

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**  
**HORNICKO-GEOLOGICKÁ FAKULTA**  
**Katedra geoinformatiky**

**VÝVOJ WEBOVEJ APLIKÁCIE PRE POTREBY  
HYDROLOGICKÉHO MODELOVANIA**

**DIPLOMOVÁ PRÁCA**

**Autor:** Ing. Patrik Slezák

**Vedúci diplomovej práce:** Ing. Jan Růžička, Ph.D.

Ostrava 2019

# Zadání diplomové práce

**Ing. Patrik Slezák**

Student:

Studijní program:

N3654 Geodézie, kartografie a geoinformatika

Studijní obor:

3608T002 Geoinformatika

Téma:

Vývoj webové aplikace pro potřeby hydrologického modelování  
Web Application for Hydrology Modelling

Jazyk vypracování:

slovenština

Zásady pro vypracování:

Cílem projektu je implementace webového mapového rozhraní pro hydrologický model TUWmodel.

Úkoly:

1. Popište TUWmodel.
2. Navrhněte webové uživatelské rozhraní využívající model.
3. Implementujte webovou mapovou aplikaci, která bude využívat model a vizualizovat vhodným způsobem výsledky modelování.
4. Popište omezení a možnosti rozšíření připraveného řešení.

**Rozsah grafických prací:**

dle potřeby

**Rozsah původní zprávy:**

50 - 70 normostran textu

Formální náležitosti diplomové práce stanoví směrnice děkana HGF HGF\_SME\_15\_001 Pokyny pro zpracování závěrečných prací, zveřejněné na webových stránkách fakulty - [https://www.hgf.vsb.cz/cs-old/portal-iso/interni/platne-dokumenty/sme/HGF\\_SME\\_15\\_001\\_A.pdf](https://www.hgf.vsb.cz/cs-old/portal-iso/interni/platne-dokumenty/sme/HGF_SME_15_001_A.pdf).

Seznam doporučené odborné literatury:

\* Coron, L. et al. (2018): airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. Version: 1.0.14.1, Published: 2018-09-28. Dostupné na: <https://cran.r-project.org/web/packages/airGR/index.html>.

\* Chang, W. et al. (2018): Shiny: Web Application Framework for R. Version 1.1.0, Published 2018-05-17. Dostupné na: <https://cran.r-project.org/web/packages/shiny/index.html>.

\* Merz, R. et al. (2011): Time stability of catchment model parameters: Implication for climate impact analyses. Water Resources Research, 47, W02531, doi:10.1029/2010WR009505.

\* R Development Core Team, 2011. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, <http://www.R-project.org/>.

\* Viglione, A., and Parajka, P. (2018): TUWmodel: Lumped hydrological model for educational purposes. Version: 1.0-1, Published: 2018-06-27. Dostupné na: <https://cran.r-project.org/web/packages/TUWmodel/index.html>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Růžička, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Michal Kačmařík, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.  
děkan fakulty

## Prehlásenie

- Celú diplomovú prácu vrátane príloh, som vypracoval samostatne a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.
- Bol som oboznámený s tím, že na moju diplomovú prácu sa v plnej miere vzťahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, predovšetkým § 35 – využitie diela v rámci školného a § 60 – školné dielo.
- Beriem na vedomie, že Vysoká škola bánská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo neziskovo, ku svojej vnútornej potrebe, diplomovú prácu použiť (§ 35 odst. 3).
- Súhlasím s tím, že jeden výtlačok diplomovej práce bude uložený v Ústrednej knižnici VŠB-TUO k prezenčnému nahliadnutiu a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho diplomovej práce. Súhlasím s tím, že údaje o diplomovej práce, obsiahnuté v Zázname o záverečnej práci, umiestnenom v prílohe mojej diplomovej práce, budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- Bolo dojednané, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z ich strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bolo dojednané, že použiť svoje dielo – diplomovú prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do jej skutočnej výšky).

V Ostrave dňa 30.4.2019



Ing. Patrik Slezák

## Anotácia

Diplomová práca sa zaoberá návrhom a realizáciou webovej aplikácie pre potreby hydrologického modelovania. Aplikácia je postavená na populárnom a široko používanom hydrologickom modely typu HBV. Model bol implementovaný pomocou softvérového prostredia R a jeho rozšírení, tzv. balíkov. Publikovanie je zabezpečené pomocou balíku Shiny. Navrhnutá webová aplikácia má slúžiť ako výukový materiál pre študentov Technickej univerzity vo Viedni, v rámci výučby predmetov zameraných na hydrologické modelovanie (Hydrológia, Vodné hospodárstvo a pod.).

**Kľúčové slová:** hydrologické modelovanie, HBV model, softvérové prostredie R, balík Shiny

## Annotation

Diploma thesis deals with the design and implementation of a web application for the hydrological modeling. The application is based on the popular and widely used HBV type hydrological model. The model was implemented using R software environment and its extensions (i.e., packages). Publishing is provided by the Shiny package. The proposed web application will serve as a teaching material for students (TU in Vienna) within the subjects focused on hydrological modeling (Hydrology, Water Resources Management, etc.).

**Keywords:** hydrology modeling, HBV model, R software environment, Shiny package

## **Pod'akovanie**

Tento cestou sa chcem pod'akovať môjmu školiteľovi Ing. Janovi Růžičkovi, Ph.D za odborné vedenie práce. Ďakujem aj za jeho trpezlivosť a čas, ktorý mi počas riešenia práce venoval.

Pod'akovanie patrí aj priateľom a spolužiakom za rady a prejavenú podporu.

Na záver by som chcel pod'akovat' rodine a blízkym za podporu a pochopenie pre túto prácu.

## OBSAH

1	Úvod .....	1
2	Hydrologické modelovanie .....	3
2.1	Hydrologické modely .....	3
2.2	Neistoty spojené so hydrologickým modelovaním pomocou koncepčných modelov .....	6
3	Hydrologický model TUW .....	8
3.1	Opis a štruktúra hydrologického modelu TUW .....	8
3.2	Kalibrácia a validácia hydrologického modelu TUW .....	10
4	Rešerš podobných štúdií .....	11
4.1	GR hydrologické modely zamerané na výučbu hydrológie .....	11
4.1.1	airGR pre výučbu hydrológie .....	12
4.1.2	airGRteaching pre výučbu hydrológie .....	13
5	Ciele práce .....	16
6	Výber softvérového prostredia .....	18
6.1	Programovací jazyk R .....	18
6.2	Balíky zamerané na hydrologické modelovanie .....	20
6.3	Balíky použité pri tvorbe vlastnej webovej aplikácie .....	24
7	Shiny aplikácie .....	26
7.1	Architektúra Shiny aplikácií .....	26
7.2	Tvorba Shiny aplikácií .....	28
7.3	Shiny server .....	31
8	Vstupné údaje .....	32
8.1	Opis vstupných údajov .....	32
8.2	Opis skúmaného územia a vybraných povodí .....	32
9	Vývoj vlastnej webovej aplikácie .....	35
9.1	Návrh webového užívateľského rozhrania využívajúceho TUW model ..	35
9.2	Implementácia web aplikácie využívajúcej TUW model .....	41
9.3	Nasadenie web aplikácie na server .....	42
9.4	Príklad použitia navrhnutej aplikácie na vybranom povodí .....	45
10	Obmedzenia a možnosti rozšírenia pripraveného riešenia .....	48

10.1	Obmedzenia pripraveného riešenia .....	48
10.2	Možnosti rozšírenia pripraveného riešenia.....	48
11	Záver.....	50
	Zoznam použitej literatúry .....	51
	Zoznam použitých skratiek .....	56
	Zoznam obrázkov.....	57
	Zoznam tabuliek.....	59
	Zoznam príloh.....	60

## 1 ÚVOD

Matematická reprezentácia hydrologického cyklu v povodí pomocou zrážkovo-odtokových (z-o) modelov je dôležitou oblasťou hydrologického výskumu. Hydrologický model, ako systém rovníc reprezentujúcich procesy, ovplyvňujúce pohyb vody v povodí od zrážok k odtoku, zovšeobecňuje aktuálny stav poznatkov o hydrologickom cykle a predstavuje dôležitý nástroj aj pre ďalší rozvoj základného výskumu (napr. testovanie hypotéz o priebehu hydrologických procesov), ale aj pre vodohospodársku prax (napr. predpovedanie priebehu povodní, plánovanie vodných zdrojov do budúcnosti, a pod.). Napriek neustálemu vývoju je každý hydrologický model iba zjednodušeným obrazom reality a je limitovaný dosiahnutým poznaním hydrologických procesov, matematickým aparátom (t.j., štruktúrou modelu, stupňom citlivosti parametrov modelu) a údajmi, ktoré môžu byť pri riešení systému rovníc v skutočnosti použité. Z týchto dôvodov je modelovanie zrážkovo-odtokového vzťahu vždy začažené neistotami. Ich poznávanie, identifikácia a redukcia sú nevyhnutné pre zlepšovanie výsledkov hydrologických modelov.

Z hľadiska využitia hydrologických modelov možno povedať, že koncepčné modely (typu HBV) sú jedny z najpoužívanejších modelov (u nás a v regióne) pri riešení rôznych praktických vodohospodárskych úloh. Vďaka svojej pomerne jednoduchej štruktúre, ľahkej aplikovateľnosti a dostupnými vstupnými údajmi sú tieto modely často používané aj pre výskumné a vzdelávacie účely. Viaceré z týchto populárnych hydrologických modelov sú implementované vo forme rozšírení (tzv. balíkov) v softvérovom prostredí R (R Development Core Team, 2014). Jedným z takýchto modelov je aj model TUW („Technische Universität Wien“), ktorý bol vyvinutý na Technickej univerzite (TU) vo Viedni (Viglione a Parajka, 2014), kde sa v širokej miere využíva, či už na výskumné účely (napr. štúdie Parajka et al., 2007; Merz et al., 2011; Slezák et al., 2018) alebo výučbu predmetov zameraných na hydrologické modelovanie (napr. predmety Hydrology, River Basin Management, Water Resources Management). Keďže tento model v súčasnosti existuje len ako balík v prostredí R, nie je možné ho aplikovať bez inštalácie tohto prostredia a ďalších jeho potrebných balíkov.

S ohľadom na vyššie uvedené je cieľom diplomovej práce implementácia hydrologického modelu TUW vo forme web aplikácie (t.j., použitie modelu bez nutnosti inštalácie softvéru R a jeho potrebných balíkov). Hlavné ťažisko práce bude spočívať vo vytvorení webovej aplikácie, ktorá bude využívať TUW model a vhodným spôsobom

vizualizovať výsledky modelovacieho procesu. Vytvorená web aplikácia by mala primárne slúžiť ako výukový materiál pre študentov TU vo Viedni, ktorým by mala v rámci výučby predmetov zameraných na hydrologické modelovanie detailnejšie priblížiť modelovací proces (t.j., umožniť lepšie porozumieť štruktúre/parametrom modelu vo vzťahu k výstupom modelovania).

Diplomová práca sa skladá z jedenástich kapitol a viacerých podkapitol. Prvá kapitola je úvodná. Druhá kapitola sa venuje hydrologickému modelovaniu. Táto kapitola obsahuje dve podkapitoly, z ktorých prvá z nich približuje hydrologické modely, pričom sa detailnejšie venuje tým modelom, ktoré majú vzťah k predmetu vlastnej práce. Druhá podkapitola poukazuje na neistoty spojené s hydrologickým modelovaním. V tretej kapitole je opísaný použitý hydrologický model (TUW model). Štvrtá kapitola obsahuje rešerš podobných štúdií. V piatej kapitole sú vymedzené ciele diplomovej práce. Siesta kapitola je zameraná na výber softvérového prostredia. V siedmej kapitole je priestor venovaný Shiny aplikáciám. Ôsma kapitola je venovaná opisu vstupných údajov a skúmaného územia. Deviata kapitola je zameraná na vývoj vlastnej webovej aplikácie, pričom obsahuje tri podkapitoly. Prvá z nich je zameraná na návrh užívateľského rozhrania web aplikácie. Druhá podkapitola približuje implementáciu hydrologického modelu. Tretia podkapitola približuje použitie navrhnutej web aplikácie na vybranom povodí. Desiata kapitola popisuje obmedzenia a možnosti rozšírenia pripraveného riešenia. Prácu uzatvára záver.

## 2 HYDROLOGICKÉ MODELOVANIE

Táto kapitola je zameraná na hydrologické modelovanie, pričom obsahuje dve podkapitoly. Prvá podkapitola sa venuje hydrologickým modelom, pričom detailnejšie poukazuje na tie modely, ktoré majú vzťah k predmetu vlastnej práce. Druhá podkapitola je venovaná neistotám, ktoré súvisia s používaním koncepčných hydrologických modelov.

### 2.1 Hydrologické modely

Hydrologické modely sú široko používanými nástrojmi vo vodnom hospodárstve, pričom existuje viacero typov týchto modelov. Pred samotnou klasifikáciou modelov je ale potrebné zadefinovať pojem model. Podľa autorov Daňhelka a kol. (2003) je model určité zjednodušenie reprezentácie reálneho sveta. Becker a Serban (1990) definujú model ako určitú štruktúru objektu, ktorá sa snaží priblížiť originálu. Lipták (1973) prirovnáva model k určitému celku, pomocou ktorého môžeme nazerať na systém v podobe jeho zrkadlenia v zjednodušenom tvaru.

Matematická reprezentácia hydrologického procesu je významným nástrojom pre vodohospodárov a hydrológov, či už z hľadiska návrhových alebo predpovedných účelov (Daňhelka a kol., 2003). Matematické modely predstavujú aplikáciu matematických operácií (riešenie sústavy algebrických a diferenciálnych rovnic), ktoré popisujú štruktúru a chovanie modelovaného systému. Tieto modely zároveň umožňujú simuláciu rozmanitých hydrologických procesov, ktoré sa môžu v skúmanom povodí vyskytnúť (Clarke, 1973). Spoľahlivosť týchto modelov je výrazne ovplyvnená (a) charakteristikami skúmaného povodia, (b) hydrologickými procesmi, ktoré sa v povodí vyskytujú, (c) štruktúrou/parametrami modelov.

Existuje viacero typov matematických modelov, ktoré sa navzájom líšia rôznymi prístupmi, napr. k štruktúre modelovaného povodia, komponentom hydrologického procesu a pod. Na jednej strane stoja modely, ktoré zanedbávajú vnútornú štruktúru a odozvu povodia (t.j., modely na princípe čiernej skrinky – tzv. black-box modely). Na druhej strane sú modely, ktoré vychádzajú z fyzikálnych zákonitostí hydrologických procesov (t.j., rôznorodé procesy v povodí popisujú pomocou parciálnych diferenciálnych rovnic; Hrušková, 2006). Premostenie medzi týmito modelmi tvoria koncepčné modely, ktoré vychádzajú zo zjednodušeného predpokladu hydrologickej bilancie povodia. Tieto modely

popisujú hydrologické procesy vyskytujúce sa v povodí pomocou diferenciálnych rovnic a tzv. koncepčných akumulačných prvkov (napr. kanál, lineárna nádrž, a pod.) (Kalaš, 2006). Vzájomné porovnania týchto modelov sú obsiahnuté napr. v prácach Beven (2001) a Perrin a kol. (2001).

V poslednom období sa do popredia dostávajú hydrologické modely s jednoduchšou štruktúrou a bežne dostupnými údajmi. Jeden z takýchto modelov bol použitý aj v tejto práci, preto aj uvedená klasifikácia bude venovaná práve týmto modelom.

Klasifikácia hydrologických modelov podľa parametrizácie vlastností prostredia (označovaná aj ako klasifikácia podľa priestorovej diskretizácie):

- modely s priestorovo sústredenými parametrami (tzv. celistvé modely),
- modely s priestorovo polorozčlenenými parametrami (tzv. semidistribuované modely),
- modely s priestorovo rozčlenenými parametrami (tzv. distribuované modely).

*Modely s priestorovo sústredenými parametrami* považujú povodie za homogénnu jednotku, ku ktorej sa vzťahujú aj samotné parametre, t.j., jedna hodnota parametru (vstupné údaje, fyzicko-geografické charakteristiky povodia) je reprezentatívna pre celé povodie. Tieto modely si v praxi získali pevné postavenie pri riešení rôznych vodohospodárskych a inžinierskych úloh (Kirnbauer a kol., 1994; Daňhelka, 2003). Vďaka svojej pomerne jednoduchej štruktúre, ľahkej aplikovateľnosti a dostupnými vstupnými údajmi sú tieto modely často používané aj pre výskumné a vzdelávacie účely (Coron a kol., 2016; Delaigue a kol., 2018). Ako príklad takéhoto typu modelov je možné uviesť napr. HBV model (Bergström, 1995), TUW model (Viglione a Parajka, 2014), HRON (Valent a Szolgay, 2013), GRJ4 (Perrin a kol., 2003), MORDOR (Garcon, 1996), HEC-HMS (Jeníček, 2009), a pod.

*Modely s priestorovo polorozčlenenými parametrami* rozdeľujú modelované povodie na elementárne odtokové plochy rôznej veľkosti (tzv. hydrotopy, Moravcová, 2011). Hydrotopy sa vyznačujú homogénnou sadou parametrov (napr. homogenitou využitia územia, pôdnich vlastností, reliéfu). Do tejto skupiny modelov patria napr. modely ako HYDROG (Unucka a Adamec, 2008), CLASSIC (Crooks a Naden, 2007), SNOW-17 (Anderson, 1973), a ďalšie.

**Modely s priestorovo rozčlenenými parametrami** rozdeľujú povodie na menšie diskrétné priestorové jednotky, ktoré väčšinou odpovedajú pravidelnej sieti buniek (grid), pričom každá bunka nesie určitú hodnotu daného parametru. Použiteľnosť týchto modelov je v praxi často limitovaná (najmä kvôli technickej náročnosti a vyšším nárokom na vstupné údaje). Tieto modely bývajú skôr aplikované na experimentálne povodia menších mierok (napr.). Ako príklad takéhoto typu modelov je možné uviesť napr. WetSpa (Hlavčová a kol., 2005), FRIER (Horvát, 2007), WaSiM-ETH, (Kostka a Holko., 2002), a ďalšie.

Pre správnu aplikáciu hydrologických modelov je dôležitá ich **kalibrácia** (odhad parametrov modelu). Jej zmyslom je stanovenie jedinečnej sady parametrov, ktorá zabezpečí, aby bola dosiahnutá čo najlepšia zhoda medzi reálne meranými a modelovanými hodnotami (napr. Beven, 2001). V súvislosti s uvedeným je treba zadefinovať pojem parameter. Pod týmto pojmom si možno predstaviť veličinu, resp. prostriedok kontroly správania sa konkrétnych modelov. Hodnoty každého parametru by mali vychádzat z terénnych meraní. Toto tvrdenie ale neplatí pre koncepčné modely, pri ktorých parametre nie sú priamo merateľné z fyzikálnych charakteristík skúmaných povodí. V prípade týchto modelov sa parametre odhadujú v procese kalibrácie (Kubeš, 2007).

Pre kalibráciu hydrologických modelov sa používajú tri metódy:

- **manuálna kalibrácia** – náhodné stanovenie parametrov modelu. Ide o časovo náročný proces, pričom výsledky často závisia na skúsenostiach používateľa (t.j., je potrebná dobrá znalosť používaného modelu a taktiež aj charakteristik skúmaného povodia).
- **automatická kalibrácia** – pri tomto kalibračnom prístupe sa využívajú optimalizačné algoritmy (definované nižšie), ktoré majú za cieľ prešetriť toľko vzájomných kombinácií, aby bola nájdená sada parametrov, ktorá vierohodne vystihuje realitu.
- **kombinácia obidvoch** vyššie uvedených kalibračných prístupov.

V procese kalibrácie zohráva dôležitú úlohu **optimalizačná funkcia** (v literatúre tiež označovaná ako účelová, alebo cieľová funkcia). Ide o kritérium pomocou ktorého je možné stanoviť presnosť (zhodu) medzi reálne meranými a simulovanými hodnotami (Beven,

2001). V hydrológii sa najčastejšie používajú tieto kritériá: Nash-Sutcliffov koeficient, objemová chyba, stredná kvadratická chyba, systematická chyba (bias), relatívna chyba, stredná absolútна chyba. Pre podrobnejšie informácie o optimalizačných funkciách odkazujeme čitateľa na početnú literatúru, napr. Parajka a kol., (2007), Madsen, (2003).

