



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

**SRÁŽKO-ODTOKOVÝ PROCES V PODMÍNKÁCH
KLIMATICKÉ ZMĚNY**

RAINFALL RUNOFF PROCESS IN TIME OF CLIMATE CHANGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kateřina Knoppová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DANIEL MARTON, Ph.D.

BRNO 2018

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce bylo sestavit koncepční srážko-odtokový model, který by byl schopen modelovat průtoky v podmínkách změny klimatu. V rámci práce byl po důkladném prověření možných variant sestaven uživatelský program Runoff Prophet, který je schopen simulace průtoků v závěrovém profilu libovolného povodí. Jedná se o deterministický lumped model s měsíčním krokem výpočtu, který z hydrologických jevů zohledňuje vlhkost půdy, evapotranspiraci, průtok podzemní vody a průtok v korytě vodního toku; jeho kalibrace funguje na principu diferenciální evoluce s koeficientem účinnosti modelu Nash-Sutcliffe jako kalibračním kritériem. Vyvinutý software byl otestován na zájmovém povodí Vír I. a výsledky aplikace vyhodnoceny z hlediska charakteru teplot, srážek a průtoků v měrném profilu Dalečín ve vzdálené budoucnosti podle klimatického scénáře A1B SRES, implementovaného v generátoru počasí LARS-WG.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hydrologický srážko-odtokový model, diferenciální evoluce, koncepční lumped model, LARS-WG, Runoff Prophet, změna klimatu

ABSTRACT

The aim of The Diploma Thesis was to compile a conceptual rainfall-runoff model, that would be eligible to model discharge in conditions of climate changes. After thorough verifications of possible variants, user program Runoff Prophet that is eligible to simulate discharge in closing profile of any river basin was compiled within this paper. Runoff Prophet is deterministic lumped model with monthly computation time step and from the hydrologic phenomena it takes soil moisture, evapotranspiration, groundwater flow and the watercourse flow into account. Its calibration is based on the differential evolution principle with Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient as the calibration criterion. Developed software was tested on Vír I. catchment basin and the results of this probe were evaluated from viewpoints of air temperature, precipitation and discharge characteristics in the Dalečín measurement river cross section in distant future according to A1B SRES climate scenario, implemented in LARS-WG weather generator.

KEYWORDS

Hydrological rainfall-runoff model, climate change, conceptual rainfall-runoff model, differential evolution, LARS-WG, Runoff Prophet

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Kateřina Knoppová *Srážko-odtokový proces v podmínkách klimatické změny*. Brno, 2018. 60 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 8. 1. 2018

Bc. Kateřina Knoppová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu své diplomové práce Ing. Danielu Martonovi, Ph.D. za to, že mi byl vždy skvělým mentorem, vzorem, učitelem, a když šlo do tuhého, tak i rádcem a psychickou podporou; lepšího školitele jsem si nemohla přát. Dále bych chtěla poděkovat ČHMÚ Brno za poskytnutá meteorologická a hydrologická data a Ing. Petru Janálovi, Ph.D. za podnětné připomínky. Velký dík patří samozřejmě i mé rodině, bez jejíž podpory by tato práce nespátřila světlo světa.

1 OBSAH

2	Úvod.....	1
3	Současný stav poznání	2
3.1	Srážko-odtokové modely	2
3.1.1	Klasifikace modelů.....	2
3.1.2	Současné srážko-odtokové modely	3
3.2	Klimatická změna	4
3.2.1	Klimatické scénáře	5
3.2.2	Klimatické modely	5
3.2.3	Generátory počasí.....	6
4	Cíl práce	8
5	Metoda.....	9
5.1	Zjednodušující předpoklady	9
5.2	Vstupní data.....	10
5.2.1	Vstupní data pro kalibraci	10
5.2.2	Vstupní data pro predikci	10
5.3	Srážko-odtokové rovnice	10
5.3.1	Wangův model	10
5.3.2	Bilanční model	12
5.4	Výpočet evapotranspirace.....	14
5.4.1	Thornthwaite	14
5.4.2	Blaney-Criddle	16
5.5	Kalibrace modelu.....	17
5.5.1	Gradientní metoda	17
5.5.2	Diferenciální evoluce	17
5.5.3	Kalibrační kritérium Nash-Sutcliffe.....	19
6	Praktická aplikace	20
6.1	Příprava dat.....	20
6.2	Porovnání srážko-odtokových rovnic	21
6.3	Sestavení modelu	23
6.3.1	Kalibrace	23
6.3.2	Výpočet evapotranspirace	23

6.3.3	Počet koeficientů	23
6.3.4	Vyhodnocení	24
6.4	Runoff Prophet	25
6.4.1	Charakteristika programu	25
6.4.2	Algoritmus.....	26
6.4.3	Práce s programem	29
6.5	Aplikace Runoff Prophet	35
6.5.1	Vstupní data pro kalibraci	35
6.5.2	Vstupní data pro validaci.....	36
6.5.3	Vstupní data pro predikci	36
6.5.4	Lokalizace	39
6.5.5	Kalibrace	40
6.5.6	Validace.....	40
6.5.7	Predikce	41
6.5.8	Interpretace výsledků	41
6.5.9	Výsledky.....	41
7	Shrnutí výsledků.....	44
7.1	Sestavení modelu.....	44
7.1.1	Výsledky kalibrace	44
7.1.2	Výsledky validace	45
7.2	Aplikace softwaru Runoff Prophet	45
8	Závěr.....	48
9	Seznam citací.....	51
10	Seznam použitých zdrojů	53
11	Seznam použitých zkratk a symbolů	56
12	Seznam obrázků	58
13	Seznam tabulek	59
14	Seznam příloh.....	60

2 ÚVOD

V současné době zaznamenáváme na našem území prokazatelné změny klimatu, které se zřejmě budou výhledově dále prohlubovat. Stále častěji se potýkáme s následky extrémního počasí jako jsou povodně, způsobené intenzivními srážkami, a sucha, která vedou k alarmujícímu snížení zásob povrchové i podzemní vody. Z ročního chodu počasí se vytrácí typická sezónnost mírného podnebného pásu. Nedávný rok 2015 byl z hlediska meteorologických měření v globálním měřítku extrémní. I v rámci České republiky dosahoval rekordů; průměrná roční teplota dosáhla podle Českého hydrometeorologického ústavu $9,4^{\circ}\text{C}$, což je o $1,9^{\circ}\text{C}$ více, než dlouhodobý normál teploty. Zaznamenat jsme také mohli rekordně nízký roční úhrn srážek pouze 532 mm, což znamená snížení o 21 % oproti dlouhodobému normálu [1].

Je zřejmé, že klima je silně provázáno s hydrologickým režimem krajiny, ve kterém také zaznamenáváme výrazné změny. Zásoby vody jsou pro lidstvo jednou z nejdůležitějších podmínek existence a jejich úbytek má většinou za následek nebezpečnou nerovnováhu ve společnosti. Proto je důležité umět budoucí vodní bilanci předpovídat a mít tak možnost podniknout v předstihu vhodná opatření.

Predikce hydrologické situace, potažmo průtoku, je možná pouze pokud jsme schopni popsat fungování srážko-odtokového procesu v povodí. Proces transformace srážky na odtok je ovlivňován řadou faktorů od velikosti a topografie povodí, typu hydrografické sítě, geologie a půdních vlastností, využití území až po charakter srážky, nasycení povodí a teplotní poměry. Jedná se o velmi složitý přírodní koloběh, a proto není nalezení vztahů mezi meteorologickými daty a odtokem vůbec jednoduché.

Nástroji, které dokáží tento proces simulovat, jsou srážko-odtokové modely. Díky nim jsme schopni na základě informací o srážkách, teplotách a vlastnostech povodí predikovat příslušné hydrologické veličiny. V dnešní době existuje spousta možností, jak předpovídat změny meteorologických i krajinných prvků. Tato data můžeme použít jako vstupy do hydrologických modelů a získat tak informace o eventuelních směrech vývoje vodní bilance krajiny v budoucích obdobích.

Díky modelování srážko-odtokového procesu můžeme nejen odhadnout budoucí průtoky ve vodních tocích, ale například i určit předpokládané změny úrovně hladiny v konkrétních vodních nádržích, upravovat návrhy objemů nádrží s ohledem na budoucí klima nebo posoudit objemy stávající.

3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Klima planety Země se v současné době zdatelně mění a tyto změny mají výrazný vliv na hydrologický režim krajiny. Společnost na tento fakt reaguje snahou co nejlépe popsat situaci, která může nastat v budoucnu, aby se na ni mohla včas připravit a případně ji zmírnit. Pouze pokud budeme schopni popsat směr vývoje klimatu, bude možné zavést efektivní mitigační opatření, představující zejména redukci vypouštění skleníkových plynů, zvyšování zalesnění, využívání obnovitelných zdrojů, snížení plýtvání elektrickou energií a další technologické a organizační změny. Úplné zastavení klimatických změn je ale nemožné, proto je třeba se jejich dopadům přizpůsobit, ať už šlechtěním zemědělských plodin se zvýšenou odolností proti suchu, aplikací vhodných protierozních a vodohospodářských úprav v krajině, zvyšování retence a množství zeleně v městské zástavbě a dalšími opatřeními napříč všemi sektory společnosti.

3.1 SRÁŽKO-ODTOKOVÉ MODELŮ

Snaha o matematický popis srážkoodtokového procesu má díky rozvoji počítačových technologií čím dál lepší výsledky. Jde v podstatě o nalezení vztahu mezi vstupními a výstupními daty, popisujícími konkrétní hydrologický systém. Na tento problém lze nahlížet mnoha různými způsoby a existuje tudíž celá řada hydrologických modelů s rozdílnými přístupy k jeho řešení.

3.1.1 KLASIFIKACE MODELŮ

Dle WMO (World Meteorological Organisation) lze srážko-odtokové modely klasifikovat dle účelu jejich aplikace, typu simulovaného systému, zohledněných hydrologických procesů, stupně kauzality a míry časové a prostorové diskretizace.

dle účelu aplikace:

1. Operativní hydrologie
2. Návrhová a Projekční činnosti
3. Výzkum

dle typu simulovaného systému:

1. Elementární systém
 - a. Hydrotop
 - b. Méně až středně velké odtokové plochy
 - c. Zvodnělé vrstvy
 - d. Říční síť
 - e. Nádrže a jezera
2. Komplexní systém
 - a. Systém říčních sítí, nádrží a jezer
 - b. Povodí nebo velké odtokové plochy

dle zohledněných hydrologických procesů:

1. Vlhkost půdy, evapotranspirace
2. Podzemní voda, hladina, průtok
3. Průtok a vodní stav v korytě
 - a. s časovým krokem menším než 1 den
 - b. s časovým krokem větším než 1 den
4. Teplota vody, ledové podmínky a další proměnné
5. Splaveniny a související parametry
6. Kvalita vody

dle stupně kauzality:

1. Deterministické modely
 - a. Hydrodynamické/Teoretické („white-box“)
 - i. Distribuované
 - b. Koncepční („grey-box“)
 - i. Distribuované
 - ii. Celistvé (Lumped)
 - c. Empirické („black-box“)
 - i. Celistvé (Lumped)
2. Stochastické modely
 - a. Pravděpodobnostní
 - b. S generováním časových řad

dle míry časové a prostorové diskretizace:

1. Časová diskretizace
 - a. hodinový krok
 - b. denní krok
 - c. týdenní krok
 - d. měsíční krok
 - e. jiný
2. Prostorová diskretizace
 - a. Celistvé (Lumped) modely (se soustředěnými parametry)
 - b. Distribuované modely (s dělenými parametry)
 - c. Semi-distribuované modely

3.1.2 SOUČASNÉ SRÁŽKO-ODTOKOVÉ MODELY

Zjednodušeně se dá říci, že na našem území se největší důvěře těší hydrologické modely, založené na co nejpodrobnějším popisu charakteristik povodí. Mezi ně patří například hydrodynamický model MIKE-SHE dánské firmy DHI, HEC-HMS (WMS), koncepční deterministický model NASIM, model SAC-SMA (SACRAMENTO), český HYDROG, švédský HBV, SWAT, TOPMODEL a mnoho dalších [2]. Pro kontinuální hydrologické

bilancování se v České republice používá například koncepční model WBCM [3], který počítá v denním kroku a jako vstupní data vyžaduje mimo jiné informace o hydrofyzikálních vlastnostech půd (zrnatostní kategorie, parametry zvodně, meze pórovitosti atd.) a dalších charakteristikách povodí (sklon toku, zastoupení kultur a plodin, klasifikace půd dle BPEJ atd.). Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka pro tyto potřeby používá a dále vyvíjí koncepční lumped model Bilan [4], zahrnující mimo jiné i možnost zadání odběrů z podzemních vod a odběrů i vypouštění do vod povrchových. Je postaven na kalibraci šesti až osmi časově invariantních parametrů, charakterizujících hydrologické jevy v zájmovém povodí, a umožňuje výpočet v denním i měsíčním kroku.

V současné době existuje v zahraničí množství studií, využívající empirických a koncepčních srážko-odtokových modelů pro dlouhodobou hydrologickou bilanci konkrétních povodí. Jedná se ale zejména o povodí v aridních a semiaridních klimatických oblastech. Nalezení vztahu mezi meteorologickými prvky a odtokem na území s vlhčím klimatem je úkolem o poznání obtížnějším, protože zde průběh srážko-odtokového procesu významněji ovlivňují (vzhledem ke své převaze nad výparem) srážky, jejichž modelování je velmi komplikované kvůli jejich časoprostorové nahodilosti a rozmanitosti, a odtok ze saturace půdy.

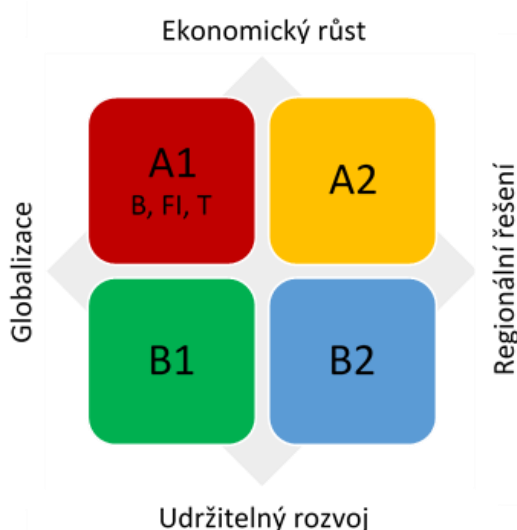
3.2 KLIMATICKÁ ZMĚNA

Jednou z vědeckých organizací, zabývajících se studiem změn klimatu, je IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change), tedy Mezivládní panel pro změnu klimatu. Tato instituce byla založena v roce 1988 dvěma organizacemi OSN, Světovou meteorologickou organizací (WMO) a Programem OSN pro životní prostředí (UNEP). Náplní práce IPCC je zejména snaha o popsání nebezpečí antropogenních klimatických změn v závislosti na možném vývoji společnosti a jejich budoucích důsledků. Mimo jiné zkoumá také možnosti přizpůsobení se těmto změnám a navrhuje chování vhodné k zmírnění jejich účinků. Jednou za několik let vydává IPCC takzvané Hodnotící zprávy, ve kterých definuje současný stav klimatu a možné scénáře jeho budoucího vývoje. První zpráva byla vydána v roce 1990 (First Assessment Report – FAR), druhá v roce 1995 (SAR), třetí v roce 2001 (TAR), čtvrtá v roce 2007 (AR4) a zatím poslední a aktuální v roce 2014 (AR5). Kromě těchto Hodnotících zpráv vydává IPCC i jiné studie, mezi které patří i Speciální zpráva Emisní scénáře z roku 2000, definující emisní scénáře typu SRES (Special Report Emissions Scenarios). Tyto scénáře zohledňují různé aspekty společenského a ekonomického vývoje společnosti a vývoje v oblasti získávání a spotřeby energie. V aktuální páté Hodnotící zprávě (AR5) jsou používány emisní scénáře typu RCP (Representative Concentration Pathways), které už v názvech jednotlivých scénářů poskytují informace o budoucích koncentracích skleníkových plynů. Scénáře typu SRES i RCP jsou scénáře klimatické, které jsou nazvány emisními proto, že budoucí klima charakterizují zejména pomocí možných budoucích koncentrací skleníkových plynů v atmosféře. Oba typy scénářů jsou založeny na výstupech z klimatických modelů.

3.2.1 KLIMATICKÉ SCÉNÁŘE

Klimatický scénář můžeme obecně popsat jako pravděpodobné vyjádření budoucího klimatu, vytvořené pro použití při studiu potenciálních dopadů antropogenní klimatické změny. Musí zahrnovat antropogenně podmíněnou změnu klimatu i jeho změnu přirozenou. Většinou popisuje i současný stav klimatu pomocí takzvané Baseline neboli referenčního období (pro většinu scénářů 1961-1990). Vlastní scénář je potom udáván jako soubor změn oproti tomuto referenčnímu období. Klimatický scénář není předpověď, spíše popis alternativ pravděpodobného budoucího stavu s ohledem na podmínky, za kterých se může vyskytnout.

Jedněmi z takových klimatických scénářů jsou Emisní scénáře SRES, definované IPCC v AR4. Jsou rozděleny na 4 základní scénářové rodiny: A1, A2, B1 a B2, lišící se od sebe predikovaným směrem vývoje společnosti. A1 se dá zjednodušeně popsat jako scénář globalizovaného světa s rychlým růstem ekonomiky a vývojem nových technologií. Je rozdělován na dílčí scénáře A1FI (Fossil Intensive), který reprezentuje budoucí intenzivní využívání fosilních paliv, A1T (Non-Fossil) bez fosilních paliv a A1B (Balanced), který popisuje vyvážené využívání všech zdrojů energie. Scénář A2 reprezentuje heterogenní svět s regionálními rozdíly a silným růstem ekonomiky. B1 zastupuje globalizovaný svět s rychlým rozvojem služeb a informačních technologií a snahou o udržitelný rozvoj. B2 je popisován jako scénář světa s regionálními rozdíly, který klade důraz na řešení problémů životního prostředí a snaží se o udržitelný rozvoj.

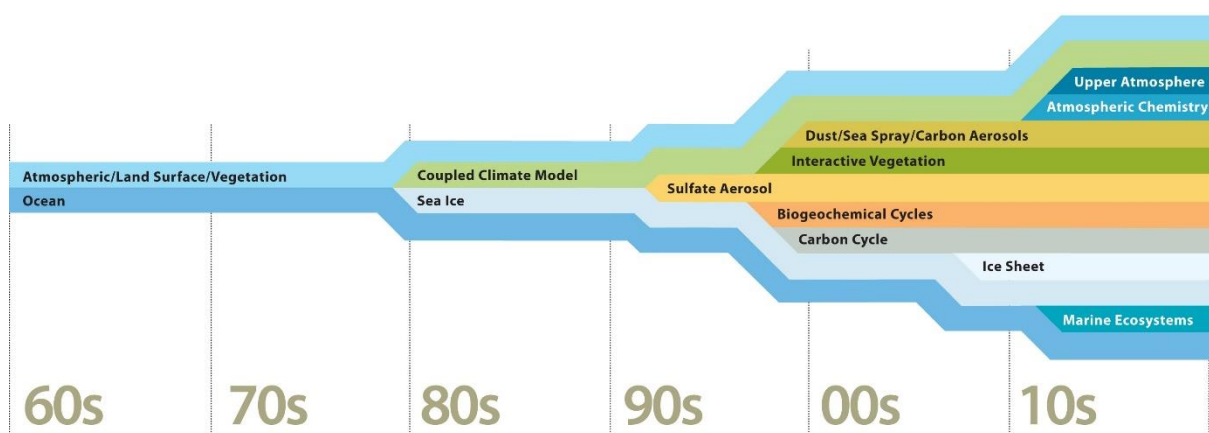


Obr. 3.2-1 Zjednodušené schéma scénářů SRES dle vývoje společnosti [1]

3.2.2 KLIMATICKÉ MODELKY

Pro odhad budoucího klimatu jsou vytvářeny a používány klimatické modely. Příprava těchto modelů zahrnuje modelový popis klimatického systému a v něm probíhající procesů na úrovni současného poznání. Následuje odborný odhad předpokládaného vývoje světové makroekonomiky, demografie, využívání zdrojů energie, technologií a dalších socioekonomických faktorů. Potom může být provedena modelová projekce budoucího vývoje.

Základními modely jsou takzvané GCMs (Global climate model/General Circulation Model) – Globální klimatické modely/Všeobecné modely proudění. Jedná se o matematické modely klimatického systému, založené na pohybových a termodynamických rovnicích. Každý globální klimatický model pracuje v určitém horizontálním a vertikálním rozlišení. Dnešní modely mají typické horizontální rozlišení 2 až 4° zeměpisní šířky/délky v atmosférické části modelu a 0,5-1° v části oceánické, jejich vertikální rozlišení je 25 až 40 vrstev nad pevninou a 20 až 30 nad oceány. Globální klimatický model je schopen popsat pouze klimatické jevy většího měřítka, než je jeho vlastní rozlišení. V začátcích modelování klimatu byly jako součásti GCMs používány pouze modely atmosféry, oceánu a zemského povrchu, dále se přidávaly modely mořského ledu, síranových částic, ostatních aerosolů, uhlíkový a biochemický cyklus, vegetace, ledový příkrov a dnes modely pracují i s atmosférickou chemií, horní atmosférou a mořským ekosystémem.



Obr. 3.2-2 Vývoj množství složek zahrnutých do GCMs [1]

Globální klimatické modely mají poměrně hrubé rozlišení. K jeho zjemnění se používají metody downscalingu, a to buď dynamické nebo statistické. Dynamický downscaling zahrnuje aplikaci lokálních (regionálních) klimatických modelů LAM (RCM), které z GCMs přebírají své okrajové podmínky. Jde v podstatě o modely klimatu, které provádějí výpočet pouze pro omezenou geografickou oblast. Výraznou nevýhodou metod dynamického downscalingu je jejich vysoká náročnost na výpočetní výkon. Statistický downscaling je založen na použití empirických statistických vztahů mezi prvky jednotlivých prostorových úrovní. Jeho nároky na výpočetní výkon jsou mnohem menší, vyžaduje ale dlouhé časové řady dat pro kalibraci. Přístupy k této metodě je možné rozdělit na lineární (regresní modely) a nelineární, mezi které patří meteorologická typizace a stochastické generátory počasí.

