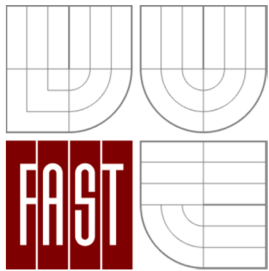


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

# VYUŽITÍ VYBRANÝCH METOD UMĚLÉ INTELIGENCE PRO NALEZENÍ MALÝCH POVODÍ NEJVÍCE OHROŽENÝCH POVODNĚMI Z PŘÍVALOVÝCH DEŠŤŮ

USE OF SELECTED ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR FINDING SMALL WATERSHEDS  
MOST AT RISK OF FLASH FLOODS

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. PAVEL JEŽÍK

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. MILOŠ STARÝ, CSc.

BRNO 2015

## **Abstrakt**

Přívalové deště se na našem území mohou vyskytovat prakticky kdekoli. V současné době lze jejich výskyt odhadnout s určitým časovým předstihem, ale jejich předpovídaná lokalizace je velmi problematická. Nynější prostředky pro hledání ohrožených povodí se soustřeďují především na operativní vyhodnocování aktuální meteorologické situace a zpracování srážkové předpovědi na nejbližší hodiny (tzv. nowcasting). Práce se zabývá odlišným způsobem hledání potenciálně ohrožených území, kdy jsou vyhodnocovány statistické veličiny za dlouhé období (N-leté vody a dešťové charakteristiky) a jsou dány do souvislosti s vlastnostmi konkrétních povodí. Celá problematika je řešena mimo situaci aktuálního ohrožení, jedná se o tzv. off-line řešení.

V práci je prezentován model sestavený na bázi vybraných metod umělé inteligence, který tvoří jádro koncové mapové aplikace. Užití modelu a koncové aplikace se předpokládá v oblasti, kde se rozhoduje o toku financí v souvislosti s protipovodňovou ochranou. Model se soustřeďuje na přívalové deště a povodně jimi způsobené.

## **Klíčová slova**

Přívalové deště, povodně z přívalových dešťů, malé povodí, modelování, fuzzy logika, teorie možnosti, umělá inteligence.

## **Abstract**

In our region, heavy rains may occur virtually everywhere. Nowadays there are instruments to predict these events in sufficient advance, but without precise localisation, which is a problem. Present instruments for searching endangered watersheds are focused on operative evaluation of meteorological situation and actual precipitation forecast processing (nowcasting). The thesis brings quite different approach. Potentially endangered areas are detected with evaluation of long-term statistical variables (N-year discharges and rain characteristics) and properties of specific watershed. The whole issue is handled out of situation of actual danger, this attitude is so called off-line solution.

The thesis describes a model based on selected artificial intelligence methods. The model forms the core of final map application. The use of model and final application is supposed to be used in area of preventive flood protection, and related investment decision-making. The model focuses on heavy rains and flash floods.

## **Keywords**

Heavy rains, flash floods, small watershed, modelling, fuzzy logics, possibility theory, artificial intelligence.

## **Bibliografická citace**

Ing. Pavel Ježík *Využití vybraných metod umělé inteligence pro nalezení malých povodí nejvíce ohrožených povodněmi z přívalových deštů*. Brno, 2015. 95 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce prof. Ing. Miloš Starý, CSc.

### **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

Děkuji svému vedoucímu disertační práce prof. Ing. Miloši Starému, CSc. za rady, vstřícný přístup a poskytnutí podkladů, které přispěly k vytvoření této práce. Děkuji také svým rodičům a blízkým za trpělivost a podporu při studiu.

# OBSAH

OBSAH .....	5
1 ÚVOD .....	7
1.1 Přívalové deště .....	7
1.2 Povodně z přívalových dešťů .....	9
1.3 Možnosti předpovídání povodní z přívalových dešťů .....	11
2 PRÁCE ZABÝVAJÍCÍ SE PŘÍBUZNOU TEMATIKOU .....	14
3 CÍL .....	17
4 ZVOLENÉ PŘEDPOKLADY ŘEŠENÍ .....	18
5 METODA .....	19
5.1 Teorie fuzzy množin a fuzzy logika .....	19
Fuzzy množiny .....	19
Fuzzy logika .....	22
Fuzzy pravidla .....	23
Fuzzy inferenční systém .....	23
5.2 Teorie možnosti .....	25
6 POPIS MODELU .....	27
6.1 Sestavení modelu .....	27
6.2 Kalibrace modelu .....	29
6.2.1 Matice báze pravidel .....	30
6.2.2 Parametry funkcí možnosti .....	30
6.2.3 Váhy jednotlivých pravidel .....	32
6.2.4 Postupná optimalizace .....	33
6.2.5 Kriteriaální funkce .....	34
6.2.6 Oblast mimo maximální odtoky při známé N-letosti .....	35
6.2.7 Varianty modelu pro různé N-letosti .....	39
7 APLIKACE .....	40
7.1 Vzorová data .....	40
7.2 Kalibrace a validace modelu .....	46
7.3 Citlivostní analýza .....	47
7.4 Dosažené výsledky .....	50
7.4.1 Kalibrace a validace při rozdělení množiny dat v poměru 2:1 .....	50

7.4.2	Kalibrace celé množiny dat – podklad pro mapovou aplikaci .....	55
7.5	Mapová aplikace.....	63
7.5.1	Datové matice.....	63
7.5.2	Samotná mapová aplikace.....	69
7.6	Užití výstupů v poloprovozu operativního modelu ČHMÚ .....	73
8	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ .....	77
9	ZÁVĚR A PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDECKÉ DISCIPLÍNY .....	81
10	NÁMĚTY PRO DALŠÍ POKRAČOVÁNÍ VE VÝZKUMU .....	83
11	SEZNAMY .....	85
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	85
	SEZNAM TABULEK.....	88
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	88
12	POUŽITÁ LITERATURA.....	90
13	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA .....	94
	2015.....	94
	2014.....	94
	2013.....	94
	2012.....	95
	2011.....	95

# 1 ÚVOD

S rostoucím socioekonomickým rozvojem společnosti roste i její snaha umět čelit extrémním přírodním jevům. Obecně je v první řadě nutné předpokládat, že určitá událost vůbec může nastat, dále pak pokusit se předpovědět (místně i časově) vznik a průběh dané události a nakonec zvládnout vhodně operativně pracovat v průběhu samotné události tak, aby byly minimalizovány následky v podobě ztrát na životech a majetku. Mezi extrémní přírodní jevy patří i povodně. Zvláštní kategorii tvoří mimořádné povodně (např. při poruše vodního díla), jejichž vznik lze dopředu zpravidla jen velmi obtížně odhadnout. Vznik povodní způsobených regionálními dešti či povodní z tání sněhu je v dnešní době poměrně dobře odhadnutelný a předpovědi jsou schopné varovat obyvatele s určitým předstihem. To je dáno zejména kvalitou a charakterem meteorologické předpovědi, která hraje zásadní roli na straně vstupů do hydrologických modelů. Poněkud odlišná situace je v dnešní době v oblasti předpovídání povodní z přívalových srážek, tzv. flash floods. Podmínky pro jejich vznik se dají předpovědět, nicméně jejich předpokládaná lokalizace je pouze velmi přibližná a následný průběh je velmi dynamický.

Problematika predikce povodní z přívalových srážek a jednoduchého modelování srážko-odtokového procesu je značně zatížena neurčitostmi. Parametry popisující příčinnou přívalovou srážku, se kterými modely pracují, jsou zpravidla zpětně vyhodnocovány ze záznamů srážkoměrných stanic. Přesnost odvození těchto dat je limitována zejména hustotou srážkoměrných stanic, která vzhledem k tomu, že přívalové srážky postihují plošně poměrně malá území, nemůže být dostatečná. Mnohdy navíc dochází k tomu, že data nejsou při extrémních intenzitách (tedy při přívalových deštích) zcela spolehlivá. Rovněž transformace celého proměnlivého průběhu srážky do datově méně náročné formy, se kterou může model pracovat, vyžaduje přijetí množství zjednodušujících předpokladů, které však vedou ke snížení přesnosti vstupních dat do modelu. Nejistoty do výpočtů vstupují i v oblasti hydrologických dat – průtoky, které jsou odvozovány z hodnot vodních stavů. Mnohdy se navíc jedná o hodnoty zpětně odvozované až po kulminaci. Například při zpětném vyhodnocování extrémní přívalové povodně z roku 2009 na tocích Jičínky a Luhy byly kulminační průtoky stanoveny kompromisním řešením vycházejícím z porovnání výsledků hydraulických a srážkoodtokových modelů, přičemž chyba těchto odhadů byla stanovena na 20 % (ČHMÚ, 2010).

## 1.1 Přívalové deště

Dešťové srážky obecně jsou charakterizovány třemi základními veličinami: doba trvání deště, intenzita deště (resp. specifická vydatnost) a velikost zasažené plochy. Přívalový déšť je definován jako déšť velké intenzity a v našich oblastech krátkého trvání a malého plošného rozsahu. Způsobuje prudké rozvodnění malých toků a značné zatížení kanalizačních sítí. Kritéria nejsou jednotná, za přívalový déšť je dle Hellmana považován déšť s množstvím 10 až 80 mm srážek spadlých za dobu menší než 180 minut (ČHMÚ, 2014). Jinou možností pro klasifikaci deště je např. Wussovo kritérium (Dub, 1963). Hraniční hodnoty v mm a minutách však nejsou všeobecně

považovány za jednoznačně definující přívalové srážky. Lze však říci, že se jedná o krátkodobou extrémní srážkovou událost.

Přívalové srážky se vyskytují převážně od druhé poloviny dubna do konce září. Jsou způsobeny typicky bouřkovými, konvekčními dešťovými srážkami velmi silné intenzity (v extrémních případech více než 100 mm za hodinu), s krátkým trváním (desítky minut), které zasahují svými plošně izolovanými jádry území o menší rozloze, zpravidla několik desítek km<sup>2</sup>. Tyto lijáky jsou buď vázány na zvlněné studené fronty, nebo mohou vznikat silné bouřky v oblastech velmi labilního teplotního zvrstvení bez existence fronty. To znamená, že mohou vyvolat povodeň většinou na povodích malých toků, a to v kterékoliv oblasti České republiky. Představují nejpočetnější případy povodňového ohrožení (Matějček, 1999).

V případě denního cyklu lze téměř s jistotou hovořit o výskytu extrémních bouřkových lijáků zcela jednoznačně v odpoledních a večerních hodinách v důsledku největšího vlivu konvekce. Tyto srážky většinou po půlnoci rychle ztrácejí na intenzitě. Z hlediska ohrožení občanů a jejich majetku je tato doba bohužel nejnepříznivější, neboť k následným povodním z přívalových dešťů dochází s malým zpožděním jen několik hodin právě v pozdních večerních a nočních hodinách (Kakos, 2001).

V tabulce 1.1 jsou uvedeny charakteristiky extrémně intenzivních srážkových událostí v závislosti na délce jejich trvání. V řádku popisujícím druh oblaků jsou uvedeny zkratky, které je třeba vysvětlit: *Cb* – bouřkový oblak cumulonimbus, *Ns* – nimbostratus. V posledním řádku popisujícím příčiny výstupných pohybů jsou uvedeny tyto zkratky: *K* – konvekce, *F* – frontální pohyb, *C* – cyklonalita, *O* – vliv orografie.

**Tab. 1.1** Meteorologické charakteristiky případů extrémních intenzit v závislosti na době trvání srážky (Kakos, 2001)

Charakteristika	Trvání srážky		
	Do 3 hod	3 až 18 hod	Více než 24 hod
Bouřka	Vždy	Vždy aspoň 2 po sobě	Zcela ojediněle
Charakter deště	Příval (popř. kroupy)	Opakovaný příval	Trvalý mírný až silný
Doba začátku srážek	Odpoledne a večer	Odpoledne a večer	Kdykoliv
Doba ukončení srážek	Odpoledne až večer	Večer až brzy ráno	Kdykoliv
Druh oblaků	<i>Cb</i>	<i>Cb</i> (-> <i>Ns</i> )	<i>Ns</i> (výjimečně <i>Cb</i> )
Denní teploty před srážkami vzhledem ke klimatickému normálu	Vždy nad 25 °C	Červen až září nad 25 °C, květen nad 20 °C	Pod 20 °C, na horách nad 15 °C
Nejvyšší denní teploty před a po srážkách	Vždy pokles	Vždy pokles	Nelze určit



Tlak vzduchu	Slabě podnormální až normální	Slabě až mírně podnormální i normální	Nelze určit
Příčiny výstupných pohybů	<i>F, K, C</i>	<i>F, K, C, (O)</i>	<i>C, O, F, (K)</i>

Uvedená tabulka poskytuje řadu informací; Je patrné, že přívalové srážky jsou úzce spjaty s vysokými denními teplotami, což ovlivňuje jejich výskyt v odpoledních až večerních hodinách. Lze také poměrně spolehlivě vyloučit vliv orografie. To znamená, že přívalové srážky se mohou vyskytnout kdekoli na území České republiky (a jinde). Z hlediska druhu oblaků je pak pro výskyt krátkodobých přívalových dešťů s trváním do dvou až tří hodin rozhodující vznik bouřkového mraku *Cb*. V některých případech se nad danou lokalitou opakuje i několikrát výskyt těchto *Cb*, přerušovaný mnohdy i bezdeštnými přestávkami. Často v tomto případě hovoříme o tzv. organizované konvekci, která se projevuje oblačnými systémy typu multicely, supercely, „squall line“. Výše zmíněné přestávky srážek vedly Trupla (Trupl, 1958) k tomu, že zpracoval intenzity pouze do dvou hodin trvání srážek. Pro delší trvání už narážel na těžko překonatelné metodické obtíže.

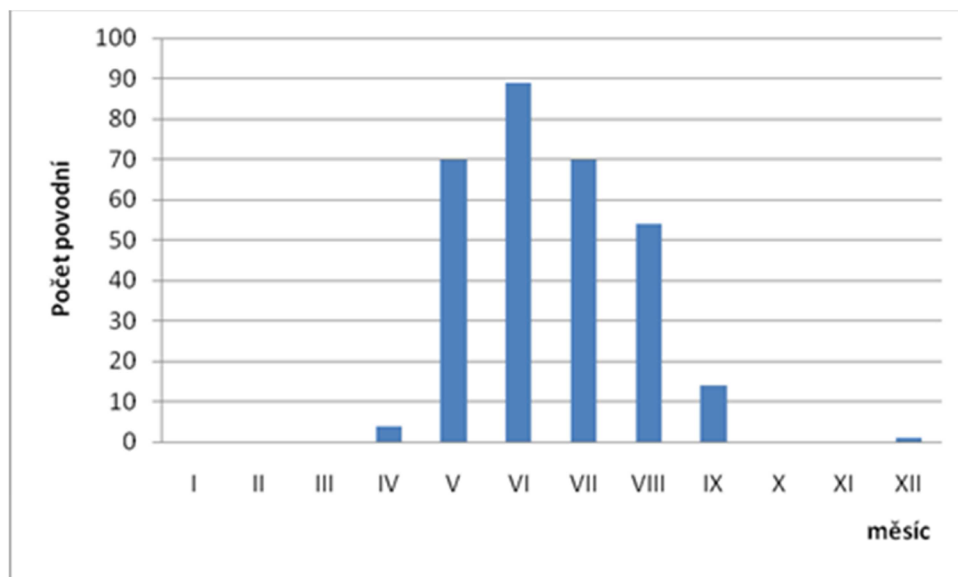
## 1.2 Povodně z přívalových dešťů

Vznik povodní z přívalových srážek je přímo vázán na spadlou přívalovou srážku. Jednoznačnou příčinou těchto povodní je dopad přívalové srážky na povodí. Přívalové srážky o velkých intenzitách, krátké době trvání a malém plošném rozsahu tak logicky způsobují odtok na malých povodích, zpravidla o rozloze do několika desítek km<sup>2</sup>. Reakce povodí na spadlou srážku je velmi rychlá (maximálně v řádu jednotek hodin) – enormní vzestup vodního stavu na malých vodních tocích, který je později následován také poměrně rychlým poklesem vodního stavu. Tyto druhy povodní lze sice ze synoptických situací předpokládat, ale nikoliv předpovědět přesně. Na předání informací zjišťovaných varovnými systémy chybí totiž zpravidla čas. To je také podstatná odlišnost povodní z přívalových dešťů od povodní, jež jsou vyvolávány dlouhotrvajícími několikadenními vlnami oblastních dešťů (Vašků, 2009). Může však také dojít k situaci, kdy povodně nejsou přímo vázány na vodní tok. Dochází tak k povrchovému odtoku velkého množství spadlé vody tam, kde je to dostatečně umožněno okolními terénními podmínkami – tedy zpravidla na malých povodích s velmi nízkým podílem zalesněných ploch, na plochách s obnaženými ornými půdami.

Ve 20. století bylo na Moravě a ve Slezsku zaznamenáno celkem 302 případů povodní z přívalových dešťů. Hlavním zdrojem informací o těchto povodních jsou výkazy klimatologických a srážkoměrných stanic ČHMÚ v působnosti poboček Brno a Ostrava. Do databáze povodní z přívalových srážek byly zařazeny jak případy, kdy jednoznačně nastala povodeň (tj. existuje záznam o průběhu povodně), tak i události, kdy po extrémní srážce došlo k zatopení budov, komunikací, polí apod. Databáze je do velké míry ovlivněna hustotou staniční sítě ČHMÚ a tím, že povodně z přívalových dešťů jsou lokální jev, někdy špatně postihnutelný. Pokud při nich nedošlo přímo k ovlivnění konkrétní oblasti lidské činnosti, nemusí být vůbec zaznamenány (Brázdil, 2007).

Hustota záznamů je tedy přímo ovlivněna hustotou osídlení a hustotou monitorovací sítě.

Nejčasnější povodeň tohoto typu v průběhu roku byla zaznamenána (v databázi povodní z přívalových dešťů na Moravě a ve Slezsku ve 20. století) dne 9. dubna 1937 na stanici Klimkovice a nejpozdější dne 21. září 1931 ve Vítkově. Za zcela výjimečnou lze považovat událost ze dne 23. prosince 1954 (Brázdil, 2007). Na obr. 1.1 je graficky zobrazena četnost výskytů povodní z přívalových dešťů ve vazbě na měsíc v roce. Nejvíce případů tohoto typu povodní bylo zaznamenáno v měsíci červnu (89), dále pak v květnu a červenci (shodně po 70) a srpnu (54).



**Obr. 1.1** Roční chod četností výskytu povodní z přívalových srážek na Moravě a ve Slezsku ve 20. století (Brázdil, 2007)

Z hlediska dopadů povodní z přívalových srážek na krajinu je největším nebezpečím výskyt povodně v měsíci dubnu a začátkem května, kdy ještě není dostatečně vzrostlá vegetace. To může vést ke zrychlení odtoku a katastrofálním následkům v krajině a pro člověka (Brázdil, 2007).

Co se týče ekonomických dopadů, největší škody jsou zpravidla zaznamenány na dopravní infrastruktuře (často i přes 50 % celkových ekonomických ztrát), dále pak na vodohospodářských objektech, vodních tocích a bytovém fondu obyvatel. Mezi ekonomické dopady se zahrnují také náklady na okamžité nasazení Armády České republiky a dalších pomocných složek, ať už při okamžitém nasazení (v průběhu povodně) nebo na dodatečné likvidování škod a pomoc postiženým obyvatelům. Nelze nezmínit i ztráty na životech; např. při povodních z června 2009 nebo v přímé souvislosti s nimi bylo hlášeno celkem 15 úmrtí (8 osob utonulo, 7 zemřelo v důsledku vzniklé situace) (Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2009).

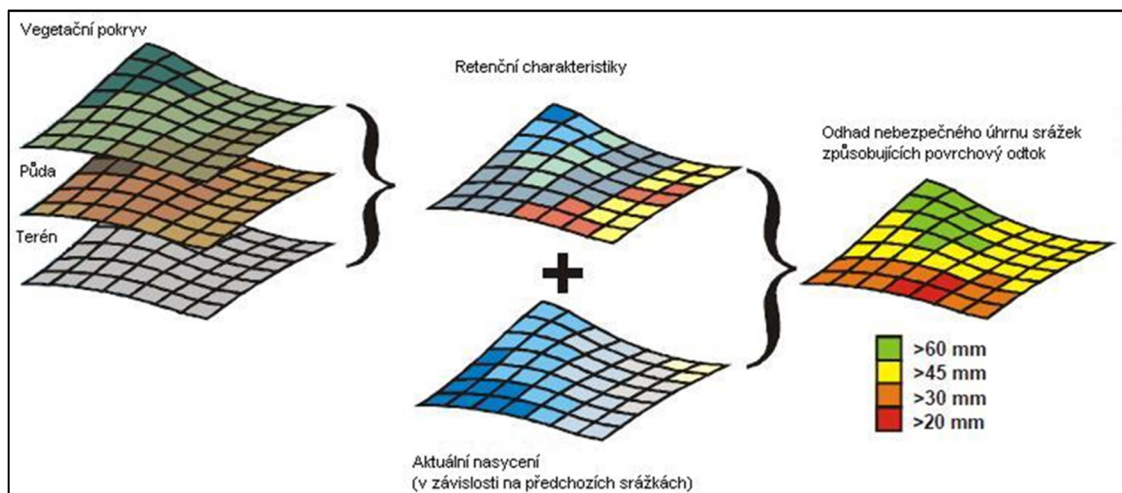
### 1.3 Možnosti předpovídání povodní z přívalových dešťů

Při řešení problematiky předpovídání povodní z přívalových dešťů je předně nezbytné ujasnit si rozdíl mezi off-line a on-line řešením. On-line přístup představuje řešení nastalé situace těsně před nebo již v průběhu sledované situace. Jedná se o operativní nakládání s daty o současném stavu (měřené srážky a vodní stavy, resp. průtoky) s předpověďmi na nejbližší hodiny. Tato data (současný stav a předpovědi) pak slouží jako vstup pro okamžité výpočty a předpovědi odtokové reakce povodí na nastalou a předpovězenou situaci. V dnešní době představuje předpovídání přívalových povodní jedno z nejaktuálnějších témat operativní hydrologie. Obzvláště s rozvojem radarových odhadů srážek a tzv. nowcastingem (extrapolace radarového echa pro předpověď srážek v nejbližších hodinách) je dnes již možné poskytnout dostatečná vstupní data pro předpovědní modely. Obecně je totiž velmi obtížné předpovídat určitý jev (povodně z přívalových dešťů) na základě jiné předpovědi (odhad vývoje srážek). Celá situace je navíc o to komplikovanější, že vývoj přívalových dešťů je velmi dynamický a jejich místní vymezení je poměrně ostře ohraničeno.

Odlisný přístup pak představuje řešení této problematiky tzv. off-line. V tomto případě není pracováno s aktuálními údaji o srážkách, ale je preventivně – tedy v době, kdy bezprostředně nehrozí nebezpečí – hledáno případné problémové místo, malé povodí ohrožené tímto jevem. Užití tohoto přístupu pak má smysl zejména v oblastech, kde se rozhoduje o investicích ve spojitosti s preventivní ochranou před přívalovými povodněmi. Jedná se o předběžné výpočty, jež odhadují předpokládanou odtokovou reakci povodí po dopadu srážky o zadaných parametrech. Je pracováno s měřeními nebo odvozenými srážkovými hodnotami. Tato oblast je předmětem řešení předložené disertační práce.

V souvislosti s výskytem extrémních přívalových dešťů a povodněmi jimi způsobenými jsou v současnosti vyvíjeny systémy pro včasné varování obyvatel. V USA se jedná o systém Flash Flood Guidance (dále FFG) (Ntelekos, 2006) provozovaný National Weather Service (NWS), který je založen na operativním srovnávání předpovídaných srážkových úhrnů se stanovenými hodnotami potenciálně nebezpečných úhrnů.

Tyto systémy se většinou skládají ze dvou částí. Prvním z nich je modul preventivní výstrahy z hlediska nebezpečné úrovně srážek. Ten je založen na zhodnocení charakteristik území z hlediska jeho potenciálu ke tvorbě rychlého odtoku (svažitost, vegetační pokryv, půdní vlastnosti, konfigurace říční sítě aj.) a současně na průběžném vyhodnocování aktuální nasycenosti povodí. Výpočet aktuálního nasycení může být realizován různými způsoby. Na základě uvedených podkladů je prezentováno aktuální potenciální nebezpečí vzniku povrchového odtoku ve formě plošně diferencované mapy úhrnu srážek, při němž by došlo ke vzniku povrchového odtoku. Uvedené hodnoty jsou prezentovány na internetových stránkách a mohou sloužit mimo jiné jako podklad pro aktualizaci limitů nebezpečných srážek v rámci vybudovaných lokálních výstražných systémů.



**Obr. 1.2** Postup odhadu nebezpečného úhrnu srážek systému (Daňhelka, 2010)

Nejjednodušší možností využití výstupů je pak operativní porovnávání odhadu srážkových úhrnů na základě pozorování meteorologických radarů s odvozenými limity potenciálně nebezpečných srážkových úhrnů.

Další z možností je kombinovat tyto podklady s předpověďmi srážek z meteorologických modelů pro indikaci oblastí, kde je na základě předpovědi přímý odtok očekáván. Tento přístup je však dle dostupných informací v operativním provozu používán pouze v omezené míře, a to především v důsledku již zmiňované nedostatečné schopnosti meteorologických modelů předpovědět intenzitu a přesnou lokalitu výskytu konvektivních jevů. Plošný rozměr konvektivních jevů a potažmo i jejich prediktabilita je větší v tropických a subtropických oblastech, než ve středoevropských podmínkách, kde nelze předpokládat dostatečnou úspěšnost tohoto postupu.

Druhou součástí systému typu FFG pak může být modul odhadu odtokové reakce v reálném čase. Ta je většinou založena na kombinaci jednoduchých hydrologických modelů pro odhad přímého odtoku s real-time radarovými odhady srážek. Takové řešení umožňuje automatizaci celého procesu přípravy výstupu ve velmi krátkém časovém horizontu a s dostatečnou frekvencí odpovídající dynamice vývoje konvektivních jevů.

Další možností je výpočet intenzity odtokové reakce na základě modelů založených na obecně dostupných informacích z digitálního modelu terénu, půdních a vegetačních charakteristikách, které modelují odtokovou ztrátu a přímý odtok z povodí (např. CN křivky). V případě aplikace tohoto postupu je nezbytná definice limitních stavů pro porovnání simulovaného odtoku a jeho kritické úrovně, která je potenciálně nebezpečná. Nastavení limitů je přitom velmi citlivou závislostí, která rozhoduje o tom, zda nebude docházet k příliš častým výstrahám (signalizaci nebezpečí, které ve skutečnosti nenastává) či naopak k nepodchycení všech skutečně nebezpečných událostí (ČHMÚ, 2009).

V konvektivní sezóně u nás ČHMÚ provozuje tzv. indikátor přívalových povodní, který je částečně inspirovaný systémem vyvinutým Národní meteorologickou službou USA. Výstupy z tohoto indikátoru jsou dostupné na internetu (ČHMÚ, 2015). Indikátor pracuje s odhadem aktuálního nasycení území vodou vždy k osmé hodině ráno. Denně aktualizovaná mapa umožňuje náhled současné situace. Středoevropskými státy je v současnosti vyvíjený systém INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive

Analysis – Central Europe). Jedná se o moderní přístupy založené na metodách radarového nowcastingu v kombinaci s pozemním monitorováním srážek a dalšími vstupy, které jsou napojené na hydrologické modely.

Mezi další evropské systémy pak lze zařadit např. tyto: (Norbiato, 2008), (Fouchier, 2007), (Taramasso, 2005). V České republice se pak operativní předpovědi povodní z přívalových srážek za použití metod umělé inteligence zabývají např. tyto práce: (Janál, 2009), (Janál, 2012).

V souvislosti s danou tematikou jsou v současnosti vyvíjeny systémy pro včasné varování obyvatel. Jedná se o systémy, které pracují s aktuálními naměřenými hodnotami srážkových úhrnů z vhodně umístěných srážkoměrů, které jsou napojeny na rozhlasové systémy samosprávných celků.

## 2 PRÁCE ZABÝVAJÍCÍ SE PŘÍBUZNOU TEMATIKOU

Hledání povodí, která jsou ohrožena povodněmi, vždy vyžaduje alespoň do určité míry zvládnutí problematiky srážko-odtokového modelování. Tato oblast je v dnešní době poměrně dobře popsána. V následujícím textu bude uveden výčet nejpoužívanějších srážko-odtokových modelů.

Model MIKE-SHE je komerčním produktem dánské firmy DHI. Jedná se o koncepční semi-distribuovaný model s vazbou na prostředí GIS. Umožňuje řešení širokého spektra hydrologických úkolů jako plánování a řízení v oblasti vodních zdrojů nebo posuzování vzájemných interakcí mezi povrchovou a podzemní vodou. Rovněž umožňuje řešení technických zásahů v povodí (DHI, 2014). Jedná se o poměrně často používaný modelovací systém.

Americký model HEC-HMS představuje celistvý model se soustředěnými parametry. Jedná se o široce používaný srážko-odtokový model pro řešení celé řady hydrologických úkolů. Obsahuje mnoho komponent od výpočtu tání sněhové pokrývky, přes výpočet objemu přímého i podzemního odtoku. Rovněž umožňuje aplikaci různých rozdělovacích objektů či nádrží. Jednotlivé kalibrační parametry mohou být určovány automaticky nebo manuálně. V současné době model umožňuje široké napojení na systémy GIS pomocí různých komponent. Podrobný popis modelu je dostupný v (Feldman, 2000) nebo (Scharffenberg, 2009).

Počátky epizodního distributivního srážko-odtokového modelu HYDROG sahají do roku 1991. Model je určen pro simulaci, operativní předpovědi a operativní řízení odtoku vody z povodí s nádržemi za povodňových situací. Praxe ukazuje, že může být nasazen ve velmi širokém rozpětí ploch modelovaných povodí. Je určen pro letní povodně i pro zimní povodně způsobené táním sněhové pokrývky. Hydraulické formulace řídicích rovnic systému zajišťují propojení podle grafové reprezentace plošného odtoku s pohybem vody v korytě a zavádí i transformaci vlny při průchodu nádržemi. Pro simulaci neustáleného proudění v korytě je využito zjednodušení Saint-Venantových rovnic kinematickou vlnou. Podzemní odtok je simulován jako odtok z jediné fiktivní nádrže. V současnosti je systém HYDROG používán na brněnské a ostravské pobožce ČHMÚ. Dále je HYDROG využíván státními podniky Povodí Odry, Povodí Moravy, Povodí Labe a Povodí Ohře (Starý, 2005).

Model KINFIL je založen na kombinaci teorie infiltrace a transformace přímého odtoku kinematickou vlnou. Model se osvědčil na řadě experimentálních povodí při rekonstrukci historických povodňových případů. KINFIL používá fyzikálně-geometrické, hydraulické a klimatické parametry povodí, které se dají určit z mapových podkladů. K výpočtu infiltrace model využívá metodu založenou na konceptu Greena a Ampta. Model je přednostně určen pro stanovení návrhových průtoků při různých variantních simulacích, např. při změnách land use (Starý, 2005).

Hydrologický model DesQ je určen pro výpočet maximálních průtoků v nepozorovaných povodích. Programový systém uvažuje povodí, které lze popsat jako jednu odtokovou plochu (samostatný svah) nebo jako modelové povodí s údolnicí (dvě odtokové plochy). Přírodní povodí lze schematizovat více modelovými povodími, výsledný průtok v závěrovém profilu pak odvozuje superpozicí hydrogramů

z jednotlivých modelových povodí. Model umožňuje práci ve třech výpočetních variantách:

- Výpočet maximálního N-letého průtoku vyvolaného deštěm kritické doby trvání.
- Výpočet maximálního průtoku vyvolaného deštěm zadané doby trvání a době opakování deště.
- Výpočet maximálního průtoku při zadané době trvání deště a intenzitě deště.

Model DesQ pracuje se specifickými charakteristikami velmi malých a malých povodí, vstupní parametry modelu zahrnují nejvýznamnější charakteristiky ovlivňující proces tvorby maximálního odtoku. Model je rovněž využitelný pro odvození objemu a tvaru povodňové vlny a pro případné posouzení vlivu změn charakteristik povodí na průběh hydrogramu (změna způsobu využívání pozemků v povodí, technická opatření na povodí apod.) (Hrádek, 1998). Podrobnější popis použitých hydraulických závislostí a algoritmizace výpočtu, kterou model DesQ uvažuje, je dohledatelný např. v (Hrádek, 1996). Model neumožňuje plošné testování skupiny malých povodí zátěžovou srážkou o zvolených parametrech, pouze výpočty na jednotlivých povodích.

V rámci projektu Ministerstva životního prostředí Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky byl v rámci dílčí části projektu pod názvem Metodika mapování povodňového rizika prezentován Metodický návod pro identifikaci kritických bodů (VÚV, 2009). Metoda kritických bodů je založena na podrobné analýze pomocí nástrojů GIS. Vstupními podklady jsou digitální model terénu vytvořený na základě výškopisu a polohopisu základní báze geografických dat (ZABAGED), digitální databáze vod (DIBAVOD) pro analýzu základních hydrologických poměrů, dále pak hranice intravilánů obcí, hranice katastrálních území, ortofotomapy (CENIA) a databáze krajinného pokryvu (CORINE land cover). Pomocí nástrojů GIS je odvozena mapa směrů odtoku a do míst, kde odvozené dráhy soustředěného odtoku protínají hranice zastavěných částí obcí, jsou umístěny kritické body. Metoda pracuje s určitými kombinovanými kritérii pro výběr kritických lokalit, přičemž zavádí tzv. ukazatel kritických podmínek vzniku negativních projevů povodní z přívalových srážek  $F$  [-]. Jeho hodnota je určena následující rovnicí:

$$F = P_{p,r} \cdot H_{m,r} \cdot (a_1 \cdot I_p + a_2 \cdot ORP + a_3 \cdot CNII), \quad (1)$$

kde  $P_{p,r}$  značí relativní hodnotu velikosti přispívající plochy (vzhledem k maximu  $10 \text{ km}^2$ ),  $H_{m,r}$  relativní hodnotu úhrnu jednodenních srážek s dobou opakování 100 let pro území České republiky (vzhledem k maximu  $285,7 \text{ mm}$ ),  $a$  je vektor vah,  $I_p$  je hodnota průměrného sklonu přispívající plochy [%],  $ORP$  je podíl plochy orné půdy [%],  $CNII$  je hodnota CNII. Hlavním výstupem této metody je grafické zobrazení plošné lokalizace vybraných kritických bodů.

Na Ústavu vodního hospodářství krajiny Fakulty stavební VUT v Brně byla roku 2011 obhájena disertační práce Ing. Petra Janála s názvem Operativní předpovědi odtoku vody z povodí za povodní způsobených přívalovými srážkami pomocí fuzzy modelu (Janál, 2011). Práce popisuje sestavení fuzzy modelu pro účely operativní předpovědi ohroženosti malých povodí povodněmi z přívalových dešťů. Fuzzy model pracuje s charakteristikami sledovaných povodí, včetně současného stavu nasycenosti povodí, a s aktuální předpovědí srážek. Zásadní rozdíl mezi předloženou prací a prací Ing. Janála spočívá v základním přístupu řešení dané problematiky; Práce Ing. Janála se zabývá operativní předpovědí, zatímco předložená práce řeší situaci tzv. off-line, tedy

v okamžiku, kdy nehrozí bezprostřední nebezpečí, nezávisle na aktuálním stavu – např. informace o předchozích srážkách a stavu nasycení půdy není brána v úvahu, její hodnota je považována za průměrnou. Cílem práce je sestavení účinného nástroje pro preventivní ochranu před povodněmi z přívalových dešťů. Významnou odlišností je pak také volba teoretického nástroje pro sestavení modelu – předložená práce prezentuje sestavení modelu na bázi teorie možnosti, zatímco práce Ing. Janála je založena na klasickém fuzzy modelu.



### 3 CÍL

Práce se zabývá sestavením účinného softwarového nástroje pro řešení problematiky preventivní ochrany malých povodí před povodněmi z přívalových dešťů. Cílem je vytvoření objektivního nástroje pro hledání malých povodí nejvíce ohrožených tímto jevem. Představa je taková, že konečný softwarový produkt bude sloužit případně i méně odborné veřejnosti – např. úředníci na příslušných místech či starostové obcí – jako objektivní nástroj, který může pomoci při rozhodování o toku peněz v souvislosti s preventivní ochranou před povodněmi z přívalových srážek.

Jádro celé aplikace tvoří model, který je sestaven na bázi vybraných metod umělé inteligence, zejména na bázi fuzzy logiky a teorie možnosti. Okrajově bylo testováno i užití neuronových sítí. Výhodou těchto metod je jejich schopnost uspokojivě pracovat s veličinami, které jsou značně zatíženy neurčitostmi, či jsou vágně popsány. V případě (byť jednoduchého) hydrologického modelování nutně musí být pracováno s přibližnými hodnotami (značně zatíženými nejistotami) – jedná se zejména o veličiny popisující příčinný přívalový déšť a o hodnoty průtoků, které reprezentují odezvu malého povodí. Výhodou užití teorie možnosti je, že lze pracovat i v oblastech nereálných kombinací stavů na vstupech.

Práce je zaměřena na oblast preventivní ochrany. Jedná se o tzv. off-line řešení dané problematiky, kdy vyhodnocování ohroženosti jednotlivých povodí probíhá v době mimo aktuální ohrožení přívalovými dešti. Aplikace se pak předpokládá při jakémsi průměrném stavu povodí (průměrný stav nasycení). Není zde pracováno s aktuální předpovědí srážek na nejbližší hodiny dopředu. Cílový softwarový nástroj je sestavován tak, aby uživatel mohl plošně zatěžovat množinu malých povodí srážkami o zvolených parametrech (doba trvání a intenzita) a sledovat, jak na dané srážky jednotlivá povodí reagují. Porovnáním předpokládaných (modelových) odtokových reakcí se zadanými limitními hodnotami kulminačních průtoků, kdy ještě nedochází k problémům v dané lokalitě, pak lze vysledovat, u kterých povodí daná zatěžovací srážka problém způsobí a u kterých ne. Může totiž docházet k situacím, kdy např. 20letý průtok na jednom povodí způsobí problémovou situaci, zatímco u jiného povodí 20letá voda bezpečně projde korytem, aniž by došlo k ohrožení. Výstupem z celé aplikace je výčet povodí, kde při zadaném dešti bude docházet k ohrožení a kde by bylo vhodné učinit nějaká opatření pro ochranu před povodněmi z přívalových dešťů.

