



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta stavební

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

**Analýza srážko-odtokových poměrů v povodí Frauenweissenbach**

**Analysis of the rainfall-runoff conditions in the catchment of  
Frauenweissenbach**

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Tomáš Dostál

**Lucie Slavíková**

---

Praha 2016

## **Abstrakt**

V diplomové práci *Analýza srážko-odtokových poměrů v povodí Frauenweissenbach* je popsán výpočet stoletého průtoku s využitím srážko-odtokového modelování v software HEC-HMS. Analýza je provedena pro povodí toku Frauenweissenbach, nacházející se v rakouských Alpách. Na zájmovém území nejsou kontinuálně měřeny hydrologické charakteristiky, a proto je část práce věnována i podrobné přípravě dat. Jejich hlavním zdrojem jsou veřejně přístupná data (např. meteorologické údaje) a dále digitální model terénu, který slouží k určení morfologických charakteristik. V práci je popsána kalibrace modelu a na základě vstupních dat je proveden výpočet, jehož výsledky jsou předloženy s patřičným komentářem.

## **Klíčová slova**

Srážka, návrhová srážka, průtok, kulminace, povodí, model.

## **Abstract**

In master thesis called *Analysis of the rainfall-runoff conditions in the catchment of Frauenweissenbach*, there is a 100-year flood flow calculated. HEC-HMS is used for rainfall-runoff modelling. Area of interest (catchment of Frauenweissenbach) is located in Austria's Alps. There are no hydrological data measured for this area. Due to this fact there is a part of this master thesis spent for data preparation. Main of input data are based on information that are publicly available (e.g. meteorological data). Moreover, there is a digital elevation model used to define morphological characteristics. There is a calibration made for the model and based on input data results are calculated and described with appropriate comments.

## **Keywords**

Rainfall, design rainfall, flow, peak flow, catchment, model.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 20. 5. 2016

Lucie Slavíková

## **Poděkování**

Mé poděkování patří vedoucímu práce doc. Dr. Ing. Tomášovi Dostálovi za rady, které mi během psaní poskytoval a mimo jiné mu patří také velký dík za prvotní impuls k mojí zahraniční stáži ve Vídni, která pro mne byla cennou životní zkušeností a stala se také místem, kde vznikla část této práce.

Dále bych na tomto místě ráda zmínila skvělého školitele Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Johannese Hübla, který mi ve Vídni pomáhal s vypracováním projektu vázaného na tuto práci. Obdivuji jeho nadšení pro téma horského inženýrství, kterým mě dokázal nakazit.

V neposlední řadě musím upřímně poděkovat svému manželovi a rodině, kteří mě po celou dobu studia neúnavně podporují.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Bc. Slavíková</u>	Jméno: <u>Lucie</u>	Osobní číslo: <u>380773</u>
Zadávající katedra: <u>K143</u>		
Studijní program: <u>SI</u>		
Studijní obor: <u>IŽP</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Analýza srážko-odtokových poměrů v povodí Frauenweissenbach</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>The analysys of rainfall-runoff conditions in the catchment of Frauenweissenbach</u>	
Pokyny pro vypracování: Hydrologická anlyza povodí toku Frauenweissenbach. Cílem práce bude stanovení a verifikace hodnot extrémních průtoků v lokalitě bez měřených vodních stavů s využitím modelace srážko-odtokových poměrů. Hodnoty budou následně využity pro návrh ochranných opatření hrazenářského typu v navazující diplomové práci Bc.Sabiny Melhubové. Svou diplomovou práci zpracujte během svého studijního pobytu na univerzitě BOKU Wien. Proveďte podrobný terénní průzkum dílčího testovacího povodí Gimbach a výsledky použijte pro generální výpočet poměrů v řešeném povodí FrauenWiessenbach. Soustředte dostupná data, proveďte jejich analýzu a pokuste se využít vhodný mateamtický simulační srážko-odtokový model pro odvození návrhových průtoků. Seznam doporučené literatury: Dostál a kol.; Využití dat a nástrojů GIS a simulačních modelů k navrhování TPEO; certifikovaná metodika VÚMOP a ČVUT, Praha, 2014	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>T.Dostál,doc.Ing.Dr.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>24.2.2016</u> Termín odevzdání diplomové práce: <u>20.5.2016</u>	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

<u>24.2.2016</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Charakteristika problému, cíl řešení.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Použitý software .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Popis území .....</b>	<b>7</b>
4.1	Geografie.....	8
4.2	Geologie .....	9
4.3	Morfologie .....	10
4.4	Hydrologie a transport sedimentu.....	11
4.5	Využití území.....	13
4.6	Dílčí povodí Gimbach .....	14
<b>5</b>	<b>Vstupní data .....</b>	<b>17</b>
5.1	DEM.....	17
	Podrobnost (rozlišení) DEM .....	17
	Úprava DEM v prostoru jezera Offensee .....	18
5.2	Geologická mapa .....	19
5.3	Mapa využití území .....	19
5.4	Ortofotomapa .....	19
5.5	Meteorologická a hydrologická data .....	20
<b>6</b>	<b>Výpočet vstupních parametrů pro HEC-HMS.....</b>	<b>22</b>
6.1	Příprava dat pomocí HEC-GeoHMS.....	22
	Terrain preprocessing.....	22
	Project setup .....	24
	Basin processing .....	24
	Stream a subbasin characteristics.....	25
	Hydrologic parameter estimation.....	26
	Hydrologic modeling system .....	27

6.2	Metoda SCS CN / odtoková ztráta .....	27
6.3	Metoda jednotkového hydrogramu / výpočet přímého odtoku .....	30
6.4	Charakteristiky koryt .....	31
	Drsnost koryt .....	31
	Rozměry koryt .....	31
6.5	Charakteristiky jezera .....	32
	Batigrafické křivky .....	32
	Konsumpční křivka .....	33
6.6	Návrhová srážka .....	34
	Stoleté odvozené srážky .....	34
	Doba koncentrace .....	38
	Průběh srážky .....	38
	Distribuce srážky .....	38
	Plošný redukční faktor .....	39
<b>7</b>	<b>Citlivostní analýza .....</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>HEC-HMS .....</b>	<b>44</b>
8.1	Fyzicko-geografické charakteristiky povodí .....	45
8.2	Meteorologický model .....	46
8.3	Časový rámec .....	46
8.4	Srážkové hyetogramy .....	47
8.5	Transformace povodňové vlny v nádrži .....	47
8.6	Průběh výpočtu .....	47
<b>9</b>	<b>Hydrologické modelování v HEC-HMS .....</b>	<b>48</b>
9.1	Kalibrace modelu na povodí toku Langbathbach .....	48
	Využití reálných srážkových a průtokových dat .....	51
	Výsledné průtoky na Langbathbachu .....	53
9.2	Výpočet kulminačního průtoku na toku Frauenweissenbach .....	55
9.3	Poznámka k výpočtu .....	58
<b>10</b>	<b>Diskuze výsledků .....</b>	<b>59</b>
<b>11</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>61</b>

<b>Bibliografie</b> .....	<b>62</b>
<b>Seznamy</b> .....	<b>65</b>
Seznam obrázků.....	65
Seznam tabulek.....	66
Seznam grafů.....	67
<b>Seznam příloh</b> .....	<b>68</b>



# **1 ÚVOD**

V této diplomové práci bude provedena hydrologická analýza toku Frauenweissenbach, který se nachází v Horním Rakousku. Srážko-odtokové modelování bude provedeno pomocí software HEC-HMS. Na zájmovém území nejsou kontinuálně měřeny hydrologické charakteristiky, a proto je část práce věnována i podrobné přípravě dat. Hlavním cílem práce je vypořádat se s nedostatkem vstupních informací a určit extrémní návrhový průtok. Výstupy z této práce budou následně použity pro návrh stabilizačních opatření na dílčím povodí Gimbach.

## **2 CHARAKTERISTIKA PROBLÉMU, CÍL ŘEŠENÍ**

Tok Frauenweissenbach se nachází v typickém alpském prostředí, potýkajícím se s extrémními hodnotami povodňových průtoků (především za jarních a letních povodní během tání sněhu) a dále s významným splaveninovým režimem. Chod splavenin ohrožuje při povodních níže položené oblasti a je proto žádoucí tento trend stabilizovat pomocí vhodných technických opatření. Pro návrh opatření je nutná znalost extrémních povodňových průtoků na povodí, kde ovšem nejsou žádná průtoková data měřena.

Hlavním cílem této práce je určení extrémních průtoků při využití srážko-odtokového modelování. Na základě dostupných údajů bude provedena hydrologická analýza v software HEC-HMS. Nutným krokem je příprava vstupních parametrů, která bude provedena pomocí informací získaných především z veřejně přístupných zdrojů. V rámci práce bude provedena i kalibrace modelu, a to na základě měřených hodnot pro sousední povodí toku Langbathbach. Výsledkem modelování bude návrhový n-letý průtok se zaměřením na nejdelší možné n-leté opakování (což je na základě dostupných dat 100 letý průtok).

Práce bude zpracována během zahraniční stáže na univerzitě BOKU Wien. Jedná se o součást projektu zaměřeného na stabilizaci toku Gimbach (což je jeden z přítoků Frauenweissenbachu), který probíhá na katedře horského rizikového inženýrství pod vedením Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Johannese Hübla. Hodnoty vypočítané níže budou následně použity pro vypracování koncepce rekonstrukce stávajících objektů na toku Gimbach a jemu přilehlých stržích.

### **3 POUŽITÝ SOFTWARE**

Stěžejní výpočty v této práci byly provedeny pomocí softwaru **HEC-HMS** (Hydrologic Modeling System) vyvinutým organizací Hydrologic Engineering Center. Tento model je navržen speciálně pro simulaci srážko-odtokových procesů v rozvětvených povodích. Pro svou univerzálnost je možné ho použít pro nespočet geograficky rozdílných lokalit, a tedy i pro horské prostředí, jako je tomu v této práci. [1] Na základě vstupních parametrů popsaných v kapitole 6 (jedná se např. o morfologické charakteristiky povodí) bylo možné na konkrétní vstupy (srážkové události) vyvozovat odezvy (hydrogramy odtoku).

Pro přípravu dat byl použit **ArcGIS**. Jednalo se jednak o použití základních nástrojů, dále pak o využití nadstavby HEC-GeoHMS, který je vytvořený speciálně pro přípravu vstupních dat do HEC-HMS. ArcGIS byl využit i pro finální prezentaci map.

K vyhodnocování nashromážděných dat byl použit **MS Excel**, odkud byly získány mimo jiné i použité grafy.

## **4 POPIS ÚZEMÍ**

Zájmové území se nachází ve spolkové zemi Horní Rakousko (německy Oberösterreich) poblíž měst Ebensee a Bad Ischl (mapa oblasti viz Obr. 3 níže). Jedná se o povodí toku Frauenweissenbach, které má rozlohu přes 80 km<sup>2</sup>. Lokalita je typicky alpského rázu – strmé vápencové svahy protínají hluboká údolí a strže, kde pramení divoké horské bystřiny. Typický pro tuto lokalitu je značně kolísající průtok ve vodních tocích a výrazný tok splavenin. Charakteristické pohledy jsou na Obr. 1 a Obr. 2.



*Obr. 1: Charakteristické údolí v povodí Frauenweissenbach*



*Obr. 2. Pohled na horní tok povodí*

## 4.1 GEOGRAFIE

Povodí Frauenweissenbachu se nachází v jižní části spolkové země Horní Rakousko (německy Oberösterreich). Severně od povodí je město Ebensee, jihozápadně leží Bad Ischl. Frauenweissenbach ústí do řeky Traun, která protéká zmíněným Ebensee a následně napájí horské jezero Traunsee. Před ústím do Traunu se údolí rozevírá, tok se zvětšuje a dochází k významnému usazování splavenin.

Povodí Frauenweissenbachu má rozlohu 85 km<sup>2</sup> a spadá do katastru města Ebensee. Jako Frauenweissenbach je tento vodní tok označen v dolní části povodí, 3 km (3 166 m) od vtoku do Traunu. Frauenweissenbach vzniká soutokem toků Ofenseebach (přitékajícím od východu) a Gimbach (z jihu). Tyto dva toky se dále směrem k pramenným oblastem rozvětvují na další drobnější potoky. Do povodí Ofenseebachu spadají toky Waidbach, Grieseneckbach, Grünbach, Rinnerbach a další drobnější toky, do povodí Gimbachu spadá např. Schwarzenbach a Zwerchbach. Za soutokem Rinnerbachu a Grünbachu leží v nadmořské výšce 649,55 m ledovcové jezero Ofensee o rozloze 0,55 km<sup>2</sup>.

Uzávěrový profil se nachází v severozápadním cípu povodí poblíž vesničky Lahnstein, ještě v rámci povodí a přímo u vtoku do Traunu leží Salinen Austria (rakouská továrna specializující se na čištění a produkci soli). V příloze číslo I. se nachází základní mapa oblasti.



*Obr. 3: Poloha povodí Frauenweissenbachu*

## 4.2 GEOLOGIE

V zájmové oblasti převažují vápenaté sedimenty triasu. Ty jsou v údolích překryty 40 až 80 m mocným morénovým nánosem, který je patrný z křídových vrstev. Vápenec je za přístupu vzduchu dobře erodovatelný a tvoří základ nánosů v dolních částech svahů. [2]

Povodí Frauenweissenbachu je tvořeno strmými vápencovými útvary. Úzkými údolními procházel ledovec, který postupoval do velkého otevřeného údolí dnešní řeky Traun. Na přítomnost ledovce poukazují mimo jiné i pozůstatky morén. Ty po ústupu ledovce výrazně ovlivňují morfologii území. Zahrazením údolí pak vznikají horská jezera. [3] V zájmovém území je to jezero Ofensee. Lokálně se v údolních

morénách vyskytují i starší ledovcové usazeniny.

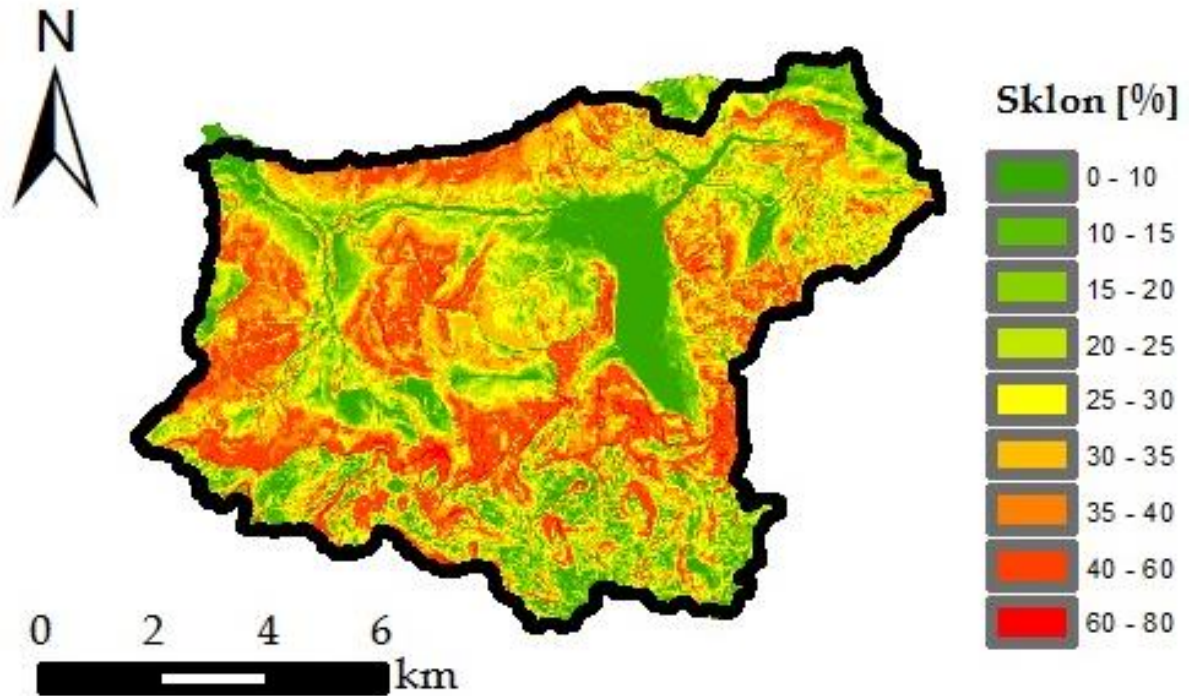
### 4.3 MORFOLOGIE

Povodí Frauenweissenbachu je typické alpské horské prostředí tvořené vápencovým pohořím s hlubokými údolími, ve kterých se (především v pramenných oblastech) nepravidelně vyskytuje povrchový odtok soustředěný do bystřin.

Uzávěrový profil je v severozápadním cípu povodí v nadmořské výšce 435 m. Odtud rozvodnice prochází přes Seeberg (1143 m n. m.) a Aschergupf (1149 m n. m.) k vrcholu **Eibenberg** (1598 m n. m.). Dále prochází na severovýchod přes Steineck a Steinbergalm (1236 m n. m.). Na východě je hranice povodí tvořena vrcholy Steinberg (1458 m n. m.), Kreuzeck (1306 m n. m.), Brunntatgupf (1280 m n. m.), Rosskopf (1268 m n. m.), Gschirreck (1410 m n. m.), **Weisshorn** (1755 m n. m.). Od vrcholu Mitterhoch/Klammkogel (1703 m n. m.) se hranice povodí stáčí na severozápad. Prochází přes Rosskogel (1892 m n. m.), Rauchfang (1971 m n. m.), Griesskogel (2006 m n. m.), Wehrkogel (2006 m n. m.), **Schonberg/Wildenkogel** (2090 a 2093 m n. m.) – nejvyšší bod povodí Frauenweissenbachu, Karkogel (1739 m n. m.), Langwand (1685 m n. m.), Speikkogel (1707 m n. m.), Mittagkogel (1790 m n. m.). Rozvodnice odtud pokračuje na sever přes Bergwerkkogel (1689 m n. m.), Bannkogel (1656 m n. m.), **Petergupf** (1646 m n. m.), Loskogel (1538 m n. m.) a Bromberg (1430 m n. m.). Odtud během necelých 3 km padá o téměř 1000 výškových metrů níže až do nadmořské výšky 435 m – na kótu uzávěrového profilu.

Dalšími významnými vrcholy v rámci povodí (ačkoliv mimo rozvodnici) jsou na severu Airkogel (1517 m n. m.) a Scharerkogel (1517 m n. m.), na východě Sulzkogel (1207 m n. m.), na jihu v okolí nejvyššího bodu Schonberg jsou to vrcholy Möselhorn (1740 m n. m.), Hochkogel (1591 m n. m.) a Rauenkogel (1747 m n. m.) a v jižní části povodí ještě Grünberg (1874 m n. m.) a Sulzkogel (1826 m n. m.). Jihozápadu dominuje vrchol Glatzeck (1523 m n. m.).

Povodí Frauenweissenbachu je značně sklonité. Největší sklony se nacházejí v pramenných oblastech toků. Směrem do údolních niv se sklon zpravidla zmenšuje, ovšem nadále zůstává vysoký. Průměrný sklon celého povodí je 30,5° (59%).