3.2.3 GENERÁTORY POČASÍ

Jak již bylo řečeno, generátory počasí (WGs – Weather Generators) jsou používány jako nástroje ke zjemnění rozlišení GCM tak, abychom byli schopni zkoumat změnu klimatu v konkrétní lokalitě a získali požadované meteorologické prvky. Na rozdíl od GCMs se neřídí rovnicemi fyzikálních procesů, ale statistickými charakteristikami skutečných řad

meteorologických veličin. Na základě reálné měřené řady dat jsou schopny pro konkrétní lokalitu vytvořit syntetickou řadu o libovolné délce.

Většina generátorů počasí pracuje ve dvou krocích – prvním je modelování denních hodnot srážek a druhým modelování zbylých proměnných, jako jsou denní maximální a minimální teplota, sluneční záření, vlhkost a rychlost větru. Existují dva základní typy generátorů počasí, a to Richardson a Serial. WGs typu Richardson v prvním kroku modelují výskyt takzvaných mokrých a suchých dní s využitím Markovova postupu, ve druhém kroku jsou potom modelovány konkrétní denní úhrny srážek. Nakonec jsou modelovány zbývající proměnné na základě jejich korelací s mokřými/suchými dny a mezi sebou navzájem. Nevýhodou generátorů typu Richardson je jejich neschopnost adekvátně popsat délky suchých a mokrých období, které mohou být pro projekci budoucího klimatu velmi důležité, zejména když se bavíme o hydrologické bilanci. Proto byl vyvinut alternativní typ generátoru (Serial), který v prvním kroku modeluje mokrá a suchá období a potom teprve další proměnné v závislosti na nich. Známými generátory počasí jsou například americké generátory GEM, USCLIMATE WGEN, britský ClimGen, LARS-WG, EARWIG nebo SDSM. Generátorem počasí, používaným v této práci je LARS-WG (Long Ashton Research Station Weather Generator), který patří mezi generátory typu Serial.

Popis základních nástrojů využívaných k modelování klimatu v kapitole 3.2 byl převzat z bakalářské práce autorky [1].

4 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo sestavit koncepční srážko-odtokový model, který by byl schopen modelovat průtoky v povodí v podmínkách změny klimatu.

Prvním úkolem bylo zpracování meteorologických a hydrologických dat do vyhovující formy a jejich vhodná kombinace, aby bylo co nejlépe vystiženo klima v zájmové oblasti. Dalším krokem bylo sestavení tzv. Wangova modelu, zahrnující ohodnocení jeho potenciálu, srovnání s jednodušší metodou hydrologické bilance, porovnání různých variant jeho struktury, nalezení příhodného způsobu výpočtu evapotranspirace jako vstupu pro model a výběr vhodné metody kalibrace.

Následujícím záměrem bylo Wangův model s ideální skladbou přepracovat do formy uživatelského programu, představujícího snadno ovladatelný univerzální srážko-odtokový model s širokými možnostmi uplatnění při řešení vodohospodářských úloh. Následně bylo třeba vyvinutý software otestovat na zájmovém povodí a výsledky jeho aplikace vyhodnotit z hlediska charakteru teplot, srážek a průtoků ve vzdálené budoucnosti.

5 METODA

5.1 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY

Prvním zjednodušujícím předpokladem této práce je, že využití srážko-odtokové modely používají jako vstupní hydrologická data pro kalibraci pouze takové řady průtoků, které nejsou ovlivněné manipulacemi na nádržích. Představené modely je tedy možné využít pro simulace spíše na menších povodích, kde k takovému ovlivnění nedochází. Řešením pro větší povodí může být přepočítání reálných průtoků na průtoky neovlivněné. Je ale nutné vzít v úvahu, že při tomto přepočtu vzniká chyba, která se dále propaguje do výsledné simulace.

Dalším zjednodušením je změna způsobu výpočtu výparu oproti doporučením. Jednou ze vstupních meteorologických veličin do Wangova modelu (kapitola 5.3) je i měsíční výpar. Autoři článku [5], ze kterého pocházejí řídicí rovnice Wangova modelu, doporučují, aby byly použity hodnoty výparu získané měřením pomocí určitého typu výparoměru, nebo výpočtem rovnicí Penman-Monteith. Z důvodů velkého množství vstupních parametrů do rovnice Penman-Monteith byla pro potřeby této práce zvolena jiná varianta výpočtu evapotranspirace, a to konkrétně metoda Thornthwaite a metoda Blaney-Criddle.

Při testování vhodného sestavení modelu (před jeho zprogramováním) byla používána gradientní metoda GRG implementovaná v doplňku Řešitel programu MS Excel. Nedostatkem tohoto řešení je fakt, že využitý optimalizační algoritmus je v rámci této práce „black boxem“ a také to, že gradientní metoda je známá nebezpečím uvíznutí v lokálním extrému.

Zjednodušujícím předpokladem týkající se simulace srážko-odtokového procesu prostřednictvím programu Runoff Prophet je, že nezohledňuje budoucí změny v jeho fungování. Nepočítá například se změnami vegetačního pokryvu, plochy zástavby v povodí, land use a tak dále. Model je nakalibrován na „průměrné“ charakteristiky povodí za minulé období a s těmito charakteristikami počítá i do budoucna. Na tuto skutečnost je třeba myslet při interpretaci predikovaných průtoků.

Jako zjednodušení je možné chápat i to, že mezivýsledky Wangova modelu nejsou uvažovány jako realistické hodnoty. Jako takový je vnímán pouze výsledný celkový odtok; vypočtené hodnoty evapotranspirace, podzemního odtoku, povrchového odtoku a nasycení půdy se sice pohybují v realistickém rozmezí, ale nejsou schopny reflektovat skutečnost. V rámci diplomové práce nejsou tedy brány jako reálné výsledky, ale pouze jako výpočetní data, sloužící pro získání hodnoty celkového odtoku.

V neposlední řadě je nutné zmínit, že meze koeficientů povrchového odtoku, podzemního odtoku a výparu a maximální možné nasycení půdy v programu Runoff Prophet byly zvoleny pouze na základě zkušenosti z předchozí práce s Wangovým modelem.

Optimalizace softwaru Runoff Prophet funguje na principu diferenciální evoluce. V první verzi tohoto programu, která je výstupem diplomové práce, není uživateli umožněno měnit parametry evoluce ani počet generací, jejich hodnoty jsou pevně nastaveny, a to pouze na základě zkušenosti, získané při sestavování modelu.

V rámci diplomové práce nebyla otestována univerzálnost programu Runoff Prophet. Jeho testování bylo provedeno pouze na jednom vybraném povodí.

Dalším zjednodušující předpokladem je, že diplomová práce nebyla řešena v podmínkách nejistot v měřených datech a nejistot vyplývajících z použití klimatických modelů, scénářů a generátoru počasí LARS-WG. Syntetické řady byly generovány na základě pouze jedné varianty random seed a byl použit jediný emisní scénář z vybraného klimatického modelu.

5.2 VSTUPNÍ DATA

Vstupní data pro srážko-odtokové modely, používané v této práci, lze rozdělit na data pro kalibraci a validaci. Data pro kalibraci popisují současné klima a hydrologickou situaci, data pro validaci reprezentují klima budoucí. Obě skupiny vstupních dat mají charakter časových řad v měsíčním kroku.

5.2.1 VSTUPNÍ DATA PRO KALIBRACI

Pro kalibraci modelu je třeba získat řadu měsíčních úhrnů srážek [mm], řadu průměrné měsíční teploty [°C] a řadu průměrných měsíčních průtoků v závěrovém profilu [m³/s].

5.2.2 VSTUPNÍ DATA PRO PREDIKCI

Vstupní data pro predikci mohou pocházet z klimatických modelů, generátorů počasí a jiných nástrojů pro modelování budoucích meteorologických dat. Podmínkou je, že výsledkem použití vybraného nástroje musí být časová řada průměrných měsíčních teplot [°C] a měsíčních úhrnů srážek [mm] na konkrétním povodí, charakterizující vybrané budoucí období.

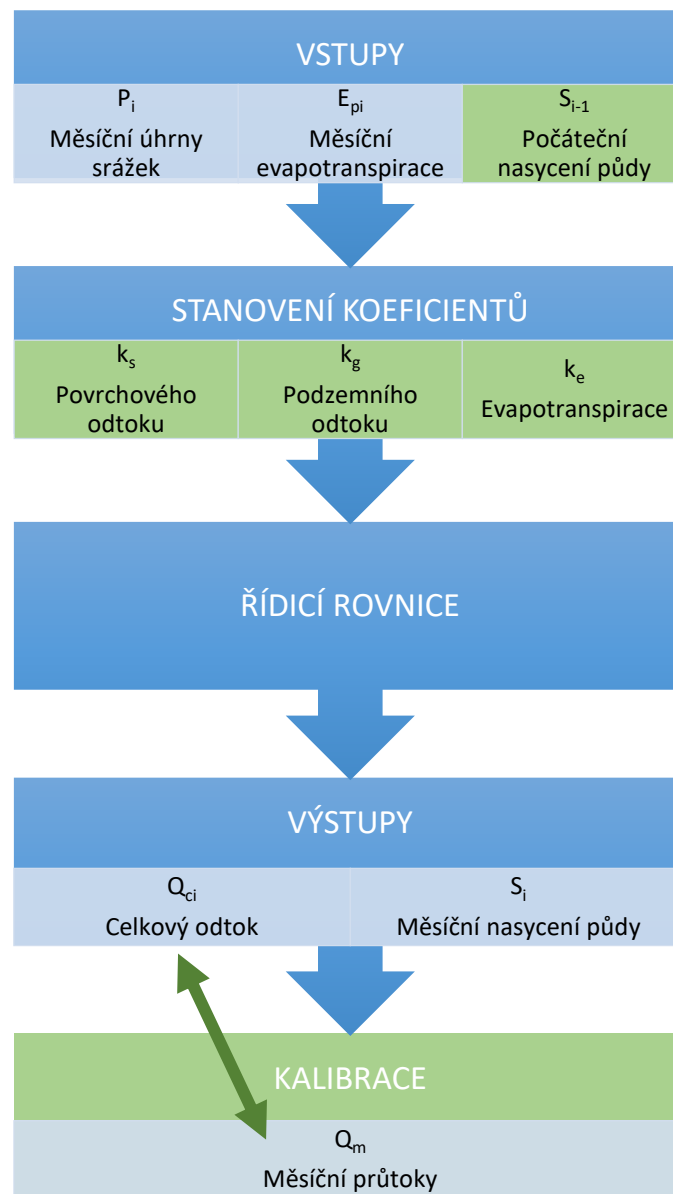
5.3 SRÁŽKO-ODTOKOVÉ ROVNICE

V rámci diplomové práce byly porovnávány dvě skupiny srážko-odtokových rovnic, pro jednoduchost nazvané Wangův model a Bilanční model.

5.3.1 WANGŮV MODEL

Sada srážko-odtokových rovnic tvořící Wangův model je převzata z článku [5]. Schéma jeho fungování vidíme na Obr. 5.3-1. Do modelu vstupuje řada úhrnů srážek a výparu v měsíčním kroku. Výpar je možné získat měřením z určitého typu výparoměru (viz článek [5]), nebo výpočtem. Na základě těchto vstupních dat je pro každý měsíc vypočten povrchový odtok, podzemní odtok a skutečný výpar. Z těch se následně počítá celkový odtok a vlhkost (nasycení) půdy v aktuálním měsíci. Neznámými jsou koeficienty povrchového odtoku, podzemního odtoku a evapotranspirace a počáteční nasycení půdy. Tyto parametry je nutné nakalibrovat na základě srovnání vypočtené řady celkového odtoku a řady měřených měsíčních průtoků

v závěrovém profilu povodí. Kritérii používanými ke kalibraci v článku [5] je Nash-Sutcliffe koeficient účinnosti modelu a relativní chyba RE.



Obr. 5.3-1 Schéma výpočtu Wangova modelu

$$Q_{si} = k_s \cdot \frac{S_{i-1}}{S_{max}} \cdot P_i \quad (1)$$

kde Q_{si} ... povrchový odtok v měsíci i [mm]
 P_i ... měsíční úhrn srážek v měsíci i [mm]
 S_{max} ... maximální nasycení půdy [mm]
 S_{i-1} ... nasycení půdy v měsíci $i-1$ [mm]
 k_s ... koeficient povrchového odtoku [-]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců

$$Q_{gi} = k_g \cdot S_{i-1} \quad (2)$$

kde Q_{gi} ... podzemní odtok v měsíci i [mm]
 S_{i-1} ... nasycení půdy v měsíci $i-1$ [mm]
 k_g ... koeficient podzemního odtoku [-]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců

$$E_i = k_e \cdot \frac{S_{i-1}}{S_{max}} \cdot E_{pi} \quad (3)$$

kde E_i ... skutečný výpar v měsíci i [mm]
 E_{pi} ... potenciální výpar v měsíci i [mm]
 S_{max} ... maximální nasycení půdy [mm]
 S_{i-1} ... nasycení půdy v měsíci $i-1$ [mm]
 k_e ... koeficient evapotranspirace [-]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců

$$Q_{ci} = Q_{si} + Q_{gi} \quad (4)$$

kde Q_{ci} ... celkový odtok v měsíci i [mm]
 Q_{si} ... povrchový odtok v měsíci i [mm]
 Q_{gi} ... podzemní odtok v měsíci i [mm]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců

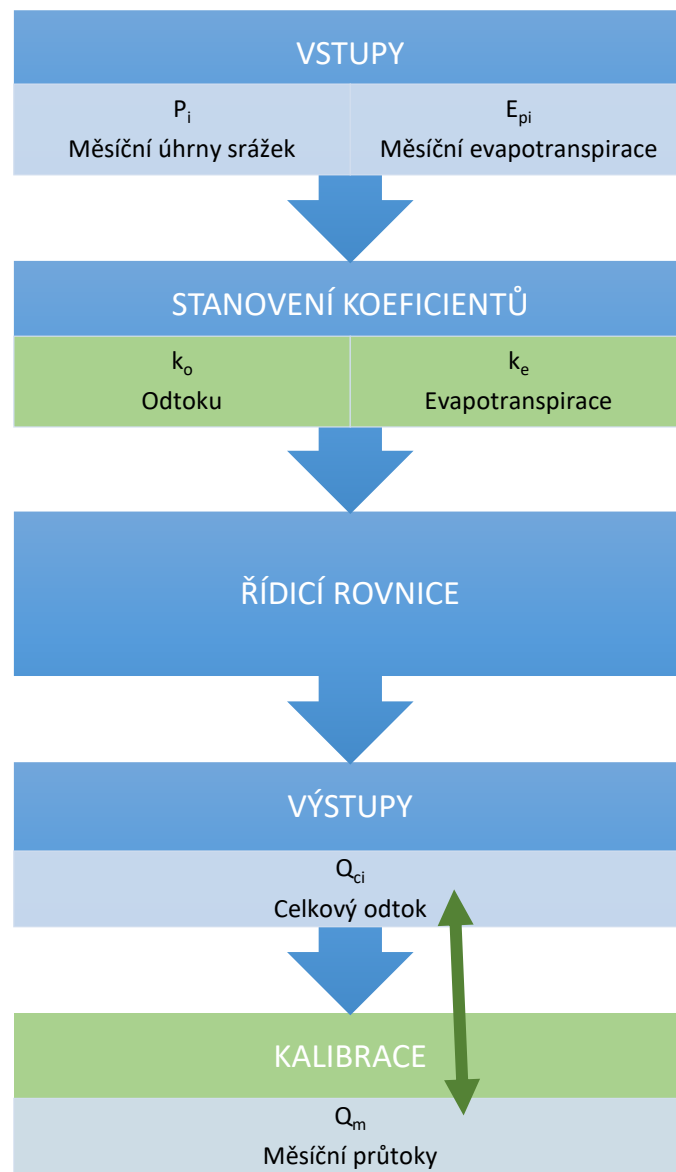
$$S_i = S_{i-1} + P_i - Q_{ci} - E_i \quad (5)$$

kde S_i ... nasycení v měsíci i [mm]
 S_{i-1} ... nasycení půdy v měsíci $i-1$ [mm]
 P_i ... měsíční úhrn srážek v měsíci i [mm]
 Q_{ci} ... celkový odtok v měsíci i [mm]
 E_i ... skutečný výpar v měsíci i [mm]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců

5.3.2 BILANČNÍ MODEL

Pro širší možnosti zhodnocení úspěšnosti Wangova modelu byl vytvořen model srovnávací, který je v této práci označován jako Bilanční model. Je založen na jednoduché hydrologické bilanci vody v krajině při zanedbání změn zásob vody. Schéma jeho výpočtu je znázorněno na Obr. 5.3-2. Do Bilančního modelu vstupuje řada úhrnů srážek a výparu v měsíčním kroku. Výpar je získán výpočtem pomocí rovnice Thornthwaite nebo Blaney-Criddle. Na základě těchto vstupních dat je pro každý měsíc vypočten celkový odtok. Neznámými jsou koeficienty odtoku a evapotranspirace. Tyto parametry jsou nakalibrovány na základě srovnání vypočtené

řady odtoku a řady měřených měsíčních průtoků v závěrovém profilu povodí. Pro kalibraci se používá kritérium Nash-Sutcliffe.



Obr. 5.3-2 Schéma výpočtu Bilančního modelu

$$Q_{ci} = P_i \cdot k_o - E_{pi} \cdot k_e \quad (6)$$

kde Q_{ci} ... odtok v měsíci i [mm]
 k_o ... koeficient odtoku [-]
 E_{pi} ... potenciální výpar v měsíci i [mm]
 k_e ... koeficient evapotranspirace [mm]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců

5.4 VÝPOČET EVAPOTRANSPIRACE

V rámci celé práce jsou porovnávány dvě metody výpočtu evapotranspirace, vstupující do použitých srážko-odtokových modelů. Oběma způsoby je možné získat posloupnost měsíční evapotranspirace na základě řady průměrné měsíční teploty. První z nich je známější metoda dle Thornthwaitea [6], která se v našich končinách běžně využívá. Druhou metodou je výpočet dle Blaney-Criddle [7], která má oproti Thornthwaiteovi tu výhodu, že při nulové a záporné teplotě nedává automaticky nulovou hodnotu výparu.

5.4.1 THORNTHWAITE

$$i_i = \left(\frac{T_{m_i}}{5}\right)^{1,514} \quad (7)$$

kde i_i ... měsíční teplotní index [-]
 T_{m_i} ... průměrná denní teplota v měsíci i [°C]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců

$$I_r = \sum_{j=1}^{12} i_{i_j} \quad (8)$$

kde I_r ... roční teplotní index [-]
 i_i ... měsíční teplotní index [-]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců
 $j = 1, \dots, m$ m ... počet měsíců v roce (1-12)
 $r = 1, \dots, p$ p ... počet let

$$a_r = (0,0675 \cdot I_r^3 - 7,71 \cdot I_r^2 + 1792 \cdot I_r + 47239) \cdot 10^{-5} \quad (9)$$

$$E_{pi_{neopravená}} = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_{m_i}}{I_r}\right)^{a_r} \quad (10)$$

$$E_{pi} = E_{pi_{neopravená}} \cdot \frac{N_j}{12} \cdot \frac{d_i}{30} \quad (11)$$

kde E_{pi} ... potenciální výpar v měsíci i [mm]
 $E_{pi_{neopravená}}$... neopravený potenciální výpar v měsíci i [mm]
 T_{m_i} ... průměrná denní teplota v měsíci i [°C]
 d_i ... počet dní v měsíci i
 N_j ... průměrný počet hodin denního svitu v příslušném měsíci [h]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců
 $j = 1, \dots, m$ m ... počet měsíců v roce (1-12)
 $r = 1, \dots, p$ p ... počet let

Průměrný počet hodin denního svitu N v příslušném měsíci lze získat buď interpolací podle zeměpisné šířky z Tab. 5.4-1, nebo výpočtem.

