

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE



FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ  
KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ  
A ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ

ANALÝZA SESTUPNÝCH VĚTVÍ HYDROGRAMŮ  
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Diplomant: Bc. Tereza Frabšová

Vedoucí práce: Ing. Petr Máca, Ph.D.

2013

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**  
Katedra vodního hospodářství a environmentálního  
modelování  
Fakulta životního prostředí  
**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Frabšová Tereza

Environmentální modelování

Název práce

**Analyza sestupných větví hydrogramů**

Anglický název

**Analysis of the Recession hydrograph's limbs**

---

**Cíle práce**

Cílem práce je analýza sestupných větví hydrogramů zaznamenaných na vybraných povodích v České republice za použití zvolených hydrologických modelů.

**Metodika**

1. Vypracujte přehled vybraných modelů, které jsou využívány při simulaci základního odtoku v povodí a jsou součástí konceptuálních modelů.
2. Shromážděte srážko odtoková data vybraných povodí a vyberte data sestupných větví hydrogramů odtoku.
3. Proveďte kalibraci zvolených modelů na úsecích sestupných větví hydrogramu odtoku.
4. Vzájemně porovnejte analyzované modely.

**Harmonogram zpracování**

červen 2012 - září 2012 - literární rešerše modelů základního odtoku

říjen 2012 - prosinec 2012 - příprava dat a tvorba algoritmů modelů

leden 2013 - březen 2013 - kalibrace a vzájemné srovnání analyzovaných modelů

duben 2013 - dokončení diplomové práce

**Rozsah textové části**

Standardní diplomová práce cca 60 stran a přílohy

**Klíčová slova**

hydrologické sucho, hydrogram, sestupná větev hydrogramu, modely základního odtoku

**Doporučené zdroje informací**

Dingman S.L.: Physical Hydrology. Prentice Hall, 2008 s. 646.

ISI a další nejen citační databáze

Vybrané články z Journal of Hydrology, Hydrological Processes a dalších odborných periodik.

**Vedoucí práce**

Máca Petr, Ing., Ph.D.



prof. Ing. Pavel Pech, CSc.  
Vedoucí katedry

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.  
Děkan fakulty

V Praze dne 9.4.2013

***Prohlášení***

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Petra Máci, Ph.D., a že jsem uvedla všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

V Praze 22 .4. 2013

.....

### ***Poděkování***

Děkuji vedoucímu této diplomové práce Ing. Petru Mácovi, Ph.D., za četné připomínky a poskytnuté rady, za obrovskou trpělivost a čas strávený při konzultacích.

V Praze 22. 4. 2013

.....

## ***Abstrakt***

Diplomová práce je zaměřena na hydrologické sucho, které se vyjadřuje snížením zásob vody v podzemní a povrchové vodě, což má za následek pokles vodních stavů v řekách. Tento pokles je zaznamenán v hydrogramu odtoku jako sestupná větev. Cílem práce je definovat sucho, popsat konceptuální modely simulující základní odtokovou odezvu povodí, vybrat sestupné větve hydrogramu odtoku ze třinácti povodí České republiky a analyzovat je konstitučními vztahy pro lineární, nelineární a exponenciální nádrž, kterými je generována pomalá odtoková odezva povodí. V první části analýzy je soubor vybraných sestupných větví analyzován za pomoci lokálního optimalizačního algoritmu, jehož výsledkem je identifikace mocninného vztahu nelineární nádrže, tzv. Q~S vztah. Ve druhé části analýzy jsou parametry vybraných konstitučních vztahů kalibrovány pomocí globálního optimalizačního algoritmu Shuffled Complex Differential Evolution (SCDE). Výsledkem kalibrace je zjištění, že základní odtoková odezva povodí odpovídá spíše nelineární odtokové odezvě, což může být využito v dalším modelování hydrologického sucha. Pomalá odtoková odezva totiž představuje důležitý zdroj vody pro většinu řek v období sucha a při absenci srážek, což souvisí i s potřebou vody pro člověka.

*Klíčová slova:* hydrologické sucho, hydrogram, sestupná větev hydrogramu, modely základního odtoku

## ***Abstract***

The thesis is focused on hydrological drought, which is expressed in reduction of groundwater and surface water storage. It results in a decrease water levels in rivers. This decrease is recorded in the runoff hydrograph as a recession limb. The aim is to define drought, describe the basic conceptual models simulating the response of drainage basins, select runoff hydrograph recession limbs from thirteen catchments of the Czech Republic and identify constitutional relationships for the linear, nonlinear and exponential reservoir which generate slow catchmen runoff response. In the first part of the analysis is set of selected runoff hydrograph recession limbs analysed by local optimized algoritimus form, they result is identification power of relationship of nonlinear reservoir, so-called Q~S relationship. In the second part of the analysis are parameters of selected constitutive relationships calibrated by using global optimization algorithm Shuffled Complex Differential Evolution (SCDE). Result of calibration is the finding that the basic response of drainage basin corresponds more nonlinear runoff response, which can be used in further modeling of hydrological drought. Slow response runoff is an important source of water for most of the rivers in the dry season and in the absence of precipitation, which is associated with the need of water for human.

*keywords:* hydrological drought, hydrograph, runoff hydrograph recession limb, models of base-flow

## **Obsah**

<b>1. Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>2. Cíle práce</b> .....	<b>12</b>
<b>3. Metodika</b> .....	<b>13</b>
<b>4. Celkový odtok v povodí</b> .....	<b>14</b>
4.1 Podzemní voda .....	15
<b>5. Srážko-odtokový proces a hydrologická bilance povodí</b> .....	<b>17</b>
<b>6. Definice sucha</b> .....	<b>19</b>
6.1 Typy sucha.....	19
6.2 Charakteristiky a indexy sucha .....	20
6.3 Procesy ovlivňující nízké průtoky.....	21
6.4 Analýza nízkých průtoků.....	22
6.5 Modelování sucha.....	25
<b>7. Hydrologické modely</b> .....	<b>26</b>
<b>8. Konceptuální modely (grey-box modely)</b> .....	<b>29</b>
8.1 Model lineární nádrže .....	29
8.2 Model nelineární nádrže .....	30
8.3 Model nádrže s exponenciálním odtokem.....	30
8.4 BILAN.....	30
8.5 HBV model a PDM model .....	31
8.6 SAC SMA (Sacramento-Soil Moisture Accounting) .....	32
8.8 ChiMeRa (Conceptual Hydrological Modeling in R) .....	32
<b>9. Optimalizace parametrů konceptuálních hydrologických modelů</b> .....	<b>33</b>
9.1 Lokální a globální optimalizační algoritmy .....	33
<b>10. Klimatické změny ovlivňující vodní režim v České republice</b> .....	<b>35</b>
<b>11. Srážko-odtoková data vybraných povodí</b> .....	<b>37</b>
11.1 Výběr dat sestupných větví hydrogramů odtoku.....	38
<b>12. Analýza sestupných větví hydrogramu dle Torfse (2009)</b> .....	<b>39</b>
12.1. Výsledky první části analýzy.....	39
<b>13. Kalibrace zvolených modelů na úsecích sestupných větví</b> .....	<b>54</b>
13.1 Výsledky druhé části analýzy.....	57
13.2 Shrnutí výsledků druhé části analýzy a porovnání modelů .....	75
<b>14. Diskuze</b> .....	<b>79</b>
<b>15. Závěr</b> .....	<b>80</b>
<b>Zdroje</b> .....	<b>81</b>
<b>Příloha č. 1</b> .....	<b>88</b>



<i><b>Příloha č. 2</b></i> .....	<i><b>93</b></i>
<i><b>Příloha č. 3</b></i> .....	<i><b>110</b></i>

## 1. Úvod

Pozornost člověka je v dnešní době spíše soustředěna na události spojené s povodněmi nežli s hydrologickým suchem. Povodně totiž patří mezi nejčastější přírodní katastrofy světa, a tak je většina srážko-odtokových modelů zaměřena právě na predikci vrcholu průtokové vlny (Ferket et al., 2010). V modelech je často nízkým průtokům věnována menší pozornost, i když si zaslouží větší z důvodu jejich vlivu na vodní zdroje využívané pro pitné účely, zavlažování, průmysl či přírodní ekosystémy. Strukturou srážko-odtokových modelů a jejich dopadem na vyhodnocení nízkých průtoků se zabýval Staudinger et al. (2011). Samotná problematika týkající se definice nízkých průtoků, stanovení jejich charakteristik a vliv lidského faktoru na sucho a nízké stavy v řekách je popsána v článku Smakhtina (2001).

Nízké stavy v řekách způsobené hydrologickým suchem by tedy neměly být opomíjeny z důvodu potřeby vody pro člověka. Voda v řekách je během bezdeštných dní a v období sucha udržována podzemní vodou, která představuje hlavní složku základního odtoku. Množství vody, které se nachází v podzemní vodě, a vliv sucha na základní odtok lze však jen obtížně kvantifikovat (Mishra et Singh, 2010).

Základní odtok je možné separovat z hydrogramu odtoku simulujícího odtokovou odezvu povodí pomocí různých metod nastíněných například v článku Tallaksena (1995). Pokles základního odtoku byl popsán Mailletem už v roce 1905 pomocí exponenciální funkce, v jejíž mocnině se nachází parametr „ $k$ “ představující dobu zdržení vody v povodí, která se zvyšuje v závislosti na snižujícím se říčním průtokem (Dewandel et al., 2003). Exponenciálně vyjádřená rovnice představuje lineární vztah mezi zásobou a odtokem vody v povodí. Tato linearita je popsána pomocí konceptuálního modelu lineární nádrže. Na většinu povodí je však aplikován spíše konceptuální model nelineární nádrže popisující nelinearitu zásoby a odtoku. Tento model totiž představuje realističtější pohled na vztah zásoby a odtoku v povodí (Wittenberg, 1999). Další konceptuální modely, exponenciální nádrž, sériově či paralelně zapojené lineární nádrže, jsou popsány a vzájemně porovnány v článku Moore (1997) nebo Mishra et al. (2004). Jiné konceptuální modely, ve kterých jsou jednotlivé složky odtoku vody v povodí reprezentovány nádržemi tak, že jedna z nádrží představuje právě základní odtok, jsou popsány například Jeníčkem (2005).

Ve vědeckých publikacích sice stále převažují články zaměřené na povodňové události, lze se však setkat i s články zkoumajícími sestupné větve hydrogramu odtoku, které simulují pomalou odtokovou odezvu povodí, společně s jejich analýzou. Wittenberg se Sivapalanem (1999) se například věnovali hlavním složkám hydrologické bilance z hlediska jejich vlivu na tvar sestupných větví v hydrogramu říčního odtoku a na odhad parametrů nádrže. Aksoy a Wittenberg (2011) se zabývali analýzou sestupných větví základního odtoku v nesouvislých říčních tocích a Millares et al. (2009) věnovali svou pozornost sestupným větvím

na tocích v horských oblastech. Klimatickými změnami a jejich vlivem na zásoby vody a tvar sestupných větví se zabývali Kašpárek et Peláková (2006).

Samotnou kalibrací modelů lineární, nelineární či exponenciální nádrže na úsecích sestupných větví v hydrogramu odtoku se nezabývá mnoho vědeckých článků. To samé se týká kalibrace využívající globální optimalizační algoritmus Shuffled Complex Differential Evolution (SCDE) tvořící základ metody Shuffled Complex Evolution method (SCE-UA) pro automatický odhad parametrů konstitučních vztahů v příslušných modelech lineární, nelineární a exponenciální nádrže. Vědecká činnost se spíše týká samotné metody SCE-UA, která byla vyvinuta Duanem (Duan et al., 1994) a byla aplikována do různých hydrologických modelů. Tato kalibrační metoda dosahovala dobrých výsledků například při aplikování na model vytvořený vědci ve Vietnamu, pomocí kterého byly simulovány říční toky v Číně (Hapuarachchi et al., 2001). Obdobný výsledek byl získán při kalibrování modelu SWAT (Soil and Water Assessment Tool) metodou SCE-UA (Eckhardt et Arnold, 2001). Samotný globální optimalizační algoritmus SCDE byl pak použit v České republice a to pro kalibraci hydrologického modelu BILAN (Máca, 2012a).

Z důvodu potřeby vody pro člověka by měla být událostem spojeným se suchem věnována stejná pozornost jako povodním. Týká se to především modelování sucha a nízkých stavů na povodích. Voda totiž stále představuje nenahraditelnou podmínku našeho života.

## ***2. Cíle práce***

Cílem autorky diplomové práce je vypracovat seznam konceptuálních modelů, které jsou využívány při simulaci základního odtoku v povodí, shromáždit srážko-odtoková data ze třinácti povodí České republiky a vybrat z nich data sestupných větví hydrogramů odtoku, pomocí lokálního optimalizačního algoritmu identifikovat parametry nelineární nádrže, tzv. Q~S vztah, provést kalibraci za použití globálního optimalizačního algoritmu Shuffled Complex Differential Evolution (SCDE) na modelu lineární nádrže, nelineární nádrže a modelu nádrže simulujícího exponenciální odtokovou odezvu na úsecích sestupných větví a vzájemně porovnat analyzované modely v jednotlivých povodích.

### 3. Metodika

Autorka pro svoji rešeršní část získávala informace o dané problematice převážně z vědeckých článků odborného zahraničního časopisu, Journal of Hydrology. Dále používala internetové stránky z oblasti hydrologie, hydrauliky a geologie. Vedle internetových zdrojů hledala informace v knižních publikacích zapůjčených v Národní technické knihovně či u vedoucího diplomové práce, Ing. Petra Máci, Ph.D.

Samotná analýza sestupných větví hydrogramu odtoku byla prováděna na třinácti povodích v České republice. Jednalo se o povodí řek Cidliny, Hloučely, Jizery, Klenice, Litavy, Malše, Orlice, Otavy, Řečice, Sázavy, Teplé, Teplé Vltavy a Úpy. Pro vybraná povodí byly denní časové řady průtoků k dispozici ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka v Praze jako výšky odtoku v milimetrech. Ze získaných dat byly vybrány pouze sestupné větve z hydrogramu odtoku a to na základě skriptu vytvořeného v prostředí programu „R“. Skript obsahoval podmínku minimální délky sestupné větve v jednotkách dnů, prahovou hodnotu výšky odtoku v milimetrech omezující se shora sestupnou větev hydrogramu a hodnotu povolující mírnou oscilaci na sestupné větvi mezi dvěma odtoky (1-5%). Hodnoty byly pro vybraná povodí nastaveny individuálně. Každé vybrané sestupné větvi a jednotlivé výšce odtoku byla poté přiřazena pozice v povodí či v samotné větvi.

Vybrané sestupné větve hydrogramu odtoku byly analyzovány konstitučními vztahy pro lineární, nelineární a exponenciální nádrž, pomocí kterých byla generována pomalá odtoková odezva vybraných povodí. V první části analýzy byl zjištěn  $Q\sim S$  vztah nelineární nádrže pro jednotlivá povodí a to pomocí „R“ skriptu vytvořeném na Wageningen University (Torfse, 2009). Výsledky byly pro každé povodí dány čtyřmi výstupy, testem linearity odtokové odezvy, neposunutými a posunutými sestupnými větvemi hydrogramu odtoku a výsledným  $Q\sim S$  vztahem pro jednotlivá vybraná povodí. V závěru této analýzy byly vytvořeny obrázky na základě příslušného skriptu, který byl přetvořen na funkci, pomocí které byla zjištěna závislost parametru  $b$  nacházejícího se v mocnině konstitučního vztahu pro nelineární nádrž na určitém rozsahu minimální délky sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku. Rozsahy byly pro vybraná povodí voleny individuálně. Ve druhé části analýzy bylo každé povodí reprezentováno čtyřmi až devíti sestupnými větvemi. Tyto větve byly analyzovány třemi konstitučními vztahy, které odpovídaly modelu lineární, nelineární a exponenciální nádrže za pomoci globálního optimalizačního algoritmu Shuffled Complex Differential Evolution (SCDE). Objektívni funkcí algoritmu byla zvolena logaritmická suma čtverců reziduí. Pro jednotlivé modely a povodí byly zjištěny počáteční zásoby v reprezentativních sestupných větvích a parametry příslušných konstitučních vztahů na základě zvolených rozsahů vstupních hodnot v algoritmu SCDE. Na závěr byly jednotlivé modely porovnávány pomocí statistických charakteristik, minima, dolního kvartilu, mediánu, průměru, horního kvartilu, maxima a směrodatné odchylky.

#### **4. Celkový odtok v povodí**

Celkový odtok v daném povodí je složen z povrchového a podpovrchového odtoku. Povrchový odtok může být definován jako soustředěný odtok vody tokem k uzávěrovému profilu povodí. U povrchového odtoku jsou rozlišovány tři základní fáze, fáze nasycování půdy, fáze plošného nebo svahového odtoku a fáze soustředěného odtoku v říční síti. (Hrádek et Kuřík, 2008)

Ve fázi nasycování půdy nevzniká povrchový odtok, protože je veškerá srážková voda buď vsakována do půdy nebo zadržována v povrchových depresích. Důvodem je malá intenzita deště, která je převyšována koeficientem hydraulické vodivosti vyjadřujícího schopnost půdy vést vodu. (Kodešová, 2012)

Naopak ve druhé fázi povrchového odtoku intenzita deště převyšuje koeficient hydraulické vodivosti. Dochází tedy k povrchovému odtoku, který je dále soustředěn do říční sítě (třetí fáze povrchového odtoku). (Beran, 2009)

Povrchový odtok tedy dává přímý rychlý odtok, který je způsoben efektivní srážkou spadlou na dané povodí (Jeníček, 2010). Efektivní srážka tvoří pouze tu část srážkového vstupu, která při srážko-odtokové události odtéká formou přímého odtoku (Máca, 2010). Zbytek srážkového vstupu, který neodtéká formou přímého odtoku, je důležitým zdrojem pro podzemní vodu tvořící hlavní složku základního odtoku, jež udržuje vodu v říčních tocích mezi jednotlivými srážkovými událostmi (Dingman, 2008).

Podpovrchový odtok je tvořen odtokem podpovrchové vody z nenasycené a nasycené zóny půdního profilu (obr. č. 1). Nenasycená zóna půdního profilu, také zóna aerace, obsahuje kromě pórů vyplněných vodou i póry vyplněné vzdušiny. Voda je v pórech držena tlakem, který je nižší než atmosférický působící na hladinu podzemní vody. Nasycená zóna půdního profilu oproti nenasycené zóně obsahuje většinu pórů plně nasycených vodou. (Pavlásek, 2010)



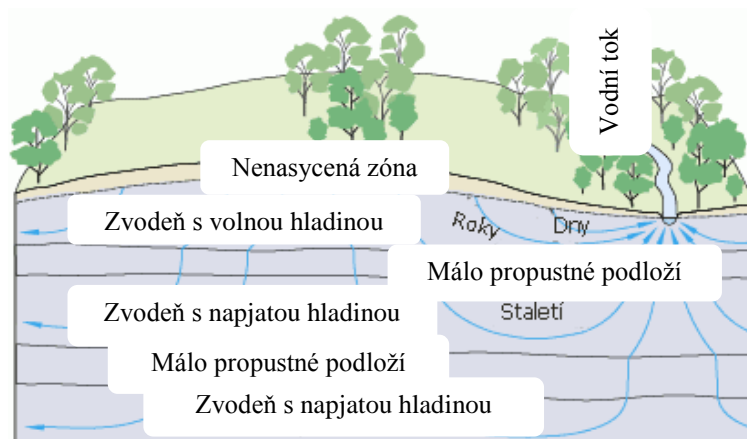
Obr. č. 1: Popis půdního profilu (Šercl, 2013)

Odtok v nenasycené zóně je tvořen „interflow“ a rychlým hypodermickým odtokem. „Interflow“ představuje boční pohyb vody ve vrchní části nenasyceného půdního prostředí. Hypodermický odtok vzniká prouděním vody v mikropórech a makropórech, což jsou póry o průměru menším či větším než  $2 \cdot 10^{-9}$  m (Bartovská et Šiškovská, 2005). Tvorba hypodermického odtoku je závislá na množství gravitačních pórů v půdním prostředí, na poloze hladiny podzemní vody, na propustnosti půdy či na sklonu nepropustné plochy. (Beran, 2009; Jeníček, 2010)

Odtok v nasycené zóně půdního profilu vytváří odtok podzemní vody, který tvoří společně se zpožděným odtokem vody v nenasycené zóně, základní odtok v daném povodí.

#### **4.1 Podzemní voda**

Podzemní voda tvoří kolem 30% světových zásob pitné vody. Z geologického hlediska bývá označována jako zvoděň (zvodnělá vrstva). Existují dva základní typy zvodněných vrstev, zvoděň s volnou hladinou, nebo napjatou hladinou (obr. č. 2). Rozdíl mezi těmito typy je v tom, zda je, či není daná zvoděň ze shora ohraničena nepropustnou hydrogeologickou vrstvou (izolátorem). Na hladině zvodně s volnou hladinou totiž působí atmosférický tlak, naopak u zvodně s napjatou hladinou působí tlak větší než atmosférický (Pech, 2010; Dingman, 2008)



Obr. č. 2: Typy zvodněných vrstev v půdním profilu (Šercl, 2013)

Nad hladinou podzemní vody se nachází oblast nazývaná jako kapilární třáseň (pásma podepřené kapilární vody), která je někdy zahrnována společně s podzemní vodou do nasycené zóny půdního profilu. Obsahuje totiž také většinu porů plně zaplněných vodou. Tlak, jímž je voda držena v oblasti kapilární třáseň, je však nižší než atmosférický působící na hladinu podzemní vody. Kapilární třáseň vzniká působením kapilárních sil, kdy se část podzemní vody díky kapilárním silám dostává nad hladinu podzemní vody (obr. č. 1). (Pavlásek, 2010)

Navzdory tomu, že je pohyb podzemní vody, který vychází z pohybové rovnice odvozené z Darcyho zákona a rovnice kontinuity, pomalý, je podzemní voda klíčovým článkem hydrologického cyklu. Podzemní voda totiž představuje důležitý zdroj vody pro většinu řek a jezer a její využití je úzce spjato s člověkem a jeho potřebami. Převažuje-li totiž v říčním toku voda získaná ze základního odtoku podzemní vody, má říční tok relativně malou časovou proměnlivost průtoků. Z tohoto důvodu jsou takto definované říční toky schopny poskytovat spolehlivé zdroje vody pro různé účely. (Dingman, 2008)

Spojité křivka závislosti celkového odtoku na čase se nazývá hydrogram odtoku. Křivka jedné průtokové vlny obsahuje vzestupnou větev, ve které odtok po určitou dobu stoupá, a sestupnou (poklesovou) větev, ve které naopak odtok s časem klesá. Přechod mezi vzestupnou a sestupnou větví se nazývá vrchol průtokové vlny. (Herber, 2007)



## **5. Srážko-odtokový proces a hydrologická bilance povodí**

Srážko-odtokový proces je založen na postupné transformaci spadlé srážky na povodí až na odtok vody, který stéká do uzávěrového profilu daného povodí. Uzávěrovým profilem je tedy označováno místo, kudy odtéká veškerá voda z daného povodí. Srážko-odtokový proces je ovlivněn dvěma skupinami činitelů, klimatickými a geografickými.

Mezi klimatické činitele povodí například patří časový a prostorový průběh příčinného deště, vlhkost a teplota vzduchu, výpar, rychlost a směr větru, atmosférický tlak. Do geografických činitelů povodí náleží plocha, velikost, střední nadmořská výška, tvar, reliéf, vegetační pokryv. (Hrádek et Kuřík, 2008)

Srážko-odtokový proces je rozdělen na hydrologickou a hydraulickou transformaci. V hydrologické transformaci jsou postupně od srážky spadlé na povodí odečítány hydrologické ztráty. (Zídek, 2010)

Mezi tyto ztráty je řazena evapotranspirace, která představuje celkový výpar vztahený k určitému území. Evapotranspirace je proces složený z fyziologického a fyzikálního výparu (Ulbrichová, 2012). Fyziologický výpar, transpirace, představuje hlavní mechanismus výdeje vody povrchem rostlin. Fyzikální výpar, evaporace, je proces, při kterém dochází k vypařování vody z volné vodní hladiny nebo z povrchu půdy, sněhu nebo ledu.

Další hydrologickou ztrátou je intercepce, která je definována jako množství srážky zachycené na povrchu vegetace či na povrchu předmětů. Takto zachycená voda nikdy nesteče nebo nedopadne na povrch půdy a po určitém čase se z těchto povrchů odpaří.

Část srážky, která spadne na určité území, se také ztrácí infiltrací či povrchovou retencí. Infiltrací je míněn průsak vody do půdy a propustných hornin. Ztráta povrchovou retencí naopak představuje část srážek, které jsou dočasně zadrženy na povrchu terénu v různých terénních depresích.

V průběhu druhé transformace srážko-odtokového procesu (hydraulické) se voda spadlá na povodí přetváří na celkový odtok odtékající uzávěrovým profilem povodí. (Zídek, 2010)

Srážko-odtokový proces je úzce spjatý s hydrologickou bilancí daného povodí, která pomocí bilanční rovnice vyjadřuje vztah tří základních jevů v povodí, srážky, výparu a odtoku. Vyjádřit bilanční rovnici lze různými kvantitativními vztahy pro různá časová období. Základním časovým obdobím je hydrologický rok, který v podmínkách České republiky začíná 1. listopadu předchozího roku a končí 31. října. Začátek hydrologického roku je totiž určen tak, aby se i pevné srážky (sníh, led) po rozpuštění mohly účastnit odtokového procesu v povodí. (Beran, 2009)

Dle Dingmana (2008) může být hydrologická bilance povodí vyjádřena pomocí rovnice:

$$P + G_{in} = Q + ET + G_{out} . \quad (1)$$

Všechny veličiny vyskytující se v rovnici jsou určeny dlouhodobými průměrnými hodnotami. Veličina  $P$  vyjadřuje srážku,  $Q$  je odtok z povodí,  $ET$  představuje evapotranspiraci,  $G_{in}$  a  $G_{out}$  jsou veličiny zastupující množství vody přitékající nebo odtékající z povodí jako podzemní voda.

Bilanční rovnici lze vyjádřit samostatně pro podzemní vodu:

$$R_I + R_{SW} + G_{in} = CR + Q_{GW} + G_{out} . \quad (2)$$

$R_I$  představuje infiltraci vody do podzemní vody (perkolace), veličina  $R_{SW}$  zastupuje doplnění z povrchové vody,  $CR$  je přesun vody z podzemní vody do kapilární třásně a  $Q_{GW}$  je příspěvek podzemní vody do říčního toku.

Kombinací těchto dvou rovnic a nahrazením součtu  $R_I$ ,  $R_{SW}$  a  $(-CR)$  veličinou  $R$  představující celkové doplnění vody do toku podzemní vody lze získat následující bilanční vztah:

$$P - Q - ET = R_I + R_{SW} - CR - Q_{GW} = R - Q_{GW} . \quad (3)$$

## **6. Definice sucha**

Diplomová práce je zaměřena na sestupné větve hydrogramů v říčních tocích, které analyzují pokles průtoků v čase za dané časové období. Pokles je způsoben nízkým říčním průtokem, který má mnoho definic.

Jedna z definic vyjadřuje nízký průtok jako aktuální průtok v řece nastávající během suchého období v roce (Smakhtin, 1999). Mezinárodní hydrologický slovník zase vystihuje nízký průtok jako průtok vody v toku během dlouhotrvajícího suchého období (WMO, 1974).

Definice podle mezinárodního hydrologického slovníku však nevyjadřuje jasný rozdíl mezi nízkými průtoky a suchem. Sucho je totiž na rozdíl od nízkého průtoku přírodní událost, která vzniká v důsledku nedostatku dešťových srážek lišící se od dlouhodobého průměru v dané oblasti. Tato událost má delší časovou periodu týkající se obvykle několika měsíců, která ovlivňuje lidské potřeby a životní prostředí. Sucho je tedy velmi neurčitý pojem, který nemá jednotná kritéria pro kvantitativní vymezení s ohledem na rozmanitost různých hledisek (meteorologických, zemědělských, pedologických, atd.). (Rožnovský, 2012)

Odlisný pohled hydrologů na sucho je jednou z hlavních překážek při samotném vyšetřování sucha. Při formulování sucha je důležité rozlišovat mezi konceptuálními a funkčními definicemi. Konceptuální definice jsou založeny na relativním vyjádření sucha, kdežto funkční definice kladou důraz na popis průběhu sucha a na identifikaci počátku a konce sucha. Údaje z funkčních definic se mohou používat například k analýze vztažené k frekvenci sucha. (Mishra et Singh, 2010)

### **6.1 Typy sucha**

Sucho se dělí na několik typů, meteorologické, zemědělské, socioekonomické a hydrologické sucho. Meteorologické sucho je v dané oblasti obvykle vyjádřeno jako srážková odchylka od normálu během delší časové periody. (Wilhite et Glantz, 1985)

Zemědělské sucho nastává, když v oblasti není dostatečně vlhká půda, aby pokryla požadavky na úrodu. Se zemědělským suchem je spjata socioekonomické sucho, které nastává právě tehdy, když sucho začíná ovlivňovat přímo obyvatelstvo dané oblasti. Jsou to například události spojené s požáry a s nedostatkem vody (například funkce hydroelektráren). (NDMC, 2012)

Posledním zmíněným typem sucha je sucho hydrologické, jež nastává, když klesají zásoby povrchové a podpovrchové vody a krátkodobé deště nestačí doplnit suchem ztracené zásoby vody. Dochází tím k vysychání rezervoárů, pramenů

i studní. Hydrologické sucho se projevuje až za několik měsíců po zemědělském suchu. (Mishra et Singh, 2010)

Podle Thornthwaiteovy klasifikace podnebí (1947) lze rozlišit tři hlavní druhy sucha, stálé (nejsuší klimatická pásma), sezónní (oblasti s monzunovým podnebím), nahodilé (důsledek nepravidelných a proměnlivých četností a intenzit výskytu srážek). Právě nahodilé sucho, které může trvat týdny, měsíce nebo i roky, je z hlediska své neočekávanosti a nahodilosti velice nebezpečné. (Rožnovský, 2012)

## **6.2 Charakteristiky a indexy sucha**

Všechny již zmíněné typy sucha pocházejí z deficitu srážek a jejich společným rysem je negativní dopad na obyvatelstvo, krajinu a životní prostředí. Jednotlivá období sucha se vzájemně liší intenzitou, dobou trvání a územním rozsahem.

Sucho však nemusí být způsobena jen klimatickou fluktuací ale i lidskou aktivitou. To se týká především odvodňování řek za účelem zavlažování přilehlých polí či neefektivní aplikací agrochemikálií do zemědělsky využívané krajiny. Tyto aktivity se projeví změnou fyzikálních a chemických vlastností půdy. Mohou ale také vyvolat proces nazývaný salinizace, neboli zasolování polí, kdy se díky velkému výparu vody ve vrchních vrstvách půdního horizontu hromadí soli, které znemožňují využití půdy k zemědělským účelům. (Trnka, 2010)

Charakteristiky sucha jsou hodnoceny z časového a prostorového hlediska. Mezi časová hlediska náleží začátek, konec a délka trvání sucha. Do prostorového hlediska je řazen plošný rozsah sucha. Kromě času se na charakteru sucha a jeho průběhu mohou podílet další faktory a to například vyšší rychlost větru a teploty či nízká relativní vlhkost. Tyto faktory pak mohou zvyšovat intenzitu sucha. (Blinka, 2002)

Pro vyhodnocování vlivu sucha a definování parametrů sucha zahrnujících již zmíněnou intenzitu, dobu trvání, průběh a prostorový rozsah se používají indexy sucha jako hlavní proměnné. Časovým měřítkem těchto proměnných jsou roky, popřípadě měsíce, které jsou vhodnější pro pozorování vlivů sucha vztahujících se například k zemědělství. Tyto indexy byly vyvinuty z důvodu kvantifikace sucha a jejich hlavním účelem je stanovení počátku, konce, intenzity, četnosti výskytu a plošného rozsahu sucha. Charakteristiky indexů vlastně reprezentují vztah mezi normálovými, průměrnými hodnotami, a pozorovanými hodnotami sledované veličiny. Indexy se často vytvářejí kombinací různých parametrů charakterizujících sucho. (Mishra et Singh, 2010)

Jedním z nejčastějších a nejrozšířenějších indexů sucha je Palmer Drought Severity Index (PDSI), pro jehož stanovení jsou potřeba srážky, evapotranspirace,

odtok, půdní a hluboká infiltrace. Podle potřebných dat lze usuzovat, že tento index vytváří rovnici bilance vody pro danou oblast. (Huang et al., 2011)

Mezi jednu z nejdůležitějších charakteristik pro popis nízkých průtoků v povodí patří také základní průtokový index, Base Flow Index (BFI), který charakterizuje vliv geologie na nízké průtoky. Tento index vyjadřuje bezrozměrný poměr, který je definován jako objem základního odtoku dělený celkovým objemem v říčním toku. (Longobardi et Villani, 2008)

Další indexy sucha jsou vyčteny a popsány v článku Do-Woo et al. (2009) či v článku Kao et Govindaraju (2010). Některé používané indexy sucha mají však své slabiny, například nedostatečnou přesnost při určení začátku a konce sucha, neváženost úbytku vodních zásob v čase či nepřesný odhad parametrů pro výpočet příslušných indexů. (Blinka, 2002)

Jak už bylo zmíněno, z nízkých stavů v říčních tocích nelze nutně vyvozovat, že se jedná o sucho. Průtoky s nižšími hodnotami totiž nastávají ve stejném časovém období každoročně.

Složky, které charakterizují roční nízké stavy řek, jsou rozděleny na časové a prostorové. Mezi nejvíce využívané časové charakteristiky patří například pokles rychlosti v říčním toku z důvodu nedostatku srážek, doba trvání souvislých nízkých stavů a relativní příspěvek nízkých stavů do celkového hydrogramu daného toku. Pro vyhodnocení těchto charakteristik jsou vyžadovány souvislé časové řady. Prostorová složka se zaměřuje na regionální rozdělení charakteristik nízkých stavů a snaží se je odhadnout v povodích, kde nejsou dostupné měřené záznamy pro jejich určení. (Smakhtin, 1999)

Obě složky jsou úzce spjaty s fyzickogeografickými faktory (klíma, topografie, geologie, pedologie, atd.), které ovlivňují nízké průtoky stejně jako člověk a jeho užívání vody (kvalita a kvantita vody, zavlažování, skladování v rezervoárech, rekreace, atd.).

### ***6.3 Procesy ovlivňující nízké průtoky***

Říční průtok je výsledkem přírodních procesů, které nastávají v povodí. Povodí lze chápat jako sérii propojených nádrží, které se navzájem ovlivňují. Tyto nádrže mají tři základní funkce, plnění, které nastává během srážkové události, skladování a výtok. Akumulace vody a výtok z nádrže představuje procesy závislé na fyzickogeografických charakteristikách povodí.

Během suchého období dochází k většímu uvolňování vody z těchto nádrží a v důsledku tohoto uvolnění začíná převažovat režim nízkých stavů v říčních tocích. Režim je ovlivněn různými přírodními faktory. Tyto faktory můžeme dělit do dvou

skupin podle toho, zda se jedná o přírůstky, či ztráty v toku během suchého období roku.

K udržení vodního toku nejvíce přispívá podzemní voda, která se uvolňuje ze zásob nahromaděných během deštivých dnů. Uvolnění nastává v místě, kde se říční koryta protínají s hladinou podzemní vody. (Nelson, 2012)

Zpočátku začíná být podzemní voda ovlivňována suchem jen ve sníženém doplňování vody z nenasycené zóny půdního profilu do podzemní vody. Toto snížení se poté odráží v poklesu hladiny podzemní vody a ve sníženém výtoku. Vliv sucha na podzemní vodu může trvat v rozmezí několika měsíců až roků. Je potřeba zmínit, že množství vody v podzemní vodě se obtížně zjišťuje, tudíž i vliv sucha na podzemní vodu se hůře definuje. (Mishra et Singh, 2010)

Aby se v průběhu suchého období v říčním toku udržely nízké průtoky, musí mít zvedeň, tedy podzemní voda, dostatečnou zásobu vody a mělkou hladinu (Nelson, 2012). Průtok v říčním toku také závisí na velikosti zvodně a hydraulických vlastnostech (Pech, 2010), které udrží průtok v průběhu suché období. Nízké stavy v řekách jsou také udržovány jezery. V hornatých oblastech s výskytem sněhové pokrývky jsou pak nízké průtoky ovlivněny i táním ledu a sněhu (Timilsena et Piechota, 2008).

Vedle příspěvků vody do povodí během suchého období se lze setkat i se ztrátami, které jsou zapříčiněny evaporací ze stojatých či tekoucích vod, jiných otevřených vodních děl a mokřadů. Do ztrát je řazen průsak určitých území, infiltrace vody z toku do podzemní vody povrchovou frakturou či strukturální slabinou nebo ztráta způsobená nezpevněným naplaveninovým materiálem, které tvoří dno koryta.

Vedle přírodních procesů, které ovlivňují nízké stavy v řekách, nesmíme opomenout opět antropogenní vliv. Nízké průtoky jsou ovlivněny například zvýšeným čerpáním podzemní vody, umělým odvodňováním řek za účelem zavlažování zemědělských oblastí, zalesňováním či naopak odlesňováním příslušných oblastí a regulací říčního toku výstavbou hrází či jiných vodních děl.

#### ***6.4 Analýza nízkých průtoků***

Režim nízkých stavů v říční síti je analyzován různými způsoby. Výběr analýzy závisí na dostupnosti dat a na požadavcích týkajících se výstupové informace. Pro definování oblasti nízkých stavů je potřeba stanovit libovolnou horní mez. Horní mez je dána průměrným ročním odtokem (MAR) a je vyjádřena jako průměr dostupných průtoků časových řad. Z průměrného ročního odtoku (MAR) můžeme získat průměrný denní průtok (MDF) tím, že MAR rozdělíme podle počtu vteřin v roce. Další hydrologickou charakteristikou je medián průtoku (MF), který je vyjádřen velikostí prostřední hodnoty průtoků ze vzestupně seřazených velikostí

průtoků za danou časovou periodu, a absolutní minimální průtok (AMF) odpovídající nejnižšímu zaznamenanému dennímu odtoku. (Smakhtin, 1999)

Analyzovat nízké stavy lze i jinak než definováním oblasti, ve které se nízké průtoky nacházejí. Například se dají analyzovat křivkou FDC (flow duration curve), percentil čáry překročení (Vlnas, 2011), který ukazuje procento času, kdy se průtok v toku bude pravděpodobně rovnat nějaké stanovené hodnotě nebo ji bude převyšovat. Křivka FDC kompletně ukazuje rozmezí říčních průtoků a vyjadřuje tedy vztah mezi rozsahem a četností výskytu odtoku. Pravděpodobnost ( $P$ ), že bude stanovená hodnota překročena, lze vyjádřit vztahem, ve kterém figuruje počet zaznamenaných průměrných denních průtoků pro určité zvolené období ( $n$ ). Tyto záznamy jsou následně seřazeny sestupně, tedy od největšího zaznamenaného výtoku k nejmenšímu, a jsou jim podle toho přiřazeny pozice ( $M$ ). Výsledný tvar je dán rovnicí číslo 4. (Klingeman, 2005)

$$P = 100 \left( \frac{M}{n+1} \right) \quad (4)$$

Kromě FDC se při analýze nízkých průtoků používá čára překročení nízkých stavů (LFFC), která zachycuje část roku, kdy je stanovený průtok překročen. Obě tyto křivky jsou používány ke vzájemnému porovnávání průběhů průtoků v jednotlivých říčních tocích během suchého období. Bohužel však nedokážou identifikovat možný objemový deficit průtoků, který je vytvářen během události, která je charakterizována dlouhodobými nízkými stavy v povodí. (Ouyang, 2012)

Tento problém lze vyřešit nastavením tzv. prahové hodnoty (thresholdu), což je číslo dnů, měsíců nebo roků, kdy denní, měsíční či roční výtok zůstává pod určitým prahovým průtokem. Prahová hodnota je důležitým ukazatelem jakékoliv změny v hydrologickém systému. Významné prahové průtoky mohou být určeny z křivky FDC a to tak, že se 70 - 95% hodnot průtoků budou nacházet nad vybranou prahovou hodnotou. (Tallaksen et al., 2009; Vlnas, 2011)

Celkový objem průtoků, který je potřeba pro udržení průtoků v daném prahu, je nazýván deficitem. Tato informace je důležitá například pro účely zavlažování, výrobu elektrické energie či pro vyhodnocování zásobních kapacit v rezervoárech. (Castellarin et al., 2004)

Jak už bylo zmíněno, důležitou komponentou říčního toku je základní odtok, který je tvořen ze zásoby podzemní vody a ze zásob zpožděných zdrojů, do které je řazena mělká podpovrchová voda, jezerní voda či voda z tajících ledovců. Během období sucha je říční tok tvořen pouze touto složkou. Co se týká deštivého období, je říční tok ještě vytvářen rychlým odtokem, který odpovídá přímé reakci povodí na srážkovou událost. Jinak řečeno, říční tok je tvořen pomalou odtokovou odezvou a rychlou odtokovou odezvou. (Chapman, 1999)

Existuje mnoho separačních technik, ze kterých je získán základní odtok z celkového říčního odtoku. Tyto techniky jsou uvedeny na základě podobnosti

k Boussinesqovi rovnici a sdružují se do dvou hlavních typů. První typ předpokládá, že základní odtok reaguje na bouřkovou událost současně s povrchovým odtokem. Druhý typ je naopak založen na zpožděných zásobách v různých rezervoárech. (Szilagyí et Parlange, 1998)

Pro většinu technik je obtížné stanovit odhad načasování, rychlost vzestupu základního odtoku a určení bodu na hydrogramu, ve kterém předpokládáme, že povrchový odtok ustává. Proto se v dnešní době spíše používají metody, které jsou založeny na dlouhodobém generování hydrogramu základního odtoku (roky). V těchto metodách jsou denní průtokové časové řady rozkládány pomocí různých druhů digitálních filtrů do rychlého či základního odtoku. (Smakhtin, 1999)

Během suchého období se voda z povodí postupně ztrácí evapotranspirací a odtokem podzemní vody do říčního toku. Úbytek, který vzniká v říčním toku během suchého období, nazýváme poklesem a můžeme jej analyzovat tzv. výtokovou analýzou. V hydrogramu říčního průtoku je pak úbytek znázorněn výtokovou křivkou, jejíž tvar závisí na geologii daného povodí (hlavně na transmisivitě, schopnosti kolektoru propouštět podzemní vodu, a storativitě zvodně, schopnosti horniny přijmout či uvolnit podzemní vodu (Pech, 2010)) a na vzdálenosti říčního koryta od hranice povodí. (Tallaksen, 1995)

Každá komponenta z celkového odtoku má svoji vlastní charakteristickou výtokovou rychlost, ale rozdíly mezi jednotlivými komponentami nejsou vždy jasné. Pro režim nízkých stavů na povodí je tedy nejdůležitější základní odtok a jeho pokles, který je matematicky popisován různými výtokovými rovnicemi, ze kterých jsou příslušné modely složeny (nejčastěji exponenciální). Pokles základního odtoku byl popsán Mailletem už v roce 1905 a to pomocí rovnice číslo 5, kde  $Q_t$  představoval výtok v čase  $t$ ,  $Q_0$  byl počáteční výtok a parametrem  $k$  byla označena doba zdržení vody v povodí (Wittenberg, 1999).

$$Q_t = Q_0 e^{\left(\frac{-t}{k}\right)} \quad (5)$$

Obecně lze pak parametr výtokového modelu nazývat výtokovou konstantou. Odhad této konstanty je dán sklonem hlavní výtokové křivky, která může být například konstruována korelační metodou nebo metodou „matching strip“. (Moore, 1997)

V korelační metodě je křivka aktuálního průtoku proti předchozím  $n$  denním průtokům konstruována pro všechny nízké stavy výtokového období delší než  $N$  dnů. Druhá zmíněná metoda vytváří hlavní výtokovou křivku z překrývání jednotlivých výtokových křivek. Obě tyto metody jsou subjektivní, proto se využívají jiné alternativy, které mohou být založeny například na kovarianční analýze či na úvaze o poměru aktuálního průtoku na průtok z předchozích  $n$  dnů (Smakhtin, 1999). Tyto poměry jsou pak počítány každý den, jsou-li průtoky pod hodnotou průměrného výtoku. Recesní analýza je využívána pro krátkodobou předpověď nízkých průtoků



například v zemědělství či pro potřeby funkce vodních elektráren. (Nathan et McMahon, 1990)

Metody založené na konstruování hlavní výtokové křivky se vypořádají s problémem časové proměnlivosti mezi jednotlivými výtokovými křivkami vykreslením celkové průměrné křivky. Tato proměnlivost je dána odlišnou dobou trvání jednotlivých výtokových křivek, které jsou ovlivněny srážkovou událostí. Pro přesnější určení výtokové konstanty je vhodnější použít jednotlivé výtokové části z hydrogramu odtoku a kvantifikovat je vhodným výrazem například s použitím metody nejmenších čtverců. (Tallaksen, 1995)

Některá povodí však nemají datové záznamy o říčních průtocích či jiných průtokových charakteristikách pro analyzování jejich nízkých stavů. Důvodem může být například terénní nedostupnost povodí. V těchto případech je možné využít různých metod pro odhad charakteristik nízkých stavů. Jednou z nejvíce využívaných metod je regionální regresní přístup, který je založen na vymezení hydrologicky homogenních regionů. Tyto regiony mají podobnou odtokovou odezvu založenou na podobnosti klimatu, geologie, topografie, vegetace a půdních typů. (Clausen et Pearson, 1995)

## **6.5 Modelování sucha**

Hydrologické modelování se před několika desítkami let stalo účinným nástrojem po předpovědi extrémních hydrologických situací díky rozvoji počítačové techniky. V dnešní době se většina zahraničních i českých prací zabývá modelováním povodní, tedy reakcí povodí na extrémní příčinnou srážku a vytvářením strukturálních (technických) či nestructurálních (netechnických) opatření přímo nebo v blízkosti povodí z důvodu regulace množství vody v krajině. Strukturální opatření jsou technická opatření měnící hydrologickou bilanci v povodí. Naproti tomu nestructurální opatření představují nástroje legislativně právní povahy. Příkladem může být úprava manipulačních řádů na stávajících vodních nádržích či jejich změna ve způsobu využívání. Tyto opatření mají pouze dočasný charakter na rozdíl od strukturálních opatření, jež jsou zas naproti tomu finančně náročné. Nestructurální opatření by ještě k tomu měly splňovat požadavky na ekologický způsob řešení nedostatku vody v krajině. Snahou je tedy navrhnout taková strukturální a nestructurální opatření, aby na suchem zranitelných oblastech nenastal předpokládaný pokles průtoků, nebo se projevil v menším rozsahu s minimálními dopady na ekologickou stabilitu povodí a vodohospodářské využití oblasti. (Danihelka et al., 2012; Querner, 1997)

Existují dva základní přístupy pro modelování sucha. První hodnotí a předpovídá vliv změn v krajině na pokles průtoků na povodích v podmínkách, při kterých se mění klima jen zanedbatelně. Naopak druhý přístup je založen na predikci vlivu změn klimatu na odtokový režim v povodích. (Mishra et Singh, 2010)

## 7. Hydrologické modely

Srážko-odtokový proces (kapitola 5.) bývá popsán matematickými modely, které popisují zjednodušeně kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními veličinami určitého hydrologického systému, který je definován jako systém převážně fyzikálních procesů. Tyto procesy působí na vstupní proměnné a transformují je ve výstupní. Matematicky se jedná o vyjádření algoritmu řešení soustavy rovnic, který popisuje strukturu a chování hydrologického systému během srážko-odtokového procesu. (Pavelková Chmelová et al., 2009)

Klasifikace hydrologických modelů vychází z několika principů (WMO, 1974). Jedním z principů je účel aplikace modelu, který modely rozděluje do třech kategorií, na modely používané v operativní hydrologii (postup povodňové vlny), modely aplikované pro návrhovou a projekční činnost v oblasti vodního hospodářství (protipovodňová ochrana) a na modely využívané ve výzkumu (další vývoj modelu). (Daňhelka et al., 2003)

Druhý princip je spojen s klasifikací z hlediska typu systému a hydrologického procesu. Dle typu systému lze modely dělit na elementární, do kterých je řazena například říční síť, jezero či nádrž, a komplexní, které se týkají celého povodí. Do klasifikace modelů jsou také zahrnuty hydrologické procesy a s nimi související proměnné (vlhkost půdy, evapotranspirace, kvalita vody atd.). (Jeníček, 2012)

Další princip je vztažen ke klasifikaci modelů podle míry časové a prostorové diskretizace. Míra časové diskretizace je určována podle způsobu použití modelu, tzv. zda se například jedná o modelování šíření znečištění, kde se používá hodinový až denní krok, nebo zda se týká modelování, kde se využívají bilanční modely, u kterých může být délka výpočtového kroku vyšší (týden, měsíc).

Časová diskretizace může také vycházet z časové kontinuity výpočtu, podle které dělíme modely na kontinuální a epizodní. Kontinuální modely simulují delší i víceleté časové období. Naopak epizodní modely simulují jen dílčí události týkající se například povodní. Jejich přesná definice vyjadřuje tyto modely jako modely simulující krátký časový úsek srážko-odtokového procesu, který je vymezený jednou uzavřenou povodňovou událostí. (Máca, 2008)

Modely z hlediska prostorové diskretizace, která vytváří jejich vhodnou topologii, můžeme dělit na celistvé a distribuované. V celistvém modelu jsou parametry charakterizující povodí vztahovány k celému nebo dílčímu povodí. Příkladem takového modelu může být HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centre – Hydrologic Modelling System). (Cling et Gupta, 2009)

Distribuované modely jsou naopak založeny na distribuovaných parametrech, protože jsou schopny brát v úvahu variabilitu parametrů v prostoru. Povodí je tedy rozděleno sítí (gridem) na menší elementární odtokové plochy, pro které je určena

charakteristická hodnota parametru. Obecně ale distribuované modely neposkytují oproti celistvým modelům lepší simulace odtoků v povodí. (Connolly et al., 1997)

Kombinací celistvých a distribuovaných modelů získáme semi-distribuované modely, jejichž princip spočívá v rozdělení povodí na elementární odtokové plochy, jež mají homogenní prostorové parametry dané například stejným vegetačním pokryvem či půdním druhem. (Ajami et al., 2004)

Poslední princip souvisí s klasifikací modelů podle stupně kauzality, která je vyjádřena vztahem mezi příčinou a důsledkem. Podle tohoto kritéria se modely dělí na stochastické a deterministické.

Stochastické modely neobsahují vazbu mezi příčinou a důsledkem. Tyto modely jsou rozděleny na pravděpodobnostní a modely založené na generování časových řad. U pravděpodobnostních modelů jsou jednotlivé hydrologické parametry charakterizovány určitým pravděpodobnostním rozdělením. Druhou skupinu modelů je možné použít při extrapolaci časových řad pozorovaných parametrů, přičemž se zachovávají jejich statistické charakteristiky. Do této skupiny se například řadí ARMA modely (Autoregressive Moving Average). Výhodou těchto modelů je autokalibrace, autooptimalizace a nezávislost na fyziogeografických charakteristikách daného území (svažitost, vegetace apod). (Jeníček, 2012)

Deterministické modely jsou popsány vztahem mezi výstupními veličinami, tedy závislými proměnnými, a vstupními stavovými veličinami, tedy nezávislých proměnnými:  $y = f(x, a)$ , kde  $a$  je vektor složený z parametrů nebo koeficientů popisující chování systému. (Daňhelka et al., 2003)

V komplexním deterministickém modelu nelze vždy postihnout veškeré vstupní parametry a proměnné, které představují důležité komponenty ovlivňující výstupní veličiny. Takový model bývá zatížen určitou chybou, která je složena z chyby měření veličin, chyby parametrů modelu a chyby struktury modelu (Lettenmaier, 1984). Zmíněné chyby jsou popsány určitým pravděpodobnostním rozdělením, pomocí něhož lze stanovit meze spolehlivosti tzv. nejistotu modelu (Heuvelink, 1999).

Čím je tedy model složitější, tím se více přibližuje realitě a nejistota ze struktury klesá. Naopak, když se zvyšuje počet parametrů, tak se zároveň s tím zvyšuje i nejistota modelu. Nejlepším řešením je proto nalezení kompromisu mezi strukturou a počtem parametrů. (Jakeman et Hornberger, 1993)

S nalezením kompromisu souvisí termín Ockhamova břitva. Tento termín je založen na snaze vysvětlit neznámé jevy známými principy a teprve pokud to nejde, zavádět nové (Manfred, 2003), tzv.: „Entity se nemají množovat více, než je nutné“. Tento termín se začal šířit prostřednictvím anglického františkána Viléma Ockhama už ve 13. století. (Máca, 2012)

Hlavními deterministickými modely jsou hydrodynamické modely, konceptuální a black-box modely. Hydrodynamické modely jsou založeny na fyzikálním popisu srážko-odtokového procesu, berou tedy v úvahu zákony o zachování hmoty, hybnosti a energie. Mohou využívat teoretické poznatky z termodynamiky, hydrodynamiky, chemie či biologie. Tyto modely jsou též označovány jako white-box modely. (Jeníček, 2012)

Opakem těchto modelů jsou black-box modely, které používají pouze empiricky odvozený vztah mezi vstupními a výstupními veličinami a neberou v úvahu již zmíněné zákony. Mezi nejnámější black-box modely patří neuronové sítě, které se umí učit na vzorech chování, a modely jednotkových hydrogramů.

Mezi hlavní deterministické modely také patří grey-box modely, tzv. konceptuální modely, kterým je věnována tato diplomová práce a jsou popsány v následující kapitole (8.) spolu s vybranými modely simulujícími základní odtok povodí.

## 8. Konceptuální modely (grey-box modely)

Konceptuální hydrologické modely berou v úvahu fyzikální zákony, které se snaží do modelu aplikovat ve zjednodušené (koncepční) formě, a obsahují i určité množství empiricky odvozených vztahů. Jinak řečeno, jsou založeny na fyzikálním a empirickém přístupu, a tak jsou někdy označovány jako „grey-box“ modely. Tyto modely potlačují prostorovou složku a zaměřují se na změnu stavových parametrů v určitých reprezentativních bodech. Proto jsou řešeny pomocí obyčejných diferenciálních rovnic. (Daňhelka et al., 2003)

Model je sestaven na základě formulace konceptu, který je vztažen k modelovanému systému. Konceptem je myšlena zjednodušená reprezentace povodí soustavou propojených nádrží a dalších transformačních prvků povodí (Máca, 2010).

Základem konceptuálního hydrologického modelu je tedy nádrž. Stav nádrže je charakterizován hodnotou zásoby vody a nádrž jako taková slouží k dlouhodobému zadržení vody. V systému jsou dále definovány toky mezi nádržemi, které mohou být ovlivněny nejen stavem nádrží, ale i jinými vnějšími podmínkami. Změna zásoby vody v nádrži je vyjádřena jako rozdíl mezi tokem vstupujícím do nádrže a tokem vystupujícím z nádrže. Nejčastěji je takto definovaná změna zásoby v nádrži popsána diferenciální rovnicí. (Jeníček, 2012)

Dynamika hydrologického systému je dána rovnicí číslo 6, kde  $i$  vyjadřuje nekonečně malý přítok a  $q$  nekonečně malý průtok, který je funkcí zásoby a příslušných parametrů popisující daný konstituční vztah, který vyjadřuje vztah mezi zásobou a odtokem. Konstituční vztah popisující chování hydrologického systému je obecně popsán rovnicí číslo 7, kde  $S$  je zásoba v nádrži a  $\mathbf{p}$  je vektor parametrů nádrže. (Máca, 2011)

$$i - q = \frac{dS}{dt} \quad (6)$$

$$q = f(S, \mathbf{p}) \quad (7)$$

### 8.1 Model lineární nádrže

Konstituční vztah:

$$Q = aS, \quad (8)$$

kde  $Q$  je odtok,  $S$  je zásoba vody v nádrži a  $a$  je parametr lineární nádrže. Tento parametr bývá též značen  $k$ , což je součinitel zásobnosti. Lze ho vyjádřit jako obrácenou hodnotu doby zdržení ( $T_{res}$ ).

