu soustředěného odtoku

Nové možnosti detekce projevu povrchových procesů umožňuje dálkový průzkum země (DPZ) a to díky možnostem obrazových a dalších senzorů ale i rozšiřující se nabídce možností. Ať už se jedná o družicová data, případně data pořizovaná z pilotovaných letadel nebo data z bezpilotních prostředků (UAV).

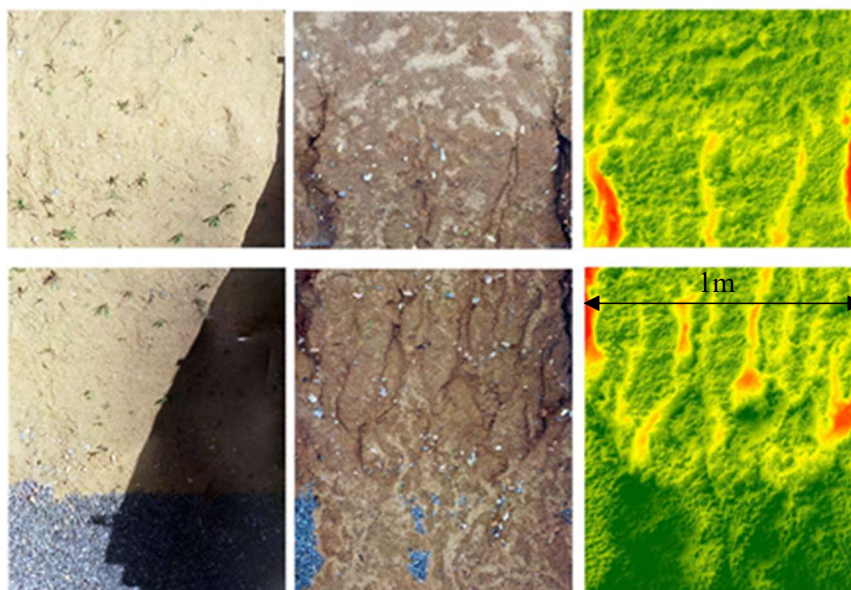
Jedním z projevů povrchového odtoku, který je patrný i na snímcích z viditelného spektra jsou vytvořené erozní rýhy a další změny na půdním povrchu. Moderní technologie bezpilotních prostředků (UAV) – dronů společně s vysokým rozlišením pořizovaných fotografií, případně pomocí LiDAR senzorů umístěných na bezpilotních prostředcích umožňují sledovat tyto vedlejší projevy povrchového odtoku a zpětně tak pomocí modelů určovat možný podíl soustředěného odtoku na celkové bilanci.



Obr. 11: Ukázka formování odtoku a pohybu sedimentu pomocí UAV a.) uvolnění a transport ve vzniklých drahách soustředěného odtoku b) odnos a sedimentace v ploše povodí – lokalita Býkovice (autor Tomáš Laburda, fotoarchiv katedry K143)

Tyto projevy je možné detekovat na snímcích pořizovaných z letadel, využitelnost těchto dat byla testována na experimentálním pozemku v povodí Býkovického potoka (Báčová and Krása, 2016). Tyto popsání události byly pak dále využity pro validaci fyzikálního popisu rýhového odtoku.





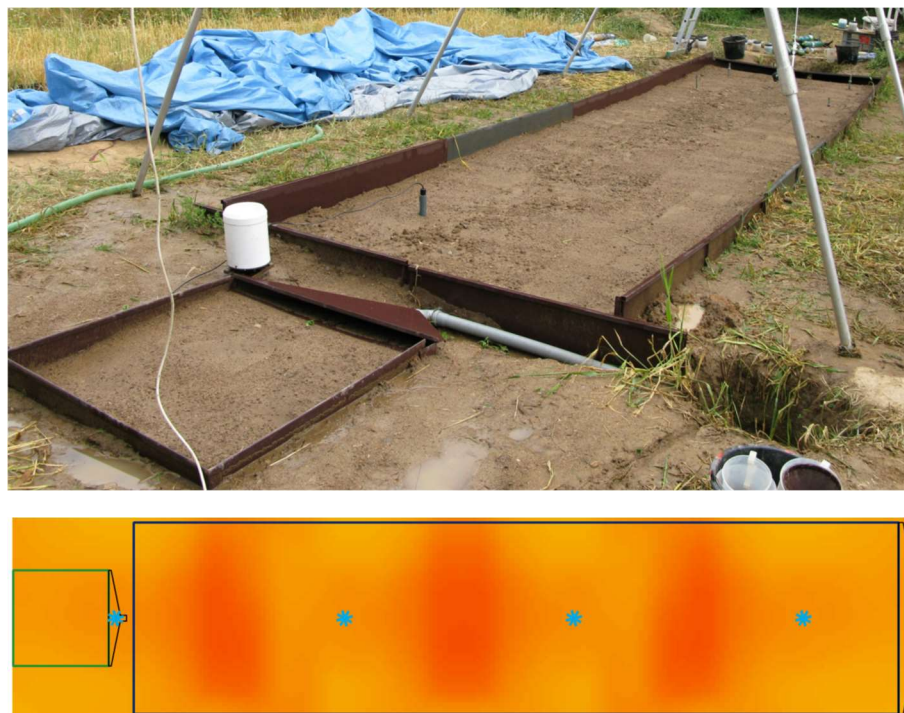
Obr. 12: Snímkování povrchy před deštěm (vlevo), po dešti (střed) a výsledný rozdílový model terénu (vpravo).

## 2.4 Vybrané ukázkové výsledky experimentálního měření

Na mobilním dešťovém simulátoru bylo provedeno přes 150 simulací, na laboratorním násobně více. Měření byla podpořena z několika výzkumných projektů a jedná se unikátní soubor měření. Metodická část měření různých veličin nejen k vazbě na povrchový odtok byla popsána v roce 2018 (Kavka *et al.*, 2018), a její modifikace vycházely z dalších nebo přesnějších metod měření sledovaných veličin. Ukázkové výsledky uvedené v této práci ukazují především potenciál a šíři možného využití dešťových simulátorů. Zde představené experimenty nebyly publikovány v impaktovaných publikacích. Výsledky z většiny provedených simulací jsou využity pro kalibraci a verifikaci fyzikálně založeného epizodního modelu SMODERP, kterému je věnována celá kapitola 3.

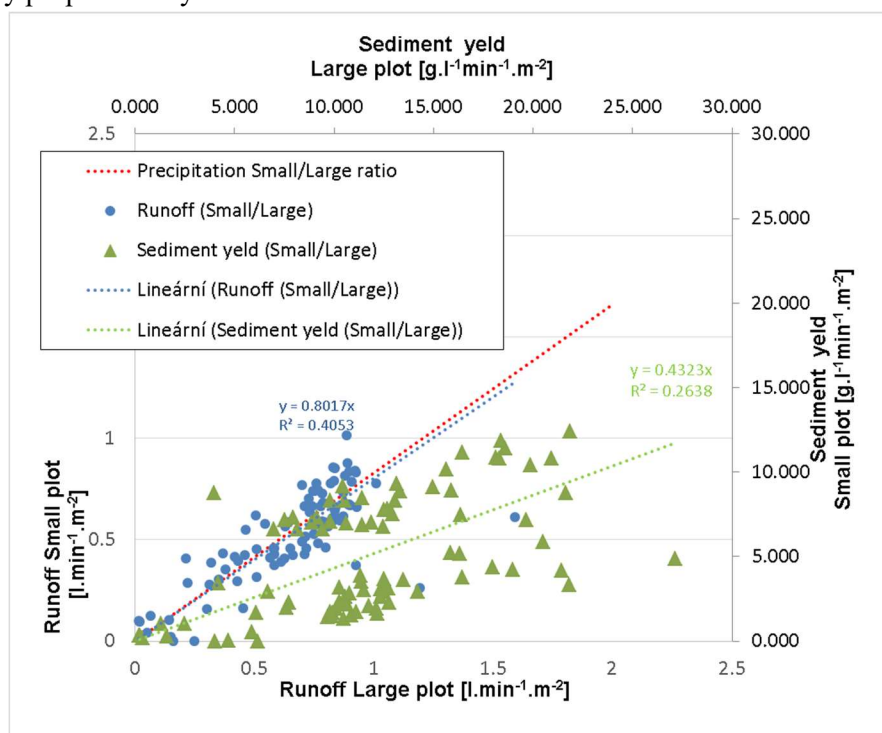
### 2.4.1 Vliv velikosti zadešťované plochy

Cílem experimentu bylo srovnání odtoku a také ztráty půdy ze dvou měřítek ploch. A ověřit předpoklad, že na malé zadešťované ploše, která je ve světě využívána daleko častěji než plochy větší (T. Iserloh *et al.*, 2013), dochází jen k některým z projevů povrchového odtoku. Kromě standardní a běžně využívané plochy 2 x 8 m, byla na stejném místě ve stejný čas umístěna i plocha 1 x 1 m. Obě plochy byly zadešťovány stejně. Základní parametry povrchového odtoku (počátek povrchového odtoku, hydrogram odtoku, objem odtoku) a eroze (ztráta půdy v čase, zrnitostní složení) byly měřeny současně na obou plochách.



Obr. 13: Fotografie (nahore) a umístění dvou ploch (dole) při srovnávacím experimentu. Modré body označují trysky dešťového simulátoru

Experiment byl prováděn současně stejnou RS na stejné lokalitě, za stejných povrchových podmínek (kultivovaný úhor). Odtokové parametry a výnos sedimentu byly měřeny (odebírány vzorky) ve stejných intervalech. Výsledky ukazují na vliv délky pozemku a ukazují na zvýšení ztráty půdy při plošné a rýhové erozi.



Obr. 14: Porovnání vlivu zadešťované plochy. Modré body jsou porovnání odtoku, zelené pak porovnání sedimentu (Kavka et al., 2015).

Z obrázku (Obr. 14) je patrné, že velikost plochy má vliv zejména na odnos sedimentu. Hydrologická odezva je po přepočtení na jednotkový odtok podobná, množství sedimentu je na malé ploše nižší. Množství odtoku je primárně dáno bilancí, zatímco množství smyvu je dáno unášecí silou povrchového odtoku.

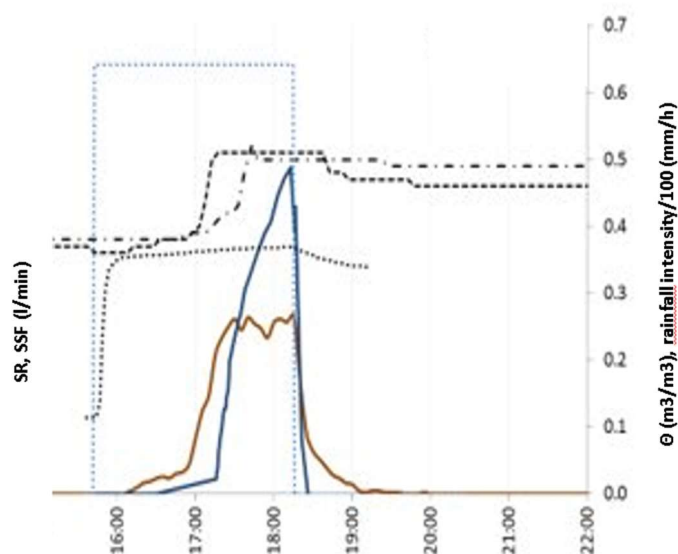
## 2.4.2 Vazba mezi povrchovým a mělkým podpovrchovým odtokem.

Odtokové procesy, jak byly popsány v předchozích kapitolách, jsou v interakci s dalšími procesy na povrchu i v půdě. Krom povrchového odtoku může být druhou složkou rychlého (přímého) odtoku mělký podpovrchový odtok a případné následné nasycení svrchní vrstvy půdy. V kulturní krajině se tento typ odtoku může vyskytovat zejména na půdách se zhutněným podložím (orná půda, uměle ohumusované svahy), kde může na rozhraní vznikat preferenční proudění. V experimentálním povodí Býkovice byla sestava měření na dešťovém simulátoru rozšířena tak, aby bylo možné sledovat i procesy mělké podpovrchové vrstvy. Před simulací byl do půdního profilu instalován drén na rozhraní ornice a podorničí, kde byl sledován mělký podpovrchový odtok.



Obr. 15: Instalace drénu na půdním rozhraní (foto: archiv katedry K143)

Bylo provedeno několik experimentů s různou intenzitou a dobou trvání srážek v rozmezí od 23 do 162 mm/hod. Sledován byl povrchový odtok, vlhkost půdy ve třech hloubkách a odtok na půdním rozhraní ornice a podorničí. Zatímco povrchový odtok se netvořil při nižších intenzitách, podpovrchový odtok byl pozorován při každé simulaci a začal relativně rychle.



Obr. 16: Graf průběhů plošného odtoku (modře), mělkého podpovrchového (hnědě) a změny vlhkosti ve třech hloubkách (černě). (Strouhal, Zumr and Kavka, 2016)

Obdobný pokus byl opakován na dalších dvou lokalitách, ale mělký podpovrchový odtok nebyl pozorován i když došlo k povrchovému odtoku. Což jen podtrhuje komplexnost sledované problematiky.

### 2.4.3 Efektivita geteoxtilních protierozních opatření pomocí stabilního dešťového simulátoru

Účinnosti těchto opatření – efektivita byla v minulosti testována různými způsoby. Za pomoci přírodních dešťů ji testoval například Álvarez (Álvarez-Mozos *et al.*, 2014). Vzhledem k nejistotám výskytu přírodních srážek jsou častěji využívány srážky uměle vytvořeného deště. Jako standardní metodu pro testování ji uvádí Sutherland (Sutherland, 1998).

Efektivita opatření byla testována pomocí stacionárního dešťového simulátoru. Jednotlivé plochy ve sklonech 22°, 30° a 34° (což odpovídá sklonům 1:2,5, 1:1,75 a 1:1,5) dle limitních požadavků na konstrukce násypů. Každá experimentální plocha byla ve směru svahu rozdělena na dvě stejné části. Vznikly tak dvě plochy o rozměrech 4x1 m na kterých mohly být provedeny párové testy na holé půdě a na půdě s aplikovanými RECP. Konkrétní zde publikované testované materiály jsou popsány v následující tabulce (Tab. 5).

Tab. 5: Popis konkrétních sledovaných materiálů

Zkratka	Obchodní název	Typ materiálu	Tloušťka [mm]	Gramáž [g/m <sup>2</sup> ]	Typ
<b>Biom</b>	Biomac-C	Kokosové vlákno + PP	9	450	přírodní
<b>En71</b>	Encamat 71	3D struktura PA	10	260	syntetické
<b>En72</b>	Encamat 72	3D struktura PA – z jedné strany plochá	18	400	syntetické
<b>K700</b>	K700	Kokosové vlákno	8	700	přírodní
<b>Ma08</b>	Macmat8.1	3D struktura PP	8	250	syntetické
<b>Ma18</b>	Macmat18.1	3D struktura PP	18	350	syntetické

Výsledky ze sekce bez RECP jsou považovány za referenční hodnotu, vůči které byly vztahovány výsledky z ploch s ochranným opatřením. Všechny plochy byly před každým zadešťovacím experimentem upraveny podle totožného schématu. Půdní povrch byl urovnán válcováním ručním válcem, což odpovídá technologickému postupu na staveništi, kde je povrch buď také válcován, nebo urovnán mechanizací. Na polovinu experimentální plochy byla v rastru 1 x 2 m přikotvena zvolená RECP a druhá polovina plochy byla ponechána bez ochranného opatření. Každá sada experimentů na jednom konkrétním RECP obsahuje sekvenci čtyř dílčích měření I – IV, která simulují různé počáteční stavy popsané v následující tabulce (Tab. 6).

Tab. 6: Přehled dílčích měření jedné sady experimentů

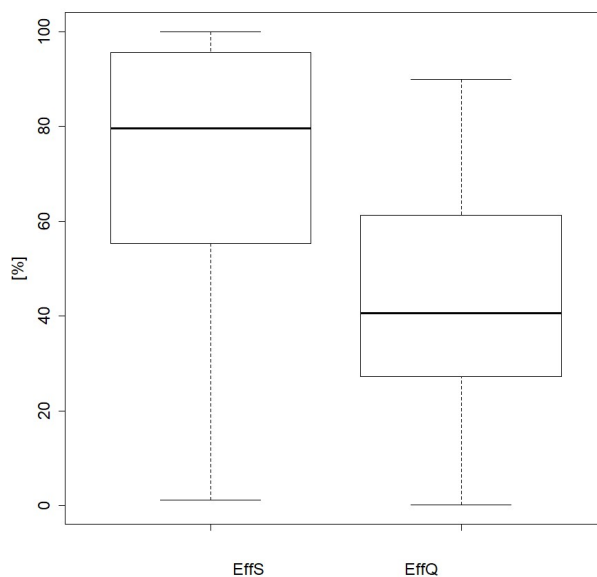
Stav	Název	Popis
I	suchý stav	počáteční podmínky simulující právě dokončenou stavbu.
II	mokrý stav	navazuje po 15minutové pauze na předchozí, kdy je simulována srážka do mokrého povrchu po dokončení stavby
III	opakovaný suchý stav	po čtrnácti denní pauze, simulace opakované události do již usazeného povrchu – suchý stav
IV	opakovaný mokrý stav	po čtrnácti denní pauze, simulace opakované události do již usazeného povrchu – mokrý stav

Stav č. I simuluje svah ihned po dokončení výstavby, stav II po první významné srážkové události, kdy je původně relativně hladký povrch erodován a dochází k tvorbě prvních erozních rýh. Zároveň je sledováno zapojení a funkčnost daného opatření.

Stavy č. III a IV simulují opakovanou srážkovou událost s odstupem cca čtrnácti dní, kterou může být svah zatížen. Sledována je efektivita opatření (Álvarez-Mozos *et al.*, 2014) na celkové množství sedimentu ( $E_{fTS}$ ) a povrchový odtok ( $E_{fRO}$ ):

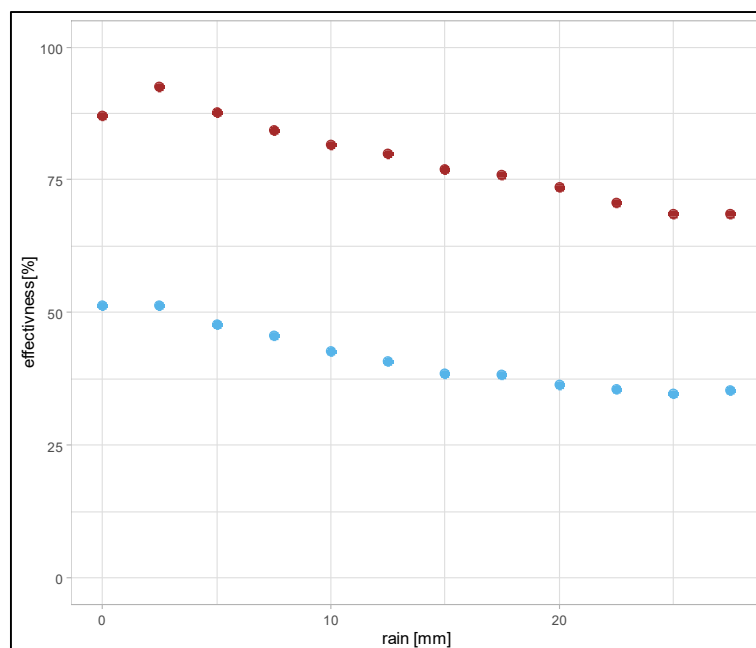
$$E_{ff}[\%] = \frac{\text{Hodnota jevu bez opatření} - \text{hodnota jevu s opatřením}}{\text{Hodnota jevu bez opatření}} * 100 \quad [21]$$

Bez ohledu na další vlivy je efektivita opatření významnější na smyv než na množství vody (Obr. 17). Na plochách s opatřením byl zaznamenán v průměru o 80 % nižší odnos sedimentu a o 40 % nižší povrchový odtok. Rozptyl vypočítaných hodnot efektivity je velmi vysoký, v extrémech se blíží na spodní hranici k nule a na horní hranici ke 100 %, což je způsobeno limitem metody stanovení efektivity, kdy na jedné z polovin ploch odtok již nastal a na druhé ještě odtok nenastal.



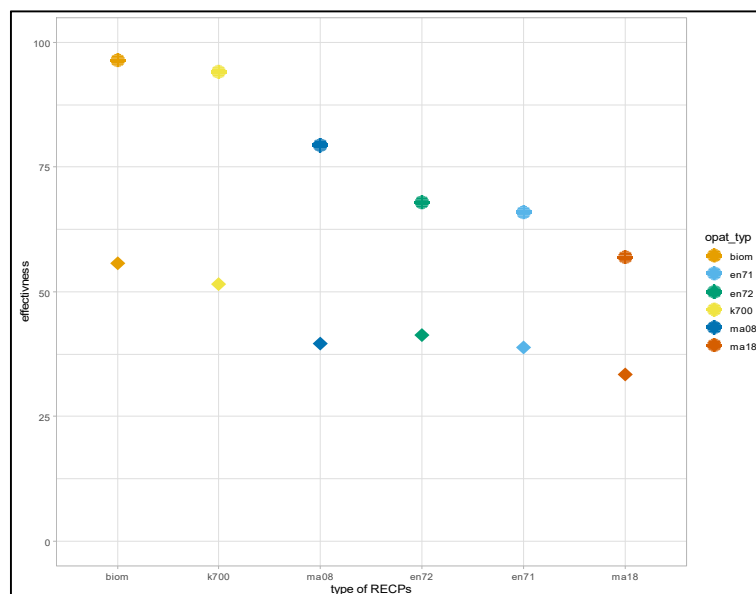
Obr. 17: RECPs hodnocená zvlášť pro sediment (EffS) a odtok (EffQ). EffS dosahuje v mediánové hodnotě téměř 80% u odtoku je efektivita 40 %.

Na dalších obrázcích (Obr. 18 až Obr. 20) je pak prezentován časový průběh efektivity a rozdílná efektivita jednotlivých materiálů a změny efektivity v čase a při opakovaných událostech. Na je znázorněn časový průběh efektivity. Efektivita zachycení sedimentu i snížení odtoku v čase klesá.



Obr. 18: Dynamika vývoje efektivity nezávisle na zvoleném materiálu v čase. Každý bod grafu představuje mediánovou hodnotu pro daný časový úsek. Z obrázku je evidentní, že snižování efektivity s délkou srážky klesá. A to jak při vlivu na odtok (modrá), tak sediment (hnědá).

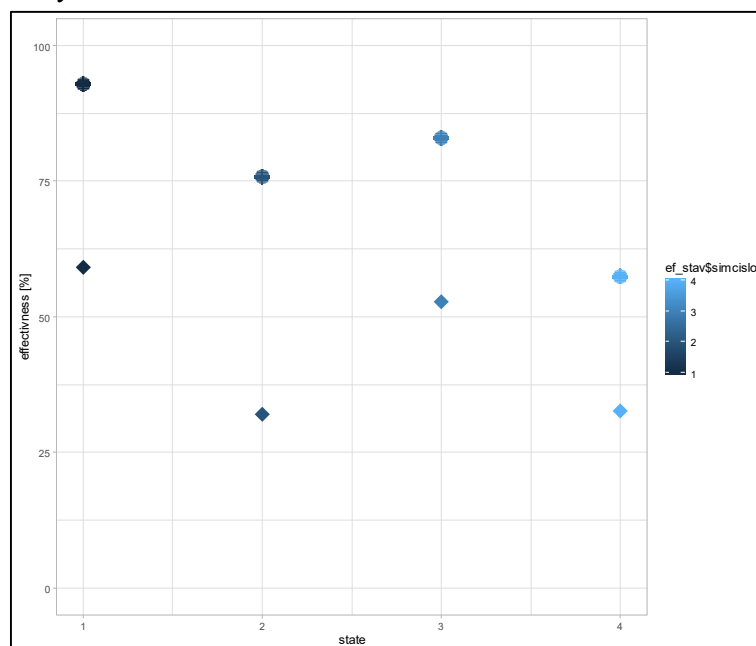
Efektivita jednotlivých materiálů je z hlediska ochrany rozdílná. Vyhodnocení efektivity jednotlivých testovaných RECP je uvedeno na následujícím obrázku. Konkrétní typy testovaných materiálů jsou uvedeny v tabulce.



Obr. 19: Rozdílná mediánová efektivita pro jednotlivé RECPs.  $E_{ffS}$  – kruh,  $E_{ffQ}$  – kosočtverec

Nejvyšší efektivita z hlediska ochrany půdy a snížení odtoku dosahují přírodní materiály Biomac a K700.

Testování každého materiálu proběhlo ve čtyřech navazujících experimentech. Dva navazující experimenty s 15minutovou pauzou (1 – suchá, 2 – mokrá) a po vyschnutí vzorku navazující další dvojice experimentů (3 -suchá, 4 mokrá). Pro jednotlivé stavy jsou zobrazeny mediánové efektivita.



Obr. 20: Efektivita RECPs pro různé počáteční stavy. Stavy 1 a 3 – suchý stav, 2 a 4 mokrá stav.  $E_{ffS}$  – kruh,  $E_{ffQ}$  – kosočtverec.

Z obrázku je patrné, že po proběhlé srážkové události je při následné události, která je po vyschnutí profilu opět suchá dochází k částečnému obnovení ochranného účinku opatření. Výše publikované výsledky vznikly rámci řešeného projektu TACŘ TH02030428 a byly částečně prezentovány pouze v periodických zprávách z příslušného projektu.

## 3 Vývoj a aplikace fyzikálně založeného modelu SMODERP

Název modelu je zkratkou původního názvu „Simulační Model povrchového ODtoku a Erozního Procesu“ (SMODERP). A jeho počátky sahají do osmdesátých let. Model lze využít pro výpočet hydrologicko-erozních procesů na jednotlivých pozemcích nebo na malých povodích. Výstupy z modelu jsou primárně určeny pro stanovení odtokových poměrů v ploše povodí a parametrů opatření pro snížení odtoku z povodí a erozního ohrožení zemědělské půdy na základě limitních hodnot tečného napětí a rychlosti proudění. Další aplikace modelu je při navrhování komplexnějších soustav sběrných a odváděcích prvků nebo suchých nádrží a poldrů. Model je jedním z doporučených modelů pro stanovení návrhových parametrů v praxi a je uveden jak v současných metodikách, tak i technických normách a doporučených standardech. Z hlediska kategorizace se jedná o fyzikálně založený plně distribuovaný dvourozměrný epizodní model (Kavka and Zajicek, 2013; Kavka, Jeřábek and Landa, 2022). Hlavními modelovanými procesy jsou povrchový odtok, retence a infiltrace (Philipovi infiltrační rutina).

### 3.1.1 Historický vývoj modelu SMODERP

Obdobně jako další fyzikálně založené odtokové modely (WEPP, EUROSEM, EROSION) byla základní koncepce modelu postavena v době počátku využití numerických řešení pomocí PC. V prostředí východní Evropy s drobným zpožděním, což bylo dáno technologickými rozdíly. Kapitola je částečně převzata z disertační práce autora (označeno uvozovkami) a text je doplněn o další vývoj.

#### **SMODERP 1D – Profilová verze modelu**

„Model je vyvíjen od konce osmdesátých let na Katedře hydromeliroací a krajinného inženýrství a od té doby byl několikrát modifikován. Základní principy a koncept modelu včetně odvození parametrů vychází z Holého (Holý, 1984). Jednotlivé verze jsou označeny, tak jak jsou označovány pro uživatele.

#### **MS DOS – Programovací jazyk Fortran**

##### **Verze 04.89**

První měření vedoucí ke stanovení odtokových parametrů na sklopném hydraulickém žlabu provedl M. Holý (Holý, 1984). Při zvolených průtocích na předem zvolených sklonech byla měřena hladina vody. Na základě těchto měření byl stanoven vztah pro výpočet průtoku na základě výšky hladiny. První verze modelu byla vyvinuta na ČVUT v roce 1989 pod vedením M. Holého. Byla napsána v programovacím jazyku FORTRAN. Zahrnovala v sobě procesy ovlivňující povrchový odtok a erozi. Submodel pro výpočet přípustné délky byl od submodelu pro výpočet odtokových charakteristik zcela oddělen a jednalo se spíše o dva nezávislé modely. Časový krok modelu byl zvolen v délce 0,2 minuty.

Před zadáním vstupních parametrů uživatel volil mezi submodelem 1 nebo submodelem 2. Zadávání probíhalo ve čtyřech krocích. V prvním kroku uživatel definoval morfologii svahu, kdy svah je definován dvojicí hodnot. První je vodorovná vzdálenost vrstevnic odečtená z mapy a druhou hodnotou je odlehlost (výšková vzdálenost) vrstevnic. Nevýhodou této verze modelu bylo, že odlehlost vrstevnic byla dána fixně a nebylo možné vkládat jakékoli jiné úseky než ty,



kteří leží přesně mezi dvěma vrstevnicemi. To odpovídalo tehdejšímu způsobu získávání dat ručním odečítáním z tištěné mapy 1: 10 000 nebo 1: 5 000.

Ve druhém kroku uživatel na takto definovaných vzdálenostech vrstevnic volil půdní druh. Vlastní hodnoty vstupních parametrů (hydraulická vodivost, sorptivita, součinitel drsnosti, potencionální intercepce, poměrná plocha listová) uživatel zadával v odděleném podprogramu. Protože tehdejší možnosti výpočetní techniky byly limitované hardwarovými prostředky, byl počet takto zadaných úseků omezen na deset. V případě delších svahů, kde bylo více než deset vrstevnic, byl uživatel nucen některé části svahu spojovat do delších úseků. Tímto vyhlazením profilu docházelo k úpravě morfologie.

Ve třetím kroku byl uživatelem volen typ vegetace pro jednotlivé úseky. Úsek lze definovat jako homogenní celek, který má konstantní sklon, půdní druh a typ vegetace. V posledním kroku uživatel zadával srážkové údaje. A to buď jako reálné srážky přímo změřené v terénu nebo návrhové srážky časově proměnné intenzity.

Doba vzniku modelu je již počítačovou historií, a tak i ovládání programu bylo poměrně náročné. Například vstupní parametry se musely při každém spuštění programu znovu zadávat, také neexistovala možnost vypočtené výsledky jakýmkoliv způsobem exportovat nebo ukládat. Používání modelu bylo tedy velmi komplikované. Proto byla vytvořena jeho aktualizovaná verze.

#### **Verze IV. I/11 – 96**

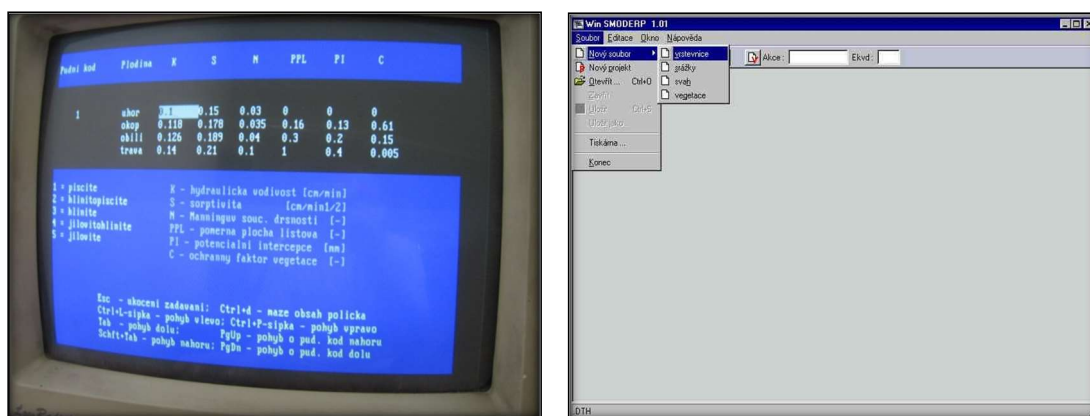
V devadesátých letech byla vytvořena druhá verze modelu. V ní se podařilo odstranit několik základních nedostatků z předchozí verze. Již bylo možné zpětně editovat dříve vypočtené pozemky. Také bylo možné ukládat a tisknout získané výpočty. Úpravy se však týkaly jen prostředí a vedly k usnadnění práce uživatele. Při této aktualizaci nedošlo k žádné úpravě vnitřních vztahů.

