

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ
A ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ



Fakulta životního
prostředí

Změna vodnosti povodí Hačky s ohledem na předpokládanou změnu klimatu

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: doc.Ing.Martin Hanel,Ph.D.

Diplomant: Bc.Vojtěch Moravec

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Vojtěch Moravec

Krajinné inženýrství

Název práce

Změna vodnosti povodí Hačky s ohledem na předpokládanou změnu klimatu

Název anglicky

The assessment of change in the water balance of Hačka catchment due to the climate change

Cíle práce

Cílem práce je: a) zpracování literární rešerše problematiky klimatické změny, jejích projevů a modelování jejího vývoje; b) předložení výčtu domácích i zahraničních studií zabývajících se dopady klimatické změny na vodní zdroje; c) sestavení scénářů vývoje klimatické změny a také scénářů chování odběratelů vody a d) vyhodnocením změn průtoků vlivem pozorovaných změn srážek a teploty, kvantifikovat možné dopady klimatické změny na povodí Hačky. Diskutována budou možná adaptační opatření.

Metodika

1. Zpracování literární rešerše zadané problematiky
2. Shromáždění a příprava meteorologických a hydrologických dat a údajů o užívání vod
3. Analýza trendů v meteorologických a hydrologických veličinách
4. Sestavení scénářů odběru povrchové vody
5. Úprava meteorologických dat dle použitých klimatických modelů
6. Tvorba odtokových řad ovlivněných změnou klimatu
7. Odhad změn hydrologické bilance povodí Hačky vlivem klimatické změny

Doporučený rozsah práce

40 stran textu a ilustrací

Klíčová slova

ALADIN-CLIMATE/CZ, CLM – Q0, hydrologická analogie, hydrologická bilance, hydrologický model, klimatická změna, model Bilan, REMO – EH5, Thin Plate Spline

Doporučené zdroje informací

- Arnell, N. W. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environmental Change*. 1999, 9, 1, s. 5–23. ISSN 0959-3780. Dostupné z: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0959-3780\(98\)00015-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-3780(98)00015-6)>.
- Bergström, S. et al. Climate change impacts on runoff in Sweden – assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate Research*. 2001, 16, 2, s. 101–112. Dostupné z: <<https://www.researchgate.net/publication/250221573>>.
- Hanel, M. et al. A Multi-Model Assessment of Climate Change Impact on Hydrological Regime in the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2012, Volume 60, 3, s. 152–161. Dostupné z: <<http://dlib.lib.cas.cz/7587/>>. ISSN 0042-790X.
- Hanel, M. et al. Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření. Vydání první. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2011. ISBN 978-80-87402-22-1. ISBN 978-80-87402-22-1.
- Horáček, S. – Kašpárek, L. – Novický, O. Estimation of climate change impact on water resources by using Bilan water balance model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2008, 4, 1, s. 1–8. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1088/1755-1307/4/1/012023>>.
- Kalvová, J. – Mikšovský, J. – Raidl, A. Atmosféra a klima aktuální otázky ochrany ovzduší, Vydání první, Klima a jeho změny, s. 280–323. Univerzita Karlova, Nakladatelství Karolinum, 2009. ISSN 978-80-246-1598-1.
- Kašpárek, L. et al. Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulční schopnosti v povodí Rakovnického potoka. Vydání první. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2011b. ISBN 978-80-87402-14-6.
- Shabalova, M. V. – Deursen, W. P. A. – Buishand, T. A. Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. *Climate Research*. 2003, 23. Dostupné z: <<http://10.3354/cr023233>>.
- Solomon, S. et al. *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, 2007. ISBN 0521880092.
- Stocker, T. et al. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2013. Dostupné z: <<http://10.1017/CBO9781107415324>>. ISBN 978-1-107-66182-0.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 4. 4. 2016

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 4. 4. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 12. 04. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Změna vodnosti povodí Hačky s ohledem na předpokládanou změnu klimatu* vypracoval samostatně, pod vedením doc. Ing. Martina Hanela, Ph.D., a že jsem uvedl veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 19. 4. 2016

.....

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Martinu Hanelovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a za veškeré poskytnuté rady a připomínky týkající se jejího obsahu. Dále děkuji oddělení vodohospodářského dispečinku státního podniku Povodí Ohře za poskytnutí hydrologických a meteorologických dat a zároveň oddělení podzemních vod a bilance za poskytnutí údajů o užívání vod v povodí Hačky a údajů o vypouštění do toku.

Abstrakt

V předkládané práci jsou uvedeny výsledky analýzy změn odtoků a základních meteorologických veličin v povodí Hačky během pozorovaného období 1962–2015. Dále jsou v práci uvedeny výsledky modelování změny hydrologické bilance v důsledku změny klimatu mezi časovými obdobími 1984–2014 a 2035–2065 a 2068–2098 podle tří regionálních klimatických modelů v povodí Hačky. Pro interpolaci srážkových úhrnů a průměrných teplot vzduchu byla využita metoda Thin Plate Spline. Pro správnou interpretaci pozorovaných průtokových řad neovlivněných vnější dotací byla využita modifikovaná varianta hydrologické analogie. Časové řady srážek a teploty ovlivněné změnou klimatu byly získány jednoduchou přírůstkovou metodou, tj. pozorované časové řady srážek a teploty byly opraveny pro každou simulaci pomocí přírůstkových faktorů tak, aby měsíční změny těchto veličin byly stejné jako podle uvažované simulace klimatického modelu. Hydrologická bilance byla modelována pomocí konceptuálního hydrologického modelu Bilan, kdy byl model nakalibrován na základě pozorovaných dat a identifikované parametry byly následně využity pro simulaci hydrologické bilance pro řady ovlivněné klimatickou změnou. Tímto postupem byl zjištěn nárůst průměrné roční teploty dle použitých modelů v průměru o 1.7 °C v prvním výhledovém období a o 2.8 °C v druhém období. Tyto změny povedou k časovému přerozdělení srážek během roku, nicméně roční úhrn srážek zůstane poměrně nezměněn (maximální změny -8.1 %; +9.3 %). Vlivem těchto změn je předpokládán pokles ročních odtoků z povodí v období 2035–2065 průměrně 5.7 %, maximálně 20.3 %. Podstatný pokles ročních odtoků je však předpokládán v období 2068–2098, průměrně 25.5 %, maximálně 45.9 %. Četnost výskytu období sucha se dle projekcí použitých modelů zvýší až dvojnásobně. Studie také prokázala podstatné změny uvnitř ročního hydrologického cyklu. Nárůst srážkové činnosti lze předpokládat v období od začátku podzimu do začátku léta s poměrně malým přírůstkem v zimním období a mírným poklesem na jaře. Navýšení srážkové činnosti bude doprovázeno nárůstem územního výparu, který bude zapříčiněn růstem teploty. V letním období lze očekávat pokles srážek spolu s poklesem odtoku. Vlivem rostoucí teploty je předpokládán posun doby tání sněhu z období března–dubna na období leden–únor, který zapříčiňuje nárůst odtoku v tomto období. Tyto poznatky lze v budoucnu uplatnit ve vodohospodářském plánování v povodí Hačky.

Klíčová slova: ALADIN-CLIMATE/CZ, CLM_Q0, hydrologická analogie, hydrologická bilance, hydrologický model, klimatická změna, model Bilan, REMO_EH5, Thin Plate Spline

Abstract

In the presented paper the changes in mean runoff, temperature and precipitation totals in an observed period 1962–2015 in the catchment river Hačka are assessed. The paper further presents the analysis of climate change impact on mean runoff between the periods 1984–2014 (control period) and 2035–2065 and 2068–2098 (scenario periods) using the projections of three regional climate model simulations. Thin Plate Spline interpolation was used to estimate basin's precipitation and temperature. Modified hydrological analogy was used for precise quantification of naturalized runoff (i.e. not affected by water use). Climate change scenarios were derived using simple delta change approach, i.e. observed series of precipitation and temperature were adjusted in order to give the same changes between the control and scenario period as regional climate model simulations. Hydrological balance was modelled with a conceptual hydrological model Bilan. The parameters of the hydrological model were estimated using observed data. These parameters were subsequently used to derive discharge series under climate change conditions for each regional climate model simulation. Results showed a 1.7 °C average increase in mean annual temperature in the scenario period 2035–2065 and a 2.8 °C average increase in the scenario period 2068–2098. The seasonal cycle of precipitation in the scenario conditions is shifted, although mean annual precipitation totals remain practically unchanged (max changes -8.1 %; +9.3 %). The mean annual discharge decreases by 5.7 % in average (most 20.3 %) in period 2035–2065 and a significant decrease of 25.5 % in average (most 45.9 %) in annual mean discharge is expected in the period 2068–2098. Frequency of minimal runoff is expected to increase up to two times. Precipitation increase is expected from the beginning of the fall to the beginning of the summer, with a slight decrease in spring. Increase in precipitation is followed by evapotranspiration increase, caused by increase in temperature. Summer precipitation is expected to decrease as well as summer runoff. Due to the temperature increase, time shift of the snowmelt is expected from the periods between March–April to January–February. This will also affect the increase of the discharge in this period. This knowledge can be applied in water management planning in the future.

Keywords: ALADIN-CLIMATE/CZ, CLM_Q0, Bilan model, climate change, hydrological analogy, hydrological balance, hydrological model, REMO_EH5, Thin Plate Spline

Obsah

Seznam použitých zkratk	11
Předmluva	12
1 Úvod	13
2 Cíle práce	14
3 Literární rešerše	15
3.1 Klimatický systém	15
3.2 Změna klimatu	16
3.3 Odhad změn hydrologické bilance vlivem klimatické změny	19
3.3.1 Scénáře vývoje emisí a koncentrací skleníkových plynů	19
3.3.2 Klimatické modely	20
3.3.3 Globální klimatický model (GCM)	21
3.3.4 Regionální klimatický model (RCM)	21
3.3.5 Obecný postup odhadu změn hydrologické bilance	23
3.3.6 Bilan - model chronologické hydrologické bilance	24
3.4 Dopady změn klimatu na vodní zdroje	26
3.4.1 Zahraniční studie	26
3.4.2 Domácí studie	28
4 Charakteristika studijního území	31
4.1 Popis studijního povodí	31
4.2 Charakteristika studijního povodí	32
5 Metodika	33
5.1 Vstupní sady dat	33
5.2 Příprava vstupních dat	35
5.2.1 Příprava vstupních dat meteorologických	35
5.2.2 Příprava vstupních dat hydrologických - horní část povodí	37
5.2.3 Příprava vstupních dat hydrologických - dolní část povodí	38
5.2.4 Výpočet základního odtoku	38
5.3 Scénáře odběru vody z Hačky	38
5.4 Kalibrace modelu Bilan a tvorba referenčních odtokových řad	39
5.5 Úprava meteorologických dat přírůstkovou metodou	40
5.6 Tvorba odtokových řad ovlivněných změnou klimatu	41
5.7 Porovnání minim současných a scénářových průtoků	42
6 Výsledky práce	43
6.1 Trendy pozorovaných hydrometeorologických veličin	43
6.1.1 Identifikované trendy srážkových úhrnů	43

6.1.2	Identifikované trendy průměrných teplot vzduchu	45
6.1.3	Identifikované změny meteorologických veličin během sledovaného období	46
6.1.4	Identifikované trendy v údajích o průměrných průtocích	47
6.1.5	Identifikované trendy v údajích o užívání vod	49
6.2	Výsledky úprav meteorologických dat dle použitých RCM	50
6.3	Relativní změny odtoků z povodí Hačky vlivem změny klimatu	53
6.4	Změny hydrologické bilance povodí Hačky vlivem změny klimatu	56
6.5	Odhad výskytu nedostatkových objemů	59
6.6	Porovnání minim současných a scénářových průtoků	60
6.7	Vyhodnocení scénářů odběru povrchové vody	61
7	Diskuze	63
7.1	Výsledky odhadu změn hydrologické bilance	63
7.2	Nejistoty spojené s odhadem změn hydrologické bilance	64
7.3	Možnosti adaptačních opatření	65
7.3.1	Vodohospodářské opatření	65
7.3.2	Opatření v krajině	65
7.3.3	Opatření na toku	66
7.3.4	Legislativní opatření	67
8	Závěr	68
	Přehled literatury a použitých zdrojů	69
	Seznam obrázků	73
	Seznam tabulek	75
	Seznam příloh	76

Seznam použitých zkratek

AGCM	Atmospheric General Circulation Model
AR4	Fourth Assessment Report
AR5	Fifth Assessment Report
ARP	RCM ALADIN-CLIMATE/CZ
AWE-GEN	Advanced WEather GENerator
EH5	RCM REMO_EH5
FAR	First Assessment Report
HadRM2	Hadley Centre Regional Model 2
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
HIRHAM	regionální klimatický model
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LAPV	lokalita vhodná pro akumulaci povrchových vod
ModABa	MODeL for Annual flow duration curves assessment in ephemeral small BASins
MODFLOW	třídimenzionální model proudění podzemních vod využívající metodu konečných diferencí
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PKP	Podkrušnohorský přivaděč vody
Q0	RCM CLM_Q0
RCAO	regionální klimatický model
SAR	Second Assessment Report
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
SRES	Special Report on Emission Scenarios
SWAT	The Soil and Water Assessment Tool
TAR	Third Assessment Report
TPS	Thin Plate Spline
UNEP	United Nations Environment Programme
VÚV TGM	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce
WMO	World Meteorological Organization

Předmluva

James Balog, americký fotograf, zasvětil nemalou část svého života popisem klimatické změny skrze hledáček fotoaparátu. Je zakladatelem projektu Extreme Ice Survey, jehož náplní je dokumentovat úbytky ledovců v průběhu let. Náplň práce jeho týmu spočívala v rozmístění několika desítek fotografických automatů, které měly za úkol snímat v relativně krátkých časových intervalech ledovce v různých částech světa. Výsledkem jeho práce jsou časosběrná videa zobrazující pohyb a odtávání ledovců. Balog tímto ukázal, že k odtávání dochází v posledních desetiletích podstatně rychlejším tempem, než tomu bylo kdy dříve.

1 Úvod

Projevy změny klimatu lze pozorovat globálně i lokálně v rámci celé planety v průběhu celého jejího vývoje. Nicméně od počátku průmyslové revoluce přispívá ke změně klimatu určitou měrou i člověk. Nejen proto se klimatická změna, její dopady na různé sektory lidské činnosti a přípravy adaptačních opatření stávají důležitým předmětem celosvětové politiky, včetně politiky v České republice. Vodní hospodářství je jedním ze sektorů, který je změnou klimatu podstatně ovlivněn. Výzkumy dokonce ukazují, že je jedním z nejvíce zranitelných oborů vůbec a proto by mu měla být věnována patřičná pozornost (Vizina – Horáček, 2009). Klimatická změna s sebou totiž nese problémy na obou stranách hydrologického režimu, hydrologické sucho a výskyt povodní. Proto v rámci plánování, a zejména plánování vodohospodářského je nutné s možnými změnami klimatu a jejich dopady na hydrologický režim povodí počítat. Navíc díky specifické geografické poloze České republiky je vodohospodářské plánování ztíženo faktem, že dynamika hydrologického cyklu je definován převážně srážkovou činností. O to větší vůle by měla být vynaložena na poznání a kvantifikaci změny klimatu, jejich projevů a důsledků.

Základní podstata možných změn hydrologické bilance na území České republiky vychází z projekcí srážek a teplot pro Evropu a je známá již řadu let (Christensen et al., 2007). Nicméně v rámci vodohospodářského plánování na ploše určitého povodí je žádoucí tyto změny postihnout s dostatečně velkou přesností. Hlavní motivací této práce je fakt, že v povodí vodního toku Hačka trend velikosti průtoku v pozorovaném období kontinuálně klesá a už několikrát v průběhu let bylo zaznamenáno úplné vyschnutí tohoto toku. V rámci předkládané práce je tento fenomén vyšetřen a zároveň jsou identifikovány změny meteorologických veličin v pozorovaném období. Následně jsou v této práci porovnávány hydrologické a meteorologické veličiny upravené dle projekcí tří regionálních klimatických modelů (RCM ALADIN-CLIMATE/CZ, RCM REMO_EH5 a RCM CLM_Q0) pro dvě výhledová období 2035–2065 a 2068–2098, prvotně s kontrolním obdobím 1984–2014 a druhotně mezi sebou. Z těchto porovnání jsou formulovány odhady změn hydrologické bilance v povodí Hačky vlivem změny klimatu.

Studii, zabývajících se odhadem změn hydrologické bilance ať už republikového charakteru jako např. Hanel et al. (2012) či Horáček et al. (2008) nebo regionálního, popřípadě lokálního charakteru jako např. Hanel et al. (2007), Kašpárek et al. (2011b) či Kašpárek – Mrkvičková (2008), je celá řada, nicméně jsou vždy zaměřeny specificky buďto na zhodnocení současných dopadů změn klimatu na hydrologický režim povodí nebo na odhad změn hydrologické bilance pro výhledová období a nebo na antropogenní vliv na hydrologickou bilanci v povodí. Předkládaná práce však shromažďuje poznatky všech těchto zaměření. V následujících kapitolách jsou kvantifikovány změny základních meteorologických veličin nejen během pozorovaného období, ale také pro dvě zmíněná výhledová období. Součástí práce je také interpretace a zároveň kvantifikace antropogenních zásahů do hydrologické bilance povodí Hačky. Nakonec jsou předloženy odhady změn hydrologické bilance povodí Hačky pro obě výhledová období.

2 Cíle práce

Předkládaná práce si klade následující cíle. Zpracování literární rešerše problematiky klimatické změny, jejích projevů a modelování jejího vývoje. Předložení výčtu domácích i zahraničních studií zabývajících se dopady klimatické změny na vodní zdroje. Sestavení řady scénářů vývoje klimatické změny a také řady scénářů chování odběratelů vody. Dále si klade za cíl kvantifikovat možné dopady klimatické změny na povodí Hačky vyhodnocením změn průtoků vlivem pozorovaných změn srážek a teploty. Nakonec budou diskutována možná adaptační opatření.

3 Literární rešerše

3.1 Klimatický systém

Klima, též podnebí, je obvykle definováno dlouhodobým průměrem variability jednotlivých meteorologických ukazatelů, jakými jsou teplota, srážky a vítr v dané oblasti za určité období. Do těchto průměrných ukazatelů je nutno zařadit výskyt hodnot kolísajících kolem průměru, tedy výskyt a četnost extrémních jevů (Goosse et al., 2010).

Lze tedy říci, že klima je definováno průměrným chováním počasí za několik desetiletí, přičemž počasí je definováno jako okamžitý stav atmosféry nad daným místem a vývoj jednotlivých synoptických systémů ze dne na den. Počasí je proměnlivé a mění se v řádech hodin a dnů. I přesto, že v ročním kroku můžeme identifikovat určitou proměnlivost, co se týče jednotlivých ročních období, z pohledu několika desítek let však počasí vytváří režim, který je pro dané území charakteristický (Kalvová et al., 2009).

Dlouhodobým stavem počasí uvažujeme dle metodiky Světové meteorologické organizace (WMO) třicetiletá období, tzv. normálová období. Dle doporučení World Meteorological Organization (1989) byla normálová období zavedena za účelem zajištění možnosti porovnání klimatických datových výstupů z různých meteorologických stanic. Prvním normálovým obdobím byla perioda 1901–1930, následující normálem byla perioda 1931–1960. Dnes se klimatické charakteristiky počítají většinou za poslední normálové období 1961–1990.

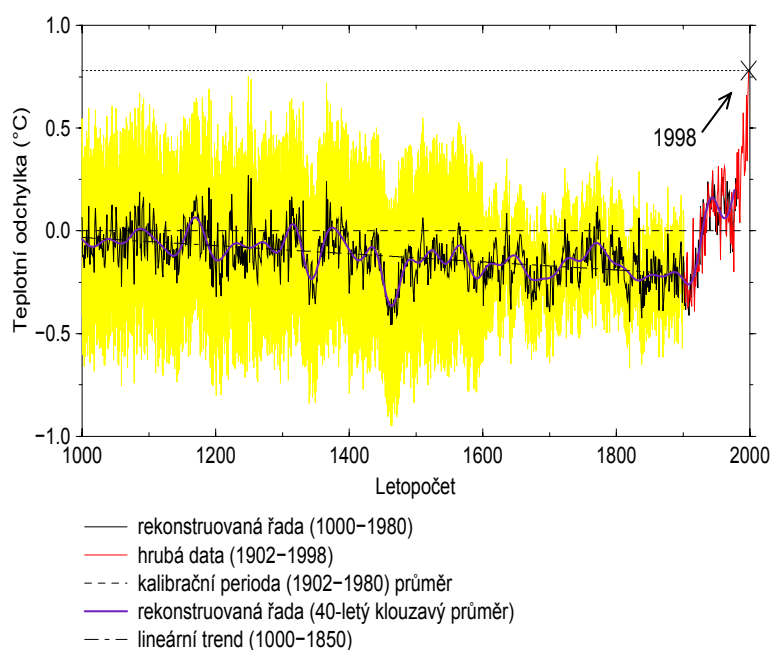
Jak uvádí Pretel (2012), klima je dlouhodobý charakteristický stav počasí podmíněný a ovlivněný energetickou bilancí, atmosférickou a oceánskou cirkulací, charakterem aktivního povrchu a lidskou činností. Je charakteristické pro dané místo, oblast nebo region v závislosti na jeho geografické poloze.

K porozumění procesů podílejících se na tvorbě klimatu na Zemi je potřeba kromě studia atmosféry věnovat patřičnou pozornost i procesům, odehrávajícím se v oceánech, na pevninách, v ledovcích a v biosféře, kterých je enormní množství a dají se rozdělit do různých prostorových, energetických a časových měřítek. Klimatický systém je tvořen pěti základními složkami: atmosférou, hydrosférou, kryosférou, litosférou a biosférou. Kontinuální výměna jak hmoty, tak energie probíhá mezi kosmickým prostorem a klimatickým systémem i jeho hlavními složkami a to jak mezi sebou, tak i v rámci vlastních subsystémů. V rámci rychlosti odezvy na vnější vlivy, lze pozorovat určitou stratifikaci u daných složek klimatického systému. Atmosféra vykazuje rychlou interakci s dalšími subsystémy, rychlost odezvy se pohybuje v řádech hodin až dnů. Procesy, odehrávající se v oceánech vykazují poměrně pomalejší reakce, od svrchní vrstvy oceánu v řádech měsíců až let, po hlubinnou část oceánu v řádech desítek let až po několik století až tisíciletí. U pevninských ledovců se odezva pohybuje v časovém měřítku několika století, u ledovcových štítů Antarktidy a Grónska dokonce několika milionů let. Procesy probíhající v litosféře, jako jsou rozložení pevnin a oceánů, lze z pohledu procesů výše zmíněných označit za prakticky konstantní. Pokud tedy uvažujeme rychlost interakce mezi jednotlivými složkami klimatického systému jako hlavní ukazatel rozdělení, lze dělit klimatický systém na vnitřní, rychle se měnící část, a vnější, pomalu se měnící složku. Přičemž právě klima lze definovat jako charakteristický režim vnitřní části klimatického systému (Kalvová et al., 2009).

3.2 Změna klimatu

Změna klimatu nebo též širokou veřejností užívaný pojem „globální oteplování“ je v posledních desetiletích čím dál tím více skloňovaným pojmem. Ačkoliv oba pojmy vyjadřují totéž, jejich užívání má své opodstatnění. Termín „změna klimatu“ je obecnější, a tudíž přesnější, neboť kromě změn teplotních v sobě zahrnuje i změny v úhrnu srážek, průměrných odtoků z povodí, popřípadě extremity počasí, jakými jsou povodně a sucha. Na druhou stranu pojem „globální oteplování“ je výhodnější v tom smyslu, že shrnuje podstatu celého procesu, navíc tento výraz byl používán dříve, a tudíž vstoupil do širokého povědomí. Nevýhodou tohoto termínu je, že v sobě zahrnuje velmi úzký pohled na tuto problematiku a tím je pouze zvyšování teploty. Celkové oteplování planety však s sebou kromě zvýšení teploty nese řadu dalších procesů, zmíněných výše, mezi nimiž může být i lokální ochlazování.

Na změnu klimatu a zejména vliv člověka na její vývoj byl poměrně dlouhou dobu víceméně skeptický názor zejména ze stran publicistů a politiků, ačkoliv vědecké práce a jejich výsledky potvrzovaly její přítomnost. Tento skeptický přístup dokazuje známý konflikt amerických vědců Manna, Bradleyho a Hughese, kteří publikovali v roce 1998 odbornou studii, v níž ukázali, že konec 20. století je nejteplejší za posledních 600 let. Graf průběhu teplot se tvarem nápadně podobal hokejce (viz obrázek 3.1). Ačkoliv Mannovu hokejku – jak byl jev nazýván – podpořila řada studií, i přesto se setkala s negativní odezvou. Konkrétně mineralog McIntyre a ekonom McKittrick našli údajně řadu chyb v Mannově studii a zároveň ji upravili tak, aby ukázali, že se žádný tvar hokejky v grafu průběhu teplot nevyskytuje. Naštěstí tato práce vyvolala další reakci, na základě které byly analyzovány obě studie, která ukázala pravdivost Mannovy práce (Metelka – Tolasz, 2009).



Obrázek 3.1: Průběh teplotní odchylky na severní polokouli v průběhu posledního tisíciletí

Zdroj: (Mann et al., 1998) (upraveno)

Skeptický pohled na celou problematiku přetrvává i ve 21. století. Například je tomu důkazem projev na Konferenci o změnách klimatu v New Yorku (Klaus, 2007), v němž zaujímá poměrně negativní názor na výskyt změny klimatu a jejích dopadů na člověka a jeho aktivity. Také dodává, že nepatří mezi politiky, kteří věří v antropogenní původ klimatické změny.

Možné vysvětlení skeptických až negativních názorů ekonomů a politiků na vývoj klimatu je fakt, že adaptace na změnu klimatu přináší velké finanční výdaje, ať už se jedná o investice spojené s výstavbou vodohospodářských opatření, implementace nových technologií při manipulaci s vodou v domácnostech a další, nebo mitigační opatření, ať už jde o podporu výroby elektrické energie z alternativních zdrojů nebo zvyšování efektivity výroby elektrické energie z fosilních zdrojů atd. Dále vyžaduje určitou nutnost úspory mezi obyvateli, ať už se jedná o materiálovou, energetickou úsporu, či úsporu vody.

Například Cílek (2010) přichází s teorií, která označuje oceán, přesněji řečeno jeho horní 2,6 metru mocnou vrstvu za absorbent tepla s reakční dobou 20–30 let. Díky této prodlevě svět nefunguje tak, že víc oxidu uhličitého v atmosféře nutně musí znamenat jisté oteplení. Hovoří tedy o časové prodlevě, ve které se Země adaptuje na zvýšený obsah CO₂ v atmosféře. Podobná zjištění však umožňují politikům problematiku změny klimatu poměrně bagatelizovat.

Nicméně i přes obrovskou variabilitu a komplexnost klimatu Země, které je ovlivněno mnoha faktory jako například intenzitou dopadajícího záření (jedenáctiletý cyklus slunce nebo Milankovičovy cykly), složením atmosféry, množstvím emisí skleníkových plynů, lze identifikovat určité trendy, promítající se v hydrometeorologických ukazatelích, které naznačují jistou změnu klimatu, která se promítá do všech sfér společnosti. Jak zmiňují Metelka – Tolasz (2009), důvody pro změnu klimatu nejsou zatím zcela objasněny, ale s určitou jistotou lze říci, že se jedná o kombinaci změn sluneční činnosti a sopečné erupce s tím, že po začátku průmyslové revoluce nastupuje ve větší míře i vliv člověka a to zejména prostřednictvím emisí skleníkových plynů a aerosolů do atmosféry a změn krajinného pokryvu (zejména odlesňování).

Jistou přítomnost klimatické změny potvrzuje Mezivládní panel pro změnu klimatu (IPCC), který je vědeckým orgánem zabývající se problematikou globálního oteplování a vyhodnocováním rizik spojených se změnou klimatu. IPCC byl založen na podnět dvou institucí OSN, Světovou meteorologickou organizací (WMO) a Programem Spojených národů pro životní prostředí (UNEP) v roce 1988. IPCC vydává periodicky souhrnné zprávy hodnotící problematiku změny klimatu. První z nich (FAR) byla zveřejněna v květnu 1990 a byla též podkladovým dokumentem pro Summit Země v Riu v roce 1992. Druhá hodnotící zpráva (SAR), byla vydána v roce 1995 a byla klíčovým dokumentem pro Kjótský protokol. Třetí zpráva (TAR) byla vydána v roce 2001. Některé poznatky z předposlední (AR4, 2007) a poslední, páté, hodnotící zprávy (AR5, 2013) jsou uvedeny na následující straně.