Dôležitosť v procese kalibrácie zohráva aj **optimalizačný (vyhľadávací) algoritmus**. Existuje viacero typov týchto algoritmov, no v hydrologickej komunite sa v poslednom období dostávajú do popredia evolučné algoritmy. Do tejto skupiny patria napr. genetické algoritmy (riadia sa princípmi genetiky, Goldberg, 1989) alebo diferenciálne evolučné algoritmy (podobné genetickým algoritmom, často používaný je napr. algoritmus diferenciálnej evolúcie Deoptim, Ardia a kol., 2015).

Overenie správania sa hydrologického modelu sa nazýva **validácia**. V hydrologickej literatúre existujú štyri testy podľa ktorých je možné overiť chovanie sa modelu (t.j., či model vierohodne reprezentuje skutočnosť): (a) Split-sample test – kalibrácia a validácia prebieha na rozdelenej vzorke údajov, (b) Differential split-sample test – kalibračné a validačné obdobia sú vybrané na základe rozdielov napr. v klimatických podmienkach, (c) Proxy-basin test – kalibrácia a validácia pomocou tzv. náhradného povodia, (d) Proxy-basin differential split-sample test – kombinácia vyššie uvedených testov.

V súvislosti s používaním hydrologických modelov je nutné spomenúť aj chyby, ktoré sa môžu vyskytnúť. Medzi najčastejšie chyby patria (a) náhodné/systematické chyby – chyby v meraných veličinách, chyby súvisiace so štruktúrou/parametrami modelu, (b) volumetrické chyby – poukazujú na nadhodnotenie/podhodnotenie výsledného hydrogramu, (c) fázové chyby – posunutie/oneskorenie hydrogramu voči meranému priebehu.

## 2.2 Neistoty spojené so hydrologickým modelovaním pomocou koncepcných modelov

Ako sme naznačili v predchádzajúcom, koncepcné hydrologické modely vychádzajú zo zjednodušeného predpokladu hydrologickej bilancie povodia. Pri používaní týchto modelov (v praxi, výskume, alebo pre vzdelávacie účely) sa môžeme stretnúť s viacerými

neistotami, ktoré obyčajne súvisia s kvalitou vstupných údajov, klimatickým obdobím pre ktoré bol model vyvinutý, štruktúrou/parametrami modelu a ich vzájomnou interakciou.

Podľa Seibert (2003) predstavujú parametre modelu a ich vzájomná interakcia veľké zdroje neistôt v hydrologickom modelovaní. Vo svojej štúdii upozorňuje na to, že v mnohých modeloch sú parametre značne vzájomne závislé, čo viedie aj k problémom pri ich optimálnej parametrizácii (priestorové rozloženie hodnôt parametrov) a teda aj k neistotám vo výsledných simuláciách. V tejto súvislosti sa viacerí domáci a zahraniční autori zaoberali analýzou reprezentatívnosti jednotlivých parametrov v hydrologických modeloch a vo svojich štúdiach konštatujú, že neistotu spojenú s odhadom parametrov týchto modelov netreba zanedbať (napr. Vaze et al., 2010; Merz et al., 2011; Coron et al., 2012; Slezia a kol., 2018). Iní autori argumentujú, že výkonnosť modelu závisí najmä od štruktúry modelu a matematických rovníc použitých na opisanie hydrologických procesov (Perrin a kol., 2001). Tieto tvrdenia sú v súlade s prácou, v ktorej autori konštatujú, že neistoty súvisiace so štruktúrou modelov sa predovšetkým odrážajú v matematických rovniaciach, ktoré opisujú rozmanité hydrologické procesy vyskytujúce sa povodí. (Nasseri a kol., 2014). Niektorí autori uvádzajú, že rozdiely vo výkonnosti modelu, ktoré sú zapríčinené rozdielnym konceptom vychádzajúcim z rozdielnych rovníc sa môžu kompenzovať pomocou vhodnejších nastavení parametrov modelu (napr. Andréassian a kol., 2004).

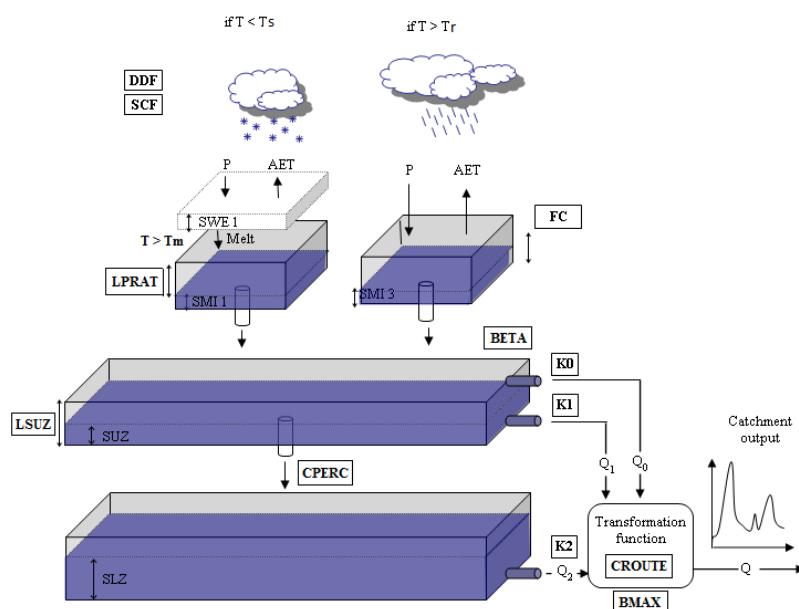
Vyššie uvedený prehľad štúdií poukazuje na to, že štruktúra/parametre koncepcných hydrologických modelov (ich vzájomná kompenzácia, citlivosť) predstavujú veľké zdroje neistôt v procese modelovania. Ich poznávanie, identifikácia a redukcia sú nevyhnutné pre zlepšovanie výsledkov hydrologických modelov.

### 3 HYDROLOGICKÝ MODEL TUW

Pre potreby tejto práce bol vybraný model typu HBV. Ide o jeden z najznámejších a najpoužívanejších (u nás a v regióne) koncepčných hydrologických modelov. V práci sme pracovali s jeho implementáciou TUW („Technische Universität Wien“, Viglione a Parajka, 2014). V prvej podkapitole je opísaná štruktúra TUW modelu. Druhá podkapitola je venovaná kalibrácii (odhadu parametrov) modelu.

#### 3.1 Opis a štruktúra hydrologického modelu TUW

TUW („Technische Universität Wien“) model (Viglione a Parajka, 2014) je koncepčný hydrologický model, ktorý umožňuje riešiť zrážkovo-odtokové vzťahy v povodí pomocou celistvého prístupu (pozri kapitolu ). Model vychádza zo štruktúry známeho švédskeho modelu HBV (Bergström, 1995) a pracuje v dennom časovom kroku. Schéma modelu je zobrazená na obr. 1.



Obrázok 1 Schéma hydrologického modelu TUW (Slezia, 2017)

Model sa skladá z troch prepojených častí (tzv. modulov): snehový, pôdný a odtokový modul. Úlohou snehového modulu je simulácia akumulácie a topenia snehu v povodí, k čomu sa používa koncept degree-day a hraničné teploty zámrzu a topenia. Úloha

pôdneho modulu spočíva v regulácii územného výparu a vodnej bilancie koreňovej zóny. Odtokový modul je zodpovedný za riadenie vzniku a priebehu povrchového a podpovrchového odtoku.

V modely TUW (jeho moduloch) je zahrnutých 15 parametrov, pomocou ktorých je možné kontrolovať a upravovať vlastnosti simulovaných javov a stavy zásob vody v povodí. Hodnoty týchto parametrov sa odhadujú v procese kalibrácie (pozri kapitolu ), pričom ako vstupné údaje do modelu sú potrebné: denné úhrny zrážok na povodí, priemerné denné teploty vzduchu na povodí, priemerná denná potenciálna evapotranspirácia na povodí. Priemerné denné hodnoty prietokov v záverečnom profile povodia sa používajú na porovnanie so simulovanými hodnotami.

Snehový modul zahrňuje tieto parametre:

- snehový korekčný parameter **SCF** (-) – pomocou neho je snehová zrážka z dôvodu nepresnosti pri meraní tuhých zrážok upravovaná,
- teplotný parameter **DDF** (mm/ $^{\circ}$ C deň) – riadi topenie snehu v povodí,
- hraničná teplota **Tr** ( $^{\circ}$ C) – hodnota priemernej teploty vzduchu na povodí nad ktorou je zrážka kvapalná,
- hraničná teplota **Ts** ( $^{\circ}$ C) – hodnota priemernej teploty vzduchu na povodí pod ktorou je zrážka snehová,
- hraničná teplota **Tm** ( $^{\circ}$ C) – hodnota priemernej teploty vzduchu na povodí pri ktorej nastáva topenie snehu.

Pôdný modul obsahuje tieto parametre:

- limit pre potenciálnu evapotranspiráciu **Lprat** (-) – určuje hranicu, kedy sa aktuálna evapotranspirácia rovná potenciálnej,
- pôdnú vodnú kapacitu **FC** (mm) – maximálne množstvo vody, ktoré je pôda schopná prijať,
- parameter tvorby odtoku **BETA** (-) – kontroluje tvorbu odtoku,

Odtokový modul pozostáva z týchto parametrov:

- parameter zodpovedný za riadenie vzniku a priebehu odtoku **k0** (deň) – ovplyvňuje povrchový odtok,

- parameter zodpovedný za riadenie vzniku a priebehu odtoku **k1** (deň) – ovplyvňuje pod povrchový odtok,
- parameter zodpovedný za riadenie vzniku a priebehu odtoku **k2** (deň) – ovplyvňuje podzemný odtok,
- zásoby vody v pôde **Lsuz** (mm),
- parameter súvisiaci s prenikanie vody do pôdy **Cperc** (mm/deň),
- parameter spojený so základným odtokom **Bmax** (deň),
- tzv. parameter transformácie odtoku **Croute** (odtok/deň).

Funkcia odozvy v odtokovom module reprezentuje cesty odtoku na svahu a pozostáva z dvoch rezervoárov (horný a dolný). Voda vstupuje do horného rezervoára a vystupuje z neho cez tri cesty: výstup z rezervoára na základe rýchleho koeficientu odtoku **k1**, perkolácia (prenikanie vody) do spodnej zóny s konštantnou mierou perkolácie (**Cperc**) a ak je stav zásoby vody v pôde (**Lsuz**) prekročený, cez výstup na základe rýchleho koeficientu odtoku **k2**. Voda opúšťa spodnú zónu (dolný rezervoár) na základe pomalého koeficientu odtoku **k0**. Výstup z obidvoch rezervoárov ( $Q_g$ ) je riadený pomocou trojuholníkovej transformačnej funkcie, ktorá reprezentuje cesty odtoku v toku.

Detailnejší opis štruktúry modelu, ako aj rozličné príklady jeho aplikácií je možné nájsť v početných prácach (napr. Parajka a kol., 2007, Ceola a kol., 2015; Slezia a kol., 2016).

### 3.2 Kalibrácia a validácia hydrologického modelu TUW

Pre kalibráciu parametrov modelu bola použitá automatická kalibrácia (pozri rešeršnú časť) s využitím algoritmu diferenciálnej evolúcie Deoptim (Ardia a kol., 2015). Algoritmus bol aplikovaný v softvérovom prostredí R (R Development Core Team, 2014). Model bol kalibrovaný v období 2001-2010 pre 5 reprezentatívnych rakúskych povodí (detailnejšie opísané v kapitole 8).

Parametre modelu boli optimalizované na základe kombinácie dvoch známych a často používaných kritérií: Nash-Sutcliffovho koeficientu (Nash a Sutcliffe, 1970) a jeho logaritmu (Merz a kol., 2011; Slezia a kol., 2018). Optimalizačná funkcia bola definovaná v štandardnom tvare:  $(\text{NSE} + \log\text{NSE})/2$ . Pre detailnejší opis použitej optimalizačnej funkcie

pozri napr. Slezia (2017). Účinnosť modelu z hľadiska kalibrácia modelu bola úspešne zhodnotená vo viacerých predoších štúdiách (napr. Slezia a kol., 2016, 2017, 2018)

Pre potreby tejto práce budú nakalibrované parametre priamo použité pre simulácie (v období 1981-1990) vo vytvorennej web aplikácii. Účinnosť modelu bude v práci hodnotená na základe vizuálneho posúdenia meraných a modelom simulovaných hodnôt prietokov.

## 4 REŠERŠ PODOBNÝCH ŠTÚDIÍ

Táto kapitola sa venuje podobným štúdiám v kontexte práce, pričom obsahuje jednu podkapitolu, ktorá opisuje GR („Génie rural“) hydrológicke modely, ktoré boli primárne navrhnuté na výučbu hydrológie.

### 4.1 GR hydrologické modely zamerané na výučbu hydrológie

GR („Génie rural“) modely (tab. 1) sú koncepcné hydrologické modely, ktoré pracujú v hodinovom, dennom, mesačnom alebo aj ročnom časovom kroku. Tabuľka 1 zobrazuje prehľad týchto modelov spolu s počtom parametrov, ktoré môžu byť použité pre ich kalibráciu. Z tab. 1 môžeme usúdiť, že modely sú pomerne jednoduché, čo naznačuje aj malý počet kalibrovateľných parametrov (napr. model GR1A má iba jeden kalibrovateľný parameter). Napriek tomu sú modely v obľube, najmä pre vzdelávacie účely.

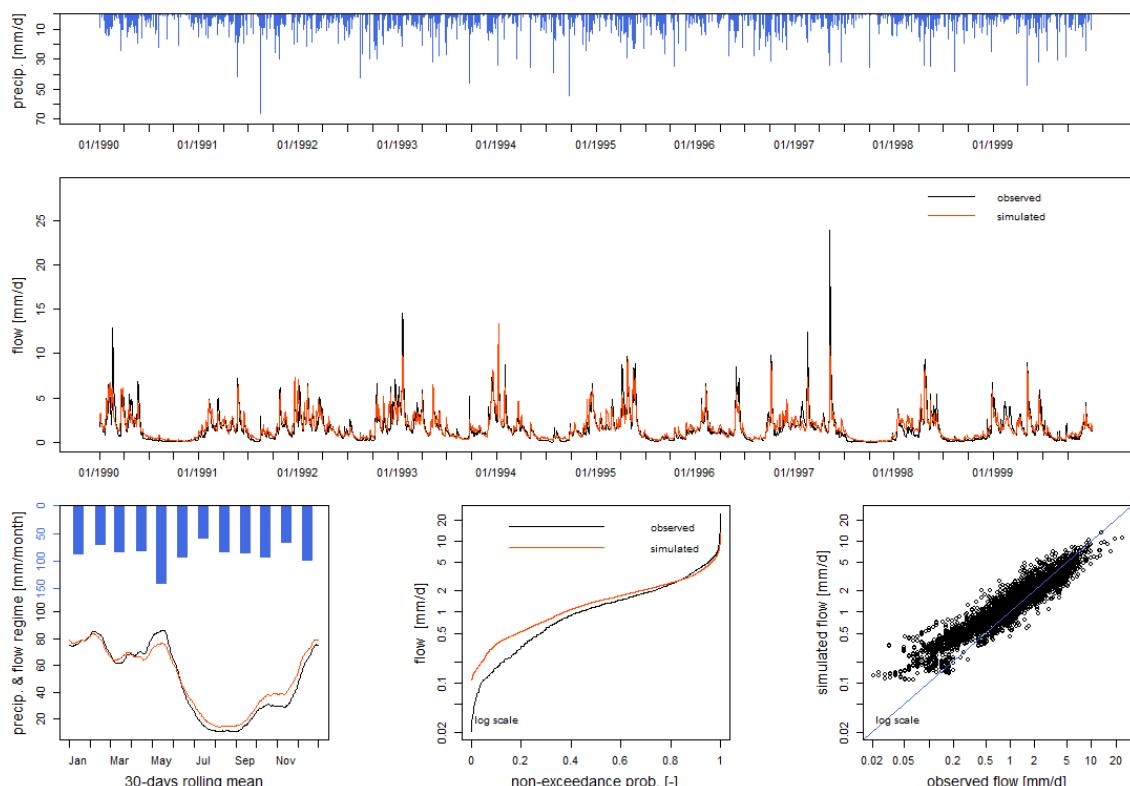
Model	Počet parametrov	Časový krok	Autor
GR4H	4	hodinový	Mathevet, 2005
GR4J	4	denný	Perrin a kol., 2003
GR5J	5	denný	Le Moine, 2008
GR6J	6	denný	Pushpalatha a kol. 2011
GR2M	2	mesačný	Mouelhi a kol. 2006a
GR1A	1	ročný	Mouelhi a kol. 2006b

Tabuľka 1 Prehľad GR hydrologických modelov

V súčasnom období vznikli dve štúdie (airGR, Coron a kol., 2016 a airGRteaching, Delaigue a kol., 2018), ktoré umožňujú použitie vyššie spomínaných GR hydrologických modelov pre rôzne modelovacie experimenty.

#### 4.1.1 airGR pre výučbu hydrológie

airGR existuje ako balík v prostredí R (R Development Core Team, 2014). Bol vytvorený výskumnou skupinou IRSTEA vo Francúzsku (Coron a kol., 2016, 2017). airGR umožňuje použitie vyššie spomínaných GR hydrologických modelov a snehového modulu CemaNeige (pre simuláciu akumulácie a topenia snehu v povodí). airGR bol navrhnutý najmä pre výskumné a vzdelávacie účely. Balík zahŕňa tri príkladové povodia s údajmi, pomocou ktorých je možné vykonať pomerne jednoduché modelovacie experimenty (obr. 2). Balík umožňuje do procesu modelovania zahrnúť aj vlastné povodia.



Obrázok 2 Výstup zo simulácie pomocou balíku airGR a modelu GR4J

airGR bol vyvinutý tak, aby spĺňal dve hlavné požiadavky: (a) mal by uľahčiť používanie GR hydrologických modelov začínajúcim modelárom (t.j., je určený študentom, modelárom, ktorí nemajú príliš veľké skúsenosti s hydrologickým modelovaním), (b) mal by umožniť flexibilitu týkajúcu sa najmä pridávania externých kritérií modelov (napr. na posúdenie ich účinnosti) alebo kalibračných algoritmov.

#### Nedostatky

Asi najväčším nedostatkom je webové rozhranie, ktoré v tomto riešení chýba. Pre spustenie jednotlivých modelov zakomponovaných v balíku airGR je potrebné mať nainštalovaný tento balík v prostredí R a taktiež aj ďalšie podporné balíky (napr. pre úpravu údajov a pod.). Za nedostatok sa dá považovať aj absencia mapy, ktorá by poukazovala na skúmané povodia. Ako sme už naznačili vyššie modely zahrnuté v balíku airGR obsahujú menší počet parametrov (v porovnaní s klasickými koncepnými hydrologickými modelmi) a teda treba byť opatrní aj pri interpretácii získaných výsledkov.

#### 4.1.2 airGRteaching pre výučbu hydrológie

Na vyššie uvedený balík airGR (Coron a kol. 2017) nadväzuje aj balík airGRteaching (Delaigue a kol., 2018), ktorý je už ale viac prepracovaný. Podobne ako airGR aj airGRteaching umožňuje použitie GR („Génie rural“) hydrologických modelov (GR4H, GR4J, GR5J, GR6J, GR2M, GR1A) a taktiež aj snehového modulu CemaNeige.