#### **Windows 1995 až XP**

##### **Programovací jazyk Visual Basic**

S příchodem nového prostředí Windows již nebylo možné předchozí DOS verzi spustit. Nejen proto byla od roku 1999 vyvíjena další generace modelu. Hlavní změnou byl posun od prostředí MS-DOS k uživatelsky přístupnějšímu prostředí Windows. Uživatelsky byl tento směr krokem vpřed. Způsob zadávání vycházel z jedné vstupní obrazovky, kde uživatel zvolil zadávání svahů, srážek, případně vegetace. Dalším kladem byla možnost zadat a vypočítat několik svahů najednou. Všechny tyto úpravy vedly ke zjednodušení a zrychlení práce. Postupně vzniklo celkem šest verzí modelu, které se částečně lišily vzhledem a dostupností obou submodelů.

Úpravy se týkaly především uživatelského rozhraní, výpočtové části se změny týkaly jen minimálně. Některé z nedostatků byly postupně odstraňovány, šlo většinou o úpravu drobných chyb a případně o zjednodušení práce pro uživatele. Výsledkem spojení verze pro MS-DOS, programově vycházející z jazyka FORTRAN, a Visual Basic je občasná nestabilita programu, která se projevuje zhroucením výpočtu (například při větším počtu úseků, při krátkých úsecích apod.).



Obr. 21: Ukázka obrazovky modelu SMODERP a) Verze IV. I/11 – 96 b) Windows 1.01.

V roce 1999 vznikla první verze s označením 1.01, ve které byla funkční pouze simulace erozní ohroženosti a stanovení přípustných délek. Tato verze byla aktualizována v roce 2001 pod označením verze 2.20. Především šlo o vylepšení uživatelského rozhraní. V roce 2001 byla také vytvořena zkušební verze 3.55, ve které byl zahrnut kromě simulace erozní ohroženosti i výpočet odtokových charakteristik. Tato verze byla v roce 2003 aktualizována zcela funkční verzí 4.01. Poslední verzí, která přímo vychází a navazuje na předchozí verze, má označení 5.1 a vznikla v roce 2010. Verze 5.1, na rozdíl od předchozích verzí, ve výsledcích neudává ztrátu půdy. Vedle základních odtokových charakteristik jsou uváděny také další charakteristiky (maximální výška hladiny, rychlost proudění a doba kulminace). V této verzi je aktualizován vztah pro výpočet průtoku a do této verze je možné doplnit rekalibrované odtokové parametry.

#### Programovací jazyk *Visual Fox Pro*

Od roku 2006 byla vytvářena nová verze modelu SMODERP, která reflektuje nové poznatky v nově napsaném zdrojovém kódu. V této verzi jsou zahrnuty nově stanovené rekalibrované odtokové parametry. Tato verze navazuje na předchozí verze použitím základních vztahů, a také cílovou skupinou uživatelů, převzato z disertační práce autora (Kavka, 2012).

#### SMODERP 2D – Plošně distribuovaná verze modelu

Další vývoj modelu byl řešen v rámci několika vědeckovýzkumných aktivit a ve spojení s celou řadou studentů bakalářského, magisterského i doktorského studia. Zásadní změnou je ukončení vývoje 1D řešení a přechod od profilové verze modelu k prostorovému řešení. Za současnou podobou modelu stojí celý kolektiv autorů. Model byl vyvíjen nejprve jako sada skriptů. Vývojovým prostředím se stal programovací jazyk Python, který je nativním programovacím jazykem komerčního prostředí ArcGIS a také volně dostupného prostředí GIS Grass, respektive QGIS. Z původní sady skriptů se postupně stal objektově orientovaný přístup odpovídající standardnímu kódu a tyto změny jsou nad rámec této práce a nejsou zde popisovány. Zásadní změnou je oddělení přípravy dat, která je závislá na konkrétním SW a samotného numerického řešení, které je řešeno v rámci numerických polí. Samotné verzování modelu je řešeno sdílením s otevřenou komunitou na platformě GitHub (<https://github.com/storm-fsv-cvut/smoderp2d>) a popisuje je Landa (Landa *et al.*, 2019).

Z hlediska technického řešení bylo třeba na rozdíl od profilové metody vyřešit několik zásadních problémů, které jsou spojeny s prostorovým řešením. Především se jedná o:

- směrování odtoku,
- numerickou stabilitu výpočtu,
- plošná vstupní data a jejich zpracování.

Technická řešení jsou kombinací knihoven geografických informačních systémů (GIS) a knihovny NumPy.

### **SMODERP Line – využití modelu přes webové rozhraní**

Technologicky odlišné řešení od SMODERP 2D je serverové zpracování výpočtu, ve kterém klient skrz webový prohlížeč nebo konkrétní službu spouští výpočet vzdáleně. Výpočetní jádro – numerické zpracování v NumPy polích je zachováno, upraveny jsou vstupní a výstupní data. Tento přístup byl implementován do verze modelu SMODERP Line přístupné na smoderp.fsv.cvut.cz. Jedná se upravený model pro určení ohroženosti povrchovým odtokem uměle vytvořených svahů na základě limitních rychlostí. SMODERP Line je tak v souladu s metodikou „Ochrana umělých svahů před erozí a stabilizace povrchové vrstvy“ (Kavka, P.; Vanicek, M.; Dufka, 2021). Vzhledem k charakteru těchto staveb je dostačující profilové řešení, protože se většinou jedná o přímé svahy a konstrukce jsou navrhovány rovněž v příčných řezech. Příklad využití tohoto nástroje je v kapitole 3.5.2.

## **3.1.2 Fyzikální báze modelu**

Principy řešení a popis jednotlivých rutin je popsán v manuálu k modelu SMODERP 2D, jehož je autor této práce spoluautorem. Následující text je výběrem z tohoto manuálu a upraven pro potřeby této práce.

„Výpočet je řešen v pravidelné rastrové síti. Prostorová diskretizace modelu je řízena rozlišením vstupního digitálního modelu terénu. V celém řešeném prostoru je po jednotlivých buňkách v každém časovém kroku provedena bilance vstupů a výstupů a následně je vypočteno odtoklé množství za daný časový úsek v buňce. V modelu jsou uvažovány dvě složky povrchového odtoku (a) plošný povrchový odtok a (b) soustředěný odtok v rýhách. Soustředěný odtok v rýhách je ve SMODERP 2D řešen explicitně. Vznik soustředěného odtoku je podmíněn překročením limitní rychlosti, resp. limitního tečného napětí (viz. kapitola 1.2).

Formálně se jedná o řešení metodou konečných diferencí s explicitně řešenou časovou diskretizací. V bilanční rovnici jsou řešeny tři základní složky:

- infiltrace do půdy  $I_{inf}$
- efektivní srážka  $ES$
- přítoklé a odtoklé množství  $I_{tot}$  a  $O_{tot}$ 
  - Odtoklé množství může být dále složeno ze tří základních typů odtoku:
    - plošného povrchového odtoku
    - soustředěného rýhového povrchového odtoku
    - odtoku hydrografickou sítí (vodním tokem nebo dočasnou hydrografickou sítí)

V ploše povodí jsou směry odtoků odvozeny na základě odtokových algoritmů. V místě úseků hydrografické sítě je veškerý tok směřován touto sítí.

### **Bilance zásob**

Základním řešeným vztahem je aktuální bilance celkové zásoby za daný čas.

$$\frac{dS}{dt} = I_{tot} - O_{tot} \quad [22]$$

kde:

$\frac{dS}{dt}$	změna zásoby
$I_{tot}$	aktuální celkový přítok
$O_{tot}$	je aktuální celkový odtok

Dle složek povrchového odtoku a dalších procesů lze  $I_{tot}$  a  $O_{tot}$  dále rozepsat na:

$$I_{tot} = Es + O^{in} \quad [23]$$

$$O_{tot} = Inf + O^{out} \quad [24]$$

kde:

$O^{in}$  přítok ze sousedních buněk

$O^{out}$  odtok z buňky

$Es$  efektivní srážka

$Inf$  infiltrace

Během řešení v modelu SMODERP 2D se operuje s veličinami v podobě výšky vodního sloupce (m) a intenzit ( $m \cdot s^{-1}$ ). Po vydělení rovnice velikostí buňky a provedení matematické operace dojdeme k rovnici pro plošný odtok ve tvaru:

$$h_{i,t}^{sur} = h_{i,t-1}^{sur} + \Delta t \left( es_{i,t} + \sum_j^m o_{j,t-1}^{in} - inf_{i,t} - o_{i,t}^{out} \right) \quad [25]$$

kde:

$h^{sur}$  výška hladiny na povrchu (m)

$es$  intenzita efektivní srážky ( $m \cdot s^{-1}$ )

$m$  buňky, odkud vtéká voda z buňky  $j$  do buňky  $i$

$inf$  intenzita infiltrace ( $m \cdot s^{-1}$ )

$o^{in}$  výška vtoku za čas ( $m \cdot s^{-1}$ )

$o^{out}$  výška odtoku z buňky za čas ( $m \cdot s^{-1}$ )

$\Delta t$  délka časového kroku

### Efektivní srážka

Srážka je hlavní příčinou srážko-odtokové události a erozního procesu. Model je epizodní a srážka se zadává v podobě konkrétní modelové srážky, které začíná prvním časovým krokem výpočtu, tzn. na začátku není nultá minuta. V modelu je zahrnut vliv intercepce, která je definována pomocí potenciální intercepce  $I_{POT}$  jako výška zachycené vody. Míra zachycení v každém časovém kroku je definována pomocí poměrné plochy listové  $I_{LAI}$ .

### Infiltrace

Jako infiltrační rutina byla pro model zvolena infiltrace dle Philipa (Philip, 1957), viz kapitola 1.2.4.2 v následujícím tvaru:

$$inf = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + K_s \quad [26]$$

kde:

$inf$  intenzita infiltrace ( $m \cdot s^{-1}$ )

$S$  sorptivita půdy ( $m \cdot s^{-1/2}$ )

$K_s$  nasycená hydraulická vodivost ( $m \cdot s^{-1}$ )

$T$  čas od začátku srážky (s)

Dle dokumentů k modelu byla Philipova infiltrační rovnice zvolena z důvodu relativně malého počtu vstupních parametrů. Tato zjednodušená rovnice má dva členy, nasycenou hydraulickou vodivost  $K_s$  a sorptivitu  $S$ . Tabelární průměrné hodnoty jsou součástí manuálu a je možné je určit i z dalších zdrojů případně z měření.

### Plošný povrchový odtok

Rovnice popisující plošný povrchový odtok vychází ze zjednodušení Saint-Venantových (SV) rovnic použitím teorie kinematické vlny. Použití tohoto přístupu předpokládá mělké povrchové proudění po dlouhém plochém povrchu. Za těchto podmínek lze u pohybové rovnice SV rovnic zanedbat lokální změny kinetické a potenciální energie a lokální zrychlení. Při tomto zjednodušení lze uvažovat povrchový tok jako ustálené proudění (Miller 1984).

Plošný povrchový odtok je poté možné řešit pomocí obecného mocninného vztahu:

$$q_{sur} = ah^b \quad [27]$$

kde:

$q_{sur}$	specifický plošný průtok ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
$a$	parametr rovnice plošného odtoku (-)
$b$	je parametr rovnice plošného odtoku (-)
$h_{sur}$	průměrná výška plošného odtoku

Parametr  $a$  byl na základě měření na sklopném žlabu a na pomoci dešťových simulací odvozen dle vztahu:

$$a = \frac{XI^Y}{n} \quad [28]$$

kde:

$X$	parametr rovnice plošného odtoku (-)
$Y$	parametr rovnice plošného odtoku (-)
$I$	sklon (-)
$n$	Manningův drsnostní součinitel ( $s \cdot m^{1/3}$ )

Parametry  $a$  a  $b$  respektive  $X$  a  $Y$  jsou odvozeny na základě měření (Neumann and Kavka, 2015). Z vyhodnocení vyplývá, že parametr  $b$  je závislý pouze na půdním druhu. Parametr  $a$  je závislý nejen na půdním druhu, ale také na sklonu svahu  $I$ . Do modelu je také zavedena Pokud je povrch půdy pokryt vegetací, je třeba provést korekci pomocí Manningova drsnostního součinitele.

### Určení vzniku rýh a soustředěný odtok v nich

Pro výpočet tečného napětí je v modelu SMODERP 2D zavedena rutina dle Schwab (Schwab, 1993):

$$\tau_{sur} = \rho gh_{sur}I \quad [29]$$

kde:

$\tau_{sur}$	tečné napětí ( $Pa$ )
$\rho$	hustota vody ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$g$	gravitační zrychlení ( $m \cdot s^{-2}$ )
$I$	sklon (-)
$h_{sur}$	průměrná výška plošného odtoku

Vlivem tekoucí vody je na povrch půdy vyvíjeno napětí. Za specifických podmínek je soudržnost půdy nižší než tečné napětí proudící vody na jejím povrchu a následně dojde k tvorbě rýhy.

Je několik způsobů, jak tento moment určit. V modelu SMODERP 2D jsou implementovány dva způsoby odvození: překročením kritického tečného napětí a překročením nevymílací rychlosti. Z obou odvození je určena kritická výška hladiny povrchového odtoku  $h_{crit}$ , po jejímž překročení začne vznikat rýha.

Přečet kritické nevymílací rychlosti na kritickou výšku hladiny je proveden dle vztahu:

$$h_{crit,v} = \frac{\sqrt{(b-1)nv_{crit}I^Y}}{X} \quad [30]$$

kde:

$h_{crit,v}$  je kritická výška hladiny ( $m$ )

$v_{crit}$  je kritická nevymílací rychlost ( $m \cdot s^{-1}$ )

Výpočet kritické výšky hladiny z tečného napětí je odvozen z rovnice (14) jako:

$$h_{crit,\tau} = \frac{\tau_{crit}}{\rho g I} \quad [31]$$

kde:

$h_{crit,\tau}$  je kritická výška hladiny ( $m$ )

$\tau_{crit}$  je kritické napětí ( $Pa$ )

Pro každou buňku výpočetní oblasti je vypočítáno  $h_{crit}$  pomocí odvození výše uvedených vztahů. Podmínka v modelu následně vybere menší z hodnot.

Kritická nevymílací rychlost a kritické tečné napětí jsou vstupní parametry modelu.

Výpočet soustředěného odtoku v rýhách, který je implementován v modelu SMODERP 2D, vychází z několika předpokladů.

- 1) Zavedením stejných zjednodušujících předpokladů výpočtu proudění jako v případě výpočtu plošného povrchového odtoku (teorie kinematické vlny) lze řešit tok rýhou jako ustálené proudění. Při ustáleném proudění se předpokládá sklon dna  $I$  paralelní se sklonem hladiny vody v rýze a neměnná drsnost v celé délce buňky. Rýha se předpokládá obdélníková v neměnném poměru mezi šířkou a hloubkou 3:2. Průtok v rýze je tedy vyjádřen pomocí Manningovy rovnice:

$$q_{rill} = v_{rill}A = A \frac{1}{n} R_{rill}^{2/3} I^{1/2} \quad [32]$$

kde:

$q_{rill}$  průtok v rýhách ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )

$v_{rill}$  rychlost proudění – rýhový odtok ( $m \cdot s^{-1}$ )

$A$  průtočná plocha ( $m^2$ )

$n$  Manningův koeficient drsnosti ( $s \cdot m^{-1/3}$ )

$R_{rill}$  je hydraulický poloměr v rýze ( $m$ )

- 2) V každé buňce, kde probíhá výpočet, může vzniknout pouze jedna přímá rýha bez ohledu na velikost buňky.

- 3) Soustředěný odtok vzniká v buňkách, kde dojde k překročení kritické výšky hladiny.
- 4) Objem vzniklé rýhy odpovídá nadkritickému objemu vody  $V_{rill}$ , který vychází ze vztahu:

$$V_{rill} = V_{to} - V_{crit} \quad [33]$$

kde:

$V_{rill}$	objem vody v rýze v daném elementu ( $m^3$ )
$V_{tot}$	celkový objem vody v elementu ( $m^3$ )
$V_{crit}$	objem vody do kritické hladiny ( $m^3$ )
$h_{crit}$	kritická výška hladiny ( $m$ )

5) Tvar příčného profilu rýhy je reprezentován obdélníkem s pevným poměrem stran rýhy. Velikost rýhy se zvětšuje, pokud je nadkritické množství větší než objem samotné rýhy tak, aby byl splněn předpoklad v předchozím bodě. Při zvětšování rýhy se tedy výška rýhy rovná výšce vodní hladiny v rýze. Pokud začne být nadkritické množství menší, než je objem rýhy, a dochází k prázdnění rýhy, zůstává velikost rýhy konstantní a v rýze dochází pouze k poklesu hladiny. Tento mechanismus ovlivňuje odtok změnou hydraulického poloměru, předpokládaného obdélníkového příčného profilu rýhy.

### Celková bilance

Pokud dojde k vzniku rýh, je rovnice bilance [25] rozšířena o členy vyjadřující soustředěný rýhový odtok a přítok z rýh sousedních buněk následovně:

$$h_{i,t}^{sur} = h_{i,t-1}^{sur} + \Delta t \left( es_{i,t-1} + \sum_j^m o_{j,t-1}^{in} - inf_{i,t-1} - o_{i,t-1}^{out} + \sum_k^n o_{rill,k,t-1}^{in} - o_{rill,i,t-1}^{out} \right) \quad [34]$$

kde:

$o_{rill}^{in}$	výška vtoku v rýze za čas ( $m \cdot s^{-1}$ )
$o_{rill}^{out}$	výška odtoku v rýze za čas ( $m \cdot s^{-1}$ )
$n$	jsou buňky, odkud vtéká voda z rýh do buňky $i$

### Odtok hydrografickou sítí

Použití modelu SMODERP 2D je orientováno také na navrhování technických opatření v ploše povodí a na drobných vodních tocích. Cílem je simulovat a navrhovat odtoky i v dočasné hydrografické síti, která je tvořena přirozeným nebo častěji umělým záměrným přerušením odtokové dráhy prvky tzv. dočasné hydrografické sítě.

Na rozdíl od výpočtu povrchového odtoku, který je prováděn v rastru buněk, se výpočet řeší v hydrografické síti po jednotlivých úsecích. Jeden úsek hydrografické sítě zpravidla leží na několika buňkách rastru. Bilance a odtok je počítán na celém úseku. Přítokem do tohoto úseku je přítok ze všech buněk, které vtékají do buněk tohoto úseku. Poté, co výpočet povrchového odtoku skončí, provede se ve stejném časovém kroku výpočet odtoků a vtoků mezi jednotlivými úseky a spočítá se nová výška hladiny a z ní odvozený odtok ve všech úsecích najednou.

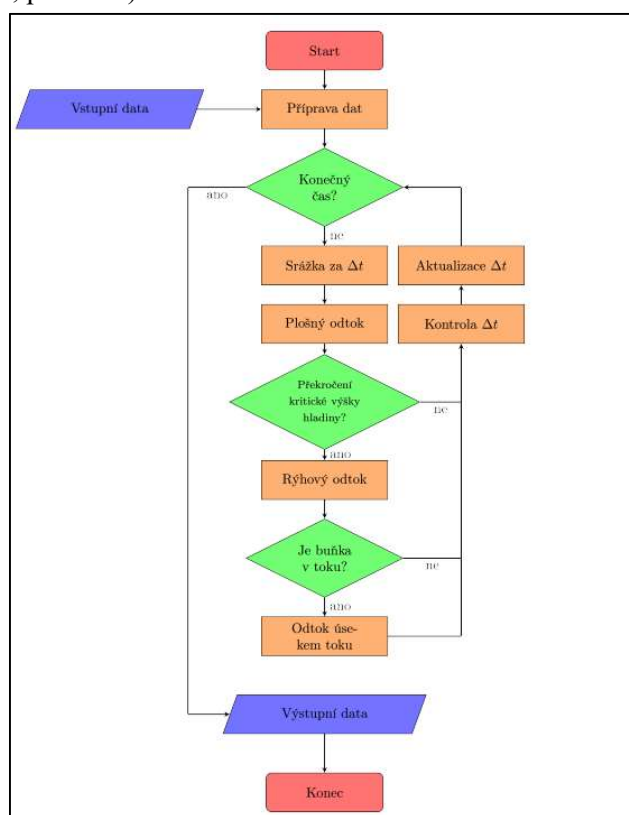
Proudění v úsecích je řešeno Manningovou rovnicí ve tvaru:

$$q_{stream} = A \frac{1}{n} R_{stream}^{2/3} I^{1/2} \quad [35]$$

kde:

- $q_{stream}$  průtok v otevřeném korytě ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )  
 $A$  průtočná plocha ( $m^2$ )  
 $n$  Manningův drsnostní součinitel ( $s \cdot m^{1/3}$ )  
 $R_{stream}$  je hydraulický poloměr v otevřeném korytě ( $m$ )

Pro vlastní výpočet je třeba zadat typ a příčný profil daného úseku. Délka úseku a jeho sklon jsou převzaty z liniové vrstvy a z digitálního modelu terénu. Protože je model určen pro malá povodí, jsou v modelu předpokládány pouze základní tvary příčných profilů (trojúhelník, obdélník, lichoběžník, parabola).“.Převzato a zkráceno z manuálu k modelu SMODERP.

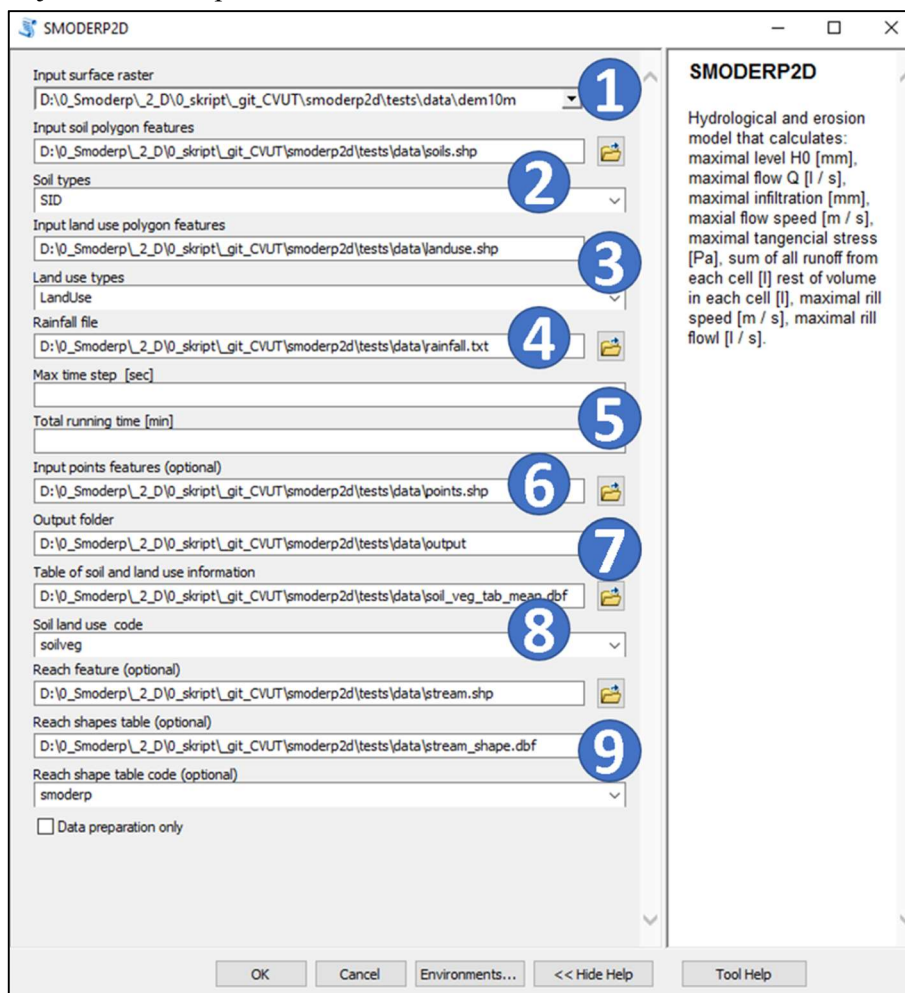


Obr. 22.: Tok programu SMODERP 2D - převzato z manuálu k programu (Návod programu SMODERP, 2022)



## 3.2 Vstupy modelu

Model pracuje se vstupy popisující topografii území, vlastnosti půd, využití území, geometrii a charakteristiky vodních toků a dočasné hydrografické sítě. Dále pak pracuje s nutnými vstupy pro chod modelu a nutnými řídicími tabelárními vstupy. V této kapitole je uveden přehled vstupních dat a jejich charakteristika a datový typ. Vstupy jsou pak vizualizovány na příkladu využití modelu. Odvozením některých z těchto dat pro celé území ČR, a zajištění jejich dostupnosti je věnována kapitola 4.



Obr. 23: Ukázka rozhraní nástroje SMODERP 2D v prostředí ArcGIS, popis jednotlivých polí je uveden dále

Navazující text popisu vstupních dat pochází z diplomové práce studenta Jana-Františka Kubáta, jemuž byl autor této práce vedoucím. Text byl doplněn v místech, kde to vyžaduje návaznost textu této habilitační práce.

### Digitální model terénu (1)

„Rastr digitálního modelu terénu DMT nebo reliéfu (DMR), či anglicky DTM (Digital Terrain Model) nebo DEM (Digital Elevation Model), reprezentuje souvislou morfologii určité části Země. DMT rastr je složen z jednotlivých buněk obsahujících informace o elevaci terénu. Velikost buněk se liší v závislosti na velikosti zobrazovaného území. Pro účely modelu SMODERP 2D by minimální velikost buněk měla být 2 metry, optimum je však 5 metrů a více.

## **Půdní data (2)**

Vstupem do modelu je vektorová vrstva s vymezením jednotlivých půd. Pro určení charakteristik je nutné, aby atributová tabulka dané vrstvy obsahovala identifikátor půdního typu. Identifikátor odkazuje na půdní charakteristiky, které jsou ale uloženy v samostatné tabulce.

## **Data využití území (3)**

Obdobně jako u půdních dat je vstupem vektorová vrstva popisující využití území. Rozumnou volbou podrobnosti pro účely hydrologického modelování je spojení vstupních vrstev do přiměřeného množství kategorií.

## **Srážková data (4)**

Dalším vstupem je soubor obsahující srážková data. Srážky se zadávají jako textový soubor se dvěma sloupci. V levém sloupci je časový interval v minutách, v pravém sloupci je kumulativní úhrn za daný časový interval v milimetrech. Srážková data – návrhové srážky jsou klíčovým vstupem do modelu a je jim věnována celá kapitola (4.1) této habilitační práce.

## **Časový krok a doba výpočtu (5)**

Časový krok modelu  $\Delta t$  je hodnota v sekundách. Jako vstupní parametr se zadává maximální časový krok. Tento časový krok je rovněž počáteční časový krok. Časový krok  $\Delta t$  je v průběhu výpočtu upravován podle Courant-Friedrich-Lewy (*CFL*) podmínky tak, aby byla zachována numerická stabilita. Délka časového kroku závisí na rychlosti povrchového odtoku a na velikosti prostorového kroku (velikosti buňky DMT). Maximální časový krok záleží na požadovaném detailu výstupních dat, zejména při dotoku srážkové epizody, kdy jsou již rychlosti proudění nižší a kdy by *CFL* kritérium povolovalo příliš velký časový krok. Implementace Courant podmínky je blíže popsána v manuálu k modelu SMODERP 2D.

## **Pozorované body zápisu výstupů (6)**

Jedná se o volitelnou bodovou vektorovou vrstvu. V těchto bodech se ukládají časové řady počítaných veličin (hydrogramy).

## **Adresář s umístěním výstupů (7)**

Jedná se o adresář výstupů, kam jsou ukládány výstupy z modelu, které jsou samostatně rozebrány v následující kapitole.

## **Tabulka charakteristik (8)**

Další povinný vstup je tabulka, která obsahuje hodnoty jednotlivých parametrů, jež jsou detailně popsány v manuálu k modelu SMODERP 2D. Na tuto tabulku se odkazují identifikátory půdních druhů a využití území definované pro jednotlivé polygony v atributových tabulkách vektorových vstupů. Tabulka charakteristik je externím zdrojem do modelu, hlavním důvodem je transparentnost výpočtu a možnost uživatelům jednoduše měnit charakteristiky vstupních dat, podle jejich vstupů. Geometrie jednotlivých prvků je řešena v GIS prostředí. Prvkům se shodnými parametry půd a vegetace jsou přiřazovány parametry této řídicí tabulky.

## **Hydrografická síť (9)**

Hydrografickou sítí jsou myšleny nejen vodní toky, ale i prvky dočasné hydrografické sítě jako jsou příkopy, průlehy, cesty s příkopy apod. Výpočet v modelu probíhá po jednotlivých úsecích pomocí Manningovy rovnice pro výpočet průtoku. Prostorové umístění jednotlivých úseků je definované pomocí liniové vrstvy. Charakteristiky jednotlivých úseků jsou definovány v samostatné tabulce“ (Kubát, 2022).

Tab. 7: Příklad tabulky charakteristik vstupující do výpočtu modelu SMODERP, oblastem se stejnou charakteristikou půdy a vegetace (soilveg) jsou přiřazovány charakteristiky parametrů

Označení kombinace půdy a vegetace soilveg	Nasyčená hydraulická vodivost Ks	Sorbtivita S	Mannigova drsnost n	Povrchová retence ret
CCOP	6.944E-06	2.453E-04	0.04	5.0
CCOZ	1.944E-06	4.746E-05	0.12	8.0
CCZ	1.944E-06	4.746E-05	0.08	8.0
CLLP	1.944E-06	4.746E-05	0.09	10.0
FFLP	2.778E-06	4.746E-05	0.09	10.0
FFOP	2.778E-06	4.746E-05	0.04	5.0
FFOZ	2.778E-06	4.746E-05	0.12	8.0
FFS	2.778E-06	4.746E-05	0.08	8.0

Označení kombinace půdy a vegetace soilveg	Poměrná plocha listová ppl	Parametry odtokové rovnice			Limitní tečné napětí tau	Limitní rychlost v
		b	X	Y		
CCOP	0.13	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245
CCOZ	0.40	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245
CCZ	0.40	1.8165	8.8133	0.3661	10.66	0.245
CLLP	0.90	1.7025	10.6706	0.6028	11.50	0.264
FFLP	0.90	1.7025	10.6706	0.6028	11.50	0.264
FFOP	0.13	1.7025	10.6706	0.6028	11.50	0.264
FFOZ	0.40	1.7025	10.6706	0.6028	11.50	0.264
FFS	0.40	1.7025	10.6706	0.6028	11.50	0.264

Jednotlivým úsekům vodního toku jsou přiřazovány charakteristiky obdobně jako v případě charakteristik pro plochy. Tabulka může vypadat následujícím způsobem.

Tab. 8: Příklad tabulky charakteristik vodních toků, úsekům vodních toků se stejnou charakteristikou (SMODERP) jsou přiřazovány charakteristiky koryta a základního odtoku. Nulový základní odtok se používá pro prvky dočasné hydrografické sítě (přikopy, průlehy atp.)

