



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ ZÁSOBNÍHO OBJEMU NÁDRŽE V PODMÍNKÁCH ZMĚNY KLIMATU

WATER MANAGEMENT ANALYSIS OF RESERVOIR STORAGE CAPACITY UNDER
CLIMATE CHANGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Smolík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. DANIEL MARTON, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lukáš Smolík
Název	Vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže v podmínkách změny klimatu
Vedoucí práce	doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

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

KNOPPOVÁ, K., MARTON, D. Srážko-odtokový model pro dlouhodobé prognózy v podmínkách klimatické změny. In Konference s mezinárodní účastí "Hospodaření s vodou v krajině". 1. Třeboň: Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds), 2018. s. 1-12. ISBN: 978-80-87361-83-2.

2. MARTON D., Nejistoty zatěžující vodohospodářské řešení zásobního objemu údolní nádrže. Brno, 2018. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny.

3. MARTON D., KNOPPOVÁ K. Robust Reliability Assessment of Water Reservoir Under Uncertainty of Climate Change. In HIC 2018. 13th International Conference on Hydroinformatics. EPiC Series in Engineering. EPiC Series in Engineering. Manchester: The EPiC Series: EasyChair Proceedings and Collections, 2018. s. 1316-1323. ISSN: 2516-2330.

4. SEMENOV M.A., BARROW E.M., LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies User Manual - version 3.0. Rothamsted Research, UK, 2002.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Klimatická změna je stále častěji skloňována a diskutována nejen v odborných, ale i společenských kruzích. Sucho mezi lety 2015 až 2018 tyto diskuze jen zesílily. Nedostatek vody ve zmiňovaném suchém období podpořilo debaty o výstavbě nových vodních nádrží v ohrožených regionech ČR. Cílem diplomové práce je analýza zásobního objemu nádrže v podmínkách změny klimatu. K provedení práce bude třeba použít následující nástroje: i) generátor počasí, ii) lumped bilanční hydrologický model a iii) simulační model zásobního objemu nádrže. Získané výsledky řádně vyhodnotit pomocí vhodných statistických metod. Praktická aplikace bude provedena pro povodí řeky Vlárky v hájeném profilu Vlachovice.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce je zpracována z několika dílčích kroků. Prvotním krokem je kalibrace a validace hydrologického modelu s pomocí reálných meteorologických a hydrologických dat použitím bilančního hydrologického modelu v programu Runoff Prophet. Dále pomocí odpovídajícího statistického downscalingu v programu LARS WG. Vytvořit soubory klimatologických dat s uvažováním změny klimatického systému. Provedení hydrologické transformace klimatologických dat hydrologickým modelem sestavit soubory hydrologických řad pro povodí řeky Vlára. Hydrologické data přepočítat k tělesu hráze pro přítok řeky Vlára včetně převodů vody z povodí toků Sviborky a Smolinky. Posledním krokem práce je provedení analýzy zásobního objemu a jeho příslušného nalepšeného odtoku vody z nádrže a posouzení vlivu změny klimatu na zásobní objem nádrže.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zásobní objem nádrže, Nalepšený odtok, Zabezpečení, Emisní scénář RCP, Vlachovice

ABSTRACT

The thesis is processed from several partial steps. The first step is to calibrate and validate the hydrological model using real meteorological and hydrological data using the balance hydrological model in Runoff Prophet. Furthermore, using the corresponding statistical downscaling in the LARS WG program. Create climatological data sets considering climate change. Hydrological transformation of climatological data by hydrological model to compile sets of hydrological series for Vlára river basin. Recalculate the hydrological data to the body of the dam for the tributary of the Vlára River, including water transfers from the basins of the Sviborka and Smolinka streams. The last step of the work is to analyze the storage volume and its respective improved water outflow from the tank and to assess the impact of climate change on the storage volume of the tank.

KEYWORDS

Water tank storage volume, Improved water drainage, Secured, Emission scenario RCP, Vlachovice

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Lukáš Smolík *Vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže v podmínkách změny klimatu*. Brno, 2020. 75 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže v podmínkách změny klimatu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 9. 1. 2020

Bc. Lukáš Smolík
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže v podmínkách změny klimatu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 1. 2020

Bc. Lukáš Smolík
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Velké poděkování patří především vedoucímu doc. Ing. Danielu Martonovi, Ph.D. za jeho přístup, vystupování a to, že mi byl skvělým rádčem, učitelem a především vzorem pro dokončení samotné práce a studia. Poděkování také patří tvůrcům programů, především Runoff Prophet a Unce Clima Change (Knoppová, Marton). Programy byly uživatelsky velmi přijatelné a hlavně velkou úsporou času při plnění výpočtů. V neposlední řadě děkuji své přítelkyni za neúnavnou a milující podporu během magisterského studia.

Obsah

Obsah	6
Úvod	8
Klimatický systém Země, Klimatické modely, Emisní scénáře	9
EC-Earth.....	11
Had-GEM-ES.....	11
MIROC	11
MPI-ESM-MR	11
RCP 2,6	14
RCP 4,5	14
RCP 6,0	14
RCP 8,5	14
Cíl práce.....	16
Metodika	17
Runoff Prophet.....	17
Lars-WG.....	20
Klimatické modely, Emisní scénáře	22
Biaskorekce	23
Unce Clima Change	25
Zásobní prostor v nádrži.....	26
Výpočet zásobního objemu se 100 % zabezpečeností odtoku	26
Zabezpečení odtoku vody z nádrže podle doby trvání	26
Praktická aplikace.....	27
Zájmové území	27
Postup výpočtů.....	31
Příprava dat.....	32
Kalibrace.....	32
Predikce.....	32
Vygenerování emisních scénářů	34
Kalibrace scénářů	44
Predikce scénářů	44
Biaskorekce	48
Převod vody	50
Zásobní objem pro 100 % zabezpečení odtoku vody z nádrže	52
Zabezpečení nalepšeného odtoku vody z nádrže	56

Vyhodnocení výsledků	57
Závěr.....	67
Seznam citací.....	69
Seznam grafů.....	71
Seznam tabulek.....	73
Seznam obrázků	74

Úvod

Dopad lidské činnosti na klimatické podmínky na naší planetě, včetně průměrných teplot, se neustále stupňuje. Tím vzniká obrovské množství skleníkových plynů, jež zvyšují objem přirozeně se vyskytujících plynů tohoto typu v atmosféře a zintenzivňují skleníkový efekt. Nejběžnějším skleníkovým plynem, který v důsledku lidské činnosti vzniká, je CO₂. Ten je zodpovědný za 63 % globálního oteplování způsobeného člověkem. [1]

Pokud se průměrná globální teplota zvýší o více než 2 °C v porovnání s teplotou v předindustriálním období, znamenalo by to mnohem vyšší riziko, že nastanou katastrofické změny v životním prostředí. Nejen z těchto důvodů byla v prosinci roku 2015 přijata, smluvními stranami Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu, tzv. Pařížská dohoda. Tato dohoda provádí ustanovení Úmluvy a po roce 2020 má nahradit dosud platný Kjótský protokol. [2]

Ačkoliv více než 70 % světové plochy je pokryto vodou, jsou pouhá 2,5 % ze všech vodních zdrojů vodou sladkou. A z toho jsou většina polární ledovce nebo voda podzemní. Navíc zásoby vody na planetě jsou velmi nerovnoměrně rozloženy. Na Zemi tedy v podstatě voda nechybí, ale malé množství vody sladké, čisté a pitné tento termín v lidské komunitě vyvolává. I obyvatelé České republiky jsou s problémy nedostatkem pitné vody, extrémních teplot a dlouhotrvajících dob sucha obeznámeni. Vláda České republiky, respektive Ministerstvo zemědělství, v dohodě s Ministerstvem životního prostředí pořídilo Generel území chráněných území pro akumulaci povrchových vod. [3]

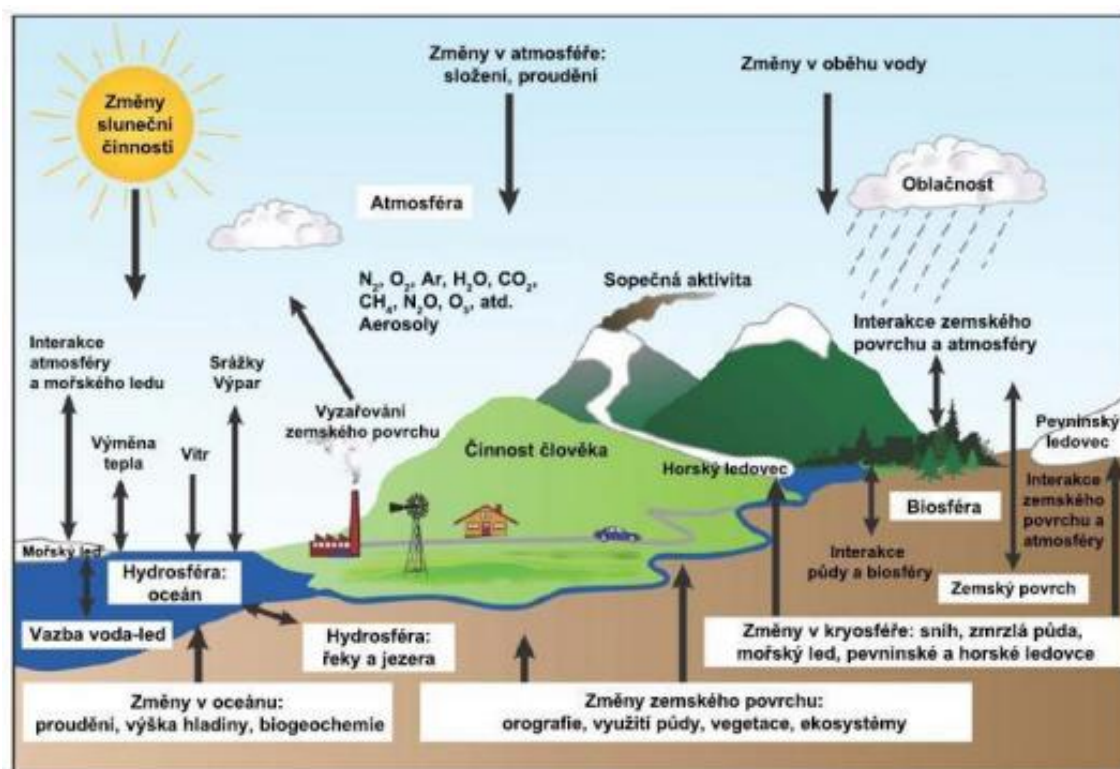
Umět předpovídat budoucí vodní bilanci je pro hydrology důležitou schopností pro podniknutí vhodných opatření. Predikce hydrologických situací, je možná za předpokladu, že jsme schopni popsat fungování srážko-odtokových poměrů. Jde o velmi složitý koloběh vody v přírodě, kde vyjádření vztahů mezi odtokem a meteorologickými daty není jednoduchou záležitostí. Tento proces dokáže simulovat srážko-odtokové modely, díky kterým můžeme predikovat příslušné hydrologické veličiny na základě informací o srážkách, teplotách a charakteristice povodí. Modelováním srážko-odtokových procesů můžeme odhadnout budoucí průtoky v recipientech, upravovat objemy vodních nádrží s ohledem na budoucí klima.

Řešení projevů měnícího se klimatu, si vyžadují dva způsoby reakcí. Jedním je politický přístup, zaměřený na přípravu opatření na postupné snižování emisí skleníkových plynů. Omezení emisí těchto plynů se stala pro řadu vyspělých zemí prioritou. I kdyby se však podařilo snížit světové emise, bude klimatický systém Země potřebovat určitý čas na „zotavení“. Odhaduje se, že i tak bychom museli dopadům současných změn čelit nejméně následujících padesát let. Jelikož nelze předpokládat, že se v nejbližší době podaří pouhým snižováním emisí rizika dopadů probíhajících změn zcela odvrátit, je třeba vzít v potaz i možnost druhé reakce. Tou je implementace opatření, zaměřených na postupné přizpůsobování nejzranitelnějších oblastí včetně složek řízených a neřízených přírodních ekosystémů. Oba přístupy musí probíhat cíleně, musí být vzájemně propojené. Adaptace jednotlivých částí přírodních ekosystémů již probíhají, často však převážně přirozenou cestou a nesystematicky. [4]

Klimatický systém Země, Klimatické modely, Emisní scénáře

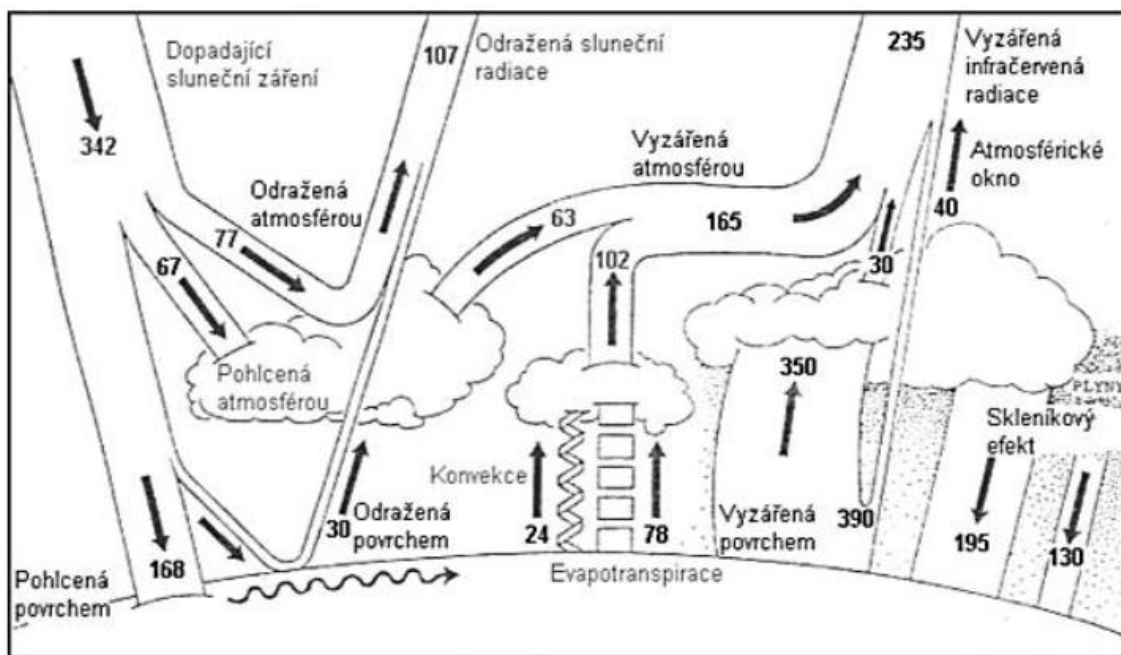
Klima neboli podnebí je dlouhodobý charakteristický režim počasí podmíněný energetickou bilancí, cirkulací atmosféry, charakterem aktivního povrchu a lidskou činností. Lze ho charakterizovat pomocí průměrných hodnot meteorologických prvků doplněných o extrémy a četnosti jejich výskytu. Důležitým aspektem klimatu daného místa jest průměrný roční chod meteorologických prvků a jejich průměrná meziroční variabilita. [5]

Pro utváření klimatu je důležité nejen chování atmosféry, ale zásadní význam má i oceán a vzájemná interakce těchto dvou systémů. Velkou roli mají i biosféra a kryosféra. Všechny tyto složky jsou součástí klimatického systému. Zanedbat nelze ani vlivy působící na klimatický systém zvnějšku – např. skleníkový efekt. Klimatický systém se neustále proměňuje a vyvíjí. [5]



Obrázek 1 - Schéma základní části klimatického systému Země [6]

Zdrojem energie přirozených procesů na planetě Zemi je Slunce. Planeta přijímá energii ze Slunce v podobě krátkovlnného záření a vydává energii dlouhovlnného záření. Tím je zajištěna určitá rovnováha mezi oteplováním a ochlazováním Země. Sluneční krátkovlnné záření je během své cesty k zemskému povrchu v atmosféře rozptylováno molekulami plynů a tím je pozměněna intenzita záření, které dopadne na povrch planety. Absorpce tohoto záření v atmosféře způsobuje její ohřev. Záření, které se dostane k zemskému povrchu je buďto pohlceno anebo odraženo zpět. Je-li záření pohlceno, dochází k ohřevu povrchu, který následně vyzařuje dlouhovlnné záření. Část tohoto dlouhovlnného záření je v atmosféře absorbováno molekulami plynů, které jsou nazývány skleníkovými plyny. Množství dlouhovlnného záření vyzářeného atmosférou závisí na koncentracích skleníkových plynů, především CO_2 . Tento jev, kdy atmosféra skrze skleníkové plyny absorbuje dlouhovlnné záření a následně ho vyzařuje zpět k povrchu se nazývá skleníkový efekt. [6]

Obrázek 2 - Schéma globální radiační bilance, uvedená čísla ve W/m^2 [13]

Pozemský klimatický systém představuje jednu z nejkompexnějších soustav studovaných současnou fyzikou. Základní rysy jeho chování lze popsat pomocí fyzikálně-chemických modelů řešených metodami numerické matematiky. V současnosti nejrozšířenějším typem klimatického modelu jsou globální klimatické modely (GCM), tedy modely všeobecné cirkulace atmosféry spojené s modelem oceánu, kryosféry, popřípadě i modelem biosféry či chemickým modelem. Klimatický model musí zohlednit i další složky klimatického systému a vazby mezi nimi. Především se jedná o tepelnou výměnu, přenos vlhkosti mezi atmosférou, oceánem a kryosférou. Tím se původně modely všeobecné cirkulace atmosféry stávají modely systému Země a představují základní nástroj současné klimatologie. [5]

Globální klimatické simulace jsou velmi složité na samotný výpočet. Jejich horizontální rozlišení se pohybuje od jednoho do 3,5 stupně zeměpisné šířky/délky. Vzhledem k hrubému rozlišení nedokáží GCM věrně simulovat klima na menších měřítkách, a proto se využívají techniky zmenšování měřítka, tzv. downscalingu, tedy regionálního klimatického modelu. Jedná se o model atmosféry, podobný jako atmosférická část GCM, ovšem výpočet neprobíhá pro celou planetu Zemi, ale pouze na omezené území. Globální i regionální klimatické simulace jsou i přes zjemňující se prostorové rozlišení zatíženy mnoha nejistotami. [5]

Klimatické modely ve své podstatě představují numerickou reprezentaci klimatického systému a jsou v současné době jedinou možností o poskytnutí informací ohledně budoucího klimatu. Každá výzkumná organizace kdekoliv ve Světě má k dispozici své vlastní klimatické modely. Níže jsou uvedeny charakteristiky vybraných GCM v této práci.

EC-Earth

Model evropského systému. EC-Earth je vyvíjen jako součást celoevropského konsorcia, čímž podporuje mezinárodní spolupráci a přístup k široké databázi. Hlavním cílem je vyvinout a použít model založený na systému sezónního předpovídání pro poskytování důvěryhodných informací o klimatu a pro vědecké poznatky o systému Země, jeho předvídatelnosti a dlouhodobých změnách. [7]

Model popisuje globální klimatický systém a jeho vývoj v čase kombinací fyzikálních a biogeochemických procesů. Aktuální verze EC-Earth 3 je založena na modelu atmosférické cirkulace, aktuální verze oceánského modelu, dynamickým vegetačním modelem a složením atmosféry a aerosolového modelu. [8]

Had-GEM-ES

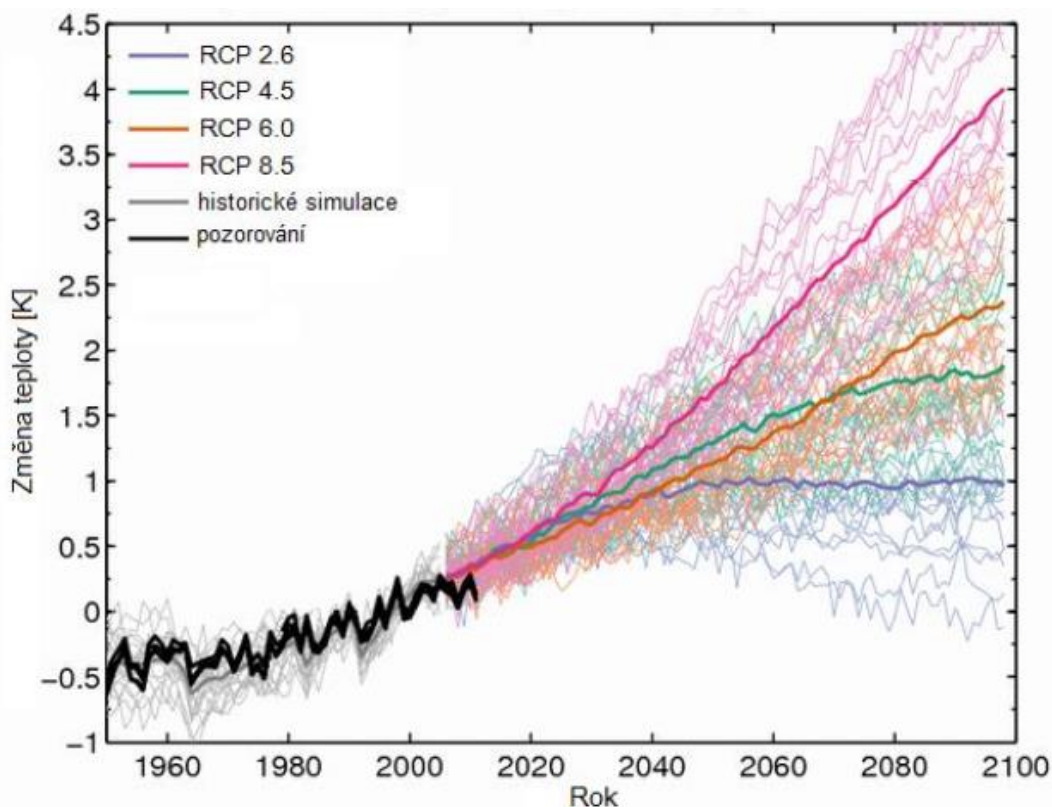
Had-GEM2-ES je klimatický model zahrnující atmosférický GCM při horizontálním a vertikálním rozlišení a oceánský GCM s jedno stupňovým horizontálním rozlišením a čtyřiceti vertikálních úrovní. Součástí systému jsou zemský a oceánský uhlíkový cyklus a troposférická chemie. Pozemskou vegetaci a uhlík představuje dynamický globální vegetační model, který simuluje pokrytí a rovnováhu uhlíku pěti druhů vegetace. [9]

MIROC

Model je podrobně popsán z hlediska jednotlivých složek modelu a jejich vzájemných interakcí. Výsledky pro simulační projekt jsou sestaveny tak, aby demonstrovaly výkon modelu z několika perspektiv, a to atmosféru, oceán, mořský led, zemský povrch, oceánská a suchozemská biogeochemie a atmosférická chemie a aerosoly. Historický vývoj a globální distribuce ozonu a množství troposférických aerosolů jsou v modelu simulovány na základě historických emisí RCP. [10]

MPI-ESM-MR

Model spojuje atmosféru, oceán a povrch půdy výměnou energie hybnosti, vody a oxidu uhličitého. Je založen na složkách pro atmosféru, oceán, pozemní biosféru a biogeochemii oceánů. [11]



Obrázek 3 - Změny průměrné globální teploty podle CMIP5 za použití 20 modelů pro každý RCP emisní scénář [13]

K tvorbě emisních scénářů se uchylujeme v situaci, kdy rozumíme poměrně dobře kauzalitě (např. více obyvatel produkuje více emisí), ale nedokážeme odhadnout, jakým způsobem se společnost bude chovat. Přijmeme-li fyzikálně zdůvodněnou teorii významu CO_2 a skleníkových plynů ve vztahu k vývoji klimatu, je logické pokusit se odhadnout další vývoj. Nicméně je třeba připomenout, že vývoj emisí bude záviset na základních paradigmatech lidské společnosti. [12]

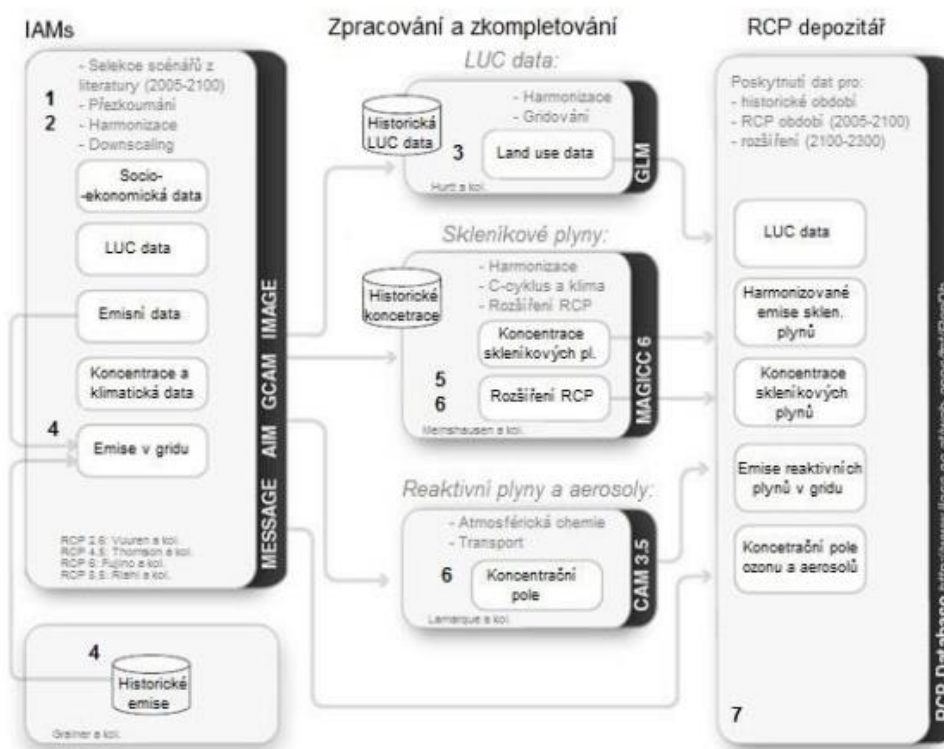
Pro Pátou hodnotící zprávu IPCC definovala vědecká komunita sérii čtyř nových scénářů, které se nazývají Reprezentativní směry vývoje koncentrací (RCP). Jsou označeny podle přibližného celkového zesílení skleníkového efektu ve Watech na metr čtvereční v roce 2100 v porovnání s rokem 1750. Tyto scénáře zahrnují jeden zmírňující opatření, jež vede k velmi nízké úrovni vlivu a je považován za velmi nepravděpodobný. Dále obsahuje dva stabilizační scénáře, u nichž se předpokládá cílená aktivita zmařená na dosažení stanovené cílové koncentrace oxidu uhličitého. Poslední scénář se vyznačuje velmi vysokými emisemi skleníkových plynů a lze tedy předpokládat vývoj bez jakéhokoliv ohledu na emise radiačně aktivních plynů. [12]

Nejnovějším souborem emisních scénářů jsou Representative Concentration Pathways (RCP), který byly publikovány v Páté hodnotící zprávě IPCC. RCP nebyly vytvořeny jako komplexní emisní scénáře, ale spíše jako soubory popisující alternativní trajektorie emisí, koncentrací a land use dat, které stojí na začátku procesu vytváření klimatických projekcí. Díky těmto scénářům je možné prozkoumat vhodnost a efektivnost rozdílných dlouhodobých klimatických cílů. [6]

RCP jsou tzv. koncentrační scénáře, které byly vytvořeny na základě výstupů z IAM modelů s přihlédnutím na kritéria, která si definovali zástupci jednotlivých modelovacích komunit:

- RCP scénáře by měly reprezentovat celou škálu emisí a koncentrací publikovanou v literatuře, a zároveň by měly poskytovat možný popis budoucnosti,
- RCP by měly být schopny poskytnout data o všech proměnných nutných pro běh současných komplexních klimatických modelů v geografické formě,
- RCP by měly pracovat se stejnými daty emisí a land use pro výchozí rok a zároveň umožnit jednoduchý přechod mezi analýzami historických a budoucích období,
- RCP by měly projektovat pro období do roku 2010, avšak zároveň poskytovat informace pro další staletí využitelné ve studiu dlouhodobých klimatických procesů. [6]

Samotná tvorba RCP scénářů probíhala v sedmi krocích (viz obrázek 5). Prvním krokem byl výběr doposud publikovaných. Z vhodných scénářů byly posléze vybrány čtyři úrovně radiačního působení, podle kterých jsou i pojmenovány. Data vybraných scénářů byl upravena tak, aby odpovídala požadavkům integrovaných vyhodnocovaných modelů, a aby všechny scénáře užívaly stejné výchozí emisní a land use data. Dalším krokem byla harmonizace a downscalingu emisních a land use dat. Následovalo použití klimatických modelů pro převod emisních dat na koncentrace a vytvoření rozšíření RCP pro období 2100-2300. [6]



Obrázek 4 - Schéma postupu vývoje RCP

RCP 2,6

Jde o mitigační scénář, který zastupuje skupinu scénářů z literatury, které vedou k velmi nízkým emisím a koncentracím skleníkových plynů díky včasné aplikaci velmi striktních mitigačních opatření, a rychlému zavedení technologií umožňujících redukci emisí.

- emise CO₂ kulminují okolo roku 2020, poté pokles až k záporným hodnotám v roce 2100
- vzrůstající koncentrace CO₂ vrcholící v roce 2050, poté pomalý pokles v roce 2100
- průměrná hodnota oteplení během tohoto století činí 1 °C
- populace přes 9 miliard v roce 2100
- snížení spotřeby ropy, vysoká spotřeba biopaliv, zvýšení využití obnovitelných zdrojů
- zvýšení plochy zemědělské půdy, intenzivní živočišná výroba [6]

RCP 4,5

Jedná se o stabilizační scénář. Radiační působení se ustálí po roce 2100 díky prosazení striktních mitigačních opatření a zavedení technologií pro snížení emisí skleníkových plynů.

