

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍHO
MODELOVÁNÍ

**Predikce odtoku pomocí lineárního
regresního modelu**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Diplomant: Milan Zadražil

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Havlíček Ph.D.

2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Milan Zadražil

Regionální environmentální správa

Název práce

Predikce odtoku pomocí lineárního regresního modelu

Název anglicky

Runoff prediction with linear regression model

Cíle práce

Cílem práce je vytvořit a otestovat hydrologický model pro predikci odtoku na zvoleném povodí .

Metodika

Literární rešerše zaměřená na hydrologické modelování.

Příprava dat.

Sestavení hydrologického modelu.

Použití modelu při predikci odtoku na zvoleném povodí

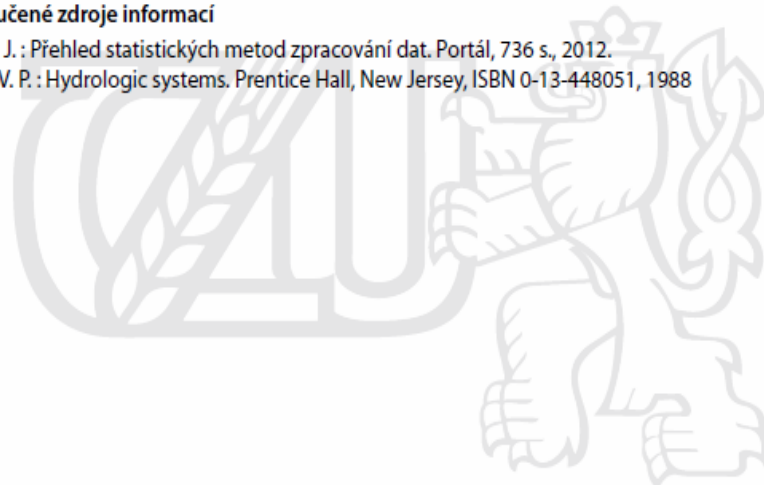
Doporučený rozsah práce

40-50 s.

Doporučené zdroje informací

HENDL J. : Přehled statistických metod zpracování dat. Portál, 736 s., 2012.

SINGH V. P. : Hydrologic systems. Prentice Hall, New Jersey, ISBN 0-13-448051, 1988



Předběžný termín obhajoby

2015/06 (červen)

Vedoucí práce

Ing. Vojtěch Havlíček, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 30. 3. 2015

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 31. 3. 2015

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Děkan

V Praze dne 06. 04. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vojtěcha Havlíčka Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

V Sokolově 13. 4. 2015

.....

Zadrazil Milan

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Vojtěchu Havlíčkovi Ph.D. za odborné konzultace, náměty, trpělivost a vstřícnost při vedení této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Tanajewskému z vodohospodářského dispečinku povodí Ohře za poskytnutá data a cenné rady. Poděkování patří i mé rodině za podporu a toleranci.

Abstrakt: Diplomová práce je zaměřena na predikci odtoků pomocí matematických modelů založených na metodě lineární regrese, které jsou vytvořeny v programovacím jazyku R. V této práci bylo popsáno celkem šest předpovědních modelů, přičemž první simuloval odtok pouze na základě denních srážkových úhrnů a druhý model počítal na vstupu s daty předchozího srážkového indexu API. Další tři modely určovaly odtok na základě srážek a předchozího odtoku. Hodnoty vstupního odtoku se od sebe lišily různou délkou kroku do historie (posunuty o jeden, dva nebo tři dny zpět). Posledním typem byl lineárně regresní model, který měl jako vstupy srážky a třídní historii odtoku. Délka předpovědi tohoto modelu byla jeden den. Všechny modely byly testovány na středně velkém povodí. Jednalo se o horní třetinu povodí Ohře s rozlohou 1851 km². Nejprve byla v programu provedena analýza vstupních dat a jejich rozdělení na kalibrační a validační soubory. Následovala kalibrace modelů a jejich hodnocení pomocí objektivních kritérií. Poté bylo provedeno ověření správnosti predikce odtoků – validace modelů, které bylo podrobeno opět hodnotícím kritériím. Z výsledků vyplynulo, že modely, které zahrnují do vstupních dat předchozí odtoky, poskytovaly velmi dobré výsledky pro jednodenní predikce.

Klíčová slova: srážko-odtokový proces, předchozí srážkový index, Nash-Sutcliffe koeficient účinnosti

Abstract: This thesis is focused on the prediction of runoff using mathematical models based on linear regression methods, which are created in the programming language R. In this work were described six forecasting models, the first one has simulated runoff only on the base of daily precipitation and the second model has counted the input data prior Precipitation Index API. The other three models determined runoff based on rainfall and runoff of the prior. The values of the input runoff differed from the others by different length step into history (shifted by one, two or three days ago). The last type was a linear regression model, which used for inputs rainfalls and a three-day history of runoff. The length of the prediction of this model was just one day. All models were tested at a medium sized river basin. It was the upper third of the Ohře river with an basin area of 1851 km². First of all, the program carried out the analysis of input data and their division into calibration and validation sets. Later followed calibration of models and their evaluation using objective criteria. Then verification of accuracy of prediction of runoff - validation of models which have been subjected to re-evaluation criteria. The results showed that the models, which included into input data prior runoffs, provided very good results for the one-day prediction.

Key words: runoff process , Antecedent Precipitation Index, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient

Obsah

1. ÚVOD.....	9
1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	9
1.2 CÍLE PRÁCE.....	9
1.3 STRUKTURA PRÁCE.....	10
2. MODELOVÁNÍ SRÁŽKO – ODTOKOVÝCH PROCESŮ.....	11
2.1 HYDROLOGIE	11
2.2 SRÁŽKO – ODTOKOVÝ PROCES	12
2.2.1 Odtok.....	12
2.2.2 Srážky	15
2.3 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ.....	16
2.3.1 Struktury modelů.....	18
2.3.2 Rozdělení modelů	18
3. METODIKA	21
3.1 VSTUPNÍ DATA.....	22
3.1.1 Charakteristika zvoleného povodí.....	22
3.1.2 Příprava dat	25
3.1.3 Stanovení indexu API	26
3.2 MODEL LINEÁRNÍ REGRESE.....	27
3.3 PROGRAMOVACÍ JAZYK R.....	30
3.4 KALIBRACE A VALIDACE MODELU	31
3.5 KRITÉRIA KVALITY PŘEDPOVĚDI	33
4. VÝSLEDKY A DISKUSE	36
5. ZÁVĚR.....	47
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
7. SEZNAM OBRÁZKŮ	52
8. PŘÍLOHY.....	53

1. ÚVOD

1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Voda je jednou ze základních podmínek vzniku života na Zemi. Pomocí vody je přemístováno obrovské množství látek a živin. Voda zároveň slouží jako regulátor teploty a má mnoho dalších jedinečných vlastností. Časovým a prostorovým oběhem vody na Zemi se zabývá hydrologie. Hydrologické jevy jako srážky, záplavy a sucha jsou složité procesy zahrnující mnoho biologických, fyzikálních a chemických faktorů (Hrádek et Kuřík, 2008). Některé zákonitosti ještě neznáme, a proto je považujeme za náhodně se vyskytující. Vzhledem ke složitosti hydrologického systému, je pro praktické využití nutné, rozvíjet spolehlivé matematické modely, využívající nejnovější poznatky a pomáhající předvídat především extrémní události (Wilderer, 2011).

1.2 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je, z naměřených srážek a odtoků, predikce odtoku na vybraném povodí. Nástrojem pro předpověď odtoků je šest hydrologických modelů dvou různých typů, které jsou naprogramovány a testovány v jazyku R. Srovnání úspěšnosti vypočtených průtoků, je provedeno pomocí několika kritérií, jejichž přehled je uveden v kapitole 3.5. Ve všech případech se jedná o lineárně regresní modely, lišící se délkou předpovědi a typy vstupů. První typ navrhovaných lineárně regresních modelů má pouze jeden vstupní parametr. Nezávislou proměnou pro první model jsou úhrny srážek. Regresorem druhého modelu jsou hodnoty API (*Antecedent Precipitation Index*) – odhad půdní vlhkosti na základě předchozích srážek (Kohler, 1951). Součástí stanovení indexu API bude i nalezení koeficientu, určující optimální počet dní počítaných zpět pro nasycení povodí z předchozí srážky. Další tři modely mají na vstupu dva parametry – úhrny srážek a předchozí měřené odtoky. Modely se liší tím, že počítají s odtokem s různou délkou kroku do minulosti (odtoky posunuté jeden, dva nebo tři dny do historie). Poslední model bere v úvahu kromě srážek všechny odtoky, které byly naměřeny tři dny zpět, celkem tedy čtyři vstupní parametry. V diplomové práci byla použita měřená data, poskytnuta vodohospodářským dispečinkem Povodí Ohře s.p. Jedná se o soubor naměřených

dat, představující úhrny denních srážek a průměrné denní průtoky, za posledních více než 10 let, pro uzavírací profil stanice Citice.

1.3 STRUKTURA PRÁCE

Práce je rozdělena na pět částí. Po úvodu je v druhé části, za pomoci citované literatury, snahou připomenout definice základních hydrologických pojmů jako je odtok, jeho rozdělení a ovlivňující faktory, srážka a problematika stanovení efektivní srážky, infiltrace, evapotranspirace a intercepce. Následuje krátký rozbor problematiky půdní vlhkosti, nasycenosti povodí, předchozích vláhových podmínek PVP a definice odtokového součinitele. Dalším bodem je obecný popis matematického modelování, struktury modelů a přehledy rozdělení používaných modelů.

V třetí části, věnující se metodice práce, jsou popsána vstupní data. Nejprve je pozornost zaměřena na povodí Ohře – základní charakteristiky vodního toku a zájmového subpovodí. Jsou zmíněny důvody volby uzavíracího profilu stanice Citice. Další část se věnuje statistickým metodám popisu vstupních dat (explorační datové analýze), grafickému vyhodnocení a úpravě dat před zpracováním. Součástí je i definování empiricky založené metody předchozí srážky – indexu API, který je vstupní veličinou pro druhý model. Dále jsou zde definovány základní matematické rovnice lineárně regresních modelů LRM, které vysvětlují primární vztahy a zákonitosti. Další podkapitola je vyhrazena programu R a postupu při sestavení konceptu, použitým funkcím a modelům. Závěrem metodické části je popis kalibrace a validace modelu, včetně sledovaných kritérií pro posouzení kvality předpovědi (průměrná odchylka ME, střední absolutní odchylka MAE, střední kvadratická odchylka MSE, odmocnina střední kvadratické odchylky RMSE a Nash – Sutcliffův koeficient účinnosti modelu NS).

Čtvrtá část obsahuje přehled a grafickou prezentaci dosažených výsledků. V diskusi je pak zamyšlení nad těmito výsledky, tedy porovnání všech modelů, úspěšnost předpovědi pomocí hydrologických modelů a úvaha nad možností jejich modifikace.

Obsahem kapitoly č. 5 je závěr, ve kterém je provedeno vyhodnocení stanovených cílů. Na konec diplomové práce je zařazen seznam použité literatury a přílohy, které obsahují mapy a celý koncept programu.

2. MODELOVÁNÍ SRÁŽKO – ODTOKOVÝCH PROCESŮ

Voda je na Zemi prostorově a také časově nerovnoměrně rozdělena. Je jedním z hlavních abiotických činitelů, rozhodujícím o výskytu živočichů a rostlin na určitém stanovišti. Dostupnost vody v neolitu rozhodovala i o tom, kde se naši předci usídlí, založí osady a začnou hospodařit. S trvalým osídlením a hospodařením pak souvisela potřeba ochrany před přebytkem vody (povodní), anebo jejím dlouhodobým nedostatkem (suchem). Tato potřeba přetrvává dodnes a se zvyšující se globální teplotou planety nabývá na významu.

2.1 HYDROLOGIE

Rozlišujeme hydrologii pevniny a oceánologii. V rámci hydrologie se zkoumá velký a malý koloběh vody. K malému koloběhu dochází nad oceánem, kdy se odpařená voda vrací zpět do oceánu, nebo nad pevninou, kdy se voda odpařená na určitém bezodtokovém území vrací v podobě srážek zpět na povrch. Velký koloběh pak tvoří pohyb vody mezi pevninou a oceány (Blažek, 2006). Jak již bylo uvedeno v úvodu, hydrologický proces je soubor mnoha chemických, fyzikálních a biologických dějů. Základní hydrologickou oblastí, u které se zkoumá odtokový proces, je povodí. Povodí ohraničuje rozvodnice. Rozvodnice je smyšlená čára v terénu, která vyznačuje geografickou hranici mezi jednotlivými povodími. Rozlišujeme rozvodnice orografické (povrchové vody) a hydrogeologické (podzemní vody). Rozvodnice povrchových vod se většinou nachází na vrcholcích nebo hřebenech okolního terénu. Na určení povodí podpovrchových vod je potřeba znát geologické složení půdních vrstev. U velkých povodí jsou velikosti orografických a hydrologických plošných rozměrů často srovnatelné, ale u malých povodí bývají velké rozdíly mezi hranicemi. Na povodí se může nahlížet také jako na fyzikální celek, který přijímá určitý vstup (srážky) a ten transformuje na výstup (odtok). Na soustředěný odtok v uzavíracím profilu povodí má rozhodující vliv hydrografická síť (Hrádek et Kuřík, 2002).

2.2 SRÁŽKO – ODTOKOVÝ PROCES

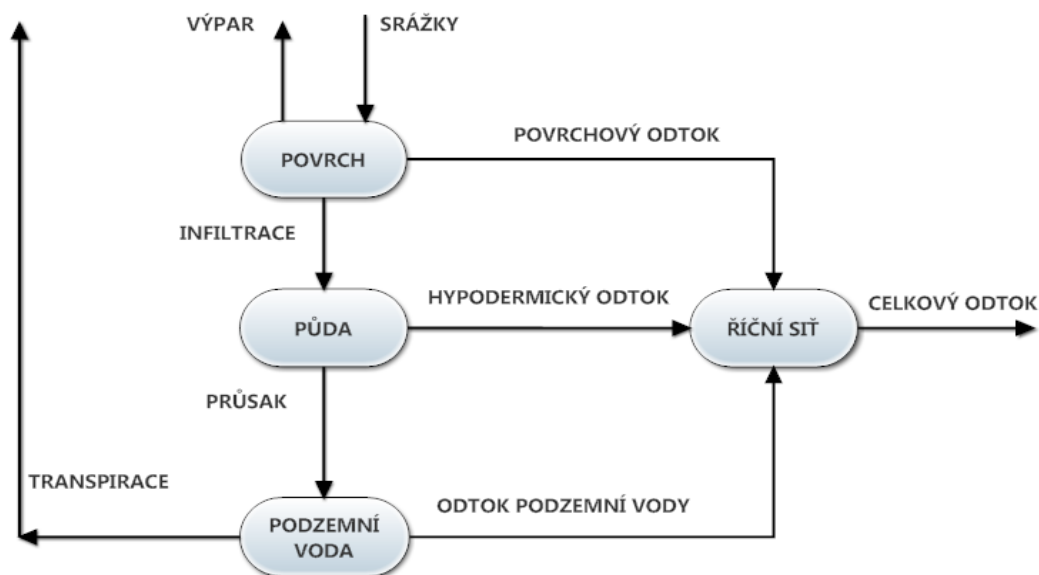
Voda z dopadajících srážek se do říčního koryta dostává třemi způsoby (Hrádek et Kuřík, 2002):

1. povrchovým odtokem
2. odtokem prosakující gravitační vody (hypodermický odtok)
3. odtokem podzemní vody

Součet odtoků povrchového a hypodermického označujeme jako odtok přímý, který vyvolá rychlou odezvu povodí na významnější srážku – průtokovou vlnu. Celkový odtok se skládá z odtoku přímého a odtoku podzemních vod, ovlivňující hlavní tok s určitým zpožděním. Rychlost odezvy je závislá na zdroji podzemní vody a charakteru půdního a horninového prostředí. Antropogenní činností jsou však tyto vazby silně pozměněny, dochází ke zrychlenému koloběhu vody a k narušení přirozených cyklů, které pak zpětně ovlivňují životní podmínky lidí (Blažek, 2006).

2.2.1 Odtok

Povrchový odtok má v závislosti na intenzitě deště a klimatických podmínkách několik fází a je součástí celkového odtoku, který je znázorněn na obrázku č. 1 (Dooge, 2003).