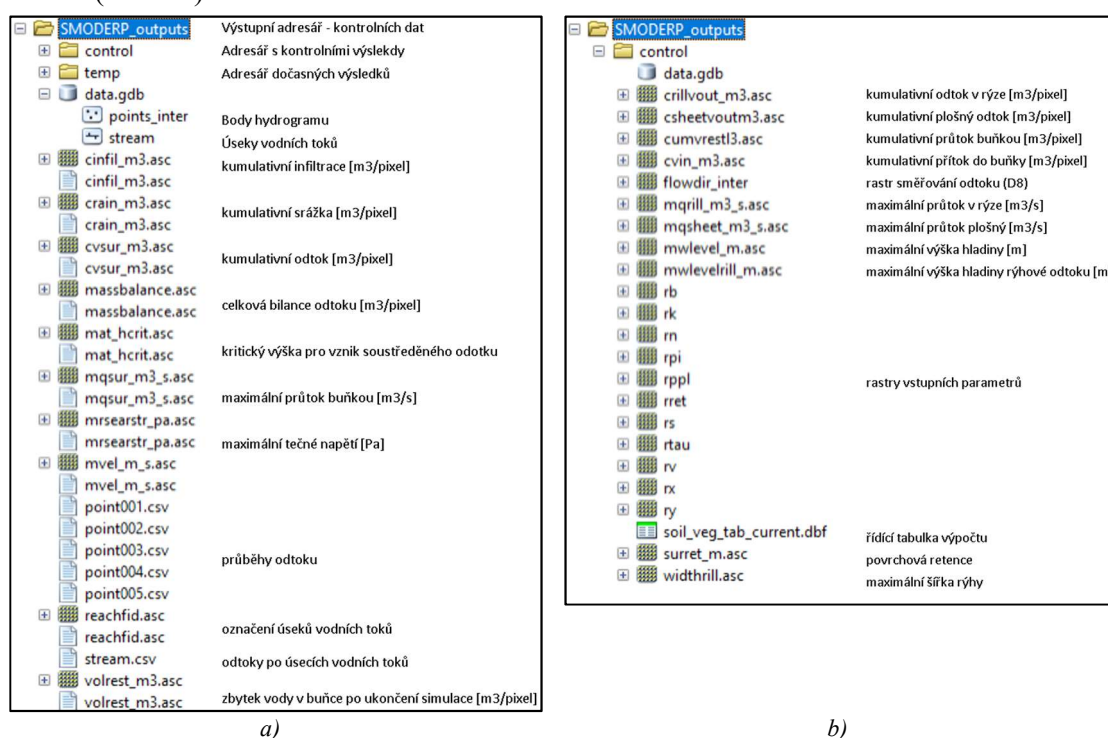
Kód smoderp	Tvar prvku shapetype	Šířka b	Sklon m	Drsnost n	Základní průtok q365	Poznámka note
shape0	1	1.1000	2.1000	0.0300	0	default
rectangle1	0	0.2000	0.0000	0.0350	0	
trapezoid1	1	0.2000	2.0000	0.0350	0	
triangle1	2	0.0000	2.0000	0.0300	0	
parabola1	3	0.7000	0.0000	0.0300	0	b.surface

### 3.3 Výstupy modelu

Model zpracovává celou řadu výsledných dat tak, aby byla využitelná pro navrhování opatření v krajině a lze je rozdělit do dvou základních skupin: a) průběžně ukládané výsledky v uživatelem definovaných bodech a b) celkové výsledky většinou v rastrové formě.

Výsledky je také možné rozdělit do třech skupin: a) základní výsledky, které jsou dostupné běžným uživatelům a obsahují pouze důležité celkové výsledky, b) podrobné výsledky, které popisují pro většinu aplikovaných výsledků nepodstatné informace (jedná se například o rozdělení modelovaného množství v rýhách a plošném odtoku atp.), c) dočasné soubory, které obsahují mezivýsledky při zpracování vstupních dat a slouží k detekci případných chyb ve vstupních datech.

Adresářová struktura výsledků s popisem jednotlivých výsledků je na následujícím obrázku (Obr. 24).



Obr. 24: Struktura výstupního adresáře modelu SMODERP 2D v prostředí ArcGIS a) hlavní výstupní adresář, b) kontrolní parametry výpočtu

Mezi základní výsledky patří maximální nebo kumulativní hodnoty vybraných veličin:

- kumulativní infiltrace (cinfil\_m3.asc) – celkové množství infiltrované vody,
- kumulativní srážka (crain\_m3.asc) – celkové množství srážky,
- kumulativní povrchový odtok (cvsur\_m3.asc) – celkové množství odtok,
- maximální povrchový průtok (mqsur\_m3\_s.asc). – maximální průtok v daném bodě,
- časové průběhy veličin ve sledovaných bodech.

Vypsané veličiny v bodech jsou závislé na typu odtokového procesu. Pokud je bod v buňce úseku hydrografické sítě, vypisují se hodnoty tohoto celého úseku relevantní pro proces odtoku ve vodním toku. Pokud je bod v ploše povodí udává model hodnoty povrchového (plošného a rýhového) odtoku pro příslušnou buňku. Výstupy jsou lépe zřetelné z ukázkové aplikace modelu, který je uveden v kapitole 3.5.

## 3.4 Kalibrace a validace modelu

Struktura modelu a popisované vztahy jsou uvedeny v předchozích kapitolách a popisují je vztahy na stranách 49 až 54. Principy kalibrace a využití měření odtoku z dešťových simulací jsou uvedeny v disertační práci autora (Kavka, 2012), kde bylo provedeno primárně odvození parametrů pro plošný odtok. Z hlediska bilance – vzniku odtoku, jsou kalibračními parametry infiltrační rovnice a povrchová retence. Tyto parametry určují jak celkový objem odtoku, tak dobu výtopy, respektive začátku povrchového odtoku. V odtokových vztazích popisujících plošný odtok, jejichž základem je popis proudění kinematickou vlnou jsou kalibračními parametry mocniny výšky( $b$ ) a sklonu ( $Y$ ) v rovnici č. [27]. Tyto parametry určují rychlost proudění a tím i charakter odtoku. Tyto parametry jsou empiricky odvozené na setu několika stovek měření pomocí dešťového simulátoru. Z hlediska vzniku soustředěného odtoku v rýhách je klíčovým parametrem kritická výška hladiny, při které je překonána buď limitní rychlost proudění nebo maximální tečné napětí. Tento parametr je možné zpřesňovat na základě detekce rýh buď pomocí dešťových simulací nebo z dat monitoringu erozních událostí například pomocí leteckého snímkování ať pilotovaného nebo pomocí bezpilotních prostředků.

Ideální je kombinace výše uvedených přístupů. Kombinací výsledků měření pomocí mobilního dešťového simulátoru, záznamů z dlouhodobého monitoringu na odtokových plochách a dat DPZ je popsáno v publikaci autora s názvem „SMODERP2D-Sheet and Rill Runoff Routine Validation at Three Scale Levels“ (Kavka, Jeřábek and Landa, 2022), který je přílohou této práce. Pro kalibraci modelu jsou využity primárně data z mobilního dešťového simulátoru. V představovaném článku jsou využita jen data změřená na příslušné lokalitě. Dále jsou využity data z dlouhodobého monitoringu eroze a odtoku v povodí Býkovice a v neposlední řadě jsou pak použita data leteckého snímkování pro ověření implementace rýhového odtoku.

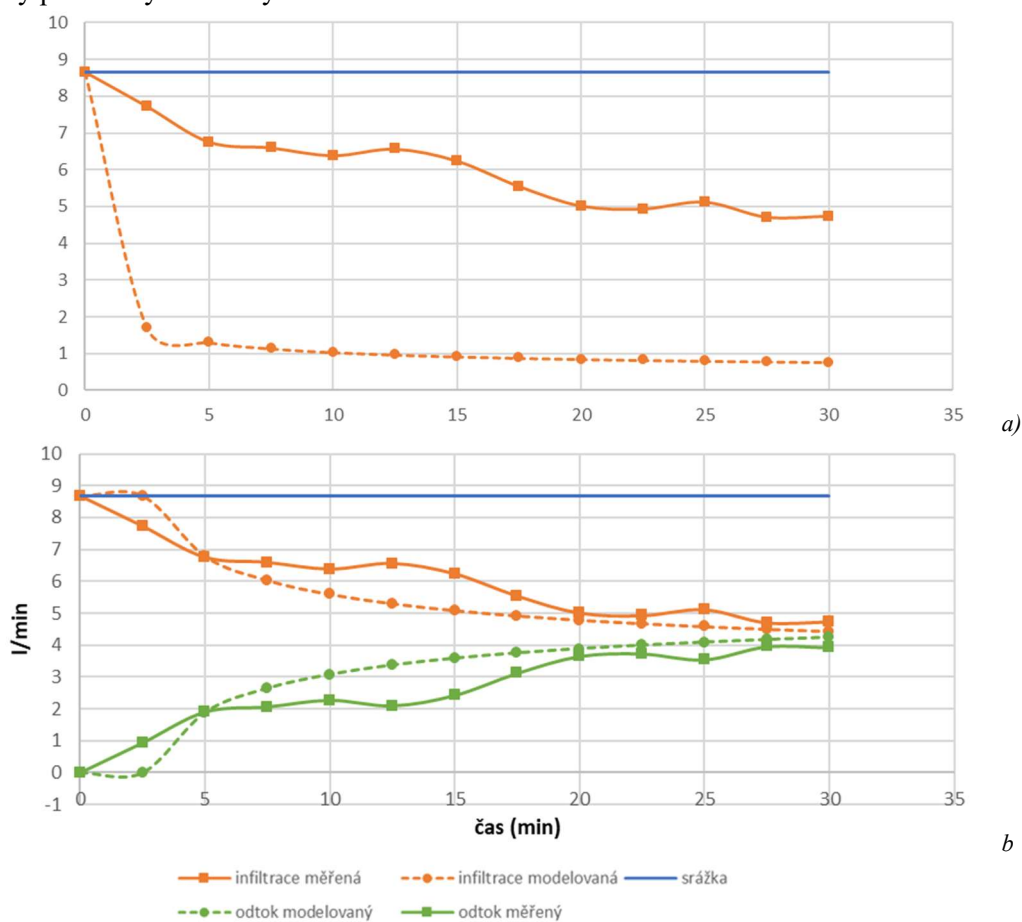
V další části práce představena ukázka validace modelu pro aplikaci na nezemědělských umělých strmých svazích, tedy mimo rozsah sklonů měření, na které byl model původně modelován. A dále je prezentováno porovnání výsledků citlivostní analýzy více modelů, což je možné považovat za formu validace. Výsledky modelu jsou zasazeny do kontextu dalších aplikačně využívaných nástrojů.

### 3.4.1 Validace modelu pro sklony umělých svahů

Parametry modelu byly kalibrovány na svazích se sklonem odpovídající zemědělské krajině do cca 15%. Statisticky odvozené parametry kinematické rovnice pro plošný odtok tak nebyly odvozeny pro větší sklony. Ověření platnosti modelu pro sklony umělých svahů (nad 20%) bylo provedeno na základě experimentů na dešťových simulátorech v rámci řešeného projektu TA ČR TH02030428. Ověření funkčních vztahů je prováděno obdobně jako pro menší sklony a ve dvou krocích. V prvním kroku je řešena bilanční část výpočetního modelu tak, že jsou hledána optimální řešení pro parametry infiltrační rovnice a povrchové retence tak, aby byla splněna podmínka co nejmenšího rozdílu mezi celkovým povrchovým odtokem a zároveň začátkem povrchového odtoku mezi měřenými a modelovanými daty. Ve druhém kroku jsou hledány parametry kinematické rovnice, tak, aby byla splněna podmínka průběhu průtoku a změřené rychlosti. Z předchozích zkušeností řešitelského kolektivu ČVUT v Praze se osvědčila metoda měření pomocí viditelného barviva přidávaného do odtoku. Jako barvivo se používá potravinářská látka Brilliant Blue, která málo sorbuje na půdní částice.

Na dešťovém simulátoru ČVUT v Praze a na stacionárním simulátoru (viz kapitola 2.2.1) bylo provedeno více než sto testů na sklonech přes 20 % s různými typy geotechnických opatření. Pro validaci byla použita zjednodušená verze modelu SMODERP převedená do tabelárního řešení, která je dostatečnou reprezentací modelu. Takto připravený model pracuje v rozlišení  $1 \times 1$  m. Dále je ukázán postup validace – ověření funkčnosti tohoto fyzikálního přístupu, který je naznačen na následující sekvenci obrázků modelovaného příkladu. Tento konkrétní příklad měření proběhl na stacionárním dešťovém simulátoru na ploše o sklonu  $30^\circ$  s intenzitou deště 130 mm/h na vzorku půdy, která je zaříděna jako jílovitá hlína.

V úvodní fázi před kalibrací jsou do modelu vloženy průměrné manuálové hodnoty pro výpočet infiltrace a povrchové retence. Kalibrace je naznačena na následujícím obrázku (Obr. 25), kde je znázorněno hledání optimálního řešení ve dvou krocích. V prvním kroku je znázorněna bilanční část rovnice, kdy je určován čas výtopy a celkový objem, a ve druhém kroku jsou pak určeny parametry odtokových vztahů.



Obr. 25: Porovnání měřených a modelovaných veličin a) před validací bilanční části rovnice, b) po provedeném hledání parametrů.

K hledání optimálního řešení je používána metoda nejmenších čtverců. Nejoptimálnější nalezené řešení pro dané měření v porovnání se změřenými veličinami je uvedeno v následující tabulce (Tab. 9). Druhým krokem je hledání optimálního řešení pro odtok. Tvar odtokového hydrogramu, který zobrazuje průtok, se příliš neliší od původního. Zobrazovaného průtoku je možné dosáhnout různou kombinací parametrů výšky hladiny a sklonu. Klíčovým parametrem je změřená rychlost odtoku. Dopady změn parametrů na odtok jsou lépe patrné z následujících tabulek (Tab. 9 a Tab. 10).

Tab. 9: Tabulka manuálových parametrů pro hlinitou půdu a parametrů po validaci.

	<b>Ks</b> [m/s]	<b>S</b> [m/s <sup>0.5</sup> ]	<b>Ret</b> [mm]	<b>n</b> [s/m <sup>1/3</sup> ]	<b>b</b> -	<b>X</b> -	<b>Y</b> -
<b>původní parametry</b>							
<b>jílovitá hlína</b>	0,000001666	0,000129099	0,2	0,02	1,666	11,2571	0,6358
<b>parametry po validaci bilance</b>	0,00001198	0,00054992	0,2	0,02	1,666	11,2571	0,6358
<b>parametry po validaci odtokových parametrů</b>	0,00001198	0,00054992	0,2	0,02	1,6764	10	0,4462

V následující tabulce je porovnán měřený a modelovaný objem odtoku a rychlost v 15. a 25. minutě experimentu.

Tab. 10: Porovnání měřených a modelovaných veličin.

<b>Čas od začátku simulace [min]</b>	<b>Rychlost [m/s]</b>			<b>Objem odtoku [l]</b>		
	<b>Změřená</b>	<b>Manuálové hodnoty</b>	<b>Po validaci</b>	<b>Změřený</b>	<b>Manuálové hodnoty</b>	<b>Po validaci</b>
<b>15</b>	0,169	0.271	0,152	32,01	32.04	31,55
<b>25</b>	0,161	0.28962	0,162	87,83	91.51	90,98

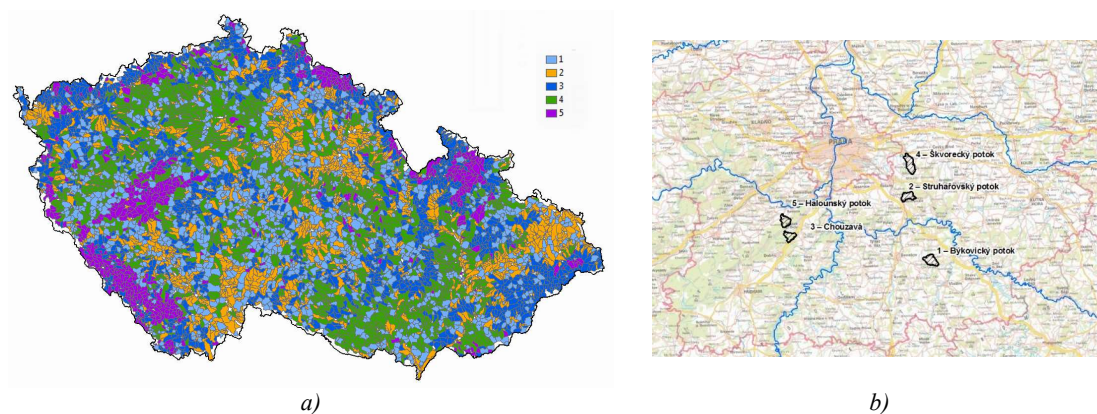
Z předchozí tabulky je patrné, že pro validaci modelu na měřená data je důležité znát jak parametr průběhu odtoku, tak alespoň bodově hodnotu rychlosti proudění. Z hlediska dynamiky odtoku je kalibrační parametr změřené rychlosti zásadní. Pozměněné parametry odtokové rovnice je možné do modelu zahrnout při přípravě dat úpravou tabulky charakteristik (viz Tab. 7).

### 3.4.2 Porovnání chování modelu s jinými modely a citlivostní analýza na vstupy do modelu

Porovnání výsledků modelu SMODERP 2Ds jinými využívanými modely vychází na jedné straně z motivace porovnat výsledky aplikační a návrhovou praxí využívané metody CN křivek a také z motivace porovnat výsledky komerčně zavedeného modelu, který pracuje s jinou formou popisu infiltrace. Pro porovnání s modelem SMODERP 2D byly vybrán fyzikální model MikeSHE a konceptuální HEC-HMS založený na široce používané metodě SCS-CN. Protože se jedná z hlediska výpočetních metod o odlišné typy modelů, lišily se i počty simulovaných scénářů a způsob jejich odvození ze vstupních dat. Dále uvedené výsledky vychází ze závěrečné zprávy projektu QJ1520265, kterého byl autor této práce hlavním řešitelem a výsledky byly také částečně publikovány v českém odborném časopise VTEI (Strouhal, Kavka and Weyskrabová, 2018).

#### Výběr srovnávacích povodí

Ve všech vybraných nástrojích (HMS, MikeSHE, SMODERP) byly sestaveny modely pěti charakteristických povodí. Tato povodí byla vybrána jako charakterističtí zástupci tříd povodí vzešlých z klasifikace povodí IV řádu (Strouhal *et al.*, 2017). Povodí byla zvolena jako zástupci jednotlivých tříd (viz následující obrázek a tabulka jejich charakteristik). Cílem klasifikace a následného výběru reprezentativního povodí je zahrnutí variability geomorfologických charakteristik povodí jako možné variability odezvy na příčinou srážku.



Obr. 26: a) rozdělení povodí IV. řádu do tříd podle podobnosti charakteristik, b) poloha vybraných charakteristických povodí Býkovického potoka (1), Struhařovského potoka (2), Chouzavě (3), Škvoreckého potoka, (4) Halounského potoka (5) (podklad: WMS – ZM ČÚZK®)

Charakteristiky vybraných reprezentativních povodí jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 11).

Tab. 11 Reprezentativní povodí a jejich základní charakteristiky

Název toku	Plocha (km <sup>2</sup> )	Nadm. výška	Sklon (%)	CN II	Les(%)	Tvar	HRS	Zrnitost půd
<b>Býkovický p.</b>	7.75	344–515	10,6	76.4	20 %	vějířovité	střední	pH, hP
<b>Struhař p.</b>	5.79	347–515	11,0	72.7	30 %	protáhlé	vysoká	H, pH, hP
<b>Chouzavá</b>	4.86	360–504	8,6	55.8	80 %	přechodný	střední	H
<b>Škvorecký p.</b>	9.36	249–420	5,7	77.4	30 %	protáhlé	nížká	hP, pH
<b>Halounský p.</b>	6.09	245–578	12,8	58.5	70 %	přechodný	nížká	hP, pH

### Zdrojová data a tvorba výpočetních scénářů

Modely těchto povodí byly zatíženy 30 variantami srážkových hyetogramů, jednotlivé varianty sestávaly z kombinací 6 bezrozměrných návrhových hyetogramů aplikovaných na 5 celkových úhrnů s dobami opakování 2, 5, 20, 50 a 100 let. Návrhové úhrny srážek za 6 hodin byly získány metodou redukce denních úhrnů a pohybovaly se v rozmezí od 29 do 88 mm. Morfologické charakteristiky byly odvozovány pomocí DMR 4G, polohopisné údaje ze ZABAGED. Detailní charakteristiky a jejich hodnoty byly zvoleny odlišně pro jednotlivé modely. Vzhledem k podobným principům modelů MikeSHE a SMODERP byly pro tyto modely scénáře vytvářeny téměř identicky, až na drobné rozdíly v infiltrační rutině a rutině pro výpočet korytového odtoku.



### 3.4.2.1 Scénáře pro MikeSHE a SMODERP

Pro metodu CN jsou parametry formulovány odděleně vzhledem k jinému principu řešení. U fyzikálně založených modelů byly při volbě parametrů vybrány následující parametry shodné pro oba modely, tak aby bylo možné provést detailnější srovnání:

- nasycená hydraulická vodivost půd,
- počáteční nasycení půdy,
- drsnost povrchu pro transformaci povrchového odtoku,
- povrchová retence,
- intercepce,
- základní parametry pro transformaci v korytech.

Průměrné hodnoty  $K_s$  byly stanoveny na základě evropských půdních databází a publikovaných pedotransferových funkcí v závislosti na sacím tlaku dle Wösten (*Wösten et al.*, 1999). Na každém z charakteristických povodí byly uvažovány tři skupiny scénářů: s průměrnou hodnotou  $K_s$  ( $\text{mean}0$ ) a s dvěma krajními hodnotami danými směrodatnou odchylkou ( $m\text{-STD}$ ,  $m\text{+STD}$ ) pro každý půdní druh.

#### **Počáteční nasycenost půdy**

Obdobně jako v případě hydraulických vodivostí byly určeny tři varianty počátečních podmínek od nejméně po nejvíce „nasycený“ scénář IC1–3. Způsob implementace ve fyzikálních modelech byl kvůli odlišné infiltrační rutině rozdílný.

#### **Drsnost povrchu a intercepce**

V případě drsnosti povrchu byly použity tři scénáře: nízká ( $nL$ ), průměrná ( $n0$ ) a vysoká drsnost ( $nH$ ). Intercepce byla uvažována pouze ve dvou variantách: základní či vysoká ( $IH$ ) a nízká, resp. nulová ( $IL$ ).

#### **Parametry transformace v korytech**

Drsnost koryta byla uvažována ve dvou variantách: scénáře „FAST“ reprezentují spíše hydraulicky hladší, udržované koryto s Manningovou drsností kynety a berem  $n = 0,02$ , resp.  $0,025$ , které vodu z povodí odvádí rychleji a méně odtok transformují. Scénáře „SLOW“ oproti tomu představují přírodě bližší, méně udržované koryto s drsnostmi kynety a berem  $n = 0,03$ , resp.  $0,035$ .

V modelu SMODERP byl podélný profil vodních toků odvozen obdobně jako u modelu MikeSHE. Koryto však bylo zjednodušeno na jednoduchou obdélníkovou kynetu, jejíž Manningova drsnost byla volena rovněž ve dvou variantách a shodně s modelem MikeSHE, tedy  $n = 0,02$  pro variantu „FAST“ a  $0,03$  pro variantu „SLOW“.

### 3.4.2.2 Scénáře pro HEC-HMS

Při tvorbě scénářů pro citlivostní analýzu v modelu HEC-HMS byly vybrány následující hydrologické charakteristiky:

- hodnota CN,
- podíl nepropustných ploch v %,
- doba zpoždění  $T_L$ ,
- počáteční podmínky dle IPS,
- podíl počáteční ztráty vůči maximální pot. retenci  $\lambda$ .

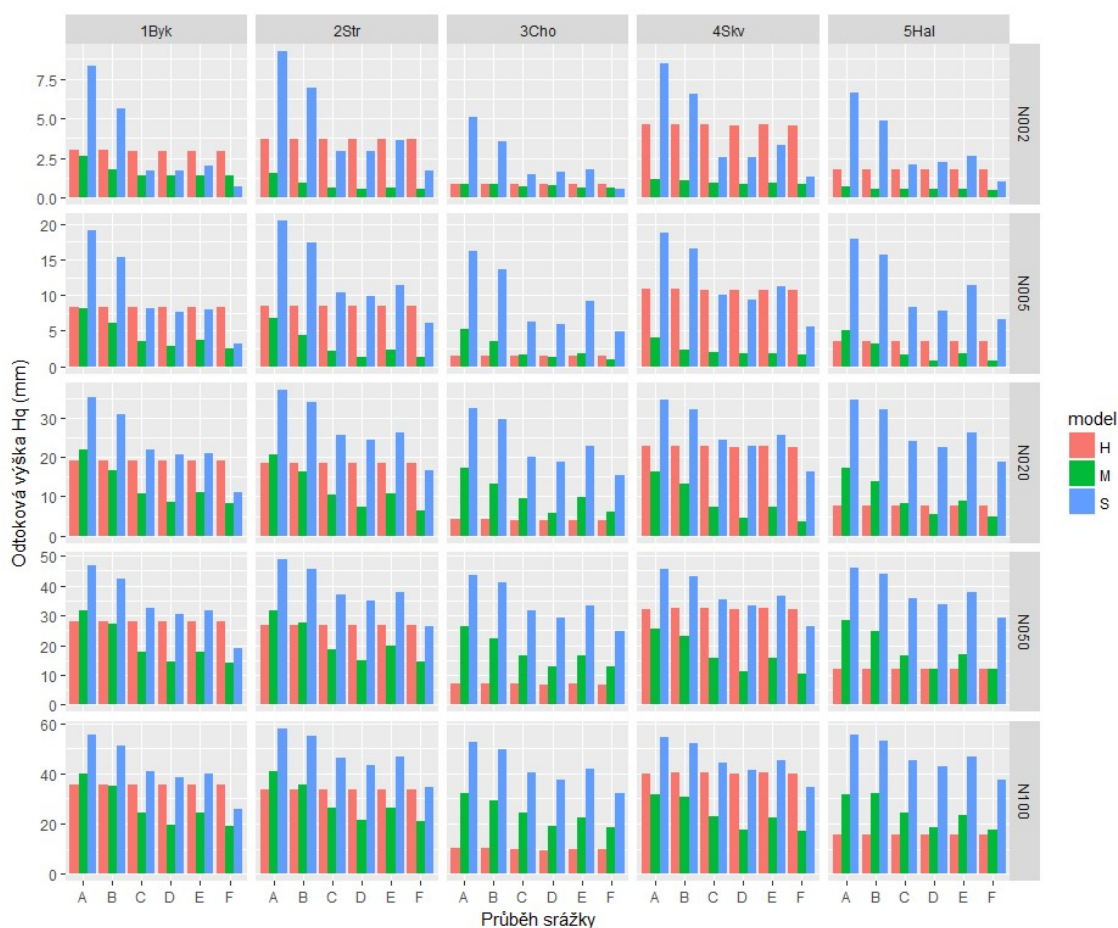
V rámci každé z 5 tříd povodí byly určeny statistické parametry rozdělení hodnot CN, doby zpoždění a procenta nepropustných ploch. Tyto parametry byly použity pro náhodné generování hydrologických charakteristik ve všech skupinách scénářů v HEC-HMS, pro každou

skupinu vždy v počtu 500 realizací. Vzniklo tak téměř milion unikátních simulací popisujících variabilitu metody CN. Podrobně je tento postup popisuje Vlasák (Vlasák, 2018) v diplomové práci, která vznikla pod vedením autora.

### Srovnání modelů

Výše popsané soubory scénářů daly vzniknout značně rozsáhlé sadě výstupů, jejichž plná analýza je mimo možnosti této práce. Srovnání třech použitých modelů je provedeno s akcentem na identifikaci klíčových proměnných.

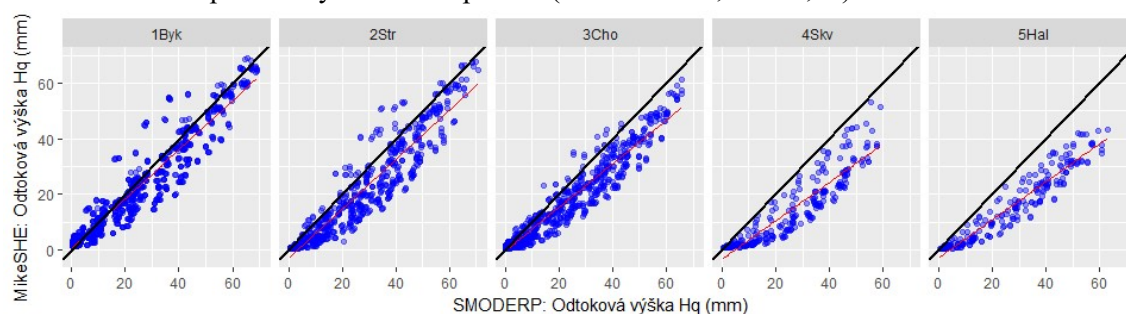
Zátěžové stavy (parametry srážky) a charakteristická povodí byla sice použita identická, ale vztah mezi hydrologickými a dalšími parametry povodí u HMS (CN, Ia, IPS) a fyzikálních modelů (vodivosti půd, hodnoty retence a intercepce, počáteční podmínky) je možné určit pouze kvalitativně. Jako sobě nejlépe odpovídající bylo vybráno 150 simulací (5 povodí x 5 dob opakování x 6 typů srážek) středních scénářů. U fyzikálních modelů pak byl zvolen scénář s průměrnými hodnotami hydraulické vodivosti půd uváděnými v literatuře pro příslušné zrnitostní třídy, počátečními podmínkami IC2 odpovídajícími průměrnému nasycení půd.



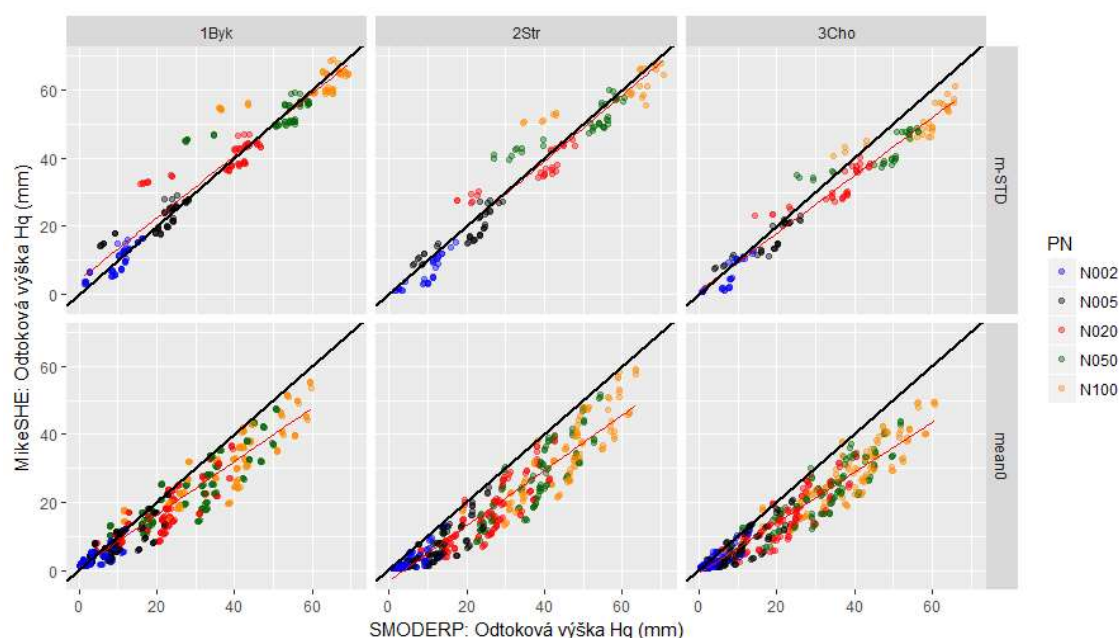
Obr. 27: Odtokové výšky modelované v HMS (H), MikeSHE (M) a SMODERP (S) ve 150 základních srážko-odtokových scénářích (povodí 1 až 5, doby opakování  $N = 2$  až 100 let, typy srážek A až F).

Model SMODERP oproti MikeSHE produkuje až na naprosté výjimky vždy vyšší odtokové výšky, přestože u těchto dvou modelů je přiřazení scénářů jednoznačné a v parametrizaci se liší jen u několika málo veličin. Dvou i vícenásobně vyšší odtoky ze SMODERP jsou zřejmé zejména u koncentrovaných srážek A a B a při nízkých dobách opakování (úhrnech) srážky. Díky téměř identicky definovaným scénářům je možné analýzu rozdílů v těchto dvou modelech rozšířit, přestože v modelu SMODERP byla vypočtena jen přibližně čtvrtina scénářů

oproti MikeSHE. Vzájemně vynesené odtokové výšky u srovnatelných scénářů na všech pěti povodích ukazuje graf na následujícím obrázku (Obr. 28). Z něj jsou patrné odlišné rozdíly mezi modely napříč povodími. Téměř vždy dává SMODERP vyšší odtokové výšky na povodí Halounského potoka (224 scénářů,  $R^2 = 0,91$ ), shoda modelů reprezentovaná červenou regresní křivkou se pak blíží k ideálu (černé diagonále) vlivem rozdílného počtu identických scénářů směrem doleva k povodí Býkovického potoka (1157 scénářů,  $R^2 = 0,92$ ).



Obr. 28: Odtokové výšky  $H_q$  z modelu MikeSHE oproti modelu SMODERP z reprezentativních povodí pro všechny  $N$ -letosti a typy srážek. Černě vynesena diagonála, červeně regresní přímka.