Objektivní nástroj tohoto typu v současnosti úředníkům i dalším případným uživatelům chybí, a proto by v budoucnu mohl k těmto účelům sloužit výsledek předložené práce. Kalibrace modelu je postavena na užití dat o reálných základech a data jsou podložena dlouhodobým pozorováním. Lze předpokládat, že výstupy z modelu sestaveného na takovém podkladu přinesou spolehlivé výsledky.

Zároveň je cílem sestavit nástroj, který by byl pokud možno co nejméně náročný na množství a obtížnost určení vstupních dat. Od přístupů, které jsou představeny v předchozí kapitole, se sestavený model liší tím, že pro následnou aplikaci vyžaduje poměrně malé množství vstupních veličin a jejich určení není příliš náročné, případně zcela závislé na dalších programových prostředích či metodických postupech.

## 4 ZVOLENÉ PŘEDPOKLADY ŘEŠENÍ

Pro řešení dané problematiky bylo přijato několik zjednodušujících předpokladů:

- Ohroženost povodí povodněmi z přívalových dešťů je posuzována výhradně z hlediska očekávaných kulminačních průtoků po dopadu příčinného deště. Ohrožení jiného druhu (např. půdní eroze, sesuvy půd apod.) zde nejsou brána v úvahu.
- Při sestavování matice vzorových dat byl přijat základní předpoklad, že srážková epizoda o dané N-letosti způsobí odtokovou reakci povodí o téže N-letosti. Nelze říct, že tato skutečnost platí obecně. Sestavený model si klade za cíl algoritmizovat kauzální vztah přívalové srážky (příčina) a následné odtokové reakce malého povodí (následek). Se všemi vstupy a výstupy je nakládáno jako se statistickými veličinami, odvozenými z dlouhodobého pozorování. Užití modelu se předpokládá v oblasti preventivní ochrany, kdy jsou testovaná povodí v jakémsi „průměrném“ stavu. Při zpracování srážkových a průtokových dat s dlouhou dobou pozorování jsou parametry srážky (doba trvání a intenzita) odvozeny i příslušné doby opakování sledovaných jevů. Teoretická kauzalita jevů je podepřena rozsáhlým množstvím dat z historického měření (případně odvozování). Předložená práce se zabývá dlouhodobým stavem povodí a jeho teoretickou reakcí na teoretický dešť o stanovených parametrech. V těchto souvislostech se považuje předpoklad o odpovídajících si dobách opakování srážek a odtokových reakcí za přijatelný a opodstatněný.
- S výše uvedeným souvisí i otázka zahrnutí vstupu, který by charakterizoval předchozí nasycení půdy. Nabízí se užití veličiny *API* (*Antecedent Precipitation Index*), jejíž hodnotu lze určit ze vztahu:

$$API = \sum_{i=1}^n H_{S,t_i} \cdot C^{t_i}, \quad (2)$$

kde  $t_i$  představuje počet dní  $i$  nazpět od sledovaného data,  $n$  celkový počet dní sledovaného období (většinou se uvažuje 14 nebo 30 dní),  $H_{S,t_i}$  je denní srážkový úhrn [mm] v  $i$ -tém dni nazpět a konečně  $C$  představuje evapotranspirační konstantu (v České republice obvykle 0,93). Pokud by byla řešena problematika operativní předpovědi (a bylo by tedy pracováno s on-line daty), bylo by použití této veličiny nezbytné. V případě řešení off-line, což je náplní předložené práce, lze informaci o předchozím nasycení povodí zanedbat a považovat ji ve všech případech za průměrnou.

- Dalším zjednodušením je fakt, že model pracuje s náhradní intenzitou deště – uvažuje konstantní intenzitu po celou dobu trvání deště, a to nad celou plochou sledovaného malého povodí. Jedná se o teoretický stav a významné zjednodušení, nicméně aplikace jiného způsobu řešení by byla příliš komplikovaná a pravděpodobně by nepřinesla lepší výsledky.

Uvedená zjednodušení jsou sice významná, ale vzhledem k množství nejistot, které do celého procesu vstupují, je lze považovat za přijatelná.

## 5 METODA

V kapitole jsou uvedeny základy fuzzy logiky a teorie možností. Uvedené metody sloužily jako teoretický podklad pro sestavování modelu.

### 5.1 Teorie fuzzy množin a fuzzy logika

Metody, které umožňují snadno pracovat s vágně či neúplně popsanými veličinami, jsou označovány souhrnným termínem *soft computing*. Do oblasti soft computing bývají zařazovány fuzzy logika, neuronové sítě, genetické algoritmy či teorie chaosu (Berka, 2003). Fuzzy logika tedy přináší účinný nástroj pro modelování systémů, do kterých vstupují veličiny značně zatížené neurčitostí.

Fuzzy logika svým principem vychází z teorie fuzzy množin, jejíž základy popsal kalifornský profesor Lofti A. Zadeh ve své práci (Zadeh, 1965). Ve své podstatě popisuje teorie fuzzy množin situaci, kdy nelze příslušnost prvku do množiny rozhodnout na základě bivalentního rozhodování klasické výrokové logiky – tedy rozhodování na úrovni 1, nebo 0, případně „pravda“, nebo „nepravda“. Zadeh zavádí tzv. funkci příslušnosti, která definuje příslušnost prvku do množiny pomocí hodnoty na intervalu 0 až 1. Odtud je odvozen název fuzzy, který lze přeložit jako mlhavý či neostrý.

V zahraniční literatuře se věnuje problematice fuzzy množin, fuzzy logiky a jejich aplikacemi zabývá mnoho autorů. Kromě L. A. Zadeha jsou to práce tvůrce prvního fuzzy regulátoru A. Mamdaniho, jeho žáka – japonského fuzzy teoretika M. Sugena (Sugeno, 1977), (Tagaki, Sugeno, 1985). Dále pak D. Dubois a H. Prade (Dubois, Prade, 1980), J. R. Jang (Jang, 1992, 1993) či velmi rozsáhlá publikace pánů G. J. Klir a B. Yuan (Klir, Yuan, 1995).

Z domácích autorů je lze zmínit např. V. Nováka se svou prací (Novák, 1990), která přináší teoretický rozklad problematiky včetně příkladů aplikací. Dále pak P. Jura (Jura, 1998), M. Pokorný (Pokorný, 1996) a další. Aplikováním fuzzy logiky do vodního hospodářství se u nás zabývali M. Starý (Starý, 2001), K. Drbal (Drbal, 1999) či Nacházel, Patera a Hejzlar (Nacházel a kol., 1999).

V následujícím textu je podrobněji popsán principy fuzzy množin a fuzzy logiky tak, jak jej uvádějí odborné publikace (Nacházel, 2004), (Pokorný, 1996), (Vysoký, 1996).

#### *Fuzzy množiny*

V teorii klasických množin prvek do množiny buď patří, nebo nepatří. Hovoříme pak o (plné) příslušnosti nebo nepříslušnosti prvku do dané množiny. V Zadehově fuzzy množinové teorii, která je zobecněním teorie abstraktních množin, je fuzzy množina definována jako třída, která přiřazuje prvkům neurčitost pomocí vlastnosti jejich částečné příslušnosti formou tzv. míry příslušnosti.

Definici fuzzy množiny a funkce příslušnosti je možné ve většině zahraničních publikací nalézt v následující formě. Jestliže  $U$  je souborem prvků označovaných  $x$ , potom fuzzy množina  $A$  v prostoru  $U$  je definována jako množina uspořádaných dvojic

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in U\}, \quad (3)$$

kde  $\mu_A(x)$  označuje funkci příslušnosti fuzzy množiny  $A$ . Funkce příslušnosti přiřazuje každému prvku  $x$  prostoru  $U$  (prostor  $U$  je obvykle označován jako universum) stupeň příslušnosti z intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ , přičemž příslušnost prvku do prostoru lze interpretovat takto:

$\mu_A(x) = 0$  ... prvek  $x$  do prostoru  $U$  nepatří,

$\mu_A(x) = 1$  ... prvek  $x$  do prostoru  $U$  patří,

$\mu_A(x) \in (0,1)$  ... nelze s jistotou určit, zda  $x$  patří do  $U$ , přičemž velikost  $\mu_A(x)$  je vyjádřením stupně, míry příslušnosti  $x$  do  $U$ .

Klasifikace určitého objektu mírou příslušnosti k určité fuzzy množině je ryze subjektivní a její velikost záleží čistě na vnitřním přesvědčení lidského experta. Z tohoto hlediska nelze zaměňovat míru příslušnosti  $\mu(x)$  se statistickou, objektivně vypočitatelnou hodnotou pravděpodobnosti  $P(x) \in \langle 0,1 \rangle$ . Velikost  $\mu(x)$  je často označována jako možnost jevu, že prvek  $x$  patří do prostoru  $U$ . Označíme-li tuto možnost jako  $M(x) \in \langle 0,1 \rangle$ , lze obecně vyjádřit vztah mezi možnostmi a pravděpodobnostmi jevu takto

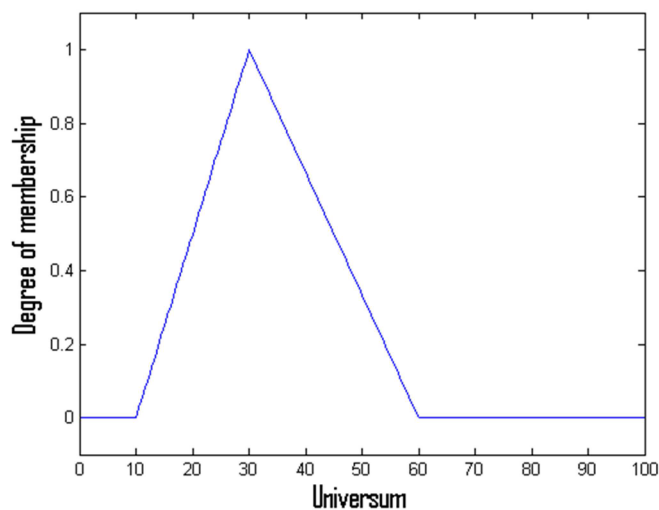
$$M(x) \geq P(x). \quad (4)$$

Fuzzy množina je tedy určena funkcí příslušnosti ( $FP$ ). Dále jsou uvedeny některé typy často užívaných parametrizovaných  $FP$ :

- Trojúhelníková  $FP$  je definována vztahem

$$trian(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (5)$$

Příklad průběhu trojúhelníkové  $FP$  s parametry  $(x; 10, 30, 60)$  je vykreslen na obr. 5.1.

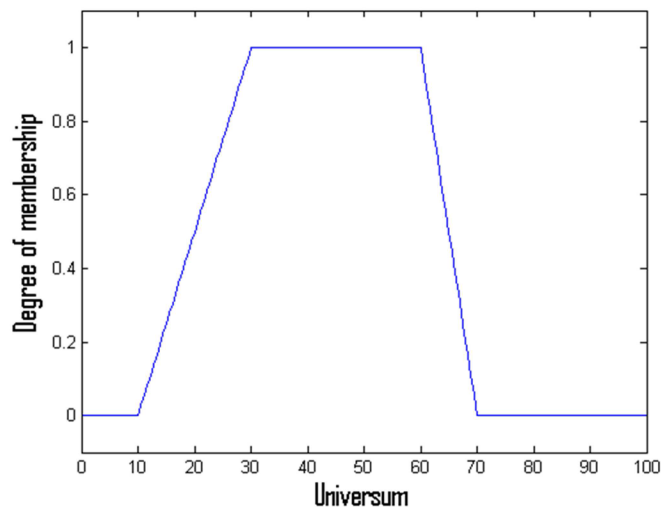


Obr. 5.1 Trojúhelníková  $FP$  s parametry  $(x; 10, 30, 60)$

- Lichoběžníková *FP* je definována vztahem

$$\text{trap}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (6)$$

Příklad průběhu lichoběžníkové *FP* s parametry  $(x; 10, 30, 60, 70)$  je vykreslen na obr. 5.2.

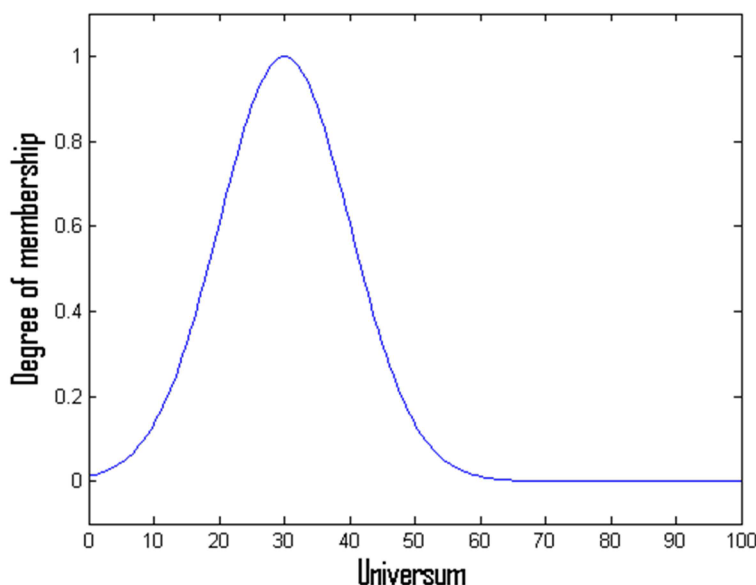


**Obr. 5.2** Lichoběžníková *FP* s parametry  $(x; 10, 30, 60, 70)$

- Gaussovská *FP* je definována vztahem

$$\text{gauss}(x; c, \sigma) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right], \quad (7)$$

kde dvojice parametrů  $c$  a  $\sigma$  reprezentuje střed funkce a její šířku. Na obr. 5.3 je uveden příklad funkce s parametry  $c = 30$  a  $\sigma = 10$ .



**Obr. 5.3** Gaussovská *FP* s parametry  $(x; 30, 10)$

S fuzzy množinami je možné provádět operace obdobně jako s klasickými množinami. Operace průniku, sjednocení a doplňku je možné zavést i pro fuzzy množiny, obdobně jako u ostrých množin, jejich interpretace však není tak jednoduchá. Řada publikací obsahuje i další operace. Zevrubnější popis problematiky operací s fuzzy množinami není součástí tohoto textu a lze jej dohledat v jiných publikacích, např. v (Dubois, Prade, 1980).

### ***Fuzzy logika***

S teorií fuzzy množin úzce souvisí fuzzy logika. Tímto pojmem jsou označovány dva různé typy logiky: jednak vícehodnotová logika, která na rozdíl od klasické dvouhodnotové logiky pracuje s více pravdivostními hodnotami, jednak lingvistická logika, jejíž pravdivostní hodnoty jsou vyjádřeny jazykově (slovy). Pravdivostní hodnoty jsou modelovány pomocí fuzzy množin v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . Pojem vícehodnotová logika je historicky starší než pojem fuzzy logika. V literatuře se citují především práce polského logika J. Lukasiewicze, který se nejdříve zabýval tříhodnotovou logikou, kterou později rozšířil na spočetně mnoho pravdivostních hodnot.

Vícehodnotová logika zobecňuje klasickou dvouhodnotovou logiku a přibližuje se způsobu myšlení člověka, pro kterého je běžné přibližné a vícehodnotové usuzování. Vícehodnotová logika je jedním z typických nástrojů metod umělé inteligence. Jazykovou (lingvistickou) logikou je pak nazývána taková vícehodnotová logika, ve

kteře jsou pravdivostní hodnoty vyjádřeny pomocí slovního ohodnocen. Interpretace jednotlivých pravdivostních hodnot je přitom vgn.

### **Fuzzy pravidla**

Fuzzy pravidlo

$$\text{IF } (x \text{ IS } A) \text{ AND } (x \text{ IS } B) \text{ THEN } (z \text{ IS } C) \quad (8)$$

představuje úsudek, jehož vstupn informace je vgn. Výrazy v kulatých závorkách jsou označovány jako fuzzy výroky, jejichž pravdivostní hodnota leží v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . Fuzzy výrok je tvořen jazykovou proměnnou a hodnotou jazykové proměnné. Výroky mohou být propojeny logickými spojkami *AND*, *OR* (tedy konjunkce a disjunkce), a tm dohromady vytvářejí složený fuzzy výrok. Tato část pravidla se nazývá premisa (antecedent, předpoklad). Vsledn část pravidla, kteře představuje výsledek fuzzy implikace, se nazývá konsekvant. Jedná se o agregovanou hodnotu z výsledků všech pravidel.

### **Fuzzy inferenční systém**

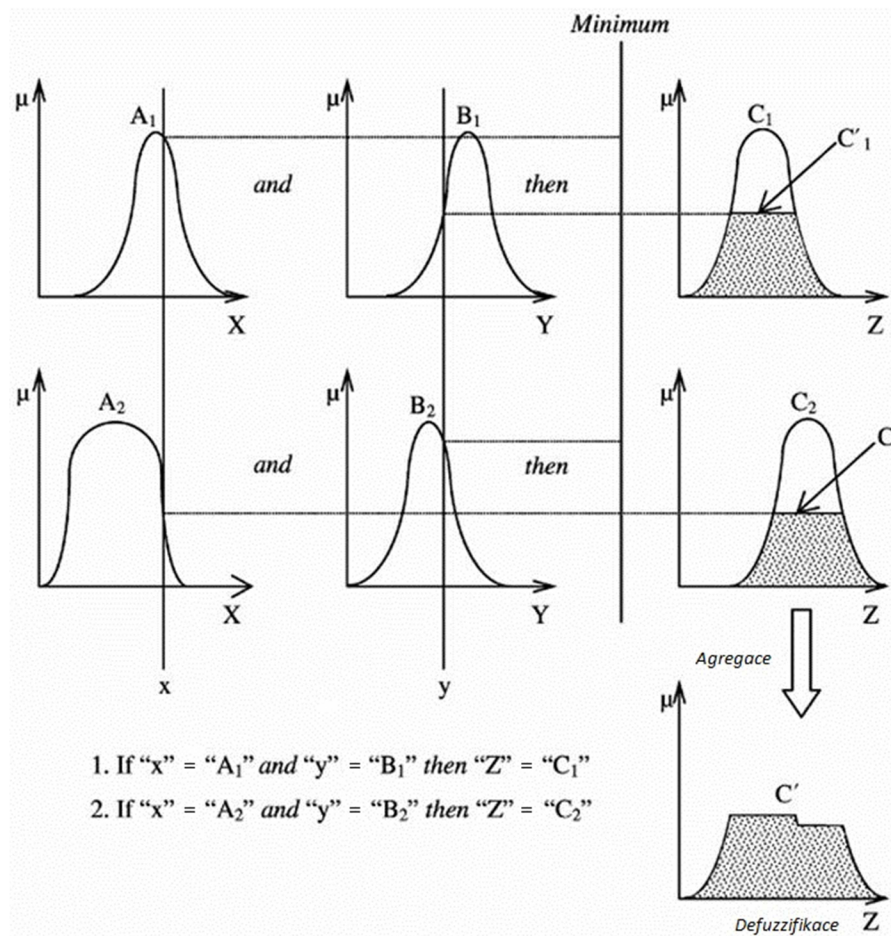
#### *Mamdani*

Pravidlo *IF-THEN* představuje fuzzy implikaci, kteřa vyjadřuje kauzln vztah mezi výroky. Nejpoužívanějším typem implikace ve fuzzy regulaci je Mamdaniho implikace, kteřa byla použita při sestavování tohoto modelu. Mamdaniho typ fuzzy modelu lze definovat vztahem:

$$R_m(i): \text{IF } (x_1 = A_1(i)) \text{ AND } (x_2 = A_2(i)) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_M = A_M(i)) \text{ THEN } (z = C(i)), \quad (9)$$

kde  $i = 1, 2, \dots, n$  je číslo pravidla a  $n$  udává počet pravidel. Takovmto fuzzy modelem se souborem  $n$  pravidel lze aproximovat téměř libovoln nelinern systém. Základním charakteristickm znakem fuzzy modelu Mamdaniho typu je, že konsekvant každého pravidla tvoří fuzzy výrok.

Základní charakteristika fuzzy inferenčního systému (*FIS*) Mamdaniho typu je zřejm ze schématu na obr. 5.4.



Obr. 5.4 Schéma FIS Mamdaniho typu (Jang, 1997)

Obr. 5.4 znázorňuje příklad jednoduchého FIS se dvěma vstupními veličinami – veličina  $x$  mapovaná fuzzy množinami  $A_1$  a  $A_2$  a veličina  $y$  mapovaná fuzzy množinami  $B_1$  a  $B_2$ . Ve schématu je použit základní operátor AND, a v rozhodovacím procesu je tedy použita funkce *minimum*.

Celý proces užití fuzzy modelu se skládá z několika částí (bloků); Úkolem normalizačního bloku je transformovat hodnoty měřených veličin s různým rozměrem i variačním rozpětím na data v jednotném univerzu. Dále pak dochází k fuzzifikaci, což obnáší převod ostrých dat na fuzzy data. Inferenční mechanismus je postup, který umožňuje stanovit výstupní fuzzy množinu pro danou vstupní fuzzy množinu, a to při zvoleném způsobu interpretace implikace v pravidlech. Defuzifikační blok přiřazuje výstupní fuzzy množině určitou ostrou hodnotu. Konečně pak denormalizace na výstupu zpětně upravuje normovaná data na data potřebná v reálných podmínkách.

### Sugeno

FIS Sugeno (Tagaki-Sugeno) typu lze podobně jako u předchozího typu vyjádřit souborem pravidel:

$$R_s(i): \text{IF } (x_1 = A_1(i)) \text{ AND } (x_2 = A_2(i)) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_M = A_M(i)) \text{ THEN } (z = f_i(x_1, \dots, x_m)), \quad (10)$$



kde  $i = 1, 2, \dots, n$  je číslo pravidla a  $n$  je počet pravidel. Konsekvent *FIS* Sugenoova typu obsahuje obecně funkci vstupních proměnných. Výsledná hodnota premisy každého pravidla je vlastně váhou, která je přiřazována právě straně pravidla. V nejčastějších případech, kdy jako funkce  $f_i$  jsou používány lineární kombinace vstup, je fuzzy model také označován jako Sugenuv model 1. řádu. V případě, kdy  $f_i$  jsou konstanty (absolutní členy), pak jde o fuzzy model nazývaný analogicky jako Sugenuv model 0. řádu, což je vlastně speciální případ Mamdaniho *FIS*, kdy každé pravidlo je ve své konsekvenci části určeno množinou singleton.

V případě Sugenoova *FIS* je hodnota výstupu nejčastěji získávána jako střední hodnota výstupů pro jednotlivá pravidla

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i(x_1, \dots, x_m)}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (11)$$

kde  $w_i$  je váha  $i$ -tého pravidla.

## 5.2 Teorie možnosti

Teorie možnosti (Theory of Possibility nebo Possibility Theory) přímo vychází z teorie fuzzy množin a fuzzy logiky. Její základy položil L. A. Zadeh v 70. letech 20. století v článku *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility* (Zadeh, 1978), kde definuje její vztah k fuzzy logice a zavádí distribuční funkci možnosti jako alternativu k pravděpodobnostnímu přístupu při řešení úloh. Postupně pak pronikla do mnoha vědeckých oblastí. Ze zahraničních publikací, které se dále zabývají teorií možnosti, lze zmínit například následující: (Dubois, 1988) nebo (Dubois, 2006).

Z českých autorů zabývajících se mimo jiné teorií možnosti lze zmínit např. (Nacházel a kol., 2010). V následujícím textu je přiblížena teorie možnosti tak, jak v textu uvádí (Nacházel a kol., 2010).

Cílem teorie možnosti je odhad nastání různých neurčitých jevů, a to i v případě, kdy je lze popsat jen lingvisticky. Pro vodní hospodářství je tato teorie přitažlivá především tím, že umožňuje formalizovat neurčité úlohy, které byly dosud prakticky neřešitelné, a řešit je podle přijatých předpokladů s jistou mírou spolehlivosti.

Teorie možnosti rozšiřuje původní teorii fuzzy množin o řešení možnosti nastání neurčitých jevů, které nelze zachytit pomocí pravděpodobnosti. Jde o další druh neurčitosti, která se zkoumá tak, že průběh funkce příslušnosti se ztotožní s rozložením možnosti a odhadne se možnost nastání hledané hodnoty. Pro vodní hospodářství je lákavý především odhad nastání extrémních hodnot hydrologických veličin. Nejjednodušším postupem, jak takové možnosti různých jevů nebo událostí odhadnout, je jejich ztotožnění s funkcí příslušnosti fuzzy množiny. Pak tzv. distribuční funkce možnosti  $\Pi_x = \pi_x$  je numericky definována jako ekvivalent funkce příslušnosti  $F$ , tj.

$$\pi_x = \mu_F. \quad (12)$$

Z toho plyne: možnost, že  $X = u$ , je rovna  $\mu_F(u)$ . Proměnná  $\pi_x(u)$  se nazývá stupeň možnosti, který může nabývat jakékoli hodnoty na intervalu  $[0,1]$  (Nacházel a kol., 2010). Tato možnost je však vždy větší nebo rovna než pravděpodobnost nastání určitého jevu (rov. (4)).

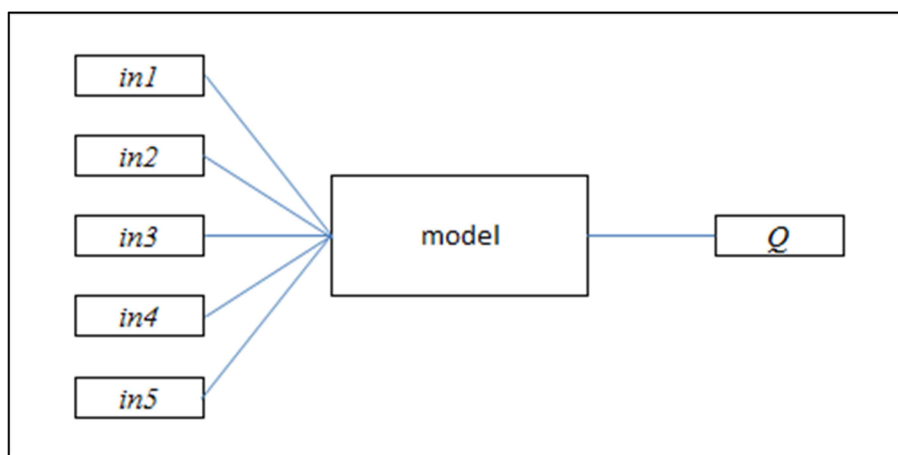
Teorie možnosti představuje určitou nadstavbu fuzzy logiky; má schopnost eliminovat oblasti řešení, které jsou mimo realitu – např. situaci, kdy je povodí zatíženo extrémně intenzivní srážkou o extrémně dlouhé době trvání. Při zadávání vstupů do výpočetního procesu je tato kombinace přípustná navzdory reálné nemožnosti nastání tohoto stavu. To je řešeno pomocí vytěšňování nereálných kombinací stavů, jehož princip je popsán v kapitole 6.2 Kalibrace modelu.

## 6 POPIS MODELU

### 6.1 Sestavení modelu

Jádrem celé aplikace je model, který z vybraných vstupních veličin, které charakterizují sledované povodí a příčný přívalový déšť, určuje hodnotu kulminačního průtoku, jakožto odezvu daného povodí na příčný přívalový déšť. Výstupní hodnota průtoku je následně porovnána s hodnotou limitního průtoku povodí. Tato hodnota musí být dopředu známa nebo stanovena.

Model je sestavován v programovém prostředí MATLAB, převážně s využitím Fuzzy Logic Toolboxu. Základní struktura modelu byla postupně volena v několika variantách. V počátcích byl sestaven model z jednoho rozsáhlého inferenčního systému, kdy vstupovaly všechny vstupní veličiny do jednoho systému, přičemž výstupem byla očekávaná odtoková reakce malého povodí ve formě kulminačního průtoku.



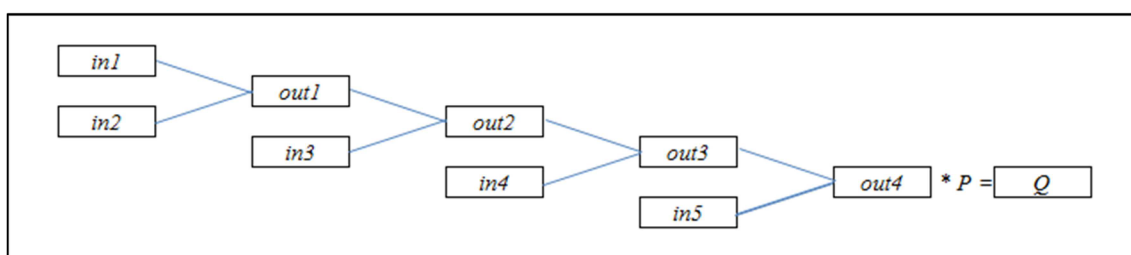
**Obr. 6.1** Základní struktura modelu v původní variantě; veličiny označené *in* představují vstupní veličiny, *Q* představuje výstupní hodnotu kulminačního průtoku

Jednoznačnou nevýhodou takovéto struktury modelu je její vnitřní složitost. Součástí modelu musí být i matice pravidel, která přiřazuje kombinaci množin na vstupech množinu na výstupu.

Časová náročnost kalibrace (a samotného výpočtu) a nároky na výpočetní techniku se zvyšují s rostoucí složitostí modelu. Ta je mimo jiné určena počtem vstupních veličin, počtem funkcí možnosti, které popisují jednotlivá universa, a počtem epizod ve vzorových datech. Jednotlivé výpočty (kalibrace modelu) mohou probíhat v časovém rozmezí jednotek hodin až dní. Proto bylo přikročeno k zásadní změně základní struktury modelu od varianty dle obr. 6.1 k variantě dle obr. 6.2. Výrazné urychlení průběhu kalibrace je dosaženo hlavně tím, že rozhodovací mechanismus pracuje v každém kroku s méně rozsáhlou maticí báze pravidel. Její rozměry jsou určeny počtem vstupů a počtem funkcí možnosti, které popisují dané universum (vstupní veličiny). Pokud je pracováno s 6 funkcemi možnosti na každém universu, tak pro model dle původní struktury s 5 vstupy má matice báze pravidel  $6^5 = 7776$  řádků, zatímco model dle novější struktury (obr. 6.2) má 4 matice s  $6^2 = 36$  řádky, což představuje řádový rozdíl rozsahu matice báze pravidel (7776 řádků proti 132 řádkům).

Snížení počtu řádků matice velmi významným způsobem snižuje rychlost celého výpočtu. Tento rozdíl je pak daleko výraznější, jsou-li do systému přidány další vstupy nebo je-li pracováno s větším počtem funkcí možnosti – finální verze modelu pracuje s 20 funkcemi možnosti.

Základní struktura upravené varianty modelu je následující: model sestává ze sekvence inferenčních systémů, které tvoří vždy dvojice vstupních veličin a jedna (pomocná) výstupní veličina. Do prvního inferenčního systému vstupují první dvě zvolené vstupní veličiny. Výstupem je pomocná veličina, která zároveň slouží jako jedna ze dvou vstupních veličin do následujícího inferenčního systému, přičemž je k ní přidána další zvolená vstupní veličina. Mechanismus tohoto postupného přidávání se pak opakuje, dokud nejsou využity všechny zvolené vstupní veličiny. Hodnota poslední výstupní veličiny je pak prostě přenásobena plochou povodí (obr. 6.2). Plocha povodí tedy zaujímá mezi ostatními uvažovanými vstupními veličinami zcela odlišnou pozici.



**Obr. 6.2** Základní struktura modelu; veličiny označené *in* představují vstupní veličiny, veličiny *out* pomocné dílčí výstupní veličiny, *P* plochu povodí a *Q* kulminační průtok

Vstupní a výstupní veličiny jsou označeny obecně *in* a *out*, protože jejich pořadí i celkový počet byly v průběhu prací testovány. Tento sekvenční přístup, kdy se jednotlivé vstupní veličiny přidávají postupně, představuje obdobu koaxiální korelace (Kohler, 1951). Výstupy z jednotlivých inferenčních systémů jsou postupně korigovány dalšími vstupy. Zvolený mechanismus umožňuje přehledně sledovat postupný vývoj výstupních hodnot a oproti systému, kdy jsou všechny vstupy zahrnuty současně, je i časová náročnost kalibrace modelu výrazně (řádově) nižší.

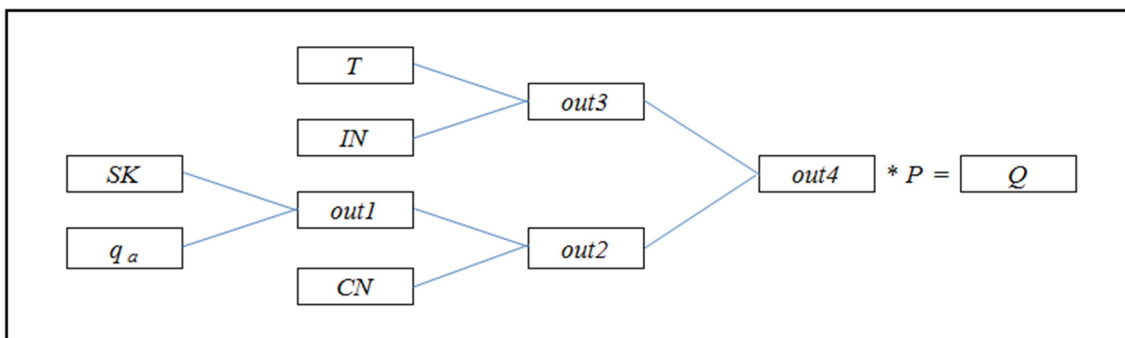
U plochy povodí se předpokládá, že má z uvažovaných vstupních veličin nejsilnější vazbu na výslednou hodnotu průtoku *Q*, proto nebyla zařazena mezi klasické vstupy, ale byla použita na konci sekvence jako multiplikátor poslední výstupní veličiny.

V průběhu prací na konstrukci modelu bylo postupně testováno užití následujících vstupních veličin, protože se předpokládá, že na výstupní hodnotu kulminačního průtoku *Q* mohou mít vliv:

- plocha povodí *P* [km<sup>2</sup>],
- sklonitost povodí *SK* [%],
- lesnatost povodí *LES* [%],
- průměrný dlouhodobý průtok *Q<sub>a</sub>* v místě uzávěrového profilu [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>],
- průměrný specifický odtok z povodí *q<sub>a</sub>* v místě uzávěrového profilu [l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>],
- průměrná hodnota *CN* čísla povodí [-],
- doba trvání deště *T* [min],
- průměrná intenzita deště *IN* [mm.hod<sup>-1</sup>].

U vstupních veličin  $q_a$  (resp.  $Q_a$ ) a  $CN$  se předpokládá, že určitým způsobem reprezentují hydrogeologické a půdní vlastnosti sledovaného povodí.

Užití uvedených veličin se osvědčilo a dle dosažených průběžných výsledků bylo patrné, že má smysl se touto cestou ubírat. Slabinou této struktury však bylo to, že model špatně reagoval na parametry zatěžovací srážky. Zároveň bylo potřeba upravit základní strukturu tak, aby bylo možno použít tzv. postupnou optimalizaci pro hledání neznámých kritických dvojic dob trvání a intenzit příčných přívalových dešťů pro jednotlivé řádky vzorové matice (blíže vysvětleno v kapitole 6.2 Kalibrace modelu).



**Obr. 6.3** Finální verze základní struktury modelu

Obr. 6.3 představuje finální verzi základní struktury modelu. Model je tvořen čtyřmi inferenčními systémy, přičemž každý z nich pracuje se dvěma vstupními veličinami a jednou (pomocnou) výstupní veličinou. První dva inferenční systémy (spodní větev) zpracovávají vlastnosti povodí. Je zde pracováno se sklonitostí povodí  $SK$ , průměrným specifickým odtokem z povodí  $q_a$  v místě uzávěrového profilu a průměrným  $CN$  číslem daného povodí. Pomocné dílčí výstupní veličiny (v obou větvích) jsou značeny  $out$  a postupně číslovány. Horní větev systému zpracovává parametry návrhového zatěžovacího deště – doba trvání  $T$  a intenzita  $IN$ . Poslední inferenční systém pak zpracovává dílčí výstupní veličiny  $out2$  a  $out3$  z obou větví. Finálním krokem je prosté přenásobení posledního dílčího výstupu  $out4$  plochou povodí  $P$ . Výstupem z modelu je předpokládaný kulminační průtok  $Q$ . Hodnota průtoku je pak v následné aplikaci porovnávána s limitní hodnotou průtoku, a jsou tak hledána ohrožená povodí.

Použití uvedených veličin ( $SK$ ,  $q_a$ ,  $CN$ ,  $T$ ,  $IN$  a  $P$ ) je podloženo dlouhodobým testováním různých vstupních veličin. Užití právě těchto veličin přineslo nejlepší výsledky. Rovněž bylo testováno pořadí těchto veličin. Rozdělení základní struktury do dvou větví – větev reprezentující testované povodí a větev reprezentující příčný dešť – vedlo k lepší reakci modelu na měnící se dešťové parametry.

## 6.2 Kalibrace modelu

Kalibrace modelu probíhá za užití vzorových dat (charakteristika vzorových dat je blíže popsána v kapitole 7 Aplikace). Model je opakovaně spouštěn, přičemž jsou v jednotlivých optimalizačních cyklech postupně měněny dílčí parametry modelu tak, aby se výstupní hodnoty (kulminační průtoky) co nejvíce shodovaly s odpovídajícími hodnotami z matice vzorových dat. Dílčí složky modelu jsou měněny náhodně, případně náhodně s určitými omezeními, s užitím náhodných čísel. Jedná se o období metody Monte Carlo. V každém cyklu optimalizace dochází po provedení

určité modifikace k výpočtu kriteriální funkce. Hodnota kriteriální funkce je porovnána s hodnotou, která byla dosažena v předchozím cyklu, a pokud bylo dosaženo příznivějšího výsledku, je tato modifikace uložena do paměti a je s ní pracováno dál. Nevedla-li poslední modifikace k lepším vlastnostem modelu, vrací se algoritmus k dosud nejlepší dosažené variantě, která je uložena v paměti.