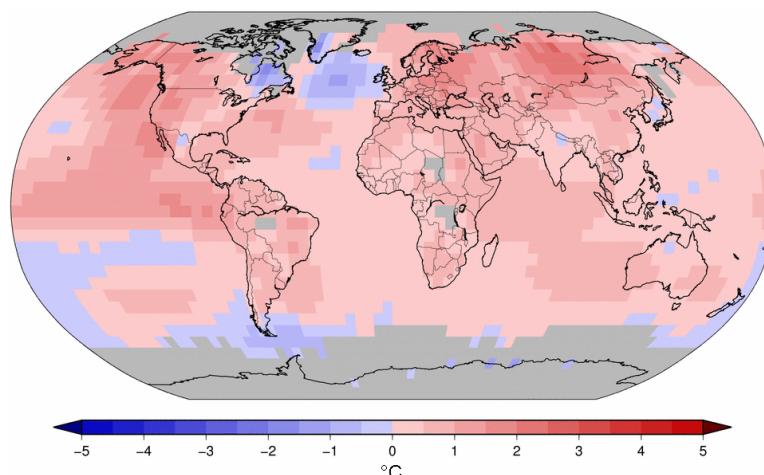
Poznatky o změně klimatu dle čtvrté hodnotící zprávy (Solomon et al., 2007)

- Z posledních 13 let jich bylo 12 klasifikováno jako nejteplejší v historii.
- Arktický mořský led se každoročně zmenšuje o plochu, jejíž velikost odpovídá rozloze Skotska.
- Hladiny moří stoupají tempem 3.1 mm za rok.
- Od roku 1966 se každoroční rozsah sněhové pokrývky na severní polokouli zmenšil o 10 %.
- V 90. letech 20. století dvojnásobně vzrostl roční výskyt katastrof vyvolaných stavem klimatu.
- V minulém století se změnilo množství srážek - v severní Evropě vzrostlo o 10–40 %, v jižní o 20 % kleslo.

Poznatky o změně klimatu dle páté hodnotící zprávy (Stocker et al., 2013)

- Od roku 1850 vzrostly teploty v Evropě o téměř 1 °C.
- Každé z posledních tří desetiletí bylo v blízkosti zemského povrchu teplejší než kterékoli předchozí desetiletí od roku 1850
- Období 1983–2012 bylo nejteplejší periodou za posledních 1400 let.
- Frekvence srážkových úhrnů s vysokou intenzitou se zvýšila v Severní Americe a v Evropě.
- Od začátku osmdesátých let 20. století se teploty permafrostu (trvale zmrzlé půdy) ve většině oblastí zvýšily v průměru o 2.5 °C
- Svrchní vrstva oceánu (75 m) se otepluje rychlostí 0.11 °C za dekádu v pozorovaném období 1971–2010

Nejnovější studie amerického Národního úřadu pro oceán a atmosféru NOAA prokazuje, že rok 2015 byl nejteplejším rokem v období 1880–2015. Zároveň tím odsouvá rok 2014 na druhé místo nejteplejšího roku v daném období. Rok 2015 byl o 0.90 °C nad průměrnou hodnotou ve sledovaném období. Kromě ledna a dubna byly všechny měsíce v roce 2015 zatím nejteplejšími měsíci vůbec. Na obrázku 3.2 na následující straně lze vidět prostorové rozmístění odchylky povrchové teploty v roce 2015 od průměru z období 1981–2010. Roční úhrn srážek roku 2015 byl o 22.5 mm nižší, než je hodnota průměrného ročního úhrnu (1033 mm) z období 1961–1990. Záznamy také dokazují, že východní část Spojených států amerických, jižní část Jižní Ameriky, oblasti severní a jihovýchodní části Evropy a oblasti Japonska byly na úhrny srážek bohatší, než je zmiňovaný průměr. Naopak méně srážek než je světový průměr se dostalo oblastem východní Brazílie, střední části Evropy, Jižní Afriky, Mongolsku a částem jihovýchodní Asie (NOAA, 2016).



Obrázek 3.2: Teplotní odchylka roku 2015 od průměru 1981–2010

Zdroj: NOAA (2016) (upraveno)

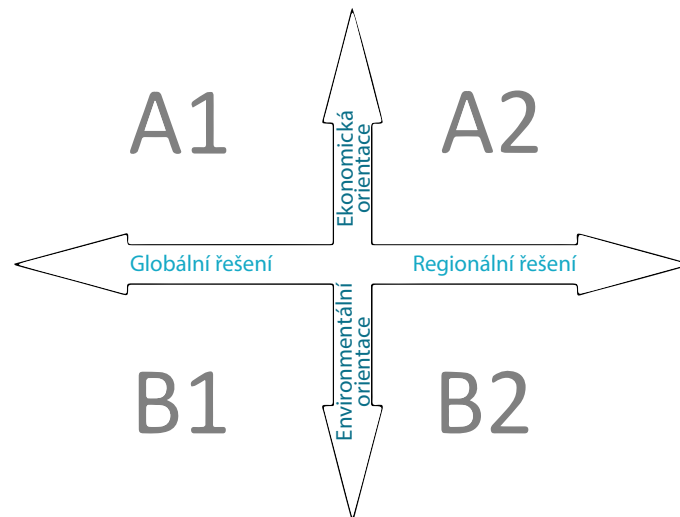
3.3 Odhad změn hydrologické bilance vlivem klimatické změny

Pro simulaci procesů odehrávajících se uvnitř klimatického systému, ať už s krátkodobým výhledem, nebo s delší predikční periodou v řádu až desítek let se používají klimatické modely. Jejich výstupy jsou nezbytným prvkem pro popis změn v hydrologické bilanci v modelovaném časovém horizontu. Základním předpokladem ke správné modelaci klimatu a jeho vývoje je dostatečně přesná znalost současného stavu atmosféry a dostatečně přesná znalost fyzikálních zákonů, jež řídí přechod atmosféry z jednoho stavu do druhého. Pro správnou formulaci vývoje klimatu je potřeba zohlednit vývoj emisí a koncentrací skleníkových plynů, který podstatně ovlivňuje energetickou bilanci Země.

3.3.1 Scénáře vývoje emisí a koncentrací skleníkových plynů

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2 na straně 16, jednou z hlavních příčin změny klimatu jsou emise skleníkových plynů. Jejich produkce je ovlivněna řadou faktorů a to zejména technologickými změnami, socioekonomickým a demografickým vývojem společnosti. Jelikož předpověď vývoje takto komplexního systému je prakticky nemožná, byly Mezivládním panelem pro klimatickou změnu (IPCC) v rámci Speciální zprávy o emisních scénářích SRES vytvořeny scénáře produkce skleníkových plynů založené na různých variantách vývoje společnosti. Systém scénářů je rozdělen do čtyř hlavních skupin scénářů, které jsou označeny jako A1, B1, A2, B2. Na tyto scénáře v současnosti navazuje velká část klimatických modelů používaných v Evropě i jinde ve světě. Základní rozdělení přístupů scénářů k problematice životního prostředí a jejich zaměření regionálního či globálního charakteru lze vidět na obrázku 3.3 na následující straně.

Koncept emisních scénářů byl publikováním AR5 nahrazen konceptem scénářů koncentrací RCP (reprezentativní směry vývoje koncentrací). Tyto scénáře nedefinují koncentrace skleníkových plynů ve vztahu ke konkrétním socioekonomickým podmínkám, ale spíše vybírají typické příklady vývoje koncentrací skleníkových plynů, bez přihlídnutí k socioekonomickým příčinám. Koncept tvoří čtyři hlavní scénáře RCP2.6, RCP4.5, RCP6 a RCP8.5; jejichž označení je dle přibližného radiačního působení v roce 2100.



Obrázek 3.3: SRES scénáře a jejich důraz na řešení environmentálních problémů

Zdroj: (Höök, 2011) (upraveno)

- **SRES A1** – popisuje svět s velmi rychlým růstem ekonomiky a vývojem nových technologií. Země dosáhne maxima počtu obyvatel (8.7 miliardy) v polovině století následně se bude tento počet snižovat (7.1 miliardy na konci jednadvacátého století). Dle scénáře budou rapidně zaváděny nové a efektivnější technologie.
- **SRES A2** – popisuje velmi heterogenní svět, ve kterém bude kontinuálně narůstat počet obyvatel během celého jednadvacátého století (15 miliard na konci jednadvacátého století). Ekonomika bude regionálně orientována bez většího důrazu na řešení problémů životního prostředí, více fragmentována a zároveň bude její růst pomalejší než v dalších scénářích.
- **SRES B1** – popisuje konvergentní svět se stejným populačním růstem jako ve scénáři A1. Ekonomika projde rapidními změnami v jejích strukturách. Scénář předpokládá rychlý rozvoj informatiky a služeb spolu s redukováním materiálové spotřeby. Důraz se klade na zavádění čistých a efektivnějších technologií, méně náročných na spotřebu zdrojů, a na řešení ekonomických a sociálních problémů a ochranu životního prostředí.
- **SRES B2** – popisuje svět, ve kterém bude kladen důraz na problémy lokálního charakteru, ať už se jedná o problémy ekonomické nebo sociální povahy, nebo o problematiku udržitelného rozvoje. Růst ekonomiky a populace bude pomalejší než ve scénáři A2 (10.4 miliardy na konci jednadvacátého století).

3.3.2 Klimatické modely

Klimatický model je matematickou reprezentací klimatického systému, založenou na fyzikálních zákonech (zákon zachování hmoty, energie a hybnosti), biologických a chemických principech, jejíž komponenty jsou tak komplexní, že musí být řešeny výhradně numericky.

Existuje několik kritérií, dle kterých lze vymezit klimatické modely. První možností, jak rozdělit klimatické modely, je dle počtu prostorových dimenzí, kdy rozeznáváme trojrozměrné

modely, které spojitě veličiny měnící se v prostoru reprezentují v konečném počtu bodů a to buď plochami nebo objemy (tzv. grid boxy) nebo dvourozměrné, jednodušší modely, které dané veličiny reprezentují jako průměry dimenzí. Další možnost rozdělení je dle počtu popsaných fyzikálních procesů, kdy s vyšším počtem popsaných procesů roste i výpočetní náročnost. Nejpodrobnější modely mají horizontální rozlišení v řádu desítek (globální klimatické modely) výjimečně jednotek kilometrů (regionální klimatické modely). Jak bylo zmíněno, lze také rozdělit modely dle výpočetní náročnosti. Jednoduché modely, které jsou méně náročné na výpočetní techniku, najdou uplatnění při produkci velkého množství simulací nebo pro dlouhé integrace. Na druhou stranu složité modely poskytují zpravidla větší spolehlivost. Nakonec lze modely dělit dle úrovně, na které dochází k zapojení empirických schémat, jinými slovy dle míry parametrizace procesů, jež nejsou přímo zachyceny ve výpočetní síti modelu (Hanel – Vizina, 2014).

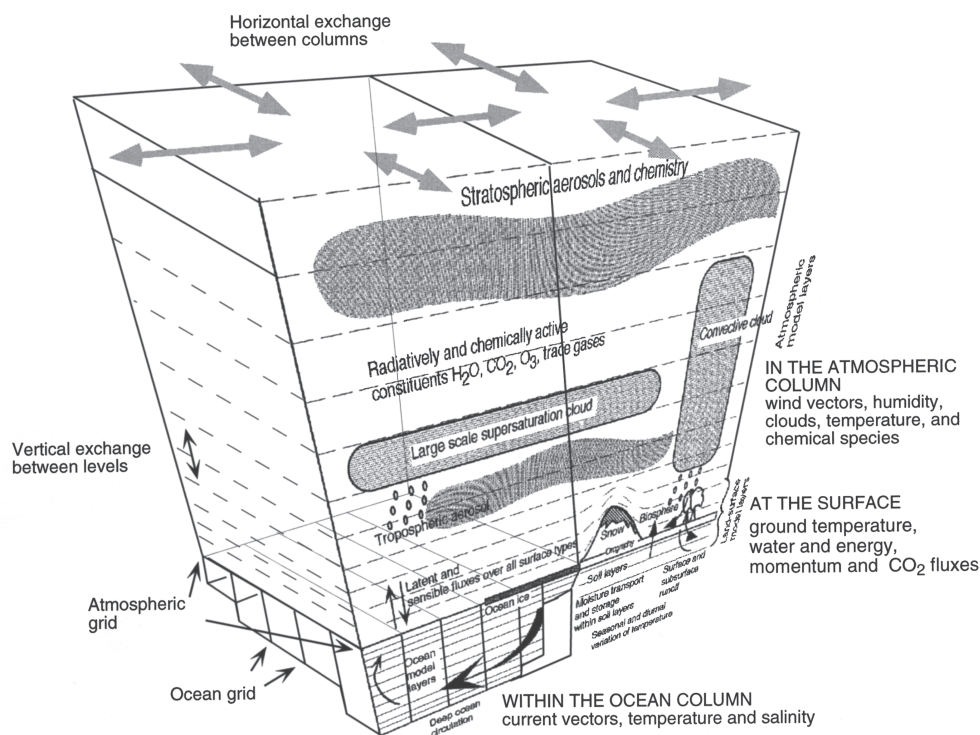
3.3.3 Globální klimatický model (GCM)

Globální klimatický model byl vyvinut na základě modelu atmosférické cirkulace (AGCM), který je běžně užíván k denní předpovědi počasí. GCM je zpravidla uvažován jako propojený (coupled) model atmosféry a oceánu, většinou obsahující i model kryosféry a zemského povrchu. GCM popisuje klimatický systém pomocí třídímenzionální sítě tzv. grid (viz obrázek 3.4 na následující straně) s typickým horizontálním rozlišením mezi 200 až 300 km a vertikálním rozlišením mezi 10 až 20 km. Z důvodu velikosti jednotlivých uzlových bodů (gridboxů) musí být fyzikální procesy, které probíhají na řádově menším měřítku než je velikost jednotlivých gridboxů, průměrovány, tzv. parametrizovány. Parametrizace neplatí pouze pro atmosférické procesy menšího měřítko, týká se také typu vegetace, půdy atd., kdy je pro každý gridbox zadán pouze jeden typ těchto proměnných. Z toho také vyplývá jejich přesnost a schopnost věrně interpretovat reálné procesy v atmosféře. Další nejistota vyplývá ze simulace mechanismů zpětné vazby, kdy jednotlivé GCM mohou simulovat poměrně odlišné odezvy na stejný druh vstupních mechanismů jen proto, jakým způsobem jsou jednotlivé procesy a odezvy uvnitř modelu popsány (Samadi et al., 2010).

Některé aplikace či studie však vyžadují poměrně vyšší rozlišení než mají GCM. Pomocí několika metod, jak přenést velkoprostorovou informaci do menších měřítek, souhrnně zvaných „downscaling“ lze dosáhnout většího rozlišení klimatického modelu regionální úrovně.

3.3.4 Regionální klimatický model (RCM)

Jak již bylo zmíněno výše, regionální klimatický model vzniká pomocí „downscalingu“, který v sobě zahrnuje dynamický a statistický downscaling. Pakliže hodnoty globálních modelů vstupují ve formě okrajových podmínek do modelů počítaných na omezené oblasti s daleko větším rozlišením, hovoříme o dynamickém downscalingu. Tento proces využívá fyzikálních principů za účelem vytvoření lokálních klimatických podmínek. Proto je tento proces výpočetně velice náročný.

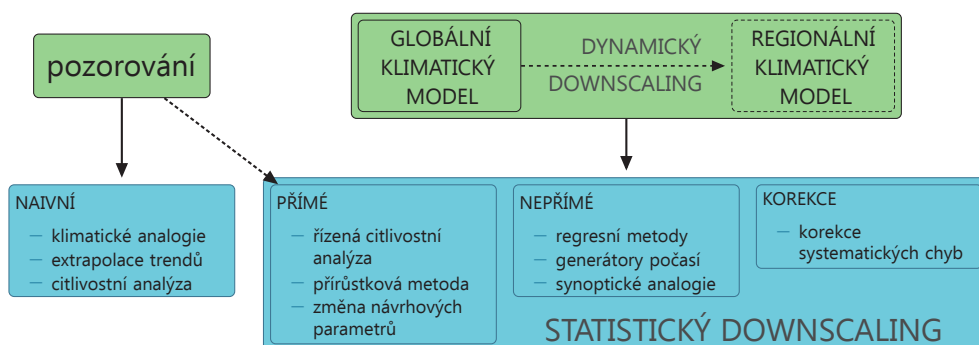


Obrázek 3.4: Schéma modelu globální cirkulace

Zdroj: (McGuffie – Henderson-Sellers, 2001)

Statistický downscaling spočívá v hledání statistických vztahů mezi velkorozměrovými poli ve volné atmosféře (prediktory) na jedné straně, a veličinami, které jsou potřebné ve studiích dopadů klimatických změn, ale nejsou simulovány v GCM (prediktanty), na straně druhé. Downscaling probíhá obvykle ve třech krocích. V prvním kroku jsou nalezeny statistické vztahy mezi prediktory a prediktanty v pozorovaných datech. V druhém kroku jsou tyto statistické vztahy uplatněny na prediktory v kontrolním běhu GCM a porovnány s pozorovanými daty (validace). Ve třetím kroku jsou pozorované statistické vztahy uplatněny na prediktory v experimentálním běhu GCM pro zesílený skleníkový efekt. Výsledkem jsou pak časové řady požadovaných prvků pro budoucí klima. Výhodou statistického downscalingu je jeho výpočetní nenáročnost a jednoduchá aplikace pro velké množství klimatických modelů. Nevýhodou je jeho náročnost na pozorovaná data a fakt, že zanedbává zpětné vazby mezi veličinami (Kalvová et al., 2009). Rozdělení jednotlivých metod tvorby scénářů změny klimatu lze vidět na obrázku 3.5 na následující straně. RCM pracují s horizontálním rozlišením několika desítek kilometrů, v současnosti již běžně využívají rozlišení např. 12 x 12 km, viz projekt CORDEX.

Pro simulaci podmínek ovlivněných změnou klimatu v této práci byly k dispozici výstupy simulace RCM ALADIN-CLIMATE/CZ pro období 1961–2099 řízené globálním klimatickým modelem ARPEGE. Dále byly k dispozici výstupy simulace RCM REMO_EH5 pro stejné období řízené globálním klimatickým modelem ECHAM5. Nakonec byly využity výstupy simulace RCM CLM_Q0 pro stejné období řízené globálním klimatickým modelem HadCM3Q0. Všechny užití simulace byly řízeny podle emisního scénáře SRES A1B s horizontálním rozlišením cca 25 km x 25 km.

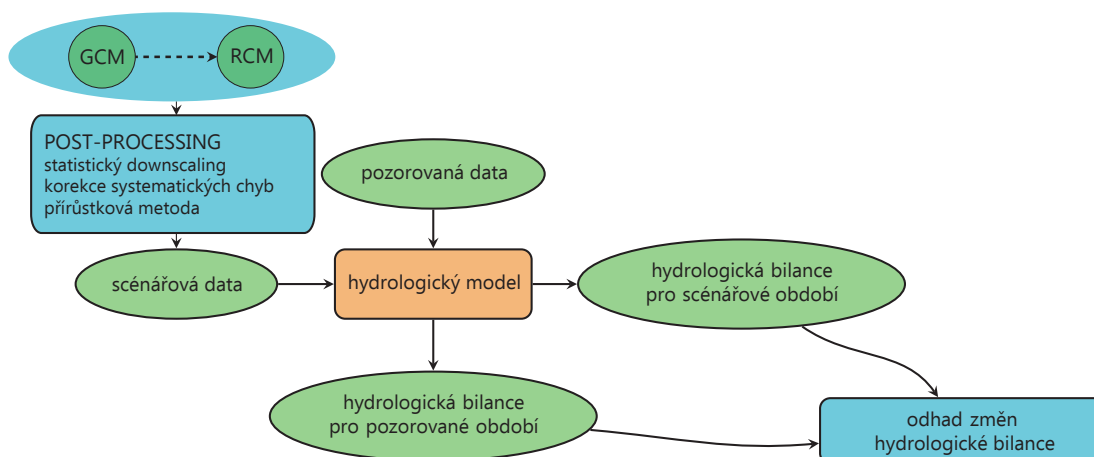


Obrázek 3.5: Rozdělení metod tvorby scénářů změny klimatu

Zdroj: (Hanel – Vizina, 2014)

3.3.5 Obecný postup odhadu změn hydrologické bilance

Při odhadu změn hydrologické bilance na určitém povodí je obecný postup následující. Zvolený hydrologický model je pro vybrané povodí nakalibrován pomocí pozorovaných dat. Zároveň jsou vytvořeny scénáře změny klimatu pro dané povodí a to buď rovnou pomocí regionálního klimatického modelu a nebo jsou pomocí downscalingu extrahována data z globálního klimatického modelu. Protože jsou klimatické modely zatíženy systematickými chybami, je jejich korekce nezbytná před zavedením scénářových dat do hydrologického modelu. Následně je pomocí nakalibrovaného hydrologického modelu a scénářových řad provedena simulace hydrologické bilance pro scénářové období. Běžnou součástí odhadu je modelování dopadů změn klimatu pro více scénářů, za účelem postihu nejistot spojených s jejich tvorbou. Nakonec dochází k odhadu změn hydrologické bilance pomocí porovnání hydrologické bilance pro scénářové období s hydrologickou bilancí pro pozorované období (Hanel – Vizina, 2014). Postup odhadu změn hydrologické bilance je patrný z grafiky na obrázku 3.6.

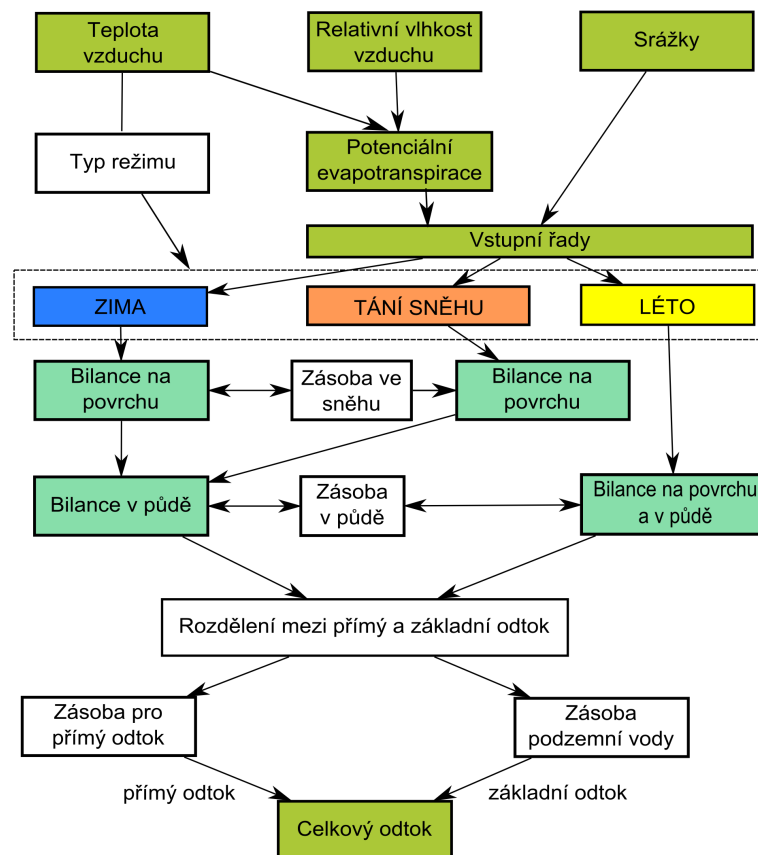


Obrázek 3.6: Schéma hydrologického modelování dopadů změny klimatu

Zdroj: (Hanel – Vizina, 2014), (upraveno)

3.3.6 Bilan - model chronologické hydrologické bilance

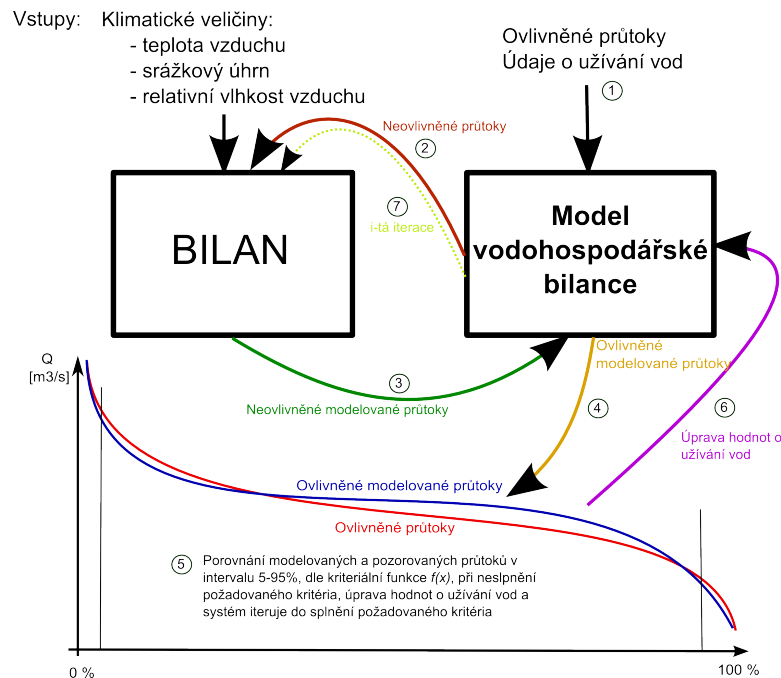
Hydrologický model Bilan schematizuje povodí na soustavu nádrží ve třech vertikálních úrovních – povrch, půdní zóna a zóna podzemní vody. Velikost toku mezi jednotlivými nádržemi je určována algoritmy modelu, které jsou řízeny v měsíční verzi osmi a v denní verzi šesti volnými parametry. Vstupem do modelu jsou pozorované časové řady srážek a teploty vzduchu. Potenciální evapotranspirace je vypočítána pomocí jednoduché metody (Beran et al., 2011) vycházející z teploty vzduchu a množství slunečního záření dopadajícího na horní vrstvu atmosféry (ovlivněno zeměpisnou šířkou a dnem v roce), popřípadě na základě metodiky (Gidrometeoizdat, 1976) vycházející z empirických vztahů (odvozených pro různé vegetační zóny) mezi potenciální evapotranspirací a sytostním doplňkem vypočteným z teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Bilance na povrchu půdy je určena vstupními srážkovými úhrny a územním výparem stanoveným na základě potenciální evapotranspirace a množství dostupné vody. V zimním období a při tání sněhu vstupuje do bilance na povrchu zásoba vody ve sněhu. Z povrchu voda infiltruje do půdní zóny, kde plní nádrž s kapacitou, která je jedním z kalibrovaných parametrů. Při překročení této kapacity voda přetéká a následně je dělena do dvou lineárních nádrží. Odtoky z nich představují pomalou (základní odtok) a rychlou (přímý odtok) odezvu povodí, celkový odtok je pak dán jejich součtem (Horáček et al., 2009). Obrázek 3.7 schematizuje zmíněný průběh proměnných uvnitř modelu Bilan.



Obrázek 3.7: Schéma modelu hydrologické bilance Bilan

Zdroj: (Horáček et al., 2009)

Hydrologický model Bilan je vyvíjen již řadu let pracovníky VÚV TGM. Model podléhá neustálému vývoji, například Beran et al. (2011) uvádějí, novou implementaci výpočtu potenciální evapotranspirace metodou podle Oudina, využívající oproti metodě vycházející z vegetační zóny¹ pouze teploty vzduchu. Předností této metody výpočtu je její menší náročnost na vstupní data a také fakt, že dosáhla lepších výsledků na většině testovaných povodích a právě proto byla začleněna do modelu. Další významnou aktualizací modelu Bilan bylo začlenění modelu vodohospodářské bilance (Vizina – Hanel, 2011), který je založen na klasické bilanční rovnici. Vstupem jsou údaje o užívání vod (povrchové a podzemní odběry a vypouštění) a ovlivněné (měřené) průtoky v měsíčním časovém kroku. Toto propojení vede ke snížení nejistot u přírodních průtoků. Výpočet probíhá tak, že v prvním kroku dojde v modelu vodohospodářské bilance k očištění průtokových řad (vzniknou teoretické neovlivněné průtoky), které jsou vstupem do modelu hydrologické bilance (Bilan). V tomto modelu jsou dále simulovány jednotlivé složky vodního režimu daného povodí a tím jsou získány modelované neovlivněné průtokové řady pro dané období. Tyto řady jsou dále zpětně převedeny na ovlivněné. Následně jsou porovnány se vstupní ovlivněnou řadou průtoků. Kriteriaální funkcí z čar překročení se určí, zda se dosáhlo věrohodného odovlivnění (eliminací) průtokových řad. Za relevantní se uvažují průtoky v intervalu 5–95 %. Pokud nedojde ke splnění zvoleného kritéria, celý proces se opakuje. K jediné změně dojde v případě údajů o užívání vod, a to kvantifikací tzv. balastních vod a užívání vod drobnými uživateli. Způsob, jakým probíhá stanovení ovlivněných průtoků pomocí propojeného modelu hydrologické a vodohospodářské bilance, lze vidět na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Schéma propojení modelu Bilan s modelem vodohospodářské bilance

Zdroj: (Vizina – Hanel, 2011)

¹metoda využívá k výpočtu potenciální evapotranspirace teplotu a vlhkost vzduchu

Během vývoje byl model odzkoušen na desítkách povodí v České republice a v rámci mezinárodních projektů, např. FRIEND nebo WATCH, i na řadě povodí z různých zemích Evropy, známé jsou i aplikace modelu z asijských a afrických zemí. Od roku 1992 je model Bilan v ČHMÚ používán pro výpočet hydrologické bilance zveřejňované v hydrologických ročenkách, od roku 2001 pro výpočty hydrologické bilance jako součásti vodní bilance (podle zákona č. 254/2001 Sb.). Ve VÚV TGM je model rutinně používán při studiích dopadů změny klimatu na hydrologickou bilanci, přičemž některé vybrané studie byly zmíněny v této práci v kapitole na straně 28.