Obr. 29: Odtokové výšky  $H_q$  z modelu MikeSHE oproti modelu SMODERP ze tří reprezentativních povodí pro všechny  $N$ -letosti a typy srážek a dvě úrovně propustnosti půd: průměrné ( $mean0$ ) a snížené ( $m-STD$ ). Černě vynesena diagonála, červeně regresní přímka.

Z grafů je patrné, že velmi dobrou shodu oba modely vykazují v případě scénářů s podprůměrnými propustnostmi půd. To lze vysvětlit upozaděním rozdílů způsobených odlišnou infiltrační rutinou (Philipova metoda u SMODERP vs. G&A s redistribucí u MikeSHE). Oproti tomu u scénářů s průměrnou vodivostí půd způsobují rozdíly v modelech až dvojnásobné odtokové výšky z modelu SMODERP tak, jak bylo patrné na prvním srovnání na Obr. 27. Modelovaná varianta s vysoce propustnými půdami ( $m+STD$ ) byla pro omezenou datovou sadu výsledků vyřazena. Další analýzy rozdílů naznačily podstatnou úlohu definice počátečních podmínek. Zatímco pro nasycený stav dávaly oba modely téměř shodné odtokové výšky, průměrný stav a suchý stav byly zdrojem hlavních rozdílů. Právě počáteční podmínky je obtížné definovat v obou modelech stejně, protože i při stejných hodnotách  $K_s$  se jejich infiltrační rutiny

liší dalšími parametry, mezi nimiž nelze definovat přímý vztah (Sorptivita u Philipovy rovnice, sací tlak a počáteční vlhkost u G&A).

## 3.5 Aplikace modelu SMODERP

Aplikace modelu je pro dva základní účely. Prvním z nich je návrh opatření v ploše povodí a případně na drobných vodních tocích. Model poskytuje potřebné výsledky pro návrh opatření. Z hlediska erozní ohroženosti lze považovat za kritický stav takový, při kterém dochází k překročení limitních rychlostí plošného odtoku a dochází ke vzniku erozních rýh, v takto modelem určených místech je vhodné realizovat některé z technických nebo organizačních opatření. Model tak poskytuje informaci o erozním ohrožení z tohoto pohledu. Dále model poskytuje data pro návrh konkrétních staveb. Pro návrh zasakovacích prvků to je objem vody, pro odváděcí prvky to je kulminační průtok. Případně je možné použít povodňovou vlnu pro určení efektivitu nádrží.

Jinou aplikací modelu je pak návrh technických opatření na tělesech zemních konstrukcí. Erozní ohroženost je definována stejně jako v případě plošného odtoku – vznikem erozních rýh. Model SMODERP je uveden jako jeden z nástrojů pro výpočet erozního ohrožení. V rámci řešeného projektu byla vytvořena aplikace SMODERP Line pro navrhování ochranných geotextilních opatření z hlediska erozní ohroženosti. Ukázkový výpočet včetně webového rozhraní modelu je uveden v kapitole 3.5.2.

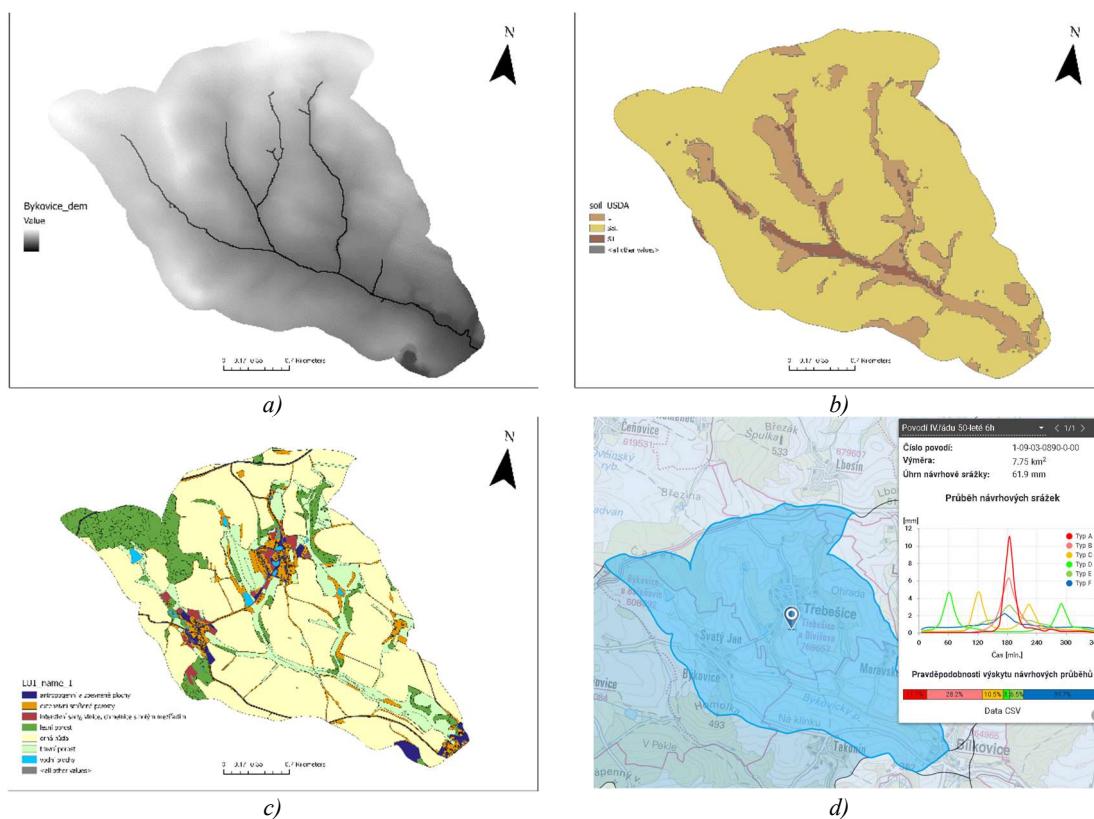
### 3.5.1 SMODERP 2D – získání návrhových dat v malém povodí

Využití modelu je především v podrobném popisu odezvy povodí na příčinnou srážku a pro získání návrhových parametrů případných plánovaných vodohospodářských opatření v ploše povodí. Ukázkově je zpracování dat v modelu zpracováno pro povodí Býkovického potoka, kde probíhá sledování srážkoodtokových procesů.

Vstupní data nutná pro model popsána výše jsou z následujících zdrojů:

- model terénu – DMR 4G – ČUZK® převzorkováno na rozlišení 10x10 m(model upraven, aby odtokově respektoval osy vodních toků),
- využití území – kombinací ZABAGED® a LPIS,
- půda a srážky jsou z dat poskytovaných na rain.fsv.cvut.cz.

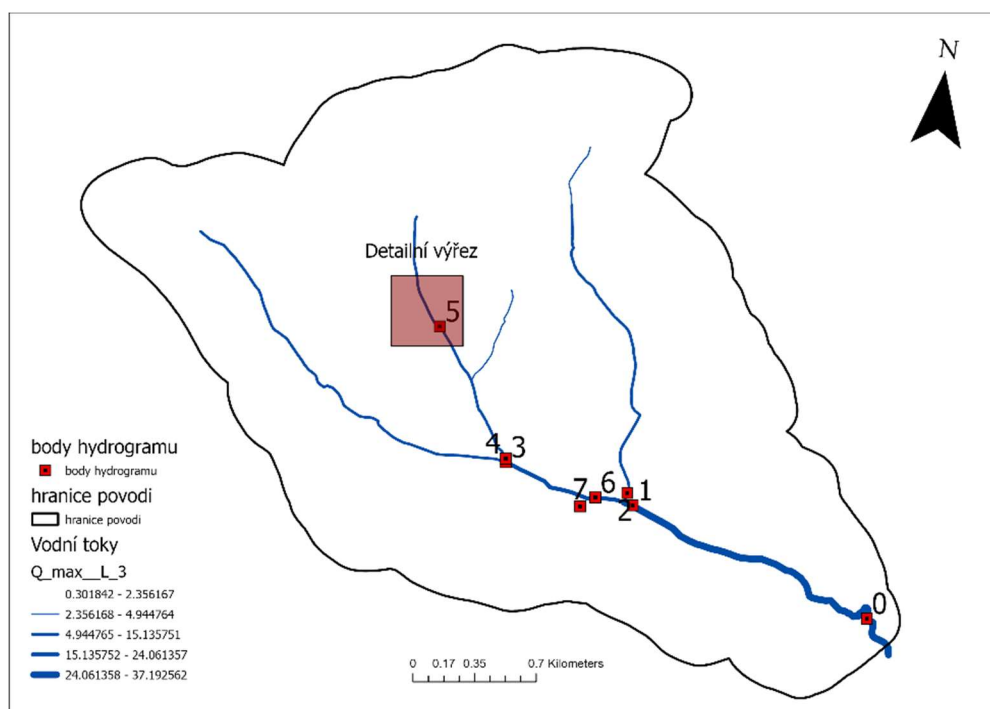
Díky lidským zásahům a změnám v krajině jsou osy vodních toků pozměněny a neodpovídají odtokovým liniím generovaným na samotném modelu terénu – přirozeným drahám odtoku. Naproti tomu osy vodních toků, které jsou součástí ZABAGED®, vycházejí z podrobných měřítek a odrážejí současný stav vodní sítě. Z hlediska směřování odtoků jsou tyto osy vodních toků brány jako přesnější než směřování odtoku na základě DMR. Proto při odvozování povodí jsou osy vodních toků zahrnuty do modelu terénu. Hodnota pixelů modelu terénu, kterými prochází osa vodního toku, byla snížena. Při vytváření směru odtoku, který je generován na základě DMR, jsou tak respektovány osy vodních toků.



Obr. 30: Vstupní data do modelu SMODERP a) digitální model terénu se zahloubenými vodními toky, b) zatřídění půd (rain.fsv.cvut.cz), c) využití území, d) srážková data (rain.fsv.cvut.cz)

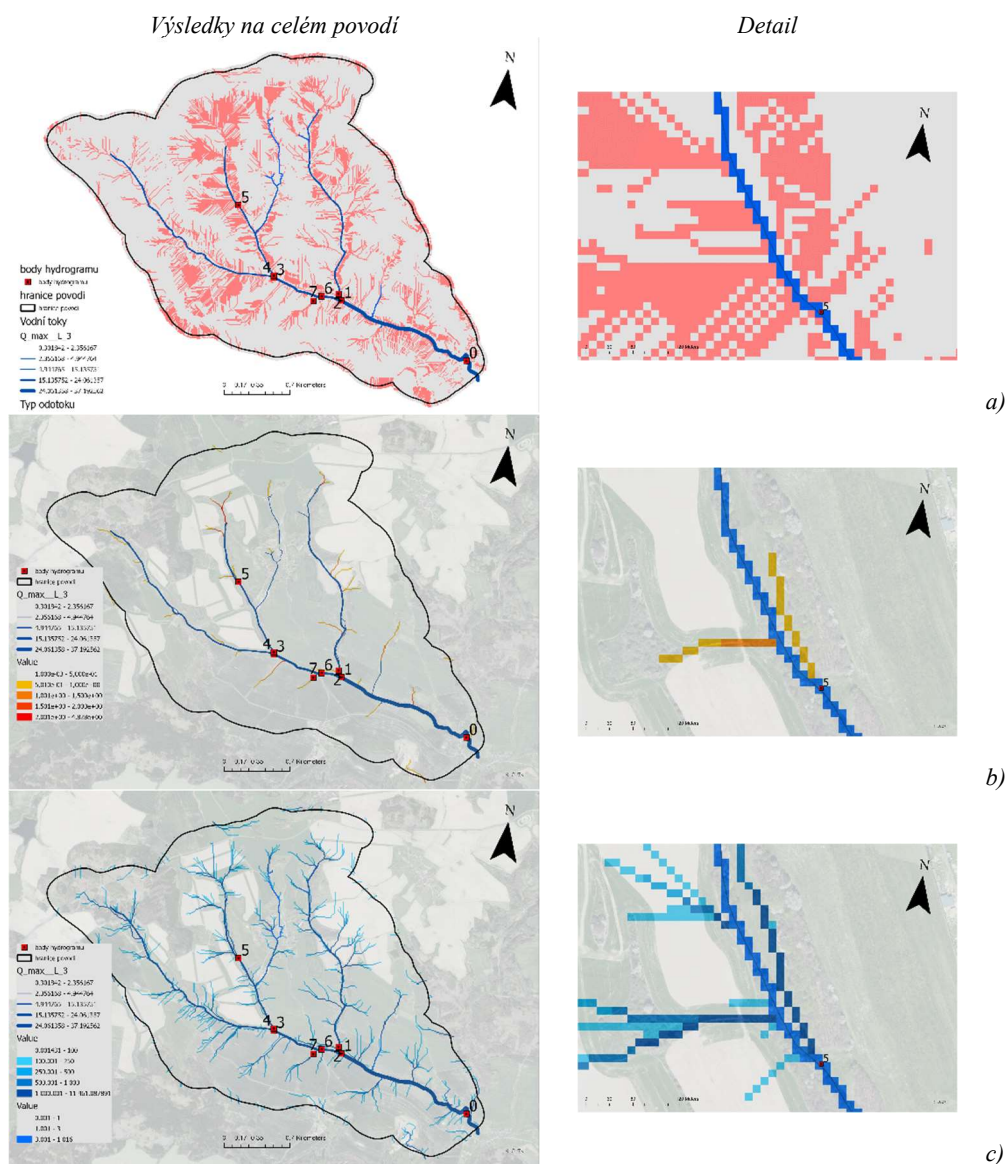
Odvozením těchto vstupních dat pro univerzální použití na území ČR je věnována celá následující kapitola (kap. 4). Model byl spuštěn v prostředí ArcGIS.

Schematizace povodí a body hydrogamů jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 31). Výstupní data jsou popsána v kapitole 0 a zde jsou vizualizovány výsledky klíčové pro návrh opatření. Výsledky jsou vizualizovány jak pro celé povodí, tak pro zvolený výřez v okolí zvoleného pozorovacího bodu č. 5.



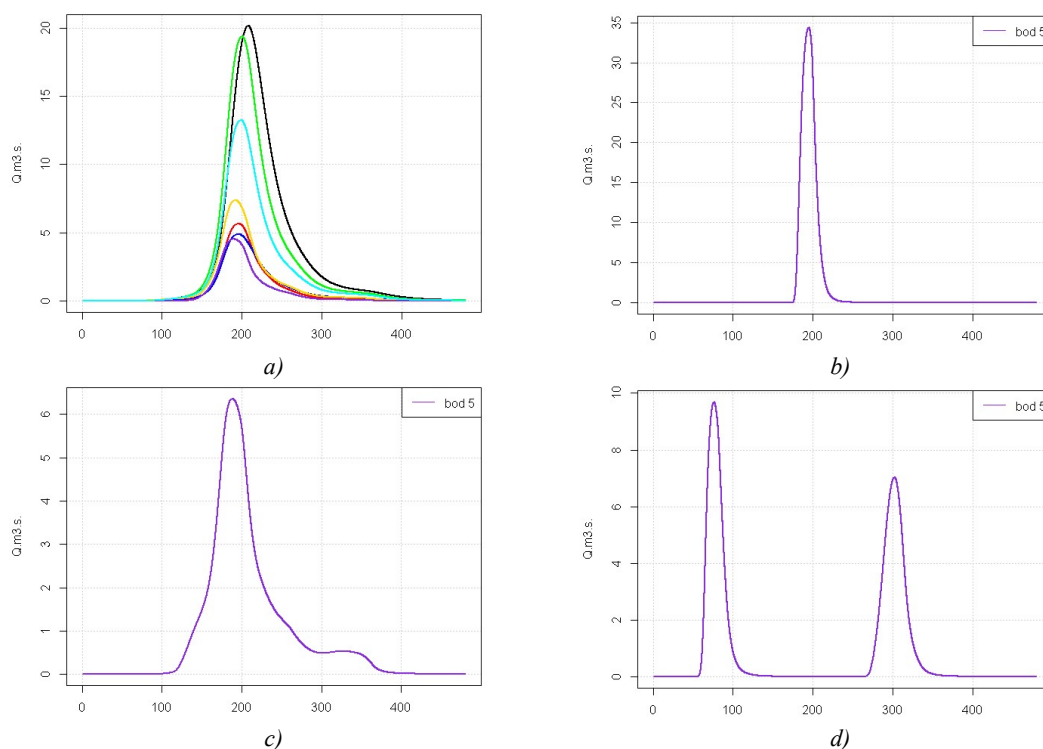
Obr. 31: Schematizace povodí, body hydrogramů a vymezení ukázky detailního výsledku

Dále jsou zobrazeny rastrové výsledky na celém povodí a výše zobrazeném detailu.



Obr. 32: Rastrové výstupy modelu SMODERP 2D, levý sloupec výsledky na celém povodí, pravý sloupec detail u bodu č. 5, a.) typ odtoku (modře odtok v hydrografické síti, červeně výskyt rýh) b) maximální průtok, c) objem odtoku

Celkové výsledky jsou ukládány jako finální rastry. Pro zvolené body jsou ukládány průběhy odtoku. Dále uvedené příklady jsou výsledkem několika scénářů modelu. Bod č. 5 umístěný ve zvoleném výřezu je zobrazen fialovou barvou. Výsledky ukazují možnou variabilitu modelových scénářů.



Obr. 33: Výsledné hydrogramy v pozorovaných bodech a) pro návrhovou srážku s dobou opakování 20 let nejpravděpodobnějšího vyskytujícího se tvaru (F), b) pro návrhovou srážku s dobou opakování 20 let nejkoncentrovanější tvar (A), pro návrhovou srážku s dobou opakování 50 let tvar F, pro návrhovou srážku se dvěma vrcholy (tvar D) – doba opakování 20 let

Na základě těchto návrhových dat může být proveden návrh – dimenzování případných opatření jak na drobných vodních tocích, tak v ploše povodí. V závislosti na zvoleném prvku by se jednalo o objemovou úlohu, případně o dimenzování průtočných charakteristik a v neposlední řadě se také díky znalosti tvaru odtokové vlny dají řešit i transformační úlohy.

### 3.5.2 SMODERP Line – upravený model pro hodnocení ohrožení svahů liniových staveb

Na rozdíl od zemědělské půdy jsou svahy kolem liniových staveb sice relativně krátké, ale na rozdíl od zemědělské půdy velmi svažité. Obdobně jako v městském odvodnění se spíše než s průběhy návrhových srážek počítá s maximálními intenzitami deště. Současná TP 53 uvádí patnáctiminutovou návrhovou intenzitu deště (Trupl, 1958) s dobou opakování dva roky. Nicméně přírodě blízké půdní prostředí svahů komunikací je třeba hodnotit i z hlediska stavu nasycenosti půdního profilu. Správnou interpretací intenzit odvozených Truplem (Trupl, 1958) se jedná o maximální intenzitu deště a jím provedená analýza nijak nehodnotí celkovou srážku. Jedná se tak o maximální hodnotu deště, který je součástí déletrvajících srážek. V tomto případě je doporučeno považovat stav povrchu za plně nasycený a simulovat tak pouze část nejintenzivnější části srážky. Dále je možné využít data z portálu [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz), (viz následující kapitola).

Aplikace modelu pro určení ohrožení svahů liniových staveb povrchovým odtokem ve formě software – webové aplikace je dostupná na stránkách modelu ([smoderp.fsv.cvut.cz](http://smoderp.fsv.cvut.cz)). Následující ukázka vychází z manuálového příkladu a odpovídá způsobu navrhování, tak jak je uveden v metodice pro navrhování technických opatření (Kavka, P.; Vaníček, M.; Dufka, 2021).



Oproti modelu SMODERP 2D je úloha na svazích zjednodušená a rastrové vstupy jsou nahrazeny profilem. Vstupní data odpovídají čtyřem základním skupinám vstupních dat a tomu také odpovídá struktura vstupního formuláře, který má čtyři základní části týkající se zadávaných dat, vyznačených na následujícím obrázku (Obr. 34).

Obecná data k výpočtu	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><b>1</b></p> <p><b>OBEČNÁ DATA</b></p> <p>Rozlišení   1   m</p> <p>Délka simulace   60   min</p> <p>Maximální dt   1   s</p> <p>Šířka svahu   1   m</p> </div>																																				
Návrhová srážka	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><b>2</b></p> <p><b>SRÁŽKA</b></p> <p>Vyberte možnost ▾ <span style="float: right;">Nastavit ✖</span></p> </div>																																				
Zadávání svahů a výběr ochrany povrchu a půdy	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><b>3</b></p> <p><b>SVAH</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Číslo úseku</th> <th>Průmět [m]</th> <th>Výška [m]</th> <th>Poměr</th> <th>Ochranné opatření</th> <th>Půda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>Vyberte ▾</td> <td>Vyberte ▾ ✖</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>Vyberte ▾</td> <td>Vyberte ▾ ✖</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>Vyberte ▾</td> <td>Vyberte ▾ ✖</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>Vyberte ▾</td> <td>Vyberte ▾ ✖</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>Vyberte ▾</td> <td>Vyberte ▾ ✖</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center; margin-top: 5px;"><span style="background-color: yellow;">Přidat řádek</span></p> </div>	Číslo úseku	Průmět [m]	Výška [m]	Poměr	Ochranné opatření	Půda	1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Vyberte ▾	Vyberte ▾ ✖	2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Vyberte ▾	Vyberte ▾ ✖	3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Vyberte ▾	Vyberte ▾ ✖	4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Vyberte ▾	Vyberte ▾ ✖	5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Vyberte ▾	Vyberte ▾ ✖
Číslo úseku	Průmět [m]	Výška [m]	Poměr	Ochranné opatření	Půda																																
1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Vyberte ▾	Vyberte ▾ ✖																																
2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Vyberte ▾	Vyberte ▾ ✖																																
3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Vyberte ▾	Vyberte ▾ ✖																																
4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Vyberte ▾	Vyberte ▾ ✖																																
5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Vyberte ▾	Vyberte ▾ ✖																																
Spuštění výpočtu	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><b>4</b></p> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;"><span style="background-color: yellow;">Spočítej</span></p> </div>																																				

Obr. 34: Rozdělení vstupních parametrů do modelu SMODERP Line

## Vstupy

„Do modelu vstupují informace o topografii řešeného území, informace o typech půd a využití území a o jejich prostorovém rozmístění a informace o srážce.

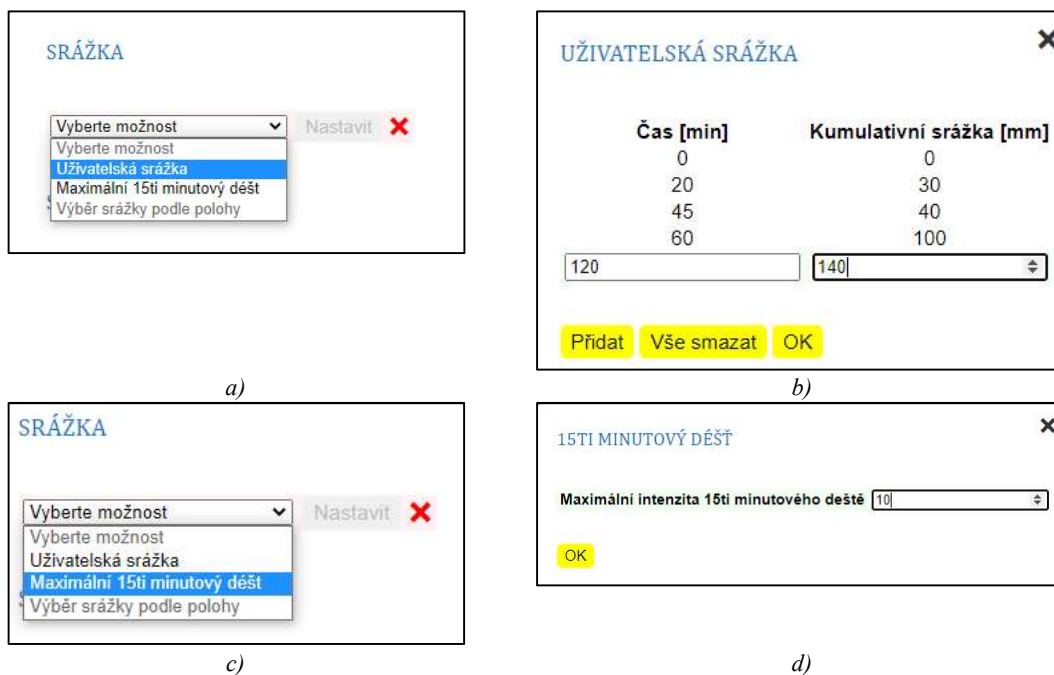
### Obecná data

V první části formuláře se zadávají základní data výpočtu:

- rozlišení (udává podrobnost řešení – délky výpočetních elementů)
- délku simulace (doba jakou dobu má model simulovat, může být delší než délka srážky pro výpočet doběhu odtoku do posledního elementu)
- časový krok modelu  $\Delta t$  (jako vstupní parametr se zadává maximální časový krok. Tento časový krok je rovněž počáteční časový krok)
- šířka svahu – do výpočtu je zahrnuta.

### Srážka

Srážku je možné nastavit ve dvou typech. Jako uživatelskou, kde je potřeba zadat časový interval v minutách a kumulativní úhrn za daný časový interval v milimetrech. Srážku je možné získat například na serveru [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz).

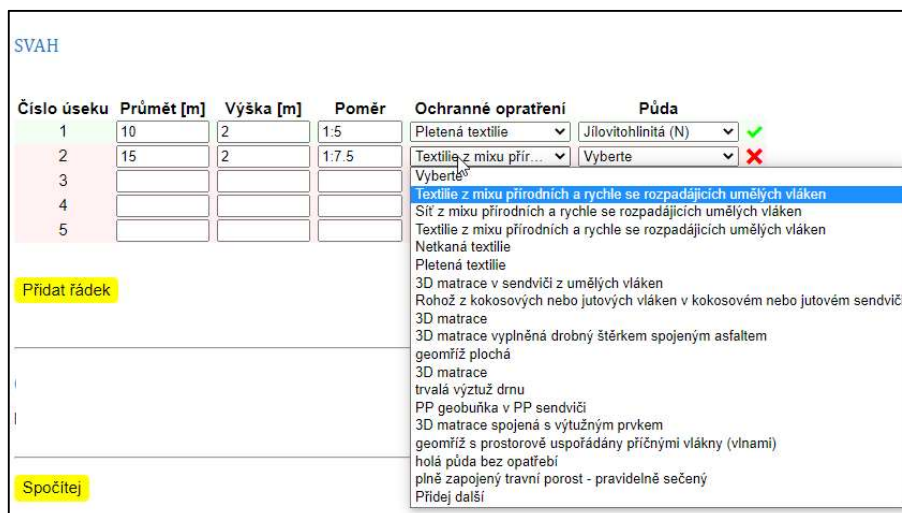


Obr. 35: Zadávání návrhových srážek do prostředí SMODERP Line a) a b) – zadání uživatelské srážky, b) a c) zadání hodnoty maximálního deště

Druhým způsobem zadání je maximální 15minutový déšť. Jedná se maximální intenzitu deště, tak jak je uvažována v TP53. Protože se jedná o maximální intenzitu deště, tak z hlediska stavu povrchu je v modelu předpokládáno, že se jedná o část déletrvajícího deště a půdní povrch je plně nasycen. Což znamená, že povrchová retence a část srážky, která je zachycena případným opatřením je již vyčerpána a infiltrace vody do půdy je dána jen  $K_s$ , kdy  $S = 0$ .

### Svah

Parametry svahu jsou zadávány po jednotlivých úsecích vyplněním jejich průmětu a výšky a vybráním použitého ochranného opatření a typu půdy z nabídky nebo přidáním vlastních hodnot.



Obr. 36: Dialogové okno pro zadávání svahu

Rozbalovací menu nabízí různá ochranná opatření s předdefinovanými parametry potřebnými k výpočtu:  $n$  – Manningův součinitel drsnosti [ $s \cdot m^{-1/3}$ ], Zachycené množství vody

opatřením [mm], Poměr zachycení [-], Povrchová retence [mm], Maximální tečné napětí [Pa], Maximální rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]. Zároveň může uživatel přidat nový typ ochranného opatření a zadat vlastní parametry. Manuálové hodnoty, které jsou obsaženy v dialogích programu jsou dostupné na stránkách programu. Mimo to uživatel může zadat svoje návrhové parametry nebo do výpočtu zahrnout jím detailněji zjištěné charakteristiky půdy. V rozbalovacím menu je na konci možnost přidat další údaje.“ Převzato z manuálu k software SMODERP Line (*SMODERP Line*, 2021), jehož je autor této práce tvůrcem.

### Výstupy

Výstupy z modelu jsou pro uživatele dvojího druhu. Tím prvním je rozdělení modelovaného profilu, kde jsou uvedeny charakteristiky odtoku v jednotlivých úsecích. Tato data slouží k popisu odtoku na svahu a pro sledování jeho vývoje po spádnicí. Druhým výsledkem je průběh odtoku na dolním konci svahu. Tyto výsledky jsou uživatelům vráceny v podobě CSV a zároveň se zobrazí přímo v prohlížeči grafy s vypočtenými veličinami.

### Výsledky modelu

Po zpracování data na serveru je vrácena uživateli odpověď ve třech možných souborech ke stažení:

- profile.csv,
- hydrograph.csv,
- XML odpovědi serveru.

Profile.csv – v tomto výsledku jsou uživateli vráceny kumulativní a maximální hodnoty po délce řešeného svahu. Svah zadaný uživatelem byl v rámci výpočtu rozdělen na výpočetní elementy podle zadaného rozlišení. Uživatel tak získává informaci o stavu celého řešeného svahu.

Hydrograf.csv – v tomto výsledku jsou uživateli poskytována data v nejnižším místě svahu. Jedná se o průběh veličin v minutovém kroku. Tato data jsou důležitá z hlediska další manipulace se srážkovými vodami v případě jejich akumulace. Dále slouží pro kontrolu celého sledovaného procesu.

### Profil

Profil dané lokality nabízí výsledné hodnoty veličin pro rozlišení, které jsme zadali v prvním kroku, který vypisuje veličiny povrchového odtoku – maximální povrchový odtok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ], celkový odtok [ $\text{m}^3$ ], maximální povrchovou rychlost [ $\text{m}/\text{s}$ ], maximální tangenciální napětí [Pa]. Poslední sloupec, který označuje, kde vznikl nepřipustný rýhový odtok [Y/N], který nastává v případě překročení limitního napětí a rychlosti.

length[m]	soilVegFID	maximalSurfaceFlow[m <sup>3</sup> /s]	totalRunoff[m <sup>3</sup> ]	maximalSurfaceRunoffVelocity[m/s]	maximalTangentialStress[Pa]	rillRunoff[Y/N]
0.925	HPOP	4.03E-05	0	0.204299355	0.814863974	0
0.925	HPOP	8.06E-05	0.308793954	0.24	0.998486994	1
0.925	HPOP	0.000120966	0.87208855	0.24	0.998486994	1

Obr 37: SMODERP Line - ukázka výsledných veličin pro jednotlivé úseky

### Hydrograf

V hydrografu nalezneme průběh veličin v časovém kroku, který jsme na začátku zadali. Je zde srážka [m], výška vodní hladiny [m], povrchový odtok [m<sup>3</sup>/s] a kumulativní povrchový odtok [m<sup>3</sup>].

A	B	C	D	E	F
# Hydrograph at the point with coordinates: 0 0					
# A pixel size is [m2]: 1.0					
time[s]	deltaTime[s]	rainfall[m]	totalWaterLevel[m]	surfaceFlow[m3/s]	cumSurfaceVolRunoff[m3]
6.00E+01	1.00E+00	4.44E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.20E+02	1.00E+00	4.44E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.80E+02	1.00E+00	4.44E-05	4.22E-04	1.51E-04	3.95E-03

Obr 38: SMODERP Line - ukázka detailních výsledků pro nejspodnější úsek svahu

## 4 Vstupní data pro využití fyzikálních modelů v návrhové praxi a jejich zpřístupnění odborné veřejnosti

Jedním z limitů aplikačního a praktického využití hydrologických modelů jsou dostupná a konzistentní vstupní data. Otevřená vstupní data a transparentnost použitých metod snižují možné rozdílné interpretace výsledků. Za posledních několik let se v rámci vědeckovýzkumných aktivit situace zlepšila. Limitem nejsou technologické metody pro poskytování dat, ale data v odpovídající kvalitě pro celé území ČR. V zásadě se jedná o čtyři skupiny dat. Morfologie terénu, půdní data a data o povrchu. A zásadním vstupem jsou pak návrhové stavy srážek ideálně ve vazbě na počáteční podmínky z hlediska vlhkosti půdy. Potřebu dat pro modelování na malých povodích podtrhuje analýza prezentovaná dále. Vyplyvá z ní, že celková plocha všech zdrojových povodí do 5 km<sup>2</sup> představuje 80 % plochy ČR.