V průběhu kalibrace jsou postupně měněny následující části modelu:

- matice báze pravidel,
- parametry funkcí možnosti,
- váhy jednotlivých pravidel.

### 6.2.1 *Matice báze pravidel*

Matice báze pravidel jednoznačně přiřazuje určité kombinaci množin na vstupech výstupní množinu. Rozměry matice jsou dány počtem vstupů a výstupů a počtem užitých funkcí možnosti (obdoba funkcí příslušnosti u fuzzy modelů) pro popis jednotlivých univers. Uvažovaná základní struktura modelu (obr. 6.2, resp. 6.3) umožňuje použití jednoduché matice báze pravidel, která popisuje všechny kombinace 2 vstupních veličin a přiřazuje jim hodnotu na 1 výstupu. V případě užití 20 funkcí možnosti (v konečné verzi modelu je použit právě takový počet) pro popis univers se pak matice skládá z  $20^2 = 400$  řádků.

V průběhu modifikace matice báze pravidel je měněn vektor konsekventu, tedy třetí sloupec matice, který na každém řádku přiřazuje kombinaci vstupů (v předchozích dvou sloupcích) množinu na výstupu. Na počátku kalibrace modelu je použita základní (subjektivně sestavená) matice báze pravidel. Její podoba byla určena součtem čísel množin na vstupech a z něj odvozenou množinou na výstupu. Modifikace matice báze pravidel probíhá pomocí užití náhodných čísel. V každém cyklu jsou u náhodně zvoleného počtu řádků náhodně měněny hodnoty konsekventu vždy o jednu hodnotu (nahoru či dolů). Vede-li modifikovaný tvar vektoru konsekventu k lepším vlastnostem modelu dle kriteriální funkce, je nový tvar vektoru uložen do paměti a je s ním pracováno v dalším kroku. V opačném případě dojde k navrácení k původnímu tvaru.

Počáteční tvar dané matice báze pravidel rovněž zohledňuje pořadí inferenčního systému ve spodní větvi (obr. 6.3) – s rostoucí délkou řetězce roste i váha hodnoty množiny na vstupu (kterou je v takovém případě pomocná veličina *out*).

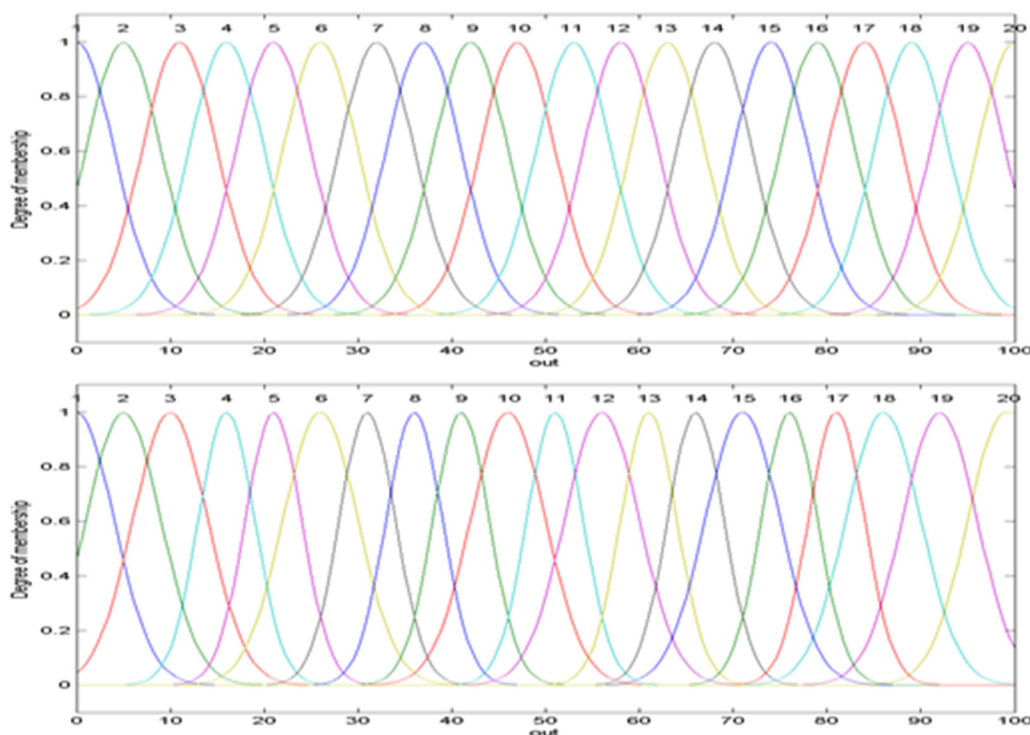
Výsledný tvar modifikované matice báze pravidel je zpravidla velmi rozdílný od počátečního (subjektivně sestaveného) tvaru matice. Nicméně předchozí práce ukázaly, že dobře sestavený počáteční tvar této matice má pro úspěch následné optimalizace nemalý význam.

### 6.2.2 *Parametry funkcí možnosti*

Universa všech použitých veličin jsou popsána pomocí funkcí možnosti. Při sestavování modelu a postupných pokusech o jeho kalibraci se ukázalo jako nejvýhodnější použití gaussovského tvaru funkcí možnosti (obr. 5.3). Postupně bylo pracováno s 6, později se 12 a nakonec s 20 funkcemi možnosti na každém universu. S rostoucím počtem funkcí se zlepšuje popis univers, což vede ke zlepšení výsledku kalibrace (dle zvolené kriteriální funkce), zároveň však s rostoucím počtem těchto funkcí roste i složitost

modelu (počet řádků matice báze pravidel) a nároky na výpočetní techniku a dobu kalibrace modelu.

V průběhu této modifikace je pracováno s dvojicemi parametrů, které popisují každou z použitých Gaussových křivek – střední hodnota a rozptyl. Jsou tedy modifikovány polohy a šířky popisujících křivek. Modifikace opět probíhá pomocí náhodných čísel, přičemž jsou do algoritmu zahrnuta určitá omezení, aby nedocházelo například k překrytí středů jednotlivých zvonů či k příliš velkému oddálení jednotlivých vrcholů, což by vedlo k nerovnoměrnému popisu univers a následnému znehodnocení výstupů.



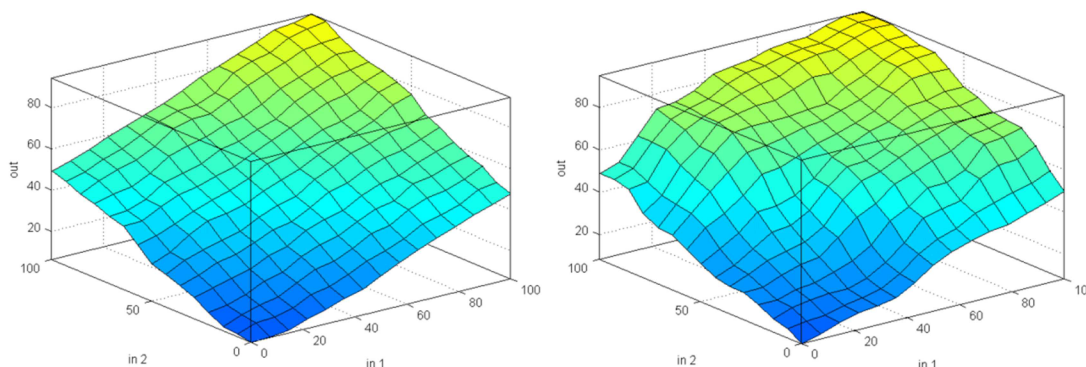
**Obr. 6.4** Ukázka změny parametrů funkcí možnosti před (nahore) a po (dole) optimalizaci

Obr. 6.4 představuje ukázkou stavu před a po optimalizaci poloh funkcí možnosti. Výchozí stav je určen subjektivním rovnoměrným rozložením, v průběhu dochází k postupnému posunu vrcholů a změnám šířek jednotlivých funkcí možnosti. Vhodná změna parametrů funkcí možnosti má velký přínos pro úspěch kalibrace, přestože se dle obr. 6.4 může zdát, že došlo pouze k nepatrné úpravě.

Otázka volby typu a počtu použitých funkcí možnosti nebyla jednoznačná. V průběhu prací na konstrukci modelu byly nejprve používány funkce trojúhelníkového tvaru (obr. 5.1), později lichoběžníkové (obr. 5.2) a nakonec bylo rozhodnuto o použití funkcí možnosti gaussovského tvaru (v prostředí Matlabu nese označení *gaussmf*) s tím, že krajní funkce nabývají maxima vždy v okrajové hodnotě universa (0, resp. 100) a v případě odsunutí vrcholu zvonu v průběhu optimalizace mimo limitní hodnotu intervalu zůstane hodnota stupně příslušnosti na maximu až do kraje universa. (v prostředí Matlabu nese označení *gauss2mf*) Např. na obr. 6.4 má krajní funkce příslušnosti při levém kraji universa (č. 1) svůj vrchol v hodnotě 0 a při pravém kraji universa (č. 20) v hodnotě 98 (nikoli 100), směrem doprava hodnota funkce již neklesá a svého maxima nabývá ve všech hodnotách až do pravého kraje universa.

Zvolený počet popisujících funkcí a volba jejich parametrů ovlivňuje celkový popis každého universa. Snaha byla o dostatečné pokrytí celého universa. Otázkou je, nakolik se mohou jednotlivé funkce příslušnosti překrývat, či nakolik je vhodné, aby body na universu příslušely do více funkcí. Přehušťení funkcí může vést k tomu, že pro jednotlivé kombinace vstupů, které jsou vypsány v matici bázi pravidel, mají na výstupu přiřazeny tutéž množinu. To pak vede ke zbytečné složitosti modelu, zpomalení výpočtu a celkové snížení přehlednosti konstrukce modelu. Finální verze modelu pracuje se 20 funkcemi možnosti na každém universu.

Kombinace parametrů funkcí možnosti a jednoznačné přiřazení výstupní množiny dané kombinaci množin na vstupech, které je definováno v matici báze pravidel, tvoří základní rozhodovací mechanismus pro určení výstupní hodnoty. Tento rozhodovací mechanismus lze graficky zobrazit pomocí tzv. řídicí plochy. Každý inferenční systém v sekvenci dle základního schématu (obr. 6.3) má svou řídicí plochu, která je v průběhu optimalizačního procesu kalibrace postupně modifikována tak, aby postupně docházelo k extremalizaci kritériální funkce. Ze svého počátečního stavu (který je dán počátečním tvarem matice báze pravidel a počátečního rovnoměrného rozmístění funkcí příslušnosti na jednotlivých universech) postupně přechází do optimalizovaného tvaru.



**Obr. 6.5** Počáteční tvar (vlevo) a optimalizovaný tvar (vpravo) řídicí plochy

Obr. 6.5 ilustruje modifikaci tvaru řídicí plochy v průběhu optimalizace. Uvedený příklad představuje řídicí plochy posledního inferenčního systému, který slučuje výstupy *out3* horní (srážkové) větve a *out2* spodní (parametry povodí) větve. Hodnoty jsou normalizované na interval [0 100].

### 6.2.3 Váhy jednotlivých pravidel

V průběhu kalibrace modelu dochází také k optimalizaci vah jednotlivých pravidel. Matice báze pravidel, která přiřazuje každé kombinaci množin vstupních veličin jednu množinu na výstupu, obsahuje také sloupec, který určuje váhu každého pravidla (řádku matice). Váhy pravidel se pohybují na intervalu [0 1], přičemž je-li váha blízká nule, je daná kombinace potlačena a v rozhodovacím mechanismu ztrácí tato kombinace vliv na konečný výsledek. Touto cestou lze potlačit či vytěsnit nežádoucí či nereálné kombinace vstupů, například extrémně intenzivní déšť o dlouhé době trvání. V této fázi dochází k aplikaci teorie možnosti a rozšíření klasického fuzzy modelu o tuto teorii.

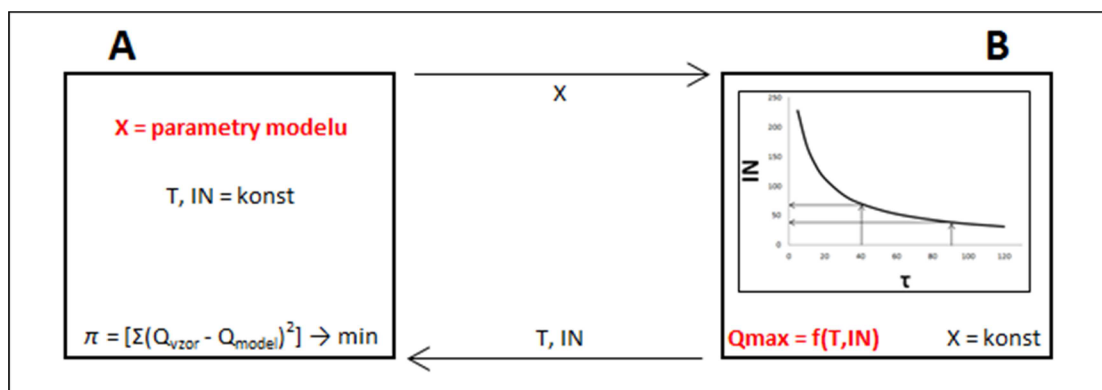
V průběhu prací byly testovány dvě varianty stanovování vah pravidel. V prvním případě byla pravidla určena zcela náhodně (Monte Carlo), případně s určitým omezováním. Výchozí stav přiřádal všem stejnou váhu rovnou 1. V druhém případě



pak byly váhy jednotlivých pravidel stanoveny subjektivně na základě dané kombinace vstupních množin.

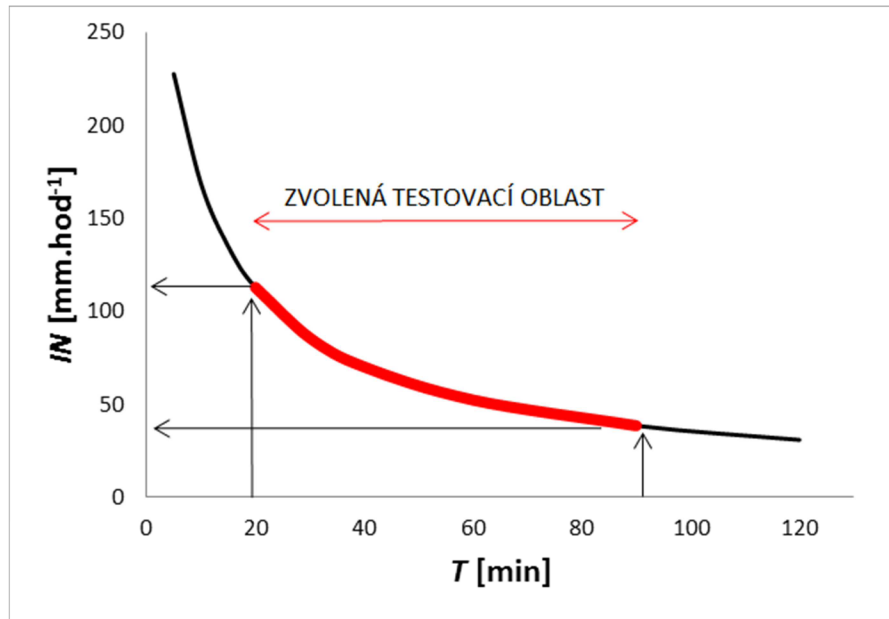
#### 6.2.4 Postupná optimalizace

Celý proces sestavování modelu a jeho kalibrace je však zkomplikován skutečností, že část dat ze vzorové matice není předem přesně známa. Jedná se o dvojici vstupů doby trvání  $T$  příčinného přívalového deště a jeho intenzity  $IN$ . Proto byl do algoritmu kalibrace zahrnut blok, který pro každý řádek vzorové matice (každé povodí) vyhledá nejméně příznivou kombinaci veličin  $T$  a  $IN$ . Pojmeme *postupná optimalizace* se pak rozumí zahrnutí tohoto bloku do původního algoritmu kalibrace modelu. Schéma celého procesu postupného hledání kritické dvojice veličin  $T$  a  $IN$  je uvedeno na obr. 6.6:



Obr. 6.6 Schéma postupné optimalizace

Proces kalibrace se skládá ze dvou bloků – A a B; V bloku A jsou pro daná vzorová data (s počáteční a v tomto bloku neměnnou kombinací srážkových vstupů  $T$  a  $IN$ ) hledány optimální vlastnosti modelu, které jsou ve schématu označeny neznámou  $X$ . Hodnota  $X$  (parametry modelu) je následně předána do bloku B. V bloku B nedochází k modifikaci dílčích částí modelu (matice báze pravidel, váhy pravidel a parametry funkcí možnosti nejsou měněny), ale je zde na zvoleném intervalu vyšetřována oblast veličin  $T$  a  $IN$  tak, aby byla nalezena nejméně příznivá kombinace vstupů  $T$  a  $IN$  – tedy taková kombinace, kdy dochází k maximálnímu odtoku  $Q$ . Algoritmus bloku B je sestaven tak, že pro každý řádek matice vzorových dat je vyhledána nejbližší srážkoměrná stanice daného povodí a z Truplových tabulek je dohledána intenzitní křivka o příslušné periodicitě. Z této křivky jsou odečítány dvojice vstupů  $T$  a  $IN$  a pro takový model, který byl sestaven předchozí modifikací v bloku A, jsou spočteny všechny hodnoty výstupů  $Q$ . Časy  $T$  a intenzity  $IN$ , které způsobí maximální odtok  $Q$  z povodí, jsou pak zpětně předány jako upravený vstup (upravená matice vzorových dat) do bloku A, kde dochází k opakované optimalizaci dle kritériální funkce  $\pi$ . Tento cyklický způsob se opakuje, dokud v obou optimalizačních blocích opakovaně nedojde k nalezení lepšího tvaru modelu či nalezení nové kombinace vstupů  $T$  a  $IN$ .



Obr. 6.7 Hledání kritických dvojic  $T$  a  $IN$  na zvolené oblasti

Uvedeným způsobem jsou na zvolené testovací oblasti postupně hledány kritické doby deště a jim odpovídající náhradní intenzity na jednotlivých povodích (obr. 6.7). V průběhu kalibrace je tedy dohledávána část samotných vzorových dat. Modifikovaná matice vzorových dat pak poskytuje přesvědčivější podklad pro celkovou kalibraci modelu.

### 6.2.5 Kriteriační funkce

Sestavení vhodné kriteriační funkce má zásadní vliv na úspěch kalibrace a celého procesu sestavování modelu. Pro vyhodnocování úspěšnosti kalibrace bylo primárně sledováno, zda se shodují modelové kulminační průtoky s odpovídajícími průtoky z matice vzorových dat. Pro tyto účely byly sestaveny kriteriační funkce  $\pi_1$  a  $\pi_2$ :

$$\pi_1 = \sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{v,i})^2, \quad (12)$$

$$\pi_2 = \sum_{i=1}^n \left| 1 - \frac{Q_{m,i}}{Q_{v,i}} \right|, \quad (13)$$

kde  $Q_{m,i}$  představuje modelový kulminační průtok  $i$ -tého povodí dat,  $Q_{v,i}$  odpovídající kulminační průtok z matice vzorových dat a  $n$  celkový počet řádků matice vzorových dat. V oblasti vyšších průtoků má vyšší účinnost kriteriační funkce  $\pi_1$ , v oblasti nižších průtoků pak funkce  $\pi_2$ .

Dále byla sestavena kriteriační funkce, která hodnotí míru vlivu jednotlivých vstupujících veličin na výstupní hodnotu. V průběhu testování se ukázalo, že modifikace dílčích částí modelu nelze vázat pouze na vztah výstupních modelových průtoků a odpovídajících kulminačních průtoků ze vzorových dat. Docházelo totiž k situaci, kdy se sice model z tohoto hlediska jevil jako velmi dobrý (korelace těchto veličin byla velmi vysoká), ale při podrobnějším testování bylo zřejmé, že úspěch je pouze částečný; Při testování, zda s rostoucím úhrnem příčinného deště roste i odtoková reakce povodí, se ukázalo, že tomu tak není vždy. Proto byly mezi kriteriační funkce zařazeny další, pro tyto účely odvozené. Jinými slovy lze říci, že do procesu kalibrace

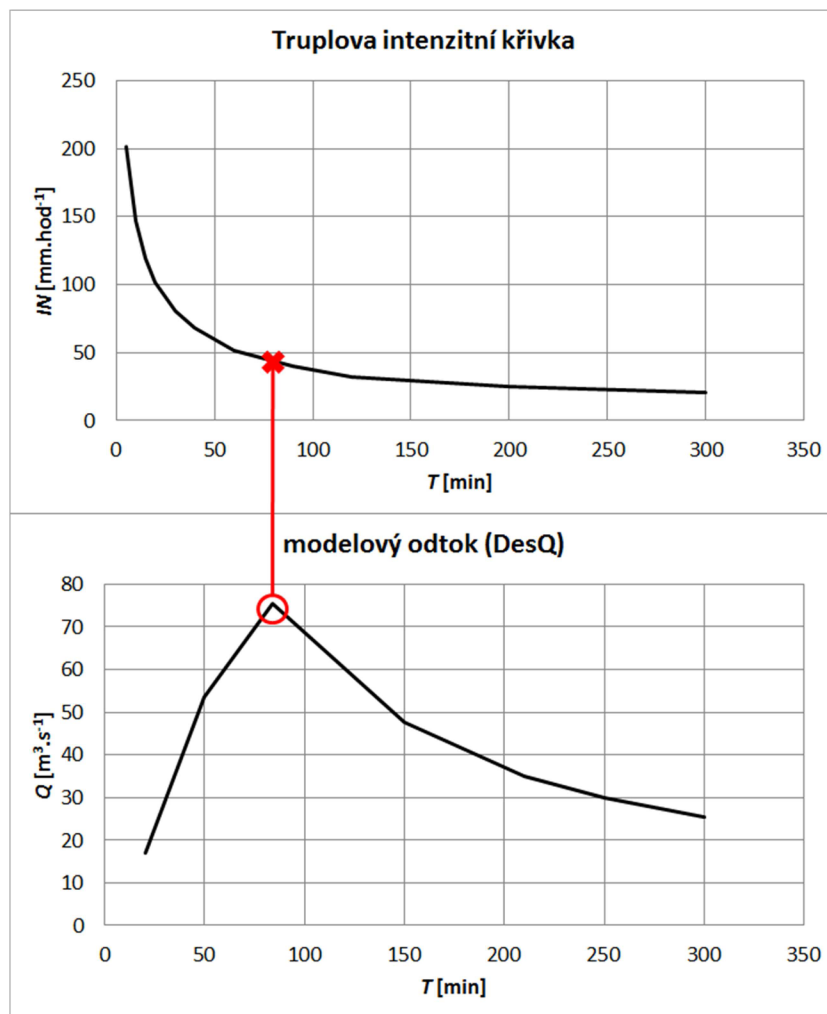
byla zařazena určitá forma citlivostní analýzy (její princip je popsán v následující kapitole 7 – Aplikace), přičemž vyčíslení jejího výsledku představuje další kritérium.

Zahrnutím více kriteriálních funkcí (rov. (12), (13) a případné zohlednění vyčísleného výstupu z citlivostní analýzy) přechází problematika kalibrace modelu do multikriteriální optimalizace. V každém cyklu optimalizace jsou porovnány dosažené hodnoty kriteriálních funkcí s dosud nejlepšími hodnotami, kterých bylo dosaženo v předchozích krocích. Pokud bylo novou modifikací ve všech kriteriálních funkcích dosaženo lepších (nebo stejných) hodnot než kdykoli předtím, je tato varianta modelu uložena do paměti a nově získané hodnoty pak slouží pro porovnávání v dalších cyklech. Volba (jedné či více) vhodné kriteriální funkce má pro úspěšnost kalibrace zásadní význam.

#### **6.2.6 Oblast mimo maximální odtoky při známé N-letosti**

Konstrukce modelu a jeho následná kalibrace se primárně soustřeďuje na oblast kulminačních průtoků. Model pracuje se dříve zpracovanou množinou malých povodí a pomocí optimalizačního postupu (kapitola 6.2.4 Postupná optimalizace) hledá kritickou dvojici vstupů doby trvání  $T$  a intenzity  $IN$ . Užitím všech uvažovaných vstupních veličin (vlastnosti povodí a parametry přívalového deště) dochází k výpočtu výstupní veličiny, kterou je předpokládaný (modelový) kulminační průtok. Tato výstupní hodnota představuje nejméně příznivou kombinaci dešťových vstupních veličin v tom smyslu, že sledované povodí bylo zasaženo právě takovým přívalovým deštěm, kdy doba trvání tohoto deště je rovna době koncentrace a zároveň je tímto deštěm zasaženo celé povodí. Intenzita takového deště je pak odvozena z Truplových závislostí pro nejbližší známou srážkoměrnou stanicí a zpracovávanou N-letostí události.

Pro účely sestavení mapové aplikace, která je popsána níže, je však nutné určit, jak se bude model chovat v případě, kdy povodí zasáhne dešť o jiné době trvání (resp. intenzitě) než kritické. Jinými slovy bylo potřeba určit hodnoty průtoků v jiných časech než v kritické době trvání příčinného deště.



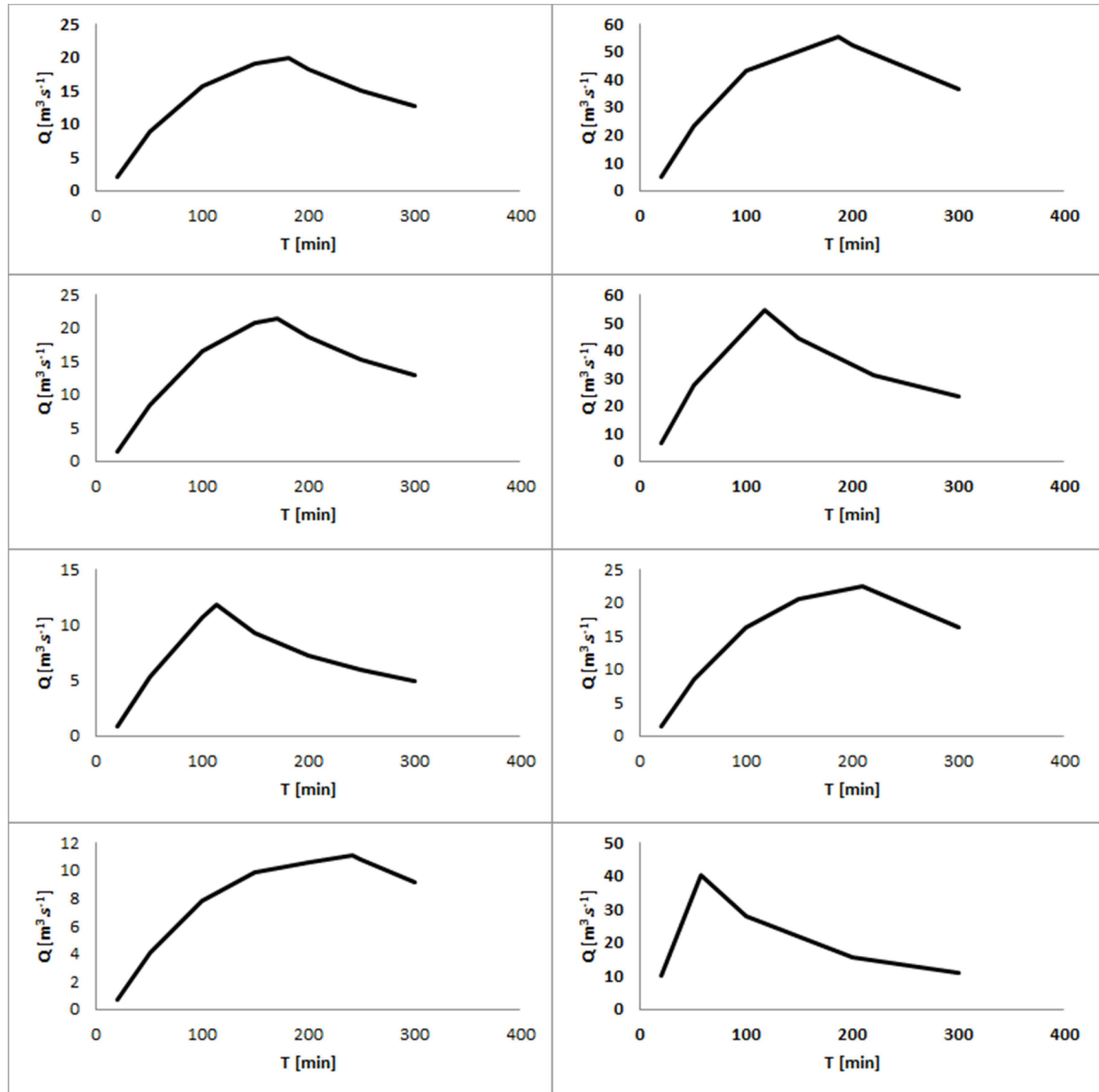
**Obr. 6.8** Hledání maximálního odtoku na Truplově křivce

Obr. 6.8 znázorňuje předpokládanou velikost modelové odtokové reakce povodí při zasažení přívalovým deštěm o určité N-letosti. Horní graf znázorňuje vztah intenzity přívalového deště  $IN$  a doby trvání  $T$  pro zvolenou N-letost dle Truplových tabulek. Zvýrazněn je bod, kdy je povodí postiženo deštěm o právě takové době trvání, která je rovna době dojezdu z nejbližšího místa na povodí do uzávěrového profilu. Model popsaný výše řeší právě tento bod – situaci, kdy povodí zasáhne srážka dané N-letosti o kritické době trvání a jí odpovídající intenzitě. Model hledá nejméně příznivou variantu, kdy je odtoková reakce největší, a způsobí tak největší ohrožení pobřežníků. Nicméně pro účely dalšího využití modelu v následné mapové aplikaci musí být ošetřena i oblast mimo tento bod, protože při práci s aplikací se předpokládá i možnost zadávání vstupů nezávisle na kritické době trvání deště. Z toho důvodu musel být nějakým způsobem odvozen charakter „vzestupné“ a „sestupné“ větve grafu (obr. 6.8 dole). Předpokládá se, že při vyšetřování odtokové reakce na celé oblasti Truplovy intenzitní křivky se bude s měnící se dvojicí vstupů  $T$  a  $IN$  měnit odtoková reakce povodí  $Q$  následujícím způsobem:

- Při  $T < T_{krit}$  a zároveň  $IN > IN_{krit}$  bude odtoková reakce  $Q$  klesat s klesající dobou trvání deště  $T$ , protože doba dojezdu z nejbližšího místa povodí (která je rovna  $T_{krit}$ ) je větší, a povodí je takovou srážku schopno lépe pojmout.

- Při  $T > T_{krit}$  a zároveň  $IN < IN_{krit}$  bude odtoková reakce  $Q$  klesat s rostoucí dobou trvání deště  $T$ , protože při překročení  $T_{krit}$  již nemůže dojít k nárůstu odtoku z povodí a charakter Truplovy intenzitní křivky je takový, že intenzita srážky s časem vždy klesá.

Tento předpoklad potvrzuje i analýza skupiny povodí pomocí programu *DesQ-MAX Q* (Hrádek, 1998). V této analýze bylo zpracováno 80 povodí. Bylo pracováno ve výpočetní variantě II, kdy je počítána hodnota maximálního průtoku při zadané době trvání deště a době opakování deště (N-letosti). U každého povodí byla zadána série různých dob trvání deště a sledována vypočtená hodnota kulminačního průtoku.



**Obr. 6.9** Ukázka výsledků analýzy průběhů kulminačních průtoků pomocí programu *DesQ-MAX Q*

Z uvedených grafů (obr. 6.9) byla odvozena zjednodušená závislost pro vztah maximálního odtoku  $Q$  a doby trvání deště  $T$  při zachování doby opakování deště. V podstatě se jedná určení míry snížení výstupní modelové hodnoty v závislosti na vztahu zadané doby trvání deště  $T$  a kritické době trvání deště  $T_{krit}$ . Oblast s nižší dobou trvání, kde  $T < T_{krit}$ , byla nazvána „vzestupná větev“. Pro tuto oblast byl subjektivně

určen způsob snížení hodnoty výstupního průtoku následujícím způsobem: oblast vzestupné větve byla rozdělena na dvě části, které jsou rozděleny hodnotou polovinou hodnoty  $T_{krit}$ .

$$Q_{upr} = A + \frac{T}{T_{krit}/2} \cdot \frac{A}{3} \quad \text{pro } T < T_{krit}/2, \quad (14)$$

$$Q_{upr} = A + \frac{T_{krit}-T}{T_{krit}/2} \cdot \frac{A}{3} \quad \text{pro } T > T_{krit}/2, \quad (15)$$

$$\text{kde } A = Q \cdot \sqrt{\frac{T}{T_{krit}} \cdot \frac{IN_{krit}}{IN}} \quad (16)$$

a jednotlivé proměnné značí následující:

$Q_{upr}$  – upravená hodnota modelového průtoku,

$A$  – pomocný člen určený výpočtem dle rov. (16),

$T$  – zadaná vstupní hodnota doby trvání příčinného deště,

$T_{krit}$  – kritická doba trvání příčinného deště (způsobující maximální odtok z povodí),

$IN$  – zadaná vstupní hodnota intenzity příčinného deště,

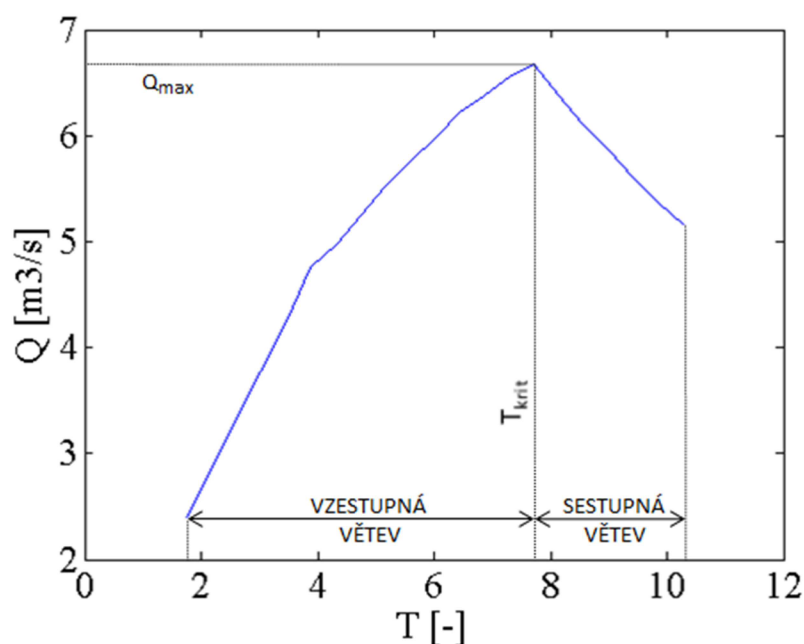
$IN_{krit}$  – intenzita příčinného deště odpovídající  $T_{krit}$  dle Truplových závislostí,

$Q$  – původní hodnota průtoku odvozená modelem (sekvencí inferenčních systémů).

Oblast vstupů, kde je  $T > T_{krit}$ , byla nazvána „sestupná větev“. Pro tuto oblast byl rovněž subjektivně určen způsob snížení hodnoty výstupního průtoku:

$$Q_{upr} = Q \cdot \sqrt{\frac{T_{krit}}{T} \cdot \frac{IN}{IN_{krit}}} \quad (17)$$

Uvedené rovnice byly sestaveny ryze subjektivně. Jejich tvar je určen snahou přiblížit tvar křivky upravených průtoků  $Q_{upr}$  ke tvarům křivek, které byly výsledkem analýzy chování malých povodí pomocí programu *DesQ-MAX Q* (obr. 6.9). Rovnice nejsou teoreticky podloženy, jejich tvar vychází čistě z podobnosti průběhů křivek a snahy určitým způsobem regulovat výstupní modelovou hodnotu v oblasti, kdy doba příčinného deště  $T$  není rovna kritické době trvání  $T_{krit}$ .



**Obr. 6.10** Ukázka úpravy výstupní hodnoty  $Q$  po celé oblasti Truplovy křivky

Graf (obr. 6.10) znázorňuje předpokládanou velikost odtoku z povodí (svislá osa) v závislosti na době trvání příčinného deště (vodorovná osa, normalizované jednotky), je-li průměrná doba opakování deště neměnná, a intenzita deště tedy vychází z Truplových závislostí. Hodnota  $Q_{\max}$  – tedy maximální hodnota odtoku při parametrech kritického deště – je určena sekvencí inferenčních systémů modelu. V bloku A postupné optimalizace (obr. 6.6) jsou změnami vnitřních parametrů modelu hledány hodnoty  $Q_{\max}$  a v bloku B jsou hledány kritické doby trvání příčinného deště  $T_{\text{krit}}$ . Oblast mimo  $T_{\text{krit}}$  (na obr. 6.10 označeno jako vzestupná a sestupná větev) je určena rovnicemi (14), (15), (16) a (17), které vycházejí z hodnoty kulminačního průtoku  $Q_{\max}$  a vztahu zadané doby trvání deště  $T$  a odvozené doby  $T_{\text{krit}}$  v bloku B.

### 6.2.7 Varianty modelu pro různé N-letosti

Jak je blíže popsáno v následující kapitole, množina vzorových dat pro kalibraci modelu obsahuje dešťové epizody v různých variantách doby opakování. Pro sestavení modelu bylo použito 7 N-letostí v rozmezí 1 rok až 100 let. Model je sestaven a následně kalibrován tak, že pro každou z uvažovaných N-letostí je vytvořena samostatná varianta modelu. Model tak pracuje v určitých vrstvách a pro následný výpočet v koncové aplikaci použije vždy příslušnou vrstvu (či dvě nejbližší) podle toho, jaké průměrné době opakování odpovídají parametry uvažovaného zatěžovacího deště. Kalibrace modelu tedy probíhá postupně; nejdříve je sestavena varianta pro 1letou srážku, následně pro 2letou a postupně pak všechny ostatní varianty až pro 100letou srážku. Tyto variantní vrstvy musejí být vytvořeny ve všech inferenčních systémech, které pracují (přímo nebo následně) s dešťovými parametry. Jedná se o inferenční systémy, jejichž výstupy jsou schematicky označeny *out3* a *out4* (obr. 6.3). Celkově je tedy při sestavování a následné kalibraci modelu vytvořeno 16 inferenčních systémů ( $1 + 1 + 7 + 7$ ).

