



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

SRÁŽKO-ODTOKOVÝ MODEL POVODÍ KOTOJEDKY

RAINFALL RUNOFF MODEL OF THE KOTOJEDKA RIVER BASIN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniela Černá

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav vodního hospodářství krajiny
Studentka: **Daniela Černá**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Srážko-odtokový model povodí Kotojedky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Základní charakteristikou řešení je sestavení srážkoodtokového modelu povodí řeky Kotojedka pomocí softwaru HEC-HMS a jeho validace použitím doplňujícího výpočtu návrhového hydrogramu povodně dle Čerkašina. Následně odvození N-letých hydrogramů povodně. Sestavení a simulace hydrologického modelu v HEC-HMS bude provedeno pro více aplikací nastavení modelu, resp. budou testovány různé metody výpočtu hydrologické a hydraulické transformace odtoku vody povodím, které budou mezi sebou vzájemně porovnány.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je sestavení, kalibrace a validace srážkoodtokového modelu povodí řeky Kotojedka a následné odvození N-letých návrhových hydrogramů povodně, které mohou potenciálně sloužit jako podklad pro návrh protipovodňových opatření v katastrálním území města Kroměříž.

Seznam doporučené literatury a podklady:

BARTLES M., BRAUER t., HO D., FLEMING M., KARLOVITS G., PAK J., VAN N., WILLIS J., Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual, 2022, U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC), 609 Second Street, Davis, CA 95616-4687.

CLARK, C.O. (1945), Storage and the unit hydrograph, Trans. ASCE, 1419-1446.

ČZÚ, TAČR - TA02020402: Optimalizace vodního režimu krajiny ke snižování dopadů hydrologických extrémů, Praha, 2014.

JANEČEK, M. et al. (2012), Ochrana zemědělské půdy před erozí, metodika, Powerprint, Praha, 1. vyd., 113 s. ISBN 978-80-87415-42-9.

KIRPICH, Z.P. (1940), Time of concentration of small agricultural catchments, Journal of Civil Engineering, ASCE, 10(6), 362-365.

SMELÍK L., UHMANNOVÁ H., FOLTÝNOVÁ L., Webový katalog drsností je doplňkem k běžně používaným tabulkám drsností dle Manninga, 2011.

SOBOTKOVÁ V., CS002 Geografické informační systémy, Návody do cvičení, Tvorba mapy CN, Ústav vodního hospodářství krajiny, VUT FAST v Brně, 2020, Brno.

ŠAMAJ F., VALOVIČ Š., BRÁZDIL R., Denné úhrny zrážok s mimoriadnou výdatnosťou v ČSSR v období 1901–1980, 1985.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 30. 11. 2022

L. S.

doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Bakalářské práce se zabývá modelováním srážko-odtokového procesu v povodí řeky Kotojedky. V povodí neprobíhá žádné kontinuální hydrologické pozorování, proto bylo hlavním úkolem sestavení hydrologického modelu v softwaru HEC-HMS a jeho následná validace použitím doplňujícího výpočtu návrhového hydrogramu povodně podle A. Čerkašina. Dále byly odvozeny N-leté hydrogramy povodně, které mohou potenciálně sloužit jako podklad pro návrh protipovodňových opatření v povodí a přilehlém katastrálním území města Kroměříž. Sestavení a simulace hydrologického modelu bylo provedeno pro více nastavení modelu, resp. byly testovány různé metody výpočtu hydrologické a hydraulické transformace průtoku vody říční sítí, které byly následně mezi sebou porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

HEC-HMS, srážko-odtokový model, kulminační průtok, CN křivky, Clarkův jednotkový hydrogram, doba koncentrace, řeka Kotojedka

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the modeling of the rainfall-runoff process in the Kotojedka river basin. Since there is no continuous hydrological measurements in the catchment, the main task was to develop a hydrological model using the HEC-HMS software and then validate it using the additional calculation of the design flood hydrograph according to A. Čerkašin method. Moreover, a N-year return period flood hydrographs were derived, which can be used as a basis for flood protection measures planning in the river basin area and in the adjacent cadastral area of the Kroměříž city. The creation and simulation of the hydrological model were carried out for several model settings, respectively different methods for the calculation of hydrologic and hydraulic transformation of the water flow in the river network were tested and subsequently compared with each other.

KEYWORDS

HEC-HMS, rainfall-runoff model, peak flow, CN curves, Clark's unit hydrograph, time of concentration, Kotojedka river

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERNÁ, Daniela. *Srážko-odtokový model povodí Kotojedky*. Brno, 2023. 52 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Srážko-odtokový model povodí Kotojedky* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 5. 2023

Daniela Černá

autor

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Srážko-odtokový model povodí Kotojedky* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 5. 2023

Daniela Černá

autor

PODĚKOVÁNÍ

Na těchto řádcích bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Danielovi Martonovi, PhD., nejen za možnost zpracovávat tak zajímavé téma, ale také za poskytnuté podklady, odborné vedení, ochotný a přátelský přístup a především trpělivost při tvorbě této práce.

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	CÍL PRÁCE	3
3	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	4
3.1	KLASIFIKACE HYDROLOGICKÝCH MODELŮ	4
3.2	SOUČASNÉ SRÁŽKO-ODTOKOVÉ MODELY	8
3.3	MODEL HEC-HMS	10
4	METODA	11
4.1	VÝPOČET ZTRÁTY VODY V POVODÍ POMOCÍ METODY SCS CURVE NUMBER	11
4.2	VÝPOČET TRANSFORMACE POVODŇOVÉ VLNY DLE METODY CLARKOVA JEDNOTKOVÉHO HYDROGRAMU	13
4.2.1	Doba koncentrace (Time of concentration).....	15
4.2.2	Koeficient nasycení (Storage coefficient).....	16
4.3	VÝPOČET TRANSFORMACE V ÚSEKU POVRCHOVÉHO TOKU	17
4.3.1	Metoda „Kinematic wave“	17
4.3.2	Metoda „Muskingum“	18
4.4	KONSTRUKCE HYDROGRAMU POVODNĚ DLE ČERKAŠINA	20
5	PRAKTICKÁ APLIKACE	24
5.1	ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ	24
5.2	SESTAVENÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELU	25
5.3	VSTUPNÍ DATA	26
5.3.1	Charakteristiky povodí	26
5.3.2	Charakteristiky toků	29
5.3.3	Hyetogram deště	30
5.4	VÝPOČET TRANSFORMACE ODTOKU VODY V DANÉM ÚSEKU TOKU	33
5.4.1	Metoda „Kinematic wave“	33
5.4.2	Metoda „Muskingum“	33
5.5	KALIBRACE MODELU	34
5.6	VALIDACE MODELU	36

6	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ	39
6.1	SROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH HYDROGRAMŮ POVODNÍ.....	39
6.1.1	Shrnutí kalibrace	39
6.1.2	Shrnutí validace.....	39
6.2	ODVOZENÍ NÁVRHOVÝCH HYDROGRAMŮ POVODNÍ	40
6.2.1	Metoda „Kinematic Wave“ – doba koncentrace dle Kirpiche.....	41
6.2.2	Metoda „Kinematic Wave“ – doba koncentrace dle Hathawaye	42
6.2.3	Metoda „Muskingum“ – doba koncentrace dle Kirpiche	43
7	ZÁVĚR.....	44
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	46
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	49
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	51
11	SEZNAM TABULEK	52

1 ÚVOD

Povodně jsou nejčastěji se vyskytující formou přírodní katastrofy, zahrnují nejen rozlivy řek, ale i pobřežní záplavy. Povodňové události způsobují obrovské škody na zemědělské půdě a infrastruktuře jako jsou silnice, mosty a budovy. [1] V nejhorších případech mohou vést i ke ztrátám na lidských životech.

Dalo by se uvést několik důvodů, proč povodně vznikají. Mezi ty hlavní můžeme zařadit prudké tání sněhové pokrývky, čímž se do řek dostává velké množství vody. Další příčinou jsou dešťové srážky, které mají buď vysokou intenzitu, nebo dlouhou dobu trvání. Důležité je zmínit, že výskyt srážek je velmi nahodilý jev, který se obtížně předpovídá. Z tohoto důvodu se mohou v různých oblastech vyskytovat s různou intenzitou. Faktory, které ke srážkám vedou, jsou známy. Jde o pohyb frontálních tlakových útvarů, množství vodních par v atmosféře, vliv orografie a další. I přes dobrou znalost příčin vzniku srážek včetně moderního monitoringu, je jejich předpověď stále předmětem výzkumu.

V posledních letech je velice diskutovaným a zkoumaným tématem globální klimatická změna. Ta je podle mnohých studií, která vývoj klimatu zaznamenávají, způsobená zejména antropogenní činností ve formě vysoké produkce emisí skleníkových plynů. Ze studií vyplývá, že změna klimatu zvyšuje pravděpodobnost výskytu extrémních hydrologických jevů, jednak může v některých oblastech přispívat k intenzivnějším projevům sucha, anebo naopak může vést právě k již zmiňovaným intenzivnějším srážkám, které způsobují povodně. Potvrzuje to například pátá a šestá hodnotící zpráva [2] a [3], kterou v roce 2015 resp. 2021 zveřejnil Mezivládní panel pro změnu klimatu – IPCC. Vliv na změnu klimatu a tím zvýšení rizika povodní mají především lidské aktivity, v jejichž důsledku dochází k odlesňování a dalším změnám v krajině, což může ovlivnit kromě jiného i povrchový odtok vody z povrchu země.

Naopak lidé mohou svými činnostmi přispět i k prevenci proti povodním. Když pomineme redukci skleníkových plynů pro zpomalení klimatické změny, tak se jedná o práci vodohospodářů, kteří se zabývají účinným plánováním a řízením odtokových poměrů. Základ řízení odtoku vody z povodí vychází z hydrologických, resp. srážko-odtokových modelů, pomocí kterých lze odvodit odtok vody z povodí v podobě hydrogramu povodně, tedy kulminačního průtoku, tvaru a objemu povodňové vlny. Modelováním dochází k simulaci hydrologického cyklu a odhadům povodňových vln, které následně slouží jako podklad při navrhování účinných protipovodňových opatření.

Srážko-odtokový model je tedy důležitým nástrojem pro porozumění a analýzu srážko-odtokového procesu, který je klíčovým prvkem hydrologického cyklu v krajině. Jedná se o velice složitý proces, který se zabývá interakcí mezi atmosférickými srážkami a povrchovým odtokem.

Je však třeba poukázat na zásadní fakt: *„Žádný model nemůže sám o sobě stát při řešení problémů reálného světa. Předpokladem jsou vždy dva komponenty, model a adekvátní vstupní data. Je zřejmé, že modely selžou, tedy podávají nespolehlivé výsledky, pokud vstupy do modelu nesplňují základní požadavky (přesnost a spolehlivost dat).“*. Jedná se o fakt, který je nezbytný zmínit nejen pro modelované aplikace, ale také pro kalibraci modelu. [4]

Výše popsané platí pro povodí toku Kotojedka, která ústí do řeky Moravy ve městě Kroměříž. Povodí Kotojedky se rozprostírá na pohoří Litenčické pahorkatiny a členité vrchoviny Chřiby ve Zlínském kraji jihozápadně od města Kroměříž. Právě ochrana Kroměříže proti velké vodě je dlouho diskutovaným tématem a zahrnuje také odhad hydrogramů povodní v řece Moravě a na přítocích do ní zasahujících do katastrálního území města. Mezi nejvýznamnější povodně, které se zde odehrály patří události z roku 1997. Ty upozornily na nevyhnutelnou nutnost začít s budováním protipovodňových opatření, která by zabránila, aby se situace v takovém rozsahu opakovala. [5]

Bakalářská práce je koncipována tak, že v první části je uvedený teoretický popis týkající se hydrologického modelování, přesněji je zde charakterizováno rozdělení modelů. Dále je zde uveden přehled vybraných srážko-odtokových modelů, které se v současnosti používají a jejich stručný popis. Součástí teoretické pasáže je také vylíčení použitých metod a principů v části praktické. Samotná praktická část pak spočívala ve vyřešení jednotlivých úloh, které jsou popsány v Cíli práce (kapitola 2).

2 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem bakalářské práce je vytvoření srážko-odtokového modelu pro povodí řeky Kotojedky v softwaru HEC-HMS. Pro schematizované povodí vyzkoušet různé možnosti hydrologické a hydraulické transformace odtoku vody závěrovým profilem. Při výpočtech využít dva způsoby výpočtu doby koncentrace a dvě metody hydraulické transformace.

Pro zpracovaný model je nutné provést kalibraci a validaci. Kalibrace spočívá v nalezení kalibračního parametru α tak, aby se dosáhlo požadovaného kritéria, kterým je shoda s návrhovým Q_{100} . Pro validaci modelu pak využít doplňující výpočet hydrogramu povodně podle Alexandra Čerkašina.

Na závěr práce pro kalibrovaný a validovaný model odvodit hydrogramy povodně pro různé N-letosti, které budou sloužit jako podklad pro návrh protipovodňových opatření v povodí a přilehlé části intravilánu města Kroměříž.

3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Simulace srážko-odtokového procesu využívající počítačové modely rychle pokročila a modelování pomocí softwarových produktů je dnes nezbytnou součástí pro pochopení vlivu lidské činnosti na hydrologický režim řek a navrhování ekologicky udržitelných přístupů k hospodaření s vodou. Potřeba modelovacích nástrojů je stimulována a někdy dokonce vynucována mnoha činnostmi, které vyžadují plánování a řízení odtoku vody z povodí, od včasného varování před povodněmi, přes vymezení oblastí ohrožených záplavami, až po management vodní bilance v povodí podle národních a regionálních plánů. [6]

Modelování srážko-odtokového procesu s omezenými nebo dokonce žádnými daty, jeho kvantitativní ohodnocení a predikce procesů tvorby plošného odtoku a následného přenosu přímého odtoku do uzávěrového profilu představuje jednu z nejnáročnějších oblastí hydrologie. Běžně používaným nástrojem pro odhad hydrologické odezvy povodí v důsledku srážek je srážko-odtokové neboli hydrologické modelování. Výběr modelu pak závisí na vlastnostech povodí a cíli hydrologické predikce v povodí. [6]

3.1 KLASIFIKACE HYDROLOGICKÝCH MODELŮ

Hydrologické modely je užitečné z různých důvodů klasifikovat. Klasifikace může být nápomocná například při výběru vhodného modelu pro danou aplikaci, nebo při posouzení dostupnosti modelu. WMO (World Meteorological Organisation) uvádí klasifikaci podle následujících kritérií:

- účelu použití modelu,
- typu simulovaného systému,
- hydrologického procesu, který má být zhodnocen,
- stupně kauzality,
- požadované časové a prostorové diskretizace. [4]

Rozdělení podle účelu aplikace modelu

Na základě toho hlediska se modely dělí na 3 kategorie:

1. modely používané v operativní hydrologii
2. modely určené pro projekční a plánovací činnost
3. modely využívané ve výzkumu

Rozdíl mezi prvními dvěma kategoriemi vyplývá především z uvažovaného časového kroku. Záležitosti týkající se operativní hydrologie souvisí se současnou situací, s danými existujícími systémovými strukturami a výchozími podmínkami. [4] Vstupní data tvoří stavové veličiny a okamžité údaje z automatických meteorologických stanic nebo radarů. [7] V praxi se jedná o sběr a zpracování dat v reálném čase, dále o předpovídání hydrologických proměnných (průtoky řek, hladiny vody) a řízení vodních stavů. [4]

Ve druhém případě, zabývající se projekční činností, se jedná zásadně o dlouhodobější pohled, kdy modely vyžadují dlouhodobé predikce hydrologických poměrů v časovém horizontu 10-100 let. [4] Může se jednat o řešení protipovodňové ochrany, jako je např. stavba přehrad, poldrů a dalších hydrotechnických a hydromelioračních opatření. [7]

Třetí kategorie představuje využití hydrologického modelu nejen pro jeho další vývoj, ale i výzkum jednotlivých komponent srážko-odtokového procesu a jejich přesnější popis. Pro tyto účely často bývají zřizována tzv. experimentální povodí s nadstandardní sítí měřicích stanic. [7]

Rozdělení podle typu simulovaného systému

Členění modelů z hlediska typu systému je podle WMO:

1. elementární systém
 - 1.1 hydrotop (elementární jednotka s konstantními charakteristikami)
 - 1.2 méně až středně velké odtokové plochy
 - 1.3 zvodnělé vrstvy (systém podzemních vod)
 - 1.4 říční síť
 - 1.5 nádrže a jezera
2. komplexní systémy
 - 2.1 systém říčních sítí, nádrží a jezer
 - 2.2 povodí nebo velké odtokové plochy

Rozdělení podle hydrologického procesu

Hydrologické procesy, které je potřeba vzít v úvahu při klasifikaci modelu, jsou:

1. vlhkost půdy, evapotranspirace a další související proměnné
2. podzemní voda, hladina, průtok
3. průtok a vodní stav v korytě
 - 3.1 s časovým krokem ≤ 1 den
 - 3.2 s časovým krokem > 1 den
4. teplota vody, ledové podmínky a další související proměnné
5. splaveniny a související parametry
6. kvalita vody

Rozdělení podle stupně kauzality

Kauzalita je dána vztahem mezi příčinou a jejím důsledkem. Podle tohoto kritéria se modely dělí na následující kategorie:

1. deterministické
 - 1.1 fyzikální
 - 1.1.1. distribuované
 - 1.2 koncepční
 - 1.2.1. distribuované
 - 1.2.2. celistvé
 - 1.3 empirické
 - 1.3.1. celistvé
2. stochastické
 - 2.1 pravděpodobnostní
 - 2.2 s generováním časových řad

Deterministické modely jsou vyjádřeny vztahem závislých proměnných (výstupy) a nezávislých proměnných (vstupy). Existuje celá řada deterministických modelů, které se odlišují svojí strukturou, fyzikálním přístupem či časovou a prostorovou diskretizací. [4] Fyzikální deterministické modely jsou založené na přesně definovaných fyzikálních vztazích a mají snahu respektovat principy zachování hmoty, hybnosti a energie. Koncepční deterministické modely předpokládají, že k prostorovým změnám stavových veličin dochází pouze v určitých reprezentativních bodech. Tyto modely popisují hlavní procesy hydrologického cyklu, jako je intercepce, evapotranspirace, infiltrace a proudění podzemní vody atd. Podle účelu se volí i délka časového kroku Δt , kdy pro účely hydrologické bilance se volí obvykle $\Delta t \geq 1$ den, pro účely modelování jednotlivých krátkodobých hydrologických procesů je Δt voleno menší. [8] Empirické deterministické modely berou v úvahu pouze empiricky odvozený vztah mezi vstupními a výstupními hodnotami. [4]

Stochastické modely neberou v úvahu princip kauzality, tedy neobsahují vazbu mezi příčinou a důsledkem. Jedna z podkategorií těchto modelů jsou tzv. pravděpodobnostní modely, které obecně představují určité pravděpodobnostní rozdělení pozorovaných hydrologických proměnných, jako jsou například maximální a minimální průtoky, vodní stavy či podzemní odtoky. Druhou podkategorií stochastických modelů jsou modely s generováním časových řad, které lze použít pro extrapolaci časové řady pozorovaných hydrologických proměnných. [4]

V praxi se velmi často využívá deterministických i stochastických přístupů. Stochastická složka je přítomna ve většině modelů v oblasti projekční činnosti vodohospodářských staveb, ale někdy se může využít i v operativní hydrologii. Obecně lze však konstatovat, že deterministický přístup v současné době převažuje. [7]

Rozdělení podle požadované časové a prostorové diskretizace

Volba vhodného časového kroku v modelovací úloze většinou vychází z účelu aplikace modelu. Míry časové diskretizace mohou být v následujících časových krocích:

1. hodinových
2. denních
3. týdenních
4. měsíčních

Další rozdělení lze provést, jak již bylo dříve zmíněno podle délky časového kroku na modely bilanční (kontinuální) s delším časovým krokem ($\Delta t \geq 1$ den) a na modely epizodní (diskrétní) s časovým krokem simulujícím kratší hydrologický proces. [8] Pro povodňové a erozní studie bývají běžně vyžadovány časové kroky od jedné hodiny do jednoho dne, zatímco pro jiné účely se často akceptují delší časové kroky. [4]

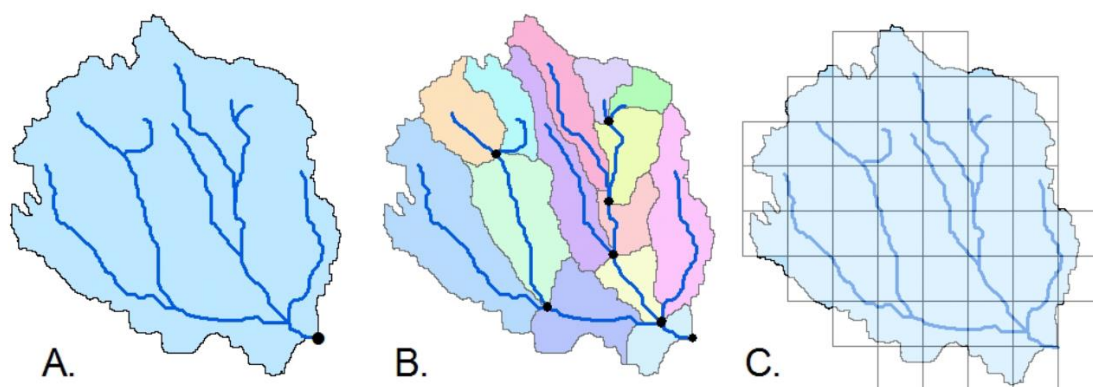
Podle prostorové diskretizace se v zásadě rozlišují tyto kategorie modelů:

1. celistvé
2. semi-distribované
3. distribuované

Celistvé modely neberou prostorovou variabilitu parametrů povodí v úvahu. Používají se průměrné hodnoty, které jsou vztahovány k celému nebo dílčímu povodí. Celistvý model je navržen tak, aby simuloval celkový odtok a proudění v místě výtoku z povodí (viz obrázek 1A), nikoliv konkrétní průtoky v povodí. [9]

Semi-distribované modely jsou variací celistvých modelů s charakteristikou modelů distribuovaných. Povodí je rozděleno na menší oblasti, jak je znázorněno na obrázku 1B, pro které jsou přiřazeny různé parametry. Dílčí oblasti lze rozlišit mnoha způsoby, např. sklonem, půdním druhem či vegetačním pokryvem. [9]

Distribuované modely zohledňují prostorovou variabilitu vstupních parametrů, jedná se o nejsložitější princip z výše uvedených. Tento typ prostorové diskretizace rozděluje proces modelu tzv. gridovou sítí (čtvercovou nebo trojúhelníkovou), kdy každý grid má odlišnou hydrologickou odezvu. Výpočet pro každou buňku mřížky poskytuje podrobné informace o odtoku v různých bodech povodí (viz obrázek 1C). [9]



Obrázek 1: Schéma prostorové diskretizace v modelech. A: celistvý model, B: semi-distribovaný model, C: distribuovaný model [9]

3.2 SOUČASNÉ SRÁŽKO-ODTOKOVÉ MODELY

V současné době existuje velké množství různých srážko-odtokových modelů, které se využívají pro modelování povodňových průtoků. Jejich vznik byl spojen mimo jiné i s rozvojem výpočetní techniky v posledních desetiletích. V této kapitole je uveden přehled nejznámějších modelů, používaných jak v zahraničí, tak v České republice. V našich podmínkách se v praxi využívají především modely HYDROG a AQUALOG, dále pak MIKE-SHE, DesQ-MaxQ nebo KINFIL.