Morfologické charakteristiky terénu je možné odvozovat pro ČR na základě DMR 4G, případně 5G v gridovém formátu v rozlišení 5x5 m i podrobnějším. Z hlediska aplikačního využití modelů pro měřítko malých povodí se jedná o dostatečnou přesnost a v této práci nejsou data o povrchu dále řešena.

Data využití území jsou ve vektorové formě poskytována v rámci ZABAGED, kdy jednotlivé prvky, ať liniové nebo plošné, vyjadřují určitý typ povrchu. Novinkou z hydrologického hlediska je v poslední aktualizované verzi rozdělení lesních pozemků podle typu a výšky lesa. Vedle ZABAGED je standardně dostupná vrstva LPIS, což je evidence zemědělských pozemků se základním rozlišením pěstovaných kultur. Kombinace těchto vrstev přináší poměrně zásadní, a hlavně celorepublikově konzistentní vstup do hydrologického modelování. Příkladem kombinace těchto vrstev je algoritmus tak jak jej odvodil Devátý pro potřeby řešených projektů: „Představovaný algoritmus kombinuje mapové produkty dostupné pro celý rozsah České republiky: ZABAGED® a LPIS a vytváří bezešvou a topologicky korektní definici využití ploch využitelnou pro sestavení odtokových a erozních modelů. Při přípravě výsledné vrstvy využívá předností každého z nich a snaží se eliminovat nedostatky ZABAGED®, zejména nejednoznačnosti hydrologických vlastností ploch zahrnutých v objektech OrnaPudaAOstatniNeurcenePlochy, OvocnySadZahrada a OstatniPlochaVSidlech. Plošné určení zemědělských pozemků dle LPIS je použito jako závazná definice zemědělsky využívaných ploch. Vyšší prostorová přesnost LPIS výrazně zvyšuje shodu vytvořené definice s realitou v extravilánu, tedy tu část krajinné matrice, která má významný vliv na tvorbu povrchového odtoku. Prvky liniové dopravní infrastruktury dle ZABAGED® jsou převedeny na plošné pomocí ekvidistanty odpovídající jejich kategorii (řád silnice, počet kolejí železnice). Aktuálnost LPIS zároveň umožňuje částečně kompenzovat nesoulad ZABAGED® s realitou způsobený časovým vývojem. Jednotlivé dílčí vstupy jsou pomocí logických operací kombinovány tak, že výsledná vrstva využití ploch reflektuje co nejvíce skutečný stav ploch a neobsahuje překrývající se plochy a drobné plošky, které mohou komplikovat následné využití výsledné vrstvy. Hlavní nástroj vytvářející vrstvu využití ploch je doplněn o pomocné nástroje pro přípravu datasetů ZABAGED a stažení aktuální definice LPIS. Celý balíček nástrojů je vytvořen jako Python modul pro prostředí ArcGIS“ (Devátý, 2014), takto vytvořený nástroj je příkladem pro odvození vrstvy využití území s následným přiřazením hydrologických vlastností jednotlivých prvků. Existují samozřejmě další metody jako je odvození dat o povrchu z družicových snímků, případně

z odvozených produktů jako je například CORINE Land Cover. Případně vlastní detailní snímkování pomocí UAV.

## 4.1 Srážková data

Srážky patří mezi meteorologické prvky s největší variabilitou v čase i prostoru, a to v nejrůznějších měřítkách. Základní klimatologie srážek na území ČR je zpracována v Atlase podnebí Česka (Tolasz et al., 2007), a to především z hlediska prostorové variability průměrných ročních, sezónních a měsíčních úhrnů. Určení návrhových srážek je problematické z několika důvodů. Především je subdenní variabilita srážek v ČR je prozkoumána mnohem méně. Síť automatických srážkoměrů byla v minulosti podstatně řidší než síť klasických srážkoměrů. Klasickou práci v tomto směru vytvořil Trupl (Trupl, 1958). Podobně komplexní studie nebyla od té doby provedena. Ze současných prací lze zmínit práci Sokola a Bližňáka (Sokol and Bližňák, 2009), kteří studovali prostorové rozložení vysokých krátkodobých intenzit srážek v ČR s využitím kombinované informace ze staniční a radarové sítě.

Navazující práce v oblasti maximálních intenzit nebyly provedeny. Truplem odvozené maximální intenzity návrhových srážek a denních úhrnů byly použity pro vztah redukce denních úhrnů kdekoliv na povodí Labe na libovolnou délku trvání, což publikovali Hrádek a Kovář (Hrádek and Kovář, 1994). I přes zastaralou datovou základnu a regionální omezení si tato metoda získala značnou popularitu, našla si cestu do řady norem a metodik zejména v oblasti protierozní ochrany (Janeček, 2007; Janeček, 2012) nebo byla zakomponována do hydrologických nástrojů jako DesQ-MaxQ nebo DesRain.

Denní (24h) návrhové srážky pro síť pozorovacích stanic uvedl Šamaj (Šamaj, Valovič and Brázdil, 1985). Pro lokality mezi pozorovacími body se používaly jednoduché interpolační metody většinou na základě vzdáleností stanic. Vzdálenosti mezi jednotlivými stanicemi jsou relativně velké. Řízenou interpolací z těchto bodových dat, do které byly zahrnuty nejen vzdálenosti bodů, ale i vliv orografie, byla vytvořena rastrová vrstva v rozlišení 1x1 km denních úhrnů v rámci zpracování bakalářské práce Martina Tomášů (Tomášů, 2013) a dále rozpracované v rámci pokračujících aktivit.

ČHMÚ disponuje rastrovou vrstvou 24 h úhrnů, které byly využity například v rámci „Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice“. Dále byla uveřejněna publikace syntetických 100letých hodinových hyetogramů včetně regionalizace výskytu jednotlivých typů. Hyetogramy čtyř typů A, B1, B2 a C jsou různě asymetricky uspořádané a mají délku od 6 do 20 hodin. Jejich nevýhodou je, že byly opět odvozeny na základě Truplových dat, omezují se pouze na dobu opakování 100 let a pro každou lokalitu v rámci ČR je nadefinován pouze jeden převládající průběh.

Výrazným znalostním posunem v oblasti návrhových srážek, s ohledem na navrhování staveb v malých povodích jsou data vytvořená a poskytovaná v rámci projektu NAZV QJ1520265 „Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině“ (Drbal, 2016) a navazující projekt NAZV QK1910029 – „Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích“ jejichž hlavním řešitelem je autor této práce.

V rámci prvního jmenovaného projektu byly odvozeny šestihodinové návrhové srážky na znalostně a kvalitativně odlišných datových zdrojích (dlouhé časové řady staničních měření a adjustovaná srážková radarová data). Aplikačním výsledkem je pak certifikovaná metodika (Kavka, Muller and Strouhal, 2018), certifikovaná mapa (Kavka and Cajthaml, 2017) a portál pro

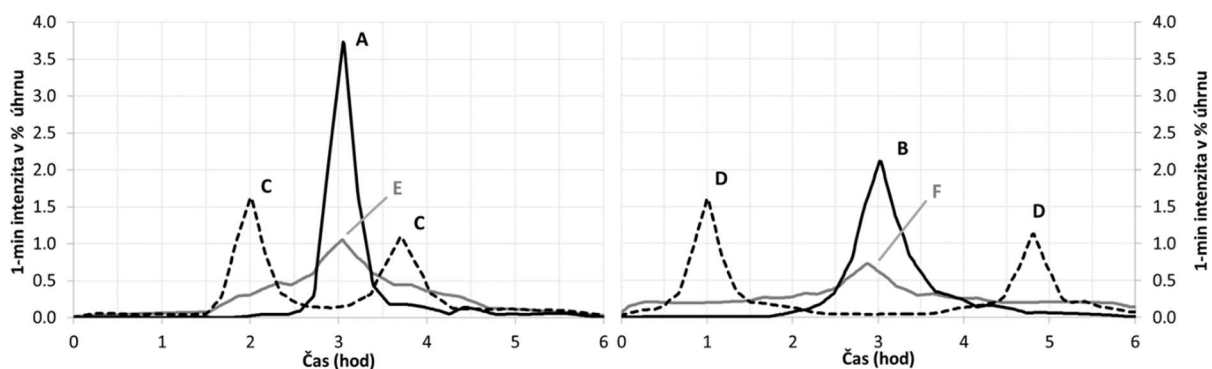
získávání dat rain.fsv.cvut.cz (*Rain@FSv*, 2018). Druhý doposud neukončený projekt si klade za cíl k dále popisovaným šestihodinovým srážkám určit předpokládané počáteční stavy a doplnit délky časových řad adjustovaných radarových dat.

Krátkodobé srážky jsou charakteristické svojí plošnou i časovou variabilitou. Území ČR není homogenní ani z hlediska statistického rozdělení úhrnů srážek, ani z hlediska variability jejich průběhů. Pohled na srážky je tak řešen ve třech rovinách. Nejprve z hlediska jejich typických průběhů s návazností na pravděpodobnost jejich výskytu v kombinaci s určitým stupněm předchozí srážkové činnosti. Poté popisuje plošné zastoupení charakteristických průběhů srážek na území ČR v závislosti na uvažované době opakování srážky. Takto odvozená data byla porovnána s dříve publikovanými hodnotami.

#### 4.1.1 Průběh návrhových srážek

Syntetické hyetogramy (průběhy srážek) byly odvozeny z reálných srážkových epizod zachycených na celém území ČR. Šestihodinová délka srážky byla zvolena jako vhodný kompromis mezi denním úhrnem, který je z hlediska doby koncentrace v malém povodí příliš dlouhým časovým úsekem, a hodinovým úhrnem, který zpravidla nezahrnuje celou příčinnou srážku. Typické průběhy návrhových srážek byly odvozeny pomocí trojice indexů, vyjadřujících míru koncentrace zaznamenaných významných srážek v různě dlouhých časových úsecích v rámci šestihodinového intervalu. Detailní popis odvození návrhových hyetogramů uvádí Müller (Müller, Bližňák and Kašpar, 2018).

Šest syntetických průběhů šestihodinových srážek pro území ČR je zobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 39). Tabelárně jsou průběhy pětiminutových intenzit dostupné přímo v metodice (Kavka, Muller and Strouhal, 2018).



Obr. 39: Šest syntetických průběhů šestihodinových srážek pro území ČR

Jednotlivé hyetogramy jsou označeny písmeny A až F se sestupně klesající mírou koncentrace srážky v čase. Čtveřice průběhů A, B, E a F má jednoduchý průběh, přičemž tvar A reprezentuje epizody nejvíce koncentrované, a naopak tvar F nejméně koncentrované epizody. Tvary C a D se vyznačují dvěma vrcholy s různě dlouhým poklesem mezi nimi. Charakteristiky typických průběhů popisuje následující tabulka.

Tab. 12: Charakteristika typických průběhů srážky pro hyetogramy typu A–F

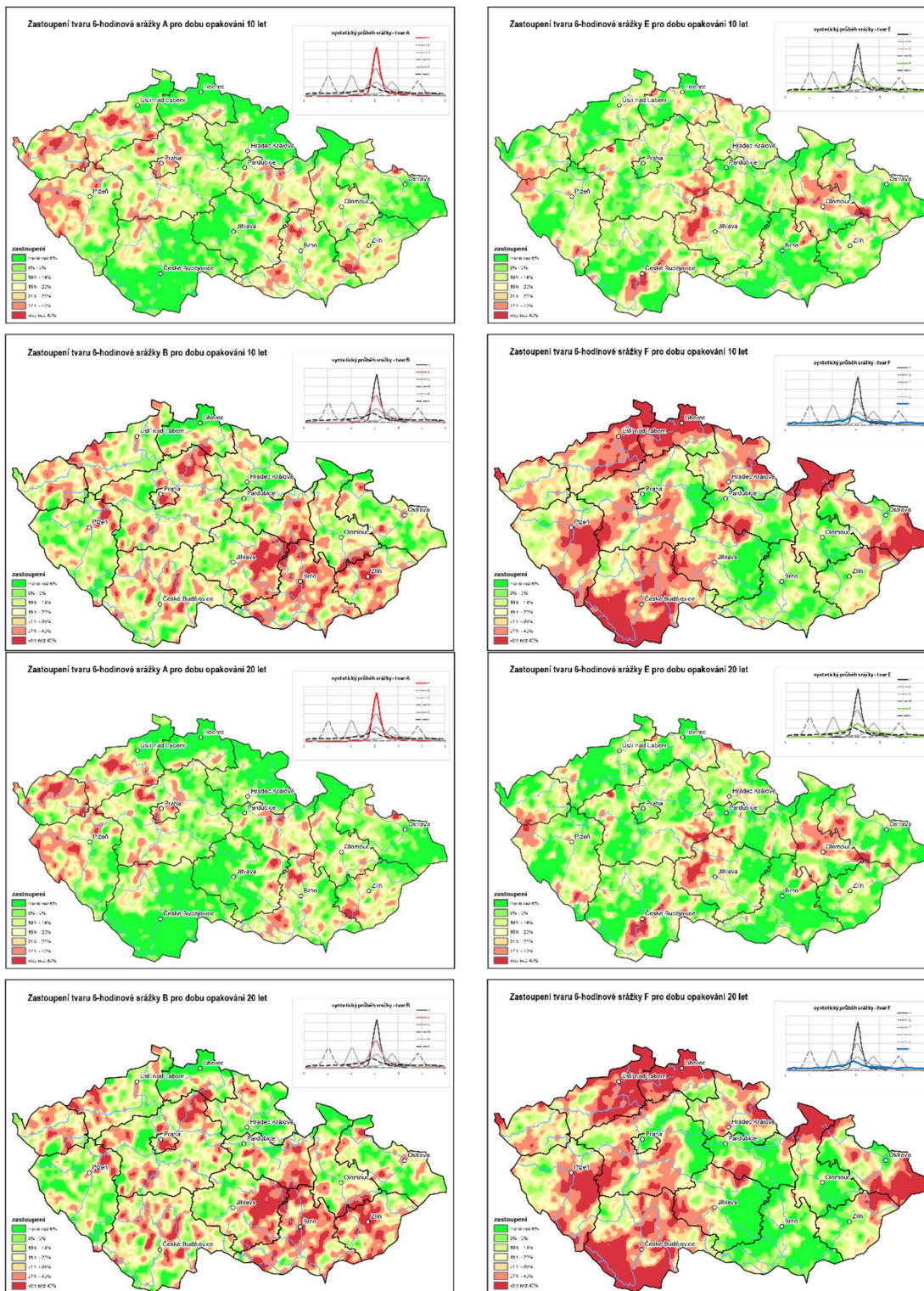
Typ průběhu	Charakteristika průběhu srážky
A	Alespoň 95 % úhrnu spadlo za 30 minut nebo méně
B	Alespoň 95 % úhrnu spadlo za cca 1 hodinu, během ní přišlo rovnoměrně
C	Alespoň 95 % úhrnu spadlo za cca 3 hodiny, během nichž se vyskytly dvě dílčí epizody oddělené přestávkou trvající alespoň 30 minut; významnější dílčí epizoda trvala 30 minut nebo méně
D	Srážka byla rozdělena do dvou dílčích epizod s přestávkou více než 1,5 hodiny
E	Alespoň 95 % úhrnu spadlo za cca 3 hodiny, během nichž přišlo rovnoměrně
F	Pršelo prakticky rovnoměrně 6 hodin

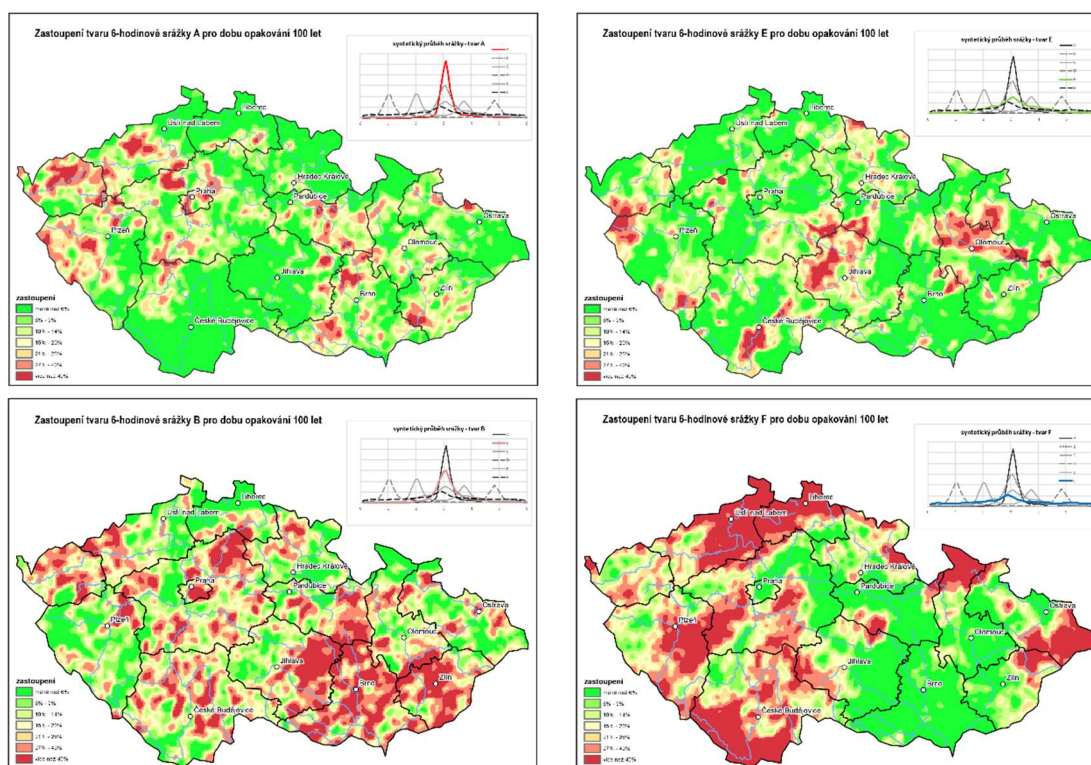
Jednotlivé typy průběhu šestihodinových srážek nejsou na území České republiky zastoupeny rovnoměrně. Pravděpodobnost jejich výskytu je podmíněna celou řadou faktorů (nadmořská výška, blízkost výrazné orografie, směr převládajícího proudění apod.). Na základě plošné informace ze srážkových radarů byly odvozeny pravděpodobnosti výskytu jednotlivých typů na území ČR. Jejich zastoupení se kromě polohy mění i v závislosti na uvažované době opakování návrhové srážky. Obecně platí, že s rostoucí dobou opakování dochází k vytváření větších oblastí s převažujícím typem průběhů srážek

#### 4.1.2 Zastoupení tvarů návrhových srážek na území ČR

Syntetické tvary šestihodinových návrhových srážek nejsou na území ČR zastoupeny rovnoměrně. Pravděpodobnost jejich výskytu je podmíněna nadmořskou výškou, přičemž zastoupení syntetických tvarů v určité lokalitě je dále proměnné v závislosti na uvažované době opakování návrhové srážky. Bylo proto třeba důkladně analyzovat prostorovou distribuci zastoupení syntetických tvarů v rámci ČR. Průměrné zastoupení syntetických tvarů návrhových srážek v ČR je zobrazeno na následujícím souboru obrázků (Obr. 40).





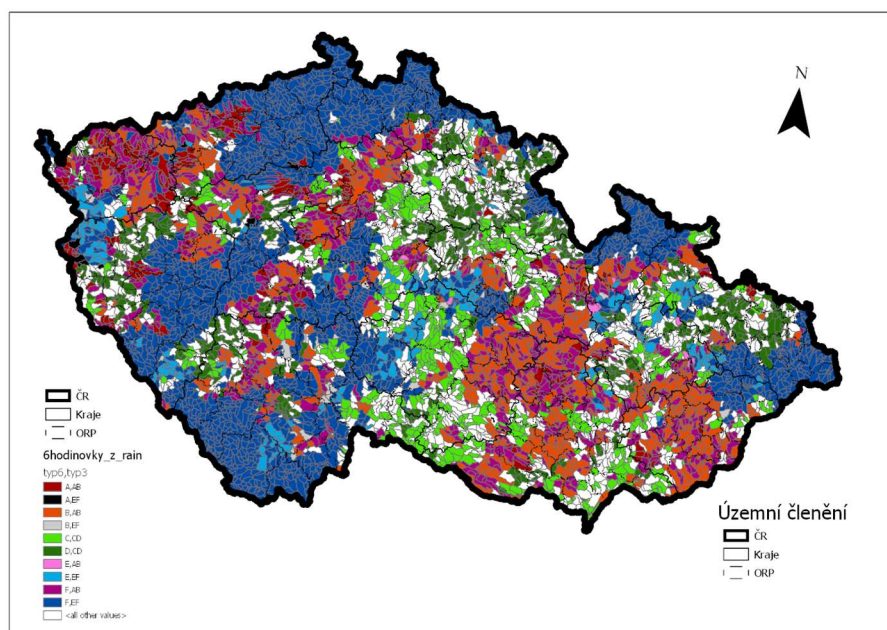


Obr. 40: Ukázka zastoupení tvarů A, B, E a F pro různé doby opakování ve škole od zelené s malým výskytem až po červenou, která indikuje více než 40% zastoupení daného tvaru

Rovnoměrné srážky se zvyšující dobou opakování koncentrují do horských oblastí. Přívalové srážky jsou naopak soustředěny do prostoru nížin, především na Jižní Moravě, v Polabí, ale i v části Jižních Čech a Podkrušnohoří.

Odvozené tvary návrhových srážek jsou pro projekční praxi v mnoha případech obtížně uchopitelné z hlediska jednoduchosti návrhu. Snížení počtu tvarů srážek je sice na jednu stranu žádoucí, na druhou stranu se ztrácí informace o variabilitě výskytu srážek. Možným přístupem je agregace podobných tvarů do skupin a sledování jak výskytu převažujícího tvaru, tak i zastoupení dalších skupin příbuzných tvarů. Typy srážek uvedené výše byly v rámci řešení agregovány do tří dvojic podle charakteru deště. Koncentrované srážky (AB) – které zahrnují koncentrované tvary srážek ve kterých většina šestihodinových srážek spadne v kratším časovém úseku, dvouvrcholové srážky (CD) – které zahrnují srážky se dvěma vrcholy a rovnoměrné srážky (EF) – zahrnující spíše rovnoměrné srážky. Pro tyto dvojice byl spočtena pravděpodobnost výskytu jako součet charakteristik příslušných typů pro povodí IV. řádu.

Povodí IV řádu byla následně hodnocena z hlediska výskytu nejen podle převažujících tvarů ale i převažujících charakteristik deště. Mohou tak nastat případy, kdy je například převažujícím tvarem koncentrovaná srážka (A), ale převažující charakteristikou deště jsou spíše rovnoměrné srážky (EF). Pro všechna povodí tak byl určen nejen převažující tvar, ale také převažující charakter deště. Následně byla povodí kategorizována podle výskytu převažujícího typu srážky a charakteru deště. Pomocí indexu ve tvaru X\_YY, kde X znamená výskyt převažujícího tvaru a YY převažující charakter deště. Kategorizovaná povodí IV. řádu podle těchto indexů je zobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 41).

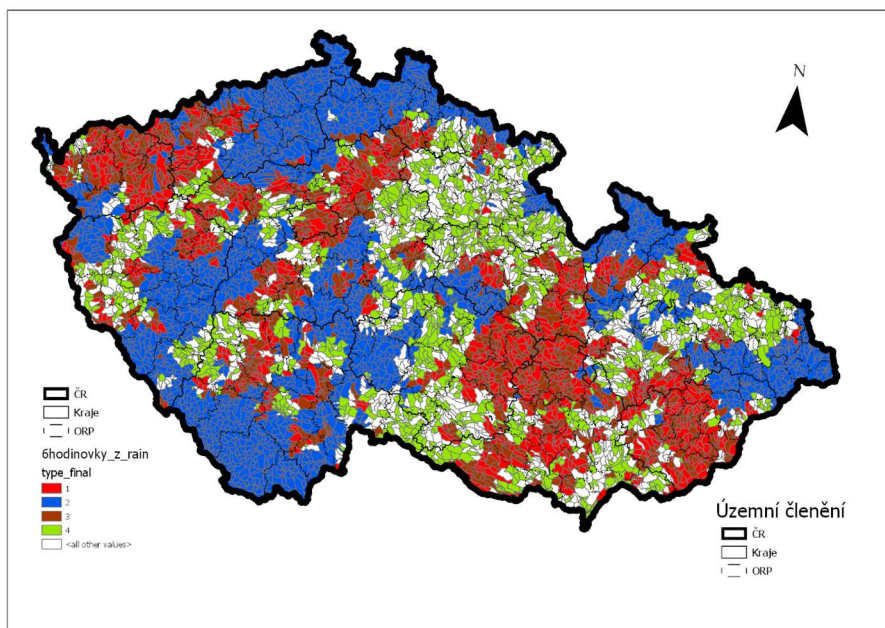


Obr. 41: Kategorizovaná povodí podle převažujícího charakteru deště, modré odstíny charakterizují výskyt rovnoměrných srážek, červené odstíny koncentrovaných srážek, zelené dvouvrcholových. Fialový odstín pak kombinaci převažující rovnoměrné srážky v kombinaci s převažujícím koncentrovaným charakterem deště

Geograficky jsou tak patrné oblasti s převažujícím výskytem spíše koncentrovaných srážek (jižní část Moravy, Karlovarsko, okolí středního a dolního úseku toku Vltavy). Rovnoměrné srážky jsou pak v horských oblastech včetně Brd a České Kanady. Na Vysočině a na Ostravsku jsou pak spíše srážky se dvěma vrcholy, anebo bez přímé vazby na tvaru srážek. Území ČR, je tak možné rozdělit do čtyřech skupin srážek (Tab. 13).

Tab. 13: Popis skupin převažujících tvarů srážek

Skupina č.	Popis
1	Převažující koncentrované srážky
2	Převažující rovnoměrné srážky
3	Převažující koncentrované srážky s častým výskytem rovnoměrných srážek
4	Oblasti srážek se dvěma vrcholy
5	Ostatní



Obr. 42: Vymezené oblasti převažujícího charakteru deště s úhrnem doby opakování 100 let

V prvních dvou oblastech (1,2), kde je dominantní podobný tvar srážky i charakter deště, lze redukovat návrhové průběhy srážek na jeden. Pro oblasti s převažujícími koncentrovanými srážkami je pak zásadní, že v těchto oblastech jsou dominantními spíše přívalové deště. V oblastech, kde nelze vysledovat jasný charakter deště (zejména Královéhradecko, Ostravsko, Slavonicko) je třeba zohlednit při návrhu opatření v krajíně větší množství tvarů srážek.

#### 4.1.3 Předchozí nasycenost na počátku návrhových srážek

Stav nasycení je klíčový z hlediska odezvy povodí na příčinnou srážku. Spoluurčuje aktuální infiltrační kapacitu půdy a retenční schopnost řešeného území. V metodě SCS-CN je tento parametr zahrnut v podobě indexu předchozí srážky určujícím úroveň hodnoty CN (IPS 1–3), ve fyzikálně založených modelech pak podle zvoleného infiltračního vztahu (Sorptivita v případě Philipovy rovnice, počáteční nasycenost a sací tlak u metody Green&Ampt atd.).

„Vzhledem k podstatným rozdílům v časové distribuci intenzit mezi šesti syntetickými tvary návrhových srážek je třeba předpokládat i podstatné rozdíly v množství srážek před jejich počátkem, a to nejen v řádu hodin. Největší předchozí srážky lze očekávat u rovnoměrných srážek reprezentovaných návrhovým tvarem F, neboť ten se vyskytuje i ve srážkových událostech značně delších než šest hodin. U větší šestihodinové srážky pak bude v průměru větší i předchozí srážka, proto byla nasycenost analyzována zvláště pro různé intervaly doby opakování srážek. Pro každý tvar a interval doby opakování byla určena průměrná předchozí nasycenost, a to na základě reálných srážkových epizod z celého území ČR (radarové a pozemní měření za deset let). Vyhodnoceny byly srážkové úhrny během 6, 24, 72 a 120 hodin (tedy ¼, 1, 3 a 5 dní) před počátkem uvažované epizody“ – převzato z publikace autora (Kavka, Muller and Strouhal, 2018). S ohledem na metodu CN se ukázalo a je popisováno v metodice, že pro české prostředí je vhodné využívat střední stav nasycení vyjma krom odvozeného tvaru F – rovnoměrného deště, který lze považovat za součást delších epizod způsobených déletrvajícimi dešti.

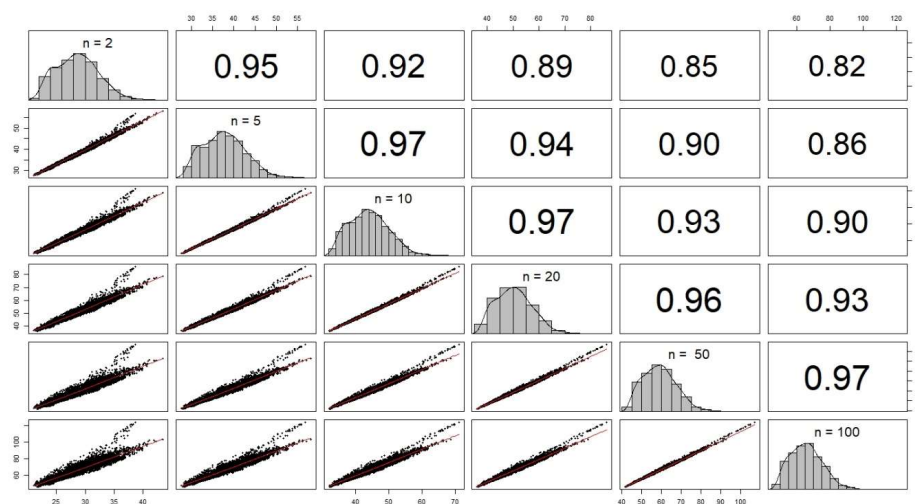
#### 4.1.4 Porovnání zdrojů srážkových dat.

Jak bylo uvedeno v úvodu této podkapitoly v ČR je publikováno a využíváno několik návrhových srážkových dat. Cílem následujících analýz je představit rozdíly mezi jednotlivými zdroji dat a tím možné vnesené nejistoty při použití rozdílných zdrojů návrhových srážek. Porovnání srážkových dat bylo provedeno v bodech stanic v případě porovnání krátkodobých dešťů odvozených Truplem anebo v podrobnosti povodí IV. řádu pro prostorová data.

Z dostupných dat byla použita následující data a přístupy:

- bodové hodnoty maximálních intenzit Trupl (Trupl, 1958),
- interpolované hodnoty 24h návrhových srážek (Kavka *et al.*, 2016) – doba opakování 100 let – rastr 1x1 km,
- denní úhrny srážek ČHMÚ – doba opakování 100 let – rastr 1x1 km,
- redukční metoda – Hrádek (Hrádek and Kovář, 1994),
- šestihodinové srážky a výskyt tvarů pro povodí IV. řádu – rain.fsv.cvut.cz.

Jako srovnávací hladina zdrojů dat byla zvolena doba opakování 100 a 20 let. Mezi nárůstem úhrnu a dobou opakování je dostatečně silná vazba, aby pro konkrétní analýzu stačila jedna srovnávací hladina. Ukázkou jsou vazby dob opakování pro šestihodinové srážky pro jednotlivá povodí IV. řádu.