## 7 APLIKACE

### 7.1 Vzorová data

Užití modelu se předpokládá v oblasti preventivní ochrany, proto byla pro kalibraci modelu použita odvozená vzorová data<sup>1</sup> (v případě operativní předpovědi by bylo žádoucí užití reálných dat). Byl přijat předpoklad, že déšť o určité N-letosti způsobí odtok o téže N-letosti a zároveň lze tento déšť popsat pomocí dvou veličin, a to dobou trvání a intenzitou (je pracováno s náhradní intenzitou deště). Jedná se o poměrně významné zjednodušení, ale vzhledem k tomu, že přívalové deště postihují plošně malá povodí, doba trvání těchto dešťových epizod je krátká (maximálně v řádu hodin) a celkové množství nejistot vstupujících veličin je značné, se považuje za přijatelné.

Matice vzorových dat obsahuje hodnoty vstupních a výstupních veličin, které jsou použity pro kalibraci modelu. Při popisu vstupních veličin se jedná o veličiny popisující geografii sledovaných povodí a parametry příčinného přívalového deště. Výstupní veličinou je odtoková reakce ve formě hodnoty kulminačního průtoku, jakožto odezvy daného malého povodí na daný přívalový déšť. Pro odvozování vzorových dat byl použit následující postup: V první řadě byl proveden výběr vhodných povodí. Základním limitujícím faktorem je plocha povodí. Protože přívalové deště způsobují problémy na malých povodích, byla subjektivně stanovena hranice maximální plochy povodí na 60 km<sup>2</sup>. Z celého spektra veličin, se kterými je pracováno, je nejproblematictější určení hodnoty N-letého průtoku, představující reakci povodí na srážku o odpovídající N-letosti. V této fázi bylo pracováno s rozsáhlou databází hydrologických posudků brněnské pobočky ČHMÚ. Databáze obsahuje mimo jiné hodnoty N-letých průtoků pro nemalé množství profilů v oblasti místní působnosti dané pobočky. V naprosté většině se jedná o profily bez pozorování, kde i použití metod hydrologické analogie k odvození požadovaných údajů naráží na obtíže související zvláště s problémem nedostatečně husté pozorovací sítě. Bližší informace ohledně odvozování hydrologických dat v rámci zpracování hydrologických posudků jsou dostupné v (Malý, 2011). Při výběru vhodných povodí byla snaha vybírat povodí, u nichž nedochází k významnému ovlivnění průtoků antropogenní činností například v podobě nádrží na toku či odběrů.

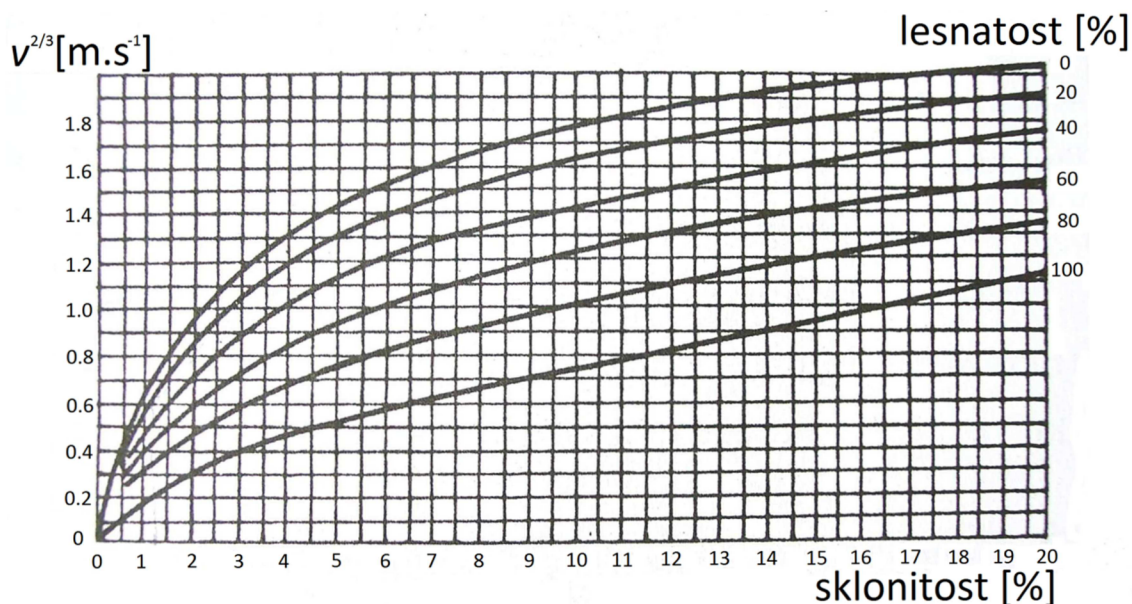
V další fázi byly určovány geografické charakteristiky jednotlivých povodí. Zde bylo maximálně využito možností programu ArcMap. Mezi takto určované veličiny patří plocha povodí, sklonitost, míra zalesnění, průměrná hodnota CN čísla a délka údolnice (od uzávěrového profilu po hydraulicky nejvzdálenější místo na rozvodnici).

První odhad doby trvání příčinného přívalového deště byl ztotožněn s dobou doběhu z nejvzdálenějšího místa na povodí do uzávěrového profilu, přičemž rychlost proudění byla odvozována pomocí Čerkašina (Čerkašin, 1964) – obr. 7.1.

---

<sup>1</sup> Pojem *odvozená data* je zde používán, protože část matice vzorových dat, která se zabývá parametry příčinného deště, byla odvozena na základě vybraných vlastností povodí a dat z dlouhodobého pozorování dešťů. V případě použití dat z reálných dešťových epizod by tyto veličiny byly přímo měřeny. Bližší popis postupu odvozování je uveden v následujícím textu.





**Obr. 7.1** Graf pro určení rychlosti proudění vody v povodí dle Čerkašina (Čerkašin, 1964). Rychlost  $v$  je určována ze sklonitosti a zalesněnosti povodí.

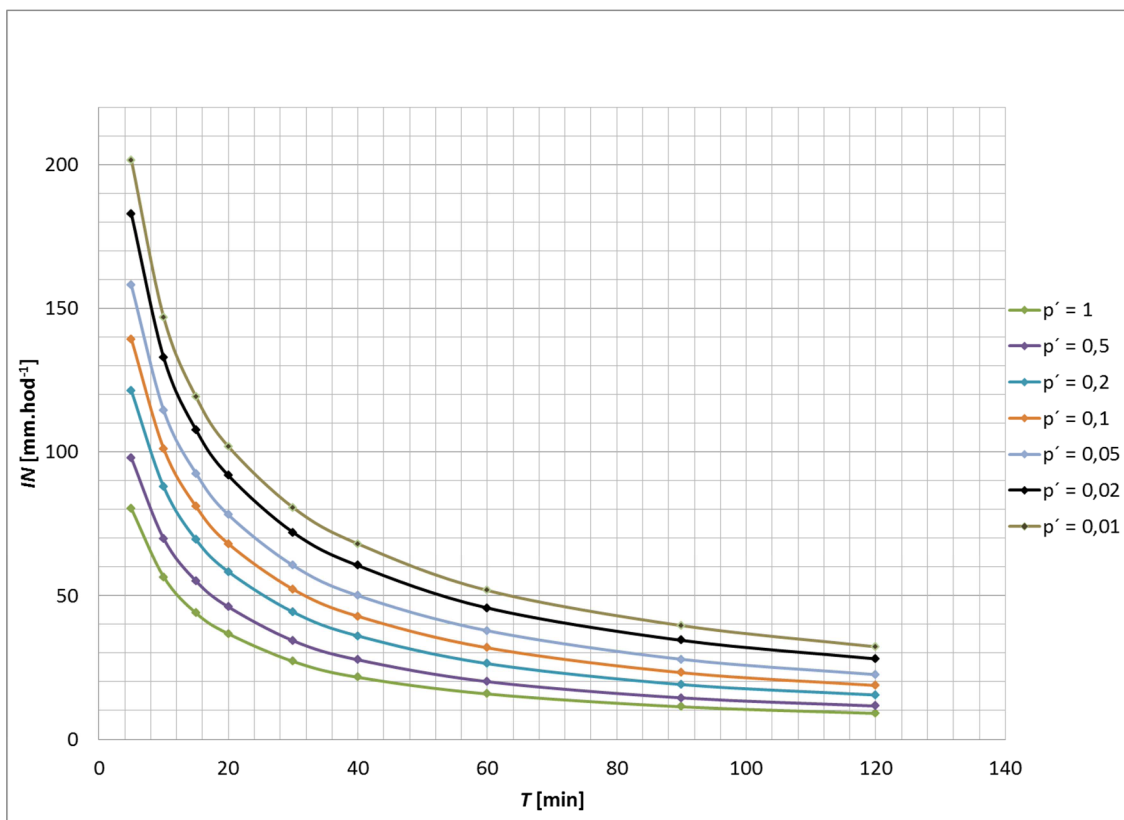
Pro oblast, kde sklonitost dosahuje hodnot mimo uvedený graf, byly křivky proloženy vhodnou regresní rovnicí a hodnoty byly odečteny pomocí užití extrapolace. Vzhledem k vysokému počtu nutného zopakování operace, byl pro zmíněné odečítání sestaven vhodný algoritmus.

Pro takto odvozené rychlosti proudění  $v$  byla vypočtena doba doběhu  $T$  dle rovnice (18), která byla ztotožněna s dobou trvání kritického deště.

$$T = \frac{L}{v}, \quad (18)$$

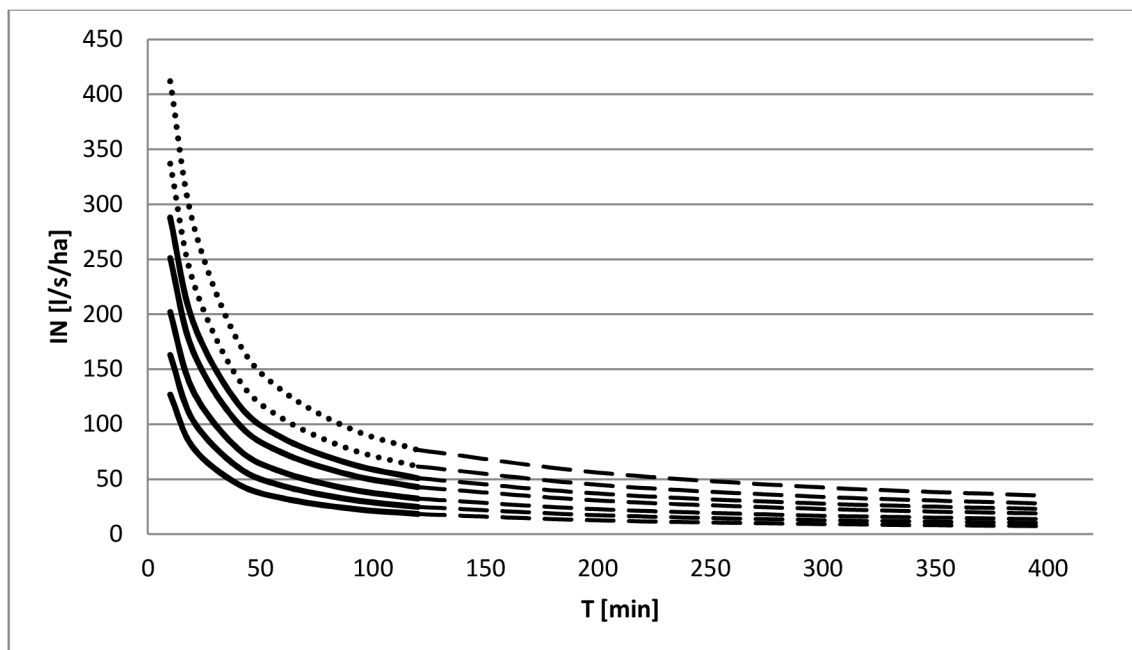
kde  $L$  představuje délku údolnice v příslušných jednotkách.

Pro odvozené doby trvání příčinné dešťové události byla z intenzitních křivek odečtena intenzita deště. V počátečních fázích práce byla užitá průměrná intenzita pro povodí Moravy a Odry dle Trupla (Trupl, 1958) – obr. 7.2. Později byly hodnoty intenzit odečítány vždy pro nejbližší srážkoměrnou stanici ke sledovanému povodí.



**Obr. 7.2** Graf průměrných intenzit pro povodí Moravy a Odry (Trupl, 1958). Křivky jsou uvedeny pro různé periodicity  $p'$ .

Kalibrace modelu probíhala v několika variantách ve vztahu k souboru vzorových dat; jednak byly použity odvozené srážkové epizody pouze s jednou dobou opakování rovnou 100 letům, jednak byly použity události i o jiných N-letostech (1, 5, 10, 20, 50 let). Zde bylo potřeba vyřešit problém s nedostatkem dat, která uvádí Trupl ve svých tabulkách. Na obr. 7.2 je uveden graf průměrných intenzit pro celé povodí Moravy a Odry. V tomto případě jsou k dispozici charakteristiky s dobou opakování až 100 let. V případě vykreslení intenzitních křivek pro konkrétní stanice jsou však uvedeny křivky s maximální dobou opakování 40 let (většinou se jedná o 20 nebo 25 let). Bylo tedy potřeba získat (odvodit) průběh těchto křivek ve vyšších N-letostech. Zároveň Trupl uvažuje maximální doby trvání příčných dešťů 120 min. Pro účely kalibrace bylo potřeba znát průběh těchto křivek i v delších dobách trvání deště, až do cca 400 min. Musela tedy být provedena extrapolace dohromady dvojího typu: do vyšších dob opakování a do vyšších dob trvání deště.



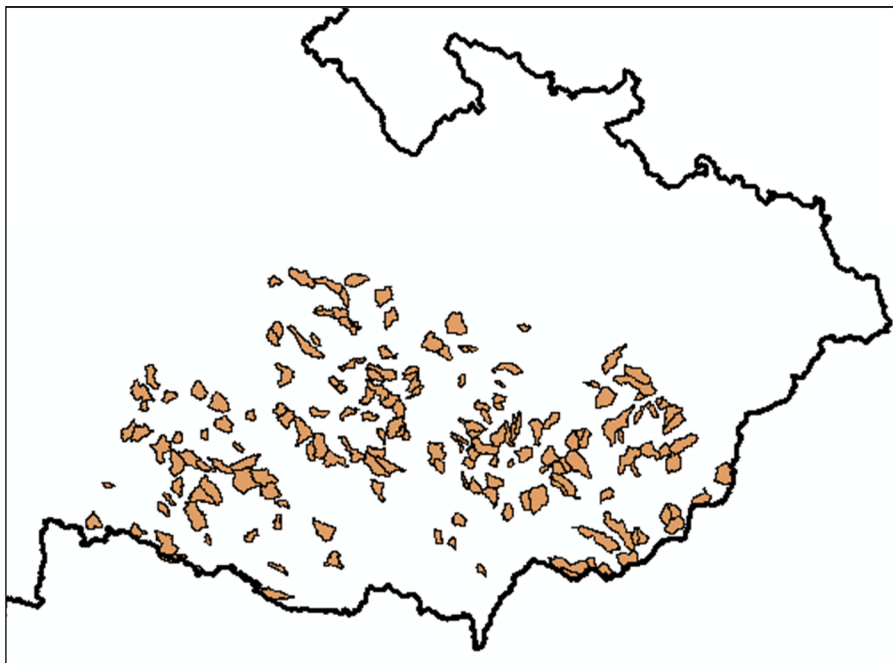
**Obr. 7.3** Extrapolace původních intenzitních křivek do vyšších  $N$ -letostí (tečkovaně) a do vyšších dob trvání (čárkovaně)

Jedná se v podstatě o proložení regresní křivky známými body a provedení následné extrapolace do požadovaných hodnot. Vzhledem velkému množství nutného zopakování postupu (pro všechny uvažované stanice a všechny uvažované  $N$ -letosti) však muselo být přikročeno k určité algoritimizaci. Oba dva druhy extrapolací byly provedeny v Matlabu za použití Curve Fitting Toolboxu. Detailněji je postup popsán v příspěvcích (Ježík, 2013) nebo (Ježík, 2014).

Uvedeným postupem byly získány hodnoty uvažovaných veličin pro sestavení matice vzorových dat. Jedná se o následující veličiny:

- Plocha povodí – určeno pomocí programu ArcMap dle polohy rozvodnice k uvažované poloze uzávěrového profilu.
- Sklonitost povodí – jedná se o sklonitost povodí určenou programem ArcMap z digitálního modelu terénu s využitím nástroje Spatial Analyst Tools – Surface – Slope.
- Lesnatost povodí – určeno pomocí programu ArcMap s využitím vrstvy lesnatosti ČR; podklady získány od ČHMÚ.
- Průměrný specifický odtok z povodí  $q_a$  v místě uzávěrového profilu – hodnota byla převzata z databáze hydrologických posudků ČHMÚ.
- Průměrná hodnota CN povodí – hodnota byla určována z mapy s rozlišením 100 m; podklady byly získány od ČHMÚ.
- Doba trvání deště – hodnota byla odvozena výše uvedeným postupem.
- Intenzita deště – hodnota byla odečtena z Truplových intenzitních křivek pro zadanou dobu  $T$ .

Počet sloupců vzorové matice je roven celkovému počtu vstupních/výstupních veličin. Počet řádků matice je dán počtem srážkových epizod a počtem uvažovaných povodí. Pro kalibraci modelu bylo použito 184 povodí. Naprostá většina z nich leží v oblasti místní působnosti brněnské pobočky ČHMÚ. U povodí, která leží mimo tuto oblast, jsou hodnoty o průtocích podloženy dlouhodobým měřením v místě uzávěrového profilu.

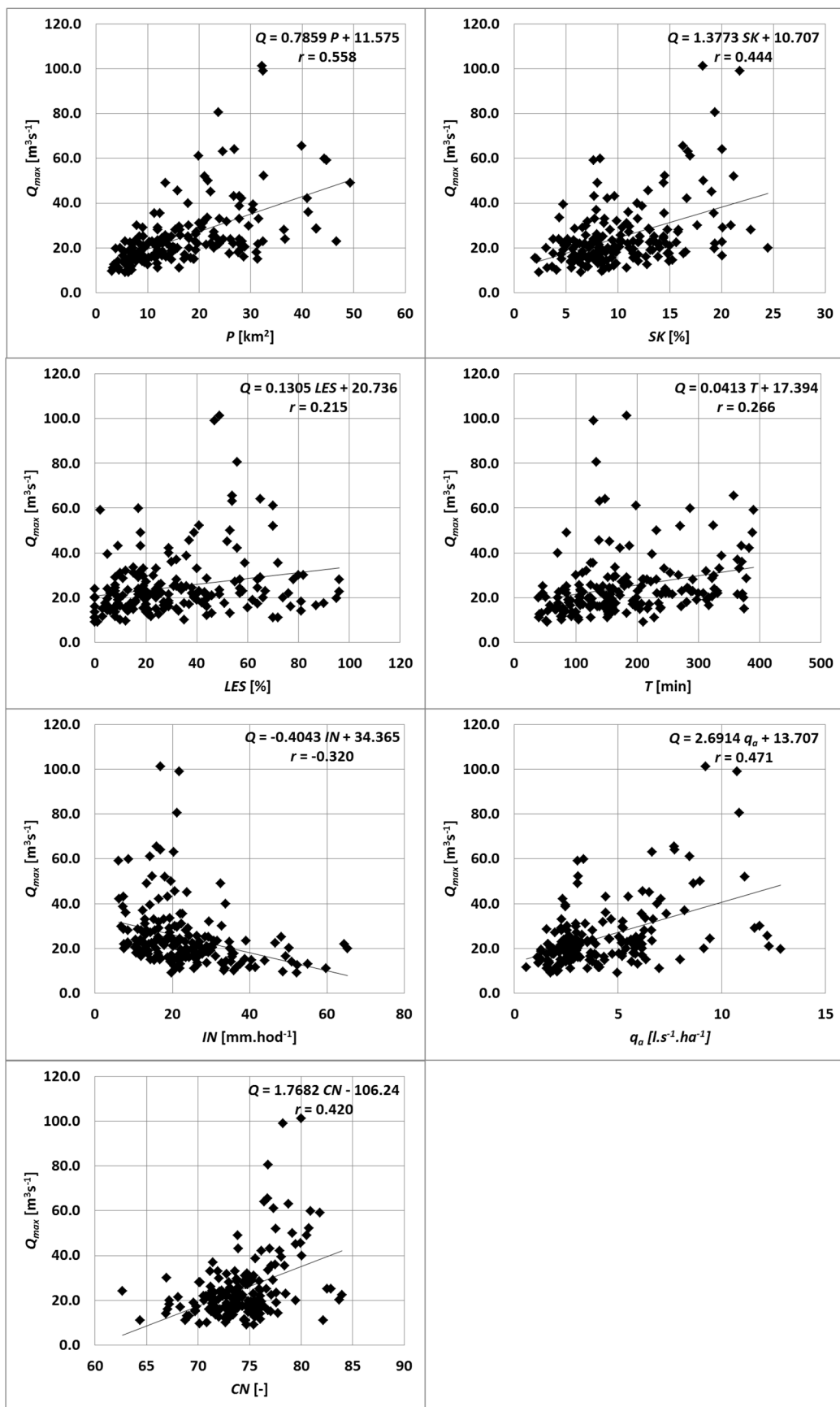


Obr. 7.4 Mapa použitých povodí pro sestavení matice vzorových dat

Následující tabulka popisuje matici vzorových dat z hlediska číselného obsahu jednotlivých užitých veličin, kde  $P$  představuje plochu povodí,  $SK$  sklonitost povodí,  $LES$  lesnatost,  $q_a$  průměrný specifický odtok z povodí v místě uzávěrového profilu,  $CN$  průměrnou hodnotu  $CN$  čísla povodí,  $T$  dobu trvání deště (rovnou době doběhu z nejvzdálenějšího místa povodí do uzávěrového profilu),  $IN_{100}$  jeho intenzitu odpovídající 100letému dešti a  $Q_{100}$  hodnotu 100letého průtoku.

Tab. 7.1 Popis hodnot v matici vzorových dat

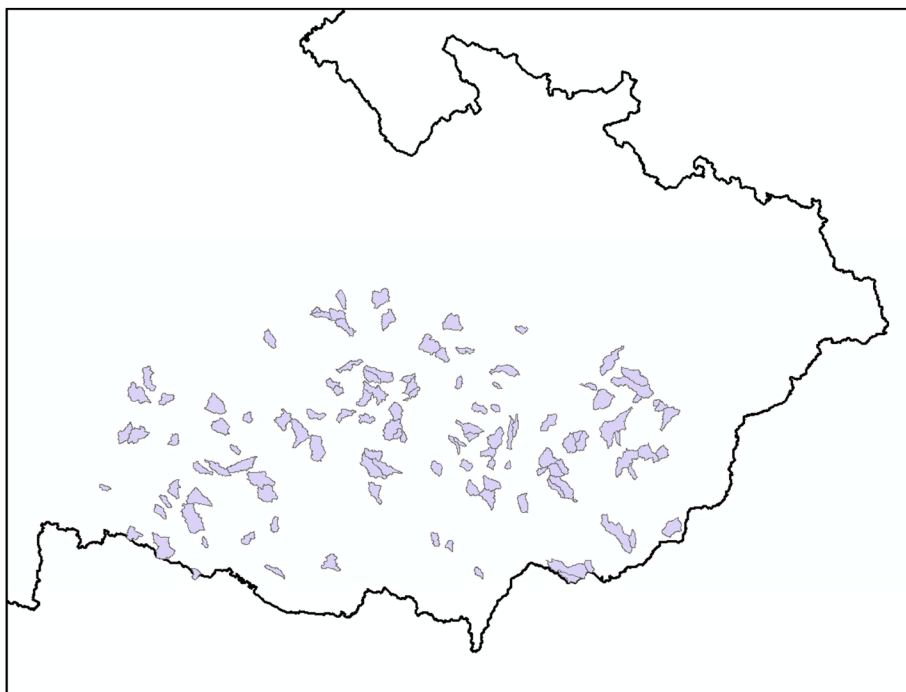
		Min	Max	Průměr	Medián
$P$	[km <sup>2</sup> ]	3,12	49,33	16,97	14,65
$SK$	[%]	2,02	24,45	10,31	9,21
$LES$	[%]	0,00	96,00	31,99	26,00
$q_a$	[l.s <sup>-1</sup> .km <sup>-2</sup> ]	0,58	12,84	4,16	3,11
$CN$	[-]	62,63	83,94	74,17	73,89
$T$	[min]	38,98	390,23	182,09	159,44
$IN_{100}$	[mm.hod <sup>-1</sup> ]	6,14	65,36	23,38	21,07
$Q_{100}$	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	9,00	101,30	24,91	21,50



Obr. 7.5 Vzájemná korelace vybraných veličin vzorové matice s kulminačními průtoky  $Q_{max}$

## 7.2 Kalibrace a validace modelu

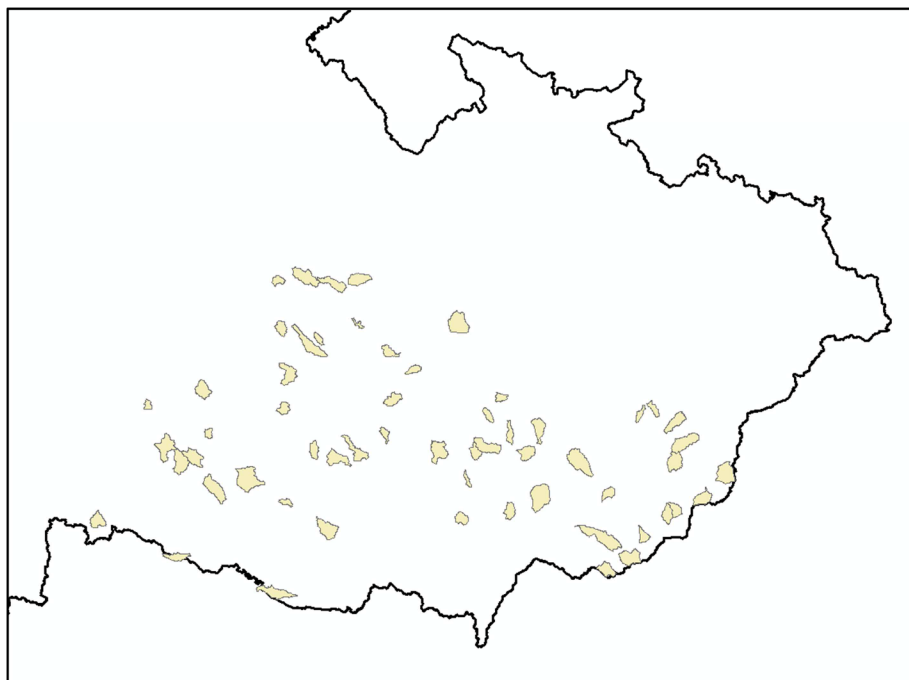
Pro účely ověření úspěšnosti sestavení modelu a jeho kalibrace byla celá matice vzorových dat náhodně rozdělena v poměru 2:1. Vznikla tak kalibrační množina dohromady o 123 povodích a validační množina o 61 povodích. Rozdělení povodí do těchto množin a jejich poloha jsou uvedeny na obr. 7.6 a obr. 7.7, základní statistické údaje dat v těchto množinách pak v tab. 7.2 a tab. 7.3.



Obr. 7.6 Kalibrační množina

Tab. 7.2 Popis hodnot v kalibrační množině

		Min	Max	Průměr	Medián
<i>P</i>	[km <sup>2</sup> ]	3,12	49,33	15,73	12,82
<i>SK</i>	[%]	2,02	24,45	10,44	9,16
<i>LES</i>	[%]	0,00	96,00	32,95	26,00
<i>q<sub>a</sub></i>	[l.s <sup>-1</sup> .km <sup>-2</sup> ]	0,58	12,84	3,85	3,06
<i>CN</i>	[-]	64,36	83,94	74,16	74,01
<i>T</i>	[min]	38,93	387,90	180,03	159,08
<i>IN<sub>100</sub></i>	[mm.hod <sup>-1</sup> ]	6,80	65,36	24,15	21,40
<i>Q<sub>100</sub></i>	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	9,00	80,50	23,03	20,50



**Obr. 7.7** Validační množina

**Tab. 7.3** Popis hodnot ve validační množině

		Min	Max	Průměr	Medián
<i>P</i>	[km <sup>2</sup> ]	4,24	46,67	19,47	18,02
<i>SK</i>	[%]	3,07	21,75	10,06	9,25
<i>LES</i>	[%]	0,00	90,00	30,07	26,00
<i>q<sub>a</sub></i>	[l.s <sup>-1</sup> .km <sup>-2</sup> ]	1,12	12,29	4,80	3,70
<i>CN</i>	[-]	62,63	81,82	74,19	73,86
<i>T</i>	[min]	54,68	390,23	186,25	159,80
<i>IN<sub>100</sub></i>	[mm.hod <sup>-1</sup> ]	6,14	50,96	21,83	20,36
<i>Q<sub>100</sub></i>	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	10,00	101,30	28,70	22,00

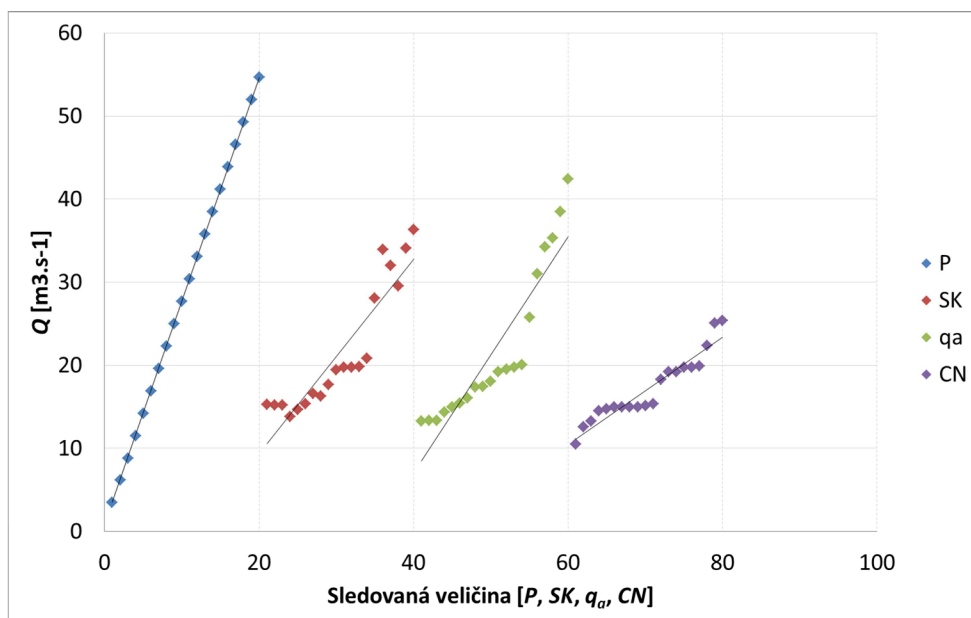
Z uvedených dat je patrné, že v několika případech dojde k tomu, že model bude validován na vstupních datech, která jsou mimo rozsah intervalů, na kterých proběhla kalibrace. V dosažených výsledcích pak bude možné vidět, jak model na taková data reaguje.

### 7.3 Citlivostní analýza

Kromě schopnosti modelu nalézt hodnotu kulminačního průtoku na jednotlivých povodích byla při vyhodnocování úspěšnosti kalibrace modelu sledována i jeho schopnost adekvátně a logicky reagovat na měnící se hodnoty vstupních veličin. Jinými

slovy lze říct, že jednotlivé varianty modelu byly testovány na citlivost na jednotlivé vstupní veličiny.

Pro účely takového druhu testování modelu byla sestavena umělá matice vstupních dat. Pomocí souboru záměrně zvolených hodnot vstupních charakteristik bylo sledováno, zda model vhodným způsobem reaguje na data, která nejsou součástí vzorové matice. Je sledováno, zda např. s rostoucí sklonitostí povodí roste i jeho odtoková reakce. Je sledován vliv všech vstupních veličin na výslednou hodnotu modelového průtoku. Pro tyto účely byl záměrně vytvořen soubor vstupních veličin tak, aby vždy byl patrný vliv právě jedné sledované veličiny. Jedná se o určitou formu citlivostní analýzy modelu, která byla prováděna ve dvou variantách: jednak byla sledována citlivost modelu na měnící se hodnoty geografických vlastností povodí (spodní větev dle schématu na obr. 6.3), jednak byla sledována reakce modelu na rostoucí srážkové parametry (horní větev). Princip citlivostní analýzy bude vysvětlen pomocí jedné skupiny dosažených výsledků (obr. 7.8 a obr. 7.9).



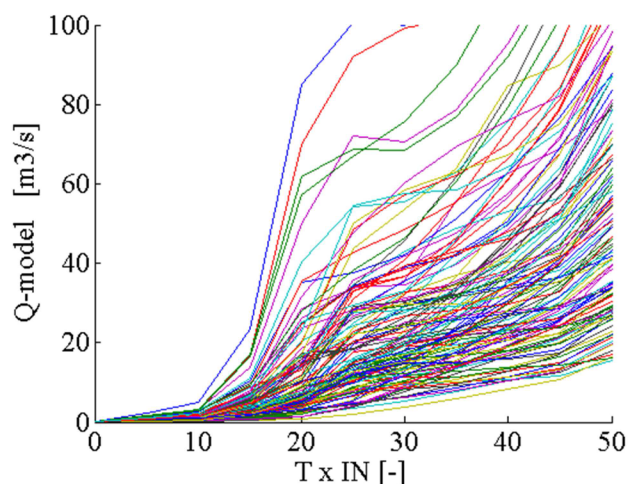
**Obr. 7.8** Výsledek citlivostní analýzy – testování vlivu geografických vstupů

Na vodorovné ose (obr. 7.8) je znázorněno pořadí testovací epizody se záměrně zvolenými hodnotami vstupních veličin. Každá ze čtyř skupin bodů v grafu zobrazuje test právě jedné veličiny (jsou barevně rozlišeny). Každá skupina bodů je proložena lineární regresí. Soubor hodnot vstupních veličin je vytvořen tak, že hodnoty všech vstupních veličin jsou zvoleny jako průměrné (na normalizovaném univerzu [0 100] se jedná o hodnotu 50), s výjimkou právě jedné sledované veličiny, u níž jsou voleny hodnoty pravidelně rostoucí od minima po maximum. Např. druhá skupina (testovací soubor dat s pořadím 21 až 40) zobrazuje vliv rostoucí sklonitosti *SK* povodí na výstupní hodnotu *Q* – tedy modelem je testován soubor 20 událostí, kdy sklonitost povodí roste a ostatní vstupní veličiny jsou neměnné, rovny průměru. Test vykazuje příznivý výsledek, protože s rostoucí hodnotou *SK* a konstantními hodnotami ostatních vstupních veličin roste i modelová odtoková reakce povodí (křivka směrem doprava roste). Obdobně lze vysledovat i vliv ostatních vstupů na výstup. Je patrné, že v případě plochy (první křivka, pořadí 1 až 20) se jedná o lineární závislost, což je způsobeno základní strukturou modelu (obr. 6.3). V případě dalších uvažovaných (testovaných)



vstupních veličin rovněž vykazuje příznivé výsledky – s rostoucí hodnotou  $q_a$  i s rostoucí hodnotou CN vždy odtoková reakce povodí roste.

Druhá část citlivostní analýzy představuje test modelu na rostoucí srážkové parametry. Princip je v zásadě stejný jako při testování citlivosti na parametry povodí. Model je spouštěn s uměle vytvořenými rostoucími srážkovými parametry. Vstupní hodnoty pro spodní větve modelu (parametry povodí) jsou brány z matice vzorových dat. Jinými slovy lze říci, že celá skupina povodí je postupně zatěžována dešti o rostoucích parametrech.



**Obr. 7.9** Výsledek citlivostní analýzy – testování vlivu dešťových parametrů

Obr. 7.9 ilustruje výsledek citlivostní analýzy vybrané varianty modelu na rostoucí dešťové parametry (doba trvání  $T$  a intenzita  $IN$ ). Každá křivka reprezentuje jedno povodí ze zpracovávané matice. Na svislé ose je modelová odtoková reakce ve formě kulminačního průtoku  $Q$ . Na vodorovné ose grafu je sloučená hodnota vstupů  $T$  a  $IN$ . Všechna povodí jsou opakovaně zatěžována srážkami o postupně rostoucích parametrech. Je pracováno s normalizovanými hodnotami na intervalu  $[0\ 100]$ , přičemž testovací hodnoty sestavených zatěžovacích dešťů jsou následující:

**Tab. 7.4** Tabulka parametrů pro citlivostní analýzu srážkových vstupů

Číslo deště [-]	$T$ [-]	$IN$ [-]	Poloha v grafu na ose $T \times IN$ (obr. 7.9) [-]
1	0	0	0
2	5	5	5
3	10	10	10
4	15	15	15
5	20	20	20
6	25	25	25
7	30	30	30
8	35	35	35
9	40	40	40

10	45	45	45
11	50	50	50

Soubor testovacích dešťů je navržen tak, aby byla jednotlivá povodí postupně zatěžována vždy o něco významnější epizodou než v předchozím případě. Primárním požadavkem pak je, aby s rostoucí srážkou (na vodorovné ose) rostla odtoková reakce (na svislé ose). Jinými slovy – aby směrem doprava křivky rostly.

Vyhodnocení citlivostní analýzy modelu lze v případě takto kalibrovaného modelu považovat za uspokojivé.

## 7.4 Dosažené výsledky

V kapitole jsou uvedeny dosažené výsledky ve dvou podkapitolách. Jednak jsou zde uvedeny výsledky kalibrace a následné výsledky validace modelu při náhodném rozdělení množiny dat v poměru 2:1 (dle kapitoly 7.2 Kalibrace a validace modelu), a jednak výsledky po kalibraci celé množiny dat, která čítá 184 povodí, a které jsou podkladem pro sestavení konečné mapové aplikace. V prvním případě je cílem ukázat, že daným způsobem je možné k problematice přistupovat a model je schopen dobře reagovat na data, která nejsou součástí kalibrace. V druhém případě je pak snaha zevrubně popsat, na jakých datech je postavena finální aplikace. Souhrnný komentář k jednotlivým výsledkům následuje v kapitole 8 Shrnutí výsledků.