3.4 Dopady změn klimatu na vodní zdroje

Studiu dopadů změn klimatu se věnuje celá řada monografií. Část z nich se věnuje výzkumu vývoje extremit počasí vlivem změny klimatu. Další část studií řeší dopady změn klimatu na zdraví obyvatelstva, která zastřešuje studium úmrtí spojených s extrémními počasí, výzkum vývoje infekčních nemocí vlivem změny klimatu nebo studium dýchacích potíží vázaných na kvalitu ovzduší. Patříčná pozornost se také věnuje zemědělství a to zejména vlivu změny klimatu na zemědělské výnosy jednotlivých plodin a vlivu na potřeby jejich zavlažování. Sleduje se též vliv změny klimatu na lesnictví a to na geografické rozmístění lesa, skladbu lesa, jeho zdraví a produkci dřeva. Řada prací se orientuje na dopady změny klimatu na vodní hospodářství, na vodní zdroje se zaměřením na zásoby podzemních a povrchových vod a také na jejich kvalitu. Nemalá pozornost se věnuje ztrátě přirozeného habitatu jednotlivých druhů rostlin a živočichů vlivem změny klimatu. V neposlední řadě se vědecká obec zabývá úbytkem ledovců vlivem změny klimatu a s tím spojenou ochranou pobřežních oblastí v důsledku navýšení hladin moří.

Předkládaná práce uvádí výčet domácích a zahraničních studií zaměřených na vodní hospodářství a vodní zdroje a také na změnu v hydrologickém režimu povodí vlivem klimatické změny.

3.4.1 Zahraniční studie

Zahraničních studií věnujících se problematice dopadů klimatické změny na hydrologický režim ať už jednotlivých povodí, (viz např. Shabalova et al., 2003), celých států, (viz např. Arnell – Reynard, 1996), částí kontinentů, (viz např. Li et al., 2015) či celých kontinentů, (viz např. Arnell, 1999), je celá řada. Předkládaná práce uvádí pouze výčet studií, které nejen identifikují současné dopady klimatické změny na hydrologický režim, ale také modelují výhledový stav do budoucnosti v zájmových územích.

Arnell (1999) ve své práci modeloval změnu odtoků na území Evropy podle čtyř scénářů různých klimatických modelů pro výhledový horizont s referenčním rokem 2050. Jako výchozí řada hydrometeorologických veličin byla použita normálová perioda 1961–1990. Všechny hydro-meteorologické veličiny byly počítány hydrologickým makro modelem² v gridu o velikosti buňky přibližně 2000 km². Všechny použité scénáře³ předpokládají nárůst srážek v severní Evropě, naopak jejich pokles v Evropě jižní. Nárůst teploty patřičně ovlivní prostorovou distribuci zásob

²volně přeloženo z angl. originálu - macro-scale hydrological model

³použité scénáře ve studii (Arnell, 1999): UKHI, UKTR, CCC, GHGx

sněhu, zejména ve východní Evropě. Redukce zásob sněhu se podstatně promítne na sezonních odtocích, kdy časnější odtávání sněhu způsobí navýšení zimních odtoků naopak zmenšení těch letních. Jen ve velmi chladných regionech zůstanou odtoky nezměněny. Právě díky mírným zimám budou nedostatkové průtoky v pobřežních částech Evropy ubývat, to však neplatí pro kontinentální části Evropy, kde naopak budou nedostatkové průtoky, zejména v létě, ještě více prohloubeny. Výsledky práce ukazují velký pokles průměrných ročních odtoků prakticky v celém území Evropy jižně od 50° rovnoběžky a naopak nárůst odtoků na severu Evropy a v Rusku.

Arnell – Reynard (1996) popisovali změnu v odtocích vlivem klimatické změny pro 21 povodí ve Velké Británii pomocí denního srážko–odtokového konceptuálního modelu. Pro popis změn v období s referenčním rokem 2050 sloužila pro modelaci hydrometeorologických veličin dle užitých scénářů výchozí perioda 1951–1980. Ve výsledcích byl pozorován podstatný rozdíl v modelovaných odtocích v závislosti na použitém scénáři. Sušší oblasti na jihovýchodě Anglie vykazovaly největší náchylnost na změnu klimatu. Byly pozorovány výraznější změny v měsíčních charakteristikách oproti méně zřetelným ročním. Díky podstatnému nárůstu teploty budou zásoby sněhu v zimních obdobích redukovány o 60 % až 80 % a díky jeho masivnímu odtávání v průběhu zimy bude pozorován největší nárůst odtoků právě v tomto období, což bude mít za následek zvýšení výskytu nedostatkových průtoků v letních měsících.

Ačkoliv Švédsko nepatří primárně mezi státy, kterým výhledově hrozí problémy spjaté s častými výskytů sucha vlivem klimatické změny, Bergström et al. (2001) naznačují, že se i v jižních částech Švédska, které jsou chudší na srážkovou činnost, mohou dle použitých scénářů vývoje klimatu objevit nedostatkové průtoky. Na druhou stranu vyvstává opačný problém. Práce dokazuje posun rizika povodní směrem do zimního, dokonce v některých případech i do podzimního období, vlivem navýšení teploty. Jak Bergström et al. (2001) dodávají, jarní povodně jsou podstatně snadněji zvládnutelné, poněvadž zásoby vody v povodích mají tendenci být po zimě malé. Naopak povodně probíhající v podzimním období způsobují daleko větší odezvy. Studie byla zacílena na změnu odtoků vlivem klimatické změny na šesti povodích rozmístěných rovnoměrně od jihu na sever Švédska. Klimatická změna byla modelována pomocí čtyř různých scénářů pro výhledový horizont 50 až 100 let. Hydrologická bilance byla modelována konceptuálním hydrologickým modelem HBV, který byl vyvinut Švédským meteorologickým a hydrologickým institutem (SHMI).

Výskyt zvyšujícího se rizika povodní v zimním období vlivem klimatické změny ke konci 21. století (2080–2099) potvrzují také Shabalova et al. (2003) v povodí řeky Rýn. Ve studii byly použity dva scénáře vývoje klimatu odvozené z regionálního klimatického modelu HadRM2 s rozlišením 50 x 50 km. První scénář uvažoval zvýšení teploty v průměru o 4.8 °C a také změnu v průměrném úhrnu srážek. Druhý scénář uvažoval období prvního scénáře, se změnou v rozptylu teplot a úhrnů srážek. Scénáře v desetidenním kroku byly vstupem do hydrologického modelu RhineFlow. Oba scénáře vykazovaly zvýšení průměrných odtoků v zimních měsících zhruba o 30 %, naopak o 30 % menší odtoky v období letním (zejména v srpnu, který vykazoval až 50 % pokles). Frekvence výskytu dvacetileté vody se u prvního scénáře zvýšila o 14 % u druhého scénáře dokonce o 29 %.

Odsun maximálních odtoků z jarního období směrem k zimním měsícům dokumentuje i Kienzle et al. (2012), který uvádí posun maximálních průtoků v období 2010–2039 v průměru o 18 dní, v období 2040–2069 o 21 dní a v období 2070–2099 o 26 dní vlivem dřívějšího odtávání sněhu zapříčiněného navýšením teploty. Výsledky v tomto korelují s prací Troin et al. (2015), kteří uvádí, posun kulminačních průtoků způsobených táním sněhu v průměru o měsíc u všech použitých scénářů pro modelované období 2041–2070. Pokles v odtocích v letním období byl zaznamenán v obou studiích. Troin et al. (2015) uvádí pokles dokonce o 29 % až 30 %, Kienzle et al. (2012) zmiňuje, že model zanedbává vliv ledovce umístěného v horní části povodí, který v letních měsících dokáže kompenzovat průtoky až ze 70 %, tudíž pokles odtoků je příliš nadhodnocen.

Předchozí studie byly zacíleny na poměrně vodná povodí s dostatečnou zásobou vody ve sněhové pokrývce. To však není případ studií Pumo et al. (2016) a Sellami et al. (2016), kteří modelovali dopady změny klimatu na soubor povodí v pobřežních oblastech Středozevního moře. Sellami et al. (2016) použili hydrologický model SWAT pro identifikování odtoků ovlivněných změnou klimatu z povodí v jižní Francii (Thau) a severním Tunisku (Chiba). Výchozí třicetiletá perioda 1971–2000 byla porovnávána s projekcemi období 2041–2071 dle čtyř klimatických modelů. Výsledky modelovaných odtoků a modelovaného obsahu vody v půdě vykazovaly těsnou korelaci s modelovanou srážkovou činností, což ukazuje vysokou závislost ve srážko–odtokovém procesu. Ačkoliv výsledky byly zatíženy mnoha nejistotami, bylo možné identifikovat pokles ročních odtoků u povodí Thau o 2 % až 33 % v závislosti na použitém scénáři, u povodí Chiba o 25 % až 48 %, což do jisté míry koreluje s poklesem úhrnu srážek v ročním chodu na jednotlivých povodích – Thau o 9 % až 18 %, Chiba o 14 % až 19 %.

Obdobných výsledků dosáhli Pumo et al. (2016), kteří popisovali změnu v hydrologickém režimu na pěti povodích Sicilského ostrova vlivem klimatické změny pomocí hydrologického modelu pro pravděpodobnostní charakteristiku denních průtoků ModABa. Downscaling globálního klimatického modelu byl proveden pomocí aplikace AWE-GEN a zároveň byly zahrnuty dva emisní scénáře. Kalibrační periodou pro hydrometeorologické veličiny pro modelovaná období 2045–2065 a 2081–2100 bylo období 2003–2013. Pumo et al. (2016) uvádí, že hydrologický režim studovaných povodí ve scénářových obdobích může připomínat režim vádí, kdy odtok je absolutně závislý na srážce. Na druhou stranu uvádí, že povodí s vysokou propustností půdy a / nebo s nízkou storativitou (bez přítomnosti hluboko kořenicí vegetace) může být méně ovlivněno změnou klimatu, z důvodu redukce územního výparu a díky rychlému transportu srážkové vody do podzemních zvodní.

3.4.2 Domácí studie

Studie probíhající v České republice, které se zabývají problematikou dopadů změny klimatu na vodní režim lze rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou studie republikového charakteru (např. Horáček et al., 2008 nebo Hanel et al., 2012), které řeší dopady změny klimatu na ploše celé České republiky. Druhou skupinou jsou studie regionálního až lokálního charakteru, zejména v územích, které už změnu klimatu pocítují nyní, která se odráží na dostupnosti vodních zdrojů. Jedná se zejména o povodí, která jsou nejzranitelnější a nejnáchylnější na změny

v hydrologickém režimu. Většinou se jedná o povodí nepříznivě umístěná vůči vnějším vlivům, ať už se jedná o zvýšené antropogenní zásahy do hydrologického režimu⁴ (Kašpárek et al., 2011a) nebo o povodí silně přetvořená lidskou činností, u kterých se zmenšila plocha odvodňovaná tokem (Hanel et al., 2007) a nebo o nepříznivé situování povodí vůči dotacím vody ze srážkové činnosti⁵ (Kašpárek – Mrkvičková, 2008).

Do skupiny studií republikového charakteru lze zařadit studii (Horáček et al., 2008), v níž byly pomocí dvou regionálních klimatických modelů HIRHAM a RCAO modelovány scénářové řady v období 2071–2100 s referenčním normálovým obdobím 1960–1990. Výsledky práce ukázaly, že model HIRHAM je podstatně ovlivněn lokální orografií, naproti tomu model RCAO využívá prioritně v simulaci atmosférickou cirkulaci mezi oceánem a pevninou a tudíž je ve výsledných meteorologických veličinách pozorovatelná stratifikace probíhající od východu k západu. Nejvyšší nárůst srážek je pozorován v zimních měsících, zejména v únoru. Největší pokles srážek je v letních měsících, nejvíce v srpnu. Oba modely predikují nárůst teplot, pouze jejich distribuce se liší. Zatímco HIRHAM předpovídá v období duben–září větší nárůst teplot v nížinách a po zbytek roku větší nárůst teplot na horách, RCAO predikuje větší nárůst ve východní části České republiky než v západní části. Kromě zmíněných klimatických modelů byl využit i konceptuální hydrologický model Bilan, který byl nakalibrován na referenční období 1932–2003 a následně byly parametry přeneseny na 61 povodí České republiky. Výsledky ukazují pokles průměrných ročních odtoků z téměř všech povodí. V měsíčním kroku vykazuje pokles odtoků většina měsíců kromě období prosinec–únor, které je kompenzováno navýšením odtoků z důvodu odtávání sněhu zapříčiněného zvýšenou teplotou.

Vizina – Horáček (2009) uvádí výsledky studie dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci pro 56 povodí v České republice pro krátkodobý výhled (časový horizont 2025). Pozorované řady meteorologických veličin byly upraveny o hodnoty dané scénáři klimatické změny vycházející z výstupů klimatického modelu ALADIN/CZ. Referenčním obdobím pro modelaci byla perioda 1980–2006. Výsledky potvrzují nárůst srážkových úhrnů v zimních měsících naopak jejich pokles v období letním. Studie taktéž potvrzuje změnu rozložení veličin v ročním cyklu, poněvadž období zvýšených průtoků se posune z jara na konec zimy. V období od jara po podzim se většina srážek spotřebuje na územní výpar vlivem zvýšené teploty a odtoky budou převážně klesat. Největší pokles odtoku je očekáván na tocích v nižších a středních polohách.

Velmi podobných výsledků dosáhli Hanel et al. (2012), studiem souboru 250 povodí České republiky, na kterých byly porovnávány změny hydrologického režimu mezi pozorovaným časovým obdobím 1961–1990 a modelovaným obdobím 2070–2099 dle patnácti regionálních klimatických modelů. Model Bilan byl nakalibrován na pozorovanou řadu dat a následně byly jeho parametry přeneseny na řady dat ovlivněné změnou klimatu. Výsledky ukazují, že kromě letních období je zvýšená srážková činnost vždy vyvážena územním výparem způsobeným růstem teplot. Důsledkem růstu teplot se posunuje doba tání zásob sněhu z dubna na období leden–únor. Proto je tedy odtok v období leden–květen určen právě odlišnou dynamikou sněhové zásoby. Valná většina modelovaných povodí vykazovala tedy pokles odtoků v období od dubna do října díky

⁴ve formě odběrů povrchových a podzemních vod nebo ve formě důlní činnosti, která má negativní vliv na zásoby podzemních vod

⁵např. známý jev srážkového stínu Krušných hor

úbytku srážek. Možným řešením nedostatkových průtoků v letním období by dle studie mohla být akumulace odtoků v zimním období a jejich postupné uvolňování v období letním.

Výzkumem vlivu klimatické změny na vodní zdroje lokálního charakteru se zabývali Novický et al. (2007), kteří pomocí propojení modelu Bilan a modelu MODFLOW prezentovali změnu ve vydatnosti podzemních zásob vody v povodí řeky Metuje vlivem klimatické změny dle scénářů regionálních klimatických modelů HadCM2 a ECHAM4. Bilan a MODFLOW byly kalibrovány na referenční období 1974–2004 s tím, že projekce modelů byla prezentována na časový horizont s referenčním rokem 2050. Vlivem zvýšení teploty v kombinaci se změnou v rozložení srážkové činnosti v průběhu roku byl zaznamenán pokles hladiny podzemní vody v průměru o 6 metrů, v některých částech povodí dokonce o 10 metrů. Tento pokles by zapříčinil úplné vyschnutí řeky Metuje právě v období, kdy je řeka dotována ze zásob podzemní vody.

Poměrně velká pozornost je věnována právě oblasti srážkového stínu Krušných hor. Oblast Žatecka a Rakovnicka patří se svými 450 mm srážek ročně k nejsušším oblastem ČR. Hřeben Krušných hor s nadmořskou výškou přes 1000 m n. m. zachytí velký podíl srážek přicházejících ze západu. V kombinaci s relativně vysokými průměrnými teplotami vzduchu vznikají vysoké ztráty výparem.

Jedním z povodí nacházejícím se v této oblasti je povodí Rakovnického potoka, které je stejně jako zbytek území ČR vystaven vzestupu teploty vzduchu, zapříčiňujícímu zvýšený územní výpar, který byl v minulosti úspěšně kompenzován mírným zvětšením srážek, tudíž se odtok z povodí nezmenšoval. Nyní je situace o poznání dramatičtější. Tak například v roce 2009 poklesl v letním období odtok na 10 l/s (ze 163 km²) což představuje asi čtvrtinu vypouštění z ČOV Rakovník. Jak uvádí Kašpárek et al. (2011a), při porovnání hydrometeorologických veličin z období 1988–2008 oproti období 1931–1980 je pozorován při relativně malém poklesu srážek extrémní pokles průměrného průtoku (až 53 %). Z rozborů údajů o užívání vod vyplývá, že nejpodstatnější jsou odběry z podzemních vod. Výsledky práce ukazují, že i když roční úhrny srážek poklesly jen velmi mírně, jejich rozložení se změnilo. Podstatně ubylo srážek s velkými výškami a také ubylo srážek v období od dubna do června. Předchozí zmíněné v kombinaci spolu s významným oteplením, které nastalo zejména po roce 1980, má za následek pokles průtoků v intervalu 40 % až 60 %, s tím, že největší poklesy jsou pozorovány v jarních měsících a také v srpnu.

Dalšími povodími ovlivněnými srážkovým stínem Krušných hor jsou povodí Blšanky a Liboce. Ve studii (Kašpárek – Mrkvičková, 2008) byla hydrologická bilance v období 1991–2006 porovnávána s výhledovým stavem do budoucna v období 2070–2100 podle čtyř různých variant scénářů klimatické změny vycházející z projektu PRUDENCE. Z výsledků modelování vyplývá, že současné hydrologické poměry jsou již do jisté míry ovlivněny dopady klimatické změny. Výsledky práce korelují s výsledky prací zmíněných výše a to ve smyslu pozorované změny v chodu srážek, kdy podle scénářů v zimních měsících srážky narůstají a naopak v letních měsících ubývají. To vše je doprovázeno zvětšením územního výparu vlivem vyšších teplot. Nejmírnější scénář vykazuje ztrátu odtokové výšky 19 %, dle nejpesimističtějšího scénáře dochází k poklesu až o 55 %, přičemž největší pravděpodobnost nedostatku vody v průběhu roku je během měsíce srpna.

4 Charakteristika studijního území

4.1 Popis studijního povodí

Hačka je zhruba 14.8 km dlouhým tokem pramenícím v Krušných horách mezi vesnicemi Strážky a Domina. Povodí Hačky je zasazeno mezi obcemi Chomutov, Málkov, Černovice a Březno u Chomutova.

Pramen vodního toku vyvěrá z místní louky, kde dále stéká do údolnice a prosakuje skrze útvar, který připomíná násep bývalé polní cesty vedoucí napříč údolím. Dnes bychom tento objekt označili spíše jako hráz suchého poldru. Dále Hačka pokračuje údolím jako přirozený vodní tok, kde též odvádí vodu z místních přítoků přitékajících ze strání údolí. Dramatická změna v morfologii toku nastává v Nových Spořicích, kdy je přirozené meandrující koryto potoka transformováno do pravidelného koryta vydlážděného kamenivem. Úseky, kde je vydlážděn celý průtočný profil, střídají místa pouze s vydlážděným dnem. Stejným způsobem je řešen i zbytek trasy toku. Změna nastává až v dolní části toku, poblíž obce Hořenec, kde potok vytváří značné meandry, a kde se abraze významně podepisuje na místním podloží.

Hačka je specifickým tokem v tom smyslu, že se jedná o tok tekoucí z Krušných hor směrem do vnitrozemí, který není přerušen a zaústěn do Podkrušnohorského přivaděče vody (dále jen PKP) z důvodu těžby hnědého uhlí v místních lomech, jako tomu je u valné většiny toků tekoucích stejným směrem. Zároveň je hydrologie tohoto toku trochu rozporuplná, poněvadž od pramene po křížení s PKP se jedná o přirozený vodní tok bez jakýchkoliv odběrů a vypouštění, naopak od křížení s PKP po ústí se jedná o tok podstatně urbanizovaný (obklopený zejména zahradami a zemědělskými staveními), ovlivněný odběry a vypouštěním. Tudíž pro další studium a výpočty je povodí rozděleno do dvou částí a to na horní část povodí a dolní část povodí. Celková rozloha povodí Hačky činí 27.60 km² (horní část 7.70 km², dolní část 19.90 km²).

Vodní tok Hačka spadá do povodí řeky Ohře a zároveň do úmoří Severního moře. Tok je spravován státním podnikem Povodí Ohře. Přehled vodních toků v povodí Hačky lze vidět na obrázku 4.1 na následující straně a tabelárně v tabulce 4.1. Schéma skladby průtoků Hačky lze vidět v příloze A na straně 77.

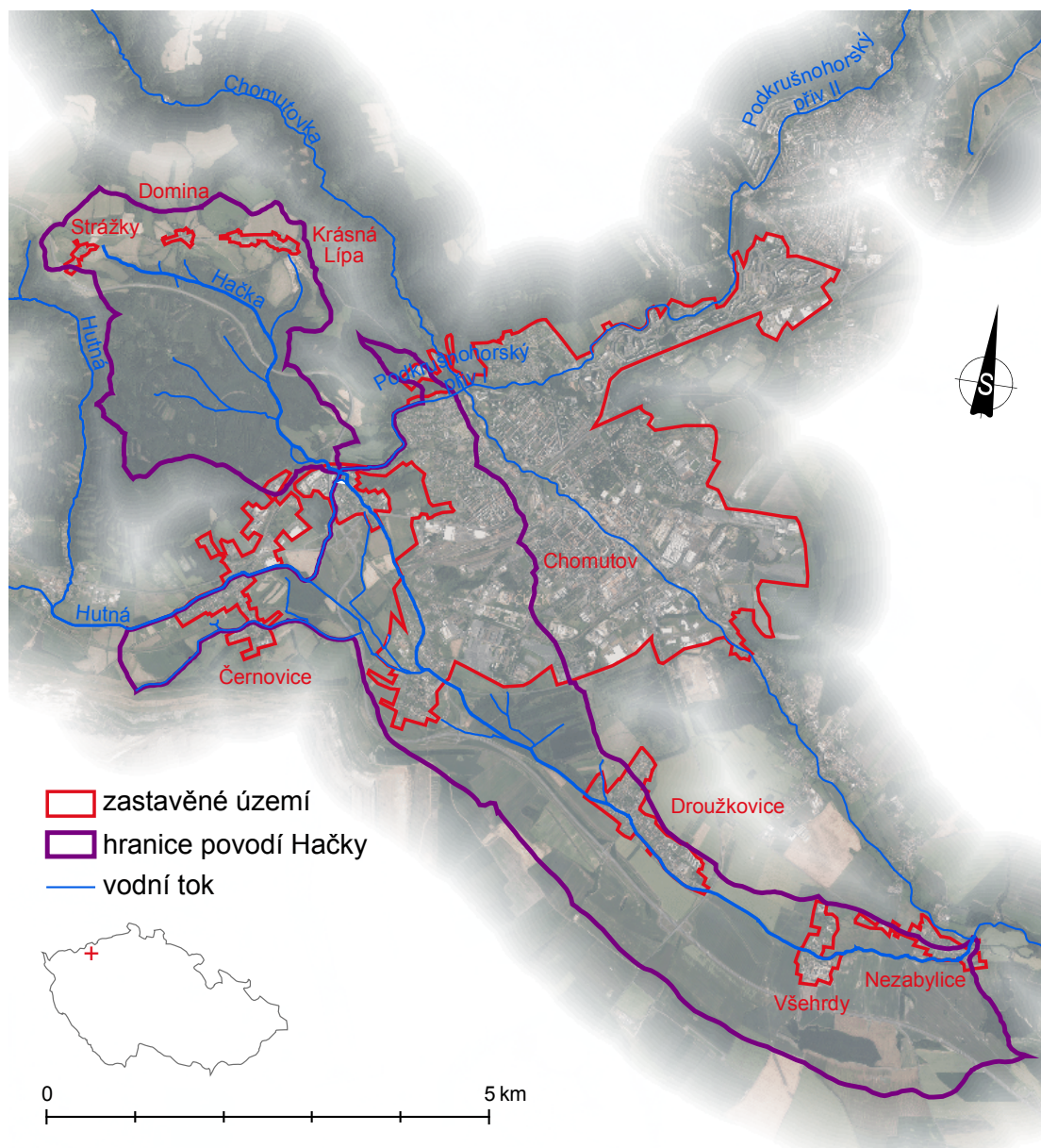
Tabulka 4.1: Přehled vodních toků v povodí Hačky

Název toku	Počet	Min [km]	Max [km]	Průměr [km]	Suma [km]	ČHP
Hačka	-	-	-	-	14.33	1-13-03-115/1
Hutná	-	-	-	-	12.40	1-13-03-115/2
Liděnský potok	-	-	-	-	3.01	1-13-03-115/4
PKP	-	-	-	-	16.56	1-14-01-003/2
Bezejmenné toky	19	0.06	2.23	0.61	11.66	

Zdroj: autor

4.2 Charakteristika studijního povodí

Povodí Hačky leží v nadmořských výškách cca 266–757 m n. m., z toho horní část 382–757 m n. m. a dolní část 266–549 m n. m., sklony terénu jsou v dolní části povodí malé, průměrně 6%, v horní části povodí jsou sklony terénu průměrně 19%. Výše zmíněné hodnoty lze vidět v grafické příloze v příloze B na straně 78 a v příloze C na straně 79. Většina plochy horní části povodí je zalesněna, cca 65%, zbytek plochy horní části povodí tvoří louky, pastviny a přirozená vegetace. Dolní část povodí je pouze minoritně zalesněna, cca 5%. Největší zastoupení připadá na zemědělské využití, cca 44% je využito jako orná půda. Louky, pastviny a přirozená vegetace je zastoupena z cca 18%. Zbytek plochy dolní části povodí připadá na zastavěnou plochu. Výše zmíněné hodnoty lze vidět v grafické příloze v příloze D na straně 80. Hydrologické a klimatické poměry povodí budou popsány v rámci kapitoly 6.1 na straně 43.



Obrázek 4.1: Přehled vodních toků v povodí Hačky

Zdroj: autor

5 Metodika

Počátečním bodem pro tuto práci bylo zpracování hydrologických a meteorologických dat. Následně byly zpracovány údaje o užívání vod v povodí a údaje o vypouštění do vodního toku Hačka. Pro tyto veličiny byl vyhodnocen jejich dlouhodobý vývoj. Obě sady dat byly vstupním parametrem pro výchozí kalibraci modelu Bilan na pozorované hydrometeorologické veličiny. Následně byly upraveny pozorované řady meteorologických veličin dle tří regionálních klimatických modelů přírůstkovou metodou, které pak byly vstupem do modelu Bilan za účelem identifikace změn hydrologické bilance vlivem změn klimatu.

Pro veškeré výpočty a modelování bylo použito statistické a programovací prostředí *R* (R Core Team, 2016), které je akademickou obcí často využíváno pro přípravu dat, analýzu časových řad a vizualizaci výsledků. V tomto prostředí byl naprogramován i balík⁶ *bilan*, který je volně šiřitelný po dohodě s autory. Tento balík zahrnuje model hydrologické bilance Bilan v denním a měsíčním časovém kroku. Protože byl model Bilan napsán v jazyku C++, bylo nutné využít balíku *Rcpp*, který umožňuje spuštění aplikací napsaných v tomto jazyku v prostředí *R*. Pro práci s geografickými daty uvnitř prostředí *R* byly použity balíky *deldir*, *fields*, *raster*, *rgeos* a *mapproj*. Pro stanovení klouzavých minim a průměrů byly použity balíky *caTools* a *zoo*. Pro následnou grafickou vizualizaci výsledků práce byl využit balík *ggplot2* (Wickham, 2009).

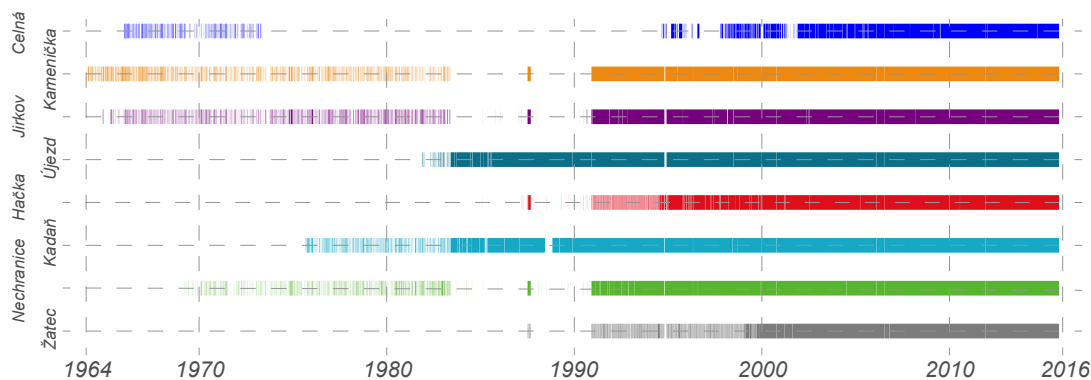
Pro mapové výstupy uvedené v této práci bylo využito sady nástrojů *ArcGIS 10.2.2 for Desktop*.