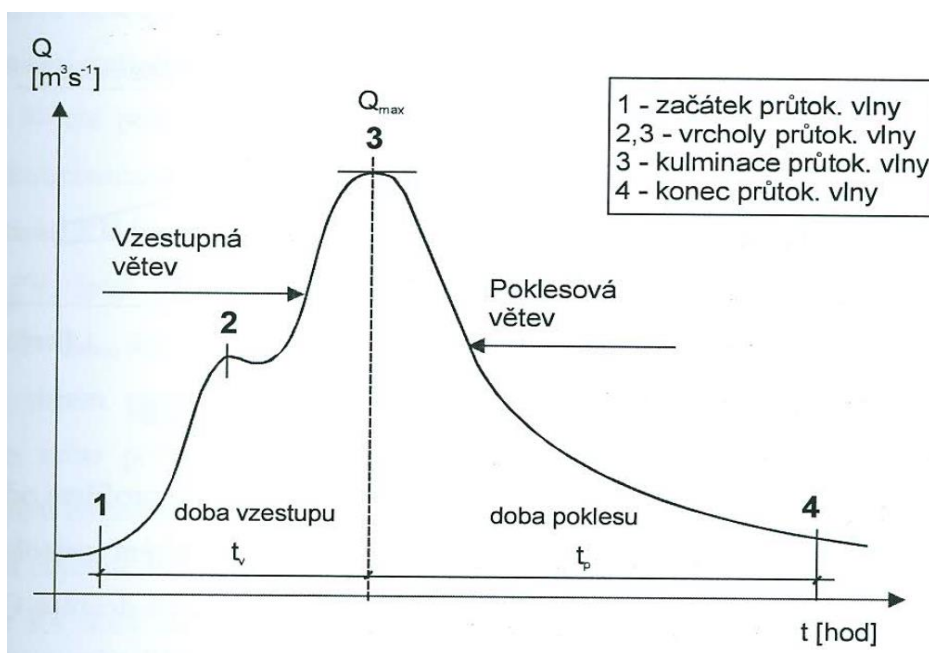


Obr. č. 1 Schéma celkového odtoku (převzato Dooge, 2003)

V první fázi při menší intenzitě deště k povrchovému odtoku ještě nedochází a voda je zcela zadržena v povodí. Nejprve probíhá proces infiltrace (nasycení půdy),

následuje intercepce (zachycení vody na vegetaci) a akumulace vody v povrchových depresích. Při větší intenzitě srážky, nebo po nasycení půdy a povrchových depresí, zůstává voda na povrchu a vzniká povrchový odtok. Voda odtéká ve směru největšího sklonu v tenké vrstvě (ronu) nebo v erozních rýhách, které svým spojením vytvoří vodní tok. Odtok prosakující gravitační vody může představovat významnou část přímého odtoku. Podíl gravitační vody v celkové vodní bilanci závisí na charakteru půdy, deště a uložení vodonosných horizontů. Hypodermický odtok představuje část infiltrovaných srážek, které nezvyšují půdní vlhkost, ale dostávají se do hlavního toku nekapilárními póry. Na poslední fázi soustředěného říčního odtoku se podílí i odtok podpovrchový, jenž je součtem odtoku hypodermického a podzemního.

Průtokovou vlnou nazýváme tu část odtoku, kdy vlivem deště, táním sněhu nebo umělým zásahem dojde k přechodnému zvýšení a následnému poklesu průtoku. Grafické znázornění závislosti průtoku na čase ukazuje hydrogram obrázek č. 2 (Hrádek et Kuřík, 2008).



Obr. č. 2 Hydrogram průtokové vlny (převzato Hrádek et Kuřík, 2008)

Průtoková vlna se skládá ze vzestupné větve, která končí kulminací. Poklesová větev kulminací začíná a končí okamžikem poklesu hodnoty průtoku na počáteční úroveň. Výtoková čára je úsek klesající větve průtokové vlny, kdy je průtok tvořen již výhradně dotací z podzemní vody. Výtoková čára se používá k předpovědi průtoků pro období bez dešťů, při řešení srážkoodtokových vztahů nebo slouží ke zjišťování

vodních zásob v říční síti. Pokud dojde k vybřežení vody z koryta, mluvíme o povodni. Ta může být způsobena náhlým zvětšením průtoku (déšť, sníh) nebo dočasným zmenšením průtočnosti koryta toku (led, eroze). Při povodni dochází k zaplavení přilehlého území. Tento jev nazýváme inundace území. Podle (Starý, 2005) se průtočný profil skládá z vlastního řečiště a přilehlé inundace.

Vznik povodní může způsobit celá řada faktorů. Vzájemná interakce zvyšuje pravděpodobnost výskytu povodně. Nejčastěji jsou faktory děleny podle (Hrádek et Kuřík, 2008) do tří skupin:

- faktory klimatické
- faktory geografické a vegetační
- faktory antropogenní

Klimatické faktor – mezi klimatické faktory patří především srážky a teplota. Srážky mohou mít různou podobu a intenzitu. Z hlediska povodní nás zajímají hlavně srážky s vysokou intenzitou – přívalový déšť. Druhým významným klimatickým faktorem je teplota, která působí na celkový odtok. Změna teploty má velký vliv na rychlost tání sněhové pokrývky. Dále teplota spolu se slunečním zářením a větrem významně ovlivňuje intercepci (zachycení vody na vegetaci), evapotranspiraci (výpar z půdy a transpirace rostlin) a výpar z volné hladiny.

Geografické a vegetační faktory – sem patří činitelé ovlivňující zejména charakteristiku povodí a výpar. U charakteristiky povodí nás zajímá tvar a plocha povodí, jeho výškové, sklonové a půdní poměry, horninový podklad a hydrografická síť. Charakteristika povodí určuje dobu, za kterou se soustředí voda z celého povodí v uzavíracím profilu. Kolik vody v uzavíracím profilu povodí proteče, závisí na infiltraci a výparu. Výpar je kromě již zmíněných klimatických faktorů závislý na intercepci a evapotranspiraci. Množství zadržené vody je odvislé od rozlohy a druhu rostlinného krytu, jeho vegetačního stádia a také půdních horizontů.

Antropogenní faktor – vliv lidské činnosti, nabývající za posledních 200 let na významu. Populační exploze, používání fosilních paliv, těžba nerostů, technický pokrok, růst průmyslu a zemědělství, intenzivní výstavba, odlesňování velkých ploch a mnoho dalších negativních vlivů, které mají globální dopad na ekosystém. V regionálním měřítku se výrazně mění především charakteristika povodí a retenční schopnost krajiny, a to díky napřimování koryt toků, odvodňování velkých ploch,

výstavbě cest, zástavbě v údolních nivách, agrotechnickým zásahům, změně vegetace a mnohému dalšímu.

2.2.2 Srážky

Vznikají kondenzací nebo desublimací vzdušné vlhkosti nebo kondenzací vodní páry na povrchu půdy, rostlin a jiných předmětů, popřípadě na vodní hladině. Dělíme je podle různých kritérií. Například podle skupenství na srážky kapalné, tuhé a smíšené. Nebo dle místa vzniku na srážky atmosférické a horizontální. Pro potřeby hydrologického modelování uvažujeme převážně jen se srážkami dešťovými, které mají největší vliv na bezprostřední povrchový odtok, a sněhovými, které mohou ovlivnit odtok v delším časovém horizontu (dny až měsíce). Srážky mají vliv i na podpovrchový odtok, na který působí až například v následujícím roce (Jeníček, 2005). Při stanovení průtokové vlny nás zajímá vlastní objem srážky, od které jsou již odečteny ztráty, způsobené především infiltrací, která u jehličnatých porostů může dosahovat až 60 % (Ředinová, 2004). Tato část srážkové události, která se svým objemem blíží objemu přímého odtoku, se nazývá **efektivní srážka**.

$$P_{ef} = P - z \quad (2.1)$$

kde P_{ef} ... efektivní srážka
 P ... celková srážka
 z ... celkové ztráty

Pro stanovení efektivní srážky existuje mnoho metod. Kromě určení metody infiltrace se odhaduje i počáteční ztráta v povodí. Nejjednodušší odvození efektivní srážky je pomocí **odtokového součinitele** φ , který udává poměr srážky na přímém odtoku (Beven, 2001).

$$\varphi = \frac{H_o}{P} \quad (2.2)$$

kde φ ... odtokový součinitel
 H_o ... výška odtoku (mm)
 P ... srážkový úhrn (mm)

Tato metoda patří do skupiny empiricky odvozených funkcí. Další definice pro infiltraci stanovili například Kostjakov, Mezenec, Horton, Green-Ampt nebo Richardson (Ředinová, 2004).

Počáteční stav nasycenosti půdy významně ovlivňuje potenciální retenci, spolu s pórovitostí půdy a tloušťkou půdního horizontu (Diermanse, 2001). Zatímco charakteristiky příslušného deště mohou být celkem snadno stanoveny pomocí adekvátní srážkoměrné sítě, přímé stanovení vlhkostních podmínek pro celé povodí je o poznání komplikovanější. Půdní typy, povrchové charakteristiky, rozdílný vegetační pokryv a využití půdy to vše přispívá ke komplexitě problému stanovení půdní vlhkosti (Steinhart, 2010). Dalším ze způsobů, při kterém jsou zohledněny předchozí srážky a nasycenost půdy je metoda předchozích vláhových podmínek (PVP) – kumulativní úhrn srážek za 5 dní (Janeček et al., 2002). Tato metoda vychází ze stanovení CN – křivek (*Curve Number Method*).

Další z metod zohledňující nenasycenou zónu, je ta, kterou používá konceptuální model „*Sacramento*“. Tento hydrologický model je založený na parametrech půdní vlhkosti, které jsou reprezentovány dvěma zónami s vázanou vodou a jednou nebo několika zónami s vodou volnou. Model je vhodný i pro povodí s rozlohou nad 1000 km² (Steinhart, 2010).

V této práci je použita metoda, počítající s nasyceností půdy z předchozích srážek, která je podrobněji popsána v kapitole 3.1.3 – stanovení indexu API. Ve výsledcích je také stanoven odtokový součinitel vybraného povodí.

2.3 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Jedním ze způsobu ochrany před povodněmi je zjistit, jak vznikají a s dostatečným předstihem předpovědět, kdy a v jaké síle zasáhnou určité území. Hydrologické procesy jsou ovlivněné mnoha vzájemně spolupůsobícími příčinnými (deterministickými) a nahodilými (stochastickými) faktory. Obecný matematický model představuje algoritmus řešení soustavy algebraických a diferenciálních rovnic, popisující chování, popřípadě strukturu modelu. Chováním modelu je myšlena komplexní reakce na efektivní srážku, kterou model transformuje na povrchový odtok. Strukturou modelu pak míníme jeho fyzikálně geometrické vlastnosti, mezi které patří plocha povodí, jeho členitost, hydrografická síť apod. (Hrádek et Kuřík, 2002).

Hydrologický model se zjednodušením některých procesů snaží matematicky popsat srážko-odtokovou událost daného povodí. Bilanční hydrologickou rovnicí pro povodí uvádí (Dingman, 2002):

$$P + Q_v - (Q_p + ET + Q_z) = \Delta S \quad (2.2)$$

P ... srážka vstupující do povodí

Q_v ... objem přítoku podzemní vody do povodí

Q_p ... objem přímého odtoku

ET ... evapotranspirace

Q_z ... objem základního odtoku

ΔS ... změna zásob vody povodí

Tato bilanční hydrologická rovnice vychází ze základní vodní bilance, kde

$$P - Q = \Delta S \quad (2.3)$$

P ... srážka vstupující do povodí

Q ... objem odtoku

ΔS ... změna zásob povodí

Do základní rovnice je možno zahrnout časový faktor a vztah pak vypadá následovně:

$$\frac{P}{\Delta t} - \frac{Q}{\Delta t} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (2.4)$$

P ... srážka vstupující do povodí

Q ... objem odtoku

ΔS ... změna zásob povodí

Δt ... časový interval

Pomocí matematických modelů se zkouší predikovat objem a časový průběh průtokové vlny, především její kulminaci – povodeň. Modely slouží i k předpovídání důsledků, které by nastaly v případě realizace navrhovaných změn v povodí, nebo

k posouzení různých návrhů vodních děl a jejich dopad na vodní hospodářství. Vysoká rozmanitost hydrologických jevů vede k velkému množství modelů, umožňujících použití jen za určitých předpokladů. Podmínky použití konkrétního modelu vyplynou z požadavků na vstupní nebo výstupní data, typu modelu, popřípadě zjednodušujících předpokladů. Obecný srážko-odtokový model vysvětluje některý ze tří procesů. Prvním procesem je srážka (vstup), vyčíslení příslušných ztrát a stanovení objemu efektivní srážky. Druhým procesem je transformace efektivního deště do povrchové a podpovrchového odtoku a posledním je proces řešení odtoku (výstupu) v čase a prostoru. Procesy vstupu a transformace jsou zpravidla modelovány pomocí datově orientovaných nebo konceptuálních modelů. Pro řešení třetího procesu se mnohem lépe uplatní hydrodynamický model (Kovář, 1990).

2.3.1 Struktury modelů

Tvorba modelu se provádí v několika blocích. Nejdříve se definuje využití modelu, charakter povodí, parametry významné a parametry, které se mohou zanedbat. Poté se vyhodnotí data – jejich dostupnost, věrohodnost, měřítko, rozptyl atd. Dalším krokem je formulace matematických nástrojů pro zvolené proměnné významných hydrologických procesů a stanovení předpokladů (podmínek platnosti). Nejčastěji je použita rovnice kontinuity a hybnosti. Následuje fáze algoritmu a tvorba programu pro vybraný software. Pak přichází na řadu kalibrace modelů a po jejím úspěšném provedení se většinou zařazuje citlivostní analýza pro posouzení vlivů jednotlivých parametrů. Tvorba modelu končí jeho validací a při dostatečné shodě simulovaných hodnot s naměřenými je model připraven k použití. V opačném případě se musí přehodnotit zjednodušující předpoklady, popřípadě přepracovat návrh modelu a kalibraci s validací opakovat (Horáček, 2006).

2.3.2 Rozdělení modelů

Jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole, vysoká rozmanitost hydrologických procesů vede k velkému počtu různých modelů, založených na rozdílných předpokladech – fyzikálních, matematických nebo empirických (Steinhart, 2010). Pro získání přehledu a snahy o systematickosti se odborníci na hydrologické modely pokusili tříditi modely podle různých hledisek. Kupříkladu podle hlediska časového na modely kontinuální nebo epizodní (např. jedna jen událost).

Nebo podle hydrologického cyklu (Kovář, 1990):

- komplexní model (počítá s celým hydrologickým cyklem)
- komponentní (počítá jen s některými částmi hydrologického cyklu)

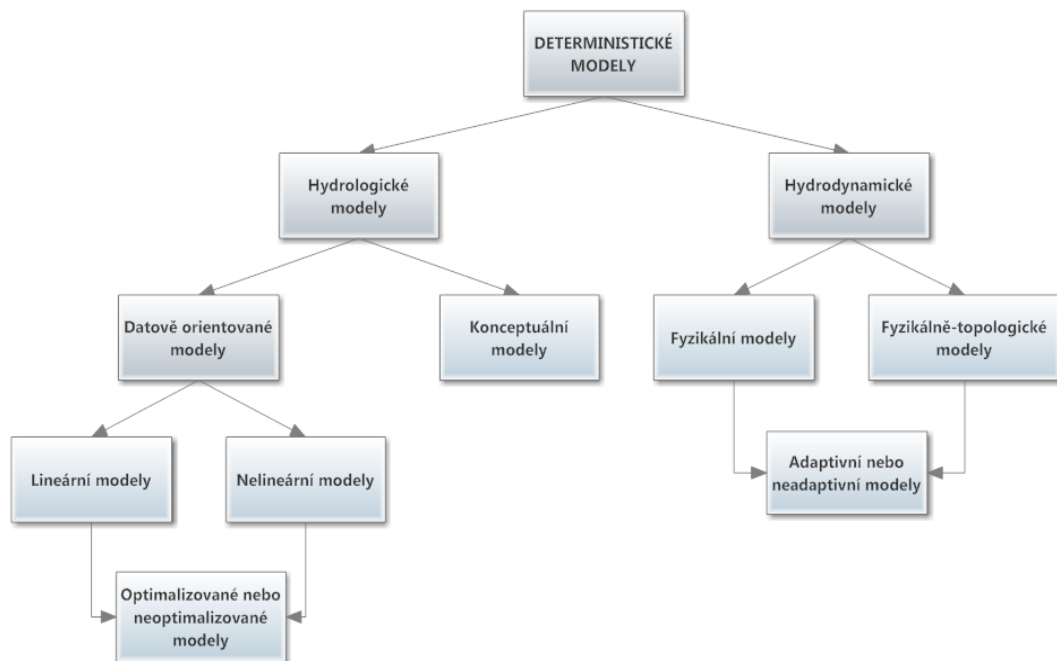
Rozdělení dle kritéria prostorového členění:

- celistvé (povodí je celek – jedna konstanta)
- dělené (povodí je rozděleno na několik částí s různými parametry)

Další dělení modelů dle kauzality (Zeman, 1994):

- stochastické (shodné vstupní soubory mohou poskytnout různé výsledky)
- deterministické (shodné vstupní soubory poskytnou vždy stejné výsledky)

Stochastické jsou dále děleny na pravděpodobnostní modely a modely pro generování časových řad. Dělení deterministických modelů je schematicky znázorněno na obrázku č. 3 (Kovář, 1990).