Z více samostatných lineárních nádrží mohou být získány komplexní modely nádrží, jejichž zapojení nádrží může být sériové nebo paralelní, které je ještě děleno podle časově konstantního či časově variabilního přivaděče. (Máca, 2011)

## 8.2 Model nelineární nádrže

Konstituční vztah:

$$Q = aS^b, \quad (9)$$

kde  $Q$  je odtok,  $S$  je zásoba vody v nádrži a  $a$  a  $b$  jsou parametry nelineární nádrže. Parametr  $a$  má stejný význam jako u lineární nádrže.

## 8.3 Model nádrže s exponenciálním odtokem

Konstituční vztah:

$$Q = a \exp\left(\frac{S}{b}\right), \quad (10)$$

kde  $Q$  je odtok z nádrže,  $S$  je zásoba vody v nádrži a  $a$  a  $b$  jsou koeficienty exponenciální nádrže. Parametr  $a$  má specifický význam a to takový, že když je zásoba vody v nádrži rovna nule, pak je odtok z nádrže roven přímo parametru  $a$ . Parametr  $b$  zase kontroluje sklon sestupné větve hydrogramu. Exponenciální zásoba se odlišuje od lineární zásoby dvěma hlavními rozdíly. První rozdíl je ten, že u lineární nádrže má parametr  $a$  rozměr času, kdežto u exponenciální nádrže má parametr  $a$  stejný rozměr jako průtok  $Q$  a parametr  $b$  je pouze kladné číslo, jehož rozměr je shodný s rozměrem zásoby  $S$ . Druhý rozdíl je v zásobě  $S$ . Zásoba v lineární nádrži nabývá pouze kladných hodnot, kdežto zásoba v exponenciální nádrži nabývá hodnot od  $-\infty$  do  $+\infty$ . Exponenciální zásoba je v zásadě reprezentována bezedným rezervoárem, kterým je vysvětlen důvod, proč nemůžeme brát počáteční hodnotu zásoby  $S$ , pro kterou je odtok  $Q$  roven nule. (Claude et al., 2003)

## 8.4 BILAN

Model BILAN, který slouží k vyhodnocení jednotlivých složek hydrologické bilance na povodích, byl vyvinut ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka v Praze. Mezi vstupní data, která jsou v měsíčních intervalech, patří srážkové úhrny, průměrné teploty vzduchu, průměrné vlhkosti vzduchu pro výpočet výparu a průměrné výšky odtoku. Data průměrné výšky odtoku jsou nutná pro kalibraci daného modelu. (Hanel et al., 2012)

Jak už bylo zmíněno, modelem jsou vyjadřovány základní bilanční vztahy jak na povrchu povodí, tak v nenasycené zóně (v zóně aerace) a v zóně podzemní vody. Hydrologické procesy, například evapotranspirace, vytváření povrchového odtoku a základního odtoku, jsou popisovány sadou empirických vztahů. (Van Lanen et al., 1997)

Pomocí tohoto modelu se modeluje potenciální evapotranspirace v závislosti na sytostním doplňku vypočítaném z teploty a relativní vlhkosti vzduchu, dále

územní výpar, infiltrace, zásoba vody ve sněhu nebo v půdě a zásoba podzemní vody. Celkový odtok je dán součtem dvou složek přímého odtoku a jednou složkou základního odtoku protékajícího uzávěrovým profilem daného povodí. Model má šest volných parametrů (maximální zásoba vody v půdě, tání sněhu, přímý odtok, perkolace v létě a v zimě a základní odtok), pro jejichž určení se používá optimalizační program, který hledá vhodnou hodnotu parametru tak, aby byla dosažena minimální hodnota zvoleného kritéria, podle které se určuje shoda mezi simulovanými a měřenými odtoky. (Vaculín et Soukalová, 2003)

V modelu BILAN se nacházejí tři typy režimu výpočtu, letní, zimní a tání sněhu. Základem pro určení tohoto režimu je teplota v aktuálním měsíci (měsíce letní a měsíce tání mají aktuální teplotu větší nebo rovnu nule, naopak měsíce zimní mají teplotu zápornou). (Vizina, 2008)

### **8.5 HBV model a PDM model**

HBV model (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model) byl vyvinut v sedmdesátých letech minulého století ve Švédsku pro krátkodobou i kontinuální simulaci odtoku z povodí. Vedle modelování odtoku je schopen modelovat i znečištění vod. Bohužel v České republice nemá tak velké uplatnění jako v zahraničí, kde byl aplikován do více než 40 zemí s různými klimatickými podmínkami. (Carlsson, 2006)

Hlavními složkami tohoto modelu jsou čtyři moduly, sněhový modul, modul půdní vlhkosti, modul geneze odtoku a modul výpočtu nádrže. Hlavní výpočetní procedura, která vytváří odtok, se odehrává v modulu půdní vlhkosti. Tato procedura je řízena třemi parametry, parametrem, který řídí změnu půdní vlhkosti (BETA), limitem pro potenciální evapotranspiraci (LP) a maximální hodnotou obsahu vody v půdě (FC). Tyto parametry se kalibrují manuálně. (Daňhelka et al., 2003; Jeníček, 2005)

Modul geneze odtoku je založen na jednotkovém hydrogramu, který je definován jako hydrogram, který má jednotkový objem a je způsoben efektivním deštěm také o jednotkovém objemu, který rovnoměrně zasáhl povodí (Máca, 2010). Model používá jako vstup měřené srážky a potenciální evapotranspiraci. Vedle těchto vstupů jsou potřeba i hydrografické, půdní či jiné charakteristiky daného povodí. Povodí je rozděleno do třech nádrží, půdního rezervoáru, rychle reagující rezervoáru a pomalu reagujícího rezervoáru, které plní zároveň funkci stavových proměnných. (Ferket et al, 2010)

Stejně vstupy jako HBV model, tedy srážková data a potenciální evapotranspiraci, má model PDM (Probability Distributed Model), pomocí kterého je povodí rozčleněno do několika nádrží (půdní, povrchový rezervoár a rezervoár podzemní vody) s různou kapacitou zásobního prostoru, která může být popsána pravděpodobnostním rozdělením. (Moore, 2007)

## **8.6 SAC SMA (Sacramento-Soil Moisture Accounting)**

Tento celistvý srážko-odtokový model je v České republice součástí knihovny modelovacích technik předpovědního systému Aqualog, který se používá k operativní předpovědi pro Labe a Vltavu (ČHMÚ). Byl vyvíjen od poloviny sedmdesátých let minulého století národní meteorologickou službou (NWS) v USA a je součástí knihovny modelovacích technik systému NWSRFS (National Weather Service River Forecast System). (Burnash, 1995; Jeníček, 2005)

Model Sacramento parametrizuje charakteristiky půdní vlhkosti. Pro optimalizaci těchto parametrů se využívá buď manuální, nebo automatická optimalizace. Vstupem do tohoto modelu jsou hydrologické charakteristiky půdy jako je obsah pórů, polní kapacita či hydraulická vodivost. Model dále dělí dané povodí do vrchní a dolní zóny. Tyto zóny jsou propojeny systémem nádrží. Mezi základní komponenty tohoto modelu patří evapotranspirace, kapilárně vázaná voda, volná voda, povrchový odtok, horizontální a vertikální odtok. (Daňhelka et al., 2003)

Model člení celkový odtok z povodí na pět dílčích odtokových procesů, přímý odtok z dočasně nepropustných ploch, povrchový odtok při překročení kapacity vrchní nádrže skládající se z vázané a volné vody, kdy je nejdříve plněna část nádrže s vázanou vodou a po jejím naplnění se plní část s volnou vodou, dochází zde i k perkolaci vody do dolní zóny, dále interflow vznikající v horní vrstvě nesaturované zóny, doplňkový a primární základní odtok tvořící celkový základní odtok. První tři dílčí odtokové procesy společně s částí celkového základního odtoku tvoří celkový přítok distribuovaný do říčního toku. Zbytek základního odtoku vytváří podpovrchový odtok. (Máca, 2011)

## **8.8 ChiMeRa (Conceptual Hydrological Modeling in R)**

ChiMeRa je prostředí, které bylo vyvinuto na univerzitě ve Wageningenu, pro sestavení celé řady různých konceptuálních modelů v programu „R“, což je jazyk a prostředí pro statistické výpočty a grafiku podobné jazyku „S“. Nabízí typ jazyka, ve kterém mohou být všechny konceptuální modely definovány kombinací základních prvků, jako jsou různé typy nádrží a toky mezi nimi (spojení s bájnou starořeckou obludou Chimerou (Kučera, 2006)). Prostředí je také schopno definovat prahové chování jednotlivých zásobních prostorů v nádržích. Výpočet prahového chování je ošetřen speciálním algoritmem tak, aby nedocházelo k numerické nestabilitě výpočtu. Nadefinované konceptuální modely jsou následně řešeny jednotlivými numerickými schémata (Eulerova metoda). Prostředí také poskytuje sofistikovaný přístup analytického výpočtu citlivosti jednotlivých modelů v kombinaci s optimalizací parametrů robustním lokálním algoritmem Levenberg-Marquardt, pro které je možno nastavit meze parametrů. (Máca et al., 2011b; Máca et al., 2011a)



## 9. Optimalizace parametrů konceptuálních hydrologických modelů

Jedním z nástrojů, které umožňují snižovat nejistotu spojenou s hydrologickým modelováním, je optimalizace parametrů hydrologických modelů. Jestliže je model kalibrován numerickou optimalizací jedná se o inverzní modelování. Základní problém, který doprovází optimalizace, je hledání extrémů objektivní funkce.

Objektivní funkce v hydrologickém modelování nejčastěji porovnává shodu mezi simulovanou a měřenou časovou řadou vybrané veličiny, která popisuje určitý hydrologický proces. Objektivní funkce tedy používá rezidua pozorovaných a simulovaných hodnot. Příkladem objektivní funkce může střední kvadratická chyba reziduí (MSE, rovnice č. 11) a střední absolutní chyba (MAE, rovnice č. 12), které jsou používány v modelu BILAN. Další objektivní funkcí může být kritérium Nash – Sutcliffe (NS, rovnice č. 13), kde  $Q_m$  jsou měřené odtoky,  $Q_s$  jsou simulované odtoky a  $N$  je celkový počet zaznamenaných odtoků.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_m(i) - Q_s(i))^2 \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_m(i) - Q_s(i)| \quad (12)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_m(i) - Q_s(i))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_m(i) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_m(i))^2} \quad (13)$$

Aby bylo dosaženo, co možná nejmenších reziduí mezi měřeními a simulovanými daty, je potřeba vhodně nastavit parametry daného hydrologického modelu. Jeden hydrologický model je jednoznačně určen jednou sadou parametrů, které by měly splňovat požadavek vzájemné nezávislosti. Počet aktuálně optimalizovaných parametrů totiž určuje dimenzi parametrizovaného prostoru. Optimalizace parametrů hydrologických modelů většinou spočívá v sestavení posloupnosti hydrologických modelů s různými sadami parametrů  $P_1, \dots, P_{iter}$ , která konverguje k optimální hodnotě hledané objektivní funkce (Máca, 2012a).

### 9.1 Lokální a globální optimalizační algoritmy

Podle způsobu prohledávání parametrického prostoru jsou optimalizační algoritmy hydrologických konceptuálních modelů rozděleny na lokální a globální.

Lokální algoritmy jsou schopny prohledávat parametrický prostor pomocí gradientu objektivní funkce. Tento způsob prohledávání je výhodný z hlediska rychlosti výpočtu a časové nenáročnosti. Jeho nevýhodou je, že velmi často místo globálního minima objektivní funkce nalezne lokální, což vede ke špatnému určení hledaných parametrů.

Naproti tomu globální optimalizační algoritmy dokážou lépe prohledávat parametrický prostor, a tím i úspěšně nalézt globální optimum. Globální optimalizační algoritmy totiž uplatňují opatření, která brání konvergenci k lokálnímu optimu, a tím zvyšují pravděpodobnost nalezení globálního optima. Hlavním cílem globální optimalizace je tedy nalezení nejlepšího možného řešení pro daný problém. (Weise, 2009)

Mezi lokální algoritmy například patří metoda nejrychlejšího vzestupu či poklesu založená na hledání směru a vhodné délky kroku v určeném směru pro nalezení optima, metoda sdružených gradientů, Newtonova metoda neboli metoda tečen a Levenberg-Marquardtův algoritmus založený na určení minima nelineární funkce. (Nocedal et Wright, 2000)

Rozšířenou skupinou globálních optimalizačních algoritmů jsou postupy řazené do skupiny evolučních algoritmů, kterou tvoří genetické algoritmy, diferenciální evoluce, evoluční strategie a evoluční programování. Tyto postupy jsou založeny na nalezení optima prostřednictvím práce s populací modelů. Populace modelů se vyvíjí iteračním způsobem, kdy se v průběhu tohoto procesu pomocí uvedených algoritmů zlepšuje hodnota objektivní funkce u jednotlivých členů populace. V rámci jedné iterace dochází k tomu, že rodičovská populace modelů je pomocí mechanismů optimalizačního algoritmu změněna na novou populaci modelů, potomků. Pokud mají nově generované modely, potomci, kvalitnější hodnotu dané objektivní funkce než jejich rodičovské populace, stávají se donory pro další iteraci. (Máca, 2012a)

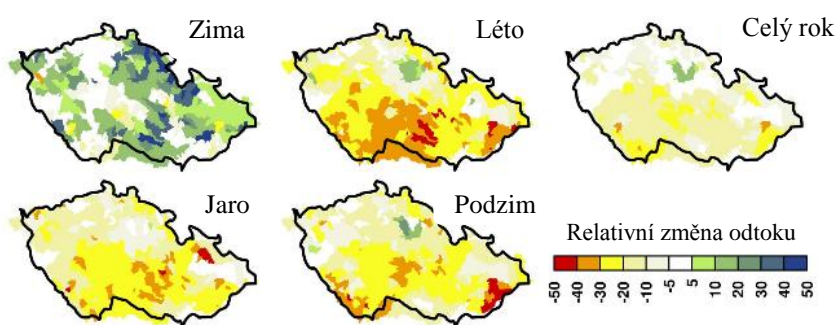
Existuje mnoho variant globálních optimalizačních algoritmů. Jeden z nejefektivnějších algoritmů, který využívá rozdělení populací na sub-populace a je tvořen mechanismem založeným na promíchávání populace modelů, tvoří jádro metody SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method) (více v kapitole 13.). Tato metoda je účinná a efektivní optimalizační technika pro kalibrování hydrologických modelů, která byla vyvinuta Duanem v roce 1992 na univerzitě v Arizoně. (Duan et al., 1994)

## 10. Klimatické změny ovlivňující vodní režim v České republice

Změna klimatu způsobená převážně zvyšováním oxidu uhličitého v atmosféře je v dnešní době jedním z nejvíce diskutovaných globálních ekologických problémů, proto by neměla být opomenuta ani v této práci z důvodu vlivu na vodní režim v České republice v posledních desetiletích (Peláková et Boersema, 2006), kdy dochází k postupnému zvyšování teplot během celého roku, poklesu letních, růstu zimních a stagnaci ročních srážek (Hanel et al., 2012).

Pro zjištění možného dopadu klimatických změn na Českou republiku jsou používány globální klimatické modely (Global Circulation Models). Tyto modely jsou schopny předpovídat možný vývoj klimatických změn, který bude ovlivňovat vodní režim v České republice. Tyto klimatické změny mají rozdílný dopad v různých regionech v závislosti na jejich přírodních podmínkách. Těmito modely bylo například zjišťováno, jak se za dalších 50 až 100 let významně sníží průměrné říční průtoky a jak výrazně klesne minimální výtok na většině povodí. Tento fakt, by mohl mít dopad na funkci rezervoárů jako vodních zdrojů pro lidstvo a jeho potřeby. Podle této předpovědi je nejvíce citlivá ke klimatickým změnám jižní část České republiky, přesněji řečeno, Jihočeské pánve. (Kašpárek et Peláková, 2006)

Dopad klimatických změn na vodní režim se odráží ve vodní bilanci v jednotlivých povodích. Povodí je totiž bráno jako systém, jehož vstupy jsou atmosférické srážky, teplota vzduchu a další meteorologické proměnné, které významně ovlivňují evapotranspiraci. Výstup z tohoto systému je pak dán celkovým odtokem. Na obrázku číslo 3 je vyobrazena relativní změna celkového odtoku v České republice pro celý rok a pro jednotlivá roční období.



Obr. č. 3: Relativní změny odtoku v roce a v jednotlivých ročních obdobích na území České republiky (Hanel et al., 2012)

Vedle zvyšování průměrné teploty vzduchu z důvodu změn klimatu dochází i ke změnám v sezonním rozložení srážek. I když je srážka nejdůležitější proměnnou pro vyhodnocení vodní bilance a její změna je z hlediska působení měnícího se klimatu v dlouhodobém průměru zanedbatelná, její sezonní změnu nelze opomenout

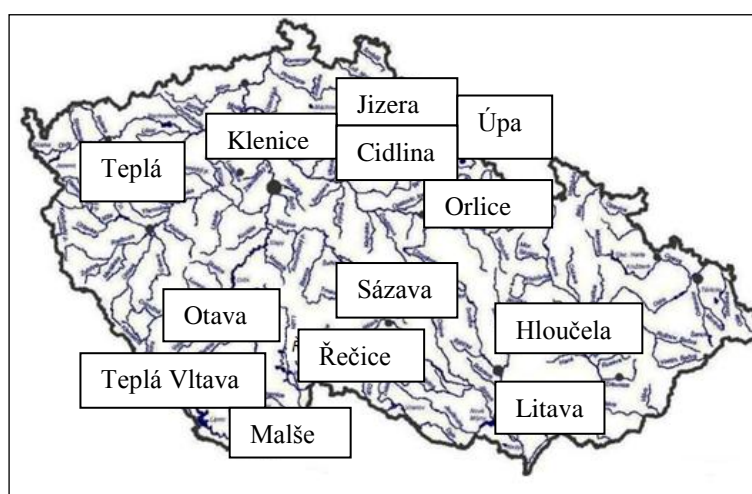
z důvodu většího výskytu srážek v zimě, nikoli na jaře, jako tomu bývalo v minulosti. V důsledku zvyšování teploty dochází v České republice k posunu doby tání sněhu z dubna na leden až únor. (Hanel et al., 2012)

Další důležitou proměnnou při určování vodní bilance na povodí je evapotranspirace, která převyšuje odtok na většině území České republiky. Mezi hlavní složky, které ovlivňují evapotranspiraci v podmínkách, které panují na území České republiky, patří energie daná převážně teplotou vzduchu a dostupnost vody ze srážek nebo z půdy. (Peláková et Boersema, 2006)

Kombinace možného zvyšování emisí (oxidu uhličitého) a citlivosti klimatu na změnu teploty zvýšenou o 1,5°C (EC1L) nebo o 4,5°C (EC2H) je dána studií Kašpárka a Pelákové (2006), kteří s použitím příslušných modelů (BILAN, SAC-SMA model, atd.) předpovídají změny teploty vzduchu, srážek a změny v celkovém odtoku do roku 2050 z dat vztahujících se k padesáti vybraným povodím v různých částech České republiky. Zjistili například, že by se celkový odtok v povodí do roku 2050 mohl snížit na 80 – 94% (EC1L) nebo na 57 – 86% (EC2H). Celkový odtok se tak díky sezonní distribuci srážek může během jara, léta a podzimu snížit až na 10 – 20% (EC1L) v porovnání s dvacátým stoletím. Naopak v zimním období se odtok může zvyšovat kvůli vzrůstající teplotě vzduchu způsobující tání sněhu či z důvodu zvýšeného výskytu deštivých srážek oproti sněhovým.

## 11. Srážko-odtoková data vybraných povodí

Data byla získána z Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka v Praze pro povodí řek Cidliny, Hloučely, Jizery, Klenice, Litavy, Malše, Orlice, Otavy, Řečice, Sázavy, Teplé, Teplé Vltavy a Úpy (obr. č. 4). Zaznamenané výšky odtoků  $H_o$  [mm] v jednotlivých povodích byly statisticky zpracovány a jsou uvedeny v tabulce číslo 1. Statistické charakteristiky se týkaly minima, dolního kvartilu (25% zaznamenaných dat má hodnotu menší než dolní kvartil  $Q_{25}$ ), mediánu, průměrné hodnoty, horního kvartilu (75% zaznamenaných dat má hodnotu menší než horní kvartil  $Q_{75}$ ), maxima a směrodatné odchylky ze zaznamenaných výšek odtoků ve vybraných povodích. Je nutno podotknout, že se povodí lišila z hlediska počtu zaznamenaných dat, což mohlo ovlivnit dané hodnoty statistik.



Obr. č. 4: Řeky použité pro analýzu sestupných větví hydrogramu (Anonym, 2013)

Statistika výšek odtoku $H_o$ [mm]	Minimum [mm]	Dolní kvartil [mm]	Medián [mm]	Průměrná hodnota [mm]	Horní kvartil [mm]	Maximum [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
Řeky							
<i>Cidlina</i>	0,000	0,131	0,245	0,510	0,518	9,628	0,811
<i>Hloučela</i>	0,001	0,110	0,232	0,473	0,528	17,87	0,846
<i>Jizera</i>	0,142	1,152	1,725	2,969	3,166	108,7	3,758
<i>Klenice</i>	0,030	0,324	0,487	0,699	0,817	18,68	0,689
<i>Litava</i>	0,005	0,081	0,145	0,232	0,252	11,62	0,387
<i>Malše</i>	0,030	0,300	0,484	0,709	0,821	55,04	0,980
<i>Orlice</i>	0,127	0,681	1,147	1,839	2,105	59,83	2,270
<i>Otava</i>	0,113	1,033	1,503	2,155	2,462	42,15	2,082
<i>Řečice</i>	0,005	0,122	0,225	0,422	0,485	21,13	0,702
<i>Sázava</i>	0,033	0,300	0,510	0,825	0,941	23,37	1,035
<i>Teplá</i>	0,009	0,211	0,410	0,785	0,852	18,88	1,226
<i>Teplá Vltava</i>	0,164	0,750	1,098	1,526	1,823	33,43	1,380
<i>Úpa</i>	0,186	0,734	1,100	1,480	1,839	17,09	1,157

Tab. č. 1: Statistické charakteristiky zaznamenaných výšek odtoků  $H_o$  na vybraných povodích České republiky

Data výšek odtoků z jednotlivých povodí byla použita pro analýzu sestupných větví hydrogramu odtoku pro vybrané konstituční vztahy, pomocí kterých byla generována pomalá odtoková odezva v povodí. Zvolené konstituční vztahy se týkaly modelu lineární nádrže (rovnice č. 8), nelineární nádrže (rovnice č. 9) a nádrže s exponenciálním odtokem (rovnice č. 10).

V první části analýzy byl vyhodnocen vztah mezi základním okamžitým odtokem ( $Q$ ) daný výškou odtoku  $H_0$  a zásobou ( $S$ ) nelineární nádrže, tzv.  $Q$ - $S$  vztah, a byly zjištěny hodnoty parametrů v příslušném konstitučním vztahu pro nelineární nádrž ( $a$ ,  $b$ ) v rámci jednotlivých povodí pomocí lokálního optimalizačního algoritmu. Pro tuto analýzu byl použit postup podle Torfse (2009). Ve druhé části analýzy byl použit konstituční vztah pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže. Pro jednotlivá povodí byly zjišťovány hodnoty zvolené objektivní funkce, počáteční zásoby podzemní vody ve vybraných sestupných větvích a parametry vyskytující se v konstitučních vztazích použitých modelů za pomoci globálního optimalizačního algoritmu Shuffled Complex Differential Evolution (SCDE).

### **11.1 Výběr dat sestupných větví hydrogramů odtoku**

Sestupné větve hydrogramu odtoku v povodích byly vybrány podle porovnávání velikostí jednotlivých výšek odtoků v časové řadě. Následovala-li totiž v časové řadě výška odtoku s hodnotou větší než v předchozím záznamu, byla automaticky vytvořena nová vlna.

Vedle toho, že následující výška odtoku v jedné sestupné větvi musela být menší než předcházející, byla stanovena další podmínka týkající se minimální délky této sestupné větve. Tímto způsobem se pak rozdělila data jednotlivých povodí podle sestupných větví, kdy každá větev i samotná výška odtoku ve větvi měla své číslo podle pozice v časové řadě nebo v sestupné větvi.

V první části analýzy byla k těmto dvěma hlavním podmínkám přidána ještě prahová hodnota výšky odtoku omezující shora sestupnou větev hydrogramu a hodnota povolující mírnou oscilaci na sestupné větvi mezi dvěma zaznamenanými odtoky v rozmezí 1-5%.

Hodnoty minimální délky sestupné větve, prahové hodnoty a hodnoty povolující oscilaci na sestupné větvi byly voleny individuálně vzhledem k jednotlivým povodím a jejich zaznamenaným výškám odtoků.

Po vygenerování jednotlivých větví splňujících dané podmínky, byly tyto větve nejprve testovány modelem nelineární nádrže a poté optimalizovány globálním optimalizačním algoritmem Shuffled Complex Differential Evolution (SCDE), podle příslušných konstitučních vztahů pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže.

## **12. Analýza sestupných větví hydrogramu dle Torfse (2009)**

Pro identifikaci parametrů vybraného konstitučního vztahu vztahujícího se k nelineární nádrži, pomocí které je generována pomalá odtoková odezva povodí, byl pro jednotlivá povodí vytvořen soubor sestupných větví splňující již zmíněné podmínky o výškách odtoků, minimální délce sestupné větve, prahové hodnotě a hodnotě povolené oscilace na sestupné větvi.

Na tomto vygenerovaném souboru dat byla testována lineární nádrž představující podzemní odtokovou odezvu daného povodí. Při tomto testu bylo sledováno, zda soubor sestupných větví po logaritmické transformaci vykazuje přímkovou závislost rozdílu  $\ln(Ho[0]) - \ln(Ho[i])$  na čase. (Máca, 2012b)

Dále byly pro každý úsek sestupné větve stanoveny zásoby za pomoci tvorby dvojic  $\{Ho[i], S[i] - S[0]\}_{t=1,2,\dots,N}$  a za předpokladu nulové počáteční zásoby  $S[0] = 0$ . (Máca, 2012b)

Na závěr této analýzy byly identifikovány počáteční zásoby a parametry nelineární nádrže pro jednotlivé úseky sestupných větví hydrogramu odtoku pomocí řešení inverzní úlohy, pro kterou byl použit algoritmus založený na nelineární minimalizaci sumy čtverců reziduí, tzv. „port“ algoritmus, který je součástí programovacího jazyka „R“. (Máca, 2012b)

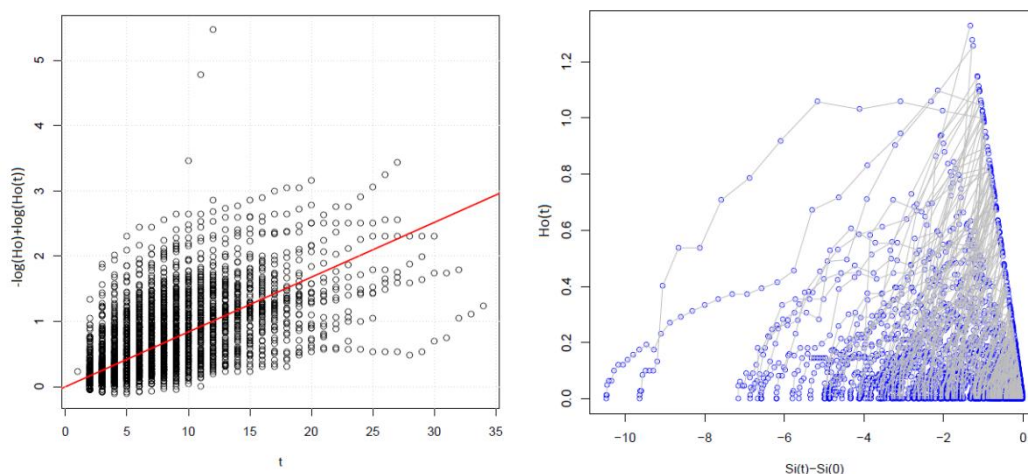
### **12.1. Výsledky první části analýzy**

Princip založený na automatické identifikaci podzemní odtokové odezvy byl aplikován na třinácti povodích České republiky. Z každého povodí byly vybrány sestupné větve v závislosti na zvolené minimální délce sestupné větve v jednotkách dní, prahové hodnotě výšky odtoku dané v milimetrech a hodnotě povolující mírnou oscilaci na sestupné větvi.

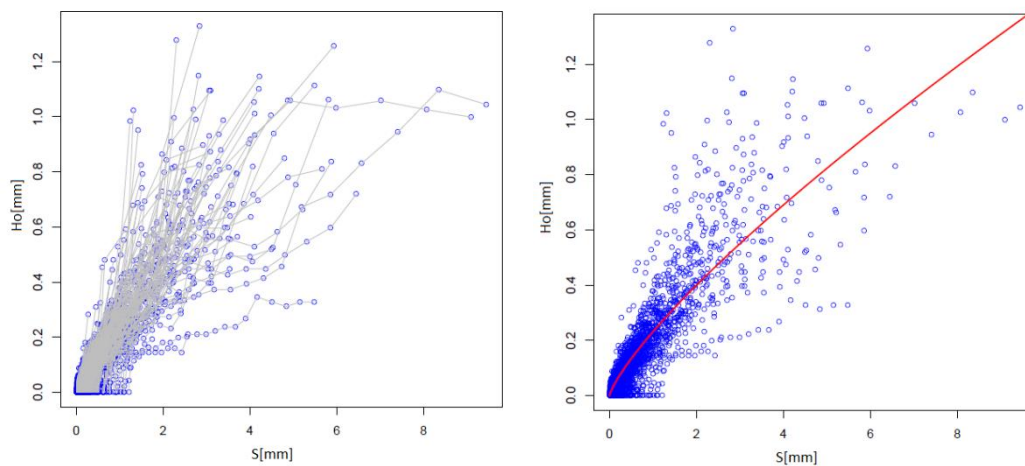
Výsledky jsou pro každé povodí dány čtyřmi obrázky, testem linearit odtokové odezvy, neposunutými a posunutými sestupnými větvemi hydrogramu odtoku a výsledným Q~S vztahem pro jednotlivá vybraná povodí, ve kterém  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $Ho$  v jednotkách milimetrů. Jednotlivé body vytvářející posunuté sestupné větve hydrogramu odtoku byly v posledním obrázku proloženy křivkou. Pomocí tvaru křivky byly zjištěny parametry  $(a, b)$  pro vybraná povodí.

### 12.1.1 Cidlina

Sestupné větve pro povodí řeky Cidlina byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna osmi dnům, a prahové hodnotě rovné 1,5mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 238 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 5: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 6: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný  $Q \sim S$  vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $Ho$

Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Cidlina je dán následující rovnicí:

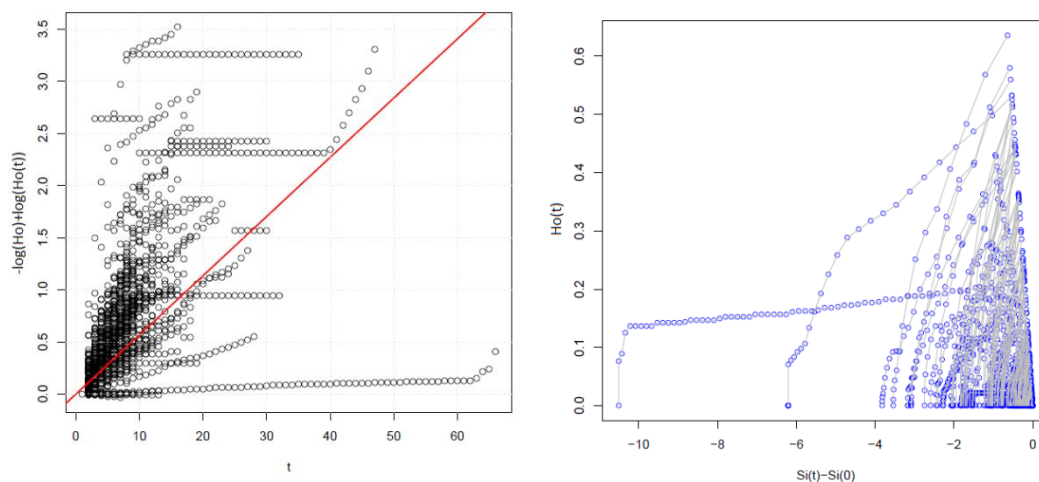
$$Q = 0,23S^{0,79}, \quad (11)$$

kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $Ho$ .

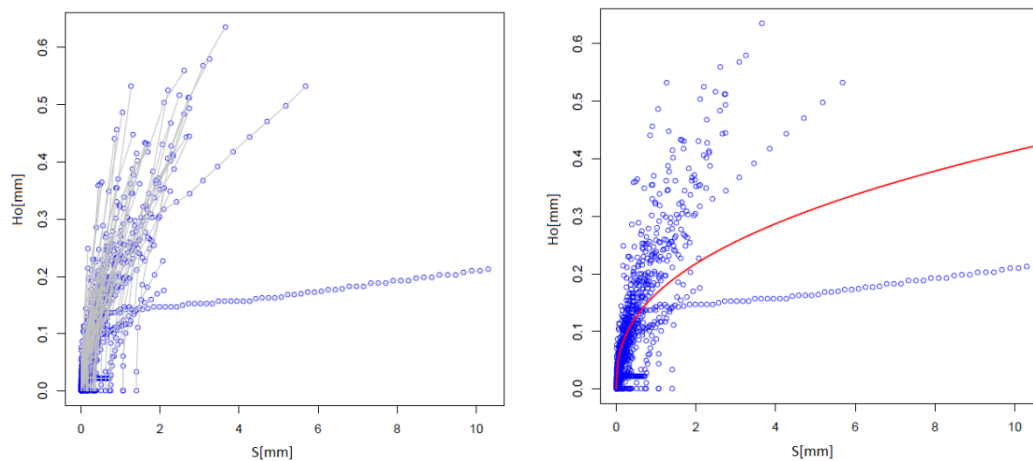


### 12.1.2 Hloučela

Sestupné větve pro povodí řeky Hloučely byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna sedmi dnům, a prahové hodnotě rovné 0,75mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 117 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 7: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 8: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný  $Q \sim S$  vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $Ho$

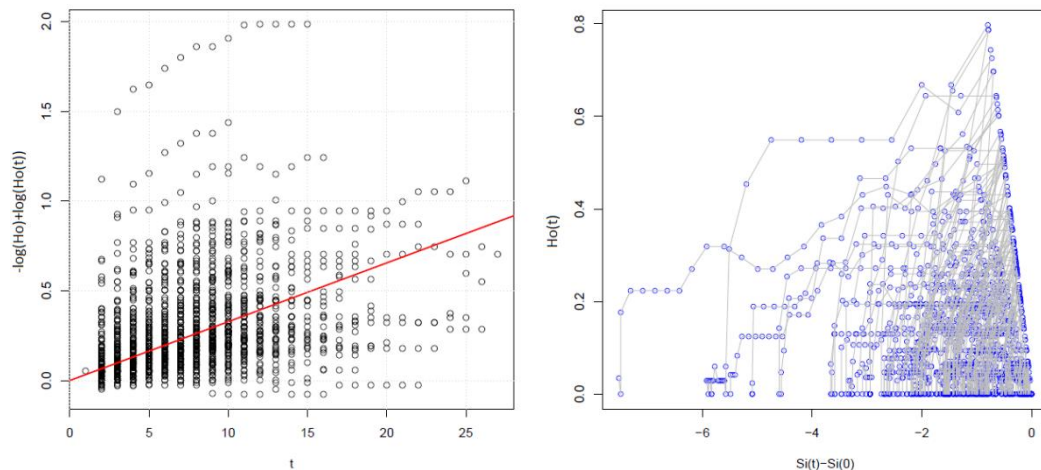
Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Hloučely je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,17S^{0,40}, \quad (12)$$

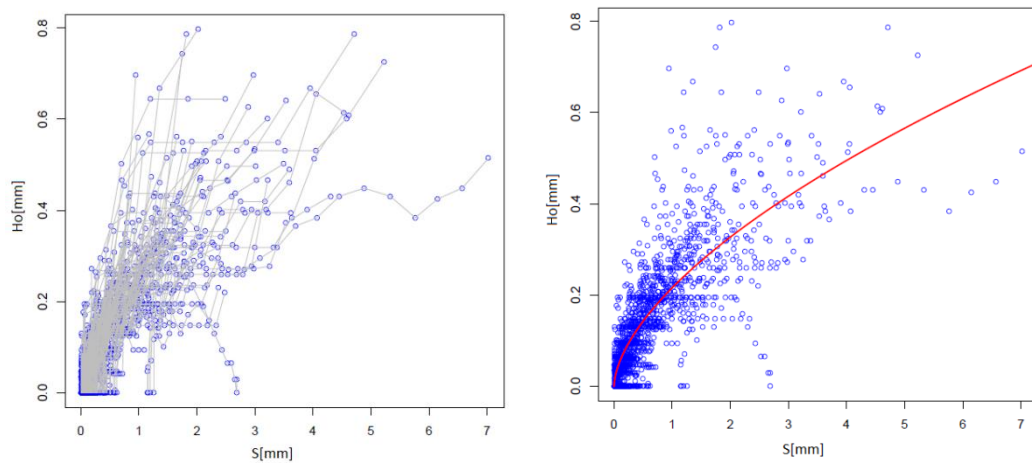
kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $Ho$ .

### 12.1.3 Jizera

Sestupné větve pro povodí řeky Jizery byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna osmi dnům, a prahové hodnotě rovné 1,5mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 138 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 9: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 10: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný Q~S vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $H_o$

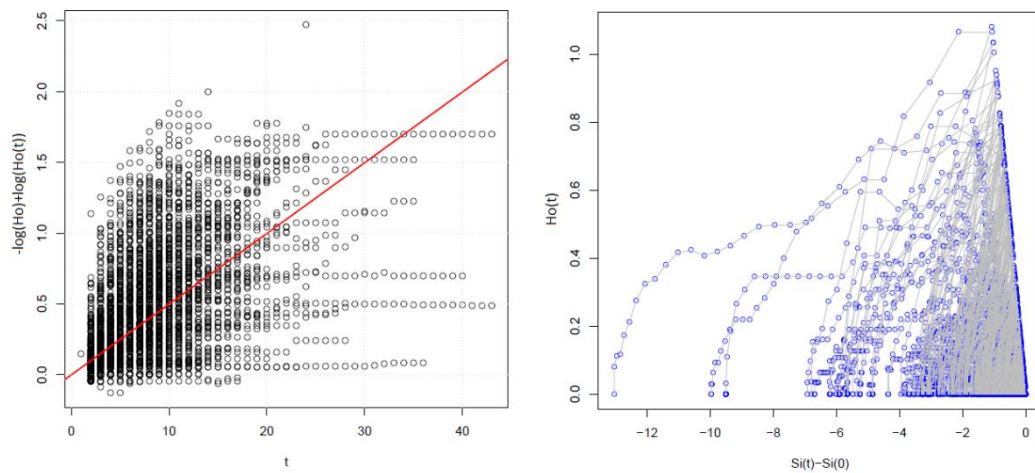
Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Jizery je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,22S^{0,60}, \quad (13)$$

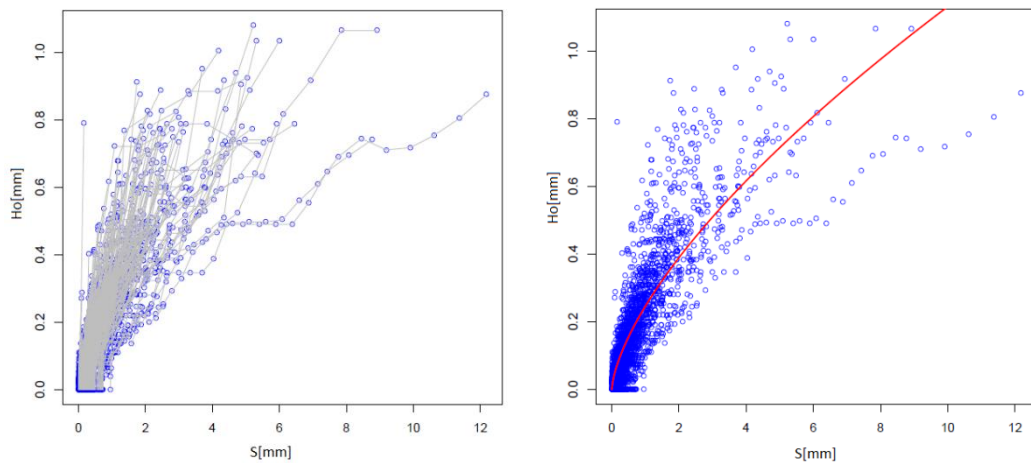
kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $H_o$ .

### 12.1.4 Klenice

Sestupné větve pro povodí řeky Klenice byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna osmi dnům, a prahové hodnotě rovné 1,5mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 300 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 11: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 12: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný  $Q \sim S$  vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $H_o$

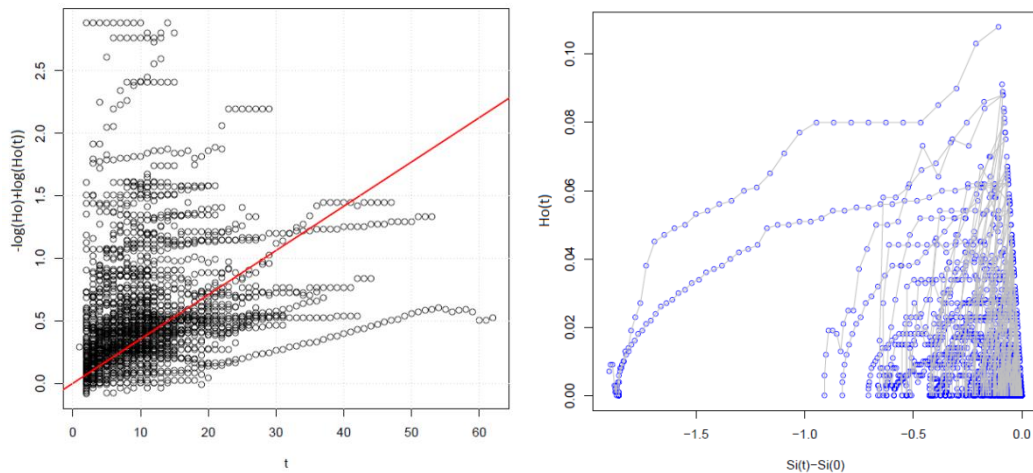
Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Klenice je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,25S^{0,66} , \quad (14)$$

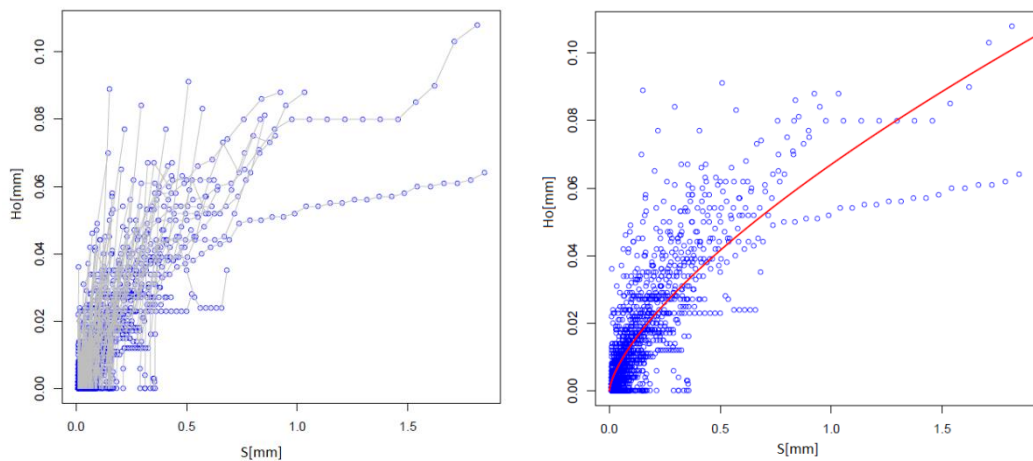
kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $H_o$ .

### 12.1.5 Litava

Sestupné větve pro povodí řeky Litavy byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna deseti dnům, a prahové hodnotě rovné 0,15mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 120 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 13: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 14: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný  $Q \sim S$  vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $Ho$

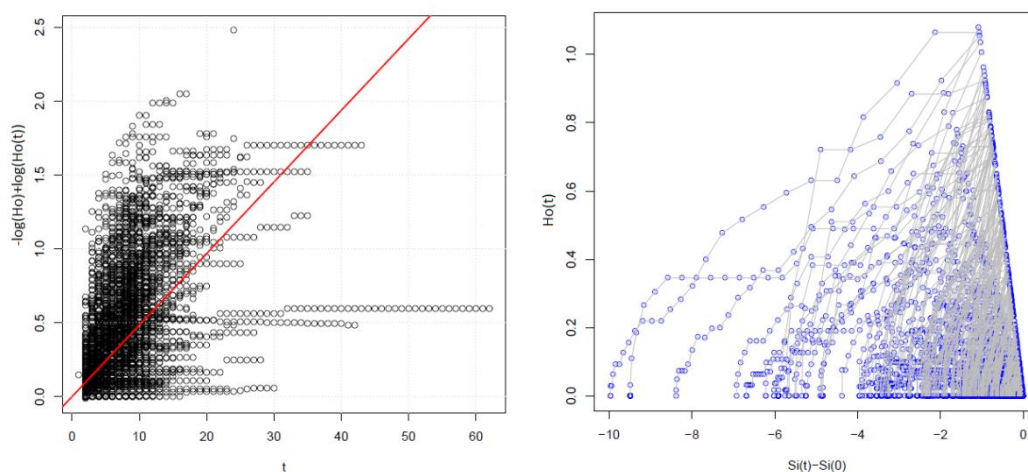
Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Litavy je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,067S^{0,69} , \quad (15)$$

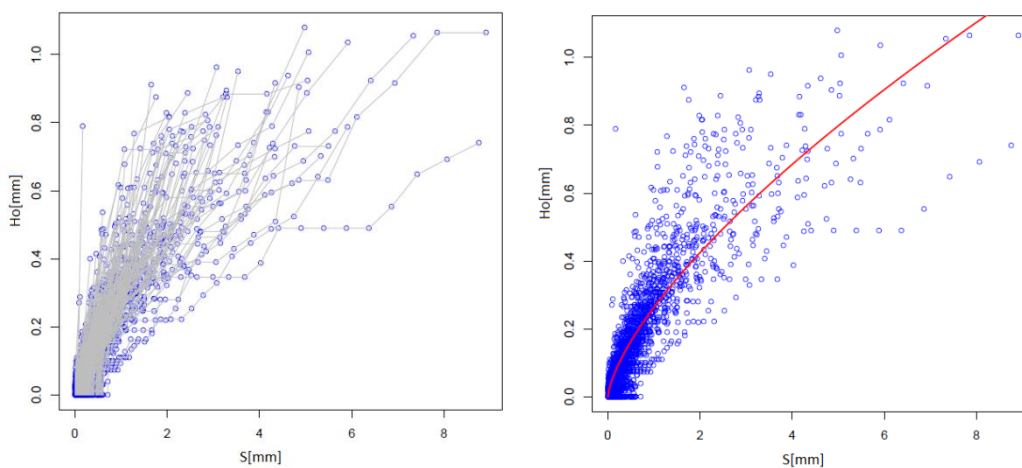
kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $Ho$ .

### 12.1.6 Malše

Sestupné větve pro povodí řeky Malše byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna osmi dnům, a prahové hodnotě rovné 1,5mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 275 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 15: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 16: Posunutá sestupná větve hydrogramu a výsledný  $Q-S$  vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $H_0$

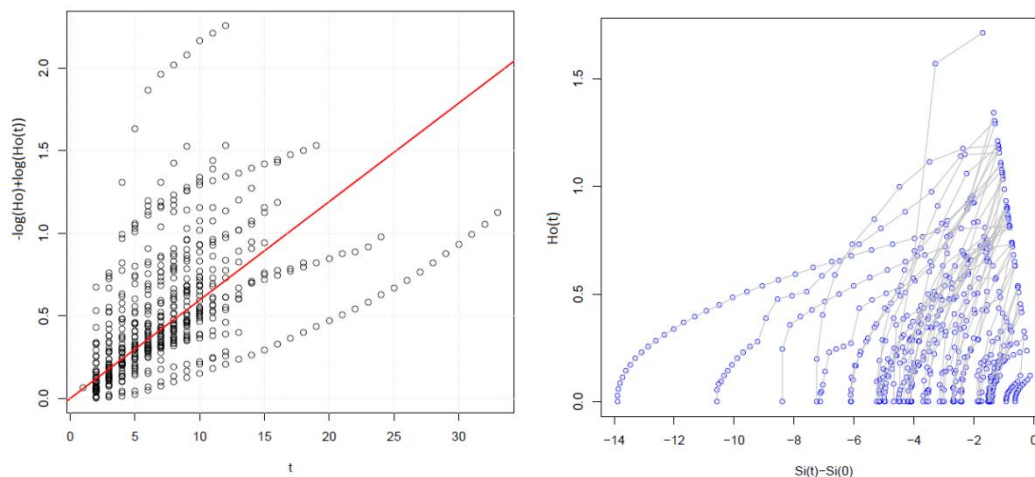
Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Malše je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,26S^{0,69}, \quad (16)$$

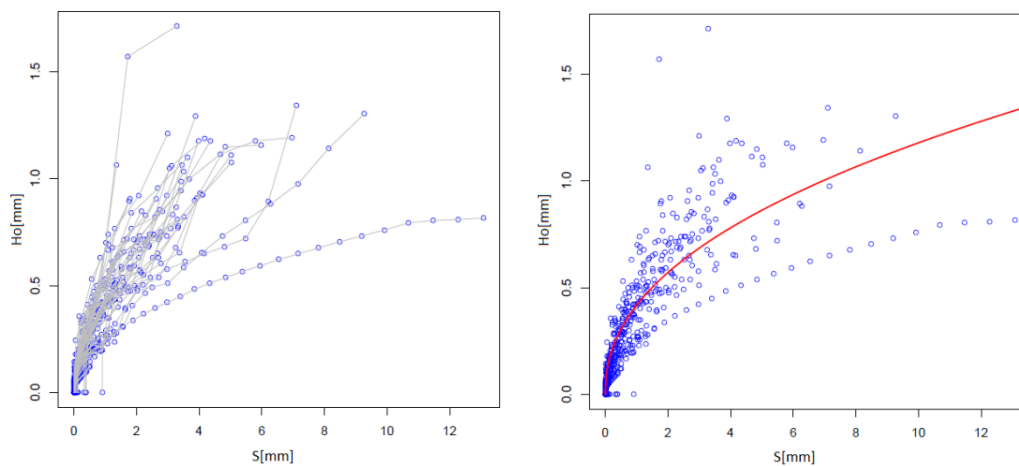
kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $H_0$ .

### 12.1.7 Orlice

Sestupné větve pro povodí řeky Orlice byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna osmi dnům, a prahové hodnotě rovné 2,25mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 47 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 17: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 18: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný  $Q \sim S$  vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $H_o$

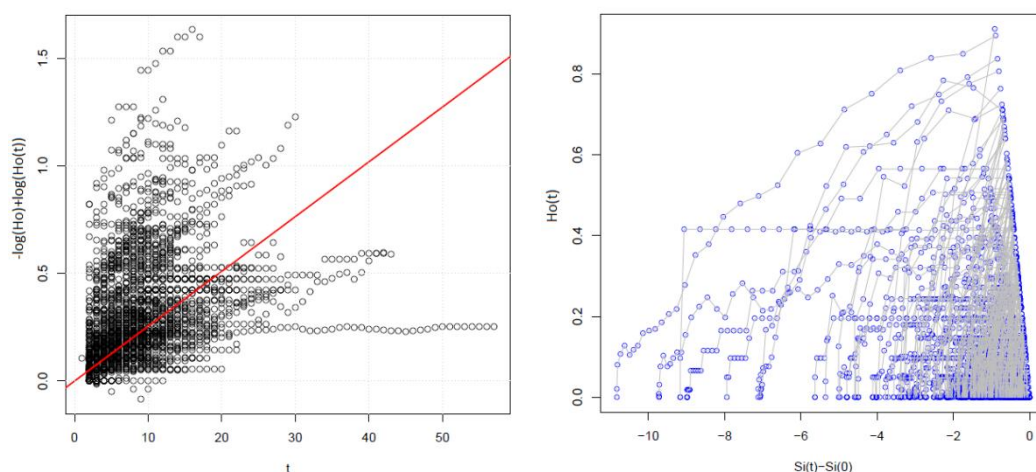
Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Orlice je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,42S^{0,45}, \quad (17)$$

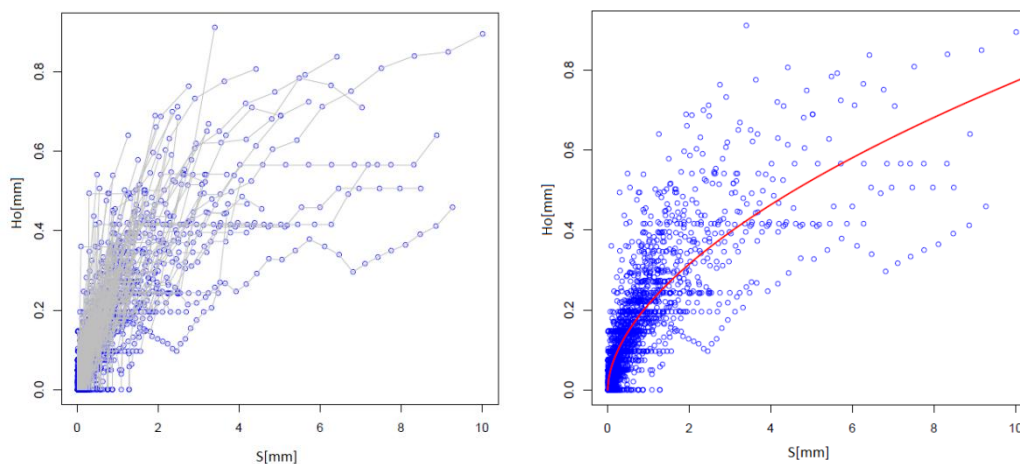
kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $H_o$ .