Obr. 43: Porovnání 6 hodinových návrhových srážek pro různé doby opakování návrhových srážek

#### Porovnání denních (24 h) úhrnů.

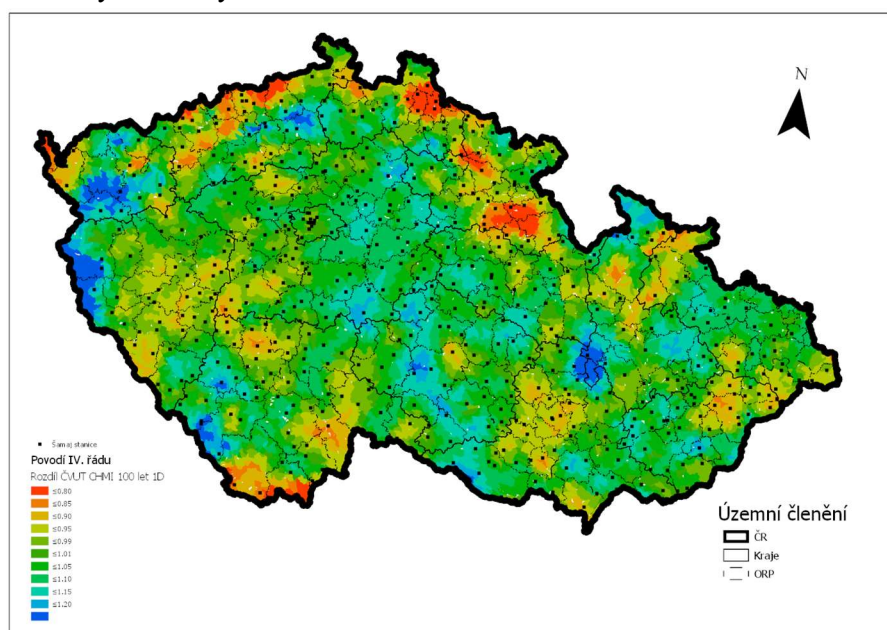
Jako zdrojová data byly použity následující vstupy

- M\_R100 – Interpolované hodnoty 24 h návrhových srážek,
- C\_R100 – Denní úhrny srážek ČHMÚ – doba opakování 100 let.

Pro jednotlivá povodí byly zpracovány histogramy četností srážek, viz. obrázek 4.

Z hlediska celkových odchylek se průměrná hodnota srážek nemění. Drobná odchylka je v případě mediánové hodnoty (2 mm). Oba datové soubory vykazují stejné odchylky. Z geografického hlediska jsou mezi datovými soubory zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 44), kde je vyznačen podíl M\_R100 / C\_R100. Červenou barvou jsou zobrazeny části území, kde novější data ČHMÚ srážkové úhrny nadhodnocují oproti starším datům. Modrá pak, kde výrazně podhodnocují. Většinou se jedná o horské oblasti ČR. A většinou jsou to místa s nižším množstvím srážkoměrných stanic, ze kterých vychází interpolační metoda. Významné rozdíly

jsou v území Českého a Slavkovského lesa, kde stanice pro odvození téměř nejsou. Z vnitrozemských oblastí se pak jedná hlavně o oblast na hranici ORP Hradec Králové, Dobruška a Rychnov nad Kněžnou. A oblast na hranici ORP Prostějov, Konice, Boskovice. Na většině území jsou rozdíly ve stoletých úhrnech do 20%.



Obr. 44: Porovnání denních úhrnů srážek s vyznačením stanic, které vstupují do interpolační metody

### Porovnání šestihodinových srážek

Jako zdrojová data byly použity následující vstupy pro doby opakování 20 a 100 let.

- M\_R100\_360m; M\_R020\_360m – Interpolované hodnoty 24h návrhových srážek, redukované pomocí Hrádka (Hrádek and Kovář, 1994) na délku srážky 6 h,
- C\_R100\_360m, C\_R020\_360m – Denní úhrny srážek ČHMÚ – redukované pomocí Hrádka na délku srážky 6 h,
- H\_n100t360, h\_n20t360 – Šestihodinové srážky a výskyt tvarů – rain.fsv.cvut.cz.

Celkově šestihodinové srážky vykazují rozdíly již v úhrnech odvozených srážek. Průměrné hodnoty šestihodinových srážek jsou pro všechna povodí IV řádu uvedeny v následující tabulce (Tab. 14).

Tab. 14: Označení zdrojových dat šestihodinových srážek (100 – značí dobu opakování)

Ozn.	Zdroj dat	Průměrná srážka [mm]	Std. srážka
<b>M_R100_360</b>	Redukovaná srážka Šamaj	84.42	15.6
<b>C_R100_360</b>	Redukovaná srážka CHMI	84.3	19.0
<b>h_n100t360</b>	Odvozené šestihodinové srážky	66.17	10.2

Průměrné hodnoty a odchylky mezi odvozenými daty pomocí redukce se neliší. Což odpovídá použité shodné redukční metodě a relativní shodě na denních úhrnech. Odvozené šestihodinové srážky na základě adjustovaných radarových dat a dlouhodobých staničních dat ale vykazují značné rozdíly.

Interpretace může být taková, že přímo odvozená šestihodinová návrhová srážka s dobou opakování 100 let (h\_n100t360) odpovídá zhruba redukované návrhové srážce s dobou opakování



Pro obě porovnání lze obecně říct, že v oblasti Jižních Čech a České Kanady jsou normované hodnoty odvozených šestihodinových srážek ( $h_{n100t360}$ ) vyšší. Zatímco v oblasti ostatních okrajových hor ČR, ale i Lounska a severní části Středočeského kraje jsou normované hodnoty šestihodinových stoletých odvozených srážek nižší.

### **Krátkodobé srážky a maximální intenzity dešťů**

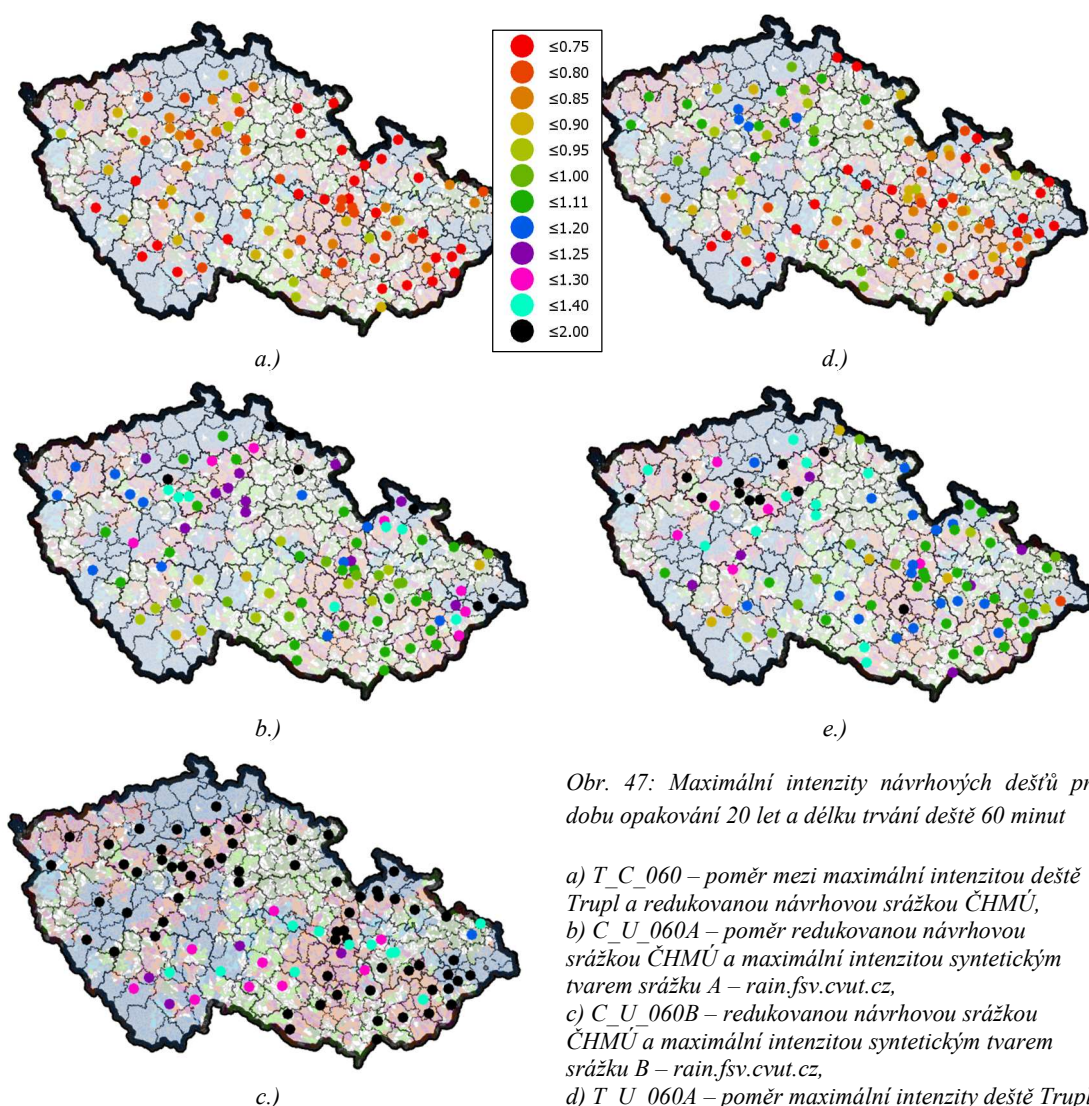
Srážková data o kratší době trvání, než šest hodin byla cíleně odvozena pouze Truplem v roce 1958 a to pouze jako maximální intenzity krátkodobých dešťů pro 98 stanic v rámci ČR (Trupl, 1958). I když se jedná o relativně starý zdroj dat, tak jsou data doposud využívána. Buď jako konkrétní hodnoty anebo v rámci výše zmiňované redukční metody (Hrádek, 1994). Odvozené syntetické tvary návrhových šestihodinových srážek s pojmem maximální intenzity nepracují i když je možné i pro syntetické deště určit maximální intenzitu deště vyhledáním maximálního jednotkového úhrnu příslušného tvaru a vynásobením srážkového úhrnu.

Pro porovnání různých datových zdrojů krátkodobých dešťů byly využity:

- M\_R020\_060m – Interpolované hodnoty 24h návrhových srážek (Kavka, 2016), redukované pomocí Hrádek (Hrádek and Kovář, 1994) na délku srážky 1 h,
- C\_R020\_060m – Denní úhrny srážek ČHMÚ – doba opakování 20 let, redukované pomocí Hrádek (Hrádek and Kovář, 1994) na délku srážky 1 h,
- U\_020\_60A, U\_020\_60B – Maximální intenzity šestihodinových úhrnů pro tvary srážek A a B – rain.fsv.cvut.cz.

Zpracování dat proběhlo pouze v 98 bodech srážkoměrných stanic, kde byly určeny maximální hodnoty Truplem. Z rastrových dat byla převzata hodnota v daném pixelu.





Obr. 47: Maximální intenzity návrhových dešťů pro dobu opakování 20 let a délku trvání deště 60 minut

- a)  $T\_C\_060$  – poměr mezi maximální intenzitou deště Trupl a redukovanou návrhovou srážkou ČHMÚ,
- b)  $C\_U\_060A$  – poměr redukovanou návrhovou srážkou ČHMÚ a maximální intenzitou syntetickým tvarem srážku A – rain.fsv.cvut.cz,
- c)  $C\_U\_060B$  – redukovanou návrhovou srážkou ČHMÚ a maximální intenzitou syntetickým tvarem srážku B – rain.fsv.cvut.cz,
- d)  $T\_U\_060A$  – poměr maximální intenzity deště Trupl a maximální intenzitou syntetickým tvarem srážku A – rain.fsv.cvut.cz,
- e)  $T\_U\_060B$  – poměr maximální intenzity deště Trupl a maximální intenzitou syntetickým tvarem srážku B – rain.fsv.cvut.cz.

Z obrázku Obr. 47 vyplývá, že při použití redukovaných návrhových srážek na délku 60 minut je velikost takto určené srážky většinou vyšší než v případě maximálních intenzit podle Trupla (Obr. 47a.), a že při použití výpočtu maximálních intenzit pomocí syntetických tvarů v moravské části ČR odpovídají spíše tvaru B (Obr. 47d.) a v české části koncentrovanějšímu tvaru A (Obr. 47e.).

## 4.2 Půdní data

Shrnutí současného stavu půdních dat, různých datových zdrojů hydrologických vlastností půd a zařazení půd podle jejich hydrologických skupin tak, jak je využívána v metodě CN, je součástí dvoučlanku autorského kolektivu Strouhal a Kavka, který je v době tisku této práce přijat k publikování v českém časopise Vodní hospodářství, a měl by být publikován v červnu 2022, a dále jednoho příspěvku v časopise Pozemkové úpravy (Strouhal *et al.*, 2021). Tyto publikace shrnují výsledky několikaletého výzkumu v této oblasti a ukazují na možný zdroj

nejistot při použití různých zdrojů půdních dat. Pro ucelenost poznatků uvedených v této práci jsou z těchto článků vybrány zásadní pasáže. Jednotlivé citované pasáže jsou odděleny krátkým komentářem.

„V českých zemích je zřejmě kvůli historickému dělení půd na zemědělský půdní fond (ZPF) a lesní půdu (LP) s odlišnými institucemi pro jejich správu přístup k hydrologickému hodnocení již dlouhé roky přinejmenším dvoukolejný. Samostatně vznikaly metodiky, odděleně probíhaly a dodnes probíhají i terénní šetření a mapování. Teprve na přelomu tisíciletí se s rozvojem GIS a možností snadnějšího zpracování velkého množství prostorových dat objevily první snahy skombinovat a vytěžit půdní data z obou půdních domén. Proto bude i následující text členěn tímto způsobem – zprvu budou odděleně uvedeny metodiky pro odvození HSP na ZPF a LP a poté budou představeny práce kombinující existující data a přístupy do výsledných čtyř celistvých produktů.“

Z těchto i dalších důvodů jsou v současné době využívány čtyři možné přístupy, které jsou uvedeny dále.

„Jedním z prvních počínů v popisu lesních půd a ostatních ploch byla již zmíněná práce Kulasové (Kulasová, Šercl and Boháč, 2004), která si kladla za cíl popsat odtokové poměry metodou CN v rozsahu celé ČR. Na projektu se podíleli řešitelé z ČHMÚ a VÚMOP a z řešení jsou patrné jejich rozdílné přístupy. Řešitelé z VÚMOP klasifikují půdy do pěti skupin, přičemž jako zvláštní podskupiny vyčleňují zemědělské půdy s vyšším obsahem skeletu a k nim přiřazují i půdy lesní. Limity infiltračních rychlostí pro zemědělskou a lesní půdu autoři nerozlišují, ovšem v hodnotách již nerespektují tehdy platnou metodiku (Janeček, 2012) a inspirují se vyššími hodnotami uvedenými jinde. Poněkud nejasně však uvádí, že se jedná o počáteční rychlosti, nikoliv o stav blízký nasycení, což je odchýlení od originální metodiky SCS“.

„Další snahu o celistvý popis hydrologických podmínek v měřítku ČR lze nalézt u řešitelů projektu Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice – dále jen Strategie. Projekt byl dokončen v roce 2015 a během jeho řešení podobně jako u o deset let staršího předchůdce vznikla celorepubliková rastrová mapa CN, tentokrát již v detailním rozlišení 10x10 m. Jako nepublikovaný meziprodukt rovněž byly odvozeny i vektorové vrstvy HSP, ovšem odděleně pro zemědělskou a lesní půdu. Pro stanovení HSP byly použity různé metodiky. Na ZPF byl aplikován převodník z HPJ dle tehdy platné Janečkovy protierozní metodiky (Janeček, 2012). a např. oproti převodníku použitému v předchozím projektu Kulasové se liší asi ve 20 kódech HPJ.“

Pro lesní půdu byla aplikována jiná metoda vycházející z porostové charakteristiky Lesního typu.

Problematickým místem jsou ostatní území, která nespádají ani do ZPF ani do lesních půd. Jakým způsobem byly určeny HSP na těchto plochách, dokumentace projektu neuvádí.

„V roce 2018 publikovali řešitelé z VUMOP (VOPRAVIL, 2018) spojitou mapu HSP, která je nabízena mezi standardními produkty VÚMOP. Mapa využívá pro lesní a ostatní neklasifikované půdy hrubší kvalitativní klasifikaci map půdotvorných substrátů. Pro zemědělské půdy je standardně využita konverze HPJ na HSP, ovšem nikoliv podle jakékoliv z publikovaných verzí metodiky, ale podle aktualizovaného, ovšem nepublikovaného převodníku“.

Posledním zdrojem půdních dat je zcela odlišný přístup vycházející z primárních dat půdních vlastností a prediktorů pro určení těchto vlastností v místech, kde vlastní měření není.

„Půdní data jsou primárně získávána jako bodové informace z jednotlivých půdních sond, případně jako orientační hodnoty pomocí neinvazivních metod. Zásadním problémem u bodových měření je extrapolace hodnot do prostoru. Čistě geometrickou interpolací v případě

půdních vlastností nelze ospravedlnit z důvodu značné proměnlivosti přírodních podmínek každého stanoviště. Proto jsou běžně využívány dva hlavní přístupy:

- přiřazení statistické hodnoty půdní vlastnosti na základě náležitosti místa k nějaké zmapované prostorové jednotce,
- přiřazením spojitéch hodnot pomocí metod digitálního mapování půd (DMP), respektive modelováním na základě znalosti vztahu hledané veličiny a známých proměnných.

V případě HSP, která je určována zejména na základě hydraulické vodivosti, jsou takových měření po celé republice k dispozici řádově pouze stovky až nízké jednotky tisíc. Historicky tak v českých zemích bylo prováděno přiřazení HSP na základě první jmenované metody – prostorové jednotky. V případě ZPF na jednotkách HPJ, u lesů podle LT. Tyto jednotky byly vždy vytvořeny v rámci víceúčelové klasifikace, nebyly zaměřeny úzce na jednu půdní vlastnost – v případě HSP na infiltrační charakteristiky půdy. To pak vedlo k někdy značné variabilitě popisované vlastnosti v rámci jedné klasifikační jednotky. Problematický je i nevyrovnaný počet měření pro každou jednotku. Při malém množství měření může být nutné aktualizovat převodník v případě zahrnutí nových dat, což je případ zpřesňování převodníků HPJ na HSP. Často u těchto převodníků nejsou uváděny počty sond, z kterých jsou data odvozena, a nejde tedy odhadnout možnou chybu.

Druhý přístup DMP využívá znalost závislosti mapované veličiny na jiných, snáze dostupných charakteristikách. Pro získání dat o nasycené hydraulické vodivosti a z toho plynoucí HSP je ve světě využívána nejčastěji především zrnitost půdy, s níž je hydraulická vodivost nejtěsněji svázána. V případě dostupných podkladů ji pak doplňují objemová hmotnost, stabilita půdní struktury, mineralogie jílových částic či obsah organického materiálu. Za příklad lze jmenovat globální dataset HSP pro použití v metodě SCS-CN s označením HYSOGs250m (Ross *et al.*, 2018). V rámci projektu TJ02000234 – Fyzikální a hydrologické vlastnosti půd na vznikla v roce 2021 spojitá mapa HSP odvozená právě na základě půdní zrnitosti. Celorepublikové mapy tří zrnitostních frakcí a zrnitostních tříd dle Taxonomického klasifikačního systému půd ČR (TKSP, klasifikace shodná s USDA) vznikly spojením map odvozených na lesní půdě v rámci řešení stejného projektu a již existujících map stejných vlastností zemědělských půd z roku 2020. Obě sady map byly odvozeny identickou metodou digitálního mapování. Následuje stručný popis datových podkladů a metody odvození.

### **Datové podklady**

Primárním datovým zdrojem jsou výsledky laboratorních analýz půdních vzorků odebraných po celé republice z kopaných sond. Data pochází ze dvou odlišných bodových databází půdních sond na zemědělské a lesní půdě.

Na pracovišti VÚMOP byla v nedávné době provedena digitalizace dat Komplexního průzkumu zemědělských půd (KPP). V letech 1961-1971 byla v celém tehdejší Československu v měřítku 1:10 000 zmapována veškerá zemědělská půda. Vykopáno bylo na českém území přibližně 500 tis. půdních sond a analyzováno násobně větší množství vzorků. Při realizaci KPP byly kopány tři typy půdních sond označené jako tzv. základní, výběrové a speciální s různým rozsahem prováděných rozborů. Základním zdrojem dat pro vytvoření map zrnitosti na zemědělské půdě v ČR bylo 36 735 výběrových sond KPP.

Zdrojem dat zrnitosti na lesní půdě je databáze Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL) obsahující celkem 6 939 historických půdních sond pořízených v období 1953–2019, převážně však do roku 1990. Z celkového počtu jen 4 794 sond obsahuje kompletní rozbor zrnitosti.

### Odvození mapy zrnitosti digitálním mapováním (DMP)

Předmětem digitálního mapování byly zrnitost půdy, hloubka půdy, obsah organického uhlíku a objemová hmotnost redukovaná. Pro potřeby tohoto článku budeme dále zmiňovat již pouze mapy zrnitosti.

K predikci zrnitosti půdy bylo využito konceptu tzv. SCORPAN faktorů, viz McBratney (McBratney, Mendonça Santos and Minasny, 2003). Tento koncept říká, že půdní vlastnost  $V$  je funkcí půdního typu (*Soil*), klimatu (*Climate*), organismů (*Organisms*), reliéfu (*Relief*), mateční horniny (*Parent material*), času (*Age*) a prostorové pozice (*Spatial position*):

$$V = f(S, C, O, R, P, A, N) = f(Q) + e \quad [36]$$

kde:

$e$  chyba predikce

$Q$  pedologicky významný prediktor.

Principem DMP je nalezení funkce vyjadřující vztah mezi  $m$  pozorováními půdního atributu  $S$  a souborem pedologicky významných prediktorů  $Q$ . To je v praxi soubor mapových vrstev o rozsahu  $M$  (bodů či pixelů). Jakmile je sestavena vhodná funkce pro predikci v  $m$  bodech, může být model rozšířen na  $M$  bodů či pixelů, respektive může být vytvořena digitální mapa.

Pro mapování zrnitosti na lesní půdě byla vybrána metoda Quantile Random Forest (QRF), která je zobecněním metody Random Forest (RF). Ta místo jedné izolované hodnoty v každém bodě dokáže předpovědět i interval spolehlivosti, který s požadovanou mírou pravděpodobnosti pokryje skutečnou hodnotu modelované proměnné.

Pro trénování QRF modelů byla využita široká škála SCORPAN prediktorů. Pro jejich podrobný výčet včetně datových zdrojů a metod odvození odkazujeme čtenáře na odborné zprávy projektů QK1820389, QK1810341 – zpracovatelem těchto projektů byl VUMOP v.v.i. pro ZPF a TJ02000234 pro les. Následující tabulka uvádí stručný přehled testovaných prediktorů.

Tab. 15: Prediktory použité pro digitální mapování zrnitosti půd

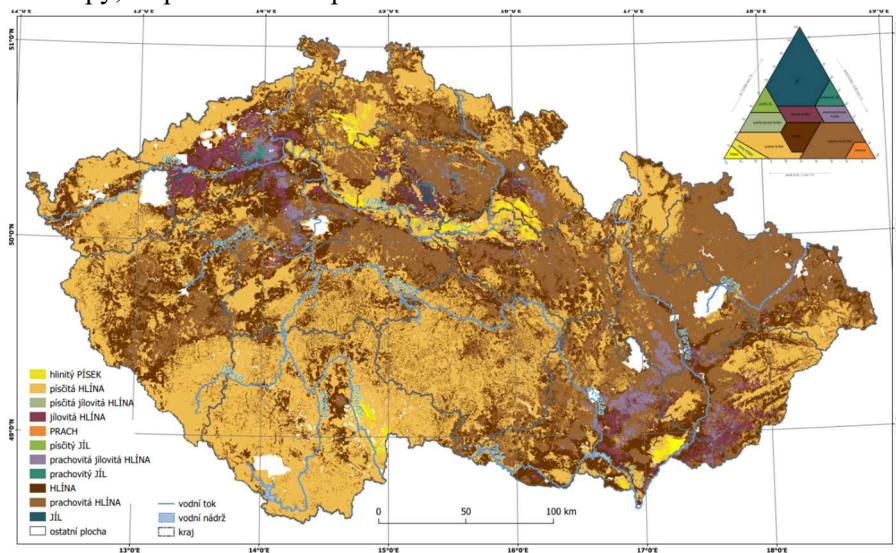
Skupina prediktorů	Seznam použitých prediktorů
S	ZPF: Půdní typ, Hloubka půdy, Půdní varieta, Štěrkovitost, Mozaika holé půdy LES: Potenciální retence, Retenční vodní kapacita, Kategorie lesních typů, Edafická řada lesních typů, Lesní vegetační stupeň, Půdní typ, Mozaika vegetačního krytu
C	Průměrná roční teplota, Průměrný roční úhrn srážek, Průměrná roční suma evapotranspirace, Regionalizovaný faktor erozního účinku deště
R	Nadmořská výška, Expozice, Sklon, Profilové zakřivení povrchu, Tangenciální zakřivení povrchu, Akumulace odtoku, Směr odtoku, LS faktor, S faktor, Vícerozměrný index plochosti údolí, Topografický index terénu, Vlhkostní index terénu, Index síly toku
P	ZPF: Půdotvorný substrát LES: Skupina hornin, Geologické oddělení, Geologická éra, Příslušnost ke kvartéru
N	Mapy vzájemných vzdáleností sond pro každou zrnitostní frakci, sondy děleny dle hodnot do 20 kvantilů.

Původní soubor půdních sond byl rozdělen na trénovací a testovací. Testovací soubor byl použit pro hodnocení přesnosti modelu a výsledné mapy. Každý model zrnitostní frakce byl

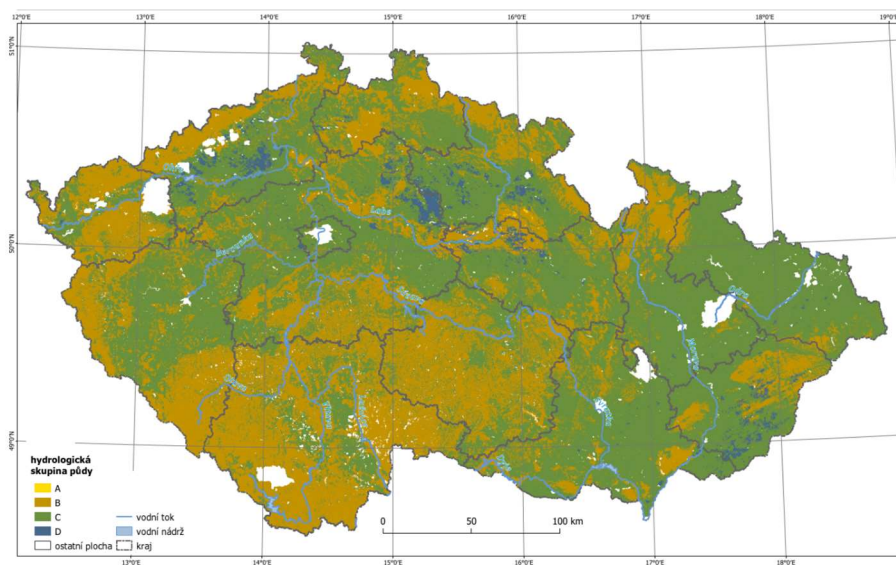
trenován celkem pět set krát za sebou. Hodnocení přesnosti predikce proběhlo na odděleném testovacím souboru pomocí tří různých metrik přesnosti“.

Analogicky s metodikou odvození globálního datasetu HYSOGs250m byla HSP určena na základě USDA klasifikace zrnitosti pro každou z dostupných hloubek v rámci půdního profilu.

Výsledná mapa zrnitostních tříd a z nich odvozených HSP pro potřeby metody CN jsou uvedeny na následujících dvou obrázcích (Obr. 48 a Obr. 49). Obě tyto mapy jsou součástí certifikované mapy, resp. souboru map.



Obr. 48: Zrnitostní třídy dle trojúhelníkového diagramu – certifikovaná mapa (Beitlerová et al., 2021)



Obr. 49: Hydrologické skupiny půd ČVUT a VUMOP – certifikovaná mapa (Beitlerová et al., 2021)

Na výše uvedených mapách jsou patrná bílá místa bez určení půdních vlastností. Jedná se o oblasti vojenských újezdů, kde historicky mapování půd neprobíhalo, povrchové doly a výsypky, tedy zcela přetvořená území a také významné vodní plochy. Data jsou zpřístupněná na serveru [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz) (viz kapitola 4.4).

### 4.3 Odvození a klasifikace malých zdrojových povodí

Získávání návrhových hodnot pro modely v krajině pomocí hydrologických modelů je relevantním přístupem na malých povodích, kde je jen velmi malé množství pozorovaných dat. Smyslem a cílem dále prezentovaného výzkumu bylo vymezení ploch malých zdrojových povodí, tedy pro území, kde lze předpokládat aplikaci hydrologických modelů pro navrhování opatření. Standardně jsou v České republice povodí kategorizována do čtyř úrovní dle významnosti. Od kategorie jednotlivých úmoří až po nejmenší povodí v kategorii IV. V této poslední kategorii jsou mezi povodími z hlediska jejich velikosti značné rozdíly. Od povodí o velikosti 20 km<sup>2</sup> až po doplňková povodí s plochou menší než 1 km<sup>2</sup>. Kategorizace povodí IV. řádu z hlediska jejich potenciální hydrologické odezvy popisuje, jak již bylo zmíněno, Strouhal (Strouhal *et al.*, 2017). Pro kategorizaci území ČR na úrovni těchto povodí z hlediska hydrologické odezvy je rozdílná velikost plochy jednou z hlavních komplikací.

Za hranici malých povodí byla převzata velikost 5 km<sup>2</sup>, která odpovídá hranici pro použití modelů podle TNV 75 2102 – úprava potoků (Havlík and Fremrová, 2010).

Vymezení povodí, která spadají do uvažované kategorie do 5 km<sup>2</sup>, ukazuje možnou plochu využití hydrologických modelů. Jejich následná klasifikace rozdělí území ČR z hlediska potenciálu ohrožení rychlým odtokem. Rozdělení plochy ČR bylo provedeno v jednotlivých velikostních třídách podle následující tabulky (Tab. 16).

Tab. 16: Plošné kategorie malých povodí na území ČR

Kategorie	od km <sup>2</sup>	do km <sup>2</sup>
005	0,3	0,7
010	0,7	1,3
020	1,7	2,3
030	2,7	3,3
040	3,5	4,5
050	4,5	5,5

Plochy menší než kategorie 005 již lze považovat za elementární odtokové plochy a nejsou hodnoceny jako plochy samostatných povodí.

#### Zdrojová data

Pro vymezení SHC bylo využito třech datových zdrojů – digitálního modelu terénu, os vodních toků a vodních nádrží. Hlavním vstupem pro určení SHC byl DTM ZABAGED® rozlišení 5x5 m. Tento DMR vzniknul pomocí LiDAR Scanning. Model terénu byl upraven tak aby respektoval osy vodních toků. Na takto upraveném modelu terénu byla v následujícím kroku odstraněna případná bezodtoká místa a následně vytvořena vrstva akumulace na základě směrování odtoku. Ke směrování odtoku byl využit nástroj jednosměrného směrování odtoku (D8).

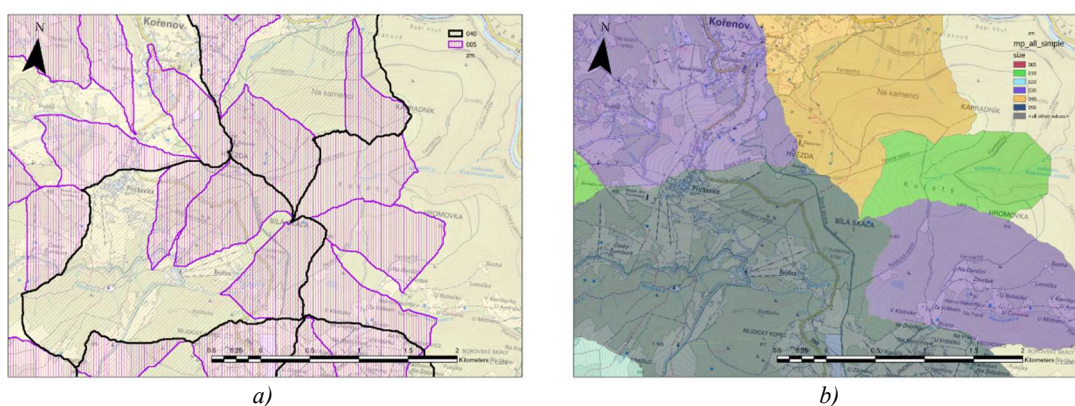
Charakteristiky povodí tvoří stejně významný zdroj variability odtoků z hlediska možné hydrologické odezvy jako variabilita úhrnů a průběhů intenzit příčných srážek.

Klasifikace je vytvářena po velikostních třídách. V tabulce níže (Tab. 17) je uvedena popisná statistika jednotlivých velikostních tříd (celková plocha povodí v dané třídě a její podíl na rozloze ČR).