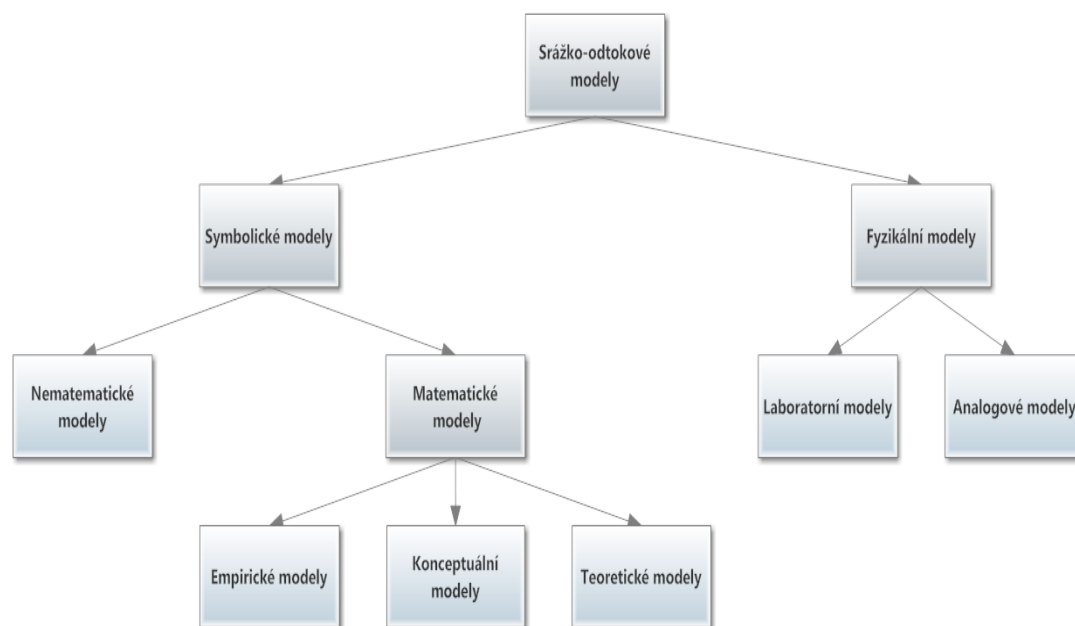
Obr. č. 3 Schéma rozdělení deterministických modelů (převzato Kovář, 1990)

Datově orientované modely (označované „*Black box*“) se zaměřují na transformační funkci a opomíjí strukturu systému a změny stavových veličin. Svou jednoduchou strukturou jsou vhodné pro systémy s jednotným chováním. Vstupní data jsou důležitá pro nalezení funkce, která vystihuje chování modelu.

Konceptuální modely (nazývané „*Grey box*“) ve zjednodušené podobě simulují základní fyzikální zákonitosti hydrologických jevů. Skládají se z jednotlivých nádrží a je důležitý koncept jejich uspořádání. Matematicky se pak snažíme popsat jejich plnění či vyprazdňování a rozdělení toků mezi jednotlivými nádržemi. Nádrže jsou plněny srážkami, infiltrací nebo prosakováním, a prázdněny odtokem, vypařováním nebo odvodněním.

Hydrodynamické modely („*White box*“) jsou také založeny na fyzikálních zákonech při zachování principů hmoty, energie a hybnosti. Využívají i poznatky z jiných oborů – hydrodynamiky, chemie, biologie atd. Hydrodynamické modely jsou svým pojetím opakem datově orientovaných modelů. (Jeníček, 2005).

Jiné rozdělení popsal například (Singh, 1988). Ten rozdělil srážko-odtokové modely na symbolické (nehmotné) a fyzikální. Fyzikální dále dělí na laboratorní a analogové, symbolické na matematické a nematematické. Matematické se skládají z empirických, konceptuálních a teoretických. Přehledněji na obrázku č. 4.



Obr. č. 4 Schéma rozdělení modelů podle (převzato Singh, 1988)

Vytvořené modely, které byly aplikovány na zájmové povodí, by měly být zařazeny mezi modely deterministické, hydrologické, datově orientované, lineární a optimalizované. Dále by se daly zařadit mezi modely celistvé a podle dělení popsaného na obrázku č. 4 se použité modely řadí rovněž mezi symbolické, matematické a konceptuální.

3. METODIKA

Pro simulaci srážko-odtokových procesů existuje mnoho již zmíněných modelů, jejichž cílem je predikce některých hydrologických ukazatelů, především těch, které mohou dosáhnout extrémních hodnot. Tato práce se věnuje předpovědi průtoků na zvoleném povodí, které se svou velikostí řadí mezi středně velká. Výběr metody matematického modelování závisí na tom, které parametry jsou důležité a které detaily jsme ochotni zanedbat. Dalším aspektem pro výběr metody jsou vstupní data. V datech se ukrývá velké množství informací, ale nás z nich v danou chvíli zajímají pouze některé. Díky výpočetní technice je dnes kladen důraz na použití metod a modelů, beroucí realisticky v potaz skutečné vlastnosti dat a studovaného procesu. Tedy, že model se přizpůsobuje situaci a nikoli situace modelu. Z těchto důvodů byla pozornost zaměřena na modely s lineárně regresní funkcí. U nelineární regrese je odhad parametrů nestabilní a jejich statistické vlastnosti i interpretace jsou mnohem komplikovanější než u regrese lineární (Hendl, 2012).

Jednodušší model je lepší než složitější, pokud poskytuje podobně kvalitní vysvětlení sledovaného jevu (Beven, 2001). Z tohoto důvodu byla jako první varianta modelu zvolena lineárně regresní funkce, kde vstupní veličinou jsou prosté srážkové úhrny a na jejich základě je předpovídán odtok v sledovaném profilu. Tento model je označen v grafech, programu a výsledcích jako model *LRM_S_O* s příponou *Cal*, pokud byl model použit na kalibračních datech, nebo příponou *Val*, analogicky na validačních datech. Druhý sestrojený model, byl podobný prvnímu. Vstupem ale nebyly jen srážkové úhrny, nýbrž byly pomocí indexu API stanoveny předchozí vláhové podmínky na povodí z předešlých srážek. Označení tohoto modelu je *LRM_API_O*. Určení vlhkostních poměrů na zvoleném středně velkém povodí je značně komplikované, a proto byl vybrán index API. Jeho stanovení je značně zjednodušené a je podrobněji popsáno v následující části 3.1.3.

Třetí, čtvrtý a pátý model jsou stejného typu. Jedná se o modely srážko-odtokové, kdy je těmito modely určován odtok na základě předešlých srážek a odtoků. Předešlé odtoky se v tomto případě dají považovat za předchozí stav povodí, respektive jeho nasycení a transformaci srážky na povrchový odtok. Tedy čím větší odtok z předešlých srážek nastane, tím předpokládáme vyšší nasycenost povodí. Modely se navzájem od sebe liší tím, kolik dní (1, 2 nebo 3 dny) se vrací do historie

předchozích odtoků, tedy jednodenní, dvoudenní nebo třídní predikce. Modely jsou označeny *LRM_SO_01*, *LRM_SO_02*, *LRM_SO_03*.

Poslední model, na kterém budou použita vstupní data vybraného povodí, je také model srážko-odtok-odtokový s jednodenní predikcí odtoků. Rozdílnost tohoto šestého modelu od třetího spočívá v tom, že počítá s odtoky, které byly v uzavíracím profilu Citice, tři dny nazpět. Tedy považuje za relevantní nasycenost povodí, vyjádřenou z předchozích průtoků, všechny tři dny dozadu a ne jako předešlé tři modely, které zahrnují pouze jeden časový úsek. Označení modelu je *LRM_SO3_01*.

3.1 VSTUPNÍ DATA

3.1.1 Charakteristika zvoleného povodí

V České republice je přibližně 76 000 km vodních toků. Velké toky spravují státní podniky jednotlivých toků a malé toky spravují především Lesy ČR, obce, CHKO a vojenské újezdy. Správce řeky Ohře je státní podnik Povodí Ohře (POH), založený v roce 1966. Správa je rozdělena na tři závody se sídly v Karlových Varech, Chomutově a Terezíně. Číslo hydrologického pořadí toku je 1-13-01-001. Ohře je levostranný přítok Labe, do něhož se vlévá u Litoměřic v nadmořské výšce 141,9 m s průměrným ročním průtokem 38 m³/s. Je tedy řekou II. řádu a patří do úmoří Severního moře. Za pramen se považuje místo nacházející se v lesích u obce Weissenstadt, ve výšce 752 m nad mořem, v Bavorsku ve Spolkové republice Německo. Celková délka toku činí 316 km (v ČR 246,5 km). Střední sklon toku má hodnotu 1,23%. Mezi významné levostranné přítoky mimo jiné patří Svatava, Bystřice, Chomutovka. Pravostrannými jsou pak především Odava, Teplá, Liboc, Blšanka a další. Na toku se nacházejí čtyři přehradní nádrže – Weißerstädter See, Skalka, Nechranice a Kadaň. Nechranice jsou zároveň největší vodní plochou na toku. Celkem má povodí rozlohu 5614 km² a na území České republiky zaujímá 4601 km². Levý břeh je lemován Krušnými horami, dolní část toku lemuje České středohoří. Na pravém břehu se nachází Slavkovský les a Doupovské hory. Nejvyšším bodem povodí je Klínovec s výškou 1244 m. Řeka protéká řadou měst a obcí, například městy Cheb, Sokolov, Karlovy Vary, Kadaň, Žatec, Louny a Litoměřice. Její voda je využívána pro ČOV těchto měst a obcí, dále pro energetické

účely a potřeby mnoha průmyslových podniků, hnědouhelných dolů a především pak pro severočeské elektrárny Prunéřov, Tušimice a Počerady (POH, 2014).

Zvolená část povodí Ohře je horní třetina toku. Přehledová mapa a mapa s detailnějším pohledem na vybrané povodí jsou součástí přílohy č. I a II. Uzavírací profil Citice je na 205 km staničení v nadmořské výšce 399,2 m. Hydrologické pořadí této části toku je 1-13-01-091. Zeměpisné souřadnice jsou 12° 37' 17'' východní délky a 50° 10' 28'' severní šířky.



Obr. č. 5 Stanice Citice (foto Zadražil, 2015)

Stanici Citice jsem vybral vzhledem k tomu, aby denní průměrné průtoky nebyly významně zkresleny napouštěním dvou rekultivačních nádrží dále po proudu řeky. Jednalo se o napouštění jezera Most, v letech 2008–2011, které má rozlohu 311 ha a objem cca $70 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ a napouštění jezera Medard, v letech 2010–2014, s rozlohou 493 ha s objemem $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Napouštění nádrží probíhalo v nepravidelných intervalech s ohledem na čistotu vody v řece, vodní režim nádrží a vodohospodářské potřeby povodí Ohře. Vybrané subpovodí Ohře má rozlohu 1729 km^2 z celkových 5614 km^2 , to představuje 31 % povodí Ohře. Průměrný roční průtok v uzavíracím profilu v Citicích je 14,4 m^3/s , což odpovídá 112 cm výšky hladiny. Průměrná roční dlouhodobá výška srážek v této oblasti je 718 mm. S touto hodnotou patří povodí mírně nad dlouhodobý průměr ČR (ČHMÚ, 2015).

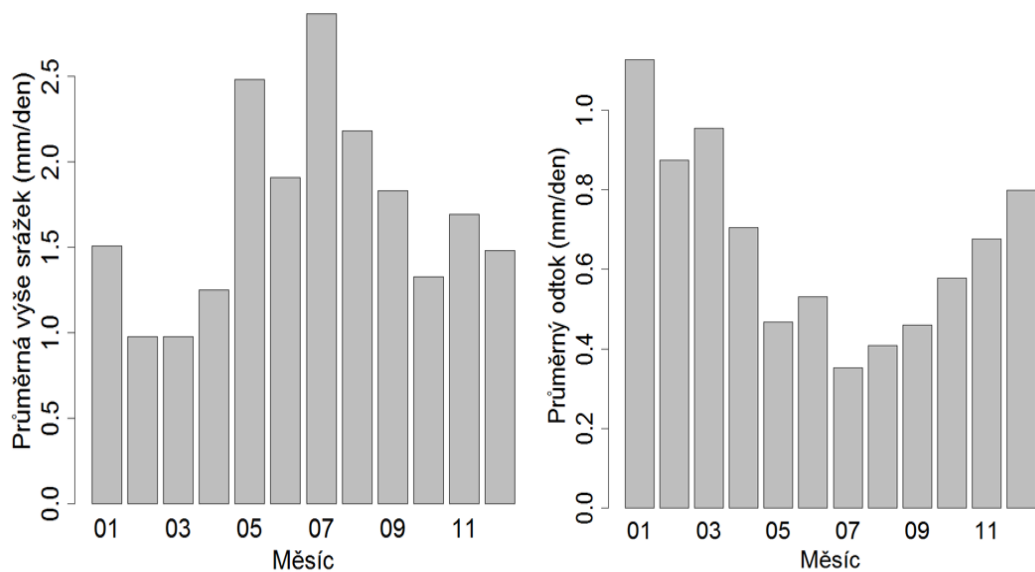
Nejvyšší průtok za dobu měření v tomto uzavíracím profilu byl zaznamenán v červenci 1954 a jednalo se o dvacetiletou vodu, kdy průtok dosahoval hodnoty 320 m³/s. Nejhorší povodeň horní části Ohře z poslední doby, zasáhla Karlovarsko v březnu 1981 a jednalo se o padesátiletou vodu s průtokem 620 m³/s. Na dolní části toku je situace o poznání horší, neboť Lovosice a Litoměřice byly zasaženy velkými povodněmi v roce 2002 a 2006. Přestože karlovarský region nezasáhly takové katastrofální povodně jako Moravu v roce 1997 a Českou republiku v roce 2002, neznamená to, že není potřeba situaci sledovat a přijímat preventivní opatření, mezi něž patří omezení antropogenní činnosti v povodí, zvyšování retenční schopnosti krajiny, revitalizace toku, vytvoření varovných systémů a další obranné mechanismy, pomáhající předcházet povodním, eventuálně zmírnit následky, pokud se meteorologická situace vyvine tak nepříznivým způsobem jako v roce 1997 a 2002. Na tvorbu varovných systému je potřeba zkoumat a analyzovat srážko-odtokové poměry, aby pak bylo možné na základě předpovědí objemů srážek určit co nejpřesněji výšky průtoků. Proto je snahou této práce takové modely vytvořit.

Jak bylo uvedeno v úvodu, naměřená data poskytnuta vodohospodářským dispečinkem povodí Ohře jsou téměř kontinuální denní průměrné průtoky a úhrny srážek. Měření začíná 1. ledna 2003 a končí 22. srpna 2014. Hodnoty **m – denních průtoků** a **N – letých vod** pro zvolený uzavírací profil jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Tab. č. 1 Hodnoty průtoků (převzato POH, 2014)

m - denní průtoky [m³/s]												
30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
33,6	22,7	17,4	14,3	11,8	10,1	8,63	7,56	6,58	5,62	4,71	3,41	1,52
N - leté průtoky [m³/s]												
1	2	5	10	20	50	100						
123,0	169,0	234,0	287,0	349,0	425,0	488,0						

Na následujícím obrázku č. 6 je graficky vyjádřena měsíční průměrná výše srážek vybraného povodí a průměrný měsíční odtok uzavíracího profilu Citice, který je už ale převedený na stejné jednotky jako srážky, aby byla lepší možnost porovnání, tedy mm/den. Tento postup sjednocených jednotek je praktikován ve zbytku celé diplomové práce.



Obř. ř. 6 Průměrná měsíční výše srážek a průměrný měsíční odtok ve stejných jednotkách mm/den (převzato a upraveno POH, 2014)

3.1.2 Příprava dat

Každá diplomová, disertační nebo vědecká práce se dnes prakticky neobejde bez statistických metod, analýz nebo řetření. Statistika, potažmo metaanalýza, je významný pomocník pro zpracování velkého množství dat a informací (Moore, 2010). Také v této diplomové práci zaujímá statistika významnou roli. Ke kontrole dat a vytvoření základní představy o chování sledovaných proměnných slouží podle (Shumway et Stoffer, 2006) explorační datová analýza EDA (*Exploratory Data Analysis*). Základní statistické hodnoty vstupních dat uvádí tabulka ř. 2.

Tab. ř. 2 Statistické hodnoty vstupních dat (převzato a upraveno POH, 2014)

Summary	Srážky (mm/den)	Odtok (mm/den)
Min.	0.000	0.111
1st Qu.	0.000	0.320
Medián	0.100	0.467
Mean	1.715	0.662
3rd Qu.	1.600	0.765
Max.	51.300	5.283

Nepříjemnou realitou každého měření jsou chybějící údaje (cca 70 průtoků + 20 úhrnů srážek). Vzhledem k celkovému množství dat se ale jedná o zanedbatelné

množství, při kterém nedojde k ovlivnění výsledků. Absence zápisu měřených dat byla způsobena poruchou průtokoměru nebo ucpáním srážkoměru, popřípadě lidským faktorem. Chybějící data jsem se rozhodl nahradit průměrnou hodnotou z údajů před a za chybějící hodnotou, podrobněji (Hendl, 2012) – imputace dat.

Vysoká četnost měření (více než 4000) spolu s každodenní kontinuitou umožňují považovat odtok a srážky za spojité proměnné. Spojitá data mívají vyšší vypovídací hodnotu a dávají možnost porovnat nejen hodnoty, ale i tvar křivky. Výpočet jednoduchých statistických charakteristik a jejich přehledná tabulková a grafická prezentace jsou důležitými nástroji přípravy dat, před jejich dalším použitím při tvorbě modelů (Pekár et Brabec, 2012). Na kalibraci regresních modelů byla použita jedna polovina naměřených hodnot. Druhá polovina byla využita při jejich validaci (verifikaci).

3.1.3 Stanovení indexu API

Jak bylo uvedeno v předcházejícím textu, srážky dopadající na povodí, nejsou v celém objemu součástí povrchového odtoku, ale část z nich je zadržena v závislosti na kapacitě daného povodí a předešlých podmínkách. Pro dosažení optimálního modelu je snahou zakomponovat do vstupních dat odhad nenasycené zóny. Nalezení vhodné metody, která umožní uspokojivou aproximaci a zároveň nezkomplikuje hledání parametrů regresního modelu, bylo důvodem pro zvolení indexu API. Komplikovanější model zvyšuje nároky na vstupní data, hardwarové vybavení, finanční prostředky a čas. Takové modely je tudíž schopen provozovat pouze úzký okruh uživatelů. Přeparametrizování modelu ale zároveň vede k větším neurčitostem ve výsledku a možnosti chyby (Beven, 2001).