### 12.1.8 Otava

Sestupné větve pro povodí řeky Otavy byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna osmi dnům, a prahové hodnotě rovné 1,5mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 197 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 19: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 20: Posunutá sestupná větev hydrogramu a výsledný  $Q$ - $S$  vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $H_o$

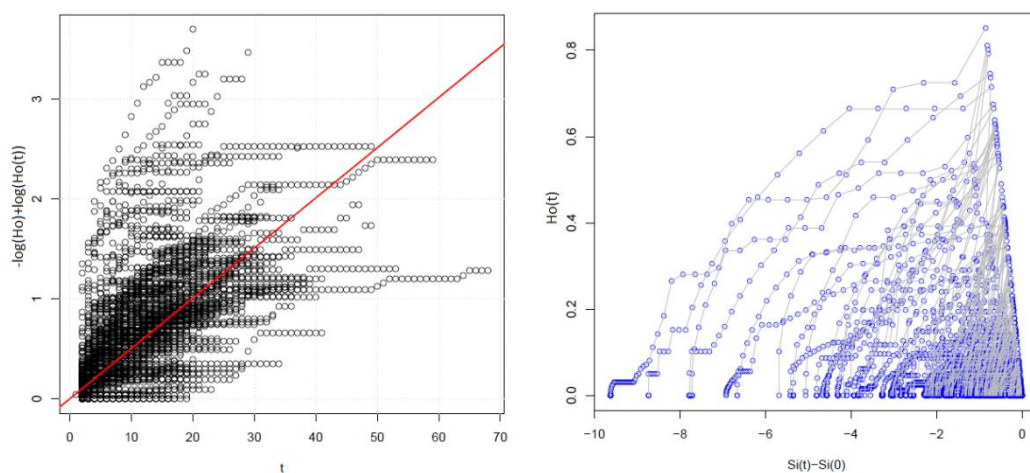
Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Otavy je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,21S^{0,56}, \quad (18)$$

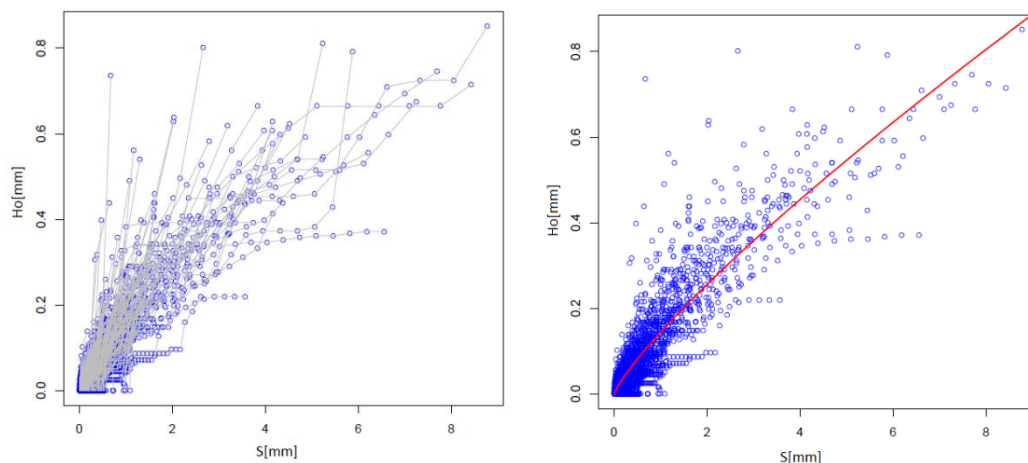
kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $H_o$ .

### 12.1.9 Řečice

Sestupné větve pro povodí řeky Řečice byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna patnácti dnům, a prahové hodnotě rovné 1,0mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 157 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 21: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 22: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný Q-S vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $H_o$

Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Řečice je dán následující rovnicí:

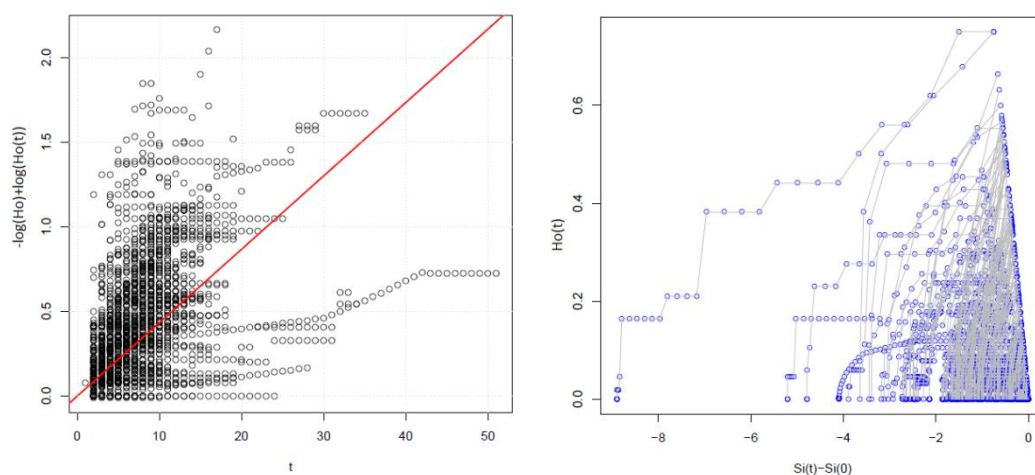
$$Q = 0,14S^{0,83}, \quad (19)$$

kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $H_o$ .

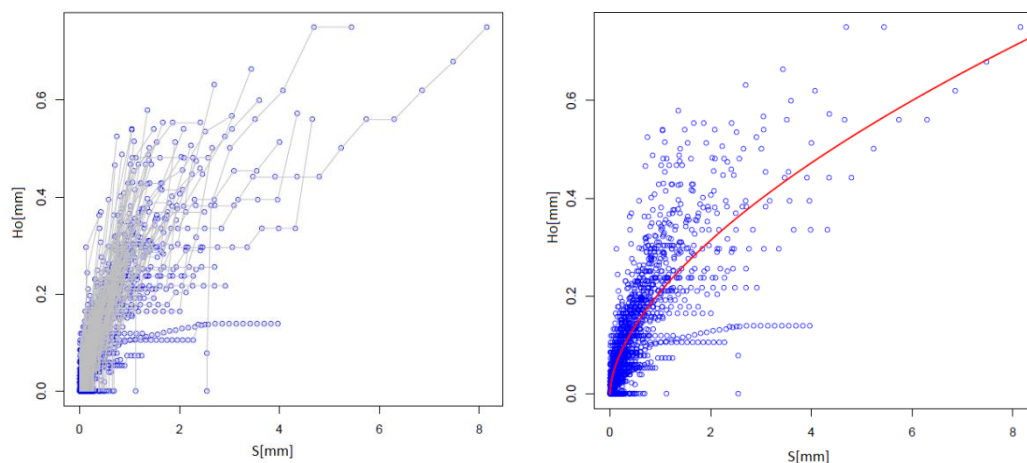


### 12.1.10 Sázava

Sestupné větve pro povodí řeky Sázavy byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna osmi dnům, a prahové hodnotě rovné 1,0mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 177 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 23: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 24: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný Q~S vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $Ho$

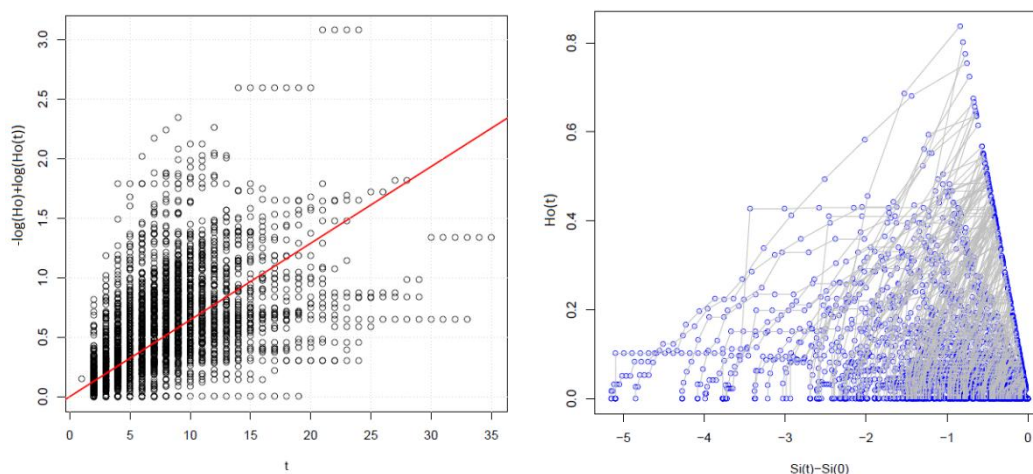
Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Sázavy je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,21S^{0,59}, \quad (20)$$

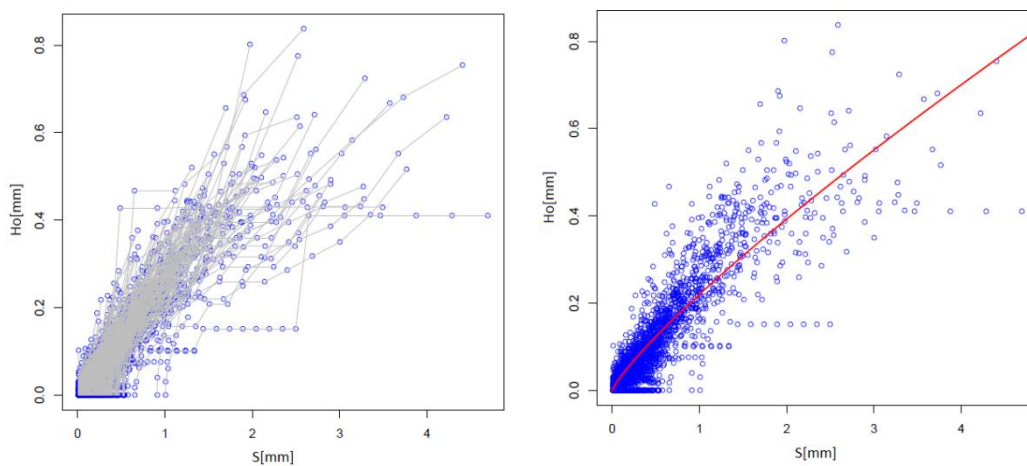
kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $Ho$ .

### 12.1.11 Teplá

Sestupné větve pro povodí řeky Teplé byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna osmi dnům, a prahové hodnotě rovné 1,0mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 237 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 25: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 26: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný  $Q \sim S$  vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $H_o$

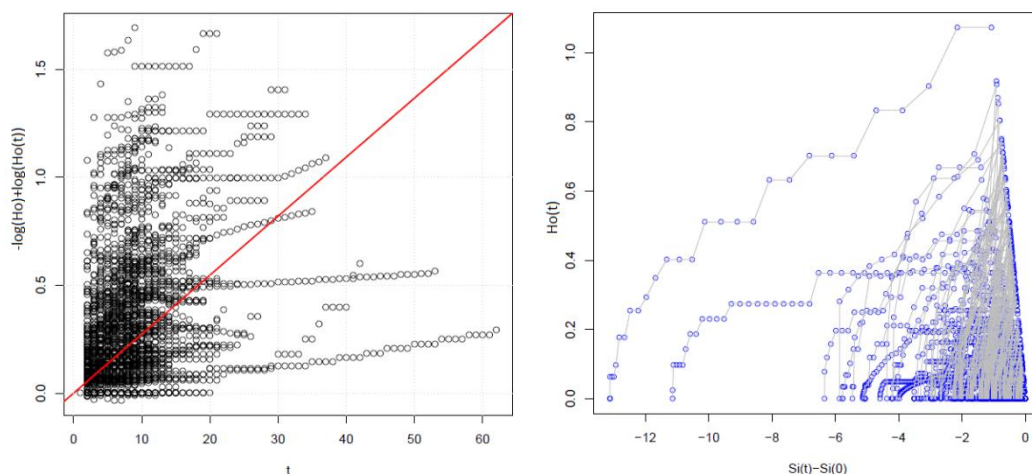
Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Teplé je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,22S^{0,83}, \quad (21)$$

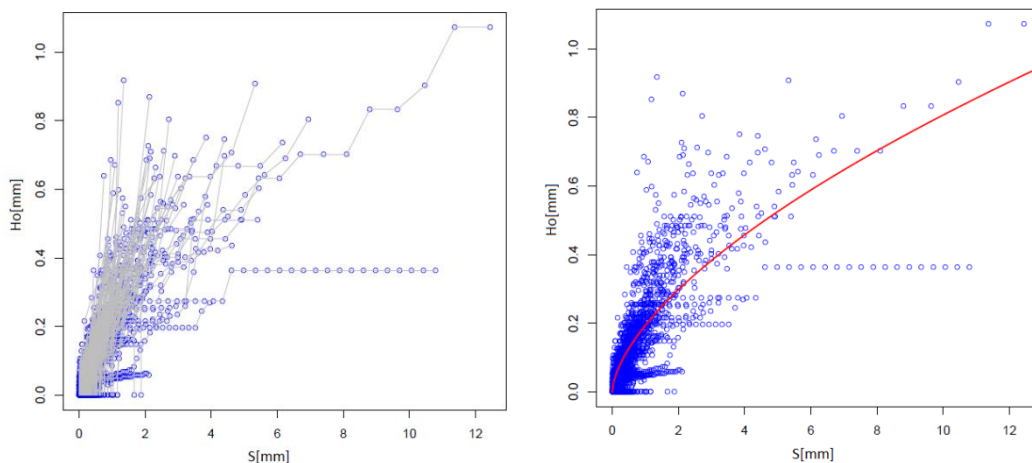
kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $H_o$ .

### 12.1.12 Teplá Vltava

Sestupné větve pro povodí řeky Teplé Vltavy byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna osmi dnům, a prahové hodnotě rovné 1,5mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 203 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 27: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 28: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný Q~S vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $Ho$

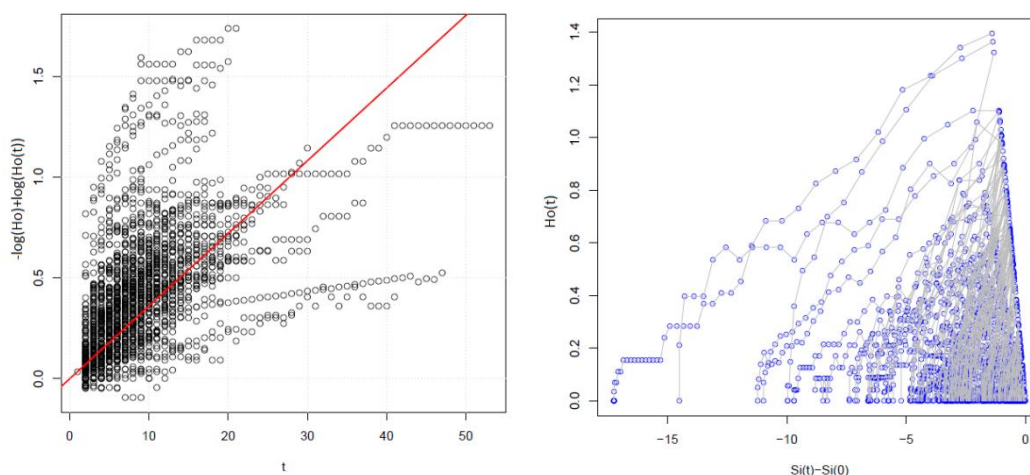
Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Teplé je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,19S^{0,62}, \quad (22)$$

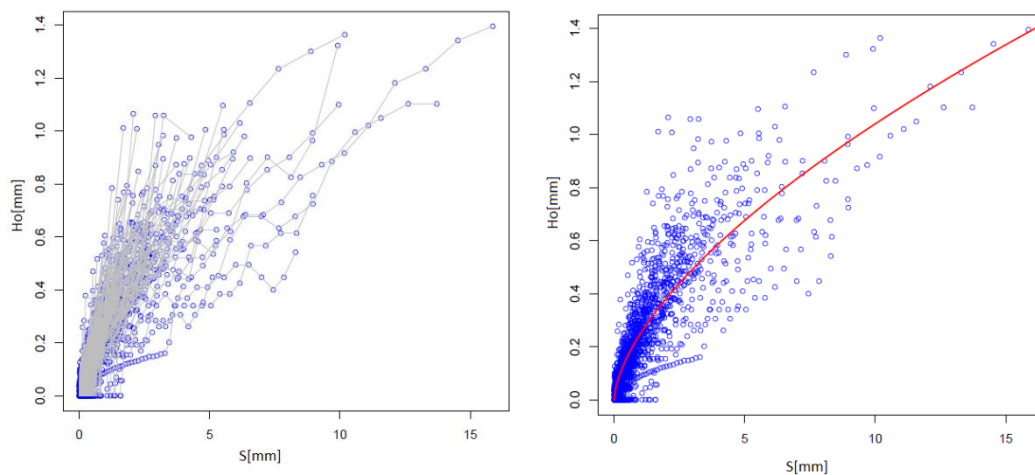
kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $Ho$ .

### 12.1.13 Úpa

Sestupné větve pro povodí řeky Úpa byly vybrány na základě minimální délky sestupné větve, která byla rovna osmi dnům, a prahové hodnotě rovné 2,0mm. Na základě těchto podmínek bylo vygenerováno 161 sestupných větví hydrogramu.



Obr. č. 29: Test linearity odezvy základního odtoku a neposunuté větve hydrogramu



Obr. č. 30: Posunuté sestupné větve hydrogramu a výsledný Q~S vztah, ve kterém  $Q$  představuje výšku odtoku  $Ho$

Odhadnutý konstituční tvar nelineární nádrže pro povodí řeky Úpa je dán následující rovnicí:

$$Q = 0,25S^{0,62}, \quad (23)$$

kde  $Q$  reprezentuje výšku odtoku  $Ho$ .

## **12.2 Shrnutí výsledků první části analýzy**

Při analýze sestupných větví hydrogramu dle Torfse (2009), která slouží k automatické identifikaci pomalé, podzemní odtokové odezvy, byl použit princip založený na řešení inverzní úlohy lokálním optimalizačním algoritmem, pomocí kterého byly zjištěny parametry  $(a, b)$  Q~S vztahu pro nelineární nádrž.

Pokud by se parametr  $b$  umístěný v mocnině Q~S vztahu pro nelineární nádrž blížil jedničce, odtoková odezva povodí by byla spíše lineární. Nejblíže se lineární odtokové odezvě blížilo povodí řeky Řečice a povodí řeky Teplé se shodnou hodnotou parametru,  $b = 0,83$ .

Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě pro vybraná povodí České republiky je ukázána v příloze číslo 1. Jednotlivým povodím byly určeny rozsahy minimálních délek sestupných větví hydrogramu a rozsahy prahových hodnot výšek odtoku. Program dle Torfse (2009) byl přetvořen na funkci, pomocí které byly vygenerovány parametry  $b$  v závislosti na stanoveném rozsahu vstupních hodnot.

Některá povodí vykazovala pozvolný přechod parametru  $b$  v závislosti na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě. Nejhladší přechod byl zaznamenán na povodí řeky Otavy (příloha č. 1), kde byl stanoven rozsah minimální délky sestupné větve od nuly do dvanácti dnů a rozsah prahové hodnoty byl v rozmezí 0-5mm výšky odtoku  $H_0$ .

### 13. Kalibrace zvolených modelů na úsecích sestupných větví

Kalibrace byla prováděna pomocí globálního optimalizačního algoritmu, Shuffled Complex Differential Evolution (SCDE), který spojuje algoritmus diferenciální evoluce patřící do skupiny evolučních algoritmů a mechanismus založený na promíchávání populace optimalizovaných modelů. (Máca, 2012a)

Jak už bylo dříve uvedeno, tento algoritmus je založen na nalezení optima objektivní funkce prostřednictvím práce s populací modelů, která se vyvíjí iteračním způsobem. Pomocí uvedeného algoritmu se tak zlepšuje hodnota objektivní funkce u jednotlivých členů populace. Objektivní funkcí byla zvolena logaritmická suma čtverců reziduí:

$$\ln SS = \sum_{i=1}^N [\ln(Q_m(i)) - \ln(Q_s(i))]^2 \quad (24)$$

Výchozím optimalizačním algoritmem byla metoda diferenciální evoluce, která se skládala z operátorů založených na mutaci a křížení. Mutační operátory diferenciální evoluce byly dány rovnicemi číslo 25 (*Bestonebin*), 26 (*Curbestbin*), 27 (*Randtwobin*), kde  $pm_j^i$  představovalo mutačně změněnou hodnotu parametru  $p_j$  u jedince populace ( $i$ ), hodnoty  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  byly indexy náhodně zvolených jedinců, *best* představoval index s nejlepší hodnotou objektivní funkce v populaci a parametry  $F$  a  $K$  řídily mutační změny v komplexech modelů. Hodnoty parametrů  $F$  a  $K$  byly voleny na základě empirických zkušeností v rozmezí mezi nulou a dvojkou. (Máca, 2012a)

$$pm_j^i = p_j^{best} + F(p_j^{r_1} - p_j^{r_2}) \quad (25)$$

$$pm_j^i = p_j^i + K(p_j^{best} - p_j^i) + F(p_j^{r_1} - p_j^{r_2}) \quad (26)$$

$$pm_j^i = p_j^{r_1} + K(p_j^{r_5} - p_j^{r_4}) + F(p_j^{r_2} - p_j^{r_3}) \quad (27)$$

V diferenciální evoluci byl vedle mutačních operátorů ještě použit operátor křížení, který řídil pravděpodobnost, že dojde ke křížení. Tento operátor byl určen parametrem binomického křížení  $CR$ , jehož hodnota se nacházela mezi nulou a jedničkou. (Máca, 2012a)

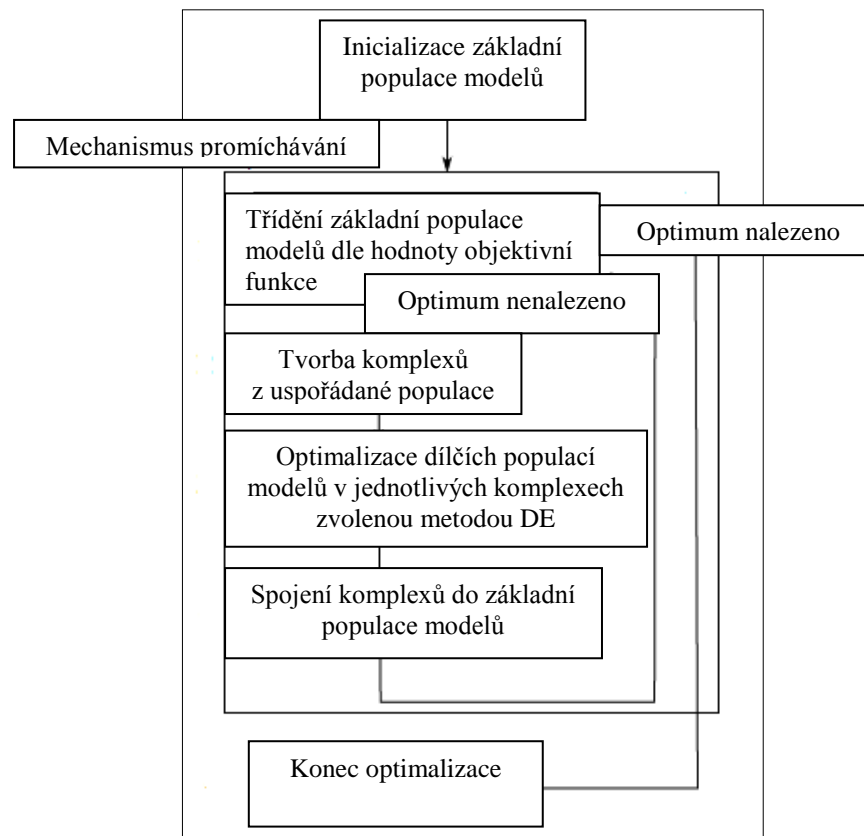
Podstatou globálního optimalizačního algoritmu SCDE bylo rozdělení základní populace modelů do komplexů, ve kterých byla následně prováděna diferenciální evoluce.

Před vlastní diferenciální evolucí bylo potřeba nastavit počáteční hodnoty základní populace modelů. Nastavení počátečních hodnot se provádělo pomocí metody latinských čtverců (Polášek, 2011), která umožňovala dosáhnout efektivního pokrytí parametrického prostoru. Použitím této metody lze totiž zabránit tomu, že nedojde k nastavení počátečních hodnot pouze v malé části parametrického prostoru.

Dále bylo nutno setřídít jednotlivé modely dle hodnot objektivní funkce (rovnice č. 24) a vytvořit komplexy modelů, tak aby byly v každém komplexu modely s dobrými i špatnými hodnotami objektivní funkce. Rozdělení populace do stejných sub-populací totiž ovlivňuje efektivnost optimalizace. (Máca, 2012a)

Po těchto krocích došlo k realizaci diferenciální evoluce v rámci dílčích populací v jednotlivých komplexech za pomoci různých mutačních operátorů a binomického operátoru křížení. Jednotlivé metody diferenciální evoluce složené z různých mutačních operátorů se odlišují v prohledávání parametrického prostoru a to z hlediska následování aktuálně nejlepšího modelu (varianta Bestonebin) či z hlediska náhodného prohledávání (varianta Randtwobin). Existuje také varianta založená na kombinaci nejlepšího modelu a náhody (varianta Curbesttbin). (Máca, 2012a)

Pro každý parametr rodičovského modelu byla vytvořena nová sada parametrů a to tak, že na každý rodičovský model nacházející se v komplexu byl postupně aplikován operátor binomického křížení a operátor mutačního křížení, dle varianty diferenciální evoluce. Jestliže měl nově vzniklý model lepší objektivní funkci než rodičovský, nahradil původní rodičovský model. Tento postup byl aplikován pro všechny modely v komplexu a byl označen jako jedna generace. Po určitém zvoleném počtu generací byla ukončena optimalizace dílčích sub-populací v komplexech a výsledné modely byly opět spojeny do základní populace. Postup se opakoval, dokud nebyla nalezena optimální hodnota objektivní funkce. Příslušné schéma SCDE je ukázáno na obrázku číslo 31, kde nultý krok představuje inicializaci parametrů a další kroky náleží k „promíchávacímu algoritmu“. (Máca, 2012a)



Obr. č. 31: Schéma globálního optimalizačního algoritmu SCDE (Máca, 2012a)

Globální optimalizační algoritmus SCDE byl aplikován na třináct povodí České republiky, na kterých bylo vybráno několik reprezentativních sestupných větví hydrogramu odtoku (4-9) a to tak, že dané větve splňovaly pouze podmínku minimální délky, která byla stanovena na osm dní. Vybrané větve byly kalibrovány pomocí SCDE na modelu lineární nádrže, nelineární nádrže a nádrže s exponenciálním odtokem. Mezi vstupní hodnoty potřebné pro daný optimalizační algoritmus patřila velikost základní populace stanovená z počtu komplexů a počtu jedinců v komplexech, počet generací v komplexu, maximální počet opakování „promíchávacího algoritmu“, volba optimalizačního kritéria, volba typu diferenciální evoluce, parametr binomického křížení, parametry mutačního operátoru a počet opakování optimalizačního výpočtu.

Proměnlivou vstupní hodnotou SCDE byl počet vybraných sestupných větví v jednotlivých povodích, výběr modelu simulujícího lineární, nelineární či exponenciální odtokovou odezvu povodí, rozsah parametrů  $a$ ,  $b$  a rozsah počátečních zásob vybraných větví.



### 13.1 Výsledky druhé části analýzy

Vstupní hodnoty optimalizačního algoritmu SCDE pro třináct povodí České republiky jsou zapsány v tabulce číslo 2.

<i>Počet komplexů</i>	6
<i>Počet jedinců v komplexu</i>	20
<i>Počet generací v komplexu</i>	40
<i>Počet opakování optimalizačního výpočtu</i>	100
<i>Maximální počet opakování „promíchávacího algoritmu“</i>	5
<i>Parametr binomického křížení (CR)</i>	0,198
<i>Mutační operátor (K)</i>	0,6
<i>Mutační operátor (F)</i>	0,8
<i>Typ nádrže: lineární (0), nelineární (2), exponenciální (3)</i>	0,2,3
<i>Počet vybraných sestupných větví</i>	<10
<i>Rozsah počáteční zásoby v nádrži</i>	0-15 pro typ nádrže 0 0-20 pro typ nádrže 2,3
<i>Rozsah parametru a</i>	0-100
<i>Rozsah parametru b</i>	0,5-4

Tab. č. 2: Hodnoty počátečních parametrů pro globální optimalizační algoritmus SCDE

Jak už bylo zmíněno, objektivní funkcí byla zvolena logaritmická suma čtverců reziduí ( $\ln SS$ ), která je zobrazena v rovnici číslo 24. Mutační operátor diferenciální evoluce byl dán výrazem dle rovnice číslo 26 (Curbestbin). Počet opakování optimalizačního programu byl zvolen tak, aby se výsledný model blížil maximálnímu věrohodnému odhadu parametrů. Obdobně byl volen i počet komplexů a počet populací v jednom komplexu. Důvodem bylo lepší prohledávání parametrického prostoru, které zvýšilo pravděpodobnost nalezení globálního optima dané objektivní funkce.

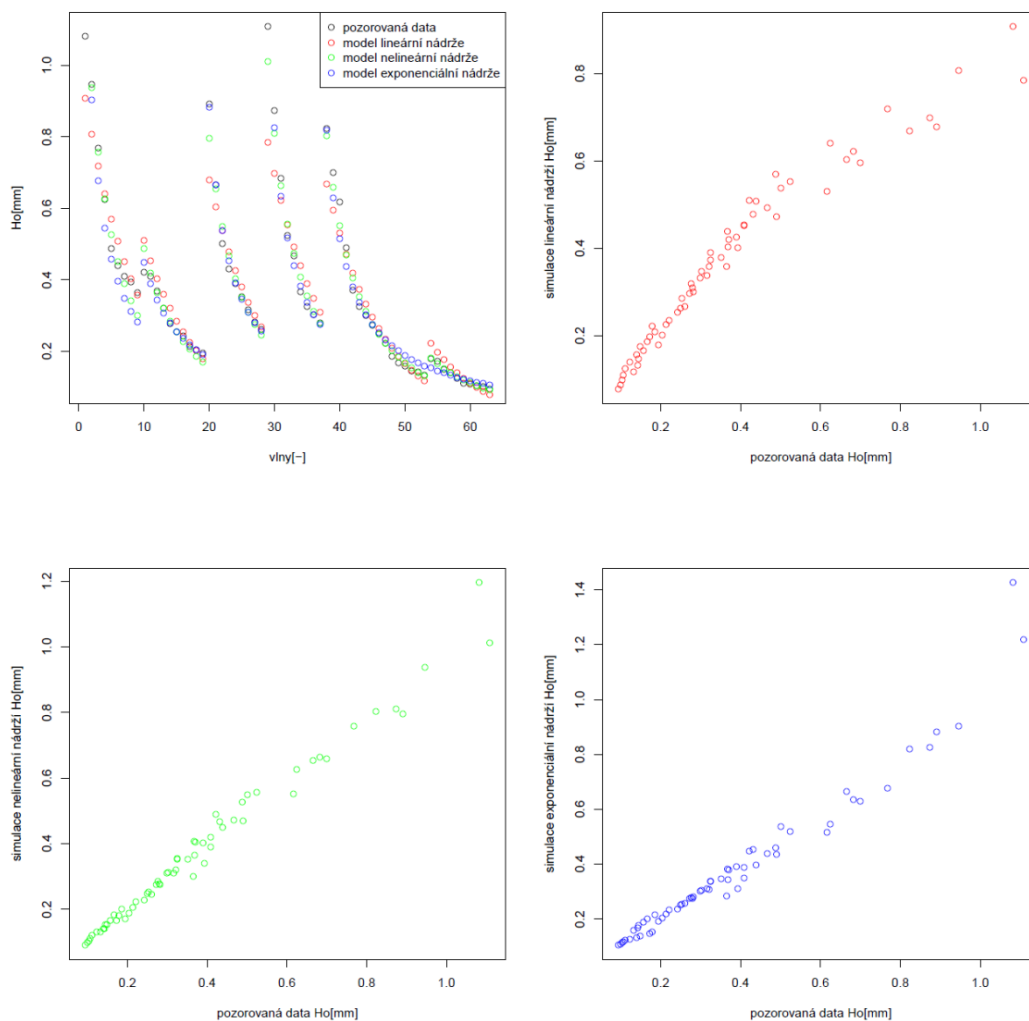
Pro jednotlivá povodí byl postupně měněn model z hlediska typu nádrže, který simuloval základní odtokovou odezvu, a počet simulovaných sestupných větví. Výsledná simulace vln modely lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže je dána obrázky číslo 32-48.

Dále byla pro vybrané sestupné větve v jednotlivých povodích vytvořena statistická tabulka podle typu nádrže simulujícího základní odtokovou odezvu. V této tabulce byly zaznamenány statistické charakteristiky počátečních zásob v jednotlivých větvích spolu s parametry nádrží a hodnotami objektivní funkce. Statistické charakteristiky dle povodí a vybraných nádrží jsou dány tabulkami v příloze číslo 2.

Na základě většího počtu opakování optimalizačního programu byly vytvořeny histogramy počátečních zásob v jednotlivých větvích pro vybrané nádrže, histogramy parametrů vybraných konstitučních vztahů a histogramy zjištěných hodnot objektivní funkce ( $\ln SS$ ), které jsou k vidění v příloze číslo 3.

### 13.1.1 Cidlina

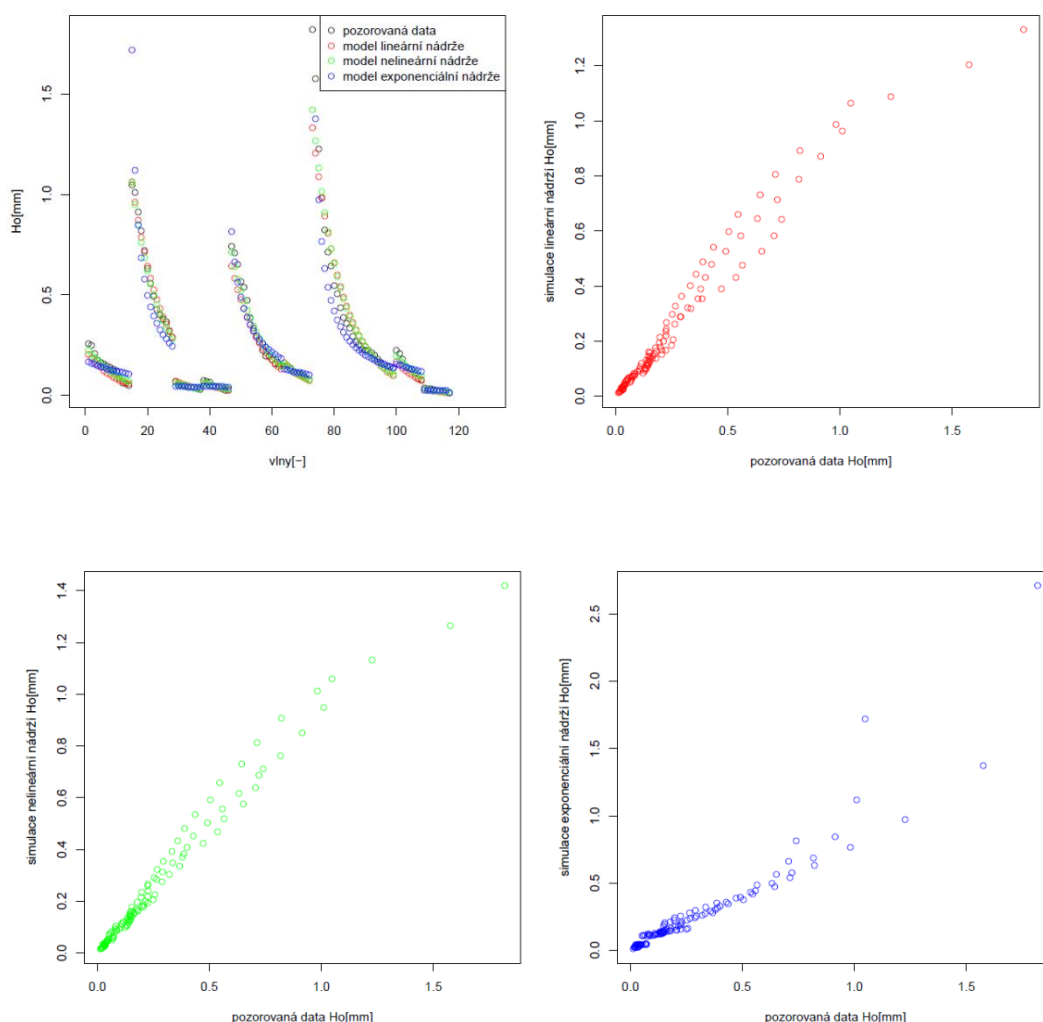
Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Cidlina byl roven šesti. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 0,283 \text{ mm}^2$ , parametrem  $a = 86,17$  a parametrem  $b = 1,972$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 1,974 \text{ mm}$  zjištěnou v šesté vlně a hodnotou  $S_0 = 8,325 \text{ mm}$  získanou z první vlny. Model exponenciální nádrže měl průměrnou hodnotu objektivní funkce  $\ln SS = 0,695 \text{ mm}^2$ , hodnotu parametru  $a = 51,54$  a hodnotu parametru  $b = 3,162$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 1,974 \text{ mm}$  a hodnotou  $S_0 = 8,325 \text{ mm}$ . Nejslabším modelem se v povodí řeky Cidlina stal model lineární nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 1,581 \text{ mm}^2$  a hodnotou parametru  $a = 0,113$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 1,974 \text{ mm}$  a hodnotou  $S_0 = 8,325 \text{ mm}$ .



Obr. č. 32: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Cidlina

### 13.1.2 Hloučela

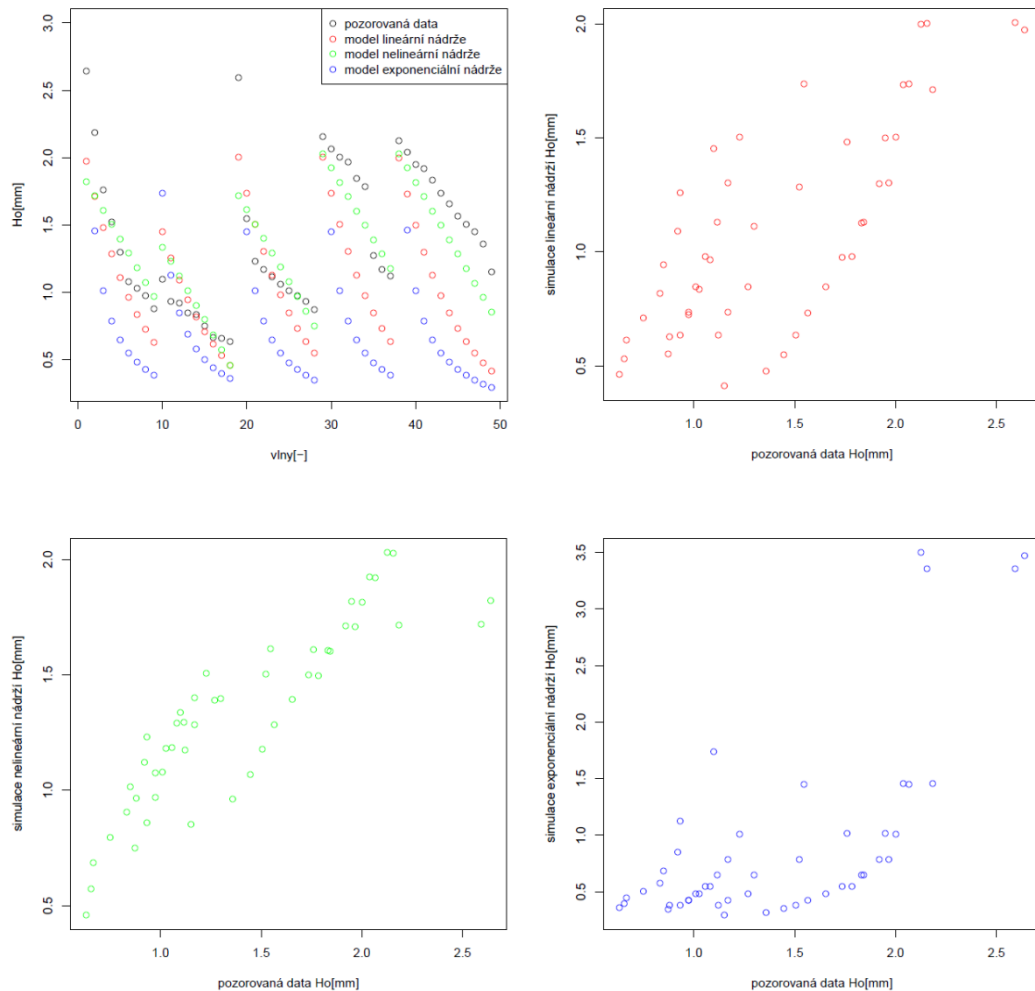
Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Hloučely byl roven devíti. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 2,759 \text{ mm}^2$ , parametrem  $a = 27,12$  a parametrem  $b = 1,368$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 0,802 \text{ mm}$  zjištěnou v deváté vlně a hodnotou  $S_0 = 15,21 \text{ mm}$  získanou ze sedmé vlny. Model exponenciální nádrže měl hodnotu  $\ln SS = 7,406 \text{ mm}^2$ , hodnotu parametru  $a = 44,46$  a hodnotu parametru  $b = 3,987$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 1,974 \text{ mm}$  a hodnotou  $S_0 = 8,325 \text{ mm}$ . Nejslabším modelem se opět stal model lineární nádrže s hodnotou  $\ln SS = 10,43 \text{ mm}^2$  a parametrem  $a = 0,082$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se pohybovala mezi  $S_0 = 0,551 \text{ mm}$  a  $S_0 = 13,42 \text{ mm}$ .



Obr. č. 33: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Hloučely

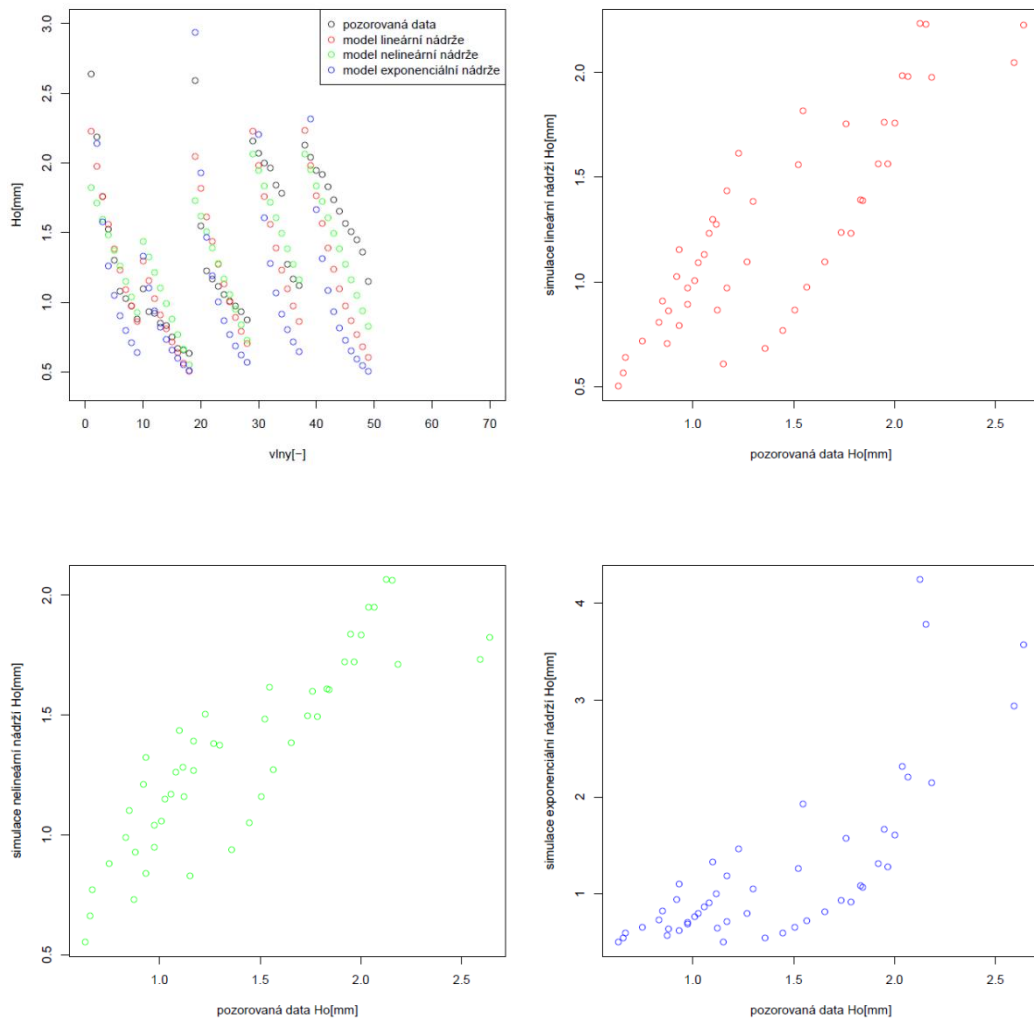
### 13.1.3 Jizera

Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Jizery byl roven pěti. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 1,522 \text{ mm}^2$ , parametrem  $a = 2,293$  a parametrem  $b = 0,516$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 8,774 \text{ mm}$  zjištěnou ve druhé vlně a hodnotou  $S_0 = 19,99 \text{ mm}$  získanou z páté vlny. Model lineární nádrže měl  $\ln SS = 9,213 \text{ mm}^2$  a parametr  $a = 0,133$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 10,92 \text{ mm}$  a hodnotou  $S_0 = 14,85 \text{ mm}$ . Nejslabším modelem se stal model exponenciální nádrže s  $\ln SS = 31,53 \text{ mm}^2$ , s parametrem  $a = 22,60$  a s parametrem  $b = 4,000$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi  $S_0 = 14,35 \text{ mm}$  a  $S_0 = 17,15 \text{ mm}$  pro první vlnu, ne pro pátou.



Obr. č. 34: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Jizery

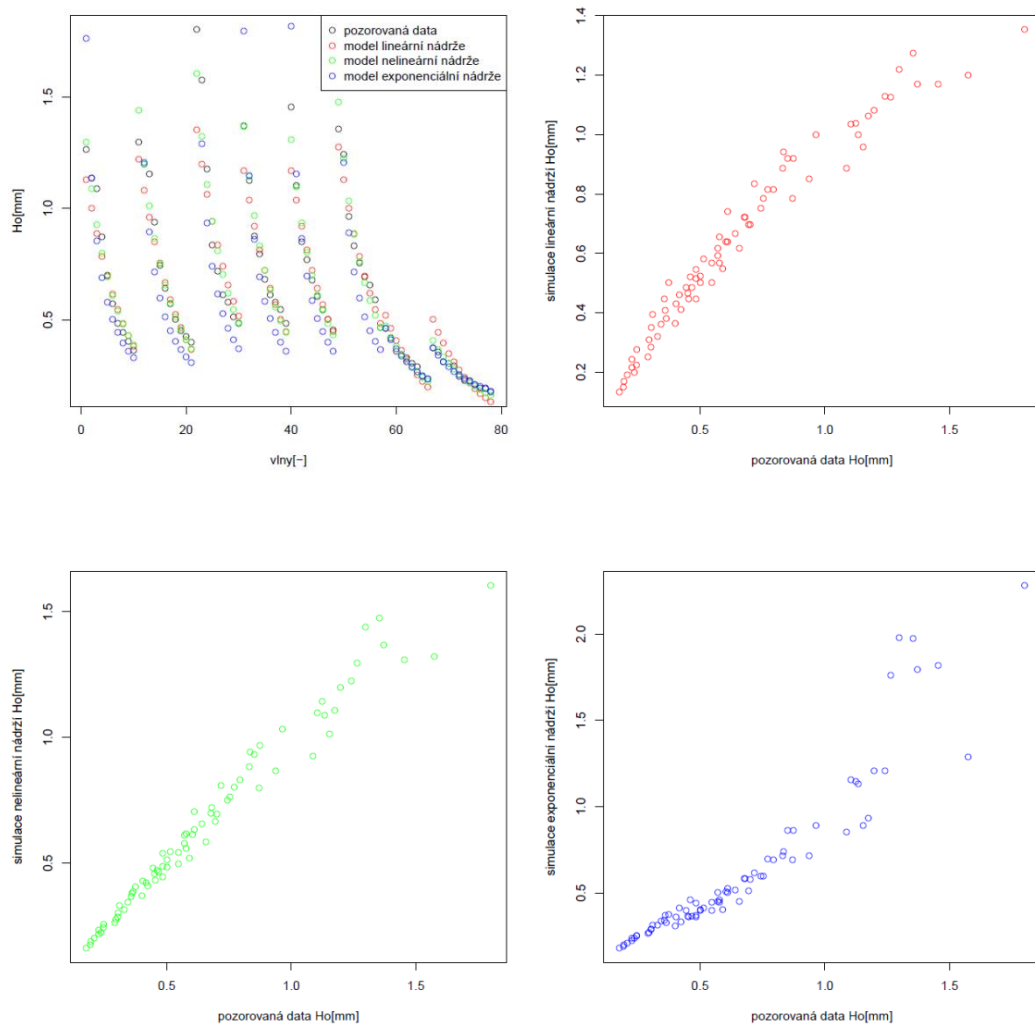
Průměrná hodnota objektivní funkce odpovídající modelu exponenciální nádrže na povodí řeky Jizery byla příliš velká a tedy nevyhovující ( $\ln SS = 31,53 \text{ mm}^2$ ). Z tohoto důvodu musely být vstupní parametry algoritmu SCDE upraveny. Rozsah počátečních zásob v modelech byl stanoven na  $S_0 = 10\text{--}20 \text{ mm}$  a rozsah parametru  $b$  byl upraven na  $0\text{--}7$ . Nejlepší simulace po úpravě opět dosáhl model nelineární nádrže, i když se zhoršenou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 1,657 \text{ mm}^2$ , parametrem  $a = 2,487$  a parametrem  $b = 0,543$ . Počáteční zásoba podzemní vody se pohybovala mezi  $S_0 = 10,04 \text{ mm}$  a  $S_0 = 19,99 \text{ mm}$  ve stejných vlnách jako před úpravou parametrů. Model lineární nádrže měl  $\ln SS = 3,352 \text{ mm}^2$  a parametr  $a = 0,114$ . Průměrná počáteční zásoba byla mezi hodnotou  $S_0 = 11,50 \text{ mm}$  a hodnotou  $S_0 = 19,88 \text{ mm}$ . Nejslabším modelem se opět stal model exponenciální nádrže se sníženou hodnotou  $\ln SS = 8,819 \text{ mm}^2$ , s parametrem  $a = 3,801$  a s parametrem  $b = 7,000$ . Zásoba ve vlnách se pohybovala mezi  $S_0 = 11,33 \text{ mm}$  a  $S_0 = 19,45 \text{ mm}$ .



Obr. č. 35: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Jizery po úpravě rozsahu počáteční zásoby a parametru  $b$  v SCDE

### 13.1.4 Klenice

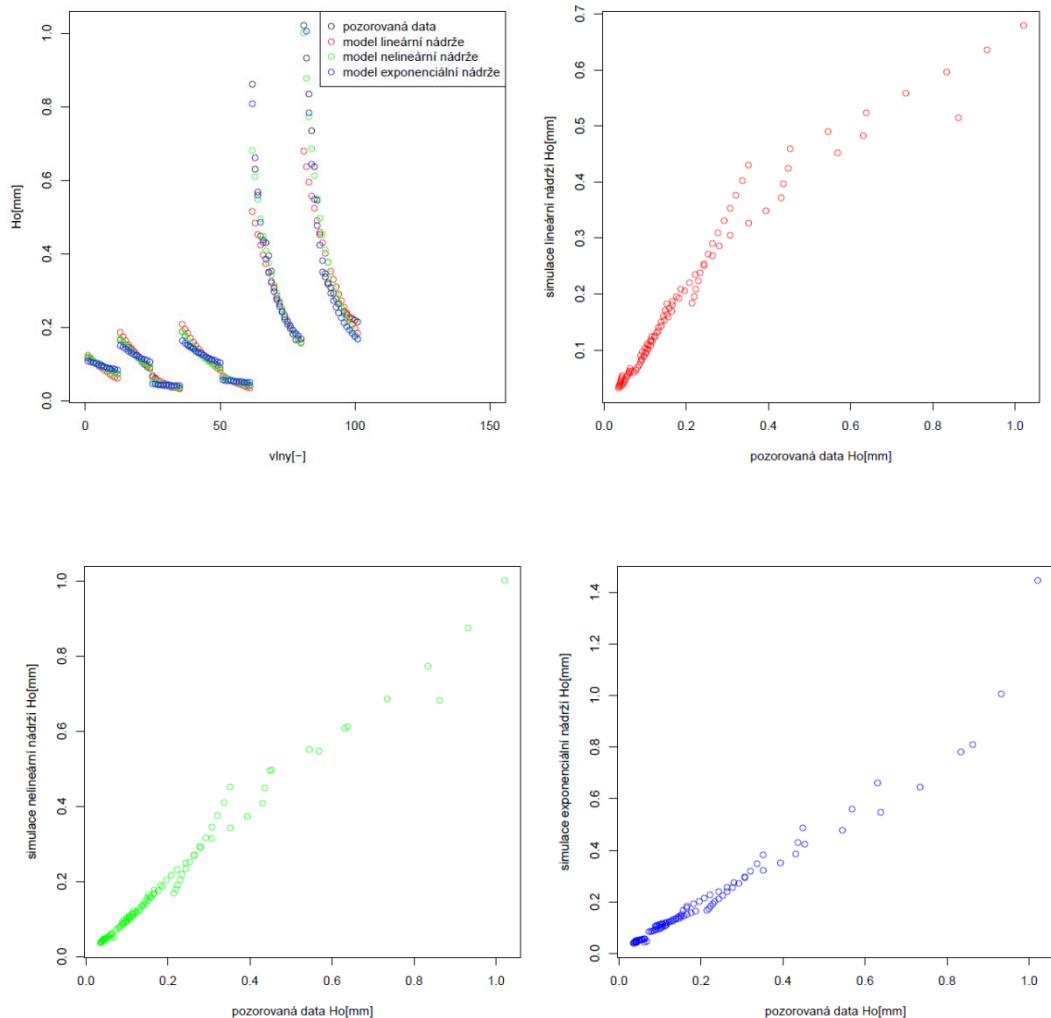
Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Klenice byl roven osmi. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=0,405\text{mm}^2$ , parametrem  $a=90,38$  a parametrem  $b=1,797$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=7,414\text{mm}$  zjištěnou v osmé vlně a hodnotou  $S_0=15,81\text{mm}$  získanou ze třetí vlny. Model lineární nádrže měl průměrnou hodnotu objektivní funkce  $\ln SS=1,650\text{mm}^2$  a hodnotu parametru  $a=0,108$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=4,439\text{mm}$  a hodnotou  $S_0=12,19\text{mm}$ . Nejslabším modelem se v povodí řeky Klenice stal model exponenciální nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=2,764\text{mm}^2$ , hodnotou parametru  $a=25,47$  a hodnotou parametru  $b=3,998$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=8,739\text{mm}$  a hodnotou  $S_0=16,10\text{mm}$ .



Obr. č. 36: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Klenice

### 13.1.5 Litava

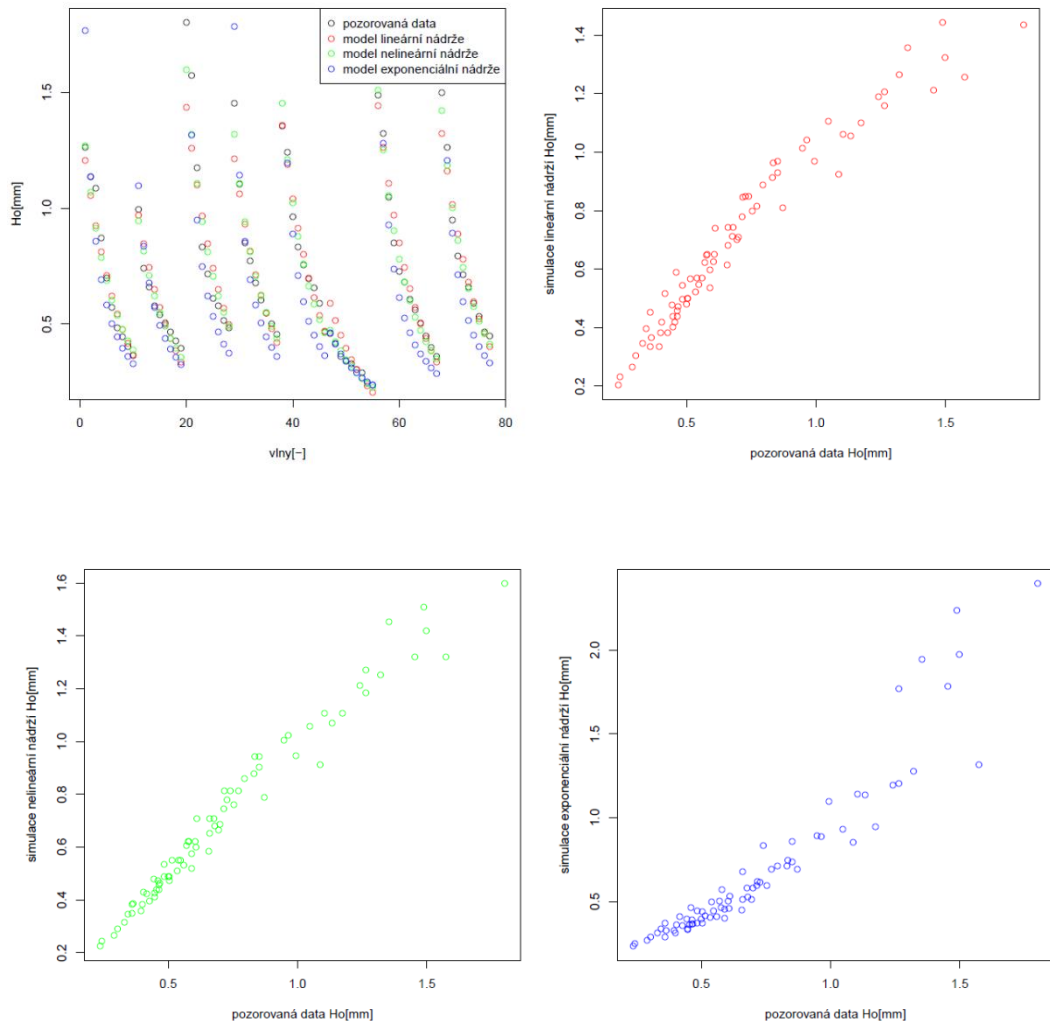
Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Litavy byl roven sedmi. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 0,666 \text{ mm}^2$ , parametrem  $a = 85,22$  a parametrem  $b = 1,704$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 2,385 \text{ mm}$  zjištěnou ve třetí vlně a hodnotou  $S_0 = 13,47 \text{ mm}$  získanou ze sedmé vlny. Model exponenciální nádrže měl průměrnou hodnotu objektivní funkce  $\ln SS = 1,228 \text{ mm}^2$ , hodnotu parametru  $a = 57,76$  a hodnotou parametru  $b = 3,986$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi  $S_0 = 3,724 \text{ mm}$  a  $S_0 = 17,44 \text{ mm}$ . Nejslabším modelem se v povodí řeky Litavy stal model lineární nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 4,775 \text{ mm}^2$  a hodnotou parametru  $a = 0,059$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi  $S_0 = 1,161 \text{ mm}$  a  $S_0 = 12,09 \text{ mm}$ .