Obr. 4: Sklonitostní poměry

#### 4.4 HYDROLOGIE A TRANSPORT SEDIMENTU

Povodí Frauenweissenbachu se vyznačuje značně kolísajícími průtoky ve vodních tocích a především výrazným tokem splavenin. Na celém povodí nejsou kontinuálně měřeny hydrologické charakteristiky (což byl také jeden z nejvýznamnějších impulsů pro vznik této práce). Jediná dostupná data jsou kusé informace o toku Gimbach. Jedná se o nejvýznamnějšího dodavatele sedimentu do toku Frauenweissenbach. Povodí Gimbachu (uvažuje se pramenná část toku před soutokem se Schwarzenbachem) má rozlohu 6,7 km<sup>2</sup>. Dle hydrologického posouzení oblasti, zpracovaného na vídeňské univerzitě BOKU, zde byl během



povodní v roce 2002 pozorován kulminační průtok  $49 \text{ m}^3/\text{s}$ . [2] Podrobnější popis tohoto dílčího povodí je v kapitole *Dílčí povodí Gimbach*.

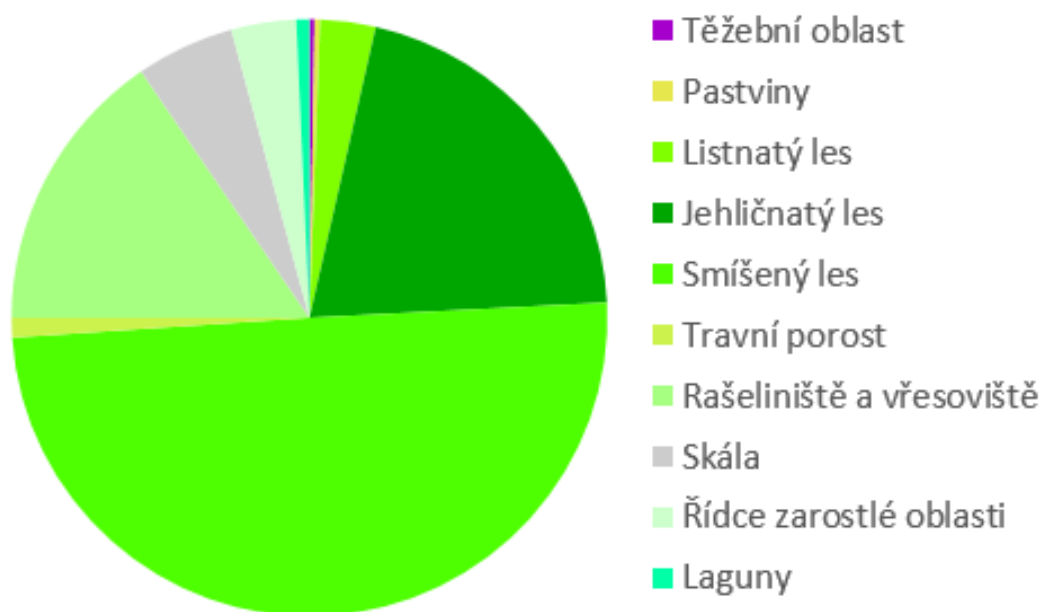
Ukázkou toho, o jaké objemy transportovaného materiálu se jedná, může být údaj taktéž z povodní v roce 2002; během nich bylo z pravobřežního přítoku Finsterwaldgraben do toku Gimbach přineseno  $10\,000 \text{ m}^3$  hrubých splavenin. [2] Přitom povodí této strže je pouhých  $0,7 \text{ km}^2$ .



*Obr. 5: Pohled do strže Finsterwaldgraben*

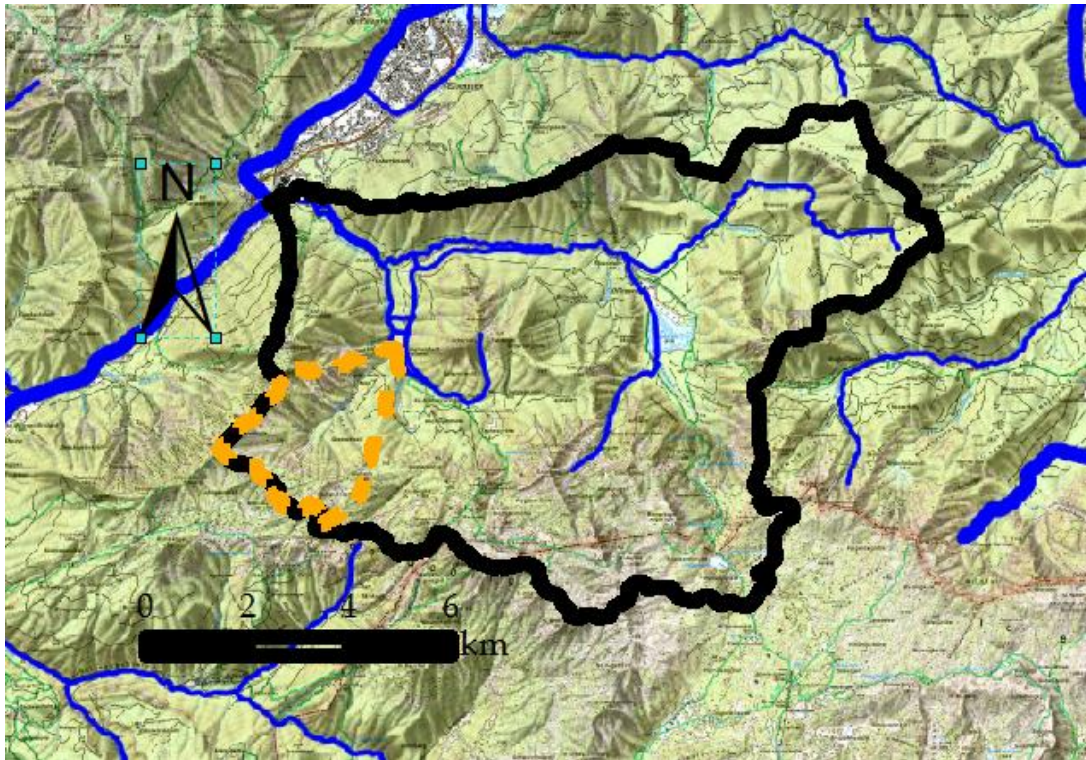
## 4.5 VYUŽITÍ ÚZEMÍ

Největší část území pokrývají lesy (73%). Jedná se především o smíšené a v menším množství zastoupené jehličnaté lesy. Dále se na území vyskytují plochy s bylinným patrem (17%), ať už jde o louky, pastviny, travní porost případně rašeliniště a vřesoviště. Zhruba 9% pokrývají obnažené skály a řídkce zarostlé plochy. Ledovcové jezero je důležitým krajínotvorným prvkom, ačkoliv zaujímá pouze 0,7% celkové plochy. V blízkosti uzávěrového profilu u řeky Traun se nachází solná továrna, jejíž areál zaujímá 0,3% z celkové plochy povodí. Mimo pár samot (povětšinou neobydlených) se na území jiná zástavba nevyskytuje. Podrobná mapa LandUse je v příloze číslo III.



*Graf 1: Procentuální rozložení ploch dle využití*

## 4.6 DÍLČÍ POVODÍ GIMBACH



*Obr. 6: Povodí Gimbachu v rámci zájmového území*

Gimbach je tok s výrazným splaveninovým režimem a jedná se jednoznačně o nejvýznamnějšího producenta sedimentu z celého zájmového území. Splaveniny vznikají především v pramenné oblasti toku a ve stržích, které do toku ústí. Na toku bylo provedeno mnoho technických opatření. Nejstarší vznikaly již před začátkem 20. století, z čehož je patrné, že se jedná o historicky významný (problematický) tok. Nejvýznamnější stavby jsou 15 metrové přehrážky ze 70. a 80. let.



*Obr. 7: Historické hrazení na toku Gimbach*

Četné srážkové události posledních let, stejně jako laviny a lesní požáry vedly k rozsáhlé erozi břehů, výsledkem čehož byl výrazný chod splavenin a na mnoha místech i přetvoření trasy koryta. Tím byly vybudované objekty výrazně poškozeny nebo dokonce zničeny. Významné změny se udály během povodní v roce 2002, kdy byl Gimbach zasažen extrémními průtoky, které (jak se během modelování ukázalo) převyšovaly stoleté hodnoty. Destrukce objektů navíc nadále pokračuje – především boční strže mají významný erozní potenciál.

Z tohoto důvodu vznikla iniciativa stabilizace tohoto povodí, a to především od místní správy vodních toků (*die Wildbach und Lawinenverbauung*) a rakouského MŽP (*Ministerium für ein Lebenswertes Österreich*) ve spolupráci s katedrou horského rizikového inženýrství na univerzitě BOKU (*Institut für Alpine Naturgefahren – IAN, Universität für Bodenkultur Wien*). Jedná se především o vypracování koncepce toku se zapojením stávajících (funkčních) objektů a návrhem možných úprav – úprava poškozených objektů, případně i budování objektů nových. Tento projekt probíhá na IAN v letech 2014 – 2015 a byla v rámci něho vypracována i část této práce. Na tomto toku byl také proveden komplexní terénní průzkum.



*Obr. 8: Poničená kamenná přehrážka – strž Holzschlaggraben na povodí Gimbach*



*Obr. 9: Poničené dřevěné hrazení – strž Schuttinggraben na povodí Gimbach*

## 5 VSTUPNÍ DATA

Jejím cílem je určit extrémní průtoky s poměrně omezeným množstvím vstupních dat. Ta budou popsána v následující kapitole. Z toho důvodu, že údajů o zájmovém území je nedostatek, byly použity i hodnoty z přílehlé lokality. Konkrétně se jedná o povodí Langbathbachu, jehož uzávěrový profil se nachází taktéž na řece Traun (jedná se o levostranný přítok, který se do Traunu vlévá 5,5 km za vtokem Frauenweissenbachu). Na rozdíl od Frauenweissenbachu jsou na Langbathbachu měřeny průtokové a srážkové údaje, které poslouží pro kalibraci srážko-odtokového modelu. Více viz kapitola *Kalibrace modelu na povodí toku Langbathbach*.

Veškerá vstupní data byla získána z veřejně přístupných zdrojů, pouze digitální výškový model byl poskytnut na katedře horského rizikového inženýrství (IAN).

### 5.1 DEM

Jako vstupní model terénu byl použit digitální výškový model (DEM z anglického termínu Digital Elevation Model) ve formě rastru s definovanou hustotou bodů. Každá buňka rastru je nositelem výšky povrchu nad hladinou moře nebo jiné známé hodnoty. DEM je jednou z variant DTM (Digital Terrain Model), kdy ten je obecně chápán jako model povrchu Země. DTM může navíc obsahovat doplňující informace o povrchu (lokace vrcholů, zlomů) i jiné údaje a může se jednat o vektor s nepravidelnou trojúhelníkovou sítí. [4] [5]

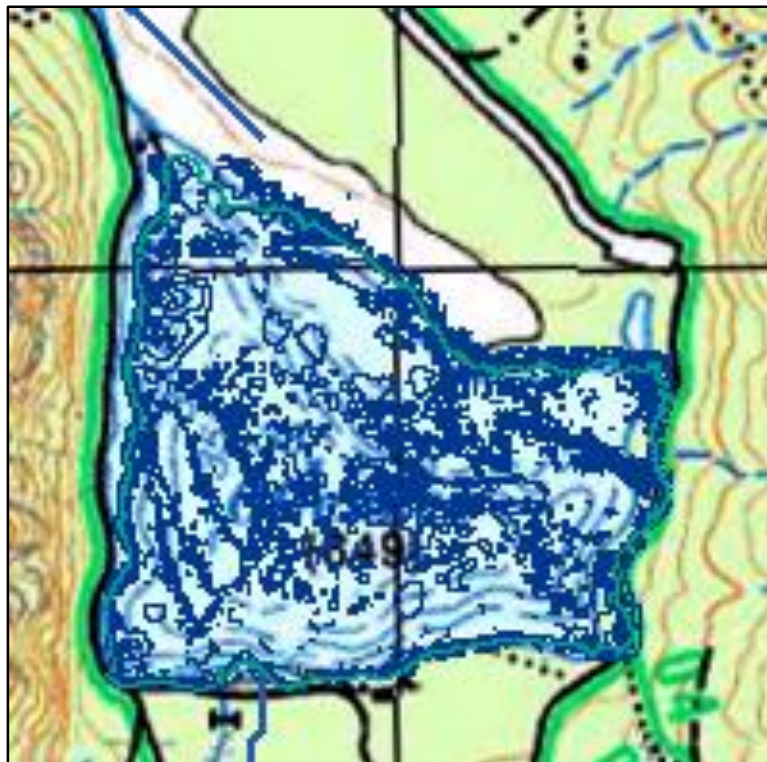
#### **Podrobnost (rozlišení) DEM**

Vstupním souborem byl výškový rastr, který byl poskytnut s rozlišením 1\*1 m (1 bod na 1 m<sup>2</sup>). Vzhledem k velikosti území a ke složitosti výpočtu byl pro tvorbu vstupních parametrů pomocí nadstavby HEC-GeoHMS použit agregovaný model

s hustotou bodů 20\*20 m (pro změnu hustoty bodů byl použit nástroj *resample*).<sup>1</sup> Pro dílčí výpočty vyžadující vyšší podrobnost byl použit původní DEM s přesností 1 m<sup>2</sup> – jednalo se o určení rozměrů příčných profilů řek nebo o tvorbu batigrafických křivek jezera Offensee.

### Úprava DEM v prostoru jezera Offensee

Vlivem nepřesností při měření byly výškové kóty vstupního modelu terénu v prostoru jezera určeny s přesností cca jednoho metru (hladina se pohybovala na kótách 648,7 m n. m. – 649,7 m n. m.). Může to být dáno i vlnami na jezeře. Pro výpočet bylo potřeba hladinu jezera srovnat na jednu kótu tak, aby modelace reprezentovala skutečnost (plochou hladinu).



Obr. 10: Původní zaměření hladiny jezera (vrstevnice s ekvidistantou 1 m dle vstupního DEM)

---

<sup>1</sup> Na dílčím povodí byl proveden výpočet i pro nezjednodušený výškový model a bylo potvrzeno, že výstup z HEC-GeoHMS se nezmění. Použití méně podrobného výškového modelu je tedy v pořádku.

Na základě porovnání jednak se základní mapou, jednak s ortofotomapou, byla kóta jezera stanovena na 649,55 m n. m – jedná se o vrstevnici, která nejlépe kopíruje skutečný tvar jezera. Následně byla vytvořena polygonová vrstva *offensee\_surface* a z ní rastrová vrstva *offensee\_raster*, která posloužila jako maska pro úpravu DEM (příkaz *Raster Calculator*): všechny body původního DEM, které se nacházely uvnitř jezera (tzn. pod maskou *offensee\_raster*), byly přepsány na jednotnou kótu 649,55 m.

Jak již bylo napsáno v předchozí kapitole, pro velkou část výpočtů byl použit DEM s rozlišením 20\*20 m, kde skutečný průběh hranice jezera nehraje tak velkou roli. Nicméně např. pro výpočet charakteristických křivek nádrže je naprosto nezbytné použít DEM s co největším rozlišením (tedy v tomto případě 1\*1 m) a i ten upravit tak, aby hladině odpovídala konstantní kóta.

## 5.2 GEOLOGICKÁ MAPA

Dalším vstupním podkladem byla georeferencovaná geologická mapa v grafickém souboru tiff. Mapa posloužila spolu s terénním průzkumem pro určení hydrologických skupin půd typů v oblasti, kde jiná půdní data nejsou k dispozici. Mapa hydrologických skupin půd na podkladě geologické mapy je v příloze číslo II.

## 5.3 MAPA VYUŽITÍ ÚZEMÍ

Mapa LandUse byla převzata z projektu CORINE Land Cover. Pro vytvoření mapy pro zájmové území byl použit nástroj *clip*. Mapa byla použita pro odvození hodnot CN (viz dále). Podrobná mapa LandUse je v příloze číslo III.

## 5.4 ORTOFOTOMAPA

Ortofotomapa byla poskytnuta na katedře IAN (Institut für Alpine Naturgefahren) na univerzitě BOKU Wien. Byla využita především pro kontrolu rozměrů koryt a při určení kóty hladiny jezera. Mapa má rozlišení 20\*20 cm.



## 5.5 METEOROLOGICKÁ A HYDROLOGICKÁ DATA

Meteorologické údaje a hydrologická data byly získány z oficiálních rakouských meteorologických stránek. [6] Co se týče srážkových údajů, ty jsou dostupné ze dvou srážkoměrných stanic, které se v blízkosti povodí (bohužel ne přímo v něm) nacházejí. Jedná se o stanici Ebensee Schule a Langbathbach Vorderer (viz Obr. 11). Dále je možné použít tzv. Bemessungsniederschlag, což jsou návrhové srážky v rastrové síti bodů (viz Obr. 12) s různou dobou opakování.

Z hydrologických údajů jsou dostupné časové řady nejvyšších průměrných denních průtoků v konkrétních profilech. Dostupný je vždy nejvyšší průměrný denní průtok za jeden měsíc. Vodoměrné stanice jsou na Obr. 11 vyznačeny hvězdičkou a jak je vidět, v okolí zkoumaného povodí se nacházejí pouze dvě. Stanice č. 205203 Ebensee/Traun a 20522 Ebensee (Unterlangbath). Ebensee/Traun ovšem není pro účel této práce využitelná, jelikož se nachází přímo na řece Traun a spádová oblast k této stanici je 1223,4 km<sup>2</sup>. Druhá vodoměrná stanice (severnější) se nachází u uzávěrového profilu toku Langbathbach, jehož povodí má 40 km<sup>2</sup>. Tato data poslouží pro kalibraci modelu.

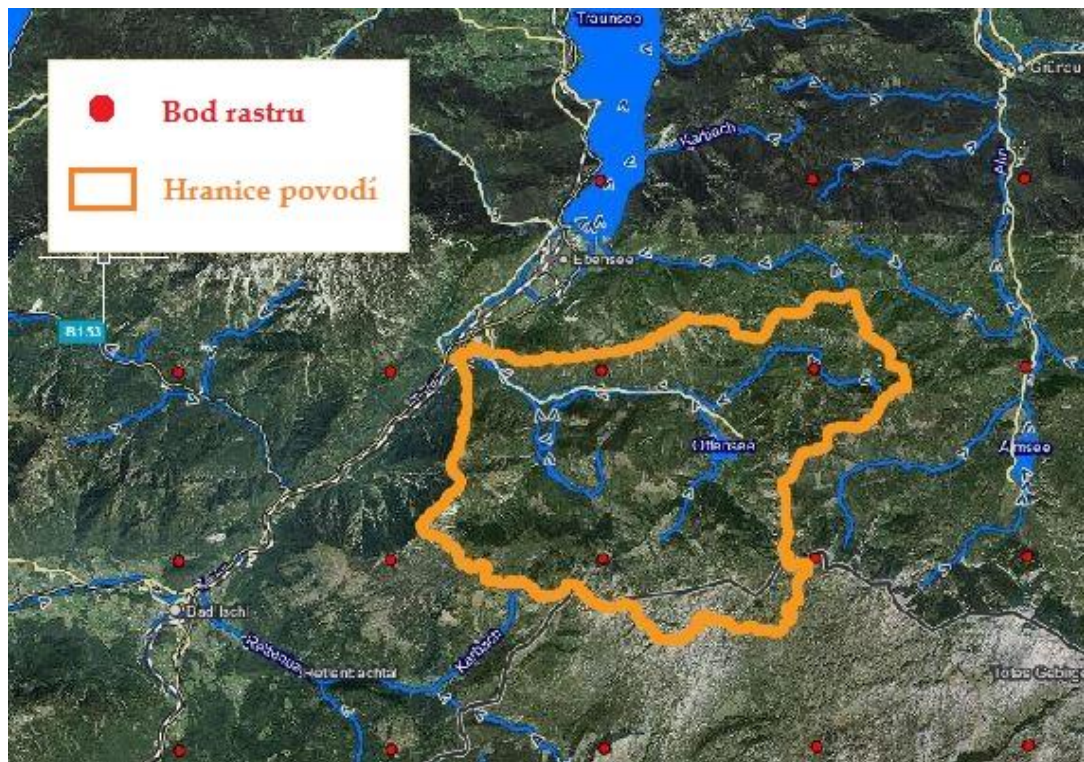
V práci byly použity oba typy srážkových dat popsaných v úvodu kapitoly: reálné údaje v kombinaci s měřenými průtoky (oboje na sousedním povodí Langbathbachu) byly využity pro kalibraci modelu, návrhové srážky potom pro výpočet extrémních průtoků na povodí Frauenweissenbachu, kde bohužel nejsou žádné průtokové analýzy k dispozici. Konkrétní postup využití srážkových dat je podrobně popsán v kapitole *Návrhová srážka*.