Proces sestavování a kalibrace modelu obsahuje fáze, kde je pracováno s náhodnými čísly (blíže popsáno v kapitole 6.2 Kalibrace modelu). Dochází zde k náhodným obměnám na omezených intervalech určitých částí modelu, což má za následek to, že jednotlivé výsledky jsou mezi sebou rozdílné, byť byly dosaženy stejným postupem (algoritmem). Charakter výsledků je napříč výpočty podobný, ale občas dojde k situaci, kdy jeden z výsledků (či jeho část) vybočuje a celý výsledek zkreslí či znehodnotí. Proces kalibrace modelu vyžaduje kontrolu zkušeného uživatele a případnou eliminaci těchto výsledků. Při kalibraci je postupně pracováno se všemi uvažovanými N-letostmi a typickým příkladem takového vybočení je situace, kdy při vykreslení vztahu modelového a vzorového kulminačního průtoku jedna z počítaných N-letostí výrazně vybočuje, zatímco v ostatních N-letostech je dosaženo dobrých výsledků. Proces kalibrace modelu tak nelze plně zautomatizovat a vždy je nutné provést sérii výpočtů a z nich následně vybrat výsledek, který nejlépe vyhovuje skupině sledovaných kritérií.

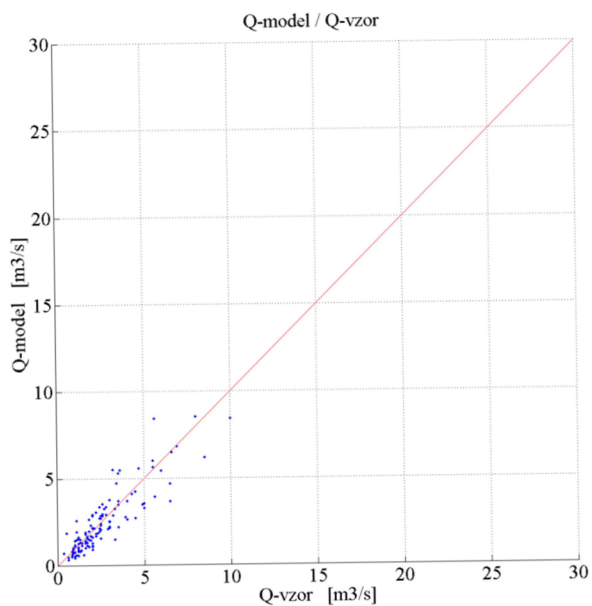
### 7.4.1 Kalibrace a validace při rozdělení množiny dat v poměru 2:1

V podkapitole jsou uvedeny výsledky dosažené při konstrukci a kalibraci modelu na základě rozdělené množiny vzorových dat v poměru 2:1 tak, jak je uvedeno v kapitole 7.2 Kalibrace a validace modelu.

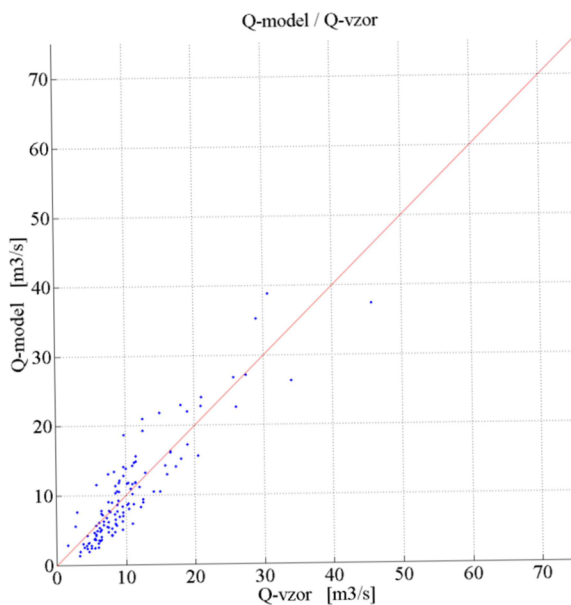
#### *Výsledky kalibrace modelu*

Následující grafy představují výsledky kalibrace modelu, tedy srovnání modelových průtoků (na svislé ose) s průtoky z matice vzorových dat. Tento typ zobrazení výsledků

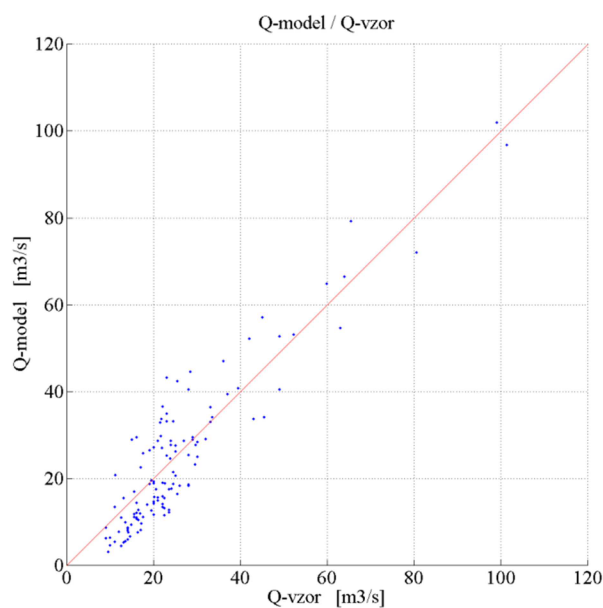
se nazývá kontrolní kvadrant. Každý bod reprezentuje jedno ze 123 povodí. Ideální stav je naznačen červenou diagonálou (nejedná se tedy o proloženou lineární regresní křivku vykreslených bodů). Výsledek je zobrazen ve třech variantách, kdy jsou postupně sledovány N-letosti 1, 10 a 100 let.



**Obr. 7.10** Výsledek kalibrace modelu – 123 povodí,  $N = 1$  rok



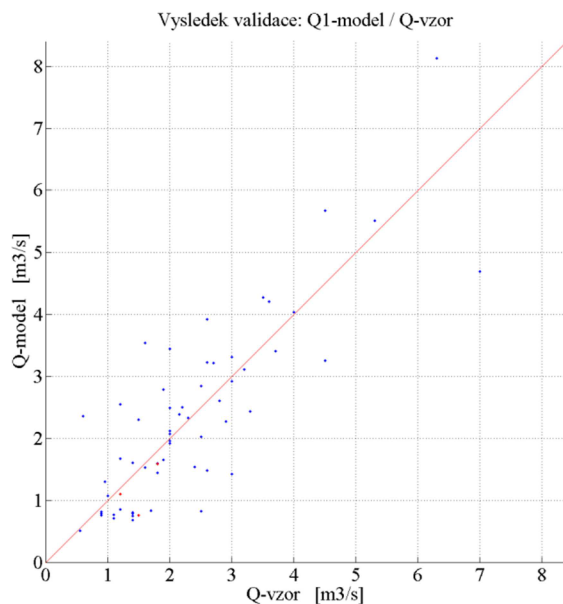
**Obr. 7.11** Výsledek kalibrace modelu – 123 povodí,  $N = 10$  let



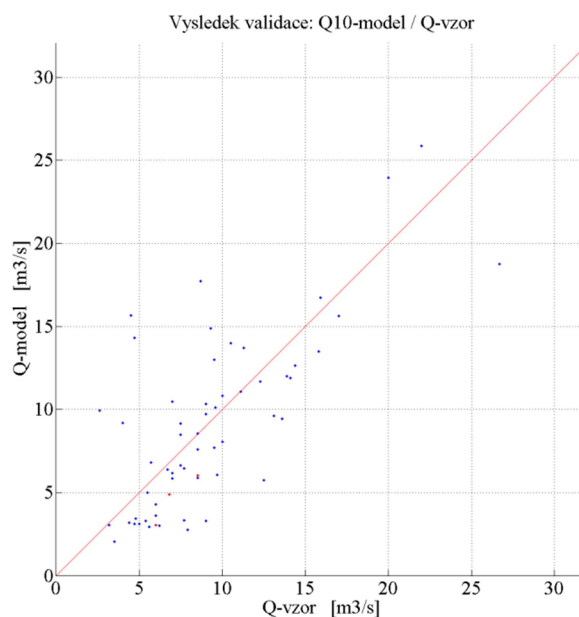
**Obr. 7.12** Výsledek kalibrace modelu – 123 povodí,  $N = 100$  let

#### Výsledky validace modelu

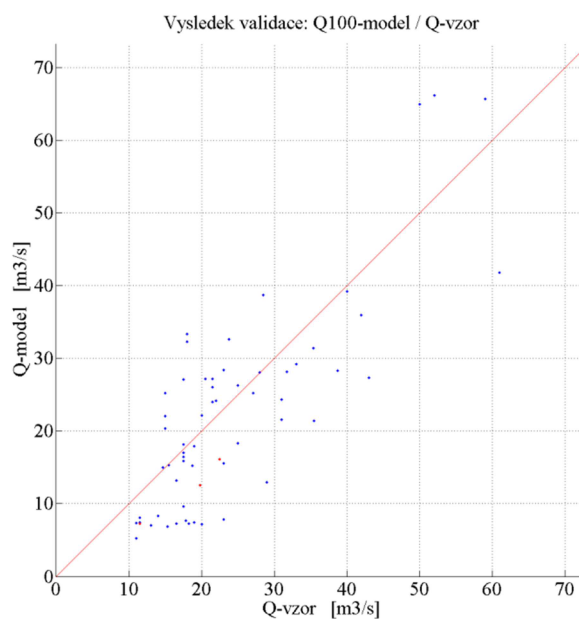
Tentýž typ výsledku je zobrazen na následujících grafech. Každý z 61 bodů reprezentuje jedno z povodí validační množiny. Červené body představují povodí (tedy řádky vstupní matice validační množiny), kdy alespoň jeden ze vstupů nabývá hodnot mimo interval kalibrace. Je tedy možné vidět, jak se model vypořádá se situací, kdy musí provádět extrapolaci mimo kalibrační prostor.



**Obr. 7.13** Výsledek validace modelu – 61 povodí,  $N = 1$  rok



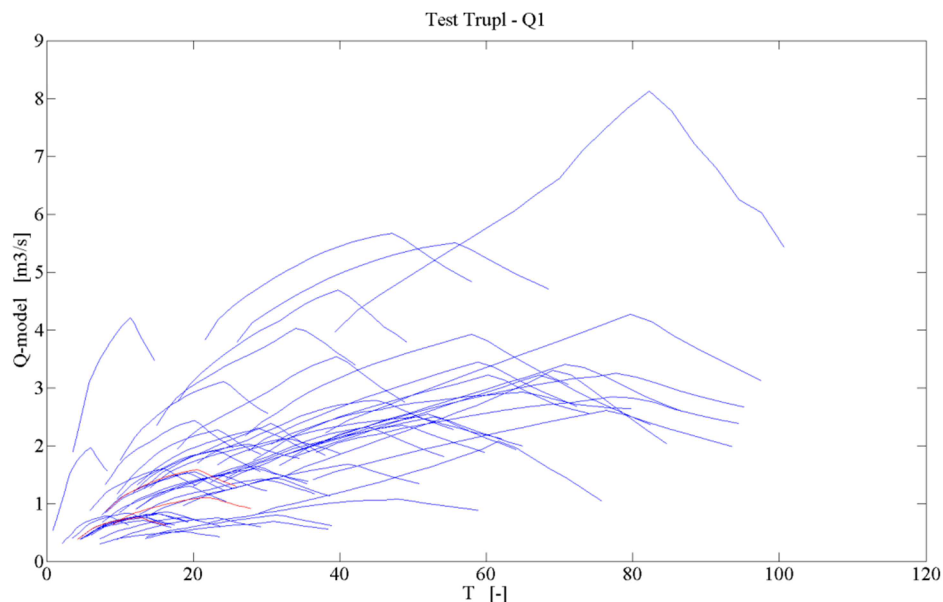
**Obr. 7.14** Výsledek validace modelu – 61 povodí,  $N = 10$  let



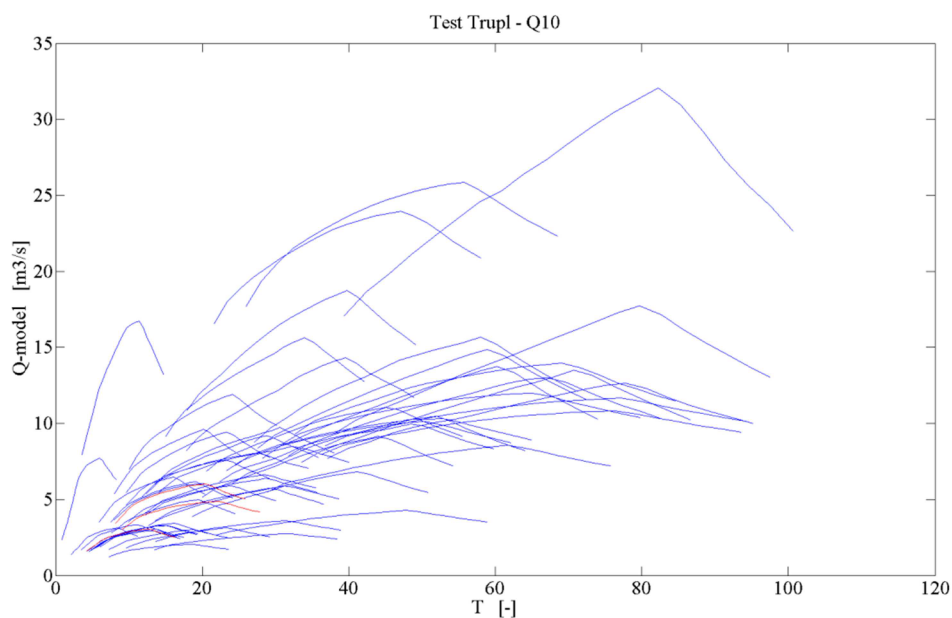
**Obr. 7.15** Výsledek validace modelu – 61 povodí,  $N = 100$  let

Dále jsou uvedeny grafy, které ukazují, jak model odvozuje velikost výstupního průtoku mimo oblast maximálního kulminačního průtoku, tedy odtoku z povodí způsobeného jinou než kritickou dvojicí vstupních parametrů  $T$  a  $IN$ . Mechanismus odvozování velikosti odtoku  $Q$  v této oblasti byl popsán v kapitole 6.2.6 Oblast mimo maximální odtoky při známé  $N$ -letosti. Na uvedených grafech jsou jednotlivá povodí (každá křivka představuje jedno povodí) zatěžována srážkou o neměnné době opakování ( $N$ -letosti). Vodorovná osa značí dobu trvání příčinného přívalového deště (normalizované hodnoty), svislá osa reprezentuje modelovou reakci povodí  $Q$  způsobenou zvolenou dobou  $T$  a odvozenou intenzitou  $IN$  dle Trupla pro nejbližší srážkoměrnou stanicí.

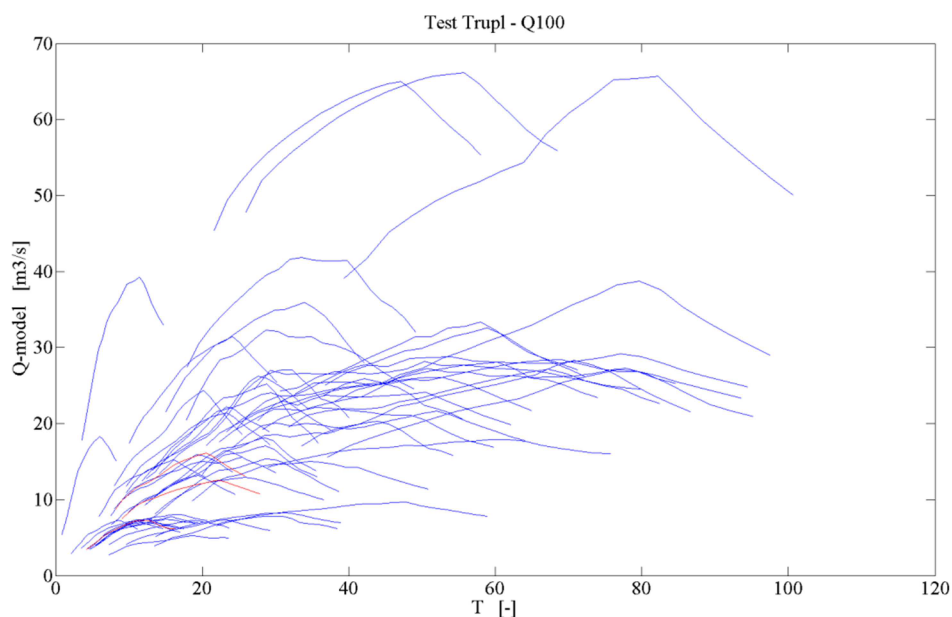
Maximální odtok  $Q$  odpovídá kritické době trvání  $T_{krit}$  a jí odpovídající intenzitě. Výsledky jsou uvedeny ve třech variantách pro N-letosti 1, 10 a 100 let. Červená barva u křivek opět značí situaci, kdy některé vstupní hodnoty povodí z validační množiny vybočují mimo interval kalibrace.



**Obr. 7.16** Výsledek validace modelu – 61 povodí; modelová odtoková reakce jednotlivých povodí při konstantní době opakování 1 rok



**Obr. 7.17** Výsledek validace modelu – 61 povodí; modelová odtoková reakce jednotlivých povodí při konstantní době opakování 10 let

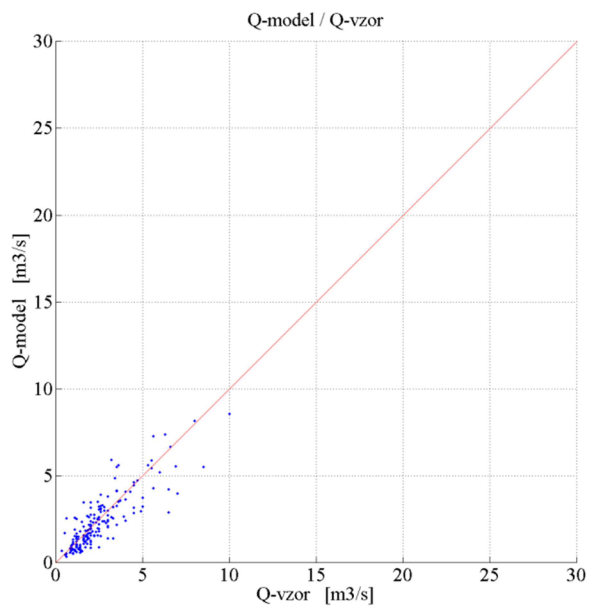


**Obr. 7.18** Výsledek validace modelu – 61 povodí; modelová odtoková reakce jednotlivých povodí při konstantní době opakování 100 let

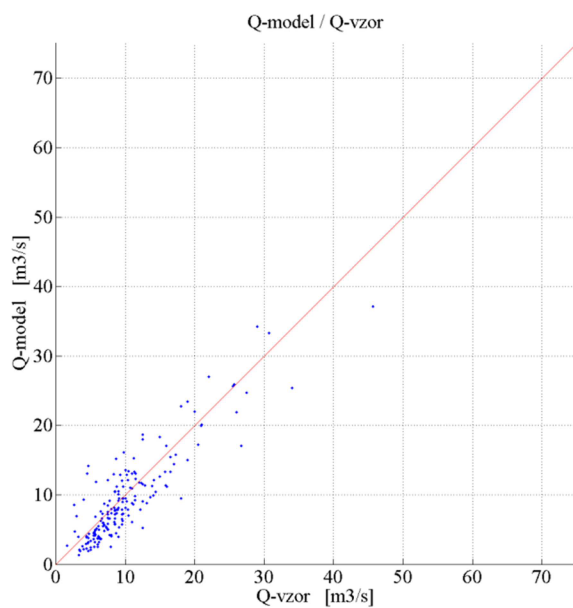
#### **7.4.2 Kalibrace celé množiny dat – podklad pro mapovou aplikaci**

Podkapitola obsahuje výsledky, kterých bylo dosaženo při sestavování koncové aplikace na základě celé matice vzorových dat, která obsahuje všech 184 povodí. Výsledky, které jsou zde zobrazeny, představují finální podobu modelu, který tvoří jádro mapové aplikace. Jsou zde uvedeny varianty pro 3 vybrané N-letosti: 1, 10 a 100 let.

*Vztah modelového a vzorového průtoku*

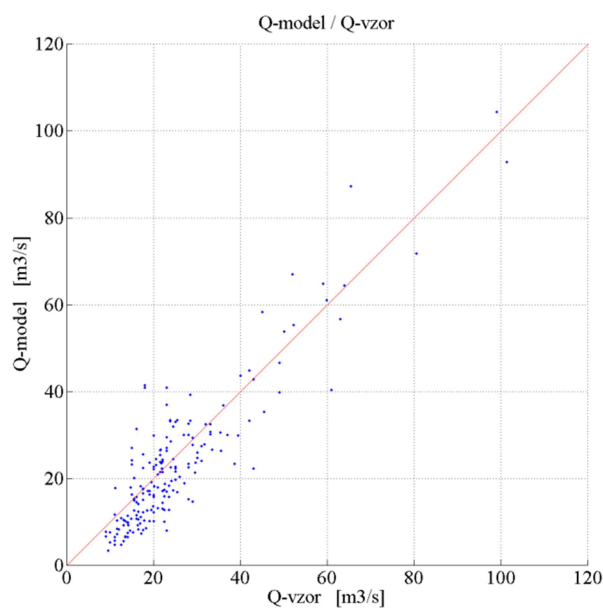


**Obr. 7.19** Vztah modelového a vzorového průtoku – 184 povodí,  $N = 1$  rok



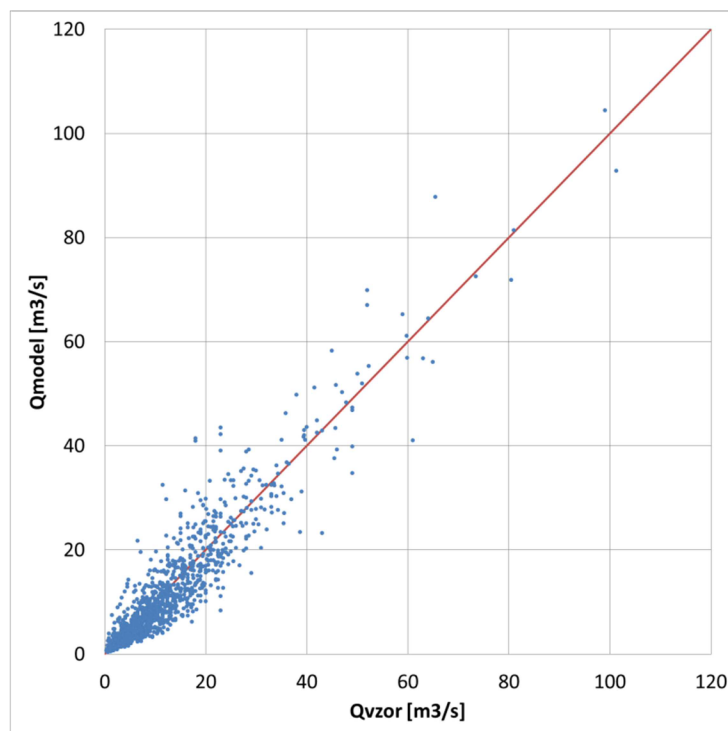
**Obr. 7.20** Vztah modelového a vzorového průtoku – 184 povodí,  $N = 10$  let





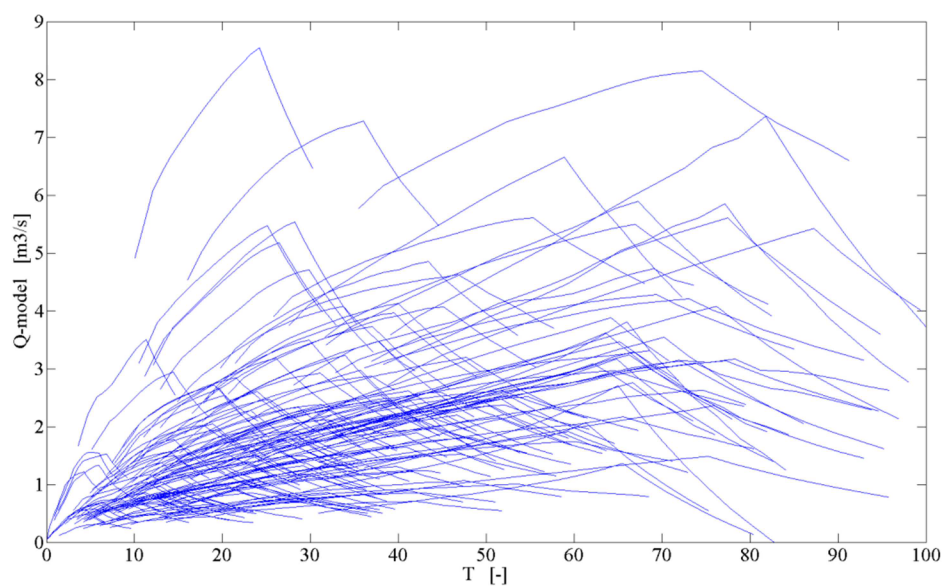
**Obr. 7.21** Vztah modelového a vzorového průtoku – 184 povodí,  $N = 100$  let

Pro sestavení modelu byla použita matice vzorových dat, která obsahuje odvozené srážkové údaje pro 7 různých  $N$ -letostí v rozpětí 1 až 100 let. Ve výše uvedených grafech jsou pro přehlednost uváděny výsledky vždy pouze pro jednu vybranou dobu opakování, a to pouze u vybraných  $N$ -letostí (1, 10 a 100 let). Jsou-li vykresleny všechny epizody pro všechny uvažované doby opakování vykresleny do jednoho grafu, je v diagramu dohromady  $184 \times 7 = 1288$  bodů.

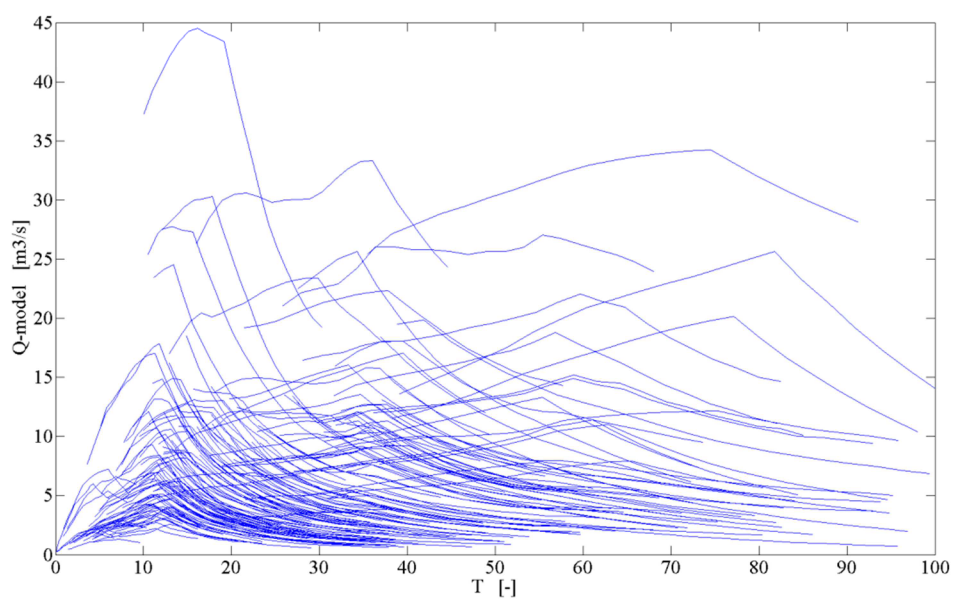


**Obr. 7.22** Vztah modelového a vzorového průtoku – 184 povodí, všechny  $N$ -letosti

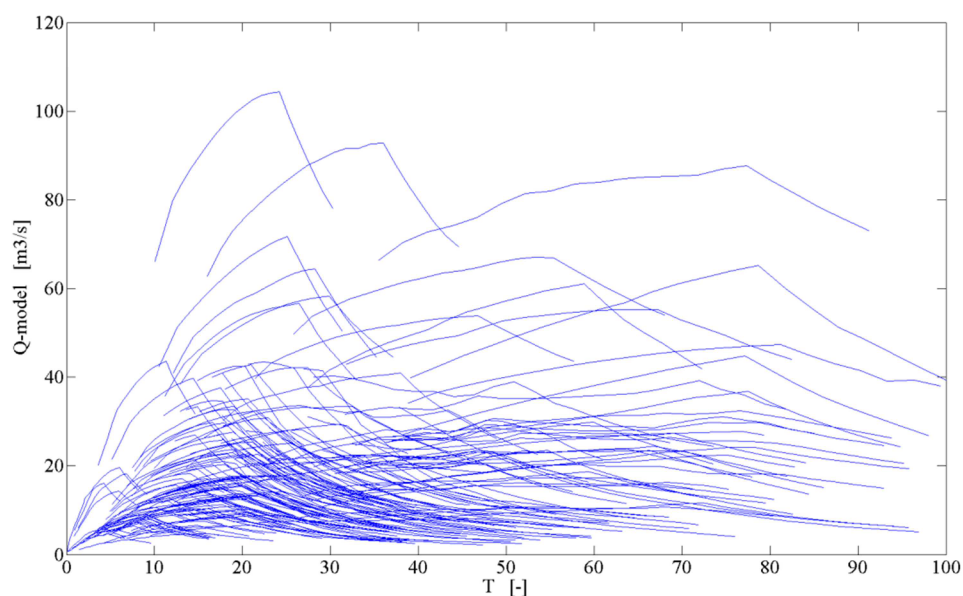
*Reakce modelu na různé parametry srážky o neměnné N-letosti*



**Obr. 7.23** Modelová odtoková reakce povodí při konstantní době opakování 1 rok – 184 povodí



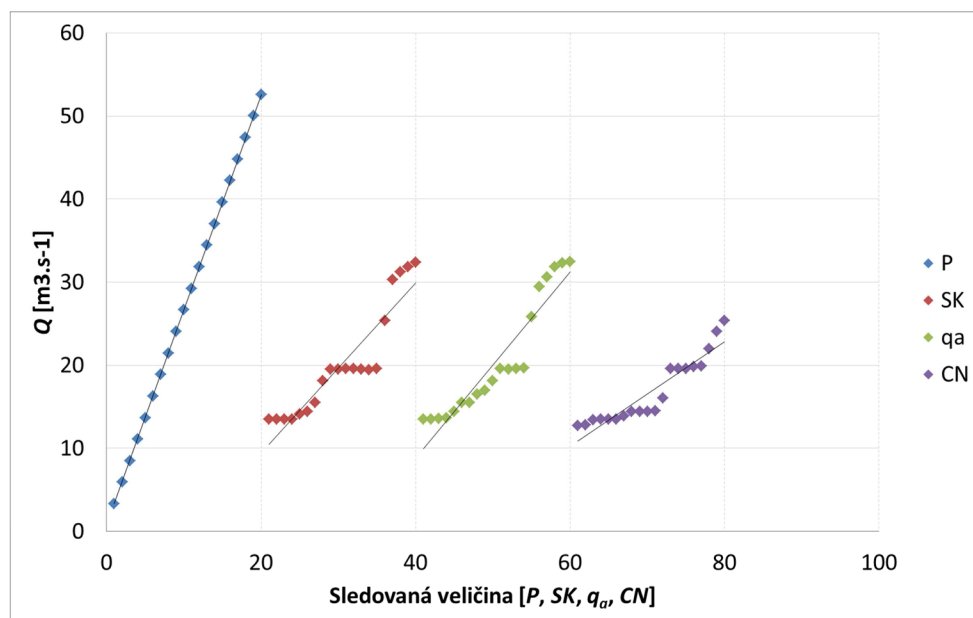
**Obr. 7.24** Modelová odtoková reakce povodí při konstantní době opakování 10 let – 184 povodí



**Obr. 7.25** Modelová odtoková reakce povodí při konstantní době opakování 100 let – 184 povodí

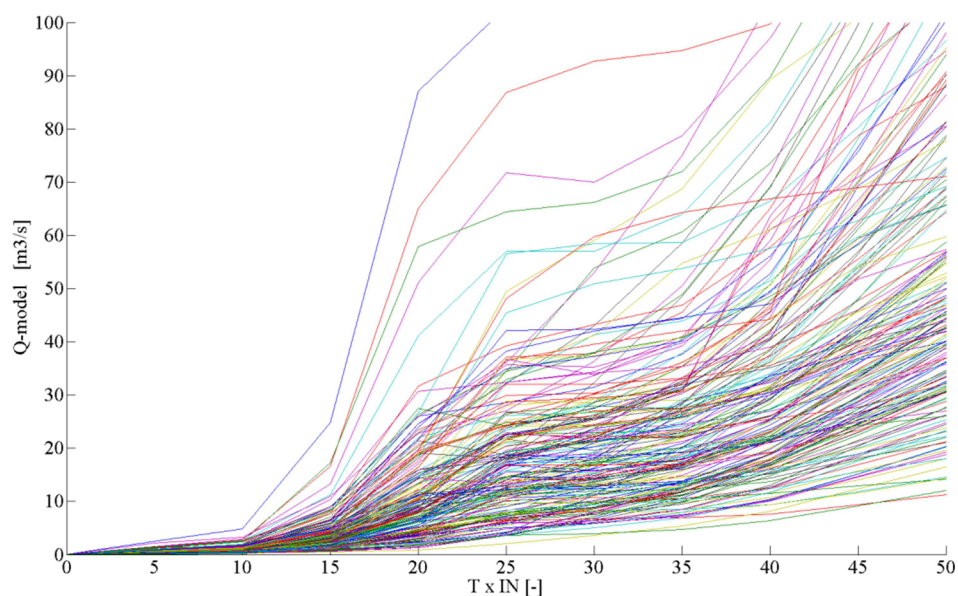
### Citlivostní analýza

Následující grafy zobrazují citlivost finální varianty na jednotlivé vstupní veličiny. Princip analýzy je blíže popsán v kapitole 7.3 Citlivostní analýza. Obr. 7.26 ukazuje, jak model reaguje na měnící se hodnoty vstupních veličin charakterizujících vlastnosti povodí.



**Obr. 7.26** Výsledek citlivostní analýzy; testování vlivu geografických vstupů – 184 povodí

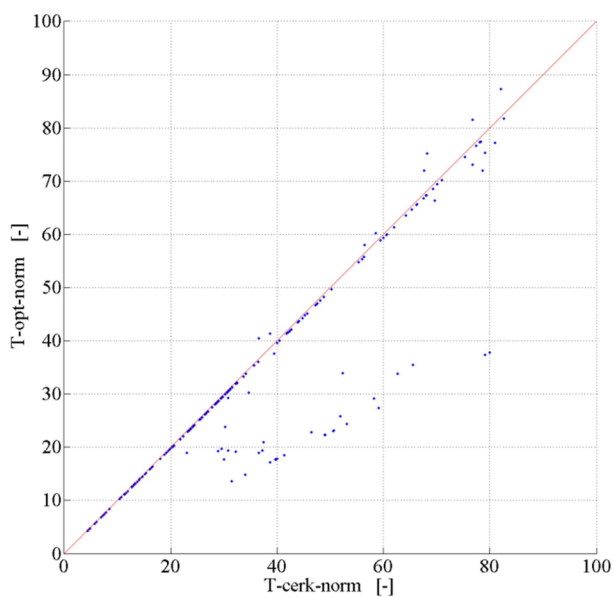
Druhá část citlivostní analýzy (obr. 7.27) ukazuje reakci modelu na rostoucí dešťové parametry; ve směru zleva doprava rostou hodnoty vstupů  $T$  a  $IN$  od minima k maximu.



**Obr. 7.27** Výsledek citlivostní analýzy; testování vlivu dešťových parametrů – 184 povodí

#### *Hledání kritické doby trvání deště*

V kapitole 6.2.4 Postupná optimalizace je zevrubně popsán způsob hledání kritické doby trvání deště, tedy takové doby, která v kombinaci s odpovídající intenzitou způsobí největší odtok z povodí. Pro tento účel byl do optimalizačního procesu při sestavování modelu vložen blok *B*, který byl sestaven za účelem postupného přibližování od počáteční doby *T* (která je dána odvozením dle Čerkašina) k nové teoretické hodnotě. Výsledek tohoto procesu je zobrazen na obr. 7.28.

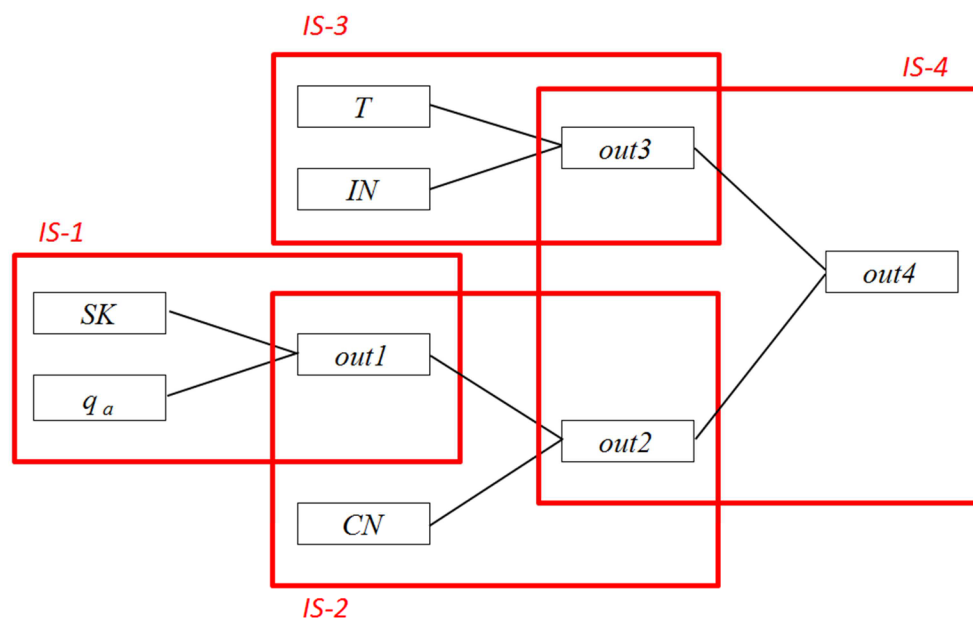


**Obr. 7.28** Hledání kritické doby trvání deště; stav po optimalizaci – 184 povodí

Graf zobrazuje vztah počáteční doby dle Čerkašina ( $T$ - $cerk$ - $norm$  na vodorovné ose) a nové doby trvání deště ( $T$ - $opt$ - $norm$ ). Každý bod představuje jedno povodí z 184členné množiny povodí vzorových dat. Z grafu je patrné, že ve většině případů zůstává počáteční doba  $T$  nezměněna a v cca 25 % případů dochází k její úpravě. S upravenými hodnotami je pak pracováno v koncové mapové aplikaci při zatěžování povodí zvolenými dešťovými parametry.

