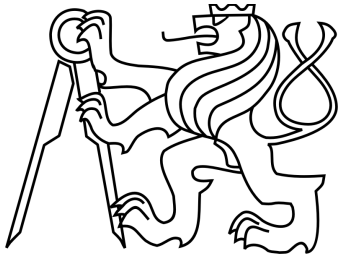
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



Diplomová práce

Citlivostní analýza vstupních parametrů modelu HEC-HMS

Uncertainty analysis in HEC-HMS

Bc. Karel Vlasák

Vedoucí práce: Ing. Petr Kavka, Ph.D.

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Vlasák Jméno: Karel Osobní číslo:

Zadávající katedra: K143 - Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Citlivostní analýza vstupních parametrů modelu HEC-HMS

Název diplomové práce anglicky: Ucertainty Analysis in HEC-HMS

Pokyny pro vypracování:
Pomocí modelu HEC-HMS proveďte na zadaných povodích IV. řádu pomocí nástroje Ucertainty Analysis analýzu parametrů ovlivňujících odezvu na návrhovou srážku. Především se soustřeďte na parametry CN, Lag Time, procento nepropustných ploch a počáteční ztráty. Pro potřeby stanovení rozptylů parametrů použijte hodnoty odpovídající parametrům v rámci České Republiky.

Výsledky modelu HEC-HMS se pokuste porovnat s výsledky jiného hydrologického přistupu.

Seznam doporučené literatury:
Manuál k modelu HEC-HMS,
Handbook of Hydrology (Maidment, D.R, 1993)
Open chanel hydrolgy (Akan, 2006)

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Petr Kavka, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 12.10.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

12.10.2017

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Poděkování

Děkuji Ing. Petru Kavkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a za rady, které mi pomohly tuto práci vytvořit. Děkuji rovněž Ing. Luďku Strouhalovi, Ph.D. za úvod do hydrologického modelování, za neúnavnou pomoc i v průběhu vánočních svátků a za vytvoření skriptu v programu RStudio, díky kterému bylo možné výsledky modelování analyzovat. Extrakce dat z modelu by pak nemohla proběhnout bez přispění Ing. Lenky Weyskrabové, PhD. Výzkum byl proveden díky podpoře grantu *Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině (QJ1520265).*

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Citlivostní analýza vstupních parametrů modelu HEC-HMS“ vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Mělníku, dne 7. 1. 2018 ……

Karel Vlasák

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá citlivostní analýzou vstupních parametrů hydrologického modelu HEC-HMS. Jedná se o parametry CN (číslo odtokové křivky), počáteční ztráta, procento nepropustných ploch a doba zdržení. Analýza těchto parametrů proběhla na modelech 5 povodí reprezentujících jednotlivé třídy povodí IV. řádu v rámci ČR. Pro každé povodí bylo posouzeno 90 scénářů lišících se N-letostí vstupní srážky, tvarem vstupní srážky a indexem předchozích srážek (IPS). Celkem bylo vypočteno 675000 scénářů. Na základě výsledků simulace byl určen vliv jednotlivých parametrů na výsledky modelování.

Abstract

The thesis deals with the uncertainty analysis of input parameters of the hydrological model HEC-HMS. Uncertainty analysis deals with following parameters: Curve number (CN), initial abstraction (Ia), impervious areas and lag time. Five groups of representative basins (primary catchments with area up to 10 km^2) were chosen for the uncertainty analysis and 90 different scenarios were computed for each basin. These scenarios vary by the applied precipitation hyetograph and the antecedent moisture condition (AMC) of the basin. Total amount of 675000 scenarios was computed. The influence of individual parameters was quantified regarding the hydrograph characteristics.

OBSAH

1. Úvod 6
2. Hydrologické modelování 7
   2.1. Modelované procesy 8
      2.1.1. Infiltrace 9
      2.1.2. Evapotranspirace 10
      2.1.3. Podpovrchový odtok 11
      2.1.4. Povrchový odtok 12
   2.2. Dělení hydrologických modelů 12
      2.2.1. Dělení dle principu 13
      2.2.2. Dělení dle prostorového rozlišení 16
      2.2.3. Dělení dle formy poskytovaných výsledků 16
      2.2.4. Dělení dle časového hlediska 17
   2.3. Používané hydrologické modely 17
   2.4. Hydrologický model HEC-HMS 19
      2.4.1. Obecné informace 19
      2.4.2. Vstupní data 19
      2.4.3. Výpočet odtoku 24
      2.4.4. Výstupní data 31
3. Citlivostní analýza 35
   3.1. Citlivostní analýza v modelu HEC-HMS 35
   3.2. Řešená povodí 38
   3.3. Nastavení modelu 41
      3.3.1. Komponent ztráty – SCS CN 42
      3.3.2. Komponent transformace 44
      3.3.3. Komponent směrování 45
      3.3.4. Použité návrhové srážky 46
   3.4. Statistické rozdělení parametrů 48
      3.4.1. Číslo odtokové křivky (CN) 50
      3.4.2. Počáteční ztráta (Ia) 52
      3.4.3. Procento nepropustných ploch (% Impervious) 56
      3.4.4. Doba zdržení (Lag Time) 59

4. Výsledky 63
4.1. Zobrazení výsledků 65
4.2. Generované hodnoty parametrů povodí 66
4.2.1. Číslo odtokové křivky (CN) 66
4.2.2. Počáteční ztráta (Ia) 69
4.2.3. Procento nepropustných ploch (% Impervious) 70
4.2.4. Doba zdržení (Lag Time) 71
4.3. Maximální specifický odtok z povodí 73
4.3.1. Vliv tvaru srážky a předchozího nasycení 73
4.3.2. Vliv vlastností povodí, velikosti srážky a počáteční ztráty 76
4.4. Odtoková výška a odtokový koeficient 79
4.5. Posun doby kulminace srážky a odtoku 82
4.6. Souhrn dosažených výsledků 85
5. Závěr 87
Seznam použitých zdrojů 89
Seznam tabulek 91
Seznam obrázků 92

1. ÚVOD

Hydrologické modelování je účinným nástrojem, který dokáže předpovědět odezvu povodí na příčinnou srážku. Všechny používané modely jsou však zatíženy velkým množstvím nejistot, které ovlivňují výslednou přesnost a použitelnost modelu. Nejistota se váže k určení hodnot vstupních parametrů modelu. Jedná se o délku a intenzitu srážky, morfologii terénu, využití zemského povrchu, pedologii území či stupeň nasycení povodí. Tato práce si klade za cíl kvantifikovat vliv těchto nejistot na předpovědi hydrologického modelu HEC-HMS.

Výzkum v rámci této práce je součástí projektu *Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině (QJ1520265),* který je řešen Katedrou hydromeliorací a krajinného inženýrství Fakulty stavební ČVUT. Citlivostní analýza v rámci tohoto projektu byla provedena na hydrologickém modelu HEC-HMS. Konkrétně byl zkoumán vliv variability 4 vstupních parametrů – čísla odtokové křivky *(CN),* počáteční ztráty *(Initial Abstraction),* procenta nepropustných ploch *(% Impervious)* a doby zdržení (*Lag Time* - časový posun maxima srážky od kulminace v závěrovém profilu).

Obecným informacím o hydrologii, o hydrologickém modelování a o modelu HEC-HMS se věnuje **kapitola 2**.

Citlivostní analýza v modelu HEC-HMS pracuje se statistickým rozdělením jednotlivých parametrů, na základě kterého se generují jejich hodnoty. Toto rozdělení bylo určeno s využitím vektorové vrstvy povodí a jejích atributů (Kavka, 2016) v prostředí programu ArcGIS tak, aby co nejlépe odpovídaly statistickému rozdělení parametrů na povodích IV. řádu v rámci celé ČR. Informacím o citlivostní analýze v prostředí HEC-HMS a přípravě dat pro ni se věnuje **kapitola 3**. V této kapitole je rovněž uvedeno matematické pozadí výpočtů provedených v rámci této práce.

V **kapitole 4** jsou výsledky citlivostní analýzy vyhodnoceny. Je zhodnocen vliv variability vstupních dat na výsledky modelu. Výsledky jsou rozlišeny dle tvaru a N-letosti srážky a dle stupně předchozího nasycení. Zkoumán je vliv jednotlivých vstupů na celkový objem odtoku z povodí, na velikost kulminačního průtoku a na časový posun kulminace srážky a kulminace odtoku.

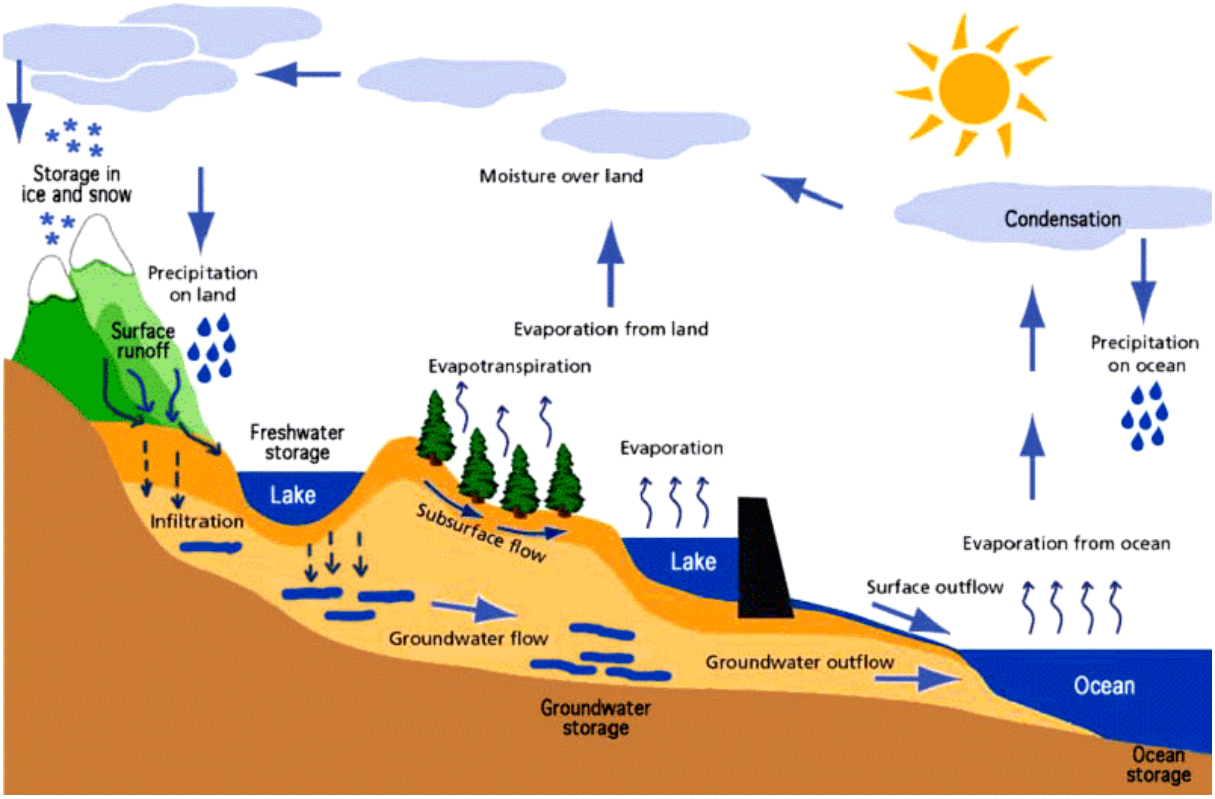
2. HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ

Modelování obecně představuje zjednodušený popis reality, který slouží k lepšímu pochopení modelovaného systému a k předpovědi jeho chování (Banks, 1998). S rozvojem výpočetních technologií získává obzvláště široké uplatnění matematické modelování (simulace), které popisuje modelovaný systém pomocí matematických rovnic. Matematické modelování se používá při studiu přírodních (fyzika, chemie, biologie) i sociálních (ekonomie, politologie) jevů. Hydrologie je rovněž jednou z oblastí, ve které znamenal nástup matematického modelování výrazný pokrok.

Hydrologické modelování se stalo významným pomocníkem v mnoha oblastech vodního hospodářství. Řízení využití vodních zdrojů, předpověď rizika povodní, řešení městského odvodnění, hydroekologie - to vše jsou oblasti, kde se hydrologické modelování stává nepostradatelným. V době, kdy jsou jedním z hlavních společenských témat klimatické změny, lze hydrologického modelování rovněž využít ke kvantifikaci dopadů těchto změn na člověka a jeho životní prostředí (Pechlivanidis, 2011).

2.1. MODELOVANÉ PROCESY

Hydrologický cyklus zahrnuje mnoho procesů, které vstupují do výsledného odtoku vody. Po dopadu srážky (*Precipitation*) a ztrátě intercepcí (*Canopy Interception*) dochází k její infiltraci do podloží (*Infiltration*). Zároveň však dochází také k výparu jak těly rostlin (*Transpiration*), tak i z volné hladiny a jiných povrchů (*Evaporation*). Vsáknutá část srážky přispívá k podpovrchovému odtoku (*Subsurface Flow*), nevsáknutá část (efektivní srážka – *Excess Precipitation*) pak k odtoku povrchovému (*Surface Runoff*). Při tom všem navíc stále probíhá odtok nezávislý na příčinné srážce - základní odtok (*Groundwater Outflow, Baseflow*). Všechny tyto procesy jsou znázorněny na Obrázku 1 a je třeba je postihnout v rámci tvorby srážko-odtokového hydrologického modelu.



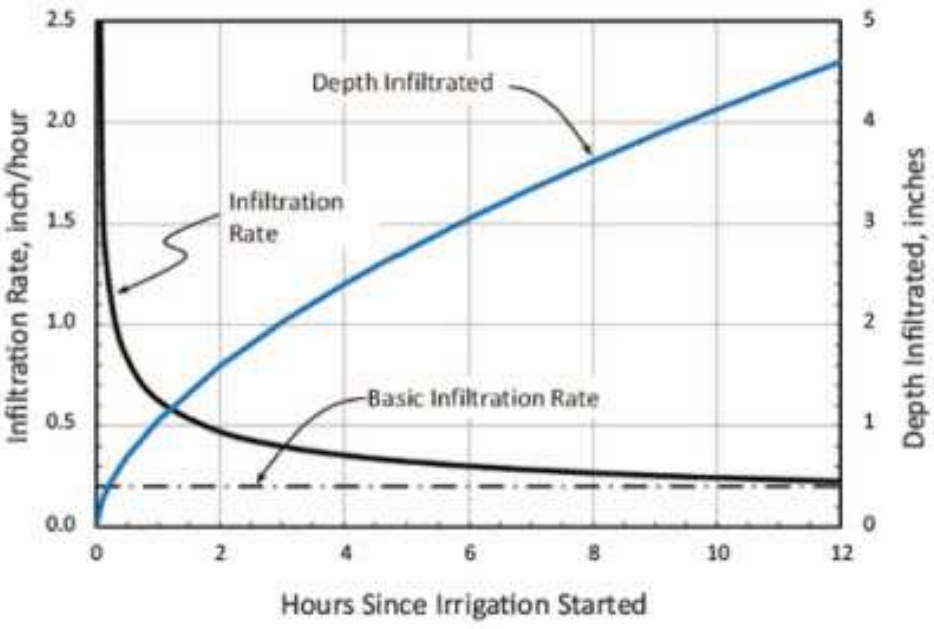
Obrázek 1: Modelované hydrologické procesy (https://civilsolution.wordpress.com/2013/02/06/the-hydrological-cycle/)

2.1.1. *INFILTRACE*

Infiltrací se rozumí vsakování vody ze zemského povrchu do hlubších půdních vrstev (Riedl, 1973). Bývá popisována svou intenzitou – tedy, jak hluboko se voda vsákne za jednotku času (např. cm/hod). Celkové množství vody, které se za daný čas do půdy vsákne, se nazývá kumulativní infiltrace a je udáváno v délkových jednotkách.

Intenzita infiltrace je ovlivňována mnoha faktory - intenzitou srážky, půdními poměry (zrnitost, pórovitost, struktura), intenzitou evapotranspirace či přítomností půdních organismů.

Typický časový průběh intenzity infiltrace (černá křivka) a kumulativní infiltrace (modrá křivka) je znázorněn na následujícím Obrázku 2. Z grafu je patrné, že se zvyšující se délkou trvání deště (a tedy se zvyšující se půdní vlhkostí) se intenzita infiltrace snižuje až k základní hodnotě nasycené infiltrace (*Basic Infiltration Rate*).



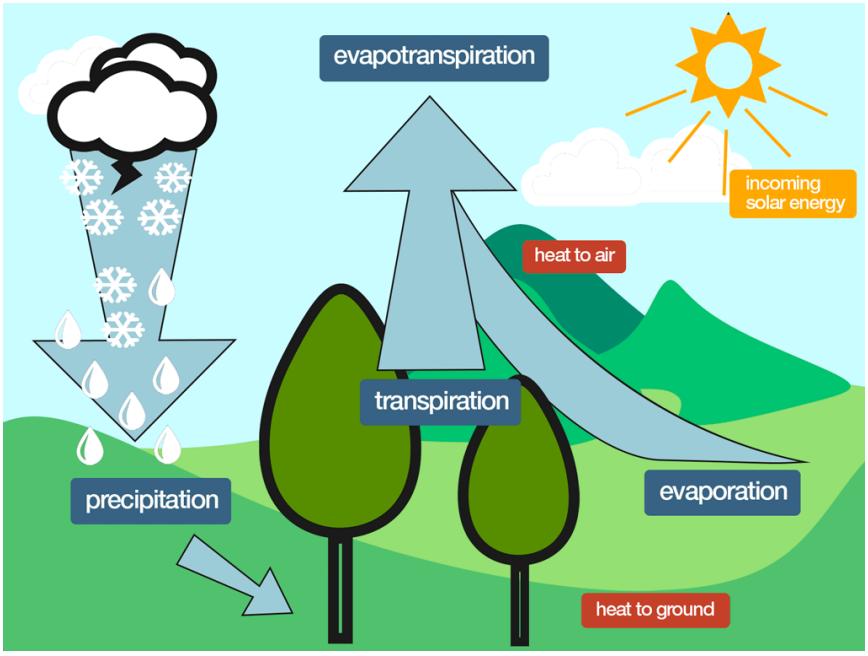
Obrázek 2: Časový průběh intenzity infiltrace (https://www.pioneer.com/home/site/us/agronomy/library/soil-water-mgmt/)

Pro popis infiltrace lze použít například následující rovnice:

- Green – Ampt (1911)
- Richards (1931)
- Horton (1933)
- Philip (1957)

2.1.2. *EVAPOTRANSPIRACE*

Jedná se o proces přeměny vody z pevného či tekutého stavu na vodní páru (Houdek, 2012). Evapotranspirace v sobě zahrnuje sumu evaporace (výpar ze zpevněných ploch, vegetace a vodní hladiny) a transpirace rostlin. Aby výpar proběhl, je třeba dodat výparnému povrchu poměrně veliké množství energie (2450 J na odpaření 1 g vody), která je dodána především ve formě slunečního záření (*Incoming Solar Energy*). Schéma je znázorněno na Obrázku 3.



Obrázek 3: Schematické vyjádření evapotranspirace (http://buddhajeans.com/encyclopedia/evapotranspiration/)

Evapotranspiraci lze zjistit v zásadě dvěma způsoby:

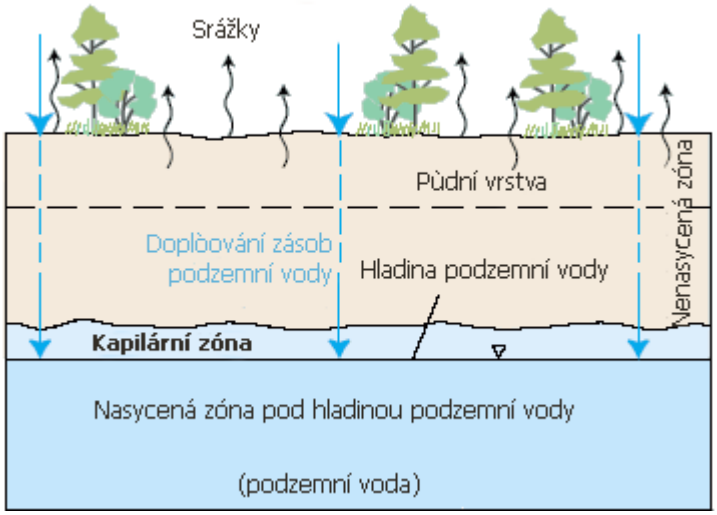
- Přímým měřením z daného vypařujícího povrchu. Pro výpar z vodní hladiny lze použít výparoměr (např. Wildův, Rónův), pro evapotranspiraci pak lyzimetr. Tato metoda je pro hydrologické modelování prakticky nepoužitelná.
- Výpočtem bilančními, mikrometeorologickými či empirickými (Turcova, Linacreaova rovnice) metodami. Často používaná je rovněž metoda kombinovaná, jejíž zjednodušená forma (Penman-Monteithova rovnice) operuje s pojmem potenciální evapotranspirace. Intenzita potenciální evapotranspirace je dána pouze meteorologickými podmínkami a není omezena zásobou vody v půdě.

Výpočetní metody poskytují pouze přibližné výsledky, jsou však z hlediska dostupnosti meteorologických dat dobře využitelné pro potřeby hydrologického modelování.

2.1.3. PODPOVRCHOVÝ ODTOK

Část vody, která se po srážce infiltrovala do půdního prostředí, se v tomto prostředí dále pohybuje. Směr a rychlost tohoto pohybu je dána vlastnostmi půdního prostředí. Může docházet k pohybu vody těsně pod zemským povrchem (hypodermický odtok), případně, v případě převažujícího vlivu gravitačních sil, dochází k vertikálnímu pohybu vody do hlubších půdních vrstev (Hubinger, 2011).

Podpovrchové vody lze rozdělit na vody půdní a podzemní (Kemel, 1996). Půdní vody, na rozdíl od vod podzemních, nevytváří souvislou hladinu (zvodeň). Schéma je znázorněno na Obrázku 4.



Obrázek 4: Rozdělení podpovrchových vod (https://water.usgs.gov/edu/watercycleczech.html)

Matematický popis proudění v porézním prostředí poskytuje Darcyho zákon (1856), který udává závislost rychlosti proudění na vlastnostech porézního prostředí (filtrační koeficient) a na hydraulickém gradientu. Platnost tohoto vtahu je omezena na lineární oblast proudění v nasyceném prostředí. Pro proudění v nenasyceném prostředí lze použít Darcy-Buckinghamův zákon.

Kombinace Darcy-Buckinghamova zákona s rovnicí kontinuity tvoří Richardsovu rovnici, která řeší proudění v nenasycené zóně.

2.1.4. POVRCHOVÝ ODTOK

Část vody, která dopadla na zemský povrch, ale do půdního prostředí se neinfiltrovala, se účastní odtoku povrchového. K plošnému, případně soustředěnému (rýhovému) povrchovému odtoku dochází zejména u extrémních přívalových srážek, jejichž intenzita překračuje infiltrační schopnost půdy (tzv. hortonovský odtok), případně při dlouhotrvajících deštích, při nichž je překročena retenční kapacita území (tzv. Dunneho odtok). Celkový objem povrchového odtoku je snížen o objem, který je zadržen v bezodtokých místech (Hubinger, 2011).

Viditelnější složkou povrchového odtoku je odtok v otevřených korytech (vodních tocích). Ten je dotován odtokem povrchovým (způsoben deštěm) a odtokem základním (dotace břehů a dna vodního toku podpovrchovou vodou). Průtoky ve vodním toku lze zjišťovat měřením (přímé, bodové, chemické), nebo hydraulickými či empirickými výpočty.

Široké využití při popisu proudění v otevřených korytech stále nalézá Chézyho rovnice (1775), jejíž platnost je však omezena na rovnoměrný ustálený pohyb v kvadratickém pásmu odporů. Tato rovnice určuje závislost průměrné průřezové rychlosti na tvaru a drsnosti koryta, sklonu nivelety dna a hloubce vody v korytě.

2.2. DĚLENÍ HYDROLOGICKÝCH MODELŮ

Existuje velké množství hydrologických modelů, které se odlišují principem, na němž je založen jejich výpočet. Každý typ modelu přináší své výhody i nevýhody. Vhodnost použití modelu pro řešení daného problému je dána zejména účelem modelování a požadavky na množství a kvalitu vstupních dat. Modely mohou být klasifikovány podle 4 základních kritérií (Pechlivanidis, 2011):

- struktura modelu
- prostorové rozlišení modelu
- forma poskytovaných výsledků (deterministický nebo stochastický model)
- časové hledisko

2.2.1. DĚLENÍ DLE PRINCIPU

2.2.1.1. **Metrické modely**

Tento typ modelů je primárně založen na dostupných pozorováních systému. Snaží se charakterizovat odezvu modelovaného povodí na základě měřených dat. Jedná se tedy o modely empirické. Známým příkladem je teorie **jednotkového hydrogramu** (Sherman, 1932), který lze definovat jako hydrogram povrchového odtoku, jenž je vyvolán efektivním deštěm určitého trvání a jednotkového objemu (Kemel, 1996).

Jednotkový hydrogram představuje odtok vzniklý z jednotkové efektivní srážky (srážkového pulsu), která je konstantní v prostoru (na celém řešeném povodí) i v čase (daná doba trvání). Jednotkový hydrogram lze odvodit z měřených odtokových dat reálné srážky. Nevýhoda takovéhoto jednotkového hydrogramu spočívá v omezení jeho platnosti na povodí, na němž byl odvozen a dokonce pouze na konkrétní místo, ve kterém byly měřeny hodnoty odtoku. Z toho důvodu naleznou široké uplatnění **syntetické jednotkové hydrogramy**, které umožňují extrapolaci hodnot odtoků i pro povodí podobných vlastností, na nichž však reálné měření není prováděno (*Ungauged Basin*). Existují tři základní typy syntetických jednotkových hydrogramů (J. Ramírez, 1999).

- Dávající do souvislosti charakteristiky hydrogramu (doba koncentrace, kulminační průtok) s charakteristikami povodí (**Snyderův hydrogram**).
- Založené na bezrozměrném jednotkovém hydrogramu (**hydrogram SCS**).
- Založené na modelu zásoby povodí a křivce time-area (**Clarkův hydrogram**).

Do kategorie metrických modelů patří i modernější a sofistikovanější zástupci umělé inteligence. Jedná se například o **model umělé neuronové sítě** (*ANN – Artificial Neural Networks*). Tyto modely se skládají ze tří vrstev - vrstva vstupních dat (v hydrologii se jedná o srážku), vrstva umělých neuronů a vrstva výstupních dat (odtok). Neuronová vrstva v průběhu procesu učení (*Training*) upravuje váhy jednotlivých neuronových spojení v síti tak, aby výsledek modelování co nejlépe odpovídal reálné odezvě povodí (Pechlivanidis, 2011).

2.2.1.2. **Konceptuální modely**

Konceptuální modely jsou definovány dvěma základními kritérii (Wheater, 1993):

- Důraz je kladen na přesně vytvořenou strukturu modelu. Konceptuální model reprezentuje všechny procesy, které mají v daném vztahu (v tomto případě srážkoodtokovém) nějakou důležitost.
- Ne všechny parametry modelu mají přímou fyzikální podstatu. Některé parametry nelze nezávisle měřit a musí být odhadnuty kalibrací na základě pozorovaných dat.

V hydrologii je povodí obvykle schematizováno konceptem **soustavy umělých nádrží**. Tato soustava může být dle typu zvoleného modelu jednoduchá (minimálně dvě nádrže), nebo naopak velmi komplexní. Jednoduchá varianta naráží na problém v podobě nepřesné reprezentace všech probíhajících procesů. Komplexní struktura modelu naopak popisuje realitu velice věrně, může však mít problém s dostupností všech potřebných vstupních dat.

Pro správnou funkčnost modelu je třeba najít rovnováhu mezi komplexností modelu a dostupností vstupních dat. Parametry, které nejsou pro odezvu modelu zásadní, lze identifikovat například pomocí **citlivostní analýzy**.

2.2.1.3. **Fyzikální modely**

Fyzikální modely popisují dílčí hydrologické procesy, například evapotranspiraci, infiltraci či proudění v nasycené i nenasycené zóně. K popisu těchto procesů jsou použity řídící pohybové rovnice, obvykle formulované jako nelineární parciální diferenciální rovnice. Tyto rovnice bývají řešeny numericky, nejčastějšími metodami jsou metoda konečných diferencí a metoda konečných prvků. Jedná se o přibližné metody řešení soustavy diferenciálních rovnic, které nahrazují spojité prostředí diskrétním modelem. Tyto metody nabyly širokého uplatnění s rozvojem výpočetní techniky.

Fyzikální modely jsou plně definovány měřitelnými parametry a mohou poskytovat kontinuální simulaci odezvy povodí bez nutnosti kalibrace. Jejich použití však rovněž naráží na limity:

- Vysoká výpočetní náročnost vedoucí často k zjednodušení používaných rovnic (např. Saint-Vénantovy rovnice popisující proudění, Green-Amptova metoda pro výpočet infiltrace), a tedy k nepřesnému popisu reality znamenajícímu zavedení nejistot do výpočtu.
- Používané fyzikální rovnice bývají odvozeny v laboratořích nebo během experimentů in-situ malého rozsahu. Vztažením těchto rovnic do měřítka povodí předpokládáme, že jsou popisované fyzikální procesy nezávislé na měřítku. Tím vnášíme do výpočtu další nejistoty.

Povodí má obvykle vysokou vnitřní heterogenitu materiálových vlastností, kterou lze jen obtížně postihnout. Přesné měření všech parametrů (zejména těch podpovrchových) je v současné chvíli prakticky nemožné, zejména s ohledem na bodové metody měření a obrovskou finanční náročnost pro větší plochy.

Fyzikálně založené modely jsou reprezentovány výhradně měřitelnými parametry, jejich reálné zjištění pro potřeby modelu je však prakticky neproveditelné.

2.2.1.4. **Hybridní modely**

Za hybridní modely označujeme takové, které v sobě nesou prvky alespoň dvou z výše zmíněných skupin. Tyto modely se snaží využít výhod každého z přístupů a naopak eliminovat jeho nevýhody.

Konceptuální modely mohou využít fyzikálně založených komponentů, díky kterým se sníží požadavky na kalibraci. Fyzikálně založené modely naopak mohou využít prvky konceptuální, zejména v případech, kdy fyzikální parametry kladou příliš vysoké požadavky na měření.

2.2.2. DĚLENÍ DLE PROSTOROVÉHO ROZLIŠENÍ

2.2.2.1. **Celistvé modely**

Celistvé modely nahlíží na celé povodí jako na jednotku s homogenními vlastnostmi. Tyto vlastnosti jsou reprezentovány průměrnými hodnotami parametrů na povodí. Není tak brán žádný ohled na prostorovou variabilitu vstupů či probíhajících procesů.

2.2.2.2. **Distribuované modely**

U distribuovaných modelů je povodí diskretizováno na množství dílčích elementů. Může se jednat o rozdělení pravidelné (nejčastěji čtvercová síť), či nepravidelné. Vlastnosti povodí jsou vyjádřeny svými průměry na těchto dílčích elementech. Díky tomu mohou distribuované modely (do jisté míry) ve svých výsledcích zohlednit prostorovou variabilitu procesů, vstupů, okrajových podmínek a charakteristik povodí. Problém může nastat, stejně jako u modelů fyzikálních, s dostupností vstupních dat. Při příliš jemném rozlišení může být v současné situaci takřka nemožné získat dostatečně přesná měření.