---

<sup>2</sup> Pro zajímavost: maximální průměrný denní průtok za zkoumané období (1951-2013) zde byl 1055,1 m<sup>3</sup>/s a nastal 2.6.2013.



Obr. 11: Srážkoměrné a vodoměrné stanice v oblasti



Obr. 12: Rastrová síť odvozených  $n$ -letých srážek

# 6 VÝPOČET VSTUPNÍCH PARAMETRŮ PRO HEC-HMS

## 6.1 PŘÍPRAVA DAT POMOCÍ HEC-GEOHMS

Pro přípravu fyzikálně-geografických parametrů byla použita nadstavba ArcGIS zvaná HEC-GeoHMS. Pomocí něho lze jednoduše provádět příkazy, které vedou k úspěšnému sestavení modelu povodí (*Basin Model*) pro následné modelování v HEC-HMS. Jednotlivé úkony v sobě obsahují buď jeden, nebo celou sérii příkazů, které na sebe navazují a jsou provedeny automaticky, takže je uživatel nemusí provádět ručně.<sup>3</sup> [7]

HEC-GeoHMS je dostupný pouze v anglickém jazyce. Proto byly názvy následujících kapitol ponechány v původním znění. Přesně tak odpovídají záložkám, které se v nabídce vyskytují.

### **Terrain preprocessing**

V rámci „předzpracování terénních dat“ se pracuje se surovým DEM. Pro účely této práce byl použit DEM s rozlišením 20\*20 m. Prvním krokem je použití příkazu *Fill Sinks* k vyrovnání bezodtokových ploch. Použitím tohoto příkazu se ovšem zvedly kóty v úrovni jezera (z původních 649,55 m n. m. na 650,78 m n. m.). Tento fakt byl ovšem zanedbán a další fyzikálně-geografické parametry byly počítány i s touto chybou, a to proto, že přesné výškové kóty slouží především pro určení sklonových poměrů, pro něž je v tak velkém měřítku chyba jednoho metru zanedbatelná.<sup>4</sup>

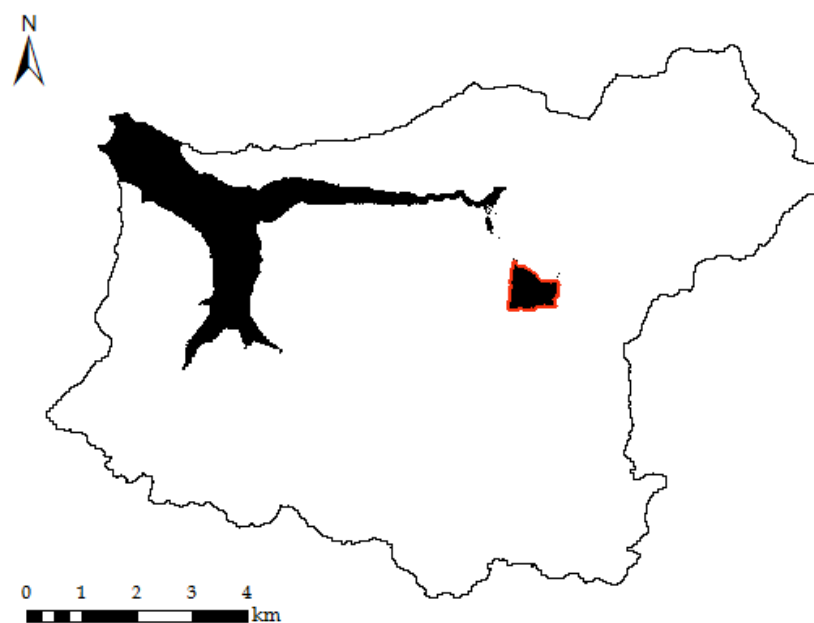
Na Obr. 13 je vidět, jaké by bylo rozložení výškových kót při zachování reálné hladiny jezera na kótě 649,55 m n. m. Z jezera vznikla jedna velká bezodtoková plocha. Zobrazeny jsou hodnoty rovné a menší právě kótě 649,55 m n. m. Pokud by

---

<sup>3</sup> Pro příklad: *Catchment Polygon processing* obsahuje celkem přes 20 příkazů.

<sup>4</sup> Toto bylo ověřeno kontrolou výpočtu sklonů jednotlivých úseků toku. Ty jsou zpravidla stovky metrů dlouhé a zmíněná výšková nepřesnost se ve výpočtu neprojeví.

totiž měla být hladina jezera zachována na původní kótě, bylo by potřeba využít rastr, který pokrývá celé území a který odlišuje hodnoty uvnitř jezera (např. 0) a mimo něj (např. 1). Následně by se pomocí příkazu *Raster Calculator* vytvořil takový DEM, který obsahuje rastr s upravenými hodnotami (s použitím příkazu *Fill Sinks*, jak bylo popsáno výše), ovšem pouze mimo plochu jezera. V rámci jezera by výšky byly ponechány na původní kótě. Následně by bylo nutné upravovat celý DEM ve směru po proudu a tím by se paradoxně do celého systému zanesly větší chyby a nepřesnosti. I z tohoto důvodu byla ponechána vyšší kóta hladiny jezera (cca o 1 m).



**Obr. 13. Upravený DEM s vyznačenými hodnotami s kótou 649,55 m n. m. a nižší (červeně vyznačeno jezero - v tomto případě jako bezodtoká plocha)**

V dalších krocích v rámci předzpracovávání terénních dat byl vypočítán směr odtoku (*Flow Direction*), akumulace odtoku (*Flow Accumulation*), rastrová vrstva vodních toků<sup>5</sup> (*Stream Definition*), rozdělení sítě vodních toků do jednotlivých

---

<sup>5</sup> Určení prahové hodnoty pro vykreslování drah soustředěného odtoku je provedeno automaticky.

segmentů<sup>6</sup> a jejich převedení na linie (*Stream Segmentation* a *Drainage Line Processing*). Následně bylo těmto segmentům určeno dílčí povodí (*Catchment Grid Delineation* a *Catchment Polygon Processing*). [7]

### **Project setup**

Pro založení projektu je potřeba znát polohu uzávěrového profilu (tzv. *Project Point*) – pro povodí Frauenweissenbachu bylo určeno ústí tohoto toku do řeky Traun (pojmenován byl *Outlet\_FwBach*). Další data byla použita z výsledků kroků prováděných během *Terrain preprocessing*. Během tohoto kroku je také přesně definována zájmová plocha a je tak jasně určeno, které body rastru spadají do řešené oblasti.

### **Basin processing**

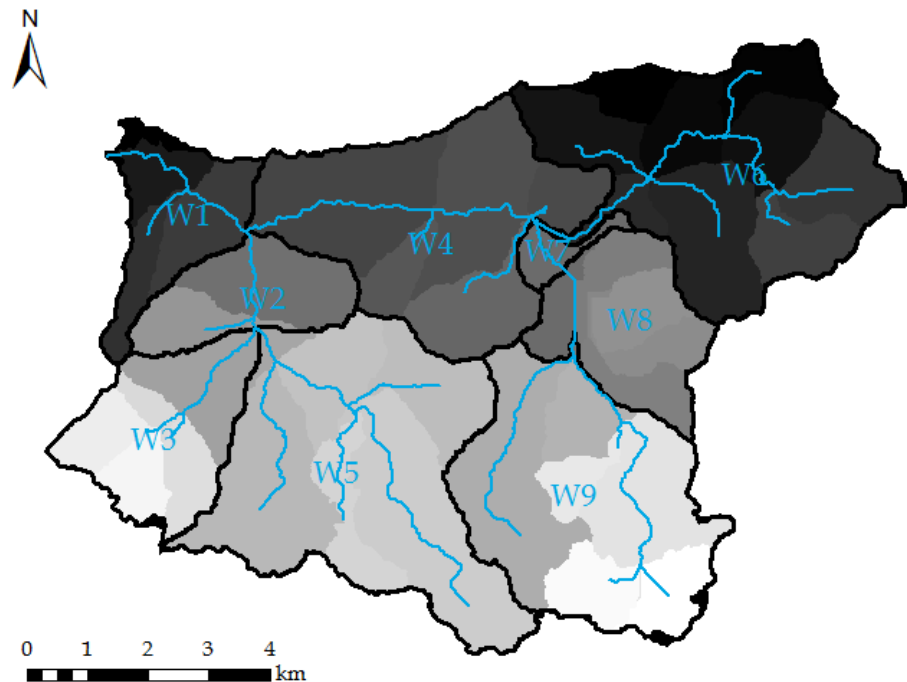
Pomocí kroků obsažených v *Basin processing* je možné velmi jednoduše upravovat vzniklá dílčí povodí. Lze je jednak rozdělovat do menších elementů, jednak také slučovat do větších celků. V tomto kroku bylo z původních 48 subpovodí vytvořeno 9.<sup>7</sup>

Původní povodí ve formě rastru i výsledných 9 dílčích povodí je vidět na Obr. 14. Názvy povodí jsou W1-W9. Povodí W8 kopíruje oblast, odkud voda odtéká skrze břehy jezera Offensee.

---

<sup>6</sup> Vodní toky v zájmovém území byly rozděleny do 48 segmentů.

<sup>7</sup> Jednalo se o takový koncept, který do značné míry kopíroval původní návrh z BOKU Wien, na který tento projekt navazoval a kde byl také realizován.

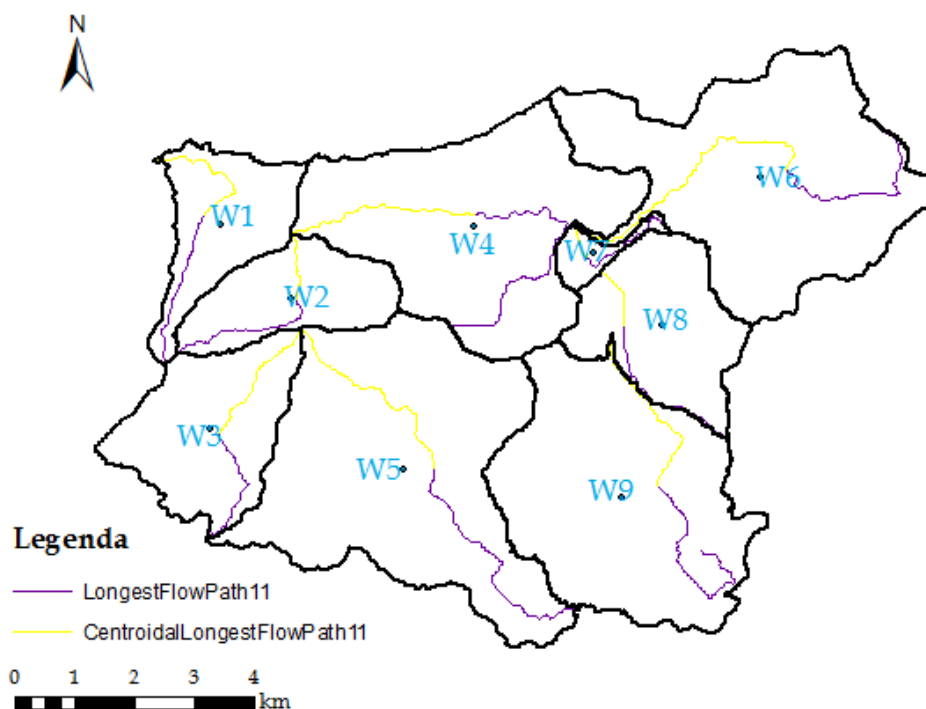


Obr. 14 Dílčí povodí W1 - W9

#### Stream a subbasin characteristics

V rámci těchto kroků se vytvoří charakteristiky řek a subpovodí, které budou následně importovány do HEC-HMS. Je vypočítán sklon a délka každého úseku toku a průměrný sklon povodí. Ten se pohybuje mezi 22% - 33%. Pouze sklon povodí W7 je výrazně menší (13%), ovšem jedná se o malé povodí v údolní nivě za jezerem.

Je určena i nejdelší průtoková dráha (*Longest Flow Path*), která následně poslouží pro výpočet doby koncentrace, a dále těžiště každého dílčího povodí (*Basin Centroid*) a jeho nadmořská výška. Poloha těžiště vypovídá i o tvaru celého povodí, pokud se průtoková dráha vedoucí z těžiště do uzávěrového profilu (*Centroidal Longest Flow Path*) pomítne do „nejdelší průtokové dráhy“. Různý podíl těchto dvou drah je na Obr. 15, kde je patrná i souvislost s tvarem dílčích povodí. Dále je vidět i poloha těžišť.



Obr. 15 Průtokové dráhy dílčích povodí

### Hydrologic parameter estimation

Byly zvoleny tyto metody hydrologických výpočtů:

- pro výpočet objemu přímého odtoku (tzv. *loss method*) **SCS CN (Curve Number)**
- pro výpočet odezvy povodí na danou srážku (tzv. *transform method*) **metoda jednotkového hydrogramu (SCS Unit Hydrograph)**
- pro metodu výpočtu korytového odtoku (tzv. *river-route method*) **Kinematická vlna (Kinematic Wave)**

Tyto metody lze následně měnit přímo v rámci modelování v HEC-HMS, nicméně v prostředí ArcGIS bylo nutné vypočítat některé vstupní parametry, jako například hodnoty CN,  $T_{LAG}$  (časový posun v hodinách mezi výskytem maxima příčné srážky a výskytem kulminačního průtoku v počítaném závěrečném profilu povodí [8]) pro jednotkový hydrogram a příčné i podélné rozměry koryta pro výpočet transformace povodňové vlny v korytě. Výpočet je popsán v kapitolách *Metoda SCS CN / odtoková ztráta* a *Metoda jednotkového hydrogramu / výpočet přímého odtoku*.

## Hydrologic modeling system

V rámci těchto kroků se ustanoví formální podoba projektu pro vložení do HEC-HMS. Jedná se o tvorbu odpovídajících ikon atp. Nejzásadnějším úkonem je kontrola dat (*Check data*), kde jsou odhaleny i ty nejmenší nepřesnosti projektu, které ovšem brání importu do HEC-HMS. Dokud nejsou vyřešeny všechny problémy, které byly odhaleny během kontroly, není vhodné model povodí do HEC-HMS vkládat a dále s ním pracovat.

## 6.2 METODA SCS CN / ODTOKOVÁ ZTRÁTA

Vybranou metodou pro výpočet odtokové ztráty je metoda SCS (*Soil Conservation Service*) CN (*Curve Number*). Na jejím základě bude určeno, kolik vody z celkové návrhové srážky se bude transformovat na efektivní srážku a bude se tak podílet na tvorbě přímého odtoku.

Výpočtem bude získána průměrná hodnota CN pro jednotlivá povodí. Výsledná hodnota CN závisí jednak na hydrologické skupině půdy, jednak na využití území. Hydrologické skupiny půd byly určeny na základě geologické mapy a terénního průzkumu. Mapa využití území byla převzata z projektu CORINE Land Cover. Na základě jejich kombinace byla přiřazena hodnota CN (pro spojení těchto dvou podkladů byly použity příkazy *Intersect* a *Dissolve*, pro přiřazení hodnoty CN *Join Field*). Přiřazení hodnot CN bylo provedeno dle *Hydrology Handbook* [9] – klasifikace viz Tab. 1. V Tab. 2 jsou vypsány hodnoty CN pro ty kategorie využití území, které se na území vyskytují.



Kód CLC	CORINE Land Cover	Český překlad	Koeficient dle Hydrology Handbook [9]	Český překlad
131	Mineral extraction sites	Těžební oblast	Urban impervious areas	Městské nepropustné plochy
231	Pastures	Pastviny	Pasture, grassland	Pastviny
311	Broad-leaved forest	Listnatý les	Oak-aspen	Dub-osika
312	Coniferous forest	Jehličnatý les	Pinyon-juniper; grass understory	Borovice-jalovec, travnatý podrost
313	Mixed forest	Smíšený les		
321	Natural grasslands	Travní porost	Meadow	Louka
322	Moors and heathland	Rašeliniště a vřesoviště	Herbaceous-mixture of grass, weeds and low-growing brush	Bylinné patro - směs trávy, plevele a nízkých keřů
332	Bare rocks	Skála	Wasteland without vegetation	Pustina bez vegetace
333	Sparsely vegetated areas	Řídce zarostlé oblasti	Sparsely covered	Řídce porostlý
521	Lagoons	Laguny	Water Bodies	Vodní útvar

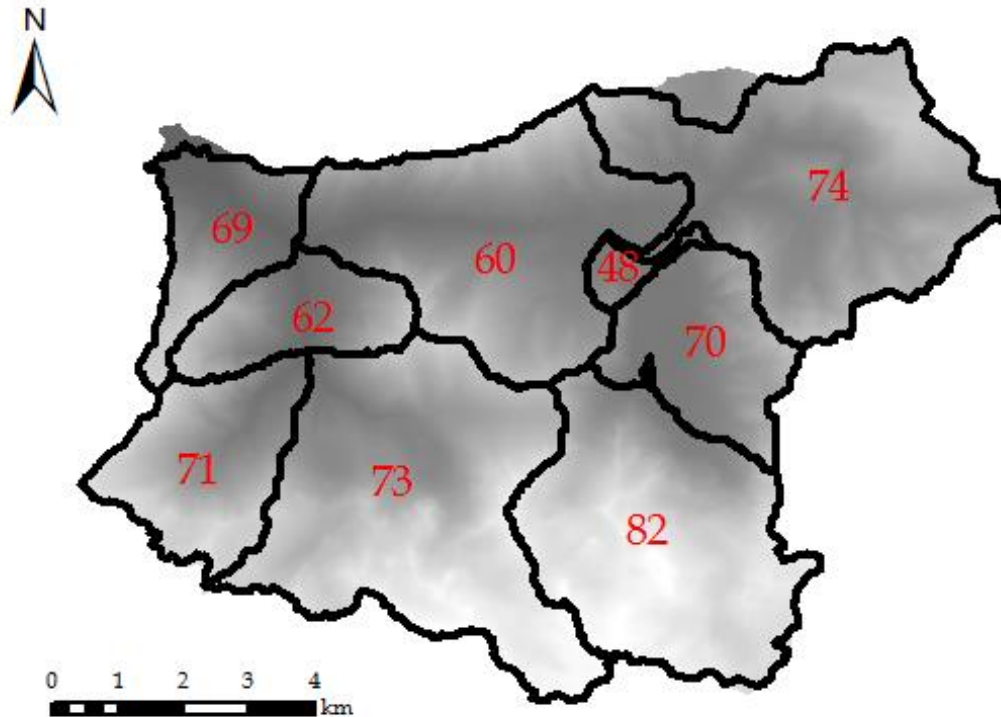
Tab. 1: Klasifikace LandUse pro přiřazení hodnot CN

Landuse \ soil group	A	B	C	D
131_MINERAL_EXTRACTION_SITES	98	98	98	98
231_PASTURES	49	69	79	84
311_BROAD_LEAVED_FORESTS	36	48	57	63
312_CONIFEROUS_FOREST	36	58	73	80
313_MIXED_FOREST	36	58	73	80
321_NATURAL_GRASSLANDS	30	58	71	78
322_MOORS_AND_HEATHLAND	60	71	81	89
332_BARE_ROCKS*	77	86	91	94
333_SPARSELY_VEGETATED_AREAS*	45	66	77	83
521_WATER_BODIES			100	

Tab. 2: Hodnoty CN [9]

Jelikož cílem tohoto úkonu je získat průměrné CN pro každé dílčí povodí, je ještě potřeba použít příkazy *Split* a *Merge* a polygonovou vrstvu s hodnotami CN pro jednotlivé plochy rozdělit polygonovými hranicemi dílčích povodí. Průměrné

hodnoty CN se určí ve *Field Calculator* pomocí váženého průměru  $CN_{Wi} = \sum CN_i * A_i / A_{Wi}$ , kde index „Wi“ znamená průměrnou hodnotu dílčího povodí a index „i“ hodnotu pro elementární plochu. Vypočtené hodnoty jsou na Obr. 16.