Tab. 5.4-1 Průměrný počet hodin denního svitu (N) dle zeměpisné šířky pro 15. den v měsíci [8]

Northern Hemisphere												Lat.	Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	deg.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.0	6.6	11.0	15.6	21.3	24.0	24.0	17.6	12.8	8.3	2.3	0.0	70	24.0	17.4	13.0	8.4	2.7	0.0	0.0	6.4	11.2	15.7	21.7	24.0
2.1	7.3	11.1	15.3	19.7	24.0	22.3	17.0	12.7	8.7	4.1	0.0	68	21.9	16.7	12.9	8.7	4.3	0.0	1.7	7.0	11.3	15.3	19.9	24.0
3.9	7.8	11.2	14.9	18.7	22.0	20.3	16.4	12.7	9.0	5.2	1.9	66	20.1	16.2	12.8	9.1	5.3	2.0	3.7	7.6	11.3	15.0	18.8	22.1
5.0	8.2	11.2	14.7	17.9	20.3	19.2	16.0	12.6	9.3	6.0	3.7	64	19.0	15.8	12.8	9.3	6.1	3.7	4.8	8.0	11.4	14.7	18.0	20.3
5.7	8.5	11.3	14.4	17.3	19.2	18.4	15.7	12.6	9.5	6.6	4.8	62	18.3	15.5	12.7	9.6	6.7	4.8	5.6	8.3	11.4	14.5	17.4	19.2
6.4	8.8	11.4	14.2	16.8	18.4	17.7	15.3	12.5	9.7	7.1	5.6	60	17.6	15.2	12.6	9.8	7.2	5.6	6.3	8.7	11.5	14.3	16.9	18.4
6.9	9.1	11.4	14.1	16.4	17.8	17.2	15.1	12.5	9.9	7.5	6.2	58	17.1	14.9	12.6	9.9	7.6	6.2	6.8	8.9	11.5	14.1	16.5	17.8
7.3	9.3	11.5	13.9	16.0	17.3	16.8	14.8	12.4	10.1	7.9	6.7	56	16.7	14.7	12.5	10.1	8.0	6.7	7.2	9.2	11.6	13.9	16.1	17.3
7.7	9.5	11.5	13.8	15.7	16.8	16.4	14.6	12.4	10.2	8.2	7.1	54	16.3	14.5	12.5	10.2	8.3	7.2	7.6	9.4	11.6	13.8	15.8	16.9
8.0	9.7	11.5	13.6	15.4	16.5	16.0	14.4	12.4	10.3	8.5	7.5	52	16.0	14.3	12.5	10.4	8.6	7.5	8.0	9.6	11.6	13.7	15.5	16.5
8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9	50	15.7	14.2	12.4	10.5	8.8	7.9	8.3	9.7	11.7	13.6	15.3	16.1
8.6	10.0	11.6	13.4	15.0	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9.0	8.2	48	15.4	14.0	12.4	10.6	9.0	8.2	8.5	9.9	11.7	13.4	15.0	15.8
8.8	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14.0	12.3	10.7	9.2	8.5	46	15.2	13.9	12.4	10.7	9.2	8.5	8.8	10.0	11.7	13.3	14.8	15.5
9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15.0	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7	44	14.9	13.7	12.4	10.8	9.4	8.7	9.0	10.2	11.7	13.3	14.6	15.3
9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15.0	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9.0	42	14.7	13.6	12.3	10.8	9.6	9.0	9.2	10.3	11.7	13.2	14.4	15.0
9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2	40	14.5	13.5	12.3	10.9	9.8	9.2	9.4	10.4	11.8	13.1	14.3	14.8
9.6	10.6	11.7	13.0	14.1	14.6	14.4	13.5	12.2	11.0	9.9	9.4	38	14.4	13.4	12.3	11.0	9.9	9.4	9.6	10.5	11.8	13.0	14.1	14.6
9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6	36	14.2	13.3	12.3	11.1	10.1	9.6	9.8	10.6	11.8	12.9	13.9	14.4
10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.2	9.7	34	14.0	13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	9.9	10.7	11.8	12.9	13.8	14.3
10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9	32	13.9	13.1	12.2	11.2	10.4	9.9	10.1	10.8	11.8	12.8	13.7	14.1
10.3	11.0	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1	30	13.7	13.0	12.2	11.3	10.5	10.1	10.2	10.9	11.8	12.7	13.5	13.9
10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	28	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8
10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4	26	13.5	12.9	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.9	12.6	13.3	13.6
10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5	24	13.3	12.8	12.2	11.4	10.8	10.5	10.7	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5
10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.8	12.1	11.5	10.9	10.7	22	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.2	11.9	12.5	13.1	13.3
10.9	11.3	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	10.8	20	13.1	12.7	12.1	11.5	11.1	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2
11.0	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9	18	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	10.9	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1
11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1	16	12.9	12.5	12.1	11.6	11.3	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9
11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2	14	12.7	12.4	12.1	11.7	11.4	11.2	11.2	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8
11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	12	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7
11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	10	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6
11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.0	11.8	11.6	11.5	8	12.4	12.3	12.1	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	12.0	12.2	12.4	12.5
11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	6	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3
11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	4	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2
11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	2	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1
12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

Pokud chceme N zjistit výpočtem, postupujeme následujícím způsobem. Nejprve provedeme výpočet pořadí dne v roce (J). Pro měsíční výpočty počítáme J pro střed měsíce podle následující rovnice [9]:

$$J_j = (30,4 \cdot j - 15); J_j \in Z \quad (12)$$

kde $j = 1, \dots, m$ $m \dots$ počet měsíců v roce (1-12)

$$\delta_j = 0,409 \cdot \sin(2\pi \cdot \frac{J_j}{365} - 1,39) \quad (13)$$

$$\varphi_j = \frac{\pi}{180} \cdot (z. \text{š.}) \quad (14)$$

$$\omega_{sj} = \arccos[-\tan(\varphi_j) \cdot \tan(\delta_j)] \quad (15)$$

$$N_j = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_{sj} \quad (16)$$

kde z.š. \dots zeměpisná šířka meteorologické stanice [°]
 (pokud se meteostanice nachází na severní polokouli, z.š. se zadává jako kladná, pokud na jižní, z.š. se zadává jako záporné číslo)

$N_j \dots$ průměrný počet hodin denního svitu v příslušném měsíci [h]

$j = 1, \dots, m$ $m \dots$ počet měsíců v roce (1-12)

5.4.2 BLANEY-CRIDDLE

$$E_{pi} = ET_{0i} \cdot d_i \quad (17)$$

kde E_{pi} ... potenciální evapotranspirace v měsíci i [mm]
 d_i ... počet dní v měsíci i
 ET_0 ... referenční evapotranspirace v měsíci i [mm/den]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců

$$ET_{0i} = p_j \cdot (0,46 \cdot T_{mean_i} + 8) \quad (18)$$

kde ET_0 ... referenční evapotranspirace v měsíci i [mm/den]
 p_j ... průměrné denní procento z celkového počtu ročních hodin slunečního svitu v příslušném měsíci [-]
 T_{mean_i} ... průměrná denní teplota v měsíci i [°C]
 $i = 1, \dots, n$ n ... počet měsíců
 $j = 1, \dots, m$ m ... počet měsíců v roce (1-12)

Průměrné denní procento z celkového počtu ročních hodin slunečního svitu v příslušném měsíci p je závislé na zeměpisné šířce. Podle ní a toho, na jaké polokouli se meteorologická stanice nachází, získáme hodnotu p interpolací z Tab. 5.4-2.

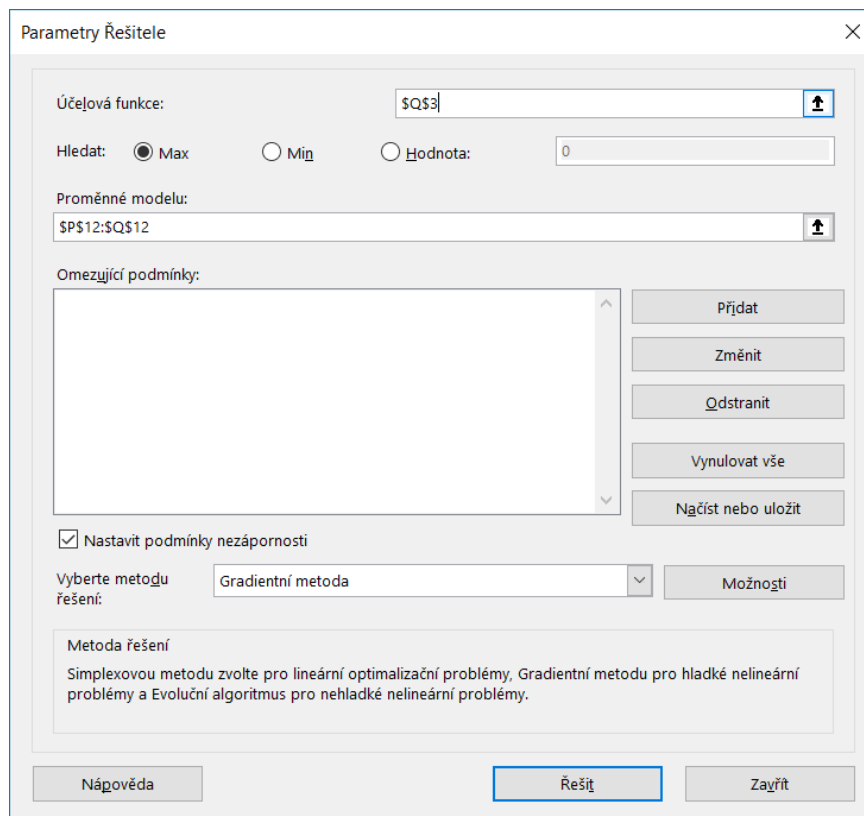
Tab. 5.4-2 Průměrné denní procento (p) z celkového ročního počtu hodin slunečního svitu [10]

Latitude	North	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
	South	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June
60°		.15	.20	.26	.32	.38	.41	.40	.34	.28	.22	.17	.13
55		.17	.21	.26	.32	.36	.39	.38	.33	.28	.23	.18	.16
50		.19	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.20	.18
45		.20	.23	.27	.30	.34	.35	.34	.32	.28	.24	.21	.20
40		.22	.24	.27	.30	.32	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
35		.23	.25	.27	.29	.31	.32	.32	.30	.28	.25	.23	.22
30		.24	.25	.27	.29	.31	.32	.31	.30	.28	.26	.24	.23
25		.24	.26	.27	.29	.30	.31	.31	.29	.28	.26	.25	.24
20		.25	.26	.27	.28	.29	.30	.30	.29	.28	.26	.25	.25
15		.26	.26	.27	.28	.29	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.25
10		.26	.27	.27	.28	.28	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.26
5		.27	.27	.27	.28	.28	.28	.28	.28	.28	.27	.27	.27
0		.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27

5.5 KALIBRACE MODELU

5.5.1 GRADIENTNÍ METODA

V této práci byla jako jedna z metod optimalizace používána Gradientní metoda GRG (Generalized Reduced Gradient), implementovaná v programu MS Excel, konkrétně v jeho doplňku Řešitel (Obr. 5.5-1). Jde o nelineární metodu optimalizace. Funguje na principu prohledávání stavového prostoru z jednoho bodu a jeho následným opakovaným posunem vždy směrem k největšímu gradientu (změně). Nevýhodou této metody je, že není jisté, že najde globální maximum/minimum, během výpočtu může uvíznout v lokálním extrému.



Obr. 5.5-1 Náhled doplňku Řešitel programu MS Excel

5.5.2 DIFERENCIÁLNÍ EVOLUCE

Diferenciální evoluce patří do skupiny evolučních algoritmů a její princip je velmi podobný algoritmům genetickým; vychází z takzvaného genetického žihání Kennetha V. Prince. Diferenciální evoluce byla v historii vyzkoušena na mnoha optimalizačních problémech a vykazovala velmi dobré výsledky, a to i v porovnání s výsledky dalších optimalizačních metod [11]. Jednou z nevýhod diferenciální evoluce je možná stagnace při výpočtu, kdy dojde k zastavení vývoje hodnoty účelové funkce. Může se tedy stejně jako u gradientní metody stát, že není nalezeno globální maximum/minimum, ale pouze lokální extrém.

Řídicí parametry

Řídicími parametry diferenciální evoluce jsou práh křížení (CR), velikost populace (NP), mutační konstanta (F) a počet generací. Důležitým aspektem problému je také jeho dimenze (D), která vyjadřuje počet argumentů účelové funkce. Intervaly, ve kterých se jednotlivé řídicí parametry pohybují, a jejich doporučené hodnoty najdeme v Tab. 5.5-1.

Tab. 5.5-1 Hodnoty řídicích parametrů diferenciální evoluce [11]

Řídicí parametr	Interval	Pravděpodobné optimum	Poznámka
NP	2D-100D?	10D	Velikost populace
F	0-2	0.3-0.9	Mutační konstanta
CR	0-1	0.8-0.9	Práh křížení
Počet generací	uživatel	-	Počet kol šlechtění populace

Princip

Cílem diferenciální evoluce je v průběhu zadaného množství cyklů (generací) vyšlechtit co nejlepší populaci jedinců. Kvalita jedince se hodnotí podle tzv. fitness kritéria čili hodnoty účelové funkce. Diferenciální evoluce má více variant – liší se podle způsobu výpočtu tzv. šumového vektoru. V diplomové práci je využíván způsob výpočtu uvedený v této kapitole [11].

1. **Stanovení parametrů** – jsou to dimenze jedince (D), počet jedinců v populaci (NP), mutační konstanta (F) a práh křížení (CR).
2. **Tvorba počáteční populace** – na základě znalosti požadované skladby jedince se vygeneruje první generace o počtu jedinců NP. Každý jedinec má počet prvků $D+1$ (počet neznámých + fitness kritérium – hodnota účelové funkce)
3. **Započetí cyklu generace** – Postupně je vybírán jeden jedinec z populace za druhým (aktivní jedinec, cílový vektor) a pro každého z nich je proveden následující evoluční cyklus.
4. **Evoluční cyklus** – je prováděna mutace a křížení. Jsou náhodně zvoleni další tři jedinci z populace – první dva se od sebe odečtou a vznikne tzv. diferenční vektor, který se následně vynásobí mutační konstantou F. Tím vznikne váhovaný diferenční vektor, který se přičte ke třetímu náhodnému jedinci a tím získáme tzv. šumový vektor. Následně se vytvoří zkušební vektor (jedinec) a to tak, že pro každý jeho prvek (počet prvků = D) se nejprve generuje náhodné číslo od 0 do 1 a porovnává se s hodnotou prahu křížení CR. Pokud je toto náhodné číslo menší než CR, na příslušnou pozici ve zkušebním vektoru se zapíše prvek z šumového vektoru, v opačném případě prvek z původního aktivního jedince. Hotovému zkušebnímu jedinci se vypočítá fitness kritérium (hodnota účelové funkce) a porovná se s kritériem původního aktivního jedince – ten jedinec, který má lepší hodnotu účelové funkce se stává jedincem v nové generaci. Z původní generace se vybere následující jedinec v pořadí (stává se aktivním jedincem) a celý evoluční cyklus se opakuje (až do vyčerpání celé populace).

5. **Ukončení evoluce** – diferenciální evoluce je ukončena tehdy, je-li proveden uživatelem zadaný počet generací.
6. **Vyhodnocení** – z poslední generace je vybrán jedinec s nejlepším fitness kritériem. Prvky tohoto jedince představují výsledné řešení optimalizace.

5.5.3 KALIBRAČNÍ KRITÉRIUM NASH-SUTCLIFFE

Jako kalibrační kritérium byl používán koeficient účinnosti modelu Nash-Sutcliffe [12]. V zahraniční literatuře je často uváděn pod označením E, v rámci diplomové práce je označován zkratkou NS. Tento koeficient se často využívá právě pro posouzení kvality predikce hydrologických modelů. Jeho hodnota se pohybuje od $-\infty$ do 1. Predikce s hodnotou $NS = 1$ vykazuje dokonalou shodu s pozorovanými daty. Pokud $NS = 0$, predikce modelu je stejně přesná jako použití průměru pozorovaných dat. $NS < 0$ nastává, pokud je použití průměru z pozorovaných dat lepším nástrojem predikce než samotný hydrologický model. Čím více se hodnota kritéria Nash-Sutcliffe blíží jedné, tím je model přesnější.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (19)$$

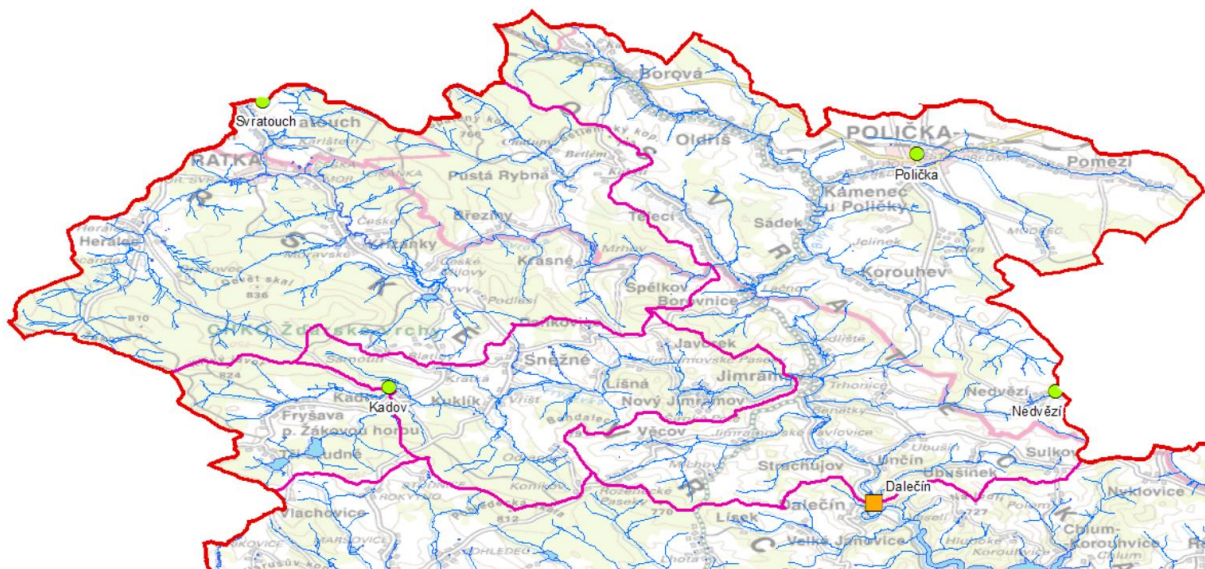
kde NS ... koeficient účinnosti modelu Nash-Sutcliffe [-]
 Q_m^t ... predikovaná hodnota průtoku v čase t (modeled) [mm nebo m^3/s]
 Q_o^t ... měřená hodnota průtoku v čase t (observed) [mm nebo m^3/s]
 \bar{Q}_o ... průměr z měřených hodnot průtoku [mm nebo m^3/s]
 $t = 1, \dots, T$ T ... počet časových kroků

6 PRAKTICKÁ APLIKACE

Důležitým krokem praktické aplikace bylo získání a zpracování dostatečně dlouhých posloupností meteorologických a hydrologických dat pro konkrétní povodí. S jejich využitím bylo možné začít vytvářet Wangův koncepční srážko-odtokový model. Nejprve bylo třeba zjistit, zda je model schopen dosáhnout při kalibraci uspokojivých výsledků. Dalším bodem bylo prokázat, že použití Wangova modelu je efektivnější než modelování průtoků pomocí jednoduché hydrologické bilance. Součástí této analýzy bylo i hledání a prověřování způsobů, jak model sestavit a nakalibrovat. V programu MS Excel bylo vytvořeno mnoho různých verzí Wangova modelu s rozdílnou strukturou, ze kterých bylo potřeba vybrat tu nejvhodnější. Stejně tak byl vybírán příhodný způsob výpočtu evapotranspirace a metoda kalibrace. Po nalezení vhodné skladby byl Wangův model přepracován do formy uživatelského programu Runoff Prophet. Vyvinutý software byl následně otestován na zájmovém povodí a výsledky jeho aplikace byly vyhodnoceny z hlediska charakteru teplot, srážek a průtoků ve vzdálené budoucnosti.

6.1 PŘÍPRAVA DAT

Zájmovým územím, na kterém se modely testovaly, bylo povodí nad nádrží Vír I. (část povodí III. řádu 4-15-01 Svatka po Svitavu), končící závěrovým profilem Dalečín (Obr. 6.1-1). Toto povodí bylo zvoleno zejména z důvodů možnosti použít výsledné průtoky k výpočtům budoucích hladin v nádrži Vír I. Dalšími důvody byla přiměřená velikosti tohoto povodí a fakt, že průtoky ve zdejších vodních tocích jsou neovlivněné manipulacemi na nádržích. Plocha zájmového povodí je 366,94 km².



Obr. 6.1-1 Zájmové území

Měřená meteorologická a hydrologická data, použitá v této práci, byla laskavě poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem (pobočka Brno). K dispozici byla následující data:

- řada průměrných měsíčních průtoků v profilu Dalečín (číslo hydrologického pořadí 4-15-01-033), a to od ledna 1949 do prosince 2016
- řada průměrné měsíční teploty a denní maximální a minimální teploty ve stanici Svatouch H3SVRA01 (automatizovaná meteorologická stanice s profesionální obsluhou), a to od srpna 1951 do května 2017
- řada měsíčních a denních úhrnů srážek ve stanici Svatouch (H3SVRA01, automatizovaná meteorologická stanice s profesionální obsluhou), a to od srpna 1951 do května 2017
- řada měsíčních a denních úhrnů srážek ve stanici Polička (B2POLI01, automatizovaná srážkoměrná stanice), a to od listopadu 1939 do května 2107
- řada měsíčních a denních úhrnů srážek ve stanici Kadov (B2KADO01, automatizovaná srážkoměrná stanice), a to od ledna 1993 do května 2017

Požadavkem na měřená data bylo, aby co nejlépe vystihovala klima celé plochy zájmového povodí. Snahou proto bylo kombinovat meteorologická data z více stanic. Na základě poskytnutých dat byla tedy sestavena kombinovaná souvislá kalibrační řada v měsíčním kroku. Obsahovala řadu průměrných měsíčních průtoků v profilu Dalečín, měsíční teploty ze stanice Svatouch a průměrného úhrnu srážek ze stanic Svatouch a Polička, a to od ledna 1954 do prosince 2016 (63 let). Průměr měsíčního úhrnu srážek byl počítán jako průměr aritmetický. Pokud v některém měsíci chyběla u jedné ze stanic data, byl jako průměrný úhrn brán úhrn srážek z druhé stanice. Měřená data ze stanice Kadov nebyla v této práci použita, a to z důvodů nedostatečné délky měsíční řady úhrnů srážek. Součástí dat, dodaných Českým hydrometeorologickým ústavem, byly i zeměpisné údaje jednotlivých stanic. V tabulce (Tab. 6.1-1) najdeme informace o stanicích Svatouch a Polička, které jsou důležité pro další výpočty, a to zejména pro určení výparu.

Tab. 6.1-1 Zeměpisné údaje vybraných meteorologických stanic

	Nadmořská výška [m n. m.]	Zeměpisná šířka [°]	Zeměpisná délka [°]
Svatouch	737	49.74	16.03
Polička	556	49.72	16.27

6.2 POROVNÁNÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÝCH ROVNIC

Nejprve bylo nutné prokázat, že použití rovnic z článku [5] je efektivnější než výpočet srážko-odtokového procesu pomocí jednoduché bilance. Současně se sestavováním Wangova modelu (kapitola 5.3.1) bylo proto provedeno rozsáhlé porovnávání výsledků s výsledky získanými pomocí Bilančního modelu. Porovnání je k dispozici ve formě elektronické přílohy k této práci v tabulkové formě. V rámci diplomové práce bude poskytnuto pouze ve stručnosti.