- vrchol emisí CO₂ v roce 2050, kdy jsou o 50 % vyšší než v roce 2000, během dalších 30 let pokles následovaný stabilizací na polovině hodnot z roku 2000
- koncentrace CO₂ vzrůstají podle dosavadních trendů do roku 2100, dále pokračuje pomalý růst
- průměrná hodnota oteplení tohoto století činí 1,8 °C
- mírný nárůst populace
- programy na obnovu zalesnění, zmenšení zemědělských a zatravněných ploch [6]

RCP 6,0

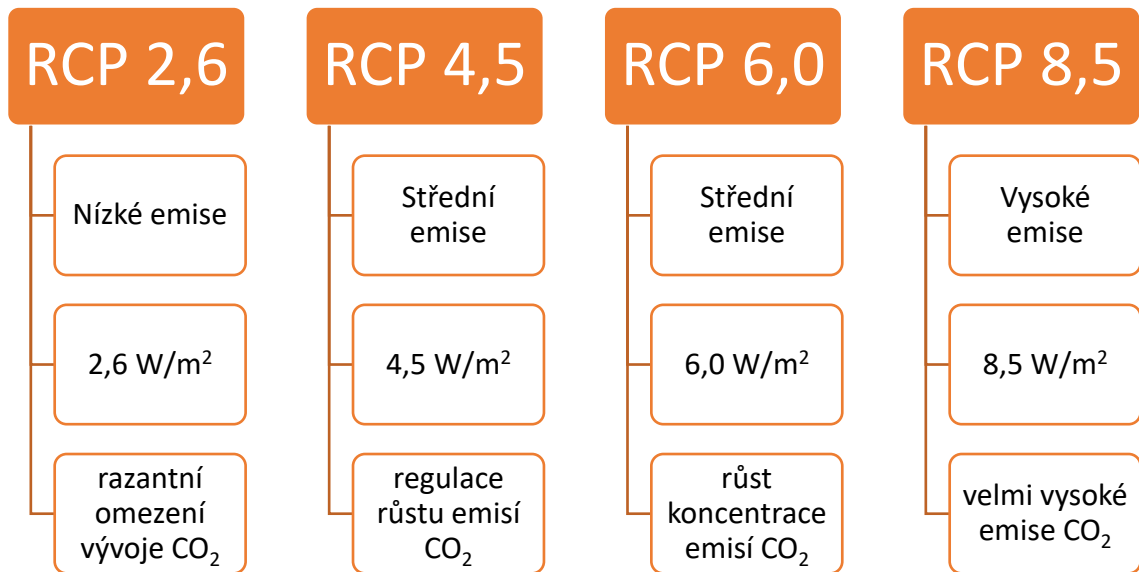
Druhý stabilizační scénář, ve kterém se hodnoty radiačního působení ustálí po roce 2100, což je uzpůsobeno zavedením technologií a opatření pro redukci emisí skleníkových plynů.

- do roku 2080 dojde ke zdvojnásobení emisí CO₂, poté dramatický pokles
- průměrná hodnota oteplení během tohoto století činí 2,2 °C
- populační vrchol 10 miliard
- vysoká závislost a spotřeba fosilních paliv
- rozšiřování zemědělských ploch, redukce zatravněných ploch [6]

RCP 8,5

Tento emisní scénář je charakterizován postupně se zvyšujícími emisemi skleníkových plynů. Jako jediný z RCP scénářů je bez klimatických politik.

- rychlý nárůst emisí CO₂
- průměrná hodnota oteplení během tohoto století činí 3,7 °C
- nárůst populace na 12 miliard kolem roku 2100
- vysoká závislost a spotřeba fosilních paliv
- nárůst zemědělských a zatravněných ploch [6]



Obrázek 5 - Charakteristika emisních scénářů RCP [zdroj vlastní]

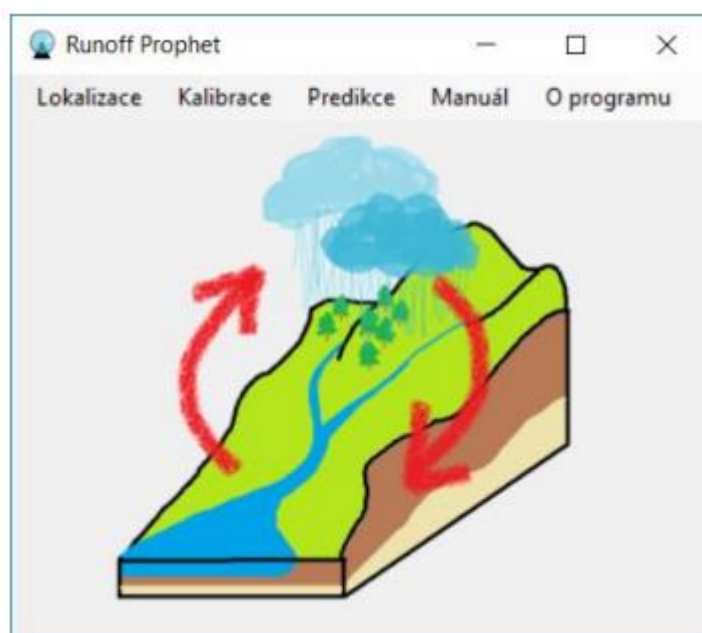
Cíl práce

Cílem práce je za pomoci kalibrovaných a validovaných bilančních rovnic a budoucích klimatologických situací získat analýzu zásobního objemu nádrže Vlachovice. Prvotním krokem je přes bilanční rovnice sestavené v programu Runoff Prophet nakalibrovat povodí z historických meteorologických a hydrologických dat. Následně pomoci programu LARS-WG vygenerovat ansámbl budoucích klimatologických situací pro dané období a opět pomocí programu Runoff Prophet získat ansámbl budoucích průtoků již s uvažovanou změnou klimatu. Budoucí simulované průtoky prostřednictvím biaskorekce převést na požadovanou hladinu se zájmovým územím povodí Vlárý. Posledním krokem je analýza zásobního objemu nádrže pro stoprocentní zabezpečení a samotné určení nalepšených odtoků vody z nádrže pro třídy významnosti dle ČSN 74 2504.

Metodika

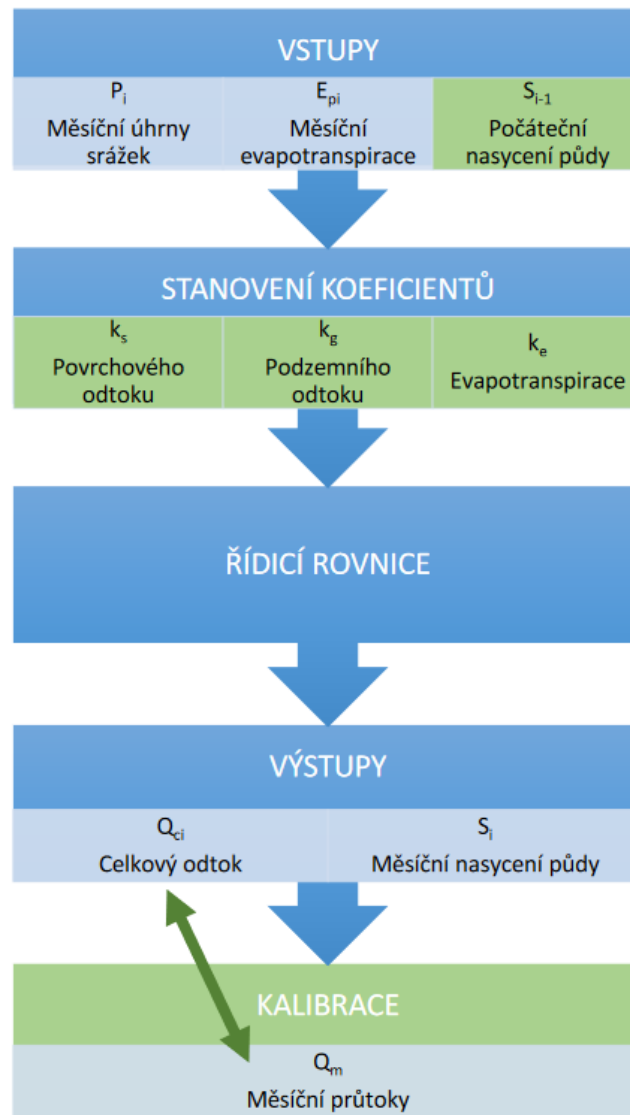
Runoff Prophet

Jedná se o program založen na srážkoodtokovém modelu umožňující simulaci průtoků u závěrového profilu ve vybraném povodí. Na základě skutečných meteorologických a hydrologických dat se model nejprve nakalibruje, až poté je model schopen na základě predikovaných meteorologických dat modelovat budoucí průtoky. Program simuluje komplexní systém povodí a zohledňuje vlhkost půdy, evapotranspiraci, průtok podzemní vody a průtok v korytě s časovým krokem větším než jeden den. Jedná se o deterministický lumped model s měsíčním krokem výpočtu. [13]



Obrázek 6 - Uživatelské rozhraní programu Runoff Prophet

Software počítá měsíční průtoky na principu Wangova modelu. Do modelu vstupují měsíční řady úhrnů srážek a výparu. Výpar je získávám výpočtem dle Thornthwaite. Na základě těchto vstupních dat je vypočten povrchový odtok, podzemní odtok a skutečný výpar. Z těchto se následně počítá celkový odtok a nasycení půdy v aktuálním měsíci. Neznámými jsou koeficienty povrchového odtoku, podzemního odtoku, evapotranspirace a počáteční nasycení půdy. Tyto parametry je nutností nakalibrovat na základě srovnáním vypočtené řady celkového odtoku s řadou měřených měsíčních průtoků v závěrovém profilu povodí. [13]



Obrázek 7 - Schéma výpočtu Wangova modelu [13]

- Povrchový odtok Q_{si} [mm]

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

kde k_s je koeficientem povrchové odtoku, S_{i-1} značí nasycení půdy v milimetrech za předcházející měsíc. Maximální nasycení půdy je označeno S_{max} a udává se v milimetrech. Měsíční úhrn srážek v měsíci P_i je uváděn v základních jednotkách, tedy v milimetrech. [13]

- Podzemní odtok Q_{gi} [mm]

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

kde k_g jest koeficientem podzemního odtoku a S_{i-1} prezentuje nasycení půdy v přecházejícím měsíci, údaj je udáván v milimetrech. [13]

- Celkový odtok Q_{ci} [mm]

$$Q_{ci} = Q_{si} + Q_{gi} \quad (3)$$

kde se jedná o součet povrchového odtoku Q_{si} a podzemního odtoku Q_{gi} . [13]

Vstupní data pro kalibraci musejí obsahovat řadu měsíčních dat v určitém pořadí a formátu. Data jsou v měsíčním formátu, kdy je v jednotlivých sloupcích nejprve rok následující měsícem a příslušným počtem dní. Následně je uvedena hodnota průměrné měsíční teploty ve stupních Celsia a celkový měsíční úhrn srážek v milimetrech. Posledním sloupcem v textovém souboru jsou průtoky základních jednotkách. Veškerá data jsou od sebe oddělené čárkou. Pro predikci je vstupní soubor s daty obdobný. Liší se pouze absencí sloupce s průtoky.

K určení lokalizace je zapotřebí uvést zeměpisnou šířku meteostanice, ze které byla poskytnuta data pro zájmové území a uvést i plochu tohoto povodí. Výpočet evapotranspirace je možný dvěma způsoby, který se zvolí v nastavení. V rámci této práce byl zvolen způsob výpočtu Thornthwaite. Po samotné kalibraci program uvede koeficient Nash-Sutcliffe, který určuje účinnost modelu. Výsledkem predikce jsou průtoky pro určené měsíce a roky.

Účinnost modelu, koeficient Nash-Sutcliffe, udává shodu s pozorovanými daty. Jeho hodnota se pohybuje v množině $(-\infty; 1]$, kde hodnota rovno jedné znamená dokonalou shodu. Za uspokojivou hodnotu se považuje hranice 0,5.

Predikce s hodnotou $NS = 1$ vykazuje dokonalou shodu s pozorovanými daty. $NS < 0$ nastává v případě, kdy použití průměru z pozorovaných dat je lepším nástrojem predikce než samotný hydrologický model. [13]

Koeficient účinnosti Nash-Sutcliffe se vypočítá následovně:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \overline{Q_o})^2} \quad (4)$$

kde Q_m^t prezentuje predikovanou hodnotu průtoky v čase t . Měřená hodnota průtoky v čase t je označena Q_o^t . Průměr z měřených hodnot průtoky $\overline{Q_o}$. Neznámé hodnoty jsou dosazovány ve stejných jednotkách, a to v milimetrech nebo v m^3/s . [13]

Lars-WG

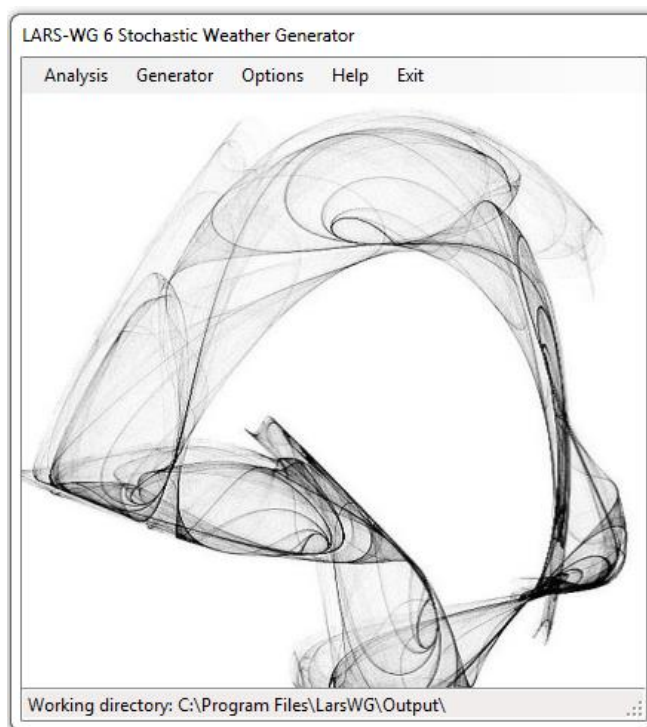
Princip generátoru počasí vychází z typu series weather generator, který byl popsán (Racsko a kol., 1991). Postup generování klimatických dat je převzat z manuálu k softwaru LARS WG. Manuál byl sepsán dvojicí autorů (Semenov a Barrow, 2002).

Model využívá tzv. semi-empirických rozdělení pracujících s řadami (sekvencemi) délek suchých a mokrých dní, denních srážek a denní sluneční radiace. Semi-empirické rozdělení $Emp = \{a_0, a_i, h_i, i=1, \dots, 10\}$ je definováno histogramem s deseti intervaly (a_{i-1}, a_i) , kdy $a_{i-1} < a_i$ a h_i popisuje počet uvedených událostí ve sledovaném souboru dat, které padnou do i -tého intervalu. Náhodné hodnoty ze semi-empirického rozdělení jsou voleny prvním výběrem jednoho z intervalů (využitím úměrnosti dané události v každém intervalu jako pravděpodobnost výběru) a pak je ze zvoleného intervalu vybraná hodnota z rovnoměrného rozdělení. Rozdělení je velice flexibilní a vytvoří široký výběr možností tvarů rozdělení nastavením intervalů (a_{i-1}, a_i) . Cena za flexibilitu daného rozdělení je dána 21 parametry (11 hodnot popisuje okrajové podmínky intervalů a 10 hodnot popisuje počet událostí v každém intervalu). [14]

Intervaly (a_{i-1}, a_i) jsou voleny na základě očekávaných vlastností proměnných charakterizující dané počasí. Pro sluneční radiaci jsou intervaly rovny rozmezí mezi minimálními a maximálními hodnotami sledovaných dat v průběhu měsíce. Pro délky řady suchých a mokrých období a srážek se velikost intervalu postupně zvětšuje (prodlužuje), jak narůstá i -tý interval. [14]

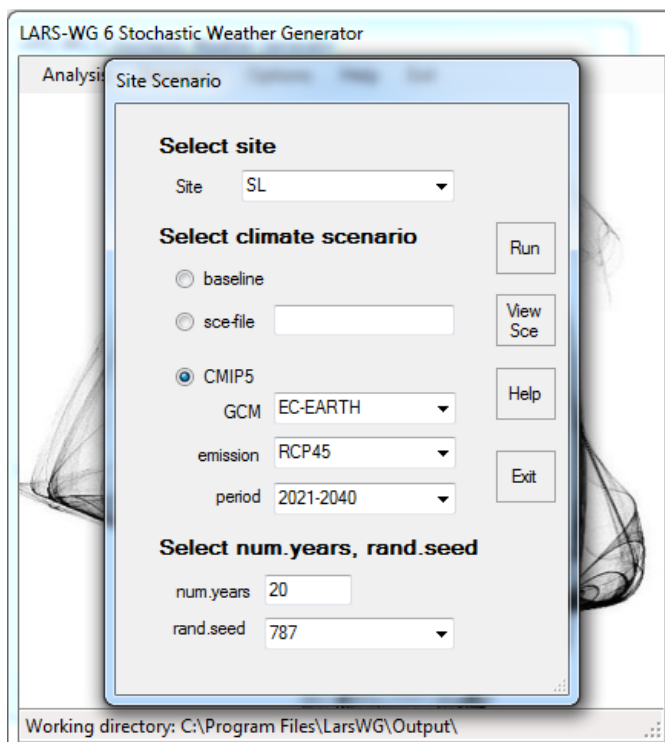
Simulace výskytu srážek je modelována střídáním sekvence mokrého a suchého období, kdy mokrý den je definován jako den se srážkami $> 0.0 \text{ mm}$. Délka každé sekvence je náhodně zvolena ze semi-empirického rozdělení mokrého nebo suchého období pro měsíc, ve kterém sekvence začaly. Pro určení vhodného semi-empirického rozdělení jsou také měřená data mokrých a suchých období situována do stejného měsíce, ve kterém začaly. Pro mokrý den je hodnota srážek generována ze semi-empirického rozdělení srážek pro odpovídající měsíc nezávisle na délce mokrého období nebo na množství srážek z předchozích dnů. [14]

Denní průměrné teploty a denní směrodatné odchylky upravené podle toho, zda nastal mokrý nebo suchý den jsou považovány za náhodné procesy. Technika pro simulaci tohoto procesu je velice jednoduchá a byla představena v publikaci (Racsko a kol., 1991). Sezónní cykly průměrů a jejich směrodatných odchylek jsou modelovány pomocí konečné Fourierovy řady třetího řádu a rezidua jsou proložena pomocí normálního rozdělení. Fourierovy řady pro průměry jsou přizpůsobeny (je upraven jejich průběh, resp. tvar) k reálným průměrným hodnotám v každém měsíci. Před každým přizpůsobením jsou pro daný měsíc směrodatné odchylky Fourierových řad a měřených dat upraveny (adjustovány) tak, aby daly odhadovanou denní směrodatnou odchylku. Toto je vytvořeno odstraněním odhadovaného efektu změn v průměrech v každém měsíci. Adjustování je počítáno pomocí upravené Fourierovy řady získané z průměrů. Měřená rezidua získaná odstraněním upravených průměrných hodnot z měřených dat jsou použita na analýzu časové autokorelace průměrných teplot. [14]



Obrázek 8 - Uživatelské rozhraní softwaru Lars-WG

Jedinými vstupními hodnotami jsou skutečná hydrologická data, která se do programu nahrají v podokně Analysis. V položce Options je důležité správné nastavení cesty pro ukládání vygenerovaných hodnot emisních scénářů. Samotné generování probíhá v podokně Generator.



Obrázek 9 - Generování emisních scénářů z programu Lars-WG

Pro vygenerování požadovaného scénáře nebo Baseline je zapotřebí nastavit samotný typ klimatologického model a typ scénáře. Na obrázku je vyobrazeno nastavení klimatického modelu EC-EARTH a jeho emisního scénáře RCP 4,5 pro časové období blízké budoucnosti.

Vygenerovaná data všech dostupných scénářů a časových období bylo v podobě průměrných denních hodnot. Pro další výpočty bylo zapotřebí jej upravit na měsíční průměry.

Klimatické modely, Emisní scénáře

Celkem bylo použito devět emisních scénářů ze čtyř různých klimatických modelů.

Tabulka 1 - Výpis použitých emisních scénářů dle klimatických modelů

EC-EARTH	Had-GEM2-ES	MIROC5	MPI-ESM-MR
RCP 4,5	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 4,5
	RCP 4,5		
RCP 8,5	RCP 8,5	RCP 8,5	RCP 8,5

Z tabulky je patrné, že bylo použito především stabilizačního scénáře RCP 4,5 a vysokoemisního RCP 8,5. Pouze jeden klimatický model nabízel i nízkoemisní scénář RCP 2,6. Už samotný výběr napovídá, že se spíše uvažuje s udržováním či zhoršováním klimatických poměrů.

Biaskorekce

Kvůli nejistotám ve scénářích musí být nejprve porovnány měsíční srážky a průměrné teploty s odpovídajícími historickými daty. Aby byla simulace RCP spolehlivější jsou skutečná data poupravena společně s budoucím obdobím Baseline. Metoda lineárního škálování je metoda, kde jsou údaje o měsíčních průtocích Baseline upravovány multiplikačními faktory, které přibližují měsíční hodnoty ke skutečným hodnotám. [15]

Korekce je tedy pro průtok následující:

$$k_i = \frac{Q_{m,i}}{Q_{b,i}} \quad (8)$$

kde k_i odpovídá koeficientu biaskorekce pro příslušný měsíc, $Q_{m,i}$ je roven průměrnému měsíčnímu průtoku z reálných hydrologických dat a $Q_{b,i}$ prezentuje průměrný měsíční průtok z Baseline řady. Index $i = 1, 2, \dots, 12$ odpovídá příslušnému měsíci. Při dosazování je nutné oba průměrné průtoky uvádět v totožných jednotkách.

Zjištěným koeficientem a příslušnou průtokovou řadou z emisních scénářů byla korekce průtoků následující:

- Pro Baseline

$$Q_{b,mij} = k_i \cdot \overline{Q_{b,muj}} \quad (9)$$

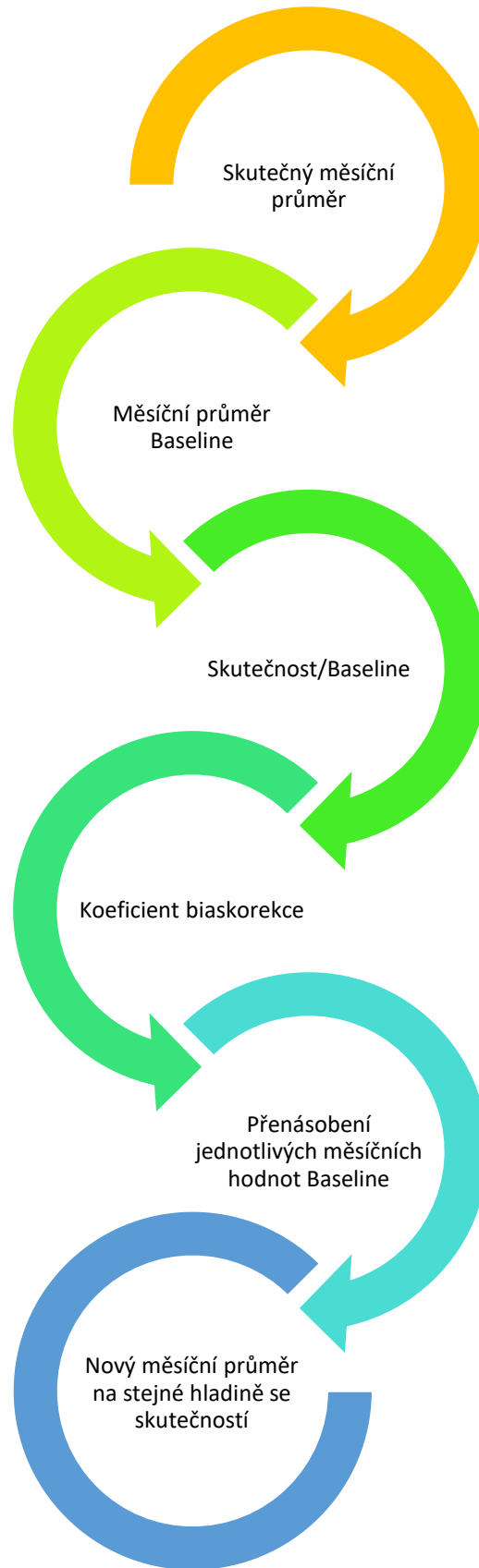
kde $\overline{Q_{b,muj}}$ je průtok odpovídajícího měsíce daného roku a je vynásoben příslušným koeficientem biaskorekce k_i . Index $i = 1, 2, \dots, 12$ pro měsíc a index $j = 1, 2, \dots, n$ let z daného časového období.

- Pro emisní scénář

$$Q_{RCP,mij} = k_i \cdot \overline{Q_{rcp,muj}} \quad (10)$$

kde $\overline{Q_{rcp,muj}}$ označuje průměrný měsíční průtok daného měsíce v určitém roce. Index $i = 1, 2, \dots, 12$ kalendářní měsíc a index $j = 1, 2, \dots, n$ let z daného časového období.

Biaskorekce neboli převedení na stejnou hladinu se skutečností. V praxi to znamená, že průměry jednotlivých měsíců budou rovny se skutečnými průměry. Abychom dosáhli této požadované hladiny, bylo zapotřebí veškerá data přenásobit koeficientem, který jsme získali z podílu skutečnosti a Baseline. Postup je znázorněn na následující animaci.

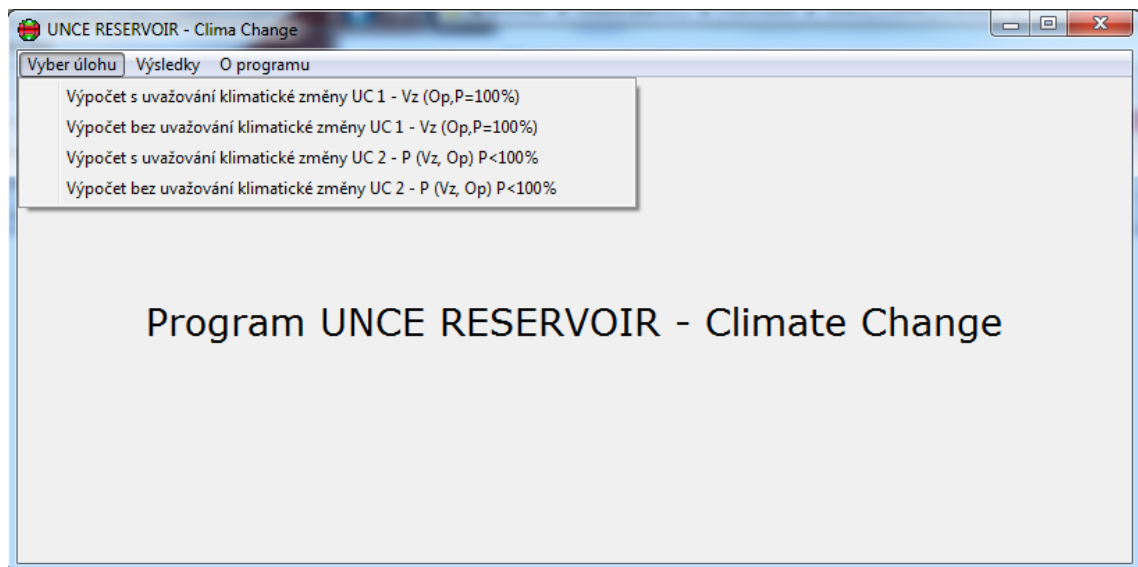


Obrázek 10 - Postup biaskorekce Baseline na stejnou hladinu se skutečností [zdroj vlastní]

Unce Clima Change

Software Unce Clima Change vychází ze simulačního modelu nádrže, který využívá k simulaci plnění a prázdnění zásobního objemu základní rovnici nádrže. Na základě simulace provozu nádrže jsou vyhodnoceny dvě úlohy. První úlohou jest stanovení zásobního objemu V_z pro 100 % zabezpečení odtoku vody z nádrže podle doby trvání P_t . Druhou úlohou je stanovení zabezpečení P_t menší než 100 % když je znám V_z a koeficient nalepšení alfa, respektive nalepšený odtok vody z nádrže Op . [16]

Simulační model nádrže vyhodnotí ansámbli hydrologických dat zatížených hlubokou nejistotou klimatické změny a vypočte zásobní objem V_z pro $P_t = 100$ % nebo zabezpečení podle doby trvání P_t odtoku vody z nádrže pro $P_t < 100$ %. [16]



Obrázek 11 - Uživatelské rozhraní softwaru Unce Clima Change

Prvotním krokem je nahrání vstupních dat na disk do složky IN_DATA_INFLOW v podobě měsíčních průměrů průtoků. Následně se vybere úloha, která se má počítat a program provede výpočet. Ve výběru Výsledky jsou prezentovány potřebné výsledky a grafy zadaných průtoků.