Model HydroCAD

Jedná se o hydrologický model, který je založený na principu CN křivek. Uživatel může s využitím tohoto softwaru ověřit, zda je říční síť daného povodí kapacitně dostatečná, předpovídat výskyt povodňových vln a také vyhodnotit alternativy návrhu řešení hydraulických objektů (jez, propustek). [10]

Model KINEROS

KINEROS, jako deterministický fyzikální model, zkoumá množství odtoku a eroze, simuluje směrování povrchového odtoku a popisuje i procesy intercepce a infiltrace. Jedná se o distribuovaný model, který k simulaci proudění používá jednorozměrné kinematické rovnice. KINEROS umožňuje prostorovou variaci parametrů srážek, infiltrace, odtoku a eroze. Model je vyvíjen Ministerstvem zemědělství Spojených států amerických. [11], [12]

Model SMODERP 2D

Starší verzí modelu SMODERP 2D je SMODERP 1D, který byl určen ke stanovení charakteristik plošného odtoku v 1D profilech řešeného svahu. SMODERP 2D je vyvíjen od konce osmdesátých let na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Jedná se o distribuovaný epizodní hydrologický model, kde je samotný výpočet řešen na pravidelné rastrové síti. Mezi tři základní složky, které jsou zde řešeny, patří infiltrace do půdy, efektivní srážka, přitekklé a odtekklé množství. [13]

Model TOPMODEL

Tento model je především zaměřen na simulaci odtoku z proměnlivých zdrojových ploch povodí. TOPMODEL se řadí do kategorie semi-distribuovaných modelů, který k rozdělení povodí využívá plošné rozdělení půdních vlhkostí a topografii terénu. Kromě simulací historických dat generuje i srážkové epizody z daného rozdělení intenzity a trvání dešťů. [8], [9]

Model EROSION 2D/3D

Obě tyto verze modelu (2D a 3D) byly koncipovány pro podmínky střední Evropy a obě mají stejný teoretický základ. Rozdíl spočívá v tom, že EROSION 2D simuluje odtok a erozi pouze z jednotlivého svahu, zatímco EROSION 3D z celého povodí, které je děleno čtvercovou (gridovou) sítí. Jedná se o modely fyzikálně založené, jejichž výhodou je minimální počet vstupních parametrů a kompatibilitnost s geografickými informačními systémy (GIS). [10]

Model HYDROG

Model je vyvíjen od roku 1991 a jeho autorem je profesor Miloš Starý z VUT v Brně. HYDROG je srážko-odtokový distribuovaný model určený k simulaci povodňových situací povodí, operativní předpovědi průtoků v říční síti a operativnímu řízení vodohospodářských děl. Při srážko-odtokovém modelování respektuje počáteční ztrátu infiltrací. V rámci ČHMÚ je v současné době používán pro výpočet předpovědí na územích působnosti poboček v Ostravě a Brně, pro toky: Svatka, Svitava, Bečva, Odra a Opava. [14]

Model AQUALOG

Dalším srážko-odtokovým modelem využívaným u nás je modelový systém AQUALOG. Na ČHMÚ se používá k operativní předpovědi v povodí Labe a Vltavy. Tento model má však veliké uplatnění i v zahraničí, kdy je v anglických zdrojích uváděn jako SAC-SMA. Ve světě se jedná o nejrozšířenější a nejpoužívanější model. Je možné jej charakterizovat jako koncepční fyzikální model, kde je povodí rozděleno na několik uspořádaných zón, respektive nádrží. Voda vstupující do systému je buď v jednotlivých zónách (nádržích) zadržována, odčerpávána procesem evapotranspirace, infiltrována do dalších níže položených zón, nebo odváděna do toku. [14]

Model MIKE-SHE

Model MIKE-SHE je vyvíjen a rozšiřován dánskou společností DHI Water & Environment. V nejjednodušším případě může tento software k modelování použít koncepční princip. Pro pokročilé aplikace pak může MIKE-SHE simulovat hydrologické procesy pomocí fyzikálních metod. Jedná se o poměrně komplexní systém, který umožňuje zapojení komponent jako je např. transport sedimentů, řešení závlah, eroze atd. [15]

Model DesQ-MaxQ

Hydrologický model DesQ-MaxQ vyvinul profesor František Hrádek. Model je určen pro stanovení návrhových charakteristik povodňových vln v nepozorovaných profilech malých povodí vyvolaných přívalovými dešti a pro výpočet ovlivnění maximálních průtoků a objemů povodňových vln změnou charakteristik povodí. [16]

Model KINFIL

Jedná se o model, který je zařazen do kategorie distribuovaných fyzikálních modelů a je založen na teorii infiltrace přívalových dešťů a transformace přímého odtoku kinematickou vlnou. Tento model využívá fyzikálně-geometrické, hydraulické a klimatické parametry povodí, které se dají při absenci přímých pozorování určit z mapových podkladů. KINFIL je výhradně určen ke stanovení návrhových průtoků pro různé scénáře, které jsou dány změnou kultur, odlesnění urbanizací aj. [14]

3.3 MODEL HEC-HMS

Srážko-odtokový model HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) je software vyvinutý v americké armádě (U.S. Army Corps of Engineers). Jedná se o pokračovatele známého modelu HEC-1, který byl vyvíjen od 60. let a jehož základní rámec je velmi podobný. Výpočty v HMS se provádějí v jednotkách soustavy SI, ale uživatel může zvolit pro zadání vstupů a zobrazení výstupů i jednotky v americkém běžném systému U.S. customary units. [17]

Provedení simulace pomocí HEC-HMS vyžaduje specifikaci tří složek dat. První složka je označena jako „Basin Model“ a obsahuje parametry týkající se hydrologických prvků, ty mohou být: subbasin (dílčí povodí), routing reach (směrování úseku vodního toku), junction (soutok dvou nebo více vodních toků), reservoir (nádrž) a další. Druhá složka, označena jako „Meteorologic Model“, sestává z meteorologických dat a informací potřebných k jejich zpracování. Třetí sada, označená jako „Control Specifications“, definuje časový interval simulace. [17]

HEC-HMS zahrnuje mnoho tradičních postupů hydrologické analýzy, jako jsou například jednotkové hydrogramy, ale nabízí i postupy nezbytné pro nepřetržitou simulaci včetně evapotranspirace, tání sněhu a určování vlhkosti půdy. K dispozici jsou dále doplňkové analytické nástroje pro optimalizaci modelu, předpovídání proudění, zmenšení hloubky, posouzení nejistoty modelu, eroze a transportu sedimentů a kvality vody. [18]

Jeho velkou výhodou je bezpochyby volná dostupnost, rozsáhlá komunita uživatelů, dále snadná schematizace povodí s využitím GIS a možnost výběru více metod řešení transformace srážek v povodí a pohybu v korytech.

4 METODA

4.1 VÝPOČET ZTRÁTY VODY V POVODÍ POMOCÍ METODY SCS CURVE NUMBER

Jedná se o jednoduchou a relativně přesnou metodu, která byla odvozena v USA pro potřeby vládní agentury Soil Conservation Service (SCS). Tato metoda reprezentuje jednoduchý srážko-odtokový model se vstupními údaji, které se stanoví poměrně snadno. Model je použitelný pro určení objemu přímého odtoku a kulminačního průtoku způsobeného návrhovým přívalovým deštěm o zvolené pravděpodobnosti výskytu v zemědělsky využívaných povodích, nebo v jejich částech o velikostech do 10 km². [10]

Podle [19] model SCS Curve Number odhaduje efektivní srážku, která přispívá k přímému odtoku, jako funkci kumulativní srážky, půdního pokryvu, využití půdy a předchozí vlhkosti pomocí následující rovnice:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (4.1)$$

kde P_e efektivní srážka [mm],
 P kumulativní (celková) srážka [mm],
 I_a počáteční retence (počáteční ztráta) [mm],
 S potenciální maximální retence [mm].

Platí, že dokud kumulativní srážka P nepřekročí hodnotu počáteční retence v povodí I_a , tak bude efektivní srážka P_e a tím i odtok nulový.

Z analýzy mnoha experimentů byl vyvinut empirický vztah pro stanovení počáteční ztráty:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (4.2)$$

kde I_a počáteční retence (počáteční ztráta) [mm],
 S potenciální maximální retence [mm].

Potenciální maximální retence S je vyjádřena pomocí čísel odtokových křivek CN na základě následující rovnice:

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad (4.3)$$

kde S potenciální maximální retence [mm],
 CN číslo odtokové křivky [-].

Pro výpočet výsledného CN celého povodí se postupuje podle vztahu:

$$CN = \frac{\sum P_i \cdot CN_i}{P_i} \quad (4.4)$$

kde CN číslo odtokové křivky pro celé povodí [-],
 P_i plocha dílčího povodí [km²],
 CN_i číslo odtokové křivky dílčího povodí [-].

Přímý odtok zahrnuje odtok povrchový a hypodermický (podpovrchový). Právě pomocí čísel odtokových křivek – CN se stanovuje podíl přímého odtoku na celkovém. Vyšší hodnoty CN vyznačují větší pravděpodobnost, že se jedná o odtok povrchový. [10]

Základem pro stanovení hodnot CN pomocí softwaru ArcMap byl dokument [20]. Postup určení čísel odtokových křivek spočívá v řešení následné posloupnosti bodů:

1. Vygenerování sloupce HPJ

Do ArcToolboxu v ArcMapu se přidá nový nástroj BPEJ.tbx, pokud je ve vrstvě BPEJ.shp kód BPEJ psaný bez teček (obsahuje 5 znaků), nebo nástroj BPEJ2.tbx v případě, že je kód BPEJ naopak psaný s tečkami (obsahuje 7 znaků). [20]

Dále je potřeba, aby měla vrstva BPEJ.shp definovaný souřadný systém S-JTSK. Je také nutné zkontrolovat, zda tato vrstva obsahuje sloupec s názvem TxtMemo, bez nějž by nově vložený nástroj nebyl funkční. Pokud sloupec nemáme, tak vytvoříme nový a zkopírujeme do něj hodnoty ze sloupce BPEJ. [20]

Ve sloupci TxtMemo označíme hodnoty značící BPEJ. Nachází se zde i hodnoty, které pětimístný kód BPEJ nepředstavují (99 – veškeré plochy, kde neprobíhá eroze – lesy, vodní plochy, ostatní plochy). Když máme hodnoty vybrané, tak v ArcToolboxu otevřeme skupinu nástrojů BPEJ.tbx nebo BPEJ2.tbx a spustíme nástroj Model. V rozbalovací liště zvolíme vrstvu BPEJ.shp a dáme OK. Tak nám vzniknou nové sloupce HPJ, B, B2, B3, B4 a B5. [20]

2. Příprava vrstev pro výpočet průměrného čísla CN křivky

Je nutné, aby všechny potřebné vrstvy, které budou vstupovat do výsledné vrstvy CN.shp byly ořezány podle hranice zájmového území. Dále, aby se samotné prvky ve vrstvách LESY.shp, INTRAVILAN.shp a LPIS.shp nepřekrývaly. Veškeré vrstvy, které se budou slučovat, musí obsahovat sloupec s názvem KULTURA a v něm obsažený kód kultury. [20]

Ve vrstvě BPEJ.shp se vytvoří nový sloupec HSP, do kterého se vepíší patřičné hodnoty určené pomocí převodní tabulky (viz [20]) na základě HPJ. Hodnotám ve sloupci BPEJ, které neznačí číslo BPEJ (99, aj.), se přiřadí „N“ jako neidentifikované plochy – lesy, nádrže atd. [20]

Pokud se vrstva INTRAVILAN.shp překrývá s vrstvou LPIS.shp, tak se za pomocí nástroje Erase z vrstvy INTRAVILAN.shp vymaže vrstva LPIS.shp. Následně se do vrstvy INTRAVILAN.shp vepíše číselný kód pro intravilán 31 do sloupce KULTURA. [20]

Pro vytvoření vrstvy LESY.shp se zjednodušeně uvažuje, že veškeré kódy 99 značí les, ačkoliv se může jednat i o plochy vodní či ostatní. Ve vrstvě BPEJ.shp se tedy označí kódy 99 a z označených prvků se vyexportuje nová vrstva LESY.shp. Zároveň se zde vytvoří sloupec KULTURA a vepíše se číselný kód pro lesy 21. [20]

Poté se postupně spojí vrstvy pomocí nástroje Update. Nejdříve se sloučí vrstvy INTRAVILAN.shp a LESY.shp. Dále se nově vzniklá vrstva INTRAVILAN_LESY.shp spojí s vrstvou LPIS.shp a vytvoří se tak vrstva LPIS_INTRAVILAN_LESY.shp. [20]

Vrstva OSTATNÍ_PLOCHY, která představuje zbývající plochy pozemků, se pak vytvoří tak, že se pomocí nástroje Erase vymaže vrstva LPIS_INTRAVILAN_LESY.shp z polygonu zájmového území. Opět dopíšeme kód do sloupce KULTURA. Pro ostatní plochy je to číselná hodnota 30. [20]

Výsledná vrstva využití zájmového území POKRYV.shp vznikne sloučením výše popsaných vrstev – LPIS_INTRAVILAN_LESY a OSTATNÍ_PLOCHY za pomocí nástroje Merge. Je nutné v téhle vrstvě provést kontrolu, zda jsou v celém sloupci KULTURA hodnoty větší než nula. Nesmí zde být nula ani prázdný řádek. To samé platí pro sloupec HSP ve vrstvě BPEJ.shp. [20]

Sloučením vrstvy POKRYV.shp a BPEJ.shp pomocí nástroje Union vznikne vrstva CN.shp, ve které se vytvoří dva nové sloupce HSP_KUL a CN. Do sloupce HSP_KUL se sloučí kód HSP a kód kultury pokryvu. Do sloupce CN se ručně vepíší příslušné hodnoty CN určené na základě HSP a kódu kultury z tabulky (viz [20]). Kultura s kódy 5, 10, 11, 12 je brána jako kultura s kódem 2 (orná půda) a kódy 91, 98 jsou uvažovány s kódem 21 (les – porost bez rozlišení). [20]

Je vhodné provést barevnou kategorizaci dle sloupce CN, dále u všech prvků zrušit hranice a ponechat pouze barevnou výplň. [20]

3. Výpočet průměrného CN dílčích povodí

Pro výpočet průměrného CN jednotlivých povodí se používá zonální statistika (nástroj Zonal Statistic as Table). Jako vstup je ovšem ale potřebná rastrová vrstva, která se vytvoří z vrstvy CN.shp pomocí nástroje Feature to Raster. Vznikne tak rastrová vrstva CN_raster.aux, která se společně s vrstvou hranic povodí IV. řádu použije do již zmiňované zonální statistiky. Jako výstup vznikne tabulka, kde sloupec MEAN značí průměrná čísla odtokových křivek CN. [20]

4.2 VÝPOČET TRANSFORMACE POVODŇOVÉ VLNY DLE METODY CLARKOVA JEDNOTKOVÉHO HYDROGRAMU

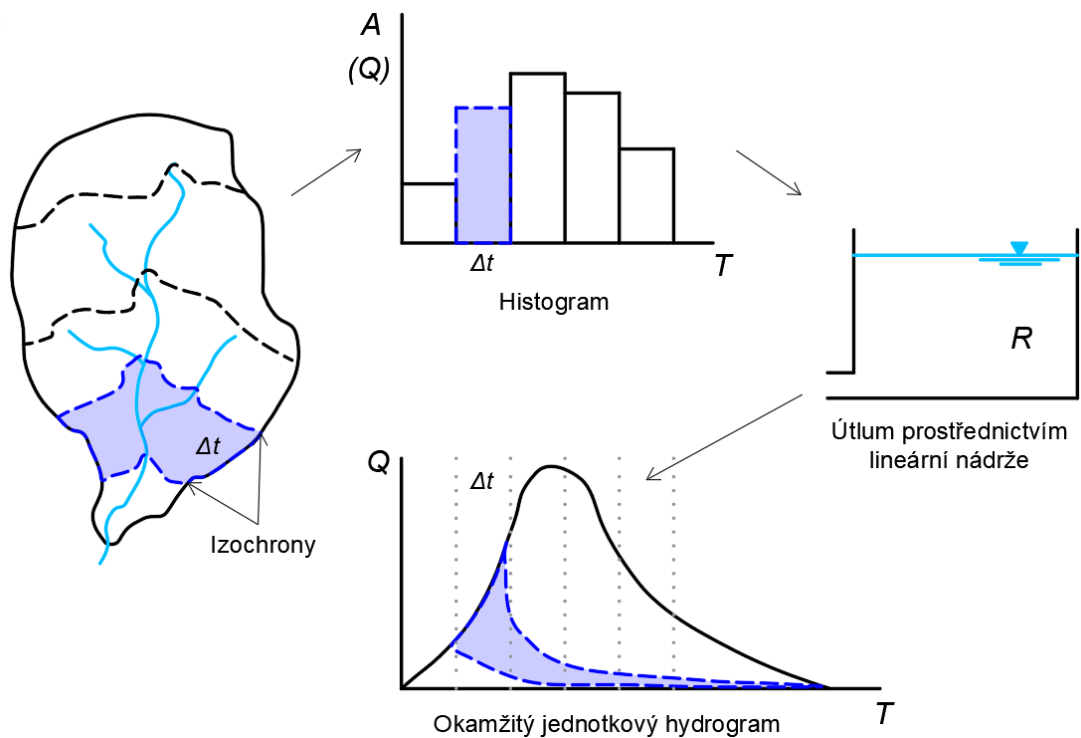
Transformační metoda Clarkova jednotkového hydrogramu byla původně navržena C. O. Clarkem v roce 1945. [21] Clarkův jednotkový hydrogram ztělesňuje dva základní rysy srážko-odtokového procesu povodí (obrázek 2), převzato z [22]:

- transformaci pohybu vody pomocí časoprostorové metody popsané histogramem neboli četností odtoku vody z dílčí části povodí a dobou koncentrace t_c
- útlum prostřednictvím akumulace v lineární nádrži (koeficient nasycení R)

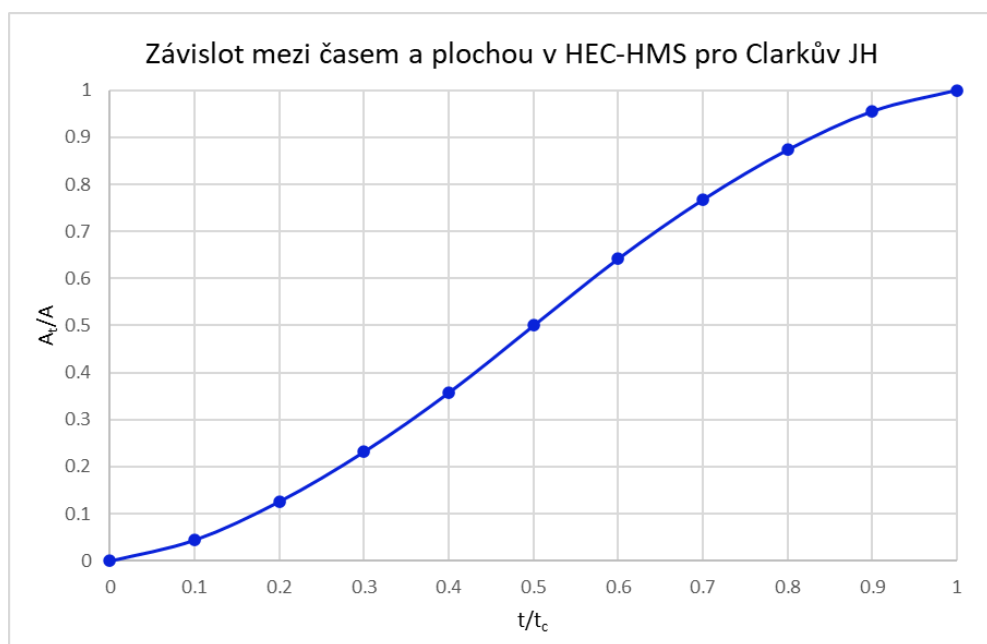
Transformační metoda Clarkova jednotkového hydrogramu v softwaru HEC-HMS využívá předdefinovanou standardizovanou křivku závislosti přispívající plochy a času, viz obrázek 3 (převzato z [22]). Ze studií organizace Hydrologic Engineering Center (například [23]) vychází, že tahle závislost mezi časem a plochou představuje časové rozložení adekvátně pro většinu povodí. Rovnice popisující tento vztah vypadá následovně:

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1,414 \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1,5} & \text{pro } t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1,414 \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1,5} & \text{pro } t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad (4.4)$$

kde A_t kumulativní plocha přispívající v čase t ,
 A celková plocha povodí,
 t_c doba koncentrace.



Obrázek 2: Clarkův jednotkový hydrogram



Obrázek 3: Závislost mezi časem a plochou v HEC-HMS pro Clarkův jednotkový hydrogram

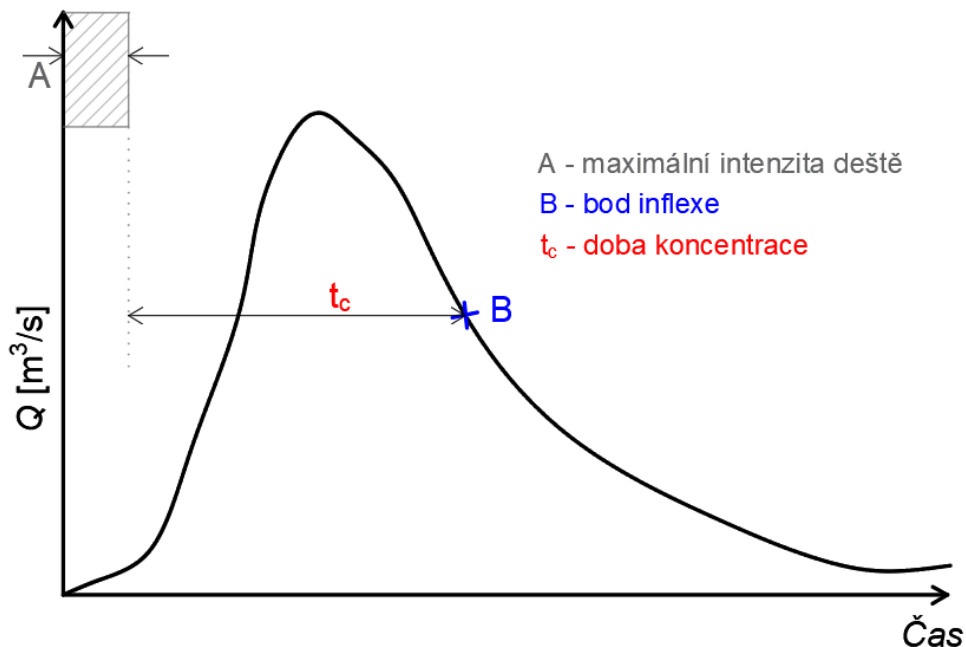
4.2.1 Doba koncentrace (Time of concentration)

Doba koncentrace, jeden z nejdůležitějších hydrologických parametrů pro výpočet a modelování odtoku, je definována jako doba potřebná k tomu, aby se kapka deště dostala z hydraulicky nejvzdálenějšího místa povodí do jeho výtoku. [22]

Hydraulicky nejvzdálenější místo v povodí je bod s nejdelší dobou do běhu do výtoku povodí, nejedná se nutně o nejvzdálenější bod z povodí. Obecně je doba koncentrace aplikována pouze pro povrchový odtok. [24]

Existuje mnoho faktorů, které dobu koncentrace ovlivňují. Mezi ně patří např. tvar povodí a terénu, využití půdy, přítomnost přírodních kanálů či umělých odvodňovacích systémů. [22]

V analýze hydrogramů je doba koncentrace doba od konce přebytečných srážek do bodu na klesající větvi hydrogramu (inflexní bod), kde začíná křivka recese neboli poklesu – viz obrázek 4 (převzato z [22]). [24]



Obrázek 4: Doba koncentrace v hydrografické analýze

Přesné odhady doby koncentrace je obecně obtížné provést. K dispozici je několik vztahů pro výpočet doby koncentrace jako funkce vybraných parametrů povodí. Většina vzorců vychází z empirických poznatků, a proto mají poněkud omezenou hodnotu. Alternativním přístupem k výpočtu doby koncentrace je rozdělení hlavního toku na několik dílčích částí toku a stanovení tak vhodné úrovně průtoku pro každou část. [25]

Výpočty doby koncentrace jsou součástí rutinní praxe inženýrské hydrologie. Doba koncentrace je totiž klíčovou složkou pro metody používané ke stanovení odtoku malých povodí. Většinou se vzorce vztahují ke sklonu a délce toku, dále srážkám a parametrům drsnosti. [25]

Známým vztahem pro výpočet doby koncentrace, který se vztahuje ke sklonovým a délkovým parametrům je Kirpichův vzorec (rovnice 4.5), použitelný pro malá zemědělská povodí do 80 ha. [25]

$$t_c = \frac{0,06628 \cdot L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (4.5)$$

kde t_c doba koncentrace [hod],
 L délka údolnice [km],
 S sklon údolnice [m/m].

Dalším obdobným vztahem pro výpočet doby koncentrace je vzorec podle Hathawaye (rovnice 4.6). [25]

$$t_c = \frac{0,606 \cdot (L \cdot n)^{0,467}}{S^{0,234}} \quad (4.6)$$

kde t_c doba koncentrace [hod],
 L délka údolnice [km],
 n koeficient drsnosti [-],
 S sklon údolnice [m/m].

4.2.2 Koeficient nasycení (Storage coefficient)

Koeficient nasycení povodí je index dočasného ukládání přebytečných srážek v povodí během toho, co odtékají do výstupního bodu – závěrového profilu. [19]

Podle publikace [26] byl pro výpočet koeficientu nasycení zvolen následující empirický vztah:

$$R = \frac{\alpha \cdot L}{\sqrt{S}} \quad (4.7)$$

kde R koeficient nasycení [hod],
 L délka údolnice [km],
 S sklon údolnice [m/m],
 α koeficient (hodnoty v rozmezí cca 0,4 – 1,4) [-].

4.3 VÝPOČET TRANSFORMACE V ÚSEKU POVRCHOVÉHO TOKU

4.3.1 Metoda „Kinematic wave“

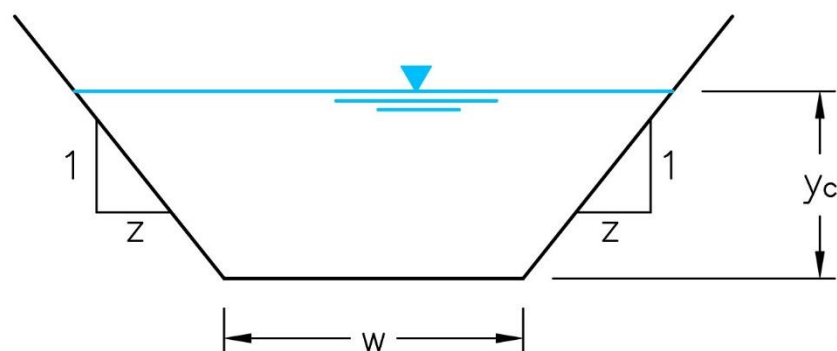
Povodňové vlny mohou být identifikovány jako jeden ze dvou samostatných druhů vlnových jevů: dynamické a kinematické vlny. Kinematika je definována jako studium pohybu bez vlivů hmoty a síly, na rozdíl od dynamiky, ve které jsou tyto vlivy zahrnuty. Ačkoli jsou zpočátku přítomny oba tyto druhy vln, určité charakteristiky povodí mohou z kinematických vln učinit dominantní charakteristiku povodňové události. [27]

Při kinematickém proudění se zanedbává vliv tlakových a setrvačných sil. Pro tento stav proudění je hmotnostní složka (síla ve směru osy kanálu způsobená hmotností tekutiny proudící z kopce v důsledku působení gravitace) přibližně vyvážena odporovými silami způsobenými třením na dně kanálu (ve většině případů je tohle reprezentováno Manningovou rovnicí). Průtoky charakteru kinematické vlny se nebudou znatelně zrychlovat a průtok zůstane podél kanálu přibližně rovnoměrný. Proto se kinematické proudění často klasifikuje jako rovnoměrné neustálené proudění. [27]

Teorie kinematické vlny nabízí výhody nelineární odezvy, aniž by vyžadovala příliš komplikovaný nebo nákladný postup řešení. Na základě několika studií se ukázalo, že aproximace pomocí kinematické vlny je přesná a účinná metoda simulace odtoku dešťové vody z malých povodí, jak pro podzemní proudění, tak pro proudění povrchových toků. [27]

HEC-HMS vyžaduje při zvolení metody Kinematic wave zadání vstupních parametrů: délku, průměrný sklon, Manningovu drsnost a příčný průřez úseku. Přičemž pro volbu tohoto průřezu software nabízí tvar kruhový, obdélníkový, lichoběžníkový nebo trojúhelníkový.

Při popisu lichoběžníkového průřezu je důležité přesně definovat boční sklony z a šířku koryta ve dně w (viz obrázek 5). Pro výpočet průtoku v hloubce y_c se pak podle [27] využije Manningovy rovnice 4.8 (viz níže).



Obrázek 5: Schéma lichoběžníkového průřezu koryta

$$Q_c = \frac{1,486 \cdot S_c^{1/2}}{n} (A_c)^{5/3} \left[\frac{1}{w+z \cdot y_c \cdot (1+z^2)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (4.8)$$

- kde Q_c průtok v daném úseku [m^3/s],
 S_c průměrný sklon dna koryta [-],
 n Manningův součinitel drsnosti [-],
 A_c průřezová plocha v hloubce y_c [m^2],
 w šířka koryta ve dně [m],
 z boční sklon koryta [-],
 y_c hloubka vody v korytě [m].

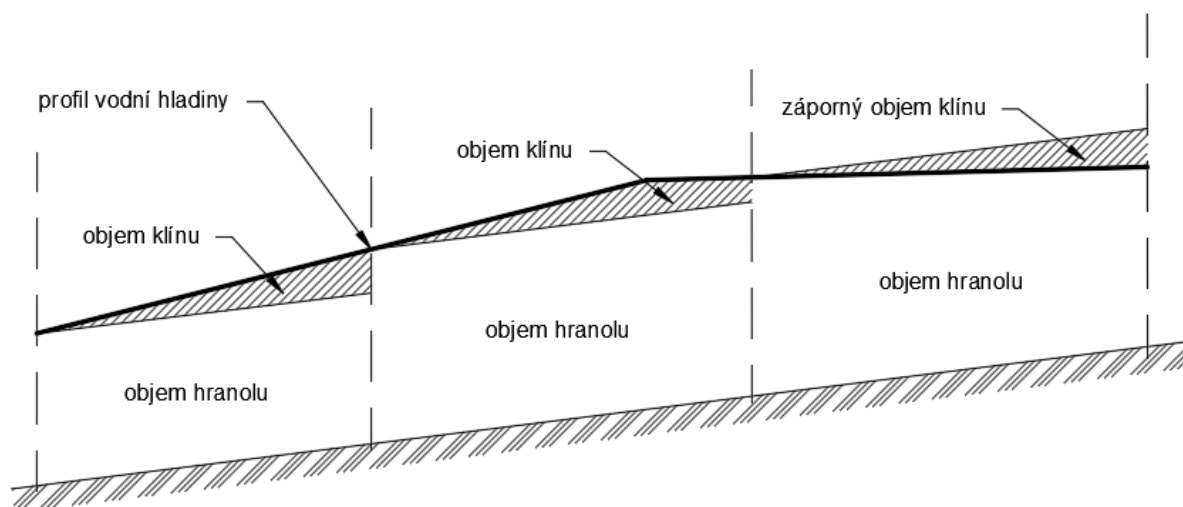
Průřezová lichoběžníková plocha se pak vypočte dle následujícího vztahu:

$$A_c = w \cdot y_c + z \cdot y_c^2 \quad (4.9)$$

- kde A_c průřezová plocha v hloubce y_c [m^2],
 w šířka koryta ve dně [m],
 z boční sklon koryta [-],
 y_c hloubka vody v korytě [m].

4.3.2 Metoda „Muskingum“

Metoda Muskingum využívá ke směřování přítoku princip zachování objemu. Tato metoda může také zohledňovat vztah mezi zásobou a odtokem v daném úseku, který běžně existuje ve většině toků (hystereze). Může simulovat obvykle pozorované zvýšené ukládání během vzestupné větve, anebo naopak snížení ukládání během sestupné větve procházející povodňové vlny. K této simulaci je celkový objem koryta daného úseku koncipovaný jako součet hranolů (tj. obdélníků) a klínů (tj. trojúhelníků), jak je znázorněno na obrázku 6 (převzato z [19]). V průběhu stoupající fáze na naběžné straně povodňové vlny je objem klínu kladný a přičítá se k objemu hranolu. Naopak během klesající fáze na ustupující straně povodňové vlny je objem klínu záporný a od objemu hranolu se odečítá. [28]



Obrázek 6: Muskingum – princip rozdělení celkového objemu koryta na hranoly a klíny

Parametry, které jsou pro použití této metody v programu HEC-HMS vyžadovány, zahrnují volbu počáteční podmínky, dále hodnotu parametru „Muskingum K“ a „Muskingum X“ a nakonec počet dílčích subpovodí. [28]

Parametr „Muskingum K“ je ekvivalentní době cesty přes daný úsek a dá se odhadnout několika způsoby. První způsob je využití známých hydrografických dat, kdy se doba cesty povodňové vlny odhadne na základě rozdílu mezi „podobnými body“ na známých hydrogramech přítoku a odtoku. Podobné body mohou být např. vrcholy každého hydrogramu. Druhým způsobem je porovnání délky toku s rychlostí povodňové vlny (viz rovnice 4.10) a třetím způsobem je použití regresních rovnic, které byly vyvinuty z pozorovaných dat v analogické oblasti. [28]

$$K = \frac{L}{v_m} \quad (4.10)$$

kde K parametr „Muskingum K“ [-],
 L délka úseku [m],
 v_m rychlost povodňové vlny [m/s].

K odhadu rychlosti povodňové vlny lze využít několik přístupů, včetně použití Manningovy rovnice nebo Kleitz-Seddonova zákona. [19] Pro odhad rychlosti je v téhle práci využit vztah dle Manninga:

$$v_m = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

kde v_m rychlost podle Manninga (1891) [m/s],
 n Manningův drsnostní součinitel [-],
 R hydraulický poloměr [-],
 i průměrný podélný sklon daného úseku [-].

Hydraulický poloměr je pak dán poměrem průtočné plochy ku omočenému obvodu:

$$R = \frac{A_c}{O} \quad (4.12)$$

kde R hydraulický poloměr [m],
 A_c průtočná plocha [m²],
 O omočený obvod [m].

Průtočná plocha se stanoví obdobně jak je uvedeno v rovnici 4.9 a omočený obvod se dá vypočítat následovně:

$$O = w + 2\sqrt{y_c^2 + (y_c \cdot z)^2} \quad (4.13)$$

kde O omočený obvod [m],
 w šířka koryta ve dně [m],
 y_c hloubka vody v korytě [m],
 z boční sklon koryta [-].

Parametr „Muskingum X“ je bezrozměrný koeficient, který postrádá silný fyzikální význam. Pohybuje se v rozmezí od 0 (maximální útlum) do 0,5 (žádný útlum). Když je tento parametr nastaven na hodnotu 0, tak se objem v daném úseku vypočítá výhradně jako funkce odtoku a výsledkem je maximální možný útlum. Když je tento parametr nastaven na hodnotu 0,5, je při určování objemu daného úseku přikládána stejná váha na přítoku i na výtoku. To má potom za následek, že nedochází k žádnému útlumu přítoku hydrogramu při jeho postupu přes konkrétní úsek. U většiny aplikací se uvažuje počáteční odhad jako střední hodnota 0,25, která se dále upřesní kalibrací modelu. [28]

4.4 KONSTRUKCE HYDROGRAMU POVODNĚ DLE ČERKAŠINA

Jednou z metod, jak zjistit návrhový průtok na tocích, kde nejsou přímá pozorování, je využití exponenciálních vzorců, mezi něž patří i vztah odvozený Alexandrem Čerkašinem. Tento vzorec (rovnice 4.19) se používá pro výpočet stoleté vody v povodí, jehož plocha je menší než 300 km². Jeho velkou výhodou je jednoduchost a dostatečná přesnost. [14]

Při použití tohoto vzorce je potřeba dodržovat jistá pravidla:

- délka údolí se uvažuje bez meandrů,
- při rozvětvení toku se za jeho délku považuje ta nejdelší,
- nemá-li tok vyvinuté koryto, tak je nutné zvětšit $p = 1,3 - 1,6$ krát,
- nachází-li se v povodí rybníky, pak se jejich vliv projeví ve zmenšení C_{obj} 1,1-1,5krát,
- plocha luk se počítá jako plocha lesů. [14]

Sestrojení návrhového hydrogramu podle Čerkašina je dáno řešením posloupností těchto bodů:

1. Průměrný sklon údolnice toku

$$J = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}, \quad (4.14)$$

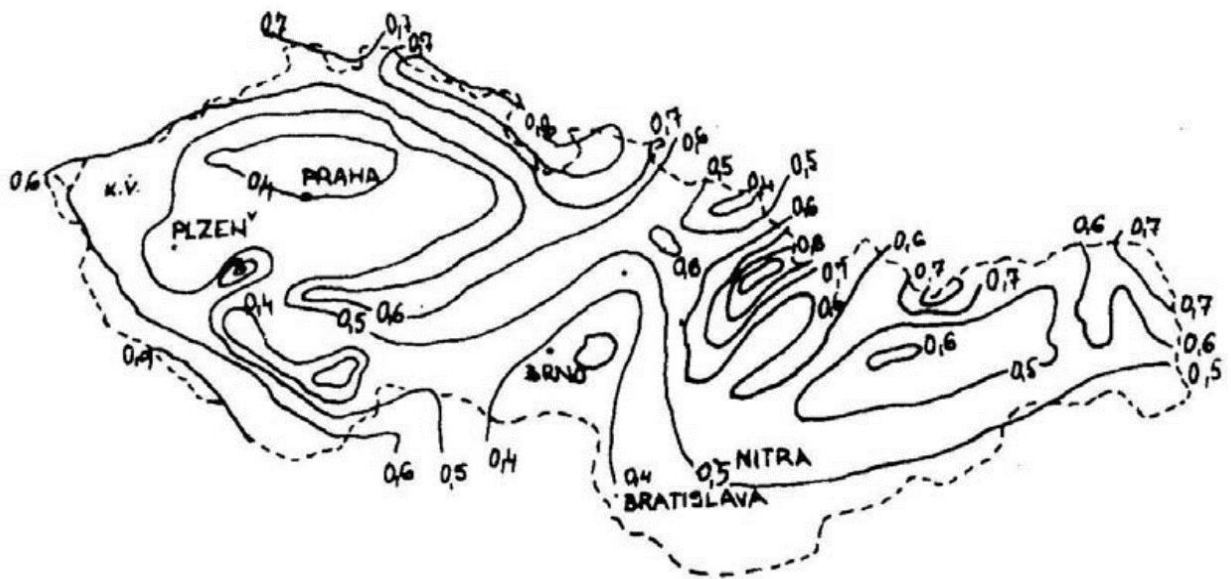
kde J průměrný sklon údolnice toku [-],
 ΔH rozdíl maximální a minimální kóty údolnice [m n. m.],
 L délka údolnice [m].