Nasycenost půdy z předchozích srážek má přímý vliv na kapacitu infiltrace a na celkovou ztrátu v povodí. Povrchový odtok je definován jako objem srážky bez ztráty, která je zadržena povodím před nasycením. Kapacitou půdního profilu můžeme v nepřímé úměře nazvat stupeň nasycení nenasycené zóny před začátkem průtokové vlny (Steinhart, 2010). Z hlediska výskytu povodně má nasycenost půdy větší roli u trvalých srážek, kdy se na vzniku povodňových průtoků podílí větší měrou podpovrchový odtok. U přívalových dešťů je význam nasycení menší (Brázdil et al., 2005). Počáteční ztráty můžeme vyjádřit jako závislost objemu srážky před vzestupnou částí hydrogramu na úhrnu předchozích srážek, označovaných z anglického názvu (*Antecedent Precipitation Index*) jako index API. Index API je

možné vyjádřit jako váženou sumaci denních srážek. Váha je dána každému srážkovému dni obvykle exponenciální nebo reciproční funkcí času. Nejstarší srážková událost má nejmenší váhu (Kohler et Linsley, 1951).

$$API_n = \sum_{i=1}^n C^i \cdot P_i \quad [\text{mm}] \quad (3.6)$$

n – celkový počet dní před příčinnou srážkou

i – pořadí dne počítané nazpět ode dne, ke kterému API určujeme

C – evapotranspirační konstanta, pro ČR je $C = 0,93$ (Jeníček, 2005)

P – denní úhrn srážek v mm v i -tém dni před výskytem příčinných srážek

Podle (Dingman, 2002) je API operativní metoda sloužící k nalezení vztahu mezi efektivní srážkou a předchozími podmínkami na povodí. U modelů, které počítají s indexem předchozích srážek API, je vhodné určit hodnotu, při které dochází k úplnému nasycení půdy – API max. Tato hodnota je dosahována při vydatné srážkové události, která svou intenzitou nebo dobou trvání překročí schopnost nenasyčené zóny infiltrovat srážku a dochází k povrchovému odtoku.

3.2 MODEL LINEÁRNÍ REGRESE

Statistická analýza se nezabývá pouze samotnými daty, ale především srovnáváním skupin, změny proměnné v čase nebo vztahy mezi proměnnými. Statistickými metodami zkoumající tyto vztahy, jsou zejména korelační a regresní analýza. Zatím co korelační analýza zkoumá, zda mezi proměnnými existuje nějaká závislost a snaží se sílu korelace proměnných vyjádřit graficky nebo pomocí korelačních koeficientů, tak regresní analýza se snaží určit tento vztah. Přes některé nedostatky sílu vztahu dvou náhodných spojitých proměnných X a Y , vyjadřuje nejlépe Pearsonův korelační koeficient r_{xy} , kdy platí rovnice:

$$r_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right) \quad (3.1)$$

$x_i, y_i \dots$ změřené párové hodnoty z n – měření

$\bar{x}, \bar{y} \dots$ průměry obou proměnných

$s_x, s_y \dots$ směrodatné odchylky proměnných

Korelační koeficient může nabývat hodnot v intervalu $r_{xy} = \langle -1, 1 \rangle$. Pokud má koeficient nulovou hodnotu, nazýváme X a Y nekorelované proměnné. Čím více se koeficient blíží k hodnotě 1 nebo -1 roste míra korelace. Pokud $|r_{xy}| = 1$ můžeme vztah obou proměnných vyjádřit přímkou – lineární funkcí. Pearsonův korelační koeficient vyjadřuje tedy sílu lineárního vztahu, jiné vztahy měří špatně. V případě ordinálních dat nebo odchylek od předpokladů rozložení dat (odlehlá pozorování, jiné než normální rozložení proměnných, nelinearita vztahu) je vhodnější použít například Spearmanův nebo Kendelův neparametrický koeficient korelace. Korelace nám neříká, jak vztah vypadá. Tvar vztahu nám ukáže až rovnice přímky (Hendl, 2012). V programu je provedeno kros korelační porovnání měřených a simulovaných průtoků na kalibračních i validačních datech. Míra korelace je graficky znázorněna pro každý model v kapitole 4. diskuse s výsledky.

Regresní analýza pomáhá odhadnout závislou proměnnou Y za pomoci nezávislé proměnné X s určitou přesností (chybou). Matematicky vyjádřené spojení proměnných se nazývá regresní funkce, která může mít různou podobu – lineární, exponenciální atd. V mnohonásobné regresní analýze se zkoumá vztah mezi výstupní (cílovou) závislou proměnnou Y a několika vstupními nezávislými proměnnými (X_1, X_2, \dots, X_k). Volba proměnných sleduje ty nezávislé proměnné, které vysvětlují co nejvíce proměnlivost závislé proměnné. Hodnota výstupní proměnné obsahuje i náhodnou (zbytkovou) složku ε .

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (3.2)$$

Závislá proměnná je spojena s nezávislými proměnnými funkcí, kterou nazýváme regresí, a obsahuje několik neznámých parametrů, které upřesňují tvar funkce. Pokud je funkce lineární v těchto parametrech, mluvíme o lineárně regresním modelu (Hendl, 2012).

Obecný tvar rovnice lineární regrese:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_k + \varepsilon \quad (3.3)$$

b_0, b_1, \dots, b_n ... jsou regresní koeficienty rovnice

x_1, x_2, \dots, x_k ... jsou vstupní nezávislé proměnné x

ε ... je chybová hodnota

Soustavu lineárních rovnic lze zapsat i maticovým způsobem:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} * \mathbf{b} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1k} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nk} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Při stavbě regresních modelů se často využívá metody nejmenších čtverců, která při splnění určitých kritérií poskytuje dostatečně přesné parametry lineární funkce. Hledá se minimální hodnota plochy S_e , která vychází ze vztahu:

$$S_e = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3.6)$$

Y_i ... pozorovaná hodnota

\hat{Y}_i ... odhadnutá hodnota

Regresní koeficienty lze získat řešením maticové rovnice:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T * \mathbf{X})^{-1} * \mathbf{X}^T * \mathbf{Y} \quad (3.7)$$

\mathbf{X}^T ... je transponovaná matice

\mathbf{X}^I ... je inverzní matice

Řešení rovnice 3.6 splňuje podmínku minimální plochy S_e . Obecně metoda nejmenších čtverců slouží k eliminaci chyb, kterou provádí optimálně vzhledem k pevně danému jednoznačnému kritériu. Z matematického hlediska hledáme globální minimum. Více o metodě nejmenších čtverců (Vampolová, 2009).

3.3 PROGRAMOVACÍ JAZYK R

V současné době se u softwaru zaměřeném na statistickou analýzu dat setkáváme s různorodým přístupem. Kromě zavedených programových systémů, si stále větší prostor získává systém R. Je to programovací jazyk a zároveň softwarové prostředí. (Cohen et Cohen, 2008). Mezi hlavní výhody tohoto nástroje patří jeho volné šíření (kompletně zdarma), stejně jako programové balíky (*packages*), které jsou pro tento program tvořeny. Existuje již více než 6000 programových balíčků v jazyce R pro nejrůznější úkoly statistické analýzy. Měsíčně narůstá počet balíčků až o několik desítek. Systém R disponuje rozsáhlým vizualizačním rozhraním GUI (*Graphical User Interface*). Program R se stal de facto standardem ve statistice analýzy dat. Vznikl v roce 1993 na univerzitě v Aucklandu v USA. Je implementací programovacího jazyka S – plus vytvořeného v 70. letech minulého století v AT-T Bell Laboratories. Software je udržován a aktualizován spolkem akademiků a odborníků, tzv. R Development Core Team (hlavní skupinu tvoří 21 vývojářů). Každoročně jsou pořádány setkání – konference useR! (Havlíček, 2014). Prostředí R je objektově orientovaný jazyk. Je používán mnohými autory i při programování jednoduché a vícenásobné lineární regrese, například (De Micheaux et al., 2014, Rao et al., 2008). Další autoři předkládají praktické návody na analýzu dat, grafické zpracování, statistické výpočty a prezentace pomocí funkcí naprogramovaných v jazyce R (Kabacoff, 2011, Pekár et Brabec, 2012).

V diplomové práci byla pomocí jazyka R provedena základní analýza a zpracována vstupní data, byly jím provedeny jednoduché statistické charakteristiky a porovnání. Vytvořený program pomáhá vyhodnotit dílčí výsledky, pomocí stanovených kritérií hodnotí kalibraci všech modelů a provádí následně jejich validaci. Program také graficky přehledně zobrazuje dílčí i konečné výsledky. Výsledný skript programu je uveden v příloze č. III a je rozdělen na dva soubory. V prvním souboru FunctionsDP.R jsou definovány funkce a kritéria, které jsou následně použity v souboru UseModels.R. Tento druhý soubor je sestaven ze tří částí. V první části je provedena příprava dat, výpočet odtokového součinitele pro zvolené povodí a přepočet odtoku na mm/den. Druhá část je vyhrazena pro samotnou tvorbu lineárních regresních modelů. Třetí část je věnována grafickým výstupům.

3.4 KALIBRACE A VALIDACE MODELU

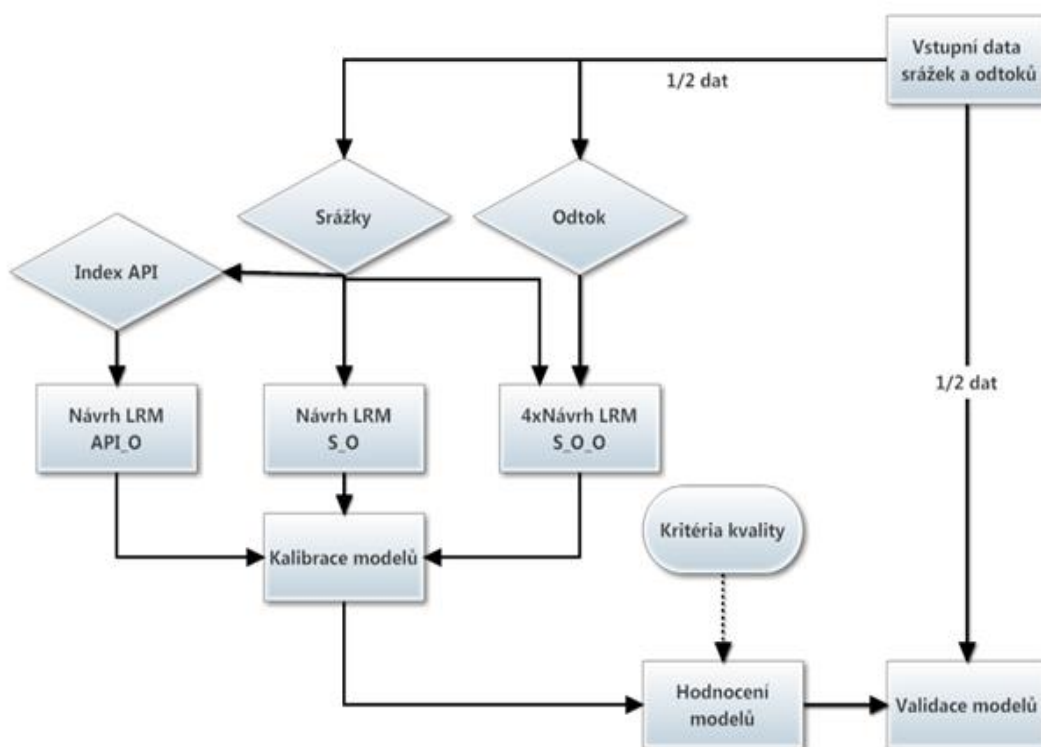
Proces kalibrace znamená hledání optimálních parametrů tak, aby bylo dosaženo co nejlepší shody mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami. Sadu parametrů není možné obecně stanovit, ale je nutné pro každý model a každé povodí s danými podmínkami provést kalibraci samostatně. Z toho plyne, že při změně podmínek se musí znova kalibrovat. Soubory dat jsou rozděleny na kalibrační a validační poloviny. Na kalibraci se použije první polovina naměřených dat. V podstatě se hledají takové koeficienty, které budou přepočítávat vstupní denní srážkové úhrny na známé naměřené denní odtoky s co nejvyšší přesností. Na obrázku č. 7 je dvojice krabicových grafů (*boxplot*), které znázorňují rozložení dat. Grafické znázornění dat je často mnohem efektivnější a názornější než tabulka, zejména pro rozsáhlejší data.



Obr. č. 7 Boxploty kalibračních a validačních dat pro srážky a odtok

Grafické vyjádření přehledně ukazuje, že kalibrační a validační soubory srážek a odtoků jsou si podobné jak v rozptylu, tak mají podobný medián, centrální tendenci, velikosti kvartilů, minim, maxim a šikmosti. Dále se zde nenacházejí žádné odlehlé „podezřelé“ hodnoty (*outliers*). Mezi soubory dat tedy není statisticky významný rozdíl, což poskytuje naději na úspěšnou validaci regresních modelů. Pokud by mezi kalibrační a validační polovinou dat byl významný rozdíl, jednalo by se nejspíš o zásadní změnu charakteristiky povodí a validace modelů by

pravděpodobně úspěšná nebyla. V rámci kalibrace se velmi často provádí i citlivostní analýza (u složitějších modelů), při které se zjistí, který koeficient nejvíce ovlivňuje navrhovaný model a naopak, který na model nemá podstatný vliv. Vyhovující výsledky ukončí celý proces a model je připraven k validaci. V opačném případě se musí celý postup zkontrolovat, zda nedošlo v některém z kroků k chybě. Pokud není chyba nalezena, musí se najít jiná sada parametrů a kalibraci opakovat, a poté teprve validovat. Po kalibraci modelu musíme ověřit jeho správnou funkčnost validací (verifikací). Validita se prokazuje porovnáním simulovaných dat našeho modelu s reálnými naměřenými daty. Jako validační soubor se použije druhá polovina dat. Je důležité, aby kalibrační a validační soubory dat byly vzájemně nezávislé, to znamená, že validační data nebyla při návrhu a tvorbě modelů dosud použita. Pro přehlednost je na obrázku č. 8 schematicky naznačeno rozdělení dat a jednotlivé fáze tvorby modelů.



Obr. č. 8 Základní schéma tvorby modelů

Platnost nakalibrovaných parametrů a úspěšnost validace se vyhodnotí pomocí kritérií kvality předpovědi uvedené v kapitole 3.5, především pak Nash – Sutcliffův koeficient. Je nutné si uvědomit, že 100% shoda není téměř možná a vytvořený hydrologický model simuluje srážko-odtokové události jen s určitou přesností.

3.5 KRITÉRIA KVALITY PŘEDPOVĚDI

Posouzení úspěšnosti jednotlivých modelů se statisticky testuje pomocí objektivních kritérií. Porovnání reálně naměřených hodnot Q_m s hodnotami nasimulovanými (vypočítanými) Q_s , je v programu provedeno pomocí několika funkcí. Cílem hodnocení modelů je nalézt globální nebo lokální extrém vybrané objektivní funkce. Hledaným extrémem je buď minimum nebo maximum použitého kritéria.