2.2.2.3. **Semi-distribuované modely**

Tento typ modelu byl navržen za účelem zvýraznění výhod obou výše uvedených přístupů prostorové reprezentace povodí. Semi-distribuovaný model se nesnaží vytvářet spojité prostředí, jedná se tedy spíše o soubor modelů celistvých. Tvůrce modelu v tomto případě sám rozhoduje, jaké prostorové dělení bude pro daný účel nejvýhodnější, a to s přihlédnutím k dostupnosti vstupních dat a k cíli modelování. Řešitel tedy může zaměřit pozornost na klíčová místa povodí a přitom oproti distribuovanému modelu stále ušetřit množství vstupních dat i výpočetní náročnost. Příkladem semi-distribuovaného modelu je i HEC-HMS.

2.2.3. DĚLENÍ DLE FORMY POSKYTOVANÝCH VÝSLEDKŮ

2.2.3.1. **Deterministické modely**

Pokud je výsledek simulace jednoznačně určen známým vztahem mezi vstupními a výstupními daty, jedná se o model deterministický. Takový model vrátí pro daný set vstupů a parametrů vždy jediný stejný výsledek.

2.2.3.2. **Stochastické modely**

Stochastické modely pracují s náhodnými proměnnými, které reprezentují **nejistoty** v procesu výpočtu (nejistoty vstupních dat, parametrů, okrajových podmínek). Náhodné proměnné jsou generovány dle zvoleného statistického rozdělení. Stochastický model proto dává vlivem nejistot pro stejný set vstupních dat rozdílné výsledky. Tyto výsledky jsou rovněž popsány statistickým rozdělením.

2.2.3.3. **Deterministicko – stochastické modely**

Oba přístupy lze rovněž kombinovat – například vnesením pravděpodobnostních chybových modelů do deterministických modelů. Vstupem pro deterministický srážko-odtokový model může například být stochastické srážkové rozdělení.

2.2.4. DĚLENÍ DLE ČASOVÉHO HLEDISKA

2.2.4.1. **Kontinuální modely**

Kontinuální modely dokážou pracovat se srážkovými daty zahrnujícími několik srážkových událostí. Z toho důvodu musí být schopné popisovat více procesů (změna stavu nasycení povodí, změna vegetačního období) a vyžadují více vstupních dat. Kontinuální modely se mohou dále dělit na hodinové, denní, měsíční či roční v závislosti na časovém rozlišení vstupních dat.

2.2.4.2. **Epizodní modely**

Epizodní modely počítají odezvu povodí pouze na jednu srážkovou epizodu. Jejich výpočetní rutina bývá jednodušší než u kontinuálních modelů.

2.3. POUŽÍVANÉ HYDROLOGICKÉ MODELY

Používaných typů hydrologických modelů existuje ve všech vymezených kategoriích veliké množství. Jejich seznam včetně podrobného popisu principu i funkčnosti poskytuje například Inventář hydrologického modelování (Hydrologic Modeling Inventory Website, Texas A&M University, 2008). Cílem této práce není analýza hydrologických modelů, považuji ale za přínosné zahrnout do ní alespoň tabelární přehled používaných modelů (Tabulka 1) ve světle výše uvedeného třídění modelů. Tento přehled není a nemůže být úplný.

Tabulka 1: Přehled a zatřídění některých používaných hydrologických modelů.

Název	Účel	Princip	Prostor	Čas	Výsledky
HEC-HMS **Hydrologic Modeling System**	**Srážko-odtokový model**	**Metrický**	**Semi-distribuovaný**	**Kontinuální**	**Deterministický**
SMODERP Simulační model povrchového odtoku a erozního procesu	Model srážko-odtokových vztahů a erozních procesů na svahu	Fyzikálně založený	Distribuovaný	Epizodní	Deterministický
MIKE SHE Système Hydrologique Européen	Model povrchového a podpovrchového odtoku	Fyzikálně založený	Distribuovaný	Kontinuální	Deterministický
SCS-CN	Model infiltrace a odtoku	Metrický	Celistvý	Epizodní	Deterministický
Hydro-BEAM Hydrological River Basin Environment Assesment Tool	Odtokový model Model množství i kvality vody a vlivu na ekosystémy	Fyzikálně založený	Distribuovaný	Epizodní	Deterministický
SWAT Soil and Water Assesment Tool	Model dopadu klimatu a změn ve využití území na dostupnost a kvalitu vody	Fyzikálně založený	Semi-distribuovaný	Kontinuální	Deterministický
WASMOD Water and Snow Balance Modeling System	Model vodní bilance a vztahu mezi zásobou vody a odtokem	Konceptuální	Distribuovaný	Kontinuální	Deterministický
SEFM Stochastic Event Flood Model	Model záplavových rizik	Fyzikálně založený	Dle zvoleného srážko-odtokového modelu	Kontinuální	Stochastický

2.4. HYDROLOGICKÝ MODEL HEC-HMS

Výpočty a analýzy v rámci této práce byly prováděny v prostředí programu HEC-HMS. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších srážko-odtokových modelů, zejména s ohledem na jeho širokou dostupnost (volně ke stažení z webových stránek US Army Corps of Engineers). Program rovněž nabízí velký počet modelovacích přístupů, které umožňují jeho široké využití – při správné volbě matematického modelu lze simulovat dostupnost pitné vody na povodí velké řeky, stejně jako odtok z malého přirozeného povodí. V dalších kapitolách je model podrobněji popsán. V kapitole 3 je popsáno nastavení modelu pro potřeby této práce. Informace o modelu jsou převzaty z uživatelského manuálu k programu HEC-HMS (Scharffenberg, 2016).

2.4.1. OBECNÉ INFORMACE

Model HEC-HMS je navržen k simulaci kompletních hydrologických procesů na stromovitých povodích. Jedná se o deterministický model, který používá tradiční výpočetní rutiny, jakými jsou metoda jednotkového hydrogramu či výpočet transformace v korytě. Z tohoto pohledu se jedná o model metrický. Program používá rovněž výpočty nutné pro kontinuální simulaci – do nich jsou zahrnuty i procesy jako evapotranspirace či tání sněhu. Uvažován je také vliv půdní vlhkosti. Model je primárně navržen jako semi-distribuovaný, kdy lze řešené povodí rozdělit na libovolné množství podpovodí. Nadstavby v prostředí geografických informačních systémů však v současné době umožňují už i distribuovaný výpočet. Program rovněž nabízí podpůrné analytické nástroje, jako například **citlivostní analýzu**.

2.4.2. VSTUPNÍ DATA

Požadavky na vstupní data se liší dle zvoleného výpočetního modelu. Aby mohla být simulace provedena, je třeba definovat tři základní vstupy:

- Model řešeného povodí (*Basin Model*)
- Meteorologický model (*Meteorologic Model*)
- Časové okno (*Control Specifications*)

Další tři typy vstupů lze použít v některých případech simulací:

- Časové řady dat (*Time-Series Data*)
- Párová data (*Paired Data*)
- Distribuovaná data (*Grid data*)

2.4.2.1. **Model řešeného povodí**

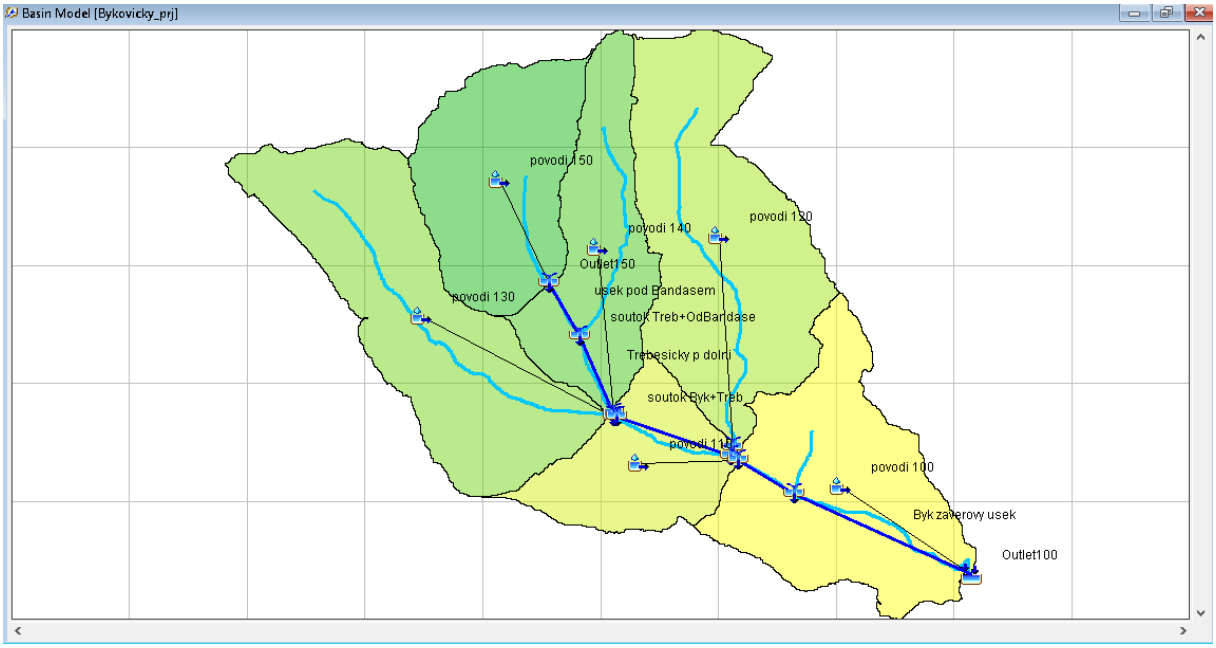
Model povodí popisuje fyzické vlastnosti povodí a topologii říční sítě. Jeho cílem je převést zadané atmosférické podmínky na odtok v korytě v zadaných místech povodí. Povodí je v modelu HEC-HMS reprezentováno soustavou hydrologických prvků, viz Tabulka 2. Tučně jsou vyznačeny prvky použité při stavbě modelů povodí pro tuto práci.

V každém z nabízených prvků probíhají výpočty některou z nabízených výpočetních metod. Jedná se o aproximaci skutečných procesů probíhajících v povodí. Metoda výpočtu je zvolena v závislosti na dostupnosti vstupních dat a požadované přesnosti. Pro každý hydrologický prvek v povodí existuje více než jedna varianta výpočetní metody.

Tabulka 2: Hydrologické prvky v modelu HEC- HMS.

Název ČJ	Název AJ	Ikona	Popis
Podpovodí	**Subbasin**		Prvek Subbasin reprezentuje určitou část plochy skutečného povodí. Pro výpočet odtoku z podpovodí je nejprve třeba vypočíst efektivní srážku (odečíst ztráty). Z ní je posléze vypočten povrchový odtok, ke kterému je přičten odtok základní.
Úsek	**Reach**		Prvek Reach reprezentuje úsek vodního toku (potok, řeka). Vstupem do prvku může být jeden nebo více prvků z horní části povodí. Odtok z prvku je vyjádřen výpočtem posunu (*Translation*) a útlumu (*Attenuation*) vlny. Zahrnuty mohou být rovněž ztráty při proudění (*Channel Losses*).
Soutok	**Junction**		Prvek Junction spojuje několik prvků Reach. Jedná se o soutok dvou nebo více vodních toků. Výsledný odtok je sumou všech přítoků do prvku.
Nádrž	Reservoir		Prvek Reservoir modeluje posun hydrogramu v důsledku průchodu vlny nádrží. Vstupem může být jeden nebo více prvků. Výsledný odtok je vypočten jednou ze tří dostupných metod.
Rozdělení	Diversion		Prvek Diversion reprezentuje oddělení proudu od hlavního toku. Vstupem může být jeden nebo více výše položených prvků. Výsledný odtok je rozdělen na odtoky v hlavním a vedlejším toku. Odtok ve vedlejším toku je specifikován uživatelem. Oba odtoky mohou být napojeny na další prvky hydrologického stromu.
Zdroj	Source		Prvek Source zavádí tok do modelu povodí. Tento prvek nemá žádný vstupní přítok. Odtok je definován uživatelem.
Odtok z povodí	**Sink**		Prvek Sink reprezentuje závěrový profil řešeného povodí. Přítok do prvku může být tvořen odtokem z jednoho nebo více výše položených prvků.

Tyto prvky jsou uživatelem spojeny do stromovité sítě, která může být v programu pro větší přehlednost graficky znázorněna nad podkladovou mapou (Obrázek 5). Podkladovou mapu lze importovat jako vektorovou vrstvu (*Shapefile*). U každého prvku je nutné specifikovat jeho umístění v síti pomocí určení prvku následujícího. Výpočet probíhá ve směru od horní části povodí.



Obrázek 5: Vizuální reprezentace povodí Býkovice v modelu HEC-HMS.

2.4.2.2. **Meteorologická data**

Pro vytvořený model povodí je nutné specifikovat vstupní přítok vody. Ten je v prostředí HEC-HMS vypočten ze zadané srážky a dalších vstupních dat pomocí meteorologického modelu. Základním vstupem do meteorologického modelu je srážka. Tu lze do modelu zadat jedním z 8 způsobů, které jsou blíže popsány v následující Tabulce 3. Pro některé z těchto způsobů je nutné zadat rovněž časovou řadu srážkových intenzit (*Precipitation Gage*). Model umí zpracovat bodově i prostorově zadanou srážku.

V případě dlouhodobé kontinuální simulace je třeba zahrnout i vliv následujících jevů:

- Tuhých srážek (*Snowmelt*) - 2 různé způsoby zadání a výpočtu
- Evapotranspirace (*Evapotranspiration*) - 7 způsobů
- Krátkovlnného záření (*Shortwave*) - 4 způsoby
- Dlouhovlnného záření (*Longwave*) - 4 způsoby

Tabulka 3: Možnosti meteorologického modelu HEC-HMS k zadání příčinné srážky.

Název ČJ	Název AJ	Popis
Frekvenční bouřka	Frequency storm	Srážková událost, při níž mají jednotlivé srážkové výšky pro různé doby trvání srážky stejnou pravděpodobnost překročení.
Váhy srážkových úhrnů	Gage weights	Uživatel určí váhy, které jsou aplikovány na zadané časové řady (*Precipitation Gage*) srážkových úhrnů.
Distribuovaná srážka	Gridded precipitation	Umožňuje využití distribuovaných srážkových dat – typicky z radarových měření.
Inverzní vzdálenost	Inverse distance	Vypočte průměrnou srážku na podpovodí metodou inverzních vzdáleností zadaných srážkových úhrnů.
HMR52	HMR52	Vypočte pravděpodobnou maximální srážku (PMP) za využití metody HMR52. Jedná se o metodu vytvořenou pro východní pobřeží USA.
SCS bouřka	SCS storm	Použije jedno ze 4 specifikovaných SCS rozdělení na 24 hodinovou srážku dané celkové výšky.
Specifikovaný hyetogram	**Specified hyetograph**	**Použije uživatelem vytvořenou časovou řadu (*Precipitation Gage*) intenzit deště na daném podpovodí.**
Bouřka standardního projektu	Standard project storm	Použije zadané pravděpodobnostní rozdělení na srážku o dané celkové výšce.

2.4.2.3. **Časové okno**

Pro simulaci v modelu HEC-HMS je třeba určit časovou specifikaci výpočtu následujícími údaji:

- Počátečním a koncovým datem výpočtu ve formátu ddMMMYYYY. Například 01Jan2000.
- Počátečním a koncovým časem výpočtu ve formátu HH:mm. Například 10:00.
- Časovým intervalem výpočtu v rozmezí 1 minuta až 1 den.

2.4.2.4. **Časové řady dat**

Tento způsob zadání dat nalezne využití zejména při zadávání srážkových dat (*Precipitation Gage*), lze ho ale využít například i k zadání hodnot sledovaných průtoků nutných pro kalibraci modelu (*Discharge Gage*), teplot (*Temperature Gage*), rychlostí větru (*Windspeed Gage*) a dalších veličin. Celkem lze tímto způsobem definovat 16 různých veličin. Takto zadaná data mohou být využita pro výpočet ve více modelech povodí i ve více meteorologických modelech a lze je zadat třemi různými způsoby:

- Manuálně (*Manual Entry*) – pro každý časový interval je nutno zadat (či manuálně vložit) hodnotu řešené veličiny.
- Jednoduchý záznam HEC-DSS (*Single Record HEC-DSS*) – časovou řadu řešené veličiny lze vložit do DSS souboru. K tomuto účelu lze využít prohlížečku HEC-DSSVue.
- Vícenásobný záznam HEC-DSS (*Multiple Record HEC-DSS*) – do DSS souboru lze vložit několik alternativních verzí časových řad.

Vzhledem k vývoji programu v USA je rovněž nutné vybrat vyhovující jednotky. Pro zadání srážkové výšky lze použít milimetry nebo inche (25,4 mm), a to v přírůstkové, nebo kumulativní formě.

2.4.2.5. **Párová data**

Některá data je vhodné zadat v párové formě. Jedná se o definovaný vztah dvou proměnných – závislé a nezávislé. Jedná se například o zadání jednotkového hydrogramu (*Unit Hydrograph Curves*) nebo o konzumční křivku (*Elevation-Discharge Functions*). Program HEC-HMS nabízí celkem 15 možných typů párových dat. Stejně jako u časových řad, takto zadaná data mohou být využita pro výpočet ve více modelech povodí i ve více meteorologických modelech.

2.4.2.6. **Distribuovaná data**

Model HEC-HMS umožňuje vkládat data i v distribuované formě. To znamená, že parametry musí být definovány v každé buňce rastru. Příkladem takto zadaných dat může být parametr CN (*SCS Curve Number Grids*) v distribuované formě, nebo rastr teplot (*Precipitation Gridsets*), který musí být navíc zadaný v časové řadě. Celkem lze tímto způsobem zadat 26 různých veličin. Stejně jako u časových řad a párových dat, takto zadaná data mohou být využita pro výpočet ve více modelech povodí i ve více meteorologických modelech.

2.4.3. VÝPOČET ODTOKU

Výpočet v modelu HEC-HMS má několik fází. Nejprve jsou meteorologická data zpracována meteorologickým modelem. Výstupy v podobě srážkové výšky pro jednotlivé elementy povodí jsou použity pro výpočet odtoku. Ten je vypočten dvěma hlavními procesy v prvku podpovodí: odečtením ztrát (komponent ztrát) a transformací efektivní srážky na povrchový odtok (komponent transformace). V prvku úseku dochází k transformaci povodňové vlny (komponent směrování) a k interakci s vodou podpovrchovou (komponent zisku/ztráty).

2.4.3.1. **Podpovodí**

V prvku podpovodí lze pracovat s pěti základními komponenty popisujícímu přeměnu srážky na povrchový odtok

- **Komponent vegetačního krytu (*Canopy Method*)**

Zahrnutím tohoto komponentu se do výpočtu zavádí vliv vegetace. Ta zachytí určité množství srážky (intercepce), které nedopadne na zemský povrch, a které se tedy neúčastní odtoku. Rostliny rovněž odebírají vodu z půdy a přenášejí ji do ovzduší během procesu transpirace.

Komponent vegetace by měl být do výpočtu vždy zahrnut v případě dlouhodobé kontinuální simulace. Jednotlivé metody výpočtu jsou uvedeny v následující Tabulce 4.

Tabulka 4: Možnosti výpočtu vlivu vegetace modelem HEC-HMS.

Název ČJ	Název AJ	Popis
Dynamická vegetace	Dynamic canopy	Metoda zahrnující kapacitu intercepce v milimetrech (množství zadržené srážky před tím, než začne dopadat na zemský povrch) a koeficient plodiny, který se mění v čase. Definován musí být rovněž počáteční stav naplnění intercepční kapacity v procentech. Se zahrnutím vlivu vegetace se neoddělitelně pojí procesy evapotranspirace a odběru vody z půdy (*Uptake Method*), které je nutno popsat jednou ze dvou nabízených metod.
Jednoduchá vegetace	Simple canopy	Zjednodušená reprezentace vlivu rostlinného krytu, která neuvažuje změnu vegetace v průběhu roku (neměnný koeficient plodiny).
Distribuovaná jednoduchá vegetace	Gridded simple canopy	Distribuovaná verze jednoduché vegetace. Intercepční kapacita musí být definována v každé buňce rastru (nikoli jednou hodnotou pro celé podpovodí jako v předchozích případech).

- **Komponent povrchu (*Surface Method*)**

Komponent povrchu slouží k zahrnutí vlivu terénních depresí, které mohou zadržet určitou část srážky. Povrchový odtok nastává teprve, pokud je vyčerpána infiltrační kapacita a všechny deprese jsou zaplněny. Voda zachycená v depresích se infiltruje a tím přispívá i k evapotranspiraci. Tyto procesy probíhají i po skončení příčinné srážky.

Depresní kapacita nepropustných povrchů (parkoviště) se obecně blíží nule. Naopak zemědělské plochy (zvláště obdělávané za využití půdoochranných technologií) mohou vykazovat vysoké hodnoty depresní kapacity. Komponent vegetace by měl být do výpočtu vždy zahrnut v případě dlouhodobé kontinuální simulace. Jednotlivé metody výpočtu jsou uvedeny v následující Tabulce 5.

Tabulka 5: Možnosti výpočtu vlivu povrchových depresí v modelu HEC-HMS.

Název ČJ	Název AJ	Popis
Jednoduchý povrch	Simple surface	Metoda operující s maximální depresní zásobou (*Max Storage*) v milimetrech. Definován musí být rovněž počáteční stav naplnění depresní kapacity v procentech.
Distribuovaný jednoduchý povrch	Gridded simple surface	Distribuovaná verze jednoduchého povrchu. Depresní kapacita musí být definována v každé buňce rastru (nikoli jednou hodnotou pro celé podpovodí jako v předchozím případě).

- **Komponent ztráty (*Loss Method*)**

Na prvku podpovodí probíhají současně procesy infiltrace, povrchového odtoku a podpovrchového odtoku. Tyto procesy se vzájemně ovlivňují a právě popis interakce těchto tří procesů je cílem komponentu ztráty. Uživatel si může vybrat jednu ze 7 výpočetních metod ztráty – viz Tabulka 6. Všechny tyto metody zachovávají objem – suma infiltrace a srážky, která zůstane na povrchu, je vždy rovna celkové srážce. Pro všechny metody je rovněž nutno zadat procento nepropustných ploch (*% impervious*). Část srážky, která dopadne na nepropustnou plochu, není předmětem výpočtu ztráty a stává se přímo efektivní srážkou tvořící přímý odtok.

Čtyři z uvedených sedmi metod (v tabulce označené hvězdičkou) lze použít rovněž v distribuované podobě. Všechna meteorologická data i všechny parametry musí být v tom případě definovány ve všech buňkách rastru.

Tabulka 6: Možnosti výpočtu ztráty v modelu HEC-HMS.

Název ČJ	Název AJ	Popis
Konstantní ztráta	Deficit and Constant Loss *	Metoda používá jedinou půdní vrstvu (definována počáteční a maximální zásobou vody), aby postihla kontinuální změny půdní vlhkosti. Průsak z této vrstvy je definován svou intenzitou (mm/hod – např. nasycená hydraulická vodivost) a nastane v případě, je-li celá půdní vrstva saturována vodou. Metoda by měla být použita v kombinaci s komponentem vegetačního krytu, který simuluje vysušení půdy během bezdeštného období pomocí evapotranspirace.
Exponenciální ztráta	Exponential Loss	Empirická metoda, která by neměla být používána bez kalibrace. Jedná se o funkci kumulativní infiltrace, která nezahrnuje žádný mechanismus obnovy infiltrační kapacity. Metoda by proto neměla být používána pro kontinuální modelování.
Green-Ampt	Green and Ampt Loss *	Jedná se o zjednodušení Richardsovy rovnice popisující nenasycené proudění vody v půdě. Je nutné určit počáteční půdní vlhkost (-), maximální půdní vlhkost (reprezentována pórovitostí) a hydraulickou vodivost. Vysoušení je definováno pomocí hodnoty sání (mm).
Počáteční a konstantní ztráta	Initial and Constant Loss	Velmi jednoduchá metoda vhodná pro povodí bez detailního půdního průzkumu. Pro výpočet je nutno specifikovat 2 parametry: počáteční ztrátu v milimetrech (množství srážky, které se z jakéhokoli důvodu neúčastní povrchového odtoku) a konstantní hodnotu (mm/hod), která určuje intenzitu infiltrace po naplnění počáteční ztráty. Počáteční ztráta se neobnovuje, metoda proto není vhodná pro kontinuální simulaci.
Metoda CN	**SCS Curve Number Loss ***	**Metoda operující s parametrem CN (číslo odtokové křivky), který by měl reprezentovat průměrnou hodnotu na řešené ploše (nepropustné plochy nejsou do výpočtu zahrnuty). Zadat lze rovněž počáteční ztrátu. Pokud tak není učiněno, je počáteční ztráta určena jako 0,2 násobek potenciální retence.**
Metoda Smith Parlange	Smith Parlange Loss	Tato metoda aproximuje Richardsovu infiltrační rovnici za použití předpokladu, že zvlhčující čelo může být reprezentováno exponenciálním průběhem nasycené hydraulické vodivosti. Metoda je velmi podrobná a vyžaduje znalost velkého množství parametrů charakterizujících půdní vlastnosti.
Ztráta s vlivem půdní vlhkosti	Soil Moisture Accountig Loss *	Tato metoda používá 3 půdní vrstvy k vyjádření dynamiky postupu vody půdou. Metoda by měla být použita v kombinaci s komponentem vegetačního krytu, který během bezdeštného období vysuší půdu pomocí využití evapotranspirace rostlin, a v kombinaci s komponentem povrchu. Tato metoda vyžaduje největší množství vstupních dat.

- **Komponent transformace (*Transform Method*)**

Komponent transformace popisuje samotný proces povrchového odtoku z podpovodí. Uživatel si může vybrat jednu ze 7 výpočetních metod transformace – viz Tabulka 7.

Tabulka 7: Možnosti výpočtu transformace v modelu HEC-HMS

Název ČJ	Název AJ	Popis
Clarkův jednotkový hydrogram	Clark Unit Hydrograph Transform	Metoda používá Clarkův syntetický jednotkový hydrogram definovaný dobou doběhu na povodí (*Time-Area Curve*). Výsledný hydrogram je navíc veden přes lineární nádrž definovanou koeficientem zásobnosti (hod), která symbolizuje efekt zdržení na ploše podpovodí. Parametr doba koncentrace (hod) určuje nejdelší možnou dobu doběhu na podpovodí.
Jednotkový hydrogram SCS	**SCS Unit Hydrograph Transform**	**Křivočarý jednotkový hydrogram. Nejprve je určeno procento odtoku, které nastane ještě před dosažením kulminačního průtoku. Standardní jednotkový hydrogram uvažuje hodnotu 37,5% odtoku před dosažením kulminace (*Peak Rate Factor 484*). Tato hodnota se ovšem pro jednotlivá povodí liší. Čím plošší povodí, tím je tento faktor nižší (až PRF 100). Program nabízí 13 různých variant PRF. Jediným dalším parametrem je doba zdržení (*Lag Time*) v minutách. Jedná se o časovou vzdálenost mezi těžištěm srážkového obrazce a vrcholem odtoku.**
Snyderův jednotkový hydrogram	Snyder Unit Hydrograph Transform	Snyderův syntetický hydrogram nedokáže vypočíst všechny souřadnice odtokového hydrogramu. Program nabízí standardní metodu výpočtu plus další dvě metody odvozené pro potřeby USA (Ft Worth District, Tulsa District). Standardní metoda používá parametry standardního zdržení (obdoba doby zdržení; hod) a vrcholového koeficientu (-), který zohledňuje strmost hydrogramu a pohybuje se obvykle v rozmezí 0,4 – 0,8.
Uživatelem specifikovaný S-graf	User-specified S-graph Transform	Nejedná se o syntetický hydrogram. Uživatel musí specifikovat s-graf (jako párová data) závislosti kumulativního odtoku na procentu doby zdržení. Tohoto přístupu lze využít pouze v konkrétních povodích s měřenými daty. Lze využít standardní, či regresní metody výpočtu doby zdržení.
Uživatelem specifikovaný jednotkový hydrogram	User-specified Unit Hydrograph Transform	Pro každé podpovodí musí být vytvořen zvláštní jednotkový hydrogram na základě měřených dat. Nejedná se o syntetickou výpočetní techniku. Doba jednotkového hydrogramu musí být stejná jako doba trvání efektivní srážky. Hydrogram musí být nejprve specifikován v sekci párových dat.

Pokračování Tabulky 7: Možnosti výpočtu transformace v modelu HEC-HMS

Transformace kinematickou vlnou	Kinematic Wave Transform	Metoda primárně určená pro reprezentaci odezvy urbanizovaných povodí. Jedná se o konceptuální model, skládající se ze dvou vrstev – jedna řeší propustné a druhá nepropustné povrchy. Ty jsou odlišeny zejména parametrem hydraulické drsnosti. Výsledný odtok je poté veden do subkolektoru, který reprezentuje primární svod vody (např. uliční žlab). Nakonec je nutné popsat charakteristiky hlavního odtokového kanálu z povodí.
Transformace ModClark	ModClark Transform	Lineární kvazi-distribuovaná metoda založená na Clarkově jednotkovém hydrogramu. V této metodě je křivka time-area nahrazena samostatným indexem doby doběhu pro každou buňku. Stejně jako u Clarkova jednotkového hydrogramu jsou využity parametry doba koncentrace (hod) a koeficient zásobnosti (hod).

- **Komponent základního odtoku (*Baseflow Method*)**

Komponent základního odtoku popisuje samotný proces podpovrchového odtoku z podpovodí. Uživatel si může vybrat jednu z 5 výpočetních metod základního odtoku – viz Tabulka 8.

Tabulka 8: Možnosti výpočtu základního odtoku v modelu HEC-HMS.

Název ČJ	Název AJ	Popis
Konstantní měsíční základní odtok	Constant monthly baseflow	Základní odtok je určen konstantní hodnotou pro každý měsíc v roce. Vhodné pro kontinuální simulace v povodích s pravidelným ročním cyklem.
Základní odtok metodou lineární nádrže	Linear Reservoir Baseflow	Metoda využívá modelu lineární nádrže k simulaci poklesu základního odtoku po srážkové události. Vstupem do lineární nádrže je infiltrace vypočtená ztrátovým komponentem v předchozím kroku. Musí být určen základní odtok před srážkou.
Recesní základní odtok	Recession Baseflow	Metoda simulující exponenciální pokles základního odtoku po příčinné srážce. Vhodná pro epizodní modelování, díky resetu základního odtoku po odeznění srážky však lze využít i pro simulaci kontinuální.
Základní odtok metodou ohraničené recese	Bounded Recession Baseflow	Metoda primárně určená pro předpovědi v reálném čase. Velmi podobná recesní metodě. V této metodě lze navíc specifikovat měsíční limity základního odtoku. Tato metoda neresetuje základní odtok po skončení srážkové události.

Pokračování Tabulky 8: Možnosti výpočtu základního odtoku v modelu HEC-HMS

Nelineární Boussinesqův základní odtok	Nonlinear Boussinesque Baseflow	Obdoba recesní metody – vhodná pro modelování v povodích, kde se základní odtok po srážce snižuje. Metoda uvažuje neomezený půdní blok a Boussinesquovy předpoklady, díky čemuž ji lze parametrizovat na základě měřených dat. Lze využít pro epizodní i (díky resetu základního odtoku po srážce) kontinuální simulaci.

2.4.3.2. **Úsek**

Jedná se o prvek s jedním nebo více přítoky z ostatních elementů v horní části povodí, ale pouze s jedním odtokem. Tento odtok je vypočten jednou z metod, které simulují proudění v otevřeném korytě.