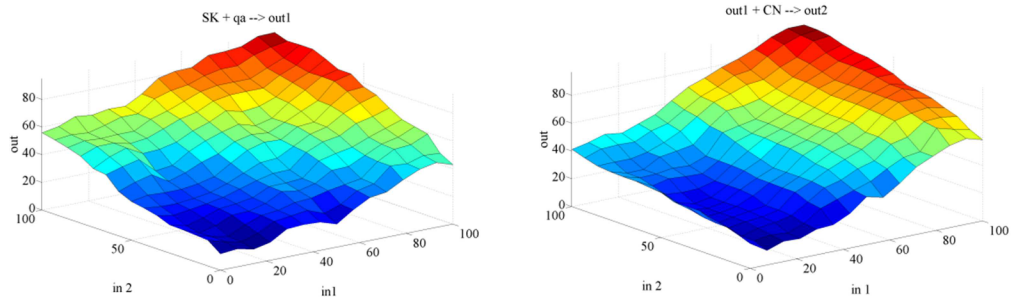
### Finální podoba jednotlivých inferenčních systémů

Základní struktura modelu je tvořena sekvencí inferenčních systémů ( $IS$ ) dle obr. 6.3, resp. 7.29. Do každého z těchto systémů vstupuje vždy dvojice vstupů a výstupem je hodnota dílčí pomocné veličiny, která slouží jako jeden ze vstupů do dalšího  $IS$ . Rozhodovací mechanismus každého  $IS$  je dán maticí báze pravidel, jejich vahami a polohou funkcí možnosti na jednotlivých universech. Graficky lze vztah dvou vstupních veličin a jedné výstupní zobrazit pomocí tzv. řídicích ploch. Zde jsou uvedeny řídicí plochy jednotlivých  $IS$  pro finální verzi modelu (obr. 7.30 až 7.37). Vstupy jsou označeny obecně  $in1$  a  $in2$ , výstup pak  $out$ . Jednotlivá universa jsou zobrazena v normalizovaných hodnotách na intervalu [0 100].

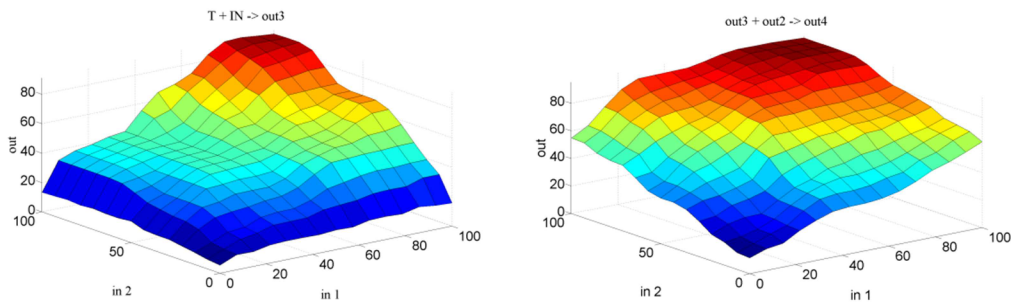


**Obr. 7.29** Základní struktura modelu s vyznačenými inferenčními systémy

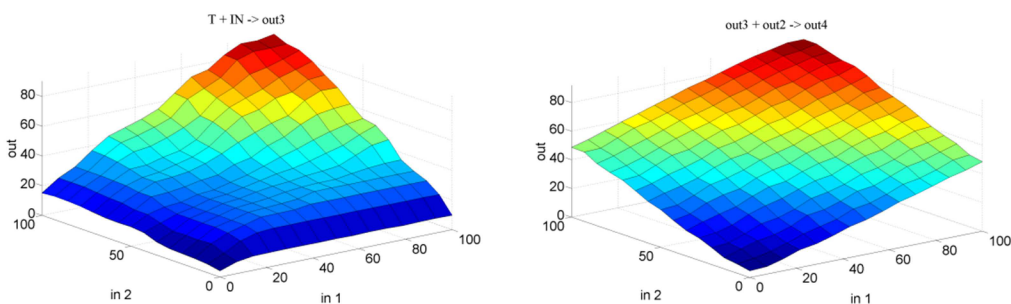
Celkový počet  $IS$  modelu je určen takto: pro větev, která pracuje výhradně s geografickými vlastnostmi povodí (spodní větev), jsou použity dva  $IS$  ( $SK + q_a \rightarrow out1$ ;  $out1 + CN \rightarrow out2$ ). V sedmi variantách (pro sedm odlišných N-letostí) jsou sestaveny  $IS$  pro dešťové parametry ( $T + IN \rightarrow out3$ ) a rovněž závěrečná část sekvence, kde se setkávají pomocné výstupy z obou větví ( $out3 + out2 \rightarrow out4$ ). Celkové množství systémů, které tvoří celou sekvenci, je tedy  $2 + 7 \times 2 = 16$ .



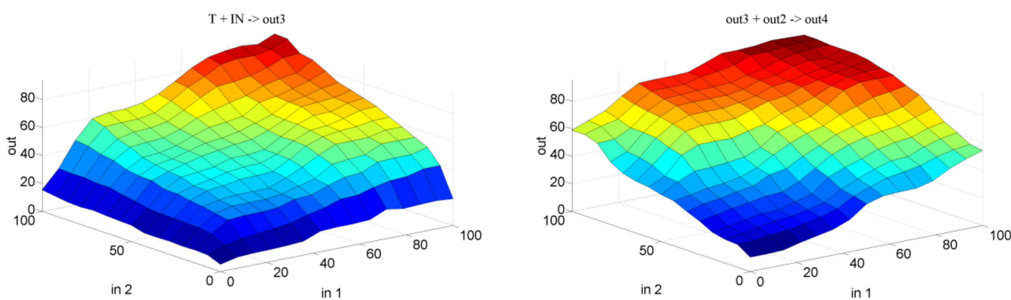
**Obr. 7.30** Řídící plochy IS-1 a IS-2



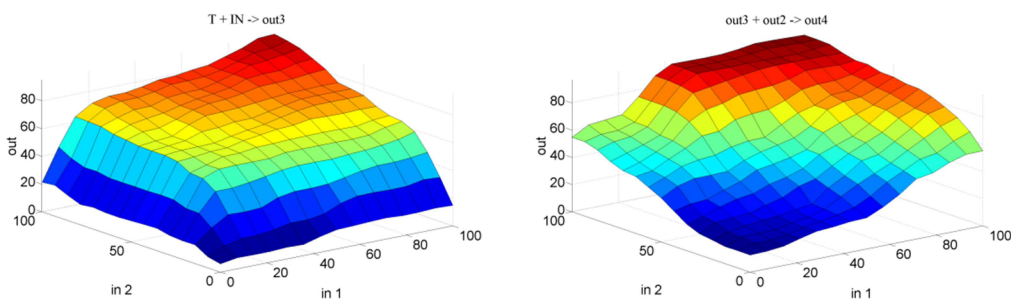
**Obr. 7.31** Řídící plochy IS-3 a IS-4 pro  $N = 1$  rok



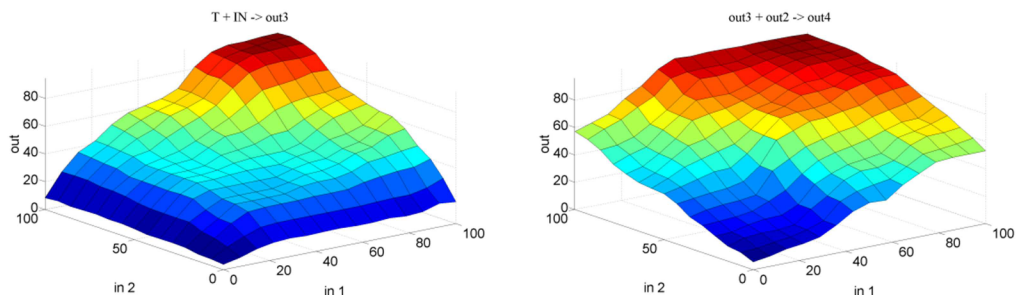
**Obr. 7.32** Řídící plochy IS-3 a IS-4 pro  $N = 2$  roky



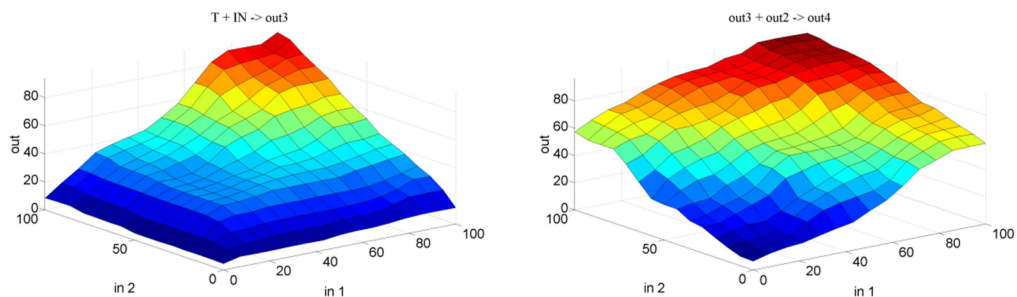
**Obr. 7.33** Řídící plochy IS-3 a IS-4 pro  $N = 5$  let



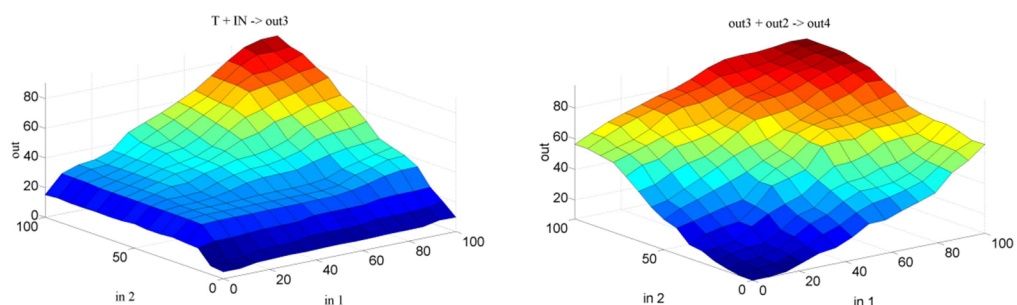
**Obr. 7.34** Řídící plochy IS-3 a IS-4 pro  $N = 10$  let



Obr. 7.35 Řídící plochy IS-3 a IS-4 pro  $N = 20$  let



Obr. 7.36 Řídící plochy IS-3 a IS-4 pro  $N = 50$  let



Obr. 7.37 Řídící plochy IS-3 a IS-4 pro  $N = 100$  let

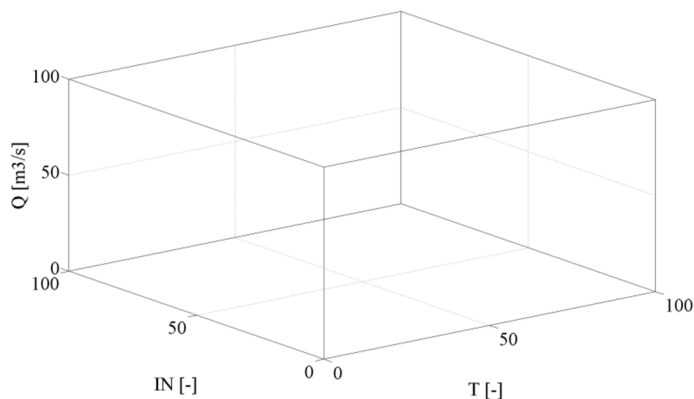
## 7.5 Mapová aplikace

V kapitole je popsána konečná mapová aplikace, která byla sestavena na základě výstupů z výše popsaného modelu. Aplikace slouží pro plošné testování množiny 184 povodí zvolenými zatěžovacími dešťovými parametry. Kapitola je rozdělena do dvou částí; v první je popsán způsob vytvoření datových matic, se kterými mapová aplikace pracuje. Druhá část se pak věnuje grafickému uživatelskému prostředí aplikace a způsobu práce s ní.

### 7.5.1 Datové matice

Koncová mapová aplikace je koncipována tak, že uživatel zatěžuje uzavřenou množinu 184 povodí zvolenými srážkovými parametry. Uživatel může na určitých intervalech volit hodnoty vstupních dešťových parametrů, přičemž se jedná o kombinaci třech veličin: doba trvání  $T$ , intenzita  $IN$  a průměrná doba opakování  $N$ . Při každé zadané kombinaci těchto parametrů dochází k výpočtu a porovnání modelové odtokové reakce s limitní hodnotou průtoku na každém z testovaných povodí. Z důvodu snížení doby výpočtu (v každém kroku zadání vstupních veličin) bylo nutné připravit tzv. datové

matice pro jednotlivá testovaná povodí. Jinými slovy byly pro každé povodí připraveny rozsáhlé třírozměrné matice, které obsahují vstupně-výstupní hodnoty (obr. 7.38). Primárním důvodem vytvoření těchto matic je rychlost reakce na výpočtové tlačítko v grafickém uživatelském prostředí koncové mapové aplikace.



**Obr. 7.38** Obecný vzhled datové matice

Vstupním hodnotám parametrů  $T$  a  $IN$  této matice je přiřazena konkrétní hodnota výstupní odtokové reakce povodí  $Q$ , a to pro jakoukoli hodnotu na vstupech. Jinými slovy je předpřipravena matice hodnot  $Q$  pro libovolnou dvojici vstupů  $T$  a  $IN$ . V grafickém prostředí (po zmáčknutí výpočetního tlačítka) pak nedochází k výpočtům v sekvencích celého systému modelu dle obr. 6.3, ale pouze k nalezení příslušné hodnoty v prostoru  $T \times IN \times Q$ . Přesnost (jemnost) celé této matice pak může být zvolena dle uvážení; zde bylo uvažováno vždy 50 hodnot na každém ze vstupních univers. Pro každé povodí má pak tato datová matice  $50 \times 50 = 2500$  hodnot.

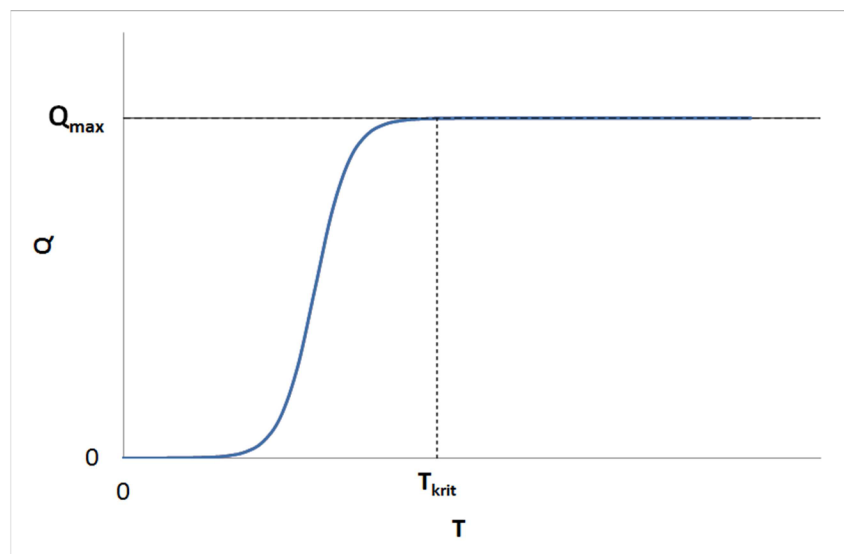
Pro každé povodí je datová matice vytvářena tak, že je sestavena množina vstupů tak, aby byla rovnoměrně pokryta obě dešťová universa  $T$  a  $IN$  v požadované hustotě. Tato mřížka vstupních hodnot (vstupy pro povodí jsou neměnné) je pak postupně zadávána do modelu. Model v každém kroku tvorby datové matice zpracuje zadané dešťové parametry a vyhodnocuje jejich průměrnou dobu opakování – podle toho následně použije příslušnou vrstvu modelu (blíže popsáno v kapitole 6.2.7 Varianty modelu pro různé N-letosti). Výběr příslušné vrstvy modelu se řídí následujícími třemi pravidly:

- je-li odvozená N-letost kombinace vstupů  $T$  a  $IN$  menší nebo rovna 1 roku, je použita první vrstva a hodnota výstupu je spočtena pomocí této vrstvy,
- je-li odvozená N-letost kombinace vstupů  $T$  a  $IN$  větší nebo rovna 100 let, je použita poslední vrstva a hodnota výstupu je spočtena pomocí této vrstvy,
- je-li odvozená N-letost kombinace vstupů  $T$  a  $IN$  v rozmezí 1 rok a 100 let, jsou mezi vytvořenými vrstvami vyhledány 2 nejbližší vrstvy, výstupní hodnota je vypočtena ve dvou variantách dle obou vrstev a konečná hodnota je lineárně interpolována mezi těmito dvěma.

Tímto způsobem je vypočtena výstupní hodnota modelového průtoku  $Q$  pro celou sestavenou množinu srážkových vstupů a pro každé povodí zahrnuté do testované množiny. V rámci tohoto procesu dochází k několika dílčím úpravám výstupního průtoku  $Q$ ; je zde zavedeno pravidlo, které hodnotu výstupního průtoku při neměnné intenzitě  $IN$  již dále nenavyšuje s rostoucí dobou  $T$ , je-li překročena doba doběhu  $T_{krit}$ . Jde o aplikaci známé „S křivky“ (obr. 7.39) z hydrologie, kdy po nasycení povodí

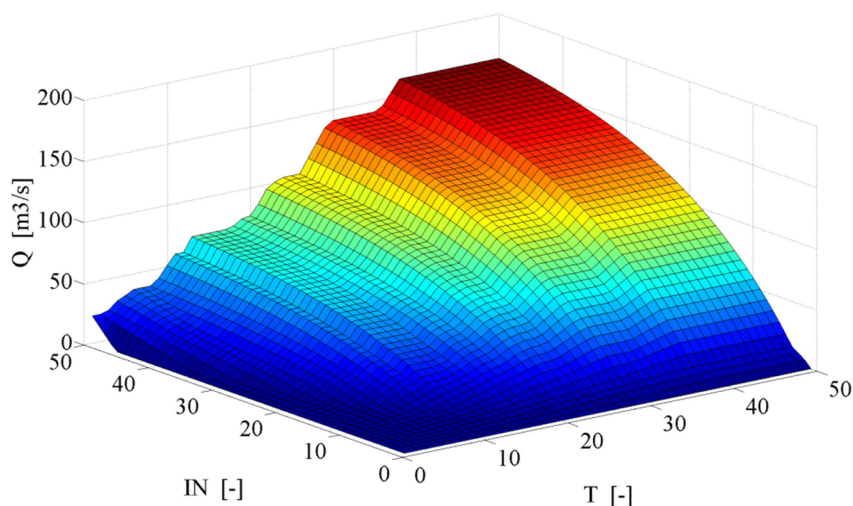


deštěm o určité intenzitě nedochází k navýšení odtoku v závislosti na době trvání deště a kdy se hodnota odtoku  $Q$  z povodí ustálí na určité (maximální) hodnotě.

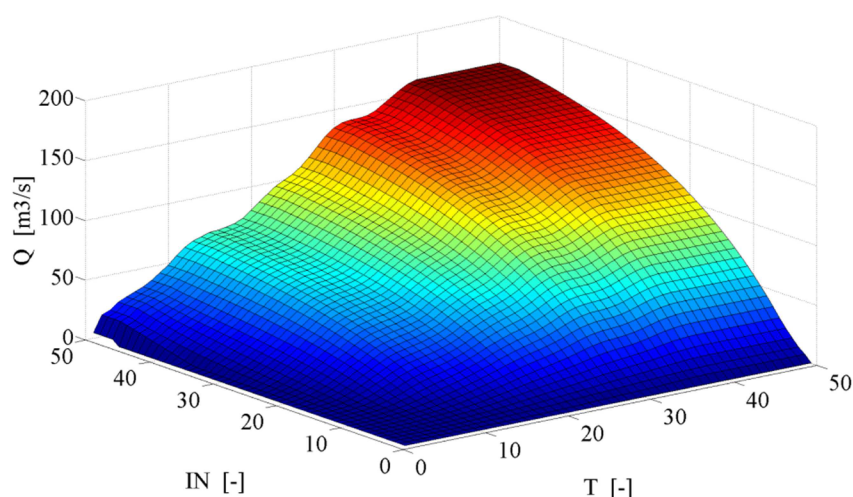


**Obr. 7.39** „S křivka“

Druhou úpravou je pak vyhlazení celého vytvořeného prostoru. Původní datová matice obsahuje určité diskontinuity prostoru, které je potřeba pro následnou práci eliminovat. Vyhlazení je provedeno pomocí zprůměrování hodnoty v daném bodě okolními body. Hodnota každého konkrétního bodu v mřížce je změněna na hodnotu průměru z okolních bodů ve zvoleném rozsahu.



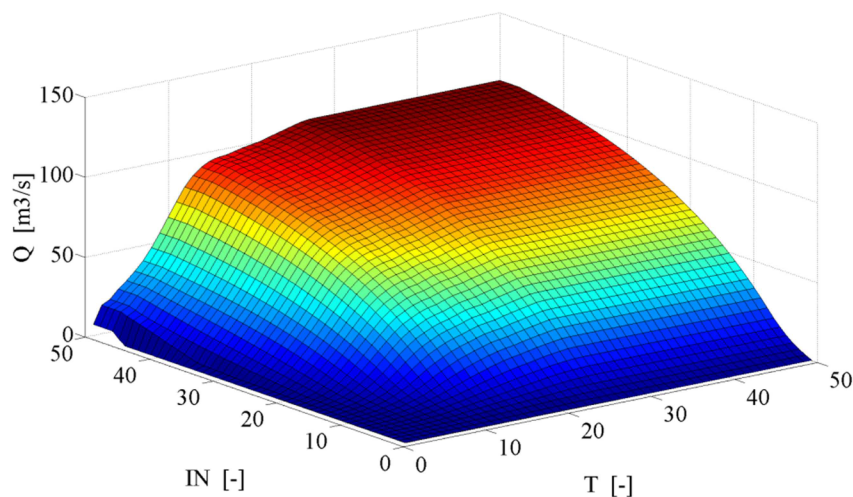
**Obr. 7.40** Ukázka prostoru datové matice – povodí 11; situace před vyhlazením



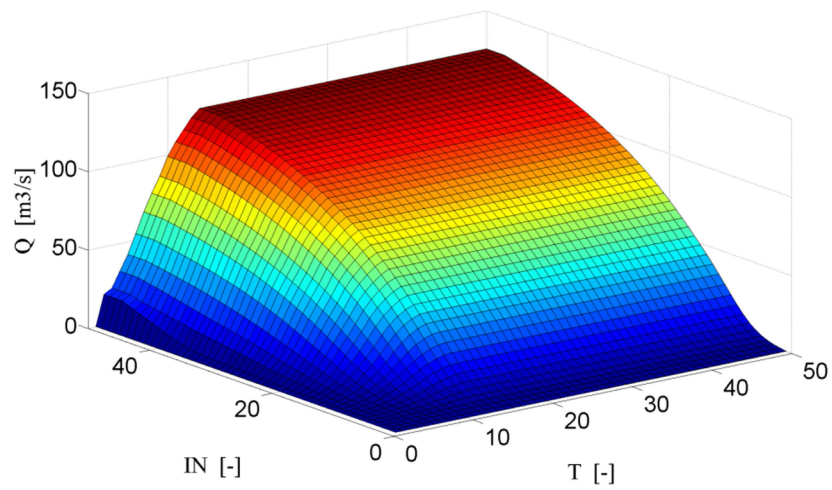
**Obr. 7.41** Ukázka prostoru datové matice – povodí 11; situace po vyhlazení

Na uvedených obrázcích představují hodnoty na osách  $T$  a  $IN$  pořadí v mřížce o zvolené hustotě  $50 \times 50$  hodnot. Na svislé hodnotě je pak výstupní hodnota průtoku  $Q$ . Je nutno říct, že hodnoty, které se vyskytují nad maximální  $N$ -letostí 100 let, jsou uměle korigovány tak, aby docházelo k dostatečnému růstu. Tuto oblast model primárně neřeší. Předpokládá se, že pro porovnávání výstupních hodnot s limitními  $N$ -letostmi pro vybraná povodí je podstatná oblast do průměrné doby opakování 100 let.

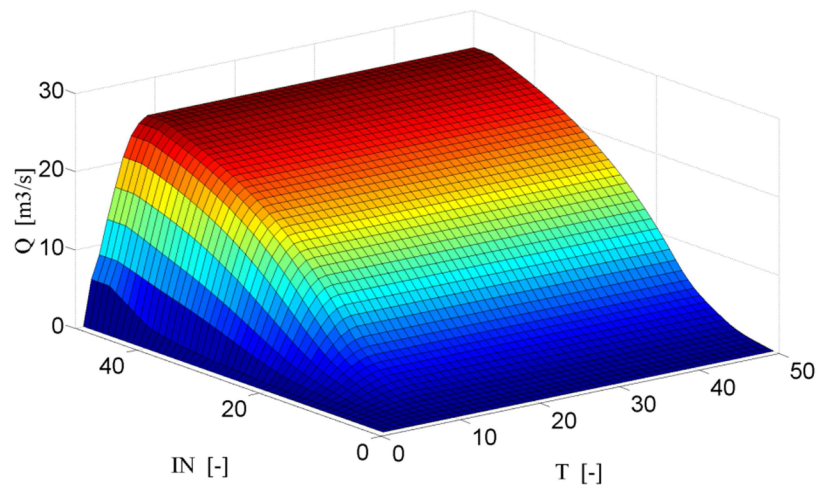
Následují ukázky několika vytvořených datových matic pro různá povodí.



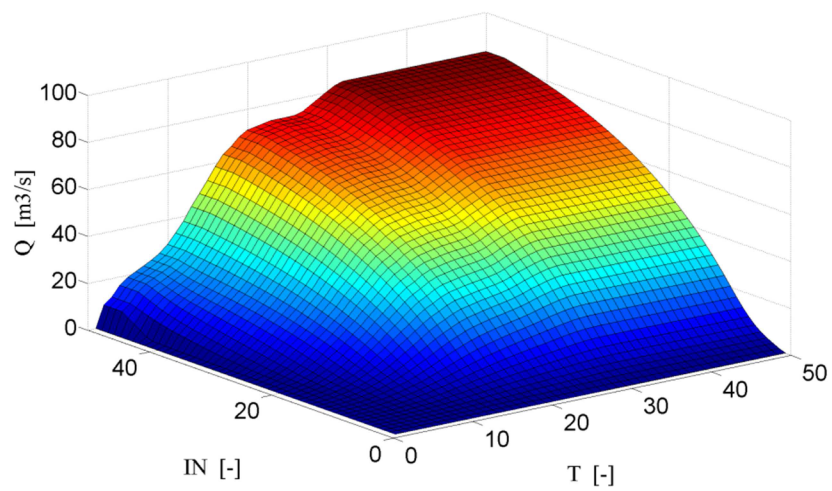
**Obr. 7.42** Datová matice – povodí 8



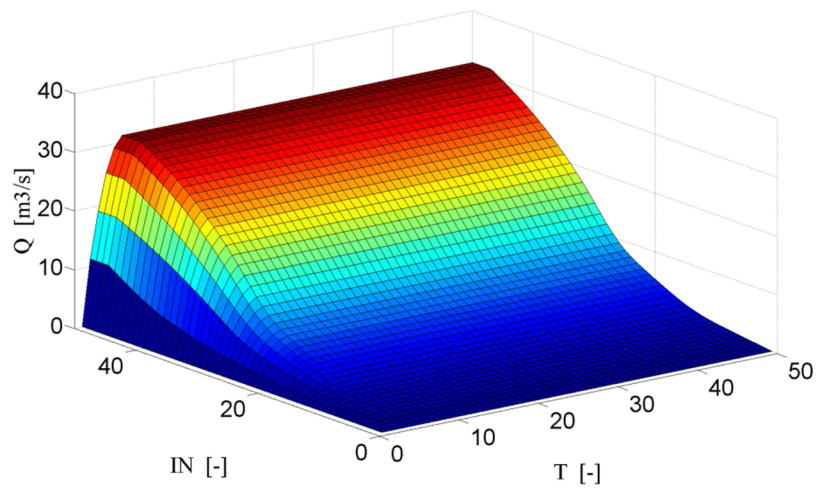
**Obr. 7.43** Datová matice – povodí 54



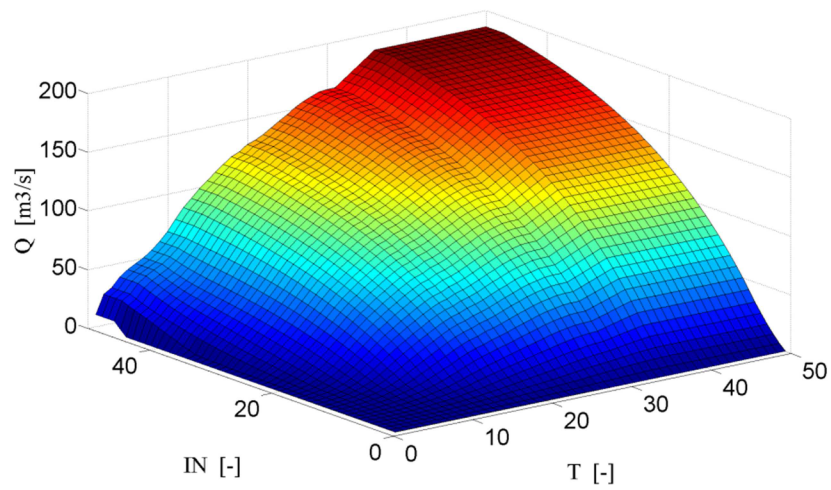
**Obr. 7.44** Datová matice – povodí 73



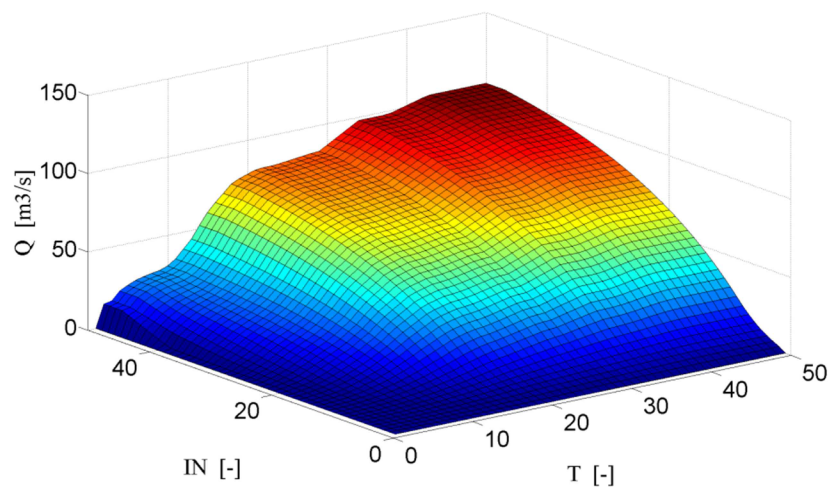
**Obr. 7.45** Datová matice – povodí 92



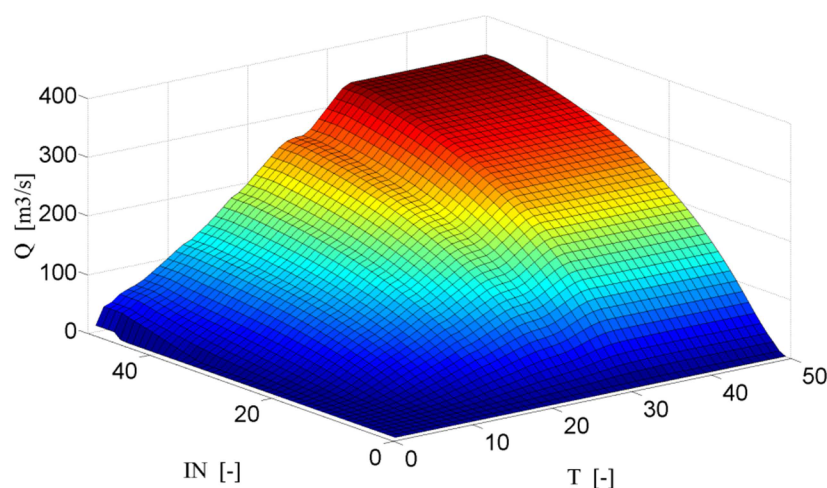
**Obr. 7.46** Datová matice – povodí 95



**Obr. 7.47** Datová matice – povodí 117



**Obr. 7.48** Datová matice – povodí 127



**Obr. 7.49** Datová matice – povodí 179

Uvedené prostorové grafy datových matic představují celou množinu řešení pro různě zvolené dešťové parametry  $T$  a  $IN$ . Jejich tvary určitým způsobem reprezentují vlastnosti povodí a definují přímý vztah mezi zmíněnými dešťovými parametry a modelovou odtokovou reakcí ve formě kulminačního průtoku  $Q$ . Pro každé povodí je vytvořena unikátní a neměnná datová matice, se kterou je pracováno v následné mapové aplikaci.

### 7.5.2 Samotná mapová aplikace

Konečným výstupem výše popsaných prací je vytvořená mapová aplikace. Jedná se o samostatně spustitelnou aplikaci s vlastním uživatelským rozhraním, která pracuje s dříve vytvořenými datovými maticemi a uživatelem zadanými dešťovými parametry. Grafické uživatelské prostředí aplikace bylo vytvořeno v programovém prostředí MATLAB, stejně jako hlavní algoritmy modelu. Aplikace slouží k plošnému testování množiny malých povodí návrhovými dešti o zvolených parametrech. Aplikace je spustitelná i mimo prostředí MATLAB, v takové situaci však vyžaduje předchozí instalaci příslušného Matlab Runtime Modulu, který je dostupný na internetu (THE MATHWORKS, 2015). Aplikaci je možno instalovat na platformě Windows.

Po spuštění programu uživatel volí jednu ze čtyř výpočetních variant. Varianty jsou určeny kombinacemi vstupních dešťových parametrů. Je pracováno s následujícími veličinami: průměrná doba opakování  $N$  [roky], intenzita deště  $IN$  [mm.hod<sup>-1</sup>], doba trvání deště  $T$  [min], resp.  $T_{krit}$  [min]. Jednotlivé varianty (I-III) jsou určeny vždy kombinacemi uvedených veličin, přičemž uživatel může volit 2 z nich a třetí je určena logickou závislostí. U varianty IV uživatel volí pouze  $N$ -letost návrhového deště.

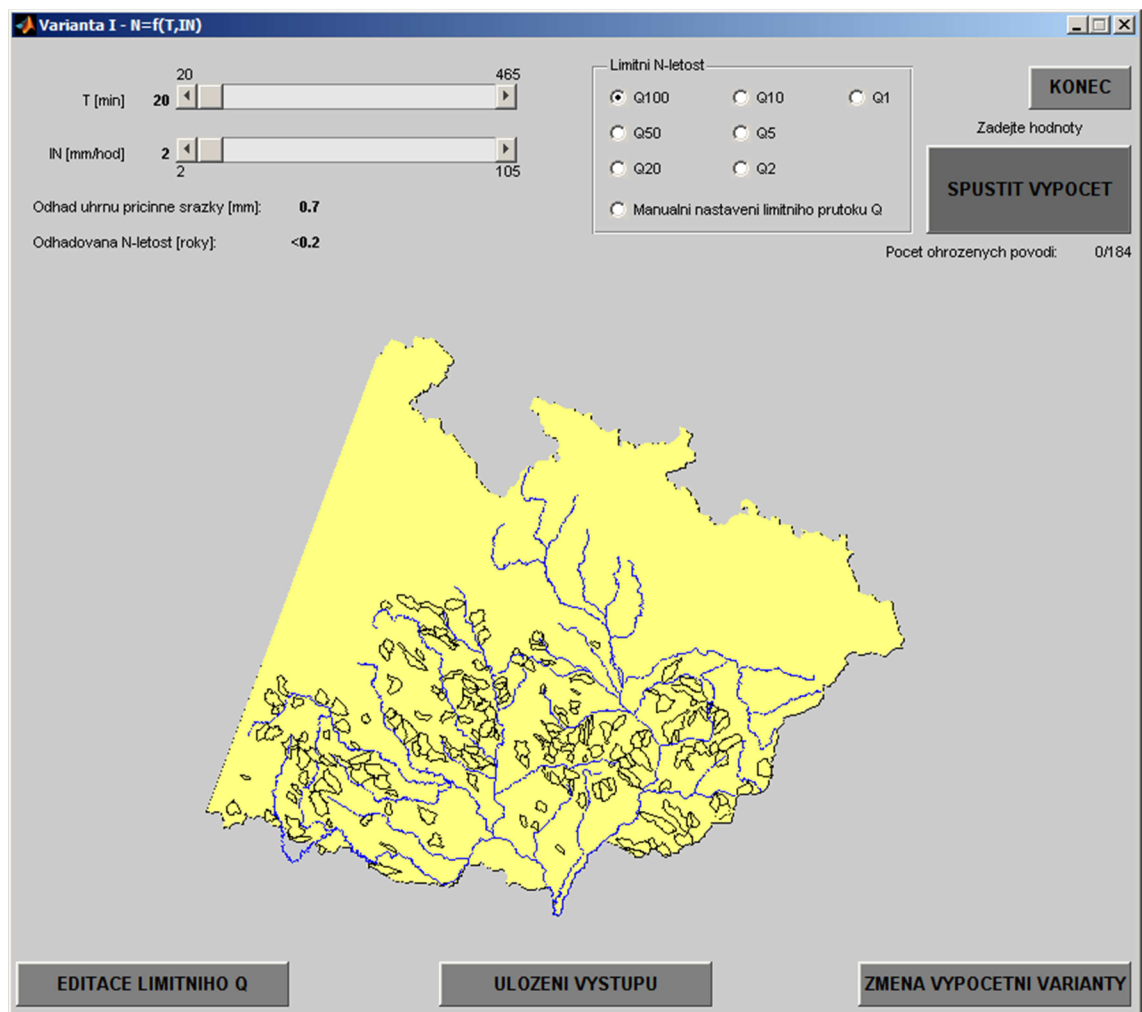
- *Varianta I* –  $N = f(T, IN)$ : uživatel volí dobu trvání  $T$  a intenzitu deště  $IN$ ; průměrná doba opakování  $N$  zvolené kombinace je doložena závislostí,
- *Varianta II* –  $T = f(IN, N)$ : uživatel volí intenzitu deště  $IN$  a průměrnou dobu opakování  $N$  zátěžové epizody; doba trvání deště  $T$  je doložena závislostí,
- *Varianta III* –  $IN = f(T, N)$ : uživatel volí dobu trvání  $T$  a průměrnou dobu opakování  $N$  zátěžové epizody; intenzita deště  $IN$  je doložena závislostí,

- *Varianta IV* –  $IN = f(T_{krit}, N)$ : obdoba předchozí varianty s tím, že uživatel volí pouze průměrnou dobu opakování  $N$  zátěžové epizody, doba trvání srážky je určena hodnotou  $T_{krit}$  odvozenou při kalibraci modelu (nejméně příznivá hodnota), intenzita  $IN$  je počtena dle závislosti.