Průměrná odchylka ME (Mean Error)

Vyhodnotí všechny odchylky měřených a simulovaných průtoků. Odchylky mohou nabývat kladných i záporných hodnot a mají stejnou váhu. $ME \in (-\infty, +\infty)$. Pokud bude ME kladné, tak to znamená, že průtoky simulované jsou menší než měřené a navržený model tedy podhodnocuje předpověď. Analogicky při záporné hodnotě ME model nadhodnocuje průtoky. Z toho plyne, že když se chyba průměru bude blížit k nule, bude model přesnější. Jednotky mm/den.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_m - Q_s \quad (3.7)$$

n ... počet měření

Q_m ... naměřené hodnoty průtok (mm/den)

Q_s ... nasimulované hodnoty průtok (mm/den)

Střední absolutní chyba MAE (Mean Absolute Error)

Toto kritérium porovnává všechny rozdíly měřených a vypočtených hodnot pouze podle jejich velikosti, přičemž velké i malé odchylky mají stejnou váhu. $MAE \in (0, \infty)$. Střední absolutní chyba může nabývat teoreticky hodnot od nuly (hodnoty vypočtené budou odpovídat průtokům naměřeným) až po nekonečno (nevyhovující model). Jednotky mm/den.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_m - Q_s| \quad (3.8)$$

n ... počet měření

Q_m ... naměřené hodnoty průtok (mm/den)

Q_s ... nasimulované hodnoty průtok (mm/den)

Střední kvadratická chyba MSE (Mean Squared Error)

MSE hodnotí kvalitu odhadu (nebo sadu předpovědí) z hlediska stupně zkreslení a jeho kolísání. Velkým odchylkám je přiřazena větší váha než odchylkám menším. $MSE \in \langle 0, \infty \rangle$. Když se n bude blížit k nekonečnu, pak $MSE = 0$, což znamená dokonalou předpověď. Jednotky $(\text{mm/den})^2$.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2 \quad (3.9)$$

n ... počet měření

Q_m ... naměřené hodnoty průtok (mm/den)

Q_s ... nasimulované hodnoty průtok (mm/den)

Odmocnina střední kvadratické chyby RMSE (Root Mean Square Error)

RMSE udává rozptyl rozdělení četnosti odchylek mezi předpovídanými hodnotami a skutečně naměřenými. Hodnota RMSE poskytuje informaci o přesnosti odhadu ve smyslu směrodatné odchylky. Je odmocninou střední kvadratické chyby, podobně jako je směrodatná odchylka odmocninou rozptylu (Mihálíková, 2011). $RMSE \in \langle 0, \infty \rangle$. Může nabývat pouze kladných hodnot, minimální hodnota RMSE opět znamená přesnější model. Jednotky mm/den.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2} \quad (3.10)$$

n ... počet měření

Q_m ... naměřené hodnoty průtok (mm/den)

Q_s ... nasimulované hodnoty průtok (mm/den)

Nash – Sutcliffe koeficient účinnosti modelu NS (Nash – Sutcliffe efficiency coefficient)

Koeficient účinnosti modelu NS je pravděpodobně nejpoužívanějším kritériem pro hodnocení hydrologických modelů. Může nabývat teoreticky hodnot v intervalu $NS \in (-\infty, 1)$ a poskytuje míru vysvětlení rozptylu v datech. Pokud dosahuje záporných hodnot, je lepší nahradit simulované hodnoty průměrem naměřených hodnot. Uspokojivé hodnoty jsou pro $NS \geq 0,5$. Když je NS koeficient roven jedné,

dochází k absolutní shodě naměřených a simulovaných dat. V predikci odtoků v krátkých časových úsecích se koeficient NS často pohybuje blízko hodnoty 1. S prodlužující se předpovědí (především u malých povodí) rychle klesá až do záporných hodnot. Naopak u větších povodí s dlouhými doběhovými dobami, zůstává často $NS > 0,5$ po 48 hodin (ČHMÚ, 2015). Bezrozměrná jednotka, pouze poměr – možno vyjádřit v procentech.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q})^2} \quad (3.11)$$

n ... počet měření

Q_m ... naměřené hodnoty průtok (mm/den)

Q_s ... nasimulované hodnoty průtok (mm/den)

\bar{Q} ... průměr naměřených hodnot (mm/den)

4. VÝSLEDKY A DISKUSE

Nejprve je potřeba uvést, že vznikla určitá nepřesnost u rozlohy zvoleného povodí. Z dostupných materiálů je plocha vybraného povodí 1729 km², jak bylo uvedeno v kapitole 3.1.1 charakteristika zvoleného povodí. Ve vytvořeném programu byla při převodu odtoku na sjednocené jednotky a při tvorbě modelů druhého typu, tedy těch, které počítají na vstupu s předešlými odtoky, použita o něco větší hodnota rozlohy, konkrétně 1851 km². Hodnoty 1850,75 km² a 248,85 km (délka rozvodnice) byly vypočteny z mapy v programu ArcGIS za použití dat ArcČR a DIBAVOD. Mapy jsou součástí přílohy I. a II. Rozdíl je možné přičíst špatné dostupnosti map z německé části povodí, kde patrně vznikla odchylka při zakreslení rozvodnice, která vymezuje hranici zájmového území. Tato 7 % odchylka v rozloze povodí však nemá na simulace odtoků významný vliv.

Pro informaci a lepší představu o charakteristice zájmového území byl programem R spočítán i odtokový součinitel, který udává poměr srážky na přímém odtoku (vzorec 2.2). Hodnota 0,3858 vypovídá o tom, že 38,6 % všech naměřených srážek za sledované období se transformovalo na povrchový odtok a zbylých 71,4 % bylo ve vybraném povodí zadrženo (výpar, transpirace atd. – kapitola 2.2). Důvodem poměrně nízké hodnoty transformace srážek na povrchový odtok je u vybraného povodí vysoká zalesněnost svahů, především smrkových porostů, jak na německé tak české straně. Další příčinou je nižší hustota obyvatel, tedy méně antropogenních vlivů a určité zásluhy je nutno přiznat i vodohospodářské činnosti na tomto povodí.

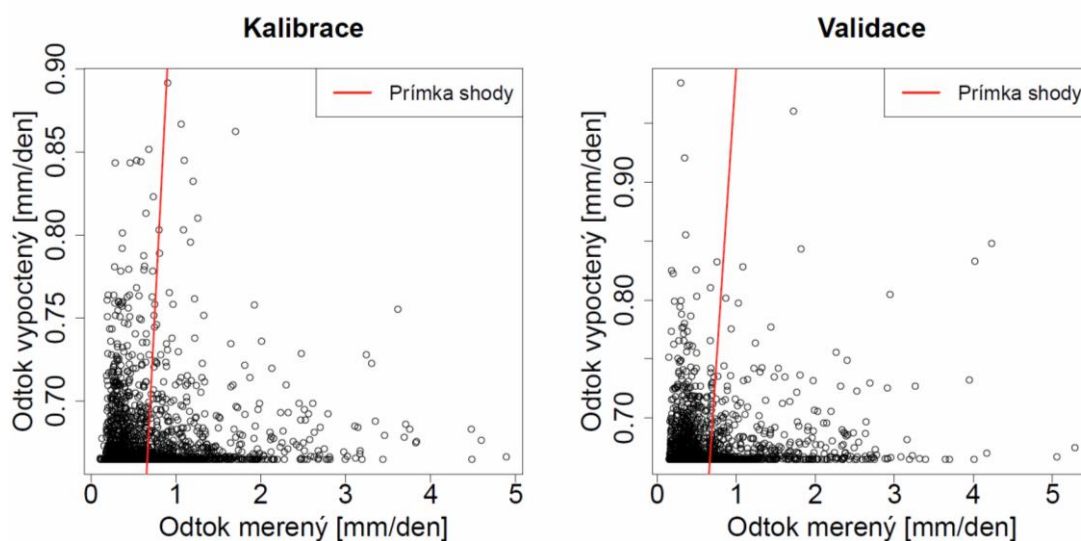
Při sumarizaci výsledků a tvoření závěrů je nutná určitá opatrnost, protože je zcela nemožné prověřit všechny aspekty (chyby I. a II. druhu). Model, který je zvolen, nemusí zcela odpovídat vstupním datům, a tudíž inference nemusí být 100 % korektní. Proto je snahou model ověřit co nejvíce – použít co nejvíce technik. Ke kritickému posouzení kvality modelu se používá celá řada diagnostických nástrojů. Cílem diagnostiky je zjistit, zda a do jaké míry jsou data v souladu s předpoklady modelu (Hendl, 2012). Hodnocení kalibrace a validace modelů byla provedena za pomoci objektivních kritérií, která byla podrobně popsána v kapitole 3.5, přičemž nejvyšší váha při posuzování modelu byla kladena na Nash – Sutcliffův koeficient účinnosti. Výsledné hodnoty kritérií pro soubory kalibračních i validačních dat jsou uvedeny v příslušné tabulce u každého modelu. Nulové hodnoty u průměrné odchylky ME ve všech tabulkách, ukazují na to, že byly při kalibraci nalezeny

odpovídající koeficienty lineárních modelů. Na grafech hydrogramů jsou pak znázorněny celé soubory validačních dat, respektive křivky měřených a simulovaných průtoků. Dále je pro názornost na detailnějším grafu vybrána největší vlna z validačního souboru dat, která byla zaznamenána 15. ledna 2011. Na příslušných obrázcích u každého modelu byl zachycen celý průběh vzestupné a také poklesové větve této srážko-odtokové události (40denní hydrogram).

1. model LRM_S_O

Výsledná rovnice: $y = 0,6648 + 0,0062$ srážky

Predikce odtoku u modelu LRM_S_O byla nedostačující. Předpověď odtoků pouze na základě úhrnů srážek se jeví pro modelování srážko-odtokového procesu na zvoleném povodí jako příliš zjednodušující. Transformace dat (např. logaritmování) se ukázala neúčinná a na kvalitě lineárního modelu se neprojevila. Na obrázku č. 9 je vidět, že korelace mezi měřeným a vypočteným odtokem je velmi slabá.



Obr. č. 9 Bodové grafy pro model LRM_S_O

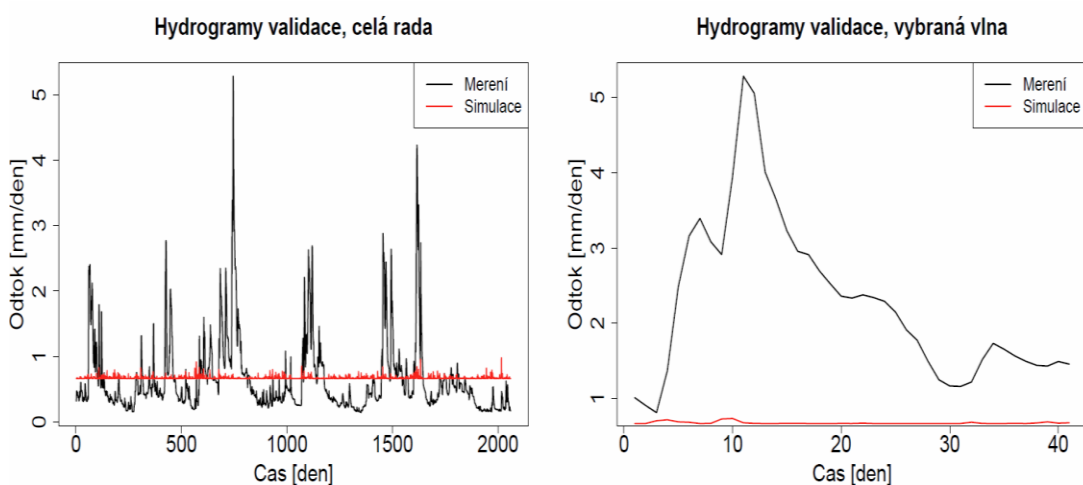
Regresní čára je téměř kolmá. Z obrázku č. 6 v kapitole 3.1.1, je patrné, že nejvyšší měsíční úhrny srážek jsou dlouhodobě v květnu a červenci, zatím co nejvyšší průtoky bývají v lednu a březnu. Dle vyjádření (Michal Tanajewski, II. 2015, in litt.) je počáteční ztráta srážky, než dojde k příčinnému povrchovému odtoku, v zimě úplně jiná, než ve vegetačním období v létě. V zimě postačí například 30 mm za 48 hodin, v závislosti na teplotě, k vyvolání značných průtoků.

V létě se obdobná srážka projeví jen minimálně. Vliv vegetačního období a teploty vzduchu na předchozí nasycenost povodí je veliký. K tomu aby bylo možné porovnávat letní období se zimním, by bylo potřeba znát množství vody ve sněhu před nárůstem průtoků. V časových řadách jsou sice vidět srážkové úhrny, ale neprojevuje se povrchový odtok – zvyšuje se zásoba sněhu. Po oteplení, ke kterému se přidá déšť, je reakce v povrchovém odtoku značná, protože déšť aktivoval tání sněhu a sám přidal do sněhu svojí vodní hodnotu. Tyto analýzy jsou ovšem značně komplikované, což odporuje původnímu cíli práce – navrhnout jednoduchý předpovědní model na základě vstupních dat.

Tab. č. 3 Výsledné hodnoty objektivních kritérií pro model LRM_S_O

	ME (mm/den)	MAE (mm/den)	MSE (mm/den) ²	RMSE (mm/den)	NS
Kalibrace	0	0,381547	0,31975	0,565464	0,001745
Validace	-0,028106	0,38931	0,32931	0,573855	0,003448

Tabulka kritérií č. 3 ukazuje, že simulovaná a měřená data se kromě průměrné chyby ME kalibrace (správné nakalibrování modelu) rozcházejí ve všech ostatních hodnotách. Koefficient účinnosti NS dosahuje naopak velmi nízkých hodnot a model neposkytuje lepší predikci, než kdyby bylo počítáno s průměrnými hodnotami měřených dat.



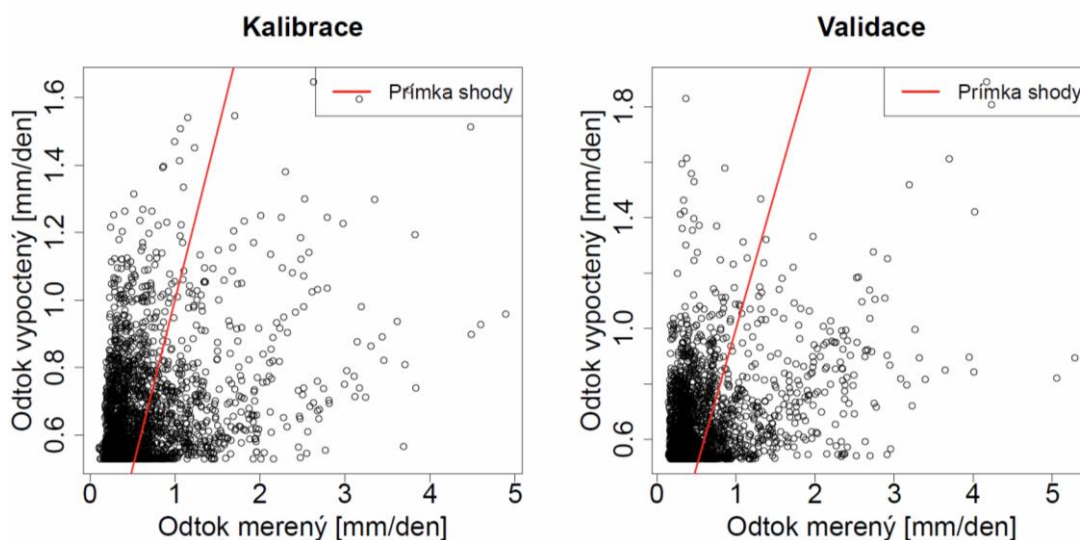
Obr. č. 10 Hydrogramy validace pro model LRM_S_O

Na obrázku č. 10 je vidět červená křivka simulace na celém souboru validačních dat a na vybrané největší validační vlně, která zcela nekoresponduje s černou křivkou měřených dat a na největší naměřenou srážko-odtokovou událost téměř nereaguje.

2. model LRM_API_O

Výsledná rovnice: $y = 0,5294 + 0,0168 \text{ api}$

Snahou při návrhu tohoto modelu, bylo jednoduchou metodou zahrnout nasycenost povodí z předešlých srážek do bilance simulovaných odtoků. API hodnota byla zkoušena při různém počtu dní (1-9) počítaných zpět od předchozí srážky. Nejvyšších hodnot koeficientu NS dosahoval index API pro 5 dní počítaných zpět, ale ani v tomto případě se hodnota NS nedostala přes 10% hranici účinnosti. Evapotranspirační konstanta $C=0,93$ pro ČR je pevně daná (Jeníček, 2005) a upravit model tímto směrem by nebylo korektní. Na obrázku č. 11 je korelační závislost odtoků a přímka shody, která udává lineární vztah.



Obr. č. 11 Bodové grafy pro model LRM_API_O

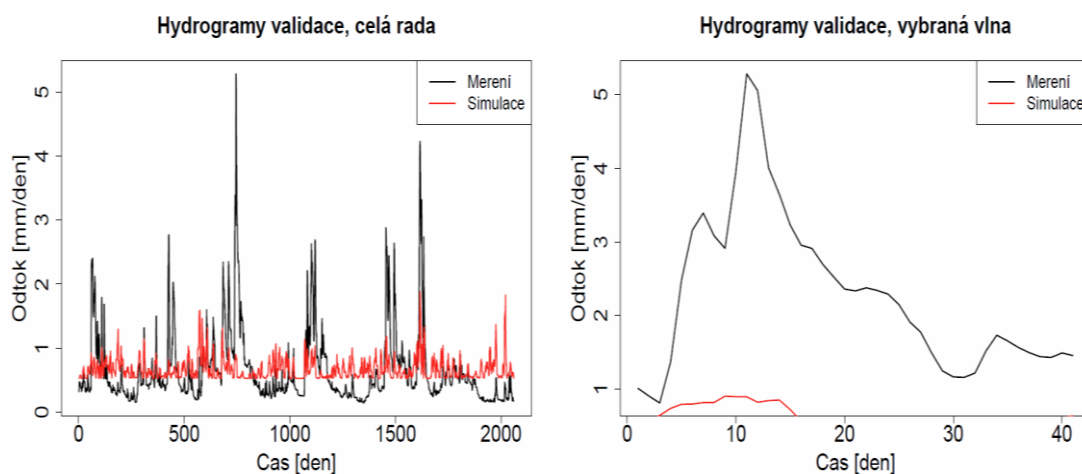
Rovněž byla neúspěšně zkoušena transformace vstupních dat. Stejně jako u předešlého modelu se i zde projevil značný vliv letního a zimního období. Podle (Daňhelka, 2003) API není vhodný u modelů, kde data obsahují nevýrazné odtokové vlny, ani pro simulaci zimních a jarních měsíců, které jsou spojené s táním sněhu, protože v těchto případech přestává reprezentovat aktuální vláhové poměry v povodí,

což se v případě modelu LRM_API_O potvrdilo. Výběr srážko-odtokových událostí by se musel omezit pouze na vegetační období.

Tab. č. 4 Výsledné hodnoty objektivních kritérií pro model LRM_API_O

	ME (mm/den)	MAE (mm/den)	MSE (mm/den) ²	RMSE (mm/den)	NS
Kalibrace	0	0,371975	0,292823	0,541131	0,085811
Validace	-0,026209	0,377438	0,297586	0,545515	0,099449

Příslušná tabulka č. 4 pro tento model opět udává vysoké hodnoty odchylek a nízkou hodnotu NS, která se v případě validace modelu blíží k 10 % hodnotě. Střední absolutní chyba MAE při validaci dosahuje hodnoty 0,38 mm/den, přičemž naměřené průměrné hodnoty odtoku, respektive medián, v uzavíracím profilu za celých 10 let je 0,46 mm/den (tabulka č. 2 Vstupní data).