Obr. 16. Průměrné CN na každém dílčím povodí

V HEC-HMS je dále nutné zadat počáteční ztrátu  $I_a$  (*initial abstraction*) a procentuální zastoupení nepropustných ploch (*impervious*).  $I_a$  definuje množství srážky, které musí spadnout, než nastane povrchový odtok. Na rozdíl od maximální potenciální retence  $A$  (která je vypočítána na základě  $CN^8$ ) ovlivňuje i následnou infiltraci během srážky. Standardně se uvažuje jako 20% potenciální retence, ovšem tato hodnota lze upravovat (např. na základě dostupných srážkových dat). V projektu byla ponechána defaultní hodnota  $I_a$ . Nepropustné plochy se na povodí nevyskytují.

---

<sup>8</sup> Vzorec pro výpočet je  $A = 25,4 * \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) (mm)$

### 6.3 METODA JEDNOTKOVÉHO HYDROGRAMU / VÝPOČET PŘÍMÉHO ODTOKU

Pro výpočet odezvy povodí na danou srážku (tzv. *transform method*) byla použita metoda jednotkového hydrogramu (*SCS Unit Hydrograph*). Pro výpočet je nejpoužívanější vzorec SCS (*Soil Conservation Service*) pro odvození  $T_{LAG}$  (doba prodlení - časový posun v hodinách mezi výskytem maxima příčinné srážky a výskytem kulminačního průtoku v počítaném závěrovém profilu povodí):

$$T_{LAG} = \frac{L^{0,8} * (S + 1)^{0,7}}{1900 * \sqrt{Y}} \quad (h) \quad (1)$$

Kde:    L      délka údolnice k rozvodnici (feet)  
          S      maximální retence povodí (inches)<sup>9</sup>  
          Y      průměrný sklon povodí (%)

Během přípravy dat je  $T_{LAG}$  vypočítán pomocí příkazu z nabídky HEC-GeoHMS na základě dříve vypočtených charakteristik. Teoretická doba koncentrace je poté odhadnuta jako  $1,67 * T_{LAG}$  (jedná se o kontrolní údaj, který není potřeba do HEC-HMS vkládat). Hodnoty viz následující tabulka.

---

<sup>9</sup> Odpovídá maximální potenciální retenci A (mm):  $S \text{ (inches)} = 25,4 * A \text{ (mm)}$   
(1 palec = 25,4 mm)

Subpovodí	T <sub>LAG</sub> (h)	T <sub>LAG</sub> (min)	TC (min)
W1	0,88	53	89
W2	0,72	43	72
W3	0,67	40	67
W4	1,58	95	159
W5	1,05	63	105
W6	1,14	68	114
W7	1,21	73	122
W8	0,73	44	73
W9	0,73	44	73

Tab. 3. Vstupní údaje pro metodu jednotkového hydrogramu

## 6.4 CHARAKTERISTIKY KORYT

Jedná se o parametry pro výpočet korytového odtoku (v tomto případě kinematické vlny) – drsnost a rozměry dílčích úseků.

### Drsnost koryt

Drsnost povrchu koryt byla definována pomocí tzv. Manningova součinitele drsnosti  $n$ . Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která v sobě zahrnuje jednak povrchovou drsnost (odpor jednotlivých zrn), dále veškeré nepravidelnosti koryta (působení vegetace, styčných ploch atp.) a také interakční procesy při vybřežení a nespočet dalších složek. [10] [11]

Po konzultaci na univerzitě BOKU v rámci zahraniční stáže (vedeno prof. Johannesem Hüblem) a především po provedení citlivostní analýzy, která je popsána v kapitole *Citlivostní analýza*, byla pro celé zájmové území volena konstantní hodnota drsnostního koeficientu. Na základě terénního průzkumu, odborné literatury [11] a konzultace s odborníky pro hydrologické modelování v alpském prostředí byla zvolena hodnota  $n=0,1$ . Tato hodnota byla po provedení kalibrace modelu potvrzena jako vhodná.

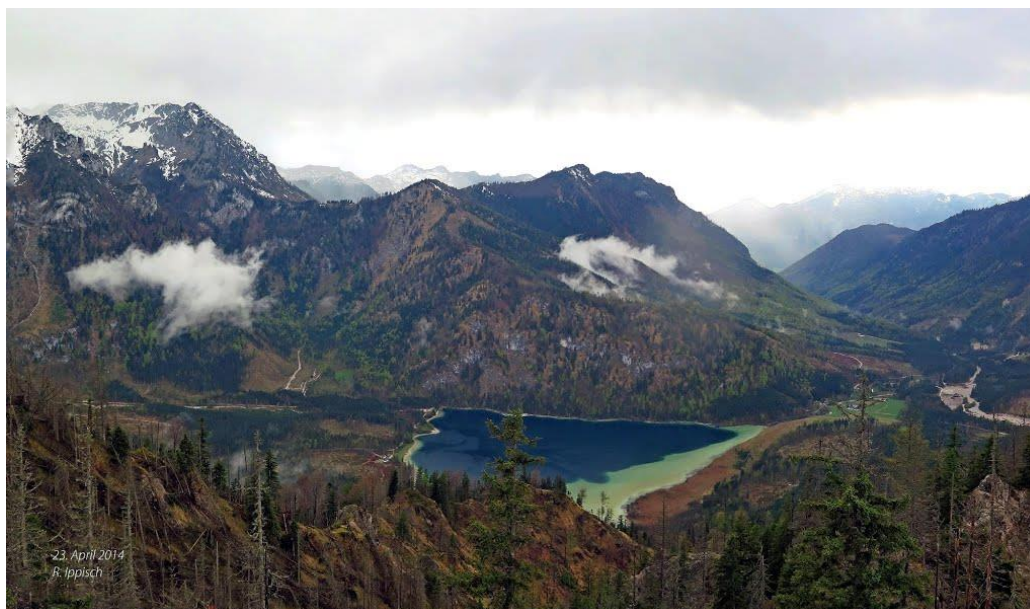
### Rozměry koryt

Podélné rozměry (délka a sklon dílčích úseků) byly určeny v rámci výpočtu pomocí HEC-GeoHMS.

Příčné rozměry koryt byly určeny na základě podrobného DEM a ortofotomapy. Pohybují se od 4 m do 15 m. Blíže k rozvodnici se samozřejmě vyskytují údolnice s menšími parametry, nicméně výpočet odtoku v HEC-HMS probíhá v rámci dílčích povodí plošně (koryta nejsou uvažována). První modelovaná koryta se vyskytují až za uzavěrovými profily prvních dílčích povodí (koryta o šířce 4 m a vyšší) a odtud se říční síť sbíhá do uzavěrového profilu (koryto šířky 15 m).

## 6.5 CHARAKTERISTIKY JEZERA

Pro výpočet transformace povodňové vlny v nádrži je potřeba znát charakteristiky jezera, které bude v HEC-HMS reprezentovat oddíl *Paired Data*. Jedná se o konsumpční a batigrafické a křivky.



Obr. 17: Jezero Offensee<sup>10</sup>

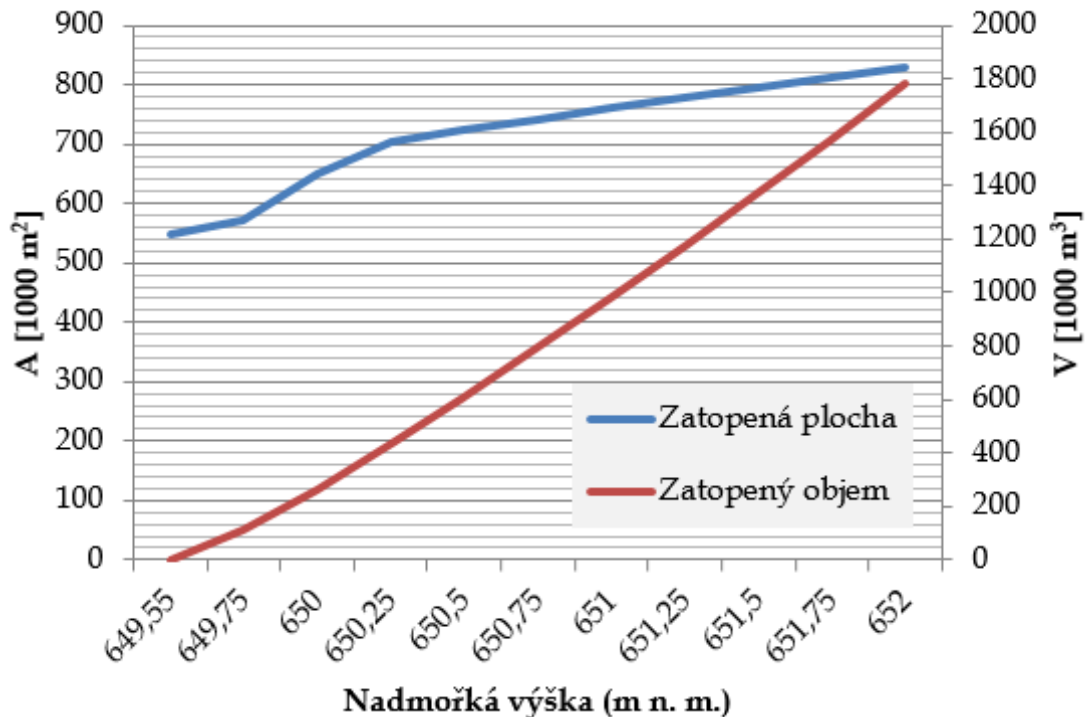
### Batigrafické křivky

Pro výpočet závislosti zatopené plochy na hloubce  $S = f(h)$  a výpočet objemu vody v nádrži na hloubce  $V = f(h)$  byl použit DEM s rozlišením 1\*1 m. Hladina jezera se

---

<sup>10</sup> Zdroj. <https://ssl.panoramio.com/photo/106053796>

nachází na kótě 649,55 m n. m. a od ní byla zjišťována plocha jezera při vzrůstu hladiny v intervalu 0,25 m (vytvářením vrstevnic s definovanou výškou pomocí příkazu *Contour*). Objem byl určen na základě výpočtu střední plochy.



Graf 2: Charakteristické křivky nádrže

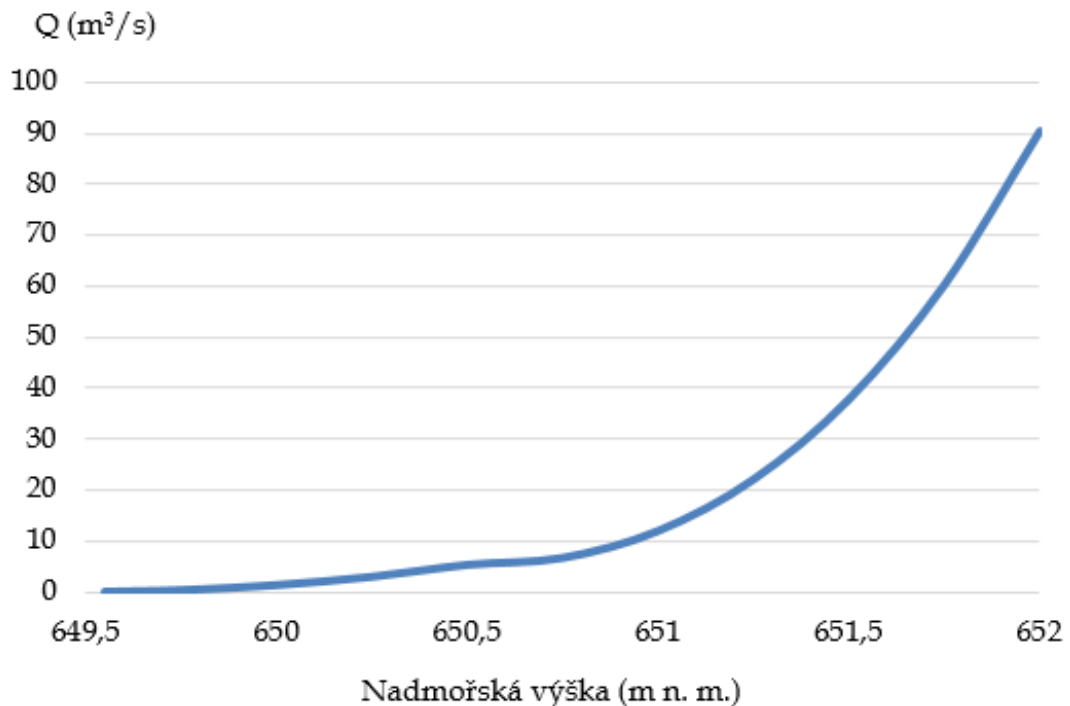
### Konsumpční křivka

Jezero Offensee je přírodní jezero s přirozeným výtokem (bez výpustního objektu). Závislost odtoku vody z nádrže na hloubce vody  $Q = f(h)$  byla určena pomocí Chezyho rovnice a výpočet byl proveden pro příčný profil koryta v místě výtoku z jezera. Rychlostní součinitel byl určen na základě Manningova součinitele drsnosti. Sklon ( $i_0$ ) a charakteristický profil pod nádrží byly vykresleny z DEM. Pomocí příčného řezu byla určena průtočná plocha (S), omočený obvod (O), hydraulický poloměr (R) a odtud byla dopočítána rychlost v závislosti na výšce hladiny:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} i_0^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Průtok Q se vypočítá jako součin průtočné plochy (S) a rychlosti (v). Do HEC-HMS je pak importována jednak tabulka závislosti velikosti průtoku na výšce

hladiny (viz Graf 3) a dále závislost průtoku na objemu vody v nádrži (získáno propojením s Grafem 2).



Graf 3: Konzumpční křivka (jezero Offensee)

## 6.6 NÁVRHOVÁ SRÁŽKA

Podkladem pro tvorbu byly n-leté srážky z rastrové sítě bodů - tzv. Bemessungsniederschlag, které jsou dostupné na oficiálních rakouských meteorologických stránkách. [6] Tato síť je patrná z Obr. 12 v kapitole *Vstupní data*.

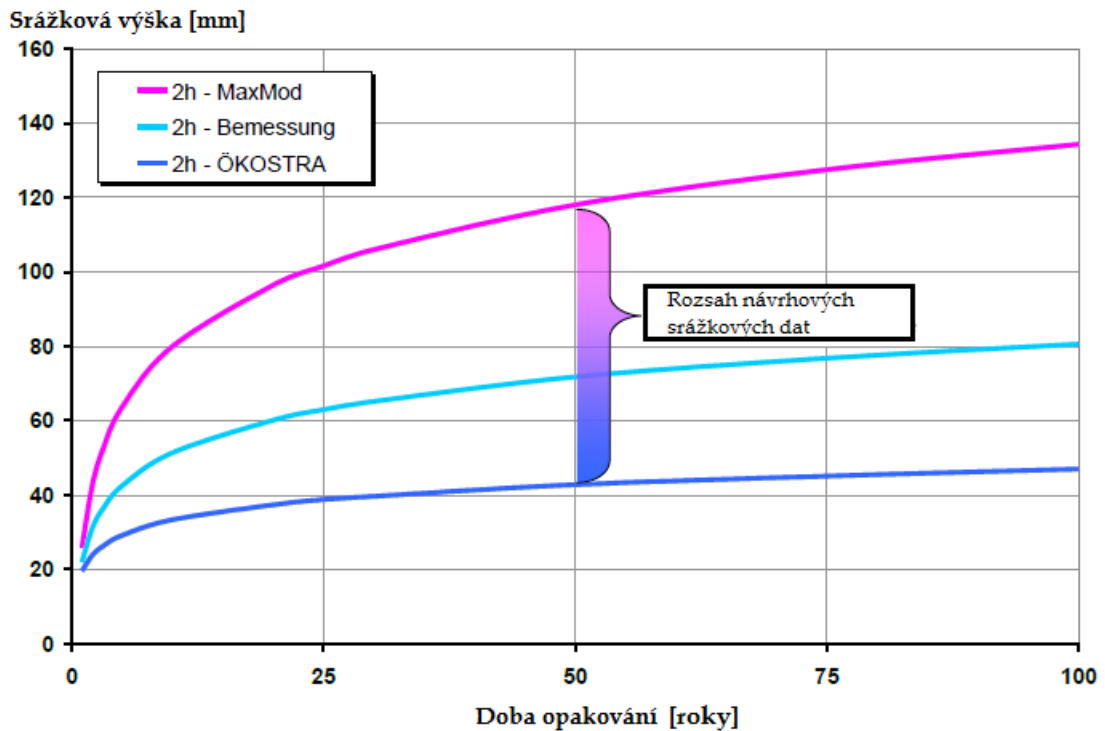
### Stoleté odvozené srážky

Rakouská hydrologická služba poskytuje v současné době 3 typy n-letých srážkových dat s dobou trvání od 5 minut do 6 dnů. Jedná se o:

- Maximalizované modely srážek (MaxModN)
- Interpolovaná data (ÖKOSTRA)
- Kombinace těchto dvou přístupů (Bemessungsniederschläg)

Široký rozsah možných srážkových událostí definovaných prvními dvěma zmíněnými přístupy (hodnoty MaxModN jsou prezentovány jako „pravděpodobně příliš velké“ a hodnoty ÖKOSTRA jako „pravděpodobně příliš malé“) byl

impulesem pro prezentaci třetího zmíněného srážkového scénáře – Bemessungsniederschlag. Tato „střední“ data jsou dle oficiálních rakouských meteorologických stránek doporučována pro počáteční aproximace a poslouží jako návrhové srážky i v této práci. [12]