5.1 Vstupní sady dat

Jak již bylo zmíněno, do modelu Bilan vstupují meteorologické řady dat denních, popřípadě měsíčních úhrnů srážek a řady průměrných denních, popřípadě měsíčních teplot vzduchu, hydrologické řady průměrných denních, popřípadě měsíčních průtoků, respektive odtoků z povodí a také volitelně údaje o odběru vod povrchových a podzemních, a vypouštění do vodního toku. Tato data poskytl státní podnik Povodí Ohře. Řady srážek a teploty byly pořízeny z meteorologických stanic KS Celná, KS Hačka, KS Jirkov, KS Kadaň, KS Kamenička, KS Nechanice, KS Újezd a KS Žatec. Prostorové rozmístění meteorologických stanic vůči povodí Hačky spolu s umístěním limnigrafické stanice lze vidět v příloze E na straně 81.

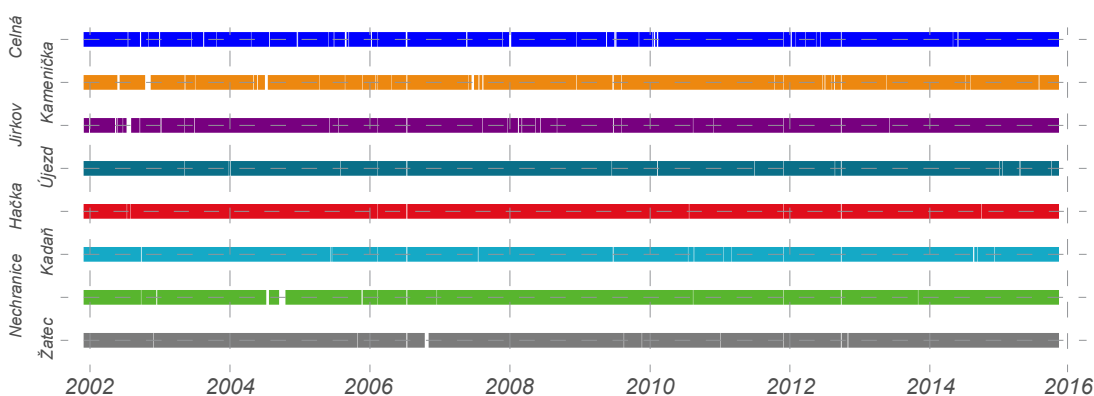
Řady průtoků byly pořízeny z limnigrafické stanice LG Hačka pod odlehčením a pro případnou kontrolu či kalibraci byly obstarány navíc průtoky ze stanic LG MÚ Chomutov a LG Postoloprty. Jedná se o limnigrafické stanice na vodním toku Chomutovka, do které ústí vodní tok Hačka, který je jeho pravostranným přítokem. LG MÚ Chomutov se nachází nad soutokem Hačky a Chomutovky a LG Postoloprty pod soutokem obou zmíněných. Jednotlivé časové řady dílčích datových sad lze vidět na obrázcích 5.1, 5.2 a 5.3 na následující straně

⁶soubor funkcí a nástrojů určený ke specifickému použití v prostředí *R*



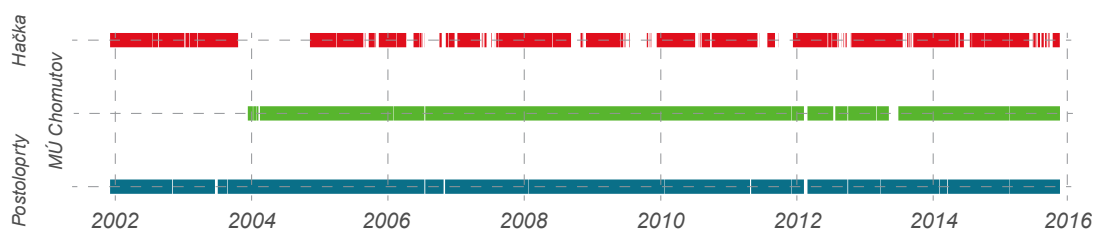
Obrázek 5.1: Denní úhrny srážek z meteorologických stanic v okolí povodí Hačky

Zdroj: autor



Obrázek 5.2: Průměrné denní teploty vzduchu z meteorologických stanic v okolí povodí Hačky

Zdroj: autor



Obrázek 5.3: Průměrné denní průtoky vodních toků Hačka a Chomutovka

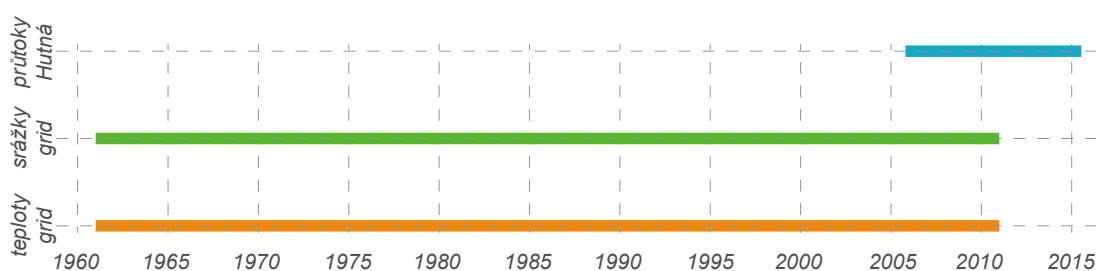
Zdroj: autor

Z důvodu necelistvosti některých časových řad vstupních dat a také za účelem získání co nejdelší pozorované kontinuální řady byla obstarána z VÚV TGM datová sada denních úhrnů srážek a sada průměrných denních teplot vzduchu z datového gridu 25 x 25 km (viz obrázek 5.4 na následující straně). Těmito daty byly časové řady vyplněny způsobem zmíněným v kapitole 5.2.1 na následující straně. Jak prokázala studie *Rozbor hydrologických poměrů Přivaděče Ohře-Bílina a jeho přítoků* (VÚV TGM, 2015), pro odhad dlouhodobých průměrných odtoků z dalších dílčích povodí v posuzované oblasti, do které povodí Hačky spadá, je vhodné použít data průměrných denních průtoků z vodního toku Hutná. S vědomím tohoto byly pořizeny z VÚV TGM denní průměrné průtoky vodního toku Hutná, který byl využit jako analogon

(nejbližší povodí s pozorovanými průtoky) a který sloužil pro následnou kalibraci modelu Bilan. Hydrologická analogie spočívá ve zjištění neznámého průtoku Q_2 , který je odvozen z měřeného hydrogramu Q_1 pomocí rovnice:

$$Q_2 = k Q_1 \quad (5.1)$$

kde koeficient k je dán poměrem ploch povodí. Principu hydrologické analogie se používá například k odhadu průtoků v nepozorovaných povodích. Právě Trávníčková – Kožín (2014) využili hydrologické analogie k odhadu základního odtoku v dosud nepozorovaných povodích zejména na severovýchodě České republiky. Desítky hydrogramů z krátkodobého měření na těchto povodích byly upraveny podle analogonu. Ačkoliv výsledky vykazovaly rozptyl hodnot základního odtoku, pro základní bilanční hodnocení sledovaných povodí byly výsledky dostatečné.



Obrázek 5.4: Hydrologická a meteorologická data pořizovaná z VÚV TGM
Zdroj: autor

Údaje o užívání vod ve studovaném povodí poskytl jak správce toku státní podnik Povodí Ohře, tak VÚV TGM. Údaje o vypouštění do povrchových vod se souhrnně z obou zdrojů datují do roku 1980. Protože v povodí Hačky není uživatel, který by odebíral množství povrchové vody přesahující v kalendářním roce $6\,000\text{ m}^3$ nebo 500 m^3 v kalendářním měsíci, byl správcem toku poskytnut soupis žadatelů (drobných uživatelů) o manipulaci s povrchovými vodami.

5.2 Příprava vstupních dat

5.2.1 Příprava vstupních dat meteorologických

Nejdříve proběhla interpolace meteorologických dat pomocí metody Thin Plate Spline (dále jen TPS), která je založena na modelu nekonečného a nekonečně tenkého plátu. Síť souřadnic (imaginární kovový plát) je umístěn na referenční objekt⁷ a následně se tvaruje tak, aby se dosáhla shoda s porovnávaným objektem. Ukázkovou síť souřadnic vytvarovanou podle zadaných bodových dat lze vidět na obrázku 5.5 na následující straně. Rozdíly mezi objekty vystihuje deformace původně pravoúhlé sítě, respektive rovinného kovového plátu. Míra prohnutí kovového plátu se vyjadřuje množstvím energie potřebné k ohybu plátu, tzv. deformační energie. Čím je deformace plátu lokálnější, tím je potřeba vyšší deformační energie (Baranová, 2006). Jak uvádí Donato – Belongie (2002), jedním nedostatkem metody TPS je, že k výpočtu vyžaduje hustou síť měřených bodů. Tento nedostatek se promítl i v řešení této práce, viz následující strana.

⁷v případě této práce se jedná o digitální model reliéfu obohacen o bodová data s údaji z meteorologických stanic, kde výšková vzdálenost mezi reliéfem a body meteorologických stanic je právě velikost srážky popřípadě hodnota teploty – z toho vyplývá, že TPS zohledňuje při interpolaci nadmořskou výšku

Interpolační funkce $f(x, y)$ má tvar

$$f(x, y) = a_1 + a_x x + a_y y + \sum_{i=1}^p w_i U(\|(x_i, y_i) - (x, y)\|) \quad (5.2)$$

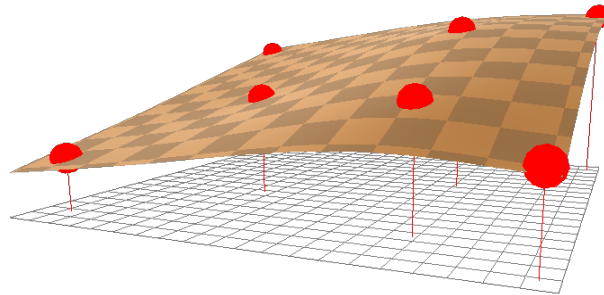
kde $U(r_{ij}) = r_{ij}^2 \log r_{ij}$, kde r_{ij}^2 je druhá mocnina vzdálenosti mezi významnými body i a j .

Funkce $U(r)$ je tzv. fundamentální řešení biharmonické rovnice

$$\Delta^2 U = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)^2 U = 0 \quad (5.3)$$

Funkce $f(x, y)$ minimalizuje tzv. deformační energii

$$I_f = \iint_{R^2} (f_{xx}^2 + 2f_{xy}^2 + f_{yy}^2) dx dy \quad (5.4)$$



Obrázek 5.5: Vytvarovaná síť souřadnic podle zadaných bodových dat

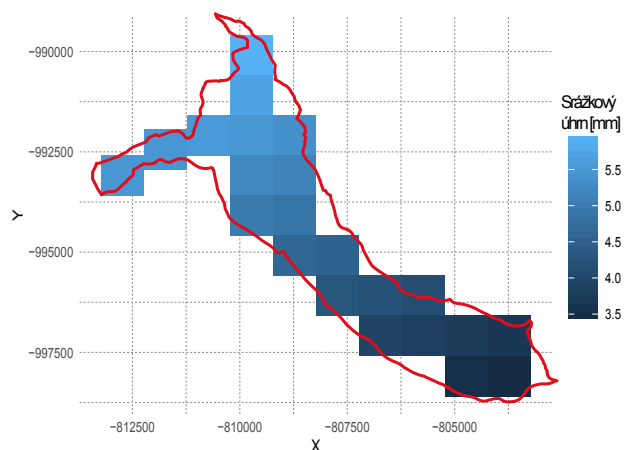
Zdroj: (Lombaert, 2006) Dostupné z: <<http://step.polymtl.ca/~rv101/thinplates/>>

Takto vytvarovaná síť souřadnic byla promítnuta na plochu povodí v rastru o velikosti buňky 1 x 1 km a to z důvodu snížení výpočetní náročnosti a také proto, že takto hrubý rastr popisuje variabilitu hodnot s poměrně vysokou přesností. Následně byl vypočten průměr z jednotlivých buněk rastru. Na obrázku 5.6 na následující straně lze vidět výsledný rastr hodnot srážkového úhrnu v určitý den na dolní části povodí Hačky.

V případech, kde nebylo možné využít interpolace pomocí TPS z důvodu nedostatku vstupních dat v jednotlivých dnech časové řady⁸, byla využita interpolace pomocí Thiessnových polygonů, za předpokladu, že v časové řadě byly přítomny hodnoty daných meteorologických stanic, které se účastnily tvorby Thiessnových polygonů. Plochy jednotlivých Thiessnových polygonů (viz obrázek 5.7 na následující straně).

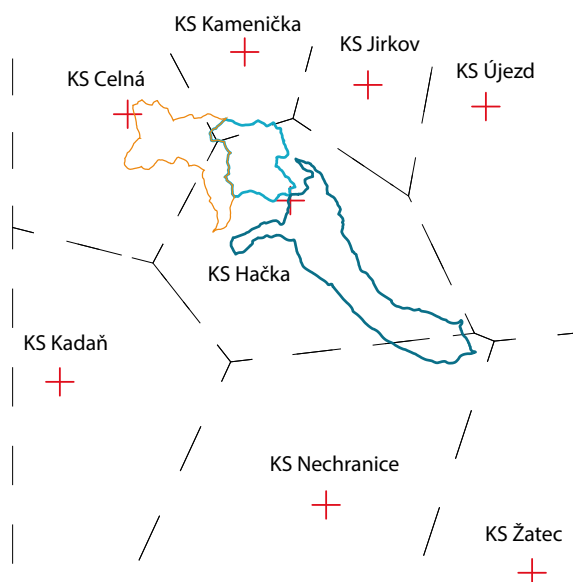
Pokud v časové řadě nebyly přítomny záznamy ze stanic, které tvoří Thiessnovy polygony byl vypočítán standardní průměr jednotlivých hodnot. Takto zpracované datové řady průměrných denních teplot vzduchu a denních úhrnů srážek byly doplněny údaji z již zmiňovaného gridu v případech, kde se vyskytovaly chybějící hodnoty, tak aby řady byly celistvé. Následně byly tyto řady meteorologických dat agregovány do měsíčního kroku.

⁸počet meteorologických stanic s naměřenou hodnotou musel být větší než 5, aby mohla být využita interpolace metodou TPS



Obrázek 5.6: Rastr hodnot srážkového úhrnu v určitý den na dolní části povodí Hačky

Zdroj: autor



Obrázek 5.7: Plochy jednotlivých Thiessnových polygonů

Zdroj: autor

5.2.2 Příprava vstupních dat hydrologických - horní část povodí

Pro správnou prognózu vydatnosti vodního toku Hačky bylo potřeba zjistit přirozený průtok, nezměněný jakoukoliv vnější dotací nebo odběrem vody z toku. V případě Hačky veškeré odběry probíhají až pod měrným profilem, a tudíž se neuvažovali, co se však týče vnější dotace, ta probíhá ve dvou profilech a to odlehčení PKP skrze tok Hutná, který je pravostranným přítokem Hačky ve Starých Spořicích⁹ a dále odlehčení PKP v Nových Spořicích¹⁰ (viz příloha E na straně 81).

Na základě vědomosti výše zmíněného bylo potřeba data denních průměrných průtoků rekonstruovat, tak aby byla eliminována dotace z PKP. Poněvadž měrný profil na Hačce se nachází

⁹soutok se nachází pod měrným profilem – neuvažuje se

¹⁰soutok se nachází nad měrným profilem – uvažuje se

v podstatě v uzávěrovém profilu horní části povodí Hačky, vycházelo se z úvahy založené na hydrologické analogii a podobnosti srážko-odtokových poměrů. Předpokladem bylo, že déšť stejné velikosti spadlý na povodí Hutné a Hačky musí vyvolat stejnou odtokovou odezvu, opravenou u Hačky o koeficient poměru ploch obou povodí. S touto úvahou pak byly porovnávány poměry průměrných denních průtoků Hutné a Hačky s poměry sum denních úhrnů srážek na obou povodích ve třech předchozích dnech včetně srážky v den uvažovaných průtoků. Na základě porovnání byl vyhodnocen průtok buď jako adekvátní ke své srážce anebo neadekvátní, což signalizovalo dotaci z PKP. Tímto způsobem byla přepočítána celá řada průměrných denních průtoků Hačky, která následně byla agregována do měsíčního kroku. Výsledkem je tedy řada rekonstruovaných průtoků, která je svou délkou identická s délkou řady průtoků z Hutné. Tato řada údajů o průtocích byla následně převedena pro model Bilan na údaje o odtokové výšce dle následujícího vzorce.

$$R [mm] = \frac{Q}{P \times 1000} \times 3600 \times 24 \times D \quad (5.5)$$

kde Q je velikost průtoků v m^3/s , P je plocha povodí v km^2 a D je počet dní v měsíci. Odtoková výška je tedy definována jako množství vody, které odteče z jednotky plochy za standardní časovou jednotku a uvádí se v mm (Tremel et al., 2012). Výstupy z modelu Bilan v podobě odtokových řad budou v následujících kapitolách uvedeny v těchto jednotkách.

5.2.3 Příprava vstupních dat hydrologických - dolní část povodí

Na základě hydrologické analogie, terénního průzkumu, údajů o vypouštění do povrchových vod a údajů o odběru povrchových a podzemních vod bylo vytvořeno celkem šest průtokových scénářů. Nejdříve byl pomocí hydrologické analogie přenásoben průtok horní části povodí Hačky koeficientem poměrů ploch horní a dolní části povodí (viz rovnice 5.1 na straně 35). Následně byl pomocí propojeného vodohospodářského modelu s modelem Bilan (viz kapitola 3.3.6 na straně 24) modelován manipulacemi neovlivněný průtok dle jednotlivých scénářů odběru povrchové vody (viz kapitola 5.3).

5.2.4 Výpočet základního odtoku

Pro zpřesnění modelace byl vypočten základní odtok pro obě části povodí, který následně vstupoval do modelu Bilan. Pro stanovení velikosti základního odtoku byla použita metoda separace hydrogramu na základě klouzavých minimálních průtoků, kterou ve své studii navrhli a ověřili Kašpárek et al. (2011b). Spočívá ve výpočtu řady klouzavých minim z intervalu předešlých 30 dní. Touto řadou se posléze proloží klouzavé průměry s dobou průměrování 30 dní.

5.3 Scénáře odběru vody z Hačky

Poněvadž v povodí Hačky není uživatel, který by odebíral množství povrchové vody přesahující v kalendářním roce $6\,000\,m^3$ nebo $500\,m^3$ v kalendářním měsíci (Česká republika, 2001), nejsou evidovány reálné odběry povrchové vody, ale pouze jejich maximální povolené limitní hodnoty a počet uživatelů, kteří požádali správce toku o vyjádření k záměru odebírat povrchovou vodu. Maximální možné množství odebírané vody povolené správcem toku v součtu

pro všechny uživatele činí zhruba $1450 \text{ m}^3 / \text{rok}$. Protože řada žadatelů vnímá vyjádření správce toku jako povolení k nakládání s vodami a na základě tohoto vyjádření odbírá povrchovou vodu, bylo uvažováno s nejhorším možným scénářem, a to, že všichni žadatelé s kladným vyjádřením správce toku, odbírají povrchovou vodu v plném rozsahu odsouhlaseného objemu uvedeného ve vyjádření správce toku nehledě na to, zda následně tito žadatelé dostali povolení k nakládání s vodami od vodoprávního úřadu či nikoliv. Tento scénář byl následně navýšen o 30 %, aby byl zahrnut odběr od případných nenahlášených odběratelů.

Celkem tedy bylo vytvořeno šest variant scénářů (viz tabulka 5.1). První varianta uvažovala, že veškeré povolené množství odebírané vody je spotřebováno v průběhu celého vegetačního období, tedy v období duben–září. Druhá varianta uvažovala, že veškerý povolený objem vody je spotřebován v klíčovém období vegetace, kdy je potřeba rostlinám dodávat nejvíce vláhy, tedy období červen–srpen. Třetí varianta vycházela z velké části z druhé varianty, s tím rozdílem, že veškerý povolený objem vody je spotřebován v bezdeštných dnech s vysokou teplotou (viz graf na obrázku 6.13 na straně 50).

Tabulka 5.1: Varianty scénářů odběru povrchové vody

Scénář odběru	Varianta odběru	Varianta odběru
Scénář 1	duben–září	(duben–září) + 30 %
Scénář 2	červen–srpen	(červen–srpen) + 30 %
Scénář 3	červen–srpen*	(červen–srpen*) + 30 %

*objem vody je spotřebován v bezdeštných dnech s vysokou teplotou (viz graf na obrázku 6.13 na straně 50)

Zdroj: autor

5.4 Kalibrace modelu Bilan a tvorba referenčních odtokových řad

Model Bilan byl kalibrován pro každou část povodí zvlášť. Kalibrace modelu pro horní část povodí byla provedena s hydrometeorologickými daty z horní části povodí a zároveň s daty z povodí Hutné, pro možnost porovnání jednotlivých výsledků modelování při použití dvou sad parametrů modelu. Kalibrace pro dolní část povodí byla provedena celkem šestkrát a to pro každou variantu scénářů odběru povrchové vody s hydrometeorologickými daty z dolní části povodí. Protože se vycházelo ze skutečnosti, že průtoky v Hačce konstantně klesají a nedostatkových průtoků v průběhu let přibývá, byla kalibrace modelu zaměřena právě na tuto skutečnost s tím, že bylo zacíleno na co nejtěsnější korelaci měsíčních pozorovaných a modelovaných minimálních průtoků.

Pro možnost odhadu hydrologické bilance vlivem klimatické změny bylo zapotřebí porovnat hydrologické řady pozorované a hydrologické řady založené na scénářových datech z klimatických modelů. Ve studiích podobného charakteru se ustálilo použití a porovnávání třicetiletých řad. Poněvadž rekonstruovaná řada odtoků z povodí Hačky byla dlouhá pouze devět let, bylo zapotřebí vytvořit tuto třicetiletou konzistentní řadu odtoků z povodí Hačky pomocí modelu Bilan. Jednotlivé sady parametrů modelu Bilan, získané jeho předchozí kalibrací na pozorovaná data, byly aplikovány do modelu spolu s meteorologickými daty z daných částí povodí a následně byly pomocí Bilanu na základě těchto vstupních dat nasimulovány řady odtoků.

Jako výchozí období pro tyto třicetileté řady byla zvolena perioda 1984–2014. Důvodem pro výběr tohoto období byl fakt, že v tomto období jsou pozorovaná data nejvíce konzistentní a přítomnost hodnot z prostorového gridu je minoritní. Pro dolní část povodí bylo vytvořeno šest odtokových řad dle jednotlivých scénářů odběru (viz kapitola 5.3 na straně 38). Za účelem porovnání byly vytvořeny pro horní část povodí celkem dvě odtokové řady a to pomocí sad parametrů modelu Bilan z kalibrace na průtoky z horní části povodí a také z kalibrace na průtoky z povodí Hutné (analogon). Stejným způsobem (přenesení parametrů nakalibrovaného modelu) se například simulovaly odtoky z LAPV ve studii (Kožín et al., 2015) za účelem zjištění potenciální akumulace vody pro případnou adaptaci na negativní účinky změny klimatu.

5.5 Úprava meteorologických dat přírůstkovou metodou

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3.4 na straně 21 pro simulaci podmínek ovlivněných změnou klimatu byly využity výstupy simulace RCM ALADIN-CLIMATE/CZ (dále jen ARP) pro období 1961–2099, dále výstupy simulace RCM REMO_EH5 (dále jen EH5) pro stejné období a nakonec výstupy simulace RCM CLM_Q0 (dále jen Q0). Všechny užití simulace byly řízeny podle emisního scénáře SRES A1B s horizontálním rozlišením cca 25 km x 25 km.

Protože jsou klimatické modely zatíženy systematickými chybami, bylo nutné odvodit změny pozorované řady pro výhledové období uvnitř dat z klimatických modelů. Zároveň bylo nutné tyto změny odvodit při zachování jejich sezonní proměnlivosti. Proto bylo vybráno identické období s pozorovanými daty (1984–2014¹¹), (tzv. kontrolní období ref) a dvě výhledová (scenářová sce) období uvnitř dat simulovaných klimatickými modely, konkrétně v této studii období 2035–2065¹² a období 2068–2098¹³. Mezi kontrolním obdobím a výhledovými obdobími byly identifikovány přírůstkové faktory na základě podílů průměrů měsíčních srážkových úhrnů a rozdílů průměrů měsíčních teplot vzduchu. Přírůstkové faktory byly následně přeneseny na pozorovanou řadu, pro srážky multiplikativně a pro teploty aditivně. Výsledkem byla pozorovaná řada dat ovlivněná dle scénářů použitých klimatických modelů. Postup přenesení změn na pozorovanou řadu dat přírůstkovou metodou je patrný z grafiky na obrázku 5.8 na následující straně. Výpočet přírůstkových faktorů pro srážky P probíhal dle rovnice 5.6 a pro teploty T dle rovnice 5.7.

$$\Delta P(y, m) = \frac{\bar{P}_{sce}(y, m)}{\bar{P}_{ref}(y, m)} \quad (5.6)$$

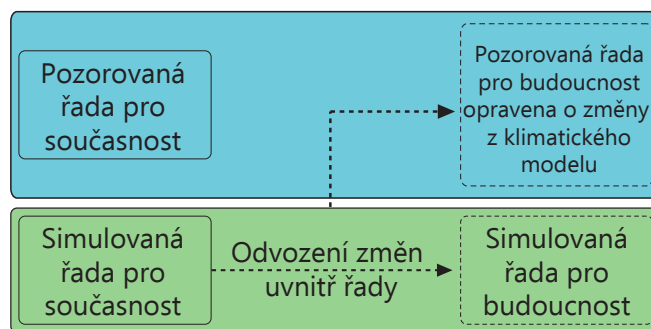
$$\Delta T(y, m) = \bar{T}_{sce}(y, m) - \bar{T}_{ref}(y, m) \quad (5.7)$$

kde y je scénářové období 2035–2065 nebo 2068–2098 a m je určitý měsíc v roce.

¹¹pro lepší přehlednost v textu je období definováno kalendářními roky, jedná se však o hydrologické roky 1985–2014

¹²viz pozn. 11, hydrologické roky 2036–2065

¹³viz pozn. 11, hydrologické roky 2069–2098



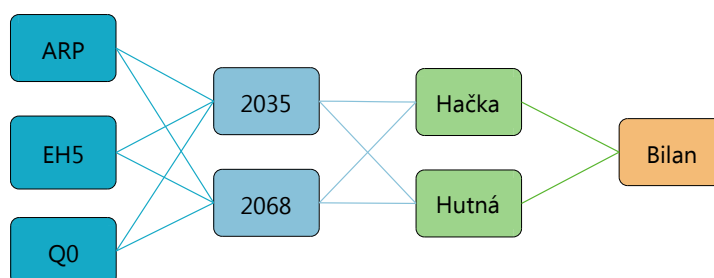
Obrázek 5.8: Odvození změn pomocí dat z klimatického modelu

Zdroj: autor

5.6 Tvorba odtokových řad ovlivněných změnou klimatu

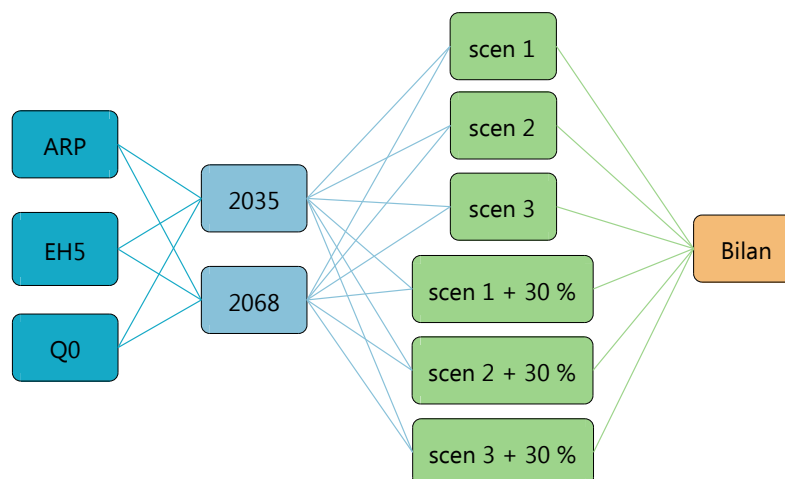
Řady meteorologických dat upravené metodou popsanou v kapitole 5.5 na předchozí straně vstupovaly do hydrologického modelu Bilan, přičemž parametry modelu byly extrahovány z výstupních souborů kalibrací modelu pro jednotlivé části povodí a pro dané varianty scénářů odběru povrchové vody (viz kapitola 5.4 na straně 39). Tímto způsobem tedy bylo vytvořeno celkem 48 odtokových řad (12 pro horní část povodí, z toho šest pro období 2035–2065 a šest pro období 2068–2098, a 36 pro dolní část, po osmnácti pro každé období). Postup tvorby odtokových řad pro horní část povodí lze vidět na obrázku 5.9, kdy meteorologická data upravená dle scénářů jednotlivých klimatických modelů z daných výhledových období vstupovala spolu s parametry modelu extrahovanými z výstupních souborů kalibrací dle dat z horní části povodí Hačky a také povodí Hutné.

Obrázek 5.10 na následující straně ukazuje postup tvorby odtokových řad z dolní části povodí. Postup modelace odtokových řad byl analogický tvorbě odtokových řad z horní části povodí s tím rozdílem, že parametry modelu byly získávány z výstupních souborů kalibrací modelu dle jednotlivých scénářů odběru povrchových vod (viz kapitola 5.3 na straně 38).