2. Objemový součinitel odtoku

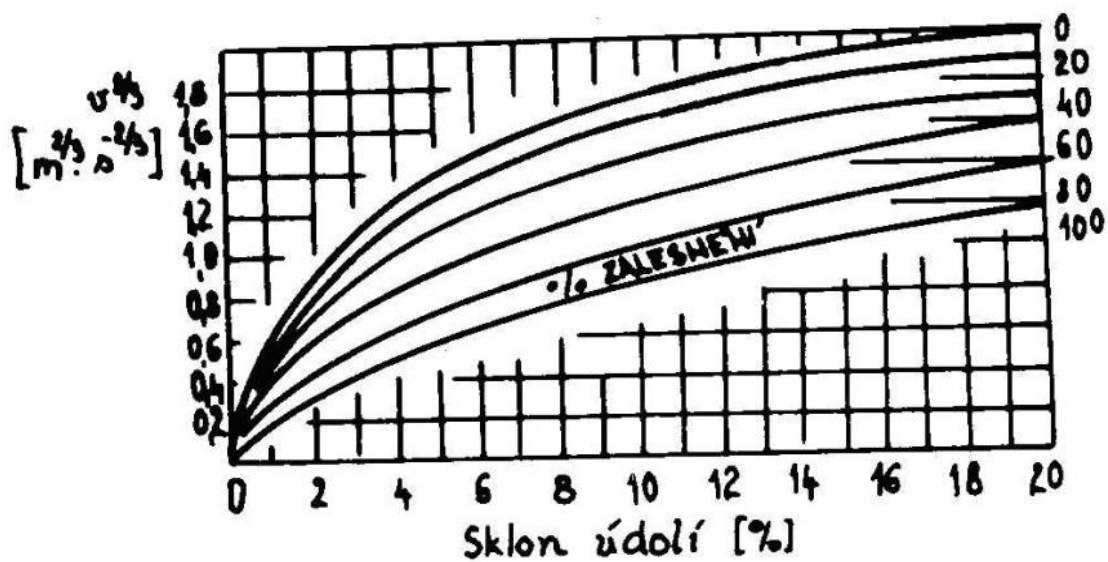
Tento parametr vyjadřuje podíl mezi skutečně spadlým a skutečně odteklým objemem vody z povodí. Stanovuje se z mapky jeho izolinií (viz obrázek 7). [29]

3. Střední rychlost doběhu

Tato veličina se určuje z grafu (viz obrázek 8) a je závislá na procentu zalesnění daného povodí a průměrném sklonu údolnice toku (výpočet viz výše). [29]



Obrázek 7: Stanovení objemového součinitele odtoku C_{obj} z mapy izoliní [29]



Obrázek 8: Stanovení střední rychlosti doběhu v_s [29]

4. Doba koncentrace

Jedná se o dobu potřebnou k doběhu povrchového odtoku z hydraulicky nejvzdálenějšího bodu z povodí do uzávěrového profilu. [29]

$$t = \frac{L}{v_s}, \quad (4.15)$$

kde t doba koncentrace [s],
 L délka údolnice [m],
 v_s střední rychlost doběhu [m/s].

5. Trvání kritického deště

Tato hodnota se uvažuje zhruba stejná jako doba koncentrace. Předpokladem je, že po této době odtok z povodí dosahuje nejvyšších hodnot. [29]

$$t = t', \quad (4.16)$$

kde t doba koncentrace [s],
 t' trvání kritického deště [s].

6. Srážkový úhrn za dobu trvání kritického deště

Hodnota srážkového úhrnu byla do výpočtu zadána na základě dat získaných od Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ).

7. Objem srážek spadlých na povodí

$$V_s = H_s \cdot P, \quad (4.17)$$

kde V_s objem srážek spadlých na povodí [m³],
 H_s srážkový úhrn za dobu trvání kritického deště [mm],
 P plocha povodí [m²].

8. Objem vody odteklý uzávěrovým profilem

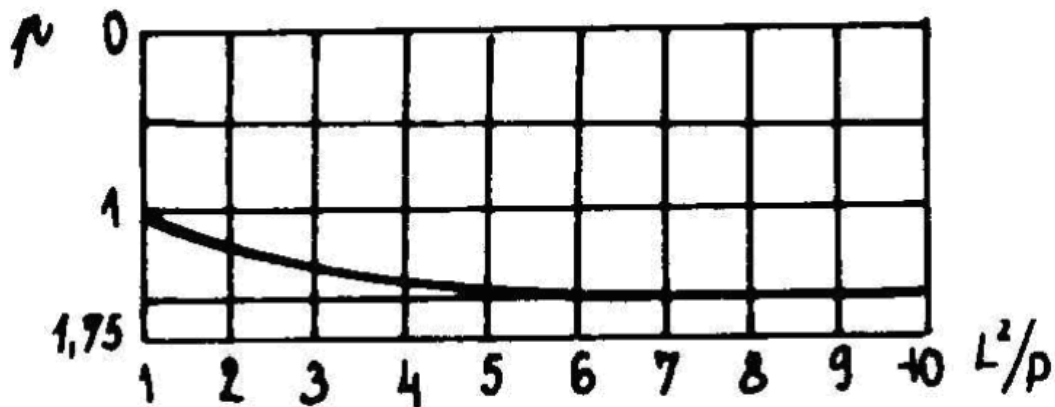
$$V_o = V_s \cdot C_{obj}, \quad (4.18)$$

kde V_o objem vody odteklý uzávěrovým profilem [m³],
 V_s objem srážek spadlých na povodí [m³],
 C_{obj} objemový součinitel odtoku [-].

9. Maximální povodňový průtok

$$Q_{100} = \frac{24,7 \cdot C_{obj} \cdot v_s^{2/3} \cdot P}{p \cdot \sqrt[3]{L^2}} \quad (4.19)$$

kde Q_{100} maximální povodňový průtok [m³/s],
 C_{obj} objemový součinitel odtoku [-],
 v_s objem srážek spadlých na povodí [m³],
 P plocha povodí [km²],
 L délka údolnice [km],
 p koeficient závisící na tvaru povodí, který byl určen z grafu (obrázek 9).



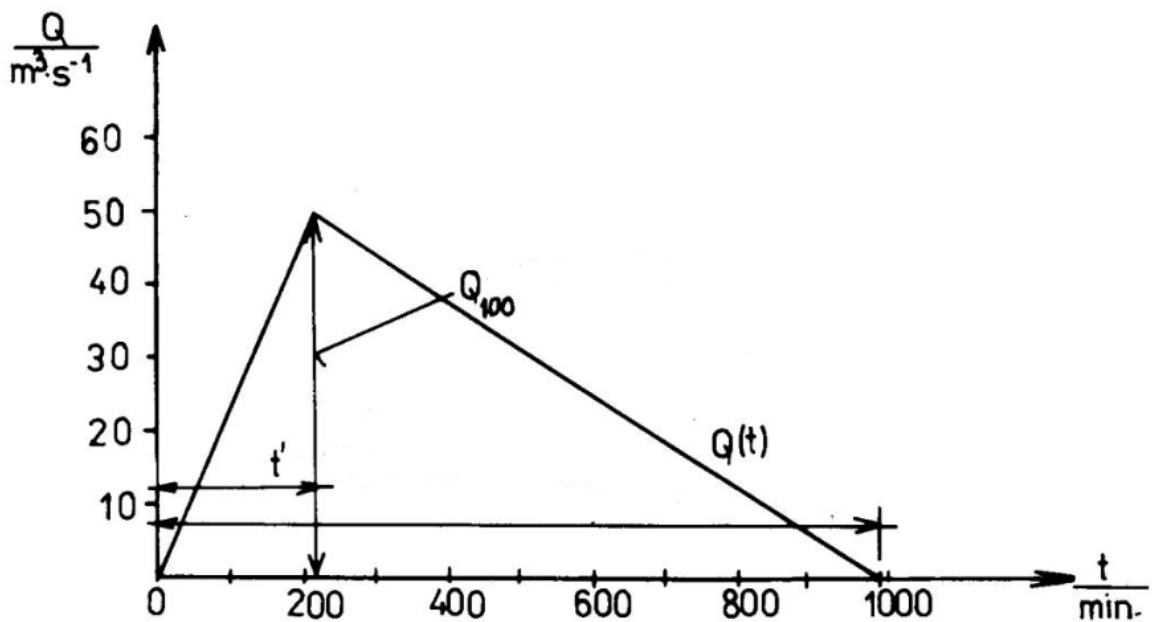
Obrázek 9: Určení koeficientu tvaru povodí p [29]

10. Doba trvání průchodu povodně

$$\tau = \frac{2 \cdot V_0}{Q_{100}} \quad (4.20)$$

- kde τ doba trvání průchodu povodně [s],
 V_0 objem vody oteklý uzávěrovým profilem [m^3],
 Q_{100} maximální povodňový průtok [m^3/s].

Pro sestavení trojúhelníkového hydrogramu jsou potřeba 3 body, které vyplývají z výše určených hodnot. Doba trvání kritického deště t' a doba trvání průchodu povodně τ se dosazuje v minutách. Schéma konstrukce hydrogramu je provedeno na obrázku 10.



Obrázek 10: Konstrukce hydrogramu povodně podle A. Čerkašina [29]

5 PRAKTICKÁ APLIKACE

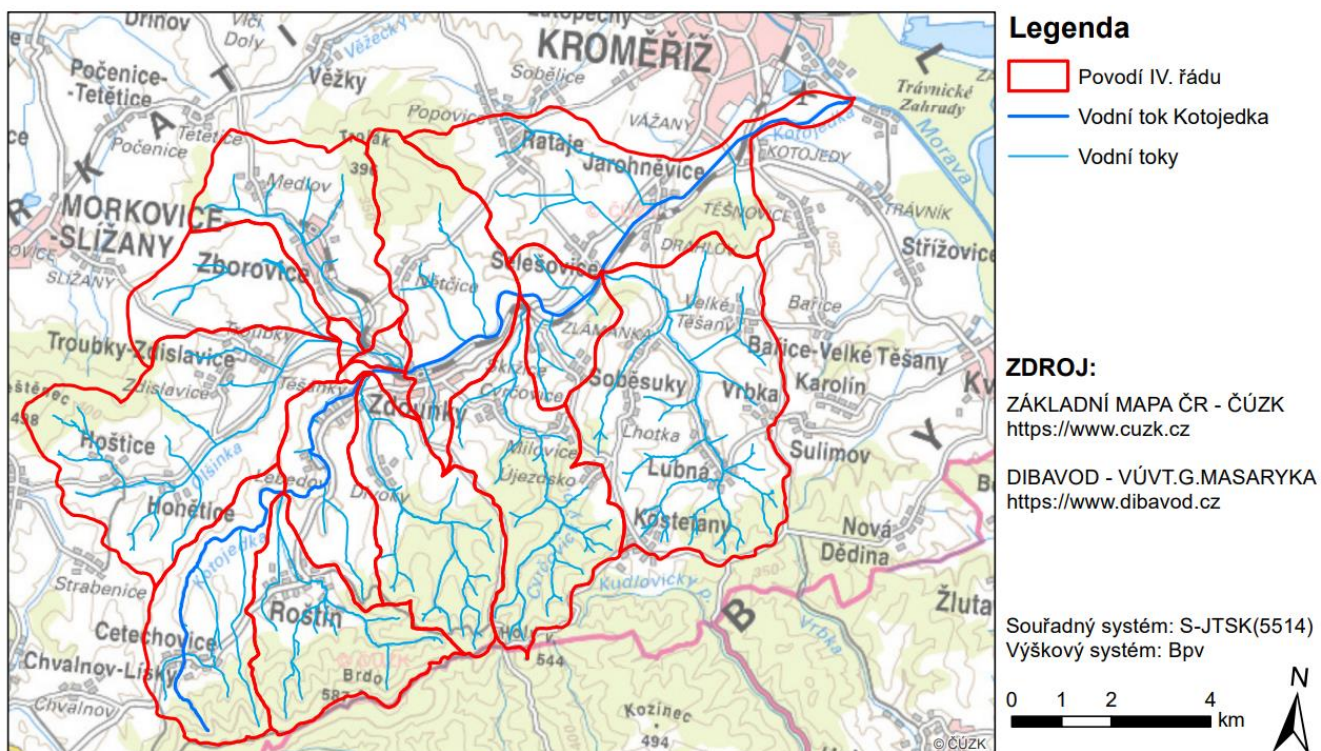
Úkolem praktické aplikace bylo sestavení srážko-odtokového modelu v prostředí programu HEC-HMS. Na sestaveném modelu pak byly testovány různé variantní řešení. Zkoušeny byly dvě metody výpočtu transformace v úsecích toků. První způsob výpočtu se značí Kinematic wave a druhý Muskingum. Dále se porovnával průběh povodňové vlny za použití dvou odlišných variant stanovení doby koncentrace. Ta byla určena podle dvou výpočetních vztahů. První vzorec byl použit podle Kirpiche a druhý pak podle Hathawaye.

Po sestavení modelu a výpočtu vstupních dat byla nutná kalibrace, která spočívala v dosažení potřebného stoletého průtoku. Nakonec byla provedena validace modelu, pro kterou byla zvolena z důvodu absence hydrologických dat metoda výpočtu návrhového průtoku podle A. Čerkašina.

5.1 ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ

Zájmové území, pro které se srážko-odtokový model sestavoval a testoval, byla část povodí Moravy (povodí 3. řádu: 4-12-02 Haná a Morava od Hané po Dřevnici). Konkrétně se jedná o povodí řeky Kotojedky, jehož celková plocha je 134,5 km².

Kotojedka se svou velikostí řadí mezi menší toky, ale pro katastrální území města Kroměříž má značný povodňový význam. Jedná se o pravostranný přítok řeky Moravy, jenž pramení ve Chříbech a údolím Zdounecké brázdy poté protéká severovýchodním směrem ke Kroměříži. [30] Schématické znázornění zájmového území je patrné z obrázku 11.

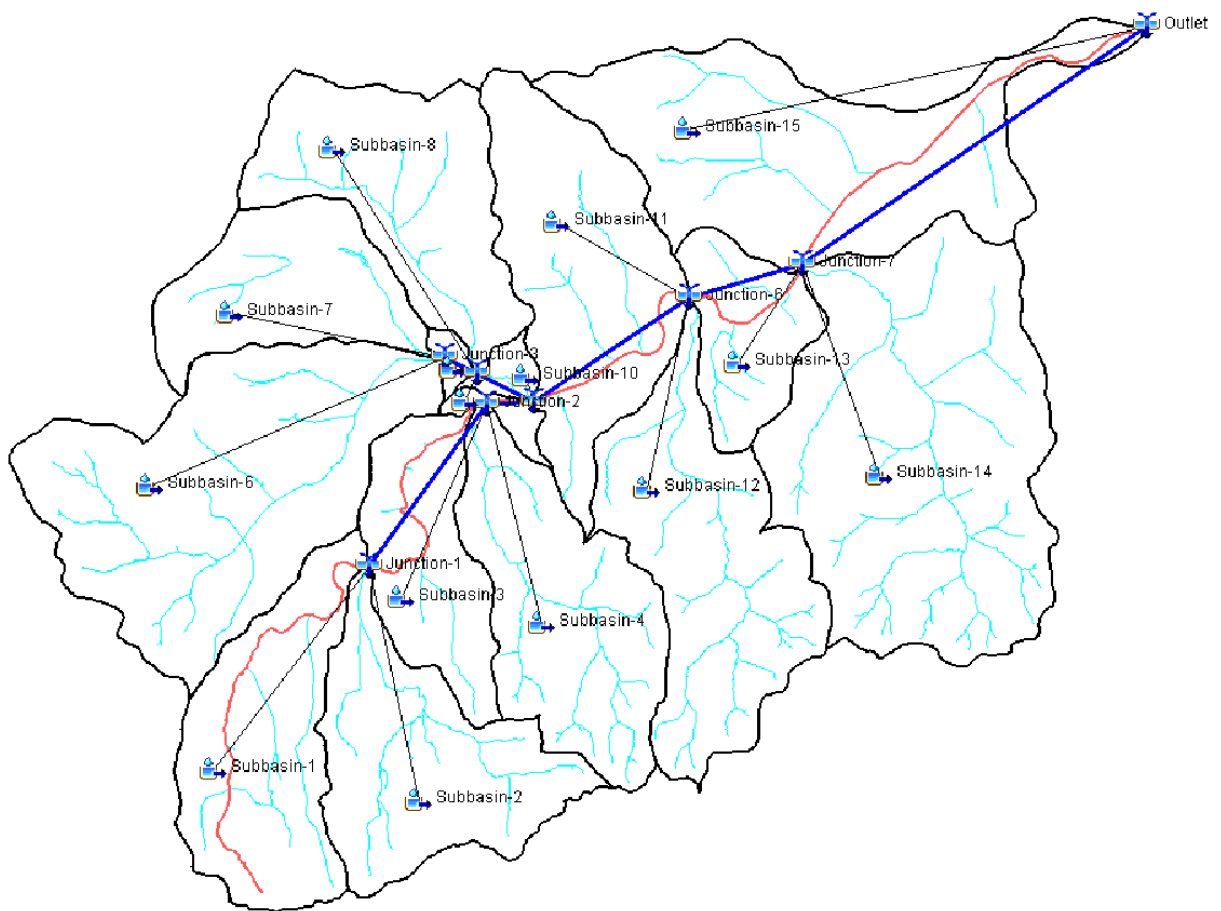


Obrázek 11: Mapa zájmového území

5.2 SESTAVENÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELU

Jak již bylo avizováno, k sestavení modelu byl použit program HEC-HMS, pro nějž bylo potřeba na začátku provést určitou schematizaci povodí. Software HEC-HMS umožňuje řešené území rozdělit na dílčí subpovodí („Subbasin“), která jsou vzájemně propojena úseky vodních toků („Reach“) a jejich soutoků („Junction“).

V rámci této schematizace bylo povodí Kotojedky rozděleno na 15 dílčích povodí a 7 úseků, pro které byly následně vypočteny základní charakteristiky (viz kapitola 5.3 a 5.4). Schematizace je znázorněna na obrázku 12, kde je červeně vyznačena řeka Kotojedka.



Obrázek 12: Schematizace povodí v softwaru HEC-HMS

5.3 VSTUPNÍ DATA

Po samotném sestavení modelu bylo nutné stanovit charakteristiky týkající se dílčích subpovodí a úseků toků, které vstupovaly do výpočtu. Ke zjištění potřebných údajů byly využity především nástroje geografického informačního systému ArcMap, na nichž závisící parametry se poté vypočetly v programu MS Excel. Dále bylo pro výpočet v HECM-HMS potřeba vložit data časové řady srážek, které se do softwaru vkládaly formou hyetogramů.

Dalším důležitým podkladem byla řada N-letých povodňových průtoků od ČHMÚ (tabulka 1), která posloužila ke srovnání odvozených N-letých průtoků v programu HEC-HMS (viz kapitola 6.2).