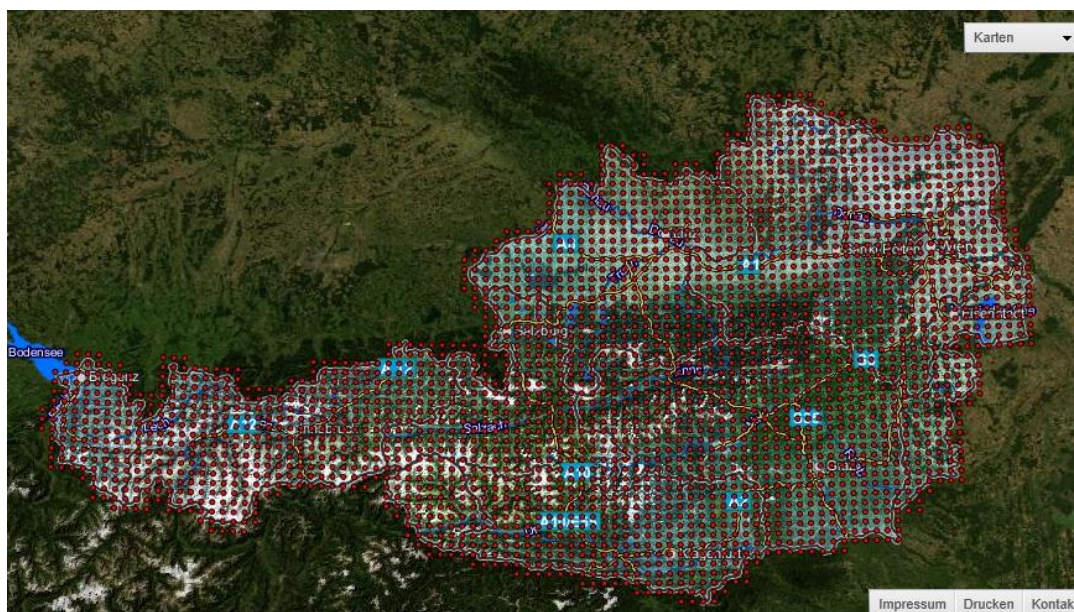


Graf 4: Návrhové srážky s dobou trvání 2 hod pro konkrétní bod rastru vyhodnocené dle různých scénářů [12]

Návrhové srážkové výšky jsou definovány pomocí rastrové sítě bodů, která pokrývá celé Rakousko. Body mají spon 6 250 m a pro každý bod existují IDF křivky s parametry:

- Doba opakování (roky): 1, 2, 3, 5, 10, 20, 25, 30, 50, 75, 100
- Trvání: 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 min; 2, 3, 4, 6, 9, 12, 18 hod; 1, 2, 3, 4, 5, 6 dnů

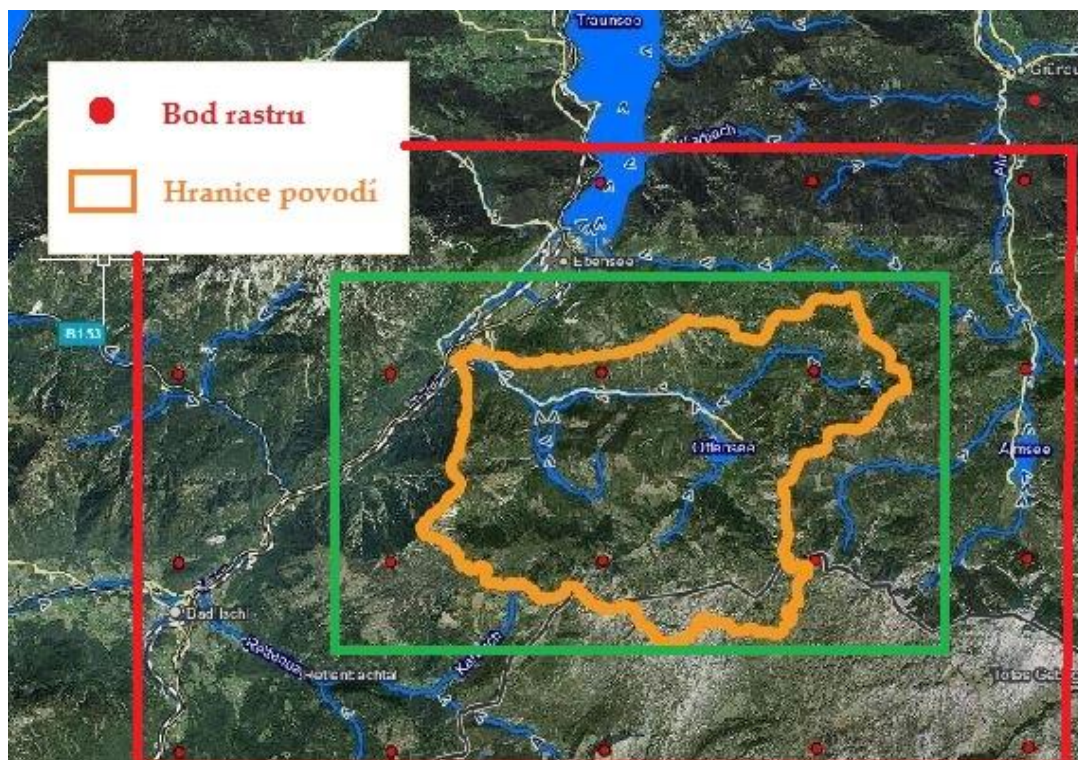




Obr. 18: Rastrová síť srážkových údajů

Ačkoliv není pravidlem, že srážka s dobou opakování  $N$  vyvolá průtok se stejnou dobou opakování, v případě analýzy na povodí Frauenweissenbachu nezbývá než postupovat právě podle tohoto scénáře. Při odhadování  $n$ -letých průtoků ovšem nelze nikdy předvídat stav povodí před příchodem extrémních srážek (nasycenost, infiltrační schopnosti atd.).

Pro návrh budou analyzovány 100-leté srážkové úhrny s dobou trvání (v hodinách): 0,5, 1, 2, 4, 6, 9, 12, 24, 48, 72. Jak je vidět na Obr. 19, pro zájmové území lze uvažovat data z 6 bodů, které se nachází přímo na povodí nebo v těsné blízkosti (ohraňované zeleně), případně lze vyhodnotit data i z přilehlé oblasti a uvažovat 20 bodů (vnější červený rámeček). Porovnáním (které je vyčísleno v Tab. 4) bylo zjištěno, že se výsledky výrazně neliší a pro další výpočty bude uvažována vnitřní oblast pokrytá 6 body. Podobné srážkové výšky jednotlivých bodů rastru vychází z faktu, že se v širším okolí dané lokality nachází pouze tři srážkoměrné stanice, které jsou od sebe vzdáleny přes 20 km. Ačkoliv jsou denní úhrny těchto stanic velmi odlišné, návrhové  $n$ -leté srážkové výšky promítnuté do rastrové sítě se sponem přes 6 km se liší v řádu procent. Výsledné 100 leté srážky v Tab. 5 byly získány zprůměrováním.



Obr. 19: Body rastrové sítě pro odvození návrhové srážky na zájmovém území

doba trvání srážky (h)	0,5	1	1,5	2	3	12	24	48
h <sub>20 bodů</sub> (mm)	65,6	81,2	90,2	96,5	107,3	185,7	218,8	283,2
h <sub>6 bodů</sub> (mm)	64,0	79,2	88,0	94,5	105,4	185,3	216,1	276,6
rozdíl (mm)	1,6	2,0	2,2	2,1	1,9	0,4	2,7	6,6

Tab. 4: Porovnání srážkových výšek

t [h]	Doba opakování 100	
	hn [mm]	in [mm/h]
0,5	64,0	127,9
1,0	79,2	79,2
2,0	94,5	47,2
4,0	114,2	28,5
6,0	135,3	22,5
9,0	164,6	18,3
12,0	185,3	15,4
24,0	216,1	9,0
48,0	276,6	5,8
72,0	312,6	4,3

Tab. 5: Návrhové srážkové výšky a srážkové intenzity na Frauenweissenbachu

## **Doba koncentrace**

Průtok stoupá tak dlouho, dokud k průřezu nedospěje první kapka deště z hydraulicky nejvzdálenějšího místa povodí. Tuto dobu, jež vyplývá z rychlosti toku vody na povrchu povodí a v říční síti, nazýváme kritickou dobou neboli dobou koncentrace. Tato doba závisí na geografických činitelích povodí. [13] Srážka, která má stejnou dobu trvání, jako je doba koncentrace (kritická doba deště), je z hlediska extrémních průtoků nejnebezpečnější a zpravidla vyvolává nejvyšší kulminaci. Jedná se totiž o srážku, která je nejintenzivnější (nejkratší) z těch, které zasáhnou celé povodí.

Výpočet doby koncentrace povodí byl proveden právě kvůli zjištění, které srážky budou pro povodí Frauenweissenbachu nejkritičtější. Výpočet doby koncentrace byl proveden podle popisu v kapitole *Metoda jednotkového hydrogramu / výpočet přímého odtoku* s tím rozdílem, že bylo uvažováno celé povodí dohromady. V HEC-GeoHMS byl vytvořen nový projekt, kde byla v rámci *Basin processing* všechna dílčí povodí spojena dohromady a byla vypočtena doba prodlení  $T_{LAG} = 2,28$  hod.  $TC = 1,67 * T_{LAG} = 1,67 * 2,28 = 3,81$  hod. Z toho vyplývá, že nejvyšší kulminační průtoky lze očekávat pravděpodobně ze 4hodinové srážky (další kritická simulovaná srážka by měla být 6, případně 2 a 9 hodinová).

## **Průběh srážky**

Z hlediska časového průběhu lze uvažovat konstantní srážku (blokové rozložení), případně srážku s proměnnou intenzitou. [14] Mnoho autorů předpokládá časově homogenní rozložení návrhové srážky na příslušných povodích. [14] [13] To bude uvažováno i v této práci, a to především z důvodu absolutního nedostatku záznamů reálných srážkových událostí z dané lokality.

## **Distribuce srážky**

Nehomogenitu srážky na velkém území lze zahrnout tak, že je zadáno více vstupních srážkových řad, které jsou prisouzeny dílčím povodím. [14] Této distribuce bude využito pro kalibraci modelu (viz kapitola *Kalibrace modelu na povodí toku Langbathbach*), kde jsou známá reálná srážková data ze srážkoměrných stanic a je patrné, jak byla ve skutečnosti srážka na povodí rozložena. K povodí

Frauenweissenbachu ovšem žádné reálné údaje o průběhu srážek nejsou a není proto možné zohlednit nehomogenitu návrhové srážky na tak velkém území. Pro celé povodí bude uvažována n-letá návrhová srážka. Jedná se o krajní – nejnebezpečnější – variantu, protože pravděpodobnost, že srážka návrhové intenzity a doby trvání zasáhne celou plochu povodí současně a po celou dobu je velmi malá. Možností simulovat průchod srážky s časově proměnným průběhem a prostorovým rozložením intenzity je nekonečné množství a neexistuje varianta, kterou by bylo možné považovat za nejvhodnější. Velikost povodí (85 km<sup>2</sup>) bude zohledněna použitím tzv. plošného redukčního faktoru (je popsán v následující kapitole).

### **Plošný redukční faktor**

Plošný redukční faktor neboli Areal Reduction Factor (dále ARF) je klíčovým parametrem při návrhu hydrologických extrémů. [15] Jedná se o parametr pro úpravu IDF křivek v závislosti na velikosti území. ARF lze vypočítat podle mnoha autorů<sup>11</sup>, přičemž klíčovým vstupem je vždy velikost povodí a doba trvání srážky. Někteří autoři zohledňují také velikost návrhové srážky. Výše uváděné návrhové srážky byly posouzeny podle tří ARF scénářů a přinesly různé redukce srážkových výšek. Níže je uveden příklad redukce na povodí Frauenweissenbach pro stoletou 1 hodinovou srážku ( $h_n = 79,2$  mm):

- „Málo odlehčený“ podle Lorenze a Skody – 84%  $h_n$
- „Silněji odlehčený“ podle Blöschla – 61%  $h_n$
- „Odlehčený v závislosti na ploše“ podle Skody – 43%  $h_n$

Variant použití ARF je nespočet a diskuze o jeho výběru by obstojně naplnila téma celé diplomové práce. Cílem zde není hlouběji tuto problematiku rozebírat, nicméně vzhledem k velikosti území (85 km<sup>2</sup>) je použití ARF téměř nutností. Především u kratších srážek nelze očekávat, že zasáhnou ve stejný čas celé zkoumané území danou (stoletou) intenzitou deště. Výběr byl proveden ze strany

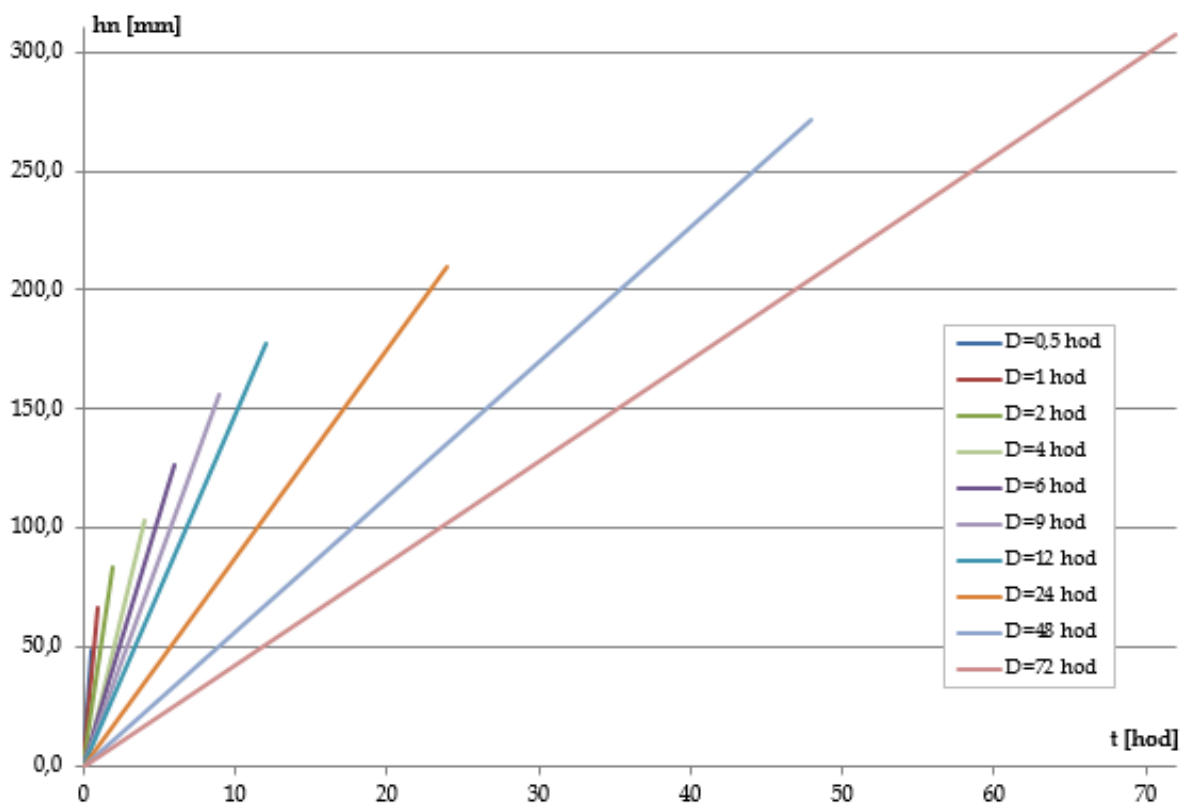
---

<sup>11</sup> Např. Lorenz a Skoda, Blöschl, Woolisher et Schwalen, Vladimirescu, Remenieras, Siccardi [19]

bezpečnosti výsledku - volen byl tedy pouze méně redukující faktor (dle Lorenze a Skody). ARF je zásadním faktorem, jehož výběr byl otestován a potvrzen v rámci kalibrace modelu. Výsledné hodnoty jsou v Tab. 6.

t [h]	Doba opakování n=100		Lorenz, Skoda	
	hn [mm]	in [mm/h]	ARF	hn <sub>red</sub> [mm]
0,5	64,0	127,9	0,770	49,2
1,0	79,2	79,2	0,838	66,3
2,0	94,5	47,2	0,887	83,8
4,0	114,2	28,5	0,922	105,3
6,0	135,3	22,5	0,937	126,7
9,0	164,6	18,3	0,950	156,3
12,0	185,3	15,4	0,957	177,3
24,0	216,1	9,0	0,971	209,8
48,0	276,6	5,8	0,980	271,1
72,0	312,6	4,3	0,984	307,5

Tab. 6: Návrhové srážky upravené podle ARF



Graf 5: Rozložení návrhových srážek

## 7 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

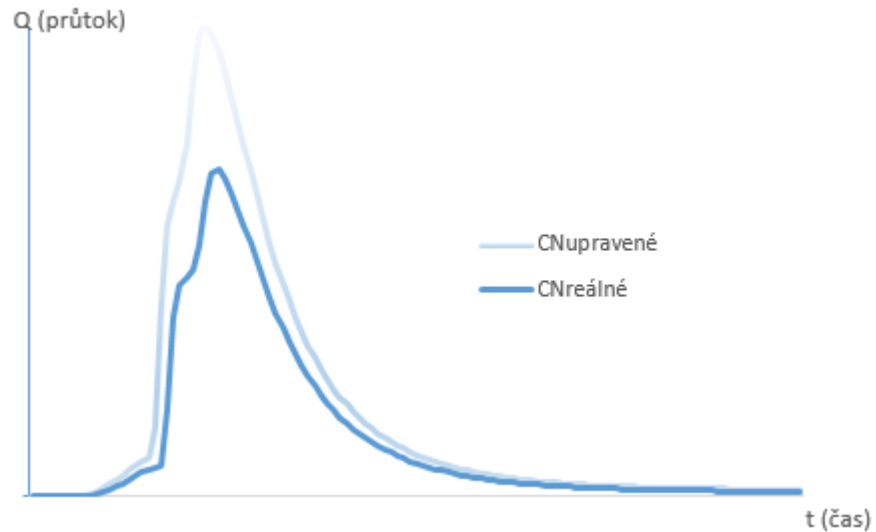
Pro vytvořený model byla provedena citlivostní analýza s cílem zjistit, které parametry jsou pro výpočet klíčové – tedy jak se mění výsledky výpočtu při jejich úpravě. Díky rychlé odpovědi softwaru na změnu dílčích parametrů bylo možné takto „otestovat“ veškeré vstupní parametry vyjma těch, které se přímo odvíjí od morfologie terénu (změna těchto parametrů nemá opodstatnění).

Jak se ukázalo, nejcitlivějším vstupním parametrem jsou bezpochyby srážková data. Výběr srážkových dat je jednou z klíčových činností a bylo jí proto také věnováno nejvíce prostoru (viz kapitola *Návrhová srážka*). Pro následný výpočet extrémních průtoků byly vybrány takové návrhové srážky, které na základě veškerých dostupných meteorologických údajů nejlépe odpovídají parametrům stoleté události. Zásadně může výslednou srážku ovlivnit i použití konkrétního ARF.

Výsledné hodnoty také významně ovlivňuje parametr pro výpočet přímého odtoku (CN). Změna CN při citlivostní analýze byla ovšem pouze ilustrativní, jelikož tento parametr byl určen velmi podrobným postupem<sup>12</sup>. Dále je možné uvažovat o změně a počáteční ztráty  $I_a$ . Při odvozování extrémních průtoků ovšem nelze odhadovat předchozí nasycenost povodí ani následnou infiltraci během srážky. Tyto parametry je možné stanovit na základě znalosti skutečného průběhu srážek (např. při kalibraci modelu). Počáteční ztráta byla proto ponechána na konstantní hodnotě 20% potenciální retence. Kontrolním výpočtem bylo navíc zjištěno, že ovlivňuje výsledný průtok v rámci procent (např. u 9hodinové distribuované srážky na povodí Langbathbachu se při zvýšení  $I_a$  z 20% A na 30% A snížil průtok z 67,6 m<sup>3</sup>/s na 64,1 m<sup>3</sup>/s).