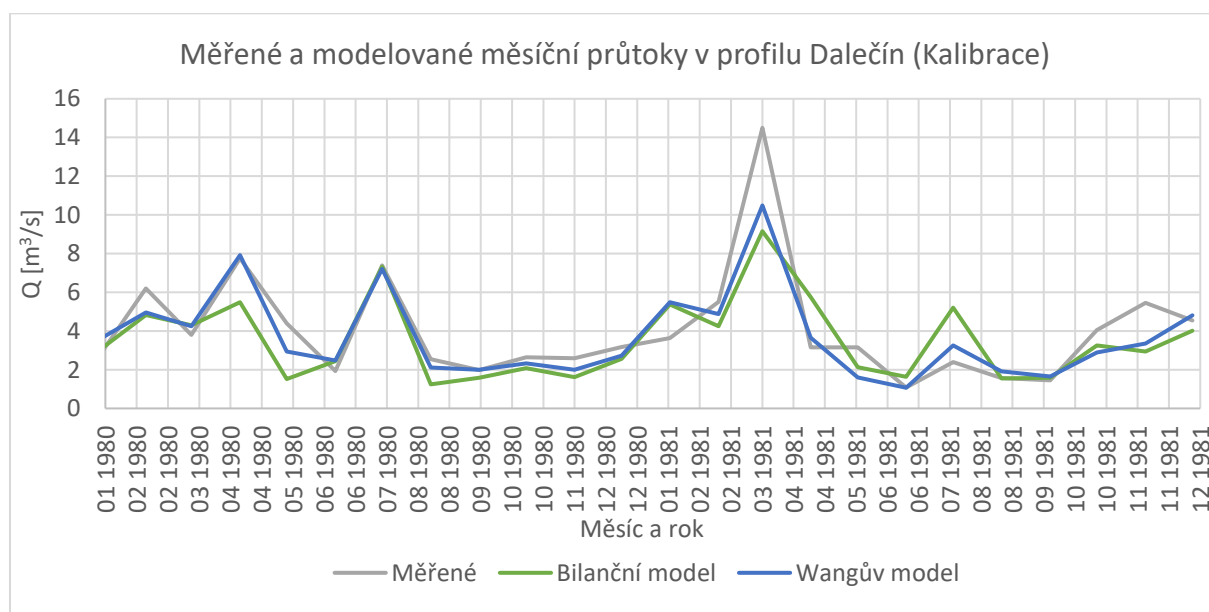
Pro zjednodušené srovnání výsledků obou typů rovnic bylo použita následující struktura modelu. Počet kalibračních koeficientů 12, délka řady měřených veličin pro kalibraci 35 let (1970-2004), délka validační řady 12 let (2005-2016), evapotranspirace počítána rovnicí

Blaney-Criddle. Při kalibraci Bilančního a Wangova modelu v programu MS Excel byla použita gradientní metoda GRG z doplňku Řešitel. Kalibračním kritériem a zároveň kritériem pro posouzení úspěšnosti modelu je Nash-Sutcliffe koeficient. (Více informací o jednotlivých prvcích struktury modelu je možné získat v kapitole 6.3.) Bilanční a Wangův model mezi sebou byly porovnávány na základě hodnoty koeficientu NS získaného kalibrací a koeficientu NS validační řady dat. Z následující tabulky je zřejmé, že Wangův model je při simulaci srážko-odtokového procesu v měsíčním kroku skutečně efektivnější než výpočet pomocí jednoduché bilance. Při kalibraci i validaci totiž dosahuje o poznání lepších výsledků Nash-Sutcliffe kritéria.

Tab. 6.2-1 Srovnání Nash-Sutcliffe koeficientu Bilančního a Wangova modelu

	Nash-Sutcliffe	
	Kalibrace	Validace
Bilanční model	0.53	0.37
Wangův model	0.67	0.59

V následujícím grafu (Obr. 6.2-1) je pro ilustraci zobrazena část kalibrační řady měsíčních průtoků (Měřené) a odpovídající modelovaná řada z Bilančního a Wangova modelu. Z tohoto vizuálního srovnání je patrné, že s použitím modelu Wang bylo skutečně dosaženo lepších výsledků než s jednodušším Bilančním modelem.



Obr. 6.2-1 Graf měřených průtoků v profilu Dalečín a průtoků modelovaných pomocí Bilančního a Wangova modelu (Kalibrace)

Na základě porovnání koeficientu účinnosti Nash-Sutcliffe (NS) bylo v této kapitole prokázáno, že použití Wangova modelu je pro zájmové povodí skutečně efektivnější než predikce průtoků pomocí jednoduché bilance.

6.3 SESTAVENÍ MODELU

Základními otázkami, které bylo při sestavování Wangova modelu třeba vyřešit, bylo kalibrační kritérium a způsob kalibrace modelu, způsob výpočtu evapotranspirace a počet neznámých (kalibračních koeficientů). Bylo nutné porovnat různé struktury modelu a vybrat tu nejvhodnější, aby mohla být následně zprogramována.

6.3.1 KALIBRACE

Jako kalibrační kritérium byl vybrán koeficient účinnosti modelu Nash-Sutcliffe. Je to kritérium, které se běžně pro posouzení predikce hydrologických modelů využívá. Jeho hodnota se pohybuje od $-\infty$ do 1, kde hodnota 1 znamená dokonalou shodu s pozorovanými daty. Názory na uspokojivou hodnotu Nash-Sutcliffe kritéria se liší. V často citovaném článku [13] je dosažená hodnota NS rozdělena do kategorií Velmi dobrý, Dobrý, Uspokojivý a Neuspokojivý (Tab. 6.3-1) a jako uspokojivá je udávána hodnota NS 0,5. Při kalibraci Wangova modelu bylo snahou dostat se na hodnotu NS alespoň 0,65, která odpovídá dobré shodě predikovaných hodnot s hodnotami měřenými.

Tab. 6.3-1 Obecné hodnocení koeficientu Nash-Sutcliffe pro měsíční časový krok [13]

Hodnocení	NS
Velmi dobrý	0.75 - 1.00
Dobrý	0.65 - 0.75
Uspokojivý	0.50 - 0.65
Neuspokojivý	< 0.50

Jako optimalizační algoritmus byla při sestavování modelu používána Gradientní metoda GRG v programu MS Excel z doplňku Řešitel.

6.3.2 VÝPOČET EVAPOTRANSPIRACE

Při sestavování vhodného modelu byly porovnávány dva způsoby výpočtu evapotranspirace. První a známější z nich je výpočet pomocí rovnice Thornthwaite, druhým byla méně známá metoda Blaney-Criddle.

6.3.3 POČET KOEFICIENTŮ

Neznámými Wangova modelu jsou počáteční vlhkost půdy S_{i-1} a koeficienty povrchového odtoku k_s , podzemního odtoku k_g a evapotranspirace k_e . Vhodný počet koeficientů není v článku [5] popsán, proto bylo v rámci této práce porovnáváno více možností. Schéma jednotlivých variant je nastíněno v následující tabulce (Tab. 6.3-2). První z nich je varianta 1k, kdy existuje pouze jeden koeficient k_s , k_g a k_e , který je stejný pro všechny měsíce v roce. Druhá je varianta 4k, která se skládá ze čtyř sad koeficientů – jedna pro každé roční období. Tedy pro jaro k_{s1} , k_{g1} a k_{e1} , pro léto k_{s2} , k_{g2} a k_{e2} , pro podzim k_{s3} , k_{g3} a k_{e3} a pro zimu analogicky k_{s4} , k_{g4} a k_{e4} . Složitější je varianta 1+9k, která obsahuje celkem 10 sad koeficientů – jednu pro zimní období (prosinec, leden a únor) a 9 pro ostatní měsíce. Celkem tedy obsahuje 30 kalibračních koeficientů. Poslední je možnost 12k, ve které má každý měsíc svou vlastní sadu koeficientů; tvoří ji tedy celkem 36 koeficientů.

Tab. 6.3-2 Schéma variant počtu koeficientů Wangova modelu

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
1k	k											
4k	k ₄		k ₁			k ₂			k ₃			k ₄
1+9k	k ₁₀		k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆	k ₇	k ₈	k ₉	k ₁₀
12k	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆	k ₇	k ₈	k ₉	k ₁₀	k ₁₁	k ₁₂

6.3.4 VYHODNOCENÍ

Následující tabulka (Tab. 6.3-3) popisuje Nash-Sutcliffe kritérium, dosažené kalibrací Wangova modelu pomocí gradientní metody. V tabulce jsou porovnány výsledky variant modelu s různým počtem koeficientů a různým výpočtem evapotranspirace. Hranice uspokojivé shody 0,5 nedosahuje pouze varianta 1k, ostatní varianty vyhovují při obou možnostech výpočtu výparu. Je patrné, že nejlepších výsledků NS kritéria dosahuje Wangův model při použití 1+9k a 12k. V obou těchto variantách je NS dosažené kalibrací větší než 0,65, což odpovídá dobré shodě. Na základě podrobné analýzy, která není součástí této práce, byla z těchto dvou jako příhodnější vybrána varianta 12k. Ani po komplexním porovnání výsledků však nebylo možné jednoznačně určit vhodnější metodu výpočtu evapotranspirace

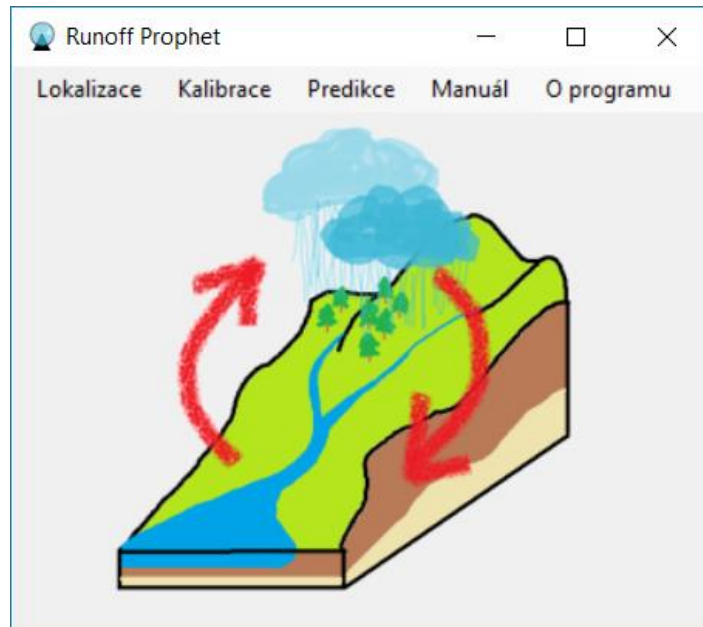
Tab. 6.3-3 Srovnání Nash-Sutcliffe kritéria Wangova modelu při různém počtu koeficientů a způsobu výpočtu evapotranspirace

	Výpočet evapotranspirace	Nash-Sutcliffe	
		Kalibrace	Validace
1k	Thornthwaite	0.47	0.46
	Blaney-Criddle	0.28	0.23
4k	Thornthwaite	0.60	0.63
	Blaney-Criddle	0.58	0.60
1+9k	Thornthwaite	0.68	0.62
	Blaney-Criddle	0.66	0.59
12k	Thornthwaite	0.67	0.59
	Blaney-Criddle	0.67	0.59

Cílem této části práce bylo vhodně sestavit Wangův model, aby mohl být následně zprogramován. Na základě výsledků porovnání různých variant jeho struktury byl vybrán Wangův model se sadou dvanácti koeficientů (12k) a oběma způsoby výpočtu evapotranspirace. Při sestavování modelu byla pro kalibraci používána Gradientní metoda GRG v programu MS Excel. Vzhledem k nedostatkům této optimalizační metody byla pro následné zprogramování modelu vybrána metoda spolehlivější, a to princip diferenciální evoluce.

6.4 RUNOFF PROPHET

Dalším krokem bylo Wangův model se zvolenou strukturou přepracovat do formy uživatelského programu. Vytvořený nástroj dostal název Runoff Prophet. Pro tvorbu výpočtové části softwaru byl zvolen programovací jazyk Fortran 77, pro grafickou část jazyk C# s využitím nástroje Visual Studio.



Obr. 6.4-1 Úvodní okno programu Runoff Prophet

6.4.1 CHARAKTERISTIKA PROGRAMU

Program Runoff Prophet je srážkoodtokový model umožňující simulaci průtoků v závěrovém profilu zájmového povodí. Nejprve se model na základě měřených meteorologických a hydrologických dat nakalibruje, poté je schopen na základě predikovaných meteorologických dat modelovat budoucí průtok. Meteorologická a hydrologická data jsou dodána uživatelem softwaru.

Dle klasifikace modelů podle WMO (kapitola 3.1.1) se dá Runoff Prophet zařadit mezi modely, které je možné použít ve výzkumu a v budoucnu i pro návrhovou činnost v oblasti vodního hospodářství. Simuluje komplexní systém povodí a z hydrologických jevů zohledňuje vlhkost půdy, evapotranspiraci, průtok podzemní vody a průtok v korytě s časovým krokem větším než 1 den. Jedná se o deterministický koncepční lumped model s měsíčním krokem výpočtu.



Obr. 6.4-2 Runoff Prophet: O programu

6.4.2 ALGORITMUS

Program se skládá ze tří základních výpočetních bloků – Lokalizace, Kalibrace a Predikce. Celému výpočtu předchází vložení vstupních dat uživatelem.

1. Vstupní data

Uživatel zajistí vstupní data pro kalibraci a pro predikci v určeném formátu.

2. Lokalizace

Uživatel zadá zeměpisnou šířku stanice a plochu povodí. Na základě udané zeměpisné šířky jsou vypočítány následující podklady pro výpočet evapotranspirace:

N pro výpočet dle Thornthwaitea

Průměrný počet hodin denního svitu v příslušném měsíci N je získán výpočtem (viz kapitola 5.4.1).

p pro výpočet dle Blaney-Criddle

Průměrné denní procento z celkového počtu ročních hodin slunečního svitu v příslušném měsíci p je získáno interpolací z Tab. 5.4-2 (viz kapitola 5.4.2).

3. Kalibrace

Nejprve uživatel vybere způsob výpočtu evapotranspirace (Blaney-Criddle nebo Thornthwaite), který je dále používán v rámci celé kalibrace i predikce. Kalibrace Wangova modelu v programu Runff-Prophet je založená na principu diferenciální evoluce a její postup je následující: (schéma viz Obr. 6.4-3)

Určení parametrů diferenciální evoluce

V první verzi softwaru Runoff Prophet není možné si parametry diferenciální evoluce volit, jsou pevně nastaveny (Tab. 6.4-1).

Tab. 6.4-1 Parametry diferenciální evoluce v programu Runoff Prophet 1.0

Řídící parametr	Hodnota	Popis
D	37	Počet dimenzí
NP	370	Velikost populace
F	0.3	Mutační konstanta
CR	0.8	Práh křížení
Počet generací	1000	Počet kol šlechtění populace
Počet cyklů	10	Počet běhů celého procesu kalibrace

Určení horních hranic neznámých

Horní hranice kalibračních koeficientů k_s , k_g a k_e , stejně jako horní hranice počáteční vlhkosti S_{i-1} (což je S_{max}) jsou pevně nastaveny (Tab. 6.4-2).

Tab. 6.4-2 Horní hranice neznámých v programu Runoff Prophet 1.0

Neznámá	Označení horní hranice	Hodnota	Jednotka	Popis
k_s	k_{sMAX}	5	-	Koeficient povrchového odtoku
k_g	k_{gMAX}	2	-	Koeficient podzemního odtoku
k_e	k_{eMAX}	100	-	Koeficient evapotranspirace
S_{i-1}	S_{max}	500	mm	Počáteční vlhkost půdy

Vytvoření první populace

Každý jedinec v populaci má následující strukturu (Tab. 6.4-3), čítající celkem 38 prvků. Jedinců v populaci je celkem 370 (NP-velikost populace). Všechny prvky kromě NS (Nash-Sutcliffe) jedinců v první populaci jsou naplněny pomocí generátoru pseudonáhodných čísel, implementovaného v jazyce Fortran 77, a to náhodnými čísly v zadaném rozmezí. Toto rozmezí je pro parametr S_{i-1} 0 až S_{max} , pro parametry k_{s1} - k_{s12} 0 až k_{sMAX} , pro k_{g1} - k_{g12} 0 až k_{gMAX} a pro k_{e1} - k_{e12} analogicky 0 až k_{eMAX} . NS představuje „fitness kritérium“ každého jedince, a je určeno v následujícím kroku.

Tab. 6.4-3 Struktura každého jedince v populaci

NS	S_{i-1}	k_{s1}	k_{g1}	k_{e1}
		k_{s2}	k_{g2}	k_{e2}
		k_{s3}	k_{g3}	k_{e3}
		k_{s4}	k_{g4}	k_{e4}
		k_{s5}	k_{g5}	k_{e5}
		k_{s6}	k_{g6}	k_{e6}
		k_{s7}	k_{g7}	k_{e7}
		k_{s8}	k_{g8}	k_{e8}
		k_{s9}	k_{g9}	k_{e9}
		k_{s10}	k_{g10}	k_{e10}
		k_{s11}	k_{g11}	k_{e11}
		k_{s12}	k_{g12}	k_{e12}

Výpočet NS pro každého jedince

Pro každého jedince v populaci je pomocí Wangova modelu vypočteno kritérium Nash-Sutcliffe. Výpočet se uskutečňuje se vstupními daty pro kalibraci (měsíční řady teploty, úhrnu srážek a průtoků) postupně s použitím prvků každého jedince jako neznámých modelu.

Evoluce jedinců nové generace

Každý jedinec v nové populaci je vytvořen následujícím způsobem (podrobněji viz kapitola 5.5.2), popsáním v bodech I. až V.:

- I. *Výběr tři náhodných jedinců z původní populace*
- II. *Výpočet diferenciálního váhovaného vektoru a šumového vektoru*
- III. *Sestavení zkušebního jedince*

Při sestavování nového jedince je do původního algoritmu diferenciální evoluce (kapitola 5.5.2) přidáno omezení hodnot jednotlivých parametrů. Vytvoří se tzv. zkušební vektor (jedinec) a to tak, že pro každý jeho prvek se nejprve generuje náhodné číslo od 0 do 1 a porovnává se s hodnotou prahu křížení CR (0,8). Pokud je toto náhodné číslo menší než CR, na příslušnou pozici ve zkušebním vektoru se zapíše prvek z šumového vektoru, v opačném případě prvek z původního aktivního jedince. Dále se příslušným prvkem zkušebního vektoru stává prvek z původního jedince pokud:

kterýkoliv prvek < 0

$$S_{i-1} > S_{\max}$$

$$k_s (k_{s1} - k_{s12}) > k_{s\max}$$

$$k_g (k_{g1} - k_{g12}) > k_{g\max}$$

$$k_e (k_{e1} - k_{e12}) > k_{e\max}$$

- IV. *Výpočet NS zkušebního jedince*
- V. *Vytvoření nového jedince*

Vyhodnocení nejlepšího výsledku

Po vytvoření celé populace je vybrán jedinec s nejvyšší hodnotou kalibračního kritéria Nash-Sutcliffe. Tento jedinec (sada neznámých) je zapsán, stejně jako jeho dosažená hodnota NS.

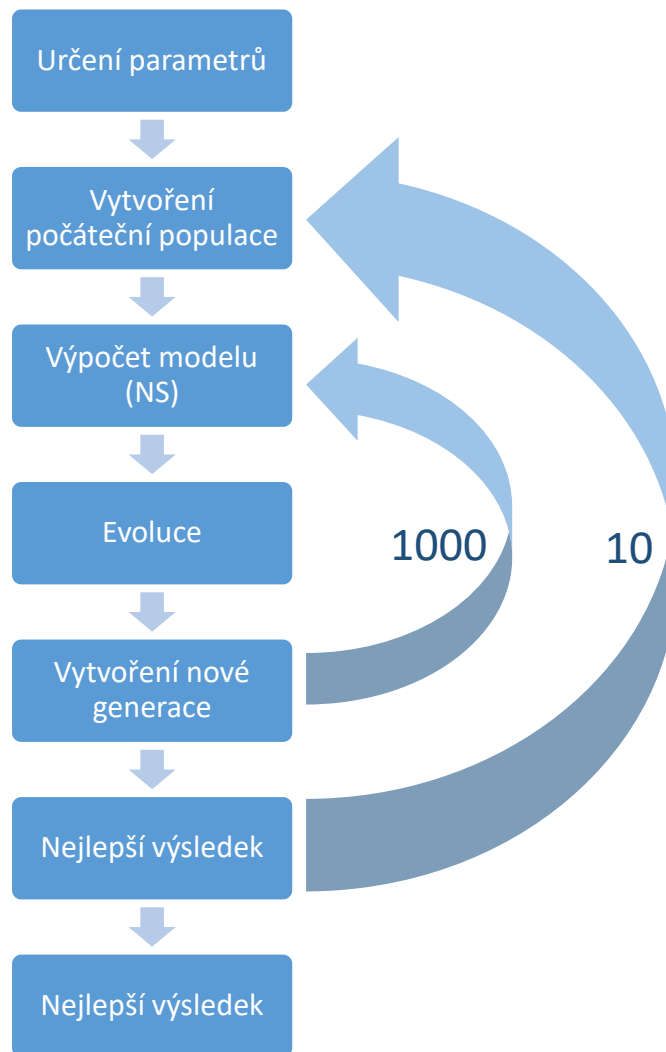
Po každém dalším evolučním cyklu je vybrán nejlepší jedinec z populace a jeho hodnota NS je porovnána s hodnotou zapsanou. Pokud je větší, je původní zapsaný jedinec přepsán, a to včetně dosažené hodnoty „fitness kritéria“. Celý proces evoluce je proveden 1000krát.

Pokud $NS > NS_{\text{zapsaný}} \rightarrow$ přepiš rekord

Zápis nejlepšího výsledku

Celý proces kalibrace je proveden 10krát. Po každém cyklu je zapsán výsledný nejlepší jedinec a jeho hodnota NS. Pokud je výsledné NS po kalibraci větší než NS zapsané, je přepsáno kritérium i příslušný jedinec.

Jedinec zapsaný po desátém cyklu kalibrace je výsledným řešením matice neznámých.



Obr. 6.4-3 Zjednodušené schéma průběhu kalibrace pomocí diferenciální evoluce v Runoff Prophet

4. Predikce

Predikce je provedení výpočtu pomocí Wangova modelu s již nakalibrovanými neznámými. Výpočet se uskutečňuje se vstupními daty pro predikci (měsíční řady teploty a úhrnu srážek). Výsledkem je řada měsíčních průtoků.