Tabulka 1: N-leté povodňové průtoky pro povodí Kotojedky od ČHMÚ

N [roky]	1	2	5	10	20	50	100
$Q_{N, \text{ČHMÚ}} [\text{m}^3/\text{s}]$	8.6	13.1	21.3	29.3	38.8	54.2	68

5.3.1 Charakteristiky povodí

Pro každé dílčí subpovodí bylo nutné zadat následující charakteristiky pro 3 složky:

1. „Subbasin“

V této části je potřeba zadat plochy dílčích subpovodí v km^2 (viz tabulka 2). Ty byly určeny pomocí softwaru ArcMap.

2. „Loss“

Jako metoda výpočtu ztráty byla zvolena „SCS Curve Number“. Při zvolení této metody se musí vložit hodnota „Initial abstraction“ (počáteční retence v povodí). Ta byla stanovena dle [19] jako 20 % z potenciální maximální retence v povodí (rovnice 4.2).

Dále se musí pro každé povodí zadat průměrné číslo odtokové křivky CN. Hodnoty CN se stanovily v ArcMapu na základě znalosti BPEJ a LPIS. Postup stanovení je podrobněji popsán v kapitole 4.1. Výsledné průměrné hodnoty CN pro jednotlivé subpovodí jsou shrnuty v tabulce 2 a jejich rozložení je patrné z obrázku 13.

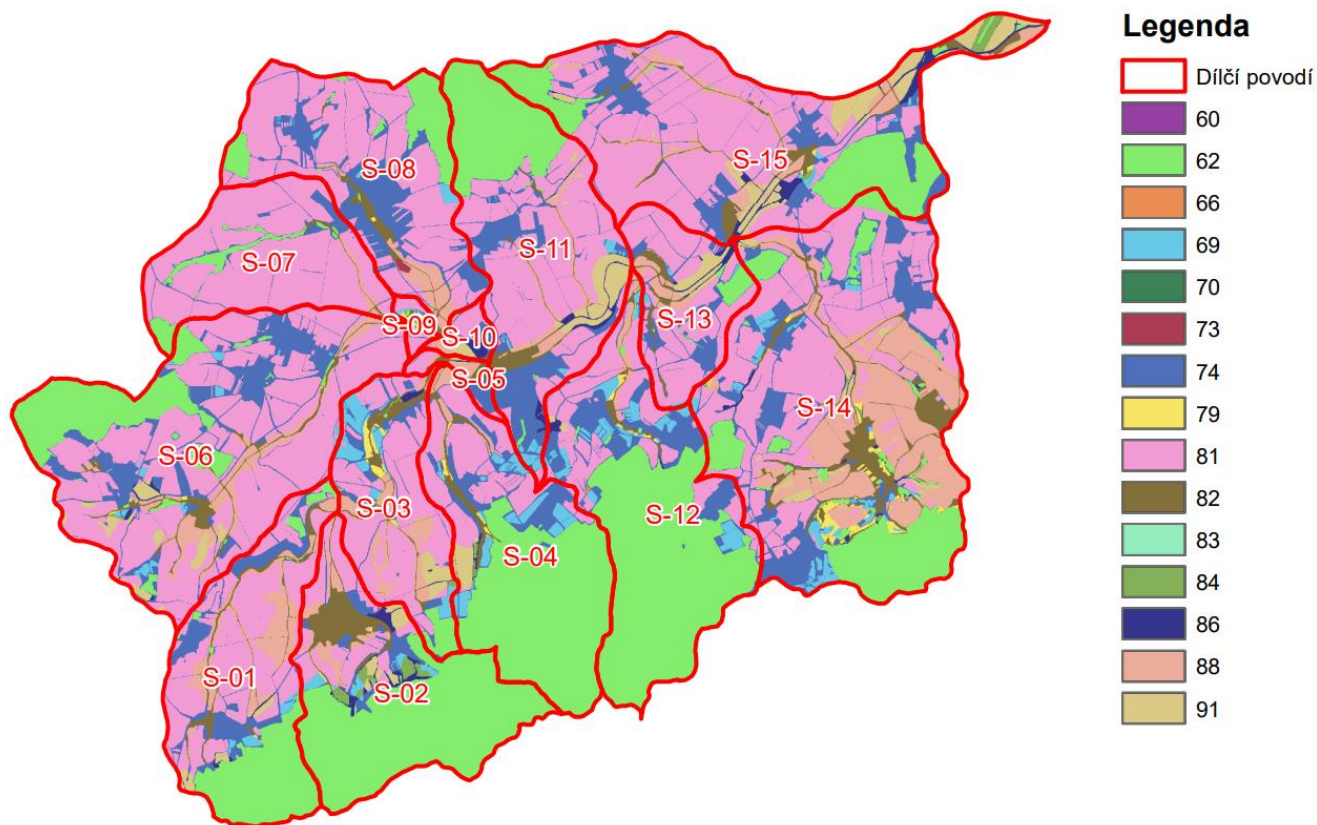
Posledním parametrem, který bylo nutno zadat, je podíl nepropustných ploch v %. Tyto hodnoty se uvažovaly jako podíl bloků budov a určeny byly opět s využitím ArcMapu.

3. „Transform“

Pro transformaci srážek se v modelu používají metody jednotkových hydrogramů. V tomto případě byl zvolen „Clark Unit Hydrograph“ (Clarkův jednotkový hydrogram), který má 2 parametry.

Prvním je „Time of Concentration – t_c “ (doba koncentrace), což je čas potřebný pro odtok z hydraulicky nejvzdálenějšího bodu v povodí do závěrového profilu. Pro jeho výpočet byly použity 2 vztahy. Jednak podle Kirpiche (rovnice 4.5) a dále podle Hathawaye (rovnice 4.6).

Druhým parametrem je tzv. „Storage coefficient – R “ (koeficient nasycení), který vyjadřuje akumulární a transformační schopnost koryta vodního toku v zájmovém povodí. Pro výpočet tohoto parametru byl použit vzorec dle [26] (rovnice 4.7).



Obrázek 13: Rozložení CN v dílčích povodí

Tabulka 2: Charakteristiky dílčích subpovodí

Označení	Plocha P_i [km ²]	CN_i [-]	$P_i * CN_i$	Prům. sklon S_i [%]	Nepropustné plochy [%]
S-01	9.39	76.10	714.76	14.34	3.471
S-02	9.52	69.33	659.79	20.19	9.100
S-03	6.00	79.60	477.76	10.62	3.882
S-04	10.04	69.33	696.13	16.33	2.510
S-05	0.65	80.61	52.24	8.58	26.693
S-06	17.55	77.48	1 359.72	11.08	6.758
S-07	6.69	79.43	531.56	7.34	1.255
S-08	9.49	77.52	735.77	8.80	10.768
S-09	0.40	80.61	32.10	5.05	0.000
S-10	0.65	82.44	53.44	6.93	15.889
S-11	11.06	76.01	840.76	10.18	11.238
S-12	11.81	68.47	808.87	17.32	4.723
S-13	4.32	80.09	346.08	9.56	5.693
S-14	21.27	78.43	1 667.94	11.85	8.794
S-15	15.66	78.37	1 227.61	6.99	8.600
Σ	134.50	Σ	10 204.52		

Výsledná hodnota CN pro celé povodí se získala poměrem sumace součinu plochy dílčích povodí P_i a k nim příslušným číslem CN_i ku celkové ploše povodí (rovnice 4.4):
 $CN = 10\,204,52/134,5 = 75,87$. Tato hodnota poté vstupovala do výpočtu maximální potenciální retence povodí S podle rovnice 4.3, která vychází na 80,79 mm.

Následně se stanovila počáteční retence v povodí I_a , která byla vypočtena, jak již bylo zmíněno, podle rovnice 4.2. Vyčíslením této rovnice byla hodnota počáteční retence I_a stanovena na 16,16 mm.

Vypočtené doby koncentrace pro dílčí subpovodí jsou shrnuty v tabulce 3. Hodnoty koeficientu nasycení pro jednotlivé subpovodí jsou pak uvedeny až po provedené kalibraci v kapitole 5.5.

Tabulka 3: Doby koncentrace t_c pro dílčí subpovodí

Označení	Doba koncentrace t_c [hod]	
	Kirpich	Hathaway
S-01	1.02	0.621
S-02	0.85	0.553
S-03	1.57	0.932
S-04	1.07	0.638
S-05	0.34	0.369
S-06	1.40	0.750
S-07	1.07	0.636
S-08	1.11	0.652
S-09	0.31	0.336
S-10	0.52	0.464
S-11	1.49	0.876
S-12	1.27	0.707
S-13	1.25	0.813
S-14	1.33	0.728
S-15	2.74	1.057

5.3.2 Charakteristiky toků

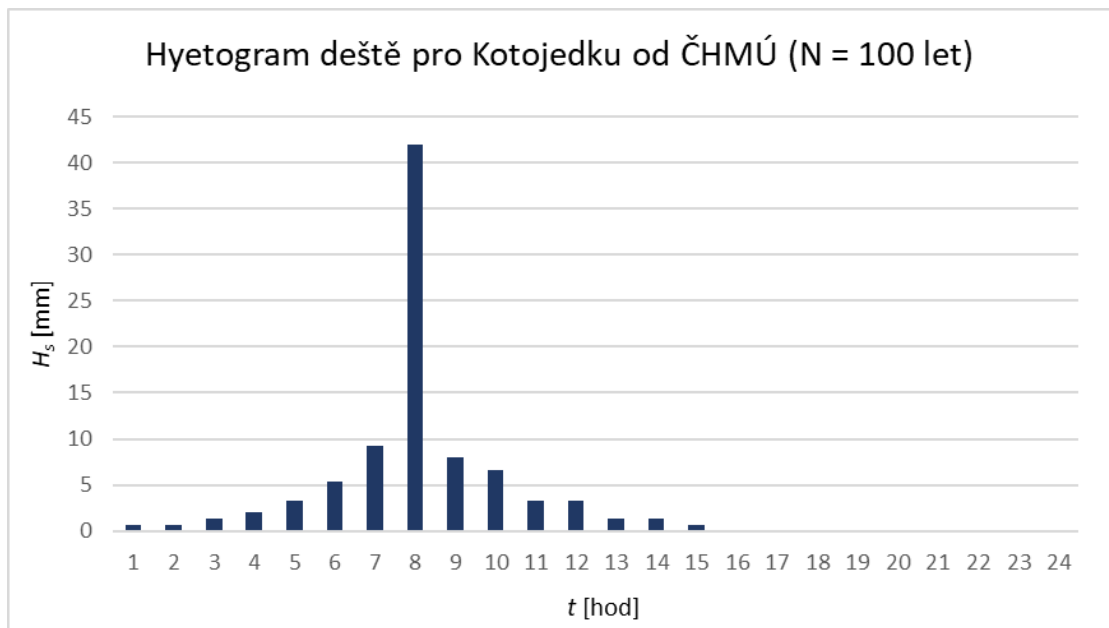
Mezi parametry toků vstupující do výpočtu patří délka a sklon úseku, tvar koryta a jeho drsnost dle Manninga. Délky a nadmořské výšky, ze kterých se následně stanovily průměrné sklony úseků, byly identifikovány v ArcMapu (viz tabulka 4). Hodnoty drsnostních součinitelů a tvarů koryt (šířka ve dně w , hloubka y_c , sklon svahů z) vycházejí z místního šetření a byly poskytnuty vedoucím bakalářské práce.

Tabulka 4: Charakteristiky dílčích toků

Označení	H_{max} [m n. m.]	H_{min} [m n. m.]	Délka $L_{T,i}$ [km]	Sklon toku $S_{T,i}$ [%]	Sklon toku $S_{T,i}$ [m/km]	Koeficient drsnosti n [-]
T-01	456.01	244.06	6.828	3.10	31.04	0.0300
T-02	483.21	244.06	5.763	4.15	41.50	0.0300
T-03	244.06	223.94	4.214	0.48	4.77	0.0410
T-04	476.13	223.94	7.139	3.53	35.33	0.0300
T-05	223.94	218.87	0.708	0.72	7.16	0.0410
T-06	382.50	227.91	7.972	1.94	19.39	0.0300
T-07	333.87	227.91	4.941	2.14	21.45	0.0300
T-08	303.71	223.94	5.085	1.57	15.69	0.0300
T-09	227.91	223.94	0.596	0.67	6.66	0.0385
T-10	223.94	218.87	1.024	0.50	4.95	0.0385
T-11	218.87	207.42	3.333	0.34	3.44	0.0385
T-12	470.33	207.42	8.592	3.06	30.60	0.0300
T-13	207.42	201.75	2.272	0.25	2.50	0.0410
T-14	333.15	201.75	7.269	1.81	18.08	0.0300
T-15	201.75	184.17	6.530	0.27	2.69	0.0260

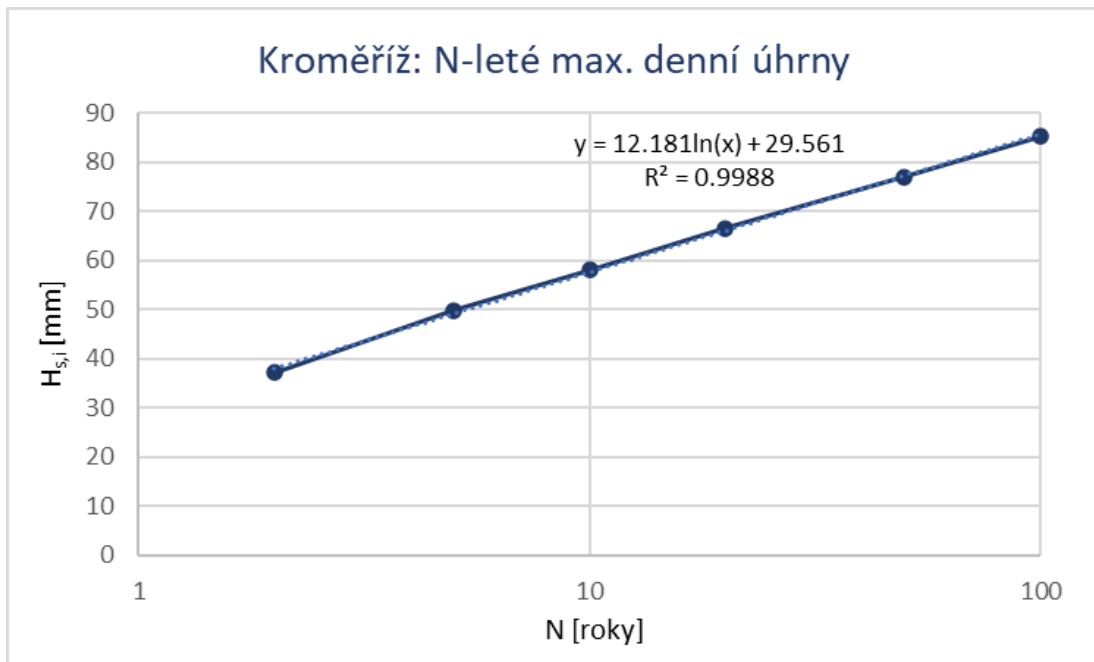
5.3.3 Hyetogram deště

V rámci praktické aplikace se vycházelo z dat úhrnů srážek s pravděpodobností opakování 100 let, která byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ). Maximální denní úhrn srážek pro povodí Kotojedky dosahuje hodnoty $H_{1d,100} = 89,05$ mm. Graf hyetogramu deště rozloženého v průběhu dne pro Kotojedku od ČHMÚ je na obrázku 14. Na základě těchto údajů byly dále odvozeny hyetogramy pro další N-letosti. Postup jejich stanovení je popsán v následujícím odstavci.



Obrázek 14: Hyetogram deště pro Kotojedku od ČHMÚ

Odvození jednotlivých hyetogramů bylo provedeno metodou analogie vztažené k meteorologické stanici Kroměříž. Pomocí programového produktu [31]: „Výpočetní prostřední pro návrhové deště a jejich průběh“ byly převzaty hodnoty maximálních denních úhrnů srážek s pravděpodobností opakování N let podle Gumbela, viz tabulka 6. Hodnota srážkového úhrnu pro dobu opakování $N = 1$ rok byla odvozena pomocí regresní logaritmické rovnice křivky, viz obrázek 15. Tato křivka je dána závislostí mezi jednotlivými lety opakování a příslušnými hodnotami maximálních denních úhrnů srážek. V grafu je zobrazen i koeficient determinace, ten je dán hodnotou $R^2 = 0,9988$. Lze tedy konstatovat, že se jedná o téměř dokonalou korelaci, kdy rozdíl mezi odhadem a skutečnými hodnotami je velmi malý.



Obrázek 15: N-leté maximální denní úhrny pro stanici Kroměříž

Tabulka 5: Maximální denní úhrny srážek $H_{1d,N}$ s dobou opakování N let podle Gumbela pro stanici Kroměříž

N	1	2	5	10	20	50	100
$H_{1d,N}$	29.56	37.10	49.80	58.00	66.60	77.00	85.20

Dále byl stanoven poměr mezi hodnotou úhrnu srážek s pravděpodobností opakování 100 let $H_{1d,100}$ pro stanici Kroměříž a hodnotou $H_{1d,100}$ pro povodí Kotojedky $P = 89,05/85,2 = 1,0452$. Vynásobením hodnot z tabulky 5 daným poměrem byly získány hodnoty $H_{1,N}$ v povodí Kotojedky, viz tabulka 6.

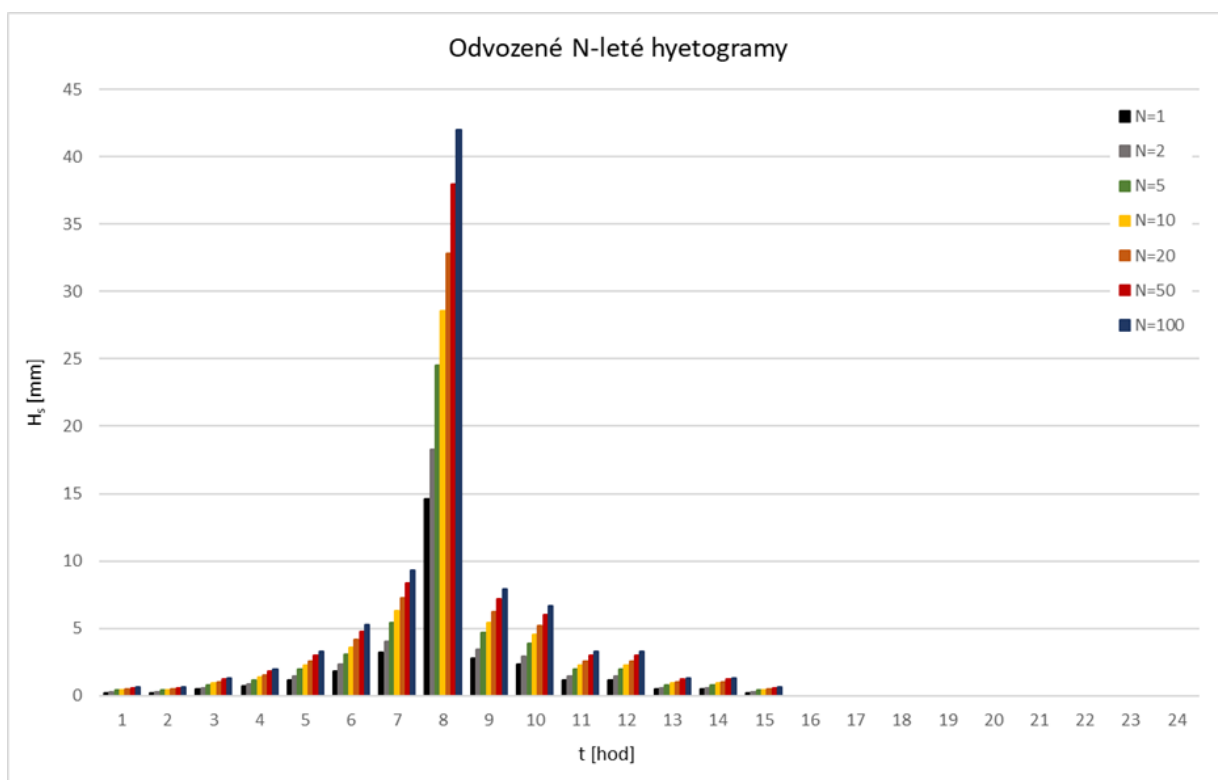
Tabulka 6: Odvozené hodnoty maximálních denních úhrnů srážek $H_{1d,N}$ s dobou opakování N let podle Gumbela pro povodí Kotojedky

N	1	2	5	10	20	50	100
$H_{1d,N}$	30.90	38.78	52.05	60.62	69.61	80.48	89.05

Následně byly na základě procentuálního rozložení srážkových úhrnů $H_{s,100}$ v průběhu dne odvozeny úhrny pro další N-letosti, které jsou shrnuty v tabulce 7. Jejich stanovení spočívalo v přenásobení daného procentuálního rozložení s příslušnou hodnotou odvozeného $H_{1d,N}$ pro povodí Kotojedky. Grafické znázornění odvozených N-letých návrhových hyetogramů 24hodinové deště pro povodí Kotojedky je patrné z obrázku 16.