Zásobní prostor v nádrži

Zásobní prostor V_Z slouží k řízení odtoku vody z nádrže tak, aby neklesl pod dolní mez variačního rozpětí. Slouží k nalepšování celkového odtoku. Velikost a účinek jsou stanoveny vodohospodářským řešením nádrže. [17]

Výpočet zásobního objemu se 100 % zabezpečeností odtoku

Základní rovnice nádrže v součtovém tvaru:

$$V_n = V_0 + \sum_{i=1}^n (O_i(V_i) - Q_i) \Delta t \quad (5)$$

kde V_n značí objem vody v nádrži na konci n -tého kroku řešení, V_0 jest počátečním objemem vody v nádrži, Q_i je průměrný měsíční přítok vody do nádrže a $O_i(V_i)$ prezentuje průměrný měsíční řízený odtok vody z nádrže, který se mění v závislosti na plnění nádrže, Δt odpovídá délce časového kroku. Index i reprezentuje pořadí řešeného měsíce $i = 1, 2, \dots, n$, kde n je počet všech řešených měsíců a je dán počtem členů řady průměrných měsíčních přítoků vody do nádrže. [18]

Protože odtok je v celkové sumě předřazen přítoku, rovnice simuluje prázdnění nádrže. Počáteční podmínkou řešení je tedy plný zásobní objem o známé velikosti V_Z , prázdnění zásobního objemu je tudíž nulové. Okrajovou podmínkou řešení je zadaný přítok vody do nádrže (řada průměrných měsíčních přítoků). Řešení je prováděno na plánovaný nalepšený odtok vody z nádrže O_P . [18]

Zabezpečení odtoku vody z nádrže podle doby trvání

Obecná definice zabezpečení vodohospodářských systémů byla sepsána v několika publikacích (Klemeš, 1967), (Hashimoto, 1982). Klasifikace poruchy zásobního objemu nádrže pro následný výpočet zabezpečení jest:

$$Z_{t,i} = \begin{cases} Z_{t,i} = 1, & O_i \geq O_P \\ Z_{t,i} = 0, & O_i < O_P \end{cases} \quad (6)$$

kdy $Z_{t,i} = 1$ popisuje stav zásobního objemu nádrže v bezporuchovém časovém kroku výpočtu. $Z_{t,i} = 0$ popisuje stav zásobního objemu v poruchovém časovém kroku výpočtu. Z hodnot $Z_{t,i}$ je možné dále dopočítat požadovanou zabezpečení. Obecně se počítá jako zabezpečení podle opakování, doby trvání a množství nedodané vody. V práci je použit vzorec pro výpočet zabezpečení podle doby trvání P_T , který je odvozen dle Čegodajeva. [18]

$$P_T = \frac{(\sum_{i=1}^n Z_{t,i})^{-0,3}}{n+0,4} \cdot 100 \quad (7)$$

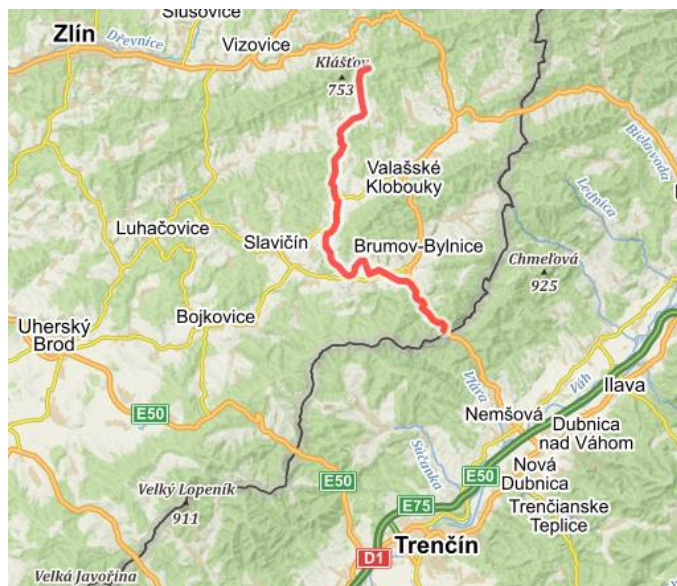
kde n značí počet všech měsíců v řešeném časovém období a $\sum_{i=1}^n Z_{t,i}$ určuje počet bezporuchových měsíců. [18]

Praktická aplikace

Praktická aplikace je zaměřena na návrh zásobního objemu plánované nádrže Vlachovice na řece Vláře pro sto procentní zabezpečení a průtoky dle emisních scénářů RCP.

Zájmové území

Vlára pramení na východním úbočí v Komonecké hornatině v nadmořské výšce 635 m. Od pramene teče jižním směrem k Drnovicím a postupně přibírá menší přítoky z přilehlých údolí.

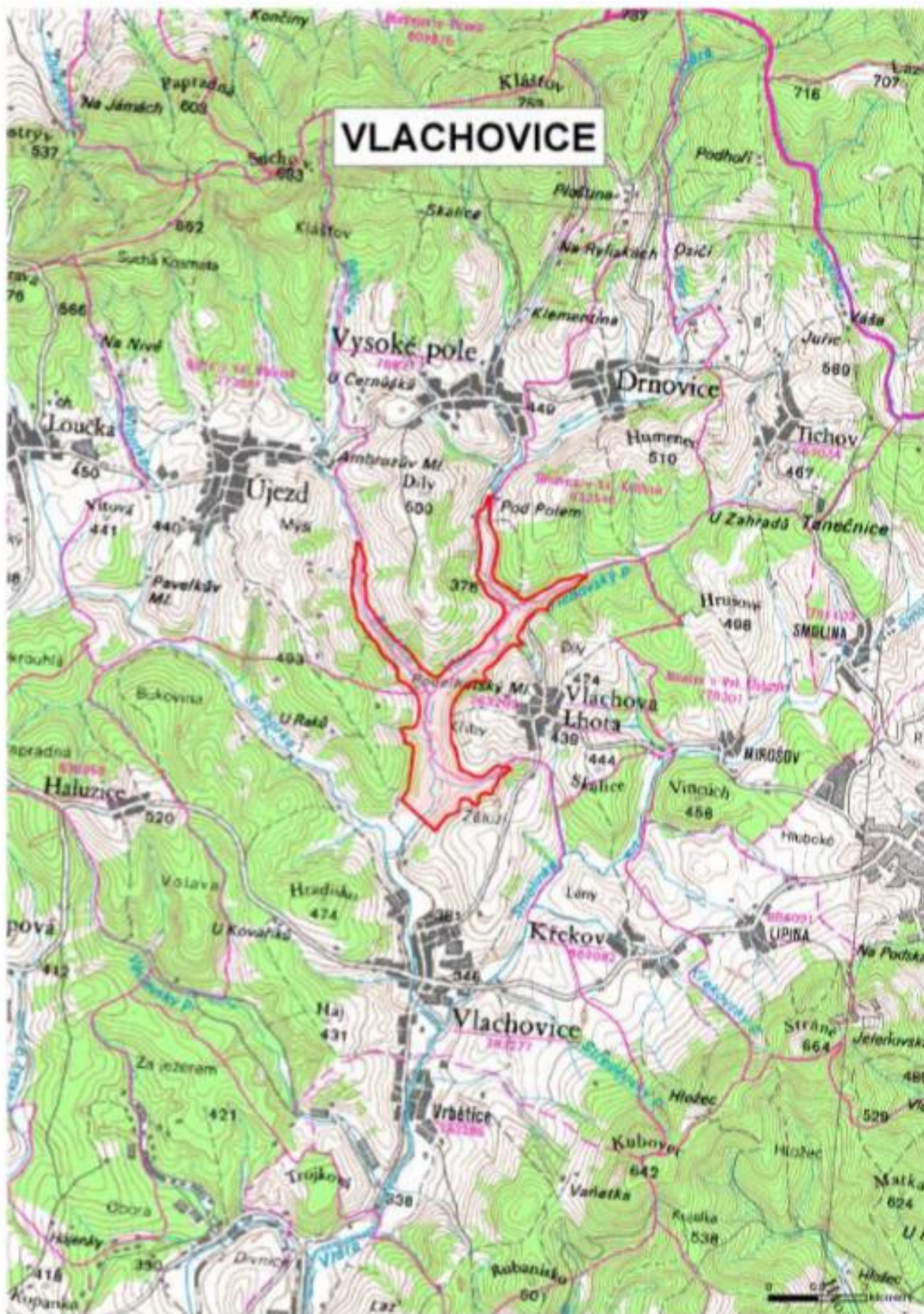


Obrázek 12 - Vodní tok Vlára na území ČR [zdroj mapy.cz]

V Drnovicích mění tok k JZ a pod Vysokým polem se údolí Vlárky rozšiřuje a mělo by zde začínat vzdušná myšlená vodní nádrž Vlachovice. Od soutoku s potokem Benčice teče Vlára k Vlachovicím, před nimiž ústí zprava Sviborka. Mezi Vlachovicemi a Vrběticemi ústí zleva Smolinka. Pod Bohuslavicemi se niva řeky Vlárky rozšiřuje na 200 až 400 metrů. Vlára je nejvýznamnější moravskou řekou nepatřící do povodí Moravy ani Odry. Vlára je řazena mezi vodohospodářsky významné toky. Hydrologická stanice je umístěna v Popově. [19]

Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod pořízený Ministerstvem zemědělství a životního prostředí s Vlachovicemi uvažuje jakožto s vodní nádrží. Samotné Vlachovice jsou v protokolu uvedeny pod pořadovým číslem 21. Z vodohospodářského významu je potenciálně významný zdroj pro posílení zásobování pitnou vodou v území v povodí Vlárky, případně části Zlínska i Uherskohradištska. Víceúčelové využití zajišťuje lokální protipovodňovou ochranu a nalepšování minimálních průtoků pro zajištění nezbytných ekologických funkcí dolního úseku Vlárky. [20]

Rozsah lokality byl stanoven s ohledem na zájmy ochrany přírody a optimalizaci objemu nádrže. Je počítáno s převodem vody ze Smolinky a Sviborky.

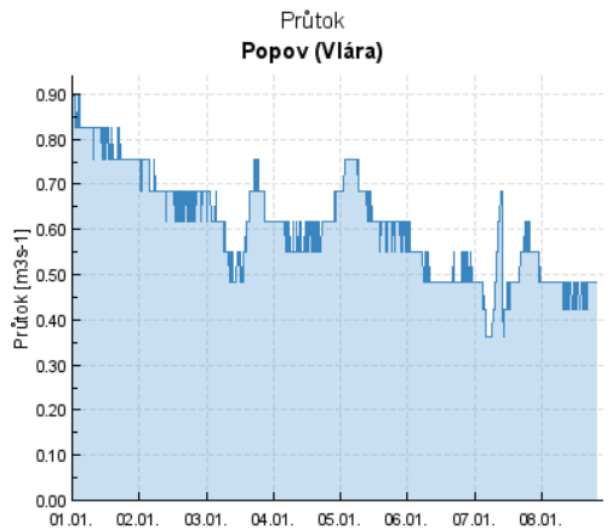


Obrázek 13 - Zájmová lokalita vodního díla Vlachovice [20]

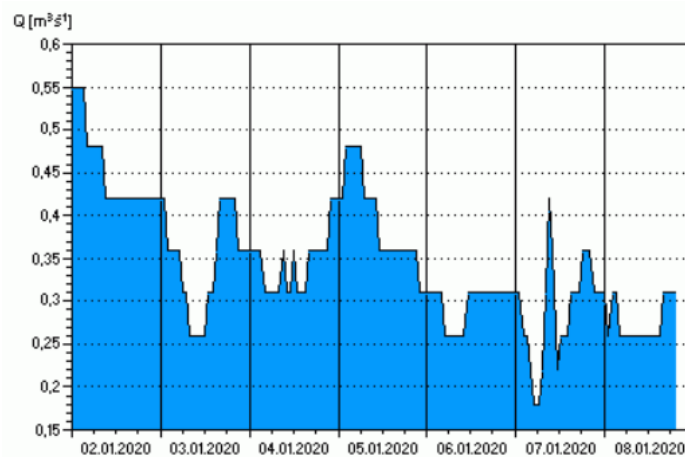
Zájmové území nádrže Vlachovice se nachází v povodí řeky Vlárky, kde podle samotného Generelu lokalit pro akumulaci povrchových vod dlouhodobě hájený profil. Praktická aplikace je

Sucho						
Q355:	0,07 [m ³ .s ⁻¹]					
N-leté průtoky [m ³ .s ⁻¹]						
Q1	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100
32,5	50	78	103	131,5	174	210

Obrázek 15 - Detail měřicího bodu Popov [22]



Obrázek 16 - Průtok stanice Popov za období 1.1. až 8.1.2020 [21]



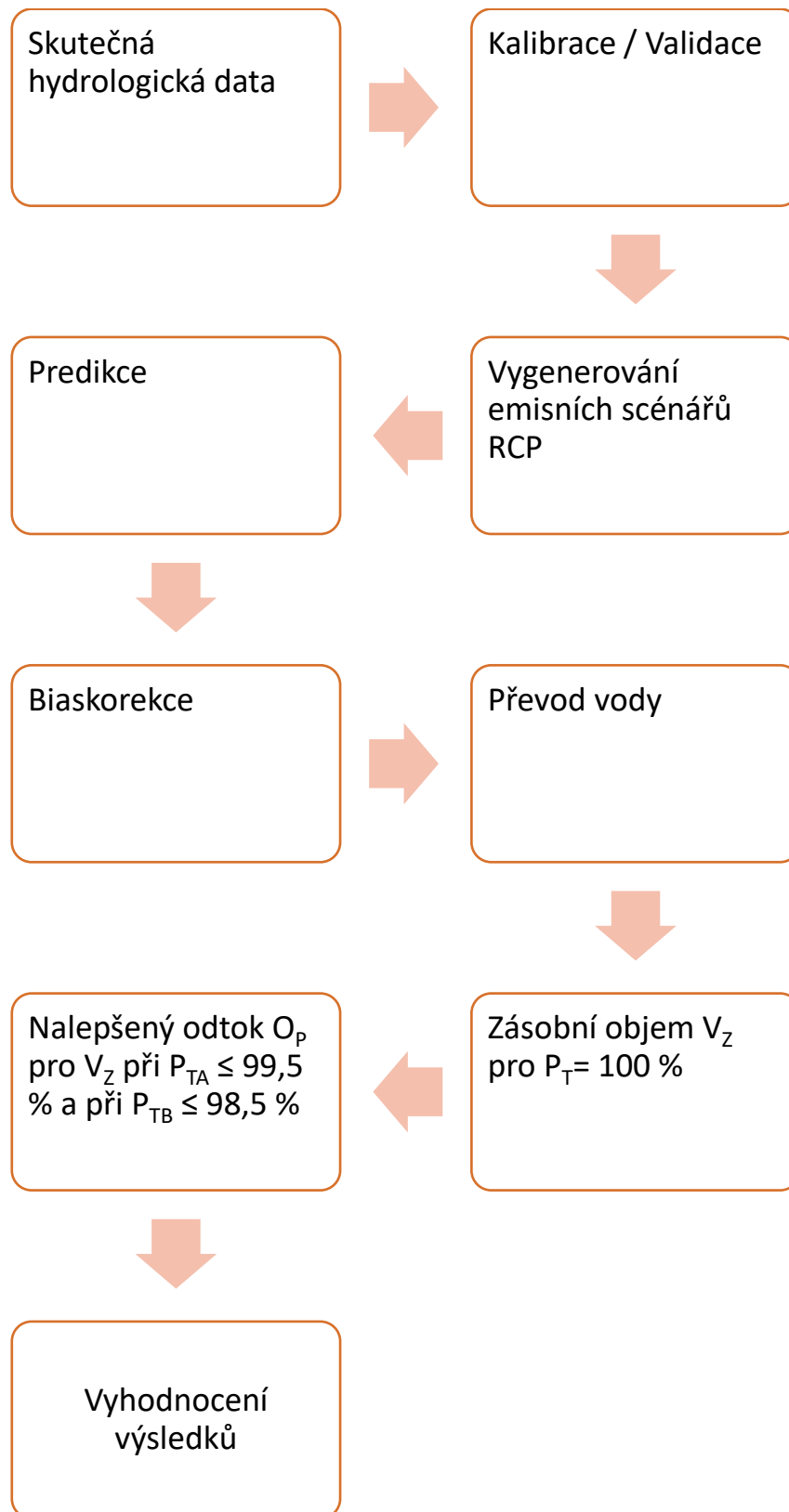
Obrázek 17 - Průtok stanice Popov za období 2.1. až 8.1.2020 [22]

Z povšimnutí stojí, že pro stejnou stanici uvádí Povodí Moravy odlišné hodnoty oproti ČHMÚ. Například pro měření ze dne 8.1.2020 v 19:20 je dle PMO průtok 0,31 m³/s, kdežto podle ČHMÚ je průtok 0,484 m³/s uváděn ve stejném čase. [21][22]

Průtoky ze stanice Popov byly poskytnuty ČHMÚ.

Postup výpočtů

K dosažení zásobního objemu vedlo několik dílčích výpočtů, úprava výsledků a možné kombinace, tak aby bylo dosaženo co nejvěrnější možné hodnotě blízké realitě.



Obrázek 18 - Znárodnění postupu praktické aplikace [zdroj vlastní]

Příprava dat

Hydrologická data byla poskytnuta ČHMÚ v podobě průměrných maximálních a minimálních denních teplot, celkového denního úhrnu srážek z meteorologické stanice Slavičín, respektive Vizovice. Průměrné denní průtoky z vodního toku Vlára byla naměřena ve stanici Popov. Poskytnutá data byla k dispozici za období z let 1961-2018.

K veškerým dílčím výpočtům bylo zapotřebí přistupovat ve formátu měsíčních hodnot. U průtoků a teploty vzduchu bylo zapotřebí pro stanovení průměrné měsíční hodnoty hlídat počet dní v jednotlivých měsících a pro únor i přestupné roky.

Kalibrace

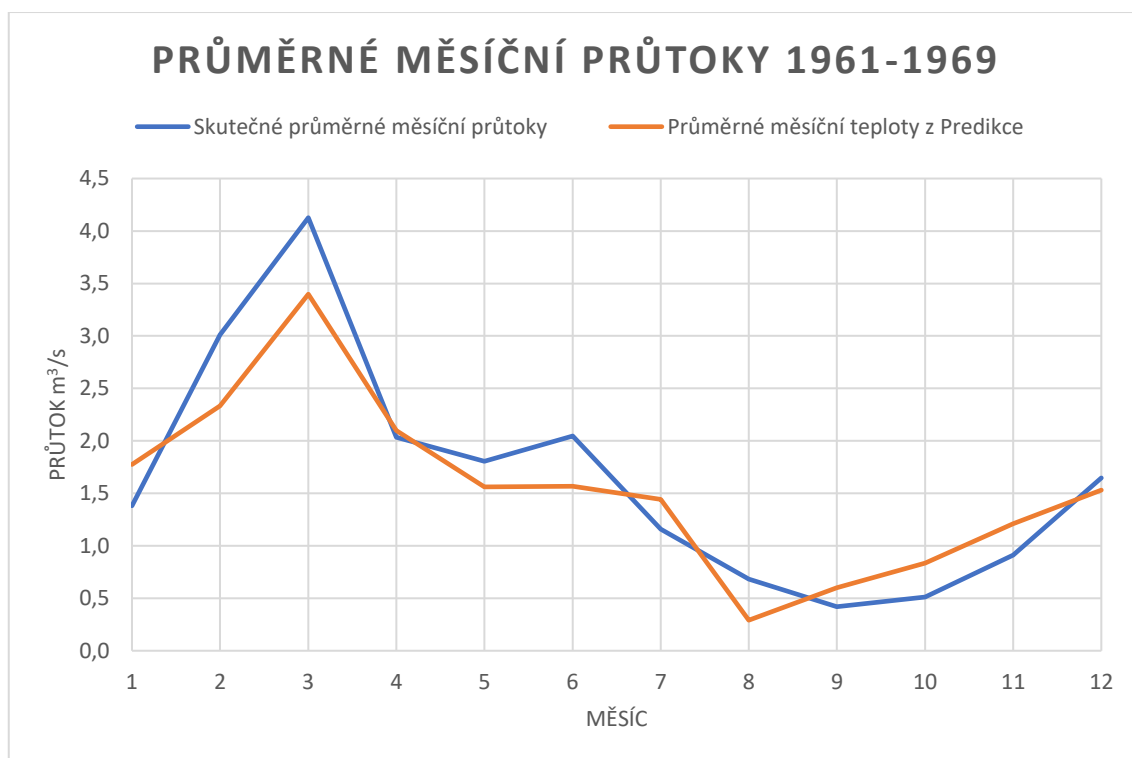
Z dostupné řady hodnot 1961-2018 byla zvolena období pro kalibraci a predikci do tří časových horizontů následovně:

- 1961-1969
- 1970-2005
- 2006-2018

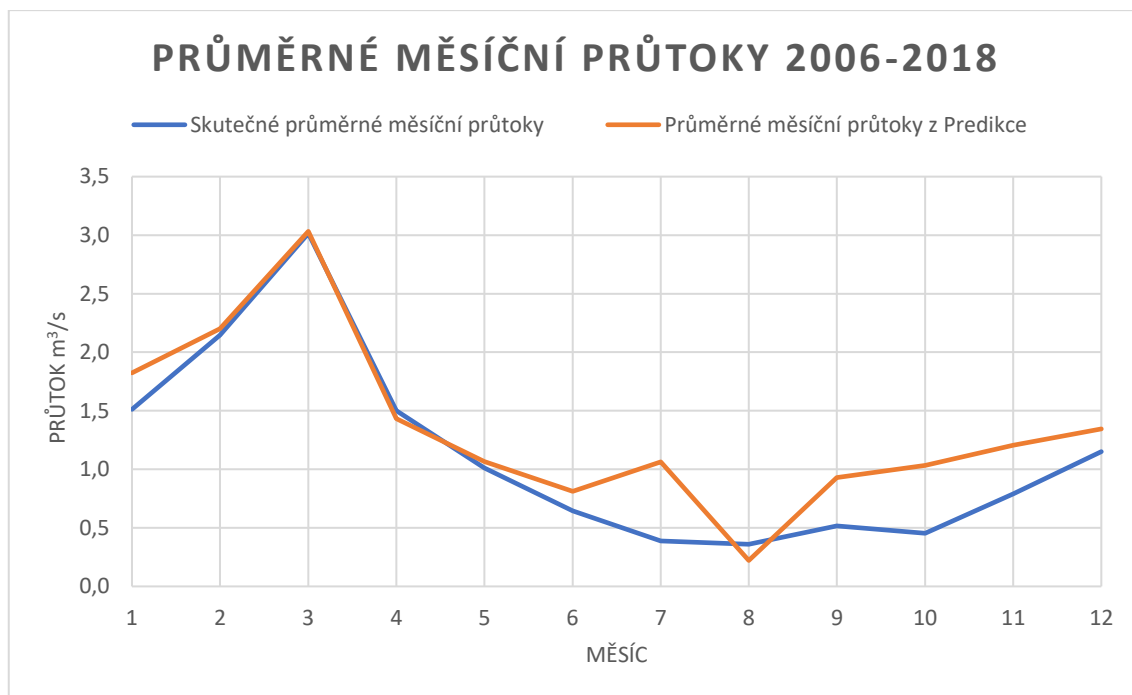
Přičemž pro následné výpočty a samotný postup výpočtu byla zvolena střední řada kalibrace, tedy 1970-2005, s koeficientem Nash-Sutcliffe 0,659. Zároveň je kalibrační řada dostatečně dlouhá oproti zbývajícimu období (použito pro predikci). Zbývajících dvě časové období tvořili predikci a jejich koeficient Nash-Sutcliffe byl roven 0,724, respektive 0,796.

Predikce

Po nakalibrování programu Runoff Prophet historickými daty za období 1970-2005 přicházela na řadu predikce pro dvě zbylé období dat. Tento krok především sloužil pro zjištění, jak se po nakalibrování predikovaná řada lišila od skutečnosti.



Graf 1 - Porovnání měsíčních průtoků za období 1961-1969



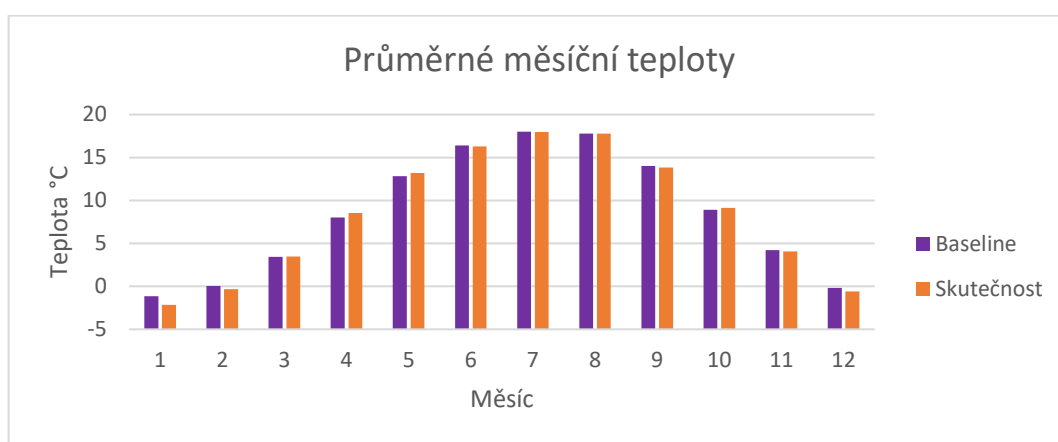
Graf 2 - Porovnání měsíčních průtoků za období 2006-2018

Z obou grafů výše vyplívá, že po provedení kalibrace byla predikovaná řada téměř totožná s reálnou řadou průměrných měsíčních průtoků. Celkový rozdíl průměrů pro první období činí pokles o 5,547 %, kdežto pro druhé období se jedná o nárůst 19,789 % průměrné teploty vzduchu.

Vygenerování emisních scénářů

Mezi největší kroky patří vygenerování emisních scénářů. Vygenerováno bylo celkem devět scénářů pro čtyři různé klimatické modely. Jejich konkrétní výpis je uveden v metodice a jejich charakteristika byla uvedena v úvodní části.

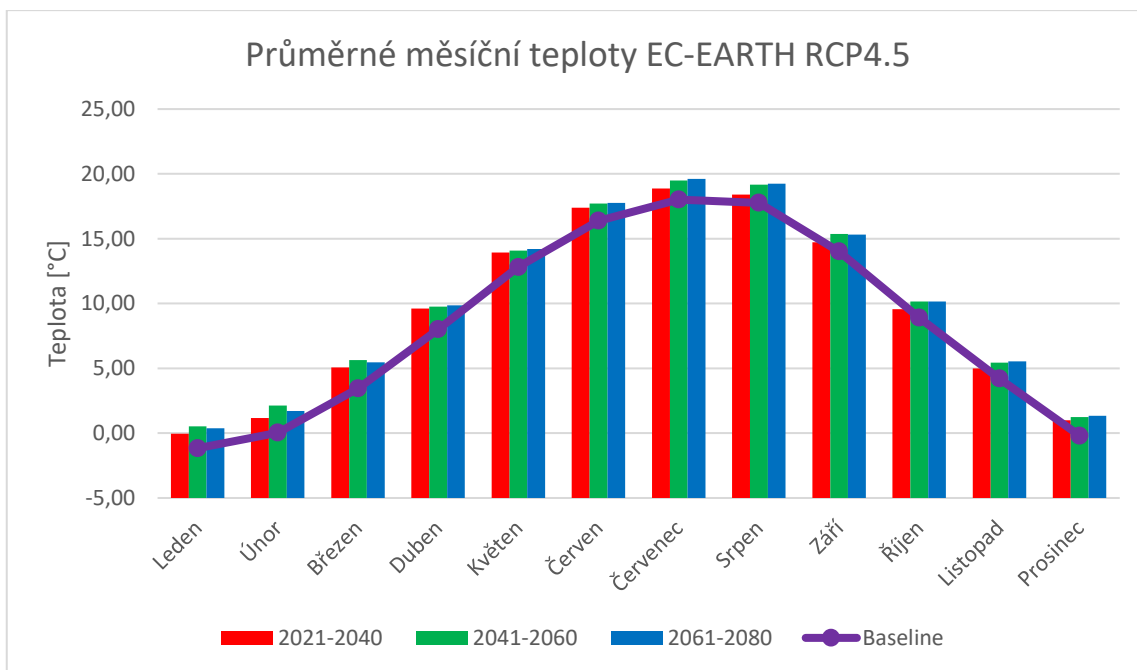
K dosažení hydrologických scénářů byl použit program Lars-WG, kdy po vložení skutečných hodnot, zeměpisné lokalizace byla vygenerována budoucí data denních teplot a úhrnů srážek. Celkem pro čtyři klimatické modely, respektive devět emisních scénářů byla vygenerována tři časová období – blízká budoucnost 2021-2040, střední budoucnost 2041-2060 a vzdálená budoucnost 2061-2080. Veškeré klimatické modely byly porovnány s Baseline řadou, jak je prezentováno v grafech níže, popřípadě v příloze na konci této práce. Baseline je vygenerovaná řada teplot vzduchu, respektive úhrnů srážek. Její hlavní účel je provázanost scénářů se skutečností.