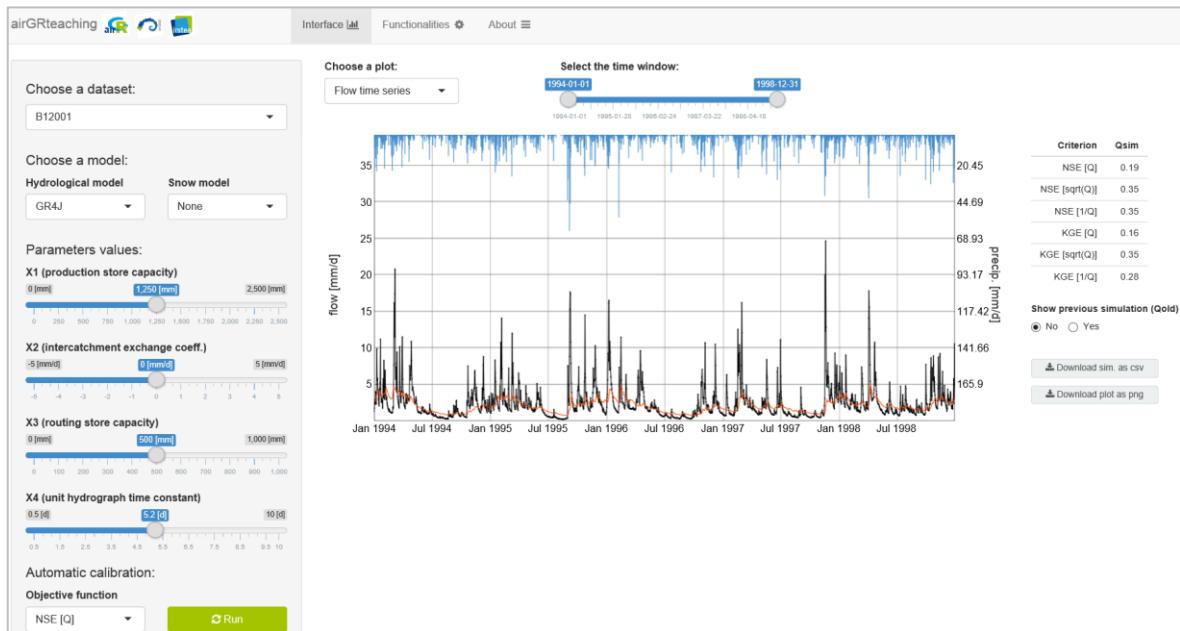
Balík airGRteachning bol navrhnutý predovšetkým pre študentov, pričom by im mal umožniť lepšie pochopenie modelovacieho procesu (porozumieť štruktúre, parametrom modelu a ich vzájomnej interakcii) v rámci rôznych modelovacích experimentov. Autori zdôrazňujú, že dôraz by mal byť kladený najmä na interpretáciu výsledkov získaných z kalibrácie a simulácie jednotlivých GR hydrologických modelov.

Balík airGRteaching vychádza z týchto funkcií:

- funkcie, ktoré slúžia na prípravu údajov, kalibráciu modelu, spustenie/vyhodnotenie simulácie modelu,

- funkcie pre zobrazenie statických/dynamických grafov, ktoré pomáhajú študentom skúmať pozorované údaje a interpretovať výsledky získané z kalibrácie a simulácie vybraných GR modelov,
- funkcia, ktorá spúšťa grafické rozhranie „Shiny“ (zabezpečuje prepojenie prostredia R s webovým prehliadačom), ktoré umožňuje zobraziť v reálnom čase vplyv parametrov modelu na výsledné simulácie. Inými slovami, po modifikácii parametrov modelu sa zároveň interaktívne menia aj simulácie prietokov.

V balíku airGRteaching sú k dispozícii aj príkladové údaje (t.j., vstupné údaje pre jedno horské a jedno nížinné povodie), pričom balík umožňuje použiť aj vlastné údaje (musia byť pripravené vo vhodnom formáte). Po načítaní údajov a spustení jedného z GR hydrologických modelov (zahrnutých v balíku airGRteaching) spolu s frameworkom Shiny (označovaný tiež ako balík v R) sa ukáže okno interaktívnej aplikácie (obr. 3). Na ľavej strane sú štyri záložky, kde je možné (a) vybrať povodie, (b) vybrať jeden z GR modelov, (c) vybrať snehový modul, (d) definovať cieľovú funkciu. V tejto časti sa nachádzajú aj samotné parametre vybraného modelu, ktoré je možné modifikovať (zmena sa premietne aj do získaných kritérií účinnosti modelu, ktoré sú definované na pravej strane).



Obrázok 3 Zobrazenie výstupu získaného použitím balíku airGRteaching v prostredí Shiny

### Nedostatky

Za nedostatok sa dá považovať absencia mapy, ktorá by poukazovala na skúmané povodia (ich charakteristiky ako napr., úhrn zrážok, teplota vzduchu, prietok, plocha povodia, nadmorská výška a pod.). Balík airGRteaching ponúka len simulácie prietoku, t.j., neukazuje v akom rozsahu by sa pohybovali ďalšie hydroklimatické charakteristiky (napr. vlhkosť pôdy, topenie snehu, vodná hodnota snehu a pod.). Za nedostatok sa dá považovať aj to, že balík zatiaľ neboli nasadené na server, teda je možné k nemu pristúpiť len z prostredia R (t.j., užívateľia/študenti) musia mať nainštalované prostredie R a taktiež aj potrebné rozšírenia (balíky).

Balík airGRteaching sice zahŕňa aj rozhranie Shiny, ktoré zabezpečuje prepojenie prostredia R s webovým prehliadačom, ale toto rozhranie je priamo súčasťou tohto balíku. Inými slovami užívateľia/študenti môžu využívať web rozhranie Shiny, len v tom prípade, keď majú nainštalované prostredie R (z ktorého sa Shiny spúšťa) a taktiež aj ďalšie potrebné R balíky.

## 5 CIELE PRÁCE

V rešeršnej časti práce boli opísané koncepčné hydrologické modely (typu HBV), ktoré sú jedny z najpoužívanejších modelov pre riešenie rôznych praktických vodohospodárskych úloh, ale aj pre výskumné a vzdelávacie účely. Jeden z takýchto modelov (TUV model) bol vybraný aj pre potreby tejto práce. Početné práce v prehľade literatúry poukázali aj na neistoty, ktoré súvisia s používaním koncepčných hydrologických modelov, pričom sa jedná najmä o neistoty vychádzajúce zo štruktúry, parametrov modelu a ich vzájomnej interakcie.

Boli priblížené dve štúdie (balíky v prostredí R), ktoré umožňujú používanie koncepčných hydrologických modelov a sú primárne zamerané na výučbu hydrologického modelovania. Doposiaľ však neexistuje žiadna webová aplikácia, ktorá by umožnila použitie hydrologického modelu a zároveň umožnila analyzovať citlivosť parametrov vo vzťahu k výstupom modelovania.

Hlavný cieľ tejto práce spočíva vo vytvorení webovej aplikácie, ktorá bude slúžiť ako výukový materiál pre študentov (primárne pre študentov Technickej univerzity vo Viedni) v rámci výučby predmetov zameraných na hydrologické modelovanie (napr. Hydrology, Water Resources Management, River Basin Management a pod.).

Čiastkové ciele práce boli definované nasledovne:

- Popíšte TUWmodel.
- Navrhnite webové užívateľské rozhranie využívajúce model.
- Implementujte webovú aplikáciu, ktorá bude využívať model a vizualizovať vhodným spôsobom výsledky modelovania.
- Popíšte obmedzenia a možnosti rozšírenia pripravovaného riešenia.

Požiadavky na aplikáciu:

- Prehľadnosť – užívateľské prostredie musí pôsobiť príjemne a prehľadne, no zároveň poskytovať potrebnú funkcionality.
- Jednoduchosť – aplikácia musí byť jasná a jednoduchá/intuitívna, bez zbytočných funkcií, ktoré by mohli užívateľov (v našom prípade študentov) miast'.

- Dostupnosť – aplikácia musí byť funkčná a dostupná v bežnom internetovom prehliadači (t.j., použitie bez nutnosti inštalácie desktopových programov).

Výhľadové funkcie:

- Rozšírenie aplikácie o ďalšie rakúske povodia.
- Doplnenie interaktívnych grafov.
- Pridanie poznámok do aplikácie.
- Možnosť vkladať vlastné údaje.

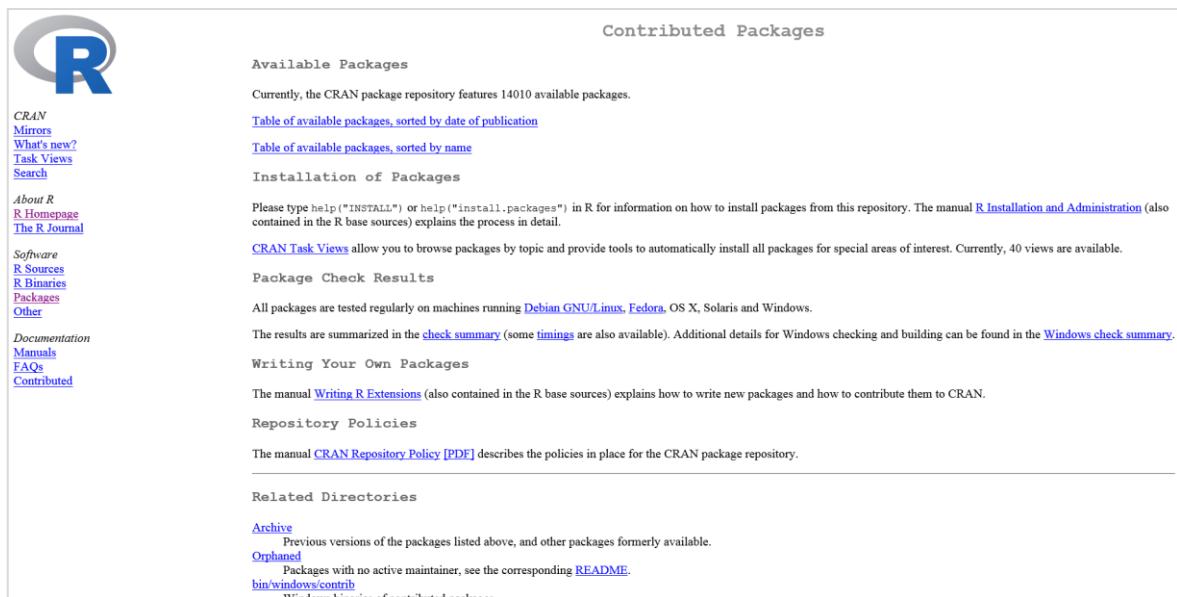
## 6 VÝBER SOFTVÉROVÉHO PROSTREDIA

Pre vývoj web aplikácie bol vybraný programovací jazyk R (v práci označujeme aj ako softvérové prostredie R), ktorý je bližšie popísaný v nižšie uvedenej podkapitole. V rámci tejto podkapitoly sú priblížené aj viaceré balíky zamerané na hydrologické modelovanie, ako aj balíky súvisiace s vývojom web aplikácie.

### 6.1 Programovací jazyk R

R je voľne dostupný (open source) programovací jazyk, primárne slúžiaci pre štatistické výpočty a vizualizáciu dát (napr. rôzne 2D/3D grafy, mapy a pod.). Jazyk R je široko využívaný najmä vo vedeckej a akademickej sfére. Tvorcom tohto jazyku je John Chambers (Čistý a kol., 2014)

Veľkou výhodou jazyka R sú jeho rozšírenia (tzv. balíky), z ktorých pochádza aj veľká časť funkcionality. V balíkoch je implementované veľké množstvo pokročilých funkcií z rôznych oblastí. Centrálny sklad (archív) balíkov sa nazýva CRAN („Comprehensive R Archive Network“). Aktuálne je na CRAN dostupných cez 14 010 balíkov (obr. 4).

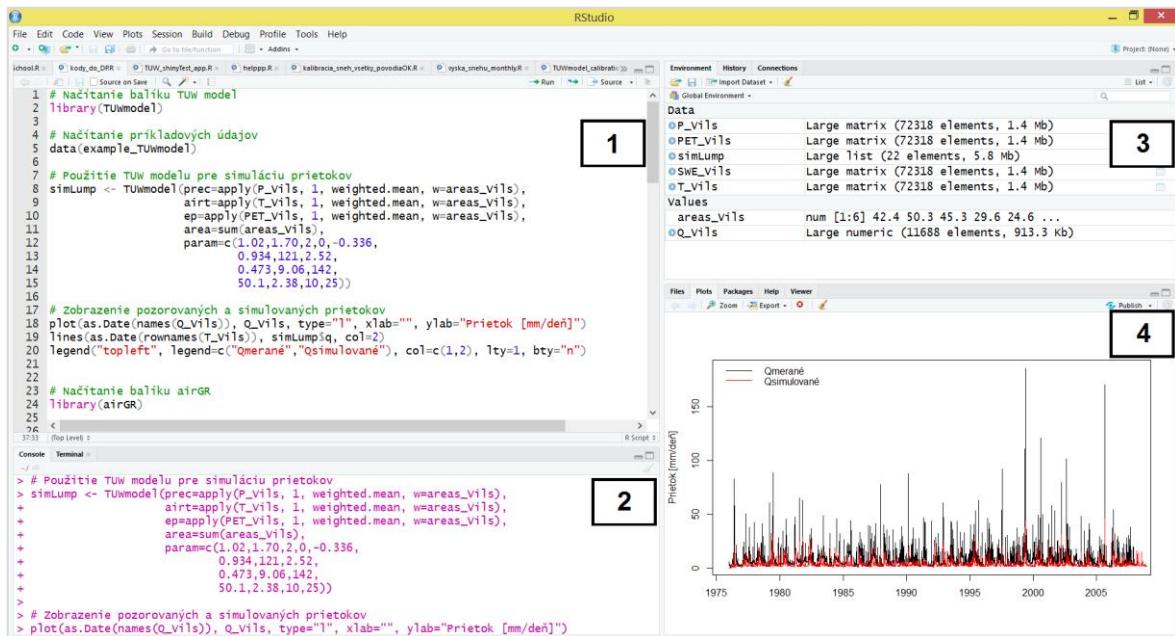


Obrázok 4 Archív R balíkov CRAN

R ako programovací jazyk a ako integrované softvérové prostredie pre (a) manipuláciu s dátami, (b) výpočty, (c) vizualizáciu dát, zahŕňa tieto črty (Čistý a kol., 2014):

- jazyk má objektový charakter,
- pracuje pod viacerými operačnými systémami, napr. Windows, Linuxové distribúcie (Ubuntu, Redhat, Debian, Suse), Mac,
- vďaka širokej škále nástrojov umožňuje efektívne spracovanie údajov.

Užívateľské prostredie R je pomerne strohé, preto sa pre komfortnejšiu prácu využívajú rôzne nadstavbové prostredia, napr. Rattle, RKWard, R Commander. Najpopulárnejším riešením je RStudio, ktoré slúži ako integrované vývojové prostredie (IDE „Integrated Development Environment“) pre R softvér. RStudio sa skladá zo štyroch hlavných komponentov (obr. 5), ktoré zahŕňajú: (1) editor zdrojového kódu – slúži na editáciu programového kódu, (2) konzolu – slúži na vykonávanie príkazov, (3) pracovného priestoru – zobrazuje načítané objekty/dáta projektu, (4) okna na prácu so súbormi a grafickými výstupmi – slúži na manipuláciu so súbormi (napr. pridanie, premenovanie, vymazanie súboru), grafickými výstupmi (umožňuje ich prezeranie, exportovanie a pod.), balíkmi (napr. vyhľadanie, inštalácia, aktualizácia konkrétneho balíku a pod.).



Obrázok 5 Prostredie RStudio

Hlavné výhody jazyka R je možné zhrnúť do nasledovných bodov:

- nulové náklady (open source prostredie),
- množstvo dostupnej literatúry/zdrojov (napr. R-bloggers, R project, Stack overflow a jeho varianty), taktiež široká a otvorená komunita,
- množstvo funkcionality v balíkoch,
- prepojenie funkcionality dohromady, čo umožňuje priamy vývoj web aplikácie.
- zaujímavá funkcia aj pre oblasť geoinformatiky.

## 6.2 Balíky zamerané na hydrologické modelovanie

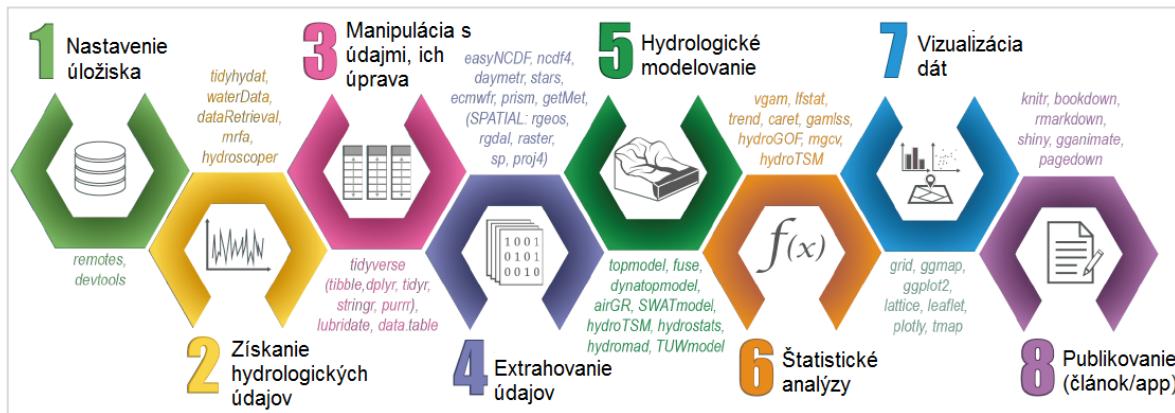
V hydrologickej komunite má jazyk R pevné postavenie. Existuje množstvo časopisov z hydrologickej oblasti (napr. Hydrology and Earth System Sciences, Water Resources Research, Journal of Water Resources Planning and Management and Journal of Hydrologic Engineering) v ktorých autori zverejňujú R kódy, ktoré sú podkladom pre výsledky prezentované v ich príspevkoch. Taktiež hydrologické R kurzy ("Using R in Hydrology") počas najpopulárnejšej hydrologickej konferencie „EGU General Assembly“ sú v obľuve, či už u nováčikov alebo aj skúsených používateľov jazyka R (obr. 6).



Obrázok 6 Hydrologický kurz ("Using R in Hydrology") v rámci konferencie EGU General Assembly 2018 (Slater a kol., 2019)

Pred uvedením jednotlivých balíkov (zameraných na hydrologické modelovanie), ktoré je možné v prostredí R použiť, je ešte dôležité spomenúť, aký pracovný postup predchádza použitiu týchto balíkov. Obrázok 7 dokumentuje kroky typického pracovného

postupu (v prostredí R) zaužívaného pri hydrologickom modelovaní. Pri jednotlivých krokoch sú zároveň naznačené aj relevantné R balíky.



Obrázok 7 Typický pracovný postup v hydrológii s využitím prostredia R a jeho rozšírení (balíkov)  
(Slater a kol., 2019)

Vyššie uvedený postup je možné zohľadniť v procese hydrologického modelovania s využitím modelov implementovaných v R vo forme balíkov (tab. 2). Väčšina z týchto modelov sú modely celistvé (t.j., modely s priestorovo sústredenými parametrami), pričom niektoré z nich (napr. airGR, airGRteaching) zahŕňajú aj snehové moduly. V týchto balíkoch sú zároveň dostupné aj ukážkové údaje, ktoré môžeme použiť na spustenie modelov. V niektorých balíkoch sú zahrnuté aj optimalizačné algoritmy (na kalibráciu modelov), kritériá účinnosti modelov, alebo funkcie na zobrazenie výsledkov modelovania (t.j., výsledných hydrogramov).

Balík	Opis balíku
TUWmodel	Umožňuje použitie populárneho HBV modelu (Viglione a Parajka, 2014).
airGR	Umožňuje použitie GR hydrologických modelov (Coron a kol., 2016, 2017).
airGRteaching	Umožňuje použitie GR hydrologických modelov, zahrnuje aj prostredie Shiny (Delaigue a kol., 2018).
dynatopmodel	Umožňuje použitie hydrologického modelu TOPMODEL (Metcalfe a kol., 2018).
fuse	Umožňuje ensemblové hydrologické modelovanie (Vitolo a kol., 2016).
hydromad	Umožňuje simulácie, posúdenie a vizualizácie časových radov prietokov (Andrews and Guillaume, 2018).

RHMS	Umožňuje simuláciu a následnú analýzu hydrologických udalostí (Arabzadeh a Araghinejad, 2018).
topmodel	Umožňuje použitie hydrologického modelu TOPMODEL (Buytaert, 2018).