6.4.3 PRÁCE S PROGRAMEM

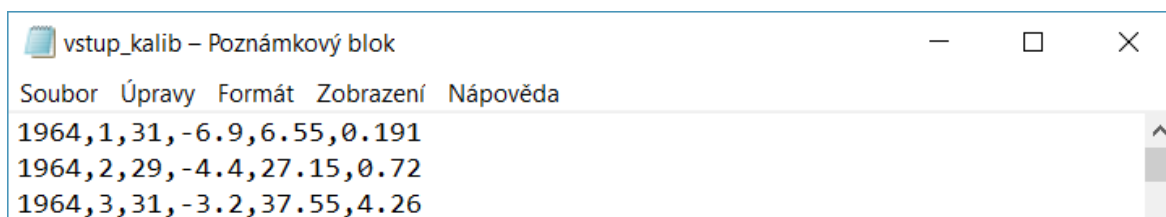
Nejprve je nutné opatřit si vstupní data pro kalibraci a predikci. Jedná se o meteorologická a hydrologická data vztažená ke konkrétním povodím. Pro každé povodí musí být nejprve provedena lokalizace (určení polohy). Následně je zvolen způsob výpočtu evapotranspirace (Thornthwaite nebo Blaney-Criddle), poté je možné přejít k samotné kalibraci. Po nakalibrování modelu přichází na řadu predikce. Pokud je predikce prováděna opakovaně pro stejné povodí, není třeba opakovat lokalizaci a kalibraci, a to ani po ukončení a opětovném spuštění programu (jsou uloženy z předchozího běhu programu). Pro ukládání uživatelských dat je možné využít složky Vstupy a Výstupy v adresářové struktuře programu.

1. Vstupní data

Všechna data, vstupující do programu Runoff Prophet musejí mít jako desetinný oddělovač tečku. Oddělovačem sloupců je čárka. Maximální délka měsíční řady dat pro kalibraci i predikci je 8333 let.

Vstupní data pro kalibraci

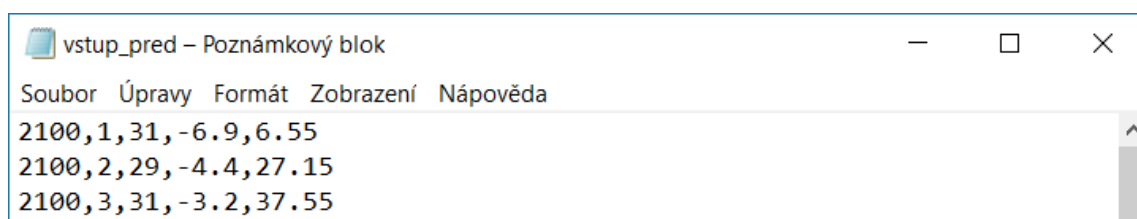
Vstupní data pro kalibraci musejí být ve formě textového souboru (bez přípony, .txt nebo .csv) bez záhlaví, obsahujícího řadu měsíčních meteorologických a hydrologických dat. Každý řádek obsahuje rok, měsíc (1-12), skutečný počet dní v měsíci (28-31), průměrnou měsíční teplotu [°C], celkový měsíční úhrn srážek [mm] a průtok v závěrovém profilu povodí [m³/s]. Jednotlivé charakteristiky jsou oddělené čárkami.



Obr. 6.4-4 Ukázka formátu vstupních dat pro kalibraci

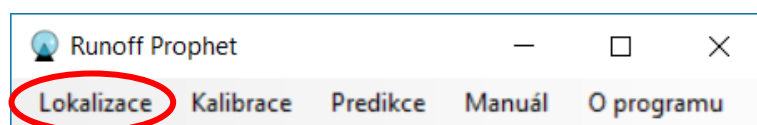
Vstupní data pro predikci

Vstupní data získaná pomocí downscalingu z klimatických modelů, generátorů počasí a dalších nástrojů je třeba upravit následujícím způsobem: vytvořit z nich textový soubor (bez přípony, .txt nebo .csv) bez záhlaví, obsahující řadu měsíčních meteorologických dat. Každý řádek musí obsahovat rok, měsíc (1-12), skutečný počet dní v měsíci (28-31), průměrnou měsíční teplotu [°C] a celkový měsíční úhrn srážek [mm]. Jednotlivé charakteristiky jsou oddělené čárkami.



Obr. 6.4-5 Ukázka formátu vstupních dat pro predikci

2. Lokalizace



Obr. 6.4-6 Runoff Prophet: tlačítko Lokalizace

Nejprve je potřeba zadat zeměpisnou šířku stanice, z níž pocházejí vstupní data pro zájmové povodí a dále plochu tohoto povodí. Obojí se provádí v okně Lokalizace (Obr. 6.4-7).

OK

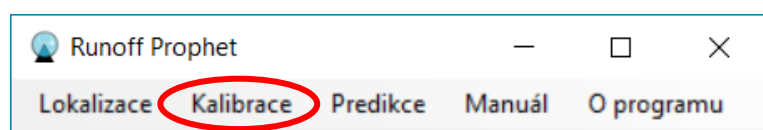
Obr. 6.4-7 Runoff Prophet: Lokalizace

Pokud jsou používána data z více meteostanic, využijeme výpočet průměrné zeměpisné šířky, který je v softwaru implementován. Přes tlačítko Více meteostanic v okně Lokalizace se dostaneme do nabídky Kombinace (Obr. 6.4-8). Zde je možné zadat zeměpisnou šířku pro každou stanici zvlášť a následně vypočítat zeměpisnou šířku průměrnou, a to buď aritmetickým nebo váženým průměrem. Je nutné použít takový způsob výpočtu průměru, jaký byl použit při úpravě meteorologických dat.

	Zeměpisná šířka	Příslušná plocha v km ²
Meteostanice 1	48.50	
Meteostanice 2	50.50	
Meteostanice 3		
Meteostanice 4		

Obr. 6.4-8 Runoff Prophet: Kombinace

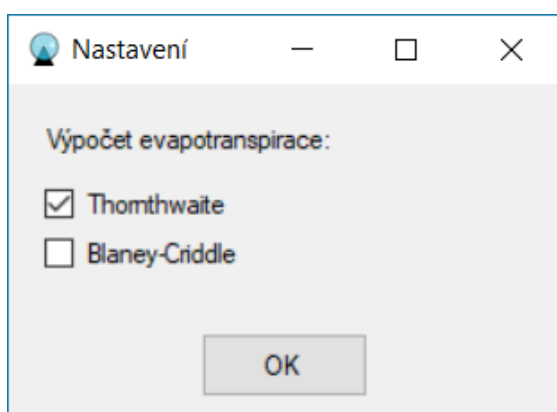
3. Kalibrace



Obr. 6.4-9 Runoff Prophet: tlačítko Kalibrace

Nastavení

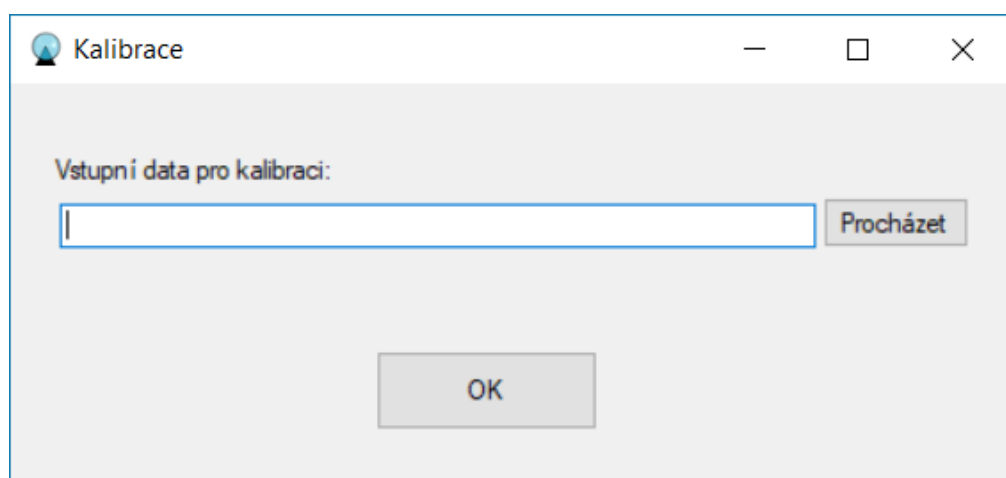
Nejprve je nastaven požadovaný způsob výpočtu výparu, který bude používán při kalibraci, i následné predikci.



Obr. 6.4-10 Runoff Prophet: Nastavení

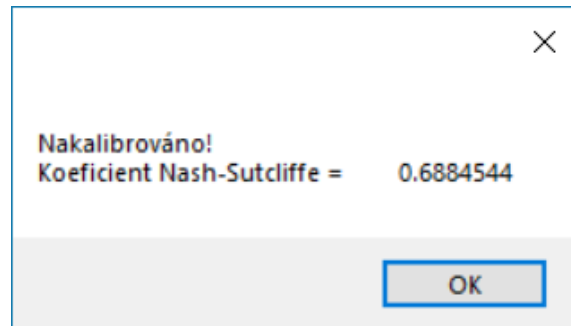
Kalibrace

Následně je možné přejít k samotné kalibraci – vybereme umístění našich vstupních dat a zahájíme výpočet. Kalibrace modelu může trvat několik minut.



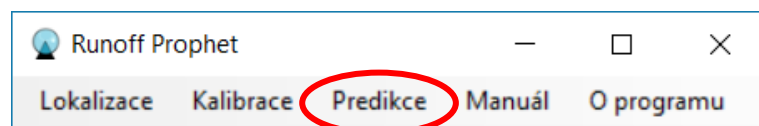
Obr. 6.4-11 Runoff Prophet: Kalibrace

Po úspěšném nakalibrování se zobrazí hodnota Nash-Sutcliffe (NS) - koeficientu účinnosti modelu. Nakalibrované koeficienty modelu se ukládají do souborů „koeficienty“ a „info“, výsledná hodnota kritéria Nash-Sutcliffe do souboru s názvem NS.



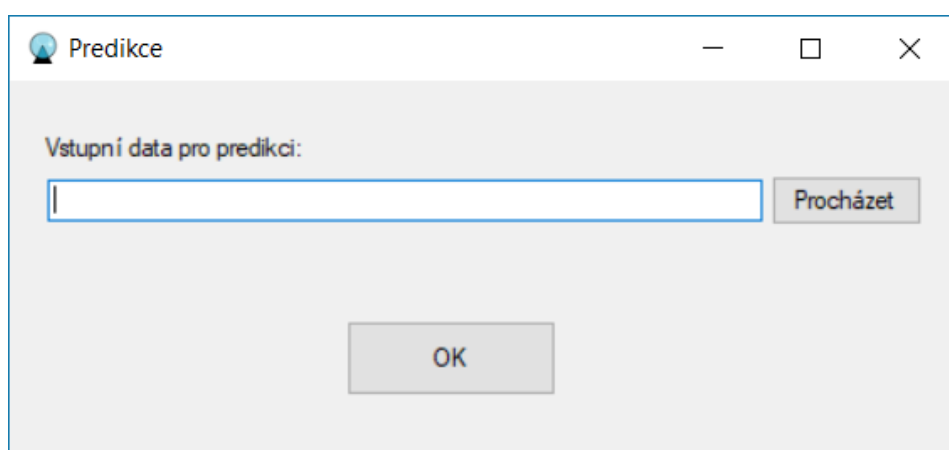
Obr. 6.4-12 Runoff Prophet: Výsledek kalibrace

4. Predikce



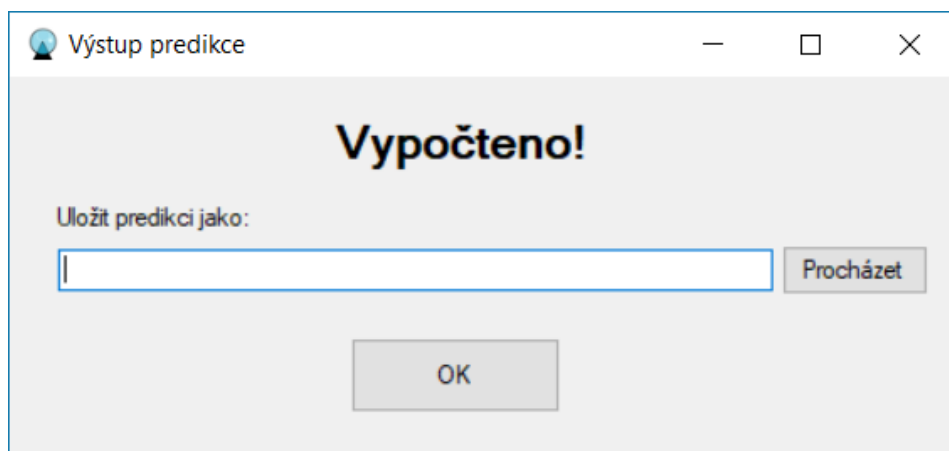
Obr. 6.4-13 Runoff Prophet: tlačítko Predikce

Po úspěšné kalibraci modelu můžeme přistoupit k predikci. Software nejdřív vyžaduje zadání umístění souboru se vstupními daty pro predikci.



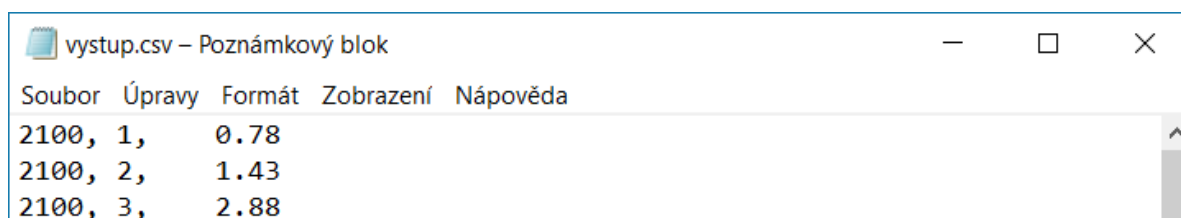
Obr. 6.4-14 Runoff Prophet: Predikce

Výpočet predikovaných průtoků proběhne v řádu několika sekund a poté je nutné zadat požadované umístění a název výstupního souboru.



Obr. 6.4-15 Runoff Prophet: Predikce

Predikovaná data jsou ukládána jako textový soubor bez přípony, s příponou .txt nebo .csv. Každý řádek obsahuje příslušný rok, měsíc (1-12) a předpovídaný průtok [m³/s].



Obr. 6.4-16 Ukázka formátu výstupních dat

6.5 APLIKACE RUNOFF PROPHET

Součástí diplomové práce je i praktická aplikace softwaru Runoff Prophet na konkrétní problém. Zájmovým územím, na kterém se program testoval, bylo povodí nad nádrží Vír I., končící závěrovým profilem Dalečín (Obr. 6.1-1). Cílem aplikace bylo určení průměrných měsíčních průtoků v tomto profilu ve vzdálené budoucnosti podle klimatického scénáře A1B z modelu HadCM3, implementovaného v generátoru počasí LARS-WG.

6.5.1 VSTUPNÍ DATA PRO KALIBRACI

Soubor vstupních dat pro kalibraci obsahoval řadu průměrných měsíčních průtoků v profilu Dalečín, měsíční teploty ze stanice Svatouch a průměrného úhrnu srážek ze stanic Svatouch a Polička, a to od ledna 1954 do prosince 2016 (63 let). Konkrétní délka kalibrační řady byla určena až na základě analýzy výsledného kritéria Nash-Sutcliffe pro její různé délky.

V tabulce (Tab. 6.5-1) vidíme srovnání NS při kalibraci programu Runoff Prophet s různou délkou řady vstupních dat. Posuzována byla kalibrace s oběma variantami výpočtu evapotranspirace (Thornthwaite i Blaney-Criddle). Zkoumané řady dat mají délku 20 až 63 let a vždy končí rokem 2016, aby co nejlépe vystihovaly současný trend klimatu. Srážko-odtokový model dosáhl při kalibraci všech posuzovaných možností koeficientu NS většího než 0,5, tedy uspokojivé přesnosti. Při výpočtu výparu podle Thornthwaitea byla dosažená hodnota NS při kalibraci vždy větší než 0,65, což značí dobrou účinnost modelu.

Tab. 6.5-1 Srovnání NS při kalibraci pro různou délku kalibrační řady

Od	Do	Počet let	NS	
			Thornthwaite	Blaney-Criddle
1954	2016	63	0.675	0.654
1957	2016	60	0.672	0.649
1962	2016	55	0.673	0.643
1967	2016	50	0.685	0.664
1972	2016	45	0.705	0.675
1977	2016	40	0.716	0.682
1982	2016	35	0.721	0.640
1987	2016	30	0.725	0.653
1992	2016	25	0.727	0.711
1997	2016	20	0.731	0.721

Na základě analýzy různé délky vstupní řady dat pro kalibraci byla vybrána varianta 45 let, se kterou bylo dosaženo velmi dobrého výsledku NS, a přitom je dostatečně dlouhá na to, aby dokázala uspokojivě vystihnout charakter klimatu v zájmovém povodí. Zároveň byl pro praktickou aplikaci v rámci diplomové práce vybrán způsob výpočtu evapotranspirace dle Thornthwaitea, protože model s ním dosahuje v zájmovém povodí při kalibraci lepších výsledků.

6.5.2 VSTUPNÍ DATA PRO VALIDACI

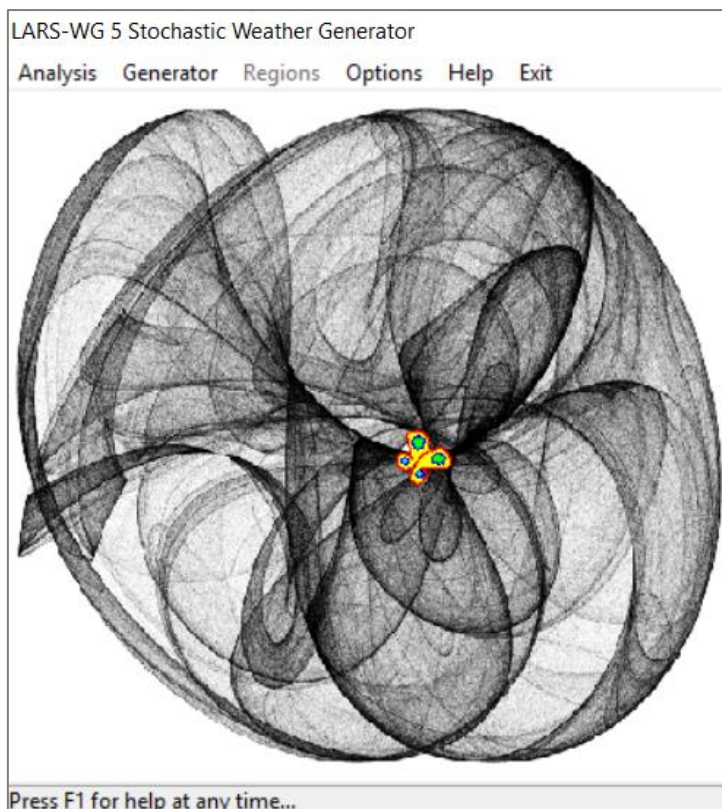
Daty pro validaci nakalibrovaného modelu byla řada průměrných měsíčních průtoků v profilu Dalečín, měsíční teploty ze stanice Svratouch a průměrného úhrnu srážek ze stanic Svratouch a Polička, a to od ledna 1957 do prosince 1971 (15 let). Použitá délka validační řady vychází z délky řady kalibrační – snahou bylo, aby z celkového objemu dat tvořila ta pro validaci cca 30 %.

6.5.3 VSTUPNÍ DATA PRO PREDIKCI

Vstupní data pro predikci byla získána pomocí statistického downscalingu prostřednictvím generátoru počasí LARS-WG. Ten na základě charakteristik vložené řady současných meteorologických dat generuje řady pro budoucí období podle implementovaných scénářů vývoje klimatu. LARS-WG počítá v denním kroku, proto bylo nutné výstupní data z něj před aplikací v Runoff Prophet převést na řadu měsíčních průměrů.

LARS-WG

Generátor počasí LARS-WG, jehož autorem je Mikhail A. Semenov (Rothamsted Research), je generátor typu „serial“, čili dokáže popisovat mokrá a suchá období a denní hodnoty generovat v závislosti na nich. Statistické charakteristiky zpracovává na principu Fourierových řad. Náhled uživatelského prostředí programu LARS-WG vidíme na Obr. 6.5-1. Podrobný popis práce s tímto programem najdeme v bakalářské práci autorky [1].



Obr. 6.5-1 Náhled programu LARS-WG

V LARS-WG je pro generování k dispozici několik klimatických modelů a příslušných scénářů vývoje klimatu. V rámci této práce je používán model HadCM3. Jde o globální klimatický model, vytvořený v Hadley Centre pro IPCC TAR. Atmosférická část modelu HadCM3 má horizontální rozlišení $3,75^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ (zeměpisná délka x zeměpisná šířka), tj. rozlišení cca 300 km. Ve vertikální rovině má k dispozici 19 úrovní. Model oceánu má horizontální rozlišení $1,25^{\circ} \times 1,25^{\circ}$ a 20 vertikálních úrovní. Z klimatického modelu HadCM3 jsou v programu LARS-WG k dispozici tři emisní scénáře, definované podle AR4 (více viz kapitola 3.2.1). Pro potřeby této práce byl vybrán scénář A1B, který reprezentuje globalizovaný svět s rychlým růstem ekonomiky, vývojem nových technologií a vyváženým využíváním všech zdrojů energie [1].

Vstupní data pro LARS-WG

Soubor vstupních dat pro program LARS-WG se skládal z řad minimální a maximální denní teploty ze stanice Svratouch a řad denních úhrnů srážek ze stanice Svratouch a ze stanice Polička, a to od 1. ledna 1972 do 31. prosince 2016 (45 let). Tato délka řady byla zvolena na základě délky řady kalibrační. Řada denního úhrnu srážek ze stanice Polička měla mezeru mezi 1. 3. až 30. 4. 1992 (61 hodnot) a mezi 1. 1. až 14. 1. 2015 (14 hodnot). Chybějící data byla nahrazena příslušnými denními úhrny srážek ze stanice Svratouch. Řady dat byly zpracovány do formy vhodné pro LARS-WG, a to jako jeden soubor dat pro stanici Polička, druhý pro stanici Svratouch.