Obrázek 5.9: Postup tvorby odtoků z horní části povodí Hačky

Zdroj: autor



Obrázek 5.10: Postup tvorby odtoků z dolní části povodí Hačky

Zdroj: autor

5.7 Porovnání minim současných a scénářových průtoků

Za účelem stanovení, jakým způsobem použité klimatické modely podmínily vznik minimálních průtoků, a zda došlo k jejich podhodnocení či naopak k nadhodnocení, byly porovnány absolutní minima současných průměrných měsíčních průtoků s absolutními minimy scénářovými. Ze současné řady průměrných měsíčních průtoků byly vybrány vždy nejmenší hodnoty v daných letech a ty byly následně vzestupně seřazeny. Následně bylo provedeno vzestupné seřazení minim kontrolního období (1984–2014) a období scénářového (2035–2065 nebo 2068–2098) a takto seřazené řady byly podělené dle rovnice 5.8. Následně byla na tento podíl aplikována lokální polynomiální regrese¹⁴ s parametrem vyhlazování α 0.5, na základě pravděpodobnosti jednotlivých minimálních průtoků vypočítané dle rovnice 5.9. Parametry regrese byly zpětně aplikovány na současnou řadu minimálních průtoků. Tímto způsobem vznikly řady minimálních průtoků současných a scénářových, které bylo možné mezi sebou porovnat.

$$\Delta R_{min} = \frac{R_{i min (sce)}}{R_{i min (ref)}} \quad (5.8)$$

$$p = \frac{k - 0.3}{n + 0.4} \quad (5.9)$$

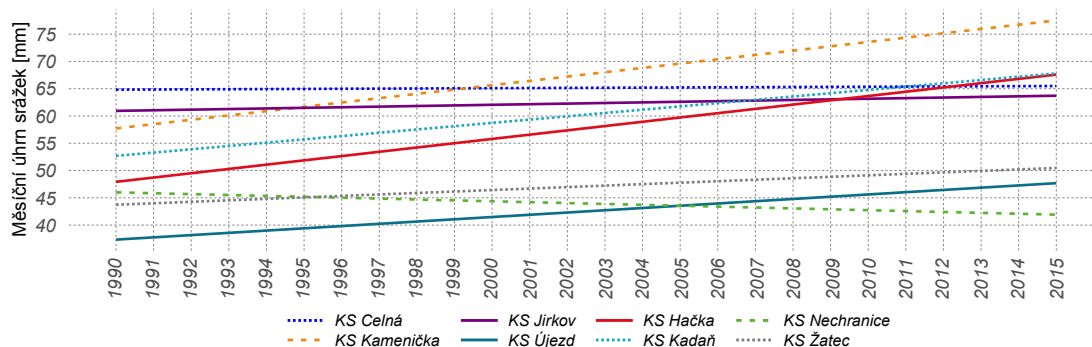
¹⁴viz funkce loess(), základní balík R

6 Výsledky práce

6.1 Trendy pozorovaných hydrometeorologických veličin

6.1.1 Identifikované trendy srážkových úhrnů

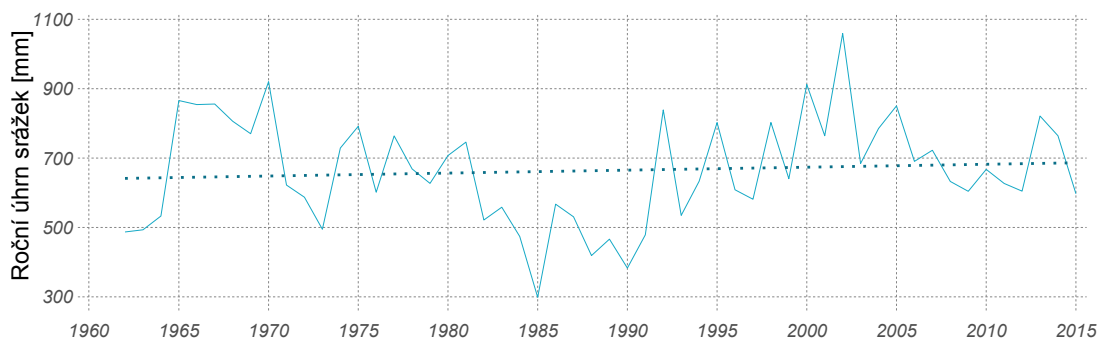
Ačkoliv pozorované údaje o srážkové činnosti ve studovaném území se datují zhruba od roku 1964 (při propojení dat z datového gridu od roku 1961), z hlediska dlouhodobého kolísání srážek bylo uvažováno období 1990–2015 (hydrologické roky), poněvadž v tomto časovém okně jsou data ze všech užitých stanic nejvíce konzistentní. Z grafu na obrázku 6.1 je patrné, že kromě KS Nechranice (pokles cca 2 mm / desetiletí), má úhrn srážek na všech stanicích rostoucí tendenci, zejména stanice KS Hačka (cca 7.2 mm / desetiletí) a KS Kamenička (cca 7 mm / desetiletí). Tento fakt do jisté míry koreluje s větším interpolovaným úhrnem srážek v horní části povodí než v dolní. Tento rozdíl trendů mezi oběma částmi povodí je pozorovatelný ve všech měsících, zejména v období prosinec–únor (v průměru cca 3.8 mm / desetiletí). V ročním chodu se největší pokles projevuje v červnu (cca 4.4 mm / desetiletí), téměř setrvalý stav lze pozorovat březnu. Největší vzestup srážek lze pozorovat v květnu (cca 17.2 mm / desetiletí), srpnu (cca 10.4 mm / desetiletí) a září (cca 9.4 mm / desetiletí) v průměru pro obě části povodí. Vývoje srážkových úhrnů jednotlivých měsíců byly vypracovány z období 1987–2015 (viz příloha F na straně 82). Stejný průběh lineárních trendů vykazuje i období 1962–2015, i když výsledky jsou do jisté míry zkresleny identickými údaji v období 1962–1987, poněvadž se jedná o data pocházející z datového gridu.



Obrázek 6.1: Trendy v průměrných ročních srážkových úhrnech pro jednotlivé meteorologické stanice v širším okolí povodí Hačky

Zdroj: autor

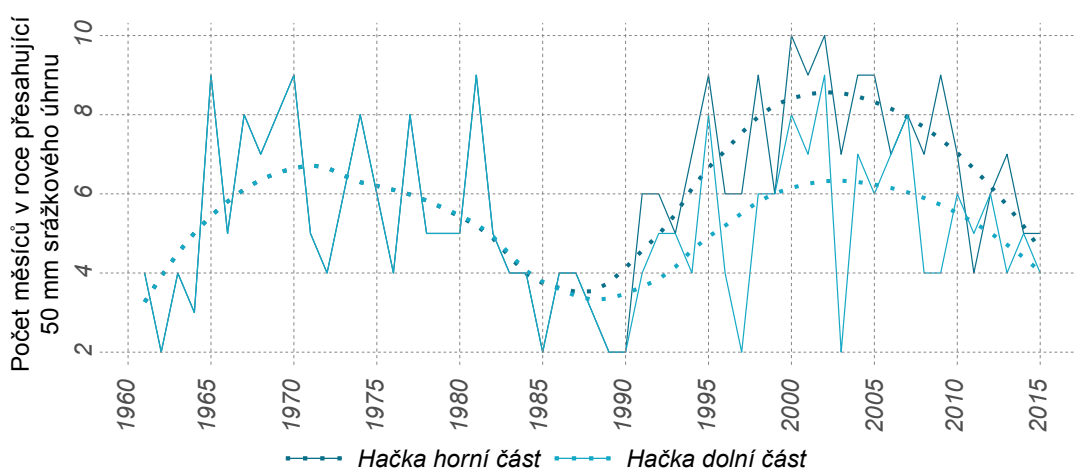
Průměrný roční úhrn srážek povodí Hačky z období 1961–1990 má hodnotu 623 mm a je tedy nižší než dlouhodobý srážkový normál 1961–1990 pro Českou republiku (674 mm). Roční úhrn srážek na ploše celého povodí má v průběhu období 1962–2015 (hydrologické roky) rostoucí trend s nárůstem cca 8.3 mm / desetiletí, respektive 44.9 mm za celé pozorované období (viz obrázek 6.2 na následující straně). Největší pokles je zaznamenán v období 1985–1990, kdy konkrétně v roce 1985 roční úhrn srážek poklesl až na hodnotu 298 mm. Největší úhrn srážek byl zaznamenán v roce 2002 a to 1059 mm / rok, což koresponduje s celorepublikovým nadstandardním úhrnem srážek spadlým v tomto roce, eskalujícím do následných povodní.



Obrázek 6.2: Roční srážkové úhrny v povodí Hačky

Zdroj: autor

Kromě změn v ročním úhrnu srážek je důležité pozorovat změny v intenzitě srážek, zejména proto, že srážky s nízkým úhrnem nedoplňují zásoby vody v povodí, poněvadž z velké části dochází k jejich odpaření. Jako identifikátor srážek s vyšším úhrnem byla vybrána hranice 50 mm / měsíc srážkového úhrnu. Z rozboru úhrnů srážek velikosti větších než 50 mm / měsíc vyplývá, že v průběhu období 1961–2015 má trend četnosti srážek této velikosti podobu sinusoidy s tím, že minimum bylo pozorováno zhruba v polovině sledovaného období, přibližně 1985–1990. Průběh tohoto trendu lze pozorovat na obrázku 6.3. Tento trend je znatelný i v údajích o měsíčních úhrnech srážek. Rozdílnost trendů v druhé polovině sledovaného období je dána přítomností reálných naměřených dat, oproti první polovině období, kde převažují data z gridu a tudíž je průběh grafů identický. Totožnost trendů je dána právě průměrováním hodnot uvnitř jednotlivých gridboxů (viz kapitola 3.3.3 na straně 21), kdy celé povodí Hačky reprezentuje pouze jedna hodnota srážkového úhrnu, nehledě na orografii a s ní spojenou větší srážkovou činnost pro horní část povodí. Inverzní analogie platí pro průměrné teploty vzduchu, které právě vlivem orografie vychází v horní části povodí menší.



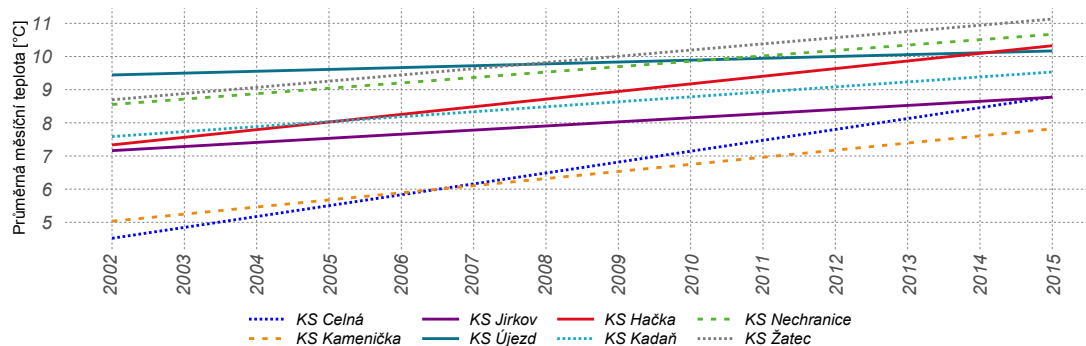
Obrázek 6.3: Trendy četnosti srážek větších než 50 mm / měsíc v povodí Hačky

Zdroj: autor

6.1.2 Identifikované trendy průměrných teplot vzduchu

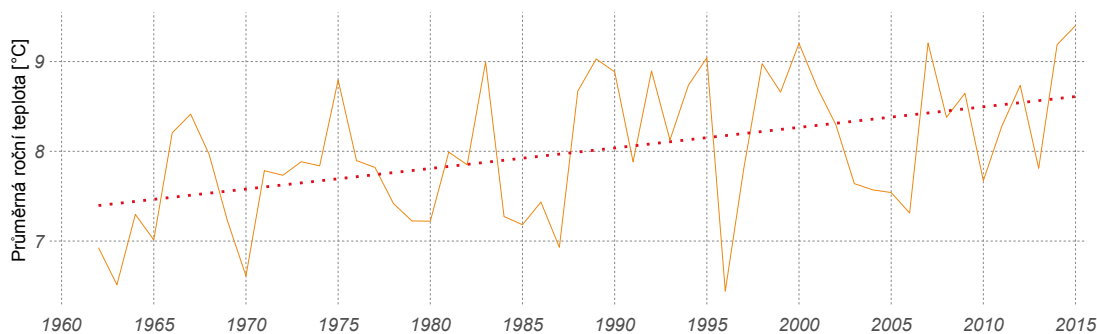
Lineární trend vzestupu teplot lze pozorovat u všech stanic, nejpodstatnější vzestup teploty lze pozorovat u KS Celná (cca $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ / desetiletí) a KS Kamenička (cca $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ / desetiletí), nejmenší změny doznává stanice KS Újezd, která je v průběhu let v podstatě konstantní. Teploty ze všech stanic byly konzistentní v průběhu celé pořízené řady, průběh jejich trendů od roku 2002–2015 (hydrologické roky) lze vidět na obrázku 6.4. Z grafu je zřejmé, že dolní část povodí je poměrně teplejší než horní část. V ročním chodu je pozorovatelný největší nárůst teploty v lednu a v červenci (oba cca $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ / desetiletí), v prosinci a v říjnu (oba cca $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ / desetiletí) a v dubnu (cca $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ / desetiletí). Pokles byl zaznamenán v únoru (cca $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ / desetiletí) a v květnu (cca $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ / desetiletí). Téměř setrvalý stav lze pozorovat pouze v červnu. Výsledky do jisté míry korelují s obdobím 1962–2015 i když je znatelné ovlivnění díky datům pocházejícím z gridu. Vývoje teplot jednotlivých měsíců byly vypracovány z období 2001–2015 (viz příloha G na straně 85).

Průměrná roční teplota vzduchu povodí Hačky z období 1961–1990 má hodnotu $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je mírně vyšší než dlouhodobý normál teploty vzduchu 1961–1990 pro Českou republiku ($7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Roční průměrná teplota vzduchu v povodí má v průběhu období 1962–2015 (hydrologické roky) rostoucí trend s nárůstem cca $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ / desetiletí, respektive $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ za celé pozorované období (viz obrázek 6.5). Největší pokles průměrné roční teploty je zaznamenán v roce 1996 s hodnotou $6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, naopak nejvyšší průměrná roční teplota $9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ byla zaznamenána v roce 2015, což koresponduje s údaji v kapitole 3.2 na straně 16.



Obrázek 6.4: Trendy v průměrných ročních teplotách vzduchu pro meteorologické stanice v širším okolí povodí Hačky

Zdroj: autor

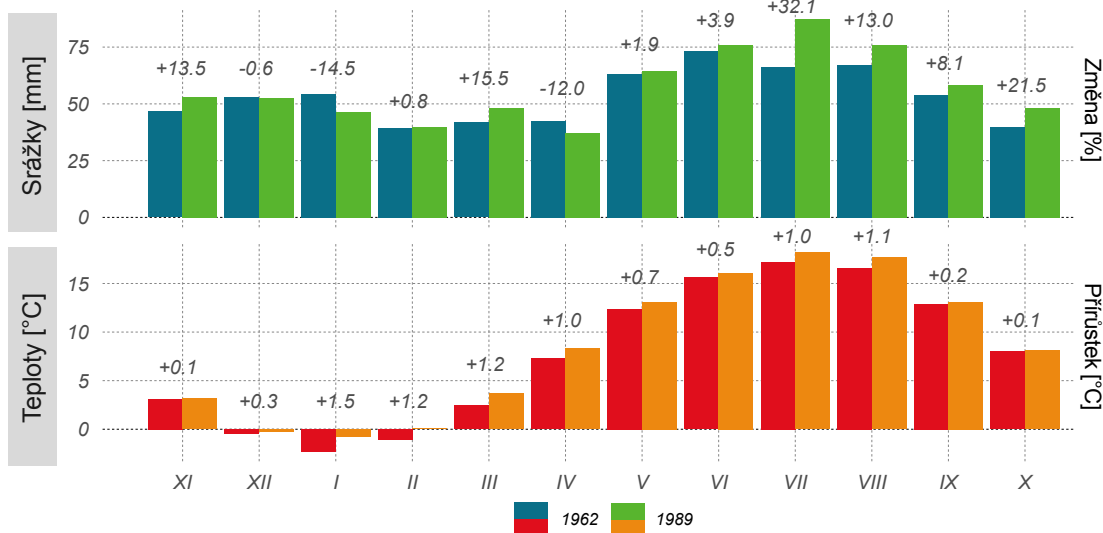


Obrázek 6.5: Průměrná roční teplota v povodí Hačky

Zdroj: autor

6.1.3 Identifikované změny meteorologických veličin během sledovaného období

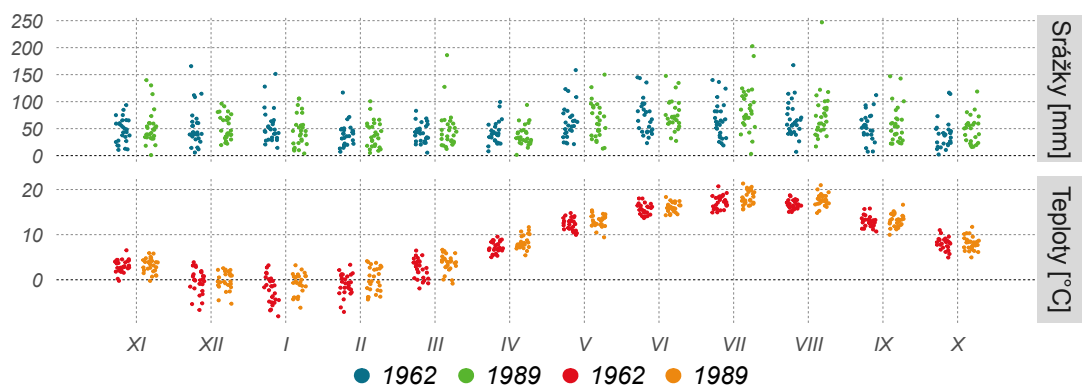
Pro možnost stanovení změn během sledovaného období 1962–2015 (hydrologické roky) bylo toto období rozděleno na dva stejně dlouhé úseky, 1962–1988 a 1989–2015. V těchto časových úsecích byly následně lokalizovány změny v měsíčních srážkových úhrnech a průměrných měsíčních teplotách vzduchu na základě průměrování jednotlivých veličin dle jednotlivých měsíců. Jak vyplývá z grafu na obrázku 6.6, navýšení měsíčního srážkového úhrnu lze pozorovat zejména v letním až podzimním období. Největší nárůst lze pozorovat v červenci (cca 32 %), který je však podstatně ovlivněn jednou hodnotou, a to rokem 2002, totéž platí pro nárůst srážkového úhrnu v březnu, který je ovlivněn nadměrnými srážkami v letech 2000–2001 (viz obrázek 6.7 na následující straně). Relevantní nárůst srážkové činnosti byl zaznamenán v závěru letního a v první polovině podzimního období. Začátek zimního období je naopak charakterizován spíše poklesem srážkových úhrnů, dominantně v lednu (cca 15 %). Pokles byl rovněž zaznamenán v dubnu (12 %). Navýšení průměrné měsíční teploty vzduchu lze pozorovat v průběhu celého roku, zejména však v zimním období (především leden +1.5 °C). Poměrně velký nárůst teploty vykazují i měsíce červen a červenec (cca +1 °C). Podzimní období vykazuje stagnaci.



Obrázek 6.6: Změny meteorologických veličin během pozorovaného období v povodí Hačky

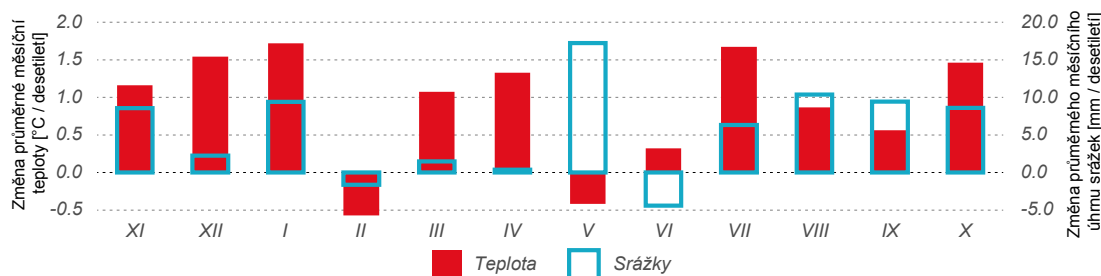
Zdroj: autor

Při porovnání lineárních trendů srážkových úhrnů v kapitole 6.1.1 na straně 43 a průměrných teplot vzduchu v kapitole 6.1.2 na předchozí straně v průběhu roku, lze konstatovat, že zvýšený územní výpar zapříčiněný zvýšením teploty je z větší části roku do jisté míry kompenzován nárůstem srážkové činnosti. Tento fakt lze vidět na obrázku 6.8 na následující straně. K významné kompenzaci nárůstu teploty dochází v období od června do listopadu a také v lednu. V období od března do června a prosinec v případě dolní části povodí se lineární trendy teplot a srážek mírně rozcházejí, nicméně v průměru pro obě části povodí spolu obě veličiny víceméně korespondují.



Obrázek 6.7: Porovnání průměrných měsíčních teplot vzduchu a srážkových úhrnů z období 1962–1988 a 1989–2015 v povodí Hačky

Zdroj: autor

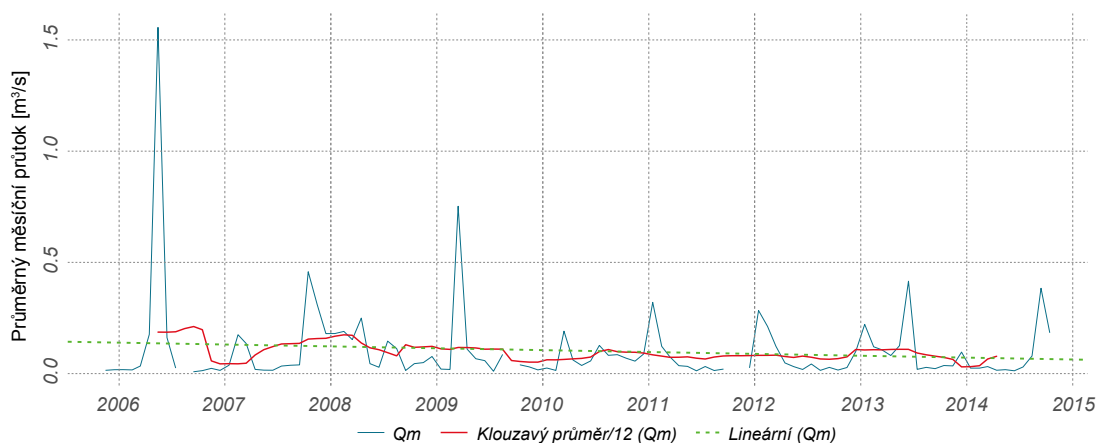


Obrázek 6.8: Kompenzace nárůstu teploty vzduchu nárůstem srážkové činnosti

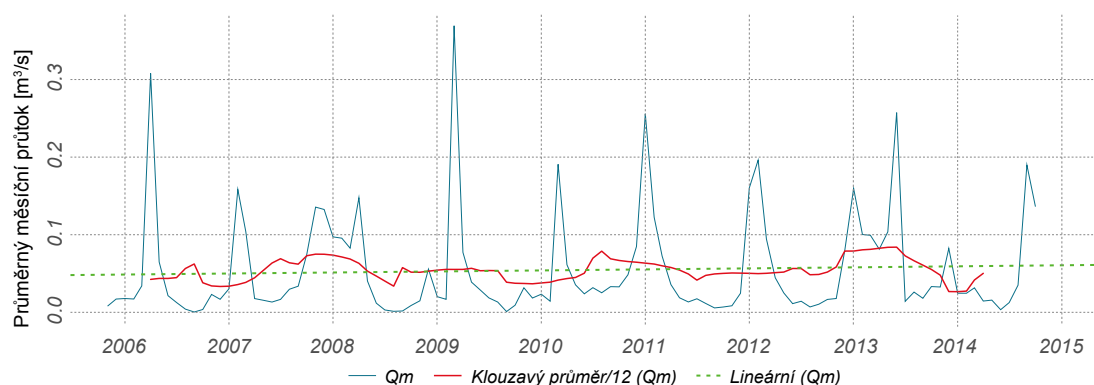
Zdroj: autor

6.1.4 Identifikované trendy v údajích o průměrných průtocích

Při porovnání naměřených průměrných měsíčních průtoků Hačky na obrázku 6.9 na následující straně s průtoky rekonstruovanými na obrázku 6.10 na následující straně (dle metodiky v kapitole 5.2.2 na straně 37) lze pozorovat klesající trend v průběhu naměřených průtoků a naopak zvyšující se trend v rekonstruované řadě průtoků. Možným vysvětlením tohoto úkazu může být v průběhu let klesající intenzita a objem dotace z odlehčení PKP (zejména velkých průtoků při povodňových stavech), ke kterému dochází při průtocích větších, než je průtočné množství shybky PKP provádějící vodu pod Hačkou. Následující charakteristiky tedy pojednávají o rekonstruované řadě průtoků. Největší pokles v průtocích byl zaznamenán zejména v dubnu (cca 34.2 l/s / rok) následně v březnu (cca 22.6 l/s / rok). Mírný klesající trend byl pozorován i v listopadu (cca 1.7 l/s / rok). Ostatní měsíce vykazovaly rostoucí trend a to zejména leden (cca 17.1 l/s / rok), únor (cca 15.6 l/s / rok) a září (cca 14.9 l/s / rok). V tabulce 6.1 na straně 49 lze vidět základní statistické hodnoty pozorovaných a rekonstruovaných průtoků v denním a měsíčním kroku. Jak lze vidět u pozorované denní řady průtoků, není minimální průtok nulový. Pravděpodobným vysvětlením je fakt, že limnigraf hodnotu nulového průtoků nevypisuje do souboru, tudíž je hodnota označena jako neměřená. S touto skutečností však nemohlo být kalkulováno ve všech případech chybějících hodnot, aby nedošlo k ovlivnění statistického souboru dat průtoků a proto s chybějícími hodnotami nebylo počítáno.



Obrázek 6.9: Měsíční naměřené průtoky Hačky, klouzavý průměr (12 měsíců) a lineární trend
Zdroj: autor



Obrázek 6.10: Měsíční rekonstruované průtoky Hačky, klouzavý průměr (12 měsíců) a lineární trend

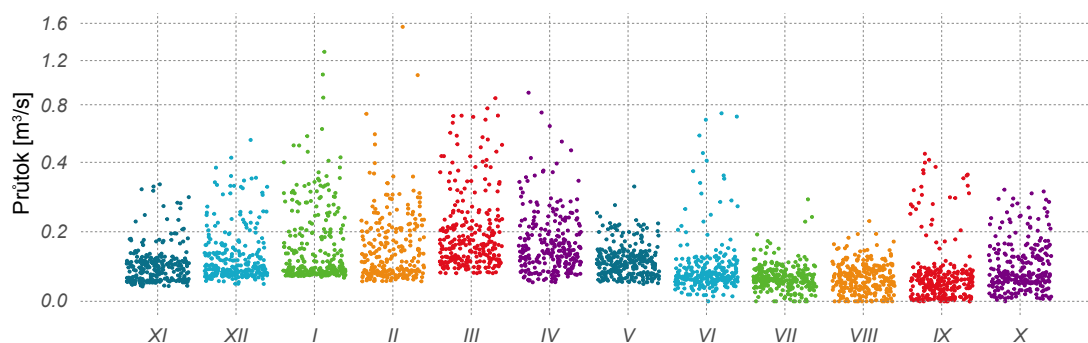
Zdroj: autor

Jak vyplývá z tabulky 6.2 na následující straně, největší průtoky v Hačce jsou pozorovatelné zejména v zimním až časně jarním období, s největšími průtoky v měsíci březnu. Naopak nejušším obdobím v ročním cyklu je léto, zejména měsíce červen a červenec. V tomto období už bylo v průběhu let několikrát pozorováno úplné vyschnutí tohoto vodního toku, poslední zaznamenaný případ je v roce 2015, kdy vysoké teploty v kombinaci s nedostatečnou srážkovou činností vyvolaly tento fenomén. Z pohledu proměnlivosti denních průtoků v jednotlivých měsících byla zaznamenána největší proměnlivost v zimním období. Letní období vykazuje naopak poměrně konzistentní průtoky, zpravidla malé (viz obrázek 6.11 na následující straně). Možným vysvětlením velké proměnlivosti zimních průtoků je skutečnost, že povodí v tomto období bývá zpravidla nasyceno a tudíž odtoková odezva na srážku je poměrně větší než by byla odtoková odezva v období letním na srážku stejné velikosti, kdy je povodí nenasyčené a kdy je velká část objemu srážky, ne-li celý objem spotřebován na nasycení povodí a odtok je tudíž realizován základním odtokem.