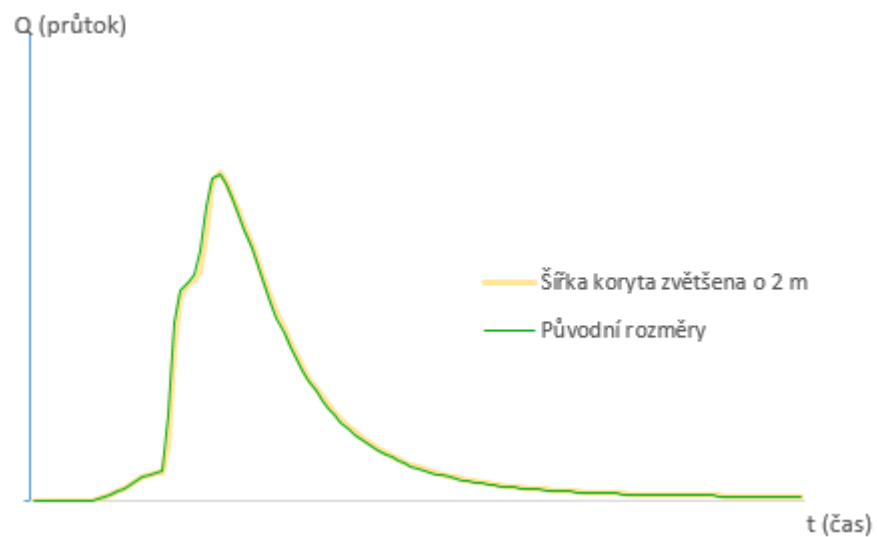
---

<sup>12</sup> Při citlivostní analýze byly měněny hodnoty CN pro celá dílčí povodí (tedy ty, které jsou vyznačeny na Obr. 16).



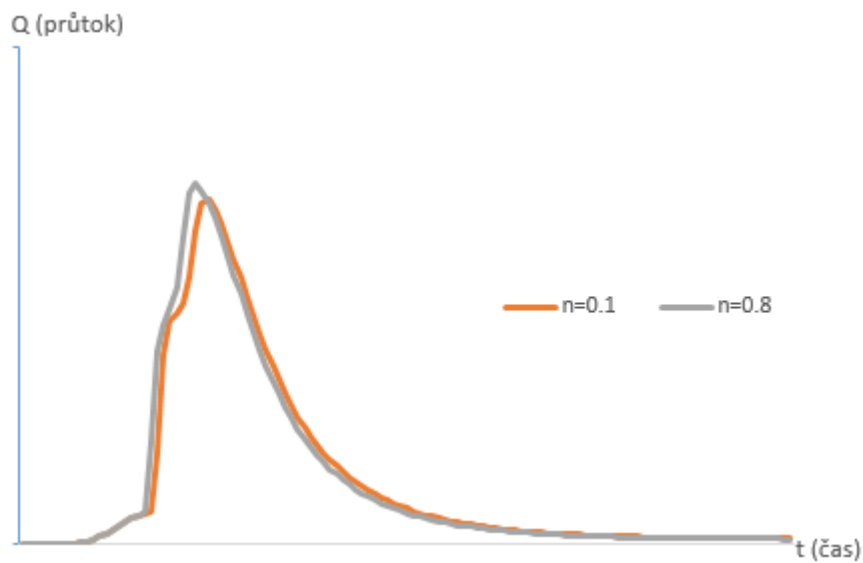
*Graf 6: Změna kulminačního průtoku Frauenweissenbachu při zvýšení dílčích CN o 5 (2hodinová srážka)*

Jelikož byly příčné rozměry koryta určeny z DEM s rozlišením 1\*1 m, bylo nutné otestovat, jak tento parametr ovlivňuje výsledný výpočet. Po plošném zvětšení všech koryt o 2 m bylo zjištěno, že tento parametr nemá na výsledek významný vliv. U 2hodinové srážky se například jednalo o rozdíl menší než 1%.



*Graf 7: Změna kulminačního průtoku na Frauenweissenbachu při výrazné úpravě šířky koryta (2hodinová srážka)*

Dalším posuzovaným parametrem byl Manningův drsnostní součinitel. Při výpočtu průtoku hraje klíčovou roli, ovšem citlivostní analýzou bylo zjištěno, že u komplexního modelování pomocí HEC-HMS má jeho změna mnohem menší vliv na výsledek. Na Grafu 8 vidět, jaký vliv na výsledný průtok má změna  $n$  o 0,2. Tyto hodnoty byly brány jako maximální možný interval drsnostního koeficientu v zájmovém prostředí (alpská krajina s toky s bystrinným prouděním). Na základě terénního průzkumu byla zvolena nejvyšší možná hodnota tohoto intervalu.



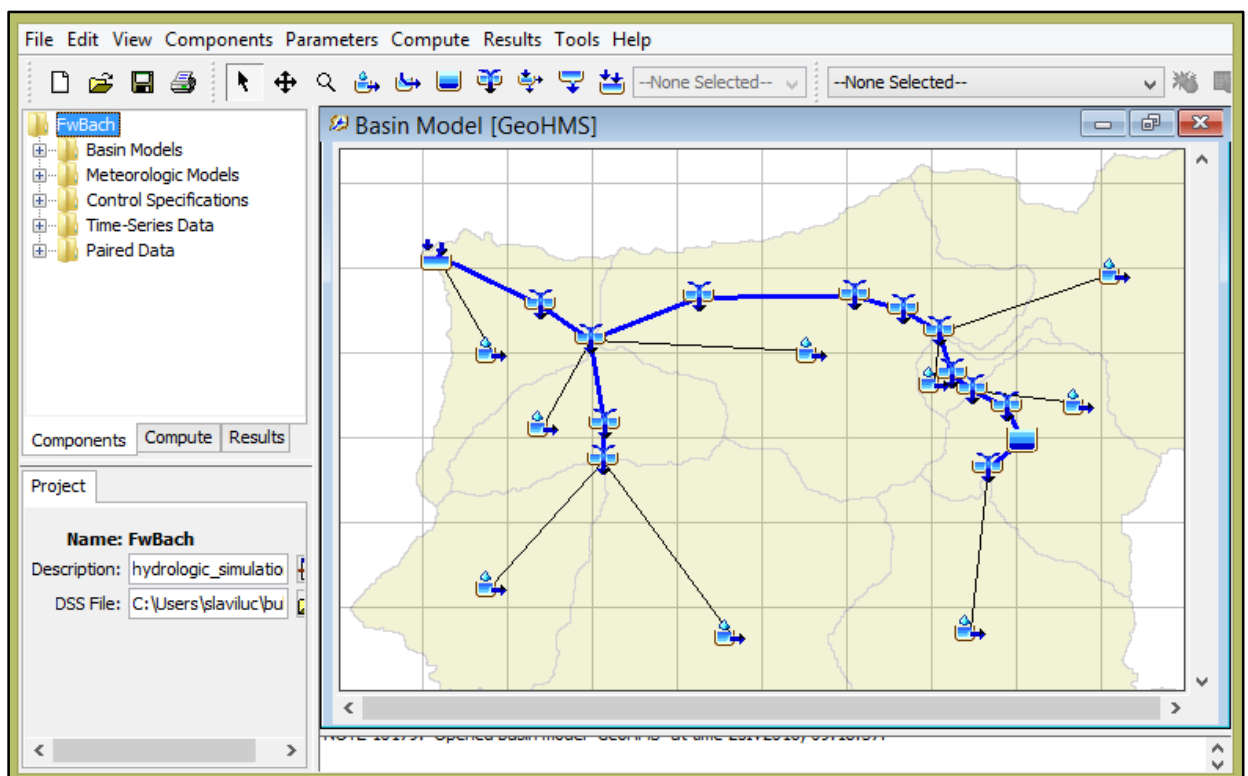
*Graf 8: Kulminační průtok na Frauenweissenbachu s krajními hodnotami Manningova součinitele*



## 8 HEC-HMS

V této kapitole bude stručně nastíněno obecné fungování softwaru HEC-HMS. Pro úplný vhled do této problematiky slouží manuál pro uživatele, který je volně dostupný na internetových stránkách organizace Hydrologic Engineering Center. [1]

HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) umožňuje provádět simulaci srážko-odtokových procesů především v rozvětvených povodích. Obsahuje celou řadu možností jak provádět hydrologické modelování. [1] Na Obr. 20 je vidět uživatelské rozhraní softwaru.



Obr. 20: Prostředí HEC-HMS

Volba veškerých vstupních parametrů se odehrává prostřednictvím menu *Components* (komponenty) a rozděluje se na několik navzájem provázaných oddílů, které jsou vidět v levé části okna (tzv. *watershed explorer*). Jedná se o:

- Basin Models
- Meteorologic Models
- Control Specifications
- Time-Series Data
- Paired Data

Tyto oddíly jsou blíže popsány níže. Další menu obsahuje jednotlivá výpočetní schémata (*Compute*), ve kterých je možné libovolně kombinovat vstupní komponenty (takto je například možné provést modelaci pro různé návrhové srážky). Prostřednictvím menu *Results* je možné prohlížet výsledky jednotlivých výpočetních schémat.

## 8.1 FYZICKO-GEOGRAFICKÉ CHARAKTERISTIKY POVODÍ

Popis povodí se realizuje v oddíle *Basin Models*.<sup>13</sup> Zde je rozvětvené povodí popsáno pomocí těchto základních prvků: *SUBBASINS* (dílní povodí<sup>14</sup>), *REACH* (úsek toku), *JUNCTION* (soutok), *RESERVOIR* (nádrž), *DIVERSION* (odbočka), *SOURCE* (zdroj vody) a *SINK* (výtok/odběr/uzávěrový profil). Každý z těchto prvků je charakterizován popisnými parametry a především je napojen do schematické sítě tím, že je určen jeho *DOWNSTREAM*, tedy prvek, který se nachází níže po proudu. V praxi je pak nejčastější model napojení úseků toků na soutoky a naopak. Každému úseku toku (*reach*) je zpravidla definováno napojení na soutok (*junction*) a obráceně, ze soutoku teče voda do jednotlivých úseků toků. V rámci modelu se vyskytuje i jezero (*reservoir*), které je, obdobně jako soutoky, po proudu a proti proudu ohraničené toky. Důležité je zde zmínit, že celá modelace je přímo závislá na napojení veškerých prvků do sítě, jelikož výpočet postupuje z prvku ve

---

<sup>13</sup> Basin Model pro Frauenweissenbach je vidět na Obr. 20 pravém okně (tzv. *desktop*).

<sup>14</sup> Dále je v textu používán i termín *subpovodí*.

směru proti proudu do prvku ve směru po proudu a takto kontinuálně až k uzávěrovému profilu. [1]

Pro dílčí povodí (*subbasins*) je možné zvolit jednu z metod pro výpočet objemu přímého odtoku (tzv. *loss method*) a dále pro výpočet odezvy povodí na danou srážku (tzv. *transform method*). HEC-HMS dále umožňuje zadat *canopy*, *surface* a *baseflow method*, které ovšem nebyly pro výpočet v této práci uvažovány. Dílčí povodí mají navíc stanovenou přesnou plochu.

Pro úsek toku (*reach*) je nutné vybrat metodu výpočtu korytového odtoku. V případě kinematické vlny (tak je tomu v této práci) je poté nutné zadat příčné i podélné rozměry koryta (délku, sklon a rozměry charakteristického příčného řezu). Z tohoto vyplývá, že je nutné rozdělit tok podle charakteristických úseků.

K vytvoření fyzicko-geografického modelu povodí je speciálně určená nadstavba ArcGISu, a to HEC-GeoHMS. Byl použit i pro vytvoření *basin modelu* Frauenweissenbachu a tento postup je podrobně popsán v kapitole *Příprava dat pomocí HEC-GeoHMS*.

## 8.2 METEOROLOGICKÝ MODEL

V tomto oddílu se vytvoří jednotlivé meteorologické simulace. Zde je pro každé dílčí povodí přiřazena konkrétní srážková událost definovaná hyetogramem. Prostřednictvím meteorologického modelu tak lze simulovat postup srážky, případně (pro velká povodí) lze srážku distribuovat v prostoru a lépe tak simulovat reálné srážkové události. V takovém případě se dílčím povodím přiřadí různé srážkové hyetogramy, které odpovídají různým srážkovým událostem (jiná srážková výška, jiné rozložení v čase, jiný začátek srážky atd.).

## 8.3 ČASOVÝ RÁMEC

Každé výpočetní schéma je nutné pevně časově ohraničit. Simulovaná doba se odvíjí zpravidla od délky vstupní srážky a také od požadovaného výstupu. V tomto oddílu se také definuje výpočetní krok (od 1 minuty až po 1 den).

## 8.4 SRÁŽKOVÉ HYETOGRAMY

V oddílu *Time-Series Data* se určí hyetogramy konkrétních srážkových událostí. Popis výběru návrhové srážky je v kapitole *Návrhová srážka*.

## 8.5 TRANSFORMACE POVODŇOVÉ VLNY V NÁDRŽI

Posledním oddílem ve watershed exploreru jsou tzv. *Paired Data*. Prostřednictvím tohoto nástroje budou definovány batigrafické křivky nádrže (závislost zatopené plochy na hloubce  $S = f(h)$ ) a závislost objemu vody v nádrži na hloubce  $V = f(h)$ ) a také konsumpční křivka (závislost průtoku na hloubce vody v nádrži  $Q = f(h)$ ).

## 8.6 PRŮBĚH VÝPOČTU

Zde je nutné vyzdvihnout, že pro každé výpočetní schéma je nutné zvolit:

- 1x *Basin Model* (fyzicko-geografický popis povodí)
- 1x *Meteorologic Model* (popis konkrétní srážkové události)
- 1x *Control Specifications* (časový rámec simulace)

Tím je jasně definován výpočetní model.

# 9 HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ V HEC-HMS

Cílem práce je analýza návrhových extrémních průtoků na povodí Frauenweissenbach při využití srážko-odtokového modelování. Výsledkem tohoto modelování budou návrhové n-leté průtoky se zaměřením na nejdelší možné n-leté opakování (což je na základě dostupných dat 100 letý průtok).

Postup modelování je následující:

- Analýza dostupných historických údajů pro povodí Langbathbach \*
- Modelace v HEC-HMS (povodí Langbathbach) \*
- Analýza návrhových srážek, určení kritické srážky (její délky, intenzity a rozložení). Určení dalších vstupních parametrů (viz kapitoly výše)
- Modelace v HEC-HMS (povodí Frauenweissenbach)
- Kalibrace modelu, úprava vstupních parametrů
- Výsledná modelace v HEC-HMS (povodí Frauenweissenbach) \*\*

\* viz kapitola *Kalibrace modelu na povodí toku Langbathbach*

\*\* viz kapitola *Výpočet kulminačního průtoku na toku Frauenweissenbach*

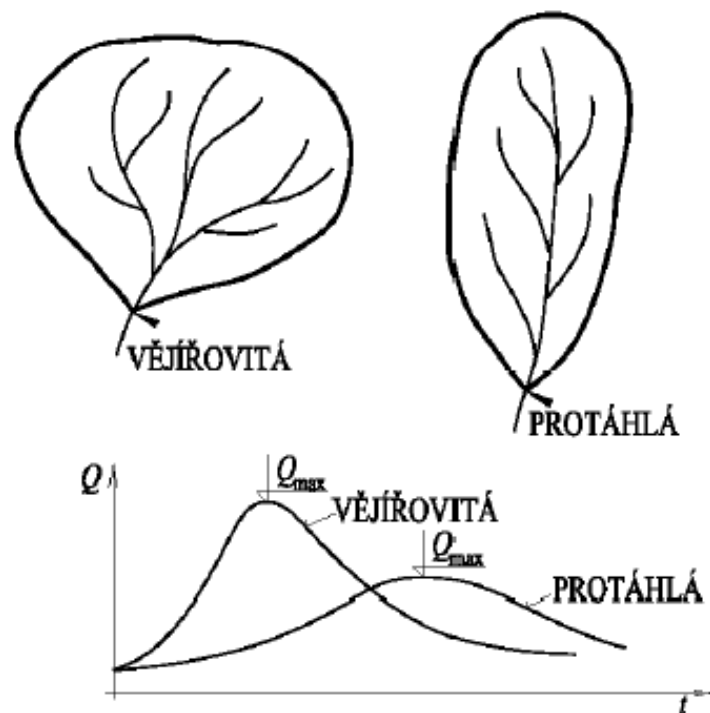
Postup byl tedy reversní oproti popisu v této práci, který byl volen logicky dle navazujících témat tak, aby byl pro čtenáře lépe srozumitelný. Ve skutečnosti probíhala nejdříve modelace na povodí Langbathbachu, kde bylo vyjasněno, jaké parametry nejlépe popisují reálné podmínky a jak ovlivňují výsledné průtoky. Pozornost byla věnována především výběru návrhové srážky.

## **9.1 KALIBRACE MODELU NA POVODÍ TOKU LANGBATHBACH**

Kalibrace modelu spočívá v přizpůsobení chování sestaveného modelu na skutečné události volbou vhodných hodnot kalibračních parametrů, případně volbou hodnot neznámých vstupních parametrů při zachování jejich fyzikální relevance. Poté, co je sestavený model zatížen určitou srážkovou událostí, pro kterou známe její skutečnou odezvu ve zvoleném uzávěrovém profilu, můžeme

provést optimalizaci simulovaného průtoku. Při procesu kalibrace jsou jednotlivé parametry sestaveného modelu postupně upravovány tak, aby bylo dosaženo co největší shody s naměřenými hodnotami průtoků. [16]

Do řeky Traun se 5,5 km pod pravostranným přítokem Frauenweissenbachu vlévá levostranný přítok Langbathbach. Jeho povodí je orientačně poloviční plochy oproti povodí Frauenweissenbachu a má velmi podobné morfologické, geologické a další charakteristiky. Povodí má protáhlý tvar (oproti vějířovitému tvaru povodí Frauenweissenbachu), proto zde můžeme očekávat jiné průtokové odezvy na příčinné dešti (viz Obr. 21). Vstupní podmínky zohledňující tvar povodí jsou v tomto případě upraveny automaticky – pomocí přípravy dat v HEC-GeoHMS. Nicméně vlivem odlišného tvaru je potřeba očekávat kulminační průtoky z povodí Langbathbach obecně menší, jelikož odpovídá protáhlým povodím, zatímco Frauenweissenbach je téměř typickým představitelem vějířovitého tvaru.<sup>15</sup>



Obr. 21. Srovnání vlivu stromovité a vějířovité říční sítě na průběh odtoku [13]

<sup>15</sup> Myšleno tak, že menší průtoky by pro Langbathbach vycházely i v případě stejné plochy (a za předpokladu shodných dalších parametrů)

Před vtokem Langbathbachu do řeky Traun se nachází vodoměr, ze kterého jsou známy jak průtoky  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) – průměrné denní hodnoty a měsíční maxima a minima, tak i vodní stavy  $h$  (cm) – průměrné měsíční hodnoty a měsíční maxima a minima. Na území se navíc nacházejí dvě srážkoměrné stanice (*Langbathbach Vorderer* v centrální části povodí a *Ebensee (Schule)* za západní hranicí povodí) s údaji o průměrných denních srážkových výškách.