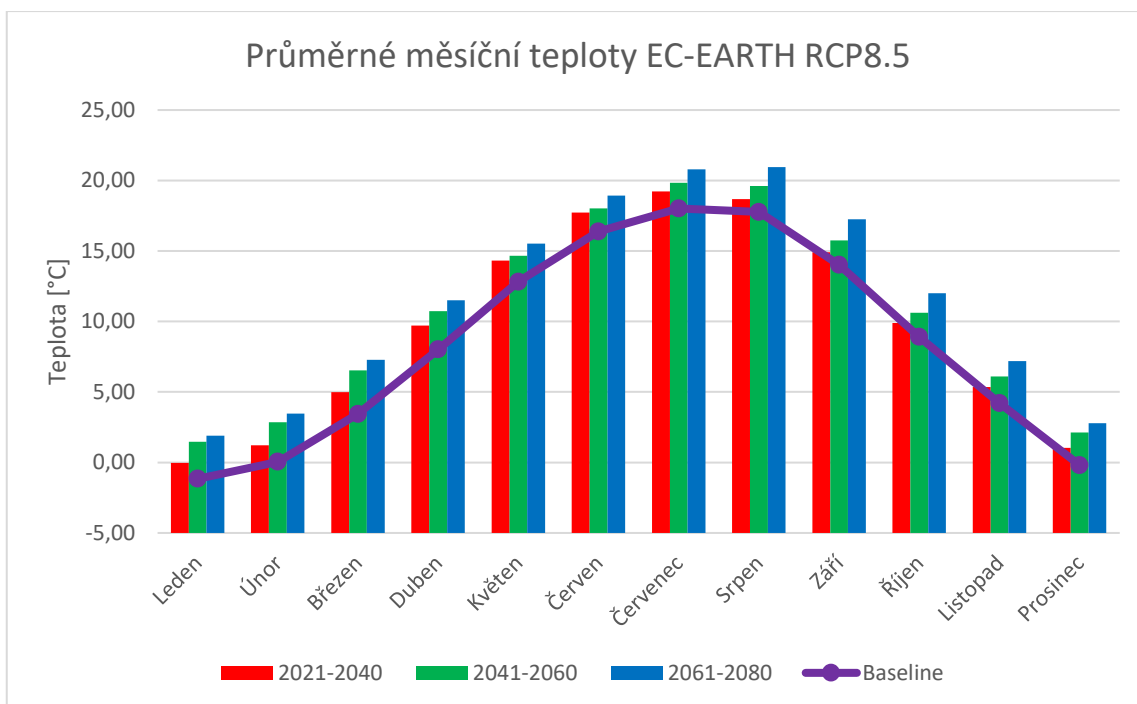
Graf 3 - Porovnání teplot skutečnosti oproti Baseline

Z grafu je patrné, že Baseline řada kopíruje teplotní trend skutečnosti a jejich vzájemný průměr se liší o necelé jedno procento.

U emisních scénářů lze však vyzorovat, že průměrná teplota stoupá v závislosti na čase, což je zapříčiněno vstupními podmínkami RCP.



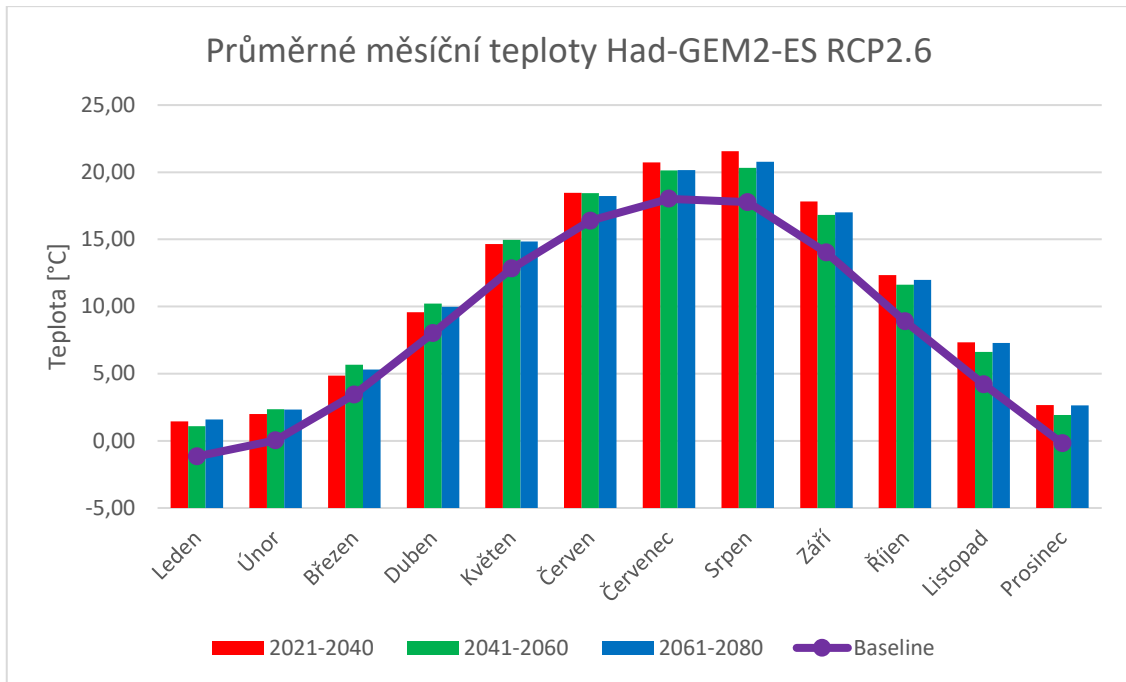
Graf 4 - Porovnání průměrné měsíční teploty Baseline oproti scénáři EC-EARTH RCP4,5



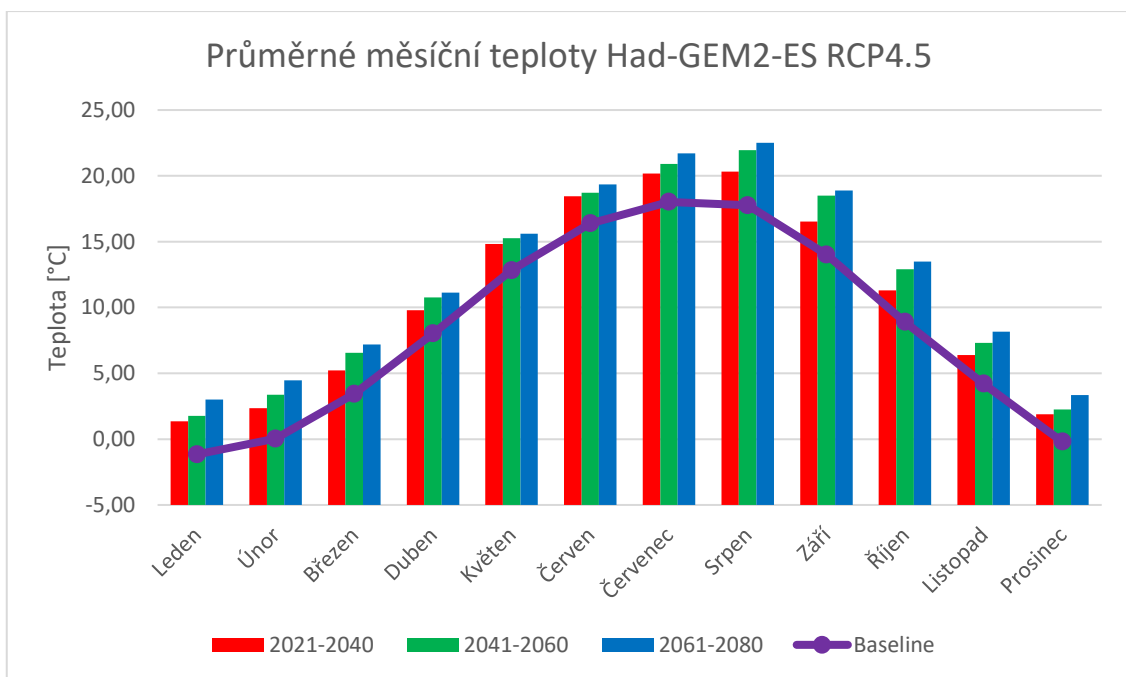
Graf 5 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři EC-EARTH RCP8,5

Oba dva emisní scénáře u klimatického modelu EC-EARTH jsou teplotně vyšší, a to konkrétně o 16 a 25,5 % v průměru oproti Baseline. Dá se tedy předpovídat, že uvažují s oteplením vzduchu.

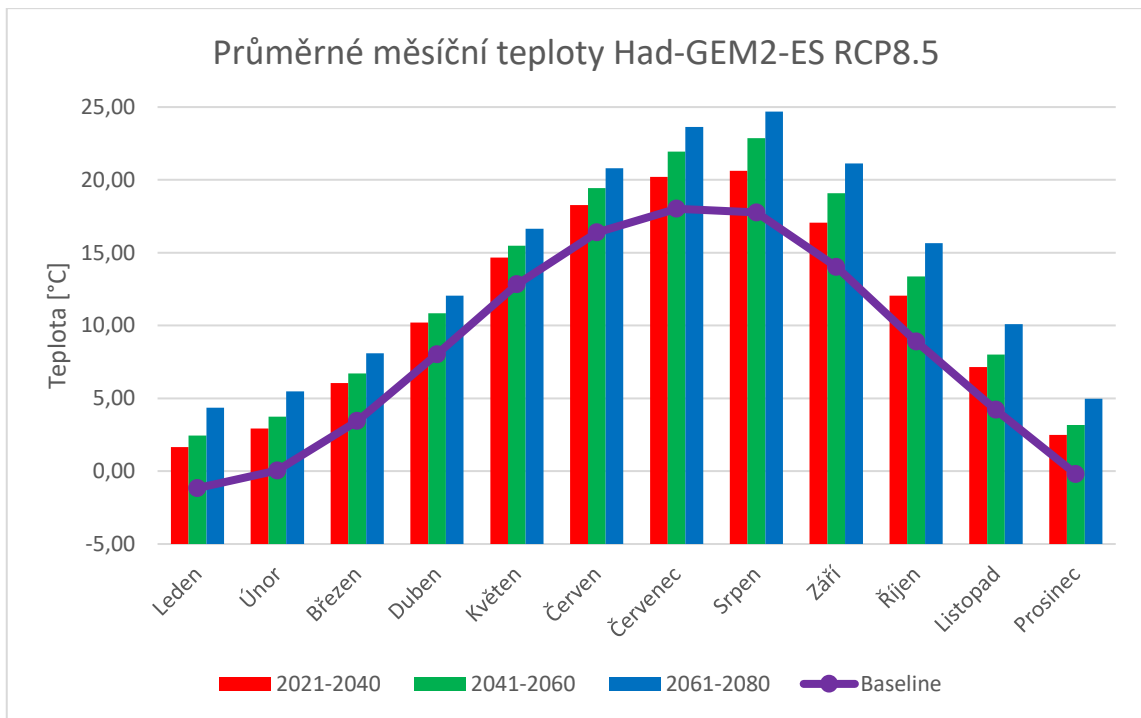
Nejvýraznější oteplení o 46,1 % je zaznamenáno u nejnepříznivějšího scénáře při modelu Had-GEM2-ES. Naopak emisní scénář RCP 2,6, který by měl vykazovat nejmírnější oteplení, je oproti Baseline oteplen o 29 %. Stabilizační scénář prezentuje průměrný nárůst o 36,18 %.



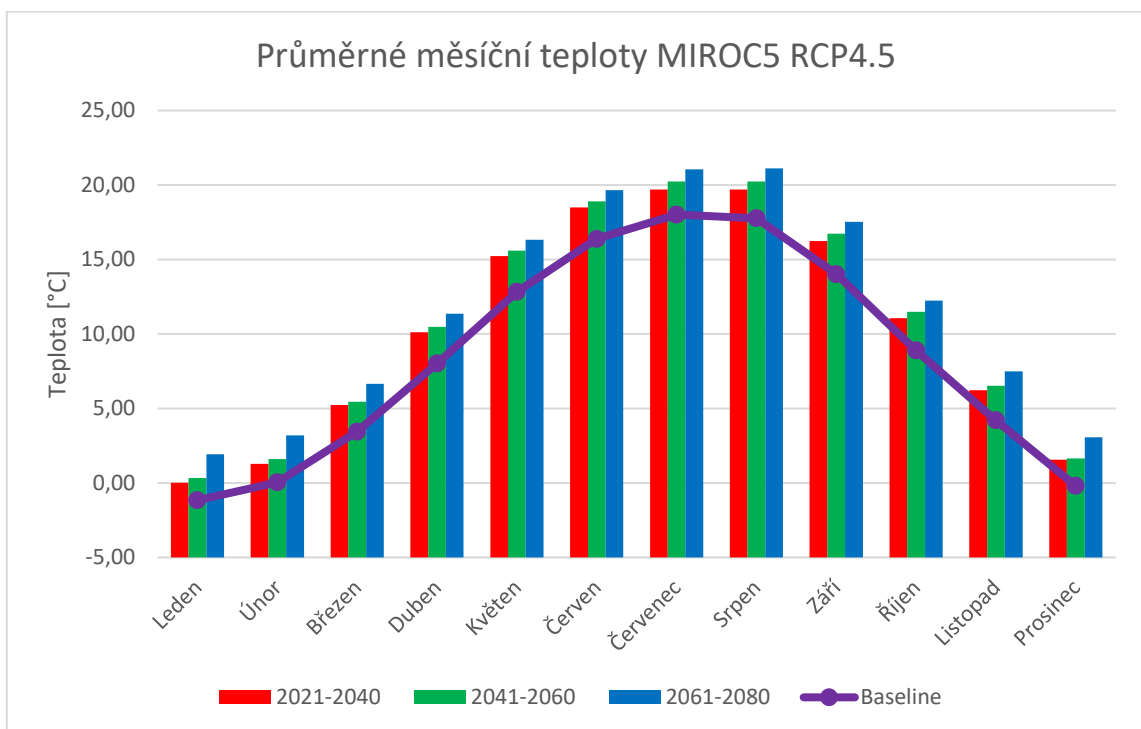
Graf 6 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři Had-GEM2-ES RCP2,6



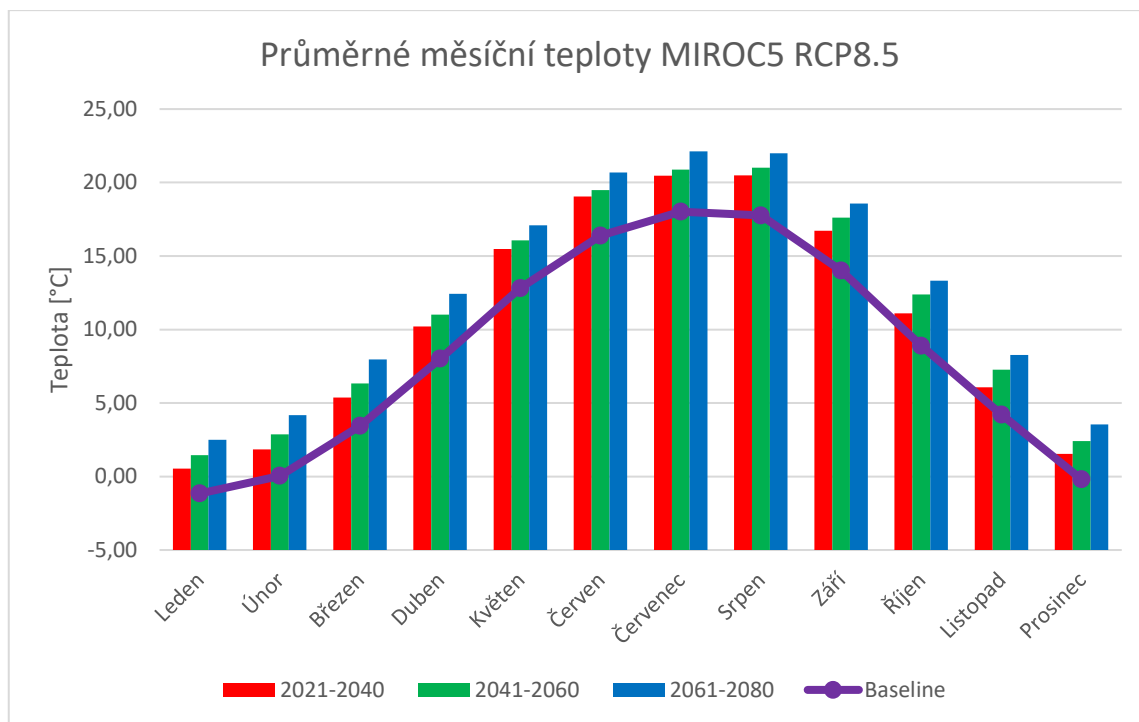
Graf 7 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři Had-GEM2-ES RCP4,5



Graf 8 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři Had-GEM2-ES RCP8,5



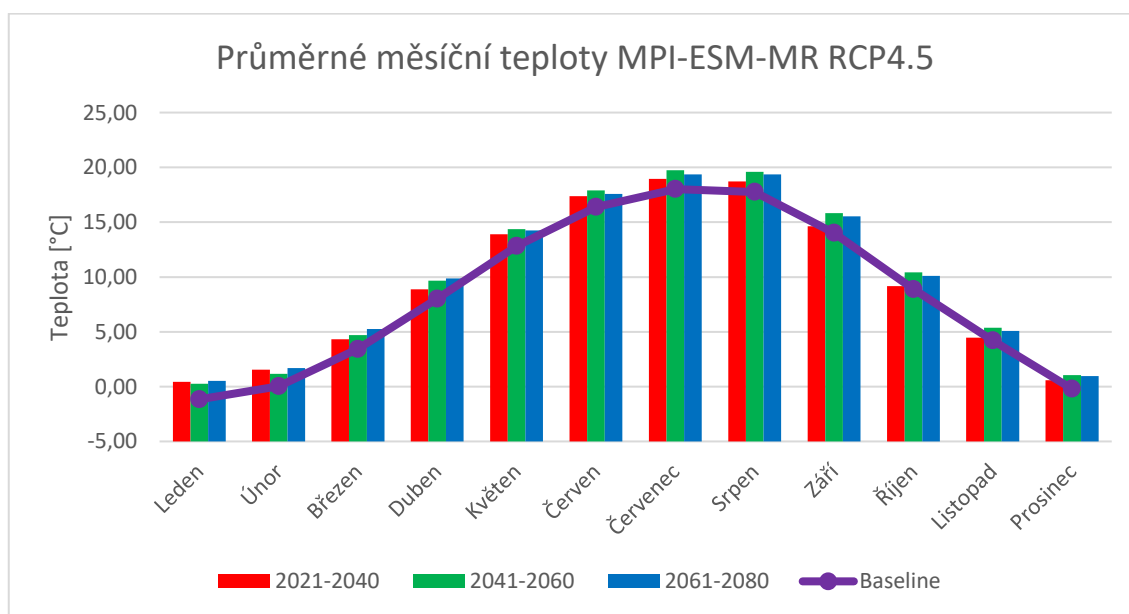
Graf 9 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři MIROC5 RCP4,5



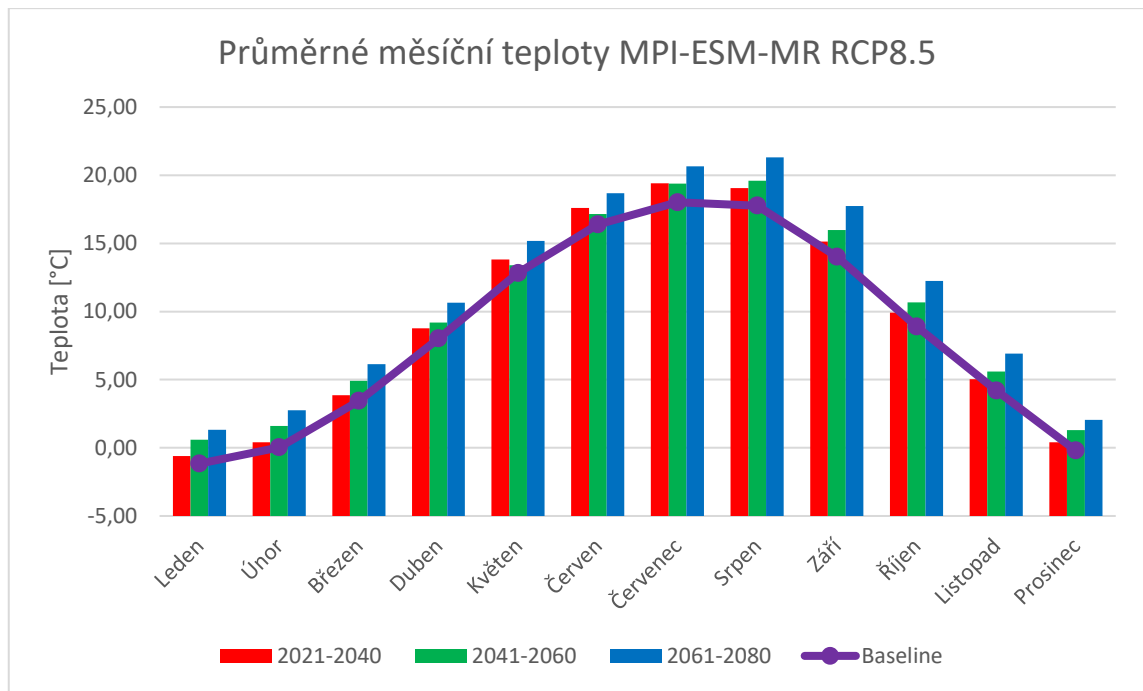
Graf 10 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři MIROC5 RCP8,5

Oba emisní scénáře při klimatickém modelu MIROC5 se prezentují s oteplováním. Stabilizační je v průměru teplejší o 28,9 % oproti Baseline. RCP8,5 scénář je charakterizován 37 % nárůstem průměrné teploty.

Při posledním klimatickém modelu je u stabilizačního scénáře zaznamenán nejmenší nárůst průměrné teploty vzduchu a to o 14,9 %. Ani při druhého scénáře s vysokými emisemi není zaznamenán výrazný nárůst teploty, přesněji o 19,9 %. V celkovém měřítku se jedná o nejméně teplejší klimatický model.



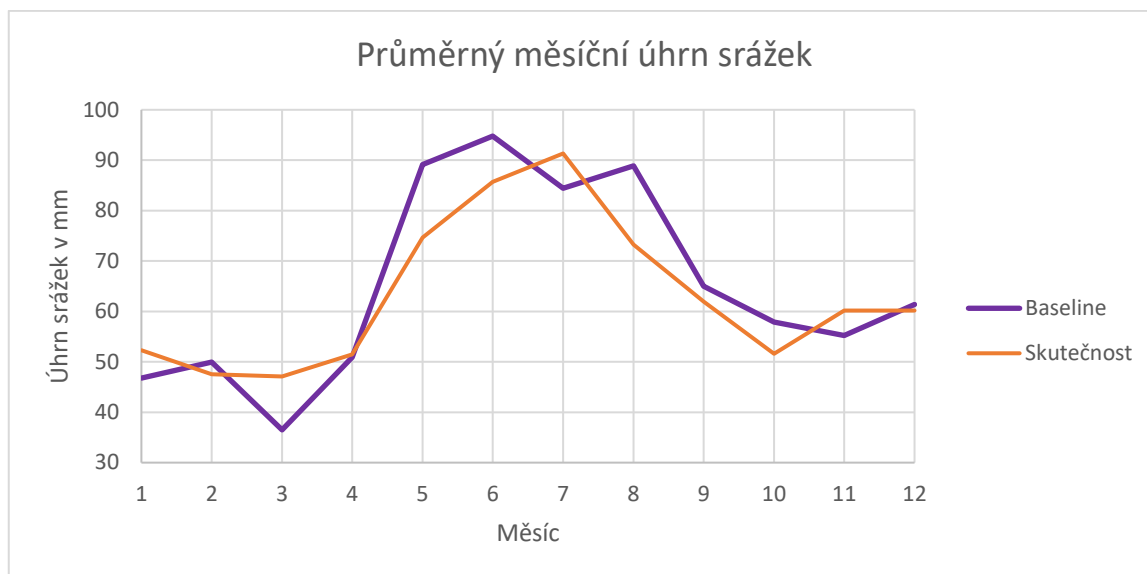
Graf 11 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři MPI-ESM-MR RCP4,5



Graf 12 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři MPI-ESM-MR RCP8,5

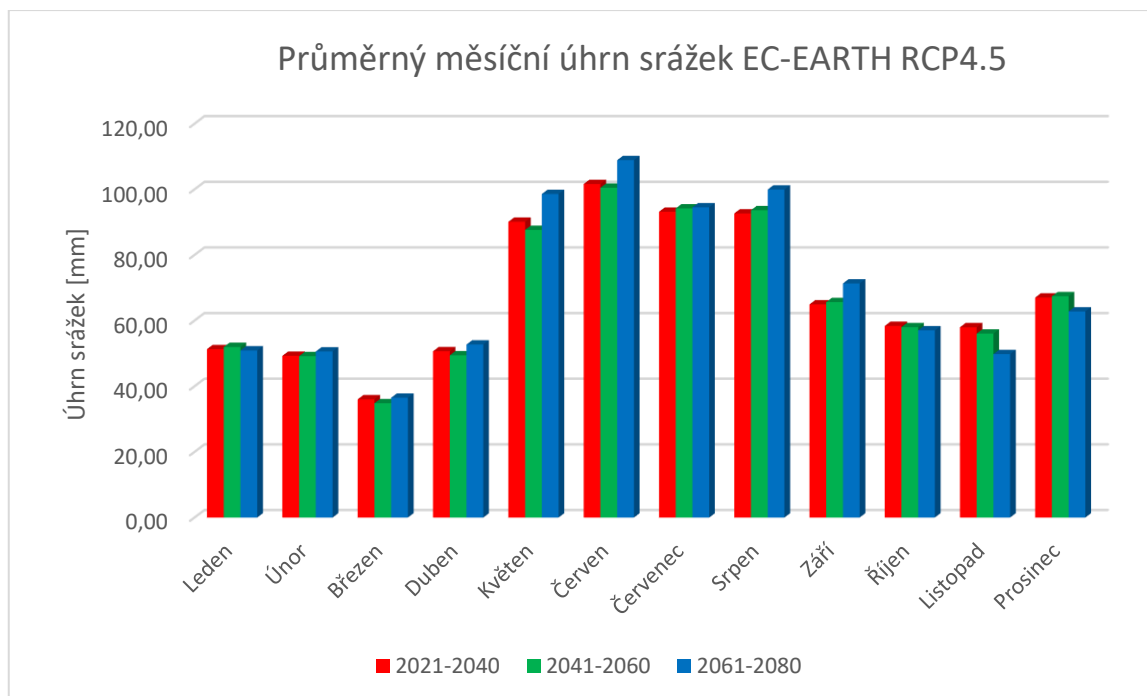
Samotné porovnání průměrných teplot vzduchu je prováděno z důvodu ověření, zda se teplota bude dle emisního scénáře oteplovat či ochlazovat. Zda bude držet pomyslnou trendovou křivku s Baseline, potažmo se skutečností na dané zájmové území.

Úhrn srážek již tak totožný jako teplota vzduchu se skutečností nebyl. Pomyslný trend se ovšem podařilo udržet, jak prezentuje následující graf.

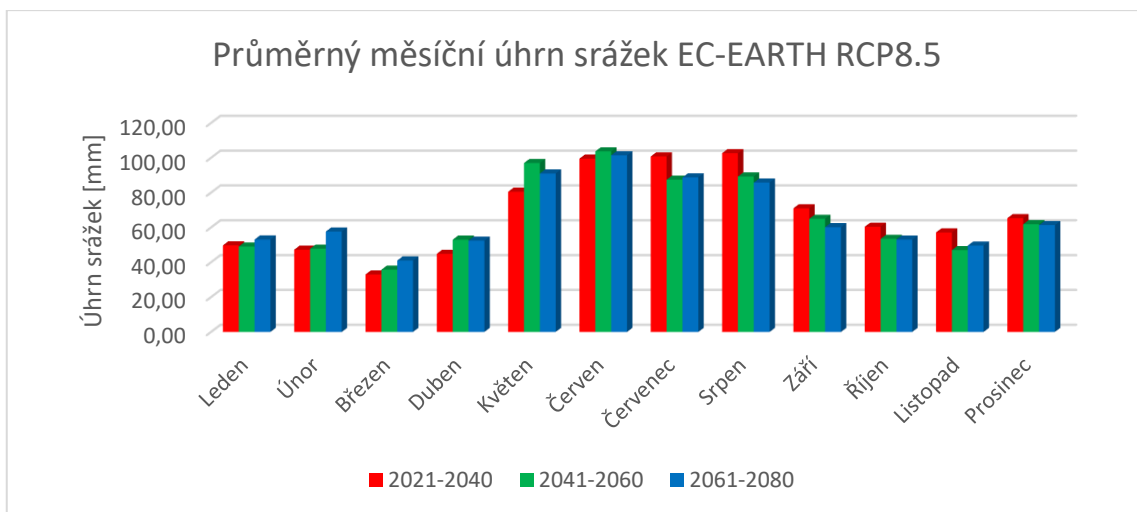


Graf 13 - Porovnání skutečných úhrnů srážek s Baseline

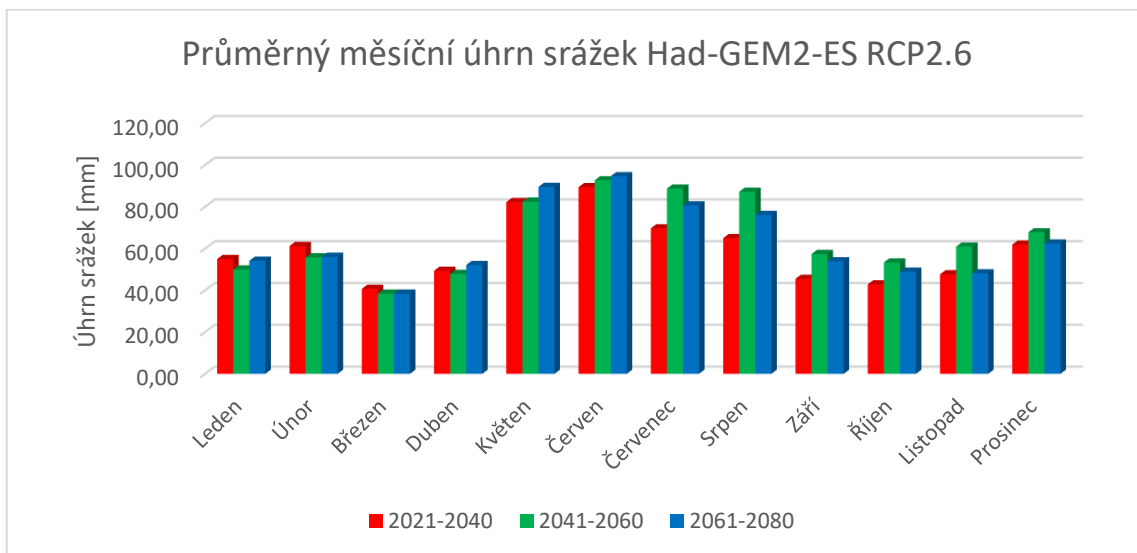
Úhrn srážek v Baseline vzrostl o 3,13 % oproti skutečnosti, což odpovídá necelým dvěma milimetrům spadených srážek. U teplot pozorujeme navýšení oproti pozorované hladině, kdežto u srážek již tak jednoznačný výsledek nenastával. Nejsilnějším emisním scénářem na úhrn srážek byl stabilizační z modelu MIROC5, kdy nárůst činil 11,19 %. Naopak nejslabším scénářem byl vysokoemisní z MPI-ESM-MR modelu, kdy se jednalo o 6,49 % pokles srážek oproti skutečnosti.