Tabuľka 2 Príklady balíkov pre hydrologické modelovanie v prostredí R (Slater a kol., 2019)

Postup aplikácie týchto modelov v prostredí R je pomerne jednoduchý. Napr. pre implementáciu/simuláciu TUW modelu pomocou balíku TUWmodel je možné použiť nižšie uvedený kód (obr. 8), kde najskôr načítame model, príkladové dáta a následne spustíme simuláciu a zobrazíme výsledné hydrogramy (t.j., pozorované a simulované hodnoty prietokov).

```

1 # Načítanie balíku TUW model
2 library(TUWmodel)
3
4 # Načítanie príkladových údajov
5 data(example_TUWmodel)
6
7 # Použitie TUW modelu pre simuláciu prietokov
8 simLump <- TUWmodel(prec=apply(P_Vils, 1, weighted.mean, w=areas_Vils),
9                         airt=apply(T_Vils, 1, weighted.mean, w=areas_Vils),
10                        ep=apply(PET_Vils, 1, weighted.mean, w=areas_Vils),
11                        area=sum(areas_Vils),
12                        param=c(1.02,1.70,2,0,-0.336,
13                               0.934,121,2.52,
14                               0.473,9.06,142,
15                               50.1,2.38,10,25))
16
17 # Zobrazenie pozorovaných a simulovaných prietokov
18 plot(as.Date(names(Q_Vils)), Q_Vils, type="l", xlab="", ylab="Prietok [mm/deň]")
19 lines(as.Date(rownames(T_Vils)), simLump$q, col=2)
20 legend("topleft", legend=c("Qmerané", "Qsimulované"), col=c(1,2), lty=1, bty="n")

```

Obrázok 8 Ukážka kódu pre simuláciu pomocou modelu TUW v prostredí R

V prípade použitia balíku airGR a aplikácie jedného z GR modelov (v nižšie uvedenom kóde GR4J model) by postup vyzeral nasledovne (obr. 9). Hashtagom (#) a zelenou farbou písma sú definované komentáre, ktoré detailnejšie približujú čitateľovi jednotlivé kroky.

```

1 # Načítanie balíku airGR
2 library(airGR)
3
4 # Načítanie príkladových údajov
5 data(L0123001)
6
7 # Príprava vstupov
8 InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR4J, DatesR = BasinObs$DatesR,
9                                     Precip = BasinObs$P, PotEvap = BasinObs$E)
10
11 # Výber obdobia
12 Ind_Run <- seq(which(format(BasinObs$DatesR, format = "%d/%m/%Y")=="01/01/1990"),
13                  which(format(BasinObs$DatesR, format = "%d/%m/%Y")=="31/12/1999"))
14
15 ## Príprava objektu "RunOptions"
16 RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J,
17                                 InputsModel = InputsModel, IndPeriod_Run = Ind_Run)
18
19 ## Manuálne nastavenie parametrov a simulácia modelu
20 Param <- c(257.238, 1.012, 88.235, 2.208)
21 OutputsModel <- RunModel_GR4J(InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions,
22                                 Param = Param)
23
24 # Zobrazenie výsledkov modelovania
25 plot(OutputsModel, Qobs = BasinObs$Qmm[Ind_Run])

```

Obrázok 9 Ukážka kódu pre simuláciu pomocou modelu GR4J v prostredí R

V prípade použitia balíku airGRteaching (zahŕňa aj Shiny web rozhranie) by aplikácia GR hydrologických modelov vyzerala nasledovne (obr. 10). Po spustení nižšie uvedeného R kódu by sa užívateľovi otvorilo webové rozhranie Shiny, kde by si užívateľ zvolil, ktorý z GR modelov chce aplikovať a taktiež aj pre ktoré z dvoch (horské/nížinné) príkladových povodí.

```

1 # Načítanie balíku
2 library(airGRteaching)
3
4 # Načítanie príkladových údajov pre nížinné povodie
5 data(L0123001)
6 BV_L0123001 <- BasinObs[0001:6000, c("DatesR", "P", "E", "Qmm", "T")]
7 BI_L0123001 <- BasinInfo
8
9 # Načítanie príkladových údajov pre horské povodie
10 data(L0123002)
11 BV_L0123002 <- BasinObs[5000:9999, c("DatesR", "P", "E", "Qmm", "T")]
12 BI_L0123002 <- BasinInfo
13
14 # Výstup v podobe interaktívnej simulácie pri použití defaultných hodnôt parametrov
15 if (interactive()) {
16   ShinyGR(ObsDF = list("Low-land basin" = BV_L0123001, "Mountainous basin" = BV_L0123002),
17           ZInputs = list(NULL, median(BI_L0123002$HypoData)),
18           HypoData = list(NULL, BI_L0123002$HypoData),
19           NLayers = list(5, 5),
20           SimPer = list(c("1994-01-01", "1998-12-31"), c("2004-01-01", "2006-12-31")),
21           theme = "United")
22 }

```

Obrázok 10 Ukážka kódu pre simuláciu pomocou balíku airGRteaching

### 6.3 Balíky použité pri tvorbe vlastnej webovej aplikácie

Pre tvorbu vlastnej web aplikácie bolo použitých niekoľko balíkov, ktoré si postupne priblížime.

Pre tvorbu web aplikácie bol použitý balík **Shiny** (v literatúre tiež označovaný ako framework, resp. rozhranie, Chang a kol., 2015). Ide o open source balík, ktorý umožňuje tvorbu interaktívnych web aplikácií a to priamo v prostredí R. Inými slovami, prostredie R slúži v tomto prípade ako backend, ktorý spracováva požiadavky a vracia definované výstupy. V Shiny je umožnená aj podpora technológií ako HTML, CSS, alebo Javascriptu, na základe čoho je aplikácie ešte viac prispôsobiť potrebám užívateľov. Pre tvorbu web Shiny aplikácie pomocou balíku Shiny je potrebný Shiny server, ktorý umožňuje hosting Shiny aplikácií. Detailnejší opis Shiny aplikácií (architektúra, princíp fungovania a pod.) je poskytnutý v nasledujúcej kapitole („Shiny aplikácie“).

Okrem R balíku Shiny existujú aj ďalšie balíky, ktoré s ním spolupracujú a rozširujú jeho funkcionality. Jedným z takýchto balíkov je aj balík **Shinydashboard** (Chang a Borges Ribeiro, 2018), ktorý obsahuje súbor vlastností a funkcií pre vytváranie dashboardov v prostredí Shiny. Dashboardy sú rozhrania, ktoré môžu zahŕňať skupiny podobných vizualizácií (napr. grafy, mapy a pod.). Tieto rozhrania môžu byť fixné (t.j., statická/ neinteraktívna webová stránka) alebo dynamické (umožňujú užívateľom meniť vstupné hodnoty, na základe ktorých sa výstupy menia v reálnom čase).

Okrem vyššie spomínaných balíkov, ktoré primárne slúžia pre tvorbu web aplikácií boli pre potreby tejto práce použité aj ďalšie balíky slúžiace najmä pre úpravu vstupných údajov (balík **zoo**, Zeileis a kol., 2019), alebo tvorbu interaktívnej mapy (**leaflet**, Cheng a kol., 2018). Pre modelovanie bol vo web aplikácii použitý balík **TUWmodel** (Viglione a Parajka, 2014), ktorý umožňuje použitie populárneho hydrologického modelu typu HBV.

R balík **zoo** slúži na úpravu časových radov, t.j. v našom prípade vstupných hodnôt zrážok, teplôt vzduchu, prietokov. Tieto časové rady transformuje do zoo objektu, ktorý je zároveň vstupom do hydrologického modelu. Balík zoo sa v širokej miere používa pre prácu s vektormi, maticami a faktormi. Taktiež je dôležitý pre úpravu dátumu a času.

Balík **leaflet**, ktorý je postavený na Javascripte sa používa na vytvorenie interaktívnych webových máp. Tieto mapy je možné použiť priamo v Shiny aplikáciach. Výhody tohto balíku je možné zhrnúť nasledovne: tvorba dynamických/interaktívnych máp (posúvanie, priblíženie, oddialenie mapy a pod.), mapy je možné zostaviť pomocou

ľubovoľných kombinácií (napr. polygóny, línie, GeoJSON), mapy je možné vytvoriť priamo z prostredie R/RStudio, vytvorené mapy je možné priamo implementovať do Shiny aplikácií.

Balík **TUWmodel** bol vyvinutý primárne pre vzdelávacie účely. Umožňuje použitie populárneho koncepčného hydrologického modelu typu HBV, ktorý pracuje v dennom časovom kroku (pozri Kapitolu 3).

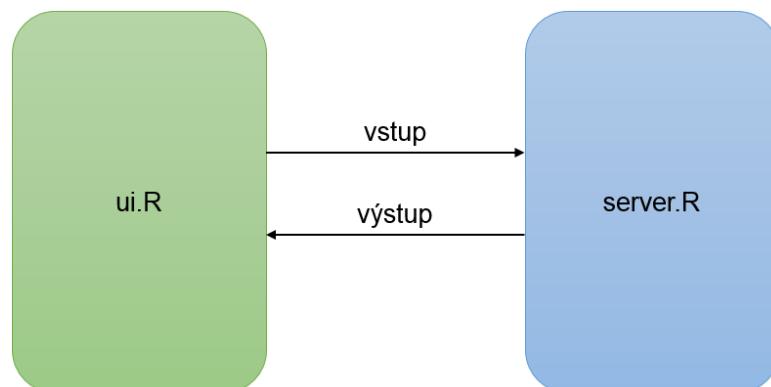
## 7 SHINY APLIKÁCIE

Ako sme naznačili v predošлом, R balík Shiny (Chang a kol., 2015) umožňuje tvorbu Shiny aplikácií. Táto kapitola je zameraná práve na tieto aplikácie. Prvá podkapitola je venovaná architektúre Shiny aplikácií. Druhá podkapitola sa zameriava na samotnú tvorbu Shiny aplikácií (princíp fungovania). Tretia podkapitola približuje Shiny server.

### 7.1 Architektúra Shiny aplikácií

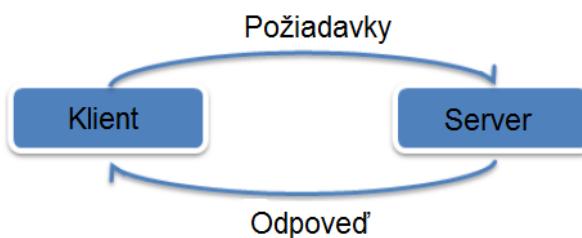
Pre tvorbu Shiny aplikácií je potrebný jazyk R, v ktorom sa využívajú funkcie integrované v balíku shiny. Shiny aplikácia je zložená z dvoch hlavných častí (obr. 11): užívateľské rozhranie (UI) a serverová časť. Pre tvorbu Shiny aplikácie sú preto potrebné dva súbory. Prvým súborom je *ui.R* (reprezentuje užívateľské rozhranie) a druhým je *server.R* (reprezentuje serverovú časť).

- *ui.R* (užívateľské rozhranie) – obsahuje kód, ktorý sa týka vzhľadu aplikácie a taktiež aj vstupných údajov užívateľa. Inými slovami, v tejto časti sa nachádza všetko, čo vidia koncoví užívatelia. Môžeme tu vytvoriť napr. menu, taktiež pridávať textový/grafický obsah (napr. v podobe grafov, obrázkov a pod.).
- *server.R* (serverová časť) – funkčná časť aplikácie (operácie s dátami, výpočty, spracovanie), ku ktorej koncoví užívatelia nemajú prístup. Sú tu umiestnené taktiež časti kódu, ktoré sa používajú na renderovanie (vysvetlené neskôr) objektov (napr. grafov, tabuliek a pod.).



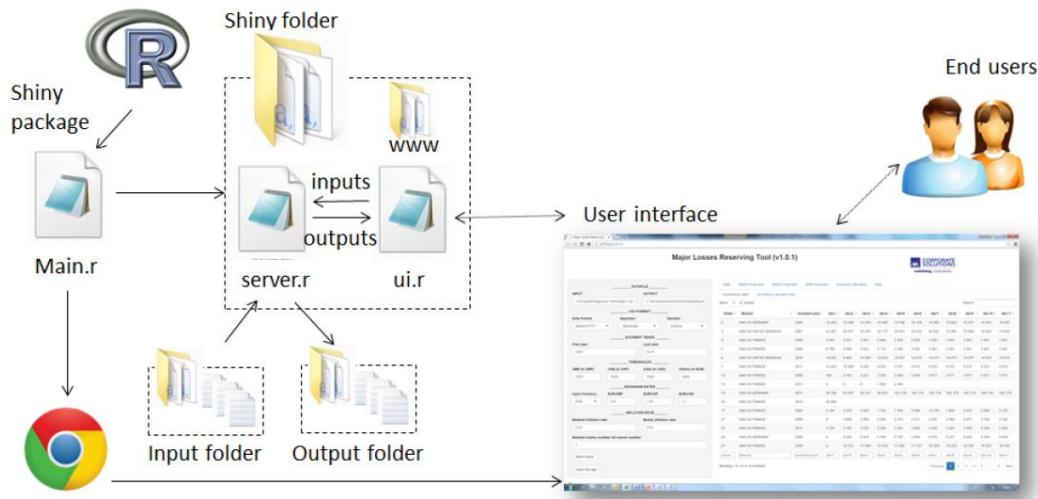
Obrázok 11 Štruktúra Shiny aplikácie

Inými slovami, Shiny spája dva pojmy, ktoré sú blízke web stránkam: klienat server (obr. 12). Klien je v interakcii s koncovými užívateľmi. Server je komponent, cez ktorý program R prijíma požiadavky od užívateľov, spúšťa R kód a následne odošle odpoveď klientskej strane.



Obrázok 12 Štruktúra Shiny aplikácie

Obrázok 13 bližšie približuje všeobecnú štruktúru aplikácie v Shiny. Ako sme už spomenuli, Shiny vyžaduje dva R skripty, ktoré musia mať presne definované názvy, t.j., *ui.R* (užívateľské rozhranie) a *server.R* (serverová časť). Tieto sú uložené v priečinku s názvom Shiny (môžeme pomenovať aj iným názvom). Taktiež môže byť potrebný aj ďalší R skript na načítanie vstupných údajov (napr. vo formáte .csv, .txt a pod.). Ten musí mať tiež pevne definovaný názov *global.R*. Okrem toho môžeme definovať aj podpriečinok s názvom „www“, do ktorého sa obyčajne ukladajú grafické prvky (obrázky a pod.), alebo súbor .pdf, ktorý chceme zobraziť v aplikácii. Štruktúra Shiny aplikácie vyžaduje aby vyššie spomínané prvky boli presne pomenované tými názvami. To čo chceme aby sa zobrazilo v užívateľskom rozhraní musí byť definované v *ui.R*. Jednotlivé výpočty sú definované v *server.R*. Shiny aplikácia je volaná z prostredia R v hlavnom skripte (*Main.r*), vďaka balíku Shiny. Aplikácia načíta vstupné súbory zo vstupného priečinku a zapisuje výstupné súbory. Užívateľské rozhranie sa môže zobraziť v predvolenom prehliadači RStudio, alebo vo webovom prehliadači. Toto používateľské rozhranie funguje presne ako webová stránka.



Obrázok 13 Architektúra Shiny aplikácie (<http://littleactuary.github.io/blog/Web-application-framework-with-Shiny/>)

## 7.2 Tvorba Shiny aplikácií

Ako sme naznačili v predchádzajúcej podkapitole, Shiny aplikácie sú zložené z dvoch častí:

- užívateľské rozhranie (*ui.R*),
- serverová časť (*server.R*).

Serverová časť umožňuje vytváranie blokov kódu (výstupov), ktoré reagujú na ovládacie prvky aplikácie (vstupy). Tieto bloky kódu sú nečinné, až pokým užívateľ neaktivuje (t.j., nezačne pracovať) s ovládacími prvkami. V takomto prípade sa bloky kódu v serverovej časti aktivujú a spustia.

Základná kostra Shiny aplikácie je uvedená nižšie (obr. 14). V užívateľskom rozhraní sa definujú jednotlivé panely, t.j., názov hlavného panelu, bočný panel a telo panelu. V serverovej časti sa definuje input/output.

```

1 # Nacitanie R baliku (shiny)
2 library(shiny)
3
4 # Uzivatelske rozhranie
5 ui <- fluidPage(
6   titlePanel(),
7   sidebarLayout(
8     sidebarPanel(),
9     mainPanel()
10   )
11 )
12
13 # Serverova cast
14 server <- function(input, output) {}
15
16 # Spustenie aplikacie
17 shinyApp(ui = ui, server = server)

```

Obrázok 14 Ukážka kódu pre definovanie základnej štruktúry Shiny aplikácie

Pre tvorbu Shiny aplikácií je potrebné pochopiť pojem „reaktivita“ (t.j., model reaktívneho programovania). Z hľadiska reaktívneho programovania obsahuje Shiny tri druhy objektov:

- a) **Reaktívne zdroje** – ovládacie prvky s ktorými užívateľ pracuje cez web rozhranie (napr. prepínač, tlačidlo a pod.).
- b) **Reaktívne vodiče** – väčšinou sa nepoužíva, len v prípade zacyklenia náročných operácií.
- c) **Reaktívny koncový bod** – objekt, ktorý sa zobrazuje v prehliadači užívateľa (napr. tabuľka, graf a pod.).

Dôležitú úlohu pri Shiny aplikáciách zohráva aj funkcia „*render*“. Pomocou tejto funkcie je možné vytvárať rôzne druhy objektov (napr. grafy, tabuľky a pod.) v serverovej časti. Najskôr je potrebné v užívateľskom rozhraní definovať výstup (output). Pre tieto požiadavky existujú v Shiny viaceré funkcie, pričom každá z nich slúži pre vyrenderovanie konkrétneho typu objektu. V tabuľke 3 sú uvedené najbežnejšie render príkazy.

Render	Output	Výstup
renderPlot	plotOutput	Graf
renderImage	imageOutput	Obrázok
renderUI	uiOutput	UI element
renderTable	tableOutput	Tabuľka
renderText	textOutput	Text

renderDataTable	dataTableOutput	Interaktívna tabuľka
-----------------	-----------------	----------------------

**Tabuľka 3 Zoznam renderovaných funkcií v Shiny**

V súvislosti s tvorbou web stránok je potrebné spomenúť aj (a) HTML (HyperText Markup Language), značkovací jazyk, ktorý využíva hypertextové odkazy, (b) kaskádové štýly (Cascading Style Sheets, CSS), pomocou ktorých môžeme definovať napr. druh písma, pozadie stránky (farbu) a pod. Ak chceme v Shiny zmeniť vzhľad textu, napr. použiť tučné písmo, kurzívnu, farbu písma a pod., môžeme použiť rôzne funkcie HTML, ktoré Shiny umožňuje (tab. 4). Taktiež je možné vytvoriť hypertextový odkaz pomocou a(), kde prvým argumentom je text s ktorým je odkaz pripojený, href obsahuje link na naše web stránky, ktoré chceme pripojiť. Tabuľka 4 dokumentuje HTML funkcie zahrnuté v Shiny, ktoré sú ekvivalentom ku klasickým HTML tagom.

HTML	Shiny	Popis
p	<p>	hlavička
h1	<h1>	nadpis 1 úrovne
h2	<h2>	nadpis 2 úrovne
h3	<h3>	nadpis 3 úrovne
h4	<h4>	nadpis 4 úrovne
h5	<h5>	nadpis 5 úrovne
h6	<h6>	nadpis 6 úrovne
a	<a>	Hypertextový odkaz
br	 	Prerušenie riadku
div	<div>	Rozdelenie textu
code	<code>	Formátovaný blok kódu
img	<img>	obrázok
strong	<strong>	Tučné písmo
em	<em>	Text s kurzívou

**Tabuľka 4 HTML tagy, ktoré sú prístupné v balíku Shiny**

### 7.3 Shiny server

Ide o špeciálne navrhnutý software, ktorý umožňuje hosting Shiny aplikácií. Je potrebné iba vytvorenie bezplatného účtu na „shinyapps.io“ (<https://www.shinyapps.io/>). K tomuto softvéru existuje pomerne dobrá dokumentácia (t.j., ako server inštalovať/nastaviť, ako sa registrovať a pod.). Po nainštalovaní máme dostatočnú kontrolu nad vytvorenou aplikáciou (napr. môžeme ju spustiť, zastaviť, taktiež vidíme koľko hodín je aplikácia aktívna a pod.). Každá vytvorená aplikácia má hosting na vlastnej adrese.