Obr. 22: Měřená data na území

Díky reálným údajům v kombinaci s měřeními průtoky byl model kalibrován. Z dostupných dat bylo možné najít kulminační průtoky v uzávěrovém profilu Langbathbachu a zjistit, jaká jim odpovídala denní srážka. K reálným srážkovým hodnotám (jednalo se pouze o celkové srážkové úhrny, nikoliv o průběh srážky) tak byly přiřazeny příslušné odezvy. **Cílem modelování na Langbathbachu bylo nastavit takové vstupní parametry, při kterých konkrétní historické srážkové události vyvodí při modelování průtoky odpovídající naměřeným hodnotám.**

## Využití reálných srážkových a průtokových dat

Ze srážkoměrné stanice Ebensee (Schule) jsou k dispozici celkové denní úhrny z let 1988 – 2013. Pro stanici Langbathbach Vorderer z let 1971 – 2013. Z těchto řad byly vybrány dvě extrémní události – jednak den, kdy průtok v uzávěrovém profilu Langbathbachu kulminoval na nejvyšší hodnotě (2. 8. 1991), jednak také den s nejvyšší naměřenou srážkovou výškou (4. 7. 2010). Naměřené hodnoty (včetně dnů předcházejících události a dnů následujících) jsou vypsány v následující tabulce.

Událost		Průtok [m <sup>3</sup> /s]		Srážky - 24hodinový úhrn [mm]	
		Q <sub>kulminační</sub>	Q <sub>průměrný denní</sub>	Langbathbach Vorderer	Ebensee (Schule)
2. 8. 1991 (maximální historický kulminační průtok na Langbathbachu)	30. 7. 1991	x	2,9	0	0
	31. 7. 1991	x	2,2	44,1	30
	1. 8. 1991	x	5,7	66,7	14,5
	<b>2. 8. 1991</b>	<b>73,8</b>	33,6	104,6	49
	3. 8. 1991	x	22,6	4,3	5,5
	4. 8. 1991	x	7,3	0,4	0
	5. 8. 1991	x	4,1	0	0
4. 7. 2010 (maximální naměřená 24hodinová srážka)	1. 7. 2010	x	0,7	0	0
	2. 7. 2010	x	0,7	0	0
	3. 7. 2010	x	0,7	7,5	10
	<b>4. 7. 2010</b>	<b>50,89</b>	5,2	45,3	161
	5. 7. 2010	x	26,2	22,7	20,2
	6. 7. 2010	x	8,9	2,1	2,3
	7. 7. 2010	x	4	0	0

Tab. 7: Historické události na Langbathbachu [6]

Průběhy srážek nejsou bohužel dostupné, proto lze pouze usuzovat z výše popsaných dat. Jak lze vidět, nezasáhla ani v jednom z uvedených případů srážka povodí plošně. V roce 1991 byla vysoká srážková výška (104,6 mm) naměřena ve stanici Langbathbach Vorderer, nicméně na východním cípu povodí byla ve stejnou dobu změřena mnohem nižší srážková výška a podobně nehomogenní jsou i



výsledky měření z roku 2010. Pro tyto případy, kdy známe alespoň částečně rozložení srážky, bude uvažována prostorová distribuce srážky (viz níže)<sup>16</sup>.

Reálná data byla porovnána s n-letými návrhovými srážkami. Jelikož se jedná o extrémní událost, data byla porovnána se 100 letými srážkami (uvedené jsou v Tab. 5: *Návrhové srážkové výšky a srážkové intenzity na Frauenweissenbachu*). Cílem bylo zjistit, o jakou extrémní událost by se v konkrétním datu mohlo jednat. Byla tedy provedena redukce 24 hodinové srážkové výšky dle vzorce [21]:

$$H_{t,N} = H_{1d,N} * \alpha * t^{1-c} \quad (3)$$

Kde  $\alpha$  a  $c$  jsou koeficienty pro redukci 24-hodinových úhrnů [17]. Redukce byla provedena na doby trvání n-letých srážek (tedy 1h, 2h, 4h, 6h, 9h a 12h). Reálné (redukované) srážky budou porovnány s návrhovými a pro modelování bude použita ta konkrétní redukovaná srážka, pro kterou dojde k největší shodě s návrhovou (=bude nejextrémnější). Tímto způsobem bude odhadnuta doba trvání srážky.

Co se týče extrémních srážkových výšek, události z roku **1991** nejlépe odpovídaly hodnotě 2hodinové srážky (návrhová srážka 94,5 mm; reálná redukovaná srážka 90 mm). **Pro modelaci bude proto uvažována 2hodinová srážková událost**. Události z roku **2010** nejlépe odpovídá srážková výška pro návrhovou **9hodinovou srážku** (návrhová srážka 164,6 mm; reálná srážka 161 mm). Všechny srážkové úhrny budou poníženy plošným redukčním faktorem (ARF).

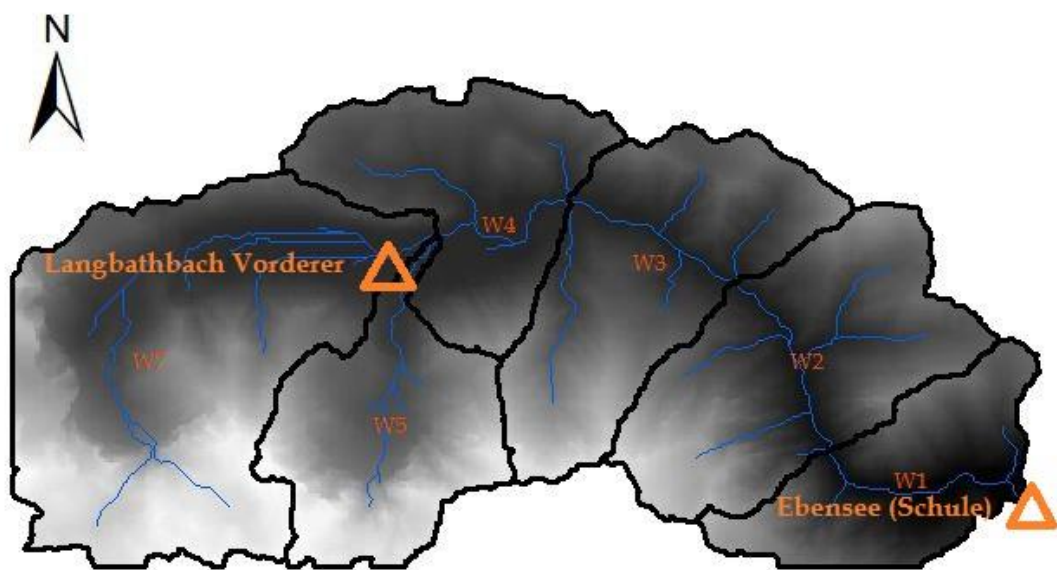
Srážkový úhrn [mm]	Langbathbach Vorderer	Ebensee (Schule)
<b>2. 8. 1991</b>	24hodinový	104,6
	2hodinový	90
	2hod (ARF)	83
<b>4. 7. 2010</b>	24hodinový	45,3
	9hodinový	45,3
	9hod (ARF)	44

Tab. 8: Srážkové úhrny pro Langbathbach

<sup>16</sup> Nevýhodou je, že podobnou distribuci nelze uvažovat i u modelování na povodí Frauenweissenbachu. Návrhové srážky nezbyvá než použít pro celé (85 km<sup>2</sup> velké) povodí.

Díky údajům ze dvou srážkoměrných stanic je dále možné srážku prostorově distribuovat. Extrémní hodnoty tak nebudou použity pro celé povodí (jak již bylo napsáno výše, je velmi nepravděpodobné, že návrhové srážky zasáhnou stejnou intenzitou celé povodí, což mimo jiné dokazují i měřená data). Pro konkrétní subpovodí budou použita data z té srážkoměrné stanice, která se nachází blíže:

- Ebensee (Schule) pro subpovodí W1, W2, W3
- Langbathbach Vorderer pro subpovodí W4, W5, W6, W7



Obr. 23: Subpovodí a srážkoměrné stanice na Langbathbachu

### Výsledné průtoky na Langbathbachu

Výsledné modelované průtoky dobře korelují se skutečnými, naměřenými hodnotami. Bylo tedy ověřeno, že se podařilo nastavit vhodné vstupní parametry a tyto byly následně využity pro tvorbu modelu v HEC-HMS pro povodí Frauenweissenbachu.

V tabulce níže je uveden vždy reálný naměřený průtok, dále průtok, který byl vypočten při plošné distribuci srážek a nakonec průtok, kterého by bylo dosaženo výpočtem, pokud by se uvažovala extrémní návrhová výška pro celé povodí

Langbathbachu. Jak je vidět, poslední hodnoty (při použití konstantní srážky) jsou vyšší než reálná data. Zde je nutné upozornit na fakt, že v následující kapitole, kde jsou řešeny průtoky na povodí Frauenweissenbachu, budou využita data plošná (nedistribovaná) a tedy bude pravděpodobně při výpočtu dosahováno obecně vyšších hodnot. Z neznalosti reálných dat ale není možné volit jinou variantu a je zřejmé, že výpočty se budou pohybovat na straně bezpečnosti – reálná data budou rovná nebo nižší těm vypočteným. Následující tabulka tak rovněž ilustruje, jak zásadní je znalost (i základních) srážkových úhrnů v lokalitě.

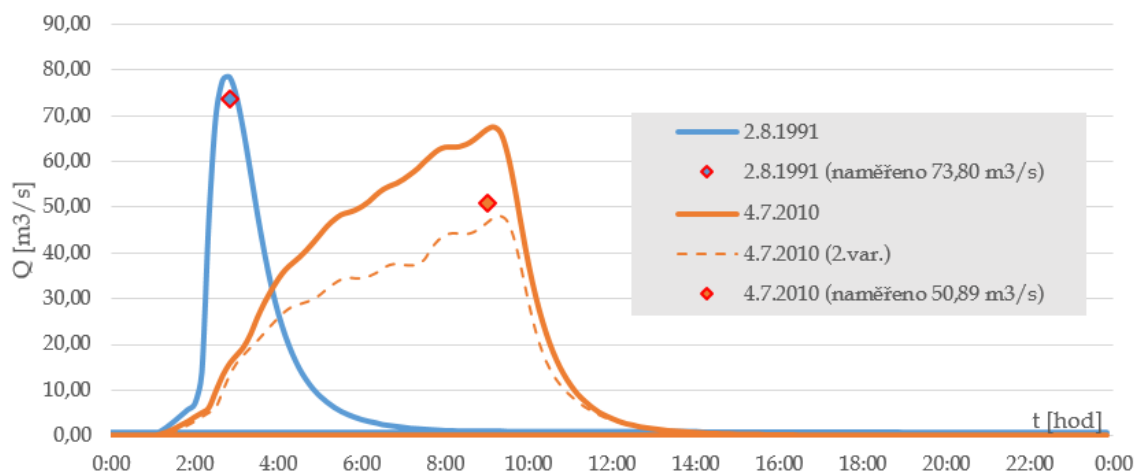
Datum	Průtok [m <sup>3</sup> /s]	
<b>2. 8. 1991</b>	Naměřený	73,80
	Modelovaný (distribuce)	78,40
	Modelovaný (konstantní 2h srážka)	141,40
<b>4. 7. 2010</b>	Naměřený	50,89
	Modelovaný (distribuce)	67,60
	Modelovaný (distribuce – 2. varianta)	47,90
	Modelovaný (konstantní 9h srážka)	119,00

*Tab. 9: Výsledné hodnoty průtoků (Langbathbach)*

V následujícím grafu je znázorněn průběh kulminační vlny pro obě modelované události, přičemž pro každou je navíc bodově zvýrazněna hodnota skutečného kulminačního průtoků v daný den.<sup>17</sup> Z grafu je vidět, že modelovaná 2hodinová srážka z roku 1991 dobře odpovídá reálným datům. U 9hodinové srážky z roku 2010 je modelovaná hodnota vyšší (130% reálné). Začátek července roku 2010 je reálné povodňové datum, při kterém bylo extrémními průtoky zasaženo celé Rakousko. Hodnota této srážky by se teoreticky mohla blížit návrhové 100leté srážce, případně by ji mohla i převyšovat. Dalším faktem je, že odhad průběhu srážky v závislosti na vzdálenosti od srážkoměrné stanice je diskutabilní. Proto byla provedena 2. varianta výpočtu, kdy se uvažovalo s výskytem ohniska srážky více na západ a extrémní srážkou tak byla zasažena menší plocha povodí (subpovodí

<sup>17</sup> Čas reálné kulminace samozřejmě není znám a v grafu je pouze ilustrativní.

W1 a W2). Pro tuto variantu už modelované hodnoty dobře korelují s těmi reálnými. Lze tedy prohlásit, že kalibrace modelu byla provedena úspěšně, ovšem nejistota rozložení návrhové srážky přinese i jistou míru nejistoty výsledků.



Graf 9: Porovnání dat na Langbathbachu: modelovaná vs. reálná

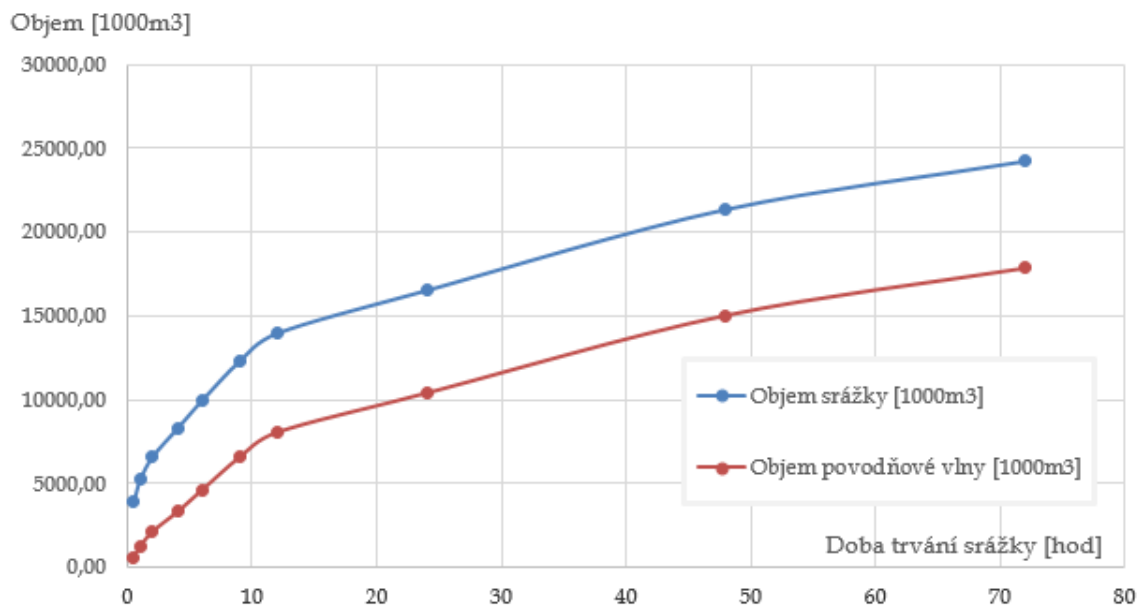
## 9.2 VÝPOČET KULMINAČNÍHO PRŮTOKU NA TOKU FRAUENWEISSENBACH

Výsledné průběhy povodňových vln byly počítány pro všechny navržené návrhové srážky. Jak bylo předpovězeno v kapitole *Návrhová srážka*, nejvyšší průtoky jsou vyvozeny srážkami s dobou trvání rovnou nebo (lehce) vyšší než je doba koncentrace. Jedná se tedy o srážky s dobou trvání 4, 6 a 9 hodin a s kulminačními průtoky okolo **260 m³/s**. Tato střední hodnota byla stanovena jako výsledný  $Q_{100}$ .

NÁVRHOVÁ SRÁŽKA	Trvání [min/hod]									
	30	60	120	240	360	540	720	1440	2880	4320
	0,5	1	2	4	6	9	12	24	48	72
	$h_{n,red}$ [mm]									
	49,2	66,3	83,8	105,3	126,7	156,3	177,3	209,8	271,1	307,5
	$h_{n,red}$ [mm/hod]									
	98,5	66,3	41,9	26,3	21,1	17,4	14,8	8,7	5,6	4,3
Kulminační průtok [m³/s]	63,20	147,40	227,90	258,60	263,90	265,50	254,20	172,40	120,00	92,70

Tab. 10: Kulminační průtoky všech návrhových srážek na Frauenweissenbachu

Výpočet byl proveden v nejkratším možném časovém kroku (1 min). Při výpočtu s delším časovým krokem (5, 10, 15 min) vznikaly ve výsledcích oproti minutovému kroku velké odchylky. Především u kratších srážek byly rozdíly znatelné – i 25%. Jako nejpřesnější byl považován výpočet v nejkratším možném kroku (1 min). Dále byl proveden výpočet celkového objemu povodňové vlny a výpočet odtokového součinitele (množství spadlé srážky, které odteklo povodím). Porovnání s objemem srážky viz Graf 10.



Graf 10: Objem srážky vs. objem povodňové vlny pro srážky s různou dobou trvání

Díky možnosti zobrazit i dílčí výsledky výpočtu (jednak pro dílčí povodí, ale také pro jednotlivé úseky toku) bylo možné odhadnout i rychlost povodňové vlny. Ta byla určena z koryta toku před uzávěrovým profilem a to tak, že byl zjištěn časový rozdíl mezi kulminací na přítoku a na odtoku. Jelikož byl časový krok výpočtu 1 minuta (a ne přesnější), byl spočten interval rychlostí, který zohledňuje tuto nepřesnost (pokud jsou od sebe vrcholy vln časově vzdálené 10 min, interval uvažuje rozpětí od 9 do 11 min). Rychlost byla získána ze znalosti doby, za jakou vlna projde závěrečným úsekem toku (dlouhým 1854,4 m). Nejvyšší rychlost prostupu povodňové vlny je u 6hodinové srážky (střední hodnota je 5,2 m/s, přičemž přípustných je až 6,2 m/s).

Doba trvání srážky [hod]	0,5	1	2	4	6	9	12	24	48	72
Délka úseku [m]	1854,4	1854,4	1854,4	1854,4	1854,4	1854,4	1854,4	1854,4	1854,4	1854,4
Kulminace na přítoku	11Jan, 02:02	11Jan, 02:10	11Jan, 02:53	11Jan, 04:36	11Jan, 06:28	11Jan, 09:25	11Jan, 12:23	12Jan, 00:17	13Jan, 00:10	14Jan, 00:08
Kulminace na odtoku	11Jan, 02:14	11Jan, 02:19	11Jan, 03:00	11Jan, 04:43	11Jan, 06:34	11Jan, 09:32	11Jan, 12:29	12Jan, 00:25	13Jan, 00:19	14Jan, 00:18
Časový rozdíl [min]	12	9	7	7	6	7	6	8	9	10
Časový rozdíl [s]	720	540	420	420	360	420	360	480	540	600
<b>Rychlost [m/s]</b>	<b>2,6</b>	<b>3,4</b>	<b>4,4</b>	<b>4,4</b>	<b>5,2</b>	<b>4,4</b>	<b>5,2</b>	<b>3,9</b>	<b>3,4</b>	<b>3,1</b>
v <sub>min</sub> [m/s]	2,4	3,1	3,9	3,9	4,4	3,9	4,4	3,4	3,1	2,8
v <sub>max</sub> [m/s]	2,8	3,9	5,2	5,2	6,2	5,2	6,2	4,4	3,9	3,4

Tab. 11: Výpočet rychlosti povodňové vlny

Vypočtené hodnoty je možné analyzovat nejenom pro celé povodí Frauenweissenbachu, ale i pro dílčí povodí. Je tak možné porovnávat odezvy konkrétních lokalit na návrhové srážky a především určovat, jaké průtoky byly vypočteny pro uzávěrové profily jednotlivých subpovodí. Pro výrazně menší území (tedy především pro dílčí povodí) je nutné upravit výšky návrhových srážek – použít plošný redukční faktor odpovídající ploše dílčího povodí. Pro výše zmíněnou problematickou lokalitu Gimbach byla nejkritičtější srážka 2hodinová, s celkovým úhrnem po úpravě pro plochu 6 km<sup>2</sup> 91,5 mm. Q<sub>100</sub> v uzávěrovém profilu dílčího povodí Gimbach byl stanoven na 40 m<sup>3</sup>/s. Během povodní v srpnu 2002 byl pozorován průtok 49 m<sup>3</sup>/s. U tohoto údaje není specifikováno, kde bylo kulminace dosaženo a je možné, že se jednalo o profil níže na toku. Další možností je překročení stoletých hodnot, což bylo obecně pro povodně v létě 2002 příznačné.