Obr. 7.50 Úvodní okno s volbou výpočetní varianty

Výběrem zvolené varianty dojde k otevření výpočtového okna. Okno je rozděleno do dvou částí; v horní části uživatel zadává vstupní parametry a volí nastavení výpočtu. Spodní část je pak tvořena mapou s vyznačenými povodími, která jsou testována.



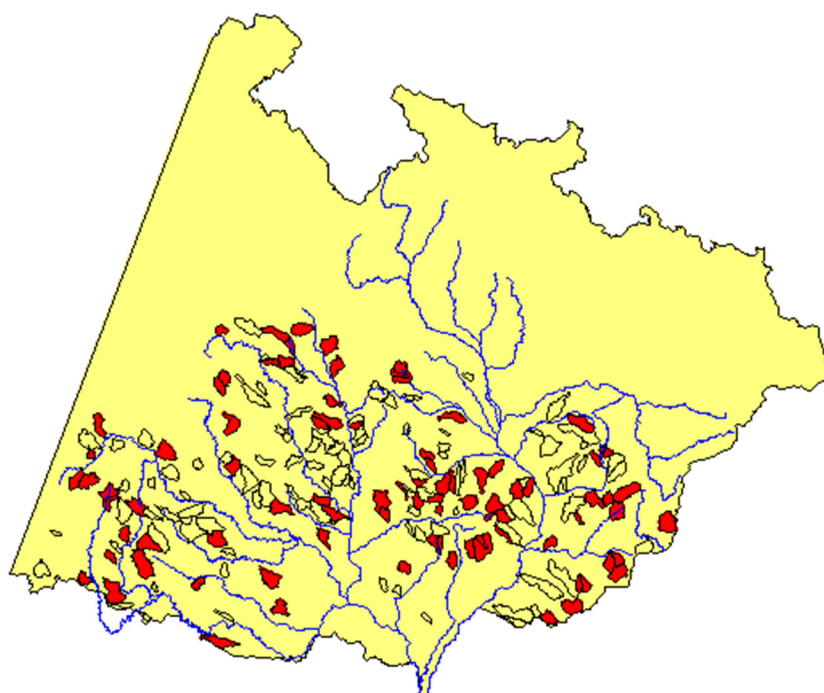
Obr. 7.51 Výpočtové okno Varianty I

Při zvolené první variantě výpočtu uživatel pomocí ovládacích prvků volí parametry zatěžovací srážky v rozmezí 20 až 465 min v případě doby trvání deště  $T$  a v případě intenzity  $IN$  v rozmezí 2 až 105 mm.hod<sup>-1</sup>. Algoritmus aplikace dopočte příslušný úhrn srážky a odhadne průměrnou dobu opakování definované srážky. Pro tento odhad je použita Truplova závislost pro průměr celého povodí Moravy a Odry tak, jak jsou uvedeny v tabulkách (Trupl, 1958). Ve všech výpočetních variantách uživatel volí limitní  $N$ -letost pro testovaná povodí. Tato hodnota může být určena plošně pro celou množinu 184 povodí nebo individuálně pomocí manuálního nastavení prostřednictvím tlačítka *EDITACE LIMITNÍHO Q*.

Editace limitních průtoků Q												
	Id	plocha	qa	Q100	Q50	Q20	Q10	Q5	Q2	Q1	Qlim	
1	1	6.2532	1.7591	9	7	5	3.8000	2.7000	1.6000	0.9000	10	5
2	2	15.7620	5.3927	20	16	11.5000	8.8000	6.4000	3.9000	2.4000		5
3	3	24.6796	5.6322	23.8000	19	13.7000	10.2000	7.4000	4.3000	2.6000		5
4	4	36.5306	6.6246	28	20.8000	13.7000	9.8000	6.9000	4.5000	3.4000		5
5	5	8.0051	3.0605	17.2000	12.8000	8.2000	5.6000	3.6000	1.8000	0.9000		5
6	6	12.5895	6.6405	23.5000	17.9000	11.9000	8.4000	5.6000	3	1.6000		5
7	7	3.1151	2.0545	9.5000	7.2000	4.7000	3.3000	2.2000	1.1000	0.6000		5
8	8	18.9441	1.3197	15	9.2000	4.5000	2.6000	1.5000	0.8000	0.6000		5
9	9	6.4240	0.5760	11.5000	10.5000	8	6	4	2.5000	1.5000		5
10	10	10.7531	3.0689	16	12.5000	8.5000	6.2000	4.3000	2.4000	1.3000		5
11	11	27.8138	2.8044	24	18.5000	12.5000	9	6.5000	3.5000	2		5
12	12	7.7677	2.4847	14	10.9000	7.5000	5.5000	3.8000	2.1000	1.2000		5
13	13	19.3173	2.3813	19	15.5000	11.5000	8.5000	6	3.5000	2		5
14	14	9.2084	2.7692	16.5000	12.4000	8.1000	5.7000	3.7000	1.9000	1		5
15	15	22.6331	2.6952	25	20.5000	14.5000	11	8	4.8000	3		5
16	16	11.5639	2.5943	15.5000	13	9.5000	7	5	3	1.8000		5
17	17	12.7966	2.5788	16.5000	14	9.5000	7.5000	5	2.8000	1.6000		5
18	18	10.2018	2.4996	15.5000	11.7000	7.8000	5.4000	3.6000	1.9000	1		5
19	19	5.5127	2.2675	13	9.8000	6.4000	4.4000	2.9000	1.5000	0.8000		5
20	20	21.4303	3.1498	21.5000	17	12	9	6.5000	3.6000	2.1500		5
21	21	8.9952	2.2790	14	11	8	6	4.3000	2.4000	1.4000		5
22	22	8.6324	3.6490	14.8000	11.5000	7.9000	5.7000	3.9000	2.1000	1.2000		5
23	23	16.3051	2.6188	25.5000	19.6000	13.3000	9.6000	6.4000	3.5000	1.9000		5
24	24	28.2737	7.0737	42	33	23.5000	17	12	5.8000	4		5
25	25	39.9046	7.7184	65.5000	52	38	29	21	13	8		5
26	26	26.7124	4.4174	43	32.1000	20.6000	14.4000	9.9000	6.1000	4.5000		5
27	27	5.9544	2.6871	14	11.5000	8	6	4	2.3000	1.3000		5
28	28	23.4588	4.5612	24.5000	19.5000	13.5000	10	7	4	2.4000		5
29	29	19.9584	2.9812	31	24.7000	17.6000	13.1000	9.4000	5.4000	3.3000		5
30	30	4.6960	0.4567	20	15	9.9000	6.8000	4.5000	2.3000	1.2000		5

Obr. 7.52 Editace hodnoty limitního průtoku  $Q$  u jednotlivých povodí

Po zadání vstupních parametrů zatěžového deště a hodnoty limitního průtoku na testovaných povodích lze spustit samotný výpočet. V této fázi (po stisknutí výpočtového tlačítka) algoritmus aplikace pracuje s předem připravenými datovými maticemi, jejichž tvorba byla popsána dříve. Z datové matice každého povodí je vybrána příslušná hodnota modelového kulminačního průtoku  $Q$  a ta je porovnána s limitní hodnotou sledovaného povodí. Je-li hodnota limitního průtoku povodí překročena modelovým kulminačním průtokem, je takové povodí označeno za potenciálně ohrožené a v mapě výpočtového okna je barevně zvýrazněno.



Obr. 7.53 Ukázka ohrožených povodí po výpočtu

Další výpočetní varianty (II, III a IV) obnášejí určitou obměnu v zadávání vstupních dešťových parametrů v horní části uživatelského prostředí. Navíc je zde přidána volba, ve které může uživatel určit, zda bude množinu povodí zatěžovat parametry pro průměrné deště povodí Moravy a Odry (dáno jednou intenzitní závislostí pro každou zvolenou průměrnou dobu opakování), nebo budou dešťové parametry odvozeny vždy pro nejbližší srážkoměrnou stanici pro každé povodí.

**Variantá II -  $T=f(IN,N)$**

N-letost [roky]    1    2    5    10    20    50    100

IN [mm/hod]    5    2    105

Typ srážkových dat:     Prumer pro M+O     Dle nejbližsi stanice

Odhad uhrnu pricinne srážky [mm]:    **24.4**

Odhad doby trvani srážky [min]:    **292.3**

Obr. 7.54 Volba vstupních dešťových parametrů ve výpočetní variantě II

V druhé variantě uživatel volí průměrnou dobu trvání opakování deště  $N$  a intenzitu deště  $IN$ . Doba trvání je pak odvozena z Truplovy závislosti buď pro průměrné charakteristiky celé oblasti, nebo pro deště odpovídající nejbližší srážkoměrné stanici, přičemž zobrazený odhad odpovídá průměrným charakteristikám pro povodí Moravy a Odry. Při volbě typu srážkových dat dle nejbližší stanice je odvozená doba trvání deště různá pro každou srážkoměrnou stanici, a proto zde není zobrazena.



**Variant III -  $IN=f(T,N)$**

T [min] 20  465

N-letost [roky]  1  2  5  10  20  50  100

Typ srážkových dat:  Prumer pro M+O  Dle nejbližsi stanice

Odhad uhrnu pricinne srážky [mm]: **12.1**

Odhad intenzity srážky [mm/hod]: **36.3**

Obr. 7.55 Volba vstupních dešťových parametrů ve výpočetní variantě III

Třetí varianta představuje obdobu druhé varianty s tím, že jsou při zadávání vstupů použity doba trvání deště  $T$  a průměrná doba opakování  $N$ . Dopočet odhadu intenzity probíhá stejným způsobem jako v druhé variantě.

**Variant IV -  $IN=f(T_{krit},N)$**

N-letost [roky] 1  200

Typ srážkových dat:  Prumer pro M+O  Dle nejbližsi stanice

Odhad uhrnu pricinne srážky [mm]: **Dle povodi**

Odhad intenzity srážky [mm/hod]: **Dle povodi**

Obr. 7.56 Volba vstupních dešťových parametrů ve výpočetní variantě IV

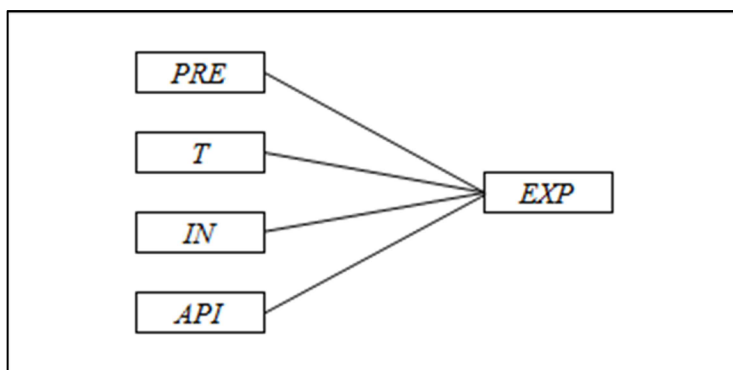
Ve čtvrté variantě uživatel volí pouze  $N$ -letost zátěžového deště, a to na logaritmické stupnici. Za dobu trvání deště je u všech povodí dosazena hodnota  $T_{krit}$ , která představuje nejméně příznivou variantu a byla odvozena při sestavování modelu pomocí postupné optimalizace. Intenzita  $IN$  je odvozena na základě zadané průměrné doby opakování  $N$  zatěžovacího deště a doby  $T_{krit}$  příslušného deště.

Kromě vizuálního náhledu na výsledek výpočtu pomocí grafického zvýraznění potenciálně ohrožených povodí (obr. 7.53) lze výsledek plošného testu zatěžovacím deštěm vypsát do externího souboru ve formátu *\*.xls*. Do souboru jsou vypsány parametry deště  $T$  a  $IN$  a hodnoty předpokládané odtokové reakce spolu se zadanou limitní hodnotou průtoku  $Q_{lim}$ . V každém kroku výpočtu lze výpisu do souboru dosáhnout pomocí tlačítka *ULOZENI VYSTUPU* v základním okně aplikace.

## 7.6 Užití výstupů v poloprovozu operativního modelu ČHMÚ

Sestavený model, který byl popsán v předchozích kapitolách a který slouží jako hlavní nástroj pro tvorbu datových matic a konečné mapové aplikace, byl v upravené podobě použit pro účely provozu operativního předpovědního fuzzy modelu. Cílem bylo pokusit se využít výstupy z výše popsaného modelu i v jiném typu aplikace než pro tzv. off-line hledání ohrožených povodí. Snahou bylo vytvořit jakýsi podpůrný prostředek pro operativní hledání ohrožených lokalit při kontinuálním zpracovávání dat

z radarových odrazů, a to ve formě jednoho ze vstupů do vytvářeného modelu. Tento vstup je označen *PRE* a má představovat určitou predispozici pozorovaného povodí ke vzniku povodňového ohrožení. Model pro operativní předpověď ohrožení povodí přívalovými povodněmi je v současné době provozován v poloprovozním režimu brněnské pobočky ČHMÚ. Jedná se o fuzzy model, který pracuje s aktuálními hodnotami z radarových odrazů a v časovém kroku 5 min, resp. 10 min je vyhodnocuje. Model pracuje se čtyřmi vstupními veličinami a jednou výstupní veličinou, která udává míru aktuálního potenciálního ohrožení povodněmi z přívalových dešťů.



Obr. 7.57 Základní schéma modelu pro operativní předpověď

Vstupní veličiny, tak jak jsou uvedeny na schématu (obr. 7.57), jsou následující:

- *PRE* – hodnota potenciálního ohrožení povodí; je určena předchozím zpracováním jednotlivých povodí pomocí modelu popsaného v této práci,
- *T* – doba trvání deště, překročí-li hodnota intenzity předepsanou mez,
- *IN* – intenzita deště nad stanovenou limitní hodnotou,
- *API* – hodnota indexu, který charakterizuje nasycení povodí předchozími srážkami; je vypočtena na základě předchozích měřených srážek na povodích.

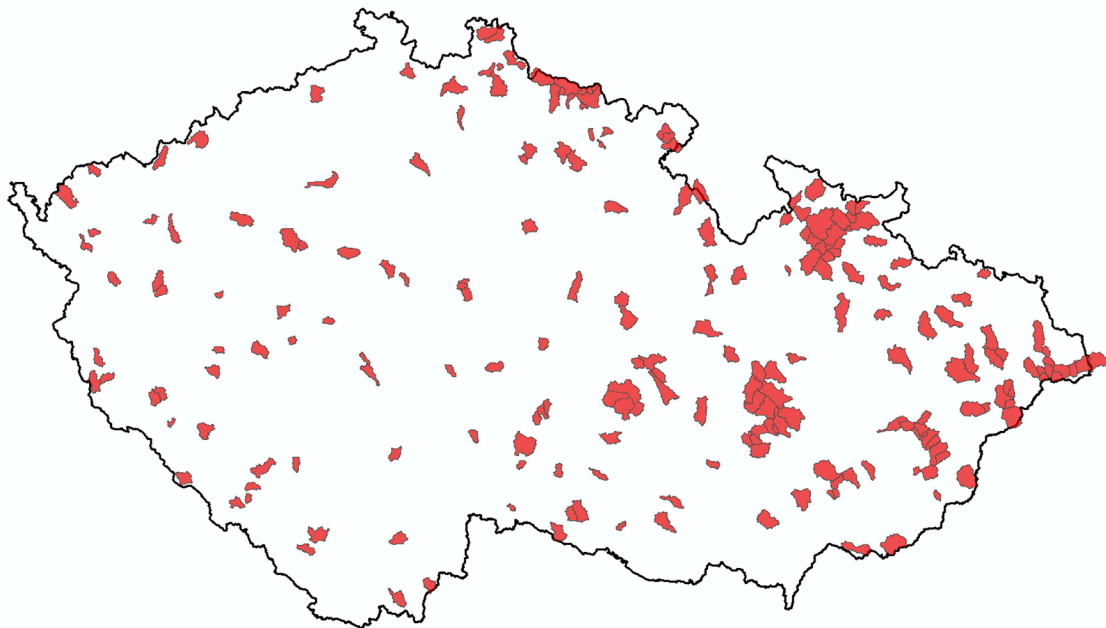
Všechny veličiny (vstupní i výstupní) pracují s normalizovanými hodnotami na intervalu [0 1]. Je zde kladen důraz na jednoduchost modelu, aby časová náročnost samotného výpočtu byla co nejjednodušší, protože výpočty probíhají ve stejném časovém kroku, jako jsou k dispozici údaje z radarových odrazů. V každém běhu je pracováno s předpovědí srážek několika předpovědních produktů (typ produktu určuje, zda je pracováno v 5minutovém intervalu, nebo 10minutovém). Jsou zpracovávány údaje o deštích za poslední 3 hodiny (měření) a předpověď na 2 hodiny dopředu. Toto pětihodinové období je vyhodnoceno a na základě analýzy dat jsou určeny hodnoty dešťových vstupních veličin *T* a *IN*. Hodnota vstupu *API* je určena na základě měření srážek z předchozích 14 dní a klouzávě se mění dle nově dostupných dat. Výstupní veličina *EXP* pak na intervalu [0 1] udává, jak jsou jednotlivá sledovaná povodí ohrožena v daném okamžiku předpovězenými srážkami.

Hodnota vstupu *PRE* se mezi jednotlivými běhy modelu nemění a je upravována v delších časových krocích na základě zpětné analýzy úspěšnosti modelu. Její počáteční hodnota je stanovena na základě výstupu z modelu, který je popisován v předložené disertační práci. Hodnota vstupu *PRE* je stanovena následujícím způsobem: každé z povodí je zatíženo stoletou srážkou. Hodnota modelového kulminačního průtoku  $Q_{model} [m^3 \cdot s^{-1}]$  je podělena plochou  $P [km^2]$  daného povodí.

$$q_{100} = Q_{model}/P \quad (19)$$

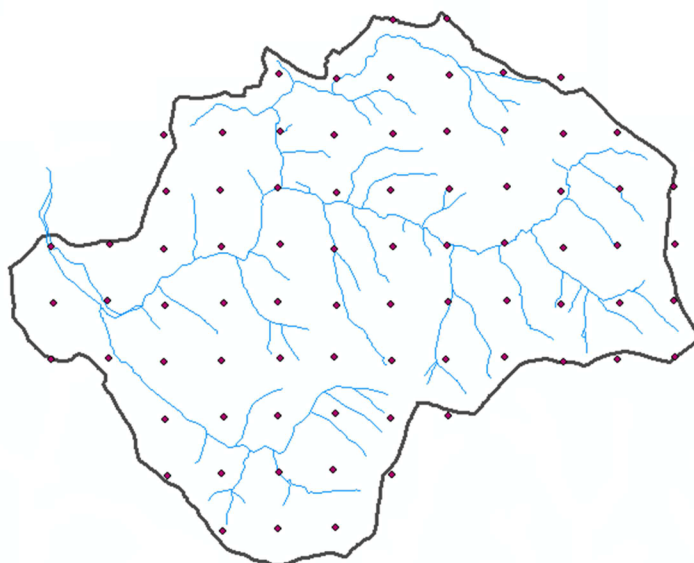
Hodnoty  $q_{100}$  jednotlivých povodí jsou pomocí zvolené transformační funkce převedeny na hodnoty 6 stupňů ohrožení  $SO$ , které jsou nakonec normalizovány na interval  $[0\ 1]$ . Bližší popis není náplní předložené práce a bude později publikován na jiných místech.

Fuzzy model pracuje s množinou 217 povodí (obr. 7.58), přičemž je v současné době pracováno na významném rozšíření (cca 3000 povodí). Výběr povodí byl limitován několika faktory; zejména se jedná o velikost povodí, protože v souvislosti s přívalovými srážkami má význam zabývat se hlavně malými povodími. Dále byla snaha pokrýt zvolenou množinou pokud možno celou Českou republiku. Omezujícím faktorem pro výběr povodí byla i dostupnost potřebných dat, zejména  $N$ -letých průtoků.



**Obr. 7.58** Mapa sledovaných povodí operativním fuzzy modelem

V každém výpočetním cyklu je zpracován rozsáhlý balík dat, který obsahuje mřížku s hodnotami radarových odrazů o velikosti  $728 \times 528$  bodů v daných časových intervalech pro období 5 hodin. Pro každé sledované povodí je z bodů, které leží uvnitř a jeho těsném okolí, určena průměrná hodnota veličin  $T$  a  $IN$  (obr. 7.59).



**Obr. 7.59** Průnik bodů s radarovými daty a sledovaného povodí

Zjednodušený popis sestavení a kalibrace operativního fuzzy modelu je následující: Byla sestavena subjektivní počáteční umělá matice, která definuje rozhodovací mechanismus samotného modelu (matice pravidel). V počátku byla hodnota výstupu *EXP* určena prostým součtem vstupních veličin. Později byl součet těchto hodnot vstupů vážen typem vstupní veličiny na základě analýzy epizod přívalových dešťů v předchozích letech. Poté proběhla zevrubná analýza konkrétních skutečných epizod a byla vytvořena vzorová matice vstupně-výstupních hodnot modelu, která byla použita k modifikaci počáteční umělé matice. Výsledná modifikovaná matice pak tvoří konečnou bázi pravidel fuzzy modelu. Bližší postup kalibrace modelu je nad rámec předložené disertační práce a bude publikován později.

## 8 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ

Základním způsobem pro hodnocení úspěšnosti sestavení modelu a jeho kalibrace bylo vykreslení tzv. kontrolního kvadrantu – tedy zobrazení vztahu výstupního modelového kulminačního průtoku a odpovídajícího kulminačního průtoku ze vzorových dat. V předchozí kapitole je uvedena skupina grafů, která ukazuje tento typ výsledků ve dvou variantách (validace modelu a příprava modelu pro koncovou mapovou aplikaci). V prvním případě se jedná o vykreslení kontrolního kvadrantu u validace modelu po rozdělení množiny povodí na kalibrační a validační množinu. Cílem je ověřit, zda a jak model reaguje na data, která nejsou součástí vzorových dat, na kterých se model učí v průběhu kalibrace. Náhodné rozdělení celé množiny povodí do dvou skupin toto umožňuje, včetně toho, že dochází k situaci, kdy jsou při validaci překročeny některé intervaly univers vstupních veličin a model je nucen provést extrapolaci mimo kalibrační prostor. Část výsledků validace ve formě kontrolních kvadrantů je uvedena na obr. 7.13, 7.14 a 7.15.

**Tab. 8.1** Tabulka korelací při validaci modelu

N-letost [roky]	1	2	5	10	20	50	100
$r$ [-]	0.83	0.82	0.78	0.78	0.79	0.81	0.81

Tab. 8.1 uvádí soupis dosažených koeficientů korelace  $r$  při vykreslení kontrolních kvadrantů všech použitých N-letostech vzorových epizod. Lze říci, že dosažené hodnoty jsou vysoké. Druhou podstatnou věcí při analýze charakteru těchto výsledků je fakt, že body v uvedených grafech leží celkem rovnoměrně okolo naznačené úhlopříčky, která svírá s osami úhel  $45^\circ$ . Dalším pozitivem je, že žádný z bodů (žádná výstupní hodnota z modelu při zadání určité kombinace vstupů) při validaci modelu neleží výrazně mimo oblast předpokládaných výsledků, a to ani v situaci, kdy se mezi vstupními veličinami objeví hodnota, která leží mimo interval kalibrace dané veličiny. To značí, že model má schopnost generalizace a dokáže v dané situaci reagovat konzistentně a relativně spolehlivě, což u některých metod umělé inteligence (např. neuronové sítě) není samozřejmostí.

**Tab. 8.2** Tabulka korelací po kalibraci modelu dle celé množiny 184 povodí

N-letost [roky]	1	2	5	10	20	50	100
$r$ [-]	0.85	0.85	0.87	0.90	0.90	0.90	0.90

Dosažené hodnoty korelace modelových a vzorových průtoků po kalibraci modelu na celé 184členné množině jsou sepsány v tab. 8.2. Je logické, že tyto hodnoty jsou vyšší než při validaci modelu, protože model se v průběhu sestavování a kalibrace učí na všech datech, která jsou následně použita pro sestavení koncové aplikace. Tabulka koresponduje s grafy na obr. 7.19, 7.20 a 7.21. Tyto výsledky mají ukazovat na kvalitu výsledků, které vykazuje model použitý pro koncovou mapovou aplikaci.

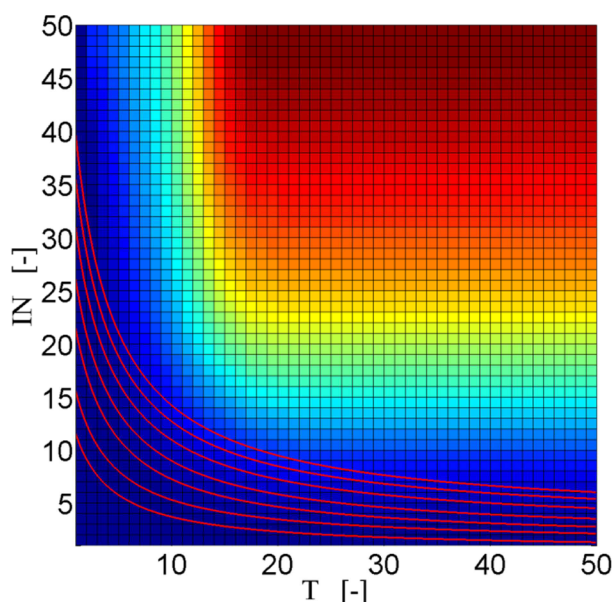
Uvedený typ výstupů z modelu – tedy kulminační průtoky o určité N-letosti – tvoří základní kostru pro odhad odtokové reakce malého povodí při zadání libovolné

kombinace vstupních dešťových parametrů. Výše uvedené výsledky ukazují, že model je schopen dostatečně odhadnout hodnoty kulminačních průtoků o konkrétně zadaných N-letostech. Zároveň je však potřeba, aby celý algoritmus byl schopen dostatečně pracovat v oblastech mezi uvedenými N-letostmi (např. určit hodnoty průtoků mezi 20letou a 50letou vodou), případně pod hodnotou nejnížší uvažované N-letosti pro kalibraci ( $Q_1$ ) a nad hodnotou nejvyšší uvažované N-letosti ( $Q_{100}$ ). Výstupní hodnoty průtoků v těchto oblastech jsou dány určitými interpolačními postupy. Předpokládá se, že základní oblastí použití modelu a následné aplikace bude v oblastech mezi  $Q_1$  a  $Q_{100}$ , protože zde velmi pravděpodobně dochází k překročení hodnot limitních průtoků jednotlivých povodí a následnému ohrožení povodněmi z přívalových dešťů. V této oblasti model vždy interpoluje mezi hodnotami, které jsou dány řídicími plochami jednotlivých inferenčních systémů na základě odhadované N-letosti příčinného deště. Základní mřížku hodnot N-letých průtoků, mezi nimiž je interpolováno, tvoří data z epizod o průměrné době opakování 1, 2, 5, 10, 20, 50 a 100 let. Odvozování hodnot mimo tyto N-letosti jsou dány řídicími plochami pro N-letosti 1 rok (v případě nejnížších průtoků) a 100 let (v případě nejvyšších průtoků), a to s určitými omezeními, které byly popsány dříve.

Pro ověření určité konzistentnosti reakce modelu, a to také v souvislosti s interpolacemi mimo základní validací ověřenou mřížku, slouží tzv. citlivostní analýza. Tato analýza zkoumá, jakým způsobem model reaguje na měnící se hodnoty jednotlivých vstupních veličin. S určitým zjednodušením lze říci, že se jedná i o částečnou validaci funkčnosti modelu, protože je sledována jeho reakce na data, která nejsou součástí kalibrace. Na obr. 7.26, resp. obr. 7.27 je možné vidět, jak model reaguje na rostoucí parametry vstupů charakterizujících vlastnosti povodí, resp. dešťové parametry. Primárním požadavkem pro úspěšný výsledek této analýzy je, aby hodnota výsledného modelového průtoků vždy rostla s rostoucí hodnotou sledovaného vstupu. To s určitými výhradami platí. Výsledek citlivostní analýzy vlivu geografických vstupů ukazuje několik věcí; lineární průběh první skupiny bodů, která reprezentuje vliv plochy povodí na výslednou hodnotu průtoků  $Q$ , je logický a je dán základní strukturou modelu. U ostatních vstupů z této kategorie ( $SK$ ,  $q_a$ ,  $CN$ ) je průběh dán tvarem řídicích ploch jednotlivých inferenčních systémů. Výsledek je uspokojivý – směrem doprava výstupní hodnoty rostou, nicméně dalo by se předpokládat, že vhodnější by byl hladší průběh. Algoritmus, který byl použit při sestavování a kalibraci modelu, pracuje s určitými omezeními při sestavování matic báze pravidel tak, aby byly výrazně vyčnívající odlehlé oblasti na řídicích plochách (které ovlivňují průběh a výsledek citlivostní analýzy a celkovou reakci modelu) pokud možno eliminovány. Nabízí se možnost provést po kalibraci modelu určité vyhlazení samotných řídicích ploch. Podobné mírné upravování dílčích částí modelu při jeho sestavování však vede k částečné odchylce od čistoty původního způsobu řešení, která se navíc nutně musí promítnout v každém dalším kroku výpočtu. Proto bylo rozhodnuto provést vyhlazení až u koncové části celého výpočetního cyklu, a to při tvorbě finálních datových matic pro každé testované povodí v mapové aplikaci (obr. 7.40 a 7.41) dle postupu uvedeného v příslušné kapitole. Danou věc ovlivňuje také fakt, že celý proces využívá náhodných čísel a mnohdy není nalezen právě ideální tvar dílčích částí modelu. Z výsledku této části citlivostní analýzy lze také vyčíst celkovou míru vlivu jednotlivých vstupních veličin na výslednou hodnotu modelového průtoků  $Q$ . Velikost lze odvodit z rozsahu hodnot na svislé ose grafu, která znázorňuje velikost výstupní hodnoty.

Obdobným způsobem lze nahlížet na výsledek druhé části citlivostní analýzy, která zkoumá míru vlivu dešťových parametrů. Zde však – při pozorném prohlédnutí výsledku – již dochází k situaci, kdy směrem doprava některé z křivek (každá představuje jedno z povodí) mírně klesají. To není příliš logické, protože citlivostní analýza je konstruována tak, že jednotlivá povodí jsou zatěžována vždy rostoucími dešťovými vstupy. Tento jev je přisuzován dvěma vlivům: jednak se jedná o určitou nehladkost příslušných řídicích ploch (tedy stejná příčina jako byla popsána v předchozím odstavci), jednak dochází k situaci, kdy je překročena nejvyšší N-letost (100 let) příčinného deště. V této oblasti se přechází od jednoho způsobu odvozování výsledné hodnoty průtoku (interpolace mezi vrstvami pro 50letý a 100letý dešť) ke druhému (odvozování na základě řídicí plochy pro 100letou událost upravenou vybranými mechanismy). Toto nežádoucí chování v přechodové oblasti je však eliminováno následným vyhlazením prostoru datových matic při přípravě dat pro finální mapovou aplikaci.

Vyhlazené datové matice, které byly vytvořeny pro každé povodí, představují jakýsi mezičlánek mezi zkonstruovaným modelem a koncovou mapovou aplikací. Primárním účelem jejich vytvoření je rychlost zpracování vstupních hodnot v mapové aplikaci. Datová matice slouží jako databáze vstupně-výstupních hodnot. Výsledná rychlost odezvy aplikace při práci je výrazně vyšší, než kdyby při každém zadání hodnot měl probíhat celý sekvenční výpočet založený na fuzzy modelu a teorii možnosti. Sekundárně je také možné pomocí grafických zobrazení datových matic získat zjednodušenou vizuální představu o základních odtokových poměrech povodí (obr. 7.41 až 7.49). Je však nutné zopakovat, že datové matice zobrazují z větší části oblast, kterou se model a následná aplikace primárně nezabývají.



**Obr. 8.1** Proložení datové matice a Truplových křivek (povodí 5)

Na obr. 8.1 je převedená datová matice pro povodí 5 do dvojrozměrného tvaru. Osy znázorňují dobu trvání  $T$  a intenzitu deště  $IN$  v normalizovaných hodnotách. Naznačené křivky reprezentují Truplovy intenzitní křivky pro nejbližší srážkoměrnou stanici (Luká u Litovle) v  $N$ -letostech postupně 1 až 100 let. Barevná škála polí v mřížce představuje

odtokovou reakci povodí od nejnižších hodnot (tmavě modrá) po nejvyšší hodnoty (tmavě červená). Z hlediska následné aplikace a testování množiny povodí je nejvýznamnější oblast v blízkosti naznačených intenzitních křivek, protože právě zde většinou dochází k překročení limitní hodnoty průtoku u jednotlivých povodí. Rozsáhlá oblast v pravé horní části přísluší (odhadem) 1000leté vodě a výrazně vyšším N-letostem. Tuto oblast však model neřeší a hodnoty kulminačních průtoků  $Q$  jsou zde jen hrubě odhadnuty. Teorie možnosti umožňuje oblasti těchto nereálných kombinací vstupů vytěsnit a vyřešit je a po následné regulaci odhadnout hodnotu výstupu. Dojde-li při zadávání vstupních dešťových parametrů v závěrečné mapové aplikaci k posunu do této oblasti, je na to uživatel upozorněn.

Součástí sestavování a kalibrace modelu je i část, která se zabývá určením kritické doby trvání deště  $T_{krit}$ , tedy takové doby, která způsobí v místě uzávěrového profilu v kombinaci s příslušnou intenzitou právě největší kulminační průtok. Algoritmus tuto dobu dohledává pomocí vnořeného optimalizačního procesu, přičemž počáteční odhad doby trvání byl ztotožněn s odvozenou dobou doběhu dle Čerkašina. Obr. 7.28 znázorňuje vztah původní a nové hodnoty  $T_{krit}$ . Je patrné, že v naprosté většině případů zůstává hodnota stejná nebo velmi podobná původní hodnotě. V několika případech pak dochází k postupné změně. V průběhu prací se ukázalo, že je velmi důležité vhodně omezit interval, na kterém má být dohledána modifikovaná doba  $T_{krit}$ . Je-li tato oblast příliš velká, dochází k tomu, že výsledná doba je dohledána vždy na krajích intervalu, zejména pak na spodním okraji (tedy nízké hodnoty  $T$  v kombinaci s vysokými hodnotami  $IN$ ), a konečné hodnoty jsou takové, že nemohou odpovídat skutečnému stavu. Interval pro hledání  $T_{krit}$  byl nakonec omezen na 0,5násobek  $T$  dle Čerkašina na spodní hranici intervalu a 1,2násobek na horní hranici intervalu. Od celého tohoto mechanismu postupné změny kritické doby trvání deště (a jí odpovídající intenzity) se očekává, že umožní modifikaci části matice vzorových dat tak, aby její tvar více odpovídal skutečnosti. Problémem však je ověření tohoto předpokladu pomocí samotného modelu, protože principiálně musí docházet k tomu, že model nejlépe reaguje na data, na kterých se učí. Tedy učí-li se na postupně měnících se datech, bude nejlépe reagovat na data, která vznikla na konci modifikačního procesu. Nedochozí-li ke změně části datového souboru v průběhu tohoto učení, bude nejlépe reagovat na data, se kterými se učí celou dobu. Lze tedy říci, že zahrnutí postupné modifikace dílčí části matice vzorových dat je diskutabilní. Zároveň však lze říci, že rozdíl výsledků při zařazení této modifikace od situace, kdy modifikační blok v algoritmu zařazen není, je relativně malý a na výslednou funkci modelu a konečné mapové aplikace zásadní vliv nemá.



## 9 ZÁVĚR A PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDECKÉ DISCIPLÍNY

Problematika přívalových dešťů a následných přívalových povodní (tzv. flash floods) je aktuální a je důležité se jí zabývat. Na území České republiky byla v posledních letech z hlediska povodní z přívalových dešťů nejvýznamnější sezóna 2009, kdy došlo ke katastrofálním událostem na Novojičínsku na Jičínce a Luze, nebo o rok později v severních Čechách na Chrastavě. Jednou z charakteristik přívalových dešťů je to, že se v našich zeměpisných šířkách mohou vyskytnout prakticky kdekoli. Jaké následky bude extrémní srážka mít na zasaženou lokalitu, pak závisí na mnoha faktorech, jako jsou vlastnosti říční sítě, typ povrchu (s tím související využití půdy), sklonitostní poměry, apod. K dané problematice lze v zásadě přistupovat dvěma způsoby. Na jedné straně je to operativní předpovídání aktuální míry ohrožení. V této situaci je pro úspěch zásadní kvalita meteorologické předpovědi příčinného deště. Předpovědní modely založené na operativním vyhodnocování předpokládaných úhrnů budoucích přívalových dešťů a aktuálního nasycení půdy se dnes běžně používají a stále vylepšují. Druhý pohled na danou problematiku představuje předložená práce, která se zabývá odlišným přístupem, kdy jsou hledány a následně vyhodnocovány vazby mezi dlouhodobými srážkovými údaji a N-letými vodami. Principiálně jde o nalezení kauzálního vztahu mezi příčinným přívalovým deštěm o určité průměrné době opakování a kulminačním průtokem o téže N-letosti na sledovaných povodích. V práci jsou zpracovávány dlouhodobé datové podklady. Pro určení ohrožení malého povodí jsou zde dávány do vztahu modelový kulminační průtok a hodnota mezního průtoku pro posuzovanou lokalitu. Jiné aspekty jako riziko sesuvů půd či negativní erozní účinky přívalového deště zde nejsou brány v úvahu.