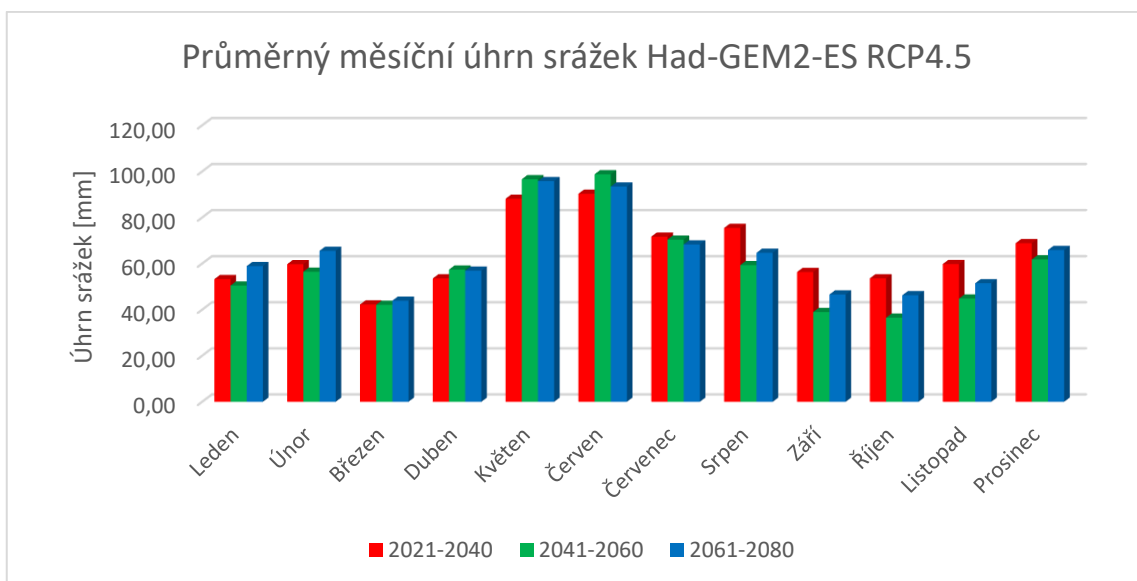
Graf 14 – Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP4,5 z modelu EC-EARTH



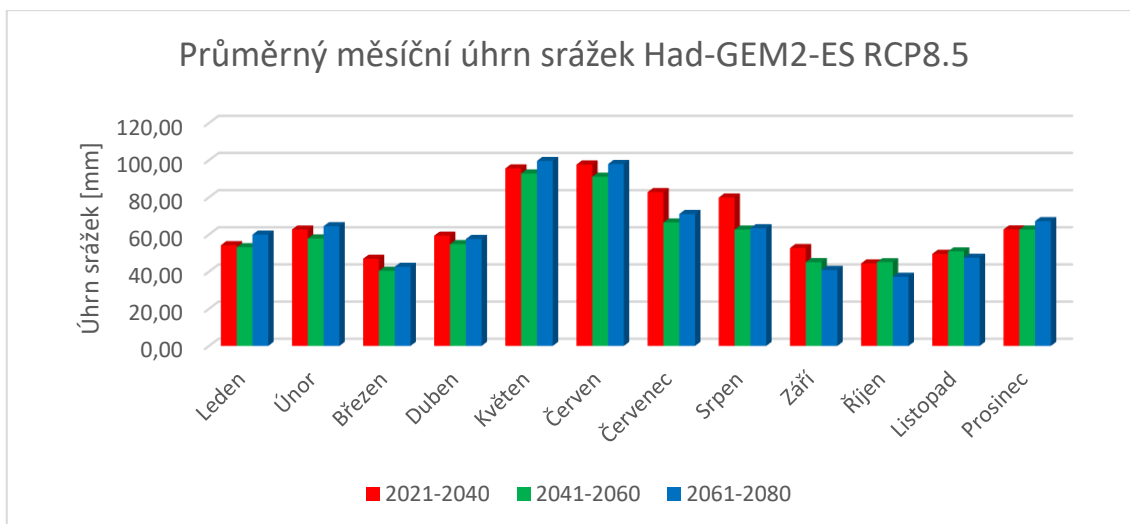
Graf 15 – Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP8,5 modelu EC-EARTH



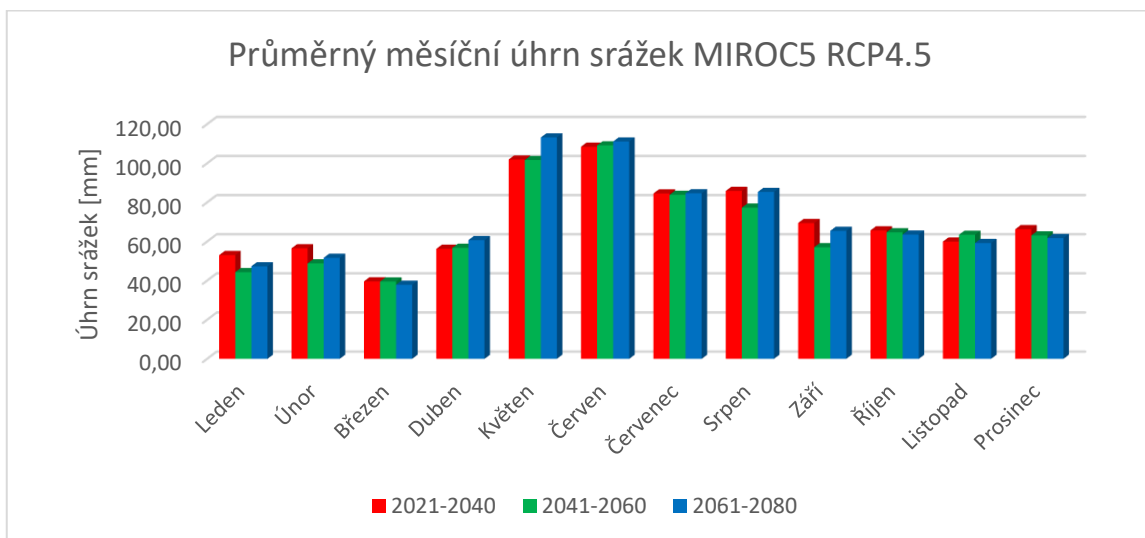
Graf 16 – Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP2,6 modelu Had-GEM2-ES



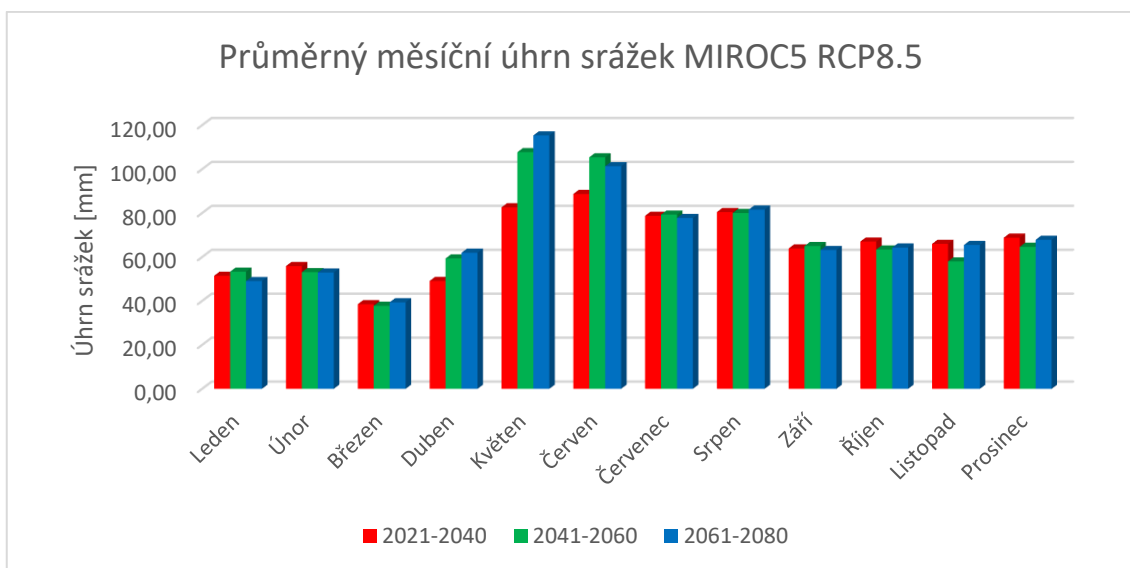
Graf 17 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP4,5 modelu Had-GEM2-ES



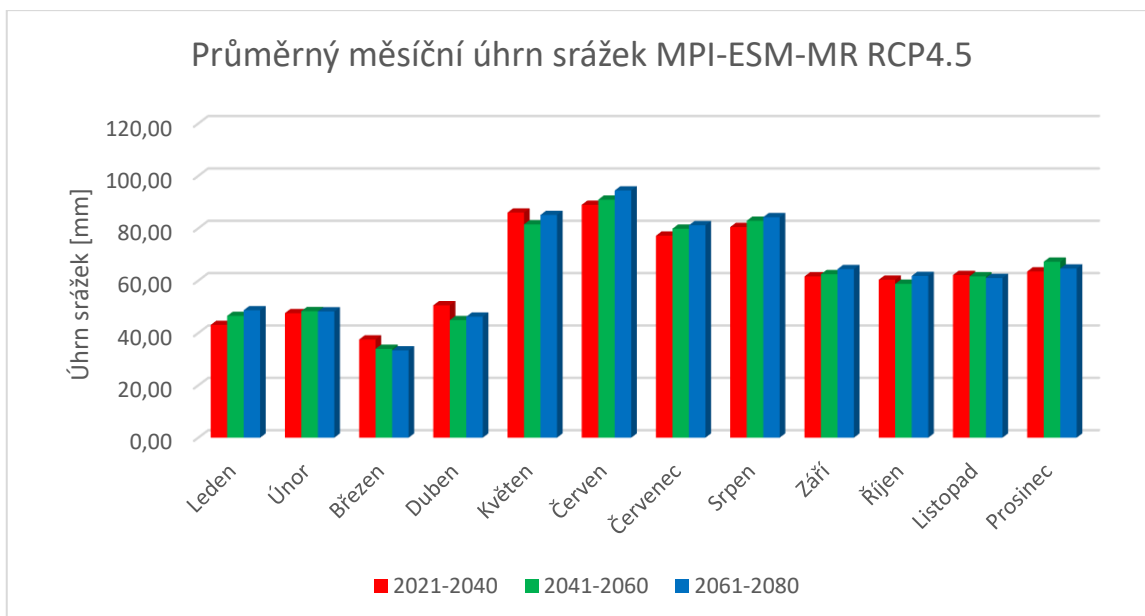
Graf 18 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP8,5 modelu Had-GEM2-ES



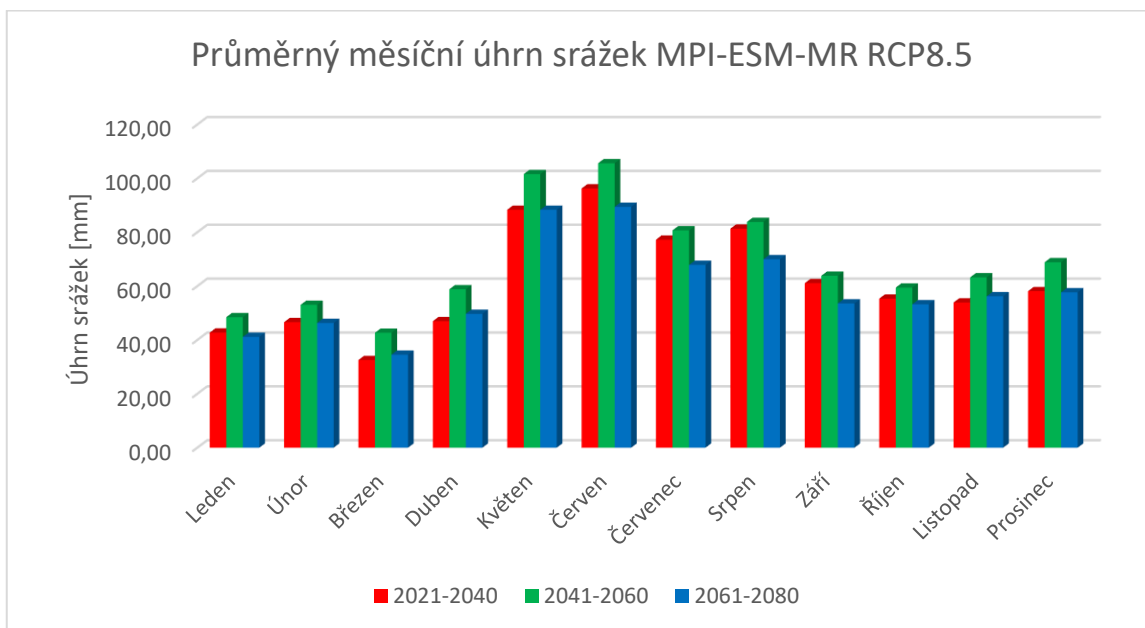
Graf 19 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP4,5 modelu MIROC5



Graf 20 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP8,5 modelu MIROC5



Graf 21 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP4,5 modelu MPI-ESM-MR



Graf 22 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP8,5 modelu MPI-ESM-MR

Samotné vygenerování emisních scénářů bylo důležitým krokem pro výpočet budoucích průtoků k zájmovému území. Data byla vygenerována v podobě denních hodnot a po převedení na měsíční hodnoty mohla být data použita v programu Runoff Prophet.

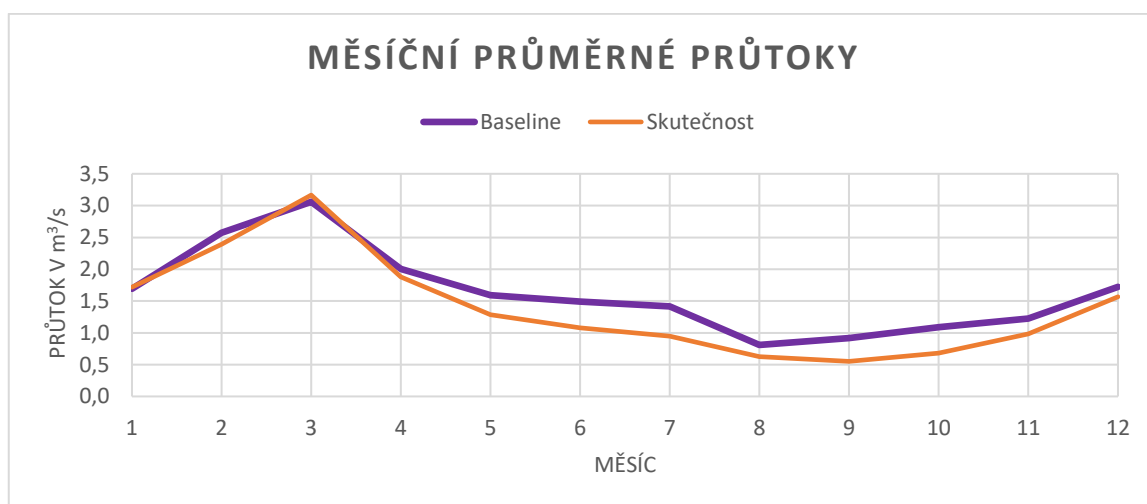
Kalibrace scénářů

Pro kalibraci k výpočtu průtoků byla použita totožná kalibrační řada z prvního kroku, tedy skutečná hydrologická data za období 1970-2005.

Predikce scénářů

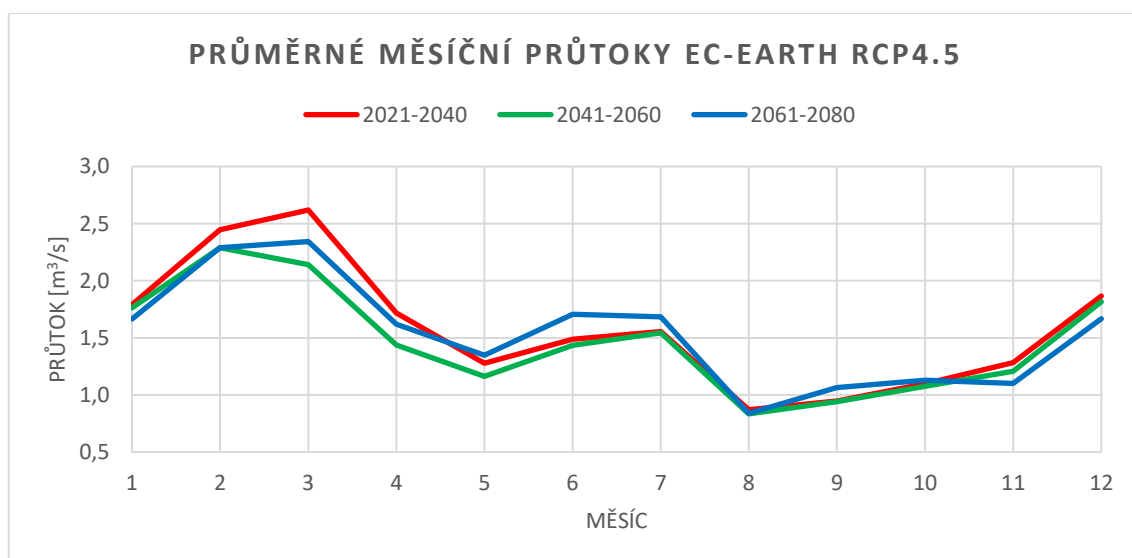
Po provedení kalibrace následoval výpočet jednotlivých emisních scénářů, kdy výsledkem byl průměrný měsíční průtok.

Prvotním výsledkem byla Baseline, která udává následný trend scénářů. Její porovnání se skutečností prezentuje graf níže, kdy je patrné, že se jedná o více vodný stav oproti skutečnosti. Celkový rozdíl činí nárůst o 16,14 %.

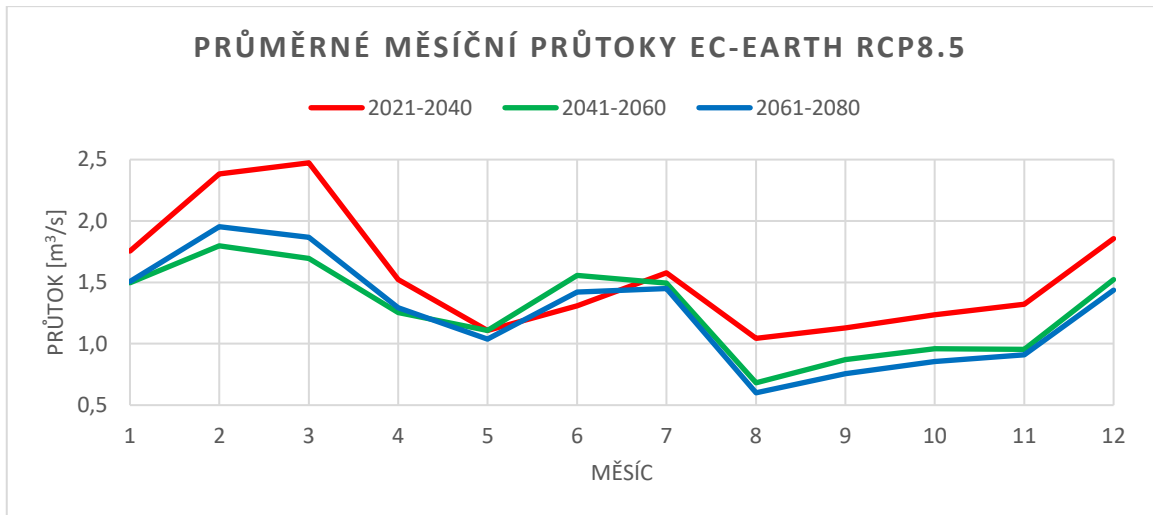


Graf 23 - Porovnání průtoků Baseline oproti skutečnosti

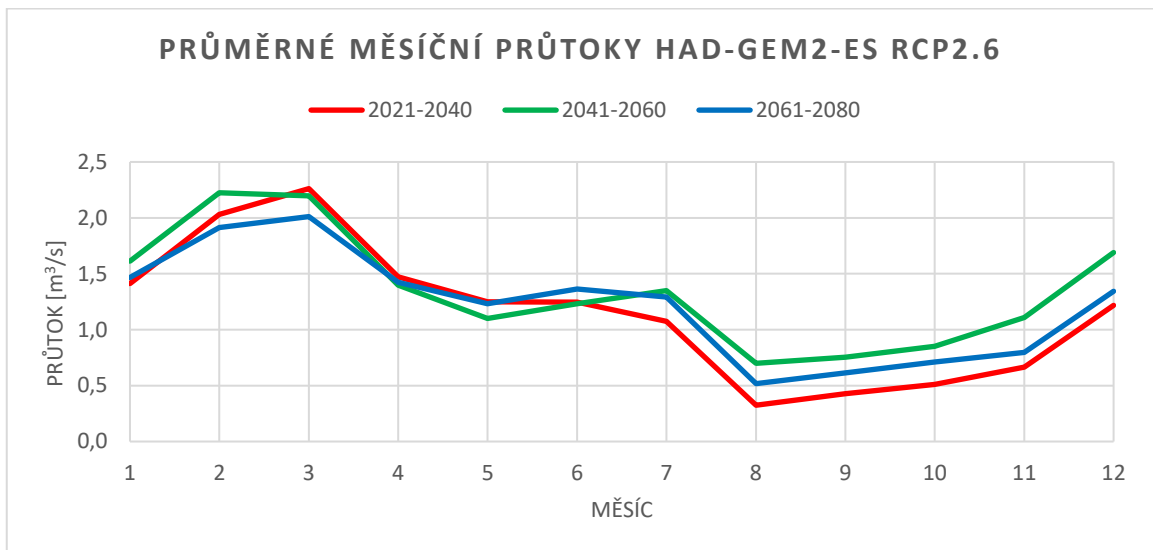
V následujících grafech jsou vyobrazeny průměrné průtoky v měsíčním provedení pro každý emisní scénář zvlášť. Dlouhodobý průtok u všech scénářů RCP vykazuje nižší hodnoty oproti Baseline. Největší pokles je zaznamenán o 31 % a je tomu tak u modelu Had-GEM2-ES při RCP8,5. Naopak nejmenší pokles průměrného dlouhodobého průtoku vykazuje RCP4,5 u EC-EARTH a to o 6,26 %.



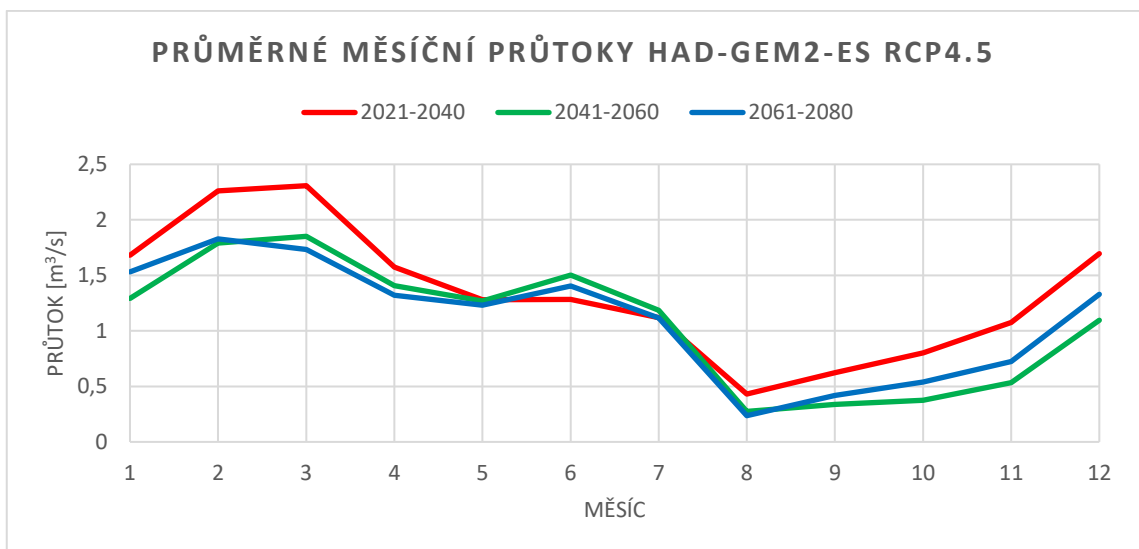
Graf 24 - Průměrný měsíční průtok EC-EARTH RCP4,5



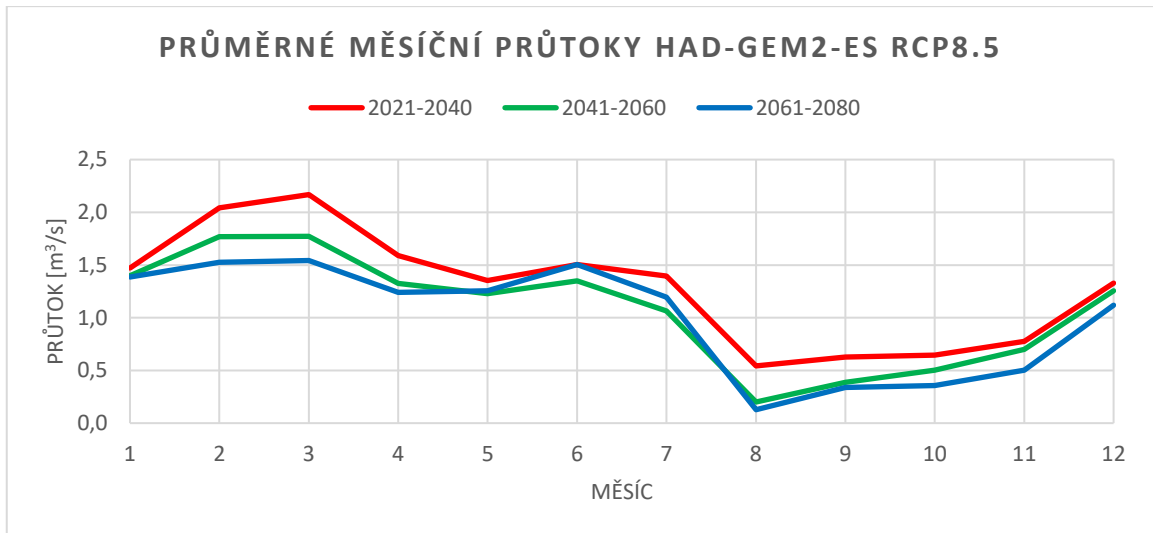
Graf 25 - Průměrný měsíční průtok EC-EARTH RCP8,5



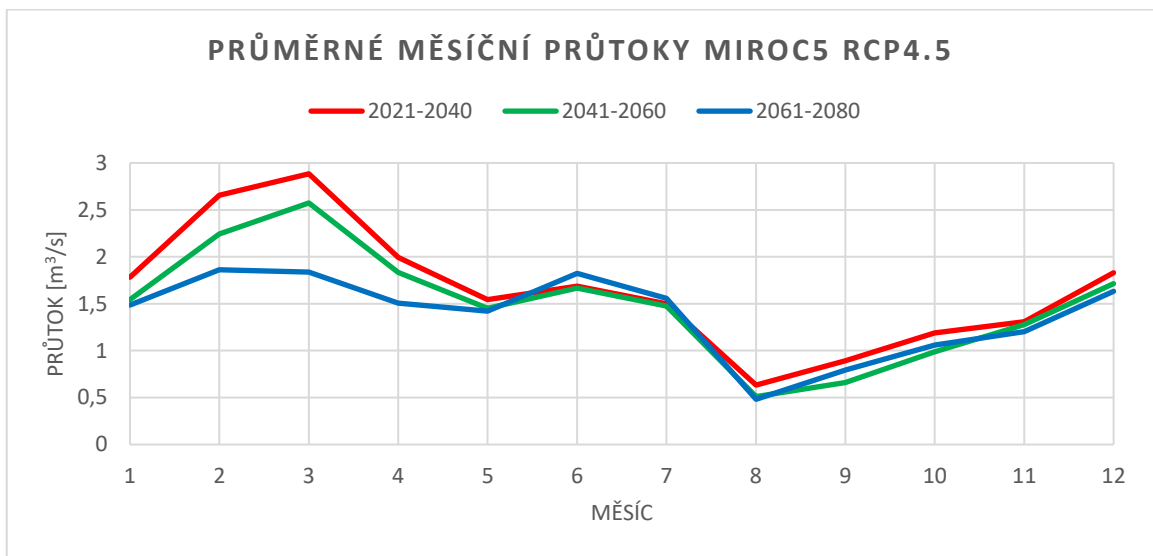
Graf 26 - Průměrné měsíční průtoky Had-GEM2-ES RCP2,6