Tabulka 6.1: Základní statistické hodnoty pozorovaných a rekonstruovaných průtoků Hačky ve sledovaném období

Řada [l/s]	Min	25% percentil	Medián	Průměr	75% percentil	Max
Pozorovaná denní	1.10	17.90	36.20	112.00	94.00	2090.00
Rekonstruovaná denní	0.00	10.80	21.50	54.70	51.80	1560.00
Pozorovaná měsíční	8.30	21.70	39.20	102.60	121.00	1557.00
Rekonstruovaná měsíční	0.40	14.50	25.10	54.50	77.90	369.30

Zdroj: autor



Obrázek 6.11: Velikost průměrných denních průtoků Hačky ve sledovaném období dle jednotlivých měsíců

Zdroj: autor

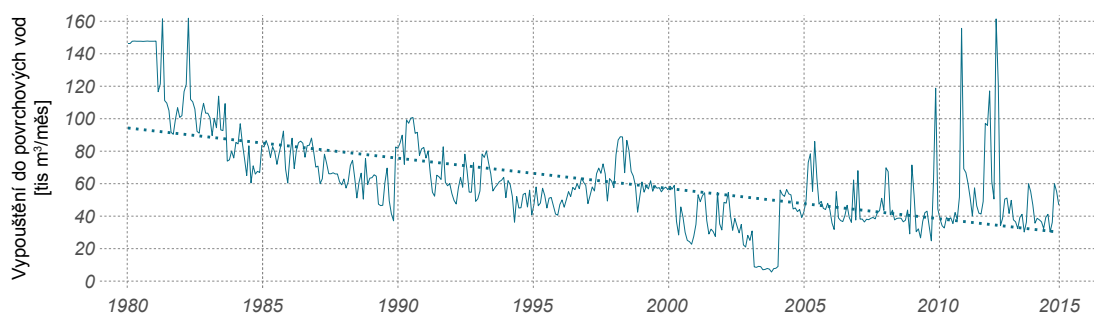
Tabulka 6.2: Průměrné měsíční průtoky Hačky ve sledovaném období dle jednotlivých měsíců

Měsíc	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Průtok [l/s]	34.06	56.49	91.92	84.3	124.72	86.92	39.64	39.57	15.18	15.66	33.15	35.63

Zdroj: autor

6.1.5 Identifikované trendy v údajích o užívání vod

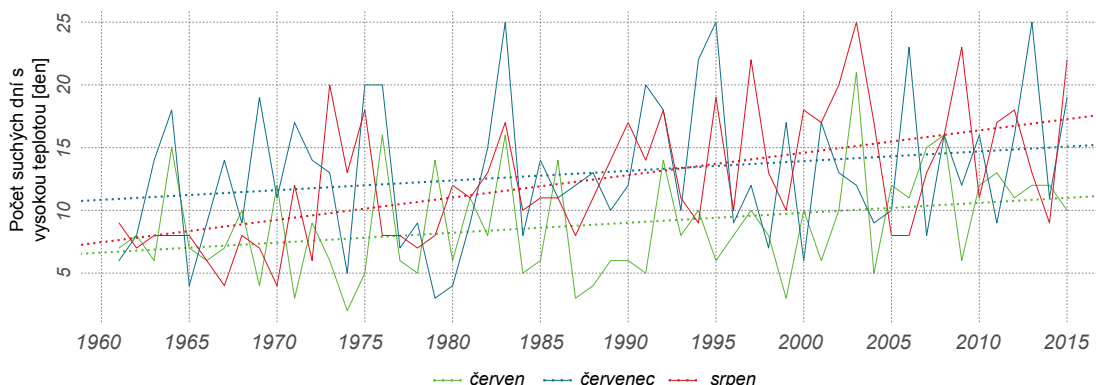
Z údajů o užívání vod vyplývá, že trend vypouštění do povrchových vod v povodí Hačky s občasnými výkyvy kontinuálně klesá tempem cca 206 tisíc m³ / desetiletí. Tento trend lze pozorovat na obrázku 6.12 na následující straně. Obecně k nejintenzivnějšímu vypouštění dochází sestupně v lednu (cca 71.0 tisíc m³ / měsíc), březnu (cca 70.8 tisíc m³ / měsíc) a únoru (cca 67.3 tisíc m³ / měsíc), naopak k nejmenší dotaci z vypouštění dochází vzestupně v červenci (cca 59.4 tisíc m³ / měsíc), září (cca 60.0 tisíc m³ / měsíc) a srpnu (cca 61.1 tisíc m³ / měsíc). Největší pokles ve vypouštění lze pozorovat v březnu (cca 23.8 tisíc m³ / desetiletí), v listopadu (cca 21.7 tisíc m³ / desetiletí) a červenci (cca 21.3 tisíc m³ / desetiletí). Současnými producenty vypouštěných vod jsou Bent Holding a.s. Chomutov ČOV, Severočeské doly a.s. ČDV, Věžeňská služba ČR - věznice Všehrady ČOV a Obec Droužkovice ČOV.



Obrázek 6.12: Vypouštění do povrchových vod v povodí Hačky

Zdroj: autor

Za účelem co možná nejpřesnějšího odhadu chování odběratelů povrchové vody v povodí Hačky a také k formulaci co možná nejvýstižnějších scénářů odběru povrchové vody byly identifikovány bezdeštné¹⁵ dny s vysokou teplotou¹⁶ v období červen–srpen¹⁷, ve kterých byl uvažován nejintenzivnější odběr z vodního toku pro zavlažování. Jak vyplývá z grafu na obrázku 6.13, počet suchých dní s vysokou teplotou v průběhu let roste. Největší nárůst byl pozorován v srpnu (cca 2 dny / desetiletí), přičemž nárůst v červnu a červenci je srovnatelný (cca 1 den / desetiletí).



Obrázek 6.13: Počet bezdeštných dní s vysokou teplotou v období červen–srpen

Zdroj: autor

6.2 Výsledky úprav meteorologických dat dle použitých RCM

Z úpravy meteorologických dat vyplývá, že neoptimističtější scénářem pro srážkovou činnost v rámci obou výhledových období je EH5, naopak nepesimističtější scénářem je ARP. Největší teplotní přírůstek je predikován modelem Q0 pro obě výhledová období. Průměrné procentuální změny srážkových úhrnů a průměrné přírůstky pro jednotlivá výhledová období dle použitých klimatických modelů lze vidět v tabulce 6.3 na následující straně.

¹⁵ uvažovaný denní srážkový úhrn menší než 2 mm

¹⁶ uvažovaná průměrná denní teplota větší než 17°C

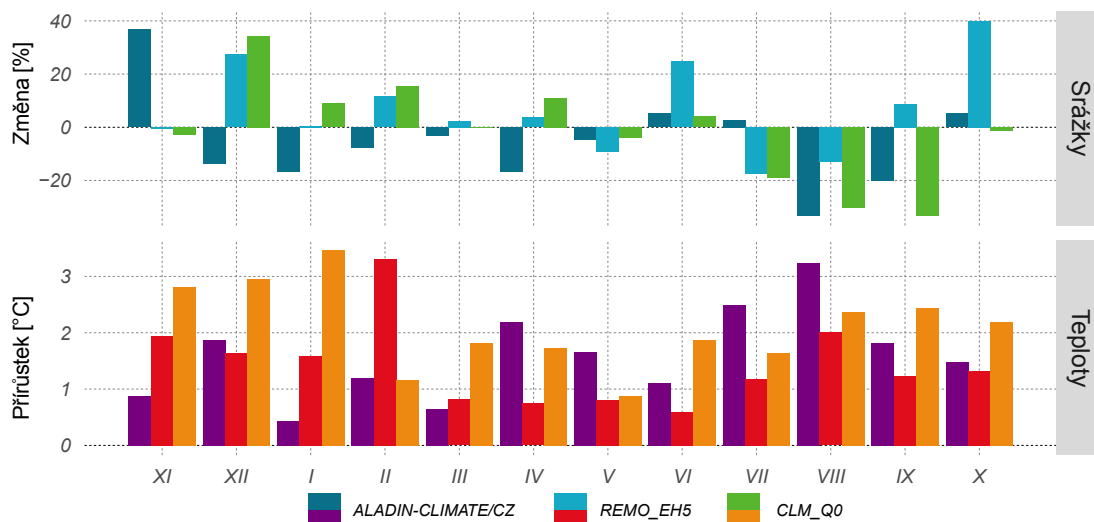
¹⁷ uvažované období dle vláhové potřeby zemědělských plodin v mm ovzdušných srážek (ideální srážky) při teplotním normálu vzduchu podle F. Klatta pro středně těžké půdy, (Kulík – Křovák, 1988)

Tabulka 6.3: Přehled průměrných změn meteorologických veličin dle použitých modelů

Období	Veličina	ALADIN – CLIMATE/CZ	REMO_EH5	CLM_Q0
2035–2065	Srážky [%]	- 5.50	+ 6.60	- 1.40
	Teploty [°C]	+ 1.60	+ 1.40	+ 2.10
2068–2098	Srážky [%]	- 4.20	+ 16.30	+ 3.80
	Teploty [°C]	+ 2.70	+ 2.60	+ 3.00

Zdroj: autor

Pro výhledové období 2035–2065 předpovídají všechny použité modely největší pokles srážkové činnosti v letním období (dominantně v srpnu až -30 %), naopak největší nárůst je predikován v podzimním období. Podle užitých modelů lze pozorovat největší nárůst teploty v letních měsících, na druhou stranu nejmenší přírůstek je pozorovatelný na jaře. Model Q0 predikuje podstatný nárůst teploty i v podzimním a zimním období, respektive v lednu (až +3.5 °C). Výše zmíněné údaje pro výhledové období 2035–2065 lze vidět na obrázku 6.14.



Obrázek 6.14: Identifikované změny meteorologických veličin v jednotlivých měsících mezi obdobími 1984–2014 a 2035–2065

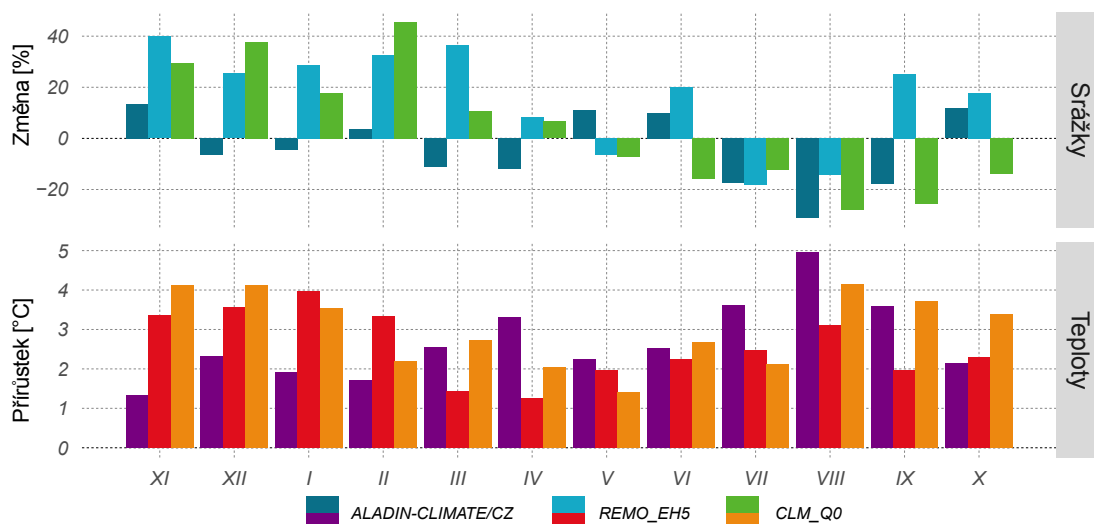
Zdroj: autor

Pro výhledové období 2068–2098 předpovídají použité modely největší nárůst srážkové činnosti v podzimním a zimním období (hlavně v únoru až +45 %), naopak pokles lze pozorovat v období letním (hlavně v srpnu až -31 %). Pro přírůstek teplot v tomto výhledovém období platí, stejný trend jako pro výhledové období 2035–2065, s tím rozdílem, že teploty jsou mírně navýšeny a výsledky z užitých modelů jsou poměrně více konzistentní. Tyto údaje pro výhledové období 2068–2098 lze pozorovat na obrázku 6.15 na následující straně.

Z analýzy měsíčních srážkových úhrnů modelovaných dle použitých scénářů vychází, že dle modelu EH5 výskyt měsíčních srážkových úhrnů větších než 50 mm vzroste v obou výhledových obdobích. V období 2035–2065 až o 7.4 % u horní části povodí, v období 2068–2098 až o 18.8 % u téhož. Dle modelu ARP dojde k poklesu výskytu srážek větších než 50 mm / měsíc o zhruba 7 % v obou výhledových obdobích u obou povodí. Model Q0 predikuje pokles výskytu srážek

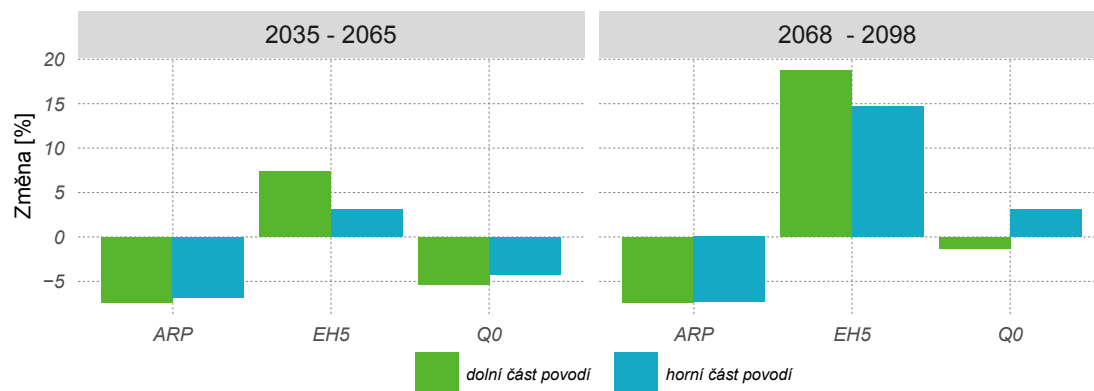
větších než 50 mm / měsíc v období 2035–2065 až o 5.4%. V období 2068–2098 předpovídá mírný pokles (1.3%) v horní části povodí a mírný nárůst v části dolní (3.1%). Zmiňované hodnoty znázorňuje obrázek 6.16.

Při porovnání ročních srážkových úhrnů a průměrných ročních teplot z kontrolního období s ročními srážkovými úhrny a průměrnými ročními teplotami projektovanými dle scénářů použitých klimatických modelů lze konstatovat následující. Při uvážení průměrné měsíční srážky z kontrolního období (cca 55 mm) nejsou očekávány výrazné změny ve srážkové činnosti ani v jednom z výhledových období. Největší nárůst srážkové činnosti predikuje model ARP pro výhledové období 2035–2065 (9.3%), naopak největší pokles byl zaznamenán pro výhledové období 2068–2098 modelem EH5 (8.1%). Výrazných změn však doznávají projektované průměrné roční teploty, přičemž pro první výhledové období je předpovídán přírůstek v průměru zhruba 1.7°C, pro druhé výhledové období v průměru zhruba 2.8°C. Zmíněné změny jsou průměrnými hodnotami změn z obou částí povodí a lze je pozorovat na obrázku 6.17 na následující straně.



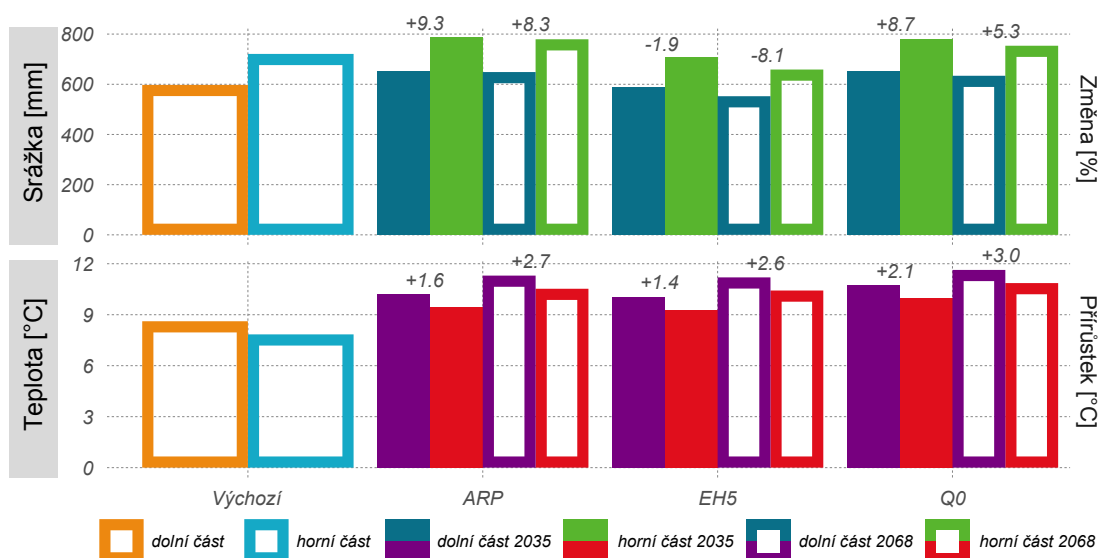
Obrázek 6.15: Identifikované změny meteorologických veličin v jednotlivých měsících mezi obdobími 1984–2014 a 2068–2098

Zdroj: autor



Obrázek 6.16: Identifikované změny ve výskytu měsíčních srážkových úhrnů větších než 50 mm

Zdroj: autor



Obrázek 6.17: Změny v ročních srážkových úhrnech a ročních průměrných teplotách v povodí Hačky

Zdroj: autor

6.3 Relativní změny odtoků z povodí Hačky vlivem změny klimatu

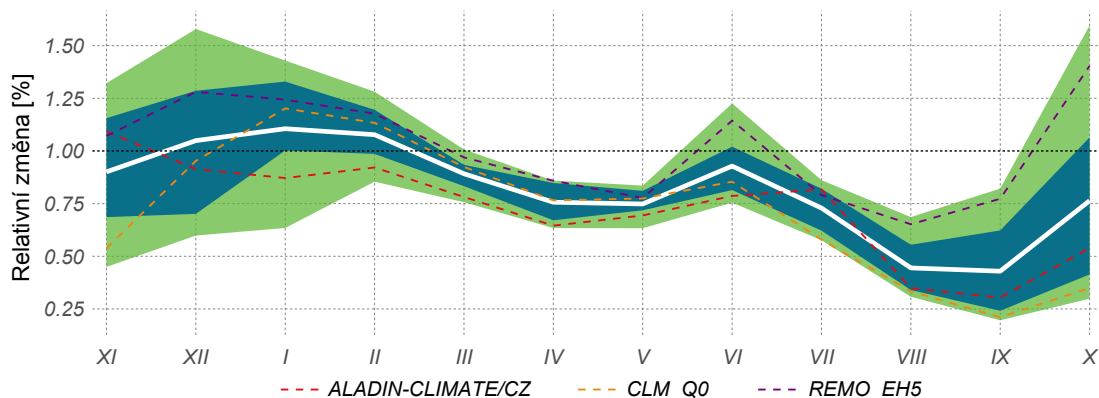
Jak již bylo zmíněno, pro odhad dopadu změny klimatu na hydrologický režim povodí Hačky byly využity jednoduché přírůstkové scénáře změny teploty a srážek (viz kapitola 5.5 na straně 40). Hydrologický model Bilan byl nakalibrován na pozorovaná data povodí Hačky. Následně byla modelována hydrologická bilance pro pozorované podmínky a pro podmínky ovlivněné změnou klimatu. Byly analyzovány změny mezi obdobími 1984–2014 (kontrolní období) a 2035–2065 a 2068–2098. Protože každá projekce odtoku se odvíjí od daného scénáře použitého modelu, jsou projekce změn definovány rozpětími. Rozpětí projekcí změn odtoku dle použitých modelů jsou znázorněny na obrázcích 6.18 a 6.19 na následující straně a obrázcích 6.20 a 6.21 na straně 55. Grafy udávají relativní změny, tedy podíl odtoku ve scénářovém období ku odtoku pro kontrolní období, pro jednotlivé měsíce roku. V oblasti ohraničené světle zeleným polygonem leží relativní změny dle všech užitých regionálních klimatických modelů a také dle všech variantních řešení výpočtu¹⁸, v oblasti ohraničené tmavě zelenou barvou leží projekce v mezikvartilovém rozpětí¹⁹, čárkované, čerchované a tečkované linie značí průměrné hodnoty²⁰ jednotlivých použitých modelů a bílá čára odpovídá průměrné změně v souboru všech použitých modelů. Na odtocích je dobře patrná větší nejistota zvýšení zimního odtoku, naproti tomu letní snížení lze konstatovat s podstatně větší jistotou.

¹⁸ v případě horní části povodí – kalibrace modelu na data z povodí Hutné, v případě dolní části povodí – všechny použité scénáře odběru povrchové vody

¹⁹ $Q_{75}-Q_{25}$

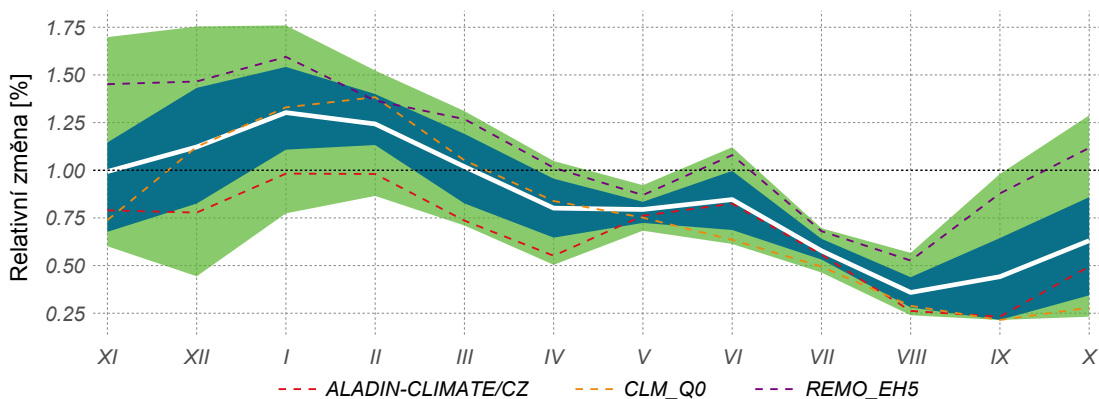
²⁰ viz pozn. 18

Z obrázků 6.18 a 6.19 je patrné, že zvýšení podzimního a zimního odtoku z horní části povodí je sice predikováno v období 2035–2065 nižší než v období 2068–2098, ale za to s větší jistotou. Zajímavým úkazem je rozdělení klesajícího trendu na dvě samostatné větve červnovým obdobím, kdy je klesající trend jarních odtoků mírně navýšen v tomto období a následně se pokles ještě více prohlubuje v období letním. Lze konstatovat, že jarní pokles v období 2035–2065 je predikován s poměrně velkou jistotou. Letní snížení odtoků je pro obě období predikováno s přibližně stejnou jistotou.



Obrázek 6.18: Podíl odtoku ve scénářovém období 2035–2065 ku odtoku v kontrolním období – horní část povodí Hačky

Zdroj: autor

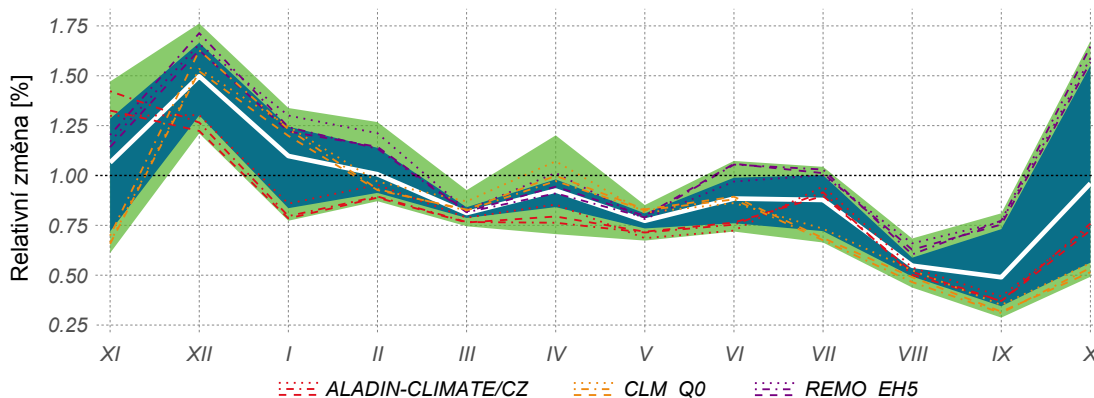


Obrázek 6.19: Podíl odtoku ve scénářovém období 2068–2098 ku odtoku v kontrolním období – horní část povodí Hačky

Zdroj: autor

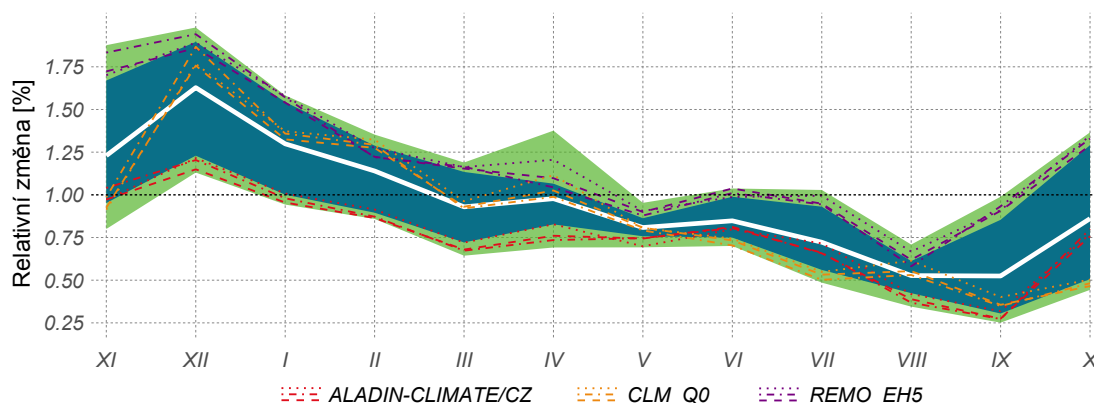
Jak lze vidět na obrázcích 6.20 a 6.21 na následující straně, nižší, zároveň však spolehlivější navýšení odtoků z dolní části povodí lze očekávat v období 2035–2065. Nicméně, stejně tak, jako tomu bylo v případě horní části povodí, v období 2068–2098 by mohlo navýšení odtoků trvat déle, dle odhadů některých modelů až do období konce zimy. Od jarního období trend relativní změny odtoků klesá s mírnými navýšeními v dubnu (dle Q0), červnu a červenci (dle EH5), přičemž největší pokles je zřejmý v období srpen–září pro oba výhledové úseky.

Z provedených porovnání je obecně možné konstatovat, že poklesy průtoků (i časově omezeného charakteru) jsou předpovídány s větší jistotou nežli jejich nárůsty. Pokles průtoků je tedy predikován v jarním a zejména letním období dle všech použitých scénářů klimatických modelů, ve zbytku roku je předpovídán jeho nárůst.



Obrázek 6.20: Podíl odtoku ve scénářovém období 2035–2065 ku odtoku v kontrolním období – dolní část povodí Hačky

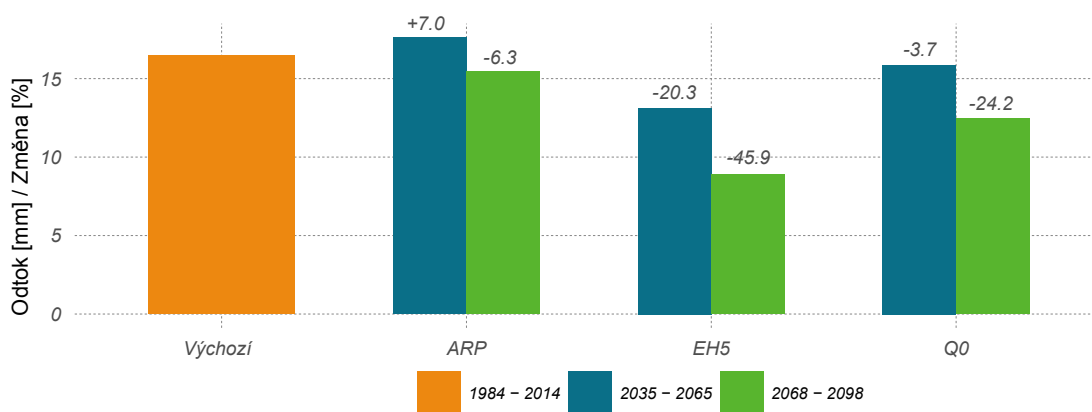
Zdroj: autor



Obrázek 6.21: Podíl odtoku ve scénářovém období 2068–2098 ku odtoku v kontrolním období – dolní část povodí Hačky

Zdroj: autor

Z porovnání průměrného ročního odtoku pozorovaného souhrnně z celého povodí s průměrnými ročními odtoky pro výhledová období, modelovanými dle scénářů použitých modelů vyplývá, že dle všech užitých modelů lze očekávat pokles průměrných ročních odtoků pro výhledové období 2035–2065 průměrně o 5.7 %, pro výhledové období 2068–2098 průměrně dle všech modelů o 25.5 %. Na obrázku 6.22 na následující straně lze vidět hodnotu pozorovaného průměrného ročního odtoku z povodí Hačky a procentuální změnu průměrných ročních odtoků modelovaných dle scénářů použitých modelů. Největší pokles předpovídá model EH5 (až 45.9 % pro období 2068–2098), naopak nejmenší pokles predikuje model Q0 (3.7 %). Model ARP pro období 2035–2065 předpovídá dokonce nárůst průměrného ročního odtoku o 7 %.