- **Komponent směrování (*Routing Method*)**

Komponent směrování popisuje samotný proces transformace v korytě na zadaném úseku vodního toku. Uživatel si může vybrat jednu z 6 výpočetních metod směrování – viz Tabulka 9.

Tabulka 9: Metody výpočtu transformace v úseku povrchového toku v modelu HEC-HMS

Název ČJ	Název AJ	Popis
Metoda kinematické vlny	Kinematic Wave Routing	Aproximuje neustálené proudění za podmínky zanedbání tlakových a setrvačných sil. Čára energie je rovnoběžná se sklonem dna. Nejlépe využitelná pro poměrně strmé toky – např. urbanizované povodí s pravidelným sklonem i tvarem koryta. Parametry: délka, průměrný sklon, Manningova drsnost a příčný průřez úseku.
Metoda zdržení	Lag routing	Velmi jednoduchá metoda s jediným parametrem – dobou zdržení (min). Reprezentuje pouze vliv posunutí povodňové vlny. Vhodná pro krátké úseky s předvídatelnou rychlostí proudění, která se příliš nemění s hloubkou.
Metoda modifikovaného pulsu	Modified Puls Routing	Tato metoda využívá zachování objemu a vztah mezi zásobou a odtokem z úseku. V sekci párová data musí být definován funkční vztah zásoby a odtoku. Lze využít k simulaci zúžení profilu a tím způsobeného vzdutí vody nad ním.
Metoda Muskingum	Muskingum Routing	Metoda uvažuje lineární průběh hladiny a zachování objemu. Lineární průběh umožňuje postihnout rozdíly při nástupu a odchodu povodňové vlny. Tato metoda je charakterizována zvláštními parametry K (cestovní čas vody skrz úsek) a X (váha v rozmezí 0 až 0,5 určující utlumení v úseku).

Pokračování Tabulky 9: Metody výpočtu transformace v úseku povrchového toku v modelu HEC-HMS

Metoda Muskingum - Cunge	**Muskingum-Cunge Routing**	**Kombinace přístupů zachování objemu a zachování momentů. Metoda proměnných koeficientů – ty jsou znovu přepočítávány v každém časovém intervalu v závislosti na vlastnostech kanálu a na hloubce vody. Vhodné použití pro toky s malým podélným sklonem. Definována délkou, sklonem, Manningovou drsností a příčným průřezem vodního toku.**
Metoda straddle stagger	Straddle Stagger Routing	Metoda používá empirické metody k reprezentaci zdržení a utlumení povodňové vlny. Definována parametry zdržení (min) a trvání (min), které vlnu zplošťují a posouvají pomocí průměrování hodnot na zadaných časových intervalech.

- **Komponent zisku/ztráty (*Loss/Gain Method*)**

Komponent zisku/ztráty popisuje interakci zadaného úseku vodního toku s podpovrchovými ději (zisk/ztráta z podpovrchových vod). Uživatel si může vybrat jednu z 2 výpočetních metod zisku/ztráty – viz Tabulka 10. Některé metody lze použít pouze v kombinaci s vybranou metodou směrování.

Tabulka 10: Možnosti výpočtu zisku/ztráty v úseku toku v modelu HEC-HMS

Název ČJ	Název AJ	Popis
Konstantní zisk/ztráta	Constant Loss/Gain	Metoda používá empirický vztah založený na redukci průtoku v korytě fixní hodnotou. Nezahrnuje možnost zisků. Metoda je použitelná ve spojení se všemi trasovacími metodami a je určena dvěma parametry: koeficient průtoku (*Flow Rate*) odečítá od přítoku fixní hodnotu průtoku a zlomek (*Fraction*) zbylý průtok sníží určeným poměrem.
Zisk/ztráta průsakem	Percolation Loss/Gain	Tato metoda počítá ztráty za použití konstantního infiltračního poměru v kombinaci se zahrnutím zaplavených území. Metoda je kompatibilní pouze s trasovacími metodami modifikovaného pulsu a Muskingum-Cunge. Nezahrnuje možnost zisků. Jediným parametrem je průsak ($m^3/s/1000\ m^2$). Pro vyčíslení ztráty je zaplavená plocha v každém časovém intervalu vynásobena tímto parametrem.

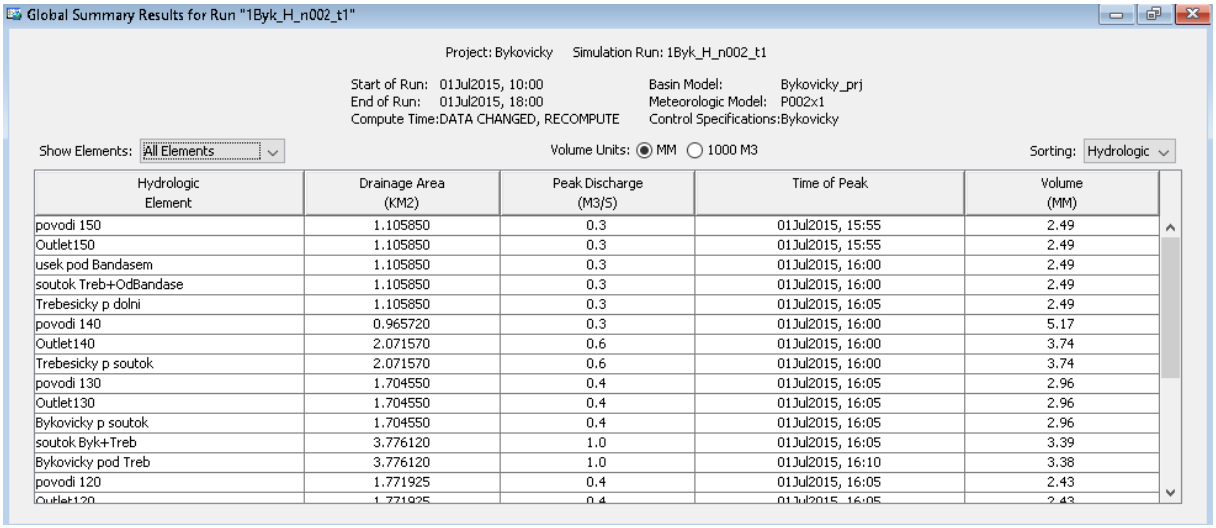
2.4.4. *VÝSTUPNÍ DATA*

V průběhu simulace je s použitím vybraných výpočetních komponentů vypočtena odtoková odezva modelu povodí na vstupní srážková data. Aby mohla simulace proběhnout, je třeba zadat všechny 3 základní vstupní veličiny - model povodí, meteorologický model, časové okno. Soubor s výsledky simulace je uložen ve formátu DSS (*Data Storage System*).

Vypočtené hodnoty lze zobrazit přímo v prostředí HEC-HMS, a to v následujících podobách:

- **Celková sumární tabulka (*Global Summary Table*)**

Tato tabulka udává hodnoty odvodňované plochy (km^2), kulminačního průtoku (m^3/s) včetně času jeho dosažení a celkového objemu odtoku (m^3) v jednotlivých hydrologických elementech povodí. Forma znázornění výsledků je uvedena na následujícím Obrázku 6.



Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
povodi 150	1.105850	0.3	01Jul2015, 15:55	2.49
Outlet150	1.105850	0.3	01Jul2015, 15:55	2.49
usek pod Bandasem	1.105850	0.3	01Jul2015, 16:00	2.49
soutok Treb+OdBandase	1.105850	0.3	01Jul2015, 16:00	2.49
Trebesicky p dolni	1.105850	0.3	01Jul2015, 16:05	2.49
povodi 140	0.965720	0.3	01Jul2015, 16:00	5.17
Outlet140	2.071570	0.6	01Jul2015, 16:00	3.74
Trebesicky p soutok	2.071570	0.6	01Jul2015, 16:00	3.74
povodi 130	1.704550	0.4	01Jul2015, 16:05	2.96
Outlet130	1.704550	0.4	01Jul2015, 16:05	2.96
Bykovicky p soutok	1.704550	0.4	01Jul2015, 16:05	2.96
soutok Byk+Treb	3.776120	1.0	01Jul2015, 16:05	3.39
Bykovicky pod Treb	3.776120	1.0	01Jul2015, 16:10	3.38
povodi 120	1.771925	0.4	01Jul2015, 16:05	2.43
Outlet120	1.771925	0.4	01Jul2015, 16:05	2.43

Obrázek 6: Celková sumární tabulka výsledků v modelu HEC-HMS.

Existují i další možné formy zobrazení vypočtených výsledků. Ty se liší od sumární tabulky tím, že jsou uvedeny vždy pouze pro vybraný hydrologický prvek povodí. Jedná se o následující možnosti:

- **Sumární tabulka**

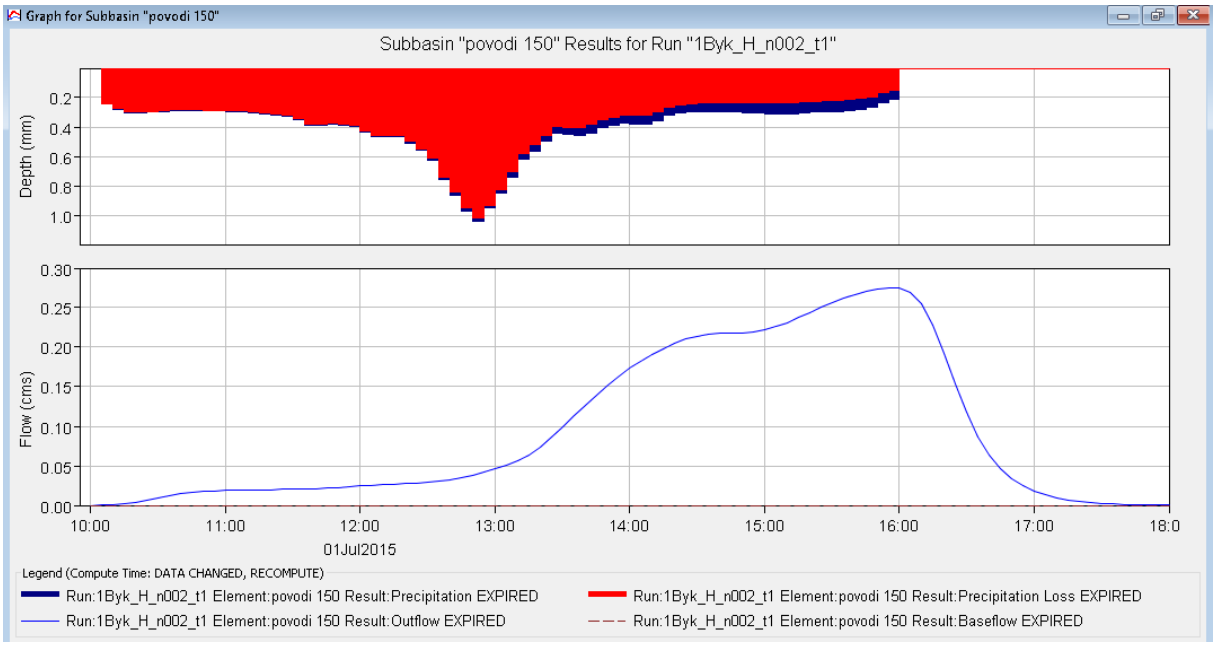
Tabulka obsahující jen nejzákladnější informace o parametrech výpočtu. Je specifikován model povodí, meteorologický model, časové parametry a hydrologický element, pro který je výpočet proveden. Z výsledků jsou uvedeny pouze hodnota a čas kulminačního průtoku a objemy jednotlivých částí odtoku (srážka, srážková ztráta, efektivní srážka, přímý odtok, základní odtok, celkový odtok). Viz Obrázek 7.

Obrázek 7: Sumární tabulka výsledků pro vybraný hydrologický prvek v modelu HEC-HMS.

- **Graf**

Grafické znázornění je výhodné pro lepší uchopení celkových výsledků. Pro prvek podpovodí je znázorněna srážková výška a srážková ztráta v porovnání s odtokem z prvku. Forma grafického znázornění výsledků pro prvek podpovodí je uvedena na následujícím Obrázku 8.

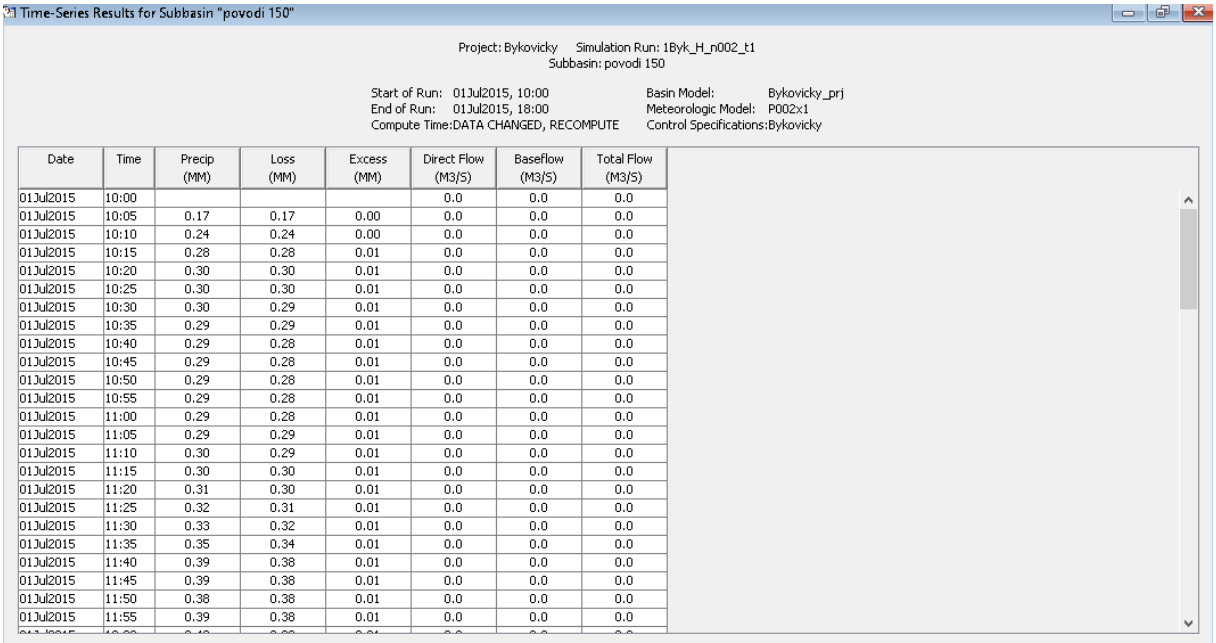
Pro každý typ hydrologického prvku v povodí je grafické znázornění provedeno rozdílným způsobem – například pro úsek toku je graficky porovnán přítok a odtok. Je tedy znázorněna transformace povodňové vlny v daném úseku vodního toku.



Obrázek 8: Grafické znázornění výsledků simulace v podpovodí v modelu HEC-HMS.

- **Časová tabulka**

Časová tabulka poskytuje stejné informace jako graf – ovšem v číselné tabelární podobě. Příklad uveden na následujícím Obrázku 9.

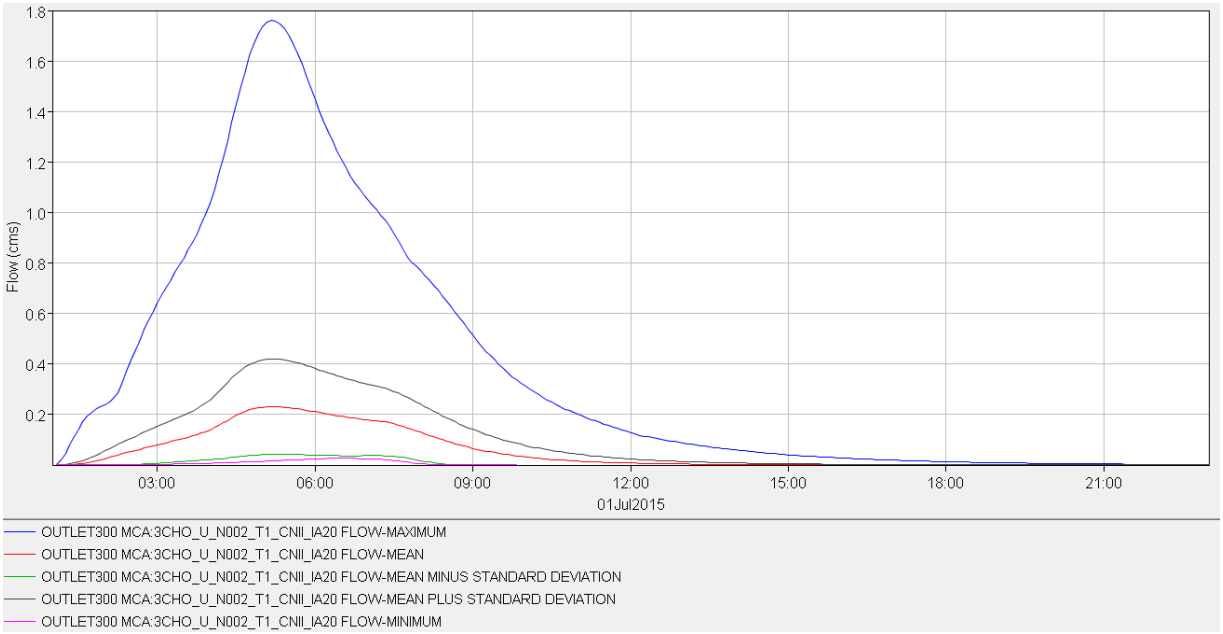


Date	Time	Precip (MM)	Loss (MM)	Excess (MM)	Direct Flow (M3/S)	Baseflow (M3/S)	Total Flow (M3/S)
01Jul2015	10:00				0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:05	0.17	0.17	0.00	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:10	0.24	0.24	0.00	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:15	0.28	0.28	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:20	0.30	0.30	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:25	0.30	0.30	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:30	0.30	0.29	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:35	0.29	0.29	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:40	0.29	0.28	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:45	0.29	0.28	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:50	0.29	0.28	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	10:55	0.29	0.28	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:00	0.29	0.28	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:05	0.29	0.29	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:10	0.30	0.29	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:15	0.30	0.30	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:20	0.31	0.30	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:25	0.32	0.31	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:30	0.33	0.32	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:35	0.35	0.34	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:40	0.39	0.38	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:45	0.39	0.38	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:50	0.38	0.38	0.01	0.0	0.0	0.0
01Jul2015	11:55	0.39	0.38	0.01	0.0	0.0	0.0

Obrázek 9: Časová tabulka výsledků pro daný hydrologický prvek v modelu HEC-HMS.

Výsledky lze rovněž prohlížet v prohlížečce určené k tomuto účelu (**HEC-DSSVue**), která je volně ke stažení z webových stránek US Army Corps of Engineers. Tato prohlížečka usnadňuje manipulaci s vytvořenými daty a umožňuje jejich analýzu například pomocí zabudovaných matematických funkcí.

Výsledky jednotlivých simulací jsou uvedeny v řádcích. Pro každý řádek znamená sloupec A (*Part A*) popis povodí, sloupec B hydrologický prvek povodí, sloupec C vypočtenou veličinu (např. FLOW – průtok), sloupec D časové zařazení, sloupec E časový interval výpočtu a sloupec F název výstupního DSS souboru. Na Obrázku 10 je znázorněno zobrazení výstupních grafů z citlivostní analýzy v prohlížečce HEC-DSSVue.



Obrázek 10: Zobrazení grafů v prohlížečce HEC-DSSVue.

3. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Popis tak komplexního systému, jakým je hydrologický cyklus Země, s sebou nese veliké množství **nejistot** (*Uncertainty*). Ty jsou do výpočtu hydrologického modelu vnášeny prakticky ve všech jeho krocích. Určení míry nejistoty výpočtu je důležitou součástí hydrologického modelování, která umožňuje vyhodnocení spolehlivosti předkládaných výstupů. V případě hodnocení rizik (např. ochrana před povodní) se jedná o nezbytnou součást výpočtu. Nejistoty jsou do výpočtu vnášeny následujícími základními procesy:

- Zjednodušením popisu povodí.
- Použitím matematických rovnic bez fyzikálního základu.
- Nedostatečnou přesností (prostorovou, časovou i kvalitativní) vstupních dat.

Jelikož je výpočet srážko-odtokové odezvy povodí velmi komplexní proces s mnoha nejistotami, není prakticky možné přesně určit, jaká část celkové nejistoty je způsobena kterým parametrem. Lze však odhadnout, který parametr má na celkový výsledek simulace podstatný vliv (vysoká citlivost), a který naopak vykazuje nízkou míru důležitosti (nízká citlivost).

3.1. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA V MODELU HEC-HMS

Cílem této práce je určení celkové nejistoty výpočtu, plynoucí z nejistot v určení 4 základních parametrů potřebných pro výpočet zvolenou metodou. Použité výpočetní metody jsou popsány v Kapitole 3.3. Hodnoty jednotlivých parametrů a způsob zjištění těchto hodnot pak v Kapitole 3.4.

Nejistota v určení hodnoty parametru je v prostředí HEC-HMS popsána statistickým rozdělením výskytu hodnot daného parametru (*PDF – Probability Density Function*). Pro provedení citlivostní analýzy je použita metoda **Monte Carlo**. Jedná se o přístup, který automatickým vzorkovacím postupem vytváří alternativní modely povodí.

V každém z těchto modelů jsou hodnoty jednotlivých parametrů určeny dle specifikovaných statistických rozdělení pravděpodobností (PDF). Pro každý z alternativních modelů je vypočtena srážko-odtoková odezva a výsledky jednotlivých simulací jsou statisticky vyhodnoceny. Z tohoto statistického vyhodnocení lze určit celkovou nejistotu modelu.

Program HEC-HMS v současné verzi dokáže postihnout pouze nejistotu vstupních parametrů popisujících povodí. Možnost určení nejistot meteorologických dat není v programu zahrnuta.

Pro citlivostní analýzu (*Uncertainty Analysis*) je nutné, stejně jako pro běžnou simulaci, definovat základní výpočetní prvky: model povodí, meteorologický model, časové okno a časový interval výpočtu. Navíc je pro každou analýzu nutné určit **počet vzorků** (*Total Samples*). Ten udává, kolikrát budou vygenerovány hodnoty parametrů (dle PDF) a kolikrát budou vypočteny výsledky. Z daného počtu vzorků vzejde stejný počet výsledků, které budou následně statisticky vyhodnoceny. Tento počet by měl překročit **hodnotu konvergence** – tedy hodnotu, při jejímž zvětšování se již dosahované výsledky nemění.

Pro každou z výpočetních metod nabízí program HEC-HMS parametry, jejichž citlivost lze otestovat. Obvykle se jedná o všechny parametry nutné pro výpočet danou metodou. Vybraným parametrům je následně nutné přidělit statistické rozdělení pravděpodobností (PDF) jednou z 3 metod uvedených v následující Tabulce 11.

Tabulka 11: Možnosti přidělení statistického rozdělení parametrům modelu HEC-HMS.

Název ČJ	Název AJ	Popis
Jednoduché rozdělení	Simple Distribution	Metoda pro určení statistického rozdělení parametru nezávisle na ostatních parametrech. Využít lze jednu z 8 nabízených distribučních funkcí.
Měsíční rozdělení	Monthly Distribution	Metoda využitelná zejména pro parametry vykazující sezónní rozkolísanost. Parametry vybraného statistického rozdělení jsou určeny odděleně pro každý měsíc v roce.
Regrese s přidanou chybou	Regression With Additive Error	Metoda vhodná pro popsání závislosti jednoho parametru na jiném nezávislém parametru vstupujícím do výpočtu. Závislost definována lineárním, nebo log-lineárním vztahem s chybou. Chyba definována svou PDF.

V následující Tabulce 12 je definováno 8 distribučních funkcí, které lze použít k popisu statistického rozdělení parametrů výpočtu. Pod funkčním předpisem jsou vždy uvedeny parametry, které je nutné pro dané rozdělení specifikovat (pro normální rozdělení se jedná o parametry Mu a Sigma, reprezentující průměr a směrodatnou odchylku datového souboru). Mimo parametry uvedené v Tabulce 12 je nutné specifikovat i minimum a maximum parametru tak, aby nedošlo k vygenerování hodnot odporujícím jeho fyzikální podstatě.

Tabulka 12: Možnosti statistických rozdělení parametrů pro citlivostní analýzu v modelu HEC-HMS.

Beta	$f(x) = \frac{1}{B(p,q)} \frac{(x-min)^{p-1}\,(max-x)^{q-1}}{(max-min)^{p+q-1}}$ Alpha=p, Beta=q, Lower=min, Upper=max $B(p,q)$ is the Beta function
Exponential	$f(x) = \frac{1}{\beta} exp\left(-\frac{(x-min)}{\beta}\right)$ Mu=β, Shift=min
Gamma	$f(x) = \frac{(x-min)^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha}\,\Gamma(\alpha)} exp\left(-\frac{x-min}{\beta}\right)$ Shape=α, Scale=β, Shift=min $\Gamma(\alpha)$ is the Gamma function
Log-normal	$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} exp\left(-\frac{[ln(x)-\mu]^2}{2\sigma^2}\right)$ Mu=μ, Sigma=σ
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} exp\left(-\frac{[x-\mu]^2}{2\sigma^2}\right)$ Mu=μ, Sigma=σ
Triangular	$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-min)}{(max-min)\,(mode-min)} & min < x \leq mode \\ \frac{2(max-x)}{(max-min)(max-mode)} & mode < x \leq max \end{cases}$ Lower=min, Mode=$mode$, Upper=max
Uniform	$f(x) = \frac{1}{max-min}$ Lower=min, Upper=max
Weibull	$f(x) = \frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{x-min}{\beta}\right)^{\alpha-1} exp\left(-\left[\frac{x-min}{\beta}\right]^{\alpha}\right)$ Shape=α, Scale=β, Shift=min

Výsledky citlivostní analýzy jsou přístupné ve formátu DSS. V tabelární podobě lze zobrazit všechny realizace jednotlivých parametrů, maximální průtok (m^3/s) pro jednotlivé realizace a celkový objem průtoku (m^3) pro jednotlivé realizace.

V grafické podobě je zobrazeno statistické vyhodnocení jednotlivých realizací. V jednom grafu je zobrazeno pět průběhů:

- Průběh minimálního průtoku.
- Průběh průměrného průtoku mínus směrodatná odchylka.
- Průběh průměrného průtoku.
- Průběh průměrného průtoku plus směrodatná odchylka.
- Průběh maximálního průtoku.

Další možnosti zobrazení a práce s daty poskytuje prohlížečka dat HEC-DSSVue. Pro potřeby této práce byla data z DSS souborů extrahována a statistické vyhodnocení bylo provedeno ve statistickém softwaru **RStudio**.

3.2. ŘEŠENÁ POVODÍ

Citlivostní analýza v hydrologickém modelu HEC-HMS byla provedena na vzorku 5 reprezentativních povodí IV. řádu České republiky (Kavka, 2016). Jejich výběr probíhal následujícím způsobem: Povodí IV. řádu s rozlohou nad 0,5 km^2 ČR byla nejprve rozdělena do 7 skupin dle následujících charakteristik:

- Koeficient tvaru povodí α (-)
- Hustota říční sítě HRS (km/km^2)
- Průměrné číslo odtokové křivky pro střední stav předchozího nasycení CN_II (-)
- Specifická maximální délka odtokové dráhy Lmax.sp (m/km^2)
- Průměrná střední dráha plošného povrchového odtoku OFLen.m (m)

Pro další analýzy bylo dle těchto společných vlastností vybráno 5 nejpočetnějších skupin, které dohromady čítají 7069 povodí IV. řádu - tedy 98,8% rozlohy ČR. Jedná se o skupiny č. 1, 2, 5, 6, 7. Dvě nejméně početné skupiny (č. 3 a č. 4) byly z testovacího souboru vyřazeny. Původní a nová čísla skupin povodí jsou uvedena v následující Tabulce 13. V některých grafech se však přesto může vyskytnout původní číslování.

Tabulka 13: Označení jednotlivých skupin povodí IV. řádu.

Původní číslo	Nové číslo	Reprezentativní povodí
1	1	Býkovický potok
2	2	Struhařovský potok
3	-	-
4	-	-
5	3	Chouzavá
6	4	Škvorecký potok
7	5	Halounský potok

Potřebné analýzy byly prováděny v programu ArcGIS. Výsledné průměrné hodnoty 5 sledovaných parametrů pro jednotlivé skupiny povodí jsou uvedeny v následující Tabulce 14.

Tabulka 14: Průměrné hodnoty jednotlivých charakteristik povodí IV. řádu.

Třída	Počet povodí	CN_II	α	HRS	Lmax.sp	OFLen.m
1	1686	70.7	0.486	1.32	747	120
2	1400	74.7	0.271	1.69	935	100
3	1690	57.7	0.322	1.59	867	118
4	1632	74.4	0.264	0.983	839	136
5	661	59.7	0.370	1.45	801	208

Hydrologické modelování však nelze, z důvodu velké časové náročnosti, provádět pro každé povodí zvlášť. Pro každou z vytvořených skupin proto bylo vybráno jedno reprezentativní povodí, na kterém bylo hydrologické modelování provedeno. Jedná se o povodí, která byla vybrána na základě nejmenší odlehlosti jejich parametrů od centroidu parametrického prostoru dané skupiny povodí. Jejich charakteristiky jsou uvedeny v následující Tabulce 15.

Tabulka 15: Charakteristiky reprezentativních povodí IV. řádu.

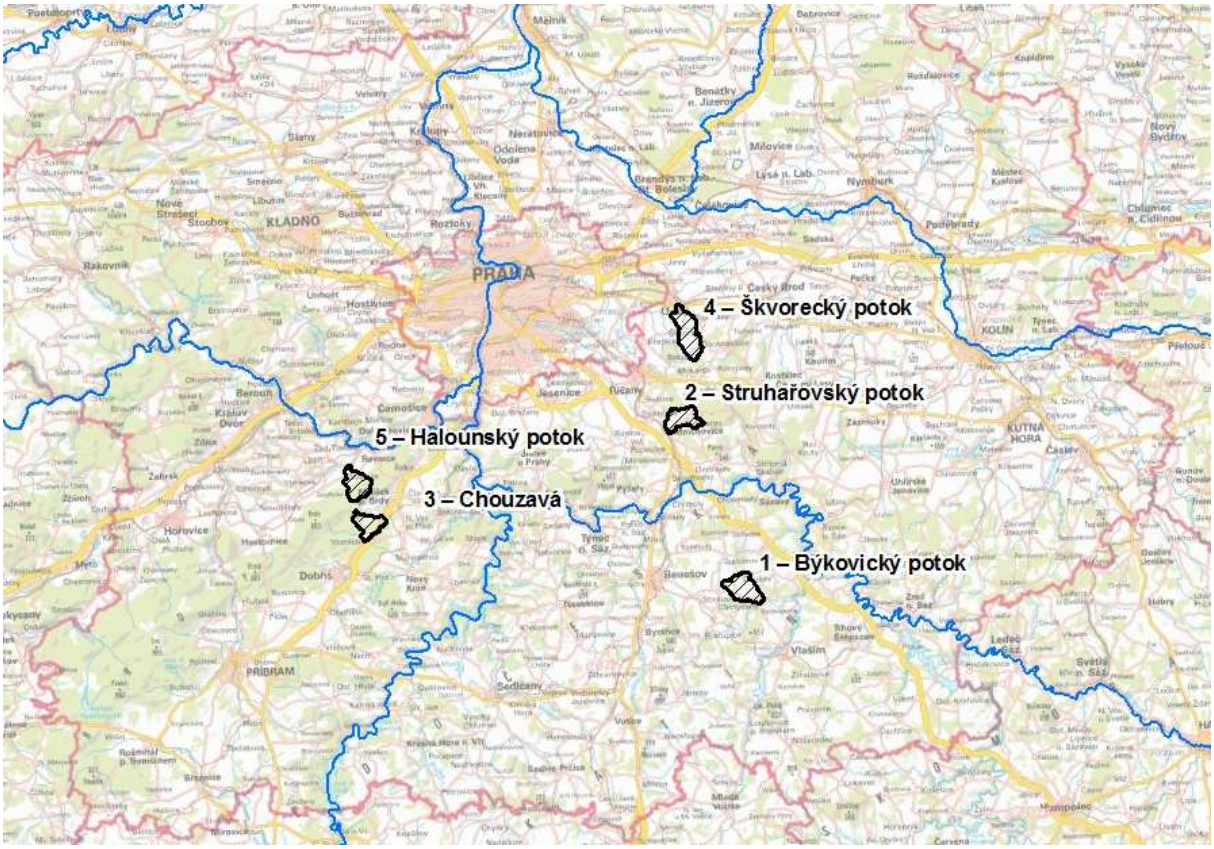
Třída	Název toku	Číslo hydr. pořadí	Plocha (km^2)	CN_II	Alfa	HRS	Lmax.sp	OFLen.m
1	Býkovický p.	1-09-03-0890	7.75	76.4	0.387	1.35	723	104
2	Struhařov. p.	1-09-03-1250	5.79	72.7	0.329	1.57	903	103
3	Chouzavá	1-08-05-1060	4.86	55.8	0.385	1.23	893	113
4	Škvorecký p.	1-04-07-0530	9.36	77.4	0.229	1.01	884	130
5	Halounský p.	1-11-05-0340	6.09	58.5	0.428	1.43	978	189

Každá ze skupin povodí má své charakteristické rysy, které určují její povahu a odtokové vlastnosti, a které jsou uvedeny v následující Tabulce 16.