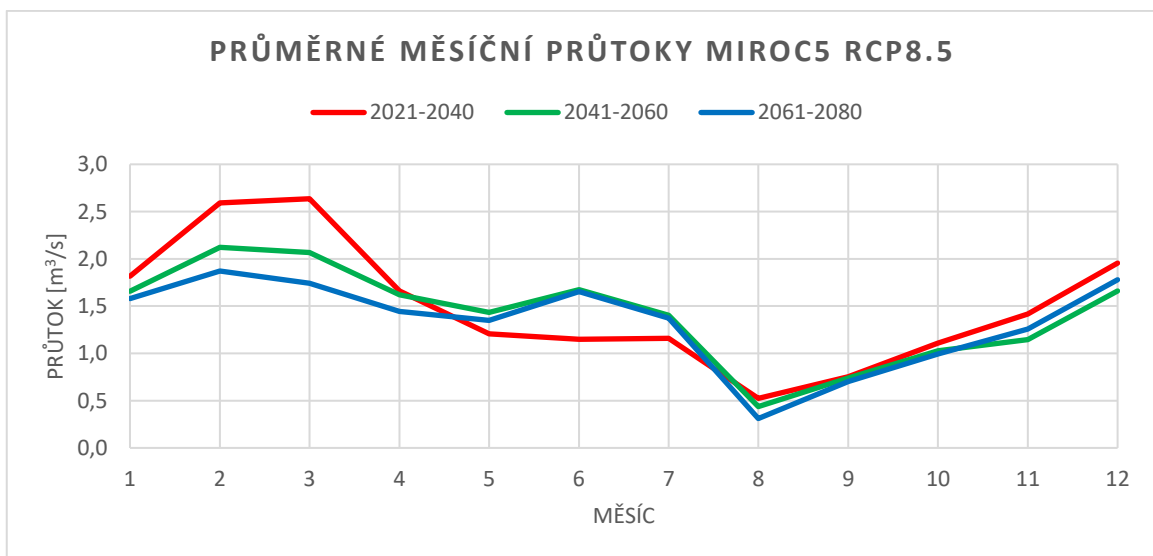
Graf 27 - Průměrné měsíční průtoky Had-GEM2-ES RCP4,5



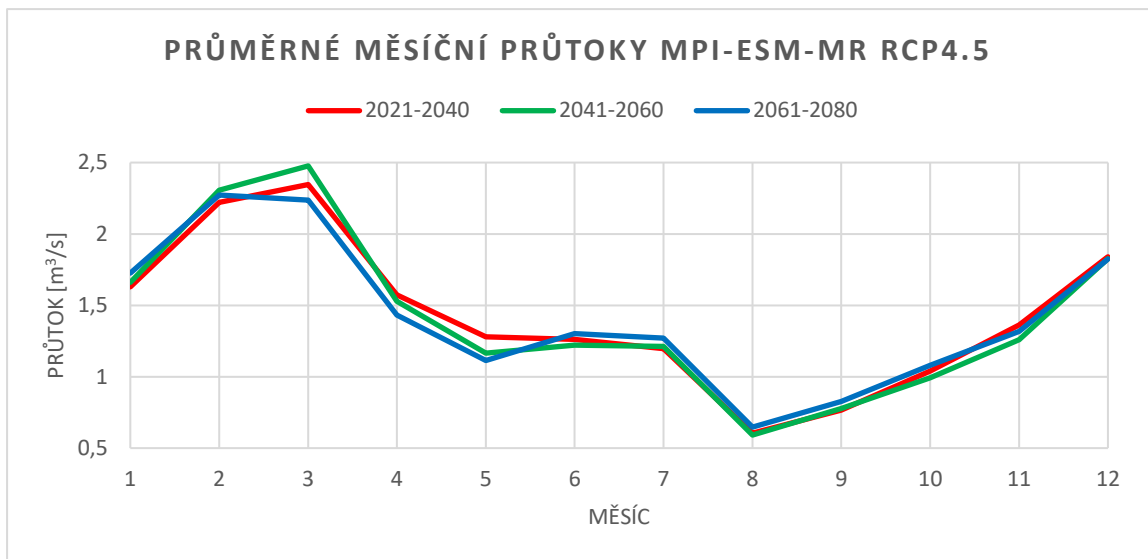
Graf 28 - Průměrné měsíční průtoky Had-GEM2-ES RCP8,5



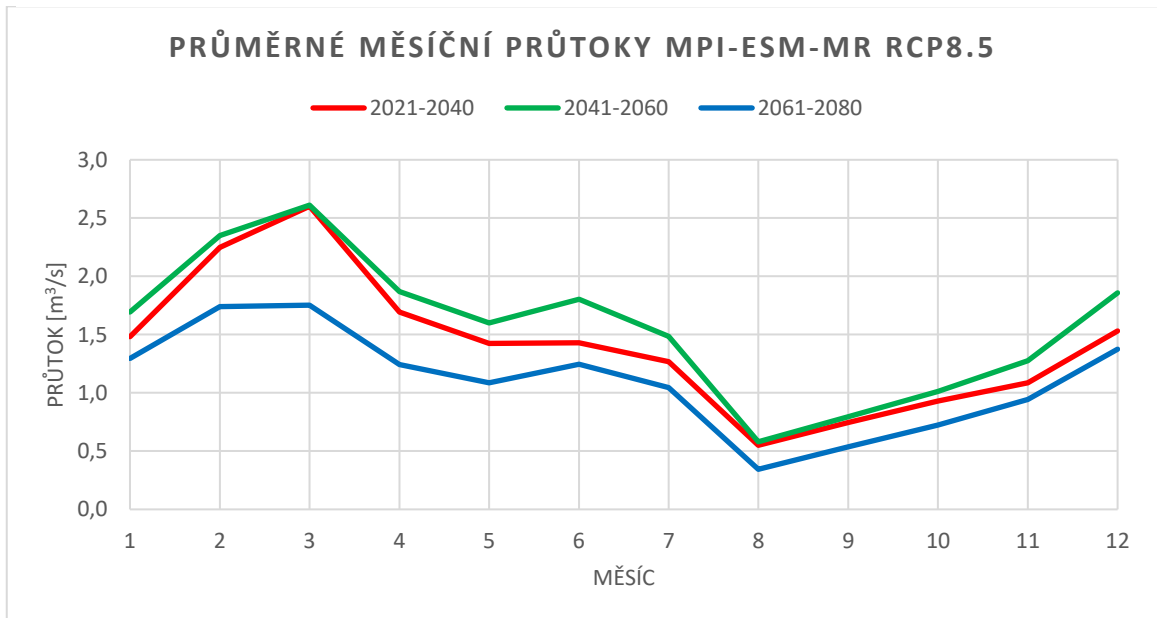
Graf 29 - Průměrné měsíční průtoky MIROC5 RCP4,5



Graf 30 - Průměrné měsíční průtoky MIROC5 RCP8,5



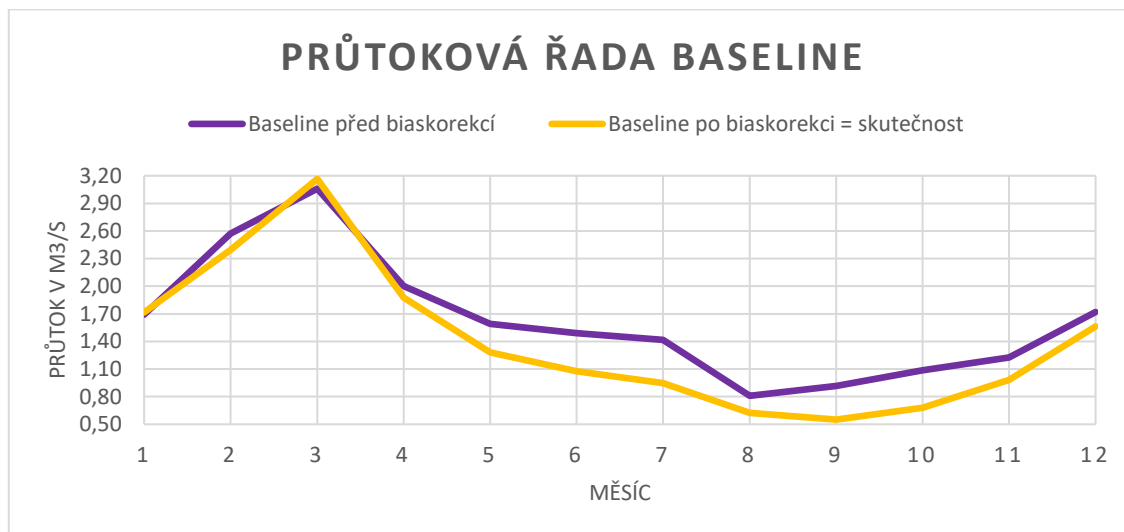
Graf 31 - Průměrné měsíční průtoky MPI-ESM-MR RCP4,5



Graf 32 - Průměrné měsíční průtoky MPI-ESM-MR RCP8,5

Biaskorekce

Pokud například v jednom z měsíců byla průměrná skutečná hodnota 1,72 a v totožném měsíci při Baseline 1,69, tak konečným koeficientem jest hodnota 1,014529. Touto hodnotu se následně vynásobí veškeré denní hodnoty v Baseline a tím se jeho průměrná měsíční hodnota upraví na 1,72. Pro každý měsíc máme k dispozici jeden koeficient, kterým přenásobíme veškerá denní data u jednotlivých emisních scénářů tak, abychom pracovali v jedné totožné hladině výsledků.



Graf 33 - Biaskorekce Baseline průtokové řady

Z výše uvedeného postupu korekce (vzorec 8) jsou koeficienty jednotlivých měsíců následující:

Tabulka 2 - Koeficient Biaskorekce

Měsíc	Koeficient Biaskorekce
Leden	1.014529
Únor	0.930820
Březen	1.034674
Duben	0.937984
Květen	0.806082
Červen	0.723802
Červenec	0.668179
Srpen	0.772358
Září	0.600507
Říjen	0.626128
Listopad	0.800318
Prosinec	0.908660

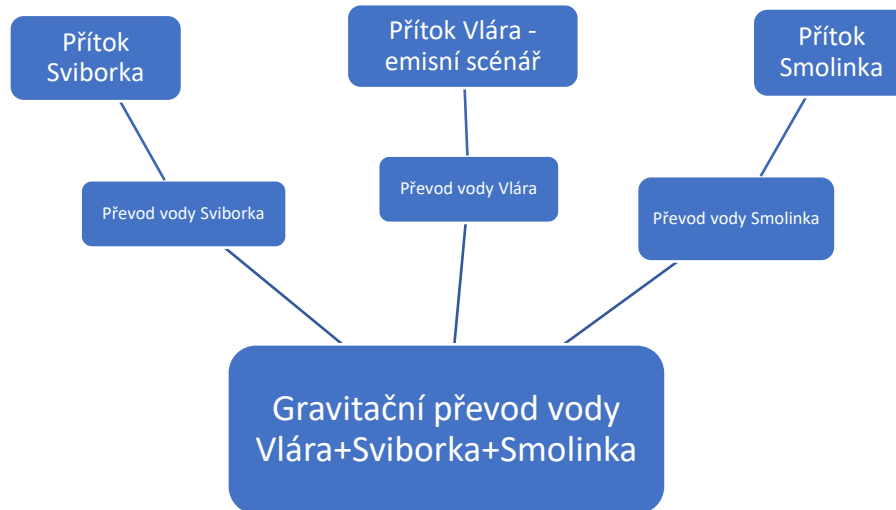
Ve své podstatě budou všechny měsíční průměry upraveny tak, aby odpovídaly co nejlíže realitě. Znárodnění jednoho časové kroku (roku) u vybraného emisního scénáře je znázorněno v následující tabulce.

Tabulka 3 - Znáznornění změny průtoků v jednom roce časového kroku

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Průtok ze scénáře	1.41	1.04	1.76	1.26	0.58	0.63	1.07	1.04	2.61	2.30	1.78	3.98
Koeficient Biaskorekce	1.0145	0.9308	1.0347	0.9380	0.8061	0.7238	0.6682	0.7724	0.6005	0.6261	0.8003	0.9087
Uvažovaný průtok	1.43	0.97	1.82	1.18	0.47	0.46	0.71	0.80	1.57	1.44	1.42	3.62

Převod vody

Přítok vody do nádrže byl odvozen poměrem dlouhodobého průměrného průtoku Q_a odvozeného pro předpokládaný profil tělesa hráze vodního díla Vlachovice. Do přítoku také byly zohledněny pánované převody vody z horní části sousedících povodí řek Smolinky a Sviborky. Převod vody byl uvažován gravitačně s odvozením převodu dle použitých podkladů. [17]



Obrázek 19 - Znárodnění převodu vody

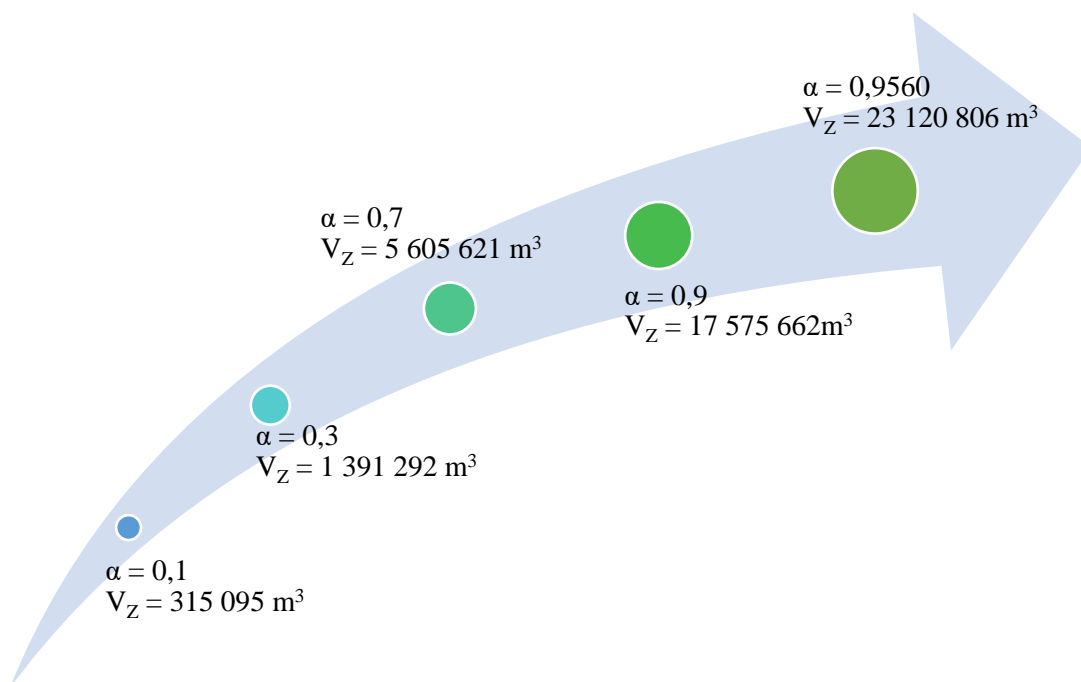
Ve své podstatě jsou stejná data srážkového úhrnu přepočítána na povodí vodních toků Smolinky a Sviborky na základě velikosti plochy povodí, z kterých je následně počítán průtok, respektive přítok na těleso hráze.

Zásobní objem pro 100 % zabezpečení odtoku vody z nádrže

S přihlédnutím na podklady Technicko-ekonomické studie nádrže Vlachovice byla pro výpočet volena varianta nádrže se zásobním objemem o velikosti $V_Z = 23,12$ mil. m^3 .

Za pomoci softwaru Unce Clima Change byly provedeny výpočty pro nalezení přesné hodnoty koeficientu nalepšení alfa tak, aby zásobní objem splňoval požadované kritérium. Vstupními hodnoty k výpočtu byla řada průtoků z předcházejícího kroku – gravitační převod vody. Velikost objemu stálého nadržení bylo uvažováno okolo 15 % a průměrná hodnota ročního výparu z vodní hladiny byla stanovena na 740 mm.

Se zvyšující se hodnotou koeficientu nalepšeného odtoku rostl i objem zásobního objemu nádrže, respektive objem celé nádrže. Koeficient uvažován na čtyři desetinná místa.

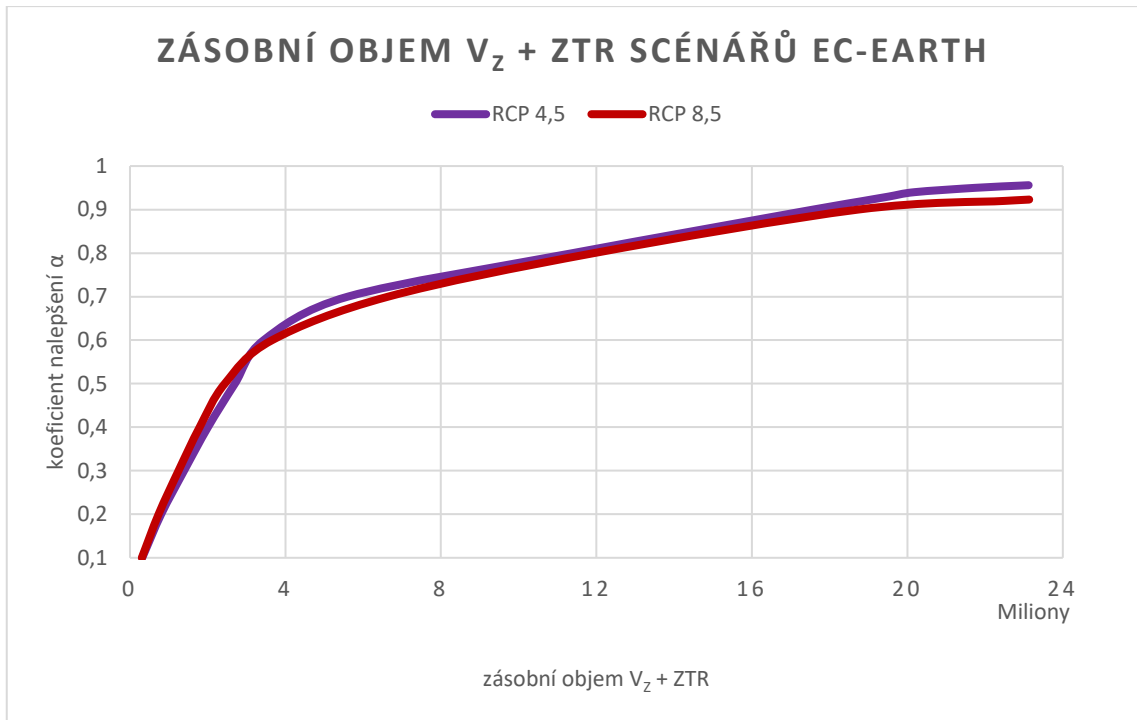


Obrázek 21 - Závislost velikosti zásobního objemu na koeficientu alfa

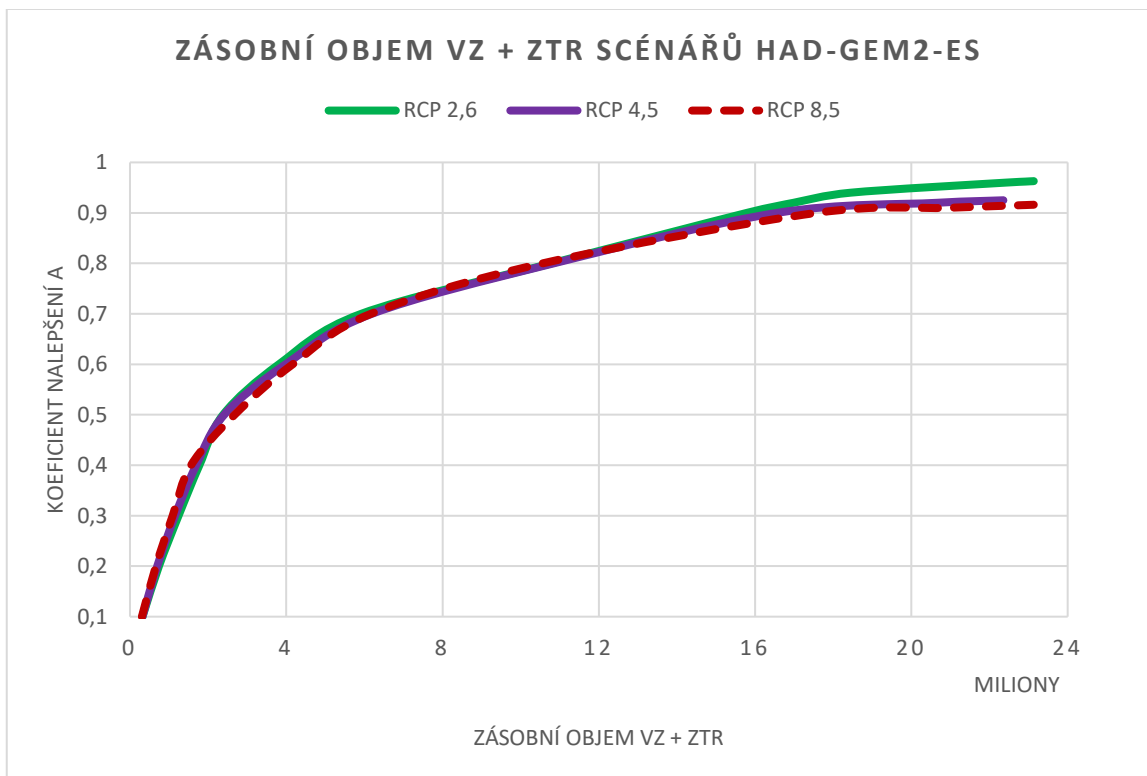
Samotný výpočet velikosti zásobního objemu v závislosti na koeficientu nalepšeného odtoku byl uvažován pro:

- 60 let sledujícího období
- Přibližně 15 % velikosti objemu stálého nadržení
- 740 mm průměrného ročního výparu

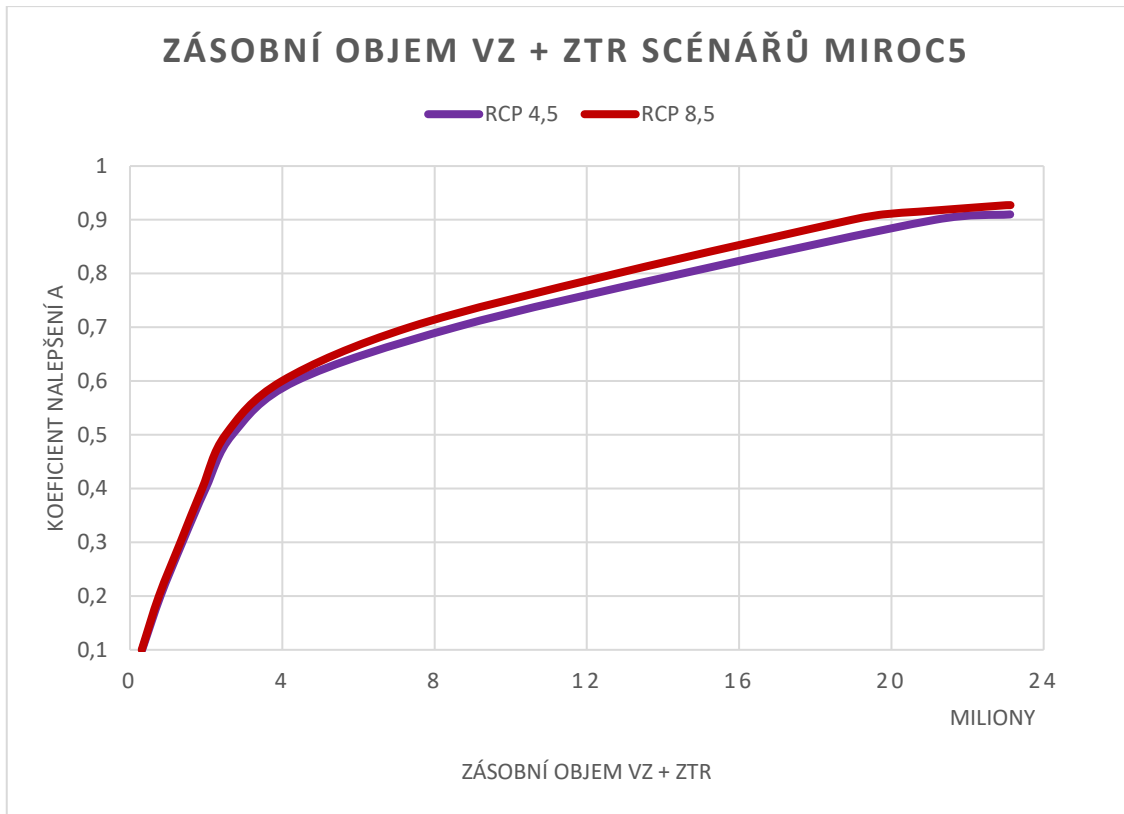
Jedinou proměnnou jest koeficient nalepšeného odtoku α , která se pohybuje v množině (0;1). Uvažováno na čtyři desetinná místa.



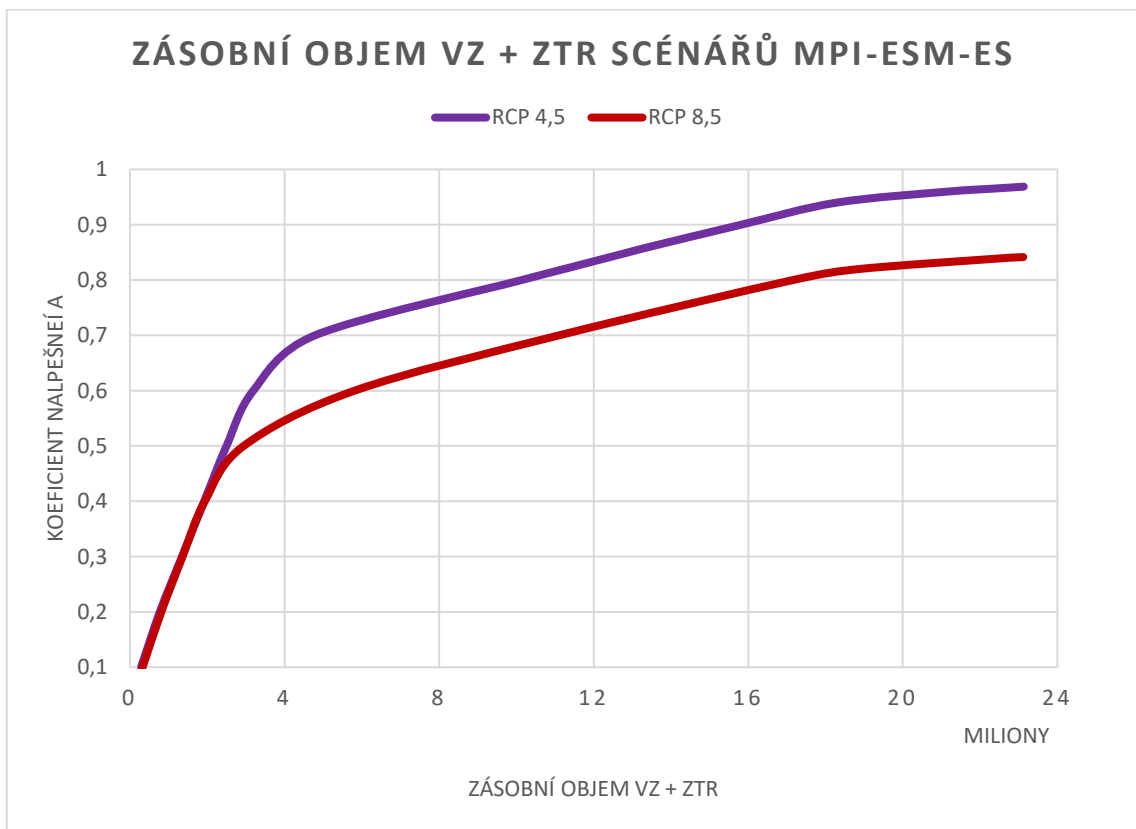
Graf 34 - Zásobní objem pro klimatický model EC-EARTH



Graf 35 - Zásobní objem klimatického modelu Had-GEM2-ES



Graf 36 - Zásobní objem pro klimatický model MIROC5



Graf 37 - Zásobní objem pro klimatický model MPI-ESM-MR

Z hodnot uvedených v tabulce je patrné, že koeficient se drží nad pomyslnou hranicí devíti desetin. Výjimkou jest jediný scénář. Medián koeficientů 0,9268 je pomyslná hranice stoprocentní zabezpečnosti.

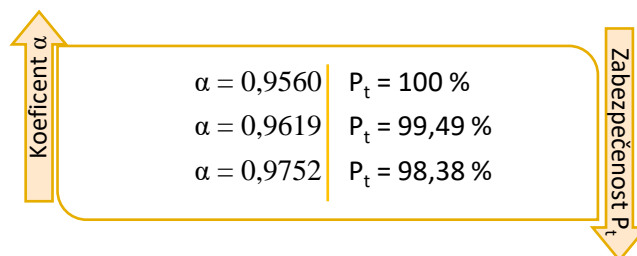
Tabulka 4 - Koeficient nalepšení pro emisní scénáře

Klimatický model	Emisní scénář	Koeficient nalepšení α	Zásobní objem $V_z + ZTR [m^3]$
EC-EARTH	RCP 4.5	0.9560	23 120 806
	RCP 8.5	0.9230	23 134 288
Had-GEM2-ES	RCP 2.6	0.9629	23 132 342
	RCP 4.5	0.9268	23 112 562
	RCP 8.5	0.9161	23 132 508
MIROC5	RCP 4.5	0.9100	23 120 934
	RCP 8.5	0.9273	23 129 496
MPI-ESM-ES	RCP 4.5	0.9688	23 129 674
	RCP 8.5	0.8415	23 115 960

Zabezpečení nalepšeného odtoku vody z nádrže

Pro stanovení odtoku vody z nádrže, když je znám zásobní objem V_z . Dle ČSN 75 2405 jest zabezpečení třídy významnosti A pro $P_t \geq 99,5 \%$ a třída významnosti B pro $P_t \geq 98,5 \%$.