Výstup z LARS-WG

Výstupem z generátoru počasí byly dvě sady dat – jedna pro Svratouch a druhá pro Poličku. U obou šlo o syntetickou současnou řadu Baseline (45 let), generovanou řadu v období 2011-2030 (20 let), 2046-2065 (20 let) a 2080-2099 (20 let). Všechna výstupní data byla v denním kroku, proto byl nejprve pro obě stanice proveden přepočítání na posloupnosti měsíčních průměrů. Následně byl u všech řad proveden průměr výsledků stanic Svratouch a Polička.

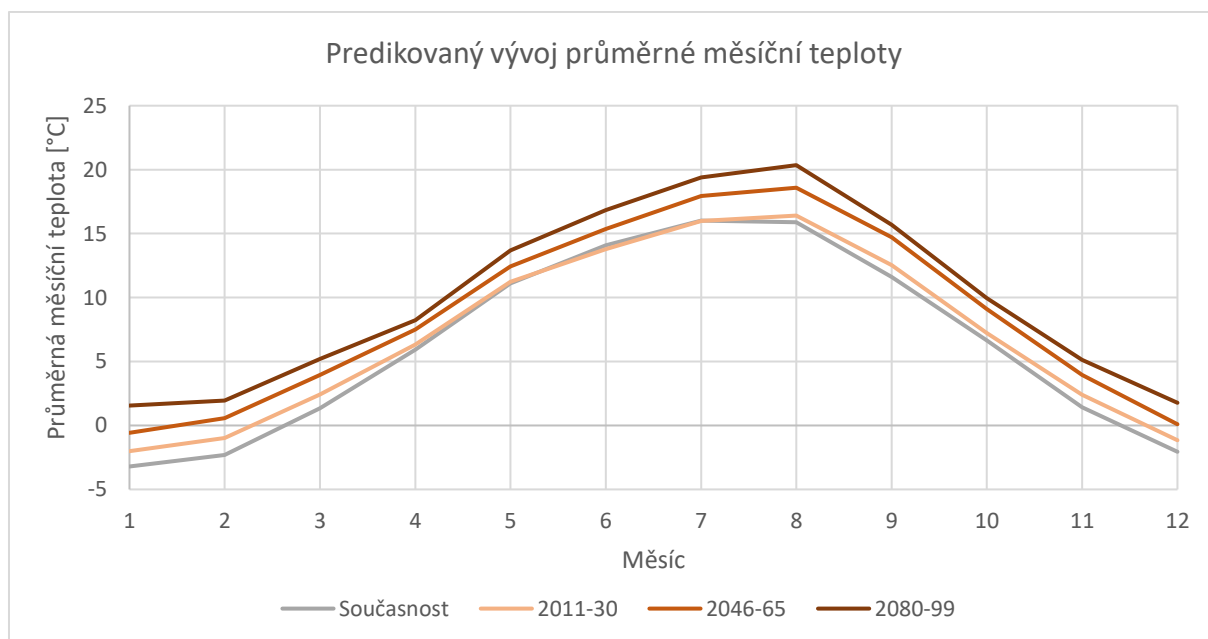
Vstupními daty pro predikci průtoků v profilu Dalečín tedy byly celkem čtyři řady průměrné měsíční teploty a měsíčního úhrnu srážek. Všechny tři budoucí řady mají délku 20 let a charakterizují jedno budoucí období podle scénáře A1B, řada Baseline (45 let) je syntetickou řadou reprezentující současné období.

V Tab. 6.5-2 vidíme srovnání současné průměrné měsíční teploty, vypočítané z kalibrační řady (45 let), a průměrné měsíční teploty generovaných řad ve třech budoucích obdobích. U hodnot teploty v budoucích obdobích byla provedena korekce na Baseline (viz 6.5.8). Z tabulky je patrné, že podle scénáře A1B dojde na území zájmového povodí k výraznému oteplení. V zimních měsících se průměrná měsíční teplota postupně dostane z hodnot záporných do hodnot kladných, konkrétně v měsíci lednu to znamená změnu nejvýraznější, a to zvýšení o $4,8^{\circ}\text{C}$ oproti současnosti.

Tab. 6.5-2 Data pro predikci: Průměrná měsíční teplota

Měsíc	Průměrná měsíční teplota [°C]			
	Současnost	2011-30	2046-65	2080-99
1	-3.2	-2.0	-0.6	1.6
2	-2.3	-1.0	0.6	1.9
3	1.3	2.4	3.9	5.2
4	5.9	6.3	7.5	8.2
5	11.1	11.2	12.4	13.7
6	14.1	13.8	15.4	16.8
7	16.0	16.0	17.9	19.4
8	15.9	16.4	18.6	20.4
9	11.6	12.5	14.7	15.7
10	6.6	7.2	9.1	10.0
11	1.4	2.4	3.9	5.1
12	-2.1	-1.2	0.1	1.8
<i>Průměr:</i>	<i>6.4</i>	<i>7.0</i>	<i>8.6</i>	<i>10.0</i>

Predikovaný vývoj průměrné měsíční teploty můžeme sledovat i na Obr. 6.5-2. Vidíme, že chod teploty v roce zůstává téměř stejný jako v současné době, ale postupně se posouvá k vyšším hodnotám.



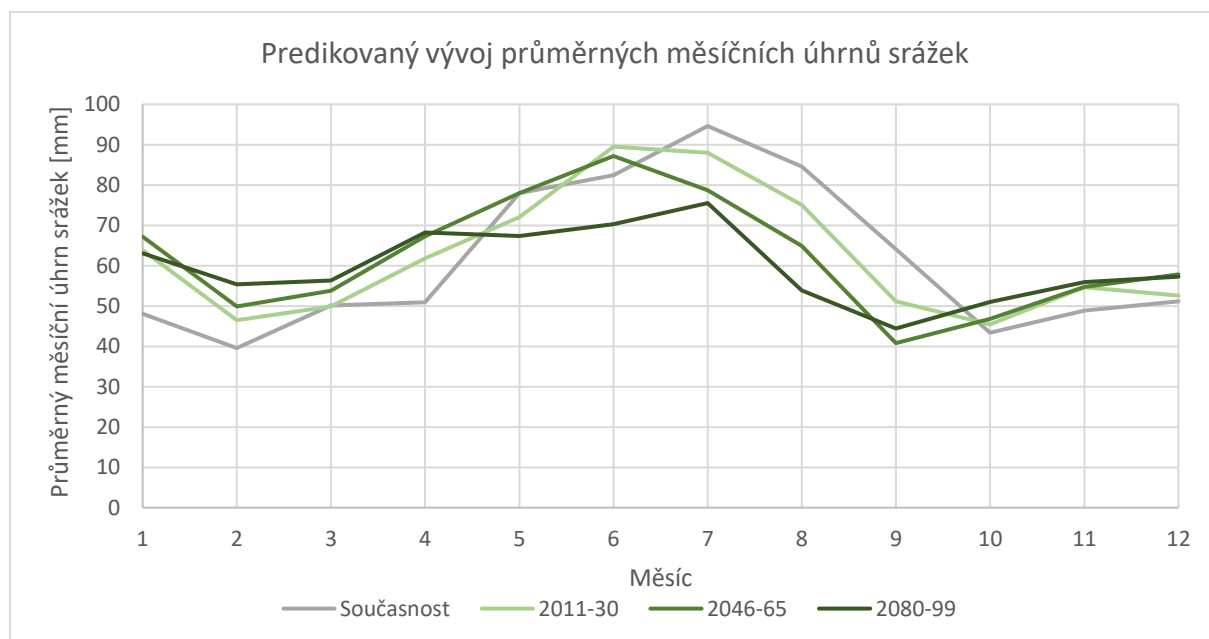
Obr. 6.5-2 Predikovaný vývoj průměrné měsíční teploty v zájmovém povodí

Co se týče průměrných měsíčních úhrnů srážek, jejich hodnoty v jednotlivých budoucích obdobích můžeme porovnat v Tab. 6.5-3 a na Obr. 6.5-3. Sloupec v tabulce s názvem Současnost reprezentuje průměrné měsíční úhrny srážek pro jednotlivé měsíce v roce, vypočítané z kalibrační řady. U hodnot teploty v budoucích obdobích byla provedena korekce na Baseline (viz 6.5.8). Ze srovnání je patrné, že v budoucnu dochází podle scénáře A1B

k postupnému rovnoměrnějšímu rozdělení srážek během roku. K nejvýraznějšímu zvýšení dochází v období 2080-2099 v měsíci únoru, a to o 39,9% (15,8 mm) oproti současnosti. Největší snížení nastane v srpnu, a to v poměru k současnosti o 36,3% (30,7 mm).

Tab. 6.5-3 Data pro predikci: Průměrné měsíční úhrny srážek

Měsíc	Průměrný měsíční úhrn srážek [mm]			
	Současnost	2011-30	2046-65	2080-99
1	48.1	63.8	67.2	63.1
2	39.6	46.5	49.9	55.4
3	50.2	49.9	53.8	56.3
4	50.9	61.8	67.3	68.2
5	78.0	72.0	78.0	67.4
6	82.4	89.5	87.2	70.3
7	94.6	88.0	78.7	75.5
8	84.6	75.1	64.9	53.9
9	64.1	51.2	40.8	44.4
10	43.4	45.4	46.8	51.0
11	48.8	54.7	54.8	55.9
12	51.2	52.6	57.8	57.3
<i>Suma:</i>	<i>735.9</i>	<i>750.5</i>	<i>747.0</i>	<i>718.8</i>



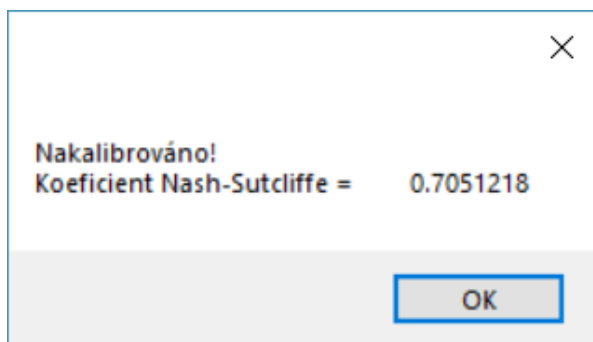
Obr. 6.5-3 Predikovaný vývoj průměrných měsíčních úhrnů srážek v zájmovém povodí

6.5.4 LOKALIZACE

Protože data pro kalibraci i predikci byla získána kombinací ze dvou stanic (aritmetickým průměrem), bylo třeba v kroku lokalizace stanice vypočítat průměrnou zeměpisnou šířku. Ta byla pro kombinaci meteorologických dat ze Svatouchu a Poličky stanovena na 49,73° s. š. Plocha zájmového povodí byla 366,94 km².

6.5.5 KALIBRACE

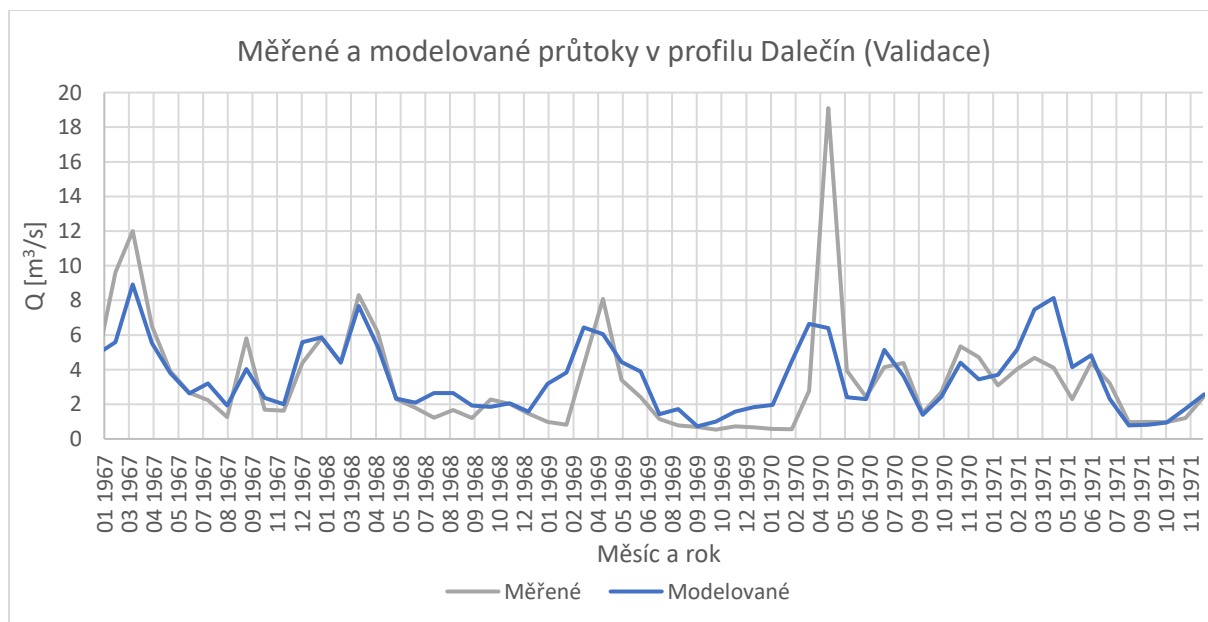
Pro praktickou aplikaci Runoff Prophet byla zvolena možnost výpočtu evapotranspirace dle Thonthwaitea (viz kapitola 6.5.1). Model po nakalibrování dosahoval hodnoty kritéria Nash-Sutcliffe 0,705 (Obr. 6.5-4), což dle Tab. 6.3-1 odpovídá dobré účinnosti modelu.



Obr. 6.5-4 Výsledné NS kritérium

6.5.6 VALIDACE

Pro validaci modelu byla v programu Runoff Prophet provedena predikce řady průměrných měsíčních průtoků na základě reálných měřených meteorologických dat z let 1957 až 1971. Výsledek predikce byl následně porovnán s příslušnými měřenými průtoky. Na Obr. 6.5-5 vidíme část validační modelované řady (Modelované) v porovnání s řadou měřenou (Měřené). Pro zjištění účinnosti modelu v rámci validace byl pro tyto dvě řady vypočítán Nash-Sutcliffe koeficient, který dosáhl hodnoty 0,52. Na základě tohoto zjištění je možné prohlásit, že model uspokojivě vystihuje srážko-odtokový proces v zájmovém povodí.



Obr. 6.5-5 Měřené průměrné měsíční průtoky v profilu Dalečín a průtoky modelované pomocí Runoff Prophet (Validace)

6.5.7 PREDIKCE

Výsledkem predikce byly následující řady průměrných měsíčních průtoků: Baseline (45 let), 2011-2030 (20 let), 2046-2065 (20 let) a 2080-2099 (20 let). Všechny modelované řady průtoků byly vytvořeny na základě scénáře A1B z AR4 IPCC, implementovaného v LARS-WG.

6.5.8 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Pro správnou interpretaci bylo nutné provést u výsledných řad predikovaných měsíčních průtoků korekci na Baseline. Šlo o pronásobení každého prvku těchto řad koeficientem poměru mezi průměrným dlouhodobým průtokem vypočítaným z reálné (kalibrační) řady a z Baseline. Analogickým procesem prošly před interpretací i měsíční řady teploty a úhrnů srážek.

6.5.9 VÝSLEDKY

Výsledkem praktické aplikace softwaru Runoff Prophet jsou predikované řady průměrných měsíčních průtoků s délkou 20 let v obdobích 2011-2030, 2046-2065 a 2080-2099. Jsou to řady, udávající simulovaný budoucí průtok ve vodoměrném profilu Dalečín, modelovaný na základě meteorologických dat, predikovaných pro oblast zájmového povodí. Vstupní data odpovídala klimatickému scénáři A1B, výstupní řady průtoků tedy charakterizují vývoj hydrologické situace podle stejného scénáře.

Pro výsledné řady průměrných měsíčních průtoků, charakterizující současnost (kalibrační řadu) i budoucí období, byly vypočítány průměrné měsíční průtoky v jednotlivých měsících v roce (Tab. 6.5-4). Největší průměrný průtok zaznamenáme ve všech budoucích obdobích v měsíci březnu, stejně jako v současnosti. Nejmenší průměrný průtok je v současnosti v říjnu, ve všech třech budoucích obdobích se minimum přesouvá na září.

Tab. 6.5-4 Výsledky: Průměrný měsíční průtok

Měsíc	Průměrný měsíční průtok [m ³ /s]			
	Současnost	2011-30	2046-65	2080-99
1	3.9	4.3	4.0	3.2
2	4.4	4.6	4.5	3.8
3	6.9	7.3	6.6	4.7
4	5.4	5.2	4.3	3.4
5	3.2	2.9	2.9	2.6
6	2.3	2.3	2.4	1.8
7	2.4	2.7	2.4	2.0
8	1.8	1.5	1.2	0.9
9	1.8	1.2	0.8	0.6
10	1.7	1.4	1.1	1.0
11	2.3	2.1	1.8	1.8
12	3.4	3.2	3.1	3.0
Průměr:	3.3	3.2	2.9	2.4

Následující tabulka (Tab. 6.5-5) ukazuje procentuální změnu průměrného měsíčního průtoků oproti současnosti v každém období v jednotlivých měsících. V období 2011-2030 dochází k nárůstu v měsících lednu, únoru, březnu, červnu a červenci, ve kterém bylo zaznamenáno

největší zvýšení průtoku, a to o 12 % oproti současnosti. U ostatních měsíců nastane podle modelu snížení, a to v případě září až o 34 % oproti současnosti. V období 2046-2065 dojde k nepatrnému zvýšení průměrného měsíčního průtoku pouze v lednu, únoru a červnu. V ostatních měsících nastává výrazné snížení, které dosahuje nejvyšší hodnoty v září, a to 56,7 % oproti současné hodnotě. V období 2080-2099 dojde podle predikce ke snížení průměrného průtoku ve všech měsících, a to v případě září až o 66,9 % oproti současnosti.

Tab. 6.5-5 Výsledky: Změna průměrného měsíčního průtoku oproti současnosti

Měsíc	Změna průměrného měsíčního průtoku oproti současnosti [%]		
	2011-30	2046-65	2080-99
1	8.4	2.4	-18.6
2	5.4	2.9	-13.5
3	5.4	-4.5	-31.8
4	-4.2	-21.6	-38.1
5	-11.0	-9.5	-20.1
6	0.8	1.4	-21.4
7	12.0	-0.1	-16.2
8	-15.1	-32.5	-48.9
9	-34.0	-56.7	-66.9
10	-21.6	-38.7	-42.3
11	-8.9	-22.9	-21.2
12	-5.4	-9.3	-12.1
<i>Průměr:</i>	-5.7	-15.7	-29.3

V Tab. 6.5-6 vidíme průměrný podíl celkového ročního průtoku profilem Dalečín v jednotlivých měsících. V současní době odtéká největší podíl vody v měsíci březnu (17,5 %) a tento měsíc zůstane nejvydatnějším i do budoucna.

Tab. 6.5-6 Výsledky: Průměrný podíl celkového ročního průtoku

Měsíc	Průměrný podíl celkového ročního průtoku [%]			
	Současnost	2011-30	2046-65	2080-99
1	9.9	11.0	11.5	11.1
2	11.1	12.0	12.9	13.2
3	17.5	18.9	18.9	16.4
4	13.7	13.5	12.2	11.7
5	8.1	7.4	8.3	8.9
6	5.8	6.0	6.7	6.3
7	6.2	7.1	7.0	7.1
8	4.5	3.9	3.5	3.2
9	4.6	3.1	2.2	2.1
10	4.4	3.5	3.0	3.5
11	5.7	5.4	5.0	6.2
12	8.5	8.2	8.7	10.3

Dále můžeme sledovat změnu průměrného podílu z celkového ročního průtoku profilem v jednotlivých měsících oproti současnému období. Z Tab. 6.5-7 je patrné, že v období 2011-2030 bude větší procento roční zásoby vody odtékat v měsících lednu, únoru, březnu, červnu a červenci. V ostatních měsících dojde ke snížení, a to v případě září až o 1,5 % oproti současnosti. V období mezi lety 2046 až 2065 dojde k největšímu poklesu také v měsíci září (o 2,3%), dále v dubnu, srpnu, říjnu a listopadu. V ostatních měsících se podíl zvýší. V posledním sledovaném období dojde ke snížení podílu celkového ročního průtoku na začátku jara a na přelomu léta a podzimu. Největší změna nastane v září (snížení o 2,5 %) a v únoru (zvýšení o 2,1%).

Tab. 6.5-7 Výsledky: Změna průměrného podílu celkového ročního průtoku oproti současnosti

Měsíc	Změna průměrného podílu celkového ročního průtoku [%]		
	2011-30	2046-65	2080-99
1	1.1	1.6	1.2
2	0.9	1.8	2.1
3	1.4	1.4	-1.1
4	-0.2	-1.5	-2.0
5	-0.7	0.2	0.8
6	0.2	0.9	0.5
7	0.9	0.8	0.9
8	-0.6	-1.1	-1.3
9	-1.5	-2.3	-2.5
10	-0.9	-1.3	-0.9
11	-0.4	-0.7	0.5
12	-0.3	0.2	1.8

7 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ

7.1 SESTAVENÍ MODELU

Na základě řídicích rovnic získaných v článku [5] byl sestaven srážko-odtokový model, který je v této diplomové práci nazýván jako Wangův. Po analýze výsledků různých variant jeho struktury byla vybrána ta nejvhodnější, výsledky její kalibrace a validace jsou součástí této kapitoly.