Tabulka 7: Rozložení srážkových úhrnů $H_{s,N}$ v průběhu dne

hod	$H_{s,1}$ [mm]	$H_{s,2}$ [mm]	$H_{s,5}$ [mm]	$H_{s,10}$ [mm]	$H_{s,20}$ [mm]	$H_{s,50}$ [mm]	$H_{s,100}$ [mm]	$H_{s,100}$ [%]
1	0.229	0.287	0.386	0.449	0.516	0.596	0.660	0.741
2	0.229	0.287	0.386	0.449	0.516	0.596	0.660	0.741
3	0.461	0.579	0.777	0.905	1.040	1.202	1.330	1.494
4	0.690	0.867	1.163	1.355	1.556	1.798	1.990	2.235
5	1.148	1.441	1.935	2.253	2.587	2.991	3.310	3.717
6	1.839	2.308	3.098	3.608	4.143	4.790	5.300	5.952
7	3.220	4.041	5.424	6.317	7.254	8.387	9.280	10.421
8	14.572	18.289	24.549	28.592	32.831	37.958	42.000	47.165
9	2.758	3.462	4.647	5.412	6.214	7.185	7.950	8.928
10	2.300	2.887	3.875	4.513	5.183	5.992	6.630	7.445
11	1.148	1.441	1.935	2.253	2.587	2.991	3.310	3.717
12	1.148	1.441	1.935	2.253	2.587	2.991	3.310	3.717
13	0.461	0.579	0.777	0.905	1.040	1.202	1.330	1.494
14	0.461	0.579	0.777	0.905	1.040	1.202	1.330	1.494
15	0.229	0.287	0.386	0.449	0.516	0.596	0.660	0.741
16	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0



Obrázek 16: Odvozené N-leté návrhové hyetogramy 24hodinového deště pro povodí Kotojedky

5.4 VÝPOČET TRANSFORMACE ODTOKU VODY V DANÉM ÚSEKU TOKU

Jak již bylo zmíněno, pro výpočet transformace odtoku vody v daných úsecích toku byly použity metody Kinematic wave a Muskingum. Pro obě tyto metody byly určeny nutné veličiny vstupující do výpočtu.

5.4.1 Metoda „Kinematic wave“

Tato metoda transformace v jednotlivých úsecích toku byla testována pro obě výše zmiňované metody výpočtu doby koncentrace. To znamená, jednak pro vztah dle Kirpiche (výsledný hydrogram – viz obrázek 17) a dále pak dle Hathawaye (výsledný hydrogram – viz obrázek 18).

Bylo potřeba spočítat veličiny vstupující do této metody, jejichž postup stanovení je popsán v kapitole 4.3.1. a výsledky jsou patrné z tabulky 8.

5.4.2 Metoda „Muskingum“

Tato metoda je charakterizována dvěma parametry (K a X), jejichž popis a postup stanovení je popsán v kapitole 4.3.2. Výsledné hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tabulce 9. Tahle metoda byla zkoušena pro dobu koncentrace t_c stanovenou podle Kirpiche (výsledný hydrogram – viz obrázek 19).

Tabulka 8: Metoda Kinematic Wave – shrnutí vstupních hodnot

Reach	Délka toku [m]	Sklon [m/m]	n [-]	w [m]	y_c [m]	z	A_c [m ²]	Q_c [m ³ /s]
1	4 214	0.0048	0.0410	1.00	1.50	1.50	4.88	11.915
2	708	0.0072	0.0410	1.00	1.50	1.50	4.88	14.592
3	596	0.0067	0.0385	1.00	1.99	1.51	7.97	28.932
4	1024	0.0050	0.0385	1.00	1.99	1.51	7.97	24.944
5	3 333	0.0034	0.0385	1.50	2.06	1.94	11.32	27.421
6	2 272	0.0025	0.0410	2.50	4.40	1.65	42.94	147.076
7	6 530	0.0027	0.0260	3.00	4.00	2.00	44.00	214.411

Tabulka 9: Metoda Muskingum – shrnutí vstupních hodnot

Reach	A_c [m ²]	O [m]	R [m]	v_m [m ³ /s]	K [s]	K [h]	X [-]
1	4.88	6.41	0.761	1.404	3 000.49	0.8335	0.25
2	4.88	6.41	0.761	1.720	411.63	0.1143	0.25
3	7.97	8.21	0.971	2.079	286.73	0.0796	0.25
4	7.97	8.21	0.971	1.792	571.40	0.1587	0.25
5	11.32	10.49	1.079	1.602	2 080.93	0.5780	0.25
6	42.94	19.48	2.205	2.064	1 100.80	0.3058	0.25
7	44.00	20.89	2.106	3.279	1 991.30	0.5531	0.25

5.5 KALIBRACE MODELU

Model povodí byl kalibrován na základě znalosti návrhového stoletého průtoku $Q_{100} = 68 \text{ m}^3/\text{s}$ pro řeku Kotojedku. Cílem kalibrace bylo dosažení hodnoty kulminačního průtoku co nejbližší, nejlépe stejné této hodnotě.

Jako kalibrační koeficient byl použit parametr α , který vstupoval do výpočtu koeficientu nasycení R podle rovnice 4.7. Kalibrace byla prováděna manuálně, kdy po dosažení potřebné hodnoty byla kalibrace ukončena.

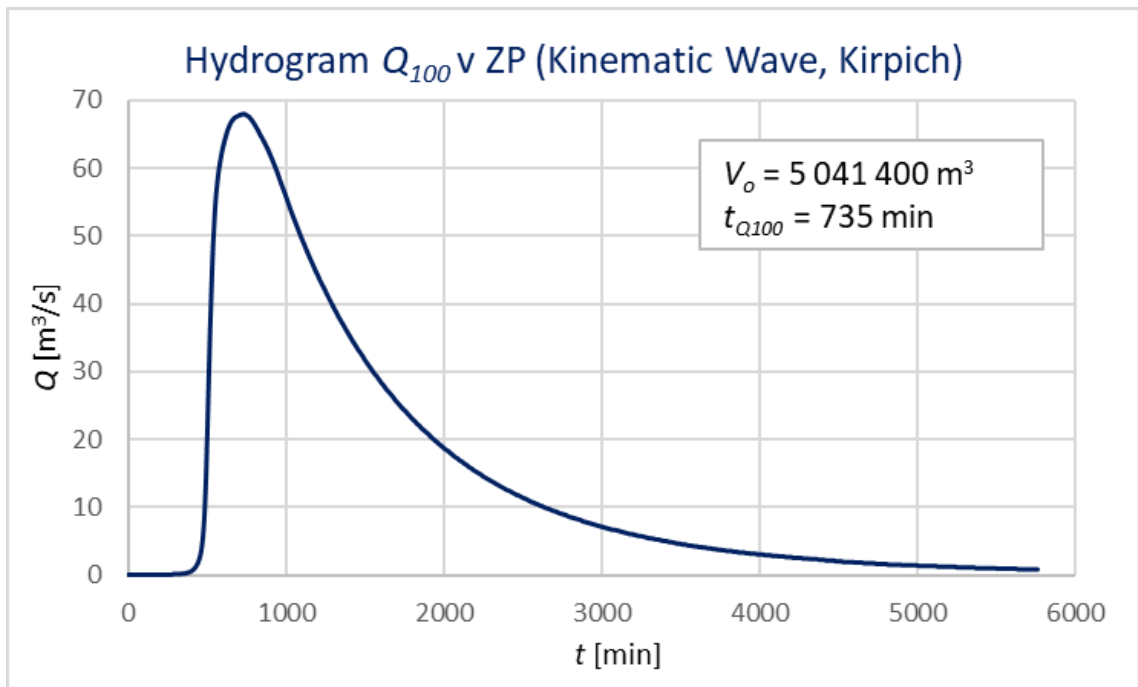
Hodnoty parametru α , při kterých jednotlivé metody docílily požadovaného kulminačního průtoku, jsou shrnuty v tabulce 10. Jedná se o hodnoty, kdy kulminační průtok dosáhl přesně hodnoty $68 \text{ m}^3/\text{s}$. Dále jsou zde uvedeny výsledné hodnoty koeficientu nasycení R (viz tabulka 11) pro jednotlivé subpovodí po provedené kalibraci.

Tabulka 10: Výsledné parametry α po provedené kalibraci modelu

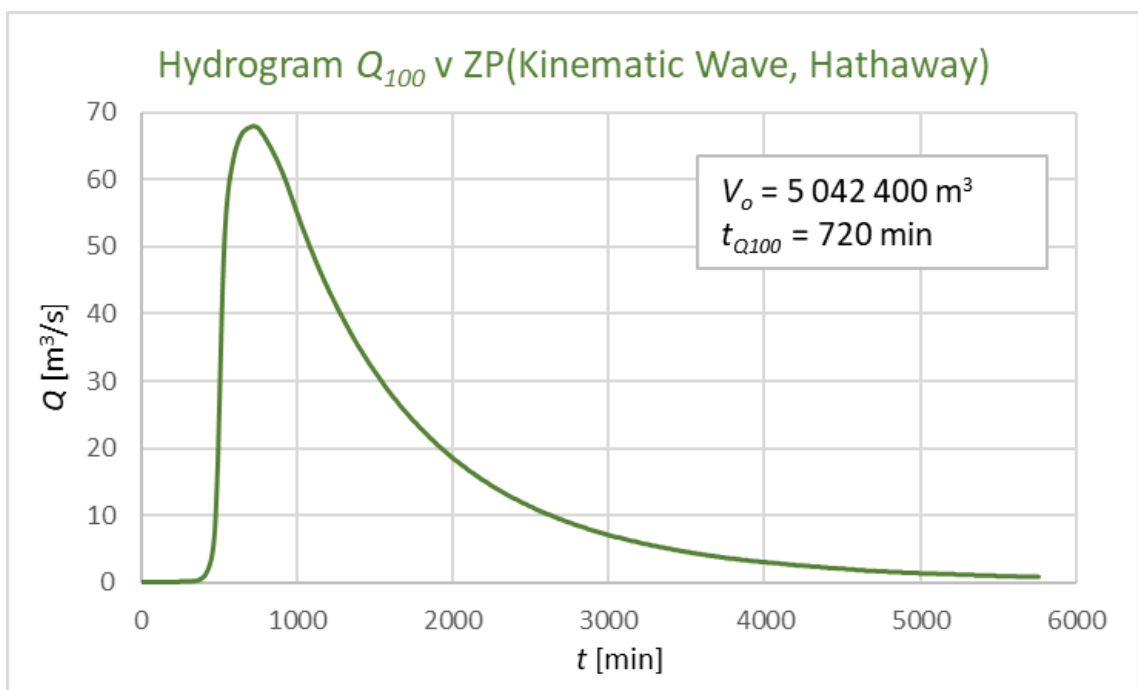
α [-]		
Kirpich	Hathaway	Muskingum
0.3232	0.3247	0.3549

Tabulka 11: Hodnoty koeficientu nasycení R pro dílčí subpovodí po provedené kalibraci

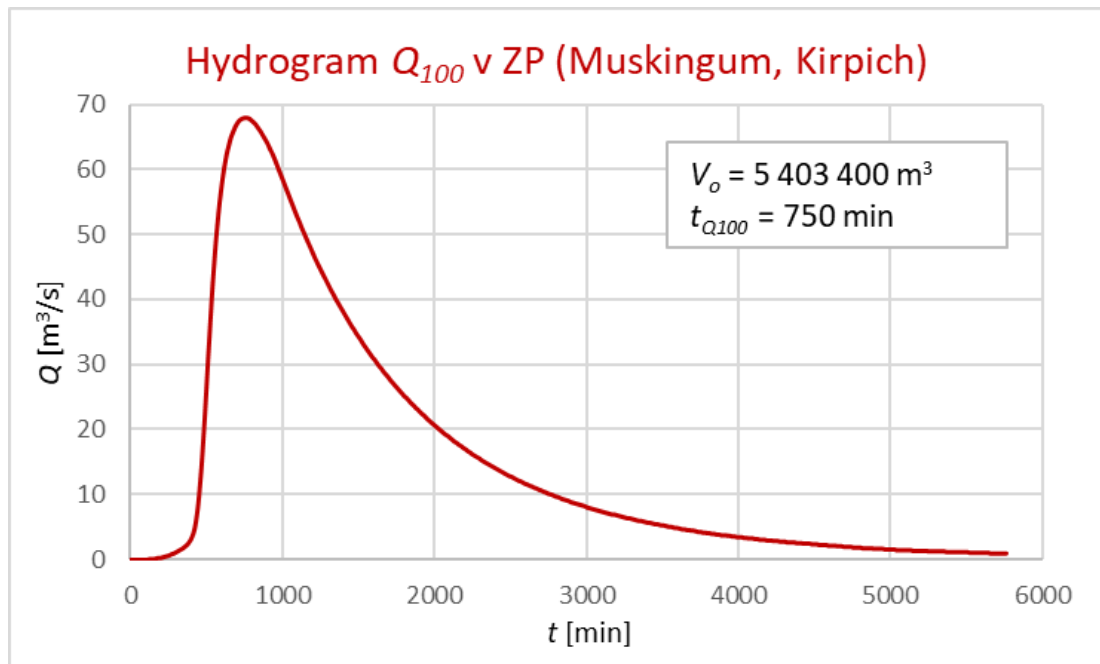
Označení	Koeficient nasycení R [hod]		
	Kirpich	Hathaway	Muskingum
S-01	11.32	11.37	12.43
S-02	8.82	8.86	9.69
S-03	19.71	19.80	21.64
S-04	11.99	12.05	13.17
S-05	2.70	2.72	2.97
S-06	16.93	17.01	18.60
S-07	11.91	11.97	13.08
S-08	12.57	12.63	13.80
S-09	2.36	2.37	2.59
S-10	4.70	4.73	5.16
S-11	18.38	18.46	20.18
S-12	14.92	14.99	16.38
S-13	14.70	14.77	16.14
S-14	15.88	15.95	17.43
S-15	40.68	40.86	44.66



Obrázek 17: Hydrogram Q_{100} v závěrovém profilu povodí (Kinematic Wave, Kirpich)



Obrázek 18: Hydrogram Q_{100} v závěrovém profilu povodí (Kinematic Wave, Hathaway)



Obrázek 19: Hydrogram Q_{100} v závěrovém profilu povodí (Muskingum, Kirpich)

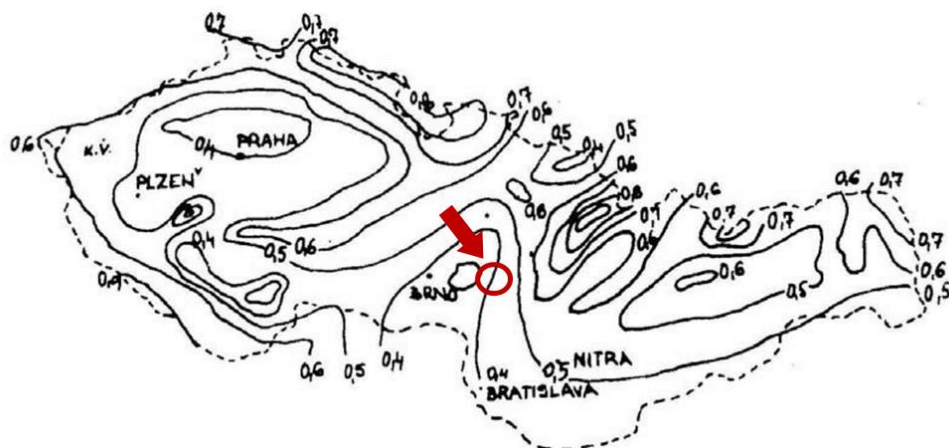
5.6 VALIDACE MODELU

Pro ověření správnosti vstupních údajů byl sestrojen trojúhelníkový hydrogram povodně podle Čerkašina (obrázek 23). Jeho řešení spočívalo ve stanovení jednotlivých bodů, které jsou uvedeny a podrobně popsány v kapitole 4.4 a jejich vypočtené hodnoty shrnuty v tabulce 12.

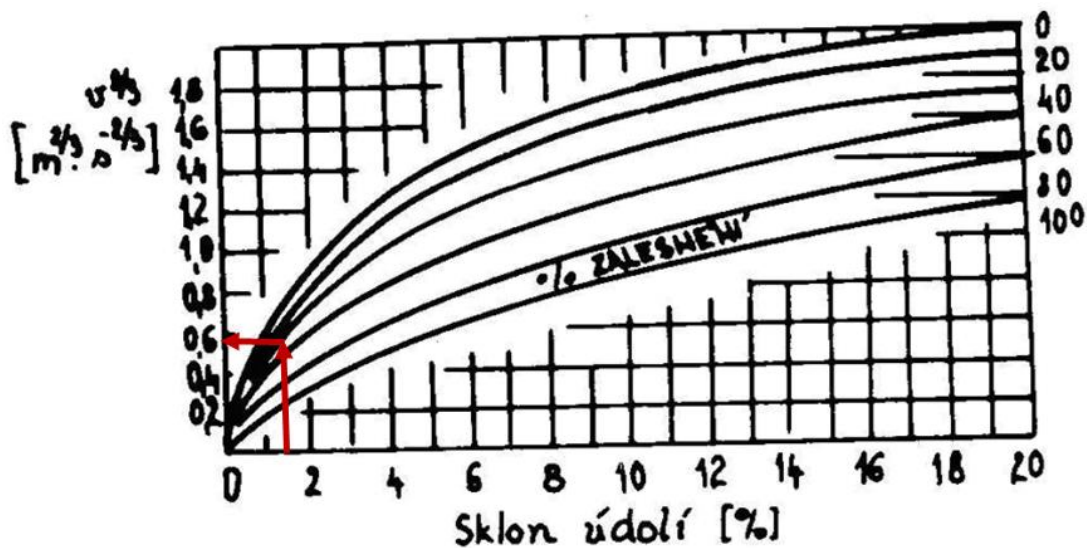
Při výpočtu těchto hodnot bylo nutné znát určité charakteristiky povodí. Potřebné charakteristiky byly zjištěny s využitím softwaru ArcMap. Jedná se o:

- maximální kótu údolnice: $H_{max} = 548,56\text{ m n. m.}$,
- minimální kótu údolnice: $H_{min} = 184,17\text{ m n. m.}$,
- délku údolnice: $L = 24\,258\text{ m}$,
- plochu povodí: $P = 134\,501\,543\text{ m}^2$,
- plochu lesů: $P_L = 34\,667\,652,33\text{ m}^2$.

Na obrázku 20 je vyznačená poloha zájmového území v mapě izolinií, ze které se určil objemový součinitel odtoku C_{obj} .

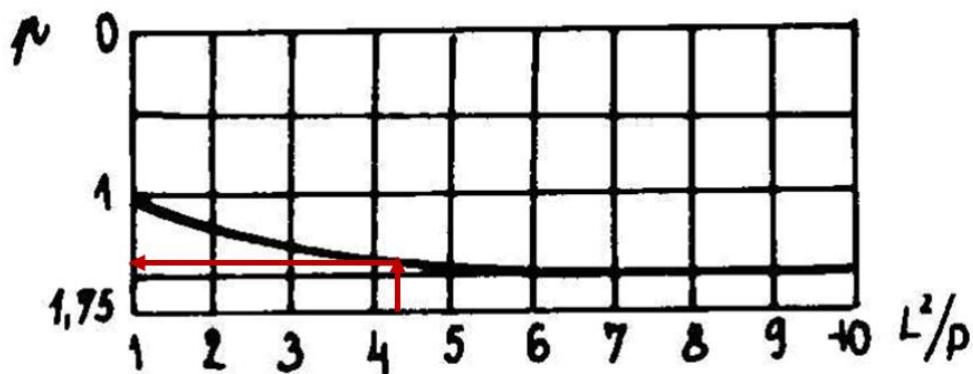


Obrázek 20: Stanovení objemového součinitele odtoku C_{obj} z mapy izolinií [29]



Obrázek 21: Odečtení střední rychlosti oběhu v_s [29]

Hodnota střední rychlosti oběhu v_s byla stanovena na základě procenta zalesnění a sklonu údolí, viz obrázek 21. Koeficient zalesnění se určil poměrem mezi plochou lesů a celkovou plochou povodí $P_L/P = 34\,667\,652,33/134\,501\,534 = 0,2577$, tedy 25,77 %.