Dôležité je spomenúť, že akonáhle užívateľ príde na konkrétnu adresu (t.j., adresa je aktívna), Shiny aplikácia sa automaticky spustí. Akonáhle užívateľ aplikáciu opustí (t.j., po skončení práce zavrie web prehliadač) aplikácia sa automaticky zastaví. Takýto stav pretrvá, až do chvíle, kým užívateľ znova aplikáciu nespustí. Shiny server dobre komunikuje s OS Windows, Linuxom, aj s Mac OSX.

## 8 VSTUPNÉ ÚDAJE

Táto kapitola je zameraná na opis vstupných údajov a skúmaného územia/povodí.

### 8.1 Opis vstupných údajov

Hydrometeorologické údaje (priemerné denné úhrny zrážok, priemerné denné teploty vzduchu, priemerný denný prietok v záverečnom profile povodí), ktoré boli použité v tejto práci boli poskytnuté rakúskou hydrografickou službou (HZB „Austrian Hydrographic Service“). Údaje boli použité v dennom časovom kroku za obdobie 1981 – 2010.

Okrem vyššie uvedených údajov hydrologický model ako vstup potrebuje aj hodnoty potenciálnej evapotranspirácie. Tieto hodnoty (v 5 rakúskych staniciach) boli vypočítané pomocou modifikovanej Blaney-Criddleho metódy (Parajka a kol., 2005) s použitím interpolovanej dennej teploty vzduchu a gridových máp potencionálneho trvania slnečného svitu (rovnica 8.1).

$$EP = -1.55 + 0.96 * (8.128 + 0.457 * T) * \frac{S_D}{S_Y} * 100 \quad (8.1)$$

$T$  – priemerná denná teplota vzduchu na povodie,

$S_D$  – potenciálna dĺžka slnečného svitu počas daného dňa (hod),

$S_Y$  – priemerná ročná suma potenciálnej dĺžky slnečného svitu (hod),

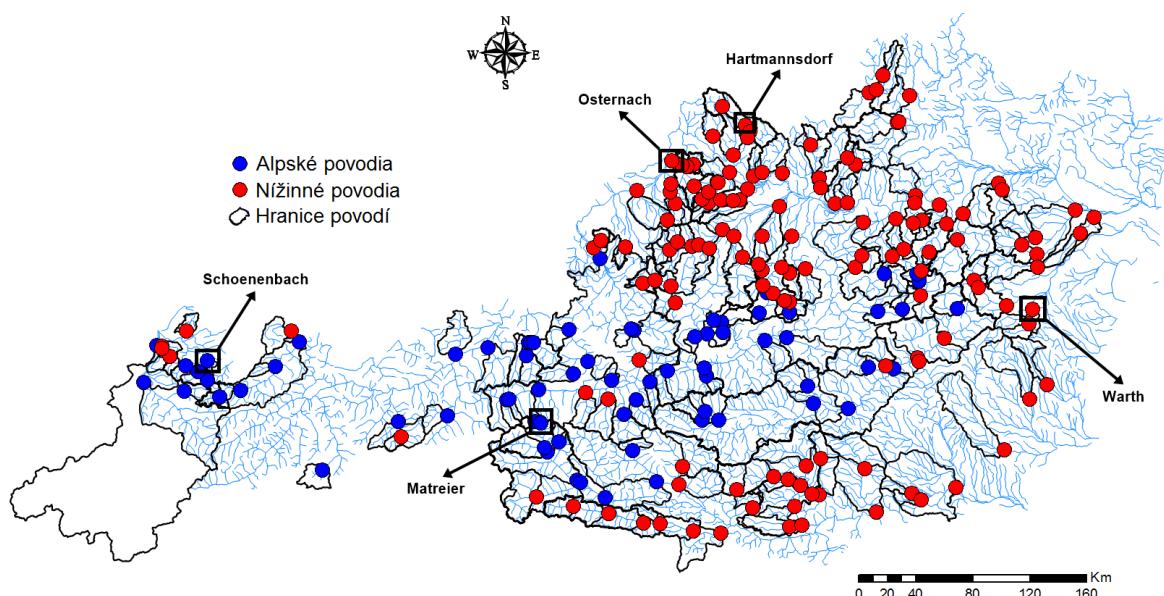
$(S_D/S_Y)*100$  – index oslnenia,

Hodnoty  $S_D$  a  $S_Y$  boli vypočítané z digitálneho modelu reliéfu (priestorové rozlíšenie 1 km).

### 8.2 Opis skúmaného územia a vybraných povodí

Ako skúmané územie bolo zvolené Rakúsko (obr. 15). Toto územie bolo vybrané ako testovacie z hľadiska (a) rozdielnych fyzicko-geografických podmienok (t.j., rozdielne plochy povodí, sklony, nadmorská výška, geológia), (b) dostupnosti vstupných údajov a ich vhodnosti pre modelovacie experimenty. Pre potreby tejto práce bolo vybraných 5 povodí (tab. 5, tri povodia nížinného charakteru – východná časť Rakúska, dve povodia horského charakteru – západná časť Rakúska), ktorých poloha v rámci Rakúska je zobrazená na

obrázku nižšie (obr. 15). Tento obrázok zároveň dokumentuje klasifikáciu rakúskych povodí (213) do dvoch skupín: alpské (horské) povodia a nížinné povodia. Pre detailnejšie informácie o uvedenej klasifikácii odkazujeme čitateľa napr. na práce Slezia (2017), Slezia a kol. (2018).



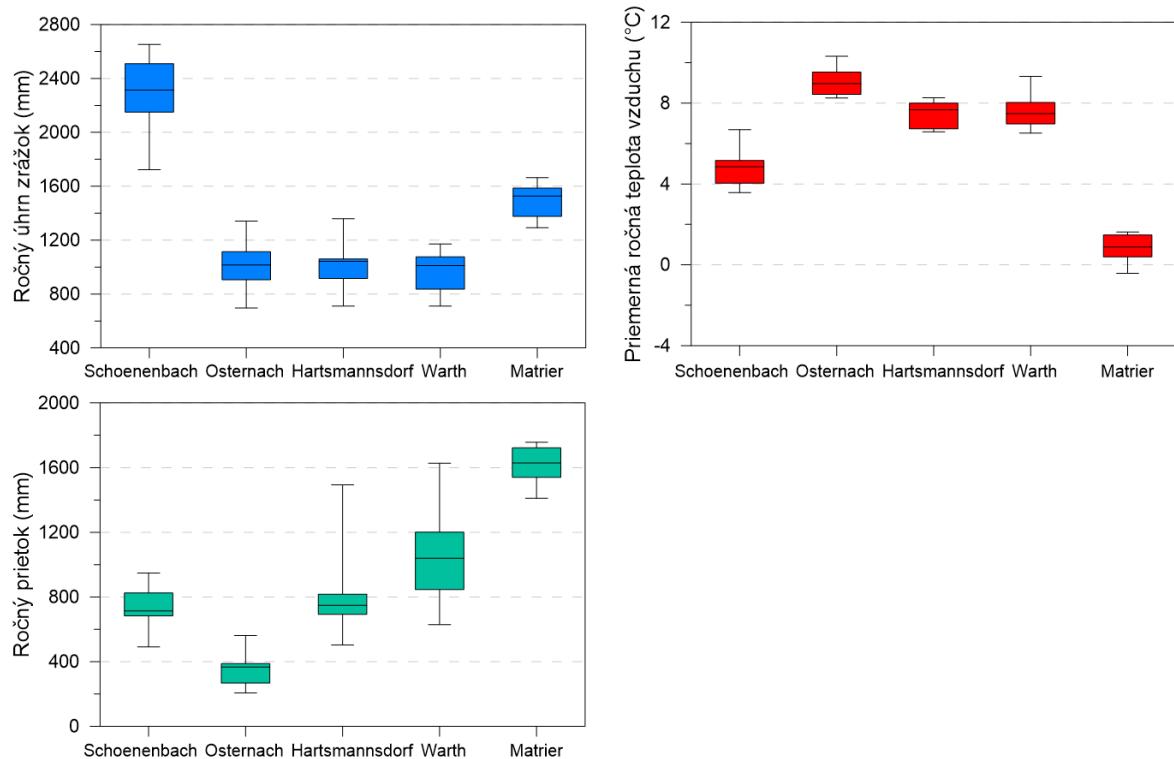
**Obrázok 15 Mapa Rakúska s vybranými povodiami (rozdelenie povodí na alpské 71 a nížinné 142, Slezia a kol., 2018)**

P.Č.	ID	Názov stanice	X	Y	Z (m n. m.)
1	200287	Schoenenbach	151606.52	392637.5	1460
2	204768	Osternach	408938.63	490432.75	431
3	204925	Hartmannsdorf	452911.5	519510.78	751
4	208835	Warth	610053.38	420977.13	830
5	212076	Matreier	336915.91	357954.66	2485

**Tabuľka 5 Zoznam vybraných rakúskych povodí**

Pre detailnejšiu ilustráciu variability jednotlivých klimatických charakteristík skúmaných povodí boli tieto charakteristiky vykreslené do škatuľových grafov (obr. obr. 16). Z tohto grafického znázornenia môžeme vidieť variabilitu jednotlivých charakteristík, pričom horizontálna čiara škatule predstavuje medián (strednú hodnotu), horná a dolná hranica škatule 75 a 25 percentil, horná a dolná anténka znázorňuje maximálnu a minimálnu hodnotu. Priemerné hodnoty týchto klimatických charakteristík boli zároveň zosumarizované v tabuľke 6. Z tab. 6 je viditeľné, že priemerný ročný úhrn zrážok sa

pohybuje od 935 mm do 2313 mm. Priemerný ročný prietok je v rozsahu od 323 mm do 2202 mm. Priemerná ročná teplota vzduchu je v intervale od -0.1 °C do 8.9 °C. V tab. sú zároveň uvedené aj fyzicko-geografické charakteristiky povodí. Plocha piatich skúmaných povodí je v rozsahu 31 až 277 km<sup>2</sup>. Nadmorská výška sa pohybuje of 431 do 2485 metrov nad morom. Sklon je do 42% a lesnatosť do 70%.



**Obrázok 16 Variabilita klimatických charakteristík pre 5 skúmaných povodí**

Povodie	Plocha (km <sup>2</sup> )	Nad. výška (m n.m.)	Sklon (%)	Lesnatosť (%)	P (mm)	T (°C)	Q (mm)
Schoenenbach	31	1460	33	38	2313	4.6	2202
Osternach	68	431	9	17	994	8.9	441
Hartsmannsdorf	138	751	10	57	935	7.1	461
Warth	277	830	20	70	973	7.3	323
Matrier	60	2485	42	5	1445	-0.1	2254

**Tabuľka 1 Priemerné hodnoty klimatických charakteristík a hodnoty fyzicko-geografických ukazovateľov pre 5 skúmaných povodí**

## 9 VÝVOJ VLASTNEJ WEBOVEJ APLIKÁCIE

Táto kapitola je venovaná vývoju vlastnej webovej aplikácie, pričom obsahuje štyri podkapitoly. Prvá z nich je zameraná na návrh webového užívateľského rozhrania využívajúceho hydrologický model (TUW model). V druhej podkapitole je priblížená implementácia web aplikácie využívajúcej model. Tretia podkapitola opisuje nasadenie web aplikácie na server. Štvrtá podkapitola ilustruje príklad použitia navrhnutej web aplikácie na vybranom rakúskom povodí.

### 9.1 Návrh webového užívateľského rozhrania využívajúceho TUW model

Užívateľské rozhranie (User Interface, UI) umožňuje užívateľovi interakciu s aplikáciou (t.j., ovládanie aplikácie, spúšťanie funkcií a pod.). Pre návrh webového užívateľského rozhrania boli použité funkcie obsiahnuté v balíku Shiny a jeho rozšírenia balíku ShinyDashboard. Rozhranie bolo vytvorené formou webového dashboardu (sústredíme sa na vizualizovaný obsah). Základná kostra aplikácie je uvedená na obr. 17. Pomocou týchto funkcií je možné definovať hlavičku, bočný panel a telo (obsah) aplikácie.

```
1 # Nacitanie R balikov (shiny, shinydashboard)
2 library(shiny)
3 library(shinydashboard)
4
5 # Uzivatelske rozhranie
6 ui <- dashboardPage(
7   dashboardHeader(),
8   dashboardSidebar(),
9   dashboardBody()
10 )
11
12 # Serverova cast
13 server <- function(input, output) { }
14
15 # Spustenie aplikacie
16 shinyApp(ui, server)
```

Obrázok 17 Ukážka kódu na vytvorenie základnej štruktúry web dashboardu

Celé užívateľské rozhranie v tejto práci je navrhnuté v anglickom jazyku, pretože aplikácia je primárne určená pre zahraničných študentov (t.j., študentov TU vo Viedni). Pomocou funkcie *sidebarMenu()* môžeme v aplikácii pridať základné menu (obr. 18).

```
1 # Menu
2 sidebarMenu( # zobrazenie záložiek a definovanie ikon
3   menuItem("Motivation", tabName = "motivacia", icon = icon("info")),
4   menuItem("Map", tabName = "mapka", icon = icon("book")),
5   menuItem("Modelling", tabName = "modelovanie", icon = icon("th")),
6   menuItem("References", tabName = "referencie", icon = icon("check")))
```

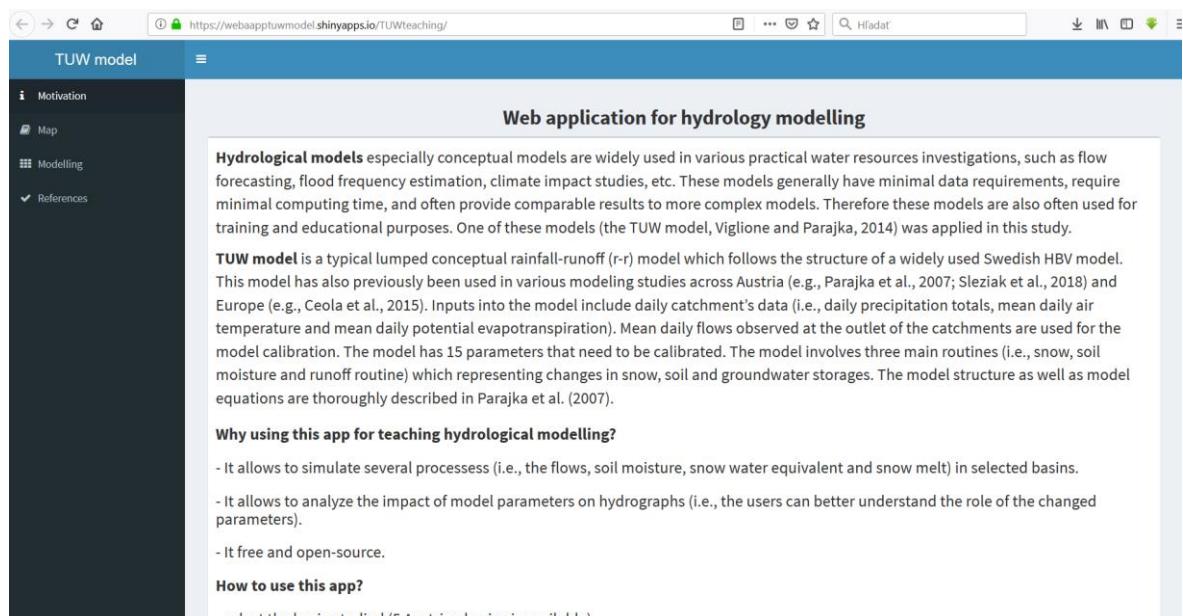
Obrázok 18 Ukážka kódu na definovanie hlavného menu v aplikácii

Hlavné menu sa skladá zo štyroch záložiek, ktoré tvoria bočný panel:

- Motivation (motivácia),
- Map (mapa),
- Modelling (modelovanie),
- References (referencie).

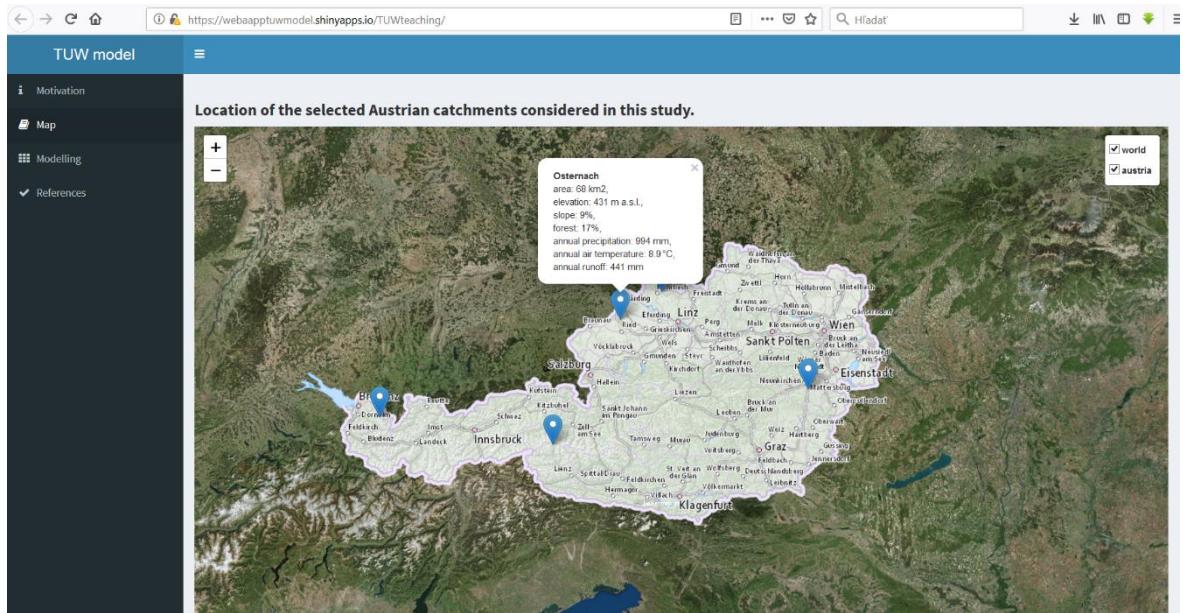
Jednotlivé časti hlavného menu si priblížime:

Prvá záložka s názvom „Motivation“ (obr. 19) zahŕňa popis hydrologických modelov a modelu (TUW model), ktorý je použitý v práci pre modelovanie. Taktiež je tu uvedený stručný popis prečo je vhodné používať navrhnutú aplikáciu pre výučbu hydrologického modelovania, a zároveň aj ako používať navrhnutú aplikáciu.



Obrázok 19 Hlavné menu v navrhnotej web aplikácii

Druhá záložka s názvom „Map“ obsahuje mapu Rakúska s vybranými povodiami (5 rakúskych povodí je dostupných, obr. 20). Akonáhle užívateľ vyberie nejaké povodie, ukážu sa základné charakteristiky (t.j. plocha povodia, nadmorská výška, sklon, lesnatosť, ročný úhrn zrážok, teplota vzduchu a prietok). Je umožnený pohyb po mapovom poli a zoomovanie/oddialovanie.