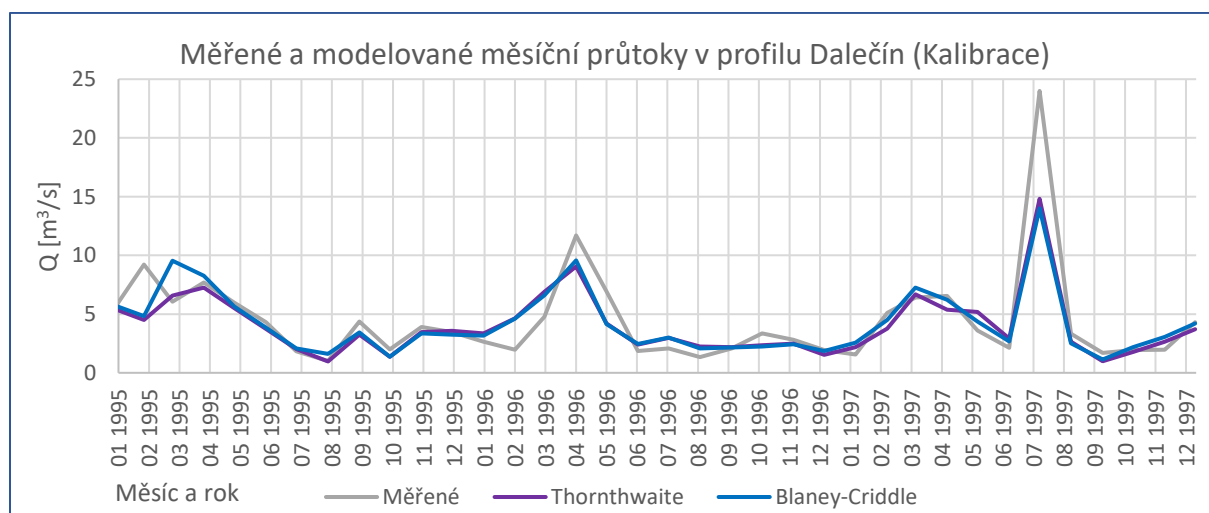
7.1.1 VÝSLEDKY KALIBRACE

Sestavený Wangův model byl v programu MS Excel nakalibrován a následně byla provedena validace. Délka řady měřených veličin pro kalibraci byla 35 let (1970-2004), délka validační řady 12 let (2005-2016). V Tab. 7.1-1 vidíme srovnání výsledného koeficientu účinnosti Nash-Sutcliffe Wangova modelu při různých způsobech výpočtu výparu. NS modelované řady dosahuje po kalibraci hodnoty větší než 0,65, což charakterizuje dobrou účinnost modelu. U validační řady bylo s velkou rezervou dosaženo výsledné hodnoty NS větší než 0,5, čili hodnoty uspokojivé. Wangův model byl na základě těchto výsledků ohodnocen jako vhodný nástroj pro modelování průtoků v zájmovém povodí.

Tab. 7.1-1 Srovnání Nash-Sutcliffe koeficientu Wangova modelu při různém způsobu výpočtu evapotranspirace

Výpočet výparu	Nash-Sutcliffe	
	Kalibrace	Validace
Thornthwaite	0.674	0.593
Blaney-Criddle	0.669	0.586

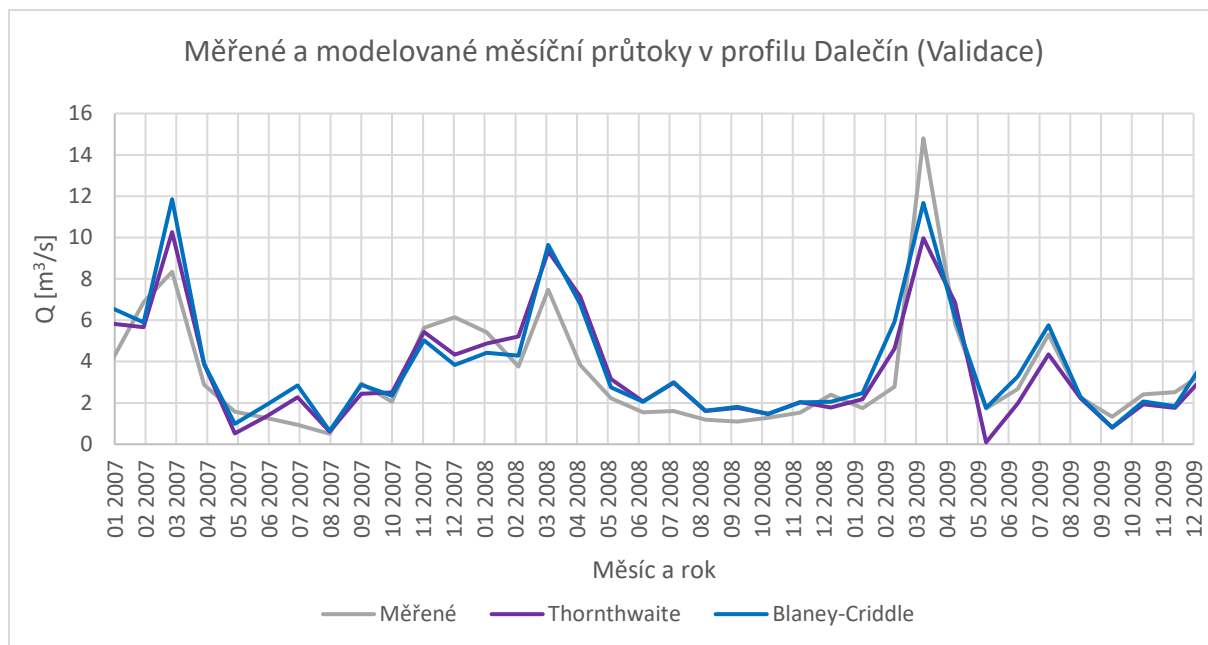
Na Obr. 7.1-1 vidíme výřez srovnání měřené řady průtoků v profilu Dalečín v měsíčním kroku a řady získané po kalibraci Wangova modelu. Pro úplnost jsou v grafu zobrazeny výsledky s použitím obou možností výpočtu evapotranspirace.



Obr. 7.1-1 Graf měřených průtoků v profilu Dalečín a průtoků modelovaných pomocí Wangova modelu s použitím různého způsobu výpočtu evapotranspirace (Kalibrace)

7.1.2 VÝSLEDKY VALIDACE

Obr. 7.1-2 zobrazuje výřez srovnání validační řady průměrných měsíčních (měřených) průtoků v profilu Dalečín a průtoků modelovaných. Modelovanými průtoky jsou v grafu dvě samostatné řady v měsíčním kroku, každá vypočítaná s použitím jiného způsobu výpočtu výparu; jedna s metodou Thornthwaite, druhá s Blaney-Criddle.

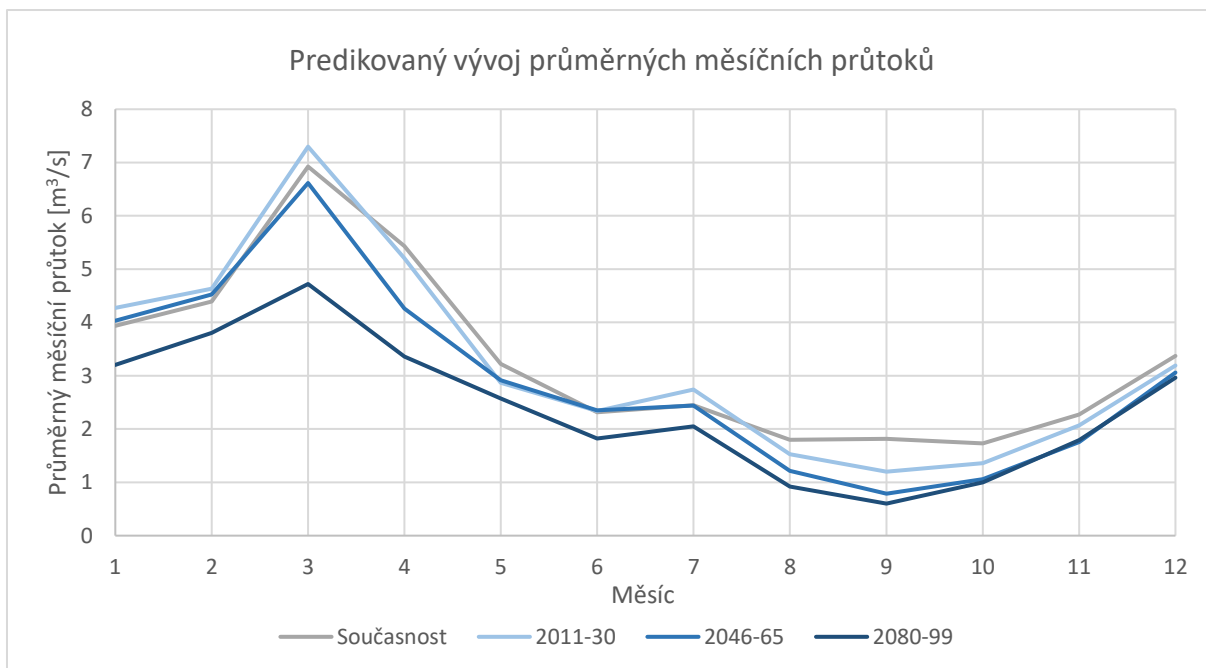


Obr. 7.1-2 Graf měřených průtoků v profilu Dalečín a průtoků modelovaných pomocí Wangova modelu s použitím různého způsobu výpočtu evapotranspirace (Validace)

7.2 APLIKACE SOFTWARE RUNOFF PROPHET

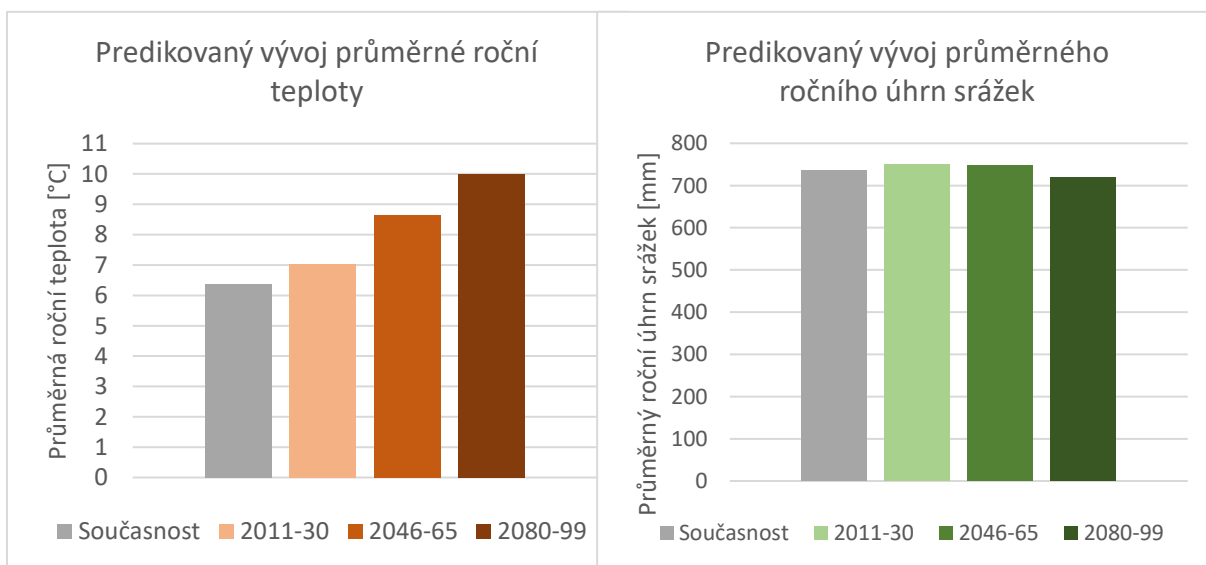
Na základě sestaveného Wangova modelu byl vyvinut uživatelský program Runoff Prophet, který byl následně aplikován na konkrétní příklad. Výstupem této praktické aplikace jsou predikované řady průměrných měsíčních průtoků s délkou 20 let v obdobích 2011-2030, 2046-2065 a 2080-2099 v profilu Dalečín na řece Svatce, odpovídající vývoji podle klimatického scénáře A1B.

Z predikovaných řad byly pro každé sledované období vypočítány průměrné měsíční průtoky pro jednotlivé měsíce v roce, které byly v grafu porovnány s průměrnými průtoky současnými, vypočítanými z kalibrační řady. Na Obr. 7.2-1 vidíme, že v období 2011-2030 je rozložení průměrného měsíčního průtoku v rámci roku téměř stejné jako v současné době. V některých měsících dojde k mírnému zvýšení jeho hodnoty, výrazné snížení nastane pouze na podzim. Mezi lety 2046 a 2065 dochází oproti období předchozímu k poklesu průměrného průtoky ve všech měsících. V posledním sledovaném období je rozdíl oproti současným průměrným průtokům ve všech měsících jasně patrný. Jde o výrazné snížení, a to od 12,1 % (prosinec) až do 66,9 % (září) oproti současnosti.



Obr. 7.2-1 Predikovaný vývoj průměrných měsíčních průtoků v závěrovém profilu zájmového povodí

Vstupem pro predikci byly syntetické řady meteorologických dat, získané použitím generátoru počasí LARS-WG. Pro účely ucelené interpretace výsledků byla pro každé období vypočítána průměrná roční teplota a průměrný roční úhrn srážek, které vidíme na Obr. 7.2-2.

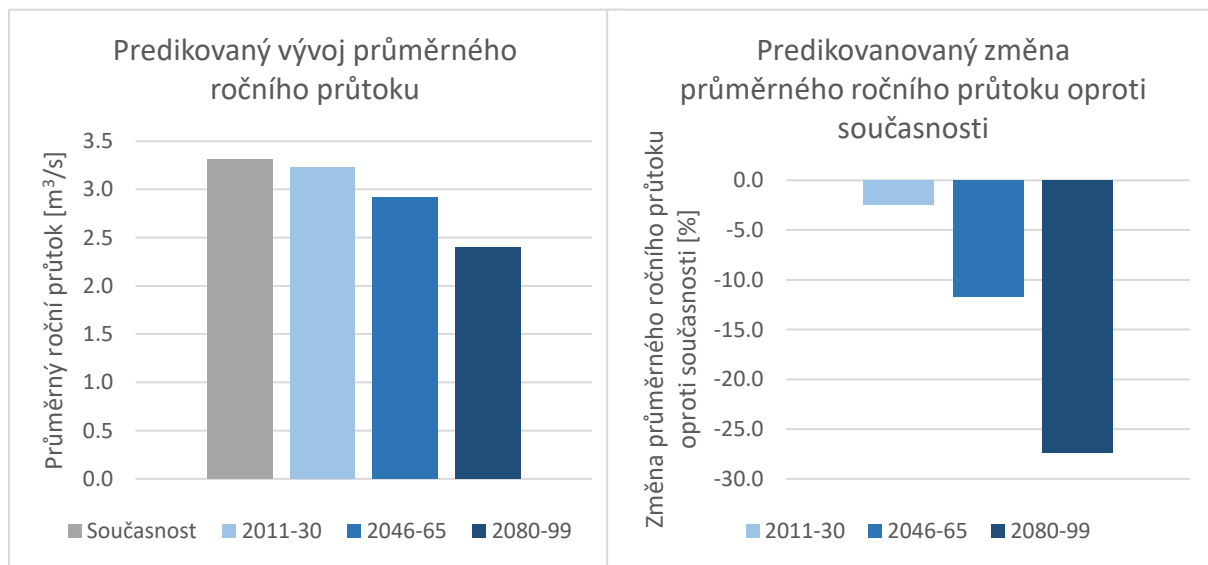


Obr. 7.2-2 Predikovaný vývoj průměrné teploty a průměrného ročního úhrnu srážek v zájmovém povodí

V současné době, kterou reprezentuje kalibrační řada, je průměrná roční teplota vzduchu 6,4 °C. V období 2011-2030 dojde podle scénáře A1B v zájmovém povodí ke zvýšení teploty na 7 °C. Mezi lety 2046 a 2065 už bude průměrná roční teplota dosahovat 8,6 °C, v období 2080-2099 dosáhne 10 °C. Celkově se tedy do roku 2099 zvýší průměrná roční teplota vzduchu na území zájmového povodí o 3,6 °C.

Co se týče průměrného ročního úhrnu srážek, z výsledků získaných při řešení diplomové práce vyplývá, že jeho hodnota zůstane v budoucích obdobích téměř konstantní. V současné době je průměrný úhrn srážek na zájmovém povodí 735,9 mm/rok. V období 2010-2030 naroste jeho hodnota o 2 %, v období 2046-2065 bude jeho hodnota o 1,5 % vyšší než v současnosti. Mezi lety 2080 a 2099 nastane podle scénáře A1B mírné snížení průměrného ročního úhrnu srážek, a to o 2,3 % oproti současnosti.

Z predikovaných řad průtoků byl pro každé budoucí období vypočítán průměrný roční průtok v profilu Dalečín a jeho změna oproti současnosti. Na Obr. 7.2-3 můžeme vidět porovnání získaných výsledků v grafické podobě.



Obr. 7.2-3 Predikovaný vývoj průměrného ročního průtoku a jeho změny oproti současnosti

Současná hodnota průměrného ročního průtoku, získaná z kalibrační řady, je 3,3 m³/s. V období 2011-2030 dojde podle scénáře A1B k jejímu poklesu o 2,5 %, a to na 3,2 m³/s. Mezi lety 2046 a 2065 už bude průměrný roční průtok pouze 2,9 m³/s, což odpovídá snížení o 11,7 % oproti současnosti. V období před rokem 2099 dojde ke průměrného ročního průtoku o 27,4 %, tedy na pouhých 2,4 m³/s.

8 ZÁVĚR

Na základě řídicích rovnic z článku [5] byl sestaven srážko-odtokový Wangův model. Po vzájemném porovnání bylo prokázáno, že jeho použití je efektivnější než predikce průtoků pomocí jednoduché bilance (Bilančního modelu), a že je tedy vhodné jej použít jako podklad pro vytvoření uživatelského programu.

Jako optimální se ukázala struktura Wangova modelu s 37 kalibračními koeficienty a s možností volby způsobu výpočtu evapotranspirace (Thornthwaite nebo Blaney-Criddle). Při kontrolní kalibraci (kapitola 7.1.1) bylo dosaženo hodnoty kritéria Nash-Sutcliffe větší než 0,65, což značí dobrou účinnost modelu. Při validaci (kapitola 7.1.2) byla hodnota NS s velkou rezervou nad hranicí účinnosti uspokojivé.

S použitím vybrané varianty Wangova modelu byl vytvořen uživatelský software s názvem Runoff Prophet, který je ve verzi 1.0 připraven k distribuci. Jedná se o koncepční srážko-odtokový model, umožňující predikci průtoků v závěrovém profilu zájmového povodí v měsíčním kroku. K optimalizaci modelu je využívána metoda diferenciální evoluce s koeficientem účinnosti modelu Nash-Sutcliffe coby kalibračním kritériem.

Software Runoff Prophet byl otestován na povodí nad nádrží Víř I. (část povodí III. řádu 4-15-01 Svratka po Svitavu), končící závěrovým profilem Dalečín. Vstupní data pro predikci byla získána downscalingem prvků scénáře A1B z modelu HadCM3 pomocí generátoru počasí LARS-WG. Z predikovaných meteorologických dat vyplývá, že do roku 2099 dojde na ploše povodí ke zvýšení průměrné roční teploty vzduchu o 3,6 °C, tedy na 10 °C. Tato hodnota se velmi přibližuje výsledkům projektu VaV MŽP, který hovoří o jejím zvýšení o 3,3 °C oproti referenčnímu období 1961-1990 v rámci celého území České republiky [14]. IPCC uvádí v hodnotící zprávě AR4 rozmezí predikované globální teploty pro období 2080-2099 dle scénáře A1B mezi 1,7 a 4,4 °C [15], čemuž data v této práci odpovídají. Vyhodnocena byla i průměrná teplota v jednotlivých měsících. Chod teploty během roku zůstává v budoucnu téměř totožný jako v současné době, posouvá se ale k vyšším hodnotám. Do roku 2099 nezůstane v žádném ze zimních měsíců průměrná teplota v záporných číslech a průměrné letní teploty se vyšplhají až na 20,4 °C (srpen).

Součástí predikovaných meteorologických dat byly i informace o budoucích srážkách. Předpovídaný průměrný roční úhrn srážek v zájmovém povodí bude v budoucnu téměř stejný jako v současnosti; do roku 2099 nastane jeho snížení o 2,3 %, a to ze 735,9 na 718,8 mm. Výsledky projektu VaV ukazují na jeho snížení o 0,2 % (od období 1961-1990 podle modelu ALADIN 25) [14], oproti čemuž nejsou závěry diplomové práce významně rozdílné. Zkoumáno bylo i budoucí rozložení srážek v roce. Průměrné měsíční úhrny budou oproti současnosti rozloženy rovnoměrněji než doposud. K navýšení úhrnu srážek oproti současnosti dojde do roku 2099 na zájmovém povodí v měsících od října do dubna, k poklesu v období od května do září, a to v případě srpna až o 36,3 %.

Z analýzy řad průtoků, simulovaných pomocí programu Runoff Prophet pro měrný profil Dalečín, vyplývá, že do roku 2099 dojde dle scénáře A1B ke snížení průměrného ročního průtoků o 27,4 %. V roce 2011 byly zveřejněny výsledky projektu VaV ke zpřesnění

dosavadních odhadů dopadů klimatické změny, kde byl na základě výstupů sady klimatických modelů pro scénář A1B předpovídán průtok pomocí srážko-odtokového modelu Bilan. Z výzkumu vyplývá, že odtok se v oblasti republiky odpovídající našemu zájmovému povodí do roku 2099 sníží o 10 až 30 % oproti referenčnímu období [14]. Výsledky diplomové práce se s těmito závěry shodují.

V rámci předpovídaných dat bylo zkoumáno také rozdělení průměrných měsíčních průtoků v roce. Mezi lety 2080 a 2099 dojde ke snížení průměrného průtoků ve všech měsících, a to od 12,1 (prosinec) do 66,9 % (září) oproti současným hodnotám. Poměrné rozložení průtoků během roku zůstává podobné jako v současnosti, v jednotlivých měsících se liší od 2,1 % (únor) do -2,5 % (září).