Tab. 17: Popis velikostních tříd malých povodí

Třída	Celková plocha [km <sup>2</sup> ]	% z ČR	Průměrná velikost [km <sup>2</sup> ]	Sm. odch. velikosti	Počet
0.5	37633	47.7	0.52	0.132	72621
1.0	33047	41.9	1.06	0.193	31287
2.0	24179	30.7	2.09	0.186	11560
3.0	20289	25.7	3.11	0.180	6530
4.0	22611	28.7	4.16	0.312	5431
5.0	20479	26.0	5.18	0.301	3957

Povodí v různých třídách jsou do sebe vzájemně vnořena. Agregací vzájemně překrytých povodí byla vytvořena vrstva pouze největších povodí (SoLC), tak jak je ukázáno na následujícím obrázku (Obr. 50).



Obr. 50: a) překryv velikostních tříd malých povodí a b) barevně odlišená povodí podle původní třídy ve skupině SoLC v které již nejsou uvažovány vnořená menší povodí

Detailní popis vytvoření malých povodí s rozlohou do 5 km<sup>2</sup>, data vstupující do klasifikace možné hydrologické odezvy a způsob zařazení do tříd podle míry rizika jsou uvedeny v článku autora s názvem „Spatial delimitation of small headwater catchments and their classification in terms of runoff risks“ (Kavka, 2021) z kterého jsou také převzaty obrázky.

Společná skupina (SoLC), kde jsou pouze největší povodí, plošně představuje 80% plochy území ČR a pro tuto skupinu povodí byla provedena klasifikace těchto povodí z hlediska možného rizika výskytu rychlé odezvy na srážky.

Jako zdrojová pro odvození charakteristik povodí byla použita data:

- DMR 4G ČÚZK v rozlišení 5 × 5 m
- Vrstva vodních toků – ZABAGED

Na základě těchto vstupních dat byly spočteny popisné charakteristiky, které uvádí následující tabulka (Tab. 18).

Tab. 18: Morfologické charakteristiky, které byly stanoveny pro malá povodí pro jednotlivé velikostní třídy (1-5)

Název vrstvy	Zdrojová data	Poznámka
<b>Obvod</b>		
<b>Plocha</b>		
<b>Délka vodních toků</b>	Vodní toky	Celková délka vodních toků. Hodnota -1 indikuje, že se na daném území VT nevyskytují
<b>Nadmořská výška</b>	DMR4G, Vodní toky	DMR upravený tak, aby zohledňoval odtokovou dráhu v místě vodních toků
<b>Sklon povodí</b>	DMR4G	sklon v [%]
<b>Akumulace odtoku</b>	DMR4G	počet pixelů, nikoli plocha
<b>Délka odtoku</b>	DMR4G	počet pixelů, nikoli délka
<b>Délka plošného odtoku</b>	Délka odtoku, Vodní toky	Z vrstvy „Délka odtoku“ byly vyřazeny body v místech vodních toků
<b>Sklon vodních toků</b>	Sklon povodí, vodní toky	Sklon vodních toků generovaný na základě vrstvy sklonů. Hodnota -1 indikuje, že se na daném území VT nevyskytují, jedná se o indikativní hodnotu.

Pro plošně odvozené prvky v Tab. 18) byla odvozena základní popisná statistická data (minimum, maximum, průměr, směrodatná odchylka). Dále pak do analýzy vstupuje vrstva CN odvozená v rámci projektu „Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice“ (Drbal, 2016).

Z popisných charakteristik uvedených v Tab. 18 byly odvozeny další morfologické charakteristiky povodí a vodních toků.

Střední šířka povodí:

$$b = \frac{A}{L} = \frac{\text{plocha}}{Fl\_len\_max} \quad [37]$$

Tvar povodí alfa:

$$\alpha = \frac{A}{L^2} = \frac{\text{plocha}}{Fl\_len\_max^2} \quad [38]$$

Hustota vodní sítě:

$$hrs = \frac{\sum L}{A} = \frac{\text{delka\_VT}}{\text{plocha}} \quad [39]$$

Koeficient protáhlosti (Gravieli):

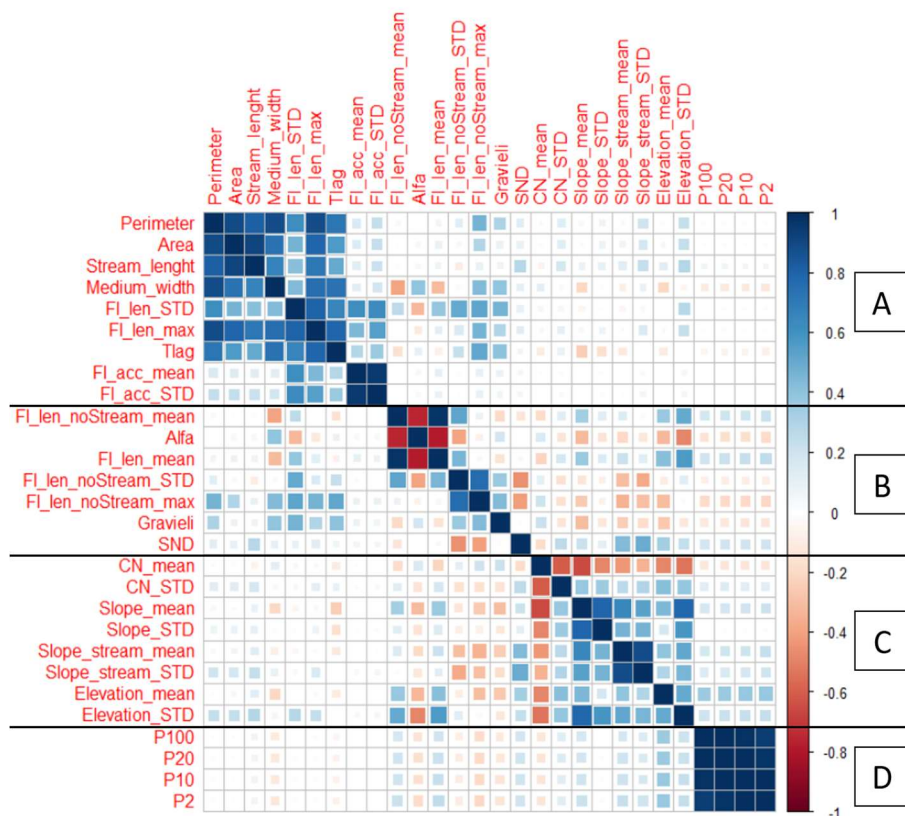
$$gra = \frac{0}{2 \cdot \sqrt{A} \cdot \pi} = \frac{\text{obvod}}{2 \cdot \sqrt{\text{plocha}} \cdot \pi} \quad [40]$$

Doba koncentrace

$$T_{lag} = Fl_{max}^{*0.8} \cdot \frac{(S+1)^{0.7}}{1900 \cdot \sqrt{Y}} \quad [41]$$



U výše popsaných parametrů byla provedena jejich vzájemná korelace a vybrány reprezentativní zástupci pro každou třídu, viz následující obrázek (Obr. 51).

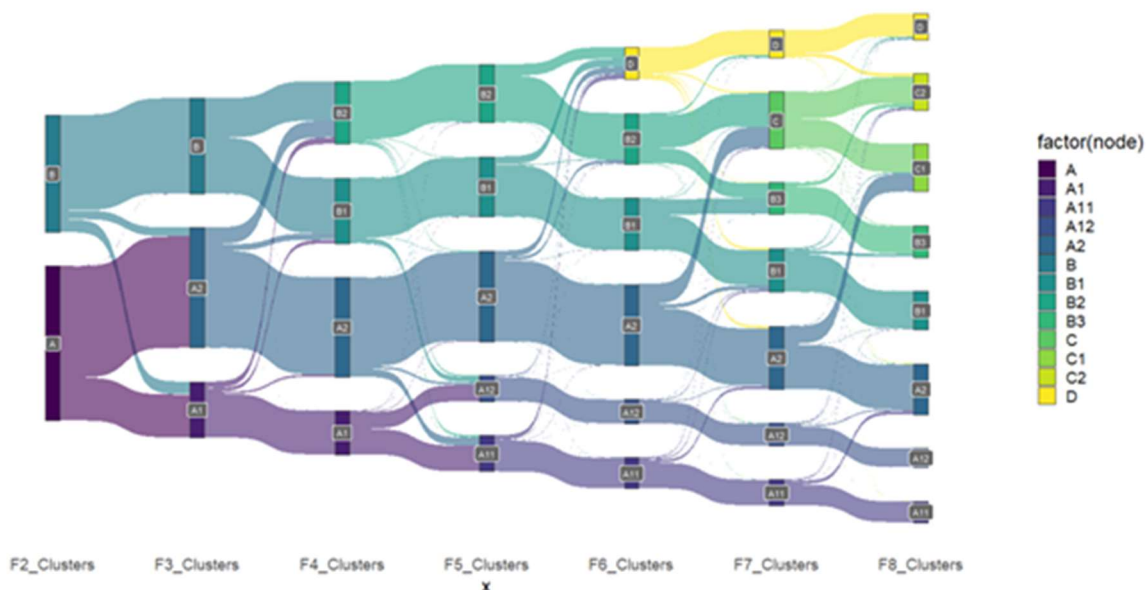


Obr. 51: Vizualizace korelačních koeficientů mezi jednotlivými parametry pro všechna povodí nezávisle na velikostní kategorii. Červená barva značí negativní vazbu, modrá barva pozitivní. Čím je vazba mezi dvěma parametry silnější tím je symbol tmavší a větší. Podobné parametry jsou seskupeny tak, aby bylo možné vizualizovat skupiny podobných parametrů (Kavka, 2021)

Ze skupin prvků seskupených podle jejich vzájemné závislosti bylo zvoleno pět parametrů, které lze považovat za nezávislé a dostatečně reprezentující a to:

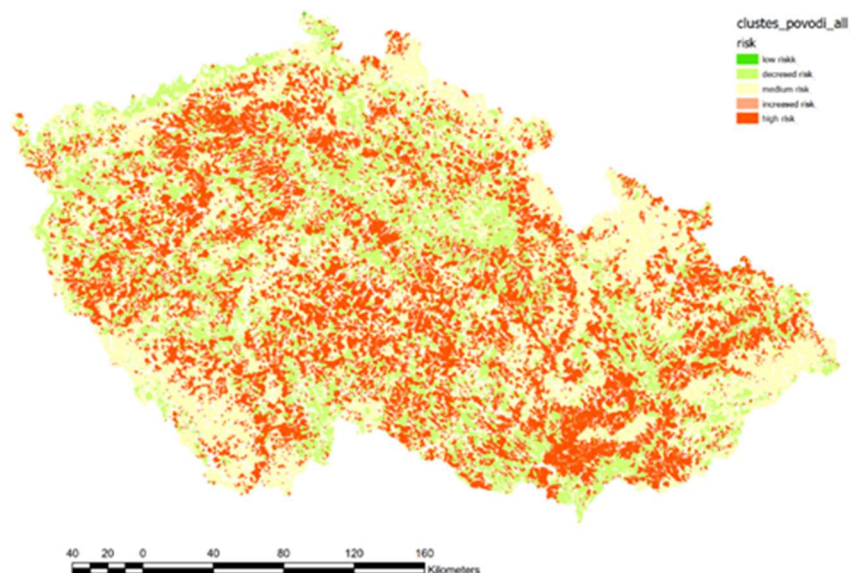
- srážka P20 – zatupující skupinu D, mezi jednotlivými hodnotami šestihodinových srážek je vzhledem k odvození těchto dat značná korelace,
- CN mean, která reprezentuje skupinu C v několika dalších parametrech. Hodnota CN vykazuje shodu jak se sklonitostí, tak s nadmořskou výškou a byla vybrána z důvodů určité hydrologické vlastnosti,
- doba zdržení (Tlag)– tento parametr charakterizuje skupinu A. Ovlivňuje tvar odtokového hydrogramu a tím i velikost kulminačního průtoku,
- Stream Network Density (SND) je parametrem, který reprezentuje množství a hustotu vodní sítě a který společně s tvarový koeficientem (Alfa) reprezentují skupinu B.

Formování jednotlivých clusterů je zobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 52).



Obr. 52: Sankey diagram vývoje skupin pro různé počty clusterů pro SoLC. Počet prvků v dané skupině odpovídá šíři pásu. Diagram zároveň zobrazuje, jak se jednotlivá povodí přeskupují dle počtu clusterů. Základní dělení je patrné již při tvorbě dvou clusterů (A, B). Od počtu clusterů šest dochází k vývoji skupin, které vznikají kombinací základního dělení na A, B a podskupiny. Kdy při šesti vzniká skupina D, která je kombinací všech dříve vzniklých skupin. Při počtu clusterů 7 a 8 pak vznikají skupiny C, které jsou kombinací části skupiny A2 a B2 (Kavka, 2021)

Výsledkem clustrové analýzy je určení míry rizika jednotlivých povodí z hlediska rizika rychlé odtokové odezvy. Rozdělení ČR je na následujícím obrázku (Obr. 53).



Obr. 53: Rozdělení malých povodí v ČR podle míry rizika rychlého odtoku.

Celá analýza je detailněji popsána ve výše uvedeném příspěvku a data jsou poskytována formou webové služby na portálu [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz).

## 4.4 Technologické zázemí poskytování dat

Získat rychle a efektivně vstupní data pro modelování je v souvislosti s využíváním geografických informačních systémů (GIS) v hydrologickém modelování velmi důležité. Proto se do popředí dostávají moderní technologie založené na principu tzv. webových služeb.

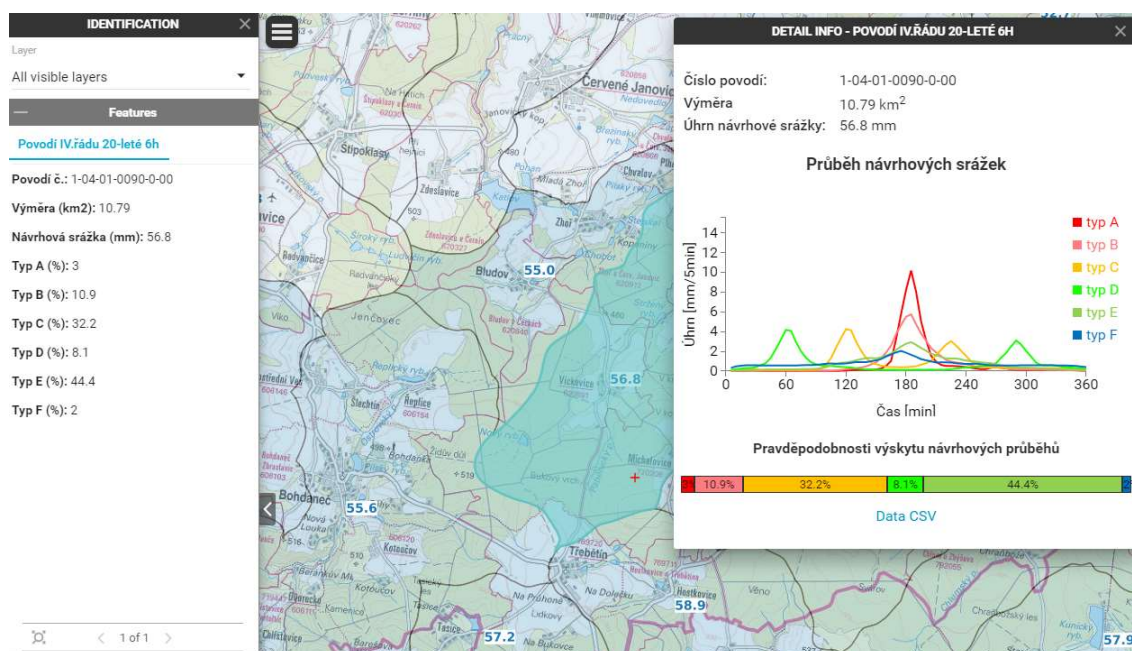
V rámci využití nástrojů geografických informačních systémů (GIS) v hydrologickém modelování se do popředí dostávají tzv. webové služby, které uživatelům umožňují rychle a efektivně získat potřebná vstupní data pro vlastní modelování. Z hlediska jednoho z klíčových vstupů – návrhových dešťů – byl tento deficit v rámci ČR značný. V rámci několikaletého výzkumu byly z důvodů poskytování dat založeny webové servery [rain1.fsv.cvut.cz](http://rain1.fsv.cvut.cz) a [rain2.fsv.cvut.cz](http://rain2.fsv.cvut.cz) a pro zpřístupnění dat jako rozdělovník a popis poskytovaných dat pak webový portál [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz). Hlavním cílem je umožnit rychlé a jednoduché získání návrhových dat kdekoli na území ČR. Vznik tohoto portálu umožňuje uživatelům získat návrhové srážky pro kteroukoliv lokalitu v rámci ČR efektivní a moderní formou. Doplňuje tak obtížně získatelné zdroje dat pro hydrologické modelování. Veřejnosti jsou nabídnuty nejen náhledy rastrových vrstev N-letých maximálních denních úhrnů, ale především specializované výpočetní nástroje pro určení úhrnů návrhových srážek a jejich typických časových průběhů pro geografická vstupní data zadaná uživatelem. Tato služba je zajišťována formou tzv. webprocessingové služby (WPS). Data jsou poskytována také jako podkladové rastrové vrstvy N-letých maximálních denních úhrnů formou webové mapové služby (WMS).

Mapový portál [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz) poskytující webové služby byl původně zaměřen pouze na poskytování dat pro odvození krátkodobých dešťů – návrhových srážek, později byla k těmto datům přidána půdní data a vymezená povodí do 5 km<sup>2</sup>.

Z tohoto pohledu je portál inovativní, především v oblasti hydrologického modelování, kde nejsou podobně navržené webové služby běžné.

### Srážková data

Za nejpropracovanější a nejčastěji využívanou metodu je aplikace s názvem „Průběhy 6hodinových návrhových srážek na povodí IV. řádu“, která umožňuje prohlížení podkladových a tematických vrstev. „Jako podkladovou vrstvu lze zvolit Základní mapu ČR nebo rastrové vrstvy orientačních hodnot maximálních denních úhrnů poskytovaných kromě této aplikace také v podobě veřejné služby OGC WMS. Z tematických vrstev může uživatel zobrazit vrstvu povodí IV. řádu s vyčíslenými úhrny návrhových srážek s délkou trvání 6 hodin. Na základě těchto hodnot je vrstva povodí řádu stylována v jednotlivých tématech (topics) podle doby opakování (2 roky, 5, 10, 20, 50 a 100 let). Aplikace umožňuje kromě základní funkcionality jako změna pohledu a přepínání vrstev či témat také měření vzdáleností a ploch, zobrazení atributů jednotlivých povodí a jejich identifikaci včetně zobrazení grafické reprezentace šesti typických průběhů návrhové srážky“, citováno z [rain.fsv.cvut.cz](http://rain.fsv.cvut.cz) (*Rain@FSv*, 2018). Zobrazené hodnoty vyjadřují pětiminutové intenzity v milimetrech, viz obrázek níže (Obr. 54). Číselné hodnoty rozdělení intenzit je možné stáhnout ve formátu csv. Možnost tímto způsobem získat data je klíčová z hlediska dalšího využití v rámci hydrologického modelování.

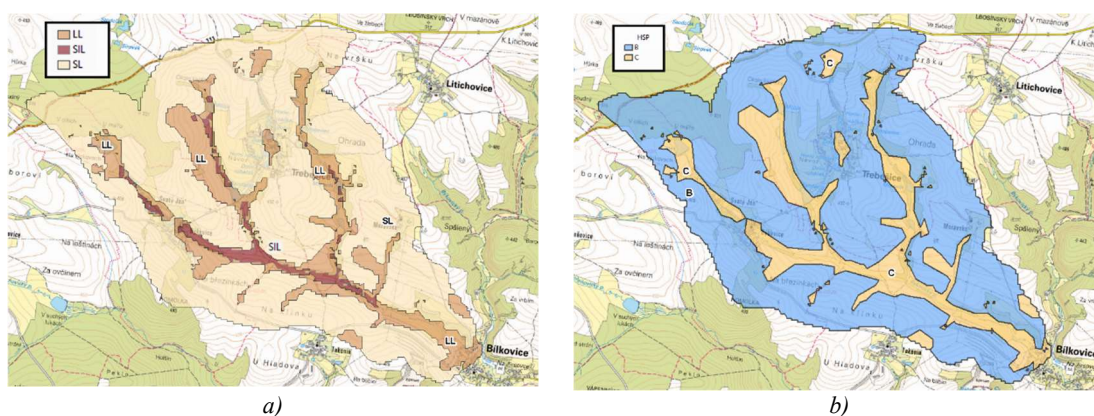


Obr. 54: Ukázka obrazovky služby „Průběhy 6hodinových návrhových srážek na povodí IV. řádu“ (Rain@FSv, 2018)

### Půdní data

WPS služba na serveru [rain.fsv.cvut.cz](https://rain1.fsv.cvut.cz) umožňuje také uživateli získat výřez rastrové vrstvy HSP podle jím definovaného polygonu ve formátu shp. Ke službě je možné připojit se např. z prostředí QGIS pomocí WPS klienta po zadání adresy služby <https://rain1.fsv.cvut.cz/services/wps>. Z nabízeného seznamu služeb se jedná o službu s názvem pudy-hsp. Služba je v tuto chvíli omezena na nekomerční využití a stažení výřezu do 20 km<sup>2</sup>.

Kromě aplikace rozšířené metody CN jsou data využitelná také ve fyzikálně založených modelech pro výpočet odtoků a erozního ohrožení, jako je například model SMODERP 2D. Pro metodu CN jsou půdní data připravena v kategoriích podle HSP. Pro fyzikálně založené modely jsou v oblasti půdních dat zásadní parametry ovlivňující infiltraci a povrchovou drsnost. V inženýrské praxi jsou tato data získávána pomocí převodních klíčů buď pomocí pedotrasferových funkcí na základě podílu zrnitostních frakcí a dalších charakteristik nebo ve zjednodušené formě podle zrnitostních tříd.



Obr. 55 a) Ukázka výřezu půdních dat získaný WPS službou pudy-zrn-tridy, b) Výřez HSP na povodí Býkovického potoka získaný WPS službou pudy-hsp (Rain@FSv, 2018)

## 5 Další směřování výzkumu

Habilitační práce shrnuje současný stav výzkumu v oblasti povrchového odtoku a v širším kontextu jeho dopady na další složky prostředí kolem nás. Tuto kapitolu poznání nelze ale považovat za uzavřenou. Další směry výzkumu v této oblasti spadají svým charakterem do základního výzkumu, jiné pak do aplikace výsledků výzkumu do praxe. V určitém směru lze předpokládat navazující činnost ve všech základních směrech této práce, experimentální měření, implementace poznatků do modelových nástrojů a jejich zavedení do praxe.

Nedílnou součástí povrchového odtoku je vodní eroze půdy. Té je v této práci věnován minimální prostor. Erozní ohroženost je primárně (nejen v ČR) řešena empirickou metodou USLE (Renard *et al.*, 1991) a je určována jako dlouhodobá průměrná hodnota. Nic méně spouštěcím procesem je povrchový odtok, který je svým charakterem epizodní. Při těchto epizodách jsou půdní zrna uvolňována jak energií kapek, tak proudící vodou. Uvolněná zrna jsou transportována a někde dále po svahu nebo ve vodním toku sedimentují. Současný stav poznání ale nedává jasnou odpověď na principy uvolnění a transport půdních zrn či půdních agregátů. Ověřenou metodou jsou dešťové simulace, které nabízejí detailní sledování vazeb mezi příčinnou srážkou, povrchovým odtokem a procesem eroze. Jednou z málo probádaných oblastí je zejména agregátové a zrnitostní složení uvolňovaných půdních částic. V této oblasti je možné využít inovativní a již dostupné technologie laserové difrakce a detailního sledování změn povrchu pomocí SfM.

S ohledem na pravděpodobnou zvýšenou extremitu srážek díky změně klimatu bude nutné dále rozvíjet fyzikálně založené modely. Je možné, že empiricky odvozené vztahy z těchto příčin přestanou dávat relevantní výsledky. Z hlediska validity využívání epizodních hydrologických modelů pro navrhování technických opatření jsou klíčové počáteční stavy, které ovlivňují hydrologickou odezvu. Je třeba pokračovat ve sledování odtoku a eroze v měřítku celých pozemků nebo malých povodí, a snažit se vysledovat možné příčiny vzniku těchto dvou procesů a využít všechny prostředky, které nabízí stále se rozvíjející technika. Zdrojem nových informací mohou být stále dostupnější a lépe vybavené bezpilotní prostředky, ale i družicová data. Ty v současné době poskytují velmi podrobná data ve viditelném spektru, ale stávají se stále dostupnější také IR senzory, vícepásmové senzory, LiDAR technologie. Rutinní nasazení těchto prostředků pro opakované nálety umožní průběžně sledovat změny jak na půdním povrchu, tak na vegetaci. V užití moderních prostředků je velký potenciál pro další výzkum, i když bude zároveň důležité pokračující kontinuální měření srážek a půdních charakteristik. Důležitou roli budou stále mít i měření půdních charakteristik a změn vlhkosti.

Výše uvedené poznatky mohou vést nejen k dalším metodám validace modelu SMODERP, ale k integraci dalších procesů. Ať se jedná o proces eroze, zpřesnění návrhových stavů, testování jiných přístupů (infiltrační rutiny, nahrazení kinematické vlny difuzní, vícesměnný odtok, zrychlení výpočtu atp.), ale i zpřístupnění dalších vstupních dat odborné veřejnosti.

Paleta možného dalšího výzkumu je široká a jeho zacílení není jen v přírodní krajině, ale také například v aplikaci ochrany umělých zemních těles, kde se vyskytují podobné procesy akcelerované většními sklony a umělým souvrstvím. Možná nestabilita svrchní vrstvy půdy a pohyby geotextilních materiálů, které jsou využívány na ochranu povrchu, způsobené extrémními srážkami jsou specifickou inženýrskou úlohou. Dynamika povrchového odtoku a eroze ve vazbě na stabilitu těchto svahů není zcela prozkoumanou oblastí.

## 6 Seznamy a zdroje

### 6.1 Řešené projekty a podíl autora – komentář

Přílohou práce je jeden odborný článek, který ilustruje propojení několika metod měření s kalibrací a validací modelu, na který je odkazováno v textu. Práce se na několika místech propojuje s aktivitami na běžících nebo ukončených projektech. V těch jsem působil buď v roli hlavního řešitele, případně řešitele za ČVUT, případně jako člen řešitelského kolektivu – mentor. Ukončené projekty byly zakončeny výzkumnými zprávami a během jejich řešení vznikla celá řada výsledků. Následující komentář propojuje aktivity na jednotlivých projektech s obsahem této práce a zároveň jsou zde uvedeni spolupracovníci tam, kde je to relevantní. Rešeršní část uvedená v kapitole 1.1 a 1.2 vznikala nezávisle na řešených projektech.

#### **QJ1520265 - Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině (2015-2017)**

Cílem toho projektu bylo doplnit znalostní deficit v oblasti návrhových srážek ve vazbě na další nejistoty v hydrologických modelech. Na tomto projektu, který jsem vedl jako hlavní řešitel s ČVUT v Praze, spolupracovali kolegové s Ústavu fyziky atmosféry AV ČR a SWECO Hydroprojekt. Primární zpracování srážkových dat proběhlo na pracovišti UFA. Návrhové srážky jsou pak společným výsledkem. V rámci projektu vznikla stránka rain.fsv.cvut.cz a WMS služby poskytující srážková a později další data. Hlavním tvůrcem služeb je Martin Landa z katedry Geomatiky. Srážková data a jejich poskytování se promítly zejména do kapitoly 4.1. Problematika hydrologického modelování a klasifikace povodí IV. řádu probíhala na pracovišti Katedry hydromelioračí a krajinného inženýrství. Zpracování v modelu MIKE – SHE měl na starosti Luděk Strouhal a zpracování v HEC – HMS pak Karel Vlasák v rámci své diplomové práce, výpočty pomocí modelu SMODERP pak já, což se zde promítlo do kapitoly 3.4.2. Na klasifikaci povodí, rešerši hydrologických modelů a jejich finální výběru se kromě mě podílel hlavně Luděk Strouhal (kapitoly 1.3.1, 1.4 a 3.4.2). Na dalších dílčích úkolech dále spolupracovali Lenka Weyskrabová, Jakub Jeřábek, Martin Neumann a další. Společným výsledkem je pak certifikovaná metodika (Kavka, Muller and Strouhal, 2018).

#### **QK1910029 - Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích (2019-2022)**

Jedná se o běžící projekt, jehož jsem hlavním řešitelem, a který navazuje na předchozí (QJ1520265). Pracovní tým byl rozšířen o pracoviště ČHMÚ a publikace většiny výsledků budou probíhat v následujícím období. V rámci projektu byla zpracována analýza malých povodí, což se promítlo do kapitoly 4.3 a publikovaného článku (Kavka, 2021).

#### **TH02030428 - Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí (2017-2020)**

Cílem tohoto projektu byl výzkum povrchového odtoku na umělých svazích podél pozemních komunikací. Na tomto projektu, který jsem vedl, se krom našeho pracoviště podílela také firma STRIX Chomutov, a.s. (hlavní řešitel) a Geotechnika s.r.o. Vědecko-výzkumné aktivity byly primárně řešeny naším pracovištěm. V rámci tohoto projektu byl navržen a využíván halový dešťový simulátor a stacionární simulátor (kapitola 2.2.1). Na vývoji těchto zařízení se kromě mě podílel také hlavně Martin Neumann, Tomáš Laburda a Adam Tejkl, kteří se také podíleli na prováděných experimentech. Zpracované výsledky se promítly do kapitol 2.4.3 (kterou jsem zpracovával já) a 3.4.1 ve spolupráci s Martinem Neumannem. V aplikační rovině v rámci

projektu vznikl SW SMODERP Line, na kterém jsem spolupracoval s Martinem Landou, Ondřejem Peškem (oba katedra Geomatiky) a Jakubem Jeřábkem. Zpracovanou ukázkovou úlohu (kapitola 3.5.2) a návod k programu jsem zpracovával já.

### **TJ02000234 - Fyzikální a hydropedologické vlastnosti půd ČR (2019-2021)**

Cílem tohoto projektu bylo na základě digitálního mapování půd určit hydropedologické vlastnosti půd. V tomto projektu jsem figuroval v roli člena týmu – mentora. Samotné digitální mapování půd uvedené v kapitole 4.2 bylo zpracováno na pracovišti VÚMOP, finalizace map pak na našem pracovišti. Na finalizaci se podílel hlavně Luděk Strouhal a Adam Tejkl. Rešeršní část vývoje půdních dat v ČR jsou publikovány ve společných člancích s Luděkem Strouhalem (rovněž v kapitole 4.2), který na nich zpracoval větší část.

**SMODERP** – model tak jak je prezentován, vzniká postupně s částečnou podporou zde uvedených i dalších grantů. Hlavními spoluautory na vývoji modelu jsou Jakub Jeřábek, Martin Landa, Ondřej Pešek a Jan Zajíček. Dále pak studenti, kteří model testovali nebo vyvíjeli dílčí části. Historie modelu (kapitola 3.1.1) vychází z vlastní disertační práce, popis vnitřní struktury (kapitola 3.1.2) vychází z manuálu k modelu, na kterém jsem spolupracoval s Jakubem Jeřábkem. Studenti se podílejí na dílčích úkolech, které jsou postupně implementovány do modelu. Vstupy do modelu (kapitola 3.2) jsou převzaty z diplomové práce Jan-Františka Kubáta, jehož jsem byl školitel. Výstupy z modelu (kapitola 3.3) a modelový příklad (kapitola 3.5.1) jsem zpracoval já.

**Dešťové simulátory a na nich měřená data** – jak je zmíněno ve vlastní práci, vývoj simulátorů a zejména pak samotné zajištění experimentů je týmovou prací. Ukázková měření (kapitola 2.4) jsou jen částí rozsáhlé databáze experimentů. V této práci uvedené experimenty (podkapitoly 2.4.1 a 2.4.2) jsem inicioval a tato měření nejsou primárně navázána na žádný z výše uvedených projektů. Data uvedená v podkapitole 2.4.2 vznikla v rámci společné publikace ve spolupráci s Davidem Zumrem a Luděkem Strouhalem, který měl na zpracování větší podíl.