Obrázek 6.22: Porovnání průměrného ročního odtoku pozorovaného s ročními odtoky scénářovými z povodí Hačky

Zdroj: autor

V příloze H na straně 88 je znázorněno srovnání průměrných měsíčních odtoků z horní části povodí pro kontrolní období 1984–2014 s průměrnými měsíčními odtoky pro výhledová období 2035–2065 a 2068–2098. Jak je patrné, dle kalibrace na Hutnou vycházejí odtoky poněkud nadhodnocené oproti kalibraci na horní část povodí Hačky. Největší odchylka v hodnotách odtoku mezi projekcemi dle těchto dvou kalibrací modelu je pozorovatelná v podzimním a zimním období. Odchylky v hodnotách odtoku mezi projekcemi dle jednotlivých kalibrací na scénáře odběru povrchové vody v dolní části povodí jsou podstatně menší a vyrovnanější, nicméně rozdíly mezi projekcemi dle použitých klimatických modelů vykazují podstatnější změny (viz příloha CH na straně 89).

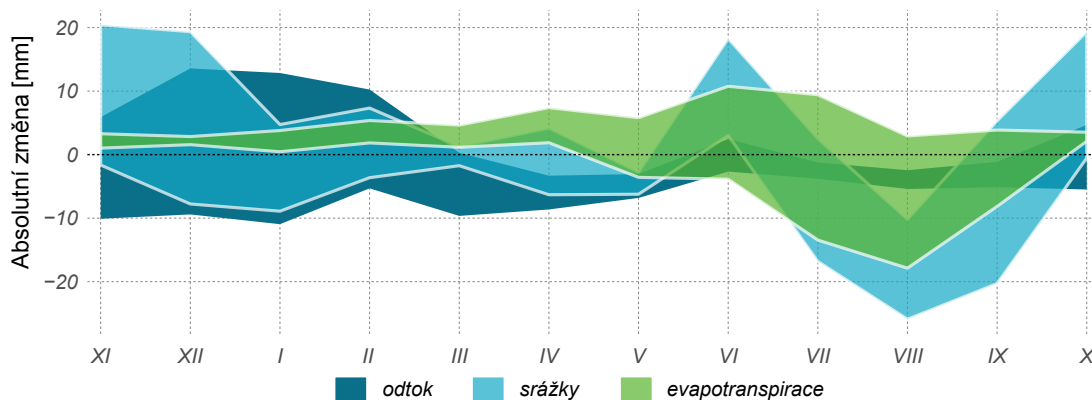
6.4 Změny hydrologické bilance povodí Hačky vlivem změny klimatu

Za účelem popisu principu změn hydrologické bilance byly zjištěny absolutní změny třech základních složek hydrologické bilance, a to odtoku, srážek a evapotranspirace. Změny základních složek hydrologické bilance lze vidět na obrázcích 6.23 a 6.24 na následující straně a obrázcích 6.25 a 6.26 na straně 58. Polygony ohraničují oblast, v níž leží veškeré změny ze souboru použitých regionálních klimatických modelů.

V horní části povodí ve výhledovém období 2035–2065 (viz obrázek 6.23 na následující straně) lze pozorovat nárůst srážkové činnosti v období od začátku podzimu do začátku léta s poměrně malým přírůstkem v zimním období a mírným poklesem na jaře. Navýšení srážkové činnosti bude doprovázeno nárůstem územního výparu, který bude zapříčiněn růstem teploty. V letním období lze očekávat pokles srážek spolu s poklesem odtoku. V důsledku úbytku zásob vody v povodí však zvyšování teploty nepovede k výraznému zvyšování územního výparu. Různí se predikce podzimního a zejména zimního odtoku²¹ je zapříčiněna různou prognózou doby tání sněhu v povodí. Vlivem rostoucí teploty je předpokládán posun doby tání sněhu z období března–dubna na období leden–únor. Pokles odtoku je předpovídán nejen v letním období, ale také v jarním období.

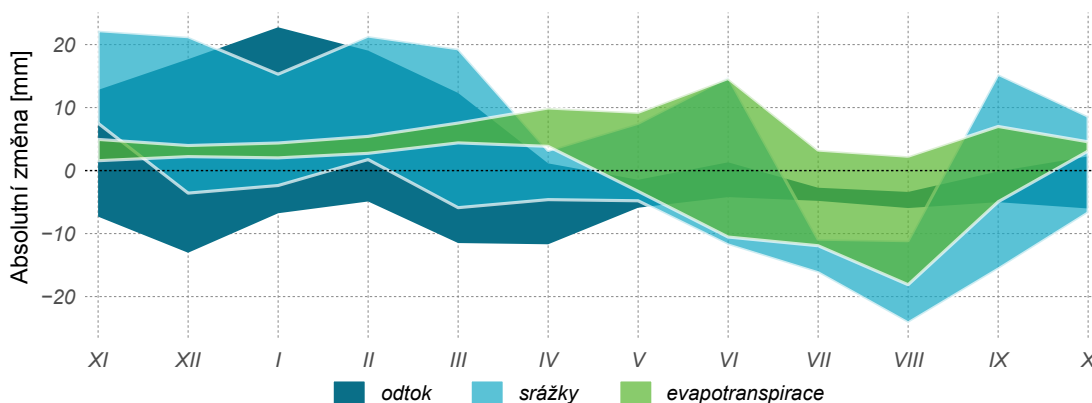
²¹tato rozdílnost může být dána rozdílnými parametry modelu, právě z lišící se kalibrace na povodí Hačky a Hutné

Přibližně stejné změny hydrologické bilance jsou pozorovatelné i v období 2068–2098 (viz obrázek 6.24). V období února–března lze pozorovat, oproti období 2035–2065, dosti podstatný nárůst srážkové činnosti, který má za následek navýšení odtoku v tomto období. S větší jistotou je předpokládán pokles srážkové činnosti v letním období. Nicméně stejná nejistota navýšení zimního odtoku platí i pro výhledové období 2068–2098.



Obrázek 6.23: Změna základních složek hydrologické bilance ve výhledovém období 2035–2065 – horní část povodí Hačky

Zdroj: autor



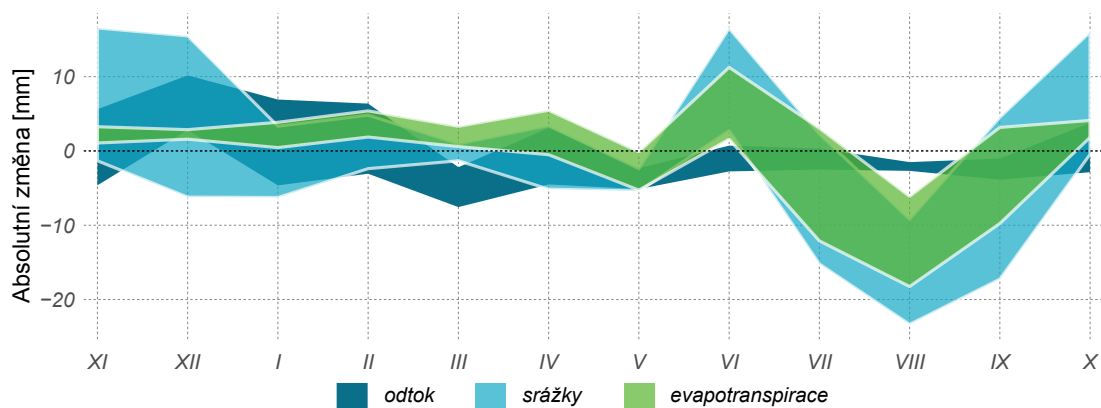
Obrázek 6.24: Změna základních složek hydrologické bilance ve výhledovém období 2068–2098 – horní část povodí Hačky

Zdroj: autor

V dolní části povodí ve výhledovém období 2035–2065 (viz obrázek 6.25 na následující straně) lze pozorovat relativně více konzistentní předpověď změn základních složek hydrologické bilance, respektive relativně větší jistotu v navýšení podzimního a zejména zimního odtoku²². Podstatně jistější je i pokles územního výparu v letním období vlivem nedostatečné zásoby vody v povodí, který koresponduje s poklesem srážkové činnosti v tomto období. Stejně tak jako v případě horní části povodí dochází k poklesu jarního odtoku a také k očekávanému poklesu odtoku v období letním.

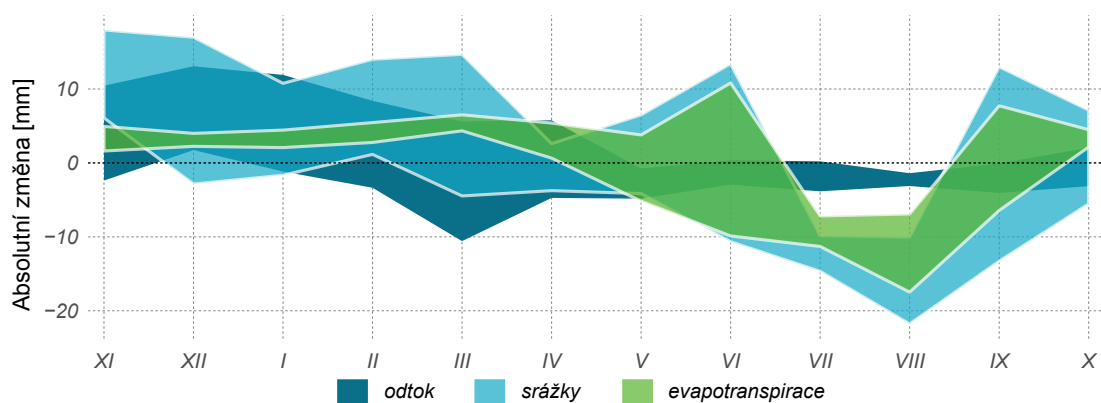
²²větší jistota v předpovědi změn základních složek hydrologické bilance je pravděpodobně dána kalibrací modelu pouze na data z dolní části povodí Hačky

Velmi podobné změny hydrologické bilance v dolní části povodí lze očekávat i v období 2068–2098 (viz obrázek 6.26). Stejně tak, jako tomu bylo v případě horní části povodí, lze v období února–března pozorovat, oproti období 2035–2065, podstatný nárůst srážkové činnosti, který má za následek navýšení odtoku v tomto období, naopak stejný trend platí pro pokles jarního a letního odtoku. Větší jistota panuje také v poklesu srážkové činnosti v letním období.



Obrázek 6.25: Změna základních složek hydrologické bilance ve výhledovém období 2035–2065 – dolní část povodí Hačky

Zdroj: autor



Obrázek 6.26: Změna základních složek hydrologické bilance ve výhledovém období 2068–2098 – dolní část povodí Hačky

Zdroj: autor

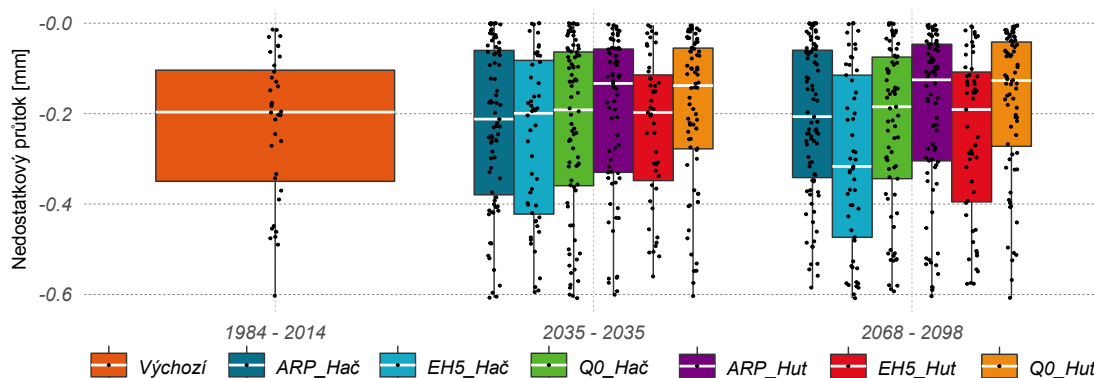
Prakticky ke stejným závěrům dojdeme při pohledu na krabicové grafy pro horní část povodí v příloze I na straně 90 a pro dolní část povodí v příloze J na straně 92. V těchto přílohách jsou porovnány krabicové grafy průměrných měsíčních odtoků modelovaných pro výhledová období 2035–2065 a 2068–2098 dle výstupů použitých klimatických modelů, s průměrnými měsíčními odtoky modelovanými pro kontrolní období 1984–2014 (vždy na prvním místě nejvíce vlevo). Je možné pozorovat největší navýšení zimních odtoků dle klimatických modelů Q0 a EH5 pro obě výhledová období pro obě části povodí. Naopak dle modelu ARP je předpovídán spíše mírný pokles těchto odtoků. Všechny modely se shodují na jarním a zejména letním poklesu odtoku.

Při porovnání tvarů polygonů jednotlivých složek hydrologické bilance (viz obrázky 6.23 a 6.24 na straně 57 a obrázky 6.25 a 6.26 na předchozí straně) pro identická výhledová období z obou částí povodí Hačky je patrné, že jejich tvary jsou téměř totožné. Lze také konstatovat, že distribuce absolutních změn pro dolní část povodí vykazuje užší rozptyl a tudíž i větší jistotu oproti absolutním změnám v horní části povodí. Tudíž přenesení parametrů z nakalibrovaného modelu pro povodí Hutné na data z povodí Hačky vneslo do odhadu změn hydrologické bilance spíše určitou míru nejistoty.

6.5 Odhad výskytu nedostatkových objemů

Jednou z hlavních motivací této práce byl fakt, že v povodí vodního toku Hačka trend velikosti průtoku v pozorovaném období kontinuálně klesá a už několikrát v průběhu let bylo zaznamenáno úplné vyschnutí tohoto toku. Z důvodu vodohospodářského plánování byly pro výhledová období identifikovány nedostatkové objemy, které jsou jedním z hlavních kritérií pro vyhodnocení hydrologického deficitu. Pro stanovení nedostatkových objemů se používají v praxi různé prahové hodnoty, bývají to zpravidla kvantily průměrného ročního průtoku $Q_{80\%}$, $Q_{90\%}$ nebo m-denní průtoky např. Q_{330} , Q_{355} nebo Q_{364} případně jiné prahové hodnoty.

V rámci této práce byl použit kvantil $Q_{90\%}$ průměrného měsíčního průtoku. Na základě velikosti této prahové hodnoty byly identifikovány průtoky, modelované dle použitých scénářů a jejich variant, o velikosti menší než byla tato prahová hodnota. Jak lze vidět na obrázku 6.27, zvýšení četnosti výskytu²³ nedostatkových průtoků (zejména těch malých) v horní části povodí je predikováno dle projekcí všech použitých modelů, u některých až dvojnásobné. Rozložení velikostí nedostatkových průtoků dle kalibrace na horní část povodí Hačky pro období 2035–2065 je velmi podobné výchozímu období, s mírným výskytem větších nedostatkových průtoků dle modelu EH5. Dle kalibrace na povodí Hutné vychází objemy nedostatkových průtoků poněkud menší, zejména dle modelů ARP a Q0. Pro období 2068–2098 předpovídá nárůst větších objemů nedostatkových průtoků model ARP. Naopak dle kalibrace na povodí Hutné vychází objemy nedostatkových průtoků dle modelu ARP relativně menší.

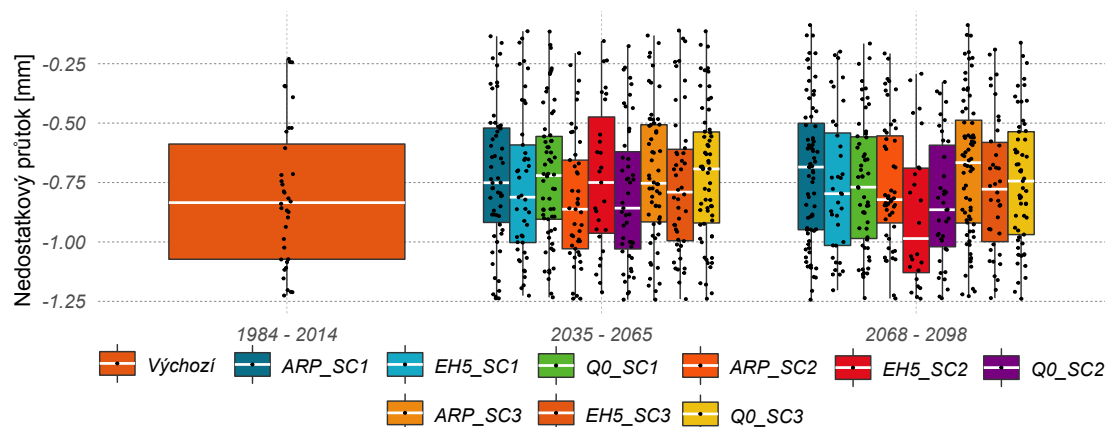


Obrázek 6.27: Četnost a velikost nedostatkových průtoků v horní části povodí Hačky

Zdroj: autor

²³černé body v grafu značí jednotlivé epizody nedostatkových průtoků

Stejně tak, jako tomu je v horní části povodí, lze očekávat zvýšenou četnost výskytu nedostatkových průtoků i v dolní části povodí, dle některých modelů až dvojnásobně (viz obrázek 6.28). Na rozdíl od predikcí pro horní část povodí vychází distribuce velikostí nedostatkových průtoků vyrovnanější a osciluje kolem průměrné hodnoty pro výchozí období. Dle celkového počtu výskytů nedostatkových průtoků lze obecně konstatovat, že model ARP předpovídá největší četnost výskytu tohoto jevu, na druhou stranu model EH5 predikuje jeho výskyt nejméně často (platí pro obě části povodí Hačky).



Obrázek 6.28: Četnost a velikost nedostatkových průtoků v dolní části povodí Hačky

Zdroj: autor

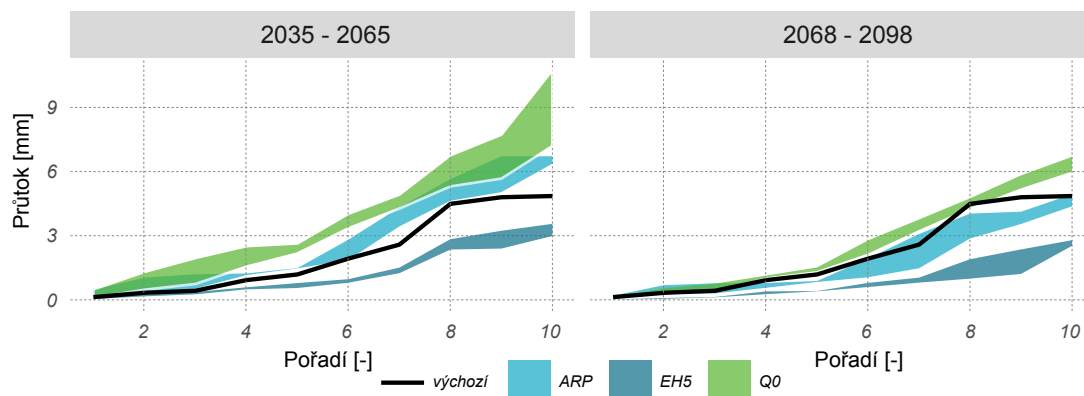
6.6 Porovnání minim současných a scénářových průtoků

Podle metodiky zmíněné v kapitole 5.7 na straně 42 byla porovnána absolutní minima průměrných měsíčních současných průtoků s průtokovými minimy scénářovými, modelovanými modelem Bilan dle scénářů použitých klimatických modelů. Na obrázku 6.29 na následující straně lze vidět porovnání absolutních minim současných a scénářových v horní části povodí, kdy pro výhledové období 2035–2065 vychází dle projekcí modelu ARP minimální průtoky mírně větší než pozorované, dle projekcí modelu Q0 vychází též minimální průtoky scénářové větší než současné a zároveň s jejich rostoucí velikostí roste i jejich odlišnost od průtoků současných. Dle modelu EH5 vychází naopak minimální průtoky menší než současné.

Jednotlivé plochy polygonů ohraničují oblast zahrnující všechny variantní řešení kalibrací modelu Bilan. Tedy pro horní část povodí Hačky zahrnují polygony kalibraci na Hutnou a na Hačku, pro dolní část povodí zahrnují polygony kalibraci dle všech použitých scénářů odběru povrchové vody.

Pro výhledové období 2068–2098 vychází dle modelu Q0 mírně větší minimální průtoky, dle zbylých dvou projekcí modelů ARP a EH5 jsou předpokládané minimální průtoky menší (zejména dle EH5).

Porovnání minimálních současných a scénářových průtoků v dolní části povodí lze vidět na obrázku 6.30 na následující straně. Z obrázku je patrné, že nejmenším současným odtokem z dolní části povodí je hodnota 2 mm (pozn. jedná se o odtokovou výšku z dolní části povodí,

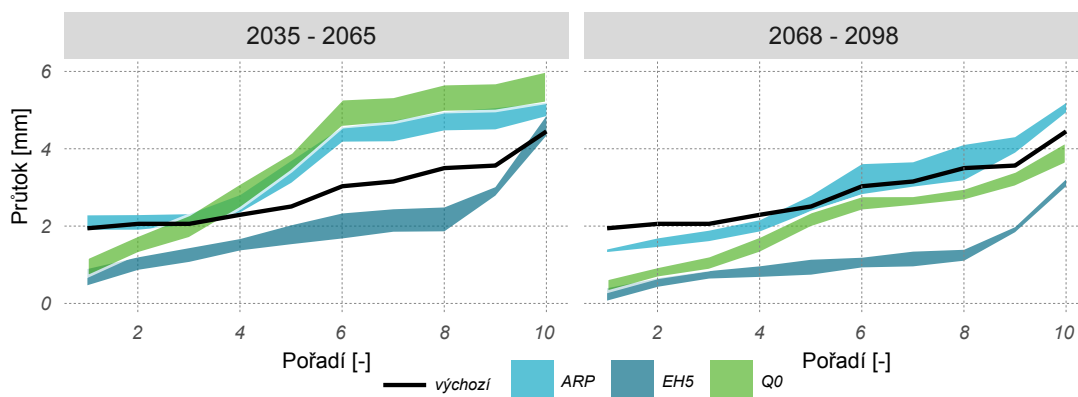


Obrázek 6.29: Porovnání současných a scénářových absolutních minim v horní části povodí Hačky

Zdroj: autor

blíže o odtokové výšce viz kapitola 5.2.2 na straně 37). Pod touto prahovou hranicí vychází scénářové průtoky podstatně menší než průtoky současné podle téměř všech projekcí použitých modelů. Nad touto prahovou hodnotou vychází minimální průtoky větší dle modelů ARP a Q0 v období 2035–2065 a v období 2068–2098 pouze dle ARP. Ve všech ostatních případech vychází minimální průtoky scénářové menší než minimální průtoky současné.

Pokud tedy porovnáme obě výhledová období z hlediska vývoje minimálních průtoků, pravděpodobnější prohloubení minimálních průtoků lze očekávat v období 2068–2098, naopak pro období 2035–2065 je pravděpodobnější mírný nárůst velikosti minimálních průtoků.



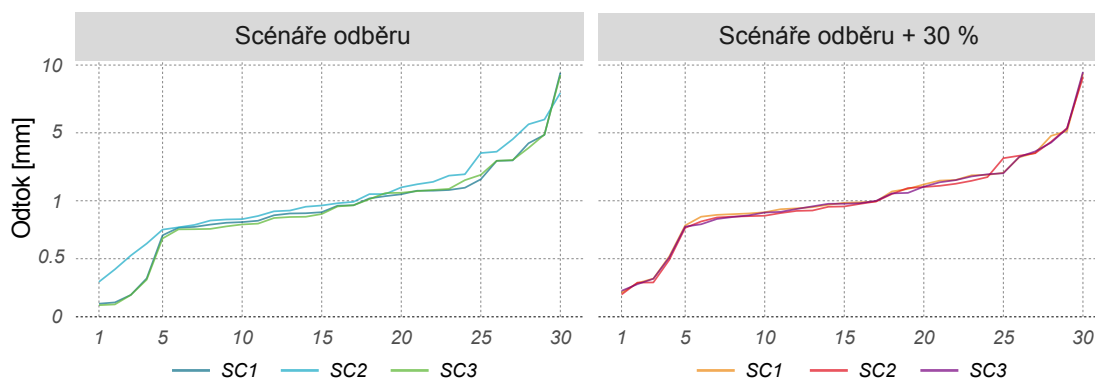
Obrázek 6.30: Porovnání současných a scénářových absolutních minim v dolní části povodí Hačky

Zdroj: autor

6.7 Vyhodnocení scénářů odběru povrchové vody

Za účelem vyhodnocení, jakým způsobem jednotlivé scénáře odběru povrchové vody (viz kapitola 5.3 na straně 38) podměnily vznik suchých období, byly lokalizovány nejmenší modelované odtoky v kontrolním období pro jednotlivé roky s ohledem na použité scénáře odběru povrchové vody a ty byly následně vzestupně seřazeny. Na základě tohoto uspořádání lze konstatovat, že původní nenavýšené scénáře odběru vykazují relativně větší proměnlivost, zejména druhá vari-

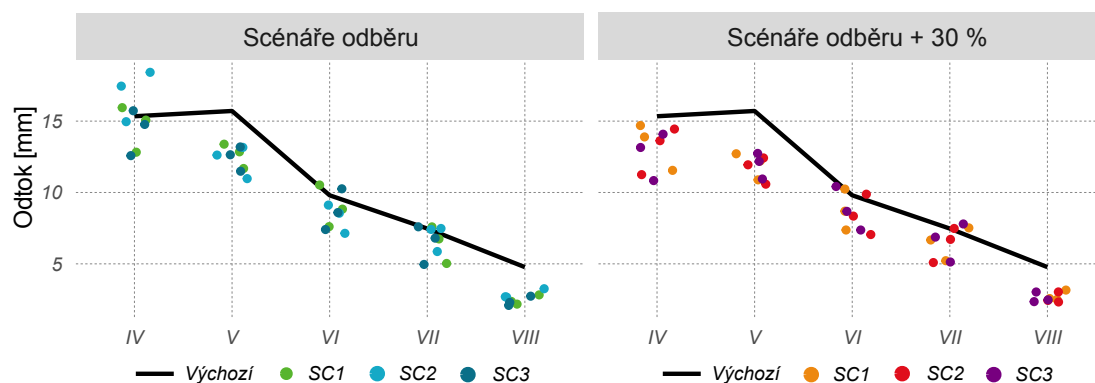
anta scénáře, která uvažuje větší velikost minimálních průtoků než ostatní dvě varianty, které jsou, co se týče minimálních odtoků, téměř identické. Navýšené scénáře odběru povrchové vody vykazují téměř identické hodnoty minimálních odtoků v celém souboru lokalizovaných minimálních odtoků. Na obrázku 6.31 lze vidět vzestupně seřazené minimální odtoky jednotlivých let v logaritmickém měřítku dle použitých scénářů odběru vody.



Obrázek 6.31: Vzestupně seřazené modelované minimální odtoky v kontrolním období dle jednotlivých scénářů odběru povrchové vody

Zdroj: autor

Poněvadž scénáře odběru povrchové vody vstupují do hydrologické bilance zejména v období od dubna do srpna, bylo proto provedeno reprezentativní porovnání průměrných měsíčních odtoků scénářových pro období 2035–2065 s průměrnými měsíčními odtoky modelovanými pro kontrolní období pro tyto měsíce. Pokles odtoků je určen zejména změnou meteorologických veličin dle použitých klimatických modelů, nicméně při porovnání hodnot jednotlivých měsíčních odtoků s ohledem na scénáře odběru vody lze vidět, že relativně menší odtoky jsou modelovány zejména v červnu dle druhé varianty scénáře. Třetí varianta scénáře je víceméně identická s první variantou (viz obrázek 6.32). Je důležité si uvědomit, že se jedná o scénáře odběru povrchové vody v měsíčním kroku, tudíž jsou dopady krátkodobých odběrů vody (zejména třetí varianta scénáře odběru) relativně rozmělněné a tudíž podhodnocené (podrobněji viz kapitola 7.2 na straně 64).



Obrázek 6.32: Porovnání průměrných měsíčních odtoků s ohledem na scénáře odběru vody

Zdroj: autor

7 Diskuze

7.1 Výsledky odhadu změn hydrologické bilance

Pro stanovení změn hydrologické bilance bylo postupováno následovně. V první fázi byly vytvořeny sady řad odtoků z povodí pomocí modelu Bilan na základě sady meteorologických veličin (srážek a teploty) pozorovaných pro kontrolní období 1984–2014. Pro výhledová období 2035–2065 a 2068–2098 byly upraveny sady řad meteorologických veličin přírůstkovou metodou dle projekcí regionálních klimatických modelů RCM ALADIN-CLIMATE/CZ, RCM REMO_EH5 a RCM CLM_Q0, na základě kterých byly následně vytvořeny sady řad odtoků z povodí pomocí modelu Bilan. Na základě konfrontace řad odtoků pro výhledová období s řadami odtoků pro kontrolní období byly vyhodnoceny změny v hydrologické bilanci pro povodí Hačky.