Budoucí klima a hydrologickou situaci, predikované v rámci praktické aplikace programu Runoff Prophet, můžeme zjednodušeně popsat jako změny, které nastanou do roku 2099. Bylo zjištěno, že průměrný roční úhrn srážek zůstane podobný jako v současné době a během roku bude rozložen rovnoměrněji než dnes. Z výsledků bakalářské práce autorky [1] vyplývá, že stejný scénář predikuje i méně extrémních srážkových jevů. Tyto výsledky mohou vyznívat tak, že jejich vliv na vláhovou bilanci krajiny bude spíše pozitivní. Při vyhodnocení je ale třeba brát v úvahu i další predikované ukazatele. Průměrná roční teplota vzduchu do roku 2099 zvýší o 3,6 °C. Významné je mimo jiné i zvýšení průměrné teploty v zimních měsících na téměř 2 °C. Z těchto hodnot můžeme usuzovat, že dojde k výraznému zvýšení výparu, a tedy i k rychlejšímu úbytku vody z povodí. Vzhledem ke zvýšení teploty v zimních měsících bude zřejmě také omezeno doplňování zásob podzemní vody z pomalého tání sněhové pokrývky. Na základě obou předpovídaných meteorologických prvků lze tedy předpokládat, že vliv změny klimatu na hydrologickou bilanci bude spíše negativní. Tento předpoklad potvrzují výsledky aplikace softwaru Runoff Prophet, podle kterých dojde ke snížení průměrného ročního průtoků o téměř 30 %. Po korekci na Baseline můžeme konstatovat, že průměrný počet měsíců v roce s průtokem pod hranicí sucha se zvýší z 0,2 na 1,69. V současné době tedy nastává takto nízký průměrný měsíční průtok v průměru jednou za pět let, v budoucnu to bude více než jednou ročně.

Program, vyvinutý v rámci diplomové práce, se během praktické aplikace prokázal jako účinný nástroj pro modelování průtoků. Může nalézt uplatnění při předpovídání změn hydrologické bilance krajiny nebo například při odhadu budoucích zásob vody ve vodních nádržích. Nabízí se jeho srovnání s o poznání složitějším koncepčním modelem Bilan Výzkumného ústavu vodohospodářského. V časopise VTEI byl zveřejněn článek [16], vyhodnocující mimo jiné kalibraci modelu Bilan na 53 povodích z Generelu LAPV. Kvalita kalibrace byla určena kritériem účinnosti Nash-Sutcliffe, používaným i v této diplomové práci. Z článku vyplývá, že jeho hodnoty se nacházely v intervalu od 0,03 do 0,75. Průměrná hodnota NS byla rovna 0,48, 50 % povodí bylo nakalibrováno s hodnotami NS mezi 0,38 a 0,59, u 25 % povodí byly výsledky kalibrace ohodnoceny hodnotou NS mezi 0,59 a 0,75. Při aplikaci softwaru Runoff Prophet na vybrané povodí bylo při kalibraci dosaženo hodnoty kritéria Nash-Sutcliffe 0,71, což odpovídá horní hranici výsledků dosažených pomocí modelu Bilan. Aby však bylo možné tyto dva softwary prokazatelně porovnat, bylo by nutné provést aplikace Runoff Prophet na více povodích.

Program Runoff Prophet bude dále vyvíjen a zdokonalován. Jedním z cílů je upravit model tak, aby byl v zájmovém povodí kromě průtoků schopen simulovat i budoucí evapotranspiraci. Dalším možným krokem je testování na větším počtu vybraných povodí a zavedení nejistot, vyplývajících z použití nástrojů pro predikci klimatu. Novým směrem výzkumu, vyplývajícím z poznatků získaných během zpracování diplomové práce, bude pokus o nalezení vazby mezi posloupností meteorologických a hydrologických prvků a množstvím sedimentu ve vodních nádržích.

Snaha popsat důsledky klimatických změn má ve vodním hospodářství své nepopiratelné místo. Potvrzuje to i Národní akční plán adaptace na změnu klimatu Ministerstva životního prostředí z roku 2015 [17], který vychází z Národní politiky výzkumu, vývoje a inovací na léta 2016-2020. Z jeho doporučení vyplývá, že bádání v oblasti globálních změn by se mělo mimo jiné soustředit na výzkum a modelování dopadů změny klimatu na vodní režim, ekosystémy a agroekosystémy a získané výsledky by měly být důsledně promítány do příslušných strategií na národní i mezinárodní úrovni.

9 SEZNAM CITACÍ

- [1] Kateřina Knopková *Stochastické generování srážek pomocí vybraných generátorů počasí*. Brno, 2016. 52 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [2] MICHAL, Jeníček. Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích. In: *Research Group od Hydrology*[online]. Faculty of Science, Charles University, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/download.php?akce=publikace&cislo=3>
- [3] ZBYNĚK, Kulhavý a Kovář PAVEL. Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí: Metodická pomůcka. *VÚMOP* [online]. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 96 s. [cit. 2018-01-02]. ISSN 1211-3972. Dostupné z: http://www.hydropmeliorace.cz/czu/ostatni/hb_malych_povodi.pdf
- [4] *Bilan* [online]. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://bilan.vuv.cz>
- [5] WANG, G. Q., J. Y. ZHANG, Y. Q. XUAN et al., Simulating the Impact of Climate Change on Runoff in a Typical River Catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrometeorology*[online]. 2013 [cit. 2018-01-02]. DOI: 0.1007/s00704-015-1467-1. ISSN 1525-7541. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JHM-D-12-081.1>
- [6] Appendix 1: Thornthwaite Method: Water balance on the central rift valley. In: *UPCommons: Portal de coneixement obert de la UPC* [online]. Barcelona: Universitat politecnica de Catalunya [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/89152/Appendix_10.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [7] Chapter 3.1.3 Blaney-Criddle Method: Chapter 3: Crop water needs. *FAO* [online]. Food and Agriculture Organisation od the United Nations, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/S2022E/s2022e07.htm#>
- [8] TABLE 2.6. Daily extraterrestrial radiation (Ra) for different latitudes for the 15th day of the month: Annex 2. Meteorological tables. *FAO* [online]. Food and Agriculture Organisation od the United Nations, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0j.htm#annex>
- [9] Annex 2. Meteorological tables. *FAO* [online]. Food and Agriculture Organisation od the United Nations, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0j.htm#annex>
- [10] Table 4 Mean daily percentage (p) of annual daytime hours for different latitudes: Chapter 3: Crop water needs. *FAO* [online]. Food and Agriculture Organisation od the United Nations, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/S2022E/s2022e07.htm#>

- [11] ZELINKA, Ivan. *Umělá inteligence: v problémech globální optimalizace*. Praha: BEN-technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0069-5.
- [12] Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nash–Sutcliffe_model_efficiency_coefficient
- [13] MORIASI, Daniel N., Jeffrey G. ARNOLD, Michael W VAN LIEW, R. Daren HARMEL a Tamie L. VEITH. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* [online]. american society of agricultural and biological engineers, 2007, 50(3), 16 s. [cit. 2018-01-02]. ISSN 0001–2351. Dostupné z: <http://swat.tamu.edu/media/90109/moriasimodeval.pdf>
- [14] *Projekt VaV – SP/1a6/108/07 Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření: TECHNICKÉ SHRUTÍ VÝSLEDKŮ PROJEKTU 2007–2011* [online]. Ministerstvo životního prostředí [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/klimazmena/files/vav_TECHNICKE_SHRUTI_2011.pdf
- [15] *Climate Change 2007: Synthesis Report: An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [online]. 2007 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf
- [16] MÁCA, P., BAŠTA, P., KOŽÍN, R. a HANEL, M. Využití geomorfologických charakteristik pro odhad celkové retence povodí. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2016, 58(6) str. 54–57. ISSN 0322-8916
- [17] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Národní akční plán adaptace na změnu klimatu: Implementační dokument Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR* [online]. MŽP, 2015 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/\\$FILE/OEOK-NAP_text_20170127.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/$FILE/OEOK-NAP_text_20170127.pdf)

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Adaptace zemědělství na změny klimatu v podmínkách ČR: souhrn aktuálních informací. *EAGRI* [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2018 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/552908/publikace_Adaptace_zemedelstvi_final.pdf
2. Annex 2. Meteorological tables. *FAO* [online]. Food and Agriculture Organisation od the United Nations, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0j.htm#annex>
3. Appendix 1: Thornthwaite Method: Water balance on the central rift valley. In: *UPCommons: Portal de coneixement obert de la UPC* [online]. Barcelona: Universitat politecnica de Catalunya [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/89152/Appendix_10.pdf?sequence=3&isAllowed=y
4. *Bilan* [online]. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://bilan.vuv.cz>
5. Chapter 3.1.3 Blaney-Criddle Method: Chapter 3: Crop water needs. *FAO* [online]. Food and Agriculture Organisation od the United Nations, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/S2022E/s2022e07.htm#>
6. *Climate Change 2007: Synthesis Report: An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [online]. 2007 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf
7. JENÍČEK, Michal. Klasifikace hydrologických modelů: Studijní materiál pro potřeby posluchačů předmětu "Modelování hydrologických procesů". In: *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. Fakulta informatiky Masarykovy univerzity [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2014/Z7000/um/Klasifikace_hydro_modelu_Jenicek.pdf
8. KNOPPOVÁ, Kateřina. *Stochastické generování srážek pomocí vybraných generátorů počasí*. Brno, 2016. 52 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
9. KOLÁŘ, Petr. Klimatický downscaling: ZOO76 Meteorologie a klimatologie. In: *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. Fakulta informatiky Masarykovy univerzity [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/Z0076/um/KLIMATICKY_DOWNSCALING.pdf

10. MÁČA, P., BAŠTA, P., KOŽÍN, R. a HANEL, M. Využití geomorfologických charakteristik pro odhad celkové retence povodí. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2016, 58(6) str. 54–57. ISSN 0322-8916
11. MICHAL, Jeníček. Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích. In: *Research Group od Hydrology*[online]. Faculty of Science, Charles University, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://hydro.natur.cuni.cz/jenickek/download.php?akce=publikace&cislo=3>
12. MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Národní akční plán adaptace na změnu klimatu: Implementační dokument Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR*[online]. MŽP, 2015 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/\\$FILE/OEOK-NAP_text_20170127.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/$FILE/OEOK-NAP_text_20170127.pdf)
13. Mitigace a adaptační možnosti na změnu klimatu pro ČR. *Klimatická změna* [online]. Brno: Ústav výzkumu globální změny AV ČR, 2018 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://www.klimatickazmena.cz/cs/vse-o-klimaticke-zmene/mitigace-a-adaptacni-moznosti-na-zmenu-klimatu-pro-cr/>
14. MORIASI, Daniel N., Jeffrey G. ARNOLD, Michael W VAN LIEW, R. Daren HARMEL a Tamie L. VEITH. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* [online]. american society of agricultural and biological engineers, 2007, 50(3), 16 s. [cit. 2018-01-02]. ISSN 0001–2351. Dostupné z: <http://swat.tamu.edu/media/90109/moriasimodeleval.pdf>
15. Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nash–Sutcliffe_model_efficiency_coefficient
16. OLEHLA, Miroslav a Jan TIŠER. *Praktické použití Fortranu*. 2. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů.
17. *Projekt VaV – SP/1a6/108/07 Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření: TECHNICKÉ SHRNUŤÍ VÝSLEDKŮ PROJEKTU 2007–2011* [online]. Ministerstvo životního prostředí [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/klimazmena/files/vav_TECHNICKE_SHRNUTI_2011.pdf

18. SEMENOV, Mikhail A. a Elaine M. BARROW. LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies: Developed by Mikhail A. Semenov - Version 3.0 - User Manual [online]. Rothamsted Research, 2002 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://resources.rothamsted.ac.uk/sites/default/files/groups/mas-models/download/LARS-WG-Manual.pdf>
19. ŠELEPA, Milan. *Střednědobá předpověď průtoků vody měrným profilem toku*. Brno, 2014. 82 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
20. TABLE 2.6. Daily extraterrestrial radiation (Ra) for different latitudes for the 15th day of the month: Annex 2. Meteorological tables. *FAO* [online]. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0j.htm#annex>
21. Table 4 Mean daily percentage (p) of annual daytime hours for different latitudes: Chapter 3: Crop water needs. *FAO* [online]. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 2017 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/S2022E/s2022e07.htm#>
22. WANG, G. Q., J. Y. ZHANG, Y. Q. XUAN et al., Simulating the Impact of Climate Change on Runoff in a Typical River Catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrometeorology*[online]. 2013 [cit. 2018-01-02]. DOI: 0.1007/s00704-015-1467-1. ISSN 1525-7541. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JHM-D-12-081.1>
23. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Manual on flood forecasting and warning* [online]. Geneva: World Meteorological Organization, 2011 [cit. 2018-01-02]. ISBN 978-926-3110-725.
24. XU, Chong-Yu. *Textbook of Hydrologic models* [online]. Uppsala: Uppsala University, Department of Earth Sciences Hydrology, 2002 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Master.Unsicherheiten/2012/Lit/Hydrology_textbook.pdf
25. ZBYNĚK, Kulhavý a Kovář PAVEL. Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí: Metodická pomůcka. *VÚMOP* [online]. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 96 s. [cit. 2018-01-02]. ISSN 1211-3972. Dostupné z: http://www.hydromeliorace.cz/czu/ostatni/hb_malych_povodi.pdf
26. ZELINKA, Ivan. *Umělá inteligence: v problémech globální optimalizace*. Praha: BEN-technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0069-5.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AR4	Fourth Assessment Report (IPCC)
Baseline	syntetická řada dat reprezentující referenční období (1961-1990)
BPEJ	bonitovaná půdně ekologická jednotka
CR	práh křížení
D	dimenze
d_i	počet dní v měsíci i
E_i	skutečný výpar v měsíci i [mm]
E_{pi}	potenciální výpar v měsíci i [mm]
$E_{pi_{neopravená}}$	neopravený potenciální výpar v měsíci i [mm]
ET_0	referenční evapotranspirace v měsíci i [mm/den]
F	mutační konstanta
GCM	Global Climate Model/General Circulation Model
i_i	měsíční teplotní index [-]
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change
I_r	roční teplotní index [-]
k_e	koeficient evapotranspirace [-]
k_{eMAX}	horní hranice intervalu hodnot koeficientu evapotranspirace [-]
k_g	koeficient podzemního odtoku [-]
k_{gMAX}	horní hranice intervalu hodnot koeficientu podzemního odtoku [-]
k_o	koeficient odtoku [-]
k_s	koeficient povrchového odtoku [-]
k_{sMAX}	horní hranice intervalu hodnot koeficientu povrchového odtoku [-]
LAM	Local Area Model (lokální klimatický model)
LAPV	území chráněná pro akumulaci povrchových vod
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
N_j	průměrný počet hodin denního svitu v příslušném měsíci [h]
NP	velikost populace (počet jedinců)

NS	koeficient účinnosti modelu Nash-Sutcliffe
OSN	Organizace spojených národů
P_i	měsíční úhrn srážek v měsíci i [mm]
p_j	průměrné denní procento z celkového počtu ročních hodin slunečního svitu v příslušném měsíci [-]
Q_{ci}	celkový odtok v měsíci i [mm]
Q_{gi}	podzemní odtok v měsíci i [mm]
Q_m^t	predikovaná hodnota průtoku v čase t (modeled) [mm nebo m^3/s]
$\overline{Q_o}$	průměr z měřených hodnot průtoku [mm nebo m^3/s]
Q_o^t	měřená hodnota průtoku v čase t (observed) [mm nebo m^3/s]
Q_{si}	povrchový odtok v měsíci i [mm]
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathways
S_i	nasycení v měsíci i [mm]
S_{i-1}	nasycení půdy v měsíci $i-1$ [mm]
S_{max}	maximální nasycení půdy [mm]
SRES	Special Report Emissions Scenarios
TAR	Third Assessment Report (IPCC)
T_{m_i}	průměrná denní teplota v měsíci i [$^{\circ}C$]
T_{mean_i}	průměrná denní teplota v měsíci i [$^{\circ}C$]
VaV	výzkum a vývoj
VTEI	Vodohospodářské technicko-ekonomické informace
WG	Weather Generator
WMO	World Meteorological Organisation
z. š.	zeměpisná šířka [$^{\circ}$]

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.2-1 Zjednodušené schéma scénářů SRES dle vývoje společnosti [1].....	5
Obr. 3.2-2 Vývoj množství složek zahrnutých do GCMs [1]	6
Obr. 5.3-1 Schéma výpočtu Wangova modelu.....	11
Obr. 5.3-2 Schéma výpočtu Bilančního modelu	13
Obr. 5.5-1 Náhled doplňku Řešitel programu MS Excel	17
Obr. 6.1-1 Zájmové území	20
Obr. 6.2-1 Graf měřených průtoků v profilu Dalečín a průtoků modelovaných pomocí Bilančního a Wangova modelu (Kalibrace)	22
Obr. 6.4-1 Úvodní okno programu Runoff Prophet	25
Obr. 6.4-2 Runoff Prophet: O programu	25
Obr. 6.4-3 Zjednodušené schéma průběhu kalibrace pomocí diferenciální evoluce v Runoff Prophet	29
Obr. 6.4-4 Ukázka formátu vstupních dat pro kalibraci.....	30
Obr. 6.4-5 Ukázka formátu vstupních dat pro predikci.....	30
Obr. 6.4-6 Runoff Prophet: tlačítko Lokalizace	30
Obr. 6.4-7 Runoff Prophet: Lokalizace	31
Obr. 6.4-8 Runoff Prophet: Kombinace	31
Obr. 6.4-9 Runoff Prophet: tlačítko Kalibrace	32
Obr. 6.4-10 Runoff Prophet: Nastavení	32
Obr. 6.4-11 Runoff Prophet: Kalibrace	32
Obr. 6.4-12 Runoff Prophet: Výsledek kalibrace.....	33
Obr. 6.4-13 Runoff Prophet: tlačítko Predikce	33
Obr. 6.4-14 Runoff Prophet: Predikce	33
Obr. 6.4-15 Runoff Prophet: Predikce	34
Obr. 6.4-16 Ukázka formátu výstupních dat	34
Obr. 6.5-1 Náhled programu LARS-WG	36
Obr. 6.5-2 Predikovaný vývoj průměrné měsíční teploty v zájmovém povodí	38
Obr. 6.5-3 Predikovaný vývoj průměrných měsíčních úhrnů srážek v zájmovém povodí	39
Obr. 6.5-4 Výsledné NS kritérium	40
Obr. 6.5-5 Měřené průměrné měsíční průtoky v profilu Dalečín a průtoky modelované pomocí Runoff Prophet (Validace)	40
Obr. 7.1-1 Graf měřených průtoků v profilu Dalečín a průtoků modelovaných pomocí Wangova modelu s použitím různého způsobu výpočtu evapotranspirace (Kalibrace)	44
Obr. 7.1-2 Graf měřených průtoků v profilu Dalečín a průtoků modelovaných pomocí Wangova modelu s použitím různého způsobu výpočtu evapotranspirace (Validace).....	45
Obr. 7.2-1 Predikovaný vývoj průměrných měsíčních průtoků v závěrovém profilu zájmového povodí	46
Obr. 7.2-2 Predikovaný vývoj průměrné teploty a průměrného ročního úhrnu srážek v zájmovém povodí	46
Obr. 7.2-3 Predikovaný vývoj prům. ročního průtoku a jeho změny oproti současnosti.....	47

13 SEZNAM TABULEK

Tab. 5.4-1 Průměrný počet hodin denního svitu (N) dle zeměpisné šířky pro 15. den v měsíci [8]	15
Tab. 5.4-2 Průměrné denní procento (p) z celkového ročního počtu hodin slunečního svitu [10]	16
Tab. 5.5-1 Hodnoty řídicích parametrů diferenciální evoluce [11].....	18
Tab. 6.1-1 Zeměpisné údaje vybraných meteorologických stanic	21
Tab. 6.2-1 Srovnání Nash-Sutcliffe koeficientu Bilančního a Wangova modelu	22
Tab. 6.3-1 Obecné hodnocení koeficientu Nash-Sutcliffe pro měsíční časový krok [13]	23
Tab. 6.3-2 Schéma variant počtu koeficientů Wangova modelu	24
Tab. 6.3-3 Srovnání Nash-Sutcliffe kritéria Wangova modelu při různém počtu koeficientů a způsobu výpočtu evapotranspirace.....	24
Tab. 6.4-1 Parametry diferenciální evoluce v programu Runoff Prophet 1.0	26
Tab. 6.4-2 Horní hranice neznámých v programu Runoff Prophet 1.0.....	27
Tab. 6.4-3 Struktura každého jedince v populaci.....	27
Tab. 6.5-1 Srovnání NS při kalibraci pro různou délku kalibrační řady	35
Tab. 6.5-2 Data pro predikci: Průměrná měsíční teplota	38
Tab. 6.5-3 Data pro predikci: Průměrné měsíční úhrny srážek.....	39
Tab. 6.5-4 Výsledky: Průměrný měsíční průtok	41
Tab. 6.5-5 Výsledky: Změna průměrného měsíčního průtoku oproti současnosti.....	42
Tab. 6.5-6 Výsledky: Průměrný podíl celkového ročního průtoku.....	42
Tab. 6.5-7 Výsledky: Změna průměrného podílu celkového ročního průtoku oproti současnosti	43
Tab. 7.1-1 Srovnání Nash-Sutcliffe koeficientu Wangova modelu při různém způsobu výpočtu evapotranspirace	44

14 SEZNAM PŘÍLOH

Všechny uvedené přílohy jsou k dispozici pouze v elektronické podobě, a to v univerzitní databázi závěrečných prací a na CD, přiloženém k tomuto výtisku.

1. Mapa zájmového území 1:150 000

2. Porovnání Bilančního a Wangova modelu

Tabulky srovnání výsledné hodnoty koeficientu Nash-Sutcliffe pro Wangův a Bilanční model s různým počtem kalibračních koeficientů (1k, 4k, 1+9k a 12k) a způsobem výpočtu evapotranspirace (Thornthwaite a Blaney-Criddle) pro různě dlouhou kalibrační (a příslušnou validační) řadu dat.

3. Runoff Prophet 1.0

Instalace první verze uživatelského programu, vyvinutého v rámci diplomové práce; součástí je i stručný manuál. Software je funkční pouze po připojení hardwarového klíče, který je možné získat na Ústavu vodního hospodářství krajiny Fakulty stavební VUT v Brně.