Obr. č. 37: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Litavy

### 13.1.6 Malše

Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Malše byl roven osmi. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=0,382\text{mm}^2$ , parametrem  $a=86,80$  a parametrem  $b=1,784$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=8,057\text{mm}$  zjištěnou v šesté vlně a hodnotou  $S_0=15,71\text{mm}$  získanou ze třetí vlny. Model lineární nádrže měl průměrnou hodnotu objektivní funkce  $\ln SS=1,205\text{mm}^2$  a hodnotu parametru  $a=0,117$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=4,656\text{mm}$  a hodnotou  $S_0=11,68\text{mm}$ . Nejslabším modelem se v povodí řeky Malše stal model exponenciální nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=3,036\text{mm}^2$ , hodnotou parametru  $a=25,38$  a hodnotou parametru  $b=3,998$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=9,568\text{mm}$  a hodnotou  $S_0=16,02\text{mm}$ .

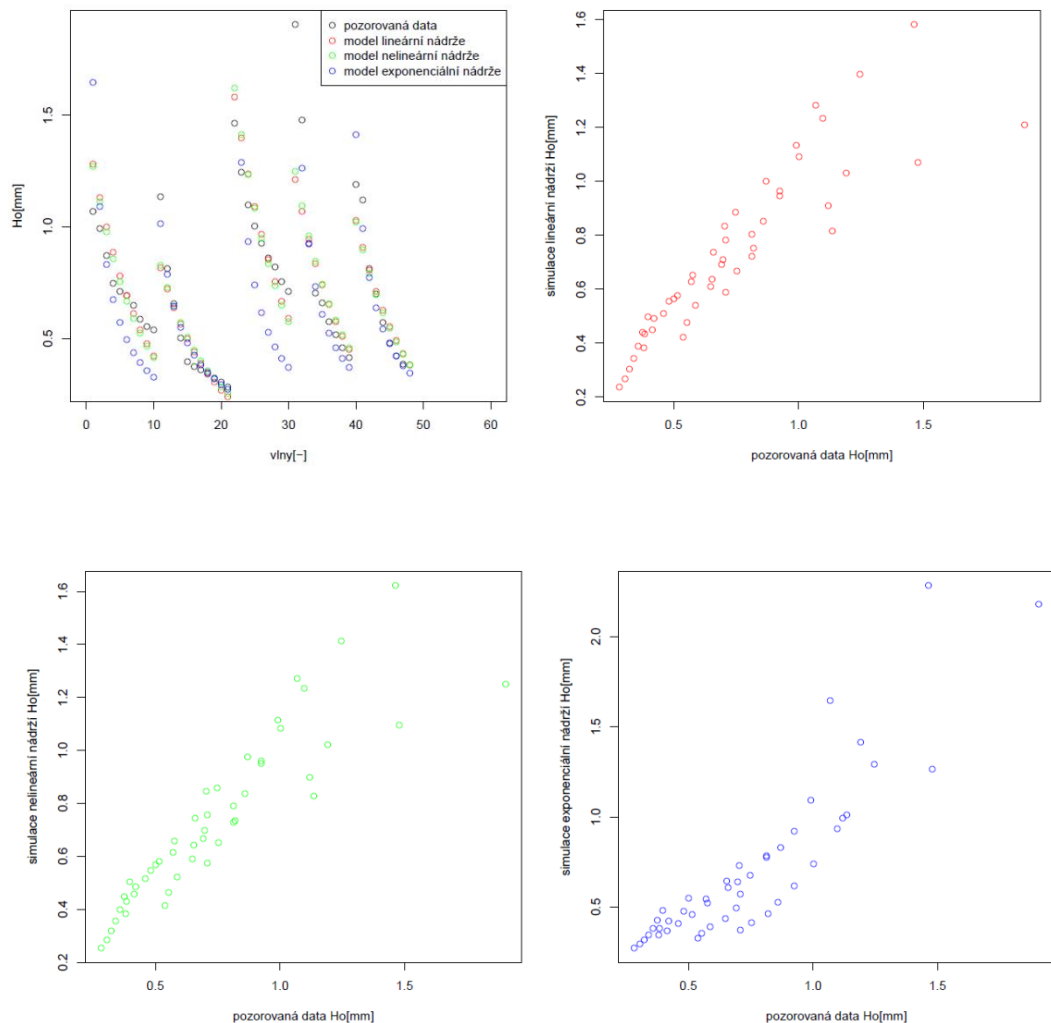


Obr. č. 38: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Malše



### 13.1.7 Orlice

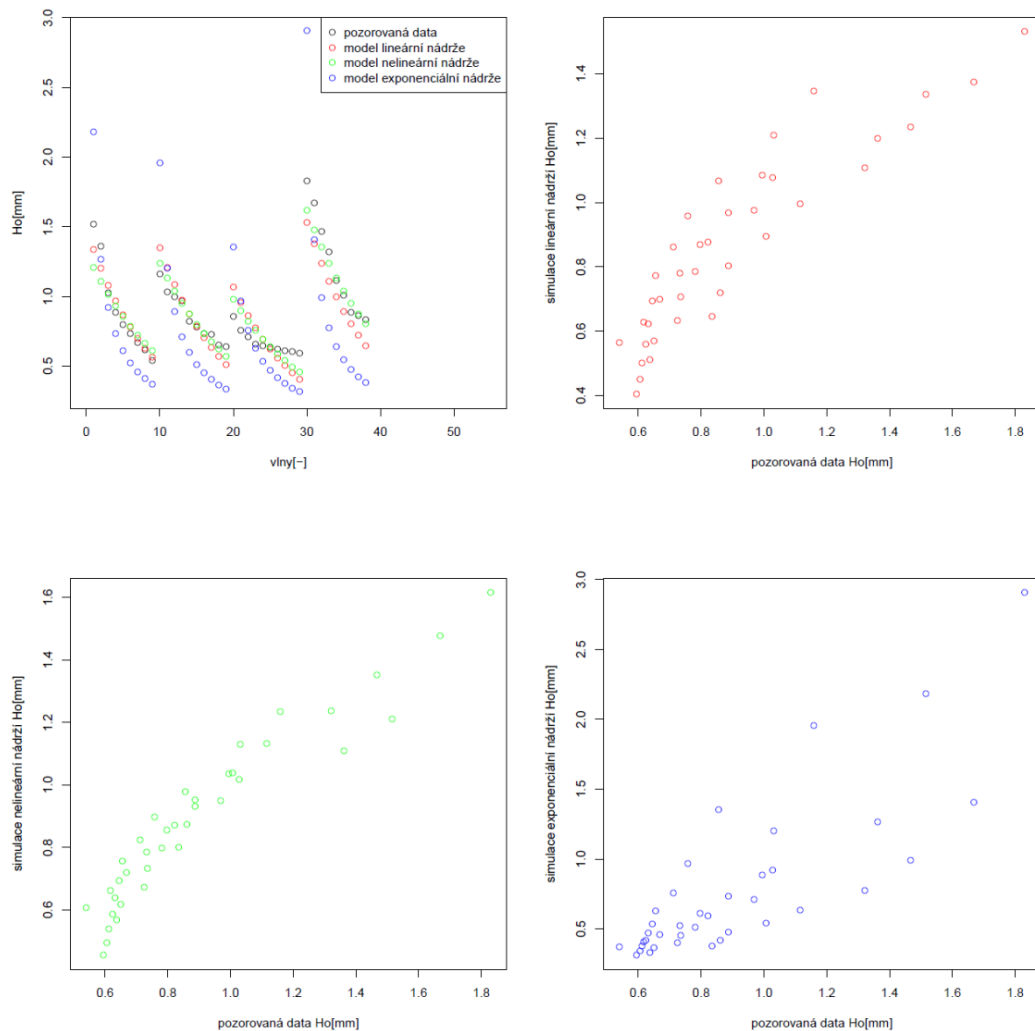
Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Orlice byl roven pěti. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=1,086\text{mm}^2$ , parametrem  $a=16,81$  a parametrem  $b=1,227$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=8,301\text{mm}$  zjištěnou ve druhé vlně a hodnotou  $S_0=14,69\text{mm}$  získanou ze třetí vlny. Model lineární nádrže měl průměrnou hodnotu objektivní funkce  $\ln SS=1,211\text{mm}^2$  a hodnotu parametru  $a=0,116$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=7,204\text{mm}$  a hodnotou  $S_0=13,57\text{mm}$ . Nejslabším modelem se v povodí řeky Orlice stal model exponenciální nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=3,223\text{mm}^2$ , hodnotou parametru  $a=28,73$  a hodnotou parametru  $b=4,000$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=13,10\text{mm}$  a hodnotou  $S_0=16,42\text{mm}$ .



Obr. č. 39: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Orlice

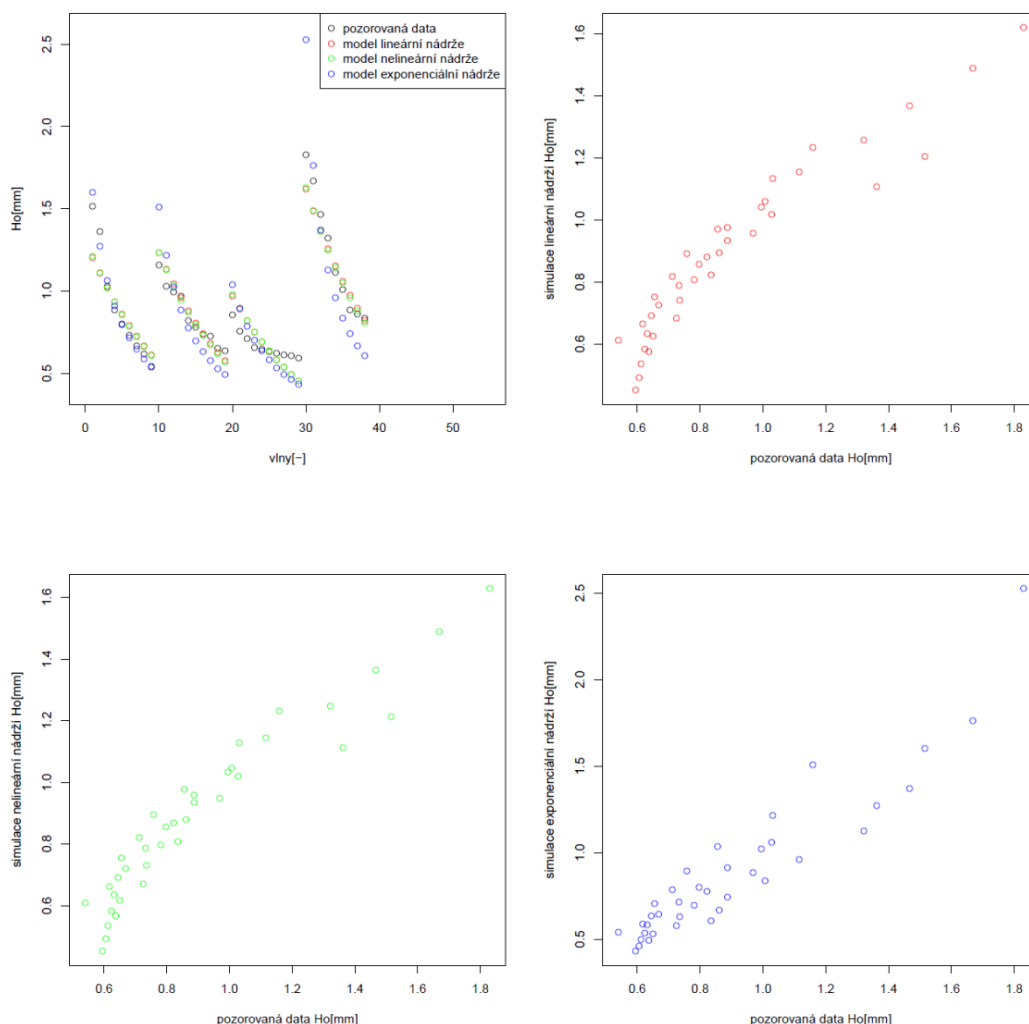
### 13.1.8 Otava

Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Otavy byl roven čtyřem. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 0,444 \text{ mm}^2$ , parametrem  $a = 14,44$  a parametrem  $b = 1,052$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 12,45 \text{ mm}$  zjištěnou ve třetí vlně a hodnotou  $S_0 = 19,99 \text{ mm}$  získanou ze čtvrté vlny. Model lineární nádrže měl hodnotu  $\ln SS = 1,019 \text{ mm}^2$  a hodnotu parametru  $a = 0,101$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 10,67 \text{ mm}$  a hodnotou  $S_0 = 14,82 \text{ mm}$ . Nejslabším modelem se v povodí řeky Otavy stal model exponenciální nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 7,287 \text{ mm}^2$ , hodnotou parametru  $a = 24,41$  a hodnotou parametru  $b = 4,000$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 13,59 \text{ mm}$  a hodnotou  $S_0 = 16,65 \text{ mm}$ .



Obr. č. 40: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Otavy

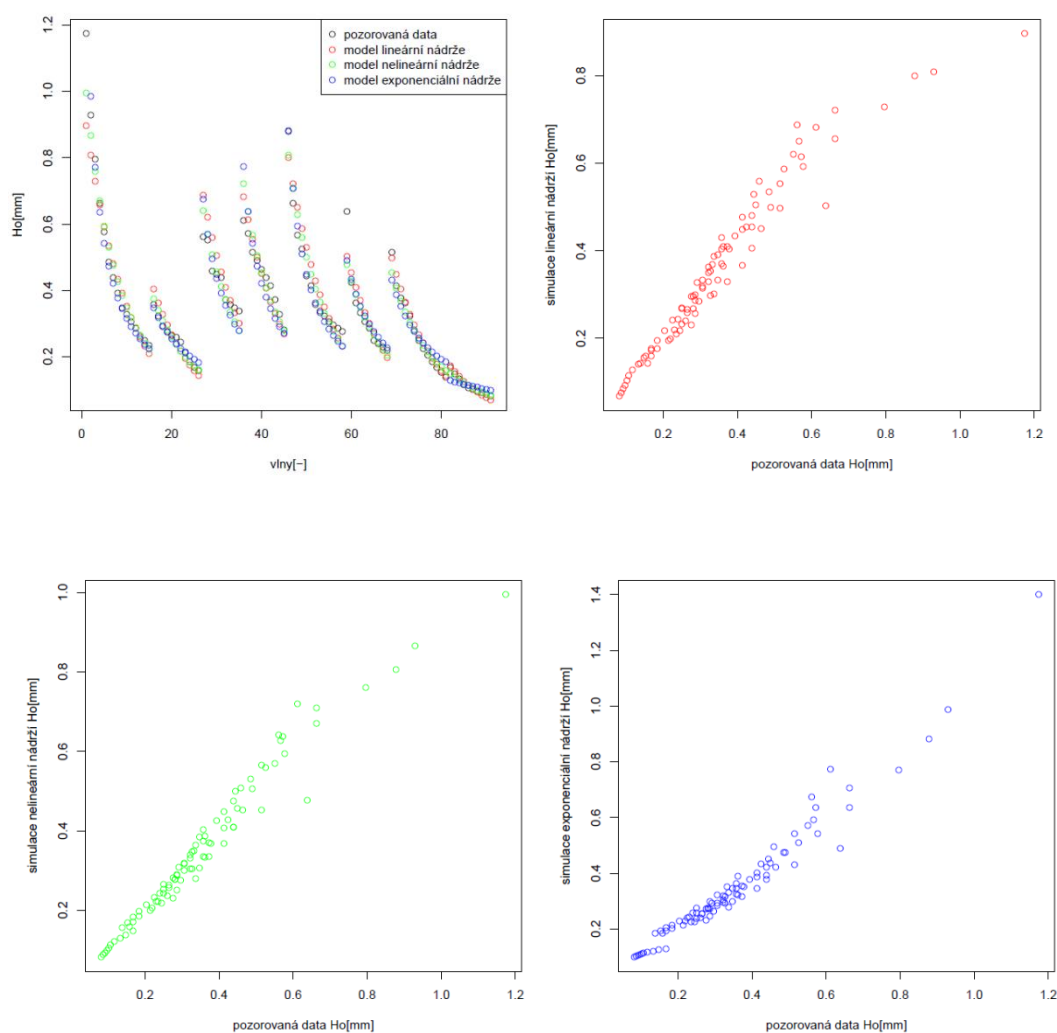
Průměrná hodnota objektivní funkce v modelu exponenciální nádrže na řece Otavě byla příliš velká a tedy nevyhovující ( $\ln SS=7,287\text{mm}^2$ ). Z tohoto důvodu musely být vstupní parametry algoritmu SCDE upraveny. Rozsah počátečních zásob v modelech byl stanoven na  $S_0=10\text{-}20\text{mm}$  a rozsah parametru  $b$  byl upraven na  $0\text{-}7$ . Nejlepší simulace po úpravě opět dosáhl model nelineární nádrže, i když s lehce zhoršenou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=0,445\text{mm}^2$ , parametrem  $a=14,70$  a parametrem  $b=1,059$ . Počáteční zásoba podzemní vody se pohybovala mezi  $S_0=12,45\text{mm}$  a  $S_0=19,99\text{mm}$  ve stejných vlnách jako před úpravou rozsahů. Model lineární nádrže měl zlepšenou hodnotu  $\ln SS=0,505\text{mm}^2$  a parametr  $a=0,083$ . Průměrná počáteční zásoba byla mezi hodnotou  $S_0=11,89\text{mm}$  a hodnotou  $S_0=19,45\text{mm}$ . Nejslabším modelem se opět stal model exponenciální nádrže se sníženou hodnotou  $\ln SS=1,045\text{mm}^2$ , s parametrem  $a=6,076$  a s parametrem  $b=7,000$ . Zásoba ve vlnách se pohybovala mezi  $S_0=12,87\text{mm}$  a  $S_0=19,08\text{mm}$ .



Obr. č. 41: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Otavy po úpravě rozsahu počáteční zásoby a parametru  $b$  v SCDE

### 13.1.9 Řečice

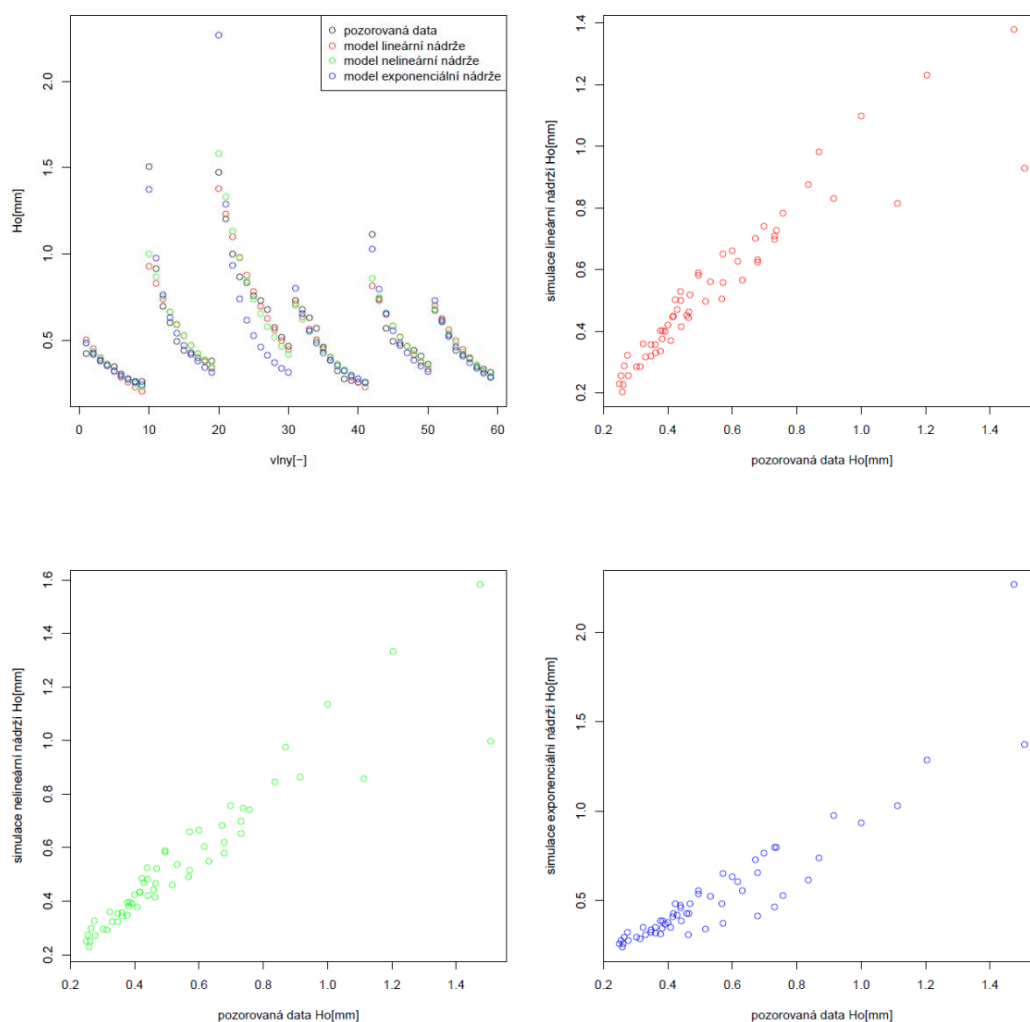
Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Řečice byl roven osmi. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 0,667 \text{ mm}^2$ , parametrem  $a = 58,98$  a parametrem  $b = 1,625$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 3,666 \text{ mm}$  zjištěnou v osmé vlně a hodnotou  $S_0 = 11,92 \text{ mm}$  získanou z první vlny. Model exponenciální nádrže měl  $\ln SS = 1,144 \text{ mm}^2$ , parametr  $a = 37,04$  a parametr  $b = 3,964$ . Průměrná počáteční zásoba se pohybovala mezi  $S_0 = 5,823 \text{ mm}$  a  $S_0 = 15,15 \text{ mm}$ . Nejslabším modelem stal model lineární nádrže s  $\ln SS = 2,251 \text{ mm}^2$  a hodnotou parametru  $a = 0,081$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi  $S_0 = 2,100 \text{ mm}$  a  $S_0 = 10,10 \text{ mm}$ .



Obr. č. 42: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Řečice

### 13.1.10 Sázava

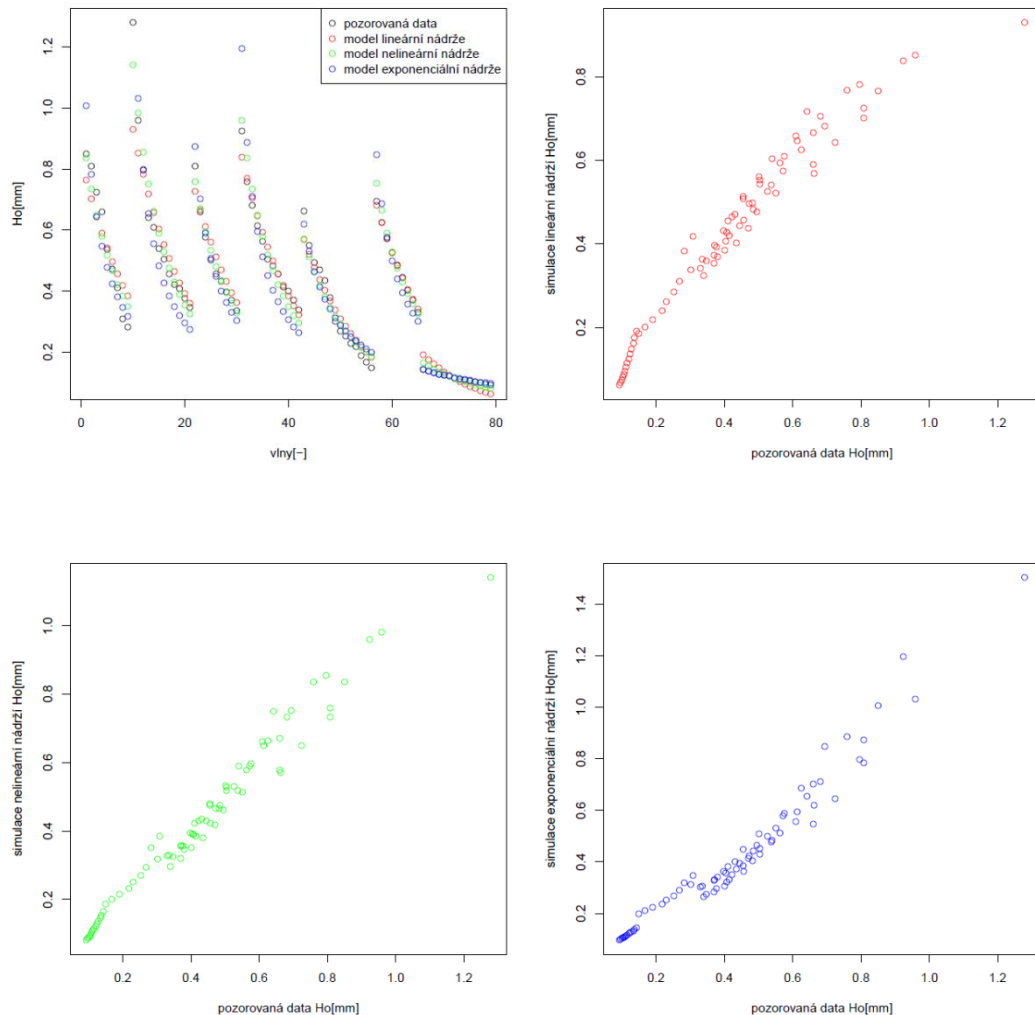
Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Sázavy byl roven šesti. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 0,711 \text{ mm}^2$ , parametrem  $a = 59,94$  a parametrem  $b = 1,629$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 7,676 \text{ mm}$  zjištěnou v první vlně a hodnotou  $S_0 = 15,87 \text{ mm}$  získanou ze třetí vlny. Model lineární nádrže měl hodnotu  $\ln SS = 1,171 \text{ mm}^2$  a hodnotu parametru  $a = 0,106$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 4,981 \text{ mm}$  a hodnotou  $S_0 = 13,03 \text{ mm}$ . Nejslabším modelem se v povodí řeky Sázavy stal model exponenciální nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS = 1,802 \text{ mm}^2$ , hodnotou parametru  $a = 29,67$  a hodnotou parametru  $b = 3,997$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0 = 10,23 \text{ mm}$  a hodnotou  $S_0 = 16,35 \text{ mm}$ .



Obr. č. 43: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Sázavy

### 13.1.11 Teplá

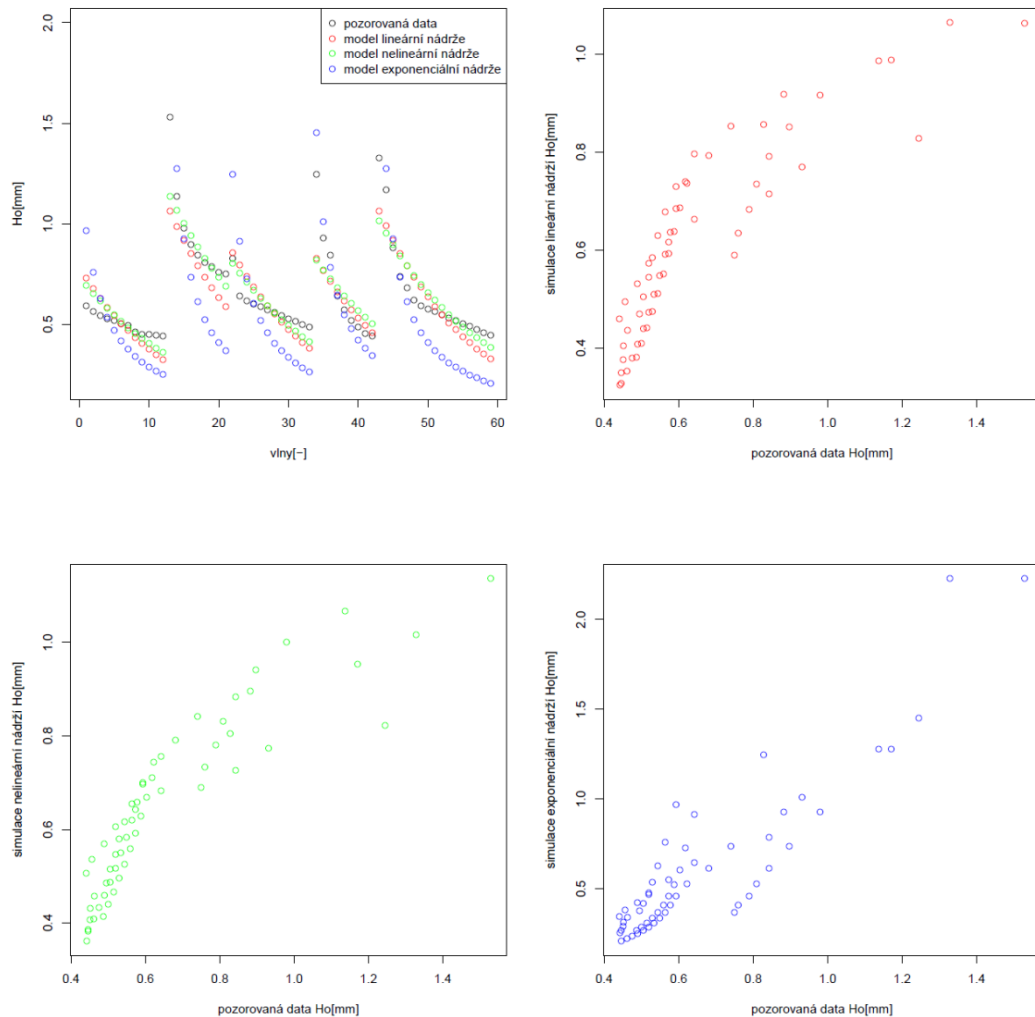
Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Teplé byl roven sedmi. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=0,646\text{mm}^2$ , parametrem  $a=87,68$  a parametrem  $b=1,744$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=4,612\text{mm}$  zjištěnou v sedmé vlně a hodnotou  $S_0=13,74\text{mm}$  získanou z první vlny. Model exponenciální nádrže měl hodnotu  $\ln SS=1,340\text{mm}^2$ , hodnotu parametru  $a=33,88$  a hodnotou parametru  $b=3,994$ . Průměrná počáteční zásoba se pohybovala mezi  $S_0=5,886\text{mm}$  a  $S_0=15,49\text{mm}$ . Nejslabším modelem se v povodí řeky Teplé stal model lineární nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=2,060\text{mm}^2$  a hodnotou parametru  $a=0,080$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=2,587\text{mm}$  a hodnotou  $S_0=11,40\text{mm}$ .



Obr. č. 44: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Teplé

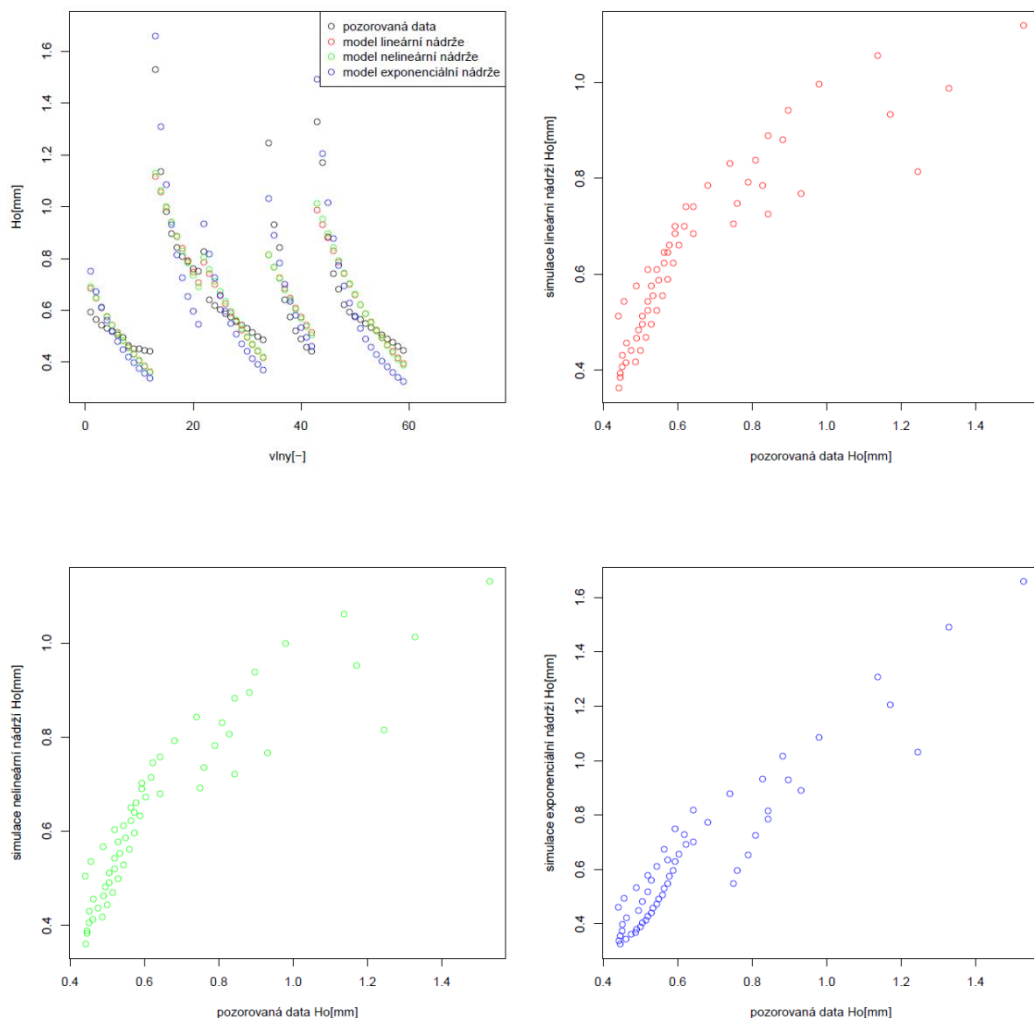
### 13.1.12 Teplá Vltava

Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Teplé Vltavy byl roven pěti. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=1,015mm^2$ , parametrem  $a=22,49$  a parametrem  $b=1,081$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=12,62mm$  zjištěnou v první vlně a hodnotou  $S_0=19,99mm$  získanou z druhé vlny. Model lineární nádrže měl hodnotu  $\ln SS=1,877mm^2$  a hodnotu parametru  $a=0,073$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=10,38mm$  a hodnotou  $S_0=14,61mm$ . Nejslabším modelem se v povodí řeky Teplé Vltavy stal model exponenciální nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=9,064mm^2$ , hodnotou parametru  $a=31,19$  a hodnotou parametru  $b=4,000$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=13,35mm$  a hodnotou  $S_0=16,70mm$  pro pátou vlnu, ne pro druhou.



Obr. č. 45: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Teplé Vltavy

Průměrná hodnota objektivní funkce v modelu exponenciální nádrže na tomto povodí byla příliš velká ( $\ln SS=9,064\text{mm}^2$ ). Z tohoto důvodu musely být vstupní parametry algoritmu SCDE upraveny. Rozsah počátečních zásob v modelech byl stanoven na  $S_0=10\text{-}20\text{mm}$  a rozsah parametru  $b$  byl upraven na  $0\text{-}7$ . Nejlepší simulace byla po úpravě dosažena modelem nelineární nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=1,016\text{mm}^2$ , parametrem  $a=21,89$  a parametrem  $b=1,072$ . Počáteční zásoba podzemní vody se pohybovala mezi  $S_0=12,62\text{mm}$  a  $S_0=19,96\text{mm}$  ve stejných vlnách jako před úpravou rozsahů. Model lineární nádrže měl zlepšenou hodnotu  $\ln SS=1,198\text{mm}^2$  a parametr  $a=0,058$ . Zásoba byla mezi  $S_0=12,13\text{mm}$  a  $S_0=19,10\text{mm}$ . Nejslabším modelem se opět stal model exponenciální nádrže se sníženou hodnotou  $\ln SS=1,550\text{mm}^2$ , s parametrem  $a=8,862$  a s parametrem  $b=6,999$ . Zásoba ve vlnách se pohybovala mezi  $S_0=13,17\text{mm}$  a  $S_0=18,83\text{mm}$ .

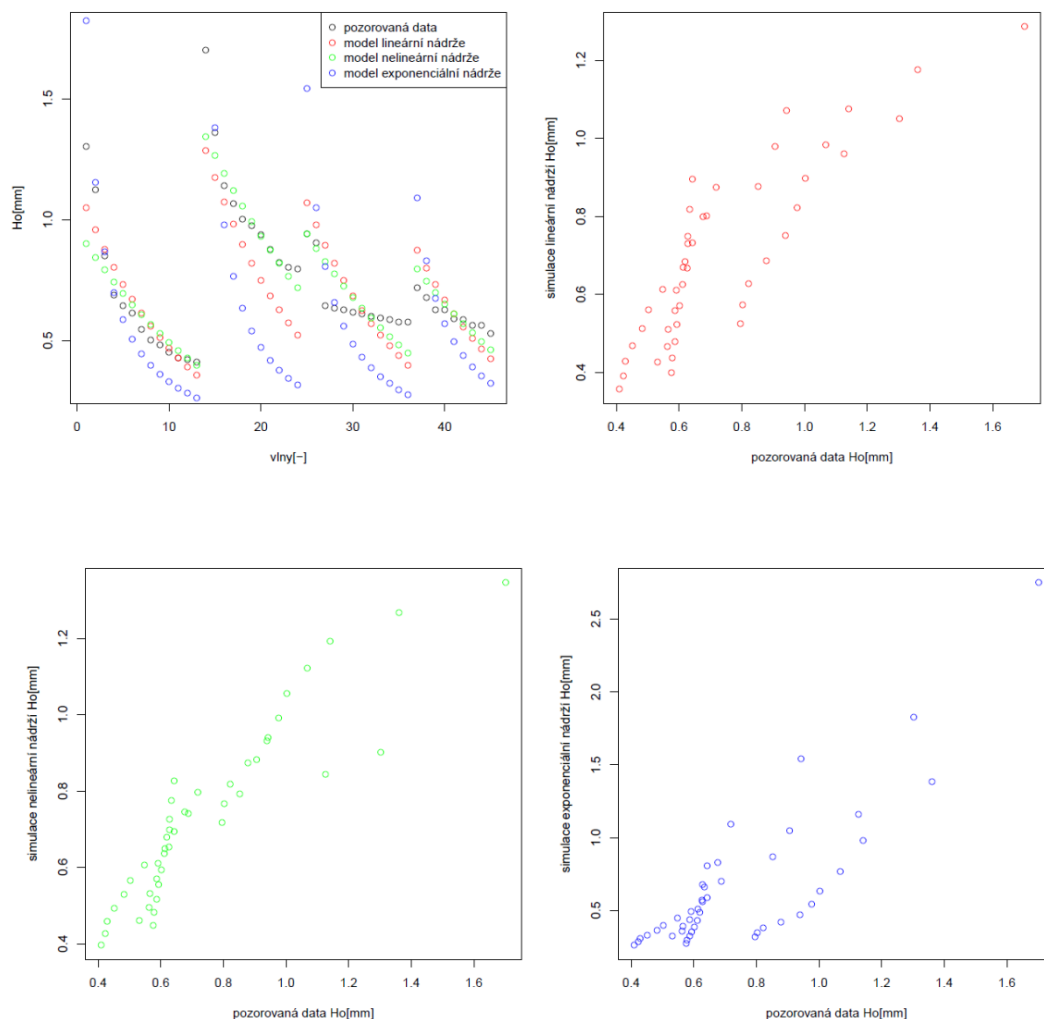


Obr. č. 46: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Teplé Vltavy po úpravě rozsahu počáteční zásoby a parametru  $b$  v SCDE



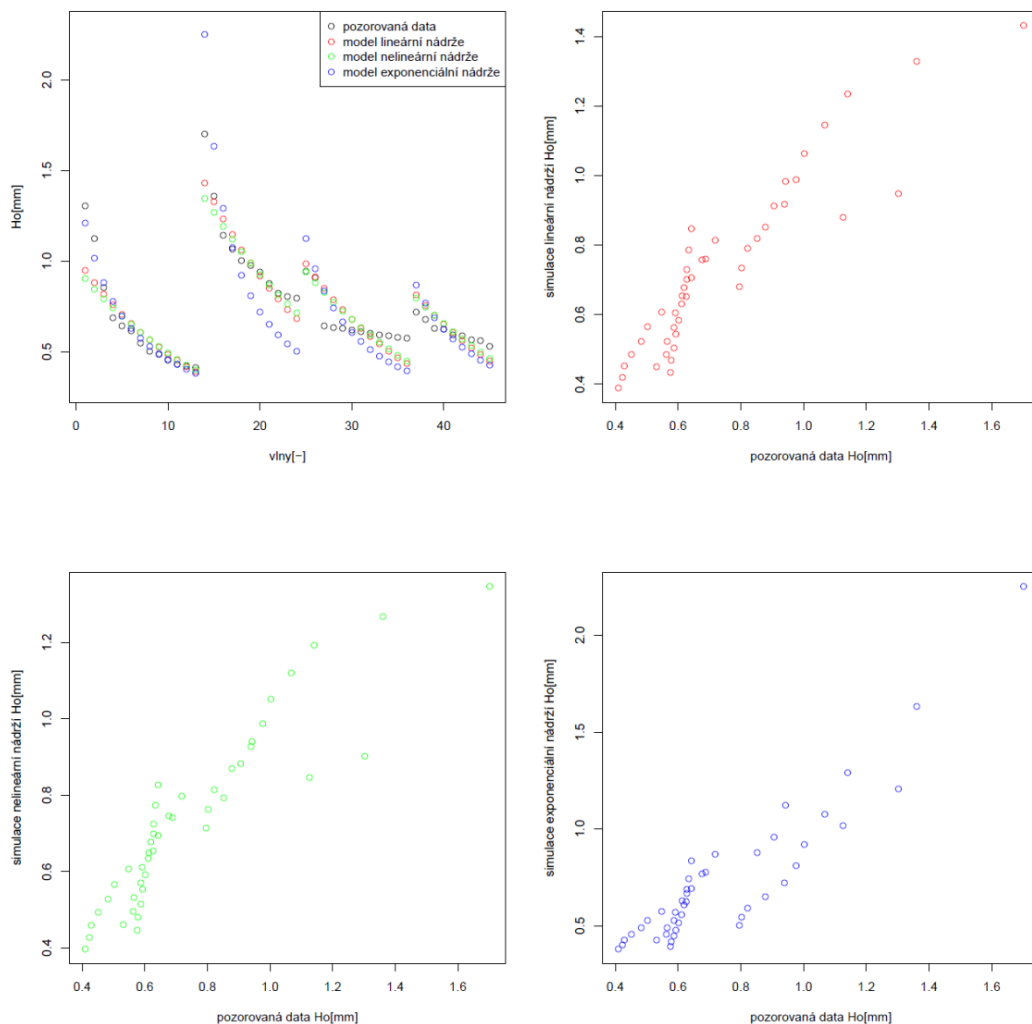
### 13.1.13 Úpa

Počet vybraných sestupných větví pro povodí řeky Úpy byl roven čtyřem. Nejlepší simulace na těchto vlnách dosáhl model nelineární nádrže s průměrnou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=0,696\text{mm}^2$ , parametrem  $a=9,821$  a parametrem  $b=0,862$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se u tohoto modelu pohybovala mezi hodnotou  $S_0=10,86\text{mm}$  zjištěnou ve čtvrté vlně a hodnotou  $S_0=19,97\text{mm}$  získanou z druhé vlny. Model lineární nádrže měl hodnotu  $\ln SS=1,659\text{mm}^2$  a hodnotu parametru  $a=0,088$ . Průměrná počáteční zásoba podzemní vody se pohybovala mezi hodnotou  $S_0=10,06\text{mm}$  a hodnotou  $S_0=14,80\text{mm}$ . Nejslabším modelem se v povodí řeky Úpy stal model exponenciální nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=8,325\text{mm}^2$ , hodnotou parametru  $a=26,41$  a hodnotou parametru  $b=4,000$ . Počáteční zásoba byla mezi  $S_0=13,08\text{mm}$  a  $S_0=16,78\text{mm}$ .



Obr. č. 47: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Úpy

Průměrná hodnota objektivní funkce v modelu exponenciální nádrže na povodí řeky Úpy byla příliš velká ( $\ln SS=8,325mm^2$ ). Z tohoto důvodu musely být vstupní parametry algoritmu SCDE upraveny. Rozsah počátečních zásob v modelech byl stanoven na  $S_0=10-20mm$  a rozsah parametru  $b$  byl upraven na  $0-7$ . Nejlepší simulace byla po úpravě dosažena modelem nelineární nádrže s hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=0,697mm^2$ , parametrem  $a=9,767$  a parametrem  $b=0,860$ . Počáteční zásoba podzemní vody se pohybovala mezi  $S_0=10,82mm$  a  $S_0=19,97mm$  ve stejných vlnách jako před úpravou rozsahů. Model lineární nádrže měl zlepšenou hodnotu objektivní funkce  $\ln SS=0,802mm^2$  a parametr  $a=0,071$ . Počáteční zásoba byla mezi hodnotou  $S_0=11,54mm$  a hodnotou  $S_0=19,65mm$ . Nejslabším modelem se opět stal model exponenciální nádrže se sníženou hodnotou objektivní funkce  $\ln SS=1,579mm^2$ , s parametrem  $a=6,770$  a s parametrem  $b=7,000$ . Počáteční zásoba ve vlnách se pohybovala mezi hodnotou  $S_0=12,37mm$  a hodnotou  $S_0=19,04mm$ .



Obr. č. 48: Zobrazení pozorovaných a simulovaných dat modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na povodí řeky Úpy po úpravě rozsahu počáteční zásoby a parametru  $b$  v SCDE

### 13.2 Shrnutí výsledků druhé části analýzy a porovnání modelů

Nejlepším testovaným modelem se stal model simulující nelineární pomalou odtokovou odezvu a to na všech vybraných povodích na základě nejmenší průměrné hodnoty objektivní funkce  $lnSS$  (tab. č. 3). Největších hodnot objektivní funkce dle původního nastavení rozsahů parametrů a počátečních zásob naopak nabýval model exponenciální nádrže. U povodí řek Jizery, Otavy, Teplé Vltavy a Úpy musel být proto rozsah vstupních hodnot upraven tak, aby lépe simuloval naměřená data výšek odtoků ve vybraných větvích. Úpravou rozsahů hodnot došlo ke zlepšení hodnoty objektivní funkce nejen u modelu exponenciální nádrže, ale také u modelu lineární nádrže. Naopak ke zlepšení hodnoty  $lnSS$  nedošlo u modelu lineární nádrže.

Typ nádrže	Lineární nádrž $lnSS [mm^2]$	Nelineární nádrž $lnSS [mm^2]$	Exponenciální nádrž $lnSS [mm^2]$
Řeky			
<i>Cidlina</i>	1,581	0,283	0,696
<i>Hloučela</i>	10,43	2,759	7,406
<i>Jizera</i>	9,213	1,522	31,53
	3,352	1,657	8,819
<i>Klenice</i>	1,650	0,405	2,764
<i>Litava</i>	4,775	0,666	1,228
<i>Malše</i>	1,205	0,382	3,036
<i>Orlice</i>	1,211	1,086	3,223
<i>Otava</i>	1,019	0,444	7,287
	0,505	0,445	1,045
<i>Řečice</i>	2,251	0,667	1,144
<i>Sázava</i>	1,171	0,711	1,802
<i>Teplá</i>	2,060	0,646	1,340
<i>Teplá Vltava</i>	1,877	1,015	9,064
	1,198	1,016	1,550
<i>Úpa</i>	1,659	0,696	8,325
	0,802	0,697	1,579

Tab. č. 3: Průměrné hodnoty objektivní funkce ( $lnSS$ ) pro vybrané sestupné větve ve třinácti povodích České republiky

Průměrné hodnoty parametru  $a$  v jednotlivých povodích pro tři typy modelů nádrží jsou dány tabulkou číslo 4. U všech modelů bylo rozmezí parametru  $a$  nastaveno shodně (0-100). U lineární nádrže se průměrná hodnota parametru  $a$  ustálila mezi nulou a jedničkou. Výjimku tvoří pouze řeka Cidlina, u které byla průměrná hodnota parametru  $a$  lehce nad hodnotou jedna ( $a=1,113$ ). Naopak u dalších dvou modelů, modelu nelineární nádrže a modelu exponenciální nádrže, se průměrné hodnoty parametru  $a$  pohybovaly mezi 2 až 91, tedy skoro v celém nastaveném rozsahu. Největší hodnota parametru  $a$  byla dosažena v modelu nelineární nádrže u řeky Klenice ( $a=90,38$ ).

<i>Typ nádrže</i>	<i>Lineární nádrž Parametr <math>a</math> [-]</i>	<i>Nelineární nádrž Parametr <math>a</math> [-]</i>	<i>Exponenciální nádrž Parametr <math>a</math> [-]</i>
<i>Řeky</i>			
<i>Cidlina</i>	1,113	86,17	51,54
<i>Hloučela</i>	0,082	27,12	44,46
<i>Jizera</i>	0,133	2,293	22,46
	0,114	2,487	3,801
<i>Klenice</i>	0,108	90,38	25,47
<i>Litava</i>	0,059	85,22	57,76
<i>Malše</i>	0,117	86,80	25,38
<i>Orlice</i>	0,116	16,81	28,73
<i>Otava</i>	0,101	14,44	24,41
	0,083	14,70	6,076
<i>Řečice</i>	0,081	58,98	37,04
<i>Sázava</i>	0,106	59,94	29,67
<i>Teplá</i>	0,080	87,68	33,88
<i>Teplá Vltava</i>	0,073	22,49	31,19
	0,058	21,89	8,862
<i>Úpa</i>	0,088	9,821	25,10
	0,071	9,767	6,770

Tab. č. 4: Průměrné hodnoty parametru  $a$  pro vybrané sestupné větve ve třinácti povodích České republiky

Průměrné hodnoty parametru  $b$  jsou dány tabulkou číslo 5. V konstitučním vztahu pro model lineární nádrže se vyskytuje pouze parametr  $a$ , proto v tomto případě není model uvažován ( $b=1$ ). Zbývajícím dvěma modelům bylo přiřazeno rozmezí parametru  $b$  shodně mezi hodnotami 0,5-4. U modelu nelineární nádrže se průměrná hodnota parametru  $b$  ustálila mezi hodnotou 0,5 a 2. Naopak u modelu exponenciální nádrže se průměrná hodnota parametru  $b$  blížila přímo koncové hodnotě vymezeného rozsahu ( $b=4$ ). Pouze u řeky Cidliny byl parametr  $b$  těsně nad hodnotou tři. I po změně rozsahu parametru  $b$  (0-7) z důvodu lepší simulace sestupných větví modelem exponenciální nádrže se parametr  $b$  opět blížil koncové hodnotě nově vymezeného rozsahu ( $b=7$ ).

<i>Typ nádrže</i>	<i>Lineární nádrž Parametr <math>b</math> [-]</i>	<i>Nelineární nádrž Parametr <math>b</math> [-]</i>	<i>Exponenciální nádrž Parametr <math>b</math> [-]</i>
<i>Řeky</i>			
<i>Cidlina</i>	-	1,972	3,162
<i>Hloučela</i>	-	1,368	3,993
<i>Jizera</i>	-	0,516 0,543	4,000 7,000
<i>Klenice</i>	-	1,797	3,998
<i>Litava</i>	-	1,704	3,986
<i>Mašše</i>	-	1,784	3,998
<i>Orlice</i>	-	1,227	4,000
<i>Otava</i>	-	1,052 1,059	4,000 7,000
<i>Řečice</i>	-	1,625	3,964
<i>Sázava</i>	-	1,629	3,997
<i>Teplá</i>	-	1,744	3,994
<i>Teplá Vltava</i>	-	1,081 1,072	4,000 6,999
<i>Úpa</i>	-	0,862 0,860	4,000 7,000

Tab. č. 5: Průměrné hodnoty parametru  $b$  pro vybrané sestupné větve ve třinácti povodích České republiky

Jak už bylo dříve zmíněno, nejlepší simulace na reprezentativních sestupných větvích pro všechna vybraná povodí byla provedena modelem nelineární nádrže. Nejhůře byly naopak proloženy reprezentativní sestupné větve na většině vybraných povodí modelem exponenciální nádrže. Na některých povodích ale model exponenciální nádrže překonal model lineární nádrže. Týkalo se to reprezentativních větví na povodí řeky Cidliny (obr. č. 32), Hloučely (obr. č. 33), Litavy (obr. č. 37), Řečice (obr. č. 42) a Teplé (obr. č. 44).

Nejlépe byla modelem lineární nádrže a nelineární nádrže nasimulována řeka Cidlina se šesti vybranými sestupnými větvemi. Modelem exponenciální nádrže byla nejlépe proložena řeka Malše (obr. č. 38). Dobře byla všemi modely také nasimulována řeka Hloučela s devíti reprezentativními větvemi, řeka Litava se sedmi větvemi a řeka Řečice s osmi větvemi. Porovnání bylo vytvořeno na základě průměrné hodnoty objektivní funkce pro jednu vybranou větev. Důvodem tohoto porovnání byl rozdílný počet vybraných sestupných větví v řekách, což v některých případech zkreslovalo výsledek z hlediska vyšší hodnoty objektivní funkce. Takovým případem byla řeka Hloučela s devíti sestupnými větvemi a s vyššími hodnotami objektivní funkce  $lnSS$ .

Z důvodu špatné simulace modelem exponenciální nádrže musely být u některých povodí upraveny rozsahy vstupních hodnot (počáteční zásoba podzemní vody u jednotlivých vln a parametr  $b$ ). Tato úprava přinesla zlepšení ve snížené hodnotě objektivní funkce u tohoto modelu a zároveň i u modelu lineární nádrže u řeky Jizery (obr. č. 34, 35), Otavy (obr. č. 40, 41), Teplé Vltavy (obr. č. 45, 46) a Úpy (obr. č. 47, 48). Zlepšení však nedosáhlo takových výsledků, aby byly řeky a jejich sestupné větve řazeny mezi nejlépe nasimulované.