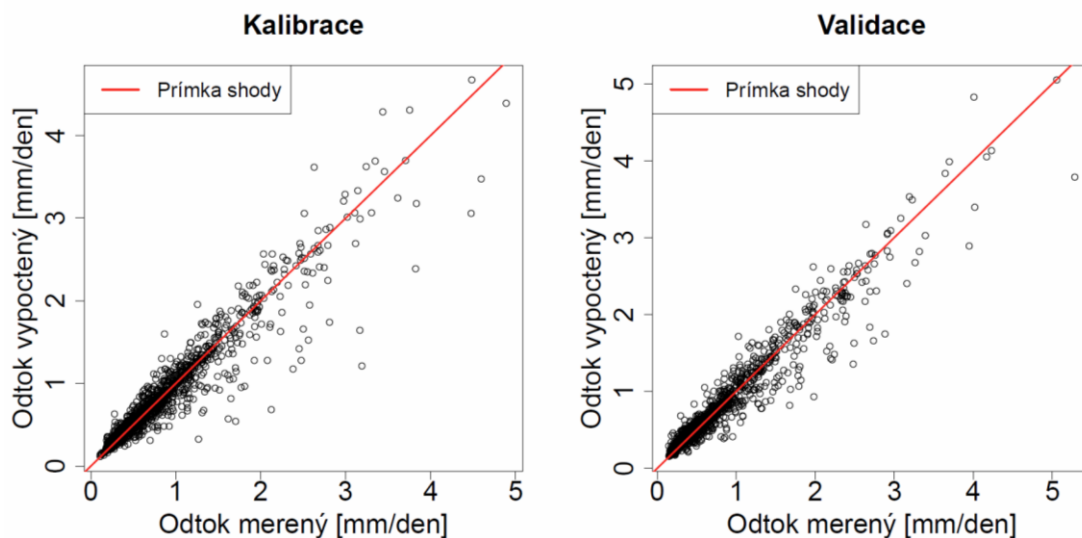
Obr. č. 12 Hydrogramy validace pro model LRM_API_O

Obrázek č. 12 znázorňuje, že simulace odtoku je o trochu lepší než v případě prvního lineárního modelu LRM_S_O, ale stále nedostatečná k praktickému použití. Stejně jako v prvním případě, model nereaguje na nižší průtoky, které nadhodnocuje a v případě větších odtoků zase výrazně podhodnocuje. Na detailu je vidět, že na výraznější událost reaguje velmi slabě.

3. model LRM_SO_O1

Výsledná rovnice: $y = 0,0137 + 0,952 \text{ odtok1} + 0,0099 \text{ srážky}$

Téměř nejlepších výsledků ze všech návrhů modelů dosahoval tento jednoduchý model s jednodenní predikcí.



Obr. č. 13 Bodové grafy pro model LRM_SO_O1

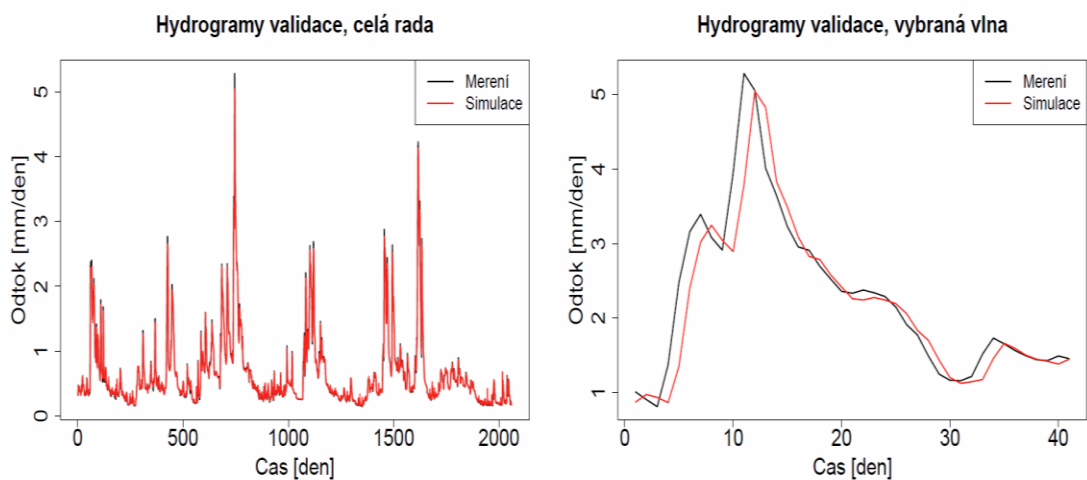
Srážky se ukázaly jako proměnná s marginálním vlivem na předpověď, koeficient srážky byl roven 0,0099, jak je vidět z výsledné rovnice. Rozhodující proměnnou se ukázaly být jednodenní předchozí odtoky (koeficient 0,952), byla ale patrná silná autokorelace mezi odtoky, což se potvrdilo i u ostatních srážko-odtoko-odtokových modelů. Obrázek č. 13 ukazuje velmi významnou korelaci, především v případě validace. Přímka lineárního modelu dosahuje téměř 45°, tedy dokonalé shody.

Tab. č. 5 Výsledné hodnoty objektivních kritérií pro model LRM_SO_O1

	ME (mm/den)	MAE (mm/den)	MSE (mm/den) ²	RMSE (mm/den)	NS
Kalibrace	0	0,07315	0,025574	0,159918	0,919151
Validace	0,000325	0,065895	0,018716	0,136807	0,943361

Tabulka č. 5 udává výrazně lepší hodnoty než v předešlých dvou případech. Koeficient NS dosahuje hodnot přes 90 %. Hodnoty absolutní chyby MAE jsou pětikrát nižší než u prvního a druhého modelu a pohybují se v setinách mm/den.

Rozptyl odchylek RMSE mezi předpovězenými a skutečně naměřenými hodnotami byl u kalibrace 0,16 a u validace 0,14 mm/den.

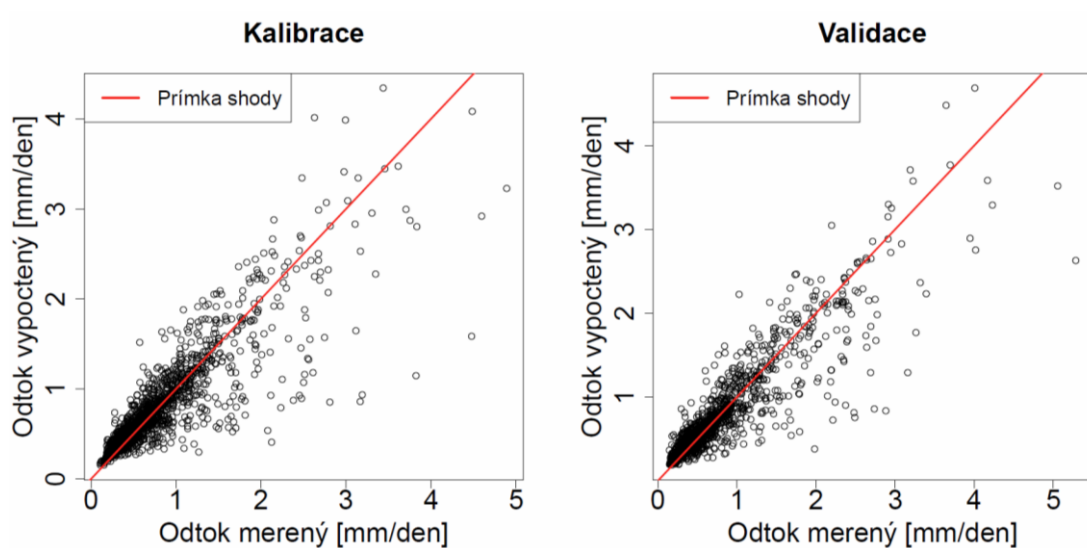


Obr. č. 14 Hydrogramy validace pro model LRM_SO_O1

Obrázek č. 14 ukazuje, jak simulované odtoky z velkou přesností napodobují skutečně naměřené odtoky. Na detailu největší naměřené srážko-odtokové vlny je lépe vidět přesnot predikce.

4. model LRM_SO_O2

Výsledná rovnice: $y = 0,0599 + 0,875 \text{ odtok2} + 0,0126 \text{ srážky}$



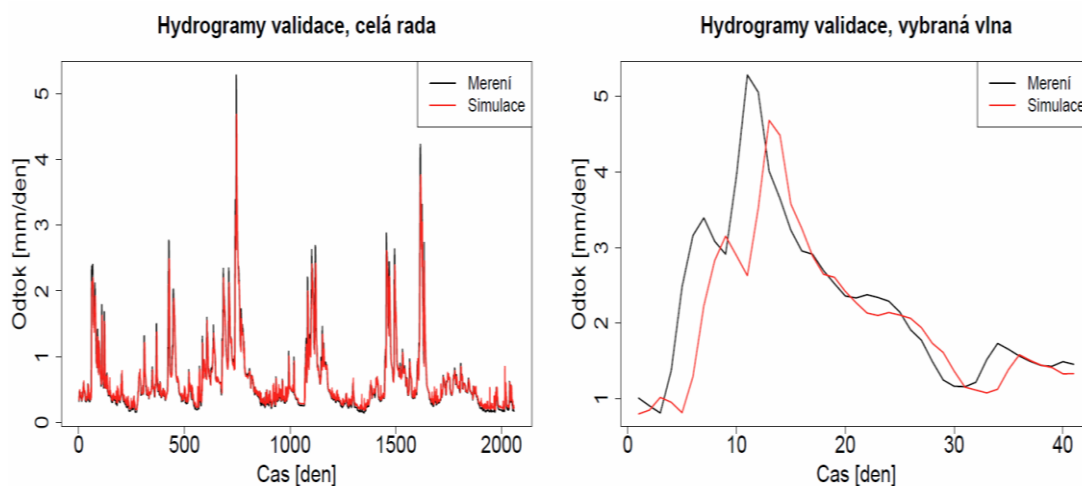
Obr. č. 15 Bodové grafy pro model LRM_SO_O2

Dvoudenní predikce poskytla také velmi dobré výsledky. Simulované průtoky nabývají proti měřeným průtokům určitého zpoždění. Z podstaty věci vyplývá, že predikce na více dní bude čím dál méně přesnější než predikce jednodenní, jak bylo popsáno v metodice u Nash – Sutcliffe koeficient účinnosti. Zvolený model podle délky předpovědi je tedy věci praktického použití a nároku na přesnost simulace průtoků. Z výsledné rovnice je stále patrný významně větší vliv na lineární model z předchozích dvoudenních odtoků (koeficient 0,875) než vliv srážek (koeficient 0,0126).

Tab. č. 6 Výsledné hodnoty objektivních kritérií pro model LRM_SO_O2

	ME (mm/den)	MAE (mm/den)	MSE (mm/den) ²	RMSE (mm/den)	NS
Kalibrace	0	0,129404	0,068333	0,261406	0,781994
Validace	-0,000633	0,117854	0,055669	0,235944	0,831534

Tabulka hodnot kritérií č. 6 udává koeficient účinnosti NS pro validaci 83%, což je velmi uspokojivá hodnota predikce. Rozptyl odchylek RMSE u tohoto modelu stoupá k hodnotě 0,26 mm/den u kalibrační poloviny dat, respektive 0,24 mm/den u validační poloviny dat.



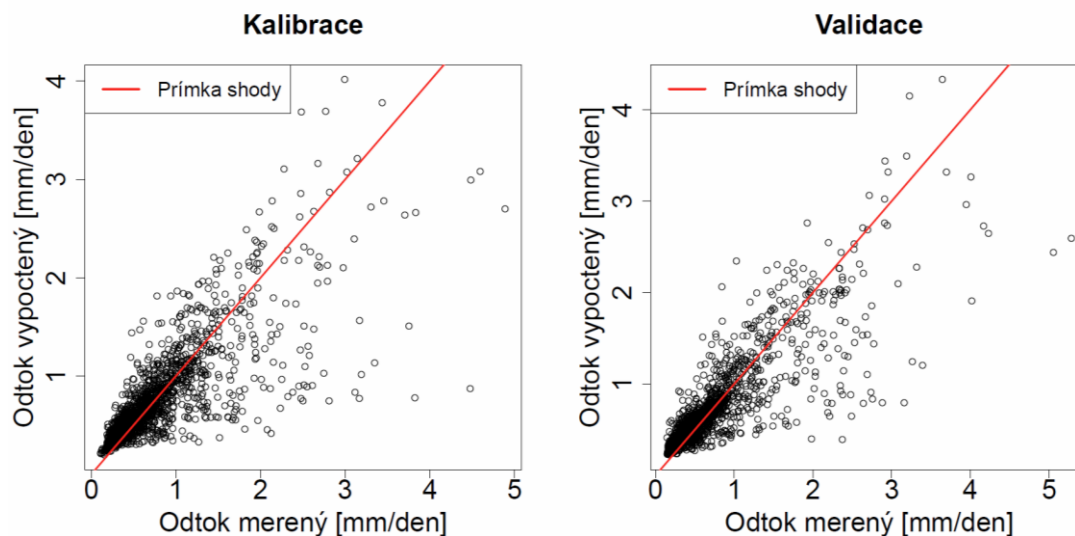
Obr. č. 16 Hydrogramy validace pro model LRM_SO_O2

Obrázku č. 16 představuje hydrogramy pro celou škálu validačních dat a znázorňuje největší vlnu, na které je znát mírné podhodnocení a zpoždění simulace oproti skutečným průtokům.

5. model LRM_SO_O3

Výsledná rovnice: $y = 0,1093 + 0,7986 \text{ odtok3} + 0,0131 \text{ srážky}$

Z provedené validace lze konstatovat, že model s třídní predikci stále ještě poskytoval uspokojivé výsledky. Na výsledné rovnici je patrné, že se snižuje vliv předchozích odtoků a mírně roste vliv srážek. Vliv srážek je ale stále velmi nízký a za určitých předpokladů by bylo možné tento parametr zanedbat.



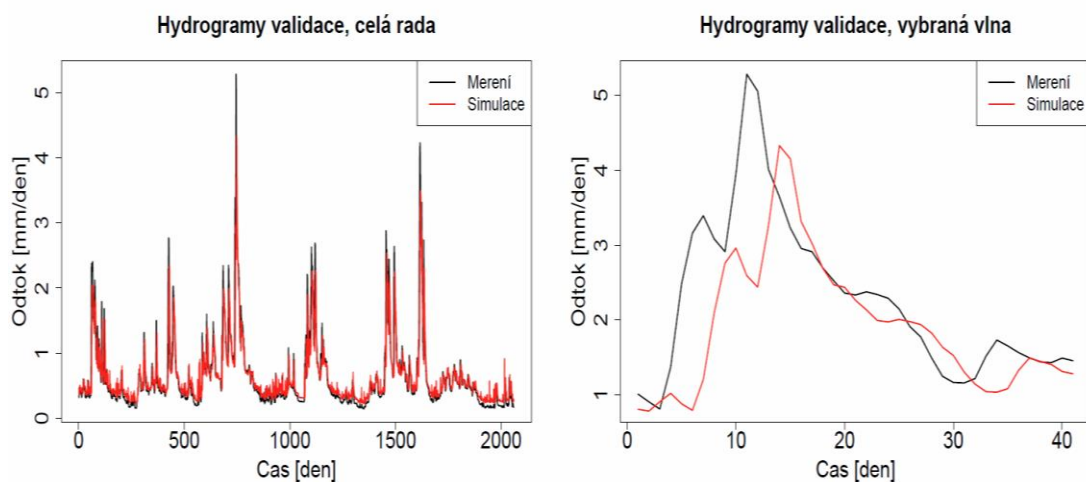
Obr. č. 17 Bodové grafy pro model LRM_SO_O3

Na obrázku č. 17 je znát klesající korelace mezi měřeními a vypočtenými odtoky. Roste počet odlehlých bodů (outliers), které mohou významně ovlivnit rovnici výsledného modelu.

Tab. č. 7 Výsledné hodnoty objektivních kritérií pro model LRM_SO_O3

	ME (mm/den)	MAE (mm/den)	MSE (mm/den) ²	RMSE (mm/den)	NS
Kalibrace	0	0,172392	0,105991	0,325563	0,657693
Validace	-0,00154	0,156912	0,089919	0,299866	0,727887

Validace podle koeficientu účinnosti NS dosahovala 73%, jak je vidět v tabulce č. 7. Hodnoty absolutní chyby MAE se pohybovaly mezi 0,15 – 0,17 mm/den. Roztyl odchylek RMSE stoupl k hodnotě 0,3 mm/den.



Obr. č. 18 Hydrogramy validace pro model LRM_SO_O3

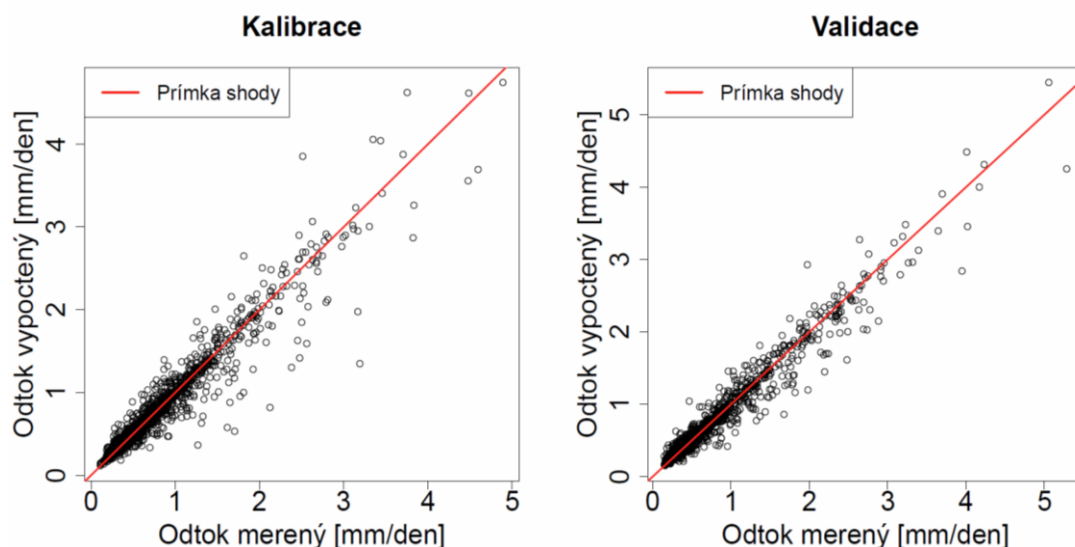
Obrázek č. 18 potvrzuje očekávané zvýšení zpoždění vypočtených odtoků za skutečně změřenými. Zvýšila se necitlivost modelu, která se projevuje podhodnocením větších srážko-odtokových událostí a nadhodnocením nízkých průtoků.