Požadované hodnoty zabezpečení se dosáhne pozvolným zvyšováním koeficientu nalepšení alfa. Přesnou hodnotu koeficientu známe z předchozího kroku pro stoprocentní zabezpečení.



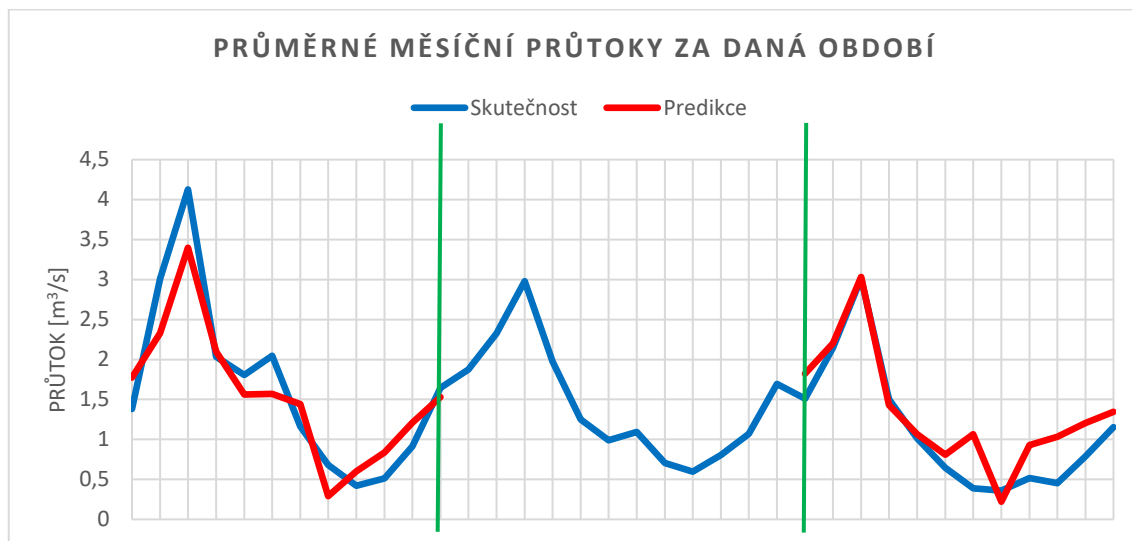
Obrázek 22 - Závislost koeficientu alfa na zabezpečení odtoku z nádrže

Tabulka 5 - Koeficient nalepšeného odtoku pro třídu významnosti

Klimatický model	Emisní scénář	Koeficient α		
		$P_t = 100 \%$	$P_t \geq 99.5 \%$	$P_t \geq 98.5 \%$
EC-EARTH	RCP 4.5	0.9560	0.9619	0.9752
	RCP 8.5	0.9230	0.9263	0.9410
Had-GEM2-ES	RCP 2.6	0.9629	0.9649	0.9893
	RCP 4.5	0.9268	0.9305	0.9489
	RCP 8.5	0.9161	0.9192	0.9309
MIROC5	RCP 4.5	0.9100	0.9147	0.9357
	RCP 8.5	0.9273	0.9341	0.9638
MPI-ESM-ES	RCP 4.5	0.9688	0.9714	0.9844
	RCP 8.5	0.8415	0.8484	0.8681

Vyhodnocení výsledků

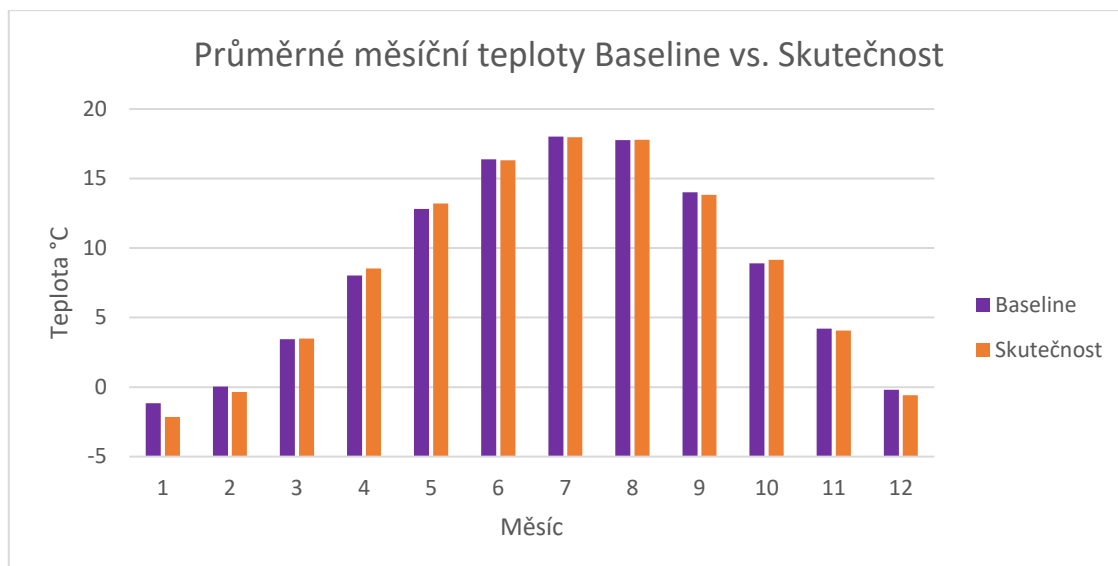
Kalibrace skutečnými daty byla provedena s koeficientem $NS=0,659$. Z grafu níže můžeme vypočítat rozdíl predikované průtočné řady oproti realitě pro dvě vymezená období, a to konkrétně 1961-1969 a 2006-2018. Uvedené hodnoty jsou uvedeny v průměrných měsíčních číslech za dané období.



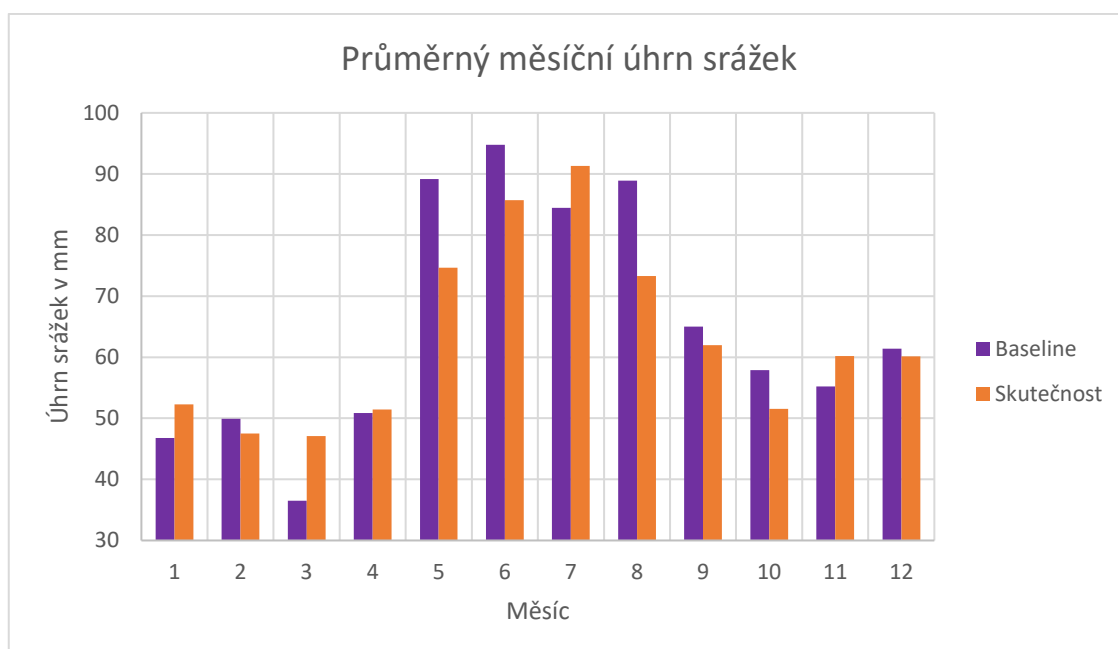
Graf 38 - Porovnání průtoků po provedení kalibrace

Graf je rozdělen do tří pomyslných sloupců, které znázorňují časové období (1961-1969, 1970-2005, 2006-2018). Modrá znázorňuje skutečnost a v prostředním sloupci i kalibrační řadu. Červená naopak ukazuje predikované průtoky z výpočtu programem Runoff Prophet po nakalibrování. Pro první sloupec, tedy období 1961-1969 je predikovaná řada průměrně podhodnocena o 5,54 %. Kdežto třetí sloupec, časová osa 2006-2018 je o 19,79 % nadhodnocena. V celkovém měřítku to znamená, že vodnost vypočítaných průtoků je oproti skutečným hodnotám přibližně totožná, a to celkově o 4,7 %. Těchto necelých pět procent odpovídá číselné hodnotě 0,065 m³/s.

Nejdůležitější vygenerovanou řadou byla Baseline, která sloužila především pro porovnání a srovnání emisních scénářů se skutečností. Baseline byla vygenerována ve dvacetiletém časovém úseku a její porovnání se skutečností je vyobrazeno v následujících dvou grafech, kde je znázorněna průměrná měsíční teplota a celkový měsíční úhrn srážek.



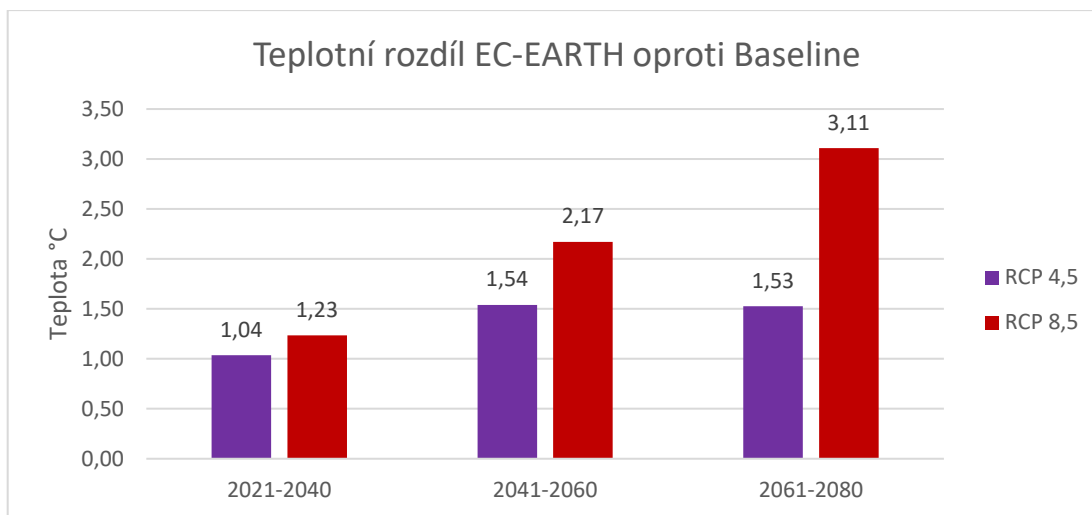
Graf 39 - Průměrné měsíční teploty Baseline a skutečnosti



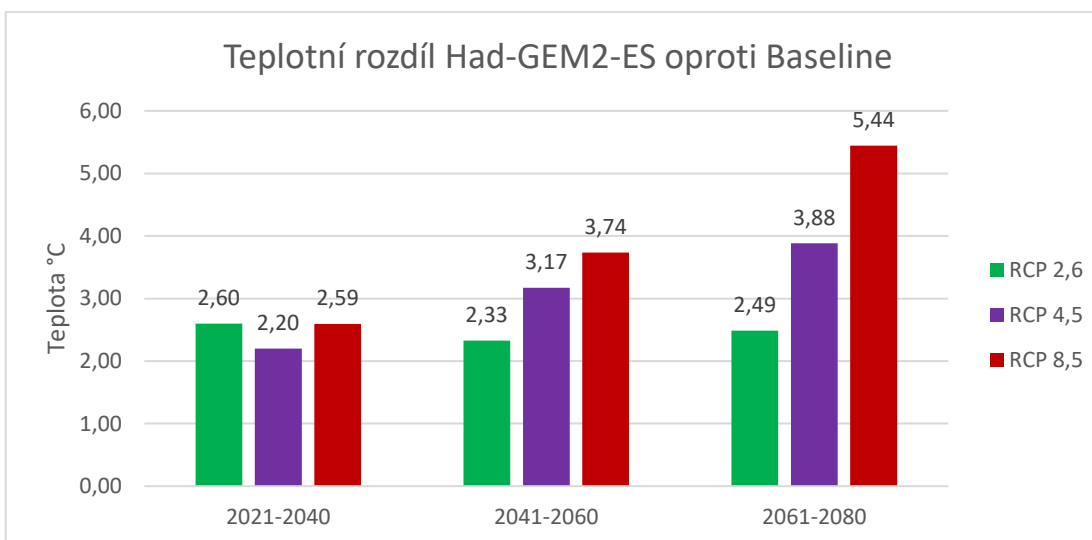
Graf 40 - Celkový úhrn srážek Baseline a Skutečnost

Z grafů je patrné, že Baseline kopíruje trend průměrných teplot vzduchu a důkazem je nepatrný 0,99 % nárůst. Při úhrnu srážek se při pohledu na graf zdá být Baseline více nadhodnocena, ale nárůst o 3,13 % neboli o necelé 2 mm v průměru je opakem. Baseline tedy můžeme uvažovat jako srovnávací hladinu pro emisní scénáře a porovnávat jej s ní. Samotný rozdíl mezi skutečností a Baseline řadou sehraje významnou roli při úpravě průtokových řad scénářů.

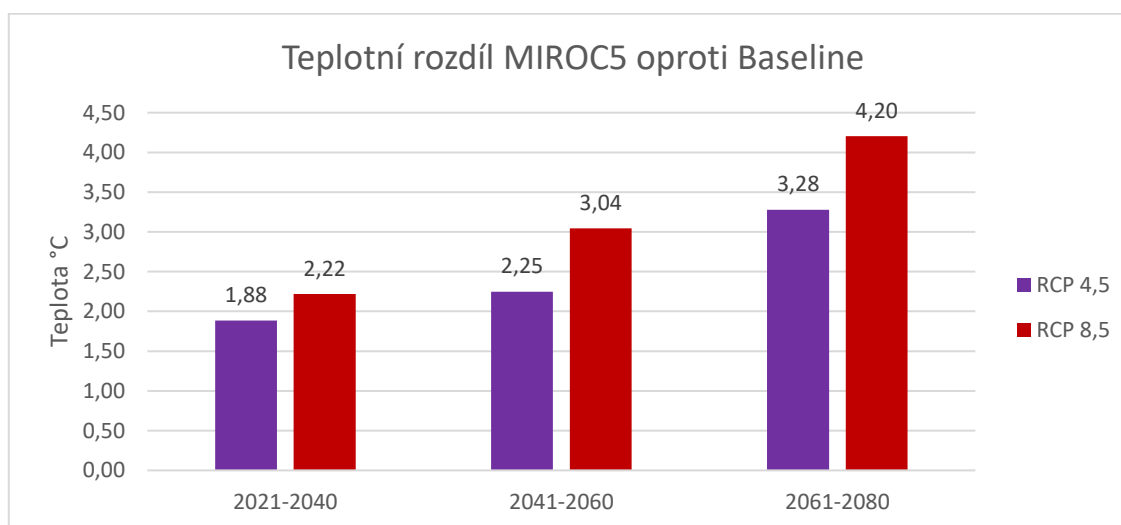
V následujících grafech je prezentován teplotní rozdíl klimatických modelů oproti Baseline.



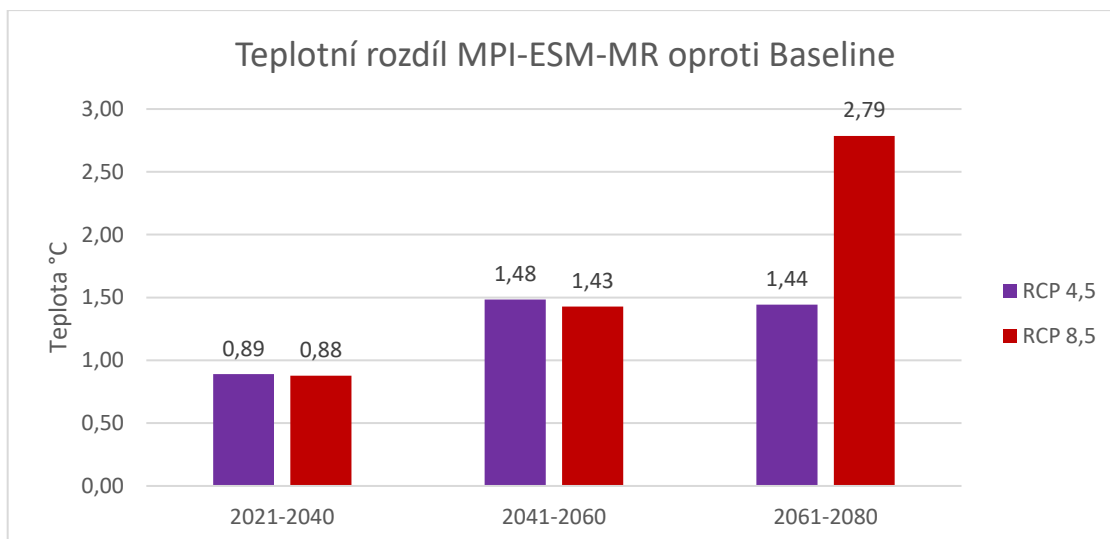
Graf 41 - Teplotní rozdíl EC-EARTH oproti Baseline



Graf 42 - Teplotní rozdíl Had-GEM2-ES oproti Baseline



Graf 43 - Teplotní rozdíl MIROC5 oproti Baseline



Graf 44 - Teplotní rozdíl MPI-ESM-MR oproti Baseline

Z grafů je patrné, že veškeré emisní scénáře uvažují s trendem rostoucí teploty. V průměru je tzv. nejteplejším scénářem RCP 8,5 z modelu Had-GEM2-ES. Nárůst průměrné teploty zmíněného scénáře je oproti Baseline o 3,93 °C. Teplotní nárůst přibližně odpovídá nárůstu teploty uvedené v charakteristice emisního scénáře RCP 8,5.

Za povšimnutí stojí i jediný emisní scénář RCP 2,6. U něj můžeme pozorovat nárůst průměrné teploty o 2,47 °C, což dle charakteristiky scénáře více jak dvojnásobně přesahuje uvažované oteplování.

V následující tabulce můžeme pozorovat procentuální rozdíl celkového úhrnu srážek pro jednotlivé klimatické modely, respektive emisní scénáře oproti Baseline. Z tabulky je patrné, že scénáře jsou nastaveny příslušným klimatickým modelem. Tudiž můžeme říci, že klimatický model nastaven na více či méně srážkových dní. Největšího nárůstu si můžeme povšimnout u scénářů v klimatickém modelu MIROC5, naopak Had-GEM2-ES je nastaven v opačném trendu.

Závislost teploty na úhrnu srážek

- Porovnáme-li například jediný scénář RCP 2,6 tak můžeme říci, že čím větší průměrná teplota se ve scénáři vyskytuje tím je scénář ochuzen o celkový úhrn srážek. To může být zapříčiněno s více dny bez srážkového úhrnu – možný výskyt období sucha.
- Uvedenou myšlenku podporuje i RCP 4,5 u modelu EC-EARTH, který se prezentuje téměř s nejnižším nárůstem průměrné teploty a zároveň skoro nejvyšším přírůstkem v celkovém úhrnu srážek.
- Naopak hypotézu vyvrací vysoce emisní scénář modelu MIROC5, který má vysoký nárůst teploty i úhrnu srážek.

Obrázek 23 - Možná závislost teploty vzduchu na úhrnu srážek v emisních scénářích

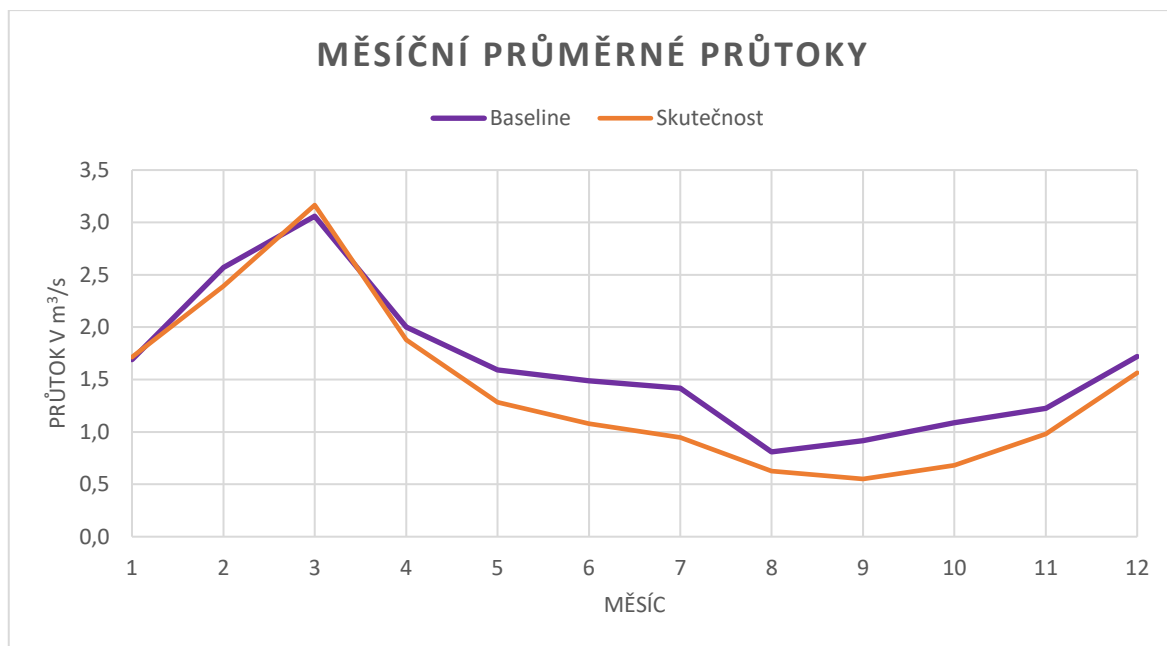
Tabulka 6 - Procentuální rozdíl úhrnu srážek klimatických modelů oproti Baseline

Průměrný měsíční úhrn srážek			Σ	\emptyset	%
Baseline		2021-2040	780.84	780.84	-
EC-EARTH	RCP 4,5	2021-2040	813.27	818.53	4.83
		2041-2060	808.59		
		2061-2080	833.73		
	RCP 8,5	2021-2040	812.33	799.32	2.37
		2041-2060	790.27		
		2061-2080	795.35		
Had-GEM2-ES	RCP 2,6	2021-2040	710.37	749.24	-4.05
		2041-2060	782.42		
		2061-2080	754.94		
	RCP 4,5	2021-2040	772.78	747.88	-4.22
		2041-2060	713.43		
		2061-2080	757.43		
	RCP 8,5	2021-2040	788.51	753.58	-3.49
		2041-2060	723.00		
		2061-2080	749.25		
MIROC5	RCP 4,5	2021-2040	847.69	833.11	6.69
		2041-2060	809.78		
		2061-2080	841.86		
	RCP 8,5	2021-2040	791.11	819.41	4.94
		2041-2060	827.02		
		2061-2080	840.11		
MPI-ESM-MR	RCP 4,5	2021-2040	758.84	763.55	-2.21
		2041-2060	758.78		
		2061-2080	773.03		
	RCP 8,5	2021-2040	740.50	759.54	-2.73
		2041-2060	830.13		
		2061-2080	708.00		

Pro vygenerované hodnoty emisních scénářů v podobě teplot a úhrnů srážek byla zapotřebí požadovaná úprava dat pro výpočet průtoků softwarem Runoff Prophet. Kalibrační řada zůstala nezměněna, tedy skutečná hydrologická data za období 1970-2005. Tentokrát kalibrace proběhla s koeficientem NS o hodnotě 0,650. Následoval výpočet průtoků pro jednotlivé časové období u všech emisních scénářů. Výsledkem byla řada průtoků, která byla prvotně porovnána s Baseline a následně pomocí biaskorekce upravena na stejnou hladinu se skutečností.

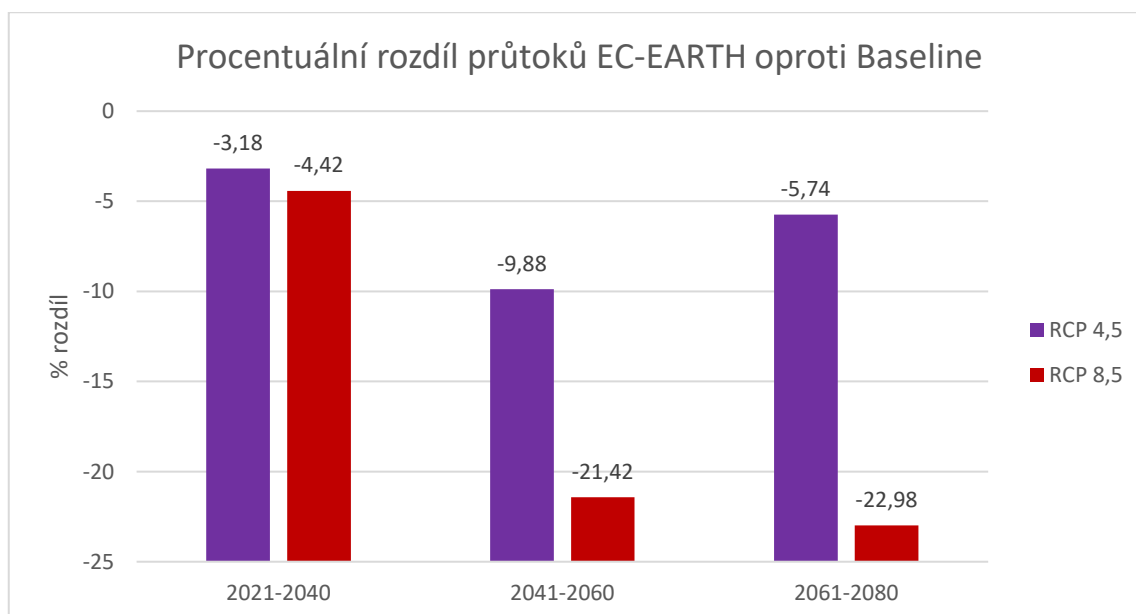
V následujících grafech a tabulkách jsou uvedeny vypočtené průtoky emisních scénářů a jejich následná úprava pro zájmové území.

Prvotním krokem výpočtu průtoků byla Baseline řada, která opět sloužila pro porovnání emisních scénářů se skutečností, a především i úpravu pro převedení scénářů na zájmové území.

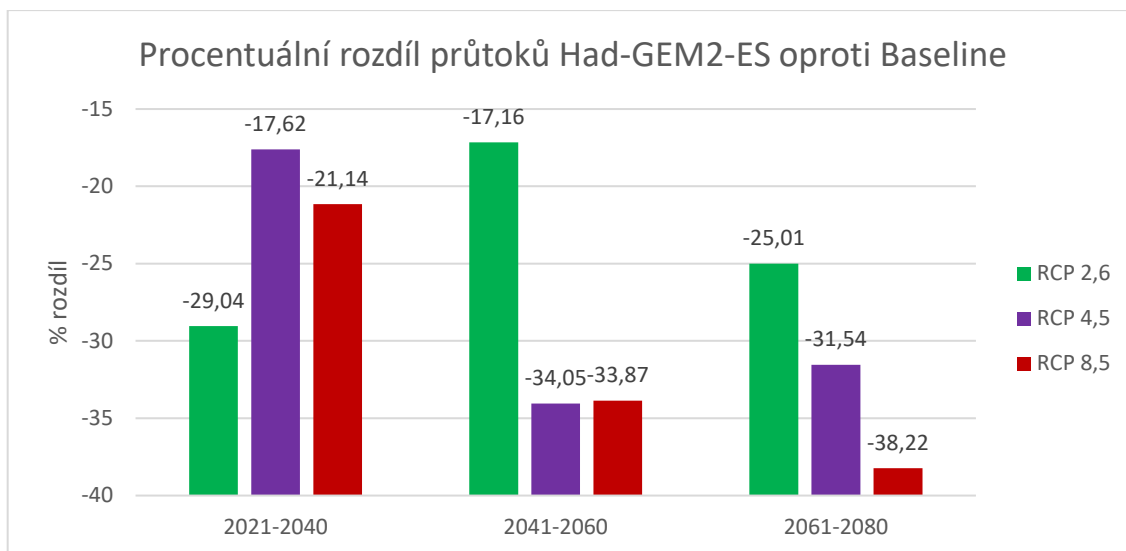


Graf 45 - Průměrný měsíční průtok Baseline

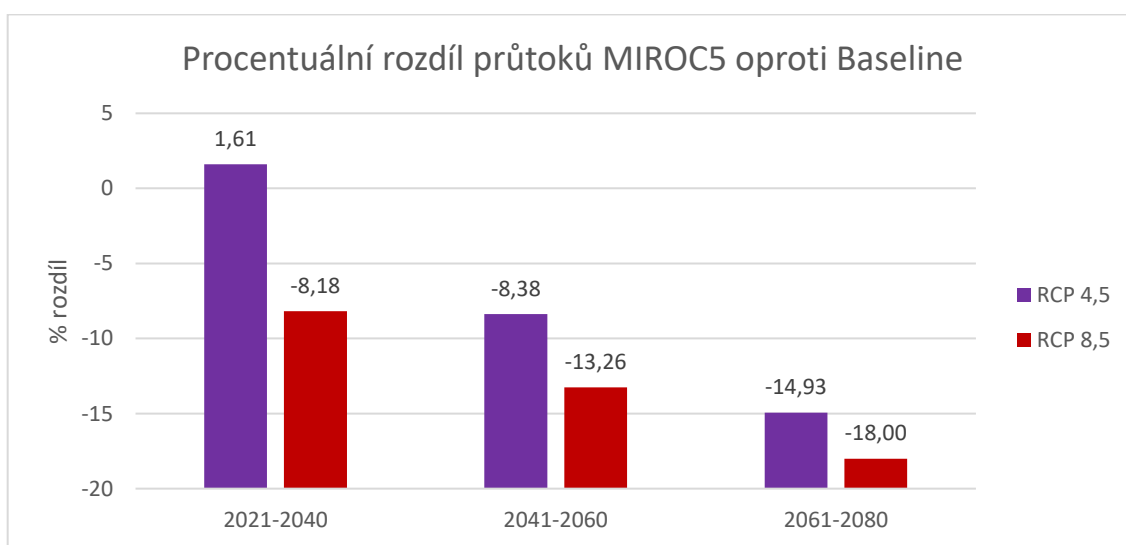
Opět Baseline kopíruje trend skutečnosti a celkový průměrný průtok je vyšší o 16,14 %, což odpovídá zhruba dvěma desetínám metrů krychlových. Oproti tomu můžeme v následujících čtyřech grafech pozorovat, že emisní scénáře jsou v porovnání s Baseline řadou podhodnoceny. To znamená, že navazují na zvyšující se teploty a mírný pokles srážek, vodnost recipientu se bude snižovat.