## **14. Diskuze**

Výsledky první části analýzy sestupných větví hydrogramu odtoku byly ovlivněny nastavením počátečních hodnot pro výběr určitého množství vln. Analýza vybraného počtu sestupných větví byla prováděna na základě kapacitních možností počítače. U některých povodí byl proto vygenerován menší počet vln, což mohlo ovlivnit parametry modelu nelineární nádrže nacházející se v příslušném konstitučním vztahu.

Je také nutné podotknout, že některé vybrané sestupné větve prokazovaly nestabilitu v samotném průběhu analýzy, což mohlo být způsobeno například špatně zaznamenanými výškami odtoků na určitých povodích, sezonním výkyvem odtoku, náhodnými povodňovými událostmi či událostmi spojenými s nízkými stavy hladin na měřených povodích. Tato nestabilita se také mohla odrazit v hodnotách parametrů konstitučního vztahu modelu nelineární nádrže.

Výsledky druhé části analýzy naopak nezávisely na kapacitních možnostech počítače, protože výpočty a následné výstupy byly prováděny na školním serveru. Výsledky však byly ovlivněny výběrem reprezentativních sestupných větví z hydrogramu odtoku. Sestupné větve naměřených výšek odtoků byly vybrány v malém počtu a na základě toho, jak dobře byly nasimulovány modelem lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže. Otázkou je, zda by se podařilo vytvořit takové kvalitní výstupy na základě výběru většího množství sestupných větví. S rostoucím množstvím sestupných větví totiž roste hodnota dané objektivní funkce, což by mohlo vést ke špatné simulaci sestupných větví v jednotlivých povodích.

Na závěr diskuze je nutno podotknout, že ve druhé části analýzy byl potvrzen fakt ohledně vztahu zásoby a odtoku. Vztah zásoby podzemní vody a základního odtoku je více nelineární než lineární, proto bývá na většinu povodí spíše aplikován konceptuální model nelineární nádrže. Tento model totiž představuje realističtější pohled z hlediska vztahu zásoby a odtoku (Wittenberg, 1999), což bylo potvrzeno i v této práci.

## 15. Závěr

Diplomová práce se zabývala analýzou sestupných větví hydrogramu odtoku, které byly vybrány na základě podmínky o minimální délce sestupné větve, prahové hodnotě výšky odtoku a hodnotě povolující mírnou oscilaci na sestupné větvi.

V první části analýzy byl zjišťován vztah zásoby a odtoku podzemní vody za použití lokálního optimalizačního algoritmu. Na základě této optimalizace byly identifikovány parametry vybraného konstitučního vztahu vztahujícího se k modelu nelineární nádrže, pomocí kterého byla generována pomalá odtoková odezva povodí. Výsledkem této analýzy bylo stanovení hodnot parametrů  $a$ ,  $b$  v příslušném Q~S vztahu pro model nelineární nádrže a grafické zobrazení závislosti parametru  $b$  na určitém rozsahu minimální délky sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro třináct povodí České republiky. Nejmenší hodnota parametru  $a$  byla získána na povodí řeky Litavy (0,067), největší pak v povodí řeky Orlice (0,4). Nejmenší hodnota parametru  $b$  byla zjištěna na povodí řeky Hlouchely (0,4), největší pak na povodí řek Teplé a Řečice (0,86). Pozvolný přechod parametru  $b$  v závislosti na rozsahu minimální délky sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku byl zaznamenán na povodí řeky Otavy.

Druhá část analýzy se týkala kalibrace modelů lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže na vybraných sestupných větvích simulujících pomalou odtokovou odezvu povodí. Kalibrace modelů byla prováděna na čtyřech až devíti vybraných sestupných větvích ve třinácti povodích České republiky za použití globálního optimalizačního algoritmu Shuffled Complex Differential Evolution (SCDE). Princip tohoto algoritmu spočíval v rozdělení základní populace modelů do komplexů, ve kterých byla následně prováděna diferenciální evoluce, pomocí které byla nalezena optimální hodnota objektivní funkce ( $lnSS$ ). Nejlepších výsledků z hlediska minimální hodnoty objektivní funkce dosáhlo povodí řeky Cidlina, Hlouchely, Malše, Litavy a Řečice. Nejslabším modelem byl určen model exponenciální nádrže a nejsilnějším se stal model simulující nelineární odtokovou odezvu povodí, tedy model nelineární nádrže.

Cílem diplomové práce bylo analyzovat pomalou odtokovou odezvu ve vybraných povodích České republiky za pomoci modelů lineární nádrže, nelineární nádrže a exponenciální nádrže z hlediska zvýšeného vlivu hydrologické sucha na vodní režim řek. Přínosem této práce bylo zjištění, že základní odtoková odezva povodí odpovídá spíše nelineární odtokové odezvě. Tento poznatek by mohl být využit v modelování hydrologického sucha na povodích České republiky.



## Zdroje

- Ajami N. K., Gupta H., Wagener T. et Sorooshian S., 2004: Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology* 298: 112-135.
- Aksoy H. et Wittenberg H., 2011: Nonlinear baseflow recession analysis in watersheds with intermittent streamflow. *Hydrological Science Journal* 56: 226-237.
- Anonym, 2013: Mapa vodstva ČR. Zemepis.com, geografický portál, online: <http://www.zemepis.com/rekycr.php>, cit. 8.3.2013.
- Bartovská L. et Šiškovská M., 2005: Mikropóry. Co je co v povrchové a koloidní chemii – výkladový slovník. Vydavatelství VŠCHT Praha, online: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/hesla/mikropory.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/mikropory.html), cit. 12.2.2013.
- Beran J., 2009: Základy vodního hospodářství. Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování. Fakulta životního prostředí. ČZU, Praha, s. 146.
- Blinka P., 2002: Metoda hodnocení sucha. XIV. Česko-slovenská bioklimatologická konference, Lednice na Moravě, s. 32-44.
- Burnash R. J. C., 1995: The NWS River Forecast System – catchment modeling. In Singh, V., P.: (et al.) *Computers Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highland Ranch, s. 311-366.
- Carlsson B., 2006: The HBV model, online: <http://www.smhi.se/sgn0106/if/hydrologi/hbv.htm>, cit. 29.1.2013.
- Castellarin A., Galeati G., Brandimarte L., Montanari A. et Brath A., 2004: Regional flow-duration curves: reliability for ungauged basins. *Advances in Water Resources* 27: 953-965.
- Claude M., Charles P. et Vazken A., 2003: The exponential store: a correct formulation for rainfall-runoff modelling. *Hydrological Science Journal* 48: 109-124.
- Clausen B. et Pearson C. P., 1995: Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *Journal of Hydrology* 173: 111-130.
- Danihelka P., Karberová M. et Chlubna M., 2012: Identifikace a hodnocení objektů a zařízení se zdroji rizik kontaminace vodního prostředí nebezpečnými chemickými látkami při povodních. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i. Praha, 54: 2-5.

- Connolly R. D., Ciesiolka C. A. A., Silburn D. M. et Carroll C., 1997: Distributed parameter hydrology model (Answers) applied to a range of catchment scales using rainfall simulator data. IV Evaluating pasture catchment hydrology. *Journal of Hydrology* 201: 311-328.
- Daňhelka J., 2004: Aqualog. Oddělení aplikovaného hydrologického výzkumu. *Hydrologie. Český hydrometeorologický ústav*, online: <http://old.chmi.cz/hydro/ohv/aqualog/s-o.html>, cit. 28.1.2013.
- Daňhelka J., Krejčí J., Šálek M., Šercl P. et Zezulák J., 2003: Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZU, Praha, s. 220.
- Dewandel B., Lachassagne P., Bakalowicz M., Weng Ph. et Al-Malki A., 2003: Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer. *Journal of Hydrology* 274: 248-269.
- Dingman S. L., 2008: *Physical Hydrology*. Prentice Hall, s. 646.
- Do-Woo K., Hi-Ryong B. et Ki-Seon Ch., 2009: Evaluation, modification, and application of the Effective Drought Index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea. *Journal of Hydrology* 378: 1-12.
- Duan Q., Sorooshian S. et Gupta V. K., 1994: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology* 158: 265-284.
- Eckhardt K. et Arnold J. G., 2001: Automatic calibration of distributed catchment model. *Journal of Hydrology* 251: 103-109.
- Hanel M., Vizina A., Máca P. et Pavlásek J., 2012: A multi-model assessment of climate change impact on hydrological regime in the Czech Republic. *Journal Hydrol. Hydromech.* 60: 152-161.
- Hapuarachchi H., A., P., Li Z. et Wang S., 2001: Application of SCE-UA Method for Calibrating the Xinanjiang Watershed Model. *Journal of Like Science* 12: 304-3014.
- Herber V., 2007: Případová studie – Povodně na východním Slovensku. *Fyzická geografie Slovenska*, online: [http://www.herber.webz.cz/www\\_slovakia/case\\_studies/povodne.html](http://www.herber.webz.cz/www_slovakia/case_studies/povodne.html), cit. 8.2.2013.
- Horáček S., 2012: Chimera, online: <http://chimera-hydrology.eu/>, cit. 8.2.2013.
- Hrádek F. et Kuřík P., 2002: *Hydrologie. Česká zemědělská univerzita*, Praha, s. 271.

- Huang S., Dahalb D., Youngc C., Chanderb G. et Liud S., 2011: Integration of Palmer Drought Severity Index and remote sensing data to simulate wetland water surface from 1910 to 2009 in Cottonwood Lake area, North Dakota. *Remote Sensing of Environment* 115: 3377-3389.
- Chapman T., 1999: A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes* 13: 701-714.
- Ferket B. V. A., Samain B. et Pauwels V. R. N., 2010: Internal validation of conceptual rainfall-runoff models using baseflow separation. *Journal of Hydrology* 381: 158-173.
- Jeníček M., 2005: Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích. Univerzita Karlova v Praze, online: <http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/download.php?akce=publikace&cislo=3>, cit. 29.1.2013.
- Jeníček M., 2010: 6. Podpovrchový odtok z povodí. Modelování hydrologických procesů I., Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, online: <http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/download.php?akce=dokumenty&cislo=15>, cit. 12.2.2013.
- Jeníček M., 2012: Klasifikace hydrologických modelů. Univerzita Karlova v Praze, online: <http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/download.php?akce=dokumenty&cislo=7>, cit. 14.11.2012.
- Kašpárek L. et Peláková M., 2006: Regional impacts of climate change on water regime in the Czech Republic. *Climate Change and Water Regime in the Czech Republic*, Sborník prací VÚV T.G.M., s. 80.
- Kling H. et Gupta H., 2009: On the development of regionalization relationships for lumped watershed models: The impact of ignoring sub-basin scale variability. *Journal of Hydrology* 373: 337-351.
- Klingeman P., 2005: Analysis Techniques: Flow Duration Analysis. Oregon State University, online: <http://streamflow.engr.oregonstate.edu/analysis/flow/index.htm>, cit. 2.3.2013.
- Kodešová R., 2012: Modelování v pedologii. Katedra pedologie a ochrany půd. ČZU, Praha, s. 152.
- Kučera R., 2006: Chiméra. ABZ slovník cizích slov, online: <http://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/chimera>, cit. 8.2.2013.
- Longobardi A. et Villani P., 2008: Baseflow index regionalization analysis in a mediterranean area and data scarcity context: Role of the catchment permeability index. *Journal of Hydrology* 355: 63-75.

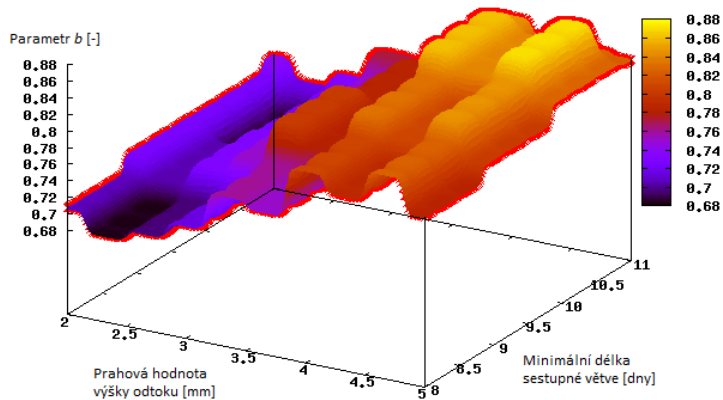
- Máca P., 2010: Jednotkový hydrogram. ČZU. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, v.v.i., Praha, s. 104.
- Máca P., 2011: Úvod do konceptuálních modelů. Hydrologické modelování, online: [http://klobouk.fsv.cvut.cz/~hubert/em\\_hyd\\_mod/conpceptual\\_models/lec\\_3\\_hm.pdf](http://klobouk.fsv.cvut.cz/~hubert/em_hyd_mod/conpceptual_models/lec_3_hm.pdf), cit. 8.2.2013.
- Máca P., 2012a: Globální Optimalizace Hydrologického Modelu BILAN, s. 40.
- Máca P., 2012b: Analýza sestupných větví hydrogramu, s. 33.
- Máca P., Horáček S., Pavlásek J., Torfs P. et Pech P., 2011a: Simulace povodňových událostí na povodí Modrava 2 různými konceptuálními modely. online: [http://klobouk.fsv.cvut.cz/~hubert/em\\_hyd\\_mod/conpceptual\\_models/prezentace.pdf](http://klobouk.fsv.cvut.cz/~hubert/em_hyd_mod/conpceptual_models/prezentace.pdf), cit. 8.2.2013.
- Máca P., Horáček S., Pavlásek J., Torfs P. et Pech P., 2011b: Simulace povodňových událostí na povodí Modrava 2 různými konceptuálními modely. Hydrologie malého povodí 2011, online: [http://chimera-hydrology.eu/\\_media/43-maca.pdf](http://chimera-hydrology.eu/_media/43-maca.pdf), cit. 8.2.2013.
- Manfred de la Sense, 2003: Slovník pojmů a osobností. Holbachia-ateistický web, online: <http://holbachia.sweb.cz/texty/jine/slovník.htm>, cit. 28.1.2013.
- Millares A., Polo M. J. et Losada M. A., 2009: The hydrological response of baseflow in fractured mountain areas. Hydrology and Earth System Sciences 13: 1261-1271.
- Mishra A. K. et Singh V. P., 2010: A review of drought concepts. Journal of hydrology 391: 202-216.
- Mishra A., Hata T. et Abdelhadi A. W., 2004: Models for recession flows in the upper Blue Nile River. Hydrological Processes 18: 2773-2786.
- Moore R. J., 1997: Storage-outflow modelling of streamflow recessions, with application to a shallow-soil forested catchment. Journal of Hydrology 198: 260-270.
- Moore R. J., 2007: The PDM rainfall-runoff model. Hydrology and Earth System Sciences 11: 483-499.
- Nathan R. J. et McMahon T. A., 1990: Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses. Water Resources Research 26: 1465-1473.
- NDMC (National Drought Mitigation Center), 2012: Droughts Basic. Types of drought. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln, U.S.A., online: <http://www.drought.unl.edu/DroughtBasics/TypesofDrought.aspx>, cit. 27.10.2012.

- Nelson S. A., 2012: Groundwater. Physical Geology, Tulane University, online: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens1110/groundwater.htm>, cit. 4.11.2012.
- Nocedal J. et Wright S. J., 2000: Numerical Optimization. Springer, s. 683.
- Ouyang Y., 2012: A potential approach for low flow selection in water resource supply and management. Journal of Hydrology 454-455: 56-63.
- Pavelková Chmelová R., Frajer J. et Geletič J., 2009: Hydrologické modely. Vybrané kapitoly z hydrologie. HYDRO.upol.cz., online: [http://hydro.upol.cz/?page\\_id=15](http://hydro.upol.cz/?page_id=15), cit. 14.11.2012.
- Pavlásek J., 2010: Modelování proudění podzemní vody nad horizontálním a nakloněným nepropustným podložím. ČZU, Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka, v.v.i., Praha, s. 68.
- Pech P., 2010: Speciální případy hydrauliky podzemních vod. ČZU, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, s. 104.
- Peláková M. et Boersema M., 2006: Possibilities to reduce the climate change impact on the water regime in the Czech Republic by construction of new reservoirs. Climate Change and Water Regime in the Czech Republic, Sborník prací VÚV T.G.M., Praha s. 80.
- Polášek M., 2011: Latinské a magické čtverce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Brno, s. 64, online: [http://is.muni.cz/th/211209/prif\\_m/diplomova\\_prace.pdf](http://is.muni.cz/th/211209/prif_m/diplomova_prace.pdf), cit. 8.4.2013.
- Querner E. P., 1997: Description and application of the combined surface and groundwater model MOGROW. Journal of Hydrology 192: 158-188.
- Rakovec O., 2009: Analysis of hydrological drought using the Bilan model, s. 106, online: [http://www.kvhem.cz/wp-content/uploads/2009/10/DP\\_Rakovec\\_Oldrich.pdf](http://www.kvhem.cz/wp-content/uploads/2009/10/DP_Rakovec_Oldrich.pdf), cit. 29.1.2013.
- Rožnovský J., 2012: Sucho na území České republiky a jeho dopady. Český hydrometeorologický ústav, Pobočka Brno, online: [http://www.chmi.cz/files/portal/docs/katastrofy/26zasedani/Roznovsky\\_sucho\\_2304\\_12.pdf](http://www.chmi.cz/files/portal/docs/katastrofy/26zasedani/Roznovsky_sucho_2304_12.pdf), cit. 26.2.2013.
- Kao S. Ch. et Govindaraju R. S., 2010: A copula-based joint deficit index for droughts. Journal of Hydrology 380: 121-134.
- Smakhtin V. U., 1999: Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology 240: 147-186.
- Staudinger M., Stahl K., Seibert J., Clark M. P. et Tallaksen L. M., 2011: Comparison of hydrological model structures based on recession and low flow simulations. Hydrology and Earth System Sciences 15: 3447-3459.

- Szilagyi J. et Parlange M. B., 1998: Baseflow separation based on analytical solution of the Boussinesq equation. *Journal of Hydrology* 204: 251-260.
- Šercl P., 2013: Oběh vody. Český hydrometeorologický ústav, online: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleczech.html>, cit. 1.3.2013.
- Tallaksen L. M., 1995: A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology* 165: 349-370.
- Tallaksen L. M., Hisdal H. et Van Lanen H. A. J., 2009: Space–time modelling of catchment scale drought characteristics. *Journal of Hydrology* 375: 363-372.
- Timilsena J. et Piechota T., 2008: Regionalization and reconstruction of snow water equivalent in the upper Colorado River basin. *Journal of Hydrology* 352: 94-106.
- Torfs P., 2009: Chimera - manual. Wageningen University: Wageningen University
- Trnka P., 2010: Možné důsledky dlouhotrvajícího sucha v naší krajině a ve světě. Ústav aplikované a krajinné ekologie AF MENDELU v Brně, online: [http://user.mendelu.cz/xvlcek1/rrc/sucho/TRNKA\\_1.pdf](http://user.mendelu.cz/xvlcek1/rrc/sucho/TRNKA_1.pdf), cit. 26.2.2013.
- Ulbrichová, I., 2012: Les a Voda. Fakulta lesnická a dřevařská ČZU, Praha, online: [http://fle.czu.cz/~ulbrichova/Skripta\\_EKOL/lesavoda/lesavoda.htm](http://fle.czu.cz/~ulbrichova/Skripta_EKOL/lesavoda/lesavoda.htm), cit. 25.3.2013.
- Vaculín O. et Soukalová E., 2003: Režim podzemní vody a použití hydrologického bilančního modelu v infiltrační oblasti jímacího území brněnského vodovodu. 5. Odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí, online: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2003texty/pdf/3/rp/vaculin.pdf>, cit. 29.1.2013.
- Van Lanen H. A. J, Tallaksen L. M., Kašpárek L. et Querner E. P, 1997: Hydrological drought analysis in the Hupsel basin using different physically-based models. FRIEND '97 — Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management. IAHS: 246, online: [http://iahs.info/redbooks/a246/iahs\\_246\\_0189.pdf](http://iahs.info/redbooks/a246/iahs_246_0189.pdf), cit. 21.2.2013.
- Vizina A., 2008: Hydrologická studie dopadů změny klimatu v povodí Berounky, s. 100, online: <http://www.kvhem.cz/wp-content/uploads/2009/02/Vizina.pdf>, cit. 29.1.2013.
- Vlnas R., 2011: Časová a plošná variabilita hydrologického sucha na území České republiky 1931 – 2007. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., online: [http://www.povis.cz/pre/201105\\_Brno/radek\\_vlnas.pdf](http://www.povis.cz/pre/201105_Brno/radek_vlnas.pdf), cit. 2.3.2013.
- Weise T., 2009: Global Optimization Algorithms – Theory and Application, online: <http://www.it-weise.de/projects/book.pdf>, cit. 11.3.2013.
- Wilhite D. A. et Glantz M. H., 1985: Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International* 10: 111-120.

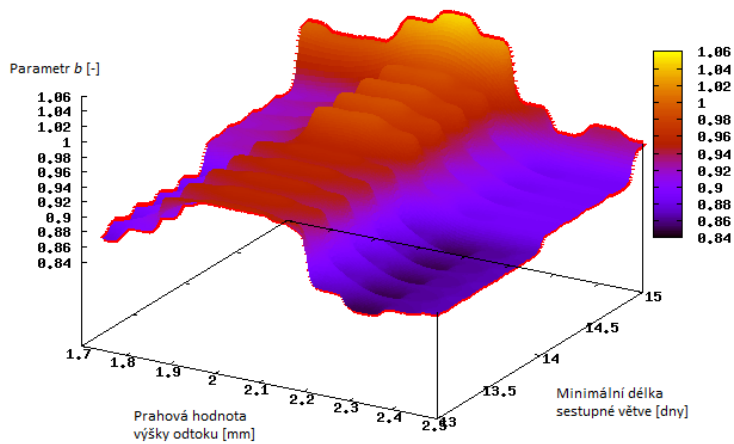
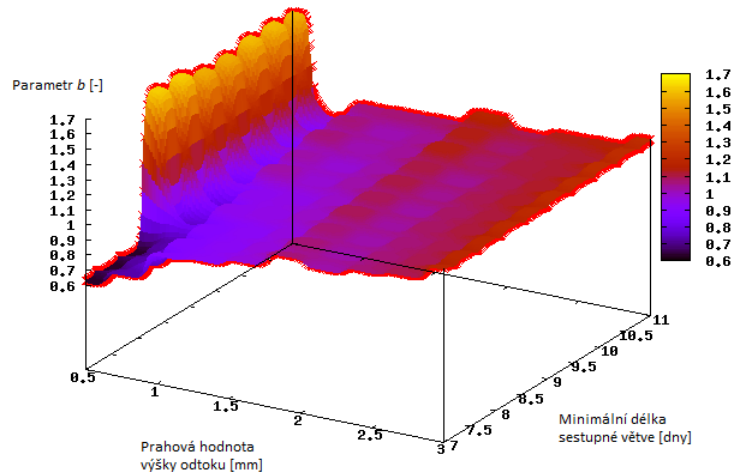
- Wittenberg H., 1999: Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. *Hydrological Processes* 13: 715-726.
- Wittenberg H. et Sivapalan M., 1999: Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. *Journal of Hydrology* 219: 20-33.
- WMO (World Meteorological Organization), 1974: International Glossary of Hydrology, WMO, Geneva.
- Zidek J., 2010: Provoz vodohospodářských děl. III.díl – Hydrologie a hydrodynamika v provozu vodohospodářských děl, Univerzita J.E. Purkyně, online: [http://zidek.b2c.cz/clanky/053\\_pvh3l.pdf](http://zidek.b2c.cz/clanky/053_pvh3l.pdf), cit.25.2.2013.

**Příloha č. 1**



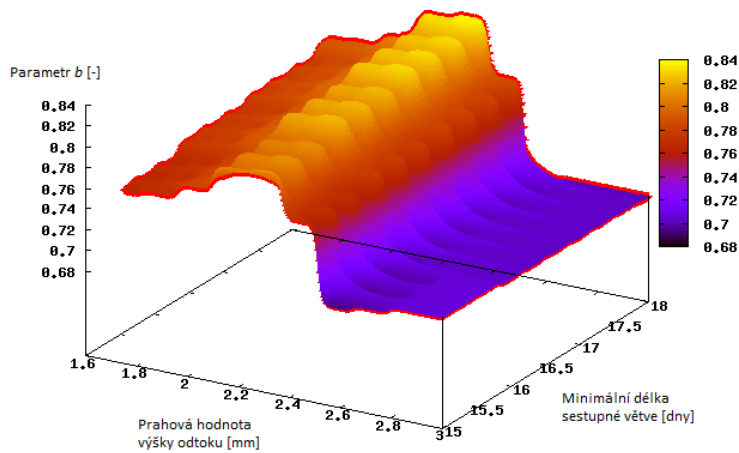
Obr. č. 49: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Cidliny (3D)

Obr. č. 50: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Hloučely (3D)



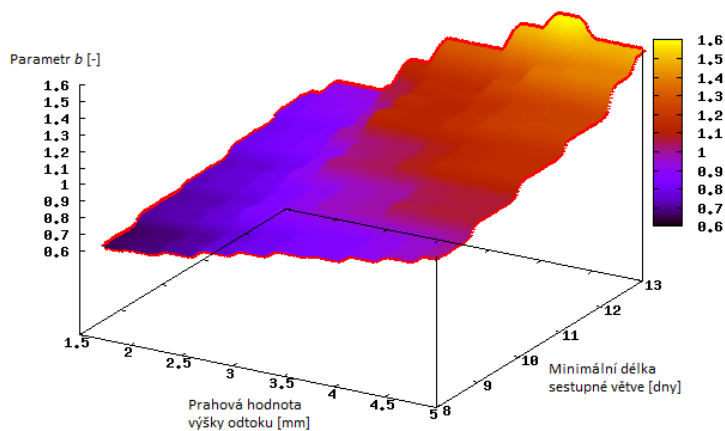
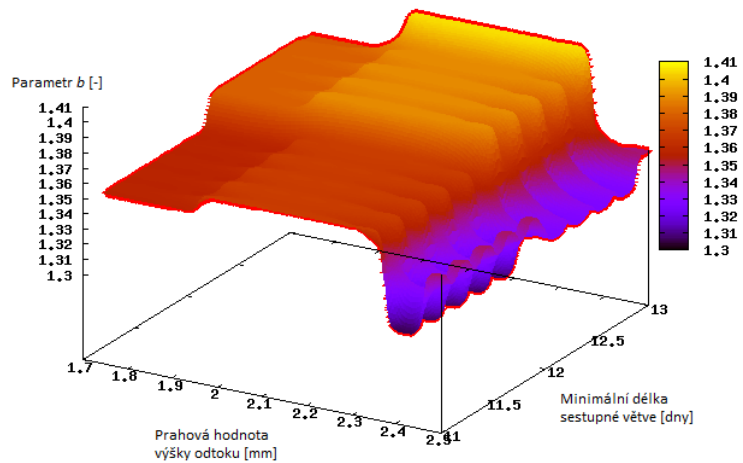
Obr. č. 51: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Jizery (3D)



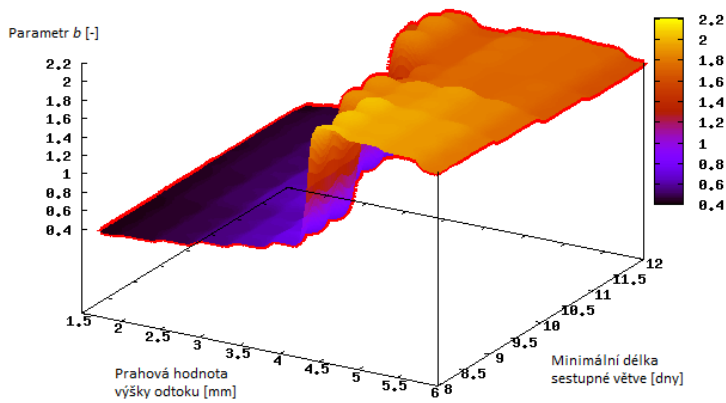


Obr. č. 52: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Klenice (3D)

Obr. č. 53: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Litavy (3D)

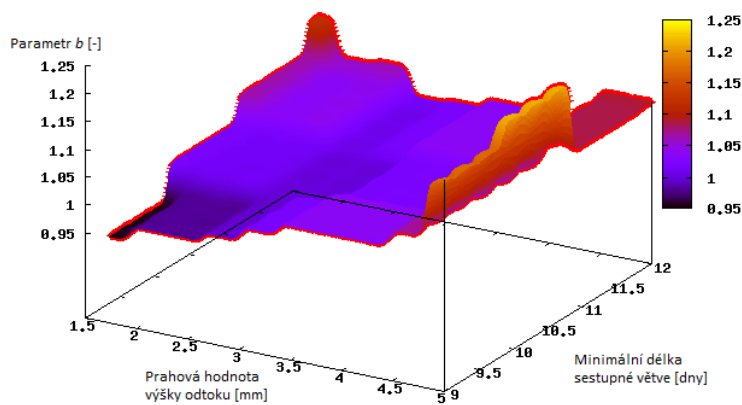
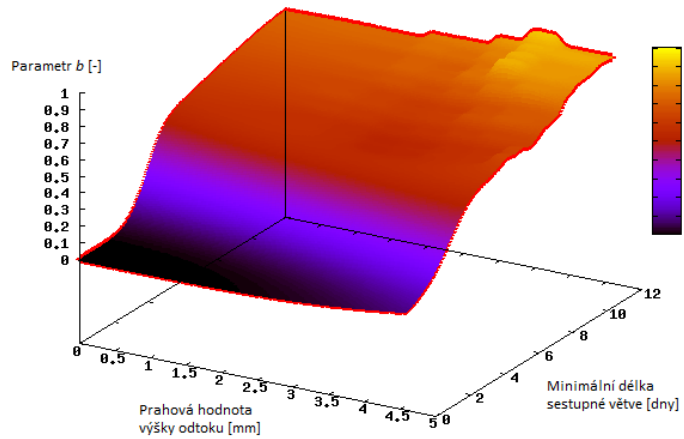


Obr. č. 54: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Malše (3D)

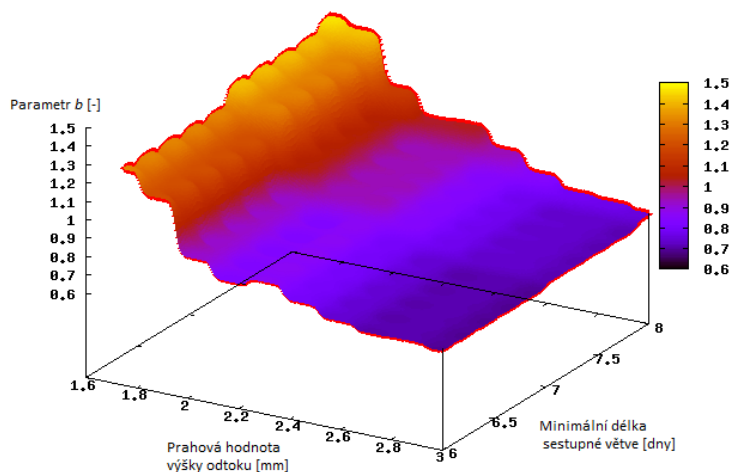


Obr. č. 55: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Orlice (3D)

Obr. č. 56: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Otavy (3D)

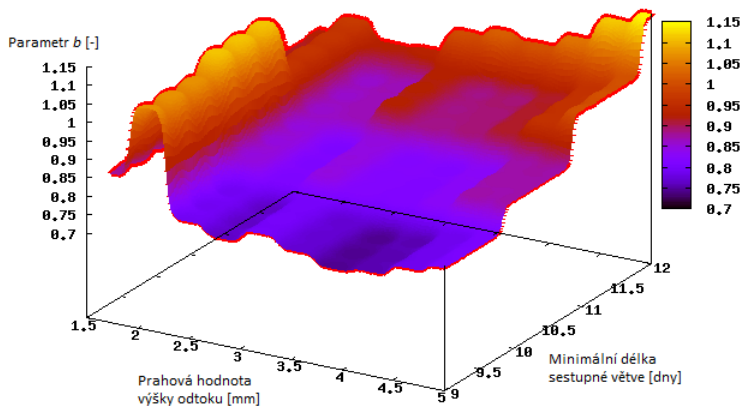
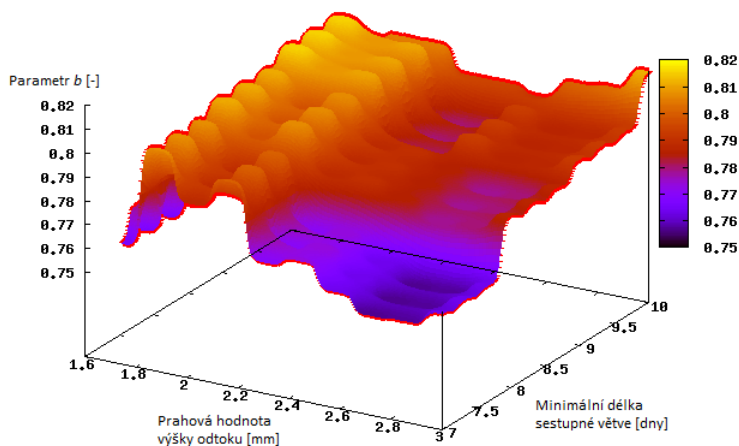


Obr. č. 57: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Řečice (3D)

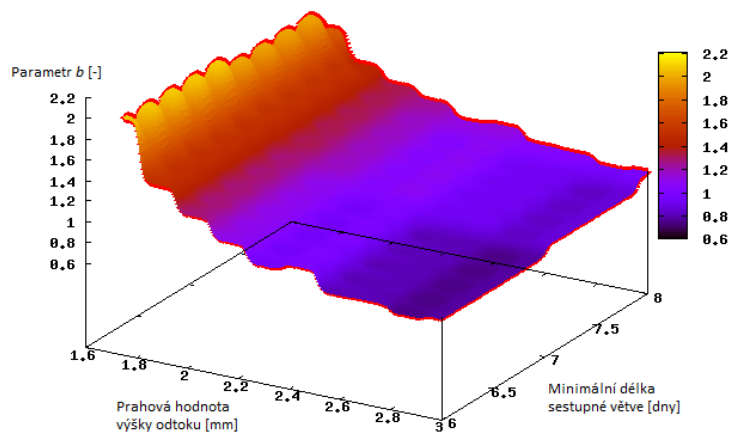


Obr. č. 58: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Sázavy (3D)

Obr. č. 59: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Teplé (3D)



Obr. č. 60: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Teplé Vltavy (3D)



Obr. č. 61: Závislost parametru  $b$  na minimální délce sestupné větve a prahové hodnotě výšky odtoku pro povodí řeky Úpy (3D)

**Příloha č. 2**

<i>Statistiky Cidlina</i>	<i>S<sub>0</sub> [mm], parametry (par.), lnSS [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<b>Lineární nádrž</b>	<i>S<sub>0</sub> 1. vlna</i>	6,226	7,735	8,270	8,325	8,820	11,400	0,896
	<i>S<sub>0</sub> 2. vlna</i>	3,292	3,963	4,222	4,323	4,677	5,912	0,489
	<i>S<sub>0</sub> 3. vlna</i>	4,755	5,711	6,106	6,147	6,473	8,173	0,632
	<i>S<sub>0</sub> 4. vlna</i>	5,536	6,653	7,119	7,122	7,586	8,942	0,762
	<i>S<sub>0</sub> 5. vlna</i>	5,166	5,833	6,119	6,115	6,349	7,348	0,400
	<i>S<sub>0</sub> 6. vlna</i>	1,456	1,776	1,943	1,974	2,167	2,859	0,274
	<i>Par. a</i>	0,072	0,103	0,112	0,113	0,123	0,146	0,016
	<i>lnSS</i>	1,026	1,272	1,507	1,581	1,788	3,251	0,404
<b>Nelineární nádrž</b>	<i>S<sub>0</sub> 1. vlna</i>	10,09	10,35	10,48	10,46	10,56	10,86	0,153
	<i>S<sub>0</sub> 2. vlna</i>	6,140	6,566	6,672	6,647	6,751	6,942	0,140
	<i>S<sub>0</sub> 3. vlna</i>	8,080	8,434	8,528	8,508	8,616	8,771	0,151
	<i>S<sub>0</sub> 4. vlna</i>	9,036	9,479	9,602	9,576	9,698	9,890	0,160
	<i>S<sub>0</sub> 5. vlna</i>	8,004	8,394	8,511	8,490	8,603	8,822	0,151
	<i>S<sub>0</sub> 6. vlna</i>	3,624	3,928	4,027	4,005	4,102	4,188	0,125
	<i>Par. a</i>	56,23	79,97	87,84	86,17	94,67	99,97	10,28
	<i>Par. b</i>	1,819	1,945	1,979	1,972	2,011	2,035	0,046
	<i>lnSS</i>	0,275	0,279	0,282	0,283	0,286	0,311	0,006
<b>Exponenciál- ní nádrž</b>	<i>S<sub>0</sub> 1. vlna</i>	9,327	12,01	13,51	13,17	14,44	15,90	1,649
	<i>S<sub>0</sub> 2. vlna</i>	5,496	8,429	9,910	9,585	10,92	12,07	1,670
	<i>S<sub>0</sub> 3. vlna</i>	7,510	10,46	11,95	11,61	12,88	14,22	1,676
	<i>S<sub>0</sub> 4. vlna</i>	8,517	11,51	13,04	12,68	13,95	15,14	1,664
	<i>S<sub>0</sub> 5. vlna</i>	7,406	10,35	11,74	11,41	12,72	13,98	1,657
	<i>S<sub>0</sub> 6. vlna</i>	2,180	5,075	6,475	6,156	7,402	8,614	1,654
	<i>Par. a</i>	12,93	31,66	50,64	51,54	67,32	97,59	23,28
	<i>Par. b</i>	3,060	3,129	3,159	3,162	3,207	3,258	0,047
	<i>lnSS</i>	0,680	0,690	0,695	0,696	0,702	0,727	0,009

Tab. č. 6: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Cidlina

Statistiky Hloučela	$S_0$ [mm], parametry (par.), lnSS [mm <sup>2</sup> ]	Minimum	Dolní kvartil	Medián	Průměrná hodnota	Horní kvartil	Maximum	Směrodatná odchylka
Typ nádrže								
Lineární nádrž	$S_0$ 1. vlna	1,528	2,526	2,833	3,017	3,342	6,076	0,813
	$S_0$ 2. vlna	8,264	11,07	12,12	12,01	12,98	15,00	1,475
	$S_0$ 3. vlna	0,355	0,614	0,851	0,958	1,155	2,330	0,433
	$S_0$ 4. vlna	0,271	0,676	0,801	0,887	1,028	2,017	0,342
	$S_0$ 5. vlna	4,521	7,227	8,054	8,349	8,952	14,77	1,806
	$S_0$ 6. vlna	1,162	1,751	1,990	2,209	2,471	4,921	0,735
	$S_0$ 7. vlna	10,24	12,91	13,60	13,42	14,16	14,99	1,070
	$S_0$ 8. vlna	1,260	1,975	2,393	2,547	2,882	5,323	0,773
	$S_0$ 9. vlna	0,239	0,378	0,498	0,551	0,661	1,344	0,231
	Par. a	0,028	0,068	0,083	0,082	0,097	0,133	0,021
lnSS	3,164	6,765	9,608	10,43	13,33	27,82	4,666	
Nelineární nádrž	$S_0$ 1. vlna	2,609	3,310	3,590	3,526	3,812	4,303	0,401
	$S_0$ 2. vlna	10,60	11,98	12,51	12,41	12,90	13,88	0,652
	$S_0$ 3. vlna	0,718	1,134	1,307	1,296	1,491	1,841	0,257
	$S_0$ 4. vlna	0,653	1,099	1,315	1,290	1,475	1,845	0,265
	$S_0$ 5. vlna	7,170	8,283	8,657	8,606	8,929	9,730	0,491
	$S_0$ 6. vlna	1,700	2,527	2,740	2,713	3,001	3,420	0,379
	$S_0$ 7. vlna	12,98	14,97	15,24	15,21	15,58	16,36	0,624
	$S_0$ 8. vlna	2,130	2,882	3,226	3,160	3,468	3,917	0,421
	$S_0$ 9. vlna	0,439	0,676	0,813	0,802	0,933	1,215	0,191
	Par. a	11,18	20,67	26,97	27,12	33,10	49,90	8,963
Par. b	1,022	1,291	1,386	1,368	1,464	1,618	0,133	
lnSS	2,082	2,605	2,808	2,759	2,920	3,156	0,232	
Exponenciál- ní nádrž	$S_0$ 1. vlna	7,202	7,752	7,951	8,038	8,240	9,283	0,437
	$S_0$ 2. vlna	16,02	16,82	17,11	17,13	17,37	18,35	0,492
	$S_0$ 3. vlna	2,098	2,460	2,695	2,762	2,896	3,852	0,427
	$S_0$ 4. vlna	2,044	2,536	2,765	2,815	2,972	3,853	0,428
	$S_0$ 5. vlna	13,35	13,97	14,28	14,33	14,60	15,42	0,459
	$S_0$ 6. vlna	5,797	6,595	6,777	6,859	7,041	7,890	0,444
	$S_0$ 7. vlna	18,21	18,71	19,07	19,06	19,33	19,99	0,466
	$S_0$ 8. vlna	6,855	7,554	7,734	7,810	7,969	8,904	0,437
	$S_0$ 9. vlna	0,181	0,203	0,210	0,340	0,226	1,308	0,305
	Par. a	36,84	41,58	43,29	44,46	45,58	57,98	4,811
Par. b	3,926	3,981	3,993	3,987	3,997	4,000	0,015	
lnSS	7,240	7,313	7,382	7,406	7,493	7,592	0,109	

Tab. č. 7: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Hloučely

<i>Statistiky Jizera</i>	<i>S<sub>0</sub> [mm], parametry (par.), lnSS [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<i>Lineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	13,53	14,65	14,77	14,72	14,90	15,00	0,276
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	9,352	10,37	10,67	10,92	11,27	14,51	0,890
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	13,69	14,37	14,74	14,62	14,88	15,00	0,324
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	13,77	14,70	14,84	14,76	14,90	15,00	0,245
	<i>S<sub>0</sub>5. vlna</i>	14,29	14,82	14,89	14,85	14,94	15,00	0,135
	<i>Par. a</i>	0,107	0,128	0,133	0,133	0,139	0,157	0,009
	<i>lnSS</i>	8,752	8,991	9,126	9,213	9,343	10,63	0,327
<i>Nelineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	15,01	15,73	15,93	15,95	16,12	16,74	0,302
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	8,382	8,691	8,778	8,774	8,837	9,185	0,143
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	13,91	14,33	14,45	14,47	14,63	15,04	0,238
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	19,33	19,92	19,96	19,93	19,98	20,00	0,096
	<i>S<sub>0</sub>5. vlna</i>	19,94	19,99	19,99	19,99	20,00	20,00	0,010
	<i>Par. a</i>	2,138	2,241	2,282	2,293	2,321	2,642	0,082
	<i>Par. b</i>	0,500	0,507	0,513	0,516	0,521	0,568	0,013
<i>lnSS</i>	1,510	1,516	1,520	1,522	1,526	1,570	0,010	
<i>Exponenciál- ní nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	12,09	16,22	17,45	17,15	18,22	19,74	1,582
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	9,259	13,38	14,62	14,35	15,46	16,94	1,579
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	11,82	15,99	17,25	17,00	18,06	19,63	1,576
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	11,94	16,05	17,29	17,00	18,04	19,66	1,588
	<i>S<sub>0</sub>5. vlna</i>	12,03	16,16	17,44	17,14	18,23	19,76	1,582
	<i>Par. a</i>	5,788	16,45	22,60	22,46	27,27	40,01	8,074
	<i>Par. b</i>	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	0,000
<i>lnSS</i>	31,53	31,53	31,53	31,53	31,53	31,54	0,003	

Tab. č. 8: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Jizery

<i>Statistiky Jizera upravená</i>	<i><math>S_0</math> [mm], parametry (par.), lnSS [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<i>Lineární nádrž</i>	<i><math>S_0 1. vlna</math></i>	17,31	18,99	19,46	19,36	19,76	19,99	0,492
	<i><math>S_0 2. vlna</math></i>	10,28	11,14	11,50	11,50	11,79	13,76	0,520
	<i><math>S_0 3. vlna</math></i>	16,07	17,75	17,99	18,06	18,48	19,57	0,710
	<i><math>S_0 4. vlna</math></i>	19,04	19,61	19,84	19,75	19,94	20,00	0,233
	<i><math>S_0 5. vlna</math></i>	19,35	19,83	19,92	19,88	19,97	20,00	0,122
	<i>Par. a</i>	0,096	0,110	0,114	0,114	0,118	0,131	0,007
	<i>lnSS</i>	3,177	3,262	3,317	3,352	3,394	3,873	0,140
<i>Nelineární nádrž</i>	<i><math>S_0 1. vlna</math></i>	15,53	16,05	16,33	16,30	16,60	17,14	0,370
	<i><math>S_0 2. vlna</math></i>	10,00	10,01	10,03	10,04	10,07	10,22	0,041
	<i><math>S_0 3. vlna</math></i>	14,01	14,50	14,72	14,74	14,97	15,93	0,333
	<i><math>S_0 4. vlna</math></i>	19,62	19,94	19,97	19,95	19,99	20,00	0,070
	<i><math>S_0 5. vlna</math></i>	19,93	19,99	19,99	19,99	20,00	20,00	0,015
	<i>Par. a</i>	2,141	2,365	2,467	2,487	2,587	2,876	0,151
	<i>Par. b</i>	0,486	0,526	0,541	0,543	0,558	0,600	0,023
<i>lnSS</i>	1,639	1,647	1,654	1,657	1,665	1,696	0,012	
<i>Exponenciál- ní nádrž</i>	<i><math>S_0 1. vlna</math></i>	17,04	18,02	18,31	18,23	18,60	18,83	0,453
	<i><math>S_0 2. vlna</math></i>	10,10	11,09	11,43	11,33	11,69	11,93	0,454
	<i><math>S_0 3. vlna</math></i>	15,66	16,61	16,98	16,86	17,22	17,48	0,455
	<i><math>S_0 4. vlna</math></i>	17,46	18,39	18,72	18,64	19,01	19,23	0,451
	<i><math>S_0 5. vlna</math></i>	18,32	19,24	19,55	19,45	19,81	20,00	0,447
	<i>Par. a</i>	3,203	3,674	3,848	3,801	3,992	4,118	0,239
	<i>Par. b</i>	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	0,000
<i>lnSS</i>	8,819	8,819	8,819	8,819	8,819	8,820	0,000	

Tab. č. 9: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Jizery po úpravě rozsahu počáteční zásoby a parametru  $b$  v SCDE



Statistiky Klenice	$S_0$ [mm], parametry (par.), lnSS [mm <sup>2</sup> ]	Minimum	Dolní kvartil	Medián	Průměrná hodnota	Horní kvartil	Maximum	Směrodatná odchylka
Typ nádrže								
Lineární nádrž	$S_0 1. vlna$	8,823	9,870	10,48	10,61	11,14	13,24	0,958
	$S_0 2. vlna$	9,770	11,06	11,66	11,72	12,24	14,83	1,000
	$S_0 3. vlna$	9,224	11,54	12,10	12,19	12,95	14,93	1,124
	$S_0 4. vlna$	9,21	10,53	11,15	11,23	11,74	13,93	1,011
	$S_0 5. vlna$	8,025	10,20	10,83	10,86	11,55	13,94	1,048
	$S_0 6. vlna$	9,68	11,08	11,72	11,85	12,55	14,79	1,065
	$S_0 7. vlna$	3,781	4,554	4,870	4,870	5,192	5,901	0,440
	$S_0 8. vlna$	3,542	4,160	4,437	4,439	4,670	5,937	0,416
	Par. a	0,078	0,097	0,105	0,108	0,117	0,143	0,014
	lnSS	1,134	1,430	1,566	1,650	1,790	3,225	0,340
Nelineární nádrž	$S_0 1. vlna$	13,37	13,93	14,11	14,08	14,27	14,59	0,235
	$S_0 2. vlna$	14,39	14,94	15,06	15,04	15,16	15,64	0,219
	$S_0 3. vlna$	15,33	15,60	15,80	15,81	16,03	16,37	0,247
	$S_0 4. vlna$	13,84	14,23	14,39	14,39	14,55	14,92	0,229
	$S_0 5. vlna$	13,64	14,09	14,22	14,22	14,35	14,81	0,224
	$S_0 6. vlna$	14,70	14,99	15,16	15,14	15,30	15,65	0,218
	$S_0 7. vlna$	7,648	8,045	8,132	8,127	8,250	8,504	0,168
	$S_0 8. vlna$	6,861	7,299	7,454	7,414	7,518	7,709	0,172
	Par. a	63,12	84,92	92,74	90,38	96,78	99,86	8,127
	Par. b	1,685	1,781	1,806	1,797	1,818	1,842	0,031
lnSS	0,386	0,396	0,404	0,405	0,411	0,433	0,010	
Exponenciální nádrž	$S_0 1. vlna$	10,31	13,85	14,77	14,85	16,02	18,42	1,604
	$S_0 2. vlna$	10,85	14,37	15,34	15,35	16,54	18,94	1,610
	$S_0 3. vlna$	11,16	15,02	16,02	16,10	17,28	19,70	1,609
	$S_0 4. vlna$	10,39	13,95	15,02	14,98	16,15	18,39	1,630
	$S_0 5. vlna$	10,30	13,94	14,96	14,97	16,06	18,34	1,617
	$S_0 6. vlna$	10,64	14,23	15,21	15,29	16,50	18,69	1,633
	$S_0 7. vlna$	5,192	8,543	9,599	9,610	10,64	13,11	1,598
	$S_0 8. vlna$	4,191	7,701	8,652	8,739	9,82	12,29	1,605
	Par. a	7,435	18,22	23,43	25,47	31,82	56,69	10,16682
	Par. b	3,992	3,998	3,999	3,998	4,000	4,000	0,001
lnSS	2,744	2,755	2,763	2,764	2,772	2,799	0,011	

Tab. č. 10: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Klenice

Statistiky Litava	$S_0$ [mm], parametry (par.), lnSS [mm <sup>2</sup> ]	Minimum	Dolní kvartil	Medián	Průměrná hodnota	Horní kvartil	Maximum	Směrodatná odchylka
Typ nádrže								
Lineární nádrž	$S_0 1. vlna$	1,086	1,926	2,188	2,391	2,782	5,453	0,730
	$S_0 2. vlna$	1,915	2,613	3,024	3,227	3,705	5,316	0,827
	$S_0 3. vlna$	0,471	0,891	1,047	1,161	1,362	3,206	0,412
	$S_0 4. vlna$	2,075	3,030	3,446	3,661	3,996	7,476	0,926
	$S_0 5. vlna$	0,651	1,009	1,243	1,322	1,596	2,688	0,415
	$S_0 6. vlna$	6,015	8,115	9,119	9,466	10,69	14,75	1,740
	$S_0 7. vlna$	9,086	11,17	11,75	12,09	13,05	14,99	1,299
	Par. a	0,028	0,044	0,060	0,059	0,069	0,107	0,017
lnSS	1,780	3,242	4,707	4,775	5,508	14,15	1,997	
Nelineární nádrž	$S_0 1. vlna$	3,523	3,871	3,999	3,965	4,068	4,253	0,157
	$S_0 2. vlna$	4,385	4,662	4,791	4,78	4,916	5,103	0,168
	$S_0 3. vlna$	2,083	2,280	2,413	2,385	2,486	2,591	0,121
	$S_0 4. vlna$	4,731	5,005	5,131	5,122	5,262	5,486	0,170
	$S_0 5. vlna$	2,343	2,602	2,700	2,684	2,793	2,923	0,131
	$S_0 6. vlna$	10,20	10,66	10,87	10,83	10,99	11,33	0,237
	$S_0 7. vlna$	12,68	13,32	13,48	13,47	13,66	14,00	0,253
	Par. a	59,45	77,93	87,10	85,22	93,27	99,67	10,259
	Par. b	1,572	1,672	1,713	1,704	1,740	1,767	0,042
lnSS	0,630	0,652	0,663	0,666	0,678	0,733	0,020	
Exponenciál- ní nádrž	$S_0 1. vlna$	3,669	6,320	7,207	7,137	7,867	9,344	1,145
	$S_0 2. vlna$	5,048	7,733	8,550	8,470	9,285	10,69	1,148
	$S_0 3. vlna$	0,536	2,936	3,783	3,724	4,538	5,963	1,140
	$S_0 4. vlna$	5,444	8,044	8,912	8,839	9,626	11,07	1,145
	$S_0 5. vlna$	1,214	3,773	4,550	4,532	5,295	6,744	1,133
	$S_0 6. vlna$	11,87	14,47	15,21	15,22	16,03	17,65	1,164
	$S_0 7. vlna$	14,08	16,69	17,50	17,44	18,21	19,52	1,152
	Par. a	24,21	46,25	56,23	57,76	67,06	96,05	15,88
	Par. b	3,936	3,978	3,990	3,986	3,996	4,000	0,013
lnSS	1,207	1,222	1,226	1,228	1,232	1,265	0,011	

Tab. č. 11: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Litavy

<i>Statistiky Malše</i>	<i>S<sub>0</sub> [mm], parametry (par.), lnSS [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<i>Lineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	8,499	9,689	10,07	10,21	10,77	12,14	0,804
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	6,454	7,565	7,909	8,015	8,506	9,709	0,697
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	9,070	11,04	11,7	11,68	12,17	14,90	0,961
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	7,667	9,858	10,30	10,37	10,96	12,51	0,900
	<i>S<sub>0</sub>5. vlna</i>	9,598	10,64	11,21	11,29	11,91	14,11	0,873
	<i>S<sub>0</sub>6. vlna</i>	3,878	4,324	4,672	4,656	4,881	5,994	0,429
	<i>S<sub>0</sub>7. vlna</i>	10,03	11,10	11,59	11,63	12,16	13,39	0,756
	<i>S<sub>0</sub>8. vlna</i>	9,359	10,66	11,12	11,16	11,74	13,73	0,771
	<i>Par. a</i>	0,080	0,111	0,117	0,117	0,125	0,147	0,013
<i>lnSS</i>	0,803	1,020	1,163	1,205	1,323	2,295	0,269	
<i>Nelineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	13,22	13,86	14,04	13,99	14,16	14,54	0,258
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	10,96	11,67	11,85	11,80	11,97	12,28	0,254
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	14,85	15,59	15,74	15,71	15,93	16,35	0,296
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	13,18	13,95	14,17	14,09	14,29	14,52	0,268
	<i>S<sub>0</sub>5. vlna</i>	14,32	14,87	15,09	15,06	15,25	15,67	0,278
	<i>S<sub>0</sub>6. vlna</i>	7,365	7,938	8,127	8,057	8,197	8,464	0,209
	<i>S<sub>0</sub>7. vlna</i>	14,54	15,29	15,46	15,42	15,59	16,03	0,251
	<i>S<sub>0</sub>8. vlna</i>	14,00	14,74	14,93	14,89	15,09	15,35	0,259
	<i>Par. a</i>	51,76	78,54	89,92	86,80	94,70	99,95	10,39
	<i>Par. b</i>	1,628	1,762	1,796	1,784	1,813	1,843	0,041
<i>lnSS</i>	0,366	0,374	0,381	0,382	0,388	0,422	0,011	
<i>Exponenciální nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	10,64	13,69	14,82	14,81	15,76	18,27	1,745
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	8,601	11,94	12,97	13,02	14,03	16,57	1,709
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	11,80	14,88	15,94	16,02	17,13	19,64	1,760
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	10,50	13,67	14,87	14,86	15,83	18,44	1,731
	<i>S<sub>0</sub>5. vlna</i>	10,69	14,17	15,16	15,23	16,25	18,85	1,755
	<i>S<sub>0</sub>6. vlna</i>	4,996	8,459	9,504	9,568	10,59	13,17	1,731
	<i>S<sub>0</sub>7. vlna</i>	11,53	14,61	15,58	15,65	16,69	19,14	1,721
	<i>S<sub>0</sub>8. vlna</i>	10,88	14,24	15,34	15,39	16,48	19,15	1,740
	<i>Par. a</i>	7,702	17,58	23,04	25,38	29,55	55,86	11,05
	<i>Par. b</i>	3,991	3,998	3,999	3,998	3,999	4,000	0,001
<i>lnSS</i>	3,017	3,029	3,035	3,036	3,042	3,087	0,011	