6. model LRM_SO3_O1

Výsledná rovnice:

$$y = 0,0204 + 1,3862 \text{ odtok1} - 0,6028 \text{ odtok2} + 0,1625 \text{ odtok3} + 0,0085 \text{ srážky}$$

Poslední model s jednodenní předpovědí na základě odtoků sledovaných tři dny zpátky poskytl nejpřesnější simulaci průtoku. Koefficient jednodenních odtoků má ve výsledné rovnici největší vliv a koeficient srážky se blíží k zanedbatelným hodnotám, stejně jako u třetího modelu.

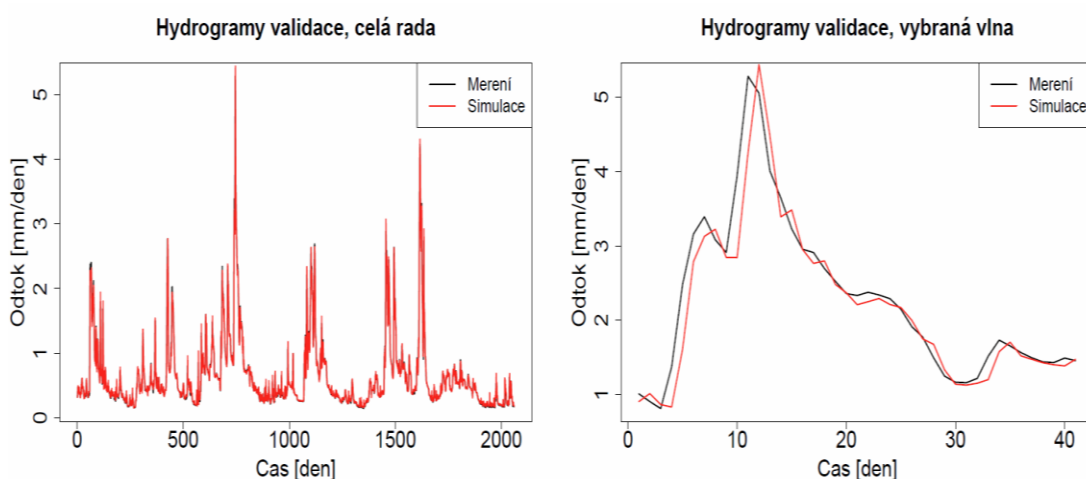


Obr. č. 19 Bodové grafy pro model LRM_SO3_O1

Tab. č. 8 Výsledné hodnoty objektivních kritérií pro model LRM_SO3_O1

	ME (mm/den)	MAE (mm/den)	MSE (mm/den) ²	RMSE (mm/den)	NS
Kalibrace	0	0,067002	0,020858	0,144422	0,932639
Validace	-0,00017	0,059112	0,013392	0,115724	0,959473

Koeficient účinnosti NS dosahoval při validaci téměř 96% skutečných odtoků, což je patrné z tabulky č. 8. Absolutní chyba MAE se pohybovala kolem hodnoty 0,06 mm/den a rozptyl odchylek RMSE byl v případě validace 0,12 mm/den.



Obr. č. 20 Hydrogramy validace pro model LRM_SO3_O1

Na obrázku č. 20 je u přehledového grafu pro celý validační soubor červená křivka vypočtených dat s černou křivkou naměřených dat téměř v zákrytu a na detailu největší validační vlny drží křivky také téměř shodný tvar.

Z uvedeného přehledu je zřejmé, že k modelování srážko-odtokových procesů je k dispozici celá řada přístupů, kterými je možné řešit úkoly spojené s problematikou povodní. Pro řešení konkrétního povodí je nejdůležitější výběr vhodného modelu. Ten musí odpovídat charakteru hydrologického zadání. Je potřeba také dopředu vědět, jaká data jsou dostupná. Při zpracování dat a interpretaci výsledků je výhodná schopnost komunikace modelu, či modelového systému s geoinformačními systémy. Aplikace hydrologického modelu je většinou finančně i časově velmi náročnou záležitostí a je dobré zvážit, zda se tyto investované prostředky vyplatí (Jeniček, 2005).

5. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo na základě analýzy vstupních dat navrhnout a aplikovat vybrané hydrologické modely. Zvoleno bylo nakonec šest modelů, které nepotřebují složité analýzy vstupních dat, popřípadě mnoho údajů (parametrů) pro svoji tvorbu. Vybraná část povodí Ohře patří svou rozlohou 1850,75 km² a délkou rozvodnice 248,85 km ke středně velkým. Data byla poskytnuta vodohospodářským dispečinkem povodí Ohře.

Za zvolením uzavíracího profilu stanice Citice byla snaha, aby hydrologická data nebyla ovlivněna napouštěním jezer Medard a Most v letech 2008-2014. Každá nádrž a regulační prvek může velmi výrazně ovlivňovat odtok, to znamená zkreslovat výsledný model. Na sledovaném horním toku Ohře jsou dvě vodní nádrže. V Německu je to Weißerstädter See a na české straně Skalka. Na pravostranném přítoku Ohře, říčce Odrava, je to ještě vodní nádrž Jesenice. Dle (Michal Tanajewski, II. 2015, in litt.) nemá z praktického hlediska nádrž Weißerstädter See vliv na odtokové poměry v Citicích. Tato nádrž ovládá horní povodí řeky Ohře a její transformační účinek bude ovlivňovat průtoky maximálně jen několik kilometrů po toku. Vliv nádrží Skalka a Jesenice na profil Citice je. Tyto nádrže mají vliv na určení kulminací povodní a celkově vyrovnávají krátkodobé rozkolísání průtoků. Pokud jsou počítány například měsíční bilance objemů, jejich účinek na tyto objemové bilance už není veliký.

Z provedených simulací a srovnání pomocí objektivních kritérií se ukázalo, že pro povodí zvolených parametrů, se nehodí jednoduché modely, které jsou postaveny na srážkových úhrnech, popřípadě na nasycenosti povodí, které je vyhodnoceno ze srážek pomocí metody API. Srážkové úhrny se ukázaly jako parametr s marginálním vlivem na predikci odtoku v uzavíracím profilu stanice Citice. Významně lepších výsledků se dosáhlo u modelů srážko-odtok-odtokových, které počítaly s předcházejícími odtoky. Tyto odtoky lze v jistém smyslu považovat za ukazatele předcházející nasycenosti povodí. Nejlepších výsledků dosáhly modely s jednodenní predikcí, kde se výsledné hodnoty pohybovaly při validaci kolem 95% skutečnosti reálně naměřených odtoků na uzavíracím profilu. Úplně nejvyšší hodnoty koeficientu účinnosti NS dosáhl srážko-odtok-odtokový model LRM_SO3_O1 s jednodenní predikcí, který počítal se srážkami a třídenními předchozími odtoky. Nevýhodou těchto modelů je však silná autokorelace mezi odtoky. Tento jev je

zřetelně vidět na koeficientech rovnic pro tyto modely – srážky mají koeficienty nízké, zatímco předchozí odtoky vysoké. Důsledkem je predikce řady průtoků, kde křivka má stejný tvar jako řada měřených průtoků, ale je jen posunutá v čase. Otázkou také zůstává, jak by vypadala simulace (hodnota NS) v případě opravdu extrémní srážko-odtokové události, například 20leté vody, která se v naměřených datech nevyskytuje.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

BEVEN K. J., 2001: *Rainfall runoff modeling*. The Primer, John Wiley and Sons, 372 s.

BLAŽEK V., 2006: *Voda v České republice*. Editor Jan Němec, Josef Hladný, Ministerstvo zemědělství Praha, vydal Consult, 253 s., ISBN 80-903-4821-1.

BLAŽKOVÁ Š., 1993: *Srážkoodtokové modelování založené na principu jednotkového hydrogramu*. Výzkumný ústav vodohospodářský TGM Praha, 114 s.

BRÁZDIL R. A KOLEKTIV, 2005: *Historické a současné povodně v České republice*. Masarykova univerzita Brno ve spolupráci s Českým hydrometeorologickým ústavem v Praze, 1. vydání, s. 29-30, ISBN 80-210-3864-0.

COHEN Y., COHEN Y. J., 2008: *Statistics and data with R: an applied approach through examples*. Chichester U.K., Wiley, 618 s., ISBN 0470758058.

DE MICHEAUX P. L., DROUILHET R., LIQUET B., 2014: *The R software: fundamentals of programming and statistical analysis*. New York: Springer-Verlag New York Inc., 628 s. ISBN 9781461490197.

DAŇHELKA J. A KOLEKTIV, 2003: *Posouzení vhodnosti srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR*. ČZU a ČHMU Praha.

DIERMANSE F. L. M., 2001: *Physically based modelling of rainfall-runoff processes*. Ph.D. thesis, Delft University Press, The Netherlands.

DINGMAN L. S., 2002: *Physical hydrology*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 646 s., ISBN 01-309-9695-5.

DOOGE J. C. I., 2003: *Linear Theory of Hydrologic Systems*. 1.vyd. Katlenburg-Lidau, 327s., ISBN 3-936586-10-1.

HAVLÍČEK V., 2014: *Počítačové zpracování dat – úvod do práce s R*. ČZU Praha, dostupné na Netstorage, 91 s.

HENDL J., 2012: *Přehled statistických metod zpracování dat/analýza a metaanalýza dat*. Portál s.r.o., Praha, 4. rozšířené vyd., 736 s., ISBN 978-80-262-0200-4.

- HORÁČEK S., 2006:** *Analýza srážko-odtokových událostí povodí Morava 2.* Diplomová práce, Nepublikováno, KVH FLE ČZU Praha, 70 s.
- HRÁDEK F., KUŘÍK P., 2008:** *Hydrologie.* 3. vydání, ČZU Praha, 280 s., ISBN 978-80-213-1744-4.
- JANEČEK M. A KOLEKTIV, 2002:** *Ochrana zemědělské půdy před erozí.* ISV nakladatelství Praha, 1. vydání, 201 s., ISBN 85866-85-8.
- JENÍČEK M., 2005:** *Možnosti využití srážko-odtokových modelu na malých a středně velkých povodích.* In Langhammer J. (ed.), PrF UK Praha, s.108 -126.
- KABACOFF R., 2011:** *R in action: data analysis and graphics with R.* Shelter Island, New York: Manning, 447 s., ISBN 19-351-8239-0.
- KOVÁŘ P., 1990:** *Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích.* Vysoká škola zemědělská v Praze, 136 s.
- KOHLER A. M., LINSLEY K. R., 1951:** *Predicting the runoff from storm rainfall.* Weather Bureau, US Department of Commerce, Research Paper, No.34, Washington.
- MIHÁLÍKOVÁ M., 2011:** *Pedotransferové funkce pro odhad hydrofyzikálních vlastností půd.* Disertační práce, Nepublikováno, ČZU Praha, 91 s.
- MOORE D. S., 2010:** *The basic practice of statistics.* 5th ed., New York, Freeman, ISBN 14-292-2426-6.
- PEKÁR S., BRABEC M., 2012:** *Moderní analýza biologických dat 2. Lineární modely s korelacemi v prostředí R.* 1. vyd., Masarykova universita Brno, 256 s., ISBN 978-80-210-5812-5.
- RAO C. R., TOUTENBERG H., SALABH C., HEUMANN CH., 2008:** *Linear models and generalizations: least squares and alternatives.* 3rd extended ed., New York: Springer, 594 s., ISBN 9783540742265
- ŘEDINOVÁ J., 2004:** *Analýza maximálních průtoků v povodích Modrava 2, Morávka a Spůlka.* Diplomová práce, Nepublikováno, KVH FLE ČZU Praha, 79 s.
- SINGH V. P., 1988:** *Hydrologic systems.* Prentice Hall, New Jersey, 1. Title, Hydology – Mathematical models, s. 28-29, ISBN 0-13-448051

SHUMWAY R. H., STOFFER D. S., 2006: *Time series analysis and its applications: with R examples*. 2nd [updated] ed. New York, Springer, 575 s., ISBN 03-872-9317-5.

STARÝ M., 2005: *Hydrologie – modul 02*. Vysoké učení technické Brno, s. 11.

STEINHART M., 2010: *Aplikace srážko-odtokového modelu Boussmo*. Diplomová práce, Nепublikováno, KVH FLE ČZU Praha, 103 s.

VAMPOLOVÁ J., 2009: *Metoda nejmenších čtverců*. Bakalářská práce, Nепublikováno, Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 90 s.

WILDERER P., 2011: *Treatise on water science*. Editor-in-chief, vyd. Stefan Uhlenbrook, Amsterdam, Elsevier, *The Science of Hydrology*, 2. svazek, ISBN 9780444531995.

ZEMAN E., 1994: *Hydroinformatika a hydrologické modely*. Habilitační práce, ČVUT Praha, 91 s.

POH, 2014: Povodí Ohře státní podnik, Chomutov, online: <http://www.poh.cz/>, cit. 12.11.2014.

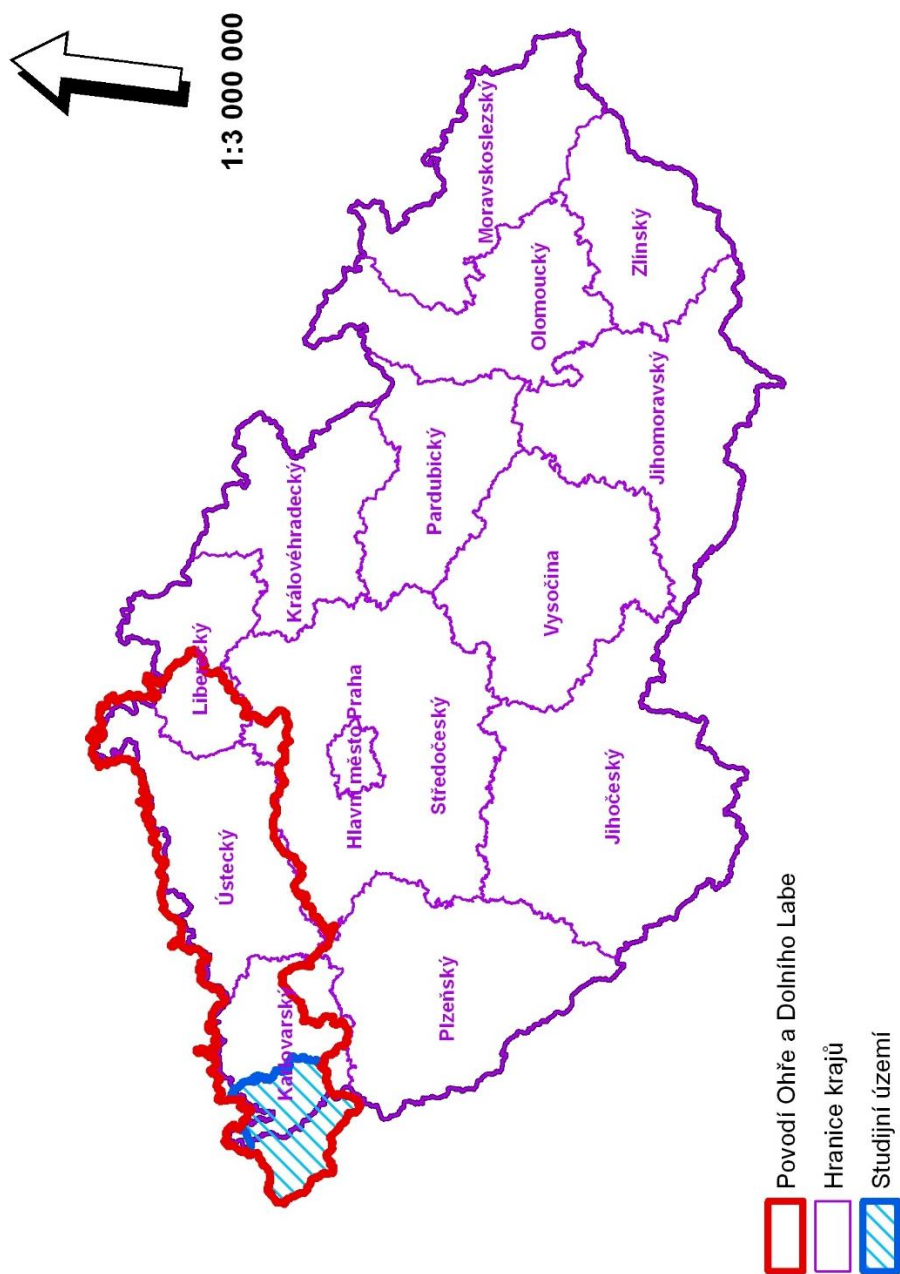
ČHMÚ, 2015: Český hydrometeorologický ústav, online: http://portal.chmi.cz/portal/dt?action=content&provider=JSPTabContainer&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_5_Uzemni_srazky&nc=1&portal_lang=cs#PP_Uzemni_srazky, cit. 4.4.2015.

7. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1 Schéma celkového odtoku (převzato Dooge, 2003)	12
Obr. č. 2 Hydrogram průtokové vlny (převzato Hrádek et Kuřík, 2008).....	13
Obr. č. 3 Schéma rozdělení deterministických modelů (převzato Kovář, 1990)	19
Obr. č. 4 Schéma rozdělení modelů podle (převzato Singh, 1988).....	20
Obr. č. 5 Stanice Citice (foto Zadražil, 2015).....	23
Obr. č. 6 Průměrná měsíční výše srážek a průměrný měsíční odtok ve stejných jednotkách mm/den (převzato a upraveno POH, 2014)	25
Obr. č. 7 Boxploty kalibračních a validačních dat pro srážky a odtok	31
Obr. č. 8 Základní schéma tvorby modelů	32
Obr. č. 9 Kroskorelační grafy pro model LRM_S_O.....	37
Obr. č. 10 Hydrogramy validace pro model LRM_S_O.....	38
Obr. č. 11 Kroskorelační grafy pro model LRM_API_O	39
Obr. č. 12 Hydrogramy validace pro model LRM_API_O.....	40
Obr. č. 13 Kroskorelační grafy pro model LRM_SO_O1.....	41
Obr. č. 14 Hydrogramy validace pro model LRM_SO_O1	42
Obr. č. 15 Kroskorelační grafy pro model LRM_SO_O2.....	42
Obr. č. 16 Hydrogramy validace pro model LRM_SO_O2	43
Obr. č. 17 Kroskorelační grafy pro model LRM_SO_O3.....	44
Obr. č. 18 Hydrogramy validace pro model LRM_SO_O3	45
Obr. č. 19 Kroskorelační grafy pro model LRM_SO3_O1.....	45
Obr. č. 20 Hydrogramy validace pro model LRM_SO3_O1	46

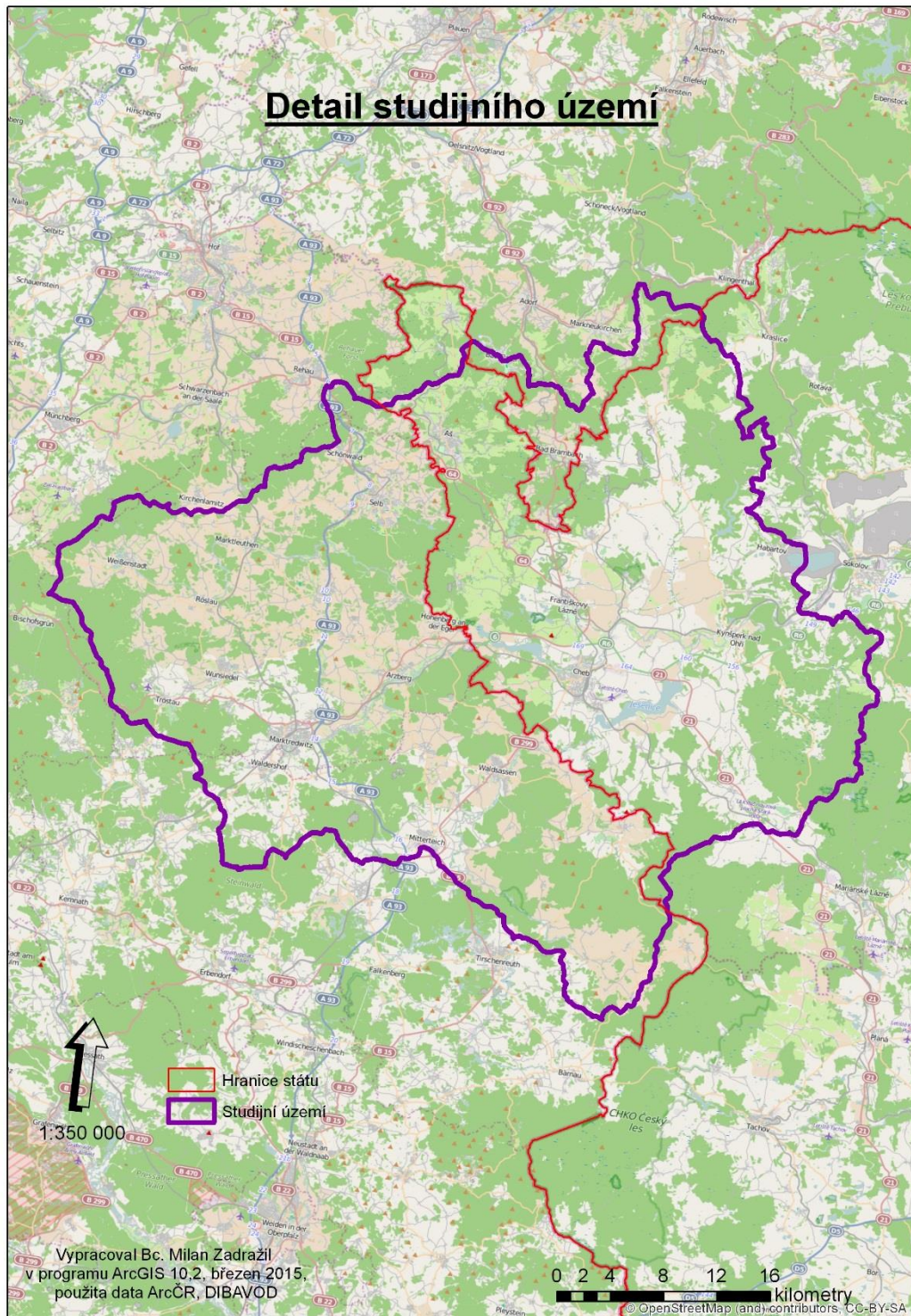
8. PŘÍLOHY

Schematická mapa se zákresem studijního území



Vypracoval Bc. Milan Zadražil v programu ArcGIS 10,2, březen 2015, použita data ArcČR500, DIBAVOD

Příloha II.



Příloha III.

SKRIPT PROGRAMU – 1. soubor FunctionDP.R

Příprava dat, celá řada, kalibrační a validační část, převod m3/s na mm/den

```
API = function(x, colID, k, lag){
  if(!is.data.frame(x)) stop("Input to API function is not a data.table")
  n = nrow(x)
  apiArr = embed(c(rep(NA,lag), x[[colID]]), lag+1)
  kPow = 0:lag
  kVec = k^kPow
  api = rowSums(apiArr[1:n, ] * kVec, na.rm = TRUE)
  api
}

dataPreparation = function(dataOhre, lagQ, lagAPI, startDate = '2003-01-01',
startValDate = "2009-01-01", area = 1.851e9){
  API = API(dataOhre, "Srazky", 0.93, lagAPI)
  Qmm = dataOhre[["Odtok"]]
  Qmm = (dataOhre[["Odtok"]] * 3600 * 24) / area * 1000
  n = nrow(data)
  endDate = as.Date(startDate) + (n - 1)
  datumy = seq(as.Date(startDate), as.Date(endDate), "day")
  t
  x = data.frame(Srazky = dataOhre[["Srazky"]][:(lagQ+1):n], API =
API[:(lagQ+1):n], Odtok = Qmm[:(lagQ+1):n])
  rownames(x) = datumy[:(lagQ+1):n]
  if(lagQ > 0){
    for(i in 1:lagQ){
      x[, (3 + i)] = Qmm[(lagQ+1-i):(n - i)]
    }
    names(x) = c(names(x)[1:3], paste0('Odtok_', 1:lagQ))
  }
}
```



```

xCal = x[1:(which(rownames(x) == (as.Date(startValDate) - 1))), ]
xVal = x[(which(rownames(x) == as.Date(startValDate))):nrow(x), ]
list(All = x, Calibration = xCal, Validation = xVal)
}
Kriteria = function (Qmer, Qsim) {
diff = Qmer - Qsim
me = mean(diff)
mae = mean(abs(diff))
mse = mean(diff^2)
rmse = sqrt(mse)
nsc = sum(diff^2)
nsj = sum((Qmer - (mean (Qmer)))^2)
ns = 1 - (nsc/nsj)
round(c(ME = me, MAE = mae, MSE = mse, RMSE = rmse, NS = ns), 6)
}
LRmodel = function(dataOhre, rovnice = NULL, model = NULL){
if(is.null(model)){
model = lm(rovnice, dataOhre)
}
predikce = predict(model, dataOhre)
hodnoceniKvality = Kriteria(dataOhre[["Odtok"]], predikce)
list(Kriteria = hodnoceniKvality, Predikce = predikce, Model = model)
}
## Bodové grafy
XYpoint = function(fileName, legendPosition, Xcal, Ycal, Xval, Yval, ...){
pdf(fileName, width = 14, height = 7)
par(mfrow = c(1,2), cex.main = 2, cex.axis= 2, cex.lab = 2, mar=c(5,5,5,3))
plot(Xcal, Ycal, main = 'Kalibrace', xlab = 'Odtok měřený [mm/den]', ylab = 'Odtok
vypočtený [mm/den]', ...)

```

```

abline(0, 1, col = 'red', lwd = 2)

legend(legendPosition, 'Přímka shody', col = 'red', lwd = 2, cex = 1.5)

plot(Xval, Yval, main = 'Validace', xlab = 'Odtok měřený [mm/den]', ylab = 'Odtok
vypočtený [mm/den]', ...)

abline(0, 1, col = 'red', lwd = 2)

legend(legendPosition, 'Přímka shody', col = 'red', lwd = 2, cex = 1.5)

dev.off()

}

```

Hydrogramy, celá řada a vybraná vlna, bude uváděna pouze validace

```

SimulationPlot = function(fileName, legendPosition, mereneVal, simulovaneVal,
...){

  poziceMax = which.max(mereneVal)

  rozsahVlny = (poziceMax - 10):(poziceMax + 30)

  vlnaMerena = mereneVal[rozsahVlny]

  vlnaSimulovana = simulovaneVal[rozsahVlny]

  pdf(fileName, width = 20, height = 7)

  par(mfrow = c(1,2), cex.main = 2, cex.axis = 2, cex.lab = 2, mar=c(5,5,5,3))

  plot(mereneVal, type = 'l', lwd = 2, main = 'Hydrogramy validace, celá řada', xlab =
'Čas [den]', ylab = 'Odtok [mm/den]', ...)

  lines(simulovaneVal, col = 'red', lwd = 2)

  legend(legendPosition, c('Měření', 'Simulace'), col = c('black', 'red'), lwd = c(2, 2),
cex = 1.5)

  plot(vlnaMerena, type = 'l', lwd = 2, main = 'Hydrogramy validace, vybraná vlna',
xlab = 'Čas [den]', ylab = 'Odtok [mm/den]', ...)

  lines(vlnaSimulovana, col = 'red', lwd = 2)

  legend(legendPosition, c('Měření', 'Simulace'), col = c('black', 'red'), lwd = c(2, 2),
cex = 1.5)

  dev.off()
}

```

SKRIPT PROGRAMU – 2. soubor UseModels.R

```
setwd("D:/Rdata")

source('./FunctionsDP.R')

dataOhre = read.table("Datacitice.txt", header = TRUE)

## 1. část Příprava dat a převod Q na mm/den

# funkce dataPreparation vrací list s celou řadou dat, kalibrační a validační set.

dataSO = dataPreparation(dataOhre, 0, 5)

dataSO1 = dataPreparation(dataOhre, 1, 5)

dataSO2 = dataPreparation(dataOhre, 2, 5)

dataSO3 = dataPreparation(dataOhre, 3, 5)

# Náhled struktury proměnných

str(dataSO)

head(dataSO[["Calibration"]])

str(dataSO1)

head(dataSO1[["Calibration"]])

str(dataSO2)

head(dataSO2[["Calibration"]])

str(dataSO3)

head(dataSO3[["Calibration"]])

## Odtokový součinitel za celé období

fi = sum(dataSO[["All"]][["Odtok"]]) / sum(dataSO[["All"]][["Srazky"]])

fi
```

2. část Tvorba modelů

Model LRM_S_O, kalibrace, validace

```
LRM_S_O_Cal = LRmodel(dataSO[["Calibration"]], rovnice = Odtok~Srazky)
```

```
LRM_S_O_Cal[["Kriteria"]]
```

```
LRM_S_O_Val = LRmodel(dataSO[["Validation"]], model =  
LRM_S_O_Cal[["Model"]])
```

```
LRM_S_O_Val[["Kriteria"]]
```

Model LRM_API_O, kalibrace, validace

```
LRM_API_O_Cal = LRmodel(dataSO[["Calibration"]], rovnice = Odtok~API)
```

```
LRM_API_O_Cal[["Kriteria"]]
```

```
LRM_API_O_Val = LRmodel(dataSO[["Validation"]], model =  
LRM_API_O_Cal[["Model"]])
```

```
LRM_API_O_Val[["Kriteria"]]
```

Model LRM_SO_O1, kalibrace, validace

```
LRM_SO_O1_Cal = LRmodel(dataSO1[["Calibration"]], rovnice =  
Odtok~Odtok_1+Srazky)
```

```
LRM_SO_O1_Cal[["Kriteria"]]
```

```
LRM_SO_O1_Val = LRmodel(dataSO1[["Validation"]], model =  
LRM_SO_O1_Cal[["Model"]])
```

```
LRM_SO_O1_Val[["Kriteria"]]
```

Model LRM_SO_O2, kalibrace, validace

```
LRM_SO_O2_Cal = LRmodel(dataSO2[["Calibration"]], rovnice =  
Odtok~Odtok_2+Srazky)
```

```
LRM_SO_O2_Cal[["Kriteria"]]
```

```
LRM_SO_O2_Val = LRmodel(dataSO2[["Validation"]], model =  
LRM_SO_O2_Cal[["Model"]])
```

```
LRM_SO_O2_Val[["Kriteria"]]
```

Model LRM_SO_O3, kalibrace, validace

```
LRM_SO_O3_Cal = LRmodel(dataSO3[["Calibration"]], rovnice =  
Odtok~Odtok_3+Srazky)
```

```
LRM_SO_O3_Cal[["Kriteria"]]
```

```
LRM_SO_O3_Val = LRmodel(dataSO3[["Validation"]], model =  
LRM_SO_O3_Cal[["Model"]])
```

```
LRM_SO_O3_Val[["Kriteria"]]
```

Model LRM_SO3_O1, kalibrace, validace

```
LRM_SO3_O1_Cal = LRmodel(dataSO3[["Calibration"]], rovnice =  
Odtok~Odtok_1+Odtok_2+Odtok_3+Srazky)
```

```
LRM_SO3_O1_Cal[["Kriteria"]]
```

```
LRM_SO3_O1_Val = LRmodel(dataSO3[["Validation"]], model =  
LRM_SO3_O1_Cal[["Model"]])
```

```
LRM_SO3_O1_Val[["Kriteria"]]
```

3. grafická část - Bodové korelační grafy

```
XYpoint('BodovyGraf_S_O.pdf', 'topright',
```

```
dataSO[["Calibration"]][["Odtok"]], LRM_S_O_Cal[["Predikce"]],
```

```
dataSO[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_S_O_Val[["Predikce"]])
```

```
XYpoint('BodovyGraf_API_O.pdf', 'topright',
```

```
dataSO[["Calibration"]][["Odtok"]], LRM_API_O_Cal[["Predikce"]],
```

```
dataSO[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_API_O_Val[["Predikce"]])
```

```
XYpoint('BodovyGraf_SO_O1.pdf', 'topleft',
```

```
dataSO1[["Calibration"]][["Odtok"]], LRM_SO_O1_Cal[["Predikce"]],
```

```
dataSO1[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_SO_O1_Val[["Predikce"]])
```

```
XYpoint('BodovyGraf_SO_O2.pdf', 'topleft',
```

```
dataSO2[["Calibration"]][["Odtok"]], LRM_SO_O2_Cal[["Predikce"]],
```

```
dataSO2[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_SO_O2_Val[["Predikce"]])
```

```
XYpoint('BodovyGraf_SO_O3.pdf', 'topleft',
        dataSO3[["Calibration"]][["Odtok"]], LRM_SO_O3_Cal[["Predikce"]],
        dataSO3[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_SO_O3_Val[["Predikce"]])
XYpoint('BodovyGraf_SO3_O1.pdf', 'topleft',
        dataSO3[["Calibration"]][["Odtok"]], LRM_SO3_O1_Cal[["Predikce"]],
        dataSO3[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_SO3_O1_Val[["Predikce"]])
```

Hydrogramy, celá řada a vybraná vlna, pouze validace

```
SimulationPlot('Hydrogramy_S_O.pdf', 'topright',
dataSO[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_S_O_Val[["Predikce"]])

SimulationPlot('Hydrogramy_API_O.pdf', 'topright',
dataSO[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_API_O_Val[["Predikce"]])

SimulationPlot('Hydrogramy_SO_O1.pdf', 'topright',
dataSO1[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_SO_O1_Val[["Predikce"]])

SimulationPlot('Hydrogramy_SO_O2.pdf', 'topright',
dataSO2[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_SO_O2_Val[["Predikce"]])

SimulationPlot('Hydrogramy_SO_O3.pdf', 'topright',
dataSO3[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_SO_O3_Val[["Predikce"]])

SimulationPlot('Hydrogramy_SO3_O1.pdf', 'topright',
dataSO3[["Validation"]][["Odtok"]], LRM_SO3_O1_Val[["Predikce"]])
```