Obrázek 22: Odečtení koeficientu tvaru povodí p [29]

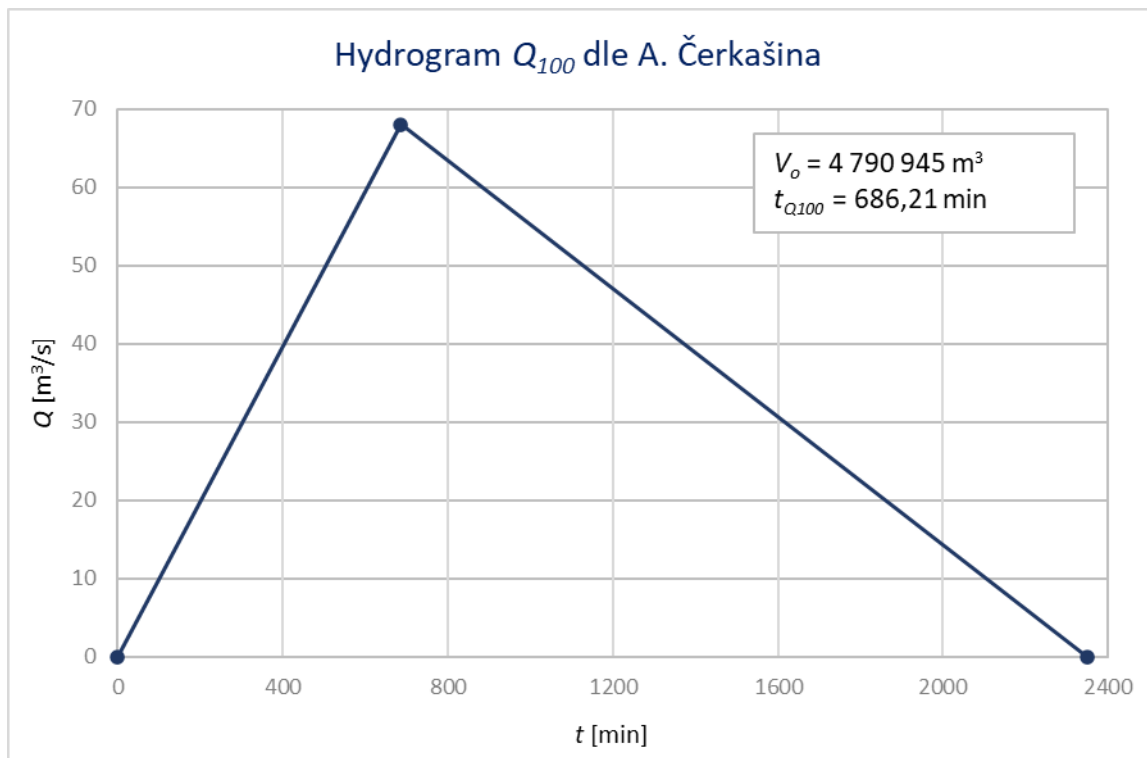
Koeficient tvaru povodí p závisí na poměru druhé mocniny délky údolnice a plochy povodí $L^2/P = 24\,258^2/134\,501\,534 = 4,375$. Podle vypočteného poměru se koeficient tvaru povodí p odečetl z křivky viz obrázek 22.

Tabulka 12: Shrnutí výsledných hodnot pro konstrukci hydrogramu podle A. Čerkašina

J [%]	1.50
C_{obj} [-]	0.4
v_s [m/s]	0.59
t [s]	41 172.39
t' [s]	41 172.39
t' [min]	686.21
H_s [mm]	89.05
V_s [m ³]	11 977 362.40
V_o [m ³]	4 790 944.96
Q_{100} [m ³ /s]	68.00
τ [s]	140 912.65
τ [min]	2 348.54

Tabulka 13: Konstrukce návrhového hydrogramu podle A. Čerkašina

t [min]	Q [m ³ /s]
0	0
686.21	68.00
2 348.54	0



Obrázek 23: Návrhový hydrogram Q_{100} dle A. Čerkašina

6 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou srovnány závěrečné návrhové hydrogramy Q_{100} vycházející z praktické aplikace (konkrétně hydrogramy z kapitol 5.4 a 5.6). Srovnání je provedeno v kapitole 6.1. Součástí je následné odvození návrhových hydrogramů pro různé doby opakování N a porovnání odvozených kulminačních N -letých průtoků s N -letými průtoky od ČHMÚ pro povodí řeky Kotojedky, viz kapitola 6.2.

6.1 SROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH HYDROGRAMŮ POVODNÍ

Pro metodu hydraulické transformace byly zkoumány metody Kinematic Wave (aproximace kinematickou vlnou) a Muskingum, jenž jsou podrobněji popsány v kapitole 4.3. K dispozici máme značné množství výpočetních vztahů pro stanovení doby koncentrace t_c . V rámci praktické aplikace byly doby koncentrace testovány podle dvou autorů, jednak dle Kirpiche (rovnice 4.5) a dále dle Hathawaye (rovnice 4.6). Oba vztahy vycházejí z knihy [25] a závisí na sklonových a délkových charakteristikách povodí. Vzorec dle Hathawaye navíc ovlivňuje i Manningův drsnostní součinitel n . Metoda hydraulické transformace Kinematic Wave byla testována pro obě zmiňované doby koncentrace. Pro metodu Muskingum byla použita doba koncentrace podle Kirpiche. Naopak pro koeficient nasycení R simulující dobu zdržení v povodí, existuje minimum výpočetních vztahů. Pro jeho stanovení se použil vztah uvedený v [26].

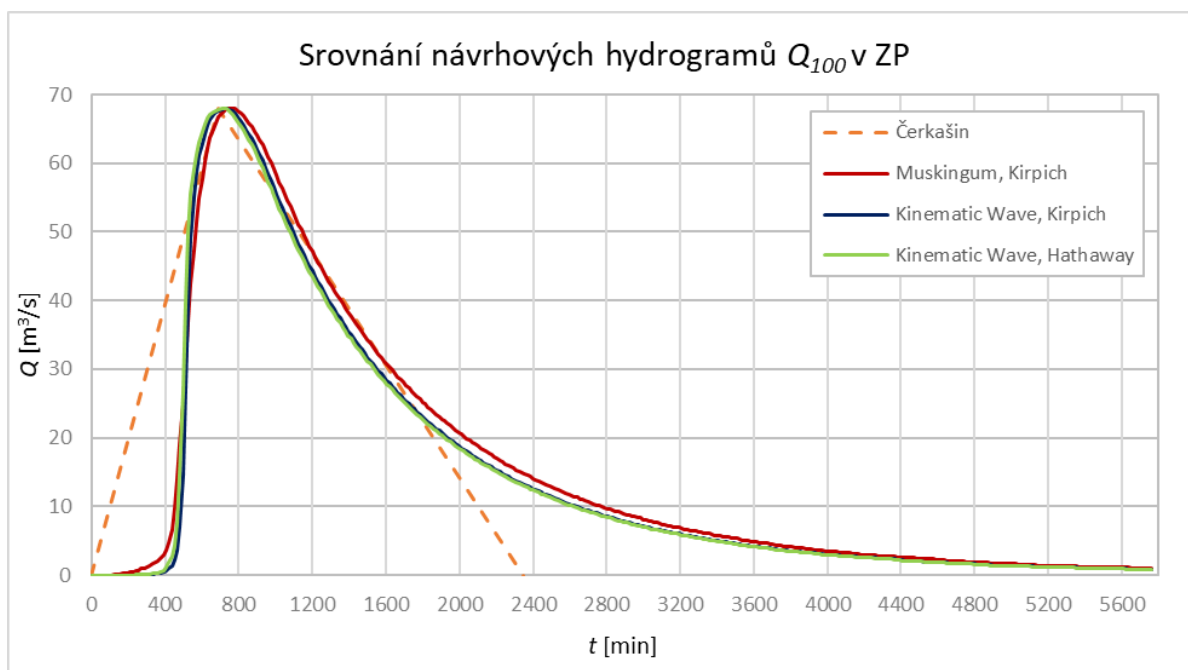
6.1.1 Shrnutí kalibrace

Kalibrace modelu byla prováděna manuálně prostřednictvím kalibračního parametru α , který vstupoval do výpočtu koeficientu nasycení R (rovnice 4.7). Výsledné hodnoty α , při kterých bylo dosaženo požadovaného kulminačního průtoku (návrhového $Q_{100} = 68 \text{ m}^3/\text{s}$), jsou uvedeny v tabulce 10 v kapitole 5.5 a pohybují se v rozmezí přibližně od 0,323 do 0,355. V případě, kdy došlo ke změně doby koncentrace, byl rozdíl v této hodnotě nepatrný, jednalo se o rozdíl v řádech tisícín. Při změně metody hydraulické transformace byl rozdíl výraznější. Pro metodu Muskingum vycházel koeficient α větší zhruba o tři setiny desetinného čísla. Obecně lze však poznamenat, že hodnoty α po provedené kalibraci vychází velmi podobné.

6.1.2 Shrnutí validace

Validace modelu byla uskutečněna na základě sestavení doplňujícího trojúhelníkového hydrogramu dle Čerkašina. Podrobný návod popisující postup pro jeho konstrukci je předveden v kapitole 4.4 a výsledky hodnot jednotlivých parametrů jsou shrnuty v Praktické aplikaci v tabulce 12.

Na obrázku 24 jsou shrnuty všechny návrhové hydrogramy Q_{100} v závěrovém profilu povodí vyplývající z aplikace všech zmiňovaných metod hydrologické a hydraulické transformace. Dále je zde znázorněn pomocný trojúhelníkový hydrogram Q_{100} dle Čerkašina sloužící k přibližnému ověření správnosti vstupních údajů.



Obrázek 24: Srovnání návrhových stoletých hydrogramů v závěrovém profilu povodí

Pro srovnání jednotlivých hydrogramů můžeme porovnat doby trvání, při kterých byl nalezen maximální průtok a dále objemy povodňových vln proteklých závěrovým profilem povodí.

Maximální průtok byl pro Kirpiche nalezen v době trvání 735 minut, pro Hathawaye v době 720 minut a pro metodu Muskingum v době 750 minut. Jedná se o rozdíl pouze 15 minut. Tento rozdíl je při dané velikosti povodí zanedbatelný. Pro Čerkašina vyšla doba trvání 686,21 minut, kde už se jedná o výraznější rozdíl, který může být způsoben méně přesnými odhady při určování některých vstupních hodnot.

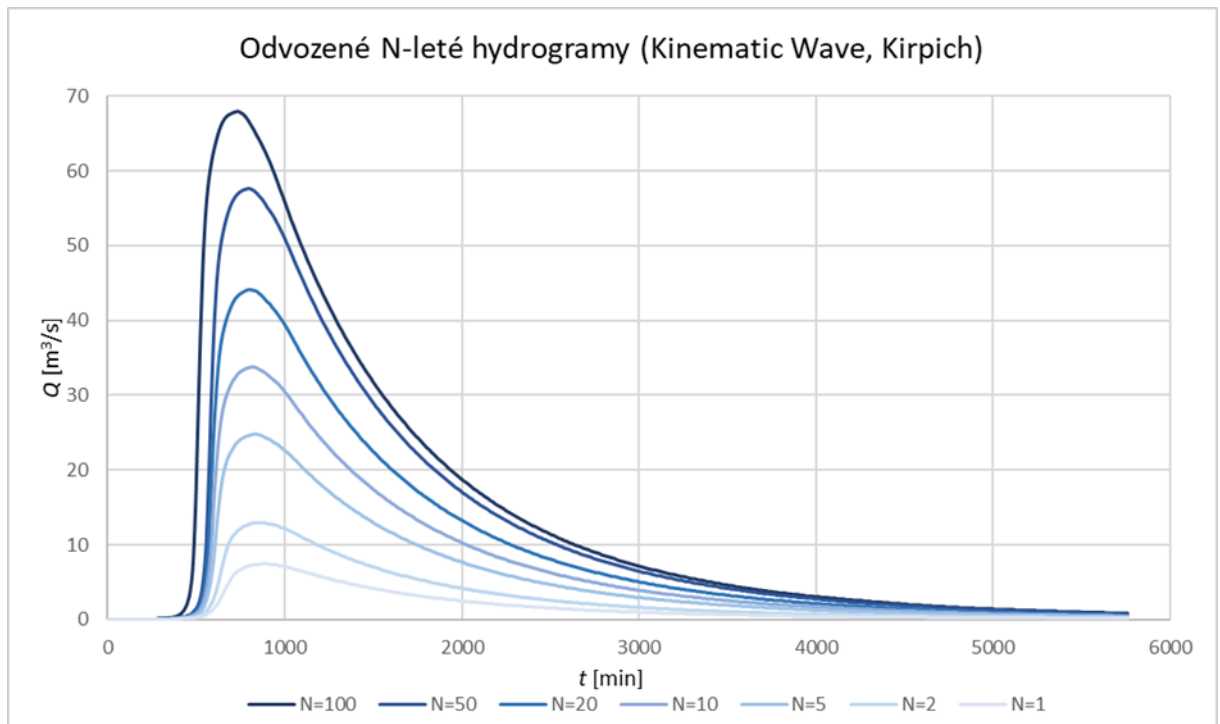
Objem povodňové vlny proteklé závěrovým profilem pro Kirpiche dosahuje hodnoty 5 041 400 m³, pro Hathawaye pak 5 042 400 m³. Rozdíl mezi nimi činí jeden tisíc m³ a v porovnání s ostatními objemy se jedná o nejmenší rozdíl. Objem povodňové vlny pro metodu Muskingum vycházel na 5 403 400 m³, kde se již jedná o znatelně větší rozdíl. Pro trojúhelníkový hydrogram byl objem vypočítán na přibližně 4 790 945 m³.

6.2 ODVOZENÍ NÁVRHOVÝCH HYDROGRAMŮ POVODNÍ

Na základě odvozených N-letých návrhových hydrogramů deště, jejichž stanovení je popsáno v kapitole 5.3.3, byly modelovány průběhy povodňových vln pro různé N-letosti (konkrétně pro N = 1, 2, 5, 10, 20, 50 a 100) Modelované hydrogramy byly provedeny pro všechny použité metody (viz obrázek 25, 26 a 27).

Pro každou metodu je navíc vytvořena souhrnná tabulka, kde jsou pro každou dobu opakování N uvedeny objemy povodňových vln proteklých závěrovým profilem $V_{o,HEC-HMS}$, maximální N-leté průtoky vycházející z modelu vytvořeného v HEC-HMS $Q_{N,HEC-HMS}$ a N-leté průtoky získané od ČHMÚ $Q_{N,ČHMU}$ (viz tabulka 14, 15 a 16). V rámci porovnání kulminačních N-letých průtoků byly vypočteny relativní odchylky průtoků.

6.2.1 Metoda „Kinematic wave“ – doba koncentrace dle Kirpiche

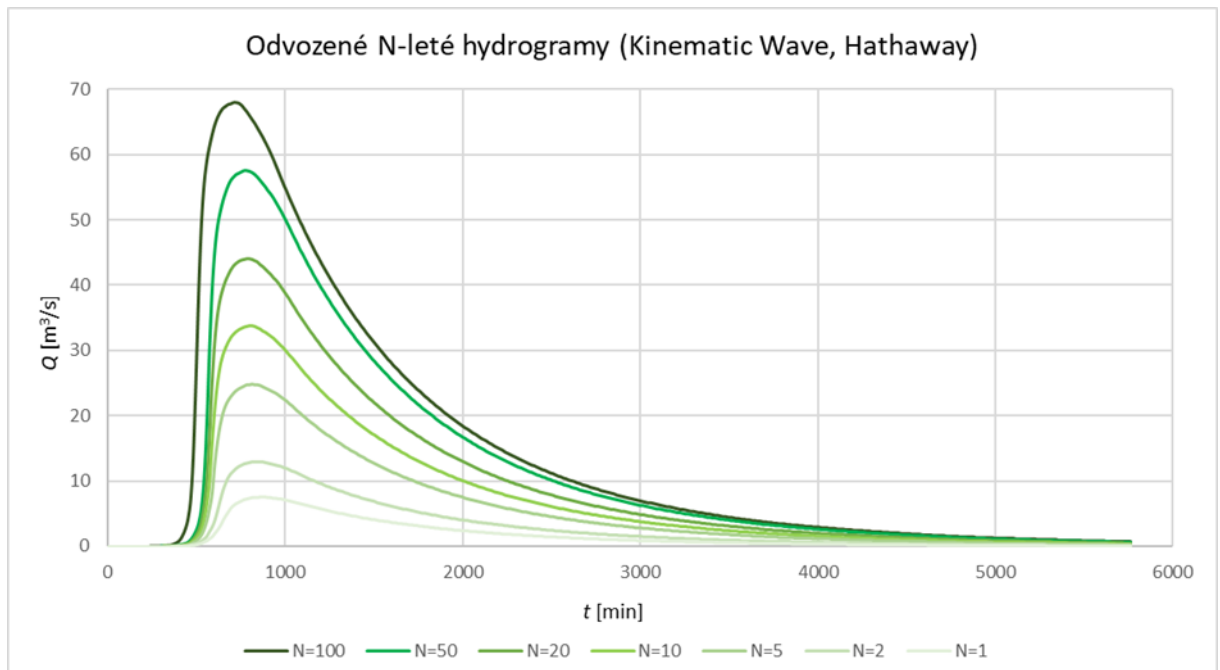


Obrázek 25: Odvozené N-leté návrhové hydrogramy povodní (Kinematic Wave, Kirpich)

Tabulka 14: Souhrn objemů povodňových vln proteklých závěrovým profilem a kulminačních průtoků (Kinematic Wave, Kirpich)

N [roky]	1	2	5	10	20	50	100
$V_{o,HEC-HMS}$ [m ³]	572 200	978 500	1 857 300	2 523 300	3 285 500	4 275 900	5 041 400
$Q_{N,HEC-HMS}$ [m ³ /s]	7.0	12.0	24.0	33.0	44.0	57.0	68.0
$Q_{N,ČHMU}$ [m ³ /s]	8.6	13.1	21.3	29.3	38.8	54.2	68.0
Rel. odchylka [%]	22.86	9.17	11.25	11.21	11.82	4.91	0.00

6.2.2 Metoda „Kinematic wave“ – doba koncentrace dle Hathawaye

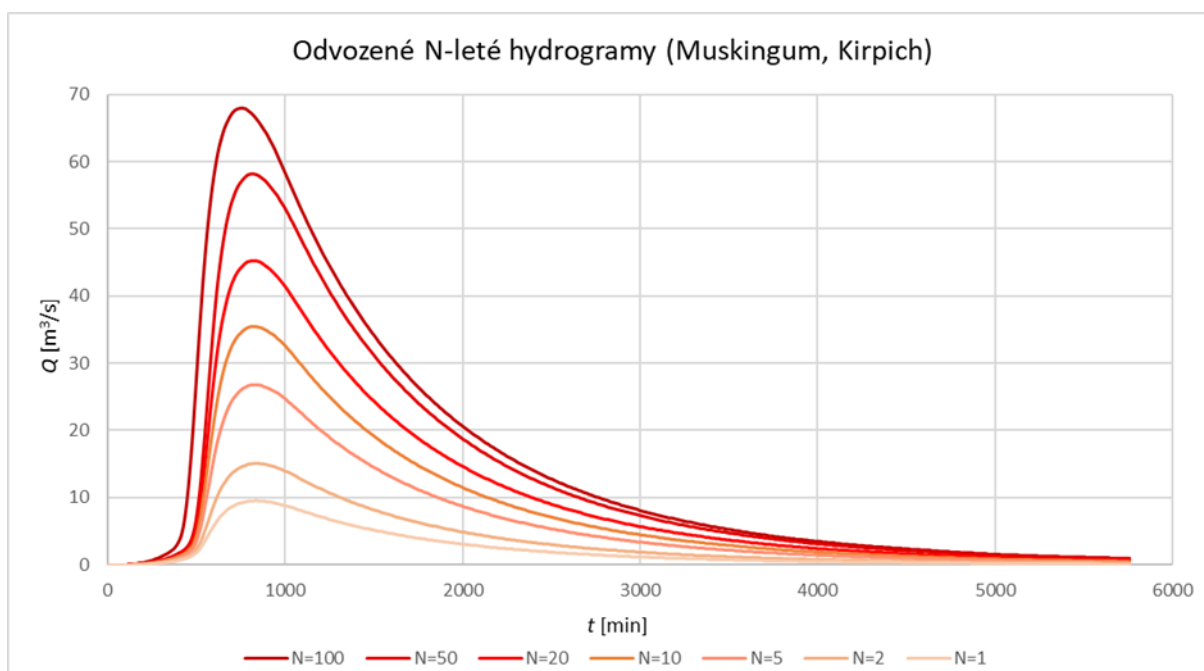


Obrázek 26: Odvozené N-leté návrhové hydrogramy povodní (Kinematic Wave, Hathaway)

Tabulka 15: Souhrn objemů povodňových vln proteklých závěrovým profilem a kulminačních průtoků (Kinematic Wave, Hathaway)

N [roky]	1	2	5	10	20	50	100
$V_{o,HEC-HMS}$ [m ³]	572 300	978 800	1 857 800	2 523 500	3 285 200	4 278 000	5 042 400
$Q_{N,HEC-HMS}$ [m ³ /s]	7.5	12.9	24.8	33.8	44.1	57.6	68.0
$Q_{N,ČHMU}$ [m ³ /s]	8.6	13.1	21.3	29.3	38.8	54.2	68.0
Rel. odchylka [%]	14.67	1.55	14.11	13.31	12.02	5.90	0.00

6.2.3 Metoda „Muskingum“ – doba koncentrace dle Kirpiche



Obrázek 27: Odvozené N-leté návrhové hydrogramy povodní (Kinematic Wave, Hathaway)

Tabulka 16: Souhrn objemů povodňových vln proteklých závěrovým profilem a kulminačních průtoků (Muskingum, Kirpich)

N [roky]	1	2	5	10	20	50	100
$V_{o,HEC-HMS}$ [m ³]	768 100	1 209 300	2 135 600	2 826 000	3 610 600	4 624 500	5 403 400
$Q_{N,HEC-HMS}$ [m ³ /s]	9.6	15.1	26.7	35.4	45.3	58.2	68.0
$Q_{N,ČHMU}$ [m ³ /s]	8.6	13.1	21.3	29.3	38.8	54.2	68.0
Rel. odchylka [%]	10.42	13.25	20.22	17.23	14.35	6.87	0.00

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce vychází ze studie efektivních protipovodňových opatření v katastrálním území města Kroměříž. Vzhledem k tomu, že ve zkoumaném povodí neprobíhá žádné kontinuální hydrologické ani meteorologické měření, tak bylo hlavním úkolem vytvoření srážko-odtokového modelu a dle různých dostupných metod jeho následná kalibrace a validace.