Tab. č. 12: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Malše

<i>Statistiky Orlice</i>	$S_0$ [mm], parametry (par.), lnSS [mm <sup>2</sup> ]	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<i>Lineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	9,760	10,58	10,89	10,92	11,20	12,55	0,552
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	6,359	6,918	7,177	7,204	7,449	8,120	0,384
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	11,80	13,12	13,62	13,57	14,04	14,91	0,652
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	8,910	10,18	10,61	10,61	10,96	12,21	0,607
	<i>S<sub>0</sub>5. vlna</i>	7,655	8,363	8,779	8,740	9,027	10,47	0,514
	<i>Par. a</i>	0,093	0,110	0,117	0,116	0,121	0,138	0,009
	<i>lnSS</i>	1,105	1,151	1,184	1,211	1,253	1,574	0,081
<i>Nelineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	11,03	11,65	11,94	11,97	12,24	13,19	0,406
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	7,485	8,051	8,253	8,301	8,507	9,342	0,382
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	13,70	14,44	14,65	14,69	14,94	15,91	0,397
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	10,83	11,51	11,77	11,83	12,04	13,20	0,461
	<i>S<sub>0</sub>5. vlna</i>	8,952	9,688	9,933	9,966	10,21	11,06	0,418
	<i>Par. a</i>	10,08	14,19	16,15	16,81	18,21	30,26	3,884
	<i>Par. b</i>	1,061	1,175	1,221	1,227	1,265	1,428	0,074
<i>lnSS</i>	1,079	1,083	1,085	1,086	1,088	1,098	0,004	
<i>Exponenciální nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	9,909	14,04	15,44	15,12	16,32	18,47	1,726
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	7,871	11,99	13,41	13,10	14,37	16,53	1,723
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	11,19	15,32	16,69	16,42	17,66	19,78	1,730
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	11,12	15,09	16,54	16,21	17,47	19,59	1,715
	<i>S<sub>0</sub>5. vlna</i>	9,289	13,39	14,77	14,49	15,67	17,86	1,725
	<i>Par. a</i>	7,305	20,14	28,37	28,73	35,96	61,52	11,45
	<i>Par. b</i>	3,998	3,999	4,000	4,000	4,000	4,000	0,000
<i>lnSS</i>	3,220	3,222	3,223	3,223	3,224	3,229	0,002	

Tab. č. 13: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Orlice

<i>Statistiky Otava</i>	<i>S<sub>0</sub> [mm], parametry (par.), lnSS [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<i>Lineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	11,47	12,74	13,02	13,06	13,56	14,42	0,657
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	11,54	12,9	13,36	13,31	13,61	14,47	0,539
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	9,546	10,33	10,62	10,67	11,05	11,84	0,473
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	14,39	14,72	14,88	14,82	14,96	15,00	0,162
	<i>Par. a</i>	0,089	0,096	0,101	0,101	0,105	0,121	0,006
	<i>lnSS</i>	0,925	0,971	1,013	1,019	1,047	1,238	0,064
<i>Nelineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	14,87	15,06	15,17	15,17	15,28	15,50	0,138
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	15,04	15,30	15,41	15,52	15,68	9,342	0,135
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	11,99	12,25	12,34	12,35	12,45	12,73	0,137
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	19,92	19,98	19,99	19,99	20,00	20,00	0,015
	<i>Par. a</i>	12,68	13,88	14,43	14,44	14,96	16,29	0,802
	<i>Par. b</i>	1,009	1,041	1,052	1,052	1,063	1,090	0,019
<i>lnSS</i>	0,4423	0,443	0,444	0,444	0,444	0,447	0,001	
<i>Exponenciální nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	10,17	14,27	15,69	15,53	16,88	18,48	1,822
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	9,666	13,81	15,30	15,10	16,44	18,17	1,831
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	8,165	12,37	13,77	13,59	14,92	16,55	1,829
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	11,19	15,35	16,83	16,65	17,99	19,67	1,833
	<i>Par. a</i>	5,757	16,19	23,23	24,41	31,15	47,06	10,19
	<i>Par. b</i>	3,999	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	0,000
<i>lnSS</i>	7,286	7,287	7,287	7,287	7,288	7,291	0,001	

Tab. č. 14: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Otava

<i>Statistiky Otava upravená</i>	<i>S<sub>0</sub> [mm], parametry (par.), lnSS [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<i>Lineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	12,13	14,26	14,71	14,72	15,20	16,69	0,756
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	12,46	14,54	14,92	14,96	15,35	16,71	0,680
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	10,27	11,50	11,93	11,89	12,23	13,60	0,590
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	16,77	19,20	19,61	19,45	19,83	20,00	0,551
	<i>Par. a</i>	0,071	0,080	0,0823	0,083	0,085	0,106	0,006
	<i>lnSS</i>	0,448	0,467	0,485	0,505	0,523	0,789	0,061
<i>Nelineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	14,84	15,04	15,15	15,18	15,30	15,66	0,167
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	15,03	15,32	15,42	15,42	15,54	15,85	0,163
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	11,97	12,28	12,39	12,38	12,46	12,70	0,145
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	19,85	19,97	19,98	19,97	19,99	20,00	0,025
	<i>Par. a</i>	12,62	14,20	14,72	14,70	15,29	16,70	0,865
	<i>Par. b</i>	1,005	1,048	1,059	1,059	1,074	1,099	0,021
<i>lnSS</i>	0,443	0,444	0,445	0,445	0,446	0,450	0,002	
<i>Exponenciál- ní nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	13,49	15,45	16,17	15,88	16,44	16,81	0,774
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	13,07	15,03	15,73	15,46	15,99	16,35	0,771
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	10,34	12,51	13,15	12,87	13,42	13,76	0,780
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	16,54	18,68	19,36	19,08	19,61	19,97	0,772
	<i>Par. a</i>	4,219	5,709	6,286	6,076	6,524	6,840	0,629
	<i>Par. b</i>	6,998	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	0,000
<i>lnSS</i>	1,044	1,044	1,044	1,045	1,045	1,046	0,000	

Tab. č. 15: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Otavy po úpravě rozsahu počáteční zásoby a parametru  $b$  v SCDE

Statistiky Řečice	$S_0$ [mm], parametry (par.), lnSS [mm <sup>2</sup> ]	Minimum	Dolní kvartil	Medián	Průměrná hodnota	Horní kvartil	Maximum	Směrodatná odchylka
Typ nádrže								
Lineární nádrž	$S_0 1. vlna$	7,428	9,190	10,03	10,10	10,70	14,20	1,314
	$S_0 2. vlna$	2,907	4,229	4,755	4,859	5,461	7,073	0,848
	$S_0 3. vlna$	5,182	6,760	7,538	7,705	8,686	13,99	1,567
	$S_0 4. vlna$	5,798	7,098	7,890	8,162	8,970	12,05	1,389
	$S_0 5. vlna$	6,454	7,915	8,634	8,697	9,417	11,85	1,155
	$S_0 6. vlna$	3,502	5,174	5,757	5,911	6,405	8,931	1,030
	$S_0 7. vlna$	3,762	4,893	5,319	5,438	5,927	8,319	0,831
	$S_0 8. vlna$	1,450	1,806	2,009	2,100	2,329	4,563	0,460
	Par. a	0,045	0,072	0,082	0,081	0,094	0,119	0,016
lnSS	0,906	1,639	2,079	2,251	2,595	5,171	0,880	
Nelineární nádrž	$S_0 1. vlna$	10,43	11,65	11,97	11,92	12,27	12,82	0,493
	$S_0 2. vlna$	5,314	6,224	6,501	6,476	6,773	7,302	0,417
	$S_0 3. vlna$	8,153	8,828	9,146	9,092	9,434	10,05	0,438
	$S_0 4. vlna$	8,161	9,300	9,736	9,638	10,01	10,71	0,512
	$S_0 5. vlna$	9,082	9,925	10,34	10,29	10,64	11,11	0,442
	$S_0 6. vlna$	6,330	7,396	7,655	7,626	7,927	8,510	0,454
	$S_0 7. vlna$	6,122	6,928	7,322	7,251	7,584	8,460	0,433
	$S_0 8. vlna$	2,853	3,455	3,706	3,666	3,937	4,402	0,369
	Par. a	27,59	46,06	56,98	58,98	71,87	95,6	17,67
Par. b	1,370	1,555	1,628	1,625	1,717	1,825	0,112	
lnSS	0,607	0,646	0,660	0,667	0,684	0,765	0,031	
Exponenciální nádrž	$S_0 1. vlna$	11,53	14,19	15,32	15,15	16,29	19,19	1,715
	$S_0 2. vlna$	6,186	8,665	10,11	9,789	10,85	13,76	1,708
	$S_0 3. vlna$	8,709	11,33	12,66	12,41	13,55	16,49	1,723
	$S_0 4. vlna$	9,278	11,88	13,12	12,91	14,10	16,71	1,706
	$S_0 5. vlna$	9,990	12,55	13,79	13,59	14,6	17,29	1,736
	$S_0 6. vlna$	7,430	10,06	11,33	11,09	12,19	15,14	1,719
	$S_0 7. vlna$	6,823	9,608	10,83	10,61	11,73	14,67	1,708
	$S_0 8. vlna$	2,253	4,821	6,010	5,823	6,879	9,927	1,710
	Par. a	13,95	26,26	35,84	37,04	44,41	98,32	15,93
Par. b	3,887	3,941	3,969	3,964	3,990	4,000	0,029	
lnSS	1,097	1,128	1,145	1,144	1,157	1,195	0,022	

Tab. č. 16: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Řečice

<i>Statistiky Sázava</i>	<i><math>S_0</math> [mm], parametry (par.), lnSS [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<i>Lineární nádrž</i>	<i><math>S_0</math> 1. vlna</i>	3,954	4,574	4,892	4,981	5,343	7,030	0,566
	<i><math>S_0</math> 2. vlna</i>	6,877	8,349	8,822	8,925	8,368	12,17	0,901
	<i><math>S_0</math> 3. vlna</i>	10,91	12,46	13,10	13,03	13,64	14,99	0,857
	<i><math>S_0</math> 4. vlna</i>	5,614	6,376	6,733	6,801	7,201	8,878	0,590
	<i><math>S_0</math> 5. vlna</i>	6,054	7,438	7,949	7,997	8,465	10,89	0,834
	<i><math>S_0</math> 6. vlna</i>	4,962	6,001	6,450	6,462	6,794	9,027	0,707
	<i>Par. a</i>	0,064	0,098	0,105	0,106	0,114	0,141	0,015
	<i>lnSS</i>	0,822	0,947	1,090	1,171	1,308	2,044	0,289
<i>Nelineární nádrž</i>	<i><math>S_0</math> 1. vlna</i>	6,553	7,382	7,698	7,676	8,065	8,624	0,476
	<i><math>S_0</math> 2. vlna</i>	10,70	11,50	11,95	11,90	12,28	12,90	0,517
	<i><math>S_0</math> 3. vlna</i>	14,70	15,54	15,90	15,87	16,24	16,77	0,483
	<i><math>S_0</math> 4. vlna</i>	8,441	9,333	9,699	9,633	10,02	10,61	0,490
	<i><math>S_0</math> 5. vlna</i>	9,633	10,54	10,88	10,87	11,26	11,82	0,505
	<i><math>S_0</math> 6. vlna</i>	8,243	9,098	9,466	9,414	9,753	10,34	0,487
	<i>Par. a</i>	27,12	47,73	58,39	59,94	72,41	98,91	17,46
	<i>Par. b</i>	1,381	1,576	1,640	1,629	1,701	1,801	0,099
<i>lnSS</i>	0,705	0,708	0,710	0,711	0,712	0,720	0,003	
<i>Exponenciál- ní nádrž</i>	<i><math>S_0</math> 1. vlna</i>	4,220	9,141	10,50	10,23	11,44	13,55	1,810
	<i><math>S_0</math> 2. vlna</i>	8,520	13,3	14,76	14,48	15,81	17,98	1,825
	<i><math>S_0</math> 3. vlna</i>	10,55	15,14	16,61	16,35	17,59	19,73	1,817
	<i><math>S_0</math> 4. vlna</i>	6,137	11,16	12,54	12,26	13,49	15,52	1,835
	<i><math>S_0</math> 5. vlna</i>	7,182	12,17	13,64	13,33	14,57	16,70	1,823
	<i><math>S_0</math> 6. vlna</i>	5,947	10,71	12,16	11,93	13,18	15,29	1,164
	<i>Par. a</i>	6,021	20,60	28,92	29,67	36,63	61,87	12,60
	<i>Par. b</i>	3,983	3,996	3,998	3,997	3,999	4,000	0,003
<i>lnSS</i>	1,790	1,798	1,802	1,802	1,805	1,827	0,007	

Tab. č. 17: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Sázavy



Statistiky Teplá	$S_0$ [mm], parametry (par.), lnSS [mm <sup>2</sup> ]	Minimum	Dolní kvartil	Medián	Průměrná hodnota	Horní kvartil	Maximum	Směrodatná odchylka
Typ nádrže								
Lineární nádrž	$S_0 1. vlna$	5,957	8,352	9,139	9,414	10,47	14,24	1,550
	$S_0 2. vlna$	8,705	10,29	11,39	11,43	12,43	14,75	1,379
	$S_0 3. vlna$	6,228	7,691	8,635	8,78	9,732	13,64	1,335
	$S_0 4. vlna$	7,684	9,705	10,48	10,61	11,44	14,48	1,257
	$S_0 5. vlna$	5,500	6,263	6,817	6,942	7,468	9,191	0,857
	$S_0 6. vlna$	6,709	7,743	8,783	8,789	9,716	14,24	1,346
	$S_0 7. vlna$	1,892	2,362	2,561	2,587	2,790	3,626	0,327
	Par. a	0,044	0,066	0,079	0,080	0,091	0,123	0,015
lnSS	1,445	1,835	1,955	2,060	2,202	3,884	0,403	
Nelineární nádrž	$S_0 1. vlna$	10,78	11,55	11,74	11,73	11,90	12,27	0,267
	$S_0 2. vlna$	12,66	13,57	13,78	13,74	13,91	14,31	0,276
	$S_0 3. vlna$	9,980	10,88	11,04	11,01	11,16	11,67	0,262
	$S_0 4. vlna$	11,86	12,61	12,81	12,78	12,95	13,26	0,253
	$S_0 5. vlna$	8,404	9,302	9,444	9,415	9,564	9,763	0,220
	$S_0 6. vlna$	10,09	10,76	10,96	10,93	11,09	11,65	0,253
	$S_0 7. vlna$	3,860	4,514	4,640	4,612	4,731	4,922	0,168
	Par. a	42,83	81,71	90,75	87,68	95,76	99,98	10,24
	Par. b	1,493	1,723	1,754	1,744	1,772	1,810	0,046
lnSS	0,628	0,637	0,642	0,646	0,652	0,701	0,014	
Exponenciál- ní nádrž	$S_0 1. vlna$	9,650	12,67	13,74	13,82	14,99	17,33	1,691
	$S_0 2. vlna$	11,41	14,42	15,35	15,49	16,69	18,78	1,694
	$S_0 3. vlna$	9,004	12,02	13,07	13,18	14,36	16,60	1,680
	$S_0 4. vlna$	10,09	13,31	14,42	14,44	15,64	17,82	1,716
	$S_0 5. vlna$	7,519	10,69	11,68	11,82	12,97	15,20	1,716
	$S_0 6. vlna$	9,052	11,88	12,97	13,01	14,13	16,35	1,690
	$S_0 7. vlna$	1,841	4,735	5,811	5,886	7,067	9,210	1,703
	Par. a	10,86	23,16	29,68	33,88	41,22	72,31	14,75
	Par. b	3,970	3,992	3,996	3,994	3,998	4,000	0,006
lnSS	1,317	1,331	1,339	1,340	1,349	1,381	0,013	

Tab. č. 18: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Teplé

<i>Statistiky Teplá Vltava</i>	<i><math>S_0</math> [mm], parametry (par.), lnSS [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<i>Lineární nádrž</i>	<i><math>S_0 1. vlna</math></i>	8,127	10,03	10,35	10,38	10,73	13,27	0,688
	<i><math>S_0 2. vlna</math></i>	13,54	14,44	14,69	14,61	14,90	14,99	0,353
	<i><math>S_0 3. vlna</math></i>	10,30	11,71	12,04	12,11	12,51	14,80	0,832
	<i><math>S_0 4. vlna</math></i>	9,342	11,49	11,93	12,00	12,56	14,47	0,935
	<i><math>S_0 5. vlna</math></i>	13,04	14,39	14,70	14,56	14,84	15,00	0,415
	<i>Par. a</i>	0,057	0,070	0,073	0,073	0,077	0,094	0,006
	<i>lnSS</i>	1,566	1,693	1,809	1,877	1,936	3,090	0,275
<i>Nelineární nádrž</i>	<i><math>S_0 1. vlna</math></i>	12,29	12,50	12,59	12,62	12,72	13,00	0,173
	<i><math>S_0 2. vlna</math></i>	19,84	19,96	19,98	19,97	19,99	20,00	0,031
	<i><math>S_0 3. vlna</math></i>	14,02	14,36	14,51	14,50	14,63	14,87	0,172
	<i><math>S_0 4. vlna</math></i>	14,33	14,66	14,79	14,79	14,93	15,21	0,177
	<i><math>S_0 5. vlna</math></i>	17,58	17,87	17,97	17,99	18,14	18,33	0,175
	<i>Par. a</i>	19,33	21,21	22,51	22,49	23,54	25,59	1,574
	<i>Par. b</i>	1,026	1,064	1,082	1,081	1,098	1,124	0,024
<i>lnSS</i>	1,011	1,014	1,015	1,015	1,016	1,020	0,002	
<i>Exponenciál- ní nádrž</i>	<i><math>S_0 1. vlna</math></i>	8,620	12,31	13,50	13,35	14,50	16,73	1,489
	<i><math>S_0 2. vlna</math></i>	11,94	15,65	16,84	16,68	17,91	19,79	1,496
	<i><math>S_0 3. vlna</math></i>	9,626	13,38	14,52	14,38	15,57	17,74	1,500
	<i><math>S_0 4. vlna</math></i>	10,36	13,95	15,13	14,97	16,14	18,14	1,492
	<i><math>S_0 5. vlna</math></i>	11,93	15,62	16,87	16,70	17,89	19,92	1,492
	<i>Par. a</i>	9,055	22,55	30,27	31,19	39,20	65,69	11,17
	<i>Par. b</i>	3,999	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	0,000
<i>lnSS</i>	9,06	9,062	9,063	9,064	9,065	9,077	0,003	

Tab. č. 19: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Teplé Vltavy

Statistiky Teplá Vltava upravená	$S_0$ [mm], parametry (par.), lnSS [mm <sup>2</sup> ]	Minimum	Dolní kvartil	Medián	Průměrná hodnota	Horní kvartil	Maximum	Směrodatná odchylka
Typ nádrže								
Lineární nádrž	$S_0 1. vlna$	10,06	11,43	12,10	12,13	12,63	14,19	0,926
	$S_0 2. vlna$	16,24	18,76	19,41	19,1	19,75	19,98	0,901
	$S_0 3. vlna$	11,13	13,10	13,98	14,01	14,78	16,94	1,234
	$S_0 4. vlna$	10,60	13,33	14,27	14,23	15,17	18,39	1,368
	$S_0 5. vlna$	14,99	16,79	17,40	17,44	18,06	19,81	1,068
	Par. a	0,044	0,053	0,058	0,058	0,062	0,081	0,007
	lnSS	1,020	1,079	1,128	1,198	1,233	1,853	0,181
Nelineární nádrž	$S_0 1. vlna$	12,17	12,44	12,54	12,56	12,69	13,06	0,184
	$S_0 2. vlna$	19,84	19,95	19,97	19,96	19,98	20,00	0,039
	$S_0 3. vlna$	14,04	14,32	14,45	14,45	14,60	14,87	0,194
	$S_0 4. vlna$	14,17	14,57	14,75	14,73	14,85	15,29	0,209
	$S_0 5. vlna$	17,50	17,78	17,93	17,93	18,07	18,47	0,203
	Par. a	18,09	20,9	21,77	21,89	22,78	27,58	1,801
	Par. b	1,004	1,056	1,072	1,072	1,088	1,151	0,028
lnSS	1,012	1,014	1,015	1,016	1,017	1,022	0,002	
Exponenciál- ní nádrž	$S_0 1. vlna$	10,42	12,68	13,45	13,17	13,99	14,41	1,011
	$S_0 2. vlna$	16,08	18,37	19,13	18,83	19,65	19,97	0,999
	$S_0 3. vlna$	11,91	14,24	15,01	14,73	15,57	16,06	1,019
	$S_0 4. vlna$	12,64	14,93	15,7	15,43	16,24	16,85	1,010
	$S_0 5. vlna$	15,29	17,48	18,24	17,99	18,83	19,28	0,993
	Par. a	5,955	8,171	9,159	8,862	9,887	10,50	1,189
	Par. b	6,997	6,999	6,999	6,999	7,000	7,000	0,001
lnSS	1,548	1,549	1,549	1,550	1,550	1,553	0,001	

Tab. č. 20: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Teplé Vltavy po úpravě rozsahu počáteční zásoby a parametru  $b$  v SCDE

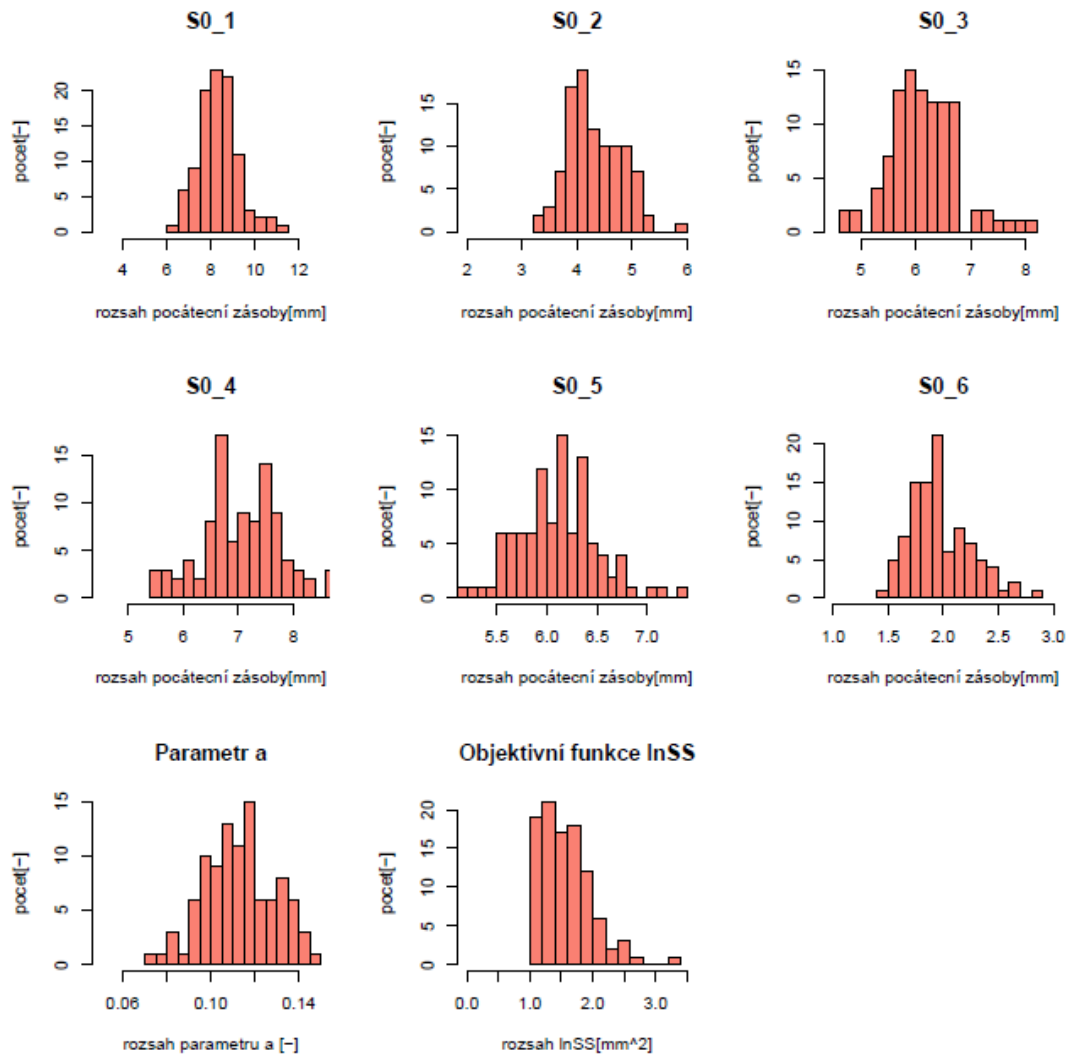
<i>Statistiky Úpa</i>	$S_0$ [mm], parametry (par.), lnSS [mm <sup>2</sup> ]	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<i>Lineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	10,4	11,72	12,10	12,03	12,34	13,18	0,498
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	13,84	14,75	14,85	14,80	14,94	15,00	0,217
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	11,17	11,94	12,32	12,34	12,65	14,37	0,632
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	8,748	9,695	10,04	10,06	10,40	11,89	0,601
	<i>Par. a</i>	0,074	0,083	0,087	0,088	0,091	0,109	0,006
	<i>lnSS</i>	1,504	1,575	1,617	1,659	1,694	2,376	0,133
<i>Nelineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	12,09	12,42	12,57	12,55	12,69	13,03	0,184
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	19,78	19,97	19,99	19,97	19,99	20,00	0,034
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	12,79	13,06	13,17	13,17	13,28	13,78	0,169
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	10,38	10,74	10,87	10,86	10,97	11,16	0,164
	<i>Par. a</i>	8,383	9,430	9,818	9,821	10,24	12,01	0,638
	<i>Par. b</i>	0,805	0,850	0,861	0,862	0,877	0,931	0,023
<i>lnSS</i>	0,693	0,694	0,695	0,696	0,696	0,707	0,002	
<i>Exponenciální nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub>1. vlna</i>	10,93	13,91	15,28	15,15	16,35	18,12	1,752
	<i>S<sub>0</sub>2. vlna</i>	12,43	15,62	16,91	16,78	17,98	19,81	1,751
	<i>S<sub>0</sub>3. vlna</i>	10,11	13,23	14,60	14,43	15,68	17,45	1,760
	<i>S<sub>0</sub>4. vlna</i>	8,682	11,84	13,22	13,08	14,32	16,10	1,759
	<i>Par. a</i>	8,136	17,82	25,10	26,41	32,52	51,20	10,98
	<i>Par. b</i>	3,999	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	0,000
<i>lnSS</i>	8,323	8,324	8,324	8,325	8,325	8,332	0,001	

Tab. č. 21: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Úpa

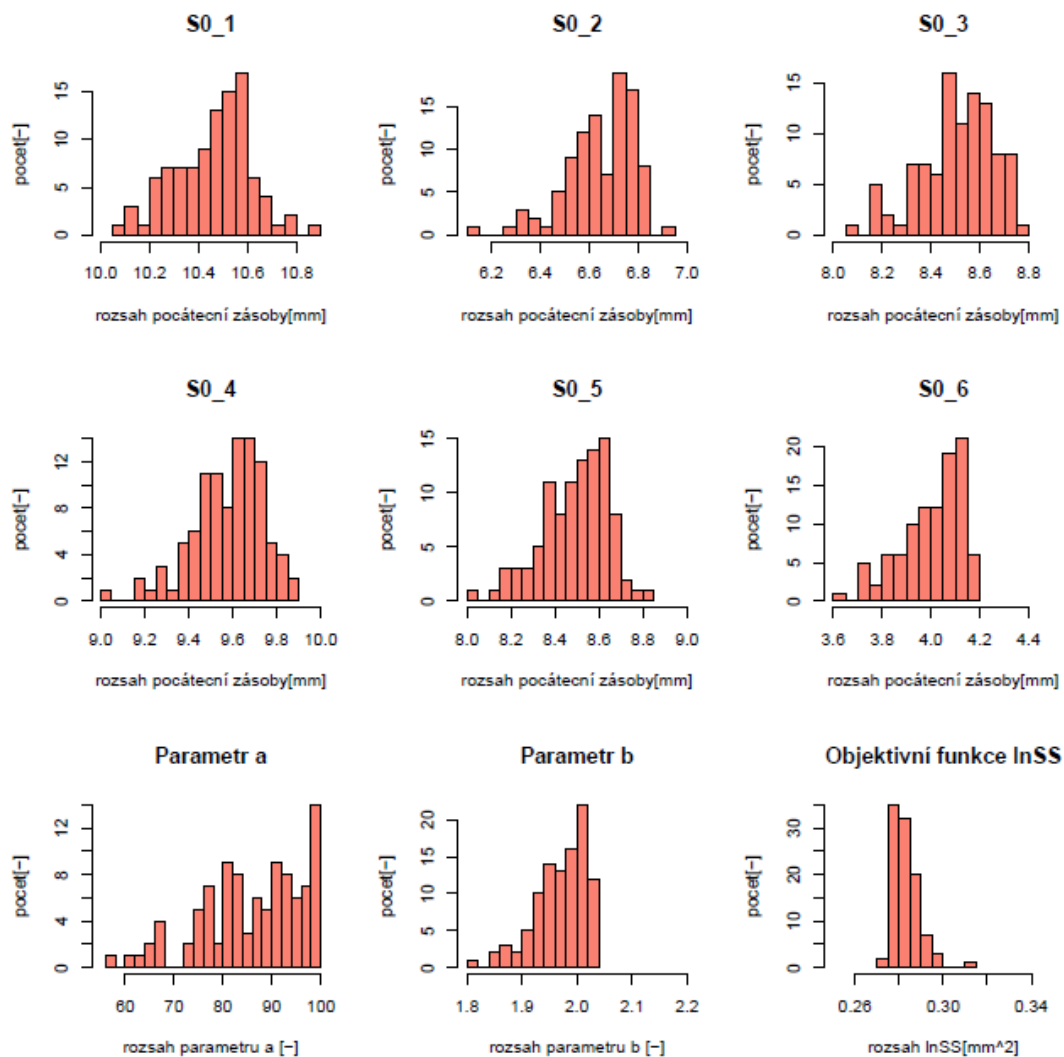
<i>Statistiky Úpa upravená</i>	<i>S<sub>0</sub> [mm], parametry (par.), lnSS [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Minimum</i>	<i>Dolní kvartil</i>	<i>Medián</i>	<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Horní kvartil</i>	<i>Maximum</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>Typ nádrže</i>								
<i>Lineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub> 1. vlna</i>	11,59	12,85	13,35	13,35	13,84	15,39	0,697
	<i>S<sub>0</sub> 2. vlna</i>	17,66	19,56	19,77	19,65	19,90	19,99	0,406
	<i>S<sub>0</sub> 3. vlna</i>	12,11	13,25	13,80	13,85	14,30	15,77	0,759
	<i>S<sub>0</sub> 4. vlna</i>	10,00	11,06	11,45	11,54	11,97	13,56	0,680
	<i>Par. a</i>	0,057	0,067	0,071	0,071	0,074	0,086	0,006
	<i>lnSS</i>	0,722	0,752	0,776	0,802	0,819	1,070	0,078
<i>Nelineární nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub> 1. vlna</i>	11,84	12,39	12,59	12,53	12,70	13,05	0,253
	<i>S<sub>0</sub> 2. vlna</i>	19,65	19,97	19,98	19,97	19,99	20,00	0,044
	<i>S<sub>0</sub> 3. vlna</i>	12,49	13,01	13,16	13,14	13,31	13,55	0,222
	<i>S<sub>0</sub> 4. vlna</i>	10,17	10,66	10,82	10,82	10,99	11,31	0,224
	<i>Par. a</i>	7,734	9,237	9,708	9,767	10,32	12,07	0,829
	<i>Par. b</i>	0,783	0,841	0,860	0,860	0,881	0,941	0,030
<i>lnSS</i>	0,693	0,695	0,696	0,697	0,697	0,715	0,003	
<i>Exponenciální nádrž</i>	<i>S<sub>0</sub> 1. vlna</i>	12,48	14,18	14,78	14,66	15,42	15,63	0,829
	<i>S<sub>0</sub> 2. vlna</i>	16,93	18,54	19,15	19,04	19,78	20,00	0,825
	<i>S<sub>0</sub> 3. vlna</i>	11,95	13,61	14,28	14,17	14,91	15,17	0,829
	<i>S<sub>0</sub> 4. vlna</i>	10,26	11,84	12,49	12,37	13,10	13,36	0,832
	<i>Par. a</i>	4,934	6,257	6,834	6,770	7,483	7,718	0,763
	<i>Par. b</i>	6,998	6,999	7,000	7,000	7,000	7,000	0,000
<i>lnSS</i>	1,579	1,579	1,579	1,579	1,579	1,580	0,000	

Tab. č. 22: Statistické hodnoty jednotlivých větví pro model lineární, nelineární a exponenciální nádrže v povodí řeky Úpy po úpravě rozsahu počáteční zásoby a parametru *b* v SCDE

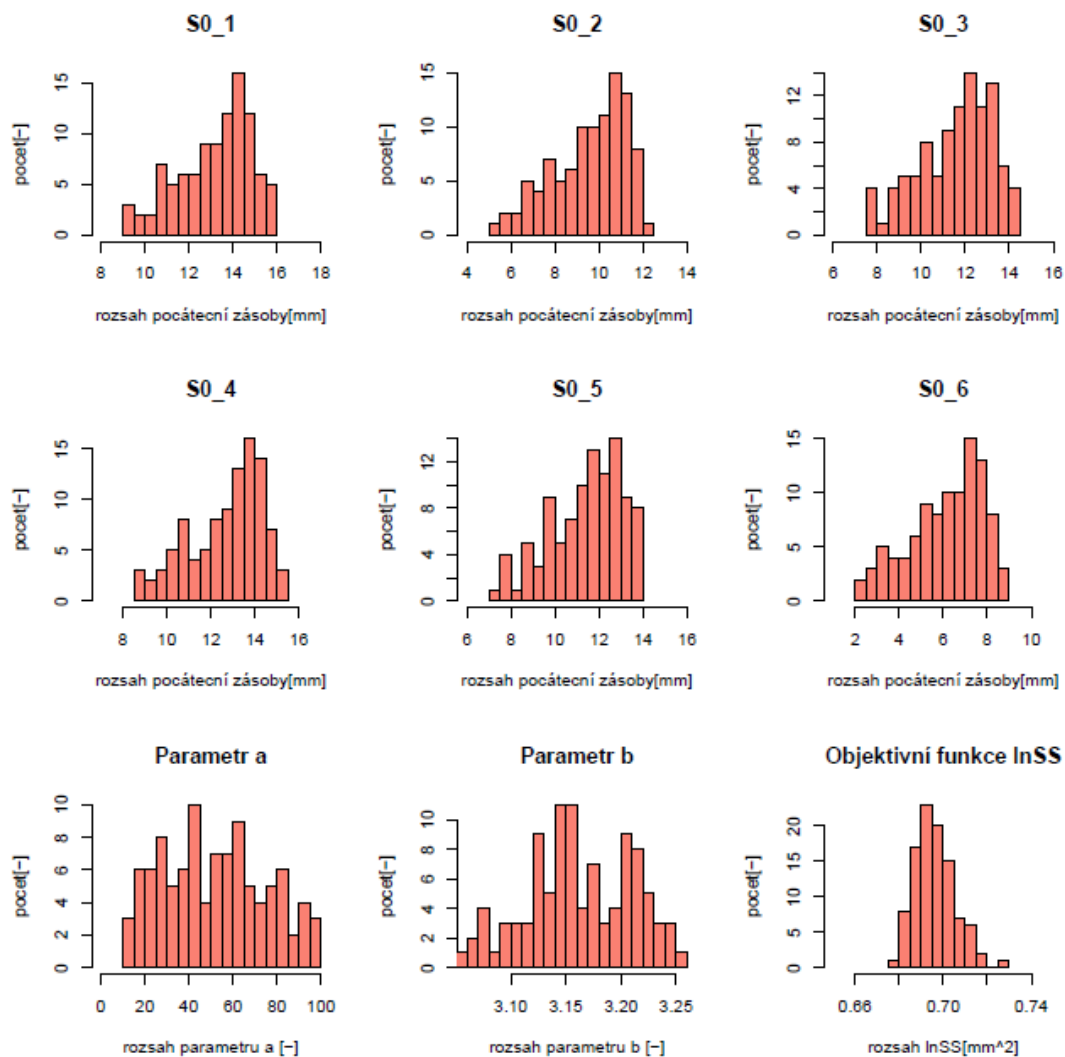
### Příloha č. 3



Obr. č. 62: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v šesti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Cidliny

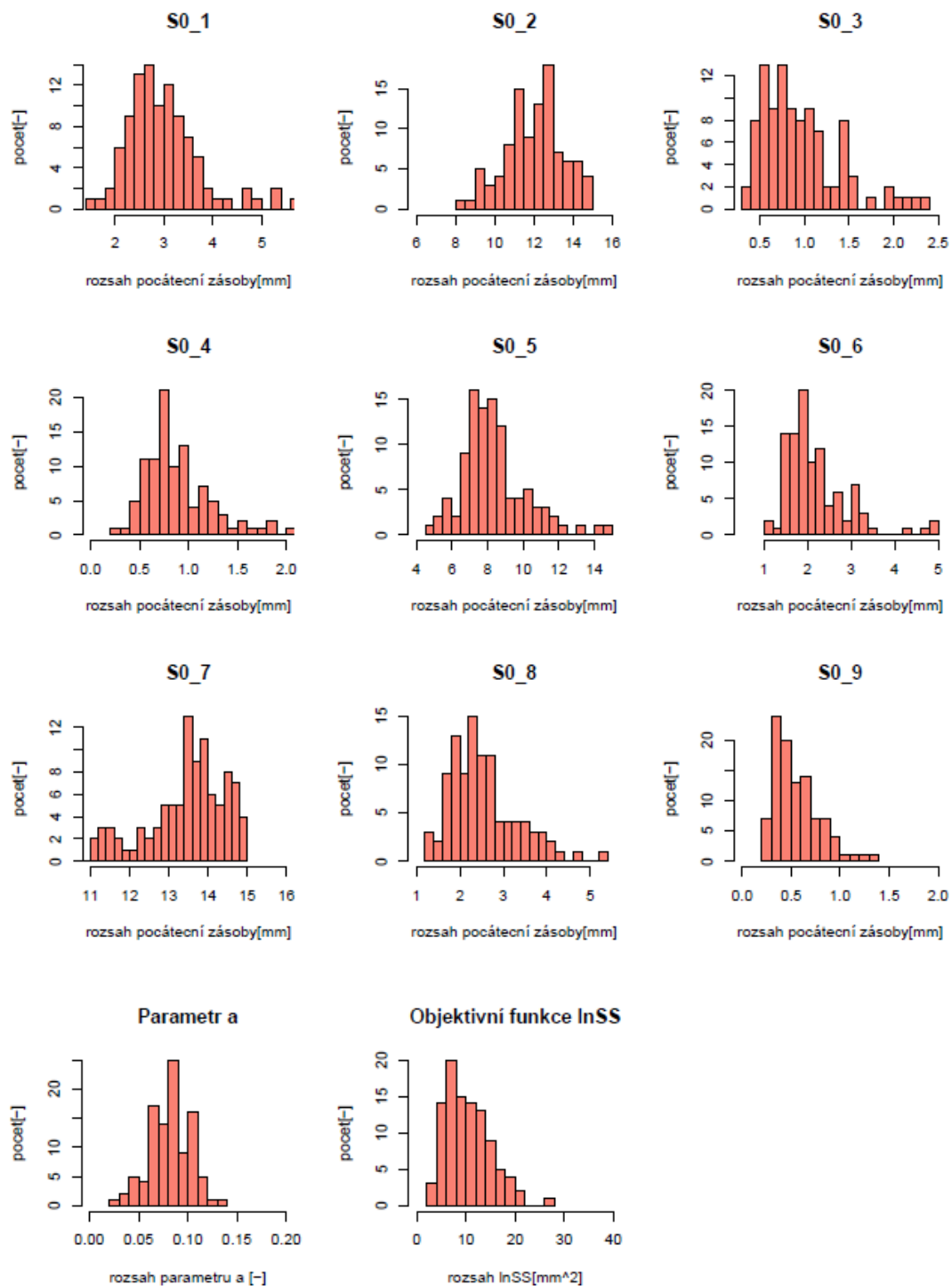


Obr. č. 63: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v šesti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Cidliny

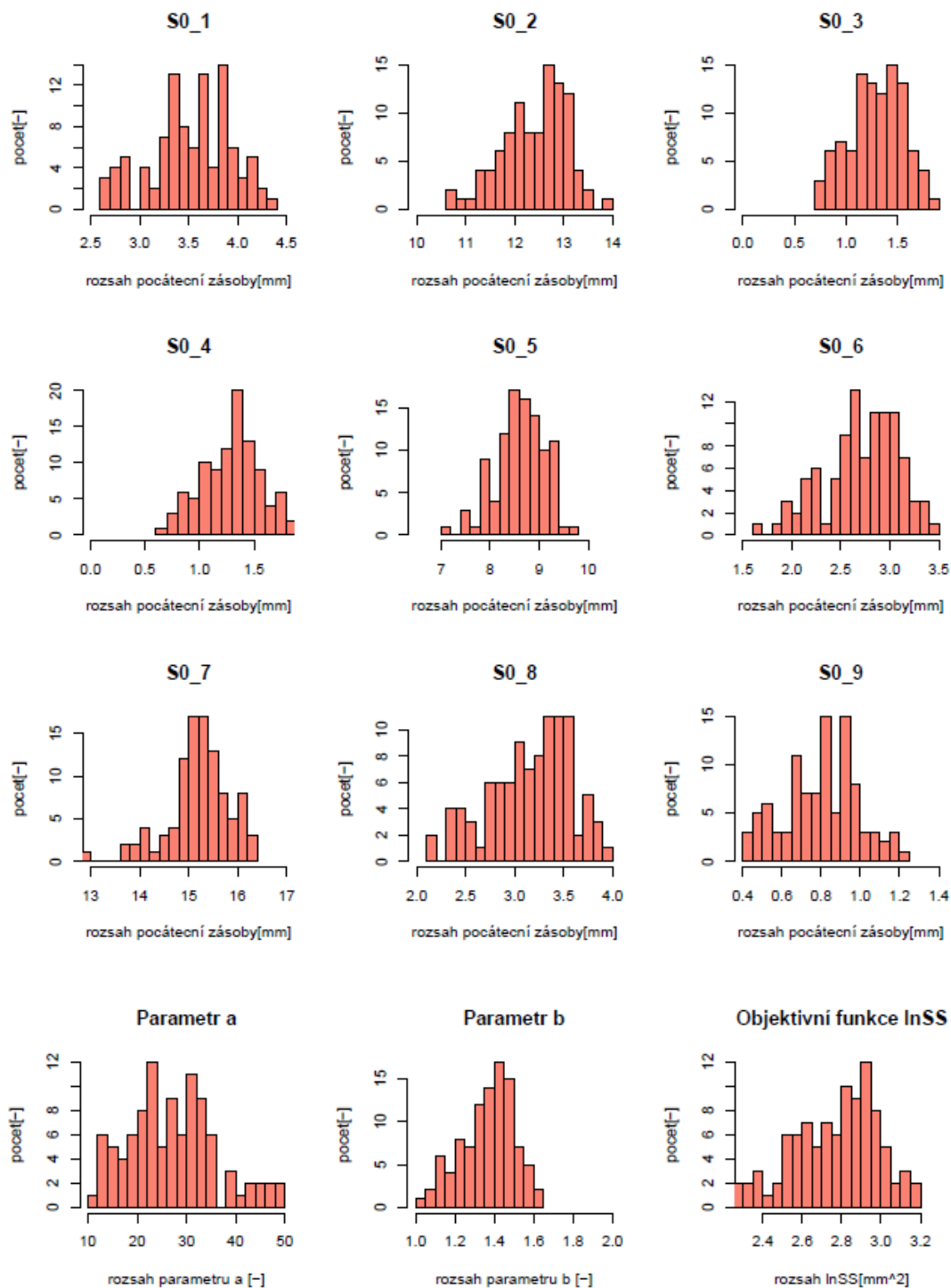


Obr. č. 64: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v šesti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Cidliny

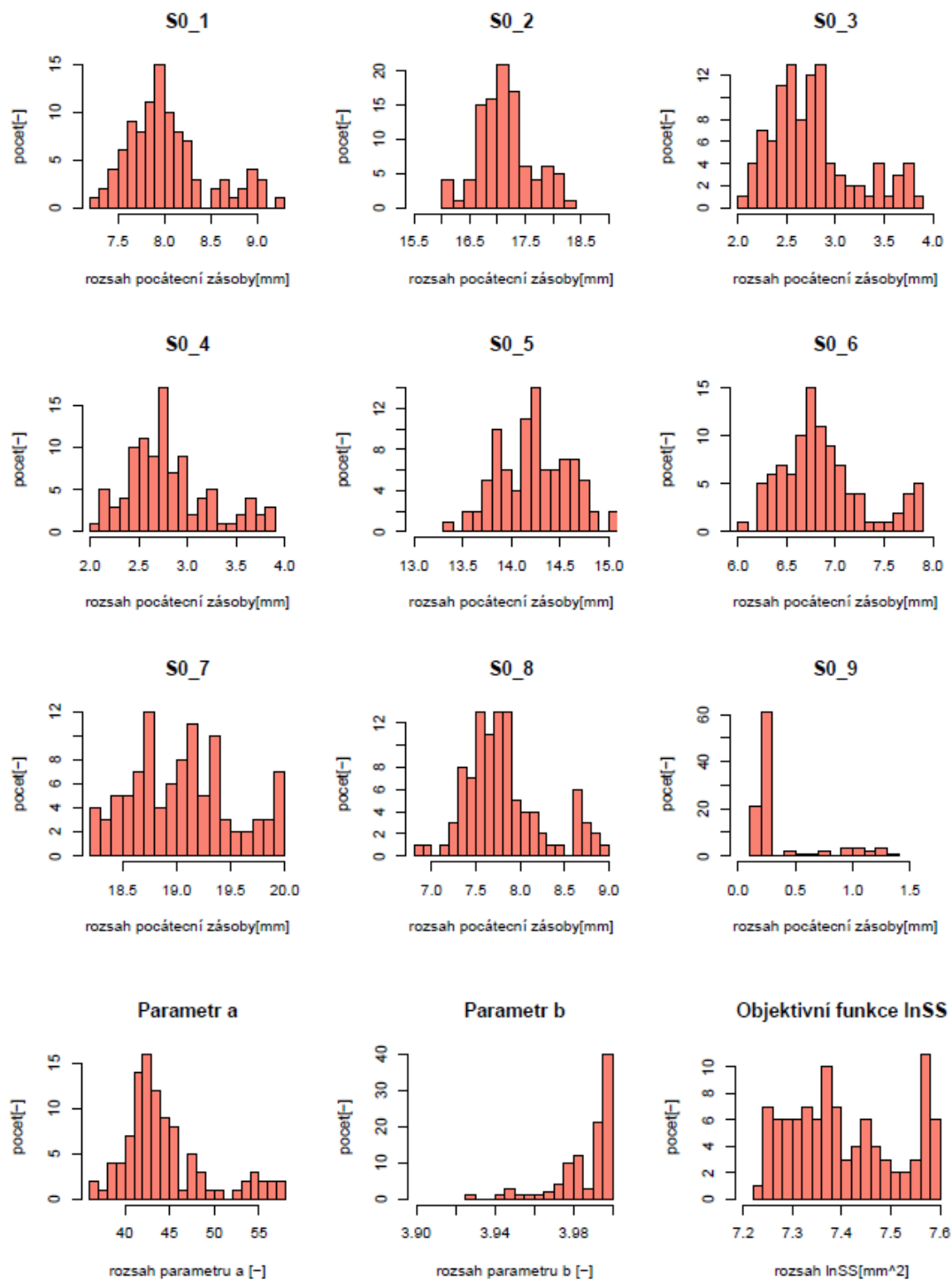




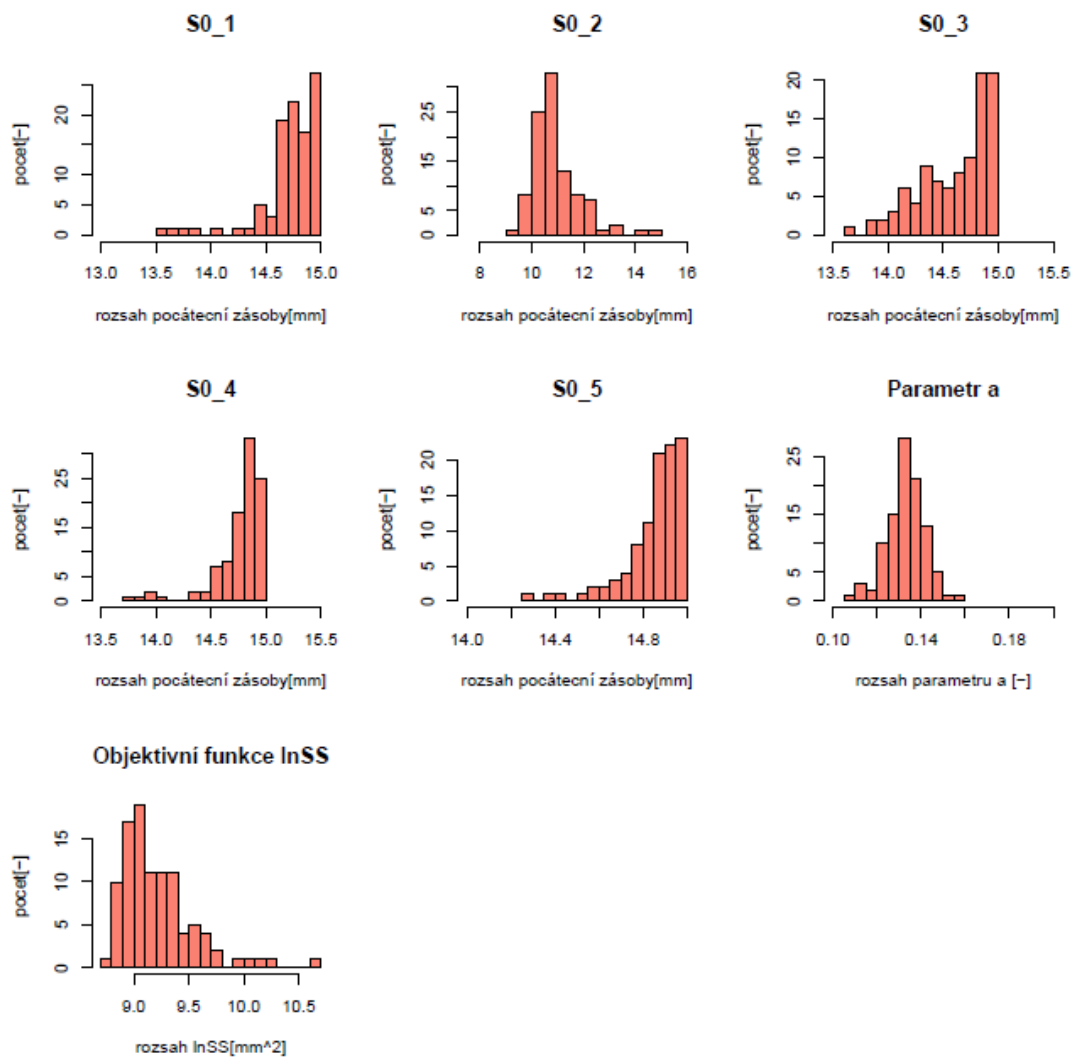
Obr. č. 65: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v devíti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Hloučely



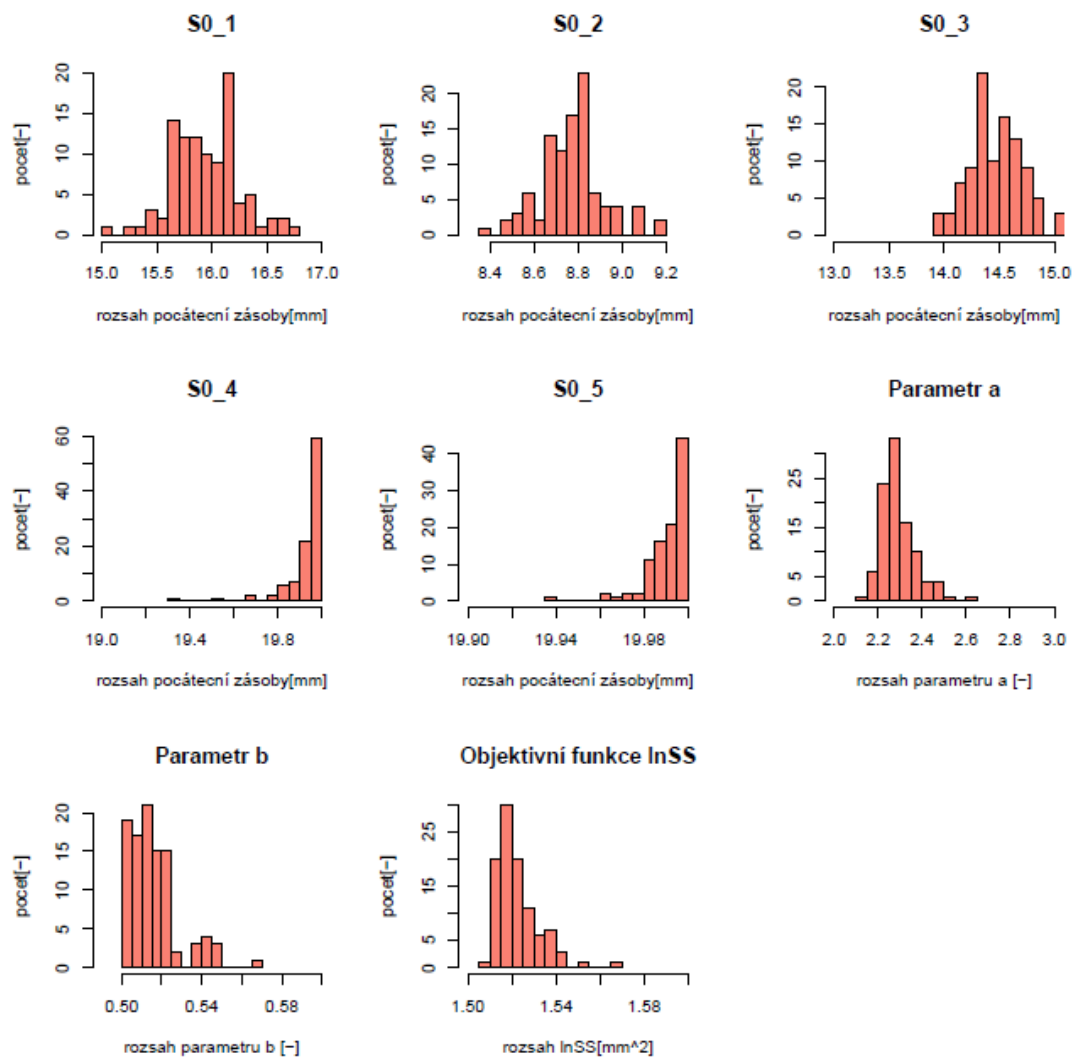
Obr. č. 66: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v devíti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Hloučely