Tabulka 16: Slovní popis jednotlivých skupin povodí IV. řádu.

Třída	Reprezentativní povodí	Charakteristika skupiny
1	Býkovický p.	Vějířovitá povodí se střední hustotou říční sítě a smíšeným půdním pokryvem.
2	Struhařov. p.	Protáhlá povodí s vysokou hustotou říční sítě, jako půdní pokryv převládají povrchy s nižší retencí (zemědělská půda, antropogenní plochy).
3	Chouzavá	Přechodný tvar povodí s pokryvem s vysokou retencí.
4	Škvorecký p.	Protáhlý tvar povodí s nízkou hustotou říční sítě a dlouhými drahami odtoku. Převažují povrchy s nízkou retencí.
5	Halounský p.	Přechodný až vějířovitý tvar povodí a velmi dlouhé dráhy odtoku. Z hlediska půdního pokryvu převažují povrchy s vysokou retencí.

Umístění reprezentativních povodí v rámci ČR je ilustrováno na následujícím Obrázku 11.



Obrázek 11: Reprezentativní povodí v rámci ČR.

3.3. NASTAVENÍ MODELU

Každé z reprezentativních povodí má v tomto konkrétním případě modelování úlohu obecného povodí – parametry zadané do modelu nevyjadřují hodnoty parametrů zjištěné pro dané reprezentativní povodí. Zadané hodnoty **vyjadřují statistické rozdělení parametrů na povodích IV. řádu v rámci celé ČR** – a to dle jednotlivých skupin povodí.

Pro provedení citlivostní analýzy parametrů bylo nejprve nutné stanovit metodu výpočtu odtoku z povodí. Volba metody určuje, které parametry je nutné pro výpočet zjistit. Použití jednotlivých výpočetních komponentů je zobrazeno v následující Tabulce 17.

Z tabulky je zřejmé, že vůbec nebyly využity komponenty řešící vegetační kryt (ten už je zohledněn v parametru CN), povrch, základní odtok a podpovrchový odtok. Tyto procesy lze pro účely této práce zanedbat. Použity byly komponenty ztráty, transformace a směrování. Dané metody byly vybrány s ohledem na prověřenost metody a dostupnost vstupních dat v rámci celé republiky.

Tabulka 17: Použité výpočetní komponenty.

Hydrologický prvek	Komponent	Použitá metoda
Podpovodí *(Subbasin)*	Vegetačního krytu *(Canopy)*	Žádná
	Povrchu *(Surface)*	Žádná
	Ztráty *(Loss)*	**SCS CN**
	Transformace *(Transform)*	**SCS jednotkový hydrogram**
	Základního odtoku *(Baseflow)*	Žádná
Úsek *(Reach)*	**Směrování *(Routing)***	**Muskingum-Cunge**
	Ztráty/zisku *(Loss/Gain)*	Žádná

V následujících podkapitolách je blíže popsáno matematické pozadí jednotlivých zvolených výpočetních metod. Zdrojem informací je Manuál technických referencí k programu HEC-HMS (Feldman, 2000). Uvedeny jsou rovněž základní informace týkající se použitých tvarů a úhrnů srážek (Kavka, 2016).

3.3.1. KOMPONENT ZTRÁTY – SCS CN

Pro výpočet ztrátové výšky byla zvolena metoda **SCS CN** (*Soil Conservation Service – Curve Number*). Tato metoda je v metodice Ochrana zemědělské půdy před erozí (Janeček, 2012) popsána jako „poměrně jednoduchá a dostatečně přesná.“ Jedná se o nepřímou metodu stanovení efektivní srážky založenou na charakteristikách povodí. Jedná se o funkci kumulativní srážky, půdního pokryvu, využití půdy a počáteční vlhkosti dle následující rovnice:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

P_e - Kumulativní efektivní srážka (přispívající k přímému odtoku) v čase t (mm)

P - Kumulativní srážka (celková) v čase t (mm)

I_a - Počáteční ztráta (mm)

S - Maximální potenciální retence (mm) – měřítko schopnosti povodí pojmout srážku

Dokud kumulativní srážka P nepřekročí hodnotu počáteční ztráty I_a, bude efektivní srážka P_e nulová. Odtok z povodí bude tedy rovněž nulový.

Hodnota počáteční ztráty I_a bývá na základě experimentů odhadována jako 20 % maximální potenciální retence:

$$I_a = 0{,}2 * S$$

Pro výpočet maximální potenciální retence S v jednotkách SI je použit následující vztah:

$$S = \frac{25400 - 254 * CN}{CN}$$

CN - Číslo odtokové křivky v rozmezí cca 30 pro propustné půdy s vysokou schopností infiltrace a hustou vegetací s vysokým retenčním potenciálem až 100 pro nepropustné a vodní plochy.

Hodnota CN je dle Janečka (2012) funkcí:

- **Hydrologických vlastností půdy** (A – vysoká rychlost infiltrace až D – velmi nízká rychlost infiltrace).

Na území ČR jsou pro určení hydrologické skupiny půd využívány převodní tabulky. Ty určují hydrologickou skupinu na základě příslušnosti půdy k dané hlavní půdní jednotce (HPJ). Číselné označení HPJ lze nalézt v databázi BPEJ (bonitované půdně ekologické jednotky), která slouží k hodnocení ceny zemědělské půdy.

- **Využití půdy** (půdní pokryv, způsob obdělávání)
- **Indexu předchozího nasycení** (IPS I – minimální obsah vody v půdě až IPS III – půda přesycena vodou z předchozích dešťů).

Pro lesní půdy je třeba určit CN na základě hloubky humusu, třídy ulehlosti, třídy lesních hydrologických podmínek a hydrologické skupiny půd.

Před zahájením výpočtu je třeba definovat nepropustné plochy, pro něž daná metoda neplatí. Z nich vzniká povrchový odtok přímo, bez použití metody SCS CN. Tyto plochy jsou definovány procentem na každém podpovodí.

V komponentu ztráty se tedy objevují hned 3 parametry pro citlivostní analýzu:

- **CN**
- **Ia**
- **% Impervious**

3.3.2. KOMPONENT TRANSFORMACE

Pro výpočet transformace srážky na odtok byl zvolen **jednotkový hydrogram SCS**. Jedná se o syntetický bezrozměrný jednotkový hydrogram s jedním vrcholem, který byl odvozen průměrováním měřených jednotkových hydrogramů na mnoha malých zemědělských povodích USA.

Kulminace jednotkového hydrogramu a čas této kulminace jsou popsány následujícím vztahem:

$$U_P = C * \frac{A}{T_P}$$

U_P - Kulminační průtok (m^3/s)

C - Konverzní konstanta (-)

Pro jednotky SI: C = 2,08

Pro americký systém (*Foot-Pound*): C = 484

Tato hodnota je důvodem, proč se nejčastěji používaný (standardní) typ jednotkového hydrogramu nazývá **PRF 484** (*Peak Rate Factor 484*). Tento typ je použit i pro výpočty v rámci této práce.

A - Plocha povodí (km^2)

T_P - Čas kulminace (s)

Čas kulminace je k době trvání návrhové efektivní srážky v následujícím vztahu:

$$T_P = \frac{\Delta t}{2} + t_{LAG}$$

Δt - Doba trvání efektivní srážky (s). Je rovna zvolené době výpočetního intervalu.

t_{LAG} - Doba zdržení (min). Jedná se o časovou prodlevu mezi výskytem těžiště srážky a kulminačního průtoku.

Do komponentu ztráty je nutné zadat parametr **Lag Time**, který je rovněž součástí citlivostní analýzy. Poté jsou pomocí uvedených rovnic vypočteny čas a hodnota kulminace jednotkového hydrogramu. Reálná odezva povodí na příčinnou srážku je pak získána vynásobením získaných bezrozměrných hodnot.

3.3.3. *KOMPONENT SMĚROVÁNÍ*

Pro vyjádření transformace vlny v korytě (směrování) byla použita metoda **Muskingum-Cunge.** Metoda Muskingum je snadno použitelná, zahrnuje však parametry bez fyzikálního základu a její předpoklady nejsou ve většině přírodních koryt dodrženy. Tyto problémy řeší metoda Muskingum-Cunge, která je založena na řešení rovnice kontinuity a rovnice hybnosti v difusním tvaru.

Pro výpočet touto metodou je třeba definovat následující parametry:

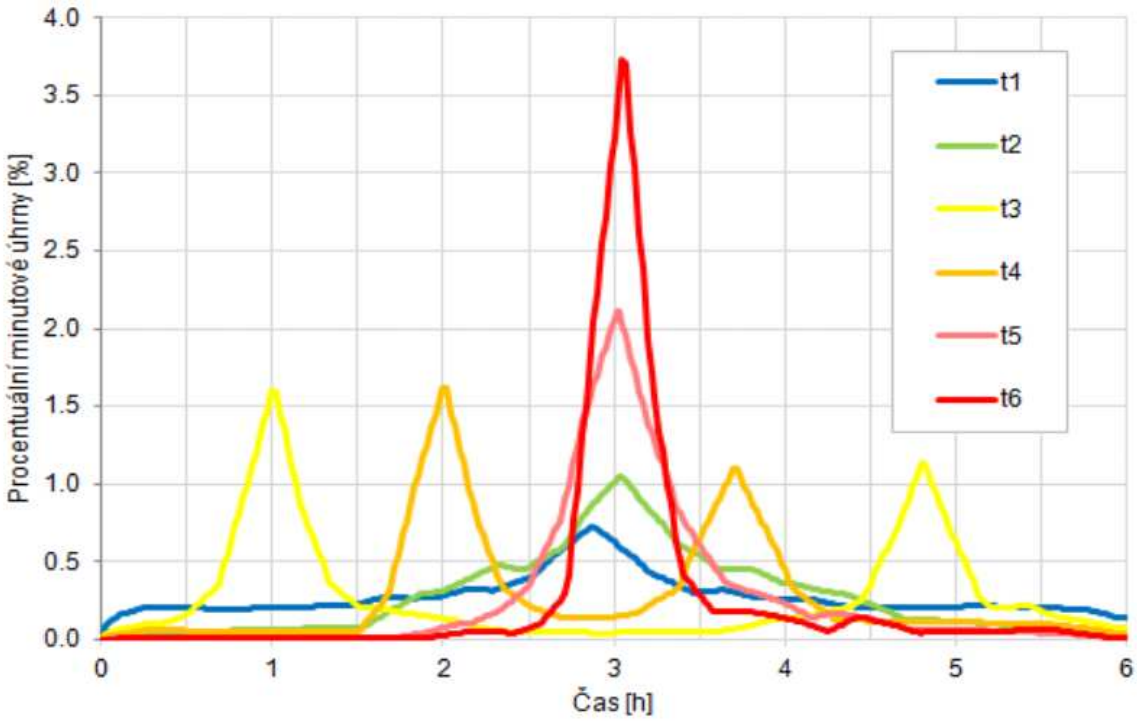
- Příčný průřez koryta – tvar (výběr z 5 možností – kruh, lichoběžník, trojúhelník, obdélník, vlastní zadaný 8 body), šířka ve dně (m), sklony svahů.
- Délka úseku (m)
- Sklon úseku (m/m)
- Manningův součinitel drsnosti (-)

Všechny potřebné hodnoty byly pro dané úseky toku zadány dle reálné situace v reprezentativním povodí.

3.3.4. *POUŽITÉ NÁVRHOVÉ SRÁŽKY*

Časové úhrny (dále tvary) použitých srážek lze zařadit do komponentů modelu. Použito bylo 6 různých typů šestihodinových srážek, které byly v rámci předchozího výzkumu (Müller, 2017) označeny za typické pro území ČR. Z následujícího Obrázku 12 je patrné, že s rostoucím číslem srážky roste i její maximální minutová intenzita.

Tvar 1 znamená prakticky rovnoměrný déšť po celých 6 hodin. Tvar 2 reprezentuje případy, při nichž více než 95% srážky spadlo v rozmezí prostředních 3 hodin srážky. U tvaru 3 je srážka rozdělena do dvou dílčích epizod s přestávkou delší než 1,5 hodiny. Do dvou dílčích epizod je rozdělen rovněž tvar 4, ve kterém mají srážkové vrcholy obdobnou intenzitu, jsou ale odděleny kratší přestávkou. Tvary 5 a 6 lze klasifikovat jako přívalové srážky, při nichž spadlo více než 95% srážky za méně než 60 (tvar 5), respektive 30 (tvar 6) minut.



Obrázek 12: Typické tvary 6 hodinových srážek pro území ČR.

Jednotlivé tvary srážek byly konstruovány tak, aby jejich maximální intenzita nastala v polovině 6 hodinového intervalu. To neplatí pro dvouvrcholové srážky t3 a t4, které dosahují maxima intenzity po 60, respektive 120 minutách. Časy kulminací výstupních hydrogramů jsou ovlivněny časy maximálních intenzit jednotlivých srážkových tvarů. Proto je třeba posuzovat dobu zpoždění kulminace odtoku od maxima intenzity srážky, nikoli absolutní čas kulminace odtoku od počátku srážky.

Všechny tvary srážek mají pro danou N-letost stejný celkový úhrn, který je uveden v následující Tabulce 18. Z ní je zřejmé, že se úhrn srážky mírně liší v závislosti na skupině povodí, pro niž byl odvozen.

Tabulka 18: Úhrny uvažovaných návrhových srážek pro jednotlivé skupiny povodí.

Skupina povodí	Býkovický p.	Struhařovský p.	Chouzavá	Škvorecký p.	Halounský p.
Plocha (km^2)	7.8	5.8	4.9	9.4	6.1
N (let)	6h	6h	6h	6h	6h
2	29.0	30.0	28.7	29.6	30.0
5	42.8	43.9	41.9	43.5	43.8
20	62.5	64.0	60.8	63.7	63.3
50	76.1	77.8	73.7	77.5	76.9
100	86.4	88.3	83.4	88.2	86.9

3.4. STATISTICKÉ ROZDĚLENÍ PARAMETRŮ

Statistické rozdělení parametrů modelu bylo určeno zvlášť pro jednotlivé skupiny povodí. Nejprve byla pro určení parametrů CN, Ia a Lag Time využita již vytvořená vrstva povodí IV. řádu, v jejíž atributové tabulce byla většina potřebných údajů vypočtena (blíže v jednotlivých podkapitolách). Tyto údaje byly exportovány do prostředí Microsoft Office Excel a **RStudio**, kde proběhly potřebné statistické analýzy a z 8 dostupných statistických rozdělení pravděpodobnosti v programu HEC-HMS (viz Tabulka 12) bylo vybráno to, které nejlépe popisuje rozdělení parametru v povodích dané skupiny. Pro určení statistického rozdělení procenta nepropustných ploch bylo navíc nutné použít databázi ZABAGED.

Testování příslušnosti k danému typu statistického rozdělení bylo provedeno na základě **Kolgomorov-Smirnovova jednovýběrového testu**. Použita byla hladina významnosti **α = 5% (p = 0,05)**, pro niž bylo porovnáno kritérium testu D s kritickou hodnotou D_{CRIT}.

$$D = \frac{1}{n} * max_i|N_{1i} - N_{2i}|$$

n - celkový počet prvků (počet povodí IV. řádu v dané skupině)

N_{1i} - $N_{1i} = \sum_{j=1}^{i} n_{1j}$

n_{1j} - četnosti testovaného souboru v každé z *k* tříd

N_{2i} - $N_{2i} = \sum_{j=1}^{i} n_{2j}$

n_{2j} - četnosti teoretického rozdělení v každé z *k* tříd

$$D_{CRIT}(pro\ \alpha = 5\%\ a\ n > 40) = \frac{1{,}36}{\sqrt{n}}$$

$$D_{CRIT} > D \rightarrow Hypotéza\ přijata, data\ patří\ s\ prav.\ 95\%\ k\ testovanému\ rozdělení$$

$$D_{CRIT} < D \rightarrow Hypotéza\ zamítnuta, vizuálně\ vybráno\ nejbližší\ rozdělení$$

V následujících podkapitolách jsou popsána statistická rozdělení jednotlivých parametrů v modelu HEC-HMS. Ta se snaží co nejlépe vystihnout statistické rozdělení parametrů na reálných povodích IV. řádu **v rámci celé ČR**.

V následující Tabulce 19 jsou uvedeny 4 parametry, jejichž citlivost byla v rámci práce testována. Uvedena je rovněž metoda použitá k vytvoření vzorků daného parametru.

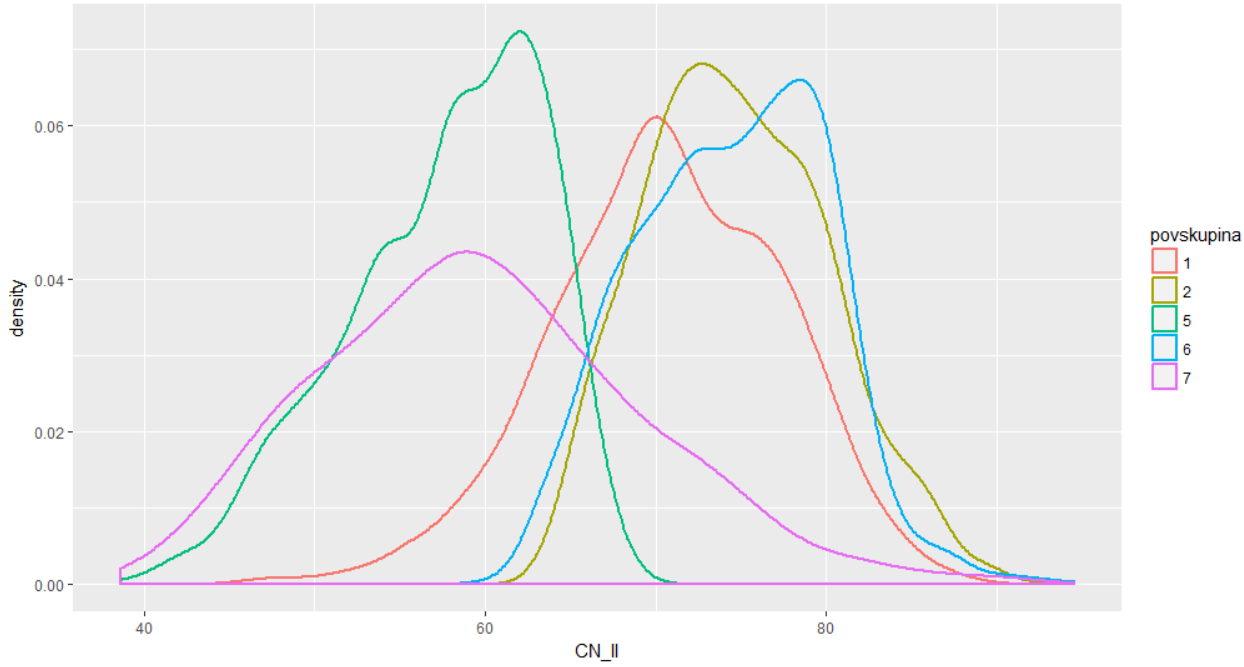
Pro parametry CN a Imp bylo použito jedno z 8 dostupných statistických rozdělní. Hodnoty parametrů Ia a LT byly lineárně navázány na hodnoty jiných parametrů.

Tabulka 19: Použité parametry a způsob jejich vzorkování.

Název ČJ	Název AJ	Zkratka	Metoda vzorkování
Číslo odtokové křivky	Curve Number	CN	Jednoduché rozdělení
Počáteční ztráta	Initial Abstraction	Ia	Lineární regrese
Procento nepropustných ploch	Imprevious	Imp	Jednoduché rozdělení
Doba zdržení	Lag Time	LT	Jednoduché rozdělení + lineární regrese

3.4.1. *ČÍSLO ODTOKOVÉ KŘIVKY (CN)*

Číslo odtokové křivky pro střední stupeň nasycení (CN II) bylo pro všechna povodí IV. řádu vypočteno v rámci předchozích výzkumných úkolů. Pro každé povodí IV. řádu byla vypočtena jediná **průměrná hodnota** CN II, která byla získána jako vážený průměr z dílčích hodnot CN na povodí. Hodnoty byly pro účely této práce převzaty a jejich statistické rozdělení je zobrazeno na následujícím Obrázku 13 (jednotlivé skupiny povodí označeny původním značením pro 7 skupin – viz Tabulka 13). Z obrázku je zřejmá odlišnost skupin povodí č. 3 a č. 5, jejichž hodnoty CN se pohybují níže, než hodnoty ostatních tří skupin. V těchto skupinách tedy lze očekávat nižší odtokovou odezvu na příčinnou srážku. Skupina povodí č. 5 navíc nabízí výrazně vyšší rozptyl hodnot CN než ostatní skupiny povodí.



Obrázek 13: Hodnoty CN II v jednotlivých skupinách povodí.

Pro pokrytí kompletní škály scénářů, které mohou v povodí nastat, bylo nutné vypočíst hodnoty CN pro nízký stupeň nasycení (CN I) a pro vysoký stupeň nasycení (CN III). Tyto hodnoty byly vypočteny na základě empirických vzorců (Chow, 1988).

$$CN\ I = \frac{4{,}2 * CN\ II}{10 - 0{,}058 * CN\ II}$$

$$CN\ III = \frac{23 * CN\ II}{10 + 0{,}13 * CN\ I}$$

Pro každé z povodí IV. řádu tedy byla vypočtena hodnota CN pro každý ze tří možných stupňů nasycení. Tyto hodnoty byly statisticky vyhodnoceny. V následujících tabulkách (Tabulka 20, Tabulka 21 a Tabulka 22) jsou popsány druhy rozdělení, které nejblíže odpovídají rozdělení parametrů CN I, CN II a CN III v rámci jednotlivých skupin povodí IV. řádu ČR. Uvedeny jsou rovněž parametry tohoto rozdělení pro jednotlivé skupiny povodí.

Obecně lze prohlásit, že skupiny povodí č. 1, 2 a 5 vykazují dobrou shodu s vybranými pravděpodobnostními rozděleními. Naopak rozložení hodnot CN ve skupinách povodí č. 3 a 4 nelze pomocí statistických rozdělení programu HEC-HMS zcela věrně namodelovat.

Tabulka 20: Statistické rozdělení parametru CN I.

Třída	Název toku	Statistické rozdělení pravděpodobností	Vyhovuje? (α = 5%)	MIN	MAX	Mu/ Shape	Sigma/ Scale
1	Býkovický p.	Gamma	ANO	26.6	75.6	38.496	1.319
2	Struhařov. p.	Lognormální	ANO	41.7	82.0	4.013	0.127
3	Chouzavá	Weibull	NE	21.2	48.6	8.193	38.969
4	Škvorecký p.	Normální	NE	38.7	80.9	55.435	7.290
5	Halounský p.	Lognormální	ANO	20.9	66.4	3.639	0.240

Tabulka 21: Statistické rozdělení parametru CN II.

Třída	Název toku	Statistické rozdělení pravděpodobností	Vyhovuje? (α = 5%)	MIN	MAX	Shift	Mu/ Shape	Sigma/ Scale
1	Býkovický p.	Normální	ANO	46.3	88.8	0	70.657	6.722
2	Struhařov. p.	Lognormální	ANO	62.9	93.3	0	4.311	0.072
3	Chouzavá	Weibull	NE	39.0	69.2	0	12.404	60.214
4	Škvorecký p.	Normální	NE	60.1	93.6	0	74.440	5.540
5	Halounský p.	Gamma	ANO	38.6	85.0	0	40.941	1.458

Tabulka 22: Statistické rozdělení parametru CN III.

Třída	Název toku	Statistické rozdělení pravděpodobností	Vyhovuje? (α = 5%)	MIN	MAX	Shift	Mu/ Shape	Sigma/ Scale
1	Býkovický p.	Normální	ANO	66.5	94.8	0	84.510	4.288
2	Struhařov. p.	Gamma	ANO	79.6	96.9	0	754.780	0.115
3	Chouzavá	Weibull	NE	59.5	83.8	0	21.770	77.617
4	Škvorecký p.	Weibull	NE	77.6	97.5	0	28.525	88.456
5	Halounský p.	Normální	ANO	59.1	94.8	0	76.861	6.738

3.4.2. POČÁTEČNÍ ZTRÁTA (IA)

V rámci této práce byl zkoumán rovněž vliv velikosti počáteční ztráty na odtoky z povodí. Hodnoceny byly 3 varianty vztahu I_a k maximální potenciální retenci S:

- I_a = 25 % S
- I_a = 20 % S
- I_a = 10 % S

Jelikož je počáteční ztráta přímo závislá na hodnotě CN v daném povodí, je také třeba ji s touto hodnotou pevně svázat v rámci citlivostní analýzy. To bylo provedeno zavedením **lineárního vztahu CN a I_a** na daném povodí. Tento vztah je odlišný pro různé stupně nasycení povodí a je charakterizován dvěma parametry:

- Intercept - absolutní člen lineární rovnice (určuje posunutí přímky)
- Slope - lineární člen (určuje sklon přímky)

Vztahy parametrů CN a I_a pro jednotlivé skupiny povodí a stupně nasycení jsou uvedeny v následující Tabulce 23. Počáteční ztráta je k hodnotě CN stále ve stejném funkčním vztahu, ať ji nastavíme na jakoukoli hodnotu (10 %, 20 %, 25 %). Hodnoty parametrů pro stejný stupeň nasycení se proto mění proporcionálně (pro I_a = 20 % jsou dvojnásobné než pro I_a = 10 %).

Tabulka 23: Lineární vztah parametrů Ia a CN.

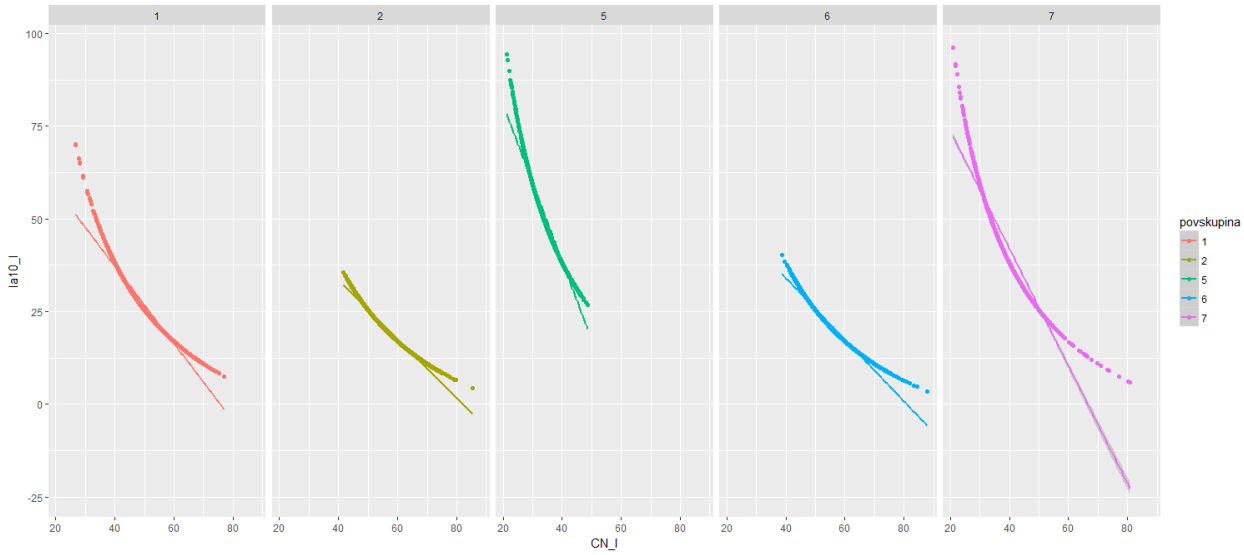
Třída	Název toku	Ia	CN I		CN II		CN III	
			Slope	Intercept	Slope	Intercept	Slope	Intercept
1	Býkovický p.	10%	-1.044	78.98	-0.537	48.877	-0.369	35.939
		20%	-2.088	157.97	-1.075	97.753	-0.738	71.878
		25%	-2.610	197.47	-1.344	122.190	-0.923	89.847
2	Struhařov. p.	10%	-0.794	65.16	-0.452	42.514	-0.335	32.951
		20%	-1.588	130.33	-0.903	85.028	-0.669	65.902
		25%	-1.985	162.91	-1.129	106.28	-0.837	82.377
3	Chouzavá	10%	-2.118	123.21	-0.833	67.165	-0.470	43.836
		20%	-4.236	246.41	-1.666	134.33	-0.939	87.673
		25%	-5.295	308.01	-2.082	167.91	-0.174	109.59
4	Škvorecký p.	10%	-0.832	67.34	-0.464	43.488	-0.340	33.387
		20%	-1.664	134.68	-0.929	86.976	-0.679	66.775
		25%	-2.080	168.35	-1.161	108.72	-0.849	83.468
5	Halounský p.	10%	-1.585	105.36	-0.718	61.06	-0.438	41.594
		20%	-3.169	210.72	-1.436	122.12	-0.876	83.188
		25%	-3.962	263.40	-1.795	152.65	-1.096	103.98

Z uvedené Tabulky 23 je zřejmé, že s rostoucí hodnotou CN počáteční ztráta I_a klesá (záporný člen slope). S rostoucím CN se totiž zhoršují infiltrační podmínky a půda je schopna zadržet menší množství vody. Uvedené lineární vztahy byly vytvořeny v programu RStudio metodou **součtu nejmenších čtverců**. Reálně vypočtené hodnoty CN a I_a byly proloženy takovou přímkou y = ax + b, aby platily následující vztahy:

$$a\sum x_i^2 + b\sum x_i = \sum x_i y_i$$

$$a\sum x_i + bn = \sum y_i$$

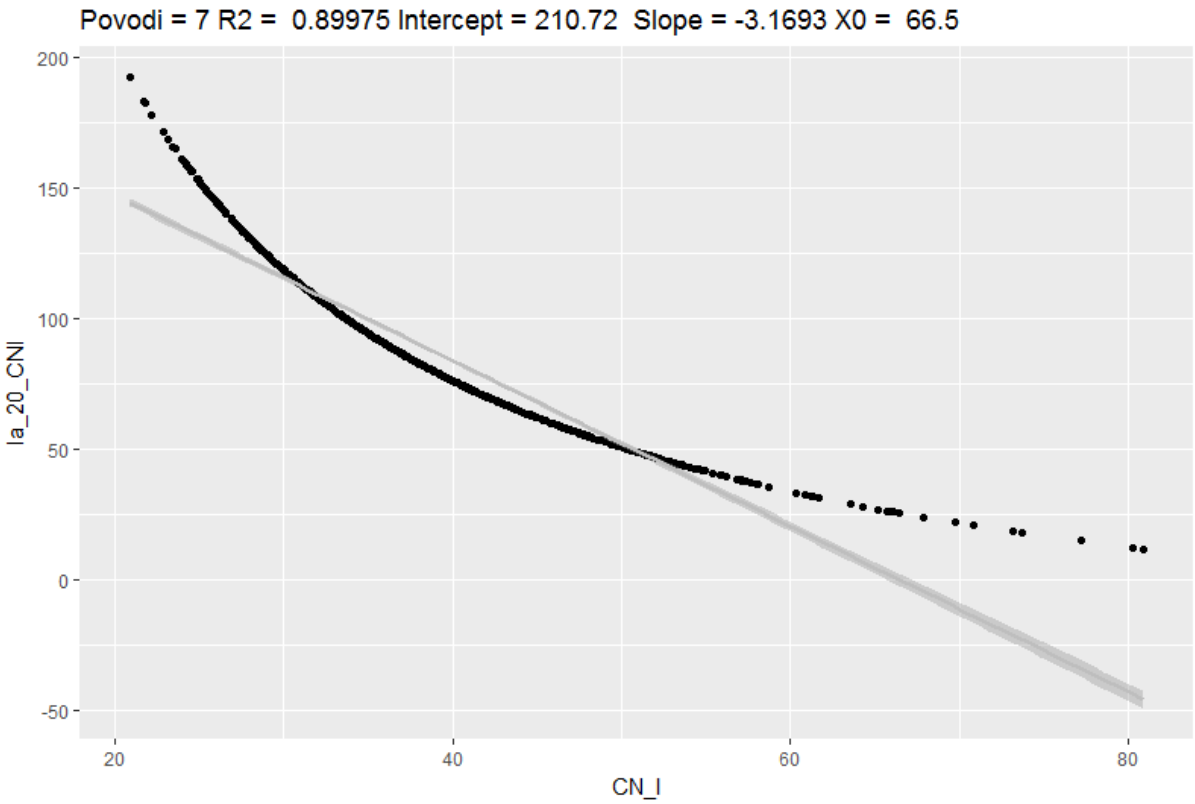
Reálný vztah mezi CN a I_a není (na rozdíl od vztahu Ia a S) lineární, prostředí HEC-HMS však neumožňuje explicitně zadat libovolnou rovnici. Aproximace přímkou proto představuje jisté zjednodušení. Zejména v krajních částech intervalů může docházet ke značným odchylkám – ty jsou ilustrovány na následujícím Obrázku 14, který zobrazuje reálné vztahy CN I a I_a (10 %) pro jednotlivé skupiny povodí i jejich lineární aproximace. Nejzřetelnější odchylku lze vysledovat u extrémně vysokých hodnot CN na skupině povodí č. 5.