### 9.3 POZNÁMKA K VÝPOČTU

V HEC-HMS lze libovolně měnit časový rámec simulace (*Control Specifications*). Problémem je, že model často (ale ne vždy) vyžaduje takovou dobu simulace, po jakou je definován srážkový hyetogram. Tzn., že pokud je simulována např. dvouhodinová srážka, ovšem požadovaný výstup je zjištění objemu povodňové vlny a simulace proto probíhá pro mnohem delší dobu (např. 20 dnů), je nutné vložit srážkový hyetogram pro celých 20 dnů (s nulovými hodnotami od 3. hodiny). Jinak model nahlásí chybu („chybějící srážkové údaje“) a výpočet neproběhne. Během výpočtů byla objevena i jiná varianta, jak se s touto komplikací vypořádat. Její postup je zde ve zkratce popsán především pro praktické účely, jelikož se jedná o významné urychlení celého výpočtového procesu:

Postup pro nastavení delší doby simulace:

- První simulace musí nutně proběhnout ve stejném časovém intervalu, v jakém je zadán srážkový hyetogram (níže popisován jako Time-Series Gage) a stejný musí být i časový krok.  
*Př. Time-Series Gage: 11Jan2011 00:00 - 11Jan2011 02:00; Time interval: 5min*  
*Contol Specifications: 11Jan2011 00:00 - 11Jan2011 02:00; Time interval: 5min*
- Další simulace proběhne se změněným časovým krokem  
*Př. Time-Series Gage: 11Jan2011 00:00 - 11Jan2011 02:00; Time interval: 5min*  
*Contol Specifications: 11Jan2011 00:00 - 11Jan2011 02:00; Time interval: 1min*
- Následuje úprava doby simulace s ponecháním upraveného časového kroku  
*Př. Time-Series Gage: 11Jan2011 00:00 - 11Jan2011 02:00; Time interval: 5min*  
*Contol Specifications: 11Jan2011 00:00 - 21Jan2011 00:00; Time interval: 1min*
- Není možné následně vrátit časový krok na původní hodnotu s ponecháním prodloužené doby simulace.
- Tato chyba se vyskytuje méně často u novějších verzí HEC-HMS (4.1)

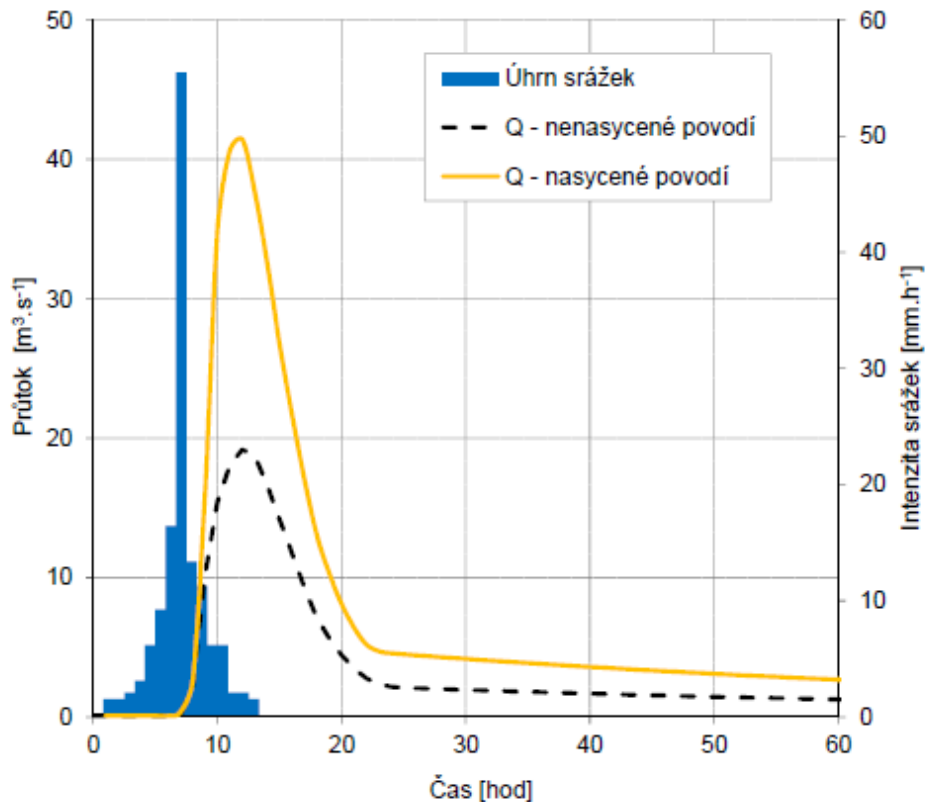
## 10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Na toku Frauenweissenbach bylo provedeno modelování extrémních průtoků za použití návrhových  $n$ -letých srážek odvozených z rastrové sítě imaginárních bodů. Jak již bylo mnohokrát v této práci zmíněno, pro úspěšný návrh  $n$ -letých průtoků na povodí je nezbytně nutné znát průběhy reálných srážek, na základě kterých je možné model kalibrovat. Tato diplomová práce se zabývala především možnostmi předpovědět extrémní průtoky i při neznalosti základních srážkových dat. Pro takový případ je z hlediska bezpečnosti výpočtu nutné uvažovat nejhorší možné srážkové události, a tedy vyvozovat nejhorší možné průtokové odezvy. Tomu odpovídá například diskuze výsledků v rámci kalibrace modelu (u povodí Langbathbach, na kterém byla kalibrace provedena, jsou určitá reálná srážková i průtoková data známa). Právě tam (v kapitole *Kalibrace modelu na povodí toku Langbathbach*) byla provedena diskuze výsledků, která přinesla reálné upravené hodnoty. Ty se opíraly o skutečné údaje, které byly do modelace zohledněny.

V této kapitole by mělo zaznít, že i pro povodí Frauenweissenbach jsou předloženy hodnoty, které by mohly být dále upravovány. Aby to bylo umožněno, bylo by třeba umístit na území srážkoměrná měření a k uzavěrovému profilu kontinuální měření průtoků a posuzovat reálné srážkové události. V takovém případě by se jednalo o značně nákladné řešení. Pro tuto práci je klíčové, že byly určeny extrémní průtoky, které lze v dané lokalitě očekávat a že byl nastaven takový srážko-odtokový model, kde je tato následná úprava umožněna. V tuto chvíli by bylo možné zabývat se distribucí jednotlivých srážek na povodí Frauenweissenbachu. Variant pro plošné rozmístění srážek je ovšem bezpočet a prezentace těchto výsledků by mohla vydat na další diplomovou práci s jediným jasným výsledkem: extrémní průtoky by při zvážení distribuce srážky byly menší než extrémní průtoky uvažované pro konstantní srážky.

Je třeba také upozornit na fakt, že u návrhových srážek nelze předpokládat míru předchozího stavu nasycení povodí, který má významný vliv na odtokové odezvy (dobře toto dokládá např. srpnová povodeň z roku 2002). Je to patrné i z následujícího grafu.





Graf 11: Odezva na srážkový úhrn (různý stupeň nasycení povodí) [18]

Tato práce se zabývala srážko-odtokovým modelováním. Je třeba upozornit na fakt, že v rakouských Alpách se téměř nikdy nesetkáme s „čistým“ povodňovým průtokem. Čistý je zde myšleno v tom smyslu, že nelze očekávat pouze přesun vody, nýbrž suspenze vody a splavenin (tzv. debris flow). V případě debris flow se do vody uvolňuje obrovské množství splavenin, pocházejících z různých sesuvů, které jsou pro nestabilní podloží typické. Objem povodňové vlny pak významně narůstá a k němu exponenciálně roste i rychlost prostupu vlny. Pro modelování pohybu splavenin je určen například software TomSed, vyvíjený na katedře horského rizikového inženýrství na univerzitě BOKU (modelování pomocí softwaru TomSed značně převyšuje zadání této práce a nebylo proto do výpočtů zahrnuto).

## 11 ZÁVĚR

V této diplomové práci byla provedena hydrologická analýza povodí toku Frauenweissenbach. Z dostupných údajů byly stanoveny veškeré potřebné vstupní parametry pro modelování v software HEC-HMS. Naprostá většina údajů pocházela z veřejně přístupných zdrojů. Hlavním cílem práce bylo vypořádat se s nedostatkem vstupních informací a určit extrémní návrhový průtok. Analyzovány byly 100leté srážky s dobou trvání od 30 min do 72 hod. Bylo zjištěno, že nejkritičtější jsou srážky s dobou trvání 4, 6 a 9 hodin (tedy reálné srážkové události trvající zhruba od 4 do 9 hod). Extrémní průtok ( $Q_{100}$ ) pro tok Frauenweissenbach byl stanoven na  $260 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Práce byla zpracována během zahraniční stáže na univerzitě BOKU Wien. Na katedře horského rizikového inženýrství probíhal v letech 2014 – 2015 projekt zaměřený na stabilizaci dílčího povodí Gimbach, v rámci něhož byly vypracovány i výše prezentované výsledky. Ty budou následně použity pro vypracování koncepce rekonstrukce stávajících objektů na tomto toku a jemu přilehlých stržích.

## **BIBLIOGRAFIE**

1. SCHARFFENBERG, William A. *Hydrologic modeling system HEC-HMS: User's Manual: Version 4.0* [online]. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center, 2013. [cit. 2015-10-15]. Dostupné z: [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Users\\_Manual\\_4.0.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.0.pdf)
2. EISL, Julia a Susanna TSCHARNER. *Geschiebemanagementkonzept Gimbach*. Wien, 2015. Report. Universität für Bodenkultur Wien; Department Bautechnik und Naturgefahren; Institut für Alpine Naturgefahren (IAN). Vedoucí práce Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hübl Johannes.
3. *Horniny sedimentární* [online]. Brno: Ústav geotechniky Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, 2016 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://geotech.fce.vutbr.cz/studium/geologie/skripta/SEDIMENT.htm>
4. ORŠULÁK, Tomáš. *3D modelování a virtuální realita* [online]. Ústí nad Labem: Centrum pro virtuální realitu a modelování krajiny, 2010 [cit. 2016-05-17]. ISBN 80-XX-XXX-XX. Dostupné z: <http://gis.fzp.ujep.cz/DTM/3d.pdf>
5. *What is the difference between a DEM and a DTM?* U.S. Geological Survey [online]. 2016 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://www2.usgs.gov/faq/node/5071/>
6. *Der Zugang zu hydrographischen Daten Österreichs* [online]. 2002 [cit. 2015-10-17]. Dostupné z: <http://ehyd.gv.at/>
7. FLEMING, Matthew J. a James H. DOAN. *HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension): User's Manual: Version 10.1* [online]. Davis, CA: Hydrologic Engineering Centre, 2013 [cit. 2015-10-15]. Dostupné z: [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS\\_Users\\_Manual\\_10.1.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf)

8. VOLOŠ, Boris. *Odvozování povodňových vln deterministickými přístupy*. In: Katedra hydrauliky a hydrologie - K141 [online]. Praha: ČVUT, Katedra hydrauliky a hydrologie, 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/vyzkum/nejistoty/hydrologie/odvozeni.html>
9. *Hydrology handbook* [online]. 2nd ed. New York: ASCE (American Society of Civil Engineers), c1996 [cit. 2015-10-27]. ISBN 07-844-0138-1. Dostupné z: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043063>
10. *Problematika stanovení drsnosti koryta (přednáška)*. In: Proudění v systémech říčních koryt [online]. Brno: VUT: Ústav vodních staveb [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [http://vst.fce.vutbr.cz/wp-content/uploads/2012/01/BR52\\_prednaska\\_09.pdf](http://vst.fce.vutbr.cz/wp-content/uploads/2012/01/BR52_prednaska_09.pdf)
11. TRITTHART, Michael. *Model treatment of the flow resistance and calibration of hydrodynamic models* [PDF]. Wien: BOKU Wien, 2015.
12. WEILGUNI, Viktor. *Ehyd bemessungs-niederschlag* [PDF]. Wien: Österreich, ministerium für ein lebenswertes, 2015.
13. STARÝ, Miloš. *Hydrologie. Skripta*. Brno: České učení technické v Brně, 2005
14. DOSTÁL, Tomáš a kol. *Využití dat a nástrojů GIS a simulačních modelů k navrhování TPEO: Metodika* [PDF]. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.; České vysoké učení technické v Praze, 2014.
15. LANGOUSIS, Andreas. *ARF: a multifractal analysis*. In: DSpace@MIT [online]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2005 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/30196>

16. K., Pyrl. *Sestavení a kalibrace simulačních modelů*. In: EKODISK [online]. 2008 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/ris/ais-ris-info-copy.nsf/4d735ff9c7e64b58c12569e7001a2d9c/34161b4f3f3514f7c1256c370072c894?OpenDocument>
17. VLÁČILOVÁ, Markéta a Tomáš LABURDA, *Návrh protierozních opatření*. In: *Potierozní ochrana - prezentace ke cvičení PROZ*. Praha: ČVUT, 2014.
18. JENÍČEK, Michal. *Metody a nástroje zpracování hydrologických dat*. In: *Katedra fyzické geografie a geoekologie* [online]. Praha: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, 2012 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/download.php?akce=dokumenty&cislo=41>
19. VICAIRE. *Urban hydrology*. In: *Virtual CAmpus In hydrology and water REsources* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: [http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod\\_1b/chapt\\_10/main.htm](http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_1b/chapt_10/main.htm)
20. JANEČEK a kol. *Ochrana zemědělské půdy před erozí* [online]. Praha: ČZÚ Fakulta životního prostředí, 2012 [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: [http://fzp.czu.cz/vyzkum/metodiky/Methodika\\_Ochrana\\_zemedelske\\_pudy\\_pred\\_erozi.pdf](http://fzp.czu.cz/vyzkum/metodiky/Methodika_Ochrana_zemedelske_pudy_pred_erozi.pdf)
21. KOLÁŘ, Pavel. *Optimalizace vodního režimu krajiny ke snižování dopadů hydrologických extrémů* [online]. Praha: Katedra biotechnických úprav krajiny, FŽP ČZÚ v Praze, 2015 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: [http://fzp.czu.cz/vyzkum/metodiky/TA02020402\\_PKOVAR2015/certifikovana\\_metodika.pdf](http://fzp.czu.cz/vyzkum/metodiky/TA02020402_PKOVAR2015/certifikovana_metodika.pdf)

# SEZNAMY

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Charakteristické údolí v povodí Frauenweissenbach .....	7
Obr. 2. Pohled na horní tok povodí.....	8
Obr. 3: Poloha povodí Frauenweissenbachu .....	9
Obr. 4: Sklonitostní poměry .....	11
Obr. 5: Pohled do strže Finsterwaldgraben .....	12
Obr. 6: Povodí Gimbachu v rámci zájmového území .....	14
Obr. 7: Historické hrazení na toku Gimbach .....	15
Obr. 8: Poničená kamenná přehrážka – strž Holzschlaggraben na povodí Gimbach	16
Obr. 9: Poničené dřevěné hrazení – strž Schuttinggraben na povodí Gimbach.....	16
Obr. 10: Původní zaměření hladiny jezera (vrstevnice s ekvidistantou 1 m dle vstupního DEM).....	18
Obr. 11: Srážkoměrné a vodoměrné stanice v oblasti .....	21
Obr. 12: Rastrová síť odvozených n-letých srážek .....	21
Obr. 13. Upravený DEM s vyznačenými hodnotami s kótou 649,55 m n. m. a nižší (červeně vyznačeno jezero – v tomto případě jako bezodtoká plocha) .....	23
Obr. 14 Dílčí povodí W1 – W9 .....	25
Obr. 15 Průtokové dráhy dílčích povodí.....	26
Obr. 16. Průměrné CN na každém dílčím povodí .....	29
Obr. 17: Jezero Offensee.....	32
Obr. 18: Rastrová síť srážkových údajů .....	36
Obr. 19: Body rastrové sítě pro odvození návrhové srážky na zájmovém území .....	37
Obr. 20: Prostředí HEC-HMS.....	44
Obr. 21. Srovnání vlivu stromovité a vějířovité říční sítě na průběh odtoku [13].....	49
Obr. 22: Měřená data na území.....	50
Obr. 23: Subpovodí a srážkoměrné stanice na Langbathbachu .....	53

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Klasifikace LandUse pro přiřazení hodnot CN .....	28
Tab. 2: Hodnoty CN [9].....	28
Tab. 3. Vstupní údaje pro metodou jednotkového hydrogramu.....	31
Tab. 4: Porovnání srážkových výšek .....	37
Tab. 5: Návrhové srážkové výšky a srážkové intenzity na Frauenweissenbachu .....	37
Tab. 6: Návrhové srážky upravené podle ARF .....	40
Tab. 7: Historické události na Langbathbachu [6] .....	51
Tab. 8: Srážkové úhrny pro Langbathbach .....	52
Tab. 9: Výsledné hodnoty průtoků (Langbathbach).....	54
Tab. 10: Kulminační průtoky všech návrhových srážek na Frauenweissenbachu .....	55
Tab. 11: Výpočet rychlosti povodňové vlny .....	57

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Procentuální rozložení ploch dle využití .....	13
Graf 2: Charakteristické křivky nádrže .....	33
Graf 3: Konsumpční křivka (jezero Offensee) .....	34
Graf 4: Návrhové srážky s dobou trvání 2 hod pro konkrétní bod rastru vyhodnocené dle různých scénářů [12] .....	35
Graf 5: Rozložení návrhových srážek .....	40
Graf 6: Změna kulminačního průtoku Frauenweissenbachu při zvýšení dílčích CN o 5 (2hodinová srážka) .....	42
Graf 7: Změna kulminačního průtoku na Frauenweissenbachu při výrazné úpravě šířky koryta (2hodinová srážka) .....	42
Graf 8: Kulminační průtok na Frauenweissenbachu s krajními hodnotami Manningova součinitele .....	43
Graf 9: Porovnání dat na Langbathbachu: modelovaná vs. reálná .....	55
Graf 10: Objem srážky vs. objem povodňové vlny pro srážky s různou dobou trvání .....	56
Graf 11: Odezva na srážkový úhrn (různý stupeň nasycení povodí) [18] .....	60



# **SEZNAM PŘÍLOH**

- I. ZÁKLADNÍ MAPA**
- II. MAPA HYDROLOGICKÝCH SKUPIN PŮD**
- III. LANDUSE**