Pro sestavení modelu, který tvoří jádro celé práce, byly použity vybrané metody umělé inteligence, a to fuzzy logika a teorie možnosti. Testováno bylo i užití neuronových sítí. Tyto metody umějí dobře nakládat s veličinami značně zatíženými nejistotami. V případě modelování, které se soustřeďuje na oblast odtokové reakce malého povodí po dopadu přívalového deště, se jedná zejména o veličiny, které popisují příčinný dešť a výslednou odtokovou reakci ve formě kulminačního průtoku. Cílem práce bylo poukázat na odlišný přístup k problematice vyhledávání malých povodí ohrožených povodněmi z přívalových dešťů (tedy odlišný přístup od operativní předpovědi), a to za užití uvedených metod. Dosažené výsledky naznačují, že sestavený model je schopen adekvátně, logicky a konzistentně reagovat na vstupní data. Ověření funkčnosti modelu proběhlo na základě rozdělení množiny zpracovávaných povodí na kalibrační a validační množinu. Výsledky validace ukazují, že model je schopen dostatečně reagovat i na data, která nejsou přímo součástí sestavování a kalibrace modelu. Byla testována i situace, při které bylo sledováno, jak model reaguje na data, která jsou mimo prostor, na kterém proběhla jeho kalibrace. Obecně známou slabinou některých metod umělé inteligence je totiž právě tato situace – modely jsou schopné zpracovat pouze vstupy, jejichž hodnoty se pohybují v oblasti, na které se tzv. učí. Jakmile se však některá vstupní hodnota dostane mimo kalibrační oblast, hodnoty výstupů mohou nabývat zjevně nelogických hodnot. Výsledek validace však ukazuje, že sestavený model je schopen extrapolace a na hodnoty mimo intervaly kalibrace dokáže reagovat

logicky. Celková konzistentnost v chování modelu byla ukázána v citlivostní analýze. Tato pozitiva jsou přičítána jednak rozsahu matice vzorových dat, jednak robustnosti zvoleného typu řešení.

Použitý způsob řešení však neumožňuje řešení postupu povodňové vlny či určení vývoje povodňové situace uvnitř povodí. Sestavený model není dynamický. Výsledná hodnota se vždy vztahuje pouze k uzávěrovému profilu sledovaného povodí. K případnému řešení dílčích částí povodí je vždy nutné přistoupit individuálně a nelze uvažovat návaznost jednotlivých subpovodí na sebe. Při výpočtech není možné nějakým způsobem editovat přítok do povodí či plošné rozdělení jednotlivých povodí do dílčích polygonů. Algoritmus modelu pracuje pouze s veličinami celého samostatného povodí bez přítoků a s teoretickou srážkou. Vztah příčinného deště a následné odtokové reakce (na konkrétním povodí) je hledán na základě zpracování dešťového souboru dat a průtokového souboru dat (N-leté vody) při určitých vlastnostech povodí, které jsou zredukovány do uvažovaných vstupů do modelu.

Cílem prací bylo vytvoření objektivního nástroje pro hledání malých povodí nejvíce ohrožených povodněmi z přívalových dešťů. Předpokládané využití tohoto nástroje je zejména na místech, kde se rozhoduje o toku financí v souvislosti s ochranou před povodněmi z přívalových dešťů. Z toho důvodu bylo vytvořeno jednoduché grafické uživatelské rozhraní, které umožňuje plošně zatěžovat uzavřenou množinu povodí přívalovými dešti o zvolených parametrech. Výsledky jednotlivých výpočtů jsou zobrazovány na mapě, kde jsou po zadání zvolených dešťových parametrů zvýrazňována potenciálně ohrožená povodí. Výsledek může být také vypsán do externího souboru. Vytvořená aplikace představuje první kompletní verzi produktu tohoto typu. Jeho možnosti použití jsou omezené a náměty pro další pokračování ve výzkumu jsou vyjmenovány v následující kapitole. Snahou bylo přistoupit k problematice hledání malých povodí ohrožených povodněmi z přívalových dešťů odlišným způsobem od operativního řešení. Jedná se o otevřený problém, který není vyřešen, ale bylo zde nastíněno, jakým způsobem se lze ubírat v budoucnu. Sestavením modelu, ověřením jeho funkčnosti a následným sestavením první verze koncové mapové aplikace byl cíl disertace naplněn. Pomocí zvolených metod, teoretických nástrojů a sestavených algoritmů byly nalezeny vstupně-výstupní vztahy, které tvoří jádro vytvořeného modelu. Ten umožňuje posoudit profily nejen z hlediska maximálního průtoku  $Q_{max}$  a jeho N-letosti, ale také umožňuje vytypovat povodí z hlediska překročených mezních průtoků.

Určitá varianta výstupu byla použita jako vstup do operativního fuzzy modelu, který je nyní v poloprovozu testován na brněnské pobočce ČHMÚ. Fuzzy model zpracovává v 5minutovém, resp. 10minutovém časovém kroku data z radarů a předpovědi na nejbližší časové období. Dalšími vstupy jsou veličiny *API*, která reprezentuje předchozí nasycení půdy u jednotlivých povodí, a *PRE*, jejíž hodnota je určena modelem vyvinutým v rámci předložené disertační práce. Operativní model byl uveden do zkušebního poloprovozu v průběhu léta 2014. Celou první sezónu byly řešeny zejména provozní problémy se spolehlivostí a stabilitou celého systému, který běží v podstatě nepřetržitě. Při vyhodnocování úspěšnosti provozu za část roku 2014 bylo zjištěno, že model vždy reaguje na srážky, potýká se však s velkým množstvím falešných alarmů. Vyhodnocování je však značně zkresleno poměrně zásadními změnami v algoritmu programu v průběhu bouřkové sezóny. Předpokládá se, že kvalitnější vyhodnocení bude k dispozici po letní sezóně 2015.

## 10 NÁMĚTY PRO DALŠÍ POKRAČOVÁNÍ VE VÝZKUMU

V práci představený model vycházející z fuzzy logiky a teorie možnosti představuje první ucelenou verzi nástroje pro hledání malých povodí ohrožených povodněmi z přívalových dešťů výše popsaným způsobem. Jádrem celé aplikace bylo vytvářeno v programovém prostředí MATLAB zejména proto, že poskytuje uživatelsky přátelské prostředí pro uživatele, který není na prvním místě programátorem, ale spíše odborníkem ve specifickém oboru, který hledá vhodné nástroje pro automatizaci určitých výpočetních postupů. Nespornou výhodou Matlabu je i velmi dobře zpracovaný *Fuzzy Logic Toolbox*, který programátorovi dobře usnadňuje konstrukci fuzzy modelu a aplikaci fuzzy logiky do různých oblastí. MATLAB je hojně využíván v soukromém i akademickém sektoru, nicméně je primárně určen pro vědeckotechnické pracovníky. Jeho nevýhodou je zejména nízká rychlost. Proto by bylo vhodnější pro práci na dalších verzích koncové aplikace využít jiné programovací nástroje, zejména pak pro konstrukci finálního grafického uživatelského prostředí. Samotná mapová aplikace by mohla pracovat s datovými maticemi, které jsou vytvořeny v rámci sestavování a kalibrace hlavního modelu a které by sloužily jako databáze vstupně-výstupních hodnot. Koncová aplikace, ke které se dostane cílový uživatel, by však měla v budoucnu být vytvořena v jiném prostředí. A to také z toho důvodu, aby nebylo nutné instalovat podpůrný *Matlab Compiler Runtime* modul, který je nutný pro spuštění finální aplikace, ale jehož instalace je ve skutečnosti náročnější, než instalace samotné mapové aplikace. Navíc by nebylo nutné řešit kompatibilitu dílčích součástí.

Velkou slabinou současné verze grafického uživatelského prostředí je to, že umožňuje testování pouze uzavřené množiny povodí. Nyní lze ve čtyřech výpočetních variantách různými způsoby plošně zatěžovat pevně definovanou množinu 184 povodí. Pro lepší využití modelu v praxi je však nutné umožnit uživateli přidávat libovolné množství povodí a testovat je stejným způsobem jako ostatní povodí. V takovém případě by byla potřeba vytvořit datové matice pro nová povodí pomocí modelu, který by byl kalibrován na dříve sestavené matici vzorových dat. Zásadní by bylo vytvoření jednoduchého uživatelského prostředí pro vkládání vstupních parametrů jednotlivých povodí a zahrnutí nových povodí do jednoduchého mapového podkladu. Současná verze pracuje s \*.shp souborem dříve vytvořeným v prostředí GIS.

Další vývoj vnitřního modelu aplikace rozhodně může pokračovat v oblasti rozšíření současné matice vzorových dat či aktualizace některých ze vstupních dat. Prezentovaná verze modelu byla postavena na datech ze 184 povodí. Podstatné rozšíření datové matice pro učení modelu může otevřít cestu pro vytváření samostatných modelů pro určité typy povodí, čímž by došlo k tzv. *clusterování*. Vytvoření samostatných modelů např. pro horská povodí s velmi výraznou sklonitostí či rozdělení testovací množiny na skupiny dle hydrogeologických rajónů by mohlo přinést zajímavé výsledky. Otázka použitých dat pro kalibraci modelu je složitá. Částečně odlišné výsledky by mohly být dosaženy při jiných způsobech určování hodnot použitých vstupních veličin. Primárním kritériem pro stanovení hodnot jednotlivých veličin byla jednoduchost. Čím jednodušší postup je, tím méně vznikne prostoru pro případné chyby při stanovování hodnot vstupních veličin. Předpokládá se, že v celém procesu je tolik nejistot, že zvýšení

přesnosti v oblasti vstupů by již nepřineslo odpovídající nárůst na výstupu. V průběhu prací bylo testováno, zda například odlišný způsob stanovování sklonitosti povodí bude mít zásadní vliv na přesnost výstupu. Ukázalo se, že nemá. Dalo by se uvažovat o jiném způsobu stanovení počáteční hodnoty doby doběhu u každého povodí, která je v rámci procesu kalibrace ztotožněna s kritickou dobou trvání deště. Nyní je určena postupem dle Čerkašina. Nabízí se varianta, kdy by tato hodnota byla určena pomocí vestavěných nástrojů v prostředí *GIS*. Stejně tak by mohla být aktualizovaná závislost mezi intenzitou deště, dobou trvání a průměrnou dobou opakování pro jednotlivé srážkoměrné stanice. Předpokládá se, že model by reagoval podobně, jen v částečně posunutých hodnotách, protože konzistentnost modelu byla ověřena výše popsanými metodami. Zajímavé výsledky by také mohla přinést analýza chování jednotlivých povodí při použití více variant hodnot průměrného *CN* čísla v jednotlivých povodích napříč lety, kdy dochází k částečným změnám ve způsobu obdělávání půdy. Obecně však platí zásada, že postup stanovení hodnot vstupů musí být stejný při sestavování matice vzorových dat pro kalibraci modelu i při přidávání dalších povodí pro následné plošné testování v koncové mapové aplikaci.

## 11 SEZNAMY

### SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Roční chod četností výskytu povodní z přívalových srážek na Moravě a ve Slezsku ve 20. století (Brázdil, 2007) .....	10
Obr. 1.2 Postup odhadu nebezpečného úhrnu srážek systému (Daňhelka, 2010) .....	12
Obr. 5.1 Trojúhelníková FP s parametry ( $x$ ; 10, 30, 60) .....	20
Obr. 5.2 Lichoběžníková FP s parametry ( $x$ ; 10, 30, 60, 70).....	21
Obr. 5.3 Gaussovská FP s parametry ( $x$ ; 30, 10).....	22
Obr. 5.4 Schéma FIS Mamdaniho typu (Jang, 1997).....	24
Obr. 6.1 Základní struktura modelu v původní variantě; veličiny označené in představují vstupní veličiny, $Q$ představuje výstupní hodnotu kulminačního průtoku.....	27
Obr. 6.2 Základní struktura modelu; veličiny označené in představují vstupní veličiny, veličiny out pomocné dílčí výstupní veličiny, $P$ plochu povodí a $Q$ kulminační průtok..	28
Obr. 6.3 Finální verze základní struktury modelu.....	29
Obr. 6.4 Ukázka změny parametrů funkcí možnosti před (nahore) a po (dole) optimalizaci .....	31
Obr. 6.5 Počáteční tvar (vlevo) a optimalizovaný tvar (vpravo) řídicí plochy .....	32
Obr. 6.6 Schéma postupné optimalizace .....	33
Obr. 6.7 Hledání kritických dvojic $T$ a $IN$ na zvolené oblasti .....	34
Obr. 6.8 Hledání maximálního odtoku na Truplově křivce.....	36
Obr. 6.9 Ukázka výsledků analýzy průběhů kulminačních průtoků pomocí programu DesQ-MAX $Q$ .....	37
Obr. 6.10 Ukázka úpravy výstupní hodnoty $Q$ po celé oblasti Truplovy křivky.....	39
Obr. 7.1 Graf pro určení rychlosti proudění vody v povodí dle Čerkašina (Čerkašin, 1964). Rychlost $v$ je určována ze sklonitosti a zalesněnosti povodí. ....	41
Obr. 7.2 Graf průměrných intenzit pro povodí Moravy a Odry (Trupl, 1958). Křivky jsou uvedeny pro různé periodicity $p'$ .....	42
Obr. 7.3 Extrapolace původních intenzitních křivek do vyšších $N$ -letostí (tečkovaně) a do vyšších dob trvání (čárkovaně) .....	43
Obr. 7.4 Mapa použitých povodí pro sestavení matice vzorových dat.....	44
Obr. 7.5 Vzájemná korelace vybraných veličin vzorové matice s kulminačními průtoky $Q_{max}$ .....	45
Obr. 7.6 Kalibrační množina.....	46

Obr. 7.7	Validační množina .....	47
Obr. 7.8	Výsledek citlivostní analýzy – testování vlivu geografických vstupů .....	48
Obr. 7.9	Výsledek citlivostní analýzy – testování vlivu dešťových parametrů .....	49
Obr. 7.10	Výsledek kalibrace modelu – 123 povodí, $N = 1$ rok.....	51
Obr. 7.11	Výsledek kalibrace modelu – 123 povodí, $N = 10$ let .....	51
Obr. 7.12	Výsledek kalibrace modelu – 123 povodí, $N = 100$ let .....	52
Obr. 7.13	Výsledek validace modelu – 61 povodí, $N = 1$ rok .....	52
Obr. 7.14	Výsledek validace modelu – 61 povodí, $N = 10$ let.....	53
Obr. 7.15	Výsledek validace modelu – 61 povodí, $N = 100$ let.....	53
Obr. 7.16	Výsledek validace modelu – 61 povodí; modelová odtoková reakce jednotlivých povodí při konstantní době opakování 1 rok .....	54
Obr. 7.17	Výsledek validace modelu – 61 povodí; modelová odtoková reakce jednotlivých povodí při konstantní době opakování 10 let.....	54
Obr. 7.18	Výsledek validace modelu – 61 povodí; modelová odtoková reakce jednotlivých povodí při konstantní době opakování 100 let.....	55
Obr. 7.19	Vztah modelového a vzorového průtoku – 184 povodí, $N = 1$ rok.....	56
Obr. 7.20	Vztah modelového a vzorového průtoku – 184 povodí, $N = 10$ let .....	56
Obr. 7.21	Vztah modelového a vzorového průtoku – 184 povodí, $N = 100$ let.....	57
Obr. 7.22	Vztah modelového a vzorového průtoku – 184 povodí, všechny $N$ -letosti.....	57
Obr. 7.23	Modelová odtoková reakce povodí při konstantní době opakování 1 rok – 184 povodí.....	58
Obr. 7.24	Modelová odtoková reakce povodí při konstantní době opakování 10 let – 184 povodí.....	58
Obr. 7.25	Modelová odtoková reakce povodí při konstantní době opakování 100 let – 184 povodí.....	59
Obr. 7.26	Výsledek citlivostní analýzy; testování vlivu geografických vstupů – 184 povodí.....	59
Obr. 7.27	Výsledek citlivostní analýzy; testování vlivu dešťových parametrů – 184 povodí.....	60
Obr. 7.28	Hledání kritické doby trvání deště; stav po optimalizaci – 184 povodí.....	60
Obr. 7.29	Základní struktura modelu s vyznačenými inferenčními systémy .....	61
Obr. 7.30	Řídicí plochy IS-1 a IS-2 .....	62
Obr. 7.31	Řídicí plochy IS-3 a IS-4 pro $N = 1$ rok.....	62
Obr. 7.32	Řídicí plochy IS-3 a IS-4 pro $N = 2$ roky .....	62
Obr. 7.33	Řídicí plochy IS-3 a IS-4 pro $N = 5$ let .....	62
Obr. 7.34	Řídicí plochy IS-3 a IS=4 pro $N = 10$ let.....	62

Obr. 7.35 Řídicí plochy IS-3 a IS-4 pro $N = 20$ let .....	63
Obr. 7.36 Řídicí plochy IS-3 a IS-4 pro $N = 50$ let .....	63
Obr. 7.37 Řídicí plochy IS-3 a IS-4 pro $N = 100$ let .....	63
Obr. 7.38 Obecný vzhled datové matice .....	64
Obr. 7.39 „S křivka“ .....	65
Obr. 7.40 Ukázka prostoru datové matice – povodí 11; situace před vyhlazením.....	65
Obr. 7.41 Ukázka prostoru datové matice – povodí 11; situace po vyhlazení.....	66
Obr. 7.42 Datová matice – povodí 8 .....	66
Obr. 7.43 Datová matice – povodí 54 .....	67
Obr. 7.44 Datová matice – povodí 73 .....	67
Obr. 7.45 Datová matice – povodí 92 .....	67
Obr. 7.46 Datová matice – povodí 95 .....	68
Obr. 7.47 Datová matice – povodí 117 .....	68
Obr. 7.48 Datová matice – povodí 127 .....	68
Obr. 7.49 Datová matice – povodí 179 .....	69
Obr. 7.50 Úvodní okno s volbou výpočetní varianty .....	70
Obr. 7.51 Výpočtové okno Varianty I.....	70
Obr. 7.52 Editace hodnoty limitního průtoku $Q$ u jednotlivých povodí .....	71
Obr. 7.53 Ukázka ohrožených povodí po výpočtu.....	72
Obr. 7.54 Volba vstupních dešťových parametrů ve výpočetní variantě II.....	72
Obr. 7.55 Volba vstupních dešťových parametrů ve výpočetní variantě III .....	73
Obr. 7.56 Volba vstupních dešťových parametrů ve výpočetní variantě IV.....	73
Obr. 7.57 Základní schéma modelu pro operativní předpověď .....	74
Obr. 7.58 Mapa sledovaných povodí operativním fuzzy modelem.....	75
Obr. 7.59 Průnik bodů s radarovými daty a sledovaného povodí.....	76
Obr. 8.1 Proložení datové matice a Truplových křivek (povodí 5) .....	79

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 <i>Meteorologické charakteristiky případů extrémních intenzit v závislosti na době trvání srážky (Kakos, 2001)</i> .....	8
Tab. 7.1 <i>Popis hodnot v matici vzorových dat</i> .....	44
Tab. 7.2 <i>Popis hodnot v kalibrační množině</i> .....	46
Tab. 7.3 <i>Popis hodnot ve validační množině</i> .....	47
Tab. 7.4 <i>Tabulka parametrů pro citlivostní analýzu srážkových vstupů</i> .....	49
Tab. 8.1 <i>Tabulka korelací při validaci modelu</i> .....	77
Tab. 8.2 <i>Tabulka korelací po kalibraci modelu dle celé množiny 184 povodí</i> .....	77

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>a</i>	vektor vah
<i>in</i>	obecný název pro vstup
<i>n</i>	periodicita
<i>out</i>	obecný název pro výstup
<i>q<sub>a</sub></i>	průměrný specifický odtok z povodí v místě uzávěrového profilu
<i>r</i>	korelační koeficient
<i>v</i>	rychlost
<i>A</i>	fuzzy množina
<i>A</i>	označení optimalizačního bloku
<i>A</i>	pomocný člen určený výpočtem
<i>API</i>	index předchozího nasycení půdy (antecedent precipitation index)
<i>B</i>	označení optimalizačního bloku
<i>C</i>	cyklonalita
<i>C</i>	evapotranspirační konstanta
<i>Cb</i>	cumulonimbus
<i>CN</i>	curve number
<i>CNII</i>	curve number (typ II)
<i>ČHMÚ</i>	Český hydrometeorologický ústav
<i>ČR</i>	Česká republika
<i>DIBAVOD</i>	digitální báze vodohospodářských dat
<i>EXP</i>	výstupní veličina
<i>F</i>	frontální pohyb
<i>F</i>	ukazatel kritických podmínek vzniku negativních projevů povodní z přívalových srážek
<i>FFG</i>	flash flood guidance



<i>FFG-CZ</i>	flash flood guidance – Czech
<i>FP</i>	funkce příslušnosti
$H_{m,r}$	relativní hodnota úhrnu jednodenních srážek s dobou opakování 100 let
$H_{S,ti}$	denní srážkový úhrn
$I_p$	hodnota průměrného sklonu přispívající plochy
<i>IN</i>	průměrná intenzita deště
$IN_{krit}$	průměrná intenzita deště odpovídající kritické době trvání deště
$IN_{100}$	intenzita deště odpovídající 100leté srážce
<i>INCA</i>	Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis
<i>IS</i>	inferenční systém
<i>K</i>	konvekce
<i>L</i>	délka údolnice
<i>LES</i>	lesnatost povodí
<i>N</i>	průměrná doba opakování
$N_s$	nimbostratus
<i>NWS</i>	National Weather Service
<i>O</i>	orografie
<i>ORP</i>	podíl plochy orné půdy
<i>P</i>	plocha povodí
$P_{p,r}$	relativní hodnota velikosti přispívající plochy
<i>PRE</i>	vstupní veličina určující míru ohrožení
<i>Q</i>	kulminační průtok
$Q_a$	průměrný dlouhodobý průtok v místě uzávěrového profilu
$Q_{model}$	modelový kulminační průtok
$Q_{m,i}$	modelový kulminační průtok <i>i</i> -tého povodí
$Q_{upr}$	upravená hodnota modelového průtoku
$Q_{vzor}$	vzorový kulminační průtok
$Q_{v,i}$	kulminační průtok <i>i</i> -tého povodí z matice vzorových dat
$Q_1$	1letý průtok
$Q_{100}$	100letý průtok
<i>SK</i>	sklonitost povodí
<i>T</i>	doba trvání deště
$T_{krit}$	kritická doba trvání deště
<i>T-cerk-norm</i>	počáteční doba trvání odvozená dle Čerkašina (normalizovaná hodnota)
<i>T-opt-norm</i>	nově určená doba trvání deště (normalizovaná hodnota)
<i>U</i>	universum
<i>USA</i>	Spojené státy americké
<i>VUT</i>	Vysoké učení technické v Brně
<i>ZABAGED</i>	základní báze geografických dat
$w_i$	váha <i>i</i> -tého pravidla
$\mu_A(x)$	funkce příslušnosti fuzzy množiny
$\pi$	kriteriální funkce
$\pi_x(u)$	stupeň možnosti

## 12 POUŽITÁ LITERATURA

- BERKA, P. (2003): *Současné trendy umělé inteligence*. Acta Oeconomica Pragensia, Praha, VŠE, 11, 8, od s. 41-46, 5 s. ISSN 0572-3043.
- BRÁZDIL, R., KIRCHNER, K., et al (2007): *Vybrané přírodní extrémny a jejich dopady na Moravě a ve Slezsku*. 1. vydání. Brno, Masarykova univerzita v Brně. 432 s. ISBN 978-80-210-4173-8.
- ČERKAŠIN, A. (1964): *Hydrologická příručka*. Hydrometeorologický ústav, Praha, 224 s.
- ČHMÚ (2009): *Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky* [online]. [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/pov09/doc/05.pdf>.
- ČHMÚ (2010): *Hydrologická ročenka České republiky 2009*. Nakladatelství Český hydrometeorologický ústav, Praha, 172 stran.
- ČHMÚ (2014): *Vysvětlení některých meteorologických pojmů a jevů* [online]. [cit. 2014-01-22]. Dostupné z WWW: [http://old.chmi.cz/meteo/olm/Let\\_met/Pojmy.htm](http://old.chmi.cz/meteo/olm/Let_met/Pojmy.htm).
- ČHMÚ (2015): *Indikátor přívalových povodní (Flash Flood Guidance)*. Český hydrometeorologický ústav [online]. 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: [http://hydro.chmi.cz/hpps/main\\_rain.php?mt=ffg](http://hydro.chmi.cz/hpps/main_rain.php?mt=ffg).
- DAŇHELKA, J. (2010): *Předpovědi v průběhu povodní a prediktabilita přívalových povodní* [online]. ČHMÚ, [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: [http://old.chmi.cz/katastrofy/danhelka\\_privalovky10.pdf](http://old.chmi.cz/katastrofy/danhelka_privalovky10.pdf).
- DHI (2014): *The expert in WATER ENVIRONMENTS*. DHI [online]. 2014 [cit. 2014-07-09]. Dostupné z: <http://www.dhi.cz/>.
- DRBAL, K. (1999): *Operativní řízení povodňových průtoků fuzzy regulací v dolní části vodohospodářské soustavy*. Disertační práce, VUT-FAST, Brno, 96 s. 60 s. příloh.
- DUB, O. (1963): *Hydrológia, hydrografia, hydrometria*, Slovenské vydavateľstvo technickém literatúry, n.p., Bratislava.
- DUBOIS, D., PRADE, H. (1980): *Fuzzy Sets and Systems. Theory and Applications*. Academic press, New York, 393 s.
- DUBOIS, D., PRADE, H. (1988): *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. New York: Plenum Press. ISBN 978-0306425202. 263 s.
- DUBOIS, D. (2006): Possibility Theory and Statistical Reasoning. *Computational Statistics & Data Analysis*. roč. 51, č. 1, s. 47-69. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167947306001149>.
- FELDMAM, A. D. (2000): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual*. USACE, Davis, 155 s.

- FOUCHIER, C., AMAUD, P., LAVABRE, J., MIZZI, J. P. (2007): *AIGA: an operational tool for flood warning in southern France*. Principle and performances on Mediterranean flash floods, Assemblée générale de l'EGU.
- HRÁDEK, F. (1996): Stanovení návrhových průtoků pro malá povodí. In: *Povrchové vody a pozemkové úpravy: sborník XI. Setkání Vodohospodářů v Kutné Hoře a II. Konference Voda a Pozemkové Úpravy*. 1. vyd. Kutná Hora: Oblastní sdružení vodohospodářů ČR, 1996, s. 13. ISBN 8002010892.
- HRÁDEK, F., ZEZULÁK, J. (1998): *Výpočet maximálních průtoků na malých povodích: model DesQ ver. 4. 1*. Praha, 1998, 48 s.
- JANÁL, P. (2011): *Operativní předpovědi odtoku vody z povodí za povodňi způsobených přívalovými srážkami pomocí fuzzy modelu: disertační práce*. Brno, 2011. 94 s., Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
- JANÁL, P., STARÝ, M. (2009): Fuzzy model pro předpověď stupně ohrožení povodí povodněmi z přívalových dešťů (Fuzzy Model for Prediction of Run-Off from River Basin in the Case of Flash Flood). *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 57, No. 3, pp. 145-153, Polygrafia SAV, Bratislava, ISSN 0042-790X, IF 1.0.
- JANÁL, P.; STARÝ, M. (2012): Fuzzy Model Used for the Prediction of a State of Emergency for a River Basin in the Case of a Flash Flood - PART 2. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2012, roč. 60, č. 3, s. 162-173. ISSN: 0042-790X.
- JANG, J. R. (1992): *Neuro-Fuzzy Modeling: Architectures, Analyses, and Applications*, Ph.D. Dissertation, EECS Department, Univ. of California at Berkeley.
- JANG, J. R. (1993): ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Interference System. IEEE Transactions on Systems. In: *Man and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3., s. 665-685.
- JANG, J. R. a kol. (1997): *Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 640 s., ISBN 0-13-261066-3.
- JEŽÍK, P. (2013): Extrapolace intenzitních křivek pro účely modelování srážkoodtokového procesu. *21th Annual Conference Proceedings Technical Computing Prague 2013*, Praha, ISBN 978-80-7080-863-4.
- JEŽÍK, P. (2014): Rozšiřování matice vzorových dat pro výpočet odtokové reakce malého povodí na přívalový déšť a ukázka výsledků. *Vodohospodářsky spravodajca*. 57(1-2): 22-25. ISSN 0322-886X.
- JURA, P. (1998): Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování. In: IEEE Transactions on Systems, *Man and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, FEI VUT, Brno, 92 s.
- KAKOS, V. (2001): Maximální srážky na území ČR z pohledu synoptické meteorologie. In: *Vývoj metod pro odhad extrémních povodní: sborník přednášek ze semináře k výsledkům grantového projektu VaV/510/3/97*: Klub techniků ČVTVHS, Praha, 23. 4. 2001. s. 46-60. ISBN 80-02-01440-5.
- KLIR, G. J., YUAN, B. (1995): *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic – Theory and Applications*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 574 s., ISBN 0-13-101171-5.

- KOHLER, M. A., LINSLEY, R. K. (1951): *Predicting The Runoff From Storm Rainfall*. Weather Bureau Research Papers, No. 34. Washington.
- MALÝ, A. (2011): *Současné možnosti deterministického modelování při odvození N-letých průtoků malých nepozorovaných povodí v praxi ČHMÚ*. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, 11 s., ISBN 978-80-88907-76-3.
- MATĚJÍČEK, J., HLADNÝ, J. (1999): *Povodňová katastrofa 20. století na území České republiky*. Ministerstvo životního prostředí, Praha, 60 s. ISBN 8072121308.
- Ministerstvo životního prostředí České republiky (2009): Zpráva o vyhodnocení povodně v červnu a červenci 2009 na území ČR. Praha : Ministerstvo životního prostředí. 20 s. Dostupné z WWW: < <http://voda.chmi.cz/pov09/doc/01.pdf>>.
- NACHÁZEL, K., FOŠUMPAUR, P.: Teorie možnosti v hydrologii a vodním hospodářství. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2010, roč. 58, č. 2, s. 73-97. ISSN 0042-790X. DOI: 10.2478/v10098-010-0008-y.
- NACHÁZEL, K., PATERA, A., HEJZLAR, J. (1999): Fuzzy model řízení jakosti vody v nádrži, I. a II. část, In: *Vodohosp. Čas.*, 47, č. 3, 6, s. 153-179, s. 384-404.
- NACHÁZEL, K., STARÝ, M., ZEZULÁK, J. (2004): *Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství*, Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, Praha, ISBN 80-200-02229-4.
- NORBIATO, D., BORGA, M., DEGLI ESPOSTI, S., GAUME, E., ANQUETIN, S. (2008): Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: an assessment for gauged and ungauged basins, *Journal of Hydrology*, 362 (3–4), s. 274–290.
- NOVÁK, V. (1990): *Fuzzy množiny a jejich aplikace*. SNTL, Praha, 148 s.
- NTELEKOS, A. A., GEORGAKAKOS, K. P., KRAJEWSKI, W. F. (2006): On the uncertainties of flash flood guidance: toward probabilistic forecasting of flash floods. *J. Hydrometeor*, 7, s. 896-915. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM529.1>.
- POKORNÝ, M. (1996): *Umělá inteligence v modelování a řízení*. BEN, Praha, 188 s.
- SCHARFFENBERG, W. A., FLEMING, M. J. (2009): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual*. USACE, Davis, 289 s.
- STARÝ, M. (2005): *Hydrologie: Modul 2*. Brno: VUT v Brně, 2005, 156 s.
- STARÝ, M. (2001): *Use of Fuzzy Regulator during Operative Control of Single Reservoir during the Flood Passage*, IX<sup>th</sup> International Poster Day, Transport of Water, Chemicals and Energy in the System Soil-Crop Canopy-Atmosphere, 7 s., Bratislava, ISBN 80-968480-4-6.
- SUGENO, M. (1977): Fuzzy Measures and Fuzzy Integrals. In: Gupta M.M., Saridis G.N., Ganies B.R.: *Fuzzy Automata and Decision Processes*, New York, North-Holand, s. 89-102.
- TAGAKI, H., SUGENO, M. (1985): Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control. In: IEEE Trans. On Systems, Man and Cybern., SMC-15(1), s. 116-132.

- TARAMASSO, A. C., GABELLANI, S., and PARODI, A.: *An operational flash-flood forecasting chain applied to the test cases of the EU project HYDROPTIMET*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 5, 703-710, DOI:10.5194/nhess-5-703-2005, 2005.
- THE MATHWORKS, Inc. MATLAB Runtime - MATLAB Compiler [online]. © 1994-2015 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/compiler/mcr/>.
- TRUPL, J. (1958): *Intenzity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy*. Výzkumný ústav vodohospodářský, Praha.
- VAŠKŮ, Z. (2009): Bleskové povodně : Hrozba krátkodobých srážek velké intenzity. *Vesmír*. 2009, 10, s. 618-622. Dostupný také z WWW: <<http://www.vesmir.cz/clanek/bleskove-povodne>>.
- VÚV TGM. (2009): *Metodika mapování povodňového rizika: Dílčí zpráva*. Praha, 85+7 s. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/pov09/doc/12.pdf>
- VYSOKÝ, P. (1996): *Fuzzy řízení*, Vydavatelství ČVUT, 131 s.
- ZADEH, L. A. (1965): Fuzzy Sets. In: *Information and Control*, 8, s. 338-353.
- ZADEH, L. A. (1978): Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*. roč. 1, č. 1, s. 3-28. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0165011478900295>.

## 13 SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

### 2015

BRÁZDIL, R., TRNKA, M. A KOL. (2015): *Sucho v českých zemích: minulost, současnost, budoucnost*. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, v.v.i., Brno, ISBN 978-80-87902-11-0

JEŽÍK, P., (2015): Představení softwarové aplikace A3C, příspěvek na konferenci *Sborník abstraktů konference Juniorstav 2015*, ISBN 978-80-214-5091-2.

JEŽÍK, P., (2015): Mapová aplikace pro hledání malých povodí nejvíce ohrožených přívalovými povodněmi, článek v *Vodohospodársky spravodajca*, ISSN 0322-886X, Združenie zamestnávateľov vo vodnom hospodárstve na Slovensku, Bratislava.

### 2014

JEŽÍK, P., (2014): Mapová aplikace pro hledání malých povodí nejvíce ohrožených přívalovými povodněmi, příspěvek na konferenci *Zborník súťažných prác mladých odborníkov*, ISBN 978-80-88907-87-9, Bratislava.

JEŽÍK, P.; STARÝ, M., (2014): Hledání kritické doby trvání deště pro účely modelování odtokové reakce malého povodí na přívalový déšť, příspěvek na konferenci *Sborník příspěvků odborné konference Voda a krajina 2014*, ISBN 978-80-01-05533-5, Praha.

JEŽÍK, P., (2014): Softwarová aplikace pro určení odtokové reakce malého povodí na přívalový déšť, příspěvek na konferenci *Sborník anotací konference Juniorstav 2014*, ISBN 978-80-214-4851-3, Brno.

JEŽÍK, P., (2014): Rozšiřování matice vzorových dat pro výpočet odtokové reakce malého povodí na přívalový déšť a ukázka výsledků, článek v *Vodohospodársky spravodajca*, ISSN 0322-886X, Združenie zamestnávateľov vo vodnom hospodárstve na Slovensku, Bánská Bystrica.

### 2013

JEŽÍK, P., (2013): Extrapolace intenzitních křivek pro účely modelování srážkoodtokového procesu, příspěvek na konferenci *21th Annual Conference Proceedings*, ISBN 978-80-7080-863-4, Praha.

JEŽÍK, P., (2013): Rozšiřování matice vzorových dat pro výpočet odtokové reakce malého povodí na přívalový déšť a ukázka výsledků, příspěvek na konferenci *Zborník súťažných prác mladých odborníkov*, ISBN 978-80-88907-85-5, Bratislava.

JEŽÍK, P., (2013): Vybrané metody umělé inteligence jako nástroj pro určení odtokové reakce malého povodí na přívalovou srážku, příspěvek na konferenci *Voda a krajina 2013 - sborník příspěvků*, ISBN 978-80-01-05318-8, Praha.

JEŽÍK, P., (2013): Vliv základní struktury modelu vycházejícího z teorie možnosti pro určení odtokové reakce povodí po dopadu přívalové srážky, příspěvek na konferenci *Sborník anotací konference Juniorstav 2013*, ISBN 978-80-214-4669-4, Brno.

## 2012

JEŽÍK, P., (2012): Predikce odtoku z malého povodí zasaženého přívalovou srážkou pomocí modelu vycházejícího z teorie možnosti, příspěvek na konferenci *Zborník príspevkov - 24. konferencia mladých hydroológov*, ISBN 978-80-88907-81-7, Bratislava.

JEŽÍK, P., (2012): Model vycházející z teorie možnosti pro určení odtokové reakce malého povodí po dopadu přívalové srážky, příspěvek na konferenci *Sborník konference Voda a krajina 2012*, ISBN 978-80-01-05107-8, Praha.

JEŽÍK, P.; STARÝ, M., (2012): Předpovědi průměrných měsíčních průtoků pomocí generátoru umělých průtokových řad, příspěvek na konferenci *Sborník příspěvků s Workshopu Adolfa Patery 2012*, ISBN 978-80-02-02423-1, Brno.

JEŽÍK, P., (2012): Užití fuzzy modelu pro určení odtokové reakce malého povodí po dopadu přívalové srážky, příspěvek na konferenci *Sborník anotací konference Juniorstav 2012*, ISBN 978-80-214-4393-8, Brno.

## 2011

JEŽÍK, P., (2011): Předpovědi průměrných měsíčních průtoků pomocí generátoru umělých průtokových řad, příspěvek na konferenci *Zborník súťažných prác mladých odborníkov*, ISBN 978-80-88907-76-3, Bratislava.