Pro hydrologickou transformaci byla použita metoda odtokových křivek CN, která je z hlediska získání potřebných vstupů nenáročná. Důležité je ovšem zmínit, že čísla CN jsou počítána z mapových podkladů k prosinci roku 2020 a říjnu roku 2021. Nezohledňují tak změny vzniklé v následujícím roce.

V průběhu modelování byly testovány dva typy výpočtu doby koncentrace podle různých autorů (Kirpich a Hathaway – viz [25]). V převážné většině vycházely hodnoty stanovené podle Hathawaye v řádu několika desítek minut menší. Změna v důsledku použití jiné doby koncentrace nebyla tolik výrazná, což je zjevné i na grafu srovnání – obrázek 24, kde lze vidět, že průběh povodňových vln se o moc neliší. Objemy povodňových vln vychází pro Kirpiche ve většině případů menší než pro Hathawaye a pro různé N-letosti se liší převážně v řádech několika stovek m³. Největší rozdíl v objemu vycházel pro dobu opakování N = 50 let a jedná se o rozdíl 2 100 m³.

Hydraulická transformace v říční síti byla provedena s využitím dvou zvolených metod, které HEC-HMS nabízí – Kinematic Wave a Muskingum. Objemy povodňových vln vyplývající z metody Muskingum vycházely v řádech několika stovek tisíc m³ větší a celkový průběh povodňové vlny se více vychyloval, viz obrázek 24.

Během kalibrace bylo zjištěno, že parametr, který nejvíce ovlivňoval průběh povodňové vlny, byl koeficient nasycení R . Při zvyšování této hodnoty (prostřednictvím parametru α) docházelo ke snižování kulminačního průtoku a naopak. V rámci kalibrace byl při testování metody Muskingum měněn a zkoumán vliv parametru X . Při jeho maximálním útlumu, tedy při nastavení jeho hodnoty na 0, docházelo ke snižování maximálního průtoku. Při změně hodnoty X na 0,5, která reprezentuje žádný útlum, se maximální průtok zvyšoval. Dosazením obou těchto extrémních hodnot pro celé povodí nebylo dosaženo požadovaného kulminačního průtoku, proto byl postup kalibrace zvolen stejný jako u předchozí metody Kinematic Wave, a to pomocí parametru α . Hodnota X se pro všechny dílčí povodí ponechala jako počáteční doporučená střední hodnota 0,25.

Výsledky získané z validace modelu pomocí výpočtu trojúhelníkového hydrogramu povodně podle A. Čerkašina vycházely výrazněji menší než výsledky získané z modelu v programu HEC-HMS. Rozdíly v objemu povodňové vlny odeklé závěrovým profilem vycházely větší o více než 250 tisíc m³. Doby trvání, při kterých byl nalezen maximální průtok, se lišily v rozmezí přibližně 48 až 64 minut. Výraznější rozdíly ve zmiňovaných veličinách mohou být způsobeny méně přesnými odhady některých parametrů, které vstupovaly do výpočtů hodnot potřebných k sestavení trojúhelníkového hydrogramu. Zejména se může jednat o hodnoty, které byly získány formou odečtení z příslušných grafů (obrázek 21 a 22) a mapy izolinií (obrázek 20).

V porovnání s hodnotami N-letých kulminačních průtoků od ČHMÚ vycházela celková relativní odchylka maximálních průtoků nejmenší pro metodu Kinematic Wave

s využitím vztahu doby koncentrace podle Hathawaye. Relativní odchylky průtoků však vycházely pro jednotlivé metody v různých dobách opakování N odlišně, například pro dobu opakování $N = 1$ rok byl právě průtok s využitím metody Muskingum nejbližší hodnotě kulminačního průtoků od ČHMÚ a relativní odchylka průtoků činila 10,42 %. Naopak pro stejnou dobu opakování, ale s využitím metody Kinematic Wave a výpočtu doby koncentrace podle Kirpiche, vycházela největší relativní odchylka průtoků vůbec, a to 22,86 %. Přitom právě pro tuto metodu vycházely hodnoty dalších N -letých kulminačních průtoků nejbližší hodnotám N -letých průtoků od ČHMÚ. Jedná se konkrétně o doby opakování $N = 5, 10, 20$ a 50 let. Obecně lze tedy říci, že ve většině případů vykazovala nejmenší odchýlení metoda Kinematic Wave při použití doby koncentrace dle Kirpiche. Výjimkou byly první dvě N -letosti. Jak již bylo uvedeno pro dobu opakování $N = 1$ rok byla nejpřesnější metoda Muskingum. Ovšem z celkového hlediska lze tuto metodu zařadit jako nejméně shodnou. Pro dobu opakování $N = 2$ roky byl nejpřesnější výsledek získán při využití doby koncentrace podle Hathawaye.

Závěrem lze konstatovat, že problematika týkající se srážko-odtokového modelování je velmi rozsáhlá a pomocí srážko-odtokových modelů lze analyzovat vliv různých faktorů (srážky, topografie terénu) na průběh povodní. Pro simulace se dají využít různé metody, které mají své výhody i nevýhody. Je proto důležité si uvědomit, že existují určitá omezení a nejistoty, které jsou s modelováním povodňových průtoků spojeny. Zásadním předpokladem pro získání spolehlivých výstupů jsou, jak již bylo zmíněno v Úvodu práce, kvalitní vstupní data, ale také správné nastavení a kalibrace modelu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] RAZI, M.A.M., J. ARIFFIN, W. TAHIR a N.A.M. ARISH. *Flood estimation studies using hydrologic modeling system (HEC-HMS) for Johor River, Malaysia*. Journal of Applied Sciences 10: 930-939, 2010. ISSN 1812-5654.
- [2] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [3] IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [4] BECKER, A. a P. SERBAN. *Hydrological models for water-resources system design and operation: Operational hydrology report No. 34*. World Meteorological Organization, Geneva 1990.
- [5] Ničivé povodně před 15 lety ochromily život města. Město Kroměříž: Aktuality [online]. 2012 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.mesto-kromeriz.cz/aktuality/nicive-povodne-pred-15-lety-ochromily-zivot-mesta/>
- [6] HALWATURA, D. a M.M.M. NAJIM. *Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment*. Internatioanl Enviromental Modeling & Software Society, 2013.
- [7] JENÍČEK, Michal. *Klasifikace hydrologických modelů: Studijní materiál pro potřeby posluchačů předmětu "Modelování hydrologických procesů"*. In: Informační systém Masarykovy univerzity [online]. Fakulta informatiky Masarykovy univerzity [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/podzim2014/Z7000/um/Klasifikace_hydro_modelu_Jenice_k.pdf
- [8] KULHAVÝ, Zbyněk a Pavel KOVÁŘ. *Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí: Metodická pomůcka* [online]. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2000 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: http://www.hydropmeliorace.cz/czu/ostatni/hb_malych_povodi.pdf
- [9] SITTERSON, Jan, Chris KNIGHTES, Rajbir PARMAR, Kurt WOLFE, Muluken MUCHE a Brian AVANT. *An Overview of Rainfall-Runoff Model Types*. Washington, DC: United States Enviromental Protection Agency, 2017.
- [10] JANEČEK, Miloslav a kol. *Ochrana zemědělské půdy před erozí: Metodika*. Praha: Powerprint, 2012. ISBN 978-80-87415-42-9.

- [11] TAJBAKSHI, S. M., H. MEMARIAN, M. SOBHANI a A. H. AGHAKHANI AFSHAR. *Kinematic runoff and erosion model efficiency assessment for hydrological simulation of semi-arid watersheds*. Iran: Global Journal of Environmental Science and Management, 2018.
- [12] *KINEROS2: A Kinematic Runoff and Erosion Model* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>
- [13] KAVKA, Petr. *SMODERP 2D – Uživatelská příručka: Simulační model povrchového odtoku a erozního procesu*. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2017.
- [14] STARÝ, Miloš. *Hydrologie: Modul 01*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
- [15] *MIKE SHE: User Guide and Reference Manual*. Danish Hydraulic Institute, 2023. Dostupné také z: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Water_Resources/MIKE_SHE_Print.pdf
- [16] *Program DesQ-MaxQ: Výpočet maximálních průtoků na malých povodích* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <http://www.desq-maxq.cz/index.html>
- [17] PETERS, John C. *The HEC Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. 609 Second Street, Davis, CA 95616-4687: US Army Corps of Engineers, 1995.
- [18] *US Army Corps of Engineers: Hydrologic Engineering Center* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- [19] BARTLES, Mike, Tom BRAUER, David HO, Matt FLEMING, Greg KARLOVITS, Jay PAK, Nick VAN a Josh WILLIS. *Hydrologic Modeling System: HEC-HMS User's manual (CEIWR – HEC)*. 609 Second Street, Davis, CA 95616-4687: US Army Corps of Engineers, 2022.
- [20] SOBOTKOVÁ, Veronika. *Geografické informační systémy – CS002: Návody do cvičení*. Ústav vodního hospodářství krajiny, VUT FAST, Brno, 2020.
- [21] CLARK, C.O., 1945. *Storage and the unit hydrograph*. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1419-1446.
- [22] RASHMS.COM: Blogs for H&H Studies and Drainage Design [online]. [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://rashms.com/>
- [23] CHE, Daniel, Mandar NANGARE a Larry W. MAYS. *Determination of Clark's Unit Hydrograph Parameters for Watersheds*. Journal of Hydrologic Engineering: American Society of Civil Engineers, 2014. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000796
- [24] Chapter 15: Time of Concentration. In: *National Engineering Handbook* [online]. Natural Resources Conservation Service, s. 29 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://directives.sc.egov.usda.gov/RollupViewer.aspx?hid=17092>

- [25] Chapter 2: Basic hydrologic principles. In: PONCE, Victor Miguel. *Engineering Hydrology: Principles and Practices* [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <http://onlinecalc.sdsu.edu/textbookhydrology/chapters.html>
- [26] KANTI KAR, Kanak, Sung-Kee YANG a Jun-Ho LEE. *Assessing Unit Hydrograph Parameters and Peak Runoff Responses from Storm Rainfall Events: A Case Study in Hancheon Basin of Jeju Island*. Korea, 2015.
- [27] MACARTHUR, Robert a Johannes J. DE VRIES. *Introduction and Application of Kinematic Wave Routing Techniques Using HEC-1*. US Army Corps of Engineers: Hydrologic Engineering Center, 1993.
- [28] *Hydrologic Modeling System: HEC-HMS Tutorials And Guides*. US Army Corps of Engineers: Hydrologic Engineering Center. Dostupné také z: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsguides>
- [29] STARÝ, Miloš. *Hydrologie: Modul 03 (Návody do cvičení)*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
- [30] Kroměříž: Povodňový plán města [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://www.edpp.cz/krm_hydrologicke-udaje/
- [31] ČZÚ, TAČR – TA02020402: *Optimalizace vodního režimu krajiny ke snižování dopadů hydrologických extrémů*, Praha, 2014.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	celková plocha povodí [km^2]
A_c	průřezová plocha v hloubce y_c [m^2]
A_t	kumulativní plocha přispívající v čase t [km^2]
BPEJ	Bonitovaná půdně ekologická jednotka
CN	Curve Number (číslo odtokové křivky)
C_{obj}	objemový součinitel odtoku [-]
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČVUT	České vysoké učení technické
DHI	Danish Hydraulic Institute
GIS	Geografický informační systém
H_s	srážkový úhrn za dobu trvání kritického deště [mm]
H_{max}	kóta maximální úrovně údolnice [m n. m.]
H_{min}	kóta minimální úrovně údolnice [m n. m.]
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
HPJ	Hlavní půdní jednotka
HSP	Hydrologická skupina půd
I_a	počáteční retence v povodí [mm]
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change (Mezivládní panel pro změnu klimatu)
J	průměrný sklon údolnice toku [-]
KINEROS	Kinematic Runoff and Erosion Model
L	délka údolnice [km]
$L_{T,i}$	délka úseku toku [km]
LPIS	Land Parcel Identification system (veřejný registr půdy)
MIKE-SHE	MIKE Systém Hydrologique European
n	Manningův součinitel drsnosti [-]
O	omočený obvod [m]
p	koeficient závisující na tvaru povodí [-]
P	kumulativní (celková) srážka [mm]
P_e	efektivní srážka [mm]
Q_{100}	stoletý průtok (maximální povodňový) [m^3/s]
Q_c	průtok v daném úseku [m^3/s]
$Q_{N,\text{ČHMÚ}}$	maximální N-leté průtoky od ČHMÚ [m^3/s]
$Q_{N,\text{HEC-HMS}}$	maximální N-leté průtoky získané ze softwaru HEC-HMS [m^3/s]
R	hydraulický poloměr [m]
R	koeficient nasycení [hod]
S	maximální potenciální retence [mm]

SAC-SMA	Sacramento Soil Moisture Accounting
SCS	Soil Conservation Service
SI	Système International d'Unites (Mezinárodní systém jednotek)
S_c	průměrný sklon dna koryta v daném úseku [-]
S_L	sklon údolnice [m/m]
$S_{T,i}$	podélný sklon úseku toku [km]
t	doba koncentrace podle Čerkašina [s]
t_c	doba koncentrace [hod]
t'	trvání kritického deště [s]
TOPMODEL	Topography based Hydrological Model
v_m	rychlost povodňové vlny – podle Manninga [m/s]
V_o	objem povodňové vlny odteklé závěrovým profilem povodí [m ³]
v_s	střední rychlost doběhu [m/s]
V_s	objem srážek spadlých na povodí [m ³]
VUT	Vysoké učení technické
w	šířka koryta ve dně v daném úseku [m]
WMO	World Meteorological Organisation
y_c	hloubka vody v korytě v daném úseku [m]
z	boční sklon koryta v daném úseku [-]
α	koeficient v rozmezí cca 0,4 – 1,4 [-]
ΔH	rozdíl maximální a minimální kóty údolnice [m n. m.]
τ	doba trvání průchodu povodně [s]

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schéma prostorové diskretizace v modelech. A: celistvý model, B: semi-distribovaný model, C: distribuovaný model [9]	7
Obrázek 2: Clarkův jednotkový hydrogram.....	14
Obrázek 3: Závislost mezi časem a plochou v HEC-HMS pro Clarkův jednotkový hydrogram	14
Obrázek 4: Doba koncentrace v hydrografické analýze.....	15
Obrázek 5: Schéma lichoběžníkového průřezu koryta.....	17
Obrázek 6: Muskingum – princip rozdělení celkového objemu koryta na hranoly a klíny	18
Obrázek 7: Stanovení objemového součinitele odtoku C_{obj} z mapy izoliní [29]	21
Obrázek 8: Stanovení střední rychlosti doběhu v_s [29]	21
Obrázek 9: Určení koeficientu tvaru povodí p [29].....	23
Obrázek 10: Konstrukce hydrogramu povodně podle A. Čerkašina [29]	23
Obrázek 11: Mapa zájmového území	24
Obrázek 12: Schematizace povodí v softwaru HEC-HMS.....	25
Obrázek 13: Rozložení CN v dílčích povodí	27
Obrázek 14: Hyetogram deště pro Kotojedku od ČHMÚ	30
Obrázek 15: N-leté maximální denní úhrny pro stanici Kroměříž.....	31
Obrázek 16: Odvozené N-leté návrhové hyetogramy 24hodinového deště pro povodí Kotojedky	32
Obrázek 17: Hydrogram Q_{100} v závěrovém profilu povodí (Kinematic Wave, Kirpich)....	35
Obrázek 18: Hydrogram Q_{100} v závěrovém profilu povodí (Kinematic Wave, Hathaway)	35
Obrázek 19: Hydrogram Q_{100} v závěrovém profilu povodí (Muskingum, Kirpich).....	36
Obrázek 20: Stanovení objemového součinitele odtoku C_{obj} z mapy izoliní [29]	36
Obrázek 21: Odečtení střední rychlosti oběhu v_s [29]	37
Obrázek 22: Odečtení koeficientu tvaru povodí p [29]	37
Obrázek 23: Návrhový hydrogram Q_{100} dle A. Čerkašina	38
Obrázek 24: Srovnání návrhových stoletých hydrogramů v závěrovém profilu povodí	40
Obrázek 25: Odvozené N-leté návrhové hydrogramy povodní (Kinematic Wave, Kirpich)	41
Obrázek 26: Odvozené N-leté návrhové hydrogramy povodní (Kinematic Wave, Hathaway).....	42
Obrázek 27: Odvozené N-leté návrhové hydrogramy povodní (Kinematic Wave, Hathaway).....	43

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: N-leté povodňové průtoky pro povodí Kotojedky od ČHMÚ	26
Tabulka 2: Charakteristiky dílčích subpovodí.....	27
Tabulka 3: Doby koncentrace t_c pro dílčí subpovodí	28
Tabulka 4: Charakteristiky dílčích toků	29
Tabulka 5: Maximální denní úhrny srážek $H_{1d,N}$ s dobou opakování N let podle Gumbela pro stanici Kroměříž.....	31
Tabulka 6: Odvozené hodnoty maximálních denních úhrnů srážek $H_{1d,N}$ s dobou opakování N let podle Gumbela pro povodí Kotojedky	31
Tabulka 7: Rozložení srážkových úhrnů $H_{s,N}$ v průběhu dne	32
Tabulka 8: Metoda Kinematic Wave – shrnutí vstupních hodnot.....	33
Tabulka 9: Metoda Muskingum – shrnutí vstupních hodnot.....	33
Tabulka 10: Výsledné parametry α po provedené kalibraci modelu	34
Tabulka 11: Hodnoty koeficientu nasycení R pro dílčí subpovodí po provedené kalibraci	34
Tabulka 12: Shrnutí výsledných hodnot pro konstrukci hydrogramu podle A. Čerkašina	38
Tabulka 13: Konstrukce návrhového hydrogramu podle A. Čerkašina	38
Tabulka 14: Souhrn objemů povodňových vln proteklých závěrovým profilem a kulminačních průtoků (Kinematic Wave, Kirpich)	41
Tabulka 15: Souhrn objemů povodňových vln proteklých závěrovým profilem a kulminačních průtoků (Kinematic Wave, Hathaway).....	42
Tabulka 16: Souhrn objemů povodňových vln proteklých závěrovým profilem a kulminačních průtoků (Muskingum, Kirpich)	43