Obrázek 14: Reálný a aproximovaný vztah CN I a Ia (10%) pro všechny skupiny povodí.

Následující Obrázek 15 ilustruje reálný vztah Ia (20%) a CN II pro skupinu povodí č. 5. Reálný nelineární vztah je pro potřeby výpočtu nahrazen vztahem lineárním:

$$I_a = -3{,}1693 * CN\ II + 210{,}72$$



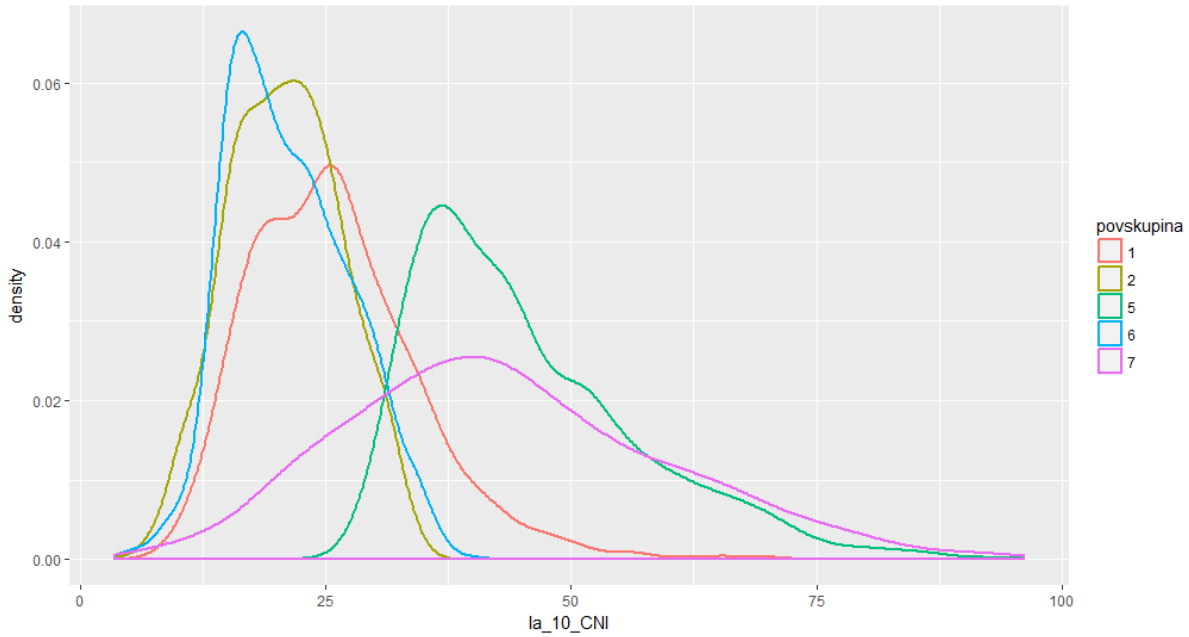
Obrázek 15: Lineární aproximace vztahu Ia (20%) a CN II pro skupinu povodí č. 5.

Z Obrázku 15 je zřejmé, že problém nastává u extrémně vysokých hodnot CN, při kterých se dostává I_a do záporných hodnot. Takový případ není reálně možný, a proto musí být maximální hodnota CN v dané simulaci omezena na X0 = 66,5 (nejvyšší CN, při kterém je hodnota I_a ještě kladná). Tímto postupem byly ze simulací vyjmuty některé extrémní scénáře, které na reálných povodích ve skutečnosti nastaly. Dle následující Tabulky 24 je však zřejmé, že se jedná pouze o 0,11 % všech případů, což je množství přijatelné pro účely tohoto výzkumu. V největší míře tato situace nastala u skupiny povodí č. 5 – celkem v 17 případech.

Tabulka 24: Oříznuté hodnoty CN v jednotlivých skupinách povodí.

Třída	CN	CN MAX	X0	Rozdíl	Počet povodí	Počet odříznutých	% Odříznutých
1	I	77.05	75.6	1.45	1686	1	0.06
	II	88.88	88.88	0	1686	0	0.00
	III	94.84	94.84	0	1686	0	0.00
2	I	85.41	82	3.41	1400	1	0.07
	II	93.3	93.3	0	1400	0	0.00
	III	96.97	96.97	0	1400	0	0.00
3	I	48.58	48.58	0	1690	0	0.00
	II	69.23	69.23	0	1690	0	0.00
	III	83.8	83.8	0	1690	0	0.00
4	I	87.86	80.9	6.96	1632	4	0.25
	II	94.51	93.6	0.91	1632	1	0.06
	III	97.54	97.54	0	1632	0	0.00
5	I	80.86	66.4	14.46	661	9	1.36
	II	90.96	85	5.96	661	6	0.91
	III	95.86	94.9	0.96	661	2	0.30
Celkem					**21207**	**24**	**0.11**

Rozložení hustot výskytu parametru I_a (10 %) je ilustrováno na následujícím Obrázku 16. Není překvapením, že tvary odpovídají osově obráceným tvarům rozdělení parametru CN. Opět si lze povšimnout skupin povodí č. 3 a č. 5. Ty se od ostatních skupin liší vyššími hodnotami počáteční ztráty. To koresponduje s hodnotami CN uvedenými na Obrázku 16.



Obrázek 16: Hodnoty Ia (10%) pro jednotlivé skupiny povodí.

3.4.3. *PROCENTO NEPROPUSTNÝCH PLOCH (% IMPERVIOUS)*

Pro určení procenta nepropustných ploch na jednotlivých povodích byla využita vektorová databáze ZABAGED (Základní báze geografických dat). Z této databáze byly vybrány ty vrstvy, které reprezentují nepropustné plochy. Jedná se o:

- usazovací nádrže
- odkaliště
- silnice
- dálnice
- vodní plochy
- železniční stanice
- skalní útvary
- sila
- rozvodny
- transformátory
- místa povrchové těžby
- lomy
- parkoviště
- letiště
- kůlny
- skleníky
- fóliovníky
- elektrárny
- bloky budov.

Do kategorie nepropustných ploch se v případě výpočtu modelem HEC-HMS řadí i vodní plochy. Veškerý déšť, který dopadne na vodní plochu, se totiž účastní přímého odtoku. Na vodní plochy proto nelze aplikovat výpočetní odtokovou rutinu programu.

Nejprve bylo nutné z liniové vrstvy SilniceDalnice vytvořit vrstvu polygonů tak, aby na ní bylo možné provést výpočet plochy. Pomocí nástroje *SELECT BY ATTRIBUTES* byla tato vrstva rozdělena na 4 nové vrstvy dle kategorie pozemní komunikace. Z těchto vrstev pak byla pomocí nástroje *BUFFER* vytvořena nová polygonová vrstva o dané šířce. Nástroj *BUFFER* byl použit oboustranně (k vybrané linii přidá vybranou hodnotu na obě strany). Liniová vrstva dálnic a rychlostních silnic je vedena pro každý směr zvlášť, zatímco normová šířka komunikace (27,5 m) je uvedena pro celou komunikaci (ČSN 73 6101). Z toho důvodu nebyl použit *BUFFER* poloviční hodnotou (13,75 m) jako u ostatních vrstev, nýbrž hodnotou 10 m. Všechny hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 25.

Tabulka 25: Hodnoty bufferu liniové vrstvy SilniceDalnice

Typ komunikace	Uvažovaná šířka (m)	Oboustranný buffer (m)
Dálnice, rychlostní silnice	27,5	10
Silnice 1. třídy	11,5	5,75
Silnice 2. třídy	9,5	4,75
Silnice 3. třídy	6,5	3,25

Po provedení tohoto kroku bylo možné pro větší přehlednost sloučit všechny nepropustné plochy ve formě polygonů do jediné vrstvy pomocí nástroje *UNION*. V následném kroku byly všechny dílčí polygony spojeny do jediného pomocí nástroje *DISSOLVE*. Tato operace se nepovedla úplně dokonale a v rámci ČR tak zůstalo celkem 13 polygonů nepropustných ploch o celkové rozloze 2706,6 km^2. Příčinou mohl být vysoký počet polygonů nepropustných ploch, kterých bylo v rámci ČR celkem 3,43 milionu.

Nástrojem *POLYGON TO RASTER* byla poté polygonová vrstva nepropustných ploch převedena na vrstvu rastrovou s velikostí pixelu 5x5 metrů. Každé buňce proto byla přiřazena hodnota 25, která je rovna její ploše v m^2.

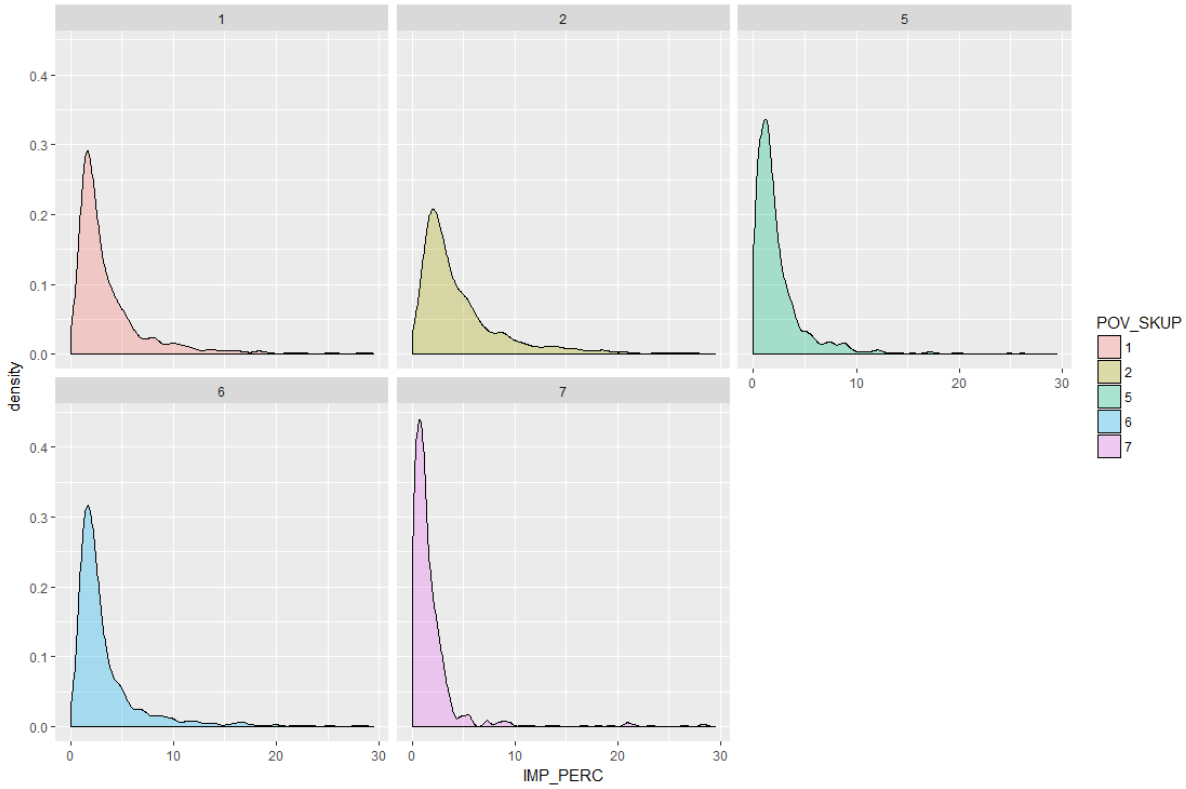
Analýza zastoupení nepropustných ploch v daném povodí byla provedena pomocí nástroje *ZONAL STATISTICS AS TABLE*. Jako identifikátor povodí bylo zvoleno jeho číslo (CHP), hodnoty byly převzaty z rastru impervious_raster_final. K výsledné tabulce byl pomocí nástroje *JOIN* připojen sloupec SS_field z atributové tabulky vektorů povodí IV. řádu. Tento sloupec určuje příslušnost daného povodí ke skupině (1 – 7). Tabulka byla dále pomocí nástroje *TABLE TO EXCEL* převedena do prostředí Microsoft Office Excel, kde byly provedeny statistické analýzy procentuálního zastoupení nepropustných ploch pro jednotlivé skupiny povodí.

V následující Tabulce 26 je popsán druh rozdělení, který nejblíže odpovídá rozdělení parametru Impervious v rámci jednotlivých skupin povodí IV. řádu. Uvedeny jsou rovněž parametry tohoto rozdělení pro jednotlivé skupiny povodí.

Tabulka 26: Statistické rozdělení parametru % Impervious

Třída	Název toku	Statistické rozdělení pravděpodobností	Vyhovuje? (α = 5%)	MIN	MAX	Shift	Mu	Sigma
1	Býkovický p.	Lognormální	NE	0.005	53.539	0	0.966	0.872
2	Struhařov. p.	Lognormální	NE	0.030	72.830	0	1.227	0.872
3	Chouzavá	Lognormální	NE	0.001	47.760	0	0.354	1.185
4	Škvorecký p.	Lognormální	NE	0.000	82.280	0	0.921	0.928
5	Halounský p.	Lognormální	NE	0.000	76.750	0	0.077	1.278

Rozdělení procenta nepropustných ploch je ve všech povodích nejlépe aproximováno lognormálním rozdělením s uvedenými parametry. Reálné rozdělení pro všechny skupiny povodí je uvedeno na následujícím Obrázku 17. Z něj je zřejmé, že u všech skupin povodí výrazně převažuje zastoupení nepropustných ploch do 5% celkové plochy. Nejvýraznější je tento jev u povodí č. 3 a č. 5. V Obrázku značení odpovídá původnímu značení pro 7 skupin.



Obrázek 17: Procento nepropustných ploch v jednotlivých skupinách povodí.

3.4.4. DOBA ZDRŽENÍ (LAG TIME)

Jedná se o parametr, jehož hodnota je závislá na parametrech povodí (průměrný sklon, nejdelší vzdálenost dotoku) a také na maximální potenciální retenci S (a tedy i na CN) dle následujícího vztahu (SCS, 1972):

$$T_{LAG} = \frac{{L_{MAX}}^{0,8} * (S+1)^{0,7}}{1900 * (\%\ slope)^{0,5}}$$

T_{LAG}	-	Doba zdržení (hod)
L_{MAX}	-	Délka nejdelší odtokové dráhy povodí (stopy)
% slope	-	Průměrný sklon povodí (%)
S	-	Maximální potenciální retence (palce – odlišný vzorec!)

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Hodnoty T_{LAG} byly již v rámci předchozího výzkumu vypočteny pro každé podpovodí reprezentativního povodí pro CN II. Pro simulaci kompletní škály možností však bylo nutné vypočíst T_{LAG} i pro ostatní stupně nasycení, a to bez znalosti parametrů % slope a L_{MAX}, které nebyly pro daná povodí známy. Toho bylo dosaženo úpravami původního vzorce a zavedením nové proměnné X:

$$X = \frac{{L_{MAX}}^{0,8}}{1900 * (\%\ slope)^{0,5}} = \frac{T_{LAG}}{(S+1)^{0,7}}$$

Dosazením za S dostaneme vztah:

$$X = \frac{T_{LAG}}{\left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0,5}}$$

Ze známého T_{LAG} pro CN II lze tedy vypočíst hodnotu X, kterou lze následně použít v daném podpovodí pro výpočet T_{LAG} pro CN I a CN III. V následující Tabulce 26 jsou uvedeny vypočtené hodnoty T_{LAG} **v minutách** pro jednotlivá reprezentativní povodí a pro všechny stupně nasycení povodí. Z tabulky je patrné, že se zvyšující se nasyceností povodí klesá doba zdržení.

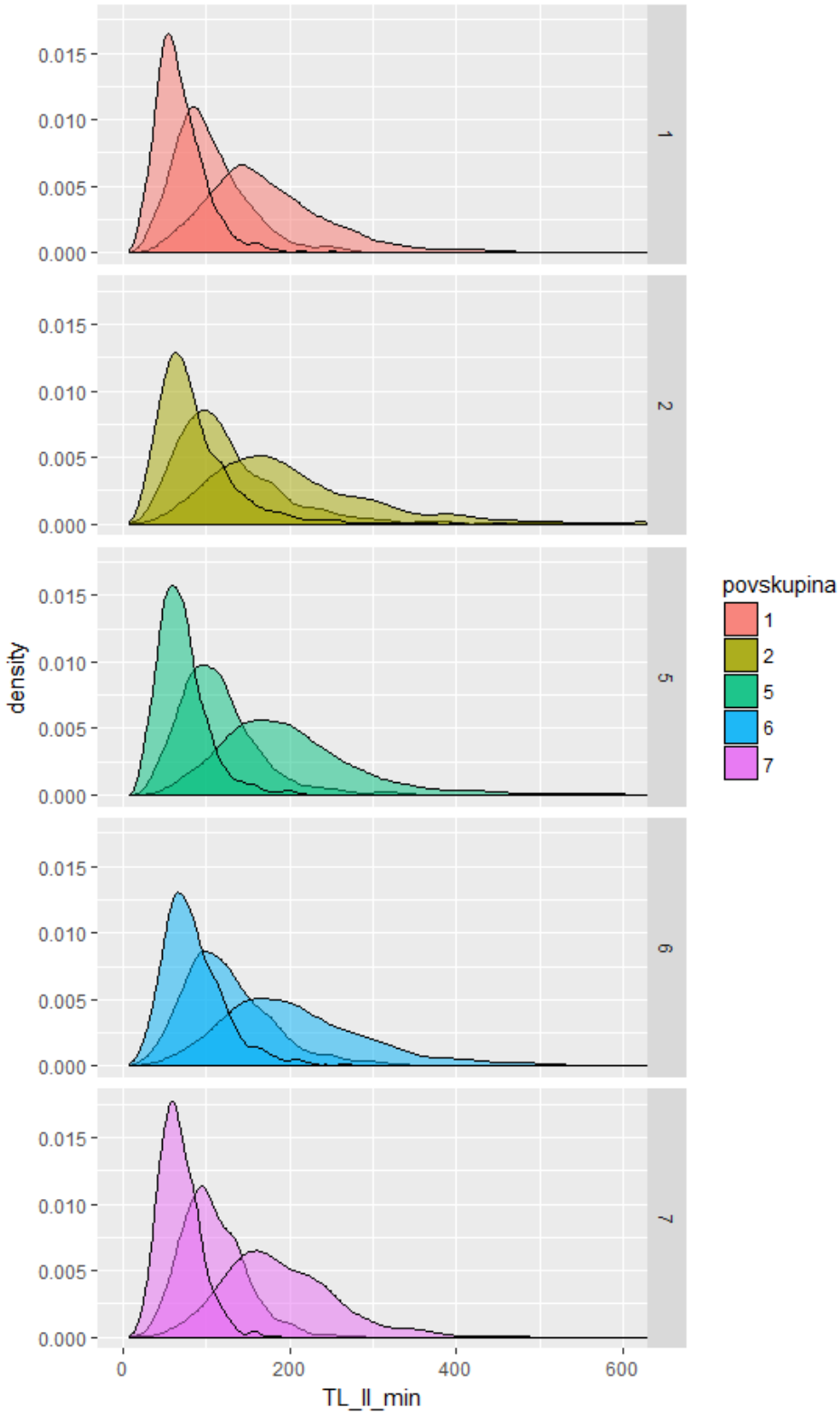
Zatímco ostatní parametry jsou „prostorově nezávislé“ (hodnoty CN, I_a i Imp odvozené pro celé povodí lze vztáhnout zpětně na jednotlivá podpovodí), hodnota T_{LAG} bude jistě rozdílná, pokud budeme brát v úvahu celé povodí, nebo pouze jeho podpovodí.

V Tabulce 27 jsou rovněž označena podpovodí, jejichž dílčí doby zdržení jsou nejblíže k dobám zdržení pro celá povodí. Pro tato podpovodí je v programu HEC-HMS použito jednoduché rozdělení pravděpodobností. Jedná se tedy o řídící podpovodí při generování scénářů. Tyto scénáře již opět pracují se statistickým rozdělením **dle republikových hodnot**. Ostatní podpovodí jsou na řídící podpovodí navázána **lineárním vztahem** - jako procento hodnoty řídícího podpovodí (např. poměr hodnot podpovodí 100 a podpovodí 130 je roven 39.850/45.260 = 0.88 – viz sloupec 4). Tímto způsobem je zachována struktura reprezentativního povodí a zároveň je i popsána návaznost na republikové rozdělení parametru.

Tabulka 27: Výpočet doby zdržení pro všechny stupně nasycení.

Povodí	Podpovodí	T_{LAG} dílčí	Podíl k řídícímu	T_{LAG} celé povodí	CN II	X	CN I	T_{LAG} (CNI)	CN III	T_{LAG} (CNIII)
1	100	39.850	0.88	67.183	73.9	0.22	54.32	45.708	86.69	37.344
	110	25.539	0.56		80.4	0.33	63.27	28.284	90.42	24.379
	120	38.778	0.86		76.5	0.22	57.76	43.856	88.22	36.617
	130	45.260	1.00		75.8	0.19	56.81	51.381	87.81	42.651
	140	35.890	0.79		77.8	0.24	59.55	40.306	88.96	34.015
	150	24.017	0.53		76.5	0.36	57.76	27.162	88.22	22.678
2	200	36.174	0.89	69.237	69.0	0.25	48.32	42.623	83.66	33.390
	210	22.644	0.59		78.1	0.38	59.96	25.389	89.13	21.479
	220	28.553	0.70		69.4	0.32	48.78	33.569	83.91	26.390
	230	40.573	1.00		69.7	0.22	49.14	47.622	84.10	37.535
	240	37.381	0.92		78.1	0.23	59.96	41.913	89.13	35.458
	250	41.256	1.02		75.8	0.21	56.81	46.835	87.81	38.878
3	300	47.473	0.48	104.505	46.2	0.23	26.51	63.780	66.39	40.081
	310	98.856	1.00		49.8	0.11	29.41	129.99	69.53	84.861
	315	41.727	0.42		67.5	0.22	46.59	49.576	82.69	38.329
	320	59.434	0.60		56.6	0.17	35.39	75.108	75.00	52.495
	330	92.490	0.94		58.3	0.11	37.00	115.74	76.28	82.233
4	400	37.098	0.64	121.513	79.9	0.23	62.54	41.196	90.14	35.364
	405	57.977	1.00		80.1	0.15	62.83	64.312	90.25	55.298
	410	26.652	0.46		75.7	0.33	56.68	30.273	87.75	25.109
	420	57.394	0.99		70.7	0.16	50.33	66.995	84.73	53.263
	430	32.740	0.56		76.8	0.27	58.17	36.967	88.39	30.942
	440	35.948	0.62		75.4	0.24	56.28	40.898	87.58	33.837
	450	49.886	0.86		78.8	0.17	60.95	55.724	89.53	47.411
5	les horni	51.591	0.93	103.338	51.2	0.20	30.59	67.282	70.70	44.561
	les pod rokli	45.582	0.82		47.9	0.24	27.86	60.620	67.89	38.793
	stred	55.531	1.00		72.4	0.16	52.42	64.218	85.78	51.805
	od louky	40.162	0.72		67.3	0.23	46.36	47.770	82.56	36.867
	zaverove	18.000	0.32		81.1	0.47	64.31	19.861	90.80	17.215

Republikové rozdělení parametru T_{LAG} na celých povodích je znázorněno na následujícím Obrázku 18. Toto rozdělení je popsáno v softwaru RStudio do modelu HEC-HMS zavedeno prostřednictvím řidícího podpovodí.



Obrázek 18: Republikové rozdělení parametru doby zdržení v jednotlivých skupinách povodí pro 3 stupně nasycení.

Statistická rozdělení pravděpodobností použitá pro jednotlivá řídící podpovodí jsou uvedena v následující Tabulce 28. Maximální hodnota byla zvolena vždy tak, aby nemohlo dojít k vygenerování nereálně vysokých hodnot.

Tabulka 28: Statistické rozdělení pravděpodobností doby doběhu v řídících podpovodí.

Třída	Název toku	Řídící podpovodí	Stupeň nasycení	Statistické rozdělení pravděpodobností	MAX (minuty)	Mu/ Shape	Sigma/ Scale
1	Býkovický p.	130	I	Lognormální	300	4.690	0.439
			II	Lognormální	200	4.171	0.437
			III	Lognormální	100	3.751	0.437
2	Struhařov. p.	230	I	Lognormální	300	4.708	0.496
			II	Lognormální	200	4.204	0.496
			III	Lognormální	150	3.806	0.497
3	Chouzavá	310	I	Lognormální	500	5.171	0.419
			II	Lognormální	300	4.616	0.419
			III	Lognormální	150	4.136	0.420
4	Škvorecký p.	405	I	Lognormální	250	4.535	0.452
			II	Lognormální	150	4.031	0.449
			III	Lognormální	100	3.632	0.446
5	Halounský p.	stred	I	Gamma	250	8.079	12.658
			II	Gamma	120	8.104	7.246
			III	Gamma	80	7.963	4.630

4. VÝSLEDKY

Dle výše popsaných statistických rozdělení pravděpodobností výskytů jednotlivých parametrů výpočtu byla v programu HEC-HMS provedena simulace celkem 675 000 možných scénářů. Tyto scénáře se liší svými parametry dle skupiny povodí, stupně nasycení, uvažované počáteční ztráty a tvaru a intenzity příčinné srážky. To je uvedeno v následující Tabulce 29.

Tabulka 29: Počet simulačních nastavení v modelu HEC-HMS.

Prvek	Počet možností	Možnost
Skupina povodí	5	Býkovický potok
		Struhařovský potok
		Chouzavá
		Škvorecký potok
		Halounský potok
Stupeň nasycení povodí	3	CN I
		CN II
		CN III
Tvar srážky	6	T1
		T2
		T3
		T4
		T5
		T6
Intenzita srážky	5	N2
		N5
		N20
		N50
		N100
Počáteční ztráta	3	Ia 10%
		Ia 20%
		Ia 25%
Vzorky	500	
Celkem	675 000	

V rámci každého z těchto scénářů byly generovány hodnoty 4 parametrů (CN, I_a, % Imp, TL) příslušné dané skupině povodí a byl vypočten hydrogram odtoku z povodí.

Vypočtené odtokové hydrogramy byly následně zpracovány ve statistickém programu RStudio. Hodnoceny byly 4 druhy odtokových charakteristik (Tabulka 30), díky kterým lze odezvy jednotlivých scénářů dobře porovnávat.

Tabulka 30: Řešené odtokové charakteristiky.

Název	Zkratka	Jednotky	Popis
Maximální specifický odtok z povodí	qmax_l.s.km2	$l/s/km^2$	Maximální průtok v závěrovém profilu přepočtený na plochu povodí.
Odtoková výška	Hq_mm	mm	Objem odteklé vody přepočtený na plochu povodí.
Odtokový koeficient	qcoef	-	Poměr odtokové a srážkové výšky.
Posun doby kulminace srážky a odtoku	dT_min	min	Zpoždění kulminace odtoku oproti kulminaci srážky

Vyhodnocení a porovnání uvedených odtokových charakteristik je provedeno na základě kritérií uvedených v Tabulce 31. Tato kritéria mohou být dle své povahy rozdělena do 4 skupin. Rozptyl výsledků jednotlivých simulací pro stejnou skupinu povodí a stejnou srážku je způsoben citlivostí modelu na vstupní parametry povodí (Lag Time, CN, % Imp), které jsou v rámci citlivostní analýzy generovány dle zadaného statistického rozdělení pravděpodobností.