## **6.2 Publikace použité v této práci**

254/2001 Sb. *Vodní zákon* (2001). Available at: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254> (Accessed: 17 May 2022).

AG BODEN (1994) *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 4. ed. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter.

Álvarez-Mozos, J. *et al.* (2014) 'Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 1: Effects on runoff and soil loss', *CATENA*, 118, pp. 168–178. doi: 10.1016/j.catena.2013.05.018.

Arguelles, A. C. C. *et al.* (2013) 'Evaluation of overland flow model for a hillslope using laboratory flume data', *Water Science and Technology*, 68(5), pp. 1188–1194. doi: 10.2166/wst.2013.341.

Arnold, J. G. *et al.* (2012) 'SWAT: Model Use, Calibration, and Validation', *Transactions of the ASABE*, 55(4), pp. 1491–1508. doi: 10.13031/2013.42256.

ASTM (2019) *ASTM D6460 - 19 Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Earthen Channels from Stormwater-Induced Erosion*. doi: 10.1520/D6460-19.

Báčová, M. and Krása, J. (2016) 'Application of historical and recent aerial imagery in monitoring water erosion occurrences in Czech highlands', *Soil and Water Research*, 11(4), pp. 267–276. doi: 10.17221/178/2015-SWR.

Bauer, M. *et al.* (2014) 'Experimental research of soil erosion processes in the Czech Republic', *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2(3), pp. 131–138. doi: 10.5593/sgem2014/b32/s13.018.

Beitlerová, H. *et al.* (2021) 'Fyzikální a hydropedologické vlastnosti půd ČR (certifikovaná mapa)'. Available at: <https://rain.fsv.cvut.cz/pudy/hydro-pudy/>.

- Betson, R. P. (1964) 'What is watershed runoff?', *Journal of Geophysical Research*, 69(8), pp. 1541–1552. doi: 10.1029/JZ069I008P01541.
- Beven, K. (2010) 'Rainfall-runoff modelling: the primer / Keith Beven. – 2nd ed', *John Wiley & Sons, Ltd*, pp. 157–175. Available at: <https://www.wiley.com/en-gb/Rainfall+Runoff+Modelling%3A+The+Primer%2C+2nd+Edition-p-9780470714591> (Accessed: 10 May 2022).
- Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979) 'A physically based, variable contributing area model of basin hydrology', *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), pp. 43–69. doi: 10.1080/02626667909491834.
- Bocco, G. (1991) 'Gully erosion: Processes and models', *Progress in Physical Geography*, 15(4), pp. 392–406. doi: 10.1177/030913339101500403.
- Bředa, N. J. J. (2003) 'Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies', *Journal of Experimental Botany*, 54(392), pp. 2403–2417. doi: 10.1093/JXB/ERG263.
- Carroll, R. G., Rodencal, J. and Collin, J. G. (1992) 'Geosynthetics in erosion control - the principles', *Geotextiles and Geomembranes*, 11(4–6), pp. 523–534. doi: 10.1016/0266-1144(92)90030-E.
- Castillo, V. M., Martinez-Mena, M. and Albaladejo, J. (1997) 'Runoff and Soil Loss Response to Vegetation Removal in a Semiarid Environment', *Soil Science Society of America Journal*, 61(4), pp. 1116–1121. doi: 10.2136/sssaj1997.03615995006100040018x.
- Cerdan, O. *et al.* (2002) 'Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management', *Catena*, 46(2–3), pp. 189–205. doi: 10.1016/S0341-8162(01)00166-7.
- Cerdan, O. *et al.* (2006) 'Sheet and Rill Erosion', in *Soil Erosion in Europe*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, pp. 501–513. doi: 10.1002/0470859202.ch38.
- Chow, V. Te *et al.* (1988) 'APPLIED HYDROLOGY'.
- Císlarová, M., Šimůnek, J. and Vogel, T. (1988) 'Changes of steady-state infiltration rates in recurrent ponding infiltration experiments', *Journal of Hydrology*, 104(1–4), pp. 1–16. doi: 10.1016/0022-1694(88)90154-0.
- ČKAIT (1998) 'DOST – Hrazení bystřin'.
- Devátý, J. (2014) 'AUTOMATIZOVANÉ VYTVOENÍ VEKTOROVÉ MAPY VYUŽITÍ PLOCH Z DOSTUPNÝCH DATOVÝCH ZDROJŮ', *SBORNÍK ABSTRAKT KONFERENCE GIS A ŽIVOTNÍ PROSTEDÍ*. Available at: [https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/Konference/GISZP/GISZP\\_2014\\_sbornik.pdf](https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/Konference/GISZP/GISZP_2014_sbornik.pdf).
- Drbal, K. (2016) 'Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice', *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 58(6), p. 4. doi: 10.46555/VTEL.2016.05.001.
- Dunne, T. and Black, R. D. (1970) 'Partial Area Contributions to Storm Runoff in a Small New England Watershed', *Water Resources Research*, 6(5), pp. 1296–1311. doi: 10.1029/WR006I005P01296.
- Dunne, T. and Black, R. D. (1971) 'Runoff Processes during Snowmelt', *Water Resources Research*, 7(5), pp. 1160–1172. doi: 10.1029/WR007I005P01160.
- Esteves, M. *et al.* (2000) 'Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain: Numerical results versus observed values', *Journal of Hydrology*, 228(3–4), pp. 265–282. doi: 10.1016/S0022-1694(00)00155-4.
- Green, W. H. and Ampt, G. A. (1911) 'Studies on soil physics: Part I. The flow of air and water through soils', *J. Agric. Sci.*, 13, p. 27.
- Havlík, A. and Fremrová, L. (2010) 'TNV 75 2102 Úpravy potoků'. Praha: MZE ČR, p. 22.
- Holý, M. (1984) 'Vztahy mezi povrchovým odtokem a transportem živin v povodí vodárenských nádrží (dílčí zpráva vzkumného ústavu VI-4-15/01-03) (in Czech)', *Prague*.
- Hrádek, F. (1998) *Hydrologický model DesQ-MaxQ*. Available at: <http://www.desq-maxq.cz/> (Accessed: 17 May 2022).
- Hrádek, F. and Kovář, P. (1994) 'Výpočet náhradních intenzit přivalových dešťů', *Vodní- hospodářství*, 11, p. 49.
- Iserloh, T. *et al.* (2013) 'European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics', *Catena*. doi: 10.1016/j.catena.2013.05.013.



- Iserloh, T. *et al.* (2013) 'European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics', *CATENA*, 110, pp. 100–112. doi: 10.1016/j.catena.2013.05.013.
- Janeček, M. (2007) *Ochrana zemědělské půdy před erozí : metodika*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy. Available at: [https://books.google.cz/books/about/Ochrana\\_zemědělské\\_půdy\\_před\\_erozí.html?id=DUXBtgAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.cz/books/about/Ochrana_zemědělské_půdy_před_erozí.html?id=DUXBtgAACAAJ&redir_esc=y).
- Janeček, M. (2012) 'Ochrana zemědělské půdy před erozí- - Metodika'. Praha: Česká zemědělská univerzita Praha.
- Janeček, M. and Váška, J. (2001) *DOST 4.06 – Hydrologické výpočty v protierozní ochraně půdy*.
- Kadlec, V. *et al.* (2014) 'Navrhování technických protierozních opatření'.
- Kaisler, J. *et al.* (2014) 'ČSN 75 2935 – Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních'. Český normalizační institut.
- Kale, R. V and Sahoo, B. (2011) 'Green-Ampt Infiltration Models for Varied Field Conditions: A Revisit', *Water Resources Management*. Springer, pp. 3505–3536. doi: 10.1007/s11269-011-9868-0.
- Kavka, P.; Vaníček, M.; Dufka, D. (2021) 'Ochrana umělých svahů před erozí a stabilizace povrchové vrstvy', p. 29.
- Kavka, P. *et al.* (2011) 'Měření povrchového odtoku a eroze sedimentů na terénních experimentálních plochách', *Stavební obzor*, 4, p. 5.
- Kavka, P. (2012) *Kalibrace a validace modelu SMODERP (Disertační práce)*.
- Kavka, P. *et al.* (2015) 'Comparison of runoff and soil loss generated on two plot sizes during rainfall simulation experiments', *EGU General Assembly 2015, held 12-17 April, 2015 in Vienna, Austria. id.10736*, 17. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015EGUGA..1710736K> (Accessed: 17 October 2018).
- Kavka, P. *et al.* (2016) 'Nástroj pro odvození návrhových srážkových úhrnů na území ČR', *Vodní hospodářství*, 66(8), pp. 9–15.
- Kavka, P. *et al.* (2018) 'DOUBLE SIZE FULLJET FIELD RAINFALL SIMULATOR FOR COMPLEX INTERRILL AND RILL EROSION STUDIES', *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*, 27(2), pp. 183–194. doi: 10.14311/CEJ.2018.02.0015.
- Kavka, P. *et al.* (2019) 'Developing of the laboratory rainfall simulator for testing the technical soil surface protection measures and droplets impact', *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019 - Proceedings*, 2019-Sept. doi: 10.32075/17ECSMGE-2019-0392.
- Kavka, P. (2021) 'Spatial delimitation of small headwater catchments and their classification in terms of runoff risks', *Water (Switzerland)*, 13(23). doi: 10.3390/W13233458.
- Kavka, P. and Cajthaml, J. (2017) 'Klasifikace povodí 4. řádu a návrhové krátkodobé deště'. Available at: <http://rain.fsv.cvut.cz/>.
- Kavka, P., Jeřábek, J. and Landa, M. (2022) 'SMODERP2D-Sheet and Rill Runoff Routine Validation at Three Scale Levels', *Water 2022, Vol. 14, Page 327*, 14(3), p. 327. doi: 10.3390/W14030327.
- Kavka, P., Müller, M. and Strouhal, L. (2018) *Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině*. first. Prague: ČVUT v Praze. Available at: <https://rain.fsv.cvut.cz/>.
- Kavka, P. and Neumann, M. (2021) 'Technical note swinging-pulse sprinkling head for rain simulators', *Hydrology*, 8(2). doi: 10.3390/HYDROLOGY8020074.
- Kavka, P. and Zajicek, J. (2013) 'Soil erosion model smoderp - 1D and 2D modelling', *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 1, pp. 895–902. doi: 10.5593/SGEM2013/BB2.V1/S11.037.
- Kubát, J.-F. (2022) *SMODERP 2D - analýza vlivu vstupních dat na hydrologickou odezvu (diplomová práce)*. Available at: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/99756> (Accessed: 17 May 2022).
- Kulasová, B. and Fremrová, L. (2014) 'ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod'. Praha: Český normalizační institut.
- Kulasová, B., Šercl, P. and Boháč, M. (2004) *Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní, ČHMÚ*. Praha.

- Lafren, J. M. *et al.* (1997) 'WEPP-predicting water erosion using a process-based model', *Journal of Soil and Water Conservation*, 52, p. 96.
- Landa, M. *et al.* (2019) 'SMODERP2D Soil Erosion Model Entering AN Open Source ERA with Gpu-Based Parallelization', *ISPAr*, 4214(4/W14), pp. 143–149. doi: 10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-4-W14-143-2019.
- Lawrence, D. S. L. (2000) 'Hydraulic resistance in overland flow during partial and marginal surface inundation: Experimental observations and modeling', *Water Resources Research*, 36(8), pp. 2381–2393. doi: 10.1029/2000WR900095.
- Maidment, D. R. (1993) 'Handbook of hydrology'.
- Manning, R. (1891) 'On the flow of water in open channels and pipes', *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 20, pp. 161–207.
- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L. and Minasny, B. (2003) 'On digital soil mapping', *Geoderma*, 117(1–2), pp. 3–52. doi: 10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
- MD ČR (2003) *TP 53 - Protierozní opatření na svazíchpozemních komunikací*. Available at: <https://pjpgk.cz/>.
- Mein, R. G. and Larson, C. L. (1973) 'Modeling infiltration during a steady rain', *Water Resources Research*, 9(2), pp. 384–394. doi: 10.1029/WR009I002P00384.
- Miller, S. J., Fischenich, J. C. and Thornton, C. I. (2012) *Stability Thresholds and Performance Standards for Flexible Lining Materials in Channel and Slope Restoration Applications*.
- Morgan, R. P. C. *et al.* (1998) 'The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments', *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(6), pp. 527–544. doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5.
- Müller, M., Bližňák, V. and Kašpar, M. (2018) 'Analysis of rainfall time structures on a scale of hours', *Atmospheric Research*, 211, pp. 38–51. doi: 10.1016/j.atmosres.2018.04.015.
- MŽP ČR (2008) 'Metodika odboru ochrany vod, která stanovuje postup komplexního řešení protipovodňové a protierozní ochrany pomocí přírodních blízkých opatření', *Věstník ministerstva životního prostředí*, XVIII.
- Návod programu SMODERP* (2022). Available at: <https://storm.fsv.cvut.cz/cinnost-katedry/volne-stazitelne-vysledky/smoderp/?lang=cz> (Accessed: 17 May 2022).
- Neumann, M. and Kavka, P. (2015) 'VYUŽITÍ DVOU METOD MĚŘENÍ RYCHLOSTI POVRCHOVÉHO ODTOKU KE KALIBRACI SRÁŽKODTOKOVÝCH MODELŮ', in *Voda a krajina 2015*. Praha, CZ, pp. 81–89.
- Onstad, C. A. (1984) 'Depressional Storage on Tilled Soil Surfaces', *Transactions of the ASAE*, 27(3), pp. 729–732. doi: 10.13031/2013.32861.
- Pandey, A. *et al.* (2016) 'Physically based soil erosion and sediment yield models revisited', *Catena*, 147, pp. 595–620. doi: 10.1016/j.catena.2016.08.002.
- Philip, J. R. (1957) 'The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution', *Soil Science*, 83(5), pp. 345–357. doi: 10.1097/00010694-195705000-00002.
- Rain@FSv* (2018). Available at: <https://rain.fsv.cvut.cz/> (Accessed: 17 May 2022).
- Renard, K. G. *et al.* (1991) 'RUSLE: Revised universal soil loss equation', *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(1), pp. 30–33. Available at: <http://www.jswconline.org/content/46/1/30.short>.
- Ross, C. W. *et al.* (2018) 'HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling', *Scientific Data 2018 5:1*, 5(1), pp. 1–9. doi: 10.1038/sdata.2018.91.
- Šamaj, F., Valovič, Š. and Brázdil, R. (1985) 'Denné úhrny zrážok s mimoriadnou výdatnosťou v ČSSR v období 1901 - 1980', in Šamaj, F. (ed.) *Zborník prác Slovenského hydrometeorologického ústavu*. Bratislava: ALFA, p. 9.
- Schwab, G. O. (1993) *Soil and water conservation engineering*. Wiley.
- SCS (1986) *Urban hydrology for small watersheds*. Washington, DC.
- Singh, V. P. (1994) 'Accuracy of kinematic wave and diffusion wave approximations for space independent flows', *Hydrological Processes*, 8(1), pp. 45–62.
- Singh, V. P. (2002) 'Is hydrology kinematic?', *Hydrological Processes*, 16(3), pp. 667–716. doi: 10.1002/hyp.306.

*SMODERP Line* (2021). Available at: <https://smoderp.fsv.cvut.cz/smoderp-l/popis-modelu/> (Accessed: 17 May 2022).

Sokol, Z. and Bližňák, V. (2009) 'Areal distribution and precipitation-altitude relationship of heavy short-term precipitation in the Czech Republic in the warm part of the year', *Atmospheric Research*, 94(4), pp. 652–662. doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2009.03.001.

SPU (2022a) *Metodický návod k provádění pozemkových úprav*. Available at: <https://www.spucr.cz/uzemkovy-uprav/uzemkovy-uprav-pravni-predpisy-a-metodiky/metodiky-navod-k-provedeni-uzemkovy-uprav-a-technicky-standard-planu-spolecnych-zarizeni> (Accessed: 17 May 2022).

SPU (2022b) *Technický standard plánu společných zařízení*. Available at: <https://www.spucr.cz/uzemkovy-uprav/uzemkovy-uprav-pravni-predpisy-a-metodiky/metodiky-navod-k-provedeni-uzemkovy-uprav-a-technicky-standard-planu-spolecnych-zarizeni> (Accessed: 17 May 2022).

Stähli, M., Jansson, P. E. and Lundin, L. C. (1999) 'Soil moisture redistribution and infiltration in frozen sandy soils', *Water Resources Research*, 35(1), pp. 95–103. doi: 10.1029/1998WR900045.

Strouhal, L. *et al.* (2017) 'Classification of small watersheds in Czech Republic for hydrological modelling', *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 17(31), pp. 121–128. doi: 10.5593/SGEM2017/31/S12.016.

Strouhal, L. *et al.* (2021) 'Fyzikální a hydrologické vlastnosti půd nejen pro návrh společných zařízení v rámci PÚ', *Pozemkové úpravy*, 2, p. 9.

Strouhal, L., Kavka, P. and Weyskrabová, L. (2018) 'Variabilita odezvy vybraných hydrologických modelů na typické průběhy krátkodobých srážek', *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 60(6), p. 4. doi: 10.46555/VTEI.2017.11.001.

Strouhal, L., Zúmr, D. and Kavka, P. (2016) 'Investigating runoff generation on compacted subsoil using a field rainfall simulator', *Geophysical Research Abstracts*, 18, pp. 2016–1135.

Sutherland, R. A. (1998) 'A critical assessment of the research conducted at the hydraulics and erosion control laboratory - a focus on rolled erosion control systems applied to hillslopes', *Geotextiles and Geomembranes*, 16(2), pp. 87–118. doi: 10.1016/S0266-1144(98)00002-8.

Tomášů, M. (2013) *Tvorba nástroje pro stanovení krátkodobých návrhových dešťů na základě interpolace a redukce*.

Trupl, J. (1958) *Intenzity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy, Práce a studie VÚV Praha*. Praha: VÁŠV Praha.

USACE (2000) 'Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual CPD-74B'.

Váška, J. (2000) *DOST 3.17 - Protierozní ochrana*.

Vlasák, K. (2018) *Citlivostní analýza vstupních parametrů modelu HEC-HMS*.

Vogel, T., Van Genuchten, M. T. and Cislérova, M. (2000) 'Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions', *Advances in Water Resources*, 24(2), pp. 133–144. doi: 10.1016/S0309-1708(00)00037-3.

Vokurka, A. and Zlatuška, K. (2020) *Technická doporučení pro hrazení bystrin a strží*. Praha: MZe ČR. Available at:

[https://eagri.cz/public/web/file/651981/Technicka\\_doporuceni\\_hrazeni\\_bystrin\\_strzi\\_A4\\_WEB.pdf](https://eagri.cz/public/web/file/651981/Technicka_doporuceni_hrazeni_bystrin_strzi_A4_WEB.pdf).

VOPRAVIL, J. (2018) 'Optimalizace využívání zemědělské půdy z pohledu podpory infiltrace a retence vody s dopady na predikci sucha a povodní v podmínkách České republiky', *VUMOP v.v.i.*

von Werner, M. (2006) *Erosion-3D User manual. Ver. 3.1.1*. Berlin.

Woolhiser, D. A. *et al.* (1989) 'KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model', 25.

Wösten, J. H. *et al.* (1999) 'Development and use of a database of hydraulic properties of European soils', *Geoderma*, 90(3–4), pp. 169–185. doi: 10.1016/S0016-7061(98)00132-3.

Žižala, D., Kapička, J. and Novotný, I. (2016) 'Monitoring Soil Erosion of Agricultural Land in Czech Republic and Data Assessment of Erosion Events from Spatial Database', in *Proceedings from International Conference Soil - the non-renewable environmental resource*. Brno, Czech Republic: Mendel University in Brno, pp. 354–370.

## 6.3 Seznamy

### Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled technických opatření v krajině a uvažovaný parametr pro návrh .....	20
Tab. 2: Přehled posuzovaných modelů a základní charakteristiky .....	25
Tab. 3 Legenda k Tab. 2 – klíčové parametry pro klasifikaci modelů.....	25
Tab. 4: Příčinné srážky a analyzované výsledky ze čtyřech let měření (Bauer et al., 2014).....	33
Tab. 5: Popis konkrétních sledovaných materiálů .....	42
Tab. 6: Přehled dílčích měření jedné sady experimentů .....	43
Tab. 7: Příklad tabulky charakteristik vstupující do výpočtu modelu SMODERP, oblastem se stejnou charakteristikou půdy a vegetace (soilveg) jsou přiřazovány charakteristiky parametrů.....	57
Tab. 8: Příklad tabulky charakteristik vodních toků, úsekům vodních toků se stejnou charakteristikou (SMODERP) jsou přiřazovány charakteristiky koryta a základního odtoku. Nulový základní odtok se používá pro prvky dočasné hydrografické sítě (příkopy, průlehy atp.).....	57
Tab. 9: Tabulka manuálových parametrů pro hlinitou půdu a parametrů po validaci.....	61
Tab. 10: Porovnání měřených a modelovaných veličin. ....	61
Tab. 11 Reprezentativní povodí a jejich základní charakteristiky .....	62
Tab. 12: Charakteristika typických průběhů srážky pro hyetogramy typu A–F .....	78
Tab. 13: Popis skupin převažujících tvarů srážek.....	81
Tab. 14: Označení zdrojových dat šestihodinových srážek (100 – značí dobu opakování).....	84
Tab. 15: Prediktory použité pro digitální mapování zrnitosti půd .....	90
Tab. 16: Plošné kategorie malých povodí na území ČR. ....	92
Tab. 17: Popis velikostních tříd malých povodí.....	93
Tab. 18: Morfologické charakteristiky, které byly stanoveny pro malá povodí pro jednotlivé velikostní třídy (1-5).....	94

### Seznam obrázků

Obr. 1: Schematizace příčiny vzniku odtoku a) hortonovský přístup, b) nasycení profilu, c) nastoupaní HPV ((Beven, 2010) .....	10
Obr. 2: Koncept zapojení jednotlivých částí svahu a typu odtoku z hlediska hydrologické odezvy (Chow et al., 1988) .....	12
Obr. 3: Schematizace vzniku odtoku v rýhách (Návod programu SMODERP, 2022) .....	13
Obr. 4: Schematizace profilu podle Metody Greena a Ampta s potencionálním vlhkostním profilem (Kale and Sahoo, 2011) .....	17
Obr. 5: Schématické rozdělení modelů (Kavka, 2012) .....	24
Obr. 6: Ukázka dlouhodobého monitoringu na vymezených odtokových plochách – Býkovice. ....	32
Obr. 7: Halový dešťový simulátor a) půdní kontejner bez zeminy na kterém je patrný rozvod média pro teplotní nastavení půdního vzorku (-15 až 30 °C), b) ukázka simulátoru se zeminou a osazenou senzorikou pro sledování půdní vlhkosti .....	35
Obr. 8: Ukázka využití dešťového simulátoru a) vinice, b) tráva na orné půdě (rozdělené plochy jsou součástí testu vlivu velikosti zadržované plochy), c) holá půda před experimentem.....	36
Obr. 9: Ukázka využití malého dešťového simulátoru a) pohled a simulátor a zadržovanou plochu, b) detail pulzně-kyvné hlavy simulátoru .....	36
Obr. 10: Fotografie umístění ploch (nahore) a schéma rozdělení ploch a zapojení vlhkostních čidel ve svrchním horizontu (dole).....	37
Obr. 11: Ukázka formování odtoku a pohybu sedimentu pomocí UAV a.) uvolnění a transport ve vzniklých drahách soustředěného odtoku b) odnos a sedimentace v ploše povodí – lokalita Býkovice (autor Tomáš Laburda, fotoarchiv katedry K143) .....	38

Obr. 12: Snímkování povrchy před deštěm(vlevo), po dešti (střed)a výsledný rozdílový model terénu (vpravo). .....	39
Obr. 13: Fotografie (nahore) a umístění dvou ploch (dole) při srovnávacím experimentu. Modré body označují trysky dešťového simulátoru .....	40
Obr. 14: Porovnání vlivu zadešťované plochy. Modré body jsou porovnání odtoku, zelené pak porovnání sedimentu (Kavka et al., 2015). .....	40
Obr. 15: Instalace drénu na půdním rozhraní (foto: archiv katedry K143).....	41
Obr. 16: Graf průběhů plošného odtoku (modře), mělkého podpovrchového (hnědě) a změny vlhkosti ve třech hloubkách (černě).(Strouhal, Zumr and Kavka, 2016).....	42
Obr. 17: RECPs hodnocená zvlášť pro sediment (Effs) a odtok (EffQ). EffS dosahuje v mediánové hodnotě téměř 80% u odtoku je efektivita 40 %.....	44
Obr. 18: Dynamika vývoje efektivy nezávisle na zvoleném materiálu v čase. Každý bod grafu představuje mediánovou hodnotu pro daný časový úsek. Z obrázku je evidentní, že snižování efektivy s délkou srážky klesá. A to jak při vlivu na odtok (modrá), tak sediment (hnědá).....	44
Obr. 19: Rozdílná mediánová efektivita pro jednotlivé RECPs. $E_{ffS}$ – kruh, $E_{ffQ}$ – kosočtverec.....	45
Obr. 20: Efektivita RECPs pro různé počáteční stavy. Stav 1 a 3 – suchý stav, 2 a 4 mokřý stav. $E_{ffS}$ – kruh, $E_{ffQ}$ – kosočtverec.....	45
Obr. 21: Ukázka obrazovky modelu SMODERP a) Verze IV. I/11 – 96 b) Windows 1.01.....	48
Obr 22.: Tok programu SMODERP 2D - převzato z manuálu k programu (Návod programu SMODERP, 2022).....	54
Obr. 23: Ukázka rozhraní nástroje SMODERP 2D v prostředí ArcGIS, popis jednotlivých polí je uveden dále.....	55
Obr. 24: Struktura výstupního adresáře modelu SMODERP 2D v prostředí ArcGIS a) hlavní výstupní adresář, b) kontrolní parametry výpočtu.....	58
Obr. 25: Porovnání měřených a modelovaných veličin a) před validací bilanční části rovnice, b) po provedeném hledání parametrů.....	60
Obr. 26: a) rozdělení povodí IV. řádu do tříd podle podobnosti charakteristik, b) poloha vybraných charakteristických povodí Býkovického potoka (1), Struhařovského potoka (2), Chouzavé (3), Škvoreckého potoka, (4) Halounského potoka (5) (podklad: WMS – ZM ČÚZK®).....	62
Obr. 27: Odtokové výšky modelované v HMS (H), MikeSHE (M) a SMODERP (S) ve 150 základních srážko-odtokových scénářích (povodí 1 až 5, doby opakování $N = 2$ až 100 let, typy srážek A až F).....	64
Obr. 28: Odtokové výšky $H_q$ z modelu MikeSHE oproti modelu SMODERP z reprezentativních povodí pro všechny N-letosti a typy srážek. Černě vynesena diagonála, červeně regresní přímka.....	65
Obr. 29: Odtokové výšky $H_q$ z modelu MikeSHE oproti modelu SMODERP ze tří reprezentativních povodí pro všechny N-letosti a typy srážek a dvě úrovně propustnosti půd: průměrné (mean0) a snížené (m-STD). Černě vynesena diagonála, červeně regresní přímka.....	65
Obr. 30: Vstupní data do modelu SMODERP a) digitální model terénu se zahloubenými vodními toky, b) zařazení půd (rain.fsv.cvut.cz), c) využití území, d) srážková data (rain.fsv.cvut.cz).....	67
Obr. 31: Schematizace povodí, body hydrogramů a vymezení ukázky detailního výsledku.....	68
Obr. 32: Rastrové výstupy modelu SMODERP 2D, levý sloupec výsledky na celém povodí, pravý sloupec detail u bodu č. 5, a.) typ odtoku (modře odtok v hydrografické síti, červeně výskyt rýh) b) maximální průtok, c) objem odtoku.....	69
Obr. 33: Výsledné hydrogramy v pozorovaných bodech a) pro návrhovou srážku s dobou opakování 20 let nejpravděpodobnějšího vyskytujícího se tvaru (F), b) pro návrhovou srážku s dobou opakování 20 let nejkoncentrovanější tvar (A), pro návrhovou srážku s dobou opakování 50 let tvar F, pro návrhovou srážku se dvěma vrcholy (tvar D) – doba opakování 20 let.....	70
Obr. 34: Rozdělení vstupních parametrů do modelu SMODERP Line.....	71
Obr. 35: Zadávání návrhových srážek do prostředí SMODERP Line a) a b) – zadání uživatelské srážky, b) a c) zadání hodnoty maximálního deště.....	72
Obr. 36: Dialogové okno pro zadávání svahu.....	72
Obr 37: SMODERP Line - ukázka výsledných veličin pro jednotlivé úseky.....	73

Obr 38: SMODERP Line - ukázka detailních výsledků pro nejspodnější úsek svahu.....	74
Obr. 39: Šest syntetických průběhů šestihodinových srážek pro území ČR .....	77
Obr. 40: Ukázka zastoupení tvarů A, B, E a F pro různé doby opakování ve škole od zelené s malým výskytem až po červenou, která indikuje více než 40% zastoupení daného tvaru.....	80
Obr. 41: Kategorizovaná povodí podle převažujícího charakteru deště, modré odstíny charakterizují výskyt rovnoměrných srážek, červené odstíny koncentrovaných srážek, zelené dvouvrcholových. Fialový odstín pak kombinaci převažující rovnoměrné srážky v kombinaci s převažujícím koncentrovaným charakterem deště. ....	81
Obr. 42: Vymezené oblasti převažujícího charakteru deště s úhrnem doby opakování 100 let.....	82
Obr. 43: Porovnání 6 hodinových návrhových srážek pro různé doby opakování návrhových srážek.....	83
Obr. 44: Porovnání denních úhrnů srážek s vyznačením stanic, které vstupují do interpolační metody ...	84
Obr. 45: Rozdělení úhrnů srážek pro různé datové zdroje.....	85
Obr. 46 Podíly normovaných šestihodinových srážek a.) podíl C_R100_360 a h_n100t360, b.) podíl M_R100_360 a h_n100t360 .....	85
Obr. 47: Maximální intenzity návrhových dešťů pro dobu opakování 20 let a délku trvání deště 60 minut .....	87
Obr. 48: Zrnitostní třídy dle trojúhelníkového diagramu – certifikovaná mapa (Beitlerová et al., 2021)..	91
Obr. 49: Hydrologické skupiny půd ČVUT a VUMOP – certifikovaná mapa (Beitlerová et al., 2021) ...	91
Obr. 50: a) Překryv velikostních tříd malých povodí a b) barevně odlišená povodí podle původní třídy ve skupině SoLC v které již nejsou uvažovány vnořená menší povodí. ....	93
Obr. 51: Vizualizace korelačních koeficientů mezi jednotlivými parametry pro všechna povodí nezávisle na velikostní kategorii. Červená barva značí negativní vazbu, modrá barva pozitivní. Čím je vazba mezi dvěma parametry silnější tím je symbol tmavší a větší. Podobné parametry jsou seskupeny tak, aby bylo možné vizualizovat skupiny podobných parametrů (Kavka, 2021).....	95
Obr. 52: Sankey diagram vývoje skupin pro různé počty clusterů pro SoLC. Počet prvků v dané skupině odpovídá šíři pásu. Diagram zároveň zobrazuje, jak se jednotlivá povodí přeskupují dle počtu clusterů. Základní dělení je patrné již při tvorbě dvou clusterů (A, B). Od počtu clusterů šest dochází k vývoji skupin, které vznikají kombinací základního dělení na A, B a podskupiny. Kdy při šesti vzniká skupina D, která je kombinací všech dříve vzniklých skupin. Při počtu clusterů 7 a 8 pak vznikají skupiny C, které jsou kombinací části skupiny A2 a B2 (Kavka, 2021).....	96
Obr. 53: Rozdělení malých povodí v ČR podle míry rizika rychlého odtoku.....	96
Obr. 54: Ukázka obrazovky služby „Průběhy 6hodinových návrhových srážek na povodí IV. řádu“ (Rain@FSv, 2018).....	98
Obr. 55 a) Ukázka výřezu půdních dat získaný WPS službou pudy-zrn-tridy, b) Výřez HSP na povodí Býkovického potoka získaný WPS službou pudy-hsp (Rain@FSv, 2018).....	98

## 7 Přílohy

Přílohu této práce tvoří odborný článek, který popisuje propojení několika metod měření povrchového odtoku se způsoby kalibrace a validace modelu SMODERP s názvem „SMODERP2D-Sheet and Rill Runoff Routine Validation at Three Scale Levels“ (Kavka, Jeřábek and Landa, 2022).