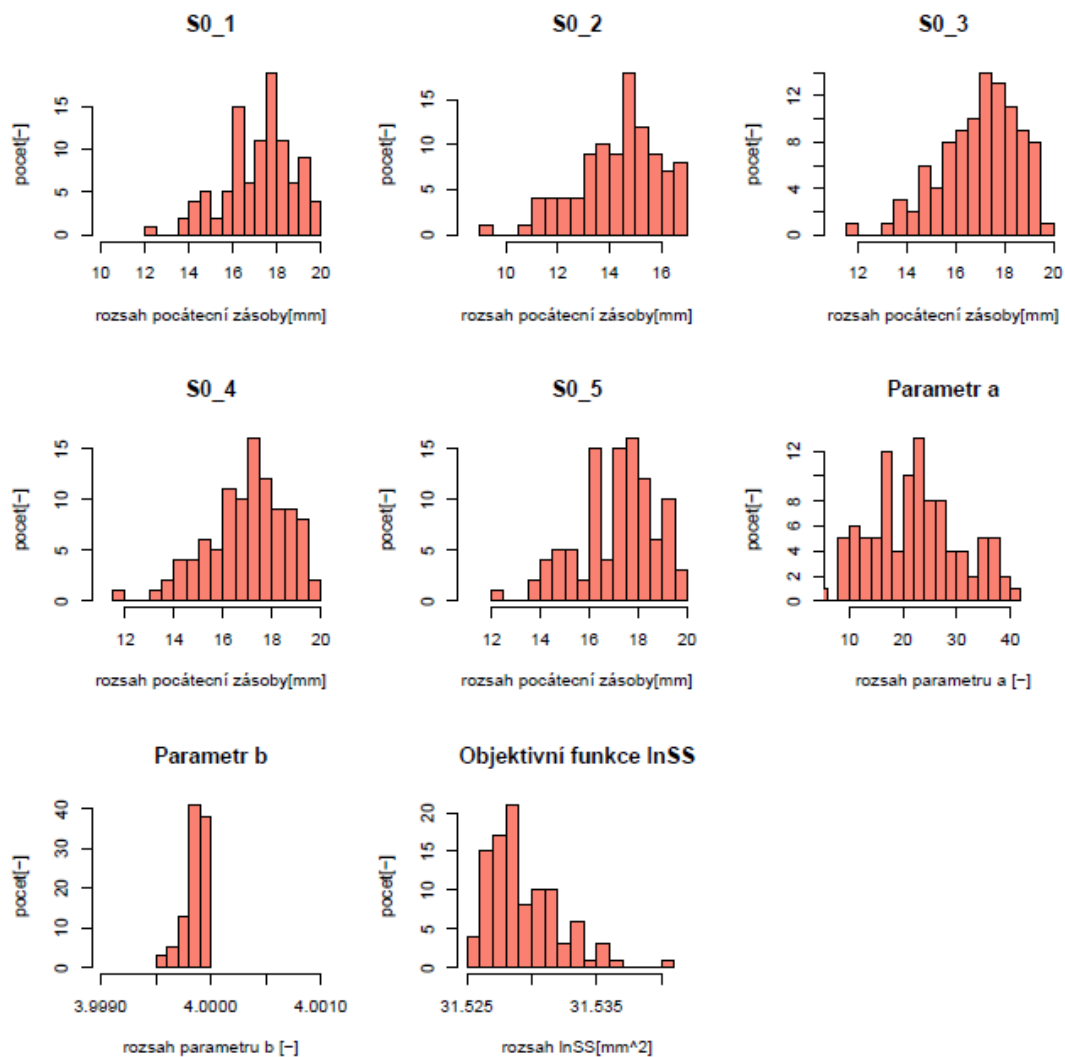
Obr. č. 67: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v devíti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Hlouchely



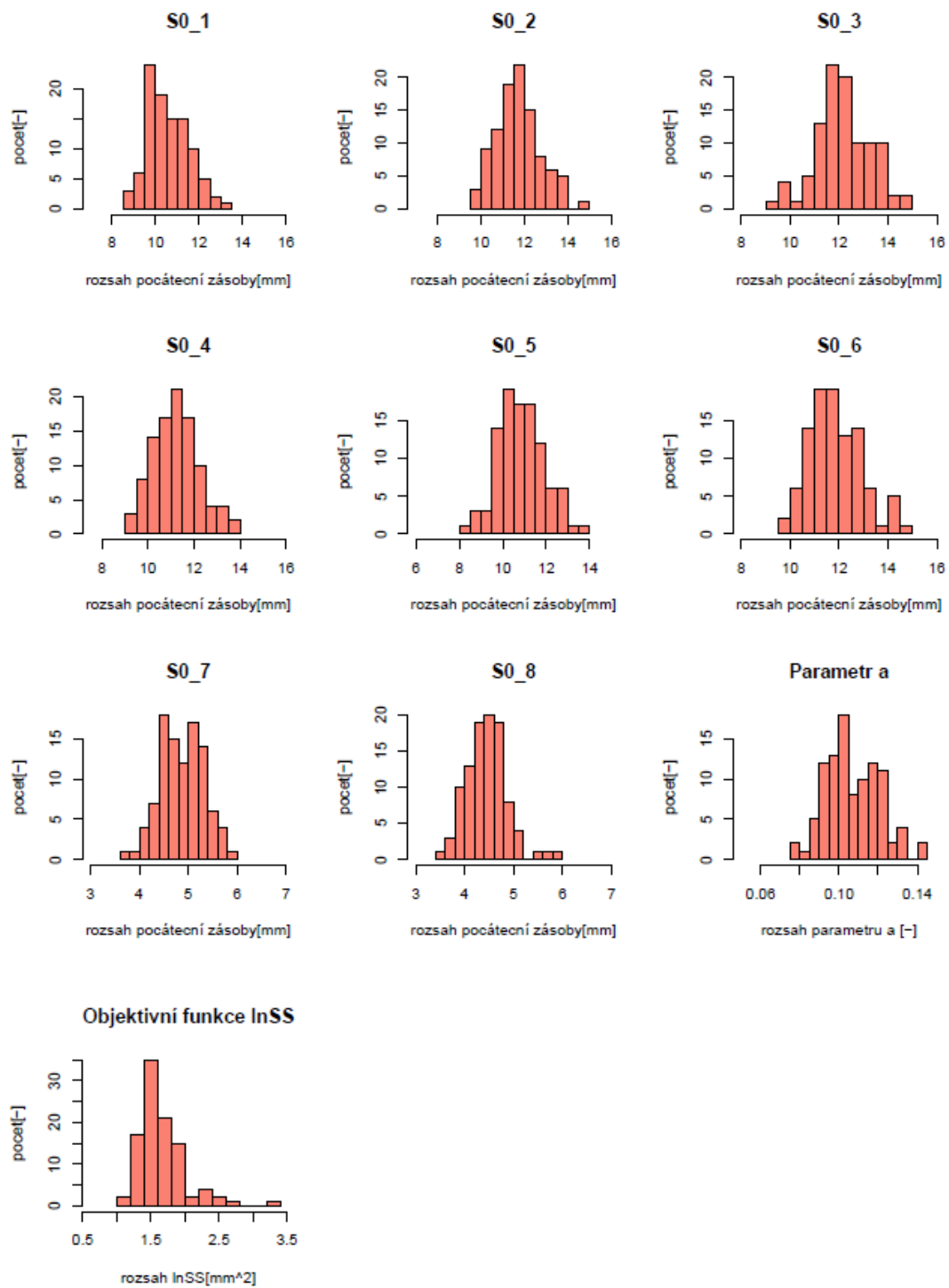
Obr. č. 68: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v pěti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Jizery



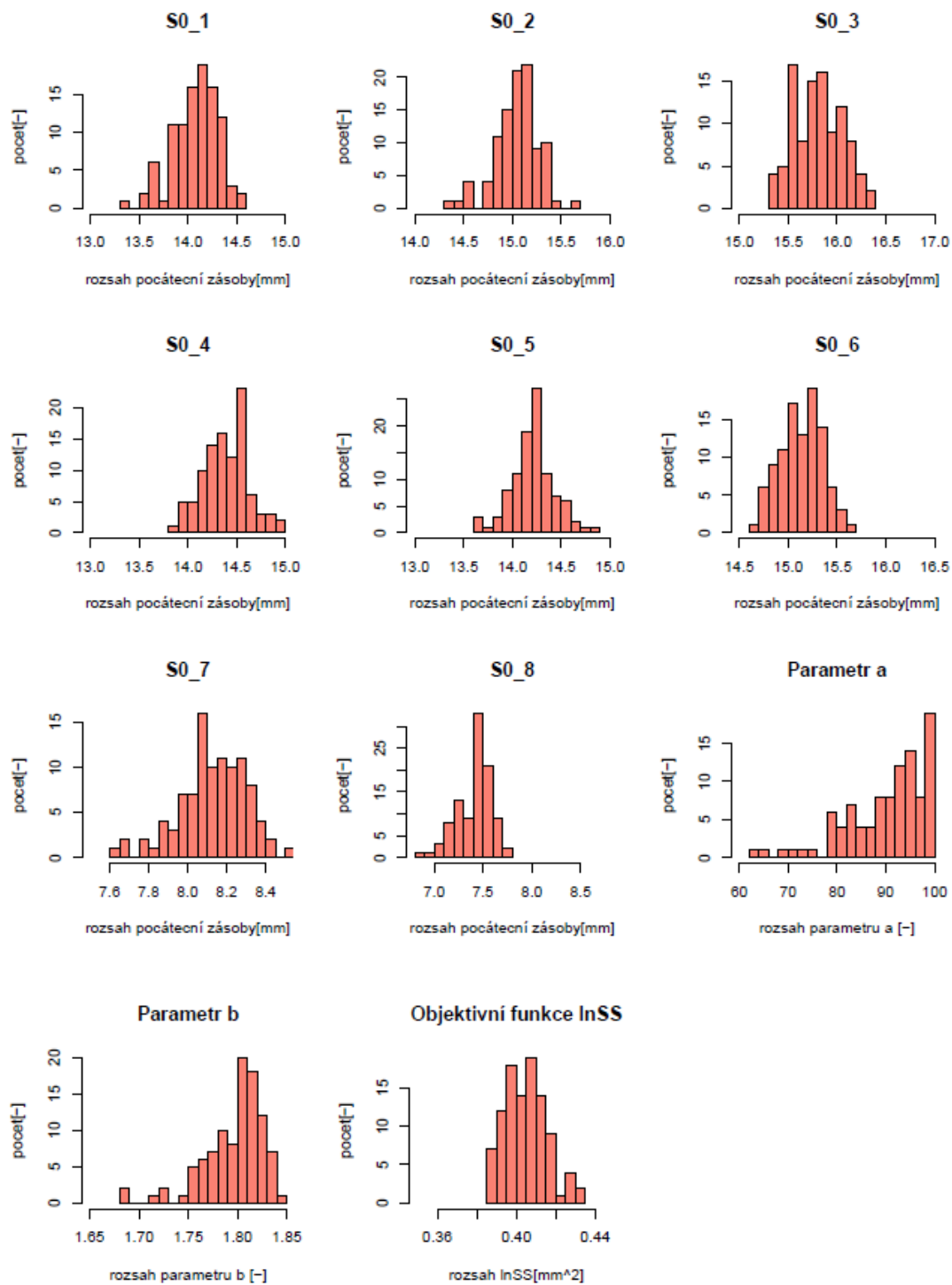
Obr. č. 69: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v pěti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Jizery



Obr. č. 70: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v pěti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Jizery

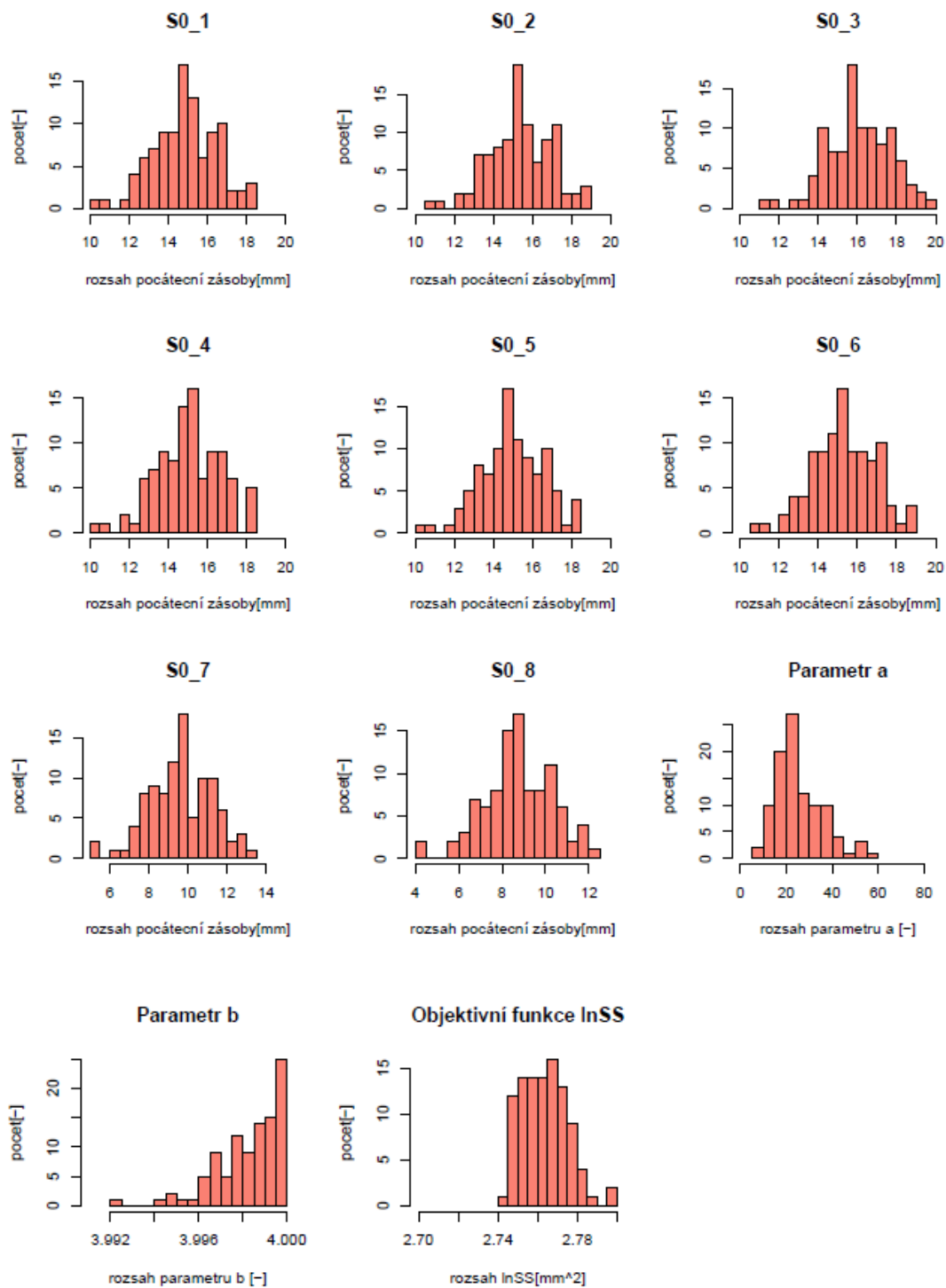


Obr. č. 71: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v osmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Klenice

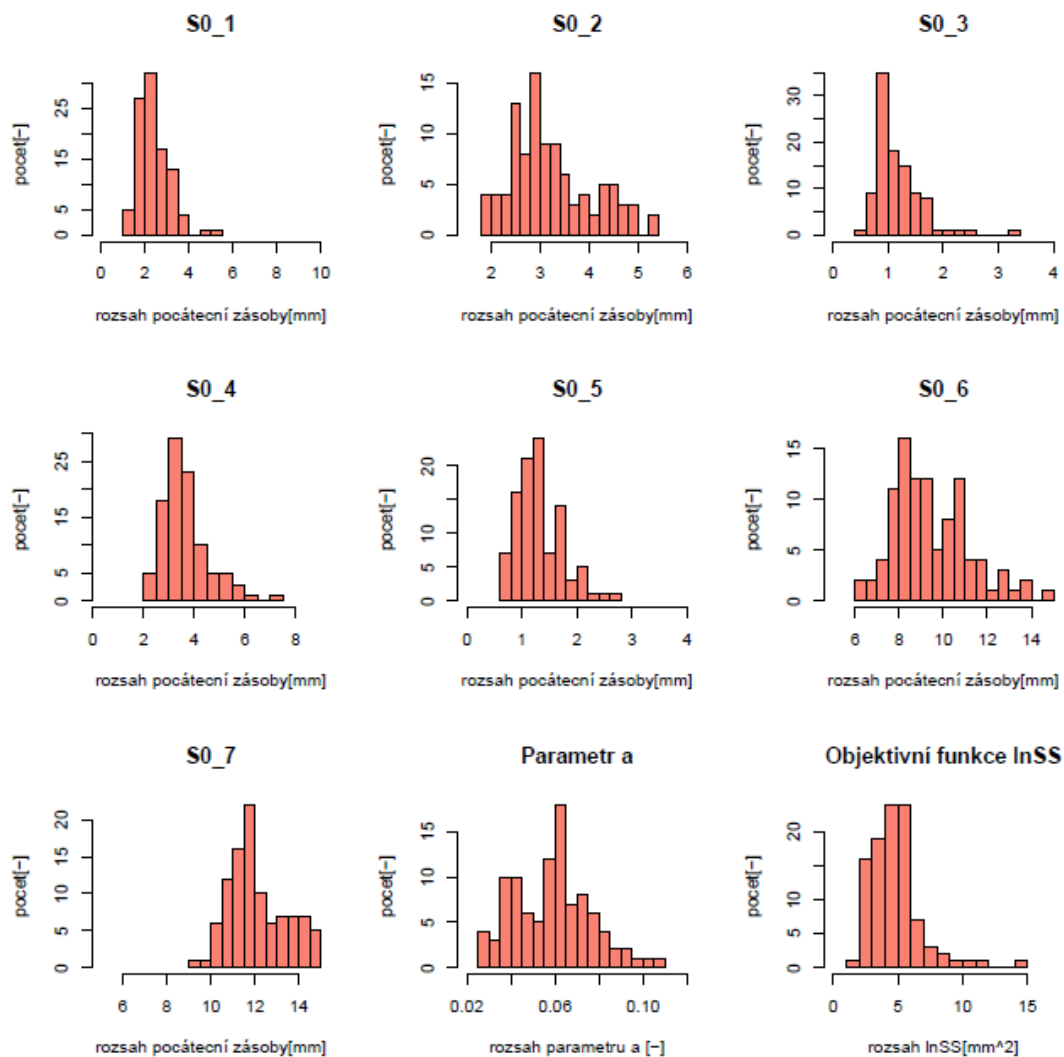


Obr. č. 72: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v osmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Klenice

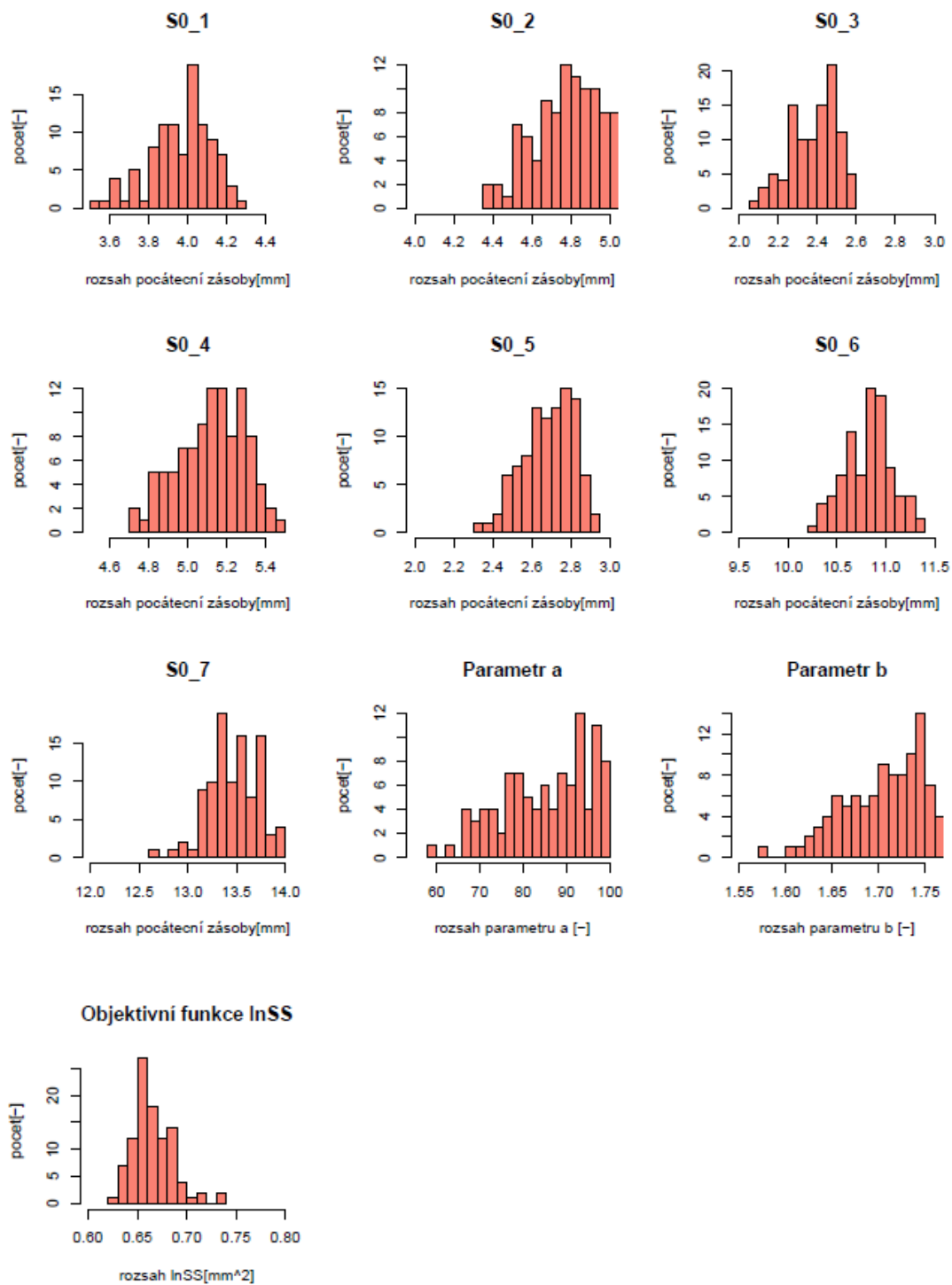




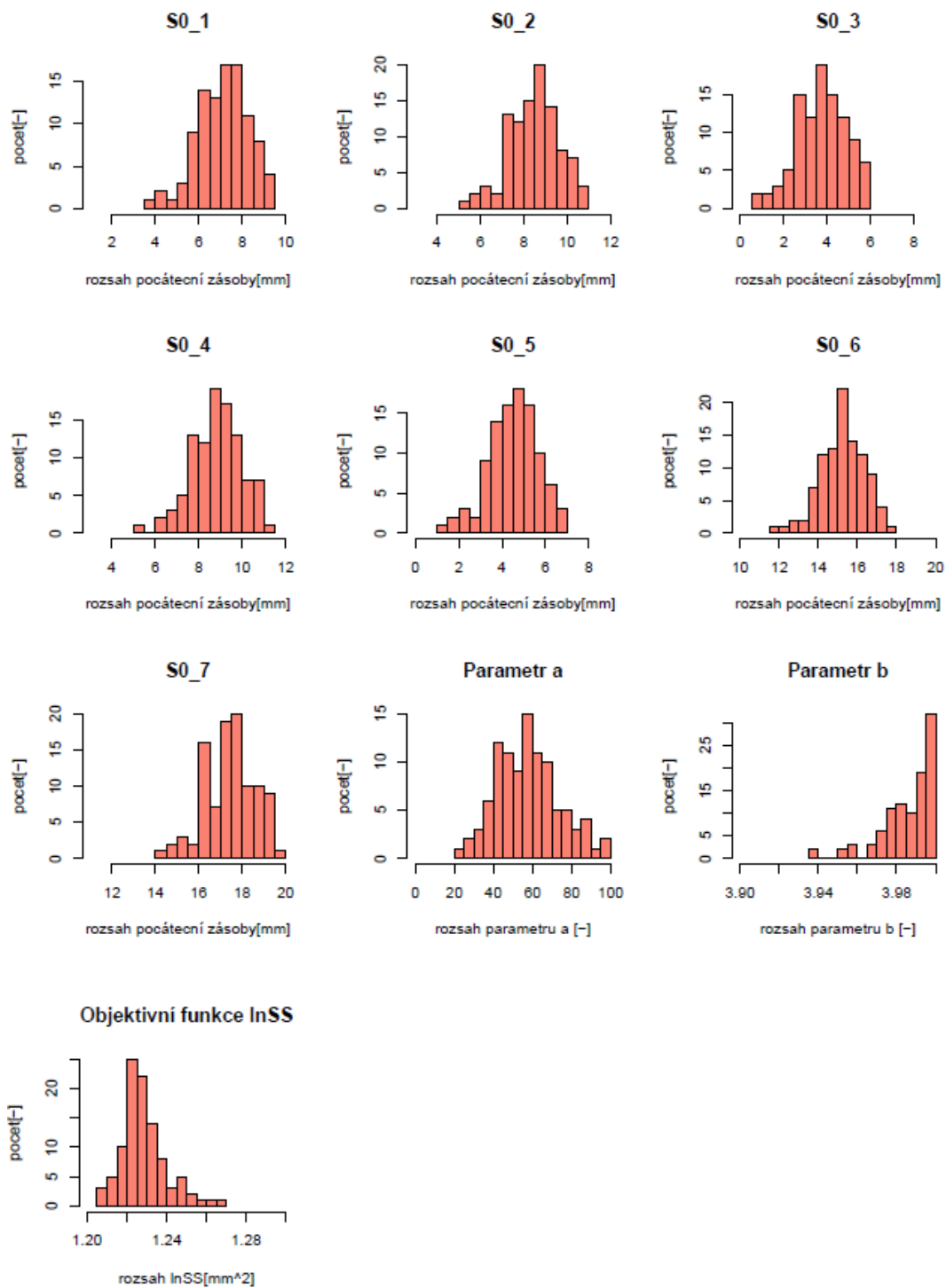
Obr. č. 73: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v osmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Klenice



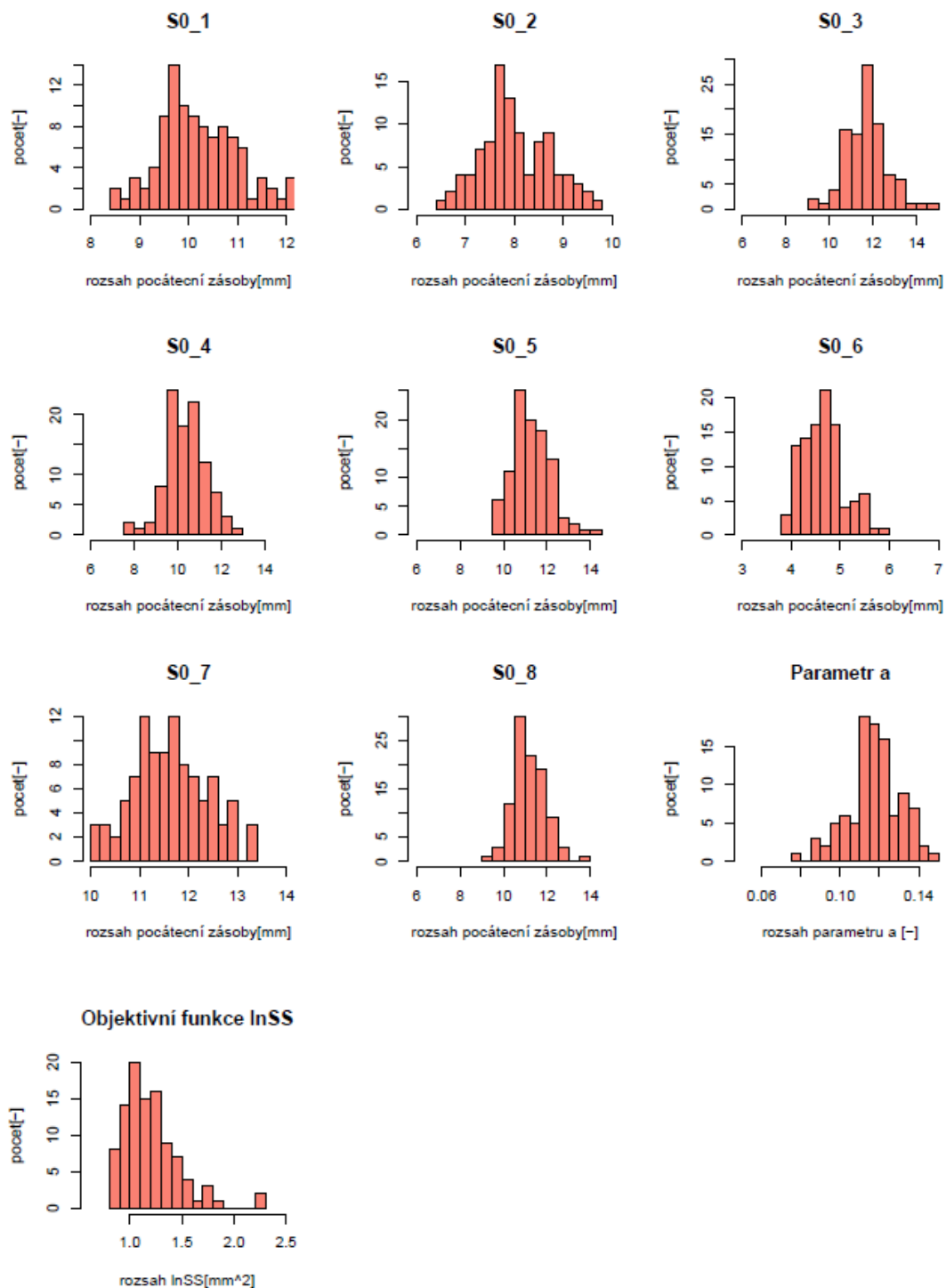
Obr. č. 74: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v sedmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Litavy



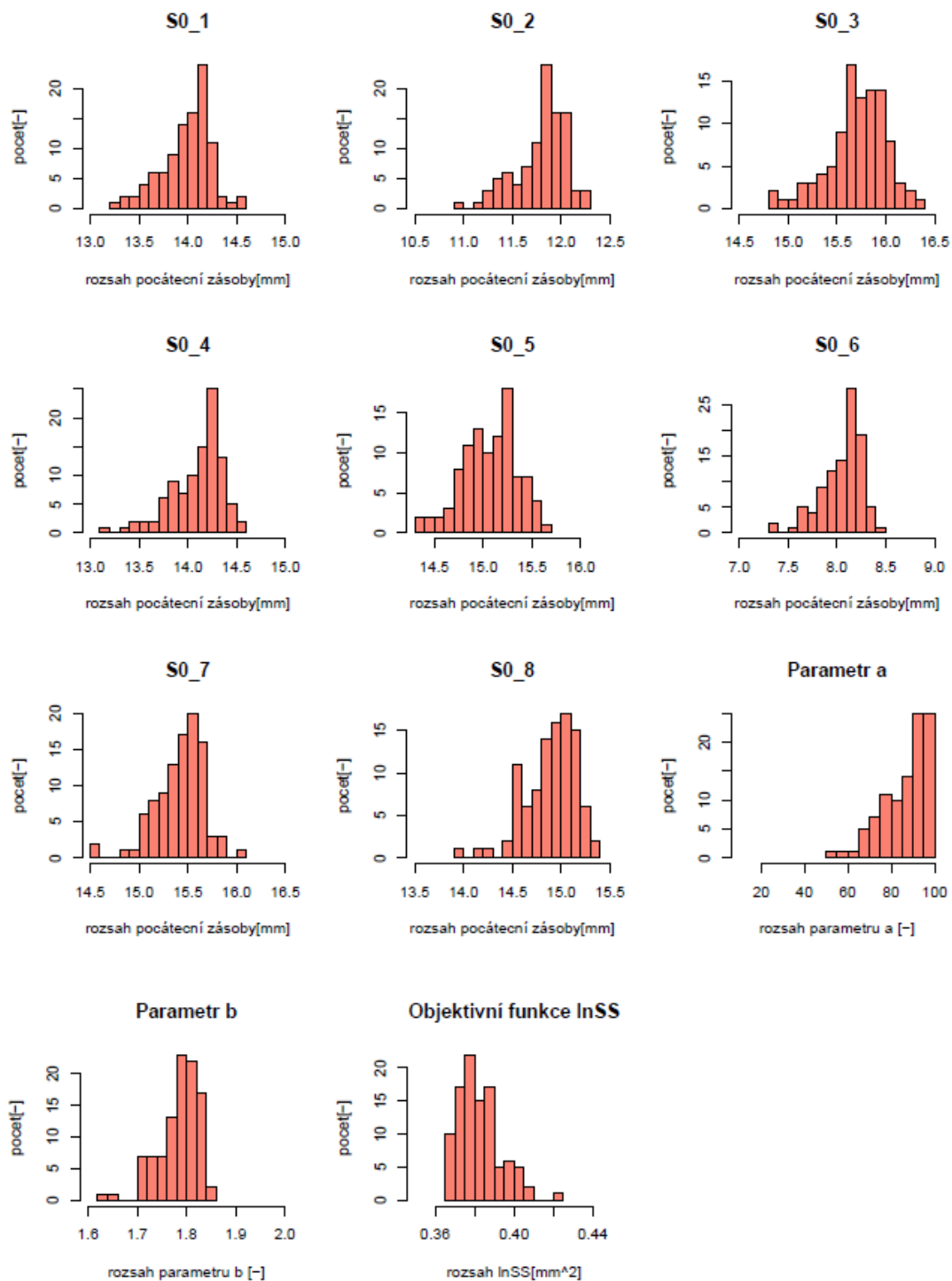
Obr. č. 75: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v sedmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Litavy



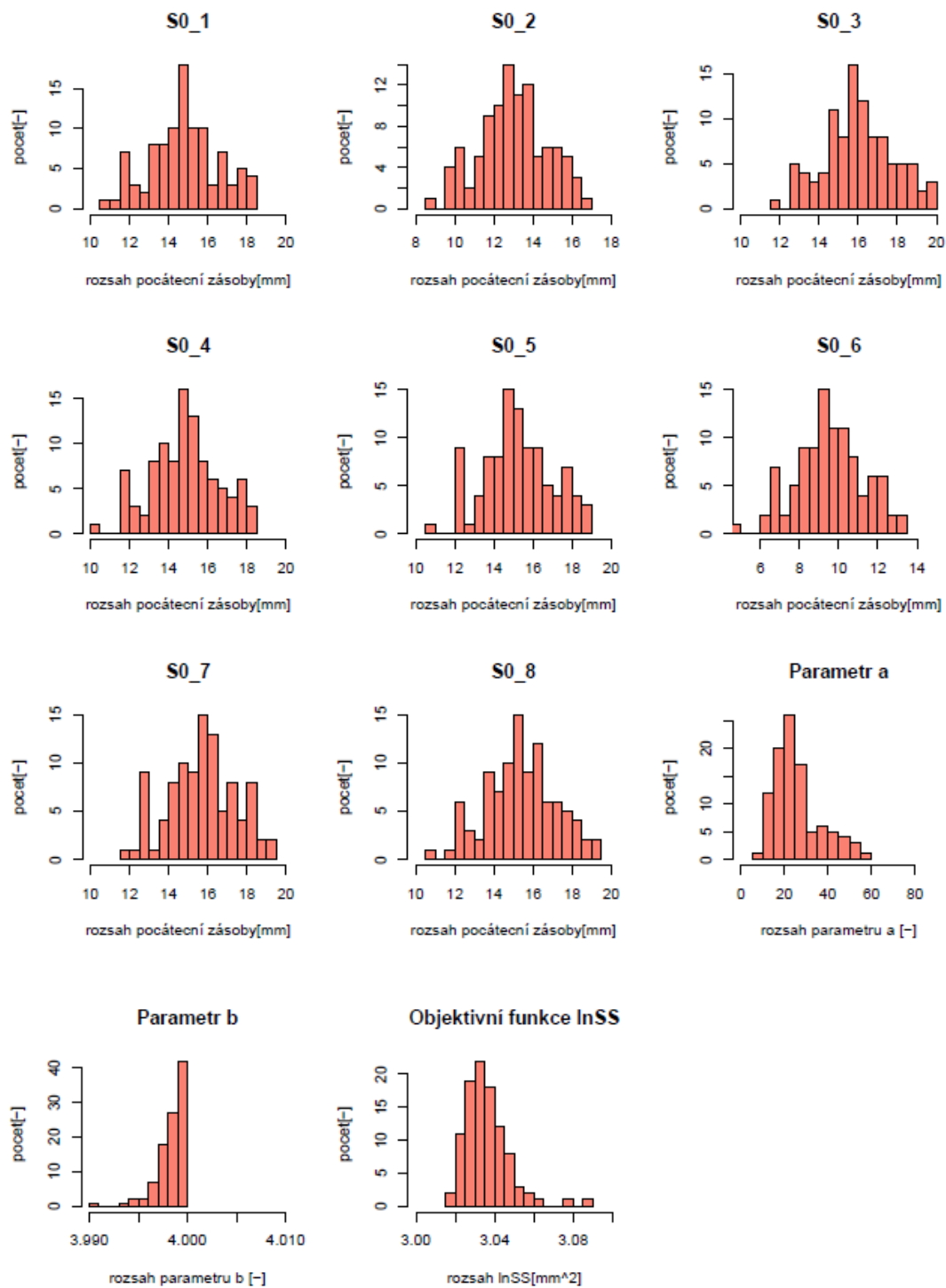
Obr. č. 76: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v sedmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Litavy



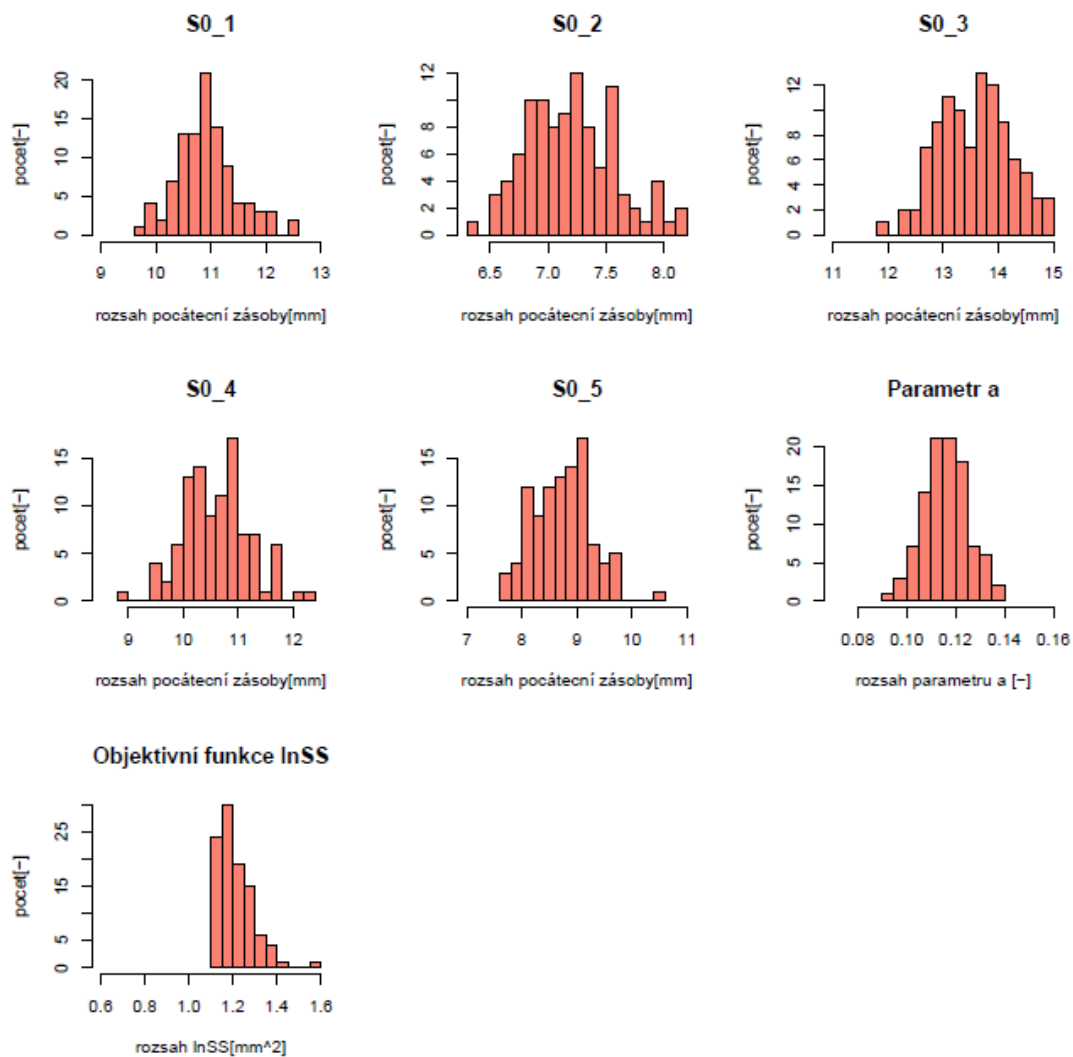
Obr. č. 77: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v osmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Malše



Obr. č. 78: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v osmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Malše

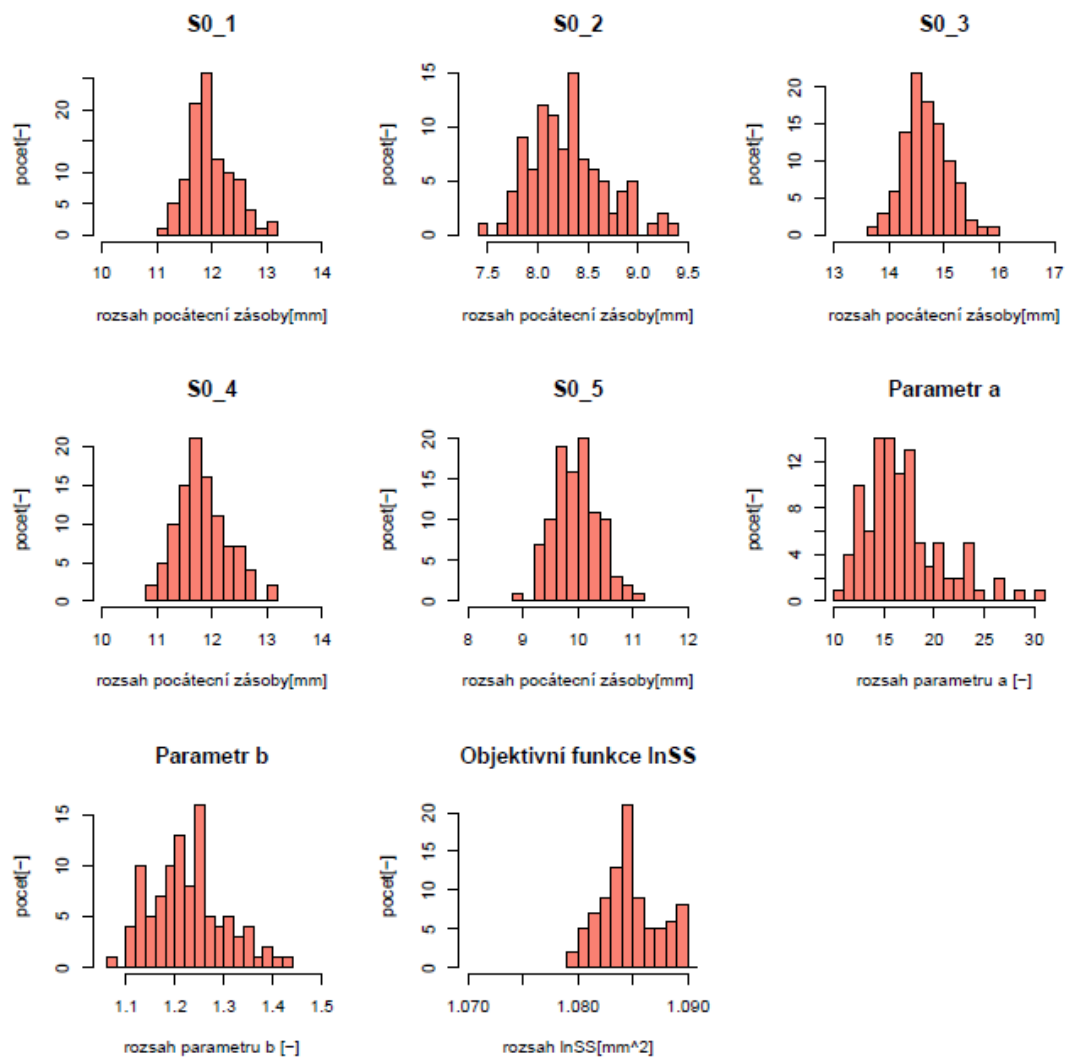


Obr. č. 79: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v osmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Malše

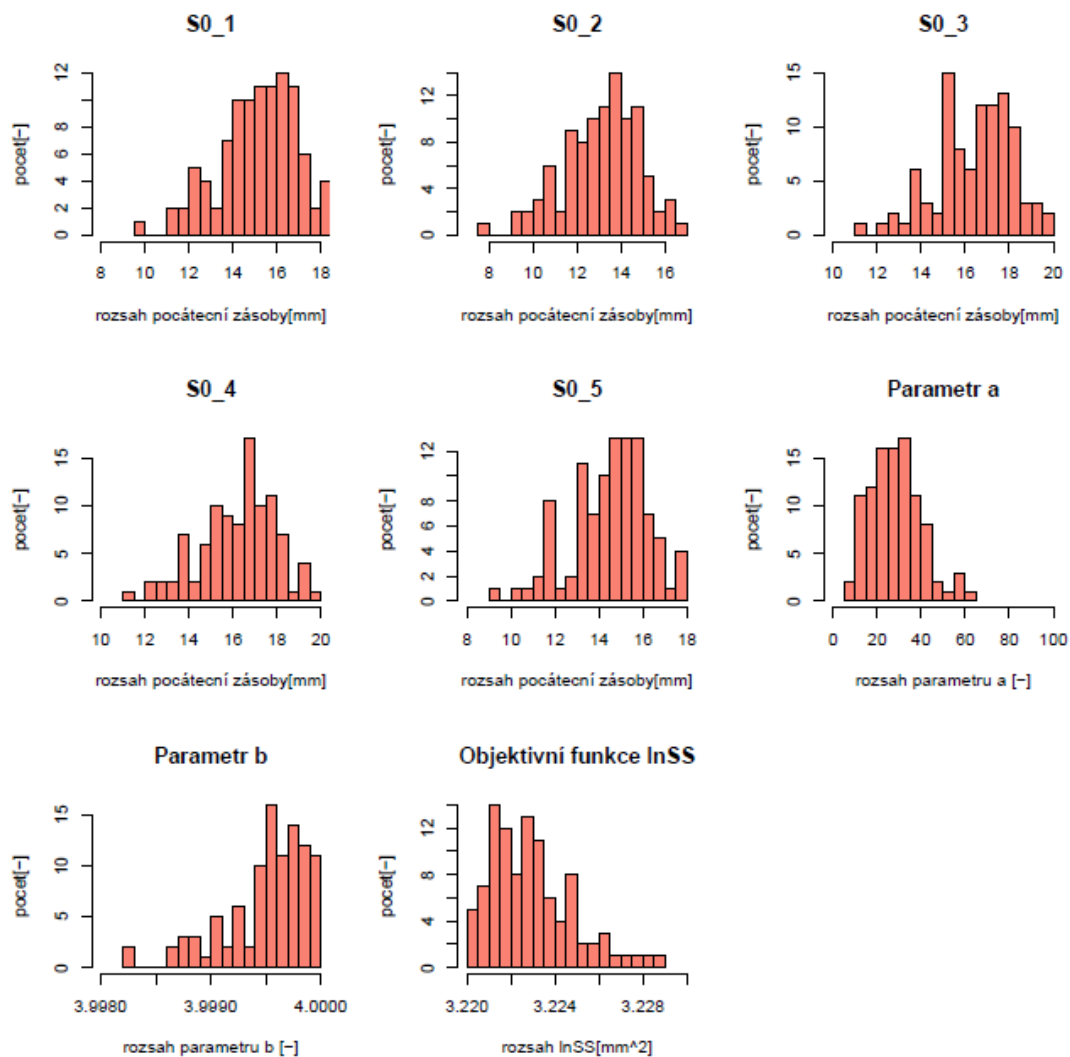


Obr. č. 80: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v pěti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Orlice

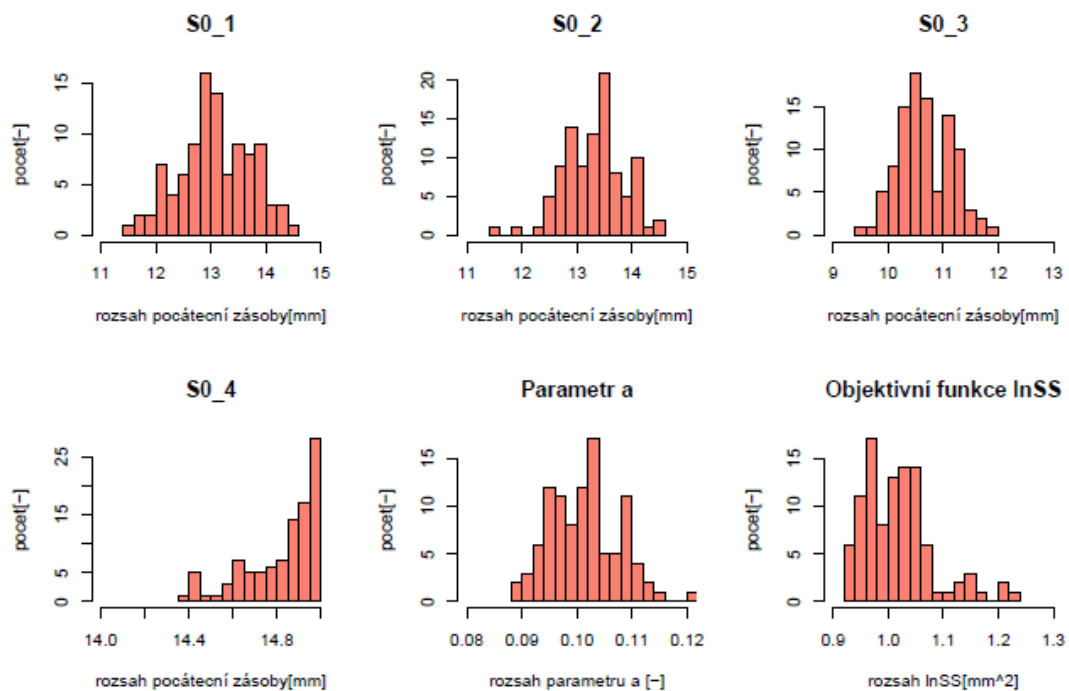




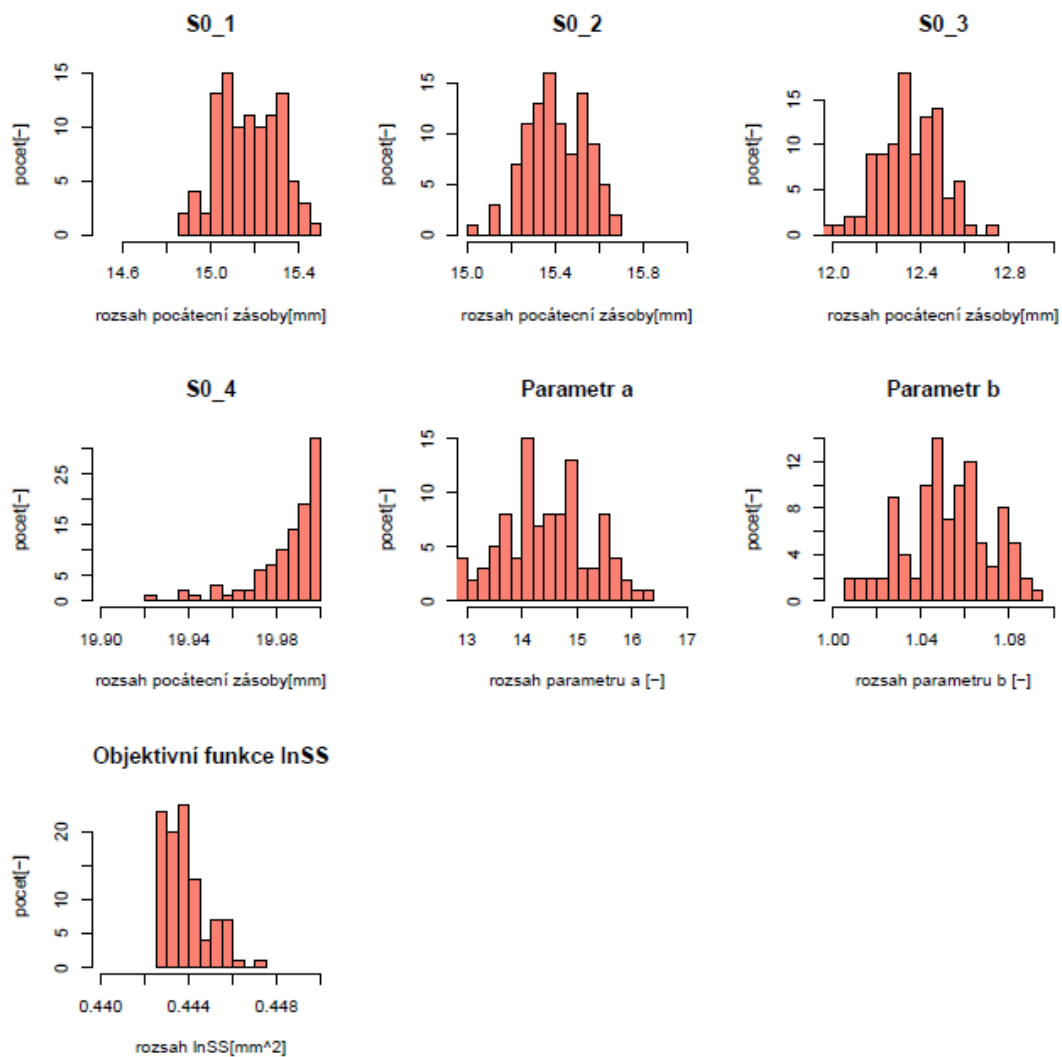
Obr. č. 81: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v pěti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Orlice



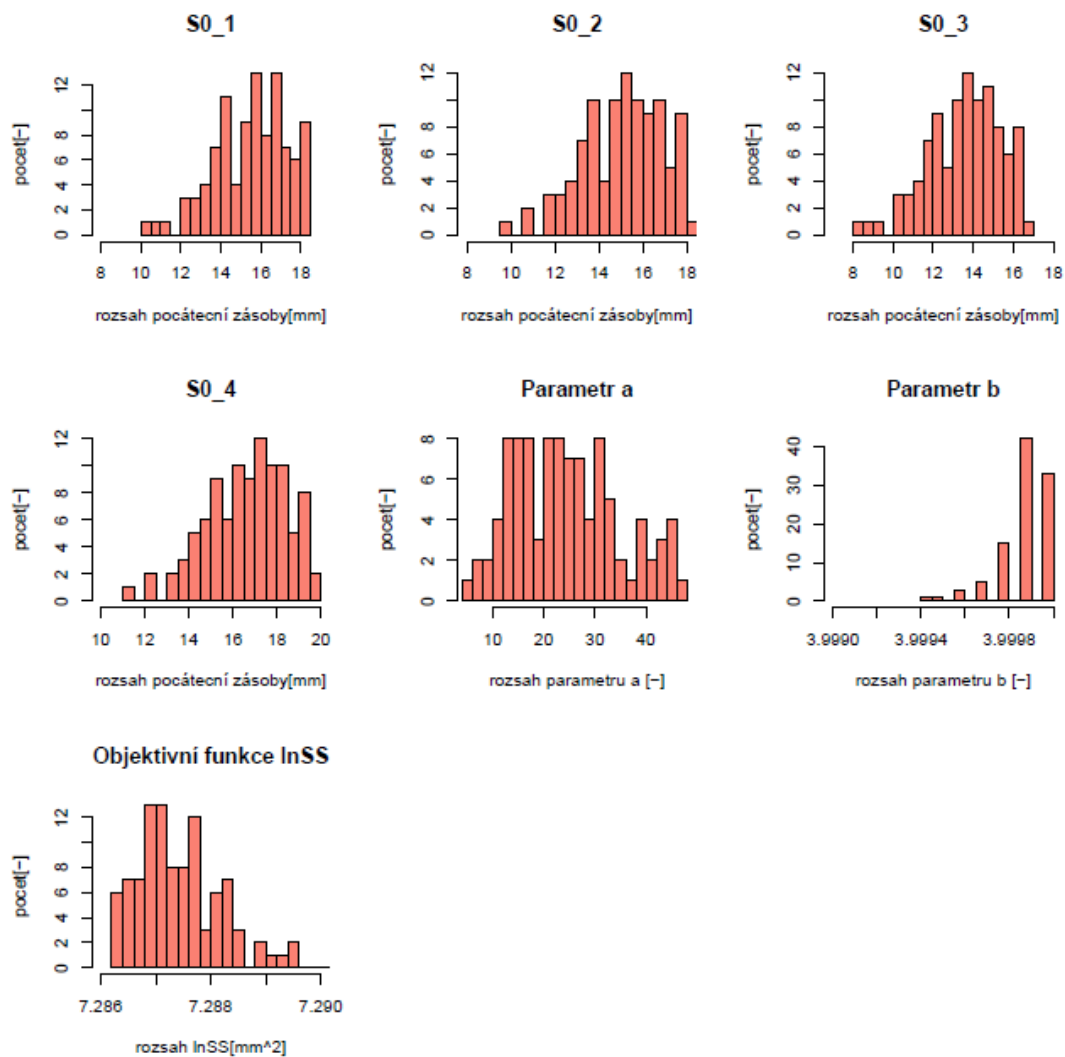
Obr. č. 82: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v pěti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Orlice