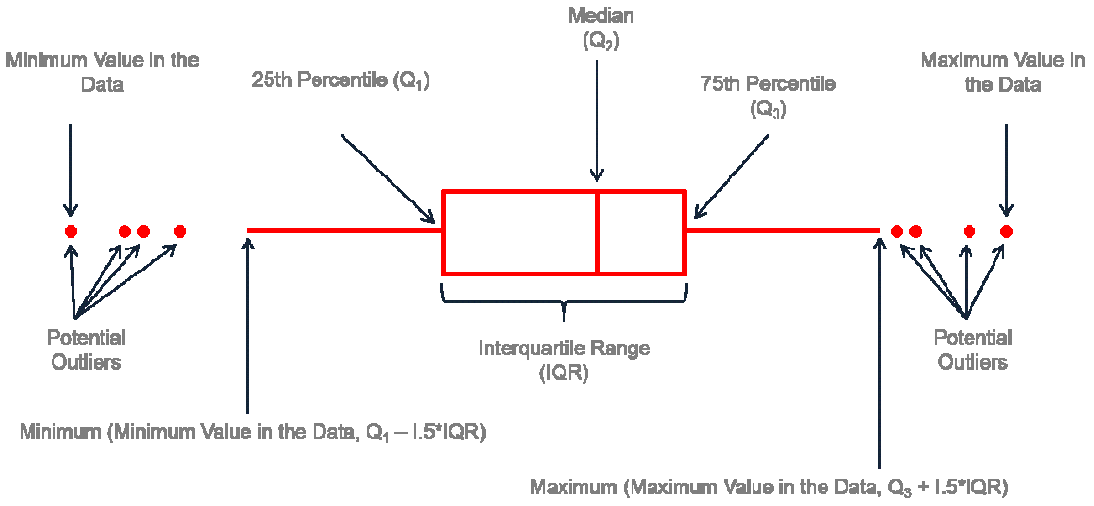
Tabulka 31: Kritéria hodnocení odtoku.

Kritérium	Zahrnuté parametry	Popis
Stálé vlastnosti povodí	Lag Time, CN, % Imp	Souhrnné vyjádření charakteristik povodí, které byly generovány v rámci citlivostní analýzy.
Proměnné vlastnosti povodí	Stupeň nasycení CNI - CNIII	Vyjádření vlivu předchozích srážek na odezvu povodí.
Nastavení modelu	Počáteční ztráta Ia 10% - Ia 25%	Vliv nastavení velikosti počáteční ztráty na odezvu povodí.
Vlastnosti srážky	Tvar Pt, N-letost PN	Vliv tvaru a velikosti srážky na odezvu povodí.

4.1. ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ

Výsledky jsou v rámci této práce zobrazovány třemi způsoby:

- Ve formě **tabulky**. Tabulka obvykle obsahuje tyto statistické charakteristiky datového souboru: medián, 1. kvantil (hodnota, pod níž leží pouze 1% dat), 25. kvantil (hodnota, pod níž leží 25% dat), 75. kvantil (hodnota, nad níž leží 25% dat), 99. kvantil (hodnota, nad níž leží 1% dat) a IQR (mezikvartilové rozpětí – číselná vzdálenost 25. a 75. kvantilu). V případě potřeby byly do tabulky doplněny další statistiky.
- Ve formě **krabicových grafů** (*Box Plot*). „Krabice“ grafu zobrazuje statistické hodnoty 1. kvartilu (*Q1*), mediánu (*Q2*) a 3. kvartilu (*Q3*). Pomocí „vousů“ jsou zobrazeny dosažené hodnoty do maximální vzdálenosti 1,5 násobku mezikvartilového rozpětí (*IQR*) od hodnot 1. a 3. kvartilu. Hodnoty, které do tohoto intervalu nespadají, se nazývají odlehlými hodnotami (*outliers*) a jsou znázorněny individuálně – viz Obrázek 19.



Obrázek 19: Zobrazení výsledků - box plot.

- Ve formě **bodových grafů** (*Jitter Plot*), které zobrazují všechny dosažené hodnoty (statisticky nevyhodnocené) pro jednotlivé realizace simulací. Grafické znázornění je použito pro zobrazení trendů.

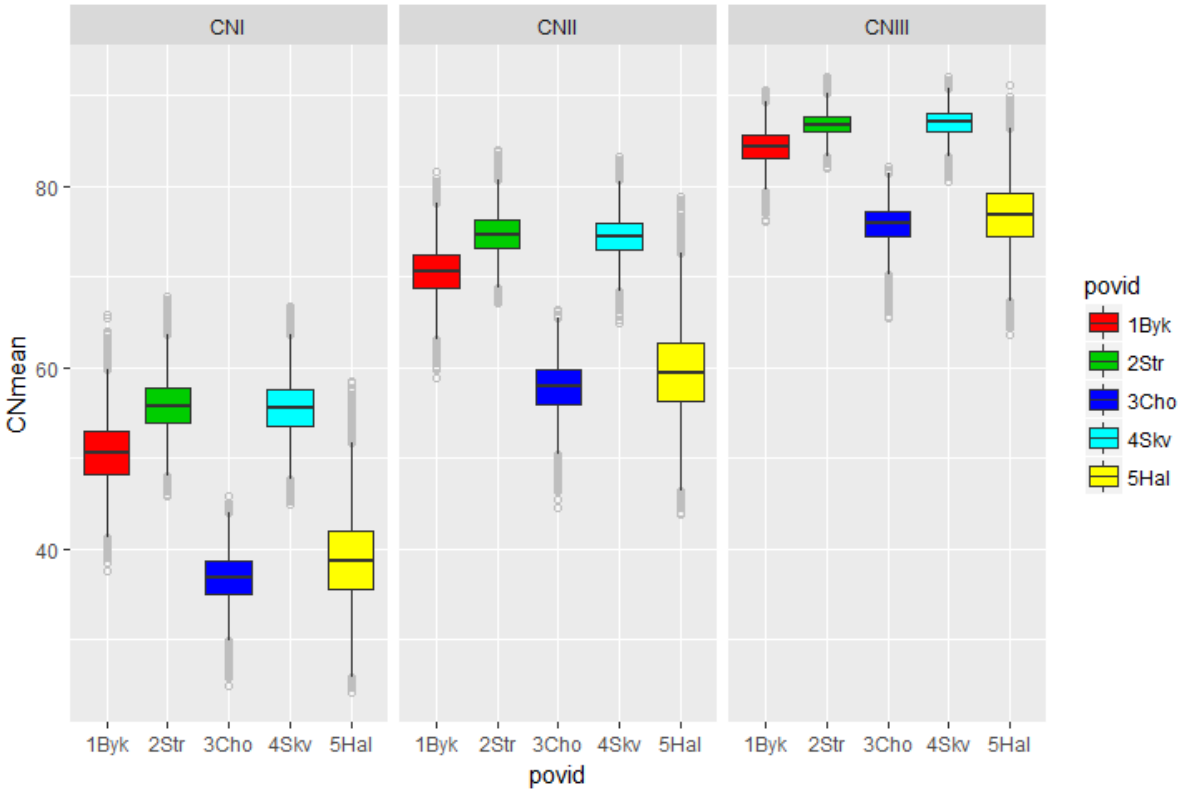
4.2. GENEROVANÉ HODNOTY PARAMETRŮ POVODÍ

Pro každé z reprezentativních povodí byly dle zadaných statistických rozdělení pravděpodobností generovány 3 nezávislé proměnné: CN (statistické rozdělení dle stupně předchozího nasycení), Lag Time a % Imp. Hodnota počáteční ztráty Ia je lineárně závislá na hodnotě CN a liší se svou velikostí ve vztahu k maximální potenciální retenci (10 %, 20 %, 25 %).

Analýzy odtokových charakteristik, které jsou uvedeny v následující Kapitole 4.3, jsou založeny na zkoumání vlivu vstupních parametrů na odtokové charakteristiky uvedené v Tabulce 30. Parametry povodí, které byly generovány v rámci citlivostní analýzy v programu HEC-HMS (CN, Lag Time, % Imp), jsou v analýze odtokových charakteristik shrnuty do parametru skupiny povodí.

4.2.1. ČÍSLO ODTOKOVÉ KŘIVKY (CN)

Rozdělení generovaných hodnot CN pro jednotlivé skupiny povodí a pro všechny tři stupně nasycení je graficky zobrazeno na následujícím Obrázku 20. Číselné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 32.



Obrázek 20: Box ploty generovaných hodnot CN v závislosti na skupině povodí a stupni nasycení.

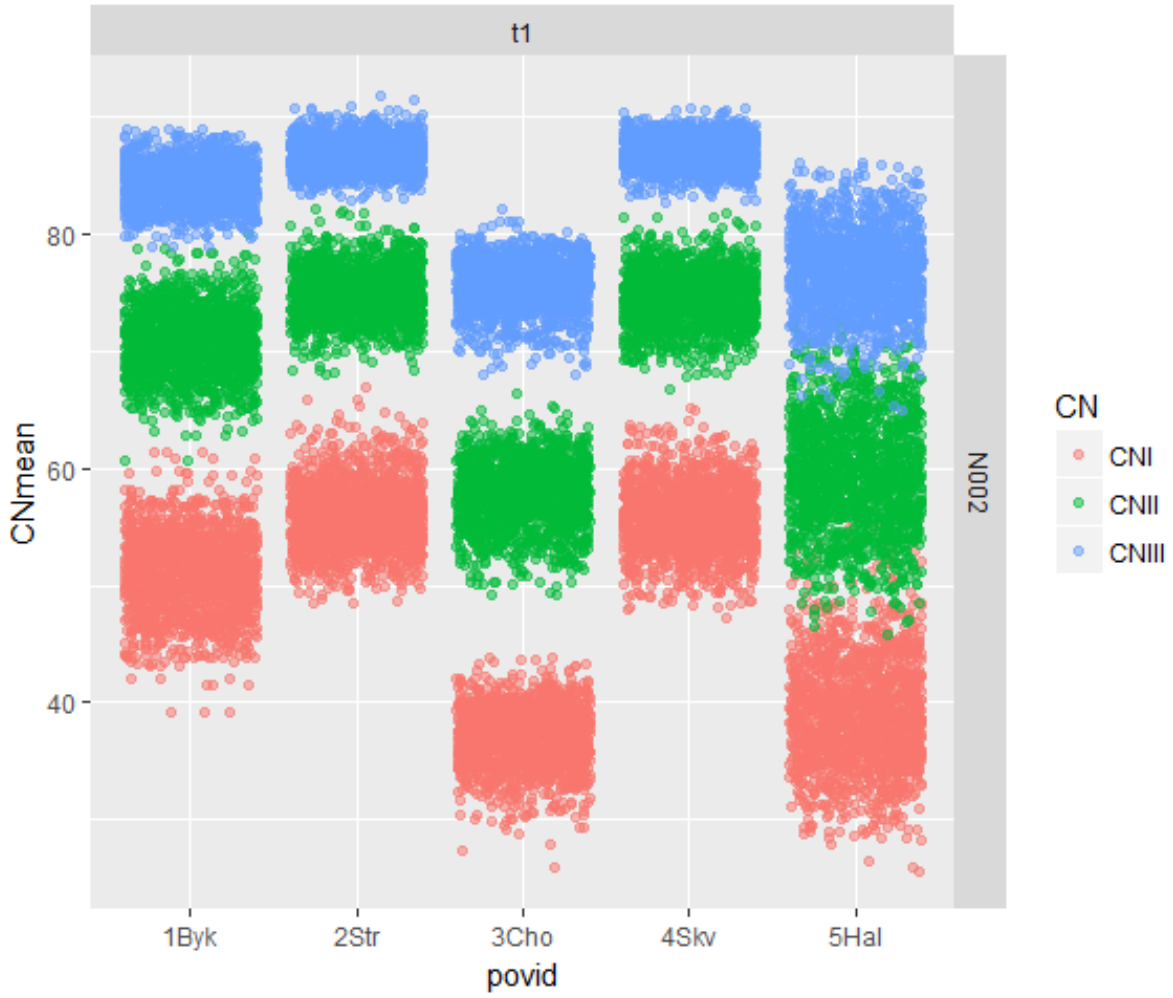
Tabulka 32: Hodnoty CN v závislosti na povodí a stupni předchozího nasycení.

Stupeň nasycení	Povodí	Medián	Kvantil_1	Kvantil_25	Kvantil_75	Kvantil_99	IQR
CNI	1Byk	50.73	43.46	48.67	53.29	58.89	4.62
	2Str	55.96	49.96	53.93	57.92	63.43	3.98
	3Cho	37.07	30.31	35.28	38.79	42.46	3.50
	4Skv	55.73	49.12	53.69	57.69	62.83	4.00
	5Hal	38.81	29.04	35.73	42.07	51.90	6.34
CNII	1Byk	70.71	64.42	68.87	72.78	77.32	3.90
	2Str	74.83	69.93	73.24	76.31	80.01	3.07
	3Cho	58.00	50.86	56.03	59.74	63.70	3.71
	4Skv	74.50	69.19	72.89	76.04	79.90	3.16
	5Hal	59.45	49.33	56.18	63.12	70.38	6.94
CNIII	1Byk	84.40	80.09	83.15	85.67	88.25	2.51
	2Str	86.89	83.87	85.96	87.76	90.01	1.80
	3Cho	75.91	69.92	74.39	77.17	79.73	2.79
	4Skv	87.16	83.84	86.20	88.11	89.79	1.92
	5Hal	77.00	68.61	74.54	79.23	84.89	4.69

Z uvedeného Obrázku 20 a Tabulky 32 lze vypozorovat několik závislostí:

- Skupina povodí č. 5 má oproti ostatním skupinám výrazně **vyšší rozptyl** hodnot CN. Díky němu jsou hodnoty CN poměrně pravidelně rozprostřeny po celém spektru možností. Ostatní skupiny vykazují oblasti, ve kterých nejsou generovány žádné hodnoty CN – viz Obrázek 21. To je dáno druhem rozdělení hodnot CN v jednotlivých skupinách povodí (Obrázek 13), které je pro skupiny č. 1, 2, 3 a 4 poměrně strmé. V této charakteristice se vymyká právě pouze skupina č. 5, která zahrnuje širší škálu hodnot CN.
- Se zvyšujícím se stupněm nasycení **roste** hodnota CN a **klesá** rozpětí generovaných hodnot CN.
- Skupiny povodí č. 2 a 4 se chovají obdobně. Jejich hodnoty CN jsou nejvyšší. Skupina povodí č. 1 vykazuje hodnoty nižší v rámci jednotek. Tento rozdíl se s rostoucím stupněm nasycení dále snižuje. Skupiny povodí č. 3 a 5 mají nejnižší hodnoty CN - oproti skupinám č. 2 a 4 průměrně nižší o 10 až 20.

- Se zvyšujícím se stupněm nasycení se rozdíly mezi jednotlivými skupinami povodí **snižují** (pro CN I je medián skupiny č. 2 téměř o 51% (18,9) větší než skupiny č. 3, zatímco pro CN III už činí tento rozdíl pouze 15% (11,3)). Snižují se rovněž rozdíly mezi stupni nasycení. Rozdíl mezi CN I a CN II je větší (obvykle cca 20) než mezi CN II a CN III (obvykle cca 15).
- Hodnoty CN pro skupiny povodí č. 3 a 5 jsou srovnatelné s hodnotami CN skupin č. 2 a 4, které mají nižší stupeň nasycení. Například pro stav CN II lze u povodí č. 2 a 4 čekat obdobnou odtokovou odezvu jako pro stav CN III u povodí č. 3 a 5. Tento fenomén je dobře viditelný rovněž na následujícím Obrázku 21. **Lze prohlásit, že rozdíly CN mezi extrémně odlišnými povodími odpovídají rozdílu plynoucímu uvažováním rozdílného stupně nasycení.**

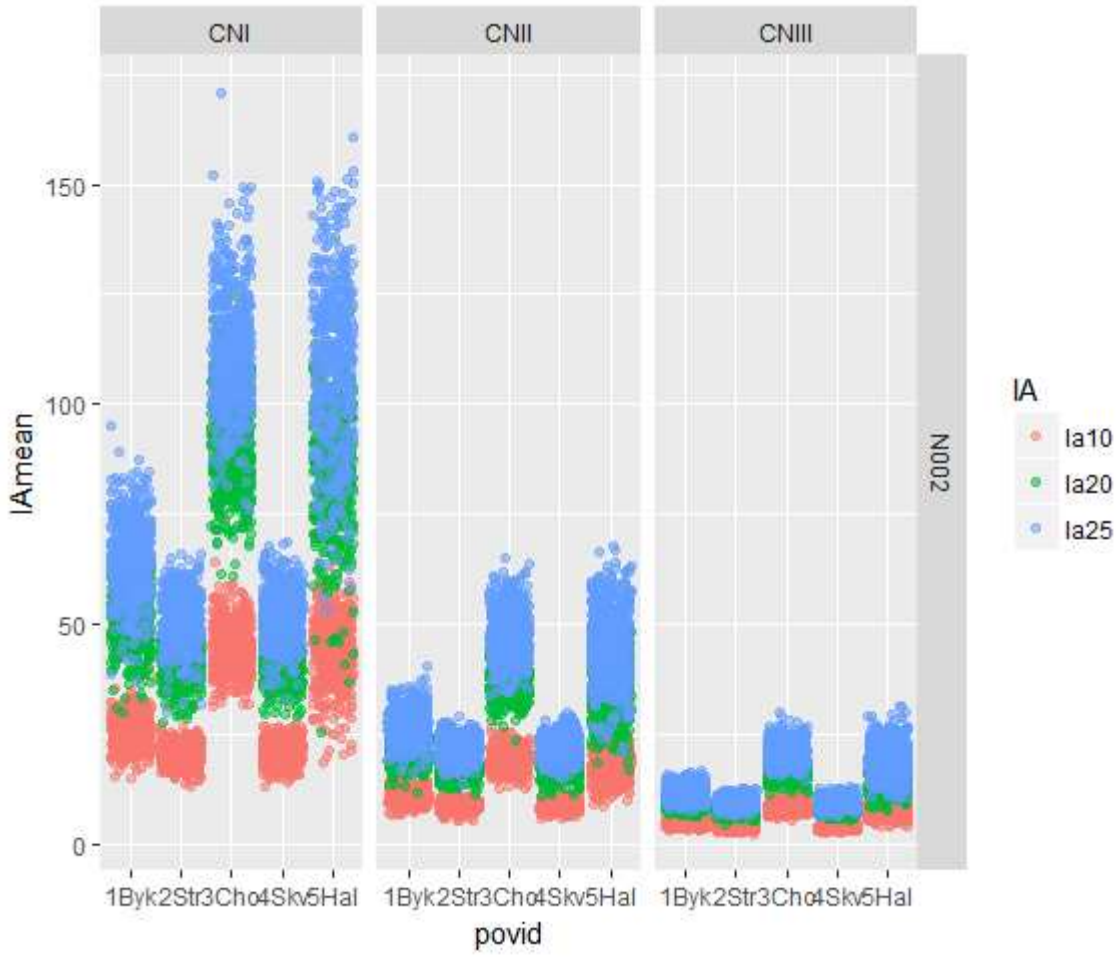


Obrázek 21: Bodový graf generovaných hodnot CN v závislosti na povodí a stupni nasycení.

4.2.2. *POČÁTEČNÍ ZTRÁTA (IA)*

Parametr počáteční ztráty (Ia) je navázán na generovanou hodnotu CN **lineárním klesajícím vztahem**, který je unikátní pro každou skupinu povodí a stupeň nasycení. Vyšší hodnota CN tedy znamená nižší počáteční ztrátu. Uvažovány jsou 3 možné scénáře – počáteční ztráta 10 %, 20 % (běžně uvažovaná hodnota), nebo 25 % z maximální potenciální retence. Jak je patrné z následujícího Obrázku 22, **největší vliv na hodnotu počáteční ztráty má stupeň nasycení povodí.** Další vztahy jsou analogické vtahům vyvozeným pro parametr CN. Hodnoty skupin č. 3 a č. 5 odpovídají hodnotám ostatních skupin na nižším stupni nasycení.

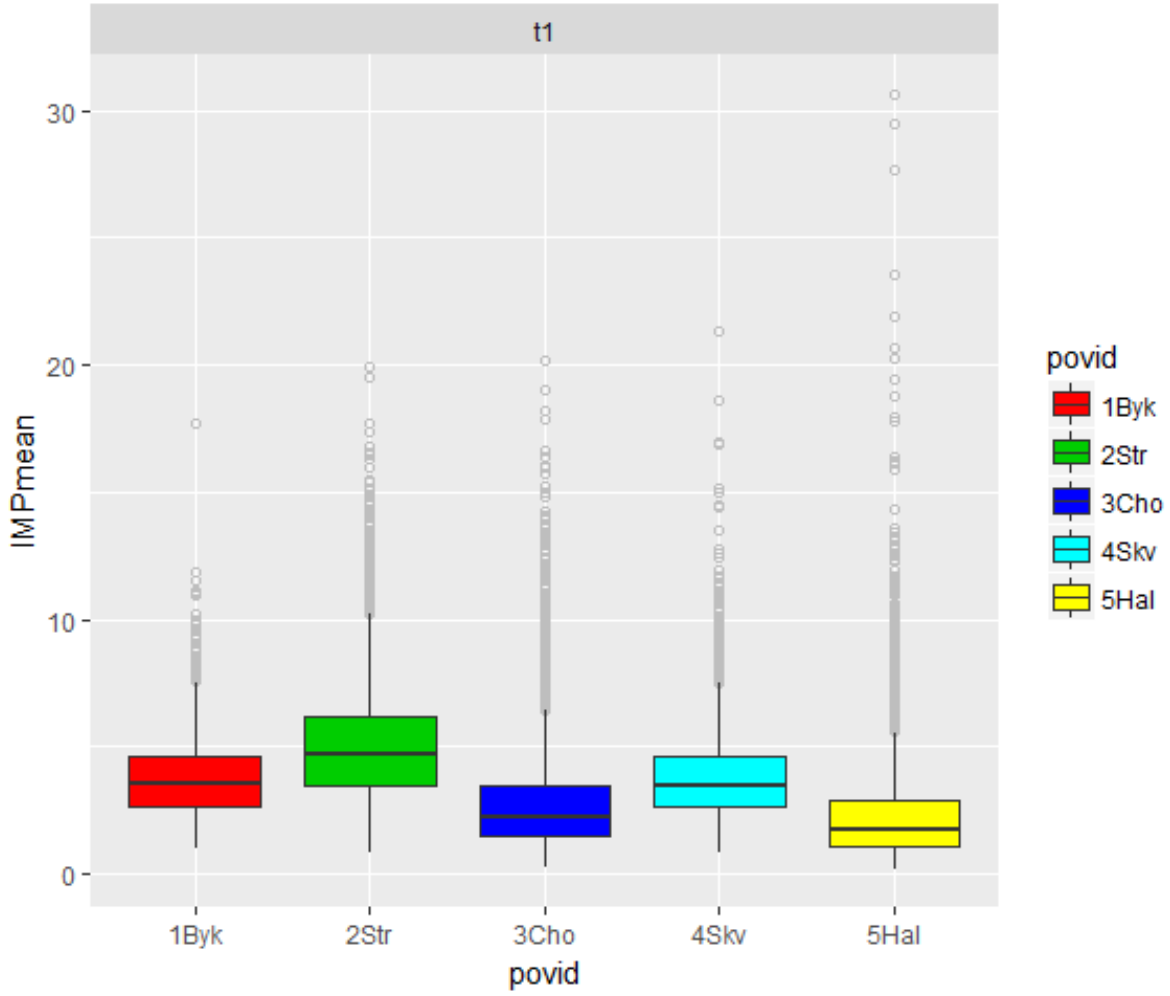
- Pro stupeň nasycení CN III nepřekročila hodnota Ia v žádném případě 30 mm, ve většině povodí se pohybovala dokonce výrazně pod touto hranicí.
- Pro stupeň nasycení CN II se extrémní hodnoty Ia ve skupinách č. 3 a 5 blížily 70 mm.
- Pro stupeň nasycení CN I se extrémní hodnoty Ia ve skupinách č. 3 a 5 blížily 150 mm. To znamená, že se prvních 150 mm srážky neúčastní povrchového odtoku.



Obrázek 22: Počáteční ztráta v závislosti na povodí a velikosti počáteční ztráty.

4.2.3. *Procento nepropustných ploch (% Impervious)*

Hodnota procenta nepropustných ploch je závislá pouze na vlastnostech povodí.

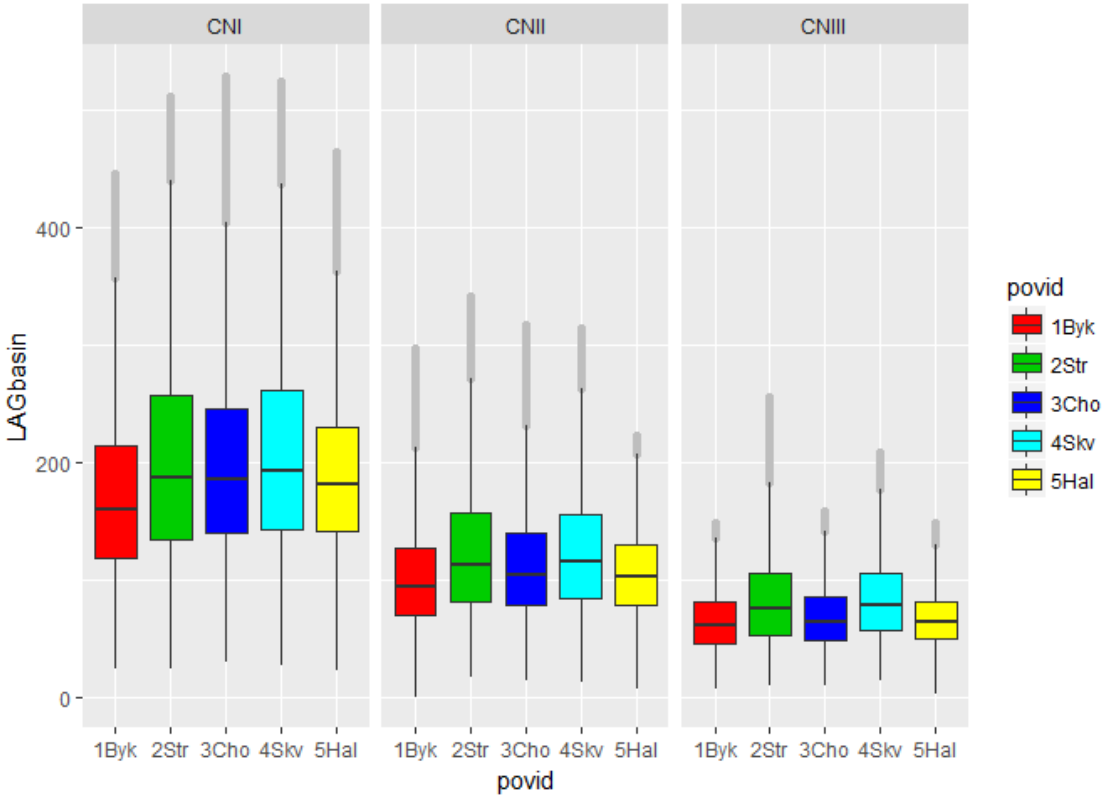


Obrázek 23: Procento nepropustných ploch v závislosti na skupině povodí.

Z Obrázku 23 je zřejmé, že procenta nepropustných ploch v jednotlivých skupinách povodí korespondují s hodnotami CN v těchto povodích. **V povodích s vyššími hodnotami CN (č. 2 a č. 4) se rovněž vyskytuje vyšší procento nepropustných ploch.** To lze vysvětlit vyšším podílem antropogenizovaných ploch v těchto povodích – z nich část je méně propustná (vyšší CN) a část není propustná vůbec. Nejvyšší průměrné hodnoty vykazuje skupina povodí č. 2, v níž se hodnoty pohybují okolo (i výrazně nad) 5 %. Následují skupiny povodí č. 1 a č. 4, nejnižší zastoupení nepropustných ploch pak vykazují skupiny povodí č. 3 a č. 5, které zahrnují převážně lesnatá povodí. Také v těchto skupinách se ovšem vyskytují ojedinělé případy s více než 20% zastoupením nepropustných ploch. Skupina povodí č. 5 opět vykazuje značnou nehomogenitu a veliký rozptyl generovaných hodnot.

4.2.4. *Doba zdržení (Lag Time)*

Rovněž doba zdržení je závislá na charakteristikách povodí a na stupni nasycení povodí. To je ilustrováno na následujícím Obrázku 24, číselně pak v Tabulce 33.



Obrázek 24: Box ploty generovaných hodnot Lag Time v závislosti na skupině povodí a stupni nasycení.

Tabulka 33: Hodnoty Lag Time v závislosti na povodí a stupni předchozího nasycení.

Stupeň nasycení	Povodí	Statistické hodnoty parametru Lag Time (min)					
		Medián	Kvantil_1	Kvantil_25	Kvantil_75	Kvantil_99	IQR
CNI	1Byk	155.69	63.03	123.39	208.56	371.08	85.17
	2Str	190.34	60.37	134.77	258.61	466.00	123.84
	3Cho	186.00	66.51	139.88	246.12	460.25	106.25
	4Skv	191.47	64.10	139.47	265.75	480.56	126.28
	5Hal	180.12	67.95	140.24	232.64	377.85	92.40
CNII	1Byk	92.85	37.69	72.12	123.81	238.96	51.69
	2Str	113.69	34.81	81.77	162.75	313.88	80.98
	3Cho	107.49	36.64	79.62	143.44	270.26	63.82
	4Skv	116.15	40.63	84.64	157.96	293.87	73.32
	5Hal	104.31	41.51	82.03	131.74	205.76	49.71
CNIII	1Byk	59.54	24.24	45.80	79.55	136.65	33.75
	2Str	75.89	24.40	54.25	106.95	199.54	52.70
	3Cho	65.43	25.28	50.39	85.87	142.26	35.48
	4Skv	78.76	27.01	57.11	104.02	189.66	46.91
	5Hal	64.26	24.16	50.20	81.07	126.21	30.86

Stejně jako u parametru CN, i tentokrát zůstávají pro všechny stupně nasycení obdobné poměry mezi jednotlivými povodími – jejich vlastnosti (sklon, dráhy odtoku) jsou totiž neměnné. Vypozorovat lze následující závislosti:

- Se zvyšujícím se stupněm nasycení **klesá** hodnota Lag Time i rozpětí generovaných hodnot. Rozpětí hodnot zejména pro stav CN I je velmi výrazné. Lag Time se pro tento stav u všech skupin povodí pohybuje v rozmezí jednotek minut až po více než 400 minut v extrémních případech (99% kvantil). Příčinu lze nalézt na Obrázku 18, který zobrazuje rozdělení parametru Lag Time v jednotlivých povodích IV. řádu ČR pro jednotlivé stupně nasycení. Z tohoto rozdělení je patrný výrazný rozptyl možných hodnot.
- Žádná ze skupin povodí se od ostatních svými hodnotami výrazně **neodlišuje**. Globálně nejnižší hodnoty vykazuje skupina č. 1. Nejvyšší hodnoty pak skupiny č. 2 a č. 4. Tyto skupiny rovněž vykazují nejvyšší rozpětí hodnot.
- Se zvyšujícím se stupněm nasycení se rozdíly mezi jednotlivými skupinami povodí **zvyšují** v absolutních číslech, ovšem snižují relativně (pro CN I je medián skupiny č. 2 téměř o 23 % (36 minut) větší než medián skupiny č. 3, zatímco pro CN III už činí tento rozdíl 32 % (19 minut). **Rozdíly mezi jednotlivými povodími však lze obecně označit za nízké.**
- Zatímco rozdíly ve vlastnostech jednotlivých povodí mohou vygenerovat rozdíl doby zdržení v hodnotách do 40 při nejnižším stupni nasycení, rozdíl v nasycenosti povodí může vygenerovat změnu parametru Lag Time blížící se až k 120 minutám (rozdíl mediánů CN I a CN III pro všechna povodí). **Stupeň nasycení povodí tedy v tomto případě hraje důležitější úlohu než vlastnosti povodí!**

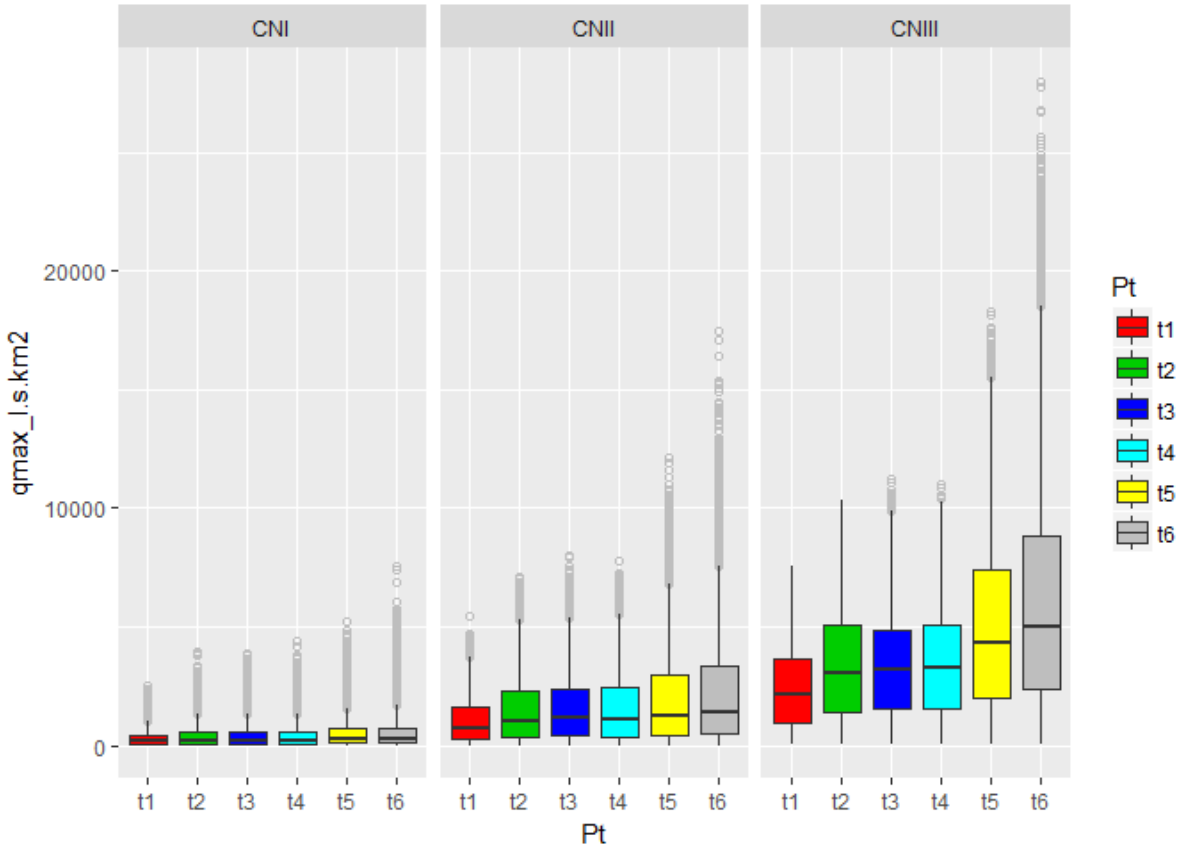
4.3. MAXIMÁLNÍ SPECIFICKÝ ODTOK Z POVODÍ

Maximální specifický odtok je základní odtokovou charakteristikou povodí. Vliv na jeho hodnotu mají všechna kritéria uvedená v Tabulce 31. Hodnoty uvedené v následujících tabulkách této kapitoly jsou vždy v jednotkách **l/s/km^2**.