Obrázok 20 Zobrazenie mapy s vybranými povodiami v navrhnutej web aplikácii

Pri vytváraní objektov (grafov, máp) v Shiny je potrebné dodržať nasledujúci postup. v časti užívateľského rozhrania (*ui.R*) definujeme výstup, kam sa má výsledný graf (mapa) vymenovať (pozri podkapitolu 7.2 „Tvorba Shiny aplikácií“). *Render* funkcia nie je univerzálna (t.j., má viac variant a každá slúži na vymenovanie niečoho iného – grafu, tabuľky a pod.). V našom prípade (t.j., pre mapu) definujeme v užívateľskom rozhraní funkciu:

```
leafletOutput("mymapka", height = 800)
```

```
tabItem(tabName = "mapka", # definovanie veľkosti písma a popisu - druhá záložka "Map" v užívateľskom rozhraní
fluidRow(
  h3(strong("Location of the selected Austrian catchments considered in this study."))
  leafletOutput("mymapka", height = 800)
),
```

Obrázok 21 Ukážka kódu pre definovanie výstupu v užívateľskom prostredí pre renderovanie mapy

Následne v serverovej časti musí byť definovaná funkcia:

```
output$mymapka <- renderLeaflet({})
```

Taktiež sú tu aj ďalšie potrebné nastavenia, napr. zoom, template, zemepisná dĺžka, šírka (obr. 22). Písмо je definované pomocou HTML tagov, ktoré sú definované v Shiny.

```
100 ## leaflet - mapa Rakuska so skumymi povodiami
101 output$mymapka <- renderLeaflet({
102
103   m <- leaflet() %>%
104     setView(15, 46, zoom = 6) %>% # pohlad, zoom
105     addTiles(urlTemplate = "http://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}",
106               group="world") %>%
107     addTiles(urlTemplate = "http://maps{s}.wien.gv.at/basemap/bmapgrau/normal/google3857/{z}/{y}/{x}.png",
108               options = tileoptions(subdomains = "1234"),
109               group="austria") %>% # definovanie zakladnych charakteristik skumanych povodi = plocha
110     addMarkers(lng = 10.041, lat = 47.386, popup = "<b>Schoenenbach</b> <br>area: 31 km2, <br>elevation: 1460 m a.s.l., <br>sl",
111     addMarkers(lng = 13.453, lat = 48.313, popup = "<b>Osternach</b> <br>area: 68 km2, <br>elevation: 431 m a.s.l., <br>sl",
112     addMarkers(lng = 14.050, lat = 48.573, popup = "<b>Hartmannsdorf</b> <br>area: 138 km2, <br>elevation: 751 m a.s.l., <br>sl",
113     addMarkers(lng = 16.131, lat = 47.654, popup = "<b>WARTH</b> <br>area: 277 km2, <br>elevation: 830 m a.s.l., <br>slope",
114     addMarkers(lng = 12.501, lat = 47.118, popup = "<b>Matreier</b> <br>area: 60 km2, <br>elevation: 2485 m a.s.l., <br>sl",
115     addLayersControl(
116       overlayGroups = c("world", "austria"), # vrstvy
117       options = layersControlOptions(collapsed = FALSE))
118   m
119 }
120 })
```

Obrázok 22 Ukážka kódu v serverovej časti pre renderovanie mapy

Tretia záložka (Modelling) hlavného menu obsahuje implementáciu modelu TUW (bližšie popísané v nasledujúcej podkapitole), taktiež definovanie rozsahu (použitý podľa autorov Merz a kol., 2011) jednotlivých parametrov modelu. Podobne ako v predchádzajúcom, pri vytváraní objektu (v tomto prípade grafov modelovaných veličín) je potrebné najskôr v *ui.R* definovať výstup, kde sa má graf vyrenderovať (obr. 23). V tomto prípade (pre vyrenderovanie grafov pozorovaných a simulovaných prietokov) použijeme funkciu:

```
plotOutput("Qplot")
```

Konečný výstup potom definujeme v serverovej časti (uvedené v nasledujúcej podkapitole).

```

1 # ----- Užívateľské rozhranie -----
2
3 ui <- dashboardPage( # nazov
4   dashboardHeader(title = "TUW model"),
5   dashboardSidebar(
6     sidebarMenu( # zobrazenie založiek a definovanie ikon
7       menuItem("Motivation", tabName = "motivacia", icon = icon("info")),
8       menuItem("Map", tabName = "mapka", icon = icon("book")),
9       menuItem("Modelling", tabName = "modelovanie", icon = icon("th")),
10      menuItem("References", tabName = "referencie", icon = icon("check"))
11    )
12  ),
13  dashboardBody( # nastavenie okna a veľkosti písma vo web aplikacií
14    tabItems(
15      tabItem(tabName = "modelovanie", # tretia založka "Modelling" v užívateľskom rozhraní - definovanie rozsahu # hodnot parametrov TUW modelu
16        fluidRow(
17          sidebarLayout(
18            sidebarPanel(
19              selectInput(inputId = "dataChoice", label = NULL, choices = names(basin_list)),
20
21              h3("Parameters values:"), # hodnoty parametrov
22              sliderInput(inputId = "p01", label = "SCF:", min = 0.9, max = 1.5, value = 1),
23              sliderInput(inputId = "p02", label = "DDF:", min = 0.0, max = 5.5, value = 1),
24              sliderInput(inputId = "p03", label = "Tr:", min = 1.0, max = 3.3, value = 2),
25              sliderInput(inputId = "p04", label = "Ts:", min = -3.0, max = 1.0, value = 0),
26              sliderInput(inputId = "p05", label = "Tn:", min = -2.0, max = 2.2, value = 0),
27              sliderInput(inputId = "p06", label = "LPrat:", min = 0.0, max = 1.0, value = 0.5),
28              sliderInput(inputId = "p07", label = "FC:", min = 0.0, max = 600.0, value = 300.0),
29              sliderInput(inputId = "p08", label = "BETA:", min = 0.0, max = 20.0, value = 10.0),
30              sliderInput(inputId = "p09", label = "K0:", min = 0.0, max = 2.0, value = 1.0),
31              sliderInput(inputId = "p10", label = "k1:", min = 2.0, max = 30.0, value = 14.0),
32              sliderInput(inputId = "p11", label = "k2:", min = 30.0, max = 250.0, value = 100.0),
33              sliderInput(inputId = "p12", label = "lsuz:", min = 1.0, max = 100.0, value = 50.0),
34              sliderInput(inputId = "p13", label = "cperc:", min = 0.0, max = 8.0, value = 4.0),
35              sliderInput(inputId = "p14", label = "bmax:", min = 0.0, max = 30.0, value = 15.0),
36              sliderInput(inputId = "p15", label = "croute:", min = 0.0, max = 50.0, value = 25.0)
37            ),
38
39            mainPanel(
40              plotOutput("Qplot"), # prietoky (Q)
41              plotOutput("Moistplot"), # vlhkost pôdy (Moist)
42              plotOutput("MELTpplot"), # topenie snehu (Melt)
43              plotOutput("SWEplot") # vodna hodnota snehu (SWE)
44            )
45          )
46        )
47      )
48    )
49  )
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67

```

**Obrázok 23 Ukážka kódu pre definovanie parametrov modelu v užívateľskom rozhraní a následné renderovanie grafov (výstupov z modelovania)**

Pre samotné použíte TUW modelu je potrebné v aplikácii načítať dátu, ktoré bude model používať pre modelovanie. Dáta (.csv súbor pre 5 skúmaných povodí – časové rady zrážok, teplôt, evapotranspirácie a prietoku v dennom kroku) sú samostatne uložené v priečinku. Pre načítanie údajov nám slúži súbor *global.R*. Tento súbor obsahuje funkcie na načítanie údajov pre modelovanie. Príklad načítania údajov pre 1 povodie je uvedený na obrázku 24.

```

1 # Nastavenie pracovného adresára
2 setwd("D:/Geoinformatika_Ostrava/Diplomova_praca")
3
4 # ----- Nacitanie vstupnych udajov pre 5 súčinných povodí -----
5 data <- read.csv("data.csv", header = TRUE, sep = ";", dec = ".", na.strings = "NA", stringsAsFactors = TRUE,
6                   check.names = FALSE)
7
8
9 ## Povodie 1 - uprava dat a nacitanie pozorovaných zrazok, teploty vzduchu, potencialnej evapotranspiracie,
10 ## taktiež plochy povodia a prietoku
11
12 days <- as.Date(strptime(paste(data[,1], data[,2], data[,3]), format="%d %m %Y"))
13 P <- zoo(data[,4], order.by=days)
14 T <- zoo(data[,5], order.by=days)
15 EP <- zoo(data[,6], order.by=days)
16 EP[EP < 0] <- 0
17
18 area <- 31.1
19
20 Q <- zoo(data[,7], order.by=days) # prietok (m3/s)
21 Qmm <- Q*86.4/area # prietok premena na mm (TUW model simuluje prietok v mm, preto sme aj poyorovany prietok
22 # premenili na mm)
23 Qmm[Qmm < 0] <- NA
24
25 # vyber obdobia
26 P1 <- window(P, start=as.Date("1 1 2000", format="%d %m %Y"), end=as.Date("31 12 2010", format="%d %m %Y"))
27 T1 <- window(T, start=as.Date("1 1 2000", format="%d %m %Y"), end=as.Date("31 12 2010", format="%d %m %Y"))
28 EP1 <- window(EP, start=as.Date("1 1 2000", format="%d %m %Y"), end=as.Date("31 12 2010", format="%d %m %Y"))
29 Q1 <- window(Qmm, start=as.Date("1 1 2000", format="%d %m %Y"), end=as.Date("31 12 2010", format="%d %m %Y"))
30
31 # Pripravene vstupy pre 1 povodie
32 basin1 <- list(ts = data.frame(prec = P1,
33                                 airt = T1,
34                                 ep = EP1,
35                                 qobs = Q1),
36                                 area = area,
37                                 paramTUV = c(1.4, 2.1, 2.9, -2.9, 0.7, 0.99, 225, 0.3,
38                                 0.5, 9.3, 150.7, 21.4, 1.2, 13.5, 25.9))

```

Obrázok 24 Ukážka kódu pre načítanie vstupných údajov pre jedno povodie

Posledná štvrtá záložka s názvom „References“ obsahuje dôležité zdroje literatúry vo vzťahu k tejto práci (obr. 25). Písмо (tučné, farebné) bolo definované pomocou Shiny tagov, ktoré sú ekvivalentom ku klasickým HTML tagom (pozri podkapitolu 7.2 „Tvorba Shiny aplikácií“).

**References**

**References relevant for this study:**

- Ceola et al., 2015. [Virtual laboratories: new opportunities for collaborative water science](#). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2101–2117, DOI:10.5194/hess-19- 2101-2015.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., Andréassian, V., 2017. [The suite of lumped GR hydrological models in an R package](#). *Environmental Modelling & Software* 94, 166-171.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., Hendrickx, F., 2012. [Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments](#). *Water. Resour. Res.*, 48, W05552. DOI: 10.1029/2011WR011721.
- Chang, W. et al., 2018. [Web Application Framework for R](#). Version 1.1.0, Published 2018-05-17.
- Delaigue, O., Coron, L. and Brigode, P., 2018. [airGRteaching: Tools to Simplify the Use of the airGR Hydrological Package for Education \(Including a Shiny Interface\)](#). R package version 0.2.2.
- Merz, R., Parajka, J., Blöschl, G., 2011. [Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses](#). *Water. Resour. Res.*, 47, 1015–1031. DOI: 10.1029/2010WR009505.
- Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G., 2007. [Uncertainty and multiple calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments](#). *Hydrol. Processes*, 21, s. 423-446. DOI: 10.1002/hyp.6253.
- R Development Core Team, 2011. [A language and environment for statistical computing](#). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- Slezia, P., Szolgay, J., Hlavcová, K., Duethmann, D., Parajka, J., Danko, M., 2018. [Factors controlling alterations in the performance of a runoff model in changing climate conditions](#). *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(4), s. 1-12. DOI: 10.2478/johh-2018-0031.
- Viglione, A., Parajka, J., 2014. [TUWmodel: Lumped hydrological model for educational purposes](#). Version 0.1-4.

Obrázok 25 Referencie pridané v okne web aplikácie

## 9.2 Implementácia web aplikácie využívajúcej TUW model

Implementácia je zabezpečená pomocou funkcie *render*. V užívateľskej časti (*ui.R*) bol najsíkôr definovaný objekt, t.j., výstup, kde sa majú výsledné grafy vyrenderovať. Následne v serverovej časti (*server.R*) použijeme tento výstup a použijeme funkciu pre renderovanie grafu (podobný postup je pre dolný graf – vlhkosť pôdy):

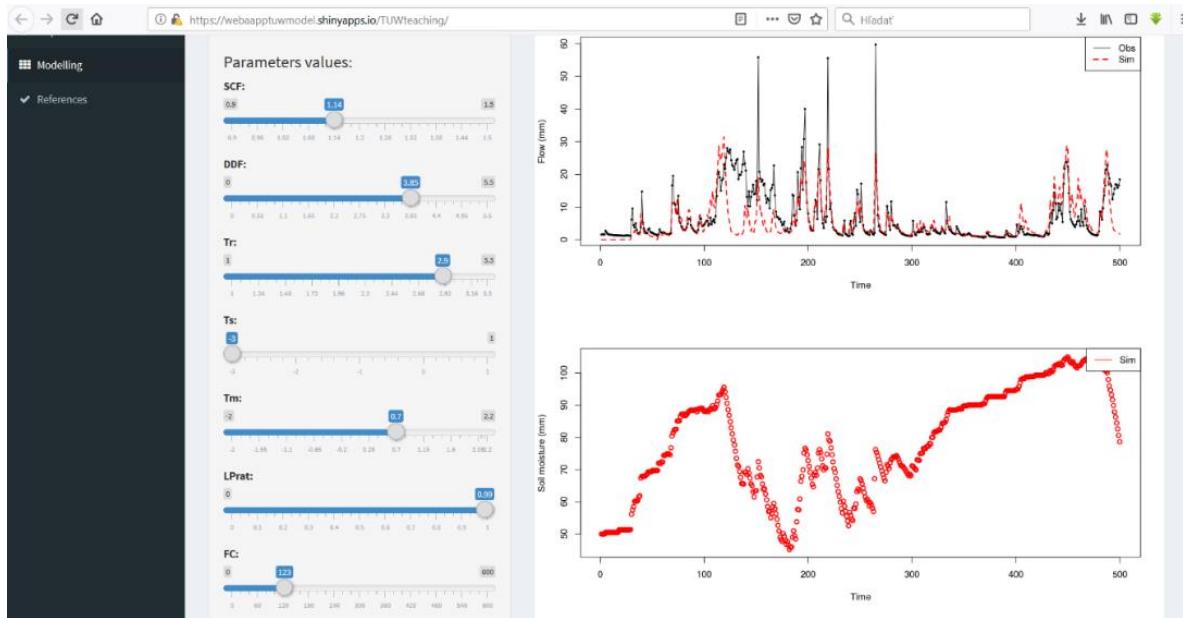
```
output$Qplot <- renderPlot({})
```

Vo funkcií je definovaných viac parametrov (obr. 26), napr. obdobie pre simuláciu modelu (zvolené na prvých 500 dní), taktiež popis osí, farba simulovaných/pozorovaných prietokov.

```
1 # Vykreslenie grafu (pozorovane a simulovane prietoky = Qobs a Qsim)
2 output$Qplot <- renderPlot({})
3- if (input$datachoice != "") {
4  k <- 1:500
5  plot(getBV()$ts$qobs[k], type = "o", pch = 19, cex = 0.4, xlab = "Time", ylab = "Flow (mm)")
6  lines(getTUV()$TUWout$q[k], col = "red", lty = 2, lwd = 2)
7  legend("topright",
8         legend = c("Obs", "Sim"), col = c("black", "red"),
9         lty = c(1, 2), lwd = c(1, 2))
10- } else {
11  NULL
12 }
13 })
```

Obrázok 26 Ukážka kódu (serverová časť) pre renderovanie grafov (výstupov z modelovania)

Výstup po simulácii modelu je zobrazený na obr. 27, kde horný graf znázorňuje porovnanie pozorovaných a modelom simulovaných hodnôt prietokov. Dolný graf približuje simulovanú vlhkosť pôdy, taktiež sú dostupné ešte ďalšie dva grafy (simulovaná vodná hodnota snehu a simulované topenie snehu). Aplikácia umožňuje meniť hodnoty parametrov modelu, pričom pri zmene sa menia aj príslušné simulácie. Medzi funkcie, ktoré aplikácia ponúka patrí aj výber povodia (dostupných je 5 rakúskych povodí).



Obrázok 27 Výstup simulácie modelu TUW

### 9.3 Nasadenie web aplikácie na server

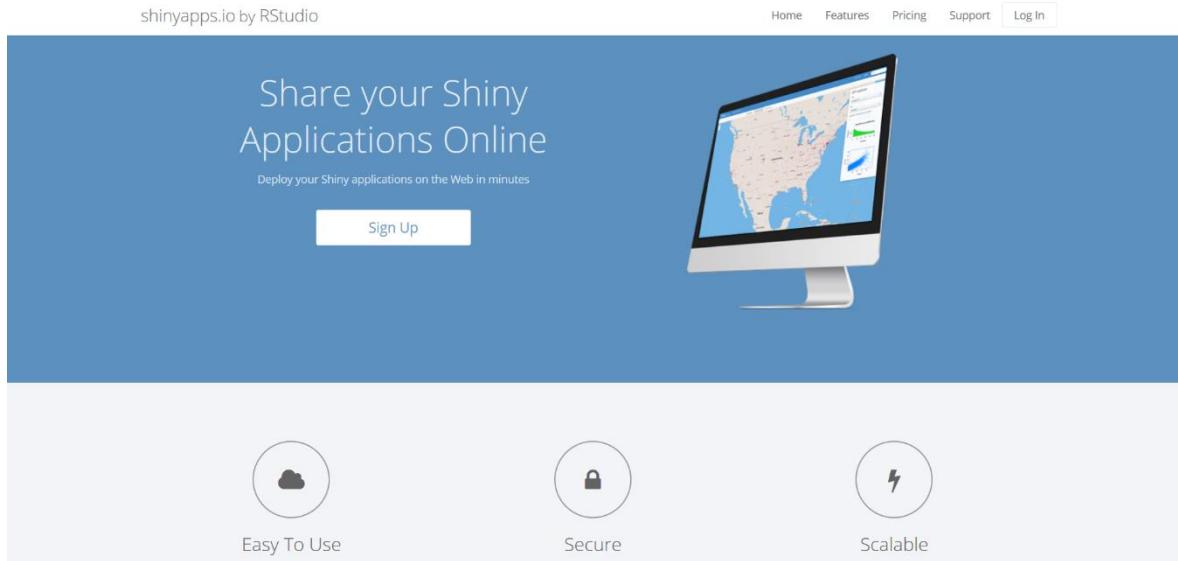
Vývoj web aplikácie prebiehal na vlastnom počítači. Po úspešnom otestovaní bola aplikácia nasadená na Shiny server (<http://shinyapps.io/>), ktorý umožňuje bezplatný hosting Shiny aplikácií. Aplikácia je nasadená na adrese:

<https://webaapptuwmodel.shinyapps.io/TUWteaching/>

Ešte pred samotnou inštaláciou softwaru Shiny Server je potrebné mať nainštalovaný software R a balík shiny. Taktiež je dôležité doinštalovať všetky potrebné balíky, ktoré sa budú v aplikácii využívať. Preto, aby bola zaistená správna funkčnosť aplikácie by všetky balíky mali byť uložené v `/usr/local/lib/R/site-library`. Detailný popis inštalácie a taktiež aj konfiguráciu serveru na jednotlivé operačné systémy je možné nájsť na adrese: <http://shinyapps.io/>. Postup nasadenia aplikácie na server je naznačený na obr. 28-31.