Ačkoliv projekce jednotlivých použitých modelů vykazují mírné odchylky jedna od druhé, jejich trendy vykazují určité paralely, které předpovídají nárůst zimních odtoků zapříčiněný dřívějším odtáváním zásob sněhu vlivem růstu teploty. Projekce také předpokládají prohloubení suchých epizod v letním období s čtenějším výskytem nedostatkových průtoků. Lze tedy očekávat nejen změny v časovém rozložení odtoků z povodí Hačky, ale také pokles (až 45.9%) průměrných ročních odtoků (viz kapitola 6.3 na straně 53). Nicméně, jak dokládají výsledky z kapitoly 6.2 na straně 50, nelze předpokládat výraznější změny v ročních srážkových úhrnech ve výhledových obdobích oproti období kontrolnímu (pokles až 8.1%, nárůst až 9.3%), dojde spíše ke změně v rozložení srážek v průběhu roku (viz kapitola 6.4 na straně 56). Poměrně nejistá předpověď panuje v odhadu změn měsíčních srážek větších než 50 mm. Zatímco model EH5 predikuje jejich nárůst (až 18.8%), zbytek použitých modelů předpovídá spíše jejich úbytek. Podstatné změny lze pozorovat v průměrných ročních teplotách vzduchu, na jejichž nárůstu se shodují všechny použité modely v obou výhledových obdobích, přičemž větší nárůst lze pozorovat v období 2068–2098 (v průměru o 2.8 °C). Na základě kapitoly 6.5 na straně 59 lze konstatovat, že četnost výskytu období sucha vzroste v obou výhledových obdobích, dle projekcí některých použitých modelů až dvojnásobně.

K velmi podobným závěrům dospěli například Horáček et al. (2008), kteří použili ke studiu změn hydrologické bilance vlivem změny klimatu na 61 povodích v ČR regionální modely HIRHAM a RCAO. Pokles v průměrném ročním odtoku z povodí osciloval mezi 8–33% v závislosti na použitém emisním scénáři. Hanel et al. (2012) použili soubor patnácti regionálních klimatických modelů k simulaci klimatických podmínek ovlivněných změnou klimatu a zaznamenali pokles průměrného ročního odtoku na 250 povodích, který se pohyboval mezi 5–20%. Obě studie dokládají nárůst zimních odtoků vlivem dřívějšího odtávání sněhových zásob zapříčiněným navýšením teploty a zároveň prohloubení suchých epizod v letním období.

Tyto změny v meteorologických a zejména hydrologických veličinách povedou k nutnosti zavádět adaptační opatření (komentovaná v kapitole 7.3 na straně 65), poněvadž změna rozložení úhrnu srážek v kombinaci s růstem teploty vzduchu povede k nepříznivému časovému i prostorovému rozložení vody v povodí, na které není pedosféra, biota ani populace zvyklá. Bude tedy nutné se s těmito změnami vyrovnat, ať už zmírňujícími nebo adaptačními opatřeními.

7.2 Nejistoty spojené s odhadem změn hydrologické bilance

Na tomto místě je dobré si uvědomit, že všechny použité metody, ať už jde o využití hydrologické analogie, rekonstrukce průtoků nebo přírůstková metoda jsou zatíženy určitou chybou. Z tohoto důvodu je vhodnější mluvit spíše o odhadech změn hydrologické bilance nežli o přesných hodnotách. Míra nejistoty, která vstupuje do konečného výsledku této práce, se také částečně odvíjí od poměrně krátké pozorované řady odtoků, na základě které byl model Bilan kalibrován a která musela být za účelem porovnání modelována pomocí modelu Bilan. Z toho též vyplývá jistá uniformita modelovaných změn odtoku. Neznalost nulových průtoků v pozorované řadě (viz kapitola 6.1.4 na straně 47) a poměrně nekonzistentní pozorovaná hydrologická a meteorologická data (která musela být doplněna daty z gridu) beze sporu přispěla též určitou mírou nejistoty do konečného výsledku. Jak již bylo komentováno, přírůstková metoda použitá pro úpravu meteorologických dat počítá pouze se změnami průměrů uvažovaných veličin, nejistotou z toho vyplývající je nezačlenění změn variability měsíčních srážek a teploty. Eliminace této nejistoty by mohla být řešena právě zahrnutím změn variability měsíčních srážek a teploty, podobně jako to provedli Hanel et al. (2013). Určité ovlivnění výsledků je též zapříčiněno výběrem kontrolního období 1984–2014 (důvod výběru viz kapitola 5.4 na straně 39) a nikoliv standardního normálového období 1961–1990, jehož použití jako kontrolní období se ustálilo ve studiích podobného typu. Míra ovlivnění je dána tím, že již ve vybraném kontrolním období lze pozorovat změny meteorologických veličin vlivem změny klimatu. Z toho vyplývá možné podhodnocení změn, zejména teploty a možné nadhodnocení změn, zejména srážek. Určitou mírou nejistoty do odhadu změn hydrologické bilance vnáší také nejednoznačnost klimatických modelů, respektive nejednoznačnost jejich predikcí, díky geografickému umístění České republiky, které je na rozhraní mezi kontinentálním a oceánským klimatem a zároveň v oblasti přechodu mezi předpokládaným růstem srážek na severu a jejich poklesem na jihu Evropy. Chyba v odhadu také vzniká, jak uvádí Hanel et al. (2011), nadhodnocením srážkových úhrnů klimatickými modely. V zimním období je chyba odhadu srážkové činnosti největší, naopak nejpřesnější odhad klimatologie probíhá v letním období.

Jedním z cílů práce bylo předložit a kvantifikovat možné scénáře odběru povrchové vody (viz kapitola 5.3 na straně 38). Přestože vliv jednotlivých scénářů je pozorovatelný jak na průměrné měsíční průtoky (viz tabulka v příloze CH na straně 89), tak na minimální průtoky (viz kapitola 6.7 na straně 61) jejich celkový účinek je relativně rozmělněn použitím měsíčního kroku výpočtu (zejména třetí varianta scénáře). Odběr na zavlažování je relativně krátkodobý, ale za to podstatný zásah do bilance vodního toku této velikosti a vodnosti, zejména v letním období a zejména pokud se jedná o kumulativní odběr více uživatelů najednou. Proto pro přesnější kvantifikaci vlivu jednotlivých scénářů by mohlo být využito denní verze modelu Bilan, který by krátkodobé výkyvy vlivem odběrů postihl s větší přesností.

Protože je v průběhu celé práce povodí Hačky rozděleno na dvě části a problematika změn hydrologické bilance je řešena diskrétně pro každou část povodí zvlášť, je nutné podotknout, že se jedná o snahu co nejlépe kvantifikovat změny probíhající v tomto povodí. Ačkoliv se jednotlivé části povodí mírně liší svojí konstitucí, morfologií a zároveň i klimatickými poměry

(spojenými právě s morfologií), je důležité si uvědomit, že se jedná o propojený systém, ve kterém probíhá kontinuální komunikace. Tudíž změny hydrologické bilance pro celé povodí Hačky budou pravděpodobně ležet ve střední hodnotě změn obou částí povodí.

7.3 Možnosti adaptačních opatření

7.3.1 Vodohospodářské opatření

Jednou z možností, jak se vyrovnat s negativními účinky klimatické změny promítající se zejména do nedostatkových průtoků v letním období v hydrologickém režimu Hačky, je, jak uvádí pilotní projekt (Kašpárek et al., 2011b), budování nových vodních nádrží. Ty by měly za úkol akumulování přebytečných průtoků v období vodných měsíců, zejména v zimě, a její postupné uvolňování v měsících s nedostatkovými průtoky. Tento úkol však vyžaduje vytipování potencionálně vhodných lokalit pro výstavbu malých vodních nádrží a následnou studii proveditelnosti, viz (Holinka et al., 2014). Zároveň toto opatření s sebou nese velké finanční náklady, nehledě na vyrovnání majetkoprávních vztahů, limity území a technickou infrastrukturu v území. V případě povodí Hačky by mohlo kýženého efektu dosáhnout zintenzivnění a zefektivnění manipulace s nádrží na odlehčení Hutná II. nad Pánským rybníkem a také zařazení akumulací a retenčních funkce pro rybochovné a rekreační nádrže v lokalitě U rasovny. Alternativním řešením zmírňování dopadů hydrologického sucha je zbudování poldru v úseku toku Droužkovice–Všehrady nebo Všehrady–Nezabylice, kdy by suchá nádrž plnila nejen protipovodňovou funkci, ale mohla by plnit i funkci zásobní. Výsledné efekty zmíněných vodohospodářských opatření je však nutno podrobit studii.

Za účelem dobývání uhelné sloje v přílehlém lomu Libouš (viz příloha E na straně 81) je na tomto území snižována hladina podzemní vody. Voda je čerpána, čištěna a následně zaústěna do vodního toku Hutná I., který ústí v řece Ohři. Vzhledem k téměř nulovému průtoku vodního toku Hutná I, který byl zapříčiněn přerušením tohoto toku právě důlní činností, je velkým přínosem nepřetržité vypouštění vyčištěných vod z čistírny důlních vod. Tudíž přeložení vypouštěných vod do Hačky za účelem nadlepšení průtoků nepřichází v úvahu nehledě na technickou a finanční náročnost. Nicméně jak uvádí Motl (2011), v horizontu 2014–2029 by měla být zahájena hydrická rekultivace lomu Libouš v rozsahu 10.33 ha a k zatápnění zbytkové jámy lomu Libouš by mělo dojít až po roce 2038. Zatopením zbytkové jámy lomu vznikne vodní nádrž o ploše 25.7 ha. Takto rozsáhlá změna v hydrologii území by měla být bezesporu pozorovatelná na odtocích z povodí Hačky.

7.3.2 Opatření v krajině

Další teoretickou možností zmírnění důsledků klimatické změny by mohlo být zalesnění určitého sektoru v dolní části povodí, který má nyní zemědělské využití. Spíše však než cílené zalesňování dolní části povodí se nabízí možnost zalesnit přílehlou část povodí v rámci rekultivace lomu Libouš, která je plánována, jak uvádí Motl (2011), v rozsahu 325.06 ha, případně zvážit možnost nahrazení zemědělské rekultivace (plánovaný rozsah 196 ha) lesnickou rekultivací a navýšit tím tak celkový rozsah lesnické rekultivace. Ellison et al. (2015) uvádějí, že lesy podporují vznik

srážek uvolňováním biologických částic do atmosféry, z nichž některé aktivně podporují dešťové a sněhové srážky. Navíc lesní porost přispívá k zásobování podzemních vod, tím, že zlepšuje infiltraci do půdy²⁴ pomocí preferenčních vsakovacích cest vytvořených kořenovými systémy v kombinaci s půdní faunou. Převodem povrchové vody do spodních vod lesy nejen potlačují velké výkyvy vodního toku, ale také přispívají k udržování bazálního odtoku, který zajišťuje dostupnost vody v suchých obdobích. Na úlohu lesa v hydrologickém cyklu jsou dlouhodobě rozdílné názory. Jak uvádí Pokorný (2016), je prokázáno, že ze zalesněných povodí odtéká menší podíl dešťových srážek nežli z povodí zatrávněných nebo částečně odvodněných. Důvodem je voda „ztracená“ transpirací rostlin a také intercepce, zadržaná voda v korunách stromů, která se vypaří zpět do atmosféry, a která průměrně činí v lese 30 % vodní bilance (Maděra, 2014). Na druhou stranu Pokorný (2016) uvádí, jedinečnou funkci lesního porostu, kdy vodní pára vypařovaná přes den korunami porostu zůstává blízko korun stromů díky opačné vertikální stratifikaci teploty uvnitř lesního porostu. V noci se potom vodní pára sráží na povrchu porostu a vrací se částečně zpět, klesá tlak vzduchu, horizontálně se nasává vzduch z okolí a s ním i vzdušná vlhkost²⁵. Velké lesní komplexy mají schopnost tímto způsobem transportovat velké množství vody. Důležité je taky chladnější mikroklima lesních porostů, které dovoluje pomalejší uvolňování sněhové pokrývky v jarním období a tak přispívá k vyrovnávání a prodlužování odtoku. Nicméně i přes tyto poznatky Hanel et al. (2011) uvádějí skutečnost, že modelové a bilanční výpočty ukazují, že opatření v krajině se v odtokovém procesu podstatně projevují jen v případech přívalových povodní na malých povodích. Pro zmírnění hydrologického sucha, tj. zvětšení průtoků při výskytu minim, nemají prakticky význam. Hanel et al. (2011) také dodávají, že posílení „malého hydrologického oběhu“ vlivem většího výparu po změně vegetačního pokryvu na povodích řádově podobných rozloze povodí Hačky při zohlednění recyklačního poměru²⁶, který pro oblast Evropy činí 11 %, je zřejmě pod hranicí rozlišitelnosti měření srážek a odtoku.

Změna vegetačního pokryvu ve prospěch lesního porostu v povodí Hačky a přilehlých oblastech (rekultivovaná plocha lomu Libouš) zacílená na nadlepšení průtoků v suchých obdobích by tedy požadovaný úkol zřejmě neplnila. Nicméně změna využití pozemků v povodí Hačky, respektive v jeho dolní části by našla své opodstatnění v případě povodňových situací. Hanel et al. (2011) uvádějí, že na velmi malých povodích s převažujícím zemědělským využitím pozemků lze tímto způsobem povodňové průtoky znatelně zmenšit. Jak zmiňují Kašpárek – Peláková (2014), lze pozorovat zřetelné zmenšení přímého odtoku z přívalových srážek od velikosti řádově 50 mm vlivem změny plochy orné půdy na lesní porost.

7.3.3 Opatření na toku

Jak bylo uvedeno v kapitole 4.1 na straně 31 poměrně značná část toku je vydlážděna kame-nivem. Možným vysvětlením tohoto provedení je snaha zamezit průsaku vody z koryta do těch struktur podzemní vody, které se neodvodňují zpět do toku, ale podloží prosakují do povrchových lomů na úpatí odvodňovaných svahů Krušných hor. Tento fenomén naznačuje studie

²⁴infiltrace u lesních systémů je až desetkrát vyšší než je tomu u nelesního porostu (Maděra, 2014)

²⁵proto je výpar z lesního porostu až o 50 % nižší než je tomu například na poli (Maděra, 2014)

²⁶poměr částí průměrné roční srážky odpovídající posílením srážek vlivem lokálního výparu ke srážce celkové

Rozbor hydrologických poměrů Přivaděče Ohře–Bílina a jeho přítoků (VÚV TGM, 2015). Je tedy otázkou, nakolik by revitalizace vydlážděné části toku byla přínosem ke zvětšení průtoků v suchých obdobích, protože jak uvádějí Hanel et al. (2011), efekt zvětšení plochy, kterou může voda prosakovat z geologického okolí do toku nebo naopak, a případný účinek odstranění nepropustného zpevnění dna a svahů řečiště není jednoznačný. Pokud je hladina podzemní vody na počátku hydrologického sucha výše než hladina v toku, její průsak do toku zvětšuje průtoky. V případě dlouhých období poklesu průtoku však nastává i opačná situace, kdy vyšší hladina v toku dotuje hladinu podzemní vody.

Další možností je zřízení území určených pro řízené rozlivy v úsecích toku Droužkovice–Všehrady nebo Všehrady–Nezabylice, kdy by se nejen prodloužila doba odtoku vody z povodí, ale také by mohlo dojít k podstatnému zmenšení kulminačních průtoků. Záleží pak na ekonomickém zhodnocení a společenském stanovisku, zda uvolnění území pro řízenou inundaci je účelné a přijatelné. Funkčnost opatření na tocích a řízených rozlivů ve studovaném území je předem nutno podrobit studii, protože jak zmiňují Hanel et al. (2011), na řadě úseků toku mohou být tato opatření považována za adaptaci na důsledky klimatické změny v oblasti povodní (pokud se jejich zvětšení vůbec projeví), z hlediska adaptace na dopady klimatické změny v období hydrologického sucha mohou být účinné spíše v ojedinělých případech.

7.3.4 Legislativní opatření

Poněvadž vodní tok Hačka protéká územími s větším počtem zahrad a zemědělských stavení, zejména v dolní části toku, je vhodné v rámci řešení dopadů klimatické změny zvážit legislativní opatření, která povedou ke zvýšení hospodárnosti odběrů povrchové vody, k minimalizaci rozdílu mezi povoleným a čerpaným množstvím vody a stanovení minimálních průtoků. Slavíková – Petružela (2015) uvádí, že současná regulace vodních práv generuje problém nadměrného povoleného množství odběru povrchové vody, poněvadž průměrné procentní využití povolení k odběru povrchové vody za celou ČR v období 2001–2013 osciluje mezi 41–45 % a v čase se výrazně nemění (vyšší variabilita je pozorovatelná v povodí Ohře, kde procento využívání povolených množství v čase spíše klesá). Poněvadž povolení je v podstatě rezervací určitého množství vody a náklady vznikají až povinností zaplatit skutečný odběr vody, je snahou odběratelů získat vyšší povolený odběr než potřebují. Ačkoliv v povodí není uživatel, který by odebíral množství povrchové vody přesahující v kalendářním roce 6 000 m³ nebo 500 m³ v kalendářním měsíci, nelze aplikovat řešení Slavíková – Petružela (2015) – zpoplatnění povoleného množství povrchové vody a platbu za skutečně odebrané množství vody (dle § 101 vodního zákona). Nicméně lze uplatnit variantní řešení v podobě reportování ročního skutečně odebraného množství vody správci toku v rámci prvních pěti let od vydání vodoprávního rozhodnutí. Tudíž by správce toku měl k dispozici údaje o odběrech a jejich částečný vývoj, na základě kterého by mohl aproximovat vývoj odběrů do budoucna a tento odhad by mohl zařadit do dalšího vodohospodářského plánování.

8 Závěr

V této práci byla provedena analýza vývoje hydrologických a meteorologických veličin během pozorovaného období 1962–2015. Byl také proveden odhad změn hydrologické bilance povodí Hačky vlivem změny klimatu pro dvě výhledová období 2035–2065 a 2068–2098 na základě projekcí tří regionálních klimatických modelů RCM ALADIN-CLIMATE/CZ, RCM REMO_EH5 a RCM CLM_Q0, dle kterých byly pomocí modelu chronologické hydrologické bilance Bilan vytvořeny odtokové řady z povodí Hačky. Tyto modelované odtokové řady spolu se základními meteorologickými veličinami (teploty, srážky) byly následně porovnávány s výchozími pozorovanými řadami těchto veličin. Na základě této konfrontace byly vyhodnoceny relativní a absolutní změny teploty, srážek a odtoků v ročním hydrologickém cyklu. Část práce byla také zaměřena na odhad výskytu suchých epizod v jednotlivých výhledových obdobích.

Studie prokázala nárůst průměrné roční teploty v průměru o 1.7°C v prvním výhledovém období a o 2.8°C v druhém období dle použitých klimatických modelů. Tyto změny povedou k časovému přerozdělení srážek během roku, roční úhrn srážek však zůstane v podstatě nezměněn (maximální změny -8.1% ; $+9.3\%$). Vlivem těchto změn zřejmě dojde k poklesu ročních odtoků z povodí v období 2035–2065 (průměrně 5.7% , maximálně 20.3%). Podstatný pokles ročních odtoků je však předpokládán v období 2068–2098 (průměrně 25.5% , maximálně 45.9%). Časové přerozdělení srážkové činnosti spolu s nárůstem teploty povedou k nepříznivému časovému i prostorovému rozložení vody v povodí, na které není pedosféra, biota ani populace zvyklá. Bude tedy nutné s těmito změnami počítat a zahrnout je do vodohospodářského plánování a zároveň se s nimi vyrovnat, ať už zmírňujícími nebo adaptačními opatřeními.

Přehled literatury a použitých zdrojů

- ARNELL, N. W. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environmental Change*. 1999, 9, 1, s. 5–23. ISSN 0959-3780. Dostupné z: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0959-3780\(98\)00015-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-3780(98)00015-6)>.
- ARNELL, N. – REYNARD, N. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology*. 1996, 183, 3-4, s. 397–424. ISSN 0022-1694. Dostupné z: <[http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02950-8](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(95)02950-8)>.
- BARANOVÁ, M. Úvod do teorie Thin Plate Spline a jeho aplikace. 2006. Dostupné z: <<http://home.zcu.cz/baranov/KMA/articles/TPS.pdf>>.
- BERAN, A. – HORÁČEK, S. – HANEL, M. Zjednodušení metody výpočtu potenciální evapotranspirace v nové verzi modelu Bilan. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2011, roč 53, 3, s. 17–20. <http://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2015/08/vtei_2011_mimoradne_03.pdf>. ISSN 1805-6555.
- BERGSTRÖM, S. et al. Climate change impacts on runoff in Sweden - assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate Research*. 2001, 16, 2, s. 101–112. Dostupné z: <<https://www.researchgate.net/publication/250221573>>.
- CHRISTENSEN, J. et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Regional Climate Projections, s. 848–940. 2007.
- CÍLEK, V. Odložené globální oteplování. *Vesmír*. 2010, roč 89, 2, s. 372–375. Dostupné z: <<http://casopis.vesmir.cz/files/file/fid/6219/aid/8837>>. ISSN 0042-4544.
- DONATO, G. – BELONGIE, S. Approximate Thin Plate Spline Mappings. In *ECCV '02 Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part III*, 2002. ISBN 3-540-43746-0.
- ELLISON et al. *Managing Forests for Water and for Climate Cooling*. WeForest for COP21, 2015.
- GIDROMETEOIZDAT. *Rekomendacii po rascotu isparenija s poverchnosti suši*. Gidrometeoizdat, Leningrad, 1976.
- GOOSSE, H. et al. *Introduction to climate dynamics and climate modelling*. 2010.
- HANEL, M. et al. *Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření*. Vydání první. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2011. ISBN 978-80-87402-22-1. ISBN 978-80-87402-22-1.
- HANEL, M. – VIZINA, A. *Hydrologické modelování dopadů klimatické změny*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2014. skriptum.
- HANEL, M. et al. Možnost zlepšení hydrologických poměrů povodí horní Srpiny. In HANEL, M. et al. (Ed.) *Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření*, Vydání první, s. 75–80. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2007. ISBN 978-80-87402-22-1.
- HANEL, M. et al. A Multi-Model Assessment of Climate Change Impact on Hydrological Regime in the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2012, Volume 60, 3, s. 152–161. Dostupné z: <<http://dlib.lib.cas.cz/7587/>>. ISSN 0042-790X.

- HANEL, M. et al. Evaluation of Simple Statistical Downscaling Methods for Monthly Regional Climate Model Simulations with Respect to the Estimated Changes in Runoff in the Czech Republic. *Water Resources Management*. 2013, 27, 15, s. 5261–5279. ISSN 1573-1650. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11269-013-0466-1>>.
- HOLINKA, M. – KOTEROVÁ, V. – MENHARD, P. *Studie proveditelnosti vodních nádrží v povodí Rakovnického potoka*. Vodohospodářský rozvoj a výstavba, a.s., 2014.
- HÖÖK, M. Fuelling Future Emissions - Examining Fossil Fuel Production Outlooks Used in Climate Models. *Climate Change - Research and Technology for Adaptation and Mitigation*. 2011. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.5772/24848>>. ISBN 978-953-307-621-8.
- HORÁČEK, S. – KAŠPÁREK, L. – NOVICKÝ, O. Estimation of climate change impact on water resources by using Bilan water balance model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2008, 4, 1, s. 1–8. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1088/1755-1307/4/1/012023>>.
- HORÁČEK, S. et al. Vývoj modelu hydrologické bilance - Bilan. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2009, roč 51, mimořádné číslo, s. 2–5. ISSN 1805-6555.
- KALVOVÁ, J. – MIKŠOVSKÝ, J. – RAIDL, A. *Atmosféra a klima aktuální otázky ochrany ovzduší*, Vydání první, Klima a jeho změny, s. 280–323. Univerzita Karlova, Nakladatelství Karolinum, 2009. ISSN 978-80-246-1598-1.
- KAŠPÁREK, L. – MRKVIČKOVÁ, M. Studie potřeb vody pro povodí Blšanky a Liboce. In HANEL, M. et al. (Ed.) *Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření*, Vydání první, s. 81–86. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2008. ISBN 978-80-87402-22-1.
- KAŠPÁREK, L. – PELÁKOVÁ, M. Analýza citlivosti změn objemu přímého odtoku a infiltrace do půdy při předpokládaných změnách užívání pozemků. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2014, roč 56, 5, s. 8–12. Dostupné z: <http://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2015/08/vtei_2014_5.pdf>.
- KAŠPÁREK, L. et al. Adaptační opatření pro zmírnění dopadů současných změn klimatu na povodí Rakovnického potoka. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2011a, roč 53, 2, s. 8–11. Dostupné z: <http://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2015/08/vtei_2011_2.pdf>.
- KAŠPÁREK, L. et al. *Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulací schopnosti v povodí Rakovnického potoka*. Vydání první. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2011b. ISBN 978-80-87402-14-6.
- KIENZLE, S. W. et al. Simulating the hydrological impacts of climate change in the upper North Saskatchewan River basin, Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*. 2012, 412 - 413, s. 76 - 89. ISSN 0022-1694. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.058>>. Hydrology Conference 2010.
- KLAUS, V. Projev prezidenta České republiky na konferenci OSN o změnách klimatu. In *Sborník příspěvků konference OSN o změnách klimatu*, 2007.
- KOŽÍN, R. et al. Možnosti zmírnění dopadů změny klimatu využitím území chráněných pro akumulaci povrchových vod. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2015, roč 52, 4-5, s. 11–17. Dostupné z: <http://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2015/08/vtei_2015_4-51.pdf>.

- KULÍK, V. – KŘOVÁK, F. *Cvičení z meliorací*. Vysoká škola zemědělská Praha, 1988.
- LI, L. et al. Hydrological projections under climate change in the near future by RegCM4 in Southern Africa using a large-scale hydrological model. *Journal of Hydrology*. 2015, 528, s. 1–16. ISSN 0022-1694. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.028>>.
- MADĚRA, P. Lesy a jejich vliv na vodní režim krajiny. In *Povodně a sucho krajina jako základ řešení*, s. 49–53. Botanický ústav Akademie věd ČR, v. v. i., 2014. ISBN 978-80-86188-44-7.
- MANN, M. E. – BRADLEY, R. S. – HUGHES, M. K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*. 1998, 26, 6, s. 759–762. ISSN 1944-8007. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1029/1999GL900070>>.
- MCGUFFIE, K. – HENDERSON-SELLERS, A. Forty years of numerical climate modelling. *International Journal of Climatology*. 2001, 21, 9, s. 1067–1109. ISSN 1097-0088. doi: 10.1002/joc.632. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1002/joc.632>>.
- METELKA, L. – TOLASZ, R. *Klimatické změny: fakta bez mýtů*. Univerzita Karlova v Praze, Centrum pro otázky životního prostředí, 2009.
- MOTL, L. Postup SD a.s. - DNT v období 2014 - 2029. Dokumentace záměru stavby v rozsahu přílohy č. 4 zákona č.100/2001sb., Environmentální a ekologické služby s.r.o., říjen 2011.
- NOAA. State of the Climate: Global Analysis for Annual 2015, leden 2016. Dostupné z: <<http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201513>>.
- NOVICKÝ, O. – KAŠPÁREK, L. – UHLÍK, J. Possible impacts of climate change on groundwater resources and groundwater flow in well developed water bearing aquifers. In HEINONEN, M. (Ed.) *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, s. 358–364, 2007.
- POKORNÝ, J. Management lesů a jeho význam pro vodu a klimatizaci krajiny. *Vodní hospodářství*. 2016, roč 66, 2, s. 22–23. ISSN 1211-0760.
- PRETEL, J. *Klimatické změny a jejich dopady na život lidí*. 2012.
- PUMO, D. et al. Climate change effects on the hydrological regime of small non-perennial river basins. *Science of The Total Environment*. 2016, 542, Part A, s. 76–92. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.109>>.
- R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016. Dostupné z: <<https://www.R-project.org>>.
- SAMADI, S. Z. – SAGARESWAR, G. – TAJIKI, M. Comparison of General Circulation Models: methodology for selecting the best GCM in Kermanshah Synoptic Station, Iran. *International Journal of Global Warming*. 2010, 2, 4, s. 347–365.
- SELLAMI, H. et al. Quantifying hydrological responses of small Mediterranean catchments under climate change projections. *Science of The Total Environment*. 2016, 543, Part B, s. 924–936. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.006>>.

- SHABALOVA, M. V. – DEURSEN, W. P. A. – BUIHAND, T. A. Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. *Climate Research*. 2003, 23. Dostupné z: <<http://10.3354/cr023233>>.
- SLAVÍKOVÁ, L. – PETRUŽELA, L. Povolené versus reálné odběry povrchových vod v ČR - Analýza dat a institucionální kontext. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2015, roč 57, 3, s. 1–3. Dostupné z: <http://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2015/08/vtei_2015_3.pdf>.
- SOLOMON, S. et al. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, 2007. ISBN 0521880092.
- STOCKER, T. et al. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2013. Dostupné z: <<http://10.1017/CBO9781107415324>>. ISBN 978-1-107-66182-0.
- TRÁVNÍČKOVÁ, A. – KOŽÍN, R. Odhad základního odtoku v dosud nepozorovaných povodích. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2014, roč 56, 5, s. 12–15. Dostupné z: <http://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2015/08/vtei_2014_5.pdf>.
- TREML, P. et al. Vliv odběrů vody na technické zasněžování na odtokovou výšku hlavních toků v Krkonoších. *Opera Corcontica*. 2012, 49, s. 73–87.
- TROIN, M. et al. Comparing statistical post-processing of regional and global climate scenarios for hydrological impacts assessment: A case study of two Canadian catchments. *Journal of Hydrology*. 2015, 520, s. 268 – 288. ISSN 0022