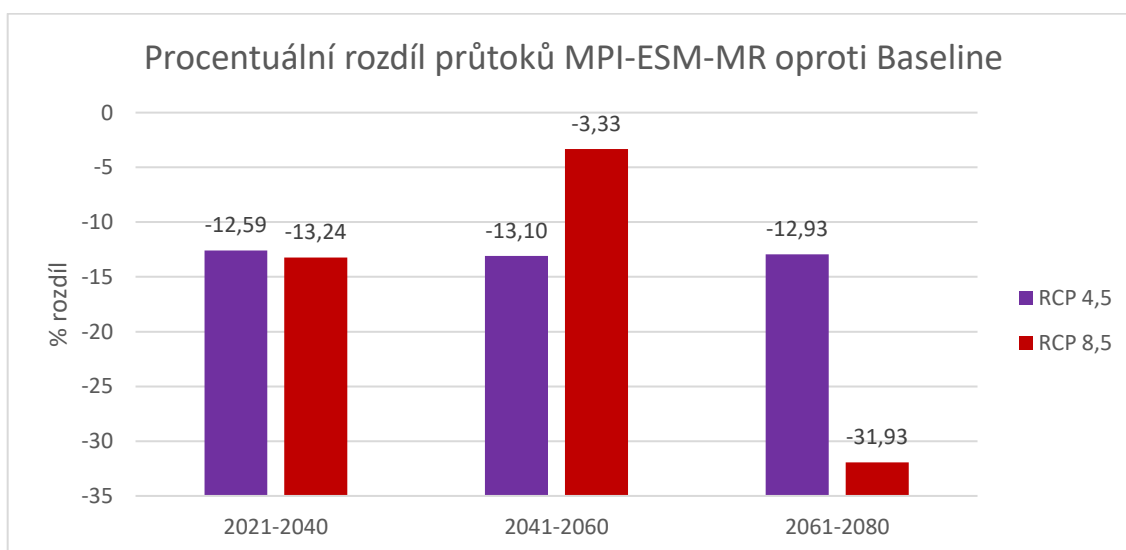
Graf 46 - Procentuální rozdíl průtoků EC-EARTH oproti Baseline



Graf 47 - Procentuální rozdíl průtoků Had-GEM2-ES oproti Baseline



Graf 48 - Procentuální rozdělení průtoků MIROC5 oproti Baseline



Graf 49 - Procentuální rozdělení průtoků MPI-ESM-MR oproti Baseline

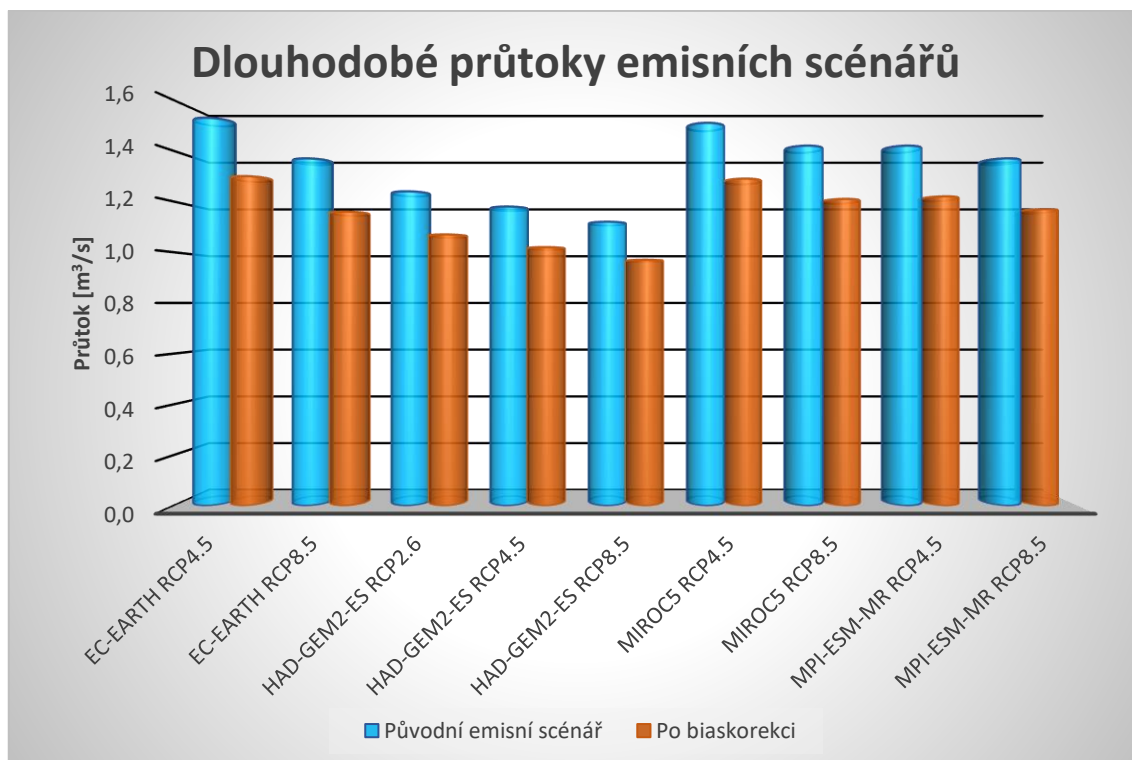
Při podrobnějším porovnání se mezi scénáři nejvíce vodný prezentuje RCP 4,5 z modelu EC-EARTH. Naopak nejméně vodný RCP 8,5 z Had-GEM2-ES.

Závislost úhrnu srážek na průtoku

- Srovnáme-li nejmenší dlouhodobý průtok z emisních scénářů, kterým je RCP8,5 u modelu Had-GEM2-ES s průměrným úhrnem srážek, můžeme si povšimnout jisté shody poklesu oproti Baseline
- Naopak největší úhrn srážek reprezentuje MIROC5 RCP4,5 a zároveň i s vysokým průtokem
- Můžeme tedy uvažovat, že velikost průtoku závisí na výši úhrnu srážek

Obrázek 24 - Závislost úhrnu srážek na průtoku

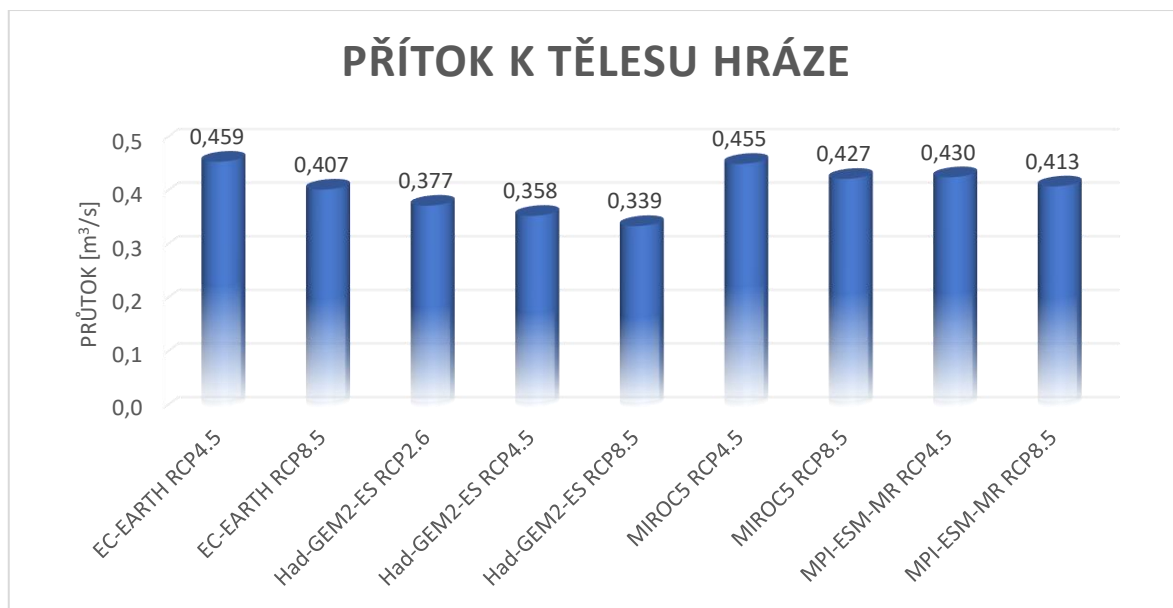
Úpravou hydrologických dat emisních scénářů biaskorekcí došlo k průměrnému snížení dlouhodobého průtoku o 14,34 %. Tento pokles zhruba odpovídá rozdílu mezi Baseline a skutečností. Je tedy možné uvažovat, že emisní scénáře jsou upraveny co nejbližší realitě pro povodí.



Graf 50 - Porovnání průtoků před a po biaskorekci

Jelikož dle mapy zájmového území není Vlára jediným přítok do plánované nádrže bylo zapotřebí uvažovat i s ostatními přítoky, a to konkrétně s vodními toky Smolinka a Sviborka. Výpočet byl proveden k tělesu hráze gravitačně. Pro tyto dvě řeky bylo počítáno s již uvedenými průtoky ve

studii [17]. Z pravidla se průtok vždy zmenšil, a to z důvodů stálosti průtoku i za tělesem hráze, a především z přepočtu úhrnu srážek na velikost povodí. Po převodu vody se průměrný průtok snížil o necelých 65 %.



Graf 51 - Přítok z emisních scénářů pro výpočet zásobního objemu

Z výše uvedených přítoků byl proveden výpočet zásobního objemu pro sto procentní zabezpečení. Stěžejním výsledkem byla hodnota koeficientu nalepšeného odtoku α a samotný odtok O_p .

Tabulka 7 - Hodnota odtoku vody z nádrže

Klimatický model	Emisní scénář	Koeficient nalepšení α	Odtok vody z nádrže O_p [m³/s]
EC-EARTH	RCP 4.5	0.9560	0.439
	RCP 8.5	0.9230	0.376
Had-GEM2-ES	RCP 2.6	0.9629	0.363
	RCP 4.5	0.9268	0.331
	RCP 8.5	0.9161	0.311
MIROC5	RCP 4.5	0.9100	0.414
	RCP 8.5	0.9273	0.397
MPI-ESM-ES	RCP 4.5	0.9688	0.417
	RCP 8.5	0.8415	0.347

Odtok vody O_p je vždy nižší než přítok Q_a (hodnoty uvedené v grafu 51). Z toho vyplývá, že při hodnotě nalepšeného odtoku vody z nádrže nenastává prázdnění nádrže.

Závislost přítoku Q_a na koeficientu nalepšení α

- V dostupných datech neplatí žádná souvislost mezi přítokem vody do nádrže a velikostí koeficientu nalepšeného odtoku

Obrázek 25 - Závislost přítoku na koeficientu nalepšení

Při zvyšování hodnoty koeficientu nalepšeného odtoku za účelem snížení zabezpečení na třídu významnosti A, respektive B se nalepšený odtok z nádrže lehce zvyšoval. Můžeme tedy říci, že pokud zvýšíme odtok vody z nádrže nad maximální hodnotu, která byla stanovena pro sto procentní zabezpečení, tak tím snižujeme nejen právě zabezpečení, ale i samotný objem vody v nádrži, jelikož přítok zůstává nezměněn.

Tabulka 8 - Nalepšený odtok z nádrže

Klimatický model	Emisní scénář	Nalepšený odtok O_p [m^3/s]		
		$P_t = 100 \%$	$P_t \geq 99.5 \%$	$P_t \geq 98.5 \%$
EC-EARTH	RCP 4.5	0.439	0.442	0.448
	RCP 8.5	0.379	0.377	0.407
Had-GEM2-ES	RCP 2.6	0.363	0.363	0.373
	RCP 4.5	0.331	0.333	0.339
	RCP 8.5	0.311	0.312	0.316
MIROC5	RCP 4.5	0.414	0.416	0.426
	RCP 8.5	0.397	0.399	0.412
MPI-ESM-ES	RCP 4.5	0.417	0.418	0.424
	RCP 8.5	0.347	0.350	0.358

Pro skutečná hydrologická data byly zjištěny následující hodnoty:

Tabulka 9 - Údaje o nádrži pro reálné hydrologické hodnoty

P=100 %	
Koeficient α	0.7623
Nalepšený odtok O_p	0.372
Přítok Q_a	0.488

Závěr

Základním rozhraním práce bylo využívání programů Runoff Prophet, LARS-WG a Unce Clima Change. Tyto tři zmíněné programy mezi sebou byly schopny komunikovat skrze výstupy, respektive vstupní data. Jelikož výstupem ze softwaru byl ansámbl klimatologických dat v podobě průměrných teplot vzduchu a úhrnu srážek, které naopak v programu Runoff Prophet slouží jakožto data vstupní pro výpočet, za principu Wangova modelu (strana 18), průměrných měsíčních průtoků. Naopak průtoková řada byla vstupním protokolem pro Unce Clima Change, kde proběhl výpočet zásobního objemu nádrže V_z a nalepšeného odtoku O_p . Přesto prvotními hodnotami pro samotný začátek a kalibraci, validaci byla zapotřebí historická meteorologická data, která byla poskytnula ČHMÚ.

Prvotním krokem – kalibrace Runoff Prophet, která byla provedena z poskytnutých dat a ohodnocena koeficientem NS 0,659. Toto ohodnocení je považováno za dobré pro zájmové území dle stanic, ze kterých jsou data poskytnuta (strana 29). Ve druhém kroku byl vygenerován ansámbl klimatických simulací pro budoucí období devíti emisních scénářů (strana 22). Následně byl použit opět program Runoff Prophet a získán simulační model průtoků k RCP scénářům (strana 44-47). Předposledním krokem byl výpočet zásobního objemu V_z na základě přítoku k tělesu hráze, kdy byl již uvažován přepočtený průtok vody a biaskorekce na povodí Vlárý. Při známé hodnotě zásobního objemu $V_z = 23,12 \text{ mil. m}^3$ (strana 52) se získávala požadovaná hodnota koeficientu nalepšeného odtoku α pro stoprocentní zabezpečení dle doby trvání. Následným pozvolným zvyšováním téhož koeficientu jsme docílili zabezpečení pro třídy významnosti A, respektive B.

S přihlédnutím na charakteristiku jednotlivých emisních scénářů (strana 13-14) je trend narůstající průměrné teploty pochopitelný. V grafech v části Praktické aplikace je patrné, že RCP scénáře neuvažují se zlepšením klimatické situace a průměrná teplota narůstá.

Průměrné měsíční teploty vzduchu budoucích simulací byly, jak je v práci několikrát uvedeno, oproti Baseline nadhodnoceny, a to o necelé $4 \text{ }^\circ\text{C}$ v dlouhodobém měřítku. Naopak srážky, které jsou v určité míře právě závislé i na teplotě, již tak jednoznačný rozdíl oproti Baseline nezaznamenávají. Rozptyl jest od $-4,22 \%$ do $+6,69 \%$ z emisních scénářů ku Baseline. Dlouhodobý průměrný průtok Q_a vodního toku Vlárý ze skutečných hydrologických dat se započítaným převodem vody z řek Smolinky a Sviborky je prezentován hodnotou $0,488 \text{ m}^3/\text{s}$. Budoucí simulační přítok z RCP je oproti skutečnosti podhodnocen, a to v rozmezí od $-5,94 \%$ do $-30,53 \%$. Z toho vyplývá, že přítok by se dle vybraných emisních scénářů měl v čase zhoršovat.

Skutečný nalepšený odtok vody z nádrže pro stoprocentní zabezpečení P_T je roven hodnotě $0,372 \text{ m}^3/\text{s}$ při koeficientu nalepšení $\alpha=0,7623$. Samotný nalepšený odtok ze skutečných hydrologických dat je pomyslnou střední hodnotou nalepšených odtoků dle emisních scénářů (strana 66). Neboť minimální nalepšený odtok vody z nádrže vykazuje klimatický model Had-GEM2-ES při emisním scénáři RCP8,5, a to konkrétně odtok $0,311 \text{ m}^3/\text{s}$. Kdežto maximální hodnotu sledujeme při stabilizačním scénáři v klimatickém modelu EC-EARTH s konečným odtokem $0,439 \text{ m}^3/\text{s}$. Podrobnější výsledky nalepšených odtoků jsou vyobrazeny v tabulce 8 na straně 66 této práce, kde jsou uvedeny i samotné odtoky pro třídy významnosti dle ČSN.

Výsledné hodnoty této práce prokazují, a to nejen při nalepšených odtocích, že dle devíti použitých emisních scénářů RCP by vodní nádrž Vlachovice byla plně využita při regulaci průtoků,

jelikož ve srovnání je přítok podhodnocen, kdežto odtok je u některých simulací naopak nadhodnocen. Tudiž ne při všech scénářích nastává stav prázdnění nádrže. I v samotném seznamu hájených profilů ministerstva (Generel LAPV) je s Vlachovicemi uvažováno jakožto s vodním zdrojem pro posílení zásobování pitnou vodou a zajištění protipovodňové ochrany s nalepšováním minimálních průtoků.

To vše je možné za předpokladu, že samotný manipulační řád nádrže, bude již uvažovat s výsledky s ohledem na vývoj klimatického systému a bude schopna vypouštět nalepšený odtok z nádrže v určitém množství tak, aby splňoval kritéria a nezvyšoval rizika umožněné se sníženým přítokem Q_a či naopak zvýšeným odtokem vody O_p z nádrže.

Zároveň z dosažených výsledků vyplývá, že aplikace emisních scénářů, jejich tvorba a neustálá aktualizace je nesmírně důležitou součástí klimatologických a hydrologických studií pro budoucí simulace ansámbly vodních stavů a pro možné budování vodních nádrží.

Seznam citací

- [1] Příčiny změny klimatu. *European commission* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/change/causes_cs
- [2] Pařížská dohoda. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/parizska_dohoda
- [3] Nedostatek pitné vody. *Enviromentální výchova* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <http://www.zsnovestraseci-enviro.cz/2-stupen/nedostatek-pitne-vody/>
- [4] Průvodce změnou klimatu: 9. kapitola - Mitigační a adaptační opatření. *Klimatická změna* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://www.klimatickazmena.cz/cs/vse-o-klimaticke-zmene/pruvodce-zmenou-klimatu/>
- [5] Klima, klimatický systém, klimatické modely. *Katedra fyziky atmosféry: Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://kfa.mff.cuni.cz/?p=57>
- [6] KOPECKÁ, Bára. *Emisní scénáře IPCC*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita. Vedoucí práce Mgr. Jarmila Burianová, Ph.D.
- [7] EC-Earth - A European community Earth-System Model. *EC-Earth* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <http://www.ec-earth.org/>
- [8] EC-Earth. *SMHI* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://www.smhi.se/en/research/research-departments/climate-research-rossby-centre2-552/ec-earth-1.121330>
- [9] HadGEM2. *EUROPEAN NETWORK FOR EARTH SYSTEM MODELLING* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://portal.enes.org/models/earthsystem-models/metoffice-hadley-centre/hadgem2-es>
- [10] MIROC-ESM. *ResearchGate* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/253418457_MIROC-ESM_model_description_and_basic_results_of_CMIP5-20c3m_experiments
- [11] MPI-ESM. *Max-Planck-Institut für Meteorologie* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/>
- [12] Průvodce změnou klimatu: 7. kapitola - Jaké bude klima? *Klimatická změna* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://www.klimatickazmena.cz/cs/vse-o-klimaticke-zmene/pruvodce-zmenou-klimatu/>
- [13] Bc. Kateřina Knoppová. *Srážko-odtokový proces v podmínkách klimatické změny*. Brno, 2018. 60 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.

- [14] SEMENOV, Mikhail A. a Elaine M. BARROW. LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies: Developed by Mikhail A. Semenov - Version 3.0 - User Manual [online]. Rothamsted Research, 2002 [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <http://resources.rothamsted.ac.uk/sites/default/files/groups/mas-models/download/LARS-WG-Manual.pdf>
- [15] Lenderink, G.; Buishand, A.; Van Deursen, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2007**
- [16] MARTON, Daniel, Kateřina KNOPPOVÁ a Petr ŠTĚPÁNEK. *Robustnost návrhu zásobního objemu nádrže Vlachovice v podmínkách nejistoty klimatické změny*. Brno. FAST VUT.
- [17] STARÝ, Miloš. *Nádrže a vodohospodářské soustavy: Modul 01*. Brno, 2006.
- [18] MARTON, Daniel. *Nejistoty zatěžující vodohospodářské řešení zásobního objemu údolní nádrže*. Brno, 2018. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny.
- [19] Vlára. *Moravské Karpaty* [online]. 2017 [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <http://moravske-karpaty.cz/prirodni-pomery/hydrografie/vlara/>
- [20] MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ a MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod a základní zásady využití těchto území*. Praha, 2011.
- [21] Detail stanice Popov. Český hydrometeorologický ústav: *Hlásná a předpovědní povodňová služba* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfdyn.php?seq=307470
- [22] Detail měřicí bodu: Vlára, Popov. *Povodí Moravy: Vodohospodářské informace* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/stav/1119/>

Seznam grafů

Graf 1 - Porovnání měsíčních průtoků za období 1961-1969	32
Graf 2 - Porovnání měsíčních průtoků za období 2006-2018	33
Graf 3 - Porovnání teplot skutečnosti oproti Baseline	34
Graf 4 - Porovnání průměrné měsíční teploty Baseline oproti scénáři EC-EARTH RCP4,5	35
Graf 5 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři EC-EARTH RCP8,5	35
Graf 6 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři Had-GEM2-ES RCP2,6	36
Graf 7 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři Had-GEM2-ES RCP4,5	36
Graf 8 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři Had-GEM2-ES RCP8,5	37
Graf 9 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři MIROC5 RCP4,5	37
Graf 10 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři MIROC5 RCP8,5	38
Graf 11 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři MPI-ESM-MR RCP4,5	38
Graf 12 - Porovnání průměrných měsíčních teplot Baseline oproti scénáři MPI-ESM-MR RCP8,5	39
Graf 13 - Porovnání skutečných úhrnů srážek s Baseline	40
Graf 14 – Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP4,5 z modelu EC-EARTH	40
Graf 15 – Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP8,5 modelu EC-EARTH	41
Graf 16 – Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP2,6 modelu Had-GEM2-ES	41
Graf 17 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP4,5 modelu Had-GEM2-ES	41
Graf 18 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP8,5 modelu Had-GEM2-ES	42
Graf 19 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP4,5 modelu MIROC5	42
Graf 20 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP8,5 modelu MIROC5	42
Graf 21 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP4,5 modelu MPI-ESM-MR	43
Graf 22 - Průměrný měsíční úhrn srážek emisního scénáře RCP8,5 modelu MPI-ESM-MR	43
Graf 23 - Porovnání průtoků Baseline oproti skutečnosti	44
Graf 24 - Průměrný měsíční průtok EC-EARTH RCP4,5	44
Graf 25 - Průměrný měsíční průtok EC-EARTH RCP8,5	45
Graf 26 - Průměrné měsíční průtoky Had-GEM2-ES RCP2,6	45
Graf 27 - Průměrné měsíční průtoky Had-GEM2-ES RCP4,5	45
Graf 28 - Průměrné měsíční průtoky Had-GEM2-ES RCP8,5	46
Graf 29 - Průměrné měsíční průtoky MIROC5 RCP4,5	46
Graf 30 - Průměrné měsíční průtoky MIROC5 RCP8,5	46
Graf 31 - Průměrné měsíční průtoky MPI-ESM-MR RCP4,5	47
Graf 32 - Průměrné měsíční průtoky MPI-ESM-MR RCP8,5	47
Graf 33 - Biaskorekce Baseline průtokové řady	48
Graf 34 - Zásobní objem pro klimatický model EC-EARTH	53
Graf 35 - Zásobní objem klimatického modelu Had-GEM2-ES	53
Graf 36 - Zásobní objem pro klimatický model MIROC5	54
Graf 37 - Zásobní objem pro klimatický model MPI-ESM-MR	54
Graf 38 - Porovnání průtoků po provedení kalibrace	57
Graf 39 - Průměrné měsíční teploty Baseline a skutečnosti	58
Graf 40 - Celkový úhrn srážek Baseline a Skutečnost	58
Graf 41 - Teplotní rozdíl EC-EARTH oproti Baseline	59
Graf 42 - Teplotní rozdíl Had-GEM2-ES oproti Baseline	59

Graf 43 - Teplotní rozdíl MIROC5 oproti Baseline	59
Graf 44 - Teplotní rozdíl MPI-ESM-MR oproti Baseline	60
Graf 45 - Průměrný měsíční průtok Baseline	62
Graf 46 - Procentuální rozdíl průtoků EC-EARTH oproti Baseline	62
Graf 47 - Procentuální rozdíl průtoků Had-GEM2-ES oproti Baseline	63
Graf 48 - Procentuální rozdělení průtoků MIROC5 oproti Baseline	63
Graf 49 - Procentuální rozdělení průtoků MPI-ESM-MR oproti Baseline	63
Graf 50 - Porovnání průtoků před a po biaskorekci	64
Graf 51 - Přítok z emisních scénářů pro výpočet zásobního objemu	65

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Výpis použitých emisních scénářů dle klimatických modelů	22
Tabulka 2 - Koeficient Biaskorekce	48
Tabulka 3 - Znázornění změny průtoků v jednom roce časového kroku	49
Tabulka 4 - Koeficient nalepšení pro emisní scénáře	55
Tabulka 5 - Koeficient nalepšeného odtoku pro třídu významnosti	56
Tabulka 6 - Procentuální rozdíl úhrnu srážek klimatických modelů oproti Baseline	61
Tabulka 7 - Hodnota odtoku vody z nádrže	65
Tabulka 8 - Nalepšený odtok z nádrže	66
Tabulka 9 - Údaje o nádrži pro reálné hydrologické hodnoty	66

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma základní části klimatického systému Země [6]	9
Obrázek 2 - Schéma globální radiační bilance, uvedené čísla ve W/m^2 [13]	10
Obrázek 3 - Změny průměrné globální teploty podle CMIP5 za použití 20 modelů pro každý RCP emisní scénář [13]	12
Obrázek 4 - Schéma postupu vývoje RCP	13
Obrázek 5 - Charakteristika emisních scénářů RCP [zdroj vlastní]	15
Obrázek 6 - Uživatelské rozhraní programu Runoff Prophet	17
Obrázek 7 - Schéma výpočtu Wangova modelu [13]	18
Obrázek 8 - Uživatelské rozhraní softwaru Lars-WG	21
Obrázek 9 - Generování emisních scénářů z programu Lars-WG	21
Obrázek 10 - Postup biaskorekce Baseline na stejnou hladinu se skutečností [zdroj vlastní]	24
Obrázek 11 - Uživatelské rozhraní softwaru Unce Clima Change	25
Obrázek 12 - Vodní tok Vlára na území ČR [zdroj mapy.cz]	27
Obrázek 13 - Zájmová lokalita vodního díla Vlachovice [20]	28
Obrázek 14 - Zeměpisné rozmístění stanic (1 – Popov, 2 – Slavičín, 3 – Vizovice) [zdroj mapy.cz]	29
Obrázek 15 - Detail měřícího bodu Popov [22]	30
Obrázek 16 - Průtok stanice Popov za období 1.1. až 8.1.2020 [21]	30
Obrázek 17 - Průtok stanice Popov za období 2.1. až 8.1.2020 [22]	30
Obrázek 18 - Znázornění postupu praktické aplikace [zdroj vlastní]	31
Obrázek 19 - Znázornění převodu vody	50
Obrázek 20 - Technicko-ekonomická studie vodního díla Vlachovice [Aquatis a Povodí Moravy]	51
Obrázek 21 - Závislost velikosti zásobního objemu na koeficientu alfa	52
Obrázek 22 - Závislost koeficientu alfa na zabezpečení odtoku z nádrže	56
Obrázek 23 - Možná závislost teploty vzduchu na úhrnu srážek v emisních scénářích	60
Obrázek 24 - Závislost úhrnu srážek na průtoku	64
Obrázek 25 - Závislost přítoku na koeficientu nalepšení	66