Obrázok 28 približuje úvodnú stránku shiny serveru:

## Patrik Slezák: Vývoj webovej aplikácie pre potreby hydrologického modelovania



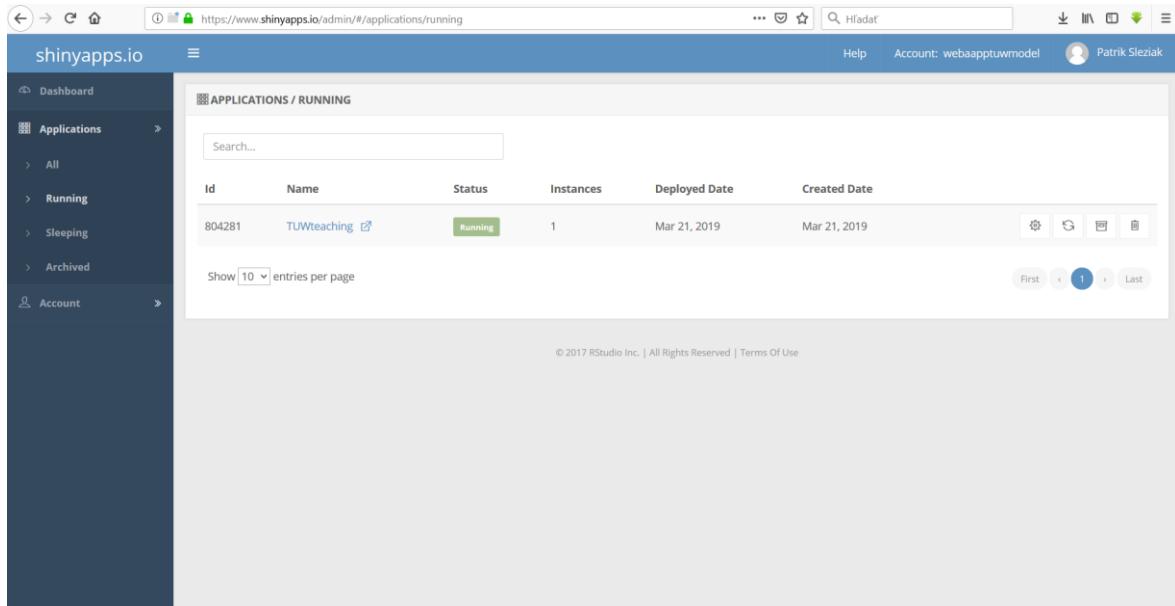
**Obrázok 1 Zobrazenie úvodnej stránky shiny serveru**

Po registrácii a počiatočných nastaveniach sa nám vytvorí bezplatné užívateľské konto, kde môžeme našu aplikáciu nahrať (obr. 29, 30).

The screenshot shows the shinyapps.io account profile page for a user named Patrik Slezák. The top navigation bar includes links for Help, Account: webapptuwmodel, and a user icon labeled Patrik Slezák. The main content area displays the user's profile information: Name (Patrik Slezák) and Email (patrik.slezak@gmail.com). Below this is a placeholder for a profile picture. The "PROFILE" section contains fields for Name, Email, Organization, Home Page, and Location, all of which are currently empty. At the bottom right of the profile section is a blue "Update Profile" button.

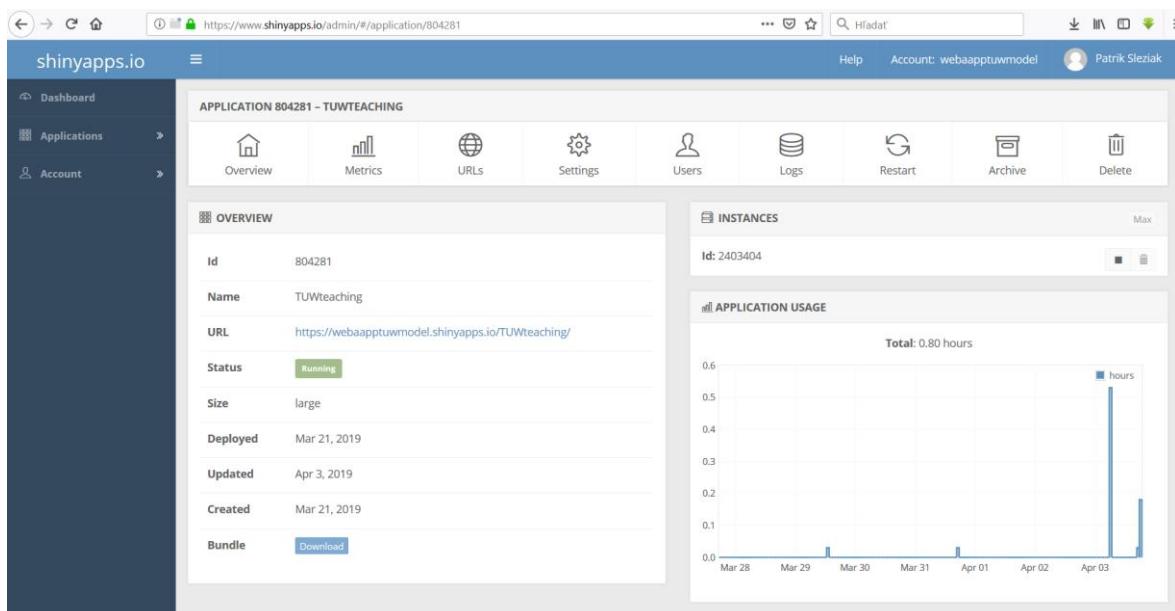
**Obrázok 2 Založenie bezplatného konta**

## Patrik Slezák: Vývoj webovej aplikácie pre potreby hydrologického modelovania



Obrázok 30 Nahranie vytvorennej aplikácie na Shiny server

Výhodou Shiny serveru je, že máme kontrolu nad navrhnutou aplikáciou, t.j., vidíme v akom časovom režime sa aplikácia používa (t.j., koľko hodín denne), môžeme aplikáciu zastaviť/opäť spustiť a pod (obr. 31).



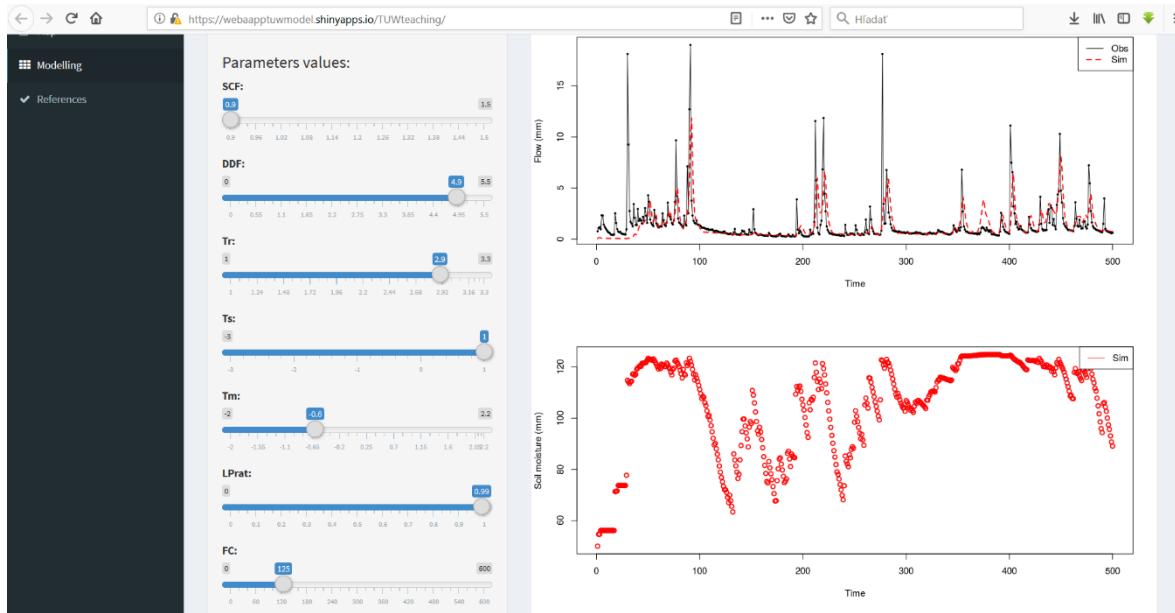
Obrázok 31 Zobrazenie rozhrania Shiny serveru

## 9.4 Príklad použitia navrhnutej aplikácie na vybranom povodí

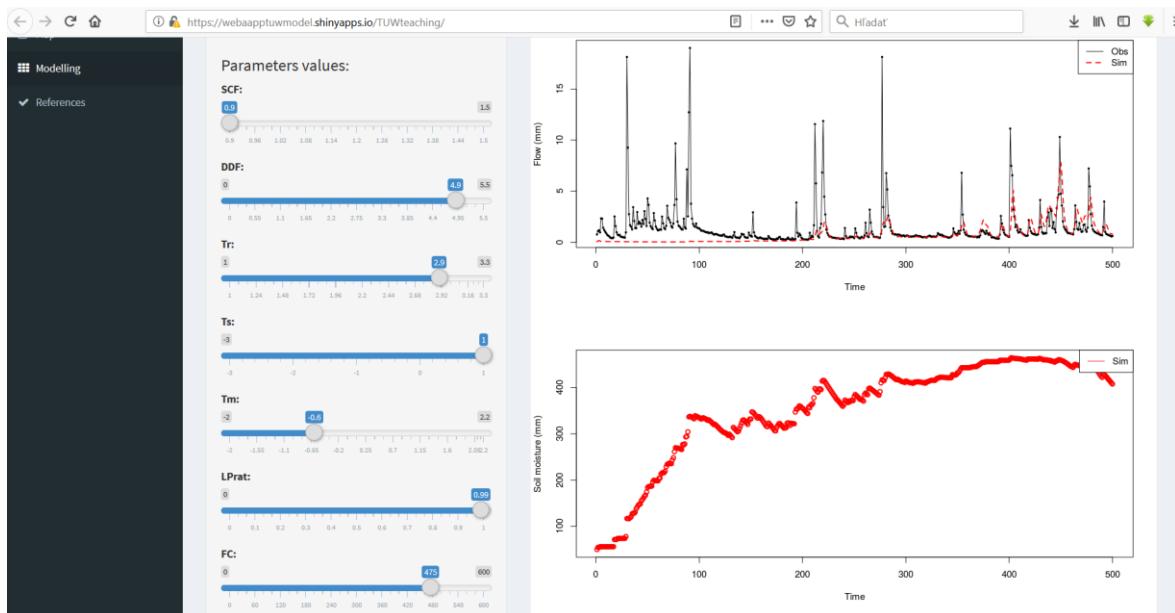
Príklad použitia navrhnutej web aplikácie je ilustrovaný na obrázkoch 32 a 33 (pre simulácie prietokov a vlhkosti pôdy) a .obrázkoch 34 a 35 (pre simulácie topenia snehu a vodnej hodnoty snehu).

Pre modelovanie bolo vybrané rakúske povodie Schoenenbach (je možné si vybrať z piatich rakúskych povodí). Po výbere povodia sa automaticky spustí simulácia TUW modelu, ktorá sa premietne do grafov – výsledných hydrogramov pozorovaných a simulovaných prietokov, simulovanej vlhkosti pôdy, simulovanej vodnej hodnoty snehu a simulovaného topenia snehu. Po každej simulácii je možné meniť parametre modelu. Ako už bolo spomenuté, aplikácia je primárne určená pre študentov TU vo Viedni v rámci výučby predmetov zameraných na hydrologické modelovanie (Hydrology, River Basin Management a pod.).

Obr. 32 znázorňuje výsledky po prvotnej simulácii. Z tohto grafického znázornenia (horný graf) je viditeľné, že simulované prietoky (červená farba) v uspokojivej zhode napodobňujú reálne merané. Dolný graf zároveň približuje simulovanú vlhkosť pôdy v povodí (reálne merané údaje o vlhkosti pôdy neboli k dispozícii). Následne sme zmenili parameter modelu FC (maximálna kapacita vody v pôde), pričom táto zmena sa premietla aj do výslednej simulácie (obr. 33). Z tohto grafického znázornenia je viditeľné, že vyššie hodnoty FC spôsobujú nižšiu spoľahlivosť modelu. Po viacnásobných simuláciach sa zároveň ukazuje, že niektoré parametre modelu sa vzájomne kompenzujú (sú v interakcii), napr. parameter tvorby odtoku BETA a spomínaný parameter FC. Na uvedené poukazujú aj viaceré štúdie, napr. Slezák a kol. (2018) v práci ukázali, že môže existovať korelácia medzi týmito dvoma parametrami (t.j., keď parameter FC dosahuje vyššie hodnoty, potom parameter BETA nižšie). Práve na takéto skúmanie vzájomných interakcií by mala aj navrhnutá web aplikácia slúžiť.



Obrázok 32 Simulácia prietokov a vlhkosti pôdy

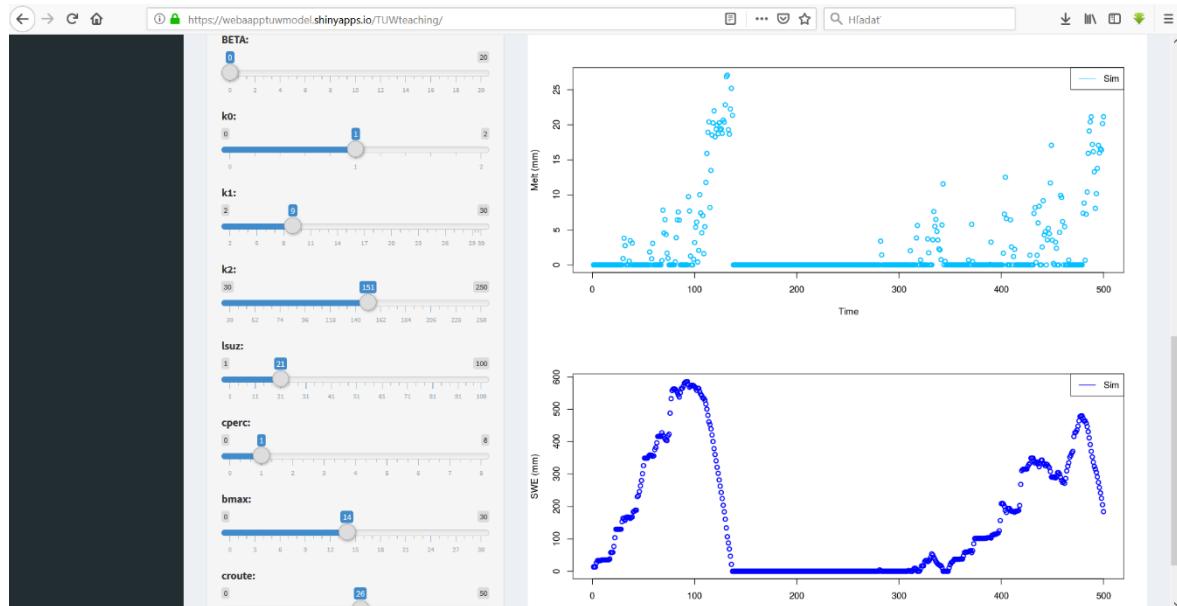


Obrázok 33 Simulácia prietokov a vlhkosti pôdy po zmene parametra FC

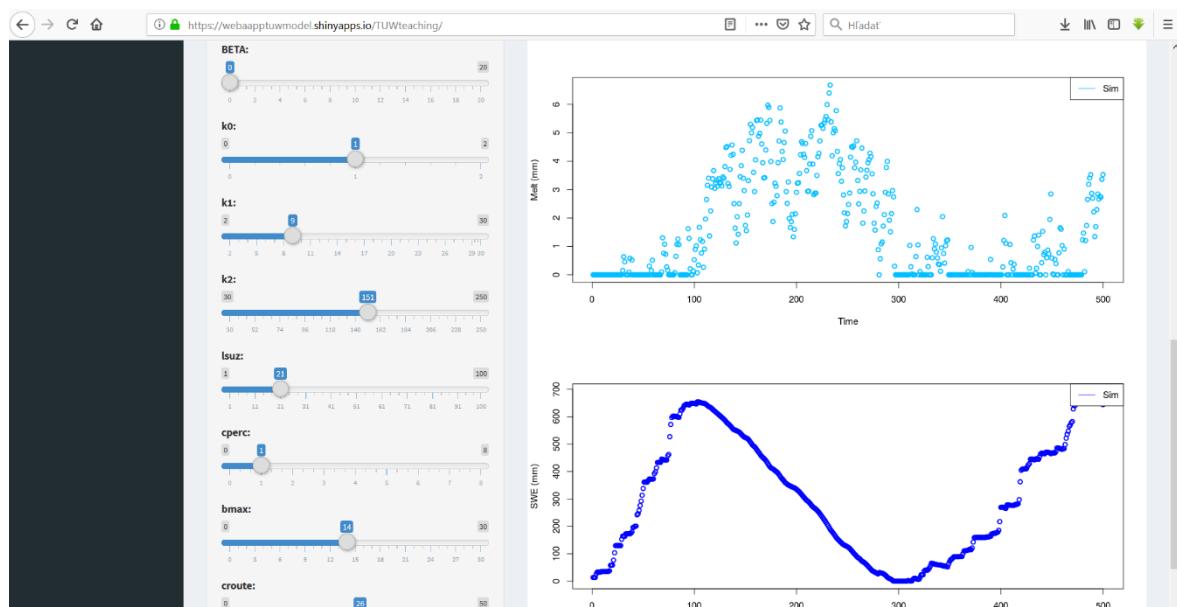
Pôdne parametre modelu vplývajú najmä na simulácie prietoku, zatiaľ čo snehové parametre (napr. parameter topenia a akumulácie snehu v povodí DDF a hraničné teploty pre zrážky/sneh) ovplyvňujú výraznejšie simulácie vodnej hodnoty snehu a topenia snehu (obr. 34, 35). Na obrázku 34 je znázornená simulácia topenia snehu (horný graf) a vodnej hodnoty snehu (dolný graf). Z týchto znázornení môžeme vidieť priebeh simulovalých hodnôt. Po

zmene parametra DDF („Degree-day factor“ – teplotný parameter topenia a akumulácie snehu v povodí) sa zmena premietne aj do výslednej simulácie charakteristík snehu.

Navrhnutá aplikácia umožňuje študentom detailne analyzovať citlivosť parametrov hydrologického modelu vo vzťahu k výstupom (výsledným simuláciám), čo zároveň smeruje aj k lepšiemu pochopeniu koncepcie modelu.



Obrázok 34 Simulácia topenia snehu a vodnej hodnoty snehu



Obrázok 35 Simulácia topenia snehu a vodnej hodnoty snehu po zmene parametra DDF

## 10 OBMEDZENIA A MOŽNOSTI ROZŠÍRENIA PRIPRAVENÉHO RIEŠENIA

V tejto kapitole sú opísané obmedzenia a možnosti rozšírenia navrhnutej web aplikácie.

### 10.1 Obmedzenia pripraveného riešenia

Prvé obmedzenie je z hľadiska skúmaných povodí, ktoré sú v aplikácii fixne definované. Čiže aplikácia neponúka v súčasnej podobe možnosť vkladať vlastné údaje a skúsiť ako by simulácie vyzerali na iných ako aplikáciou ponúkaných dátach. Zatiaľ je toto riešenie pre výučbu hydrologického modelovania (na TU vo Viedni) postačujúce.

Ďalšie obmedzenie je spojené so statickými grafmi, ktoré sú výsledkom simulácií modelu implementovaného vo web aplikácii. Aplikácia v súčasnej podobe nezahŕňa interaktívne/dynamické grafy. S týmto bodom je zároveň spojené aj hodnotenie účinnosti modelu, ktoré je v súčasnej podobe aplikácie umožnené na základe vizuálneho porovnania (t.j., porovnanie meraných a modelom simulovaných hodnôt). V aplikácii nie sú zahrnuté kritériá účinnosti modelu (napr. Nash-Sutcliffov koeficient a pod.), na základe ktorých by bolo možné číselne vyjadriť výsledky modelovania (zhodu, nepresnosti a pod.).

Taktiež obdobie pre modelovanie je fixne definované (prvých 500 dní) a nie je možné meniť časový interval.

Miernym nedostatkom je aj vizuálna stránka navrhнутej aplikácie. Aplikácia sa v súčasnej podobe zameriava najmä na funkčnosť a prvotné potreby študentov (v rámci výučby hydrologického modelovania), ktoré v takejto podobe splňa.

### 10.2 Možnosti rozšírenia pripraveného riešenia

V budúcnosti sa plánuje s rozšírením aplikácie o ďalšie rakúske povodia. V súčasnom riešení je možné použiť pre modelovanie 5 rozdielnych (rozdielne plochy, geológia, klíma) rakúskych povodí. Postupom času by sme do aplikácie chceli zahrnúť povodia z celého Rakúska. Taktiež by sme chceli rozšíriť aplikáciu o možnosť vkladať vlastné údaje, aby si aj iní užívatelia (okrem študentov TU vo Viedni) mohli vyskúšať modelovanie (bez inštalácie desktopových programov) pomocou populárneho HBV modelu.

Prínosom pre aplikáciu bude pridanie kritérií pre hodnotenie účinnosti modelu (napr. Nash-Sutcliffov koeficient, ktorý sa v hydrológii bežne používa). Na základe týchto kritérií (napr. Nash-Sutcliffov koeficient, objemová chyba a pod.) bude možné aj číselne zhodnotiť do akej miery model vystihuje realitu.