4.3.1. VLIV TVARU SRÁŽKY A PŘEDCHOZÍHO NASYCENÍ

Pro praktickou aplikaci výzkumu je stěžejní zjištění, s jakými stavy předchozího nasycení se pojí které tvary srážek. Předchozím výzkumem bylo zjištěno (Kavka, 2016), že rovnoměrné dlouhodobé srážky (t1, t2) jsou obecně vázány na vyšší stupeň předchozího nasycení povodí (déletrvající deště – CN II až CN III), než přívalové srážky typů t5 a t6, které obvykle spadnou do vysušeného povodí (CN I až CN II).

Na následujícím Obrázku 25 je zobrazena závislost dvou sledovaných veličin – tedy tvaru srážky a předchozího nasycení povodí. V každém uvedeném box plotu jsou zahrnuty všechny skupiny povodí, všechny N-letosti, i všechny možnosti počáteční ztráty.



Obrázek 25: Závislost specifického odtoku na tvaru srážky a stupni nasycení povodí.

Číselné vyjádření těchto vztahů je uvedeno v následující Tabulce 34.

Tabulka 34: Maximální specifický odtok z povodí v závislosti na tvaru srážky a stupni nasycení povodí.

Stupeň nasycení	Tvar srážky	Medián	Kvantil_1	Kvantil_25	Kvantil_75	Kvantil_99	IQR
CNI	t1	168.62	10.62	70.20	461.19	1468.53	390.99
	t2	217.28	13.51	90.38	584.13	2072.82	493.75
	t3	192.20	9.68	69.47	585.58	2108.45	516.10
	t4	200.99	11.86	79.49	567.60	2108.92	488.11
	t5	266.29	15.27	109.67	693.85	2645.64	584.19
	t6	289.62	15.45	117.95	743.91	2988.06	625.96
CNII	t1	763.99	22.46	285.73	1664.75	3569.95	1379.02
	t2	1030.25	29.77	371.09	2332.19	4998.64	1961.10
	t3	1152.60	23.57	426.82	2403.26	5200.01	1976.44
	t4	1102.81	26.57	386.29	2433.09	5247.49	2046.80
	t5	1280.37	38.36	457.89	3000.33	7491.57	2542.44
	t6	1408.40	42.49	513.90	3332.96	9090.84	2819.06
CNIII	t1	2138.27	139.94	983.75	3660.08	6053.96	2676.33
	t2	3051.46	167.00	1411.48	5109.62	8485.42	3698.15
	t3	3168.86	207.23	1571.49	4891.95	8265.66	3320.46
	t4	3257.82	178.30	1573.75	5107.01	8499.95	3533.26
	t5	4295.96	205.41	1979.24	7402.45	13710.04	5423.21
	t6	4972.13	228.53	2345.23	8818.89	18474.80	6473.65

Z uvedeného grafického i tabelárního porovnání lze vyvodit následující závěry:

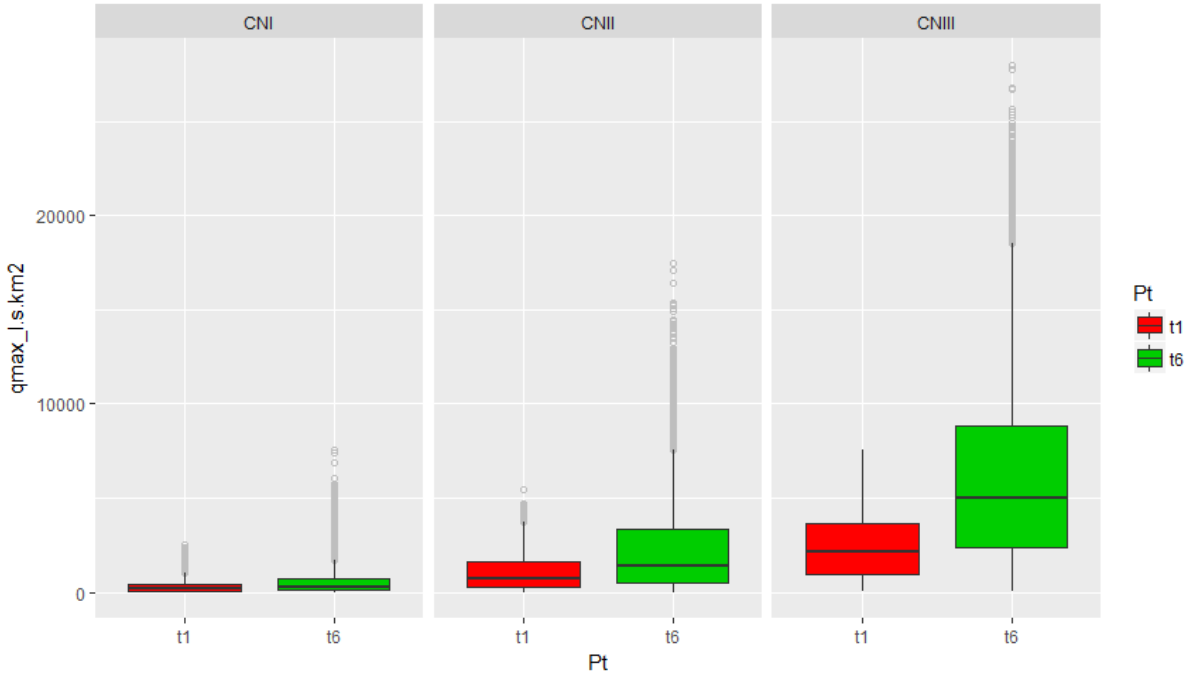
- Srážka t1 vyvolává nejnižší odtoky z povodí ve všech stupních nasycení povodí. Odtoky způsobené touto rovnoměrnou srážkou rovněž vykazují nejnižší rozptyl. Srážky t2, t3 a t4 vykazují ve všech stupních nasycení obdobné hodnoty maximálních odtoků. Nejvyšší odtoky jsou způsobeny přívalovými srážkami t5 a t6.
- Přívalové srážky t5 a t6 skýtají větší šanci výskytu extrémního odtoku, než rovnoměrné srážky t1 a t2. Při porovnání mediánu obou srážek je střední hodnota odtoku z přívalové srážky zhruba dvojnásobná. Rozdíl horních 99% kvantilů je pak už téměř trojnásobný. Při pohledu na box plot je zřejmé, že **zcela extrémní události s odtokem přesahujícím 15000 l/s/km^2 lze očekávat pouze u přívalových srážek tvarů t5 a t6.**
- Vliv předchozího nasycení je větší než vliv tvaru srážky. Markantní je zejména zhruba pětinásobné zvýšení středních hodnot (medián, kvantil 25 %, kvantil 75 %) stavu nasycení CN II oproti stavu CN I. Obdobně velký nárůst lze zaznamenat mezi stavem CN II a CN III u nízkých odtoků (kvantil 1 % a 25 %). To ukazuje na snížení vlivu počáteční ztráty se zvyšující se hodnotou CN.

Porovnejme nyní odtoky přívalové srážky t6 za nižšího stupně nasycení s rovnoměrnou srážkou t1 za vyššího stupně nasycení – viz Tabulka 35.

Tabulka 35: Porovnání odtoku ze srážek t1 a t6.

Stupeň nasycení	Tvar srážky	Medián	Kvantil_1	Kvantil_25	Kvantil_75	Kvantil_99	IQR
CNI	t6	289.62	15.45	117.95	743.91	2988.06	625.96
CNII	t1	763.99	22.46	285.73	1664.75	3569.95	1379.02
CNII	t6	1408.40	42.49	513.90	3332.96	9090.84	2819.06
CNIII	t1	2138.27	139.94	983.75	3660.08	6053.96	2676.33

Z tabulky plyne následující: **Větší odtoky vznikají ve všech případech příchodem rovnoměrné srážky do nasyceného povodí.** Jedinou výjimkou je 99% kvantil porovnávající odtoky při vyšších stupních nasycení. Tato hodnota je výrazně vyšší u přívalové srážky t6, což znamená vyšší riziko extrémních hodnot průtoků u této srážky. **Rovnoměrná srážka t1 není schopna vyprodukovat extrémní odtoky ani při vysokém předchozím nasycení povodí.** Platnost těchto závěrů je ještě jednou dokumentována na následujícím Obrázku 26.



Obrázek 26: Odtoky z rovnoměrné srážky t1 a přívalové srážky t6.

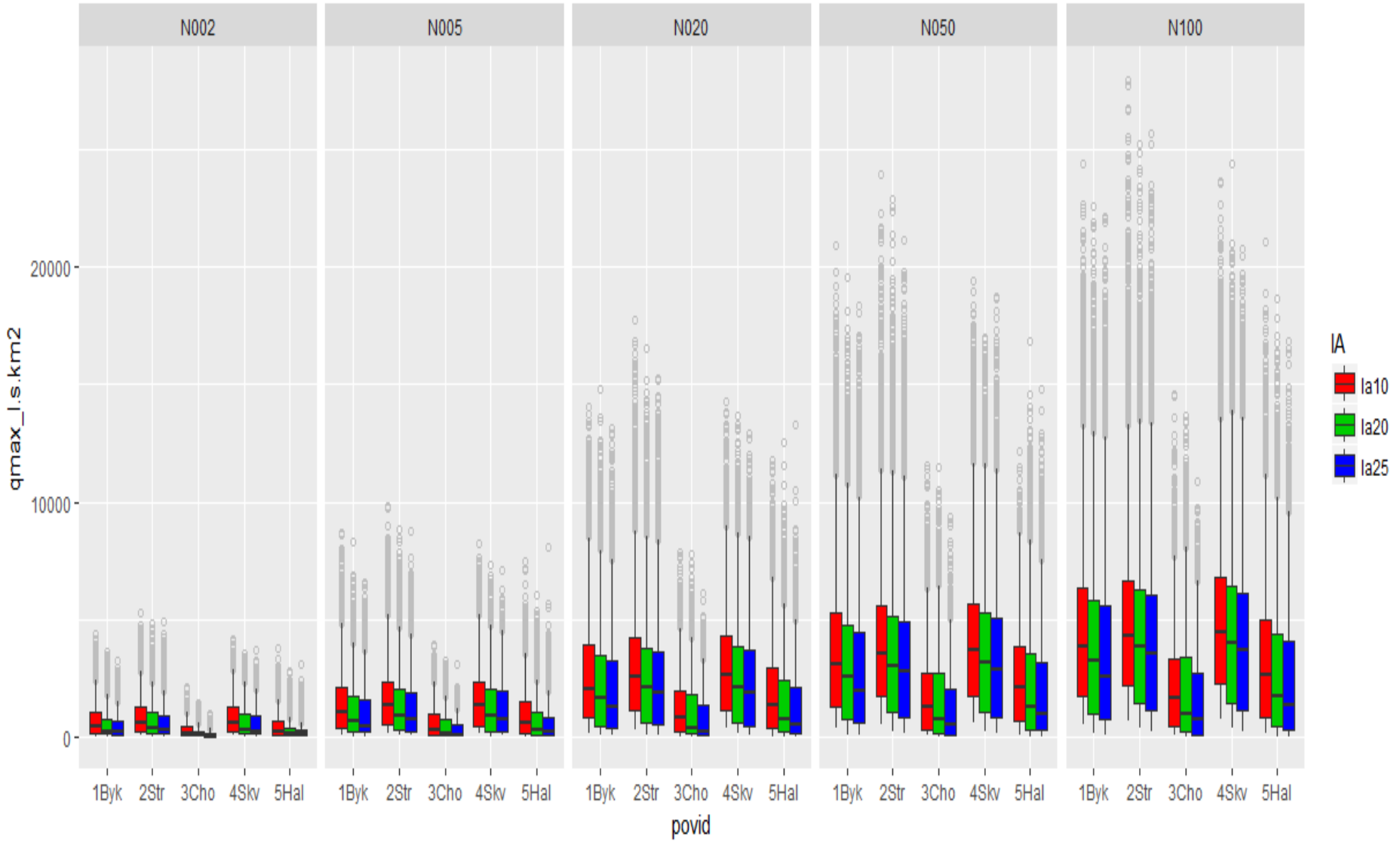
4.3.2. VLIV VLASTNOSTÍ POVODÍ, VELIKOSTI SRÁŽKY A POČÁTEČNÍ ZTRÁTY

Vliv všech tří uvedených veličin je porovnán na následujícím Obrázku 27. Jedná se o parametry, jejichž vliv na odtokovou odezvu je poměrně předvídatelný.

Z obrázku je patrné, že na výskyt extrémů má vliv (kromě tvaru srážky, který již byl popsán v minulé kapitole) prakticky pouze N-letost srážky. Dvouletá srážka v žádném případě nevyprodukuje odtoky vyšší než 5000 l/s/km^2. **S rostoucí N-letostí se průměrné hodnoty příliš nezvyšují, extrémy ale výrazně narůstají,** a to až k hodnotám 25000 l/s/km^2 pro 2. skupinu povodí a stoletou srážku.

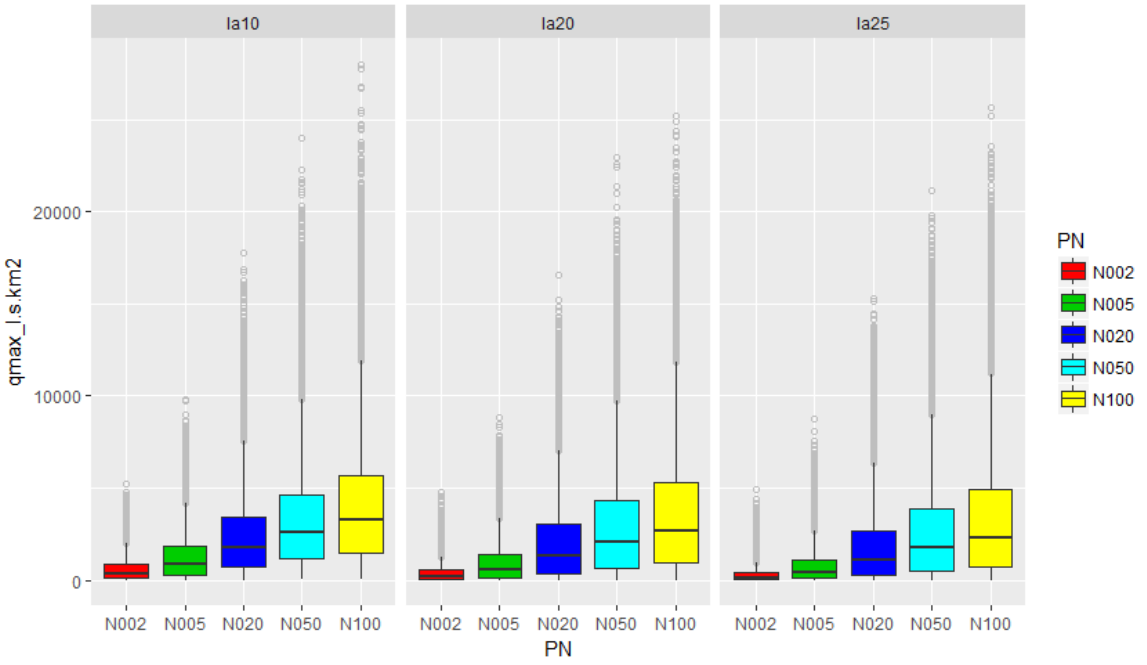
Vliv vlastností povodí je očekávaný v souvislosti s hodnotami jednotlivých parametrů, které byly popsány v kapitole 4.2. Vyšší odtokovou odezvu vykazují povodí č. 1, 2 a 4, která mají díky svému krajinnému pokryvu vyšší hodnoty CN a také více nepropustných ploch. Naopak povodí č. 3 a 5 produkují nižší odtoky. **Zejména skupina č. 3 vykazuje odtoky výrazně nižší, než všechny ostatní skupiny.** Stoletá srážka pro tuto skupinu povodí vyvolá obdobný efekt jako dvacetiletá srážka u ostatních skupin.

Vliv velikosti počáteční ztráty na velikosti extrémních průtoků není příliš podstatný – počáteční ztráta totiž odebírá všem srážkám stejný objem odtoku. Tato část má u srážek menšího objemu výraznější procentuální vliv.



Obrázek 27: Porovnání vlivu vlastností povodí, velikosti srážky a velikosti počáteční ztráty.

Pro ilustraci uvedených poznatků je přiložen Obrázek 28 zobrazující vztah N-letosti srážky a počáteční ztráty na povodích skupiny č. 1 a Tabulka 36 znázorňující číselný vztah mezi počáteční ztrátou (Ia) a N-letostí bez ohledu na skupiny povodí.



Obrázek 28: Vliv počáteční ztráty a N-letosti srážky na skupině povodí č. 1.

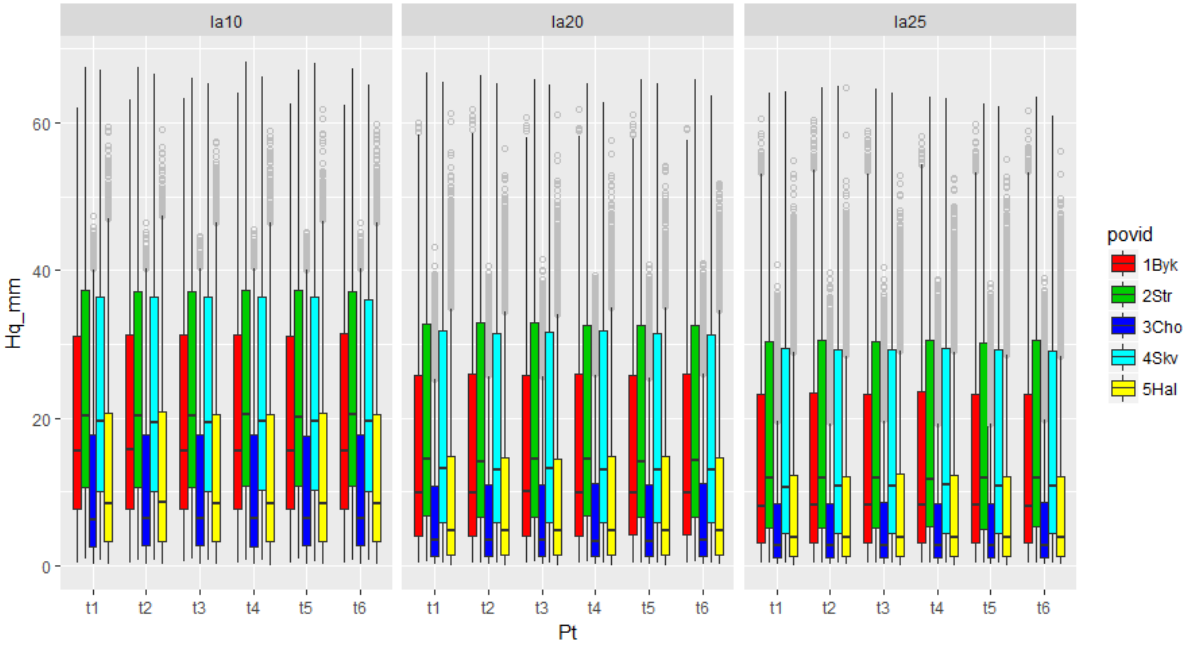
Tabulka 36: Vliv počáteční ztráty a N-letosti srážky na odtoky z povodí č. 1.

IA	PN	Medián	Kvantil_1	Kvantil_25	Kvantil_75	Kvantil_99	IQR
Ia10	N002	382.75	14.35	114.91	883.48	2809.51	768.57
	N005	879.15	24.91	304.05	1841.33	5396.39	1537.28
	N020	1803.69	68.18	752.73	3460.43	9772.76	2707.70
	N050	2609.67	141.27	1156.93	4627.52	13188.05	3470.60
	N100	3261.90	212.04	1515.98	5673.94	15802.14	4157.96
Ia20	N002	210.58	12.69	74.96	553.70	2202.32	478.74
	N005	554.81	20.65	138.05	1426.76	4751.60	1288.71
	N020	1360.19	31.54	373.13	3048.75	8921.61	2675.62
	N050	2093.58	42.35	659.78	4301.07	12107.55	3641.29
	N100	2680.56	55.11	933.63	5286.79	14768.05	4353.16
Ia25	N002	157.62	8.34	68.21	417.92	1960.60	349.71
	N005	431.80	12.90	116.18	1139.18	4232.60	1023.00
	N020	1107.80	19.19	262.90	2693.90	8554.84	2431.00
	N050	1755.62	24.07	473.97	3888.98	11774.08	3415.01
	N100	2295.27	27.63	698.86	4897.68	14199.83	4198.82

Z uvedených dat je patrná výrazná závislost extrémů odtoku na extremitě srážky. Velikost počáteční ztráty není schopna tyto extrémy příliš ovlivnit - nemá vliv na vznik těchto extrémů a její vliv na jejich hodnotu rovněž není podstatný. Naopak, v případě odtoků na nižších kvantilech hraje může být vliv počáteční ztráty významný.

4.4. ODTOKOVÁ VÝŠKA A ODTOKOVÝ KOEFICIENT

Vztahy nalezené pro tvorbu maximálního odtoku lze ve většině přenést i na výpočet odtokové výšky a odtokového koeficientu. **Jedinou výjimkou je vliv tvaru srážky, který lze v tomto případě zcela zanedbat.** To je způsobeno metodou výpočtu CN, která z odtoku odečte určitou část srážky ve formě počáteční ztráty. Zbytek srážkové výšky vždy odteče dle celkové velikosti srážky, CN povodí (dle krajinného pokryvu a stupně nasycení) a velikosti počáteční ztráty. To je velmi dobře patrné z následujícího Obrázku 29.

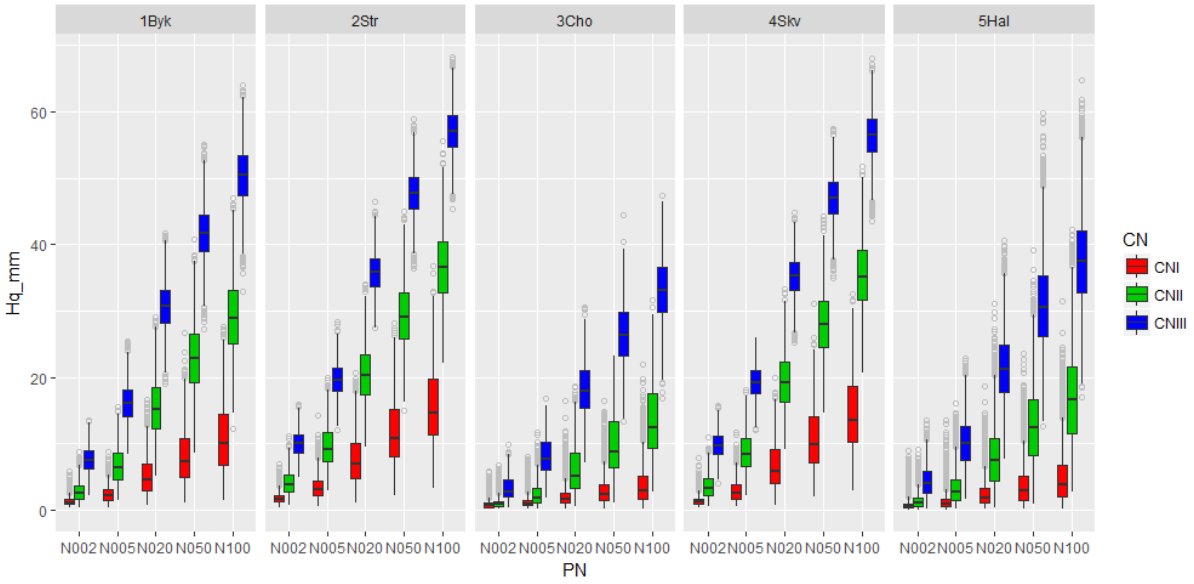


Obrázek 29: Závislost odtokové výšky na vlastnostech povodí, tvaru srážky a velikosti počáteční ztráty.

Uvedený graf rovněž potvrzuje roli velikosti počáteční ztráty, která odečte ze srážkové výšky vždy danou hodnotu bez ohledu na celkovou velikost ztráty. To může hrát podstatnou roli u nižších odtokových výšek (povodí s nízkou hodnotou CN), na extrémy má ale tento parametr zanedbatelný vliv.

Určujícím faktorem velikosti odtokové výšky povodí je tedy hodnota CN daná vlastnostmi povodí a stupněm předchozího nasycení a velikost srážky. Vysoký rozptyl hodnot (0 až 60 mm) je značný právě kvůli spojení všech určujících faktorů do jednoho grafu.

To je doloženo následujícím Obrázkem 30, který potvrzuje vliv vlastností povodí na konečné odtoky. Při porovnání sloupců značících jednotlivé skupiny povodí, nalezneme stále stejný vzorec, podle kterého nejvíce vody odteče z povodí č. 2 a č. 4. Naopak povodí č. 3 a č. 5 vykazují za všech podmínek nejnižší odtoky.

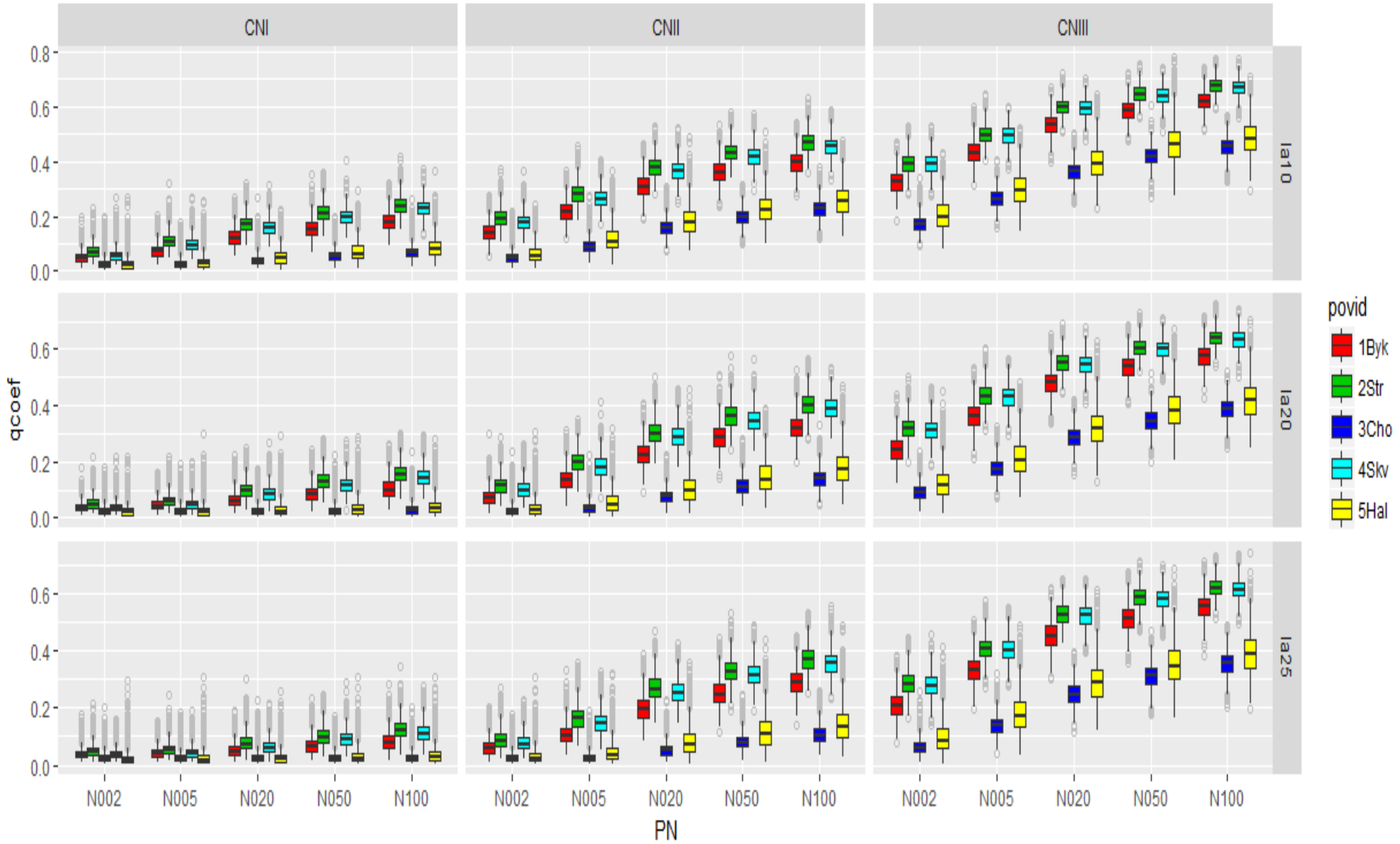


Obrázek 30: Odtoková výška v závislosti na vlastnostech povodí, N-letosti srážky a stupni předchozího nasycení.