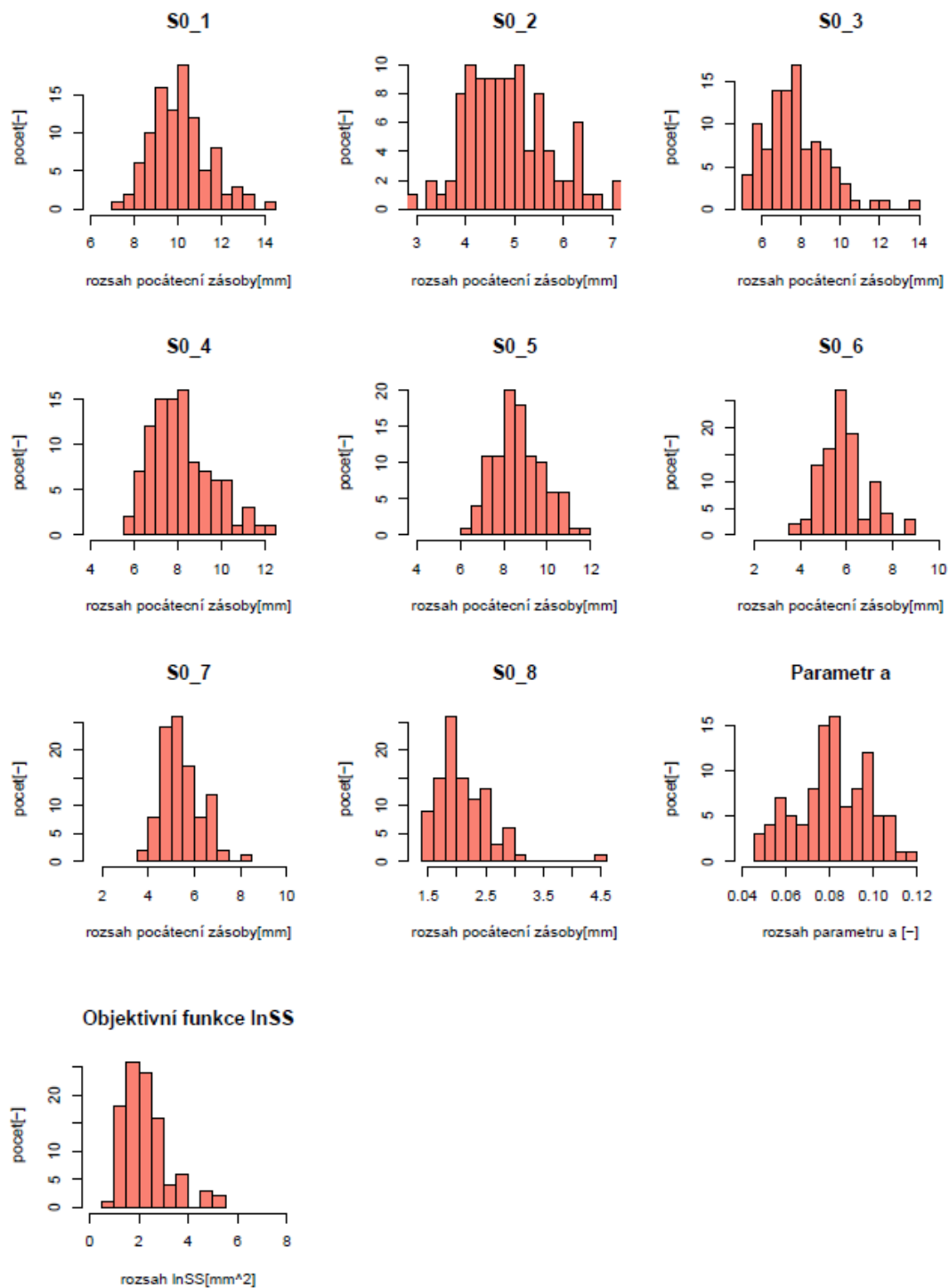
Obr. č. 83: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby ve čtyřech vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Otavy



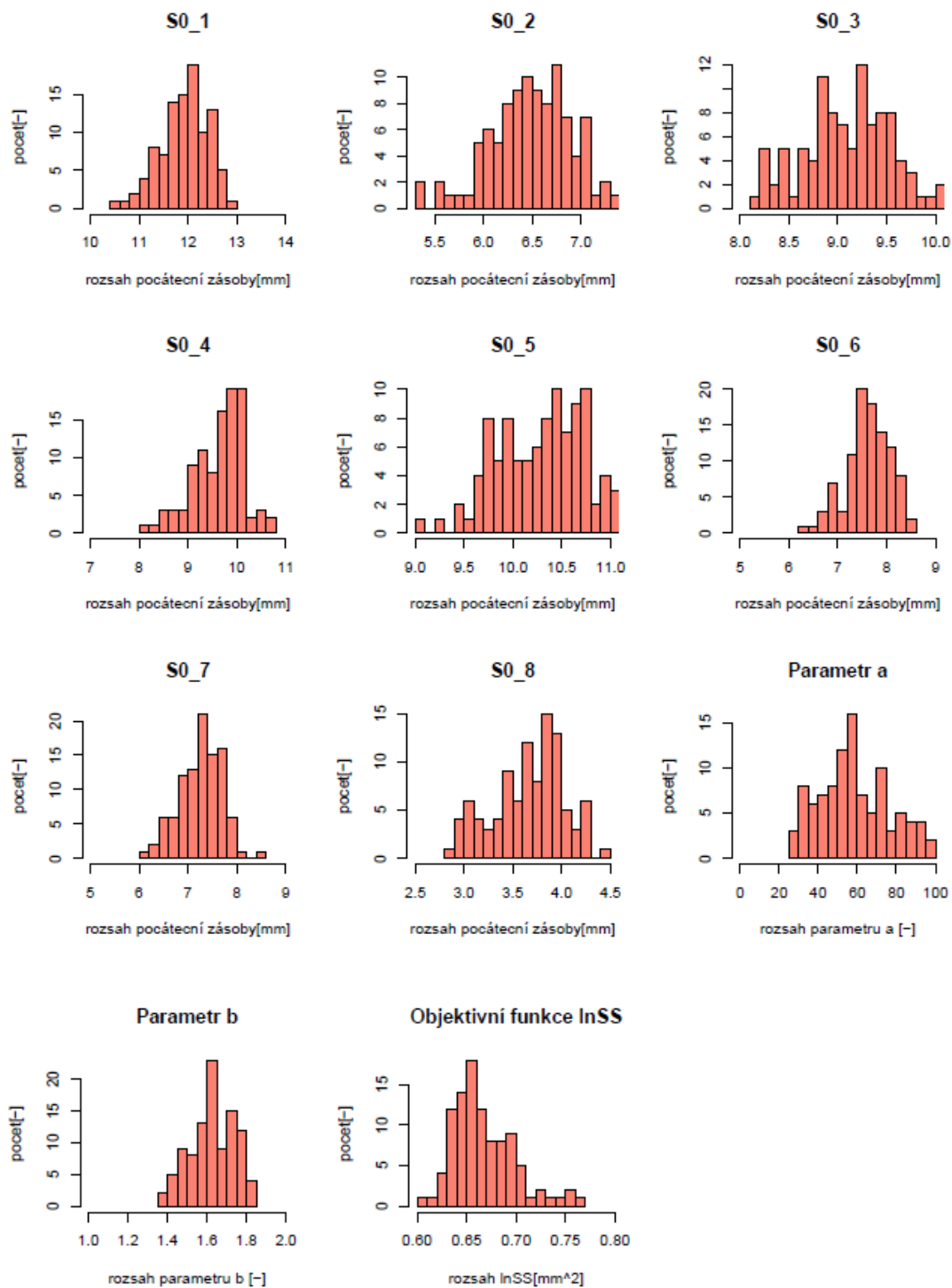
Obr. č. 84: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby ve čtyřech vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Otavy



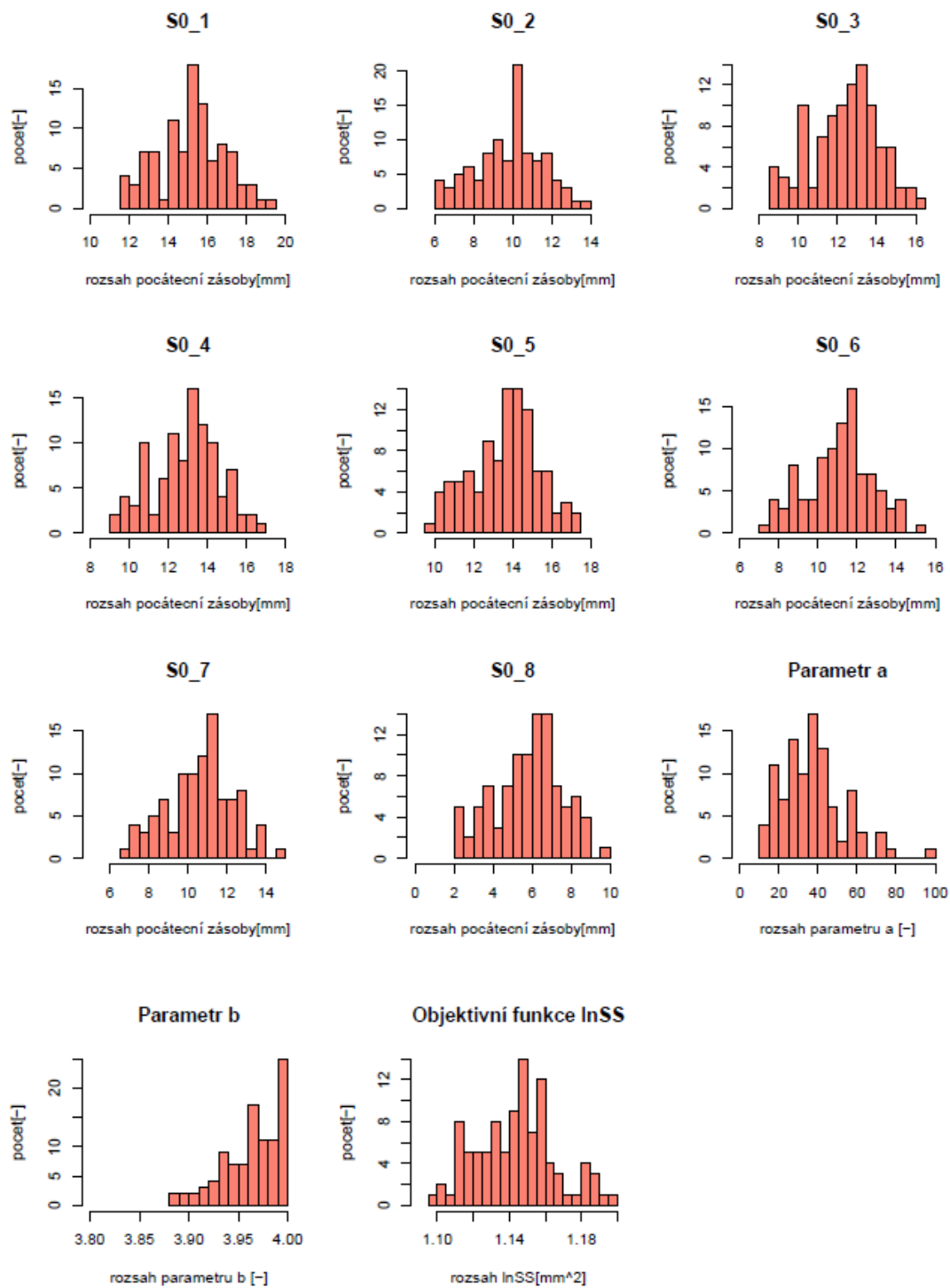
Obr. č. 85: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby ve čtyřech vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Otavy



Obr. č. 86: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v osmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Řečice

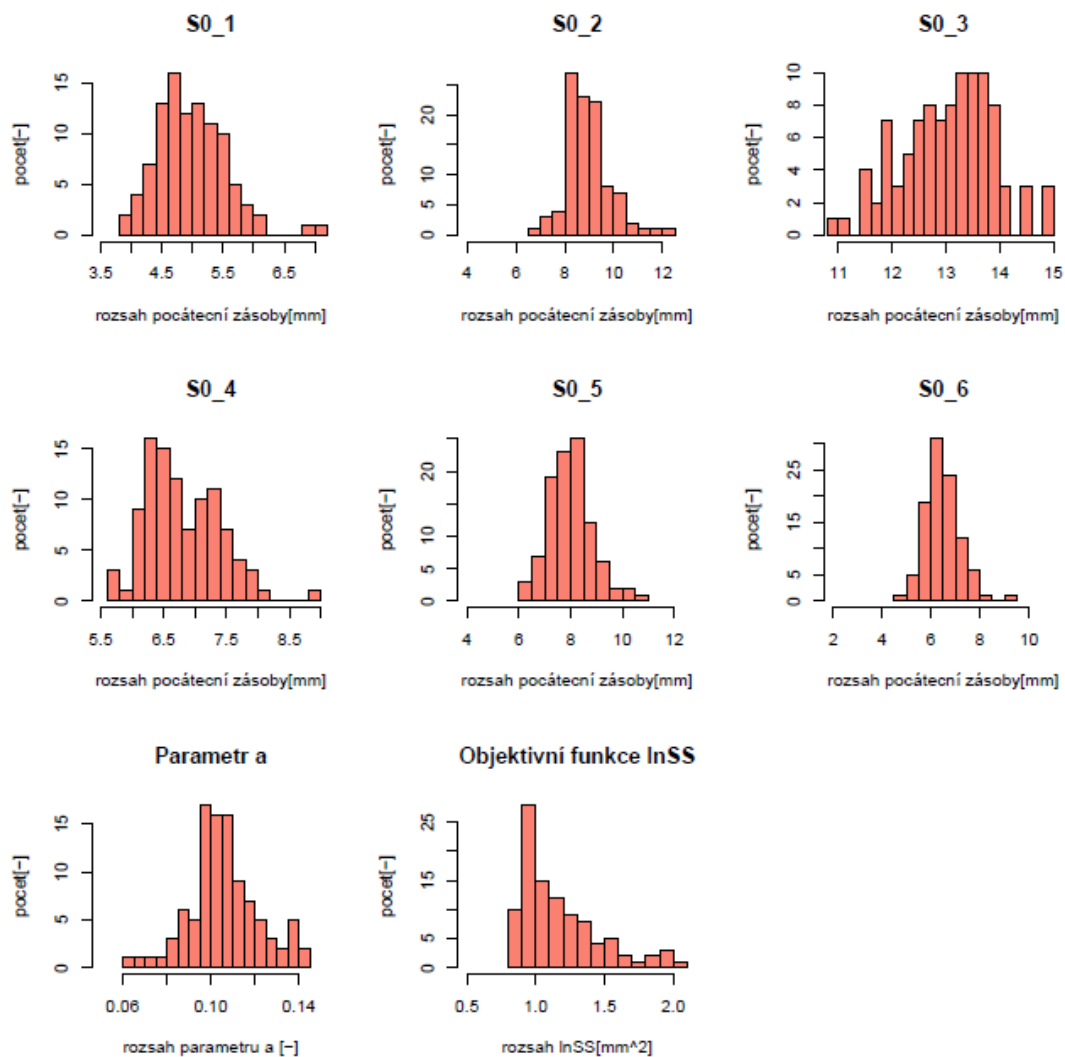


Obr. č. 87: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v osmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Řečice

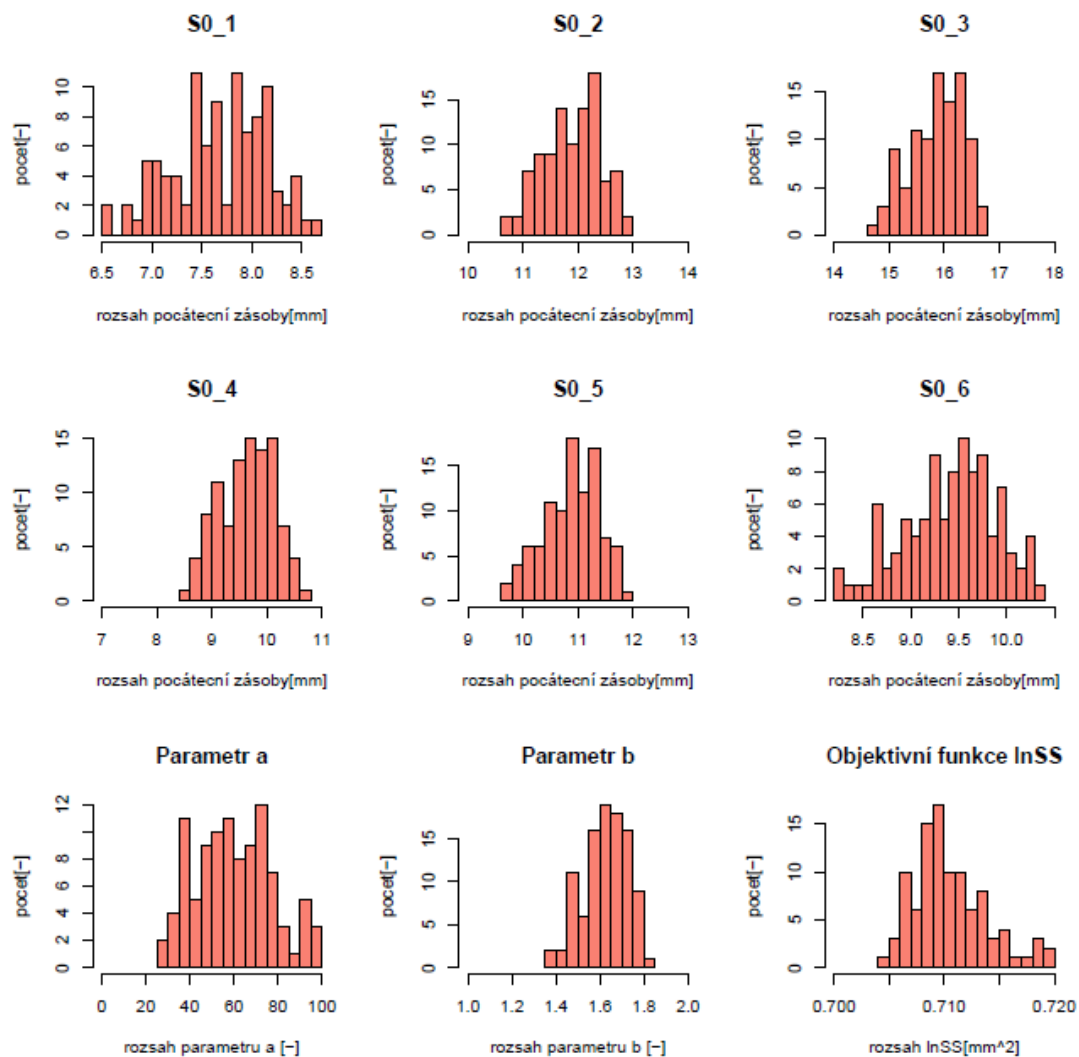


Obr. č. 88: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v osmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Řečice

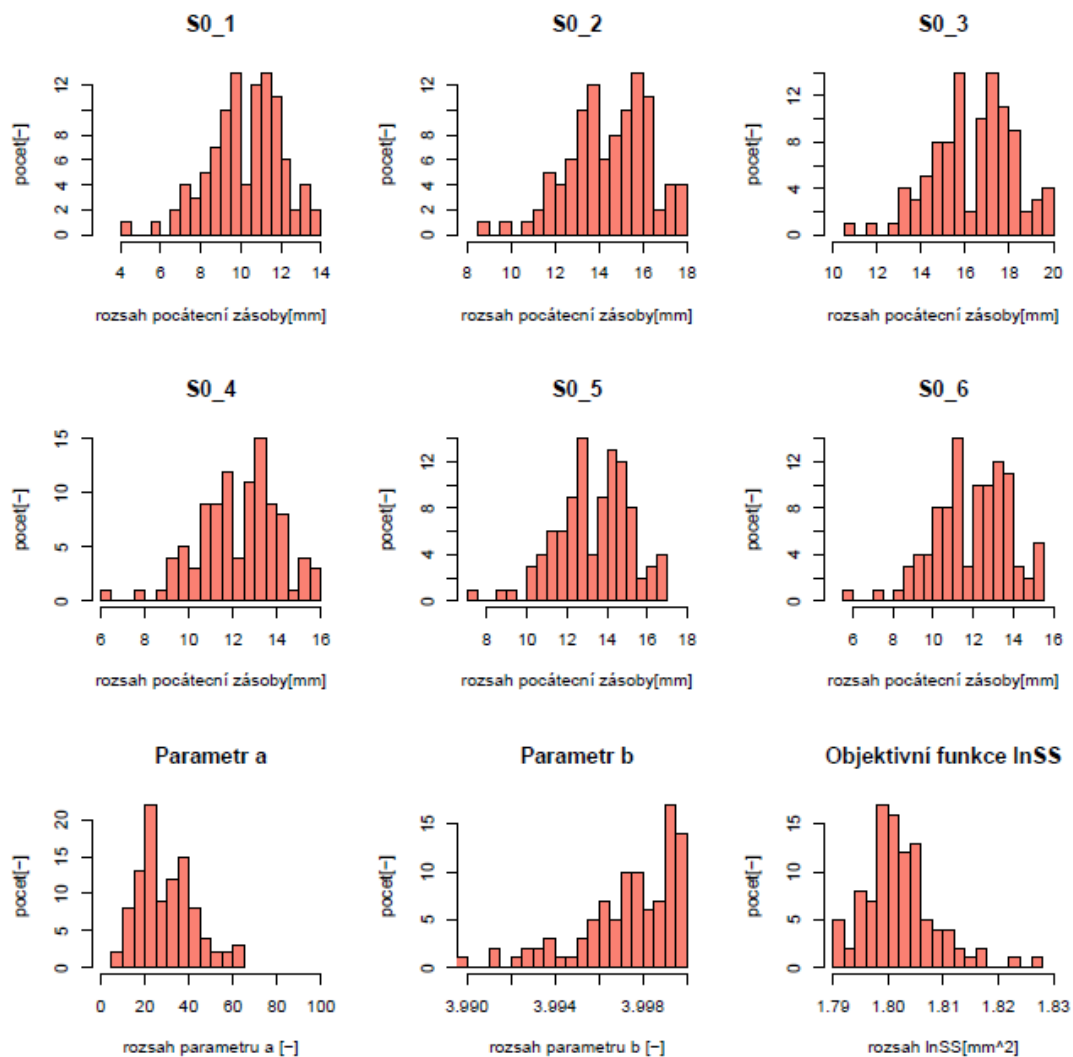




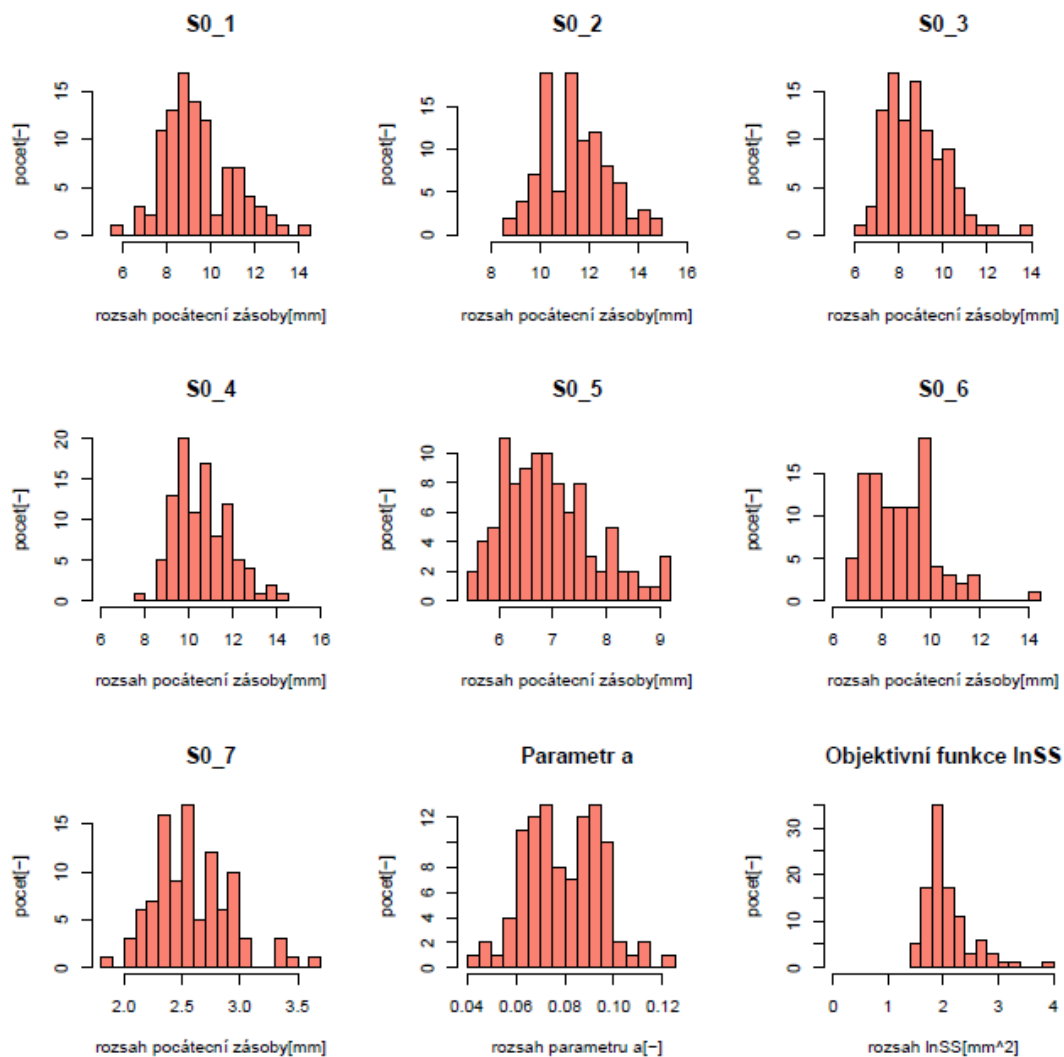
Obr. č. 89: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v šesti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Sázavy



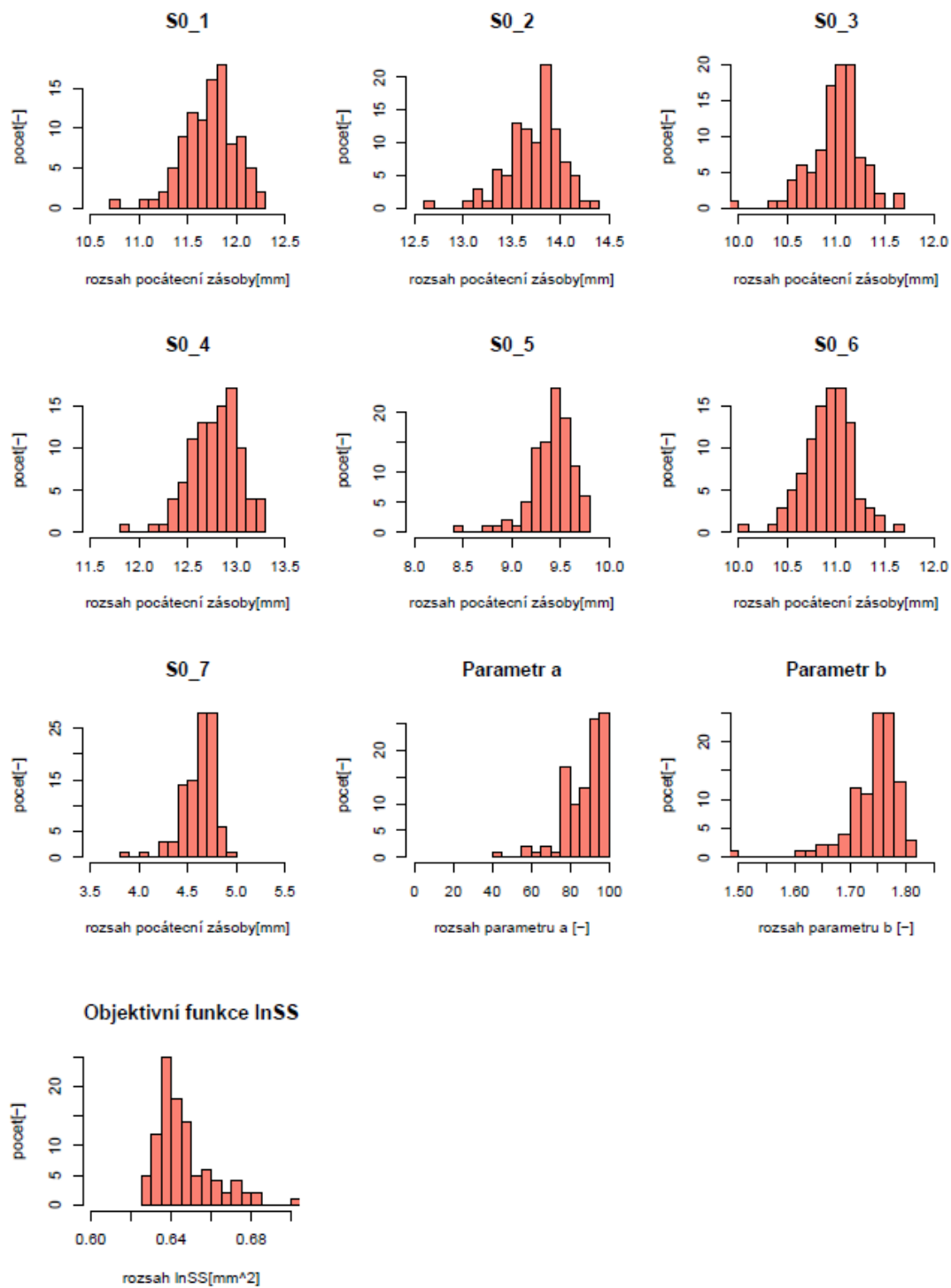
Obr. č. 90: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v šesti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Sázavy



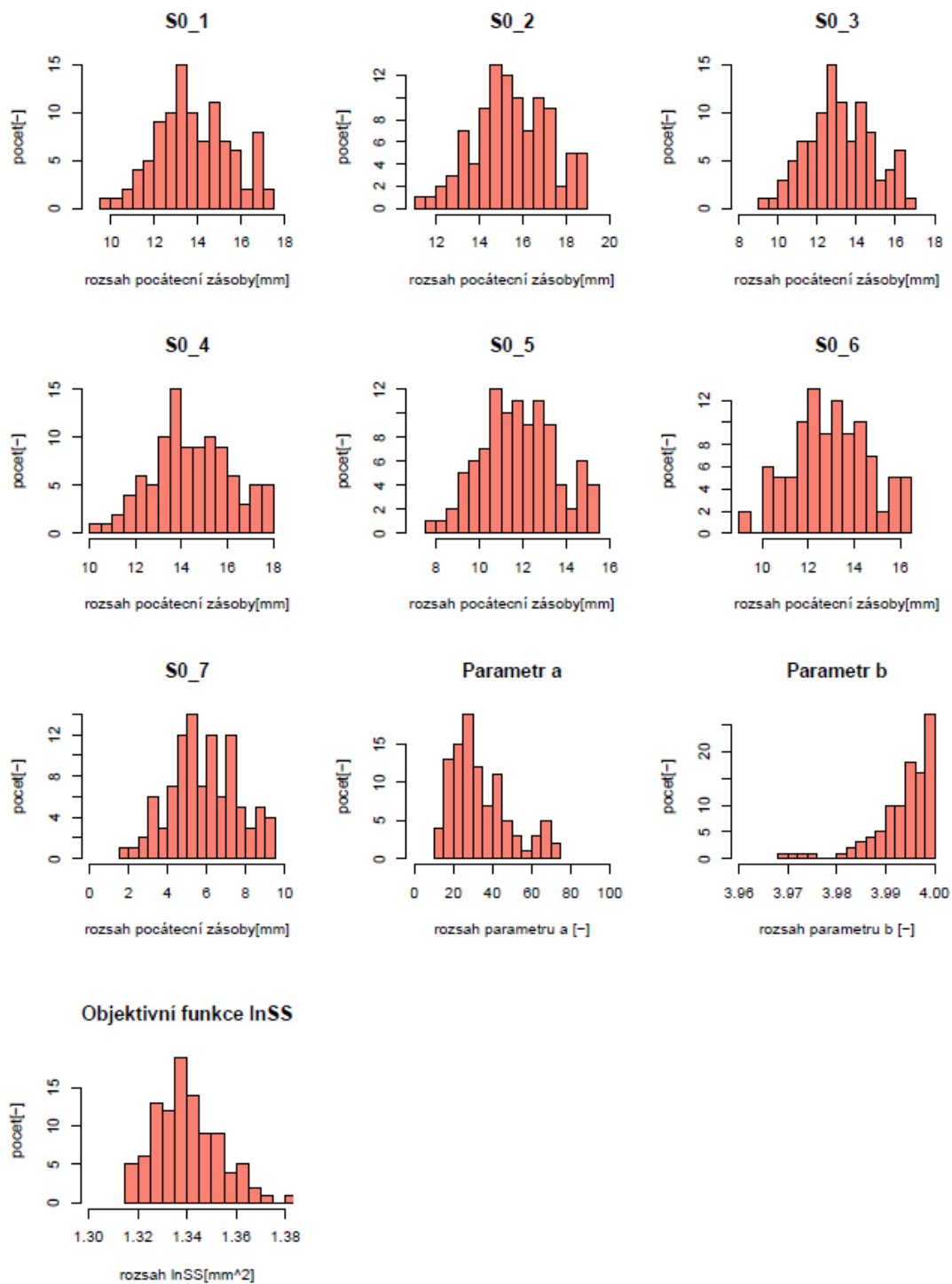
Obr. č. 91: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v šesti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Sázavy



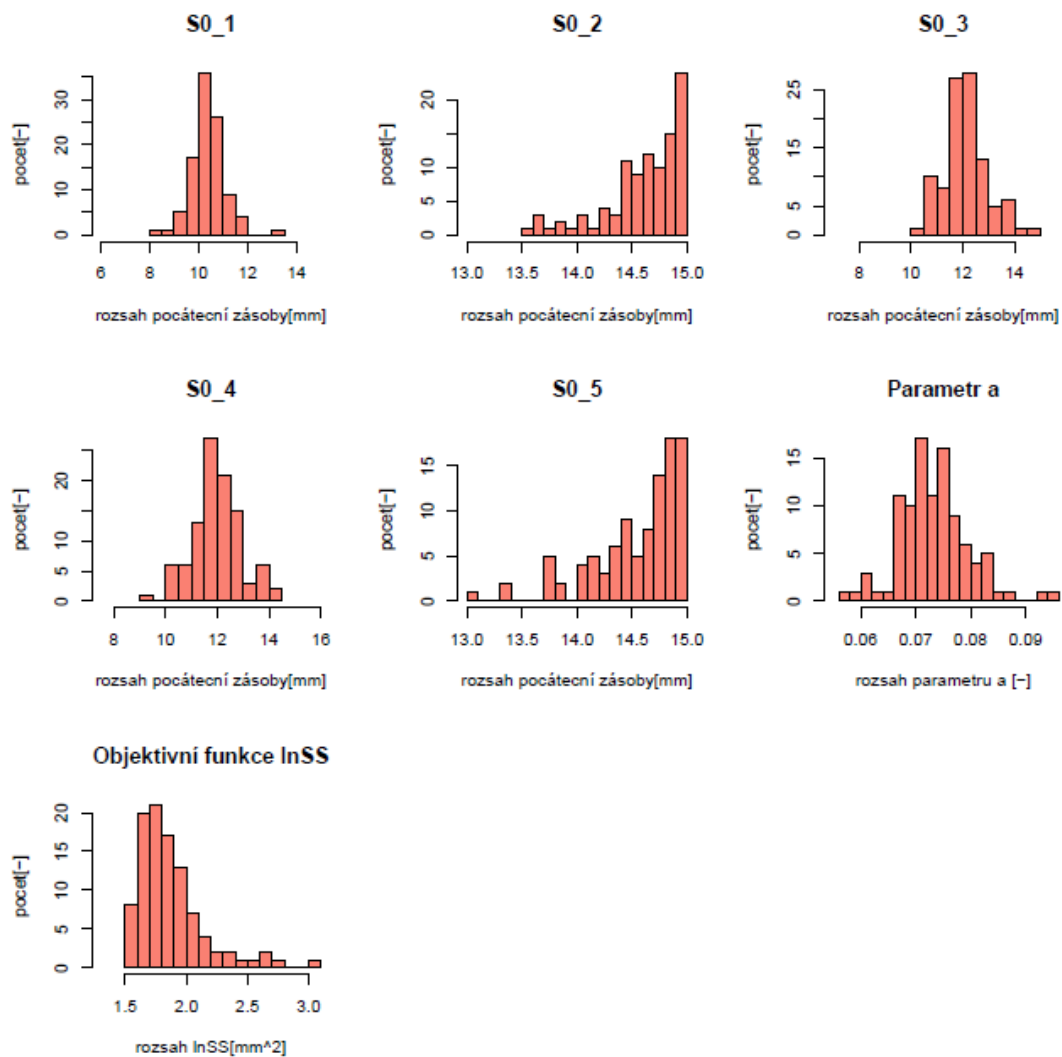
Obr. č. 92: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v sedmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Teplé



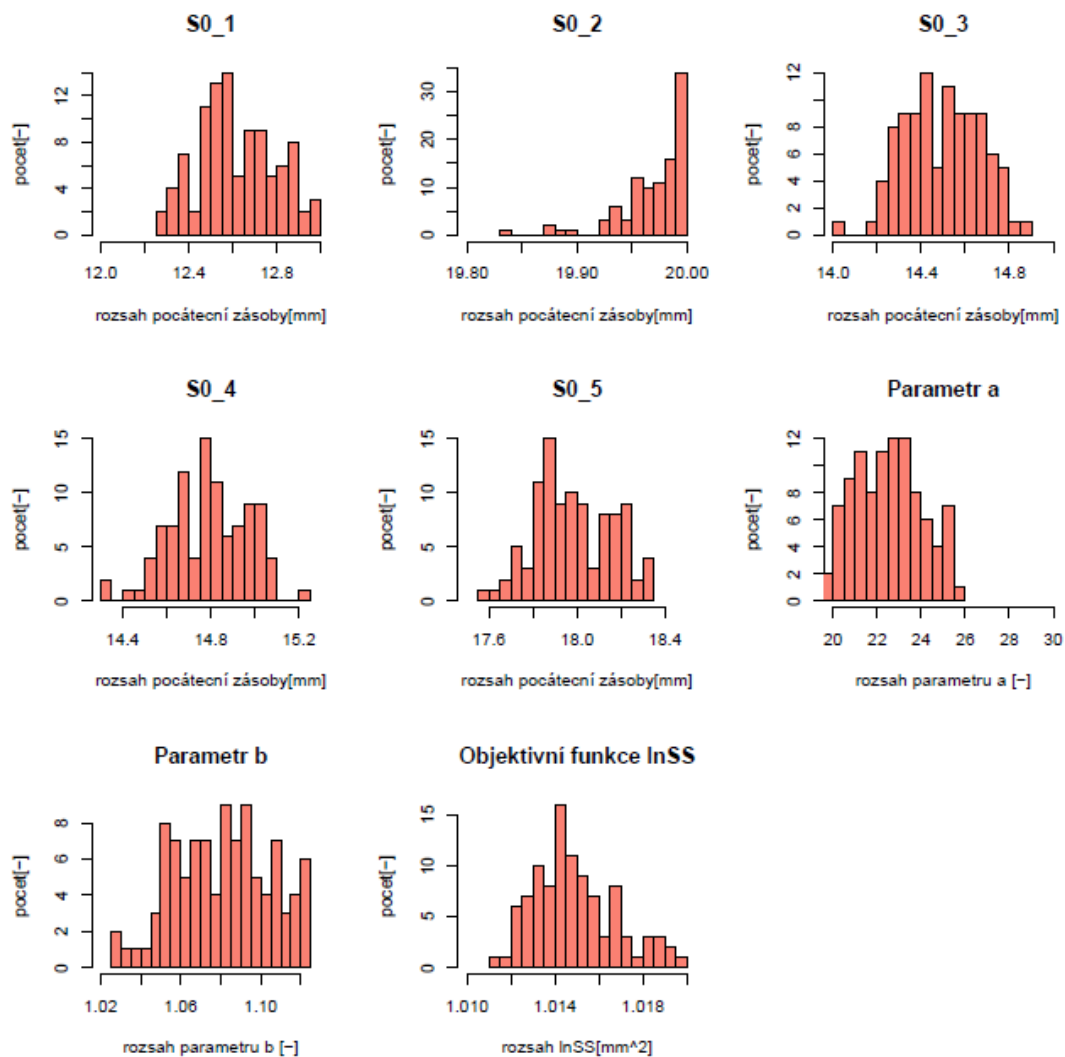
Obr. č. 93: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v sedmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Teplé



Obr. č. 94: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v sedmi vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Teplé

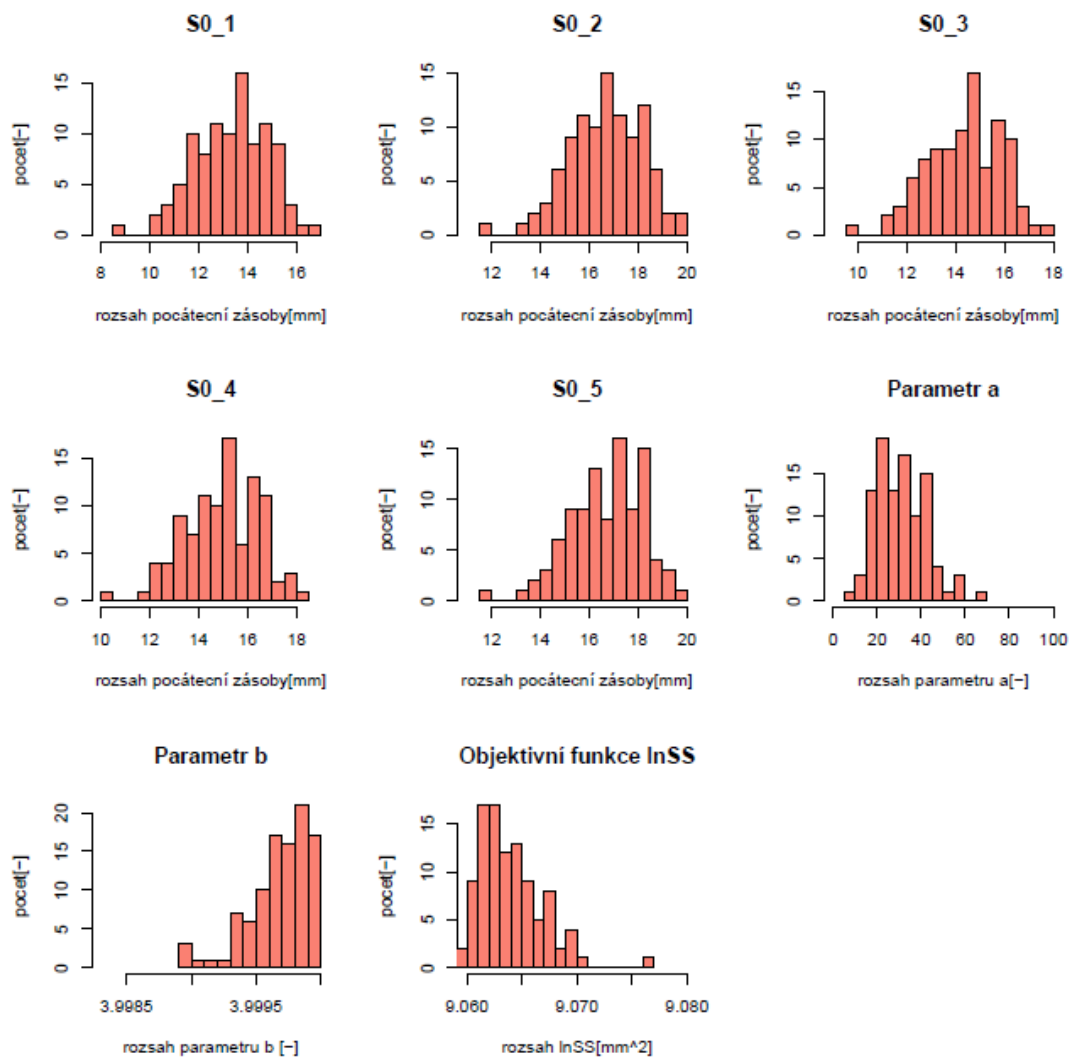


Obr. č. 95: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v pěti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Teplé Vltavy

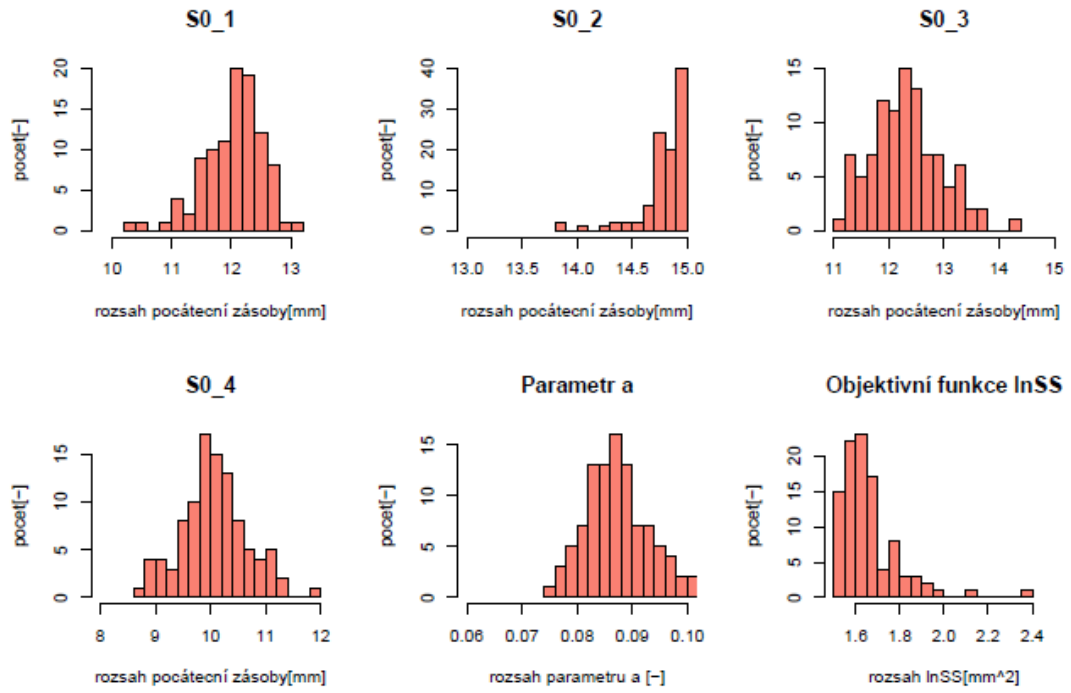


Obr. č. 96: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v pěti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Teplé Vltavy

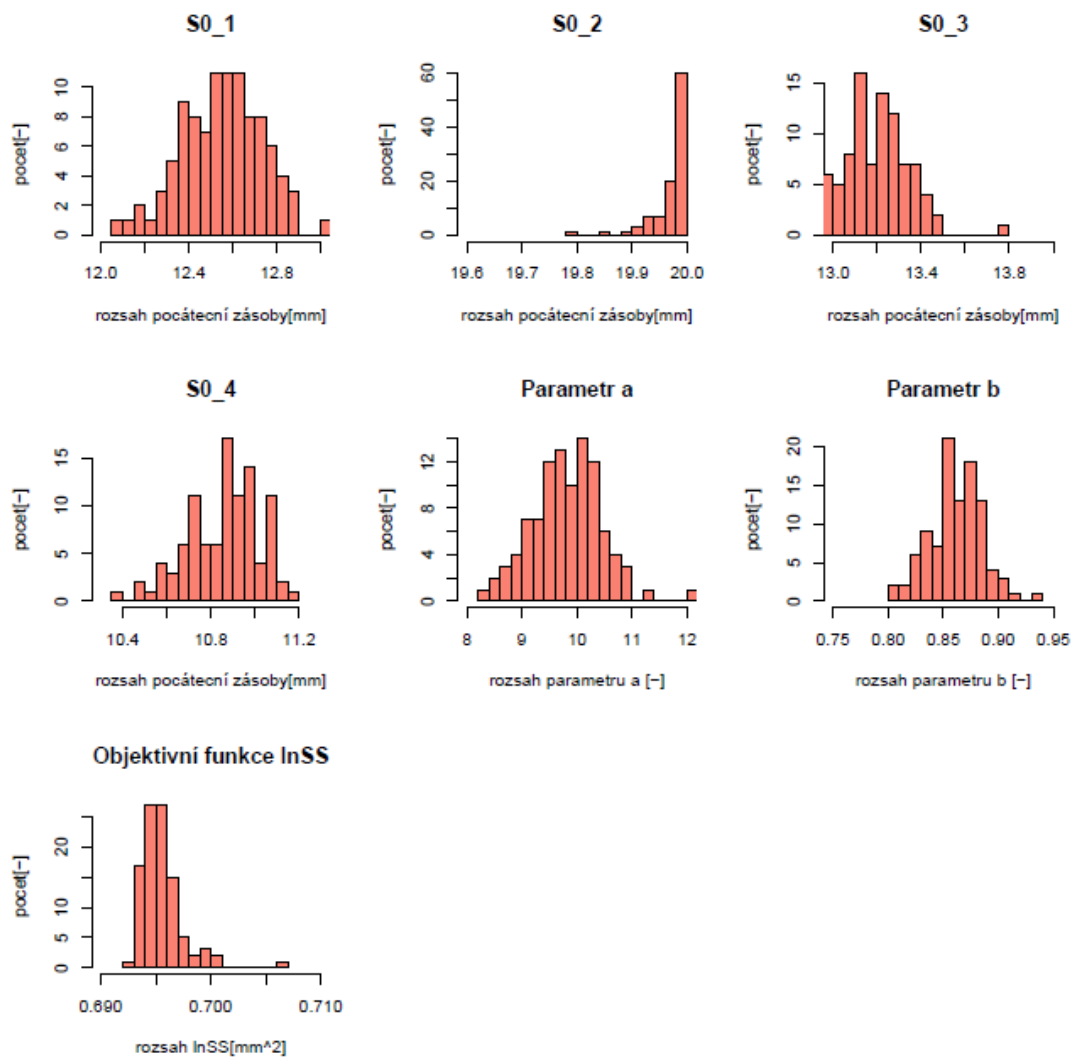




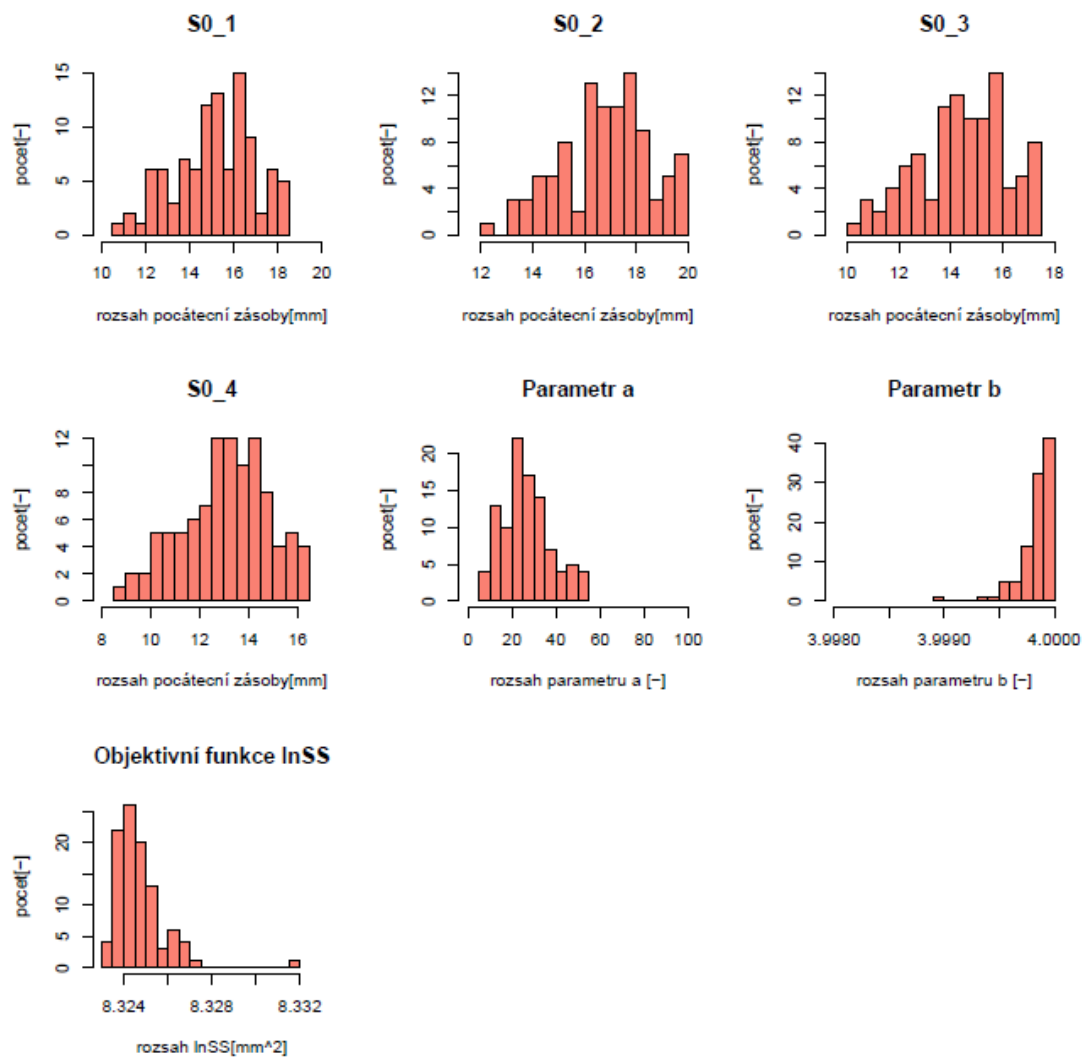
Obr. č. 97: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby v pěti vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Teplé Vltavy



Obr. č. 98: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby ve čtyřech vybraných větvích, hodnot parametru  $a$  a hodnot objektivní funkce  $lnSS$  pro model lineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Úpy



Obr. č. 99: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby ve čtyřech vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model nelineární nádrže aplikovaný na povodí řeky Úpy



Obr. č. 100: Histogramy vytvořené na základě hodnot počáteční zásoby ve čtyřech vybraných větvích, hodnot parametru  $a$ , hodnot parametru  $b$  a hodnot objektivní funkce  $\ln SS$  pro model exponenciální nádrže aplikovaný na povodí řeky Úpy