Jedným z plánov bude taktiež pridanie interaktívnych grafov (napr. využitie R balíku plotly, alebo dygraph) a rozšírenie časového rozsahu pre dostupného pre modelovanie. Použitie balíku dagraph by zároveň aj umožnilo výber konkrétneho časového obdobia zo simulácie (t.j., vedeli by sme sa detailnejšie pozrieť na jednotlivé simulácie).

Taktiež plánujeme pridať do aplikácie poznámky, napr. pre konkrétné parametre TUW modelu. Tieto parametre sú študentom, ktorí budú aplikáciu v rámci výučby používať známe. Po rozšírení aplikácie je ale predpoklad, že ju budú používať aj iní užívatelia, bolo by teda vhodné aby poznali význam jednotlivých parametrov zahrnutých v modely. Táto možnosť sa momentálne nachádza v referenciách, kde je priame presmerovanie na TUW model/význam parametrov, ale praktickejšie by bolo ak by sa tieto informácie priamo objavili ako poznámky/doplnenia pri konkrétnych parametroch.

Zaujímavou myšlienkovou by bolo aj prepojenie jednotlivých povodí znázornených na mape s modelom, tj., po výbere povodia (priamo na mape) by sa spustil TUW model. Taktiež plánujeme pridať k jednotlivým povodiam aj rozvodnice a ilustračné obrázky.

Ako sme už spomenuli vyššie, aplikácia sa v súčasnej podobe zameriava najmä na funkčnosť, no v budúcnosti bude treba popracovať aj na ďalších detailoch.

## 11 ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo navrhnutie webovej aplikácie pre potreby hydrologického modelovania. V teoretickej časti práce boli opísané koncepčné hydrologické modely (typu HBV), ktoré sú jedny z najpoužívanejších modelov pre riešenie rôznych praktických vodohospodárskych úloh, ale aj pre výskumné a vzdelávacie účely. Jeden z takýchto modelov (TUW model) bol aplikovaný aj v tejto práci. Ide o model s priestorovo sústredenou parametrizáciou, ktorý simuluje zrážkovo-odtokový proces kontinuálnym spôsobom v dvoch vzájomne prepojených fiktívnych nádržiach, ktoré reprezentujú základné akumulačné priestory v povodí. Model bol vyvinutý na Technickej univerzite vo Viedni, kde sa v širokej miere využíva, či už na výskumné účely (napr. štúdie Parajka et al., 2007; Slezia et al., 2018) alebo výučbu predmetov zameraných na hydrologické modelovanie (napr. predmety Hydrology, River Basin Management, a pod.).

Rešeršná časť poukázala na neistoty, ktoré súvisia s používaním koncepčných hydrologických modelov (ide najmä o neistoty vychádzajúce zo štruktúry/parametrov modelu a ich vzájomnej interakcie). Následne boli priblížené dve štúdie (balíky v prostredí R), ktoré umožňujú použitie koncepčných hydrologických modelov a sú primárne zamerané na výučbu hydrologického modelovania. Po vymedzení cieľov práce nasledoval výber softvérového prostredia (prostredie R) pre vývoj web aplikácie. Zároveň boli opísané balíky (shiny, shinydashboard a ďalšie) potrebné pre tvorbu aplikácie v prostredí R. Taktiež bolo predstavené skúmané územie (Rakúsko) a vybrané povodia/údaje.

V praktickej časti práce nasledoval vývoj vlastnej web aplikácie. Ako prvé bolo navrhnuté užívateľské rozhranie, ktoré je definované ako webový dashboard (použitie balíku shinydashboard). Nasledovala implementácia TUW modelu vo forme web aplikácie. Nasadenie na server je zabezpečené pomocou balíku shiny. Na vybranom povodí bola otestovaná a preukázaná použiteľnosť navrhnutého riešenia. Aplikácia je nasadená na adresu: <https://webaapptuwmodel.shinyapps.io/TUWteaching/>. Navrhnutá aplikácia by mala primárne slúžiť pre študentov Technickej univerzity vo Viedni, v rámci výučby predmetov zameraných na hydrologické modelovanie (Water Resources Management, River Basin Management a pod.).

## ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

1. Anderson, E.A. (1973): National weather service river forecast system – Snow accumulation and Ablation model. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-17, US Dept. of Commerce, Silver Spring, Maryland, 217 s.
2. Andrews, F. a Guillaume, J. (2018): hydromad: Hydrological Model Assessment and Development, <http://hydromad.catchment.org>, R package version 0.9-26.
3. Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C. (2004): Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. *J. Hydrol.* 286 (1–4), s. 19–35.
4. Arabzadeh, R. a Araghinejad, S. (2018): RHMS: Hydrologic Modelling System for R Users, <https://CRAN.R-project.org/package=RHMS>, R package version 1.4.
5. Architektúra Shiny aplikácie: [online], [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://littleactuary.github.io/blog/Web-application-framework-with-Shiny/>
6. Ardia, D., Mullen, K.M., Peterson, K.B., Ulrich, J. (2015): Deoptim: Differential evolution in R. Version 2.2-3.
7. Beven, K. (2001): Rainfall-runoff modelling: The primer. Wiley&Sons, Ltd., Chichester, 353 s.
8. Becker, A., Serban, P. (1990): Hydrological models for water – resources system design and operation. Operational Hydrology Report, č. 34, WMO, Geneva, s. 80.
9. Bergström, S. (1995): The HBV model. Computer models of watershed hydrology, edited by V.P. Singh. Water. Resour. Publ., s. 443-476.
10. Buytaert, W. (2018): topmodel: Implementation of the Model TOPMODEL in R, <https://CRAN.R-project.org/package=topmodel>, R package version 0.7.3.
11. Ceola, Arheimer, B., Baratti, E., Blöschl, G., Capell, R., Castellarin, A., Freer, J., Han, D., Hrachowitz, M., Hundecha, Y., Hutton, C., Lindström, G., Montanari, A., Nijzink, R., Parajka, J., Toth, E., Viglione, A., and Wagener, T. (2015): Virtual laboratories: new opportunities for collaborative water science, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2101–2117, doi:10.5194/hess-19- 2101-2015.
12. Clarke, R.T. (1973): A review of mathematical models in hydrology, with some observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*, 19, 1, s. 1-20.
13. Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., Andréassian, V. (2017): The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling & Software* 94, 166-171.

14. Coron, L., Perrin, C., Michel, C. (2016): airGR: suite of GR hydrological models for precipitation-runoff modelling. URL. <https://webgr.irstea.fr/airGR/?lang=en>. r package version 1.0.3.
15. Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., Hndrickx, F. (2012): Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. Water Resour. Res., 47, W05552.
16. Crooks, S.M. a Naden, P.S. (2007): CLASSIC: a semi-distributed rainfall-runoff modelling system. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11(1), s. 516-531.
17. Čistý, M., Becová, A., Čelár, L. (2014): Spracovanie údajov v environmentálnom inžinierstve. STU v Bratislave, 136 s. ISBN 978-80-227-4293-1.
18. Chang,W. and Borges Ribeiro, B. (2018): shinydashboard: Create Dashboards with 'Shiny', <https://CRAN.R-project.org/package=shinydashboard>, r package version 0.7.1.
19. Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., McPherson, J. (2015): Shiny: web application framework for R.
20. Cheng, J., Karambelkar, B., Xie, Y. (2018): leaflet: Create Interactive Web Maps with the JavaScript 'Leaflet' Library, <https://CRAN.R-project.org/package=leaflet>, R package version 2.0.2.
21. Daňhelka, J., Krejčí, J., Šálek, M., Šerel, P., Zezulák, J. (2003): Posouzení vhodnosti aplikace srážkovo-odtokových modelu s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR, ČZU, Praha.
22. Delaigue, O., Coron, L., Brigode, P. (2018): airGRteaching: Tools to Simplify the Use of the airGR Hydrological Package for Education (Including a Shiny Interface). R package version 0.2.2.2. <https://webgr.irstea.fr/en/airGRteaching/>.
23. Garcon, R. (1996): Prévision opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. La Houille Blanche, 5, s. 71-76.
24. Goldberg, D. (1989): Genetic algorithms in search, optimization & machine learning. Addison-Wesley publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts.
25. Hlavčová, K., Szolgay, J., Kohnová, S., Papánková, Z., Horvát, O. (2005): On the possibility of assessment of land use change impact on runoff with a hydrological model with distributed parameters. Meteorological Journal, 8, s. 74-81.
26. Hrušková, K. (2006): Modelování odtoku z tajícího sněhu v povodí horního Hronu (disertační práce), Masarykova univerzita v Brně.

27. Horvát, O. (2007): Parametrization of hydrologic processes in the runoff modelling. Dizertačná práca, SvF STU v Bratislave, 129 s.
28. Jeníček, M. (2009): Runoff changes in areas differing in land-use in the Blatnice river basin – application of the deterministic model. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 57, 3, s. 154-161.
29. Kalaš, M. (2006): Modelovanie hydrologickej bilancie s mesačným časovým krokom (dizertačná práca), Slovenská technická univerzita v Bratislave.
30. Kirnbauer, R., Blöschl, G., Gutknecht, D. (1994): Entering the era of distributed snow models. Nordic Hydrol., 25, s. 1-24.
31. Kostka, Z. a Holko, L. (2002): Impact of climate and vegetation changes o hydrological processes in the Jalovecký Creek catchment, CD – ERB and NEFRIEND Proj. 5 Conf. Interdisciplinary Approaches in Small Catchment Hydrology: Monitoring and Research . Slovak NC IHP UNESCO /UH SAV, s. 86 – 96.
32. Kubeš, R. (2007): Navrh koncepčneho zražkovo-odtokoveho modelu pre hydrologicke predpovede (dizertačna praca), Slovenska technicka univerzita v Bratislave.
33. Le Moine, N. (2008): The catchment seen from underground: a direction to improve the performance and realism of rainfall-runoff models?). Ph.D. thesis. UPMC, Paris, France. URL. [https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/07/2008-LE\\_MOINE-THESE.pdf](https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/07/2008-LE_MOINE-THESE.pdf), 324 p.
34. Lipták, L. (1973): Vybrané state z teórie riadenia. 1. vydanie. Alfa, Bratislava 1973.
35. Madsen, J. (2003): Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. Advances in Water Resources, 26, s. 205-216.
36. Mathevet, T. (2005): Which lumped rainfall-runoff models for thehourly time step? Empirical development and comparison of models on a large attachment set). Ph.D. thesis. ENGREF, Paris, France. URL. <https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/07/2005-MATHEVET-THESE.pdf>, 463 p.
37. Merz, R., Parajka, J., Blöschl, G. (2011): Time stability of catchment model parameters: Implication for climate impact analyses. Water Resources Research, 47, W02531, doi:10.1029/2010WR009505.
38. Metcalfe, P., Beven, K., and Freer, J. (2018): dynatopmodel: Implementation of the Dynamic TOPMODEL Hydrological Model, <https://CRAN.R-project.org/package=dynatopmodel>, R package version 1.2.1..

39. Moravcová, J. (2011): Vliv krajinných struktur na vybrané ukazatele jakosti vody při zvýšených průtocích jako podklad pro projekci KPÚ/ (disertační práce). Katedra krajinného managementu ZF JCU, České Budějovice. 143 s.
40. Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V. (2006a): Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *J. Hydrol.* 328, 283e296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.022>.
41. Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V. (2006b): Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *J. Hydrol.* 318, 200e214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>.
42. Nash, J.E. a Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), s. 282-290, doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
43. Nasseri, M., Zahraie, B., Ajami, N.K., Solomatine, D.P. (2014): Monthly water balance modeling: probabilistic, possibilistic and hybrid methods for model combination and ensemble simulation. *J. Hydrol.* 511, s. 675–691.
44. Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G. (2007): Uncertainty and multiple calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments. *Hydrol. Processes*, 21, s. 423-446, doi:10.1002/hyp.6253.
45. Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G. (2005): A comparison of regionalisation for catchment model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, s. 157-171, doi:10.5194/hess-9-157-2005.
46. Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003): Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.*, 279, s. 275-289, doi:10.1016/s0022-1694(03)00225-7.
47. Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2001): Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments, *J. Hydrol.*, 242, s. 275-301.
48. Pushpalatha, R., Perrin, C., Moine, N.L., Mathevet, T., Andréassian, V. (2011): A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *J. Hydrol.* 411, 66e76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.034>.
49. R Development Core Team (2014): R: a Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria. URL. <https://www.R-project.org/>.
50. Seibert, J. (2003): Reliability of model predictions outside calibration conditions. *Nordic Hydrology*, 34, s. 477-492.

51. Shiny server: [online], [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://shinyapps.io/>
52. Slater, L.J., Thirel, G., Harrigan, S., Delaigue, O., Hurley, A., Khouakhi, A., Prodocsimi, I., Vitolo, C., Smith, K. (2019): Using R in hydrology: a review of recent developments and future directions. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2019-50>.
53. Slezák, P., Szolgay, J., Hlavčová, K., Duethmann, D., Parajka, J., Danko, M. (2018): Factors controlling alterations in the performance of a runoff model in changing climate conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(4), s. 1-12. doi: 10.2478/johh-2018-0031.
54. Slezák, P., Hlavčová, K., Szolgay, J., Parajka, J. (2017): Závislosť kvality simulácie odtoku pomocou zrážkovo-odtokového modelu od rozdielnosti hydroklimatických podmienok kalibračného a validačného obdobia. *Acta Hydrologica Slovaca*, 18(1), s. 23-30.
55. Slezák, P., Szolgay, J., Hlavčová, K., Parajka, J. 2016: The impact of the variability of precipitation and temperatures on the efficiency of a conceptual rainfall-runoff model. In *Slovak Journal of Civil Engineering*. 24(4), s. 1-7. ISSN 1210-3896.
56. Unucka, J. a Adamec, M. (2008): Modelování vlivu krajinného pokryvu na srážkoodtokové vztahy v povodí Olše. In *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2008, 4, s. 257-271.
57. Valent, P. a Szolgay, J. (2013): Vplyv zlepšení kalibrácie kontinuálneho zo modelu na simuláciu radu maximálnych ročných prietokov. *Acta Hydrologica Slovaca*, 14, 1, s. 225-232.
58. Vaze, J., Post, D.A., Chiew, F.H.S., Perraud, J-M., Viney, N.R., Teng, J. (2010): Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 34, s. 447-457.
59. Viglione, A. a Parajka, J. (2014): TUWmodel: lumped hydrological model for education purposes. URL. <https://CRAN.R-project.org/package=TUWmodel>. r package version 0.1e8.
60. Vitolo, C., Wells, P., Dobias, M., and Buytaert, W. (2016): fuse: An R package for ensemble Hydrological Modelling, *The Journal of Open Source Software*, 1.
61. Zeileis, A., Grothendieck, G., Ryan, J.A., Ulrich, J.M., Andrews, F. (2019): zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series. R package Version: 1.8-5, <https://cran.r-project.org/web/packages/zoo/index.html>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

<b>CRAN</b>	Comprehensive R Archive Network
<b>CSS</b>	Cascading Style Sheets
<b>.csv</b>	Comma-separated values
<b>DSST</b>	Differential split-sample test
<b>EP</b>	Potenciálne evapotranspirácia
<b>fuse</b>	Framework for Understanding Structural Errors
<b>HTML</b>	Hyper Text Markup Language
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment
<b>.pdf</b>	Portable Document Format
<b>RHMS</b>	Hydrologic Modelling System for R Users
<b>SST</b>	Split-Sample test
<b>T</b>	Teplota vzduchu
<b>TUW</b>	Technische Universität Wien
<b>UI</b>	User Interface
<b>URL</b>	Uniform Resource Locator
<b>VŠB-TUO</b>	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Schéma hydrologického modelu TUW (Slezák, 2017).....	8
Obrázok 2 Výstup zo simulácie pomocou balíku airGR a modelu GR4J.....	12
Obrázok 3 Zobrazenie výstupu získaného použitím balíku airGRteaching v prostredí Shiny .....	14
Obrázok 4 Archív R balíkov CRAN .....	18
Obrázok 5 Prostredie RStudioa.....	19
Obrázok 6 Hydrologický kurz ("Using R in Hydrology") v rámci konferencie EGU General Assembly 2018 (Slater a kol., 2019) .....	20
Obrázok 7 Typický pracovný postup v hydrológii s využitím prostredia R a jeho rozšírení (balíkov) (Slater a kol., 2019) .....	21
Obrázok 8 Ukážka kódu pre simuláciu pomocou modelu TUW v prostredí R .....	22
Obrázok 9 Ukážka kódu pre simuláciu pomocou modelu GR4J v prostredí R .....	23
Obrázok 10 Ukážka kódu pre simuláciu pomocou balíku airGRteaching.....	23
Obrázok 11 Štruktúra Shiny aplikácie .....	26
Obrázok 12 Štruktúra Shiny aplikácie .....	27
Obrázok 13 Architektúra Shiny aplikácie ( <a href="http://littleactuary.github.io/blog/Web-application-framework-with-Shiny/">http://littleactuary.github.io/blog/Web-application-framework-with-Shiny/</a> ) .....	28
Obrázok 14 Ukážka kódu pre definovanie základnej štruktúry Shiny aplikácie .....	29
Obrázok 15 Mapa Rakúska s vybranými povodiami (rozdelenie povodí na alpské 71 a nízinné 142, Slezák a kol., 2018) .....	33
Obrázok 16 Variabilita klimatických charakteristík pre 5 skúmaných povodí.....	34
Obrázok 17 Ukážka kódu na vytvorenie základnej štruktúry web dashboardu.....	35
Obrázok 18 Ukážka kódu na definovanie hlavného menu v aplikácii.....	36
Obrázok 19 Hlavné menu v navrhutej web aplikácii .....	36
Obrázok 20 Zobrazenie mapy s vybranými povodiami v navrhutej web aplikácii	37
Obrázok 21 Ukážka kódu pre definovanie výstupu v užívateľskom prostredí pre renderovanie mapy .....	37
Obrázok 22 Ukážka kódu v serverovej časti pre renderovanie mapy .....	38
Obrázok 23 Ukážka kódu pre definovanie parametrov modelu v užívateľskom rozhraní a následné renderovanie grafov (výstupov z modelovania) .....	39
Obrázok 24 Ukážka kódu pre načítanie vstupných údajov pre jedno povodie .....	40

Obrázok 25 Referencie pridané v okne web aplikácie.....	40
Obrázok 26 Ukážka kódu (serverová časť) pre renderovanie grafov (výstupov z modelovania).....	41
Obrázok 27 Výstup simulácie modelu TUW .....	42
Obrázok 28 Zobrazenie úvodnej stránky shiny serveru.....	43
Obrázok 29 Založenie bezplatného konta .....	43
Obrázok 30 Nahranie vytvorennej aplikácie na Shiny server.....	44
Obrázok 31 Zobrazenie rozhrania Shiny serveru.....	44
Obrázok 32 Simulácia prietokov a vlhkosti pôdy .....	46
Obrázok 33 Simulácia prietokov a vlhkosti pôdy po zmene parametra FC.....	46
Obrázok 34 Simulácia topenia snehu a vodnej hodnoty snehu.....	47
Obrázok 35 Simulácia topenia snehu a vodnej hodnoty snehu po zmene parametra DDF.....	47

## ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Prehľad GR hydrologických modelov.....	11
Tabuľka 2 Príklady balíkov pre hydrologické modelovanie v prostredí R (Slater a kol., 2019) .....	21
Tabuľka 3 Tabuľka 3 Zoznam renderovaných funkcií v Shiny .....	29
Tabuľka 4 Tabuľka 4 HTML tagy, ktoré sú prístupné v balíku Shiny .....	30
Tabuľka 5 Zoznam vybraných rakúskych povodí .....	33
Tabuľka 6 Priemerné hodnoty klimatických charakteristík a hodnoty fyzicko-geografických ukazovateľov pre 5 skúmaných povodí .....	34

## ZOZNAM PRÍLOH

### Elektronické prílohy

Prílohy sú dostupné na CD, ktoré je priložené k diplomovej práci.

**Súčasťou priloženého CD je:**

- Textová časť diplomovej práce
- Dáta použité vo vytvorennej web aplikácii
- Zdrojové kódy použité pre tvorbu web aplikácie