Také u zbylých dvou zkoumaných veličin nenacházíme žádnou odlišnost od očekávaných hodnot. **Vliv stupně předchozího nasycení povodí i velikosti srážky lze označit za zásadní a jejich kombinace má na výsledný odtok podstatný vliv.**

Pro porovnání vlivu jednotlivých parametrů na objem odtoku je vhodné použít kritérium **odtokového koeficientu**, který vyjadřuje podíl objemu odtoku k objemu srážky. Tento podíl se pro jednotlivé scénáře výrazně liší. Z Obrázku 31 lze vypozorovat lze následující vztahy:

- Vliv velikosti srážky, počáteční ztráty a stupně předchozího nasycení je obdobný pro všechny skupiny povodí.
- Pro stupeň nasycení CN I se odtokový koeficient dostává přes hodnotu 0,2 jen ve výjimečných případech.
- Vliv předchozího nasycení je významnější než vliv velikosti srážky. Již pětiletá srážka, která spadne do nasycenějšího povodí, vyvolává větší odtokovou odezvu než srážka stoletá v méně nasyceném povodí. Tato situace platí jak pro porovnání stavů CN I a CN II, tak i stavů CN II a CN III.
- Za nejnepříznivějších odtokových podmínek (CN III, Ia 10 %, skupiny povodí č. 2 a č. 4) může koeficient odtoku dosahovat až hodnoty 0,75 (75 % srážky tedy přímo odteče). Rozdíly mezi jednotlivými skupinami povodí se zvyšují s N-letostí srážky a se stupněm nasycení. Pro nízký stupeň nasycení a nízkou N-letost scénáře je tento rozdíl téměř nulový, u nepříznivých scénářů může dosahovat až hodnoty 20 %.



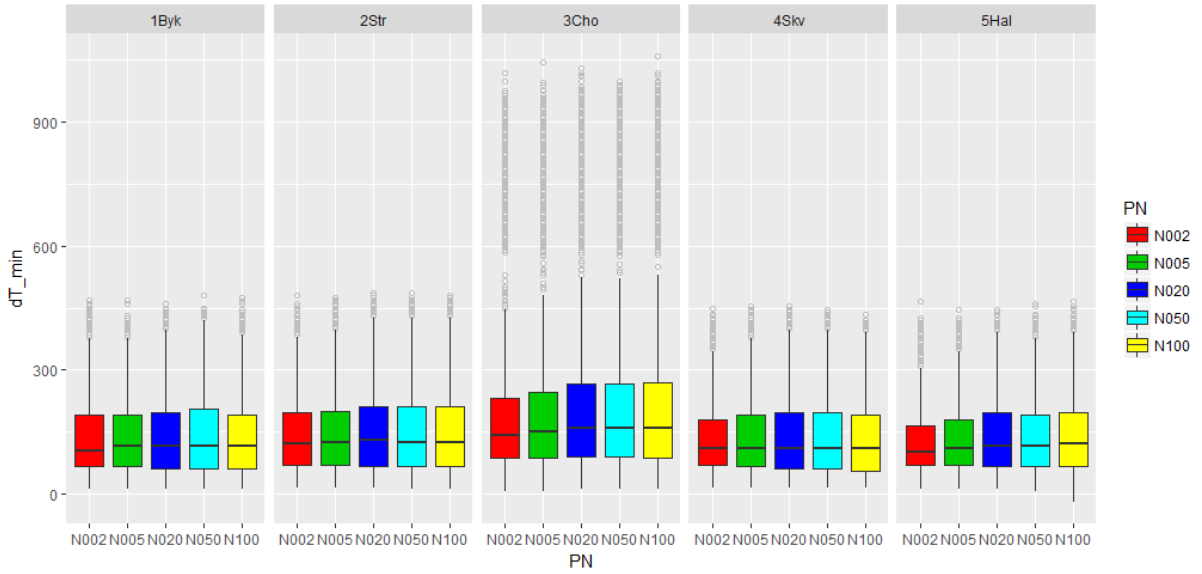
Obrázek 31: Odtokový koeficient pro všechny kombinace vstupních parametrů.

V grafu odtokového koeficientu znázorněném na Obrázku 31 lze vypozorovat opakující se schéma uvedené na Obrázku 20. To není překvapivé – odezvy jednotlivých skupin povodí dané zejména parametrem CN se totiž pouze „stěhují“ v závislosti na ostatních parametrech.

4.5. POSUN DOBY KULMINACE SRÁŽKY A ODTOKU

Poslední zkoumaná odtoková charakteristika není určena velikostí odtoku, ale posunem času jeho kulminace oproti kulminaci srážky. Zohledněn je v tomto případě parametr Lag Time daný vlastnostmi povodí, vliv má rovněž tvar srážky a velikost počáteční ztráty.

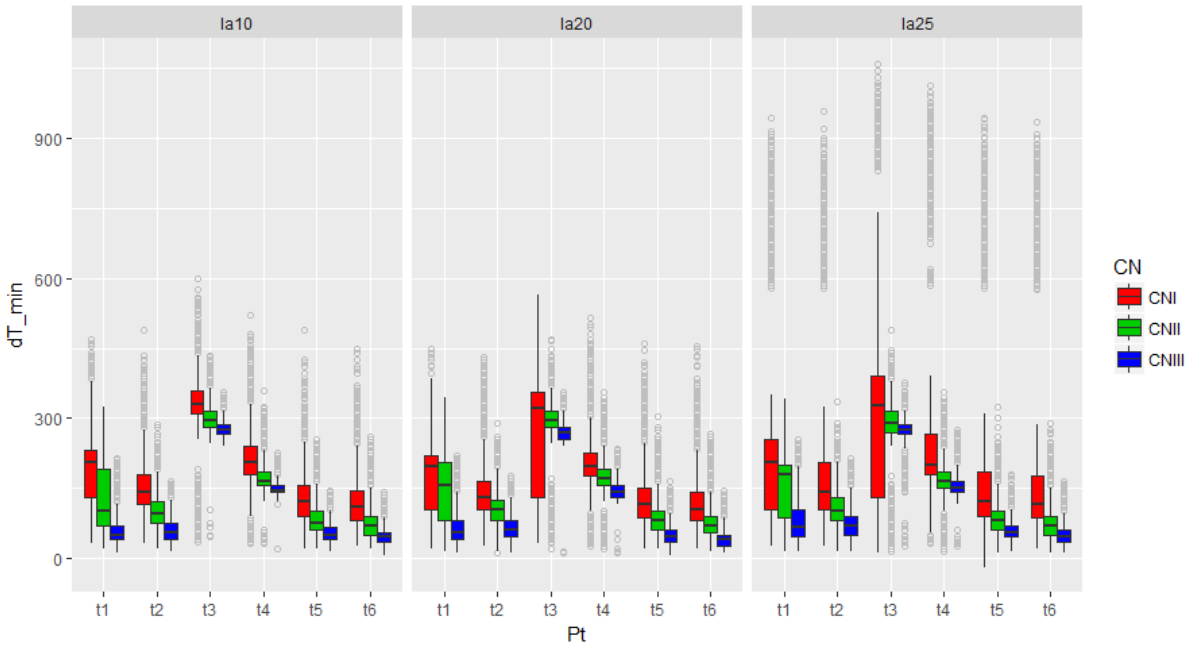
Naopak, N-letost srážky nemá na tento parametr žádný vliv – s rostoucí N-letostí se totiž mění pouze intenzita srážky, nikoli její časové rozdělení. Zanedbatelný je rovněž vliv příslušnosti k dané skupině povodí. Jak je vidět z Obrázku 22, hodnoty Lag Time se pro jednotlivé skupiny liší pouze v rámci desítek minut. Tento rozdíl je pro konečné výsledky zanedbatelný, což je znázorněno na následujícím Obrázku 32.



Obrázek 32: Závislost posunu kulminace odtoku na N-letosti srážky a na příslušnosti ke skupině povodí.

Uvedený Obrázek 32 dokumentuje nezávislost posunu kulminace odtoku na N-letosti srážky i na příslušnosti k dané skupině povodí. Jedinou výjimkou v tomto směru tvoří povodí příslušná ke skupině č. 3. V této skupině za jistých podmínek vznikaly posuny blížící se až k 1000 minutám (kulminace tedy nastala dávno po skončení příčinné srážky), přičemž medián všech skupin povodí se pohyboval okolo 100 až 150 minut.

Velký vliv na posun doby kulminace má naopak tvar srážky, stupeň nasycení povodí a velikost počáteční ztráty. To je dobře patrné z následujícího Obrázku 33.

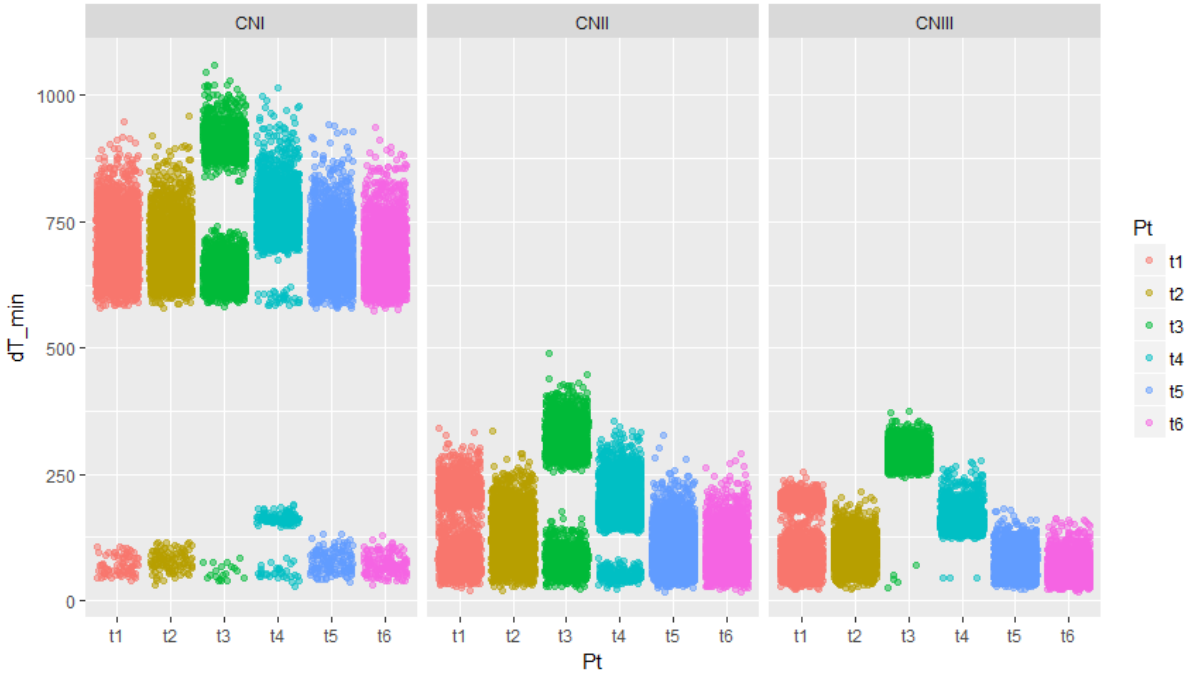


Obrázek 33: Závislost posunu kulminace na stavu nasycení povodí, tvaru srážky a velikosti počáteční ztráty.

Z Obrázku 33 jsou patrné tři závislosti:

- Zpoždění kulminace se dle očekávání snižuje s rostoucím stupněm nasycení povodí. To je dáno nižší infiltrační kapacitou půdy, a tedy rychlejším nástupem povrchového odtoku.
- Největší rozptyl vykazují tvary srážek t3 a t4 – tedy srážky se dvěma vrcholy intenzity deště. U těchto tvarů srážek může dojít dle okolností ke kulminaci jak vlivem prvního, tak druhého vrcholu. U obou typů srážek má první vrchol vyšší intenzitu.
- Pro velikosti počáteční ztráty 10 % a 20 % jsou doby zpoždění kulminace stejné – změna počáteční ztráty tedy v tomto případě nehraje roli. Rozdíl nastává při zvýšení počáteční ztráty na 25 %, a to u skupiny povodí č. 3 a nejnižšího stupně nasycení CN I. Za těchto nejpříznivějších odtokových podmínek dochází k výraznému prodloužení času kulminace odtoku.

Poslední bod je blíže zkoumán na následujícím Obrázku 33, který zobrazuje bodové rozložení zpoždění kulminace odtoku oproti kulminaci srážky pouze na skupině povodí č. 3 s variantou počáteční ztráty 25 %.



Obrázek 34: Hodnoty zpoždění kulminace pro skupinu povodí č. 3 a počáteční ztrátu 25 %.

Z Obrázku 34 je zřejmé, že stavy nasycení CN II a CN III vykazují obdobné chování – s tím, že pro stav CN III jsou doby kulminace kratší. Průměrné hodnoty se pohybují pod hranicí 200 minut. Povšimnout si lze rovněž chování povodí při výskytu tvaru srážky t3 a t4. Doby kulminace se v tomto případě rozdělí na dvě skupiny, jejichž přechod není plynulý. Jedná se pravděpodobně o odezvu povodí na rozdílné srážkové vrcholy. Přičemž dřívější odezva znamená reakci na první (kulminační) vrchol srážky. Pozdější odezva znamená, že byl první srážkový vrchol částečně pohlcen a kulminace odtoku je tak způsobena druhým vrcholem.

Odlišná situace nastává pro stav nasycení CN I – jedná se o extrémní situaci, kdy se na povodí s nejnižší průměrnou hodnotou CN vyskytne nízký stav nasycení a zároveň je uvažována vysoká počáteční ztráta. Za tohoto stavu jsou hodnoty počáteční ztráty na tomto povodí obrovské (viz Obrázek 24) a pohltí větší část příčinné srážky včetně jejího vrcholu. Právě proto jsou obrovské i posuny kulminace odtoku oproti kulminaci srážky.

4.6. SOUHRN DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V této kapitole jsou shrnuty nejdůležitější výstupy týkající se vlivu jednotlivých parametrů na výstupy modelu HEC-HMS.

Hodnota CN

Pro výpočet odtoku metodou CN je zcela zásadní právě určení hodnoty CN na základě krajinného pokryvu. **Určení stupně nasycení povodí je ale stejně důležité, ne-li ještě důležitější.** Ukazuje se totiž, že extrémní průtoky s hodnotami nad 10000 l/s/km^2 nastávají výhradně za stupňů nasycení CN II (za předpokladu přívalové srážky) a CN III. Hodnoty CN na povodích s vysokou retencí (skupiny č. 2 a 4) jsou obdobné jako hodnoty CN na povodích s nízkou retencí (skupiny č. 3 a 5) za vyššího stavu nasycení.

Procento nepropustných ploch

Byla zjištěna závislost mezi hodnotou CN a procentem nepropustných ploch na daném povodí – skupiny povodí č. 2 a č. 4 vykazující vyšší hodnoty CN tedy vykazují rovněž vyšší procenta nepropustných ploch. Může to být dáno vyšší mírou antropogenního ovlivnění těchto povodí. Ve výsledku tento fakt ještě umocňuje nepříznivé odtokové vlastnosti těchto povodí.

Počáteční ztráta

Nejvyšší počáteční ztráta nastává s nejnižším CN, v extrémních případech pak dosahuje až hodnot 150 mm. Počáteční ztráta tak výrazně ovlivňuje nižší odtoky spojené s nižším CN, které mohou nezřídka nabývat i nulové hodnoty. To je dobře dokumentováno hodnotou koeficientu odtoku, která nabývá hodnot od 0 do cca 0,75.

Naopak odtoky extrémní, spojené s vysokou hodnotou CN a vysokým objemem srážky, jsou ovlivněny pouze kosmeticky – počáteční ztráta je v těchto případech oproti celkovému srážkovému úhrnu nízká (nehledě na její podíl z maximální potenciální retence – 10 %, 20 %, nebo 25 %) a nemá tedy na celkový odtok přílišný vliv.

Počáteční ztráta je ve skutečnosti parametrem, který je individuální pro každé povodí. Velmi obtížné určení tohoto parametru však vedlo k jeho generalizaci na 20 % maximální potenciální retence. Testované hodnoty 10 % a 25 % generují pouze malé rozdíly v hodnotách odtoku při nepříznivých odtokových podmínkách (extrémní odtoky). Proto není třeba pokoušet se v těchto případech počáteční ztrátu přesněji stanovit.

Lag Time

Doba zdržení je nepřímo úměrná maximální potenciální retenci, která je závislá na hodnotě CN. Doba zdržení je proto dána (mimo jiné) stupněm nasycení povodí - **s rostoucím CN se její hodnota snižuje a kulminační průtok tak nastane rychleji. Tento fakt ještě umocňuje negativní dopady extrémních průtoků – kulminaci lze očekávat v krátkém čase.** V případech extrémně nízkého CN lze naopak očekávat velmi vysoké doby zdržení. Jelikož se však tento stav týká pouze extrémně příznivých podmínek, a tedy nízkých průtoků, nebylo jeho vysvětlení podrobněji zkoumáno.

Velikost srážky

Extremita srážky hraje pochopitelně při tvorbě odtoku zásadní roli. Zkoumáno bylo 5 srážkových úhrnů, které dosahují následujících extrémních hodnot odtoků:

N002 - 5000 $l/s/km^2$

N005 - 10000 $l/s/km^2$

N020 - 15000 $l/s/km^2$

N050 - 20000 $l/s/km^2$

N100 - 25000 $l/s/km^2$

Nutno zmínit, že **uvedené extrémní hodnoty průtoků jsou vždy vázány na přívalové srážky typů t5 či t6.**

Tvar srážky

Jak již bylo zmíněno, extrémní průtoky se váží pouze k přívalovým srážkám. Srážky rovnoměrné se však s velkou pravděpodobností pojí s vyšším stupněm předchozího nasycení. **Porovnáme-li přívalovou srážku do nenasyceného povodí s rovnoměrnou srážkou do o stupeň nasycenějšího povodí, zjistíme, že jsou generovány velmi podobné hodnoty odtoku.** Medián rovnoměrné srážky je mírně vyšší, extrémy ale lze očekávat po srážce přívalové.

5. ZÁVĚR

Práce na tomto projektu byla vedena výhradně formou počítačových analýz. Její průběh lze rozdělit do několika fází, které probíhaly v odlišných softwarových prostředích.

Stejně jako v každé oblasti vědění, i v oblasti hydrologie je pro správnou interpretaci výsledků třeba porozumět probíhajícím procesům. Právě proto byly v první fázi shromážděny základní poznatky ohledně hydrologického cyklu se zaměřením na srážkoodtokové vztahy. Následovalo studium základů hydrologického modelování a fungování modelu HEC-HMS. Blíže popsány jsou rovněž možné výpočetní metody v čele s metodou CN, která byla pro svou snadnou aplikaci použita i pro výzkum v rámci této práce. Všechny základní informace jsou uvedeny v úvodních kapitolách a mohou být využity jako výukový materiál. Zvláštní přínos to může mít pro případ citlivostní analýzy v modelu HEC-HMS, pro niž dosud není v českém jazyce zpracováno příliš podkladů.

Druhá fáze práce se týkala hledání vstupních dat pro citlivostní analýzu v programu HEC-HMS. Byla využita poskytnutá data ve formě vektorové vrstvy povodí IV. řádu ČR, která byla vytvořena v rámci předcházejících výzkumných projektů. Některé hodnoty bylo nutno doplnit vlastními analýzami v prostředí ArcGIS – tímto způsobem vznikla vrstva procentuálního zastoupení nepropustných ploch. Nalezené jednotlivé hodnoty byly následně Ing. Luďkem Strouhalem, PhD. statisticky zpracovány v programu RStudio.

Během následující fáze modelování bylo spuštěno celkem 675 000 simulací jednotlivých srážkoodtokových scénářů v programu HEC-HMS. Pro modelování republikového rozdělení parametrů bylo využito 5 reprezentativních povodí určených v rámci předchozího výzkumu. Jednou z nevýhod modelování v prostředí HEC-HMS je omezená nabídka možných statistických rozdělení. Kvůli tomu nebylo možné rozdělení hodnot řešených parametrů v rámci ČR zcela věrně namodelovat a tyto hodnoty byly pouze aproximovány nejbližším dostupným rozdělením. Výsledkem modelování jsou DSS soubory, z nichž byly za pomoci Ing. Luďka Strouhala, PhD. a Ing. Lenky Weyskrabové, PhD. extrahovány odtokové hydrogramy a vypočteny jednotlivé odtokové charakteristiky.

Závěrečná fáze práce zahrnovala tvorbu grafických a číselných výstupů v programu RStudio. Grafickou analýzou odtokových charakteristik byly vytvořeny prezentované výstupy včetně posouzení vlivu jednotlivých parametrů (CN, Ia, % Imp, Lag Time) na výsledky modelu.

Výsledky nebyly, z důvodu velkého rozsahu práce, porovnány jinými modely. I přesto práce splnila svůj účel – určila parametry, jejichž hodnoty mají zásadní vliv na modelování v hydrologickém modelu HEC-HMS metodou CN. Jedná se právě o parametr CN (podstatně ovlivněný stupněm předchozího nasycení) a o vlastnosti (průběh, objem) srážky.

Na tuto práci lze navázat dalším výzkumem. Výsledky by bylo vhodné porovnat s jinými hydrologickými modely (zejména fyzikálními, s ohledem na možný rozdíl v generovaných odtokových výškách), případně s modelováním stejných parametrů v modelu HEC-HMS za užití rozdílných metod (komponenty ztráty, směrování, transformace).

Významný vliv na odtok z povodí má dle výsledků této práce stupeň předchozího nasycení povodí. Právě výzkum přesnějšího určení hodnot CN I a CN III (pro jejich určení byl v tomto případě užit vzorec odvozený mimo území ČR) může být jednou z možností, jak dále zpřesnit výsledky modelování metodou CN.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Literatura:

1) BANKS, J.: *Principles of Simulation.* In BANKS, J., ed.: *Handbook of simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998. ISBN 0-471-13403-1. s. 547–570
2) CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., and MAYS, L.W. *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988. 572 s.
3) ČSN 73 6101. *Projektování silnic a dálnic.* Praha: Český normalizační institut, 2004. Třídící znak 736101.
4) FELDMAN, A.: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2000. 148 s.
5) HOUDEK, T.: *Metody stanovení evapotranspirace a její hodnoty v České republice.* České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2012. 64 s.
6) HUBINGER, L.: *Hypodermický a drenážní odtok.* Praha: Univerzita Karlova v Praze, 2011. 50 s.
7) JANEČEK, M.: *Ochrana zemědělské půdy před erozí.* Praha: Powerprint, 2012. 113 s.
8) KAVKA, P. et. al.: *Redakčně upravená periodická zpráva projektu QJ1520265 za rok 2016.* ČVUT v Praze, 2016. 79 s.
9) KEMEL, M. *Klimatologie, meteorologie, hydrologie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01456-8.
10) MÜLLER M., KAŠPAR M., BLIŽŇÁK V.: *Analysis of rainfall time structures on a scale of hours.* 2017. Manuscript submitted for publication in Atmos. Res., under review.
11) PECHLIVANIDIS, I.G. et al.: *Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications.* Global NEST Journal, Vol 13, No 3, 2011. s. 193-214.
12) RIEDL, D., Zachar, D.: *Lesotechnické meliorace*. 1. vyd. Praha: Státní lesnické nakladatelství, 1973. 568 s.
13) SCHARFFENBERG, W.: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*. Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2016. 612 s.

14) WHEATER, H., Jakeman, A., and Beven, K.: *Progress and directions in rainfall-runoff modelling, Modelling change in environmental systems*, New York, 1993. s. 101 – 132.

Datové zdroje:

1) Shapefile vybraných povodí IV. řádu.
2) Databáze ZABAGED.

Internetové zdroje:

1) Synthetic unit hydrographs. [online]. 20.11.2017 [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: http://www.engr.colostate.edu/~ramirez/ce_old/classes/cive322-Ramirez/CE322_Web/comet7/index.htm
2) Hydrologic Modeling Inventory Website. [online]. 22.11.2017 [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: http://hydrologicmodels.tamu.edu/models.htm
3) Soil Water Management. [online]. 27.11.2017 [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: https://www.pioneer.com/home/site/us/agronomy/library/soil-water-mgmt/
4) The Hydrological Cycle | CIVIL ENGINEERING SOLUTION. [online]. 28.11.2017 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: https://civilsolution.wordpress.com/2013/02/06/the-hydrological-cycle/
5) Evapotranspiration. [online]. 28.11.2017 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: http://buddhajeans.com/encyclopedia/evapotranspiration/
6) Schéma oběhu vody-The Water Cycle, Czech, from USGS Water-Science School. [online]. 29.11.2017 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: https://water.usgs.gov/edu/watercycleczech.html
7) Unit Hydrograph Technical Manual - NOHRSC - The ultimate source for snow information. [online]. 14. 12. 2017 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: https://www.nohrsc.noaa.gov/technology/gis/uhg_manual.html

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled a zatřídění některých používaných hydrologických modelů.
Tabulka 2: Hydrologické prvky v modelu HEC- HMS.
Tabulka 3: Možnosti meteorologického modelu HEC-HMS k zadání příčinné srážky.
Tabulka 4: Možnosti výpočtu vlivu vegetace modelem HEC-HMS.
Tabulka 5: Možnosti výpočtu vlivu povrchových depresí v modelu HEC-HMS.
Tabulka 6: Možnosti výpočtu ztráty v modelu HEC-HMS.
Tabulka 7: Možnosti výpočtu transformace v modelu HEC-HMS
Tabulka 8: Možnosti výpočtu základního odtoku v modelu HEC-HMS.
Tabulka 9: Metody výpočtu transformace v úseku povrchového toku v modelu HEC-HMS
Tabulka 10: Možnosti výpočtu zisku/ztráty v úseku toku v modelu HEC-HMS
Tabulka 11: Možnosti přidělení statistického rozdělení parametrům modelu HEC-HMS.
Tabulka 12: Možnosti statistických rozdělení parametrů pro citlivostní analýzu v modelu HEC-HMS.
Tabulka 13: Označení jednotlivých skupin povodí IV. řádu.
Tabulka 14: Průměrné hodnoty jednotlivých charakteristik povodí IV. řádu.
Tabulka 15: Charakteristiky reprezentativních povodí IV. řádu.
Tabulka 16: Slovní popis jednotlivých skupin povodí IV. řádu.
Tabulka 17: Použité výpočetní komponenty.
Tabulka 18: Úhrny uvažovaných návrhových srážek pro jednotlivé skupiny povodí.
Tabulka 19: Použité parametry a způsob jejich vzorkování.
Tabulka 20: Statistické rozdělení parametru CN I.
Tabulka 21: Statistické rozdělení parametru CN II.
Tabulka 22: Statistické rozdělení parametru CN III.
Tabulka 23: Lineární vztah parametrů Ia a CN.
Tabulka 24: Oříznuté hodnoty CN v jednotlivých skupinách povodí.
Tabulka 25: Hodnoty bufferu liniové vrstvy SilniceDalnice
Tabulka 26: Statistické rozdělení parametru % Impervious
Tabulka 27: Výpočet doby zdržení pro všechny stupně nasycení.
Tabulka 28: Statistické rozdělení pravděpodobností doby doběhu v řídících podpovodí.
Tabulka 29: Počet simulačních nastavení v modelu HEC-HMS.
Tabulka 30: Řešené odtokové charakteristiky.
Tabulka 31: Kritéria hodnocení odtoku.
Tabulka 32: Hodnoty CN v závislosti na povodí a stupni předchozího nasycení.
Tabulka 33: Hodnoty Lag Time v závislosti na povodí a stupni předchozího nasycení.
Tabulka 34: Maximální specifický odtok z povodí v závislosti na tvaru srážky a stupni nasycení povodí.
Tabulka 35: Porovnání odtoku ze srážek t1 a t6.
Tabulka 36: Vliv počáteční ztráty a N-letosti srážky na odtoky z povodí č. 1.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Modelované hydrologické procesy
(https://civilsolution.wordpress.com/2013/02/06/the-hydrological-cycle/)
Obrázek 2: Časový průběh intenzity infiltrace
(https://www.pioneer.com/home/site/us/agronomy/library/soil-water-mgmt/)
Obrázek 3: Schematické vyjádření evapotranspirace
(http://buddhajeans.com/encyclopedia/evapotranspiration/)
Obrázek 4: Rozdělení podpovrchových vod
(https://water.usgs.gov/edu/watercycleczech.html)
Obrázek 5: Vizuální reprezentace povodí Býkovice v modelu HEC-HMS.
Obrázek 6: Celková sumární tabulka výsledků v modelu HEC-HMS.
Obrázek 7: Sumární tabulka výsledků pro vybraný hydrologický prvek v modelu HEC-HMS.
Obrázek 8: Grafické znázornění výsledků simulace v podpovodí v modelu HEC-HMS.
Obrázek 9: Časová tabulka výsledků pro daný hydrologický prvek v modelu HEC-HMS.
Obrázek 10: Zobrazení grafů v prohlížečce HEC-DSSVue.
Obrázek 11: Reprezentativní povodí v rámci ČR.
Obrázek 12: Typické tvary 6 hodinových srážek pro území ČR.
Obrázek 13: Hodnoty CN II v jednotlivých skupinách povodí.
Obrázek 14: Reálný a aproximovaný vztah CN I a Ia (10%) pro všechny skupiny povodí.
Obrázek 15: Lineární aproximace vztahu Ia (20%) a CN II pro skupinu povodí č. 5.
Obrázek 16: Hodnoty Ia (10%) pro jednotlivé skupiny povodí.
Obrázek 17: Procento nepropustných ploch v jednotlivých skupinách povodí.
Obrázek 18: Republikové rozdělení parametru doby zdržení v jednotlivých skupinách povodí pro 3 stupně nasycení.
Obrázek 19: Zobrazení výsledků - box plot.
Obrázek 20: Box ploty generovaných hodnot CN v závislosti na skupině povodí a stupni nasycení.
Obrázek 21: Bodový graf generovaných hodnot CN v závislosti na povodí a stupni nasycení.
Obrázek 22: Počáteční ztráta v závislosti na povodí a velikosti počáteční ztráty.
Obrázek 23: Procento nepropustných ploch v závislosti na skupině povodí.
Obrázek 24: Box ploty generovaných hodnot Lag Time v závislosti na skupině povodí a stupni nasycení.
Obrázek 25: Závislost specifického odtoku na tvaru srážky a stupni nasycení povodí.
Obrázek 26: Odtoky z rovnoměrné srážky t1 a přívalové srážky t6.
Obrázek 27: Porovnání vlivu vlastností povodí, velikosti srážky a velikosti počáteční ztráty.
Obrázek 28: Vliv počáteční ztráty a N-letosti srážky na skupině povodí č. 1.
Obrázek 29: Závislost odtokové výšky na vlastnostech povodí, tvaru srážky a velikosti počáteční ztráty.
Obrázek 30: Odtoková výška v závislosti na vlastnostech povodí, N-letosti srážky a stupni předchozího nasycení.
Obrázek 31: Odtokový koeficient pro všechny kombinace vstupních parametrů.

Obrázek 32: Závislost posunu kulminace odtoku na N-letosti srážky a na příslušnosti ke skupině povodí.
Obrázek 33: Závislost posunu kulminace na stavu nasycení povodí, tvaru srážky a velikosti počáteční ztráty.
Obrázek 34: Hodnoty zpoždění kulminace pro skupinu povodí č. 3 a počáteční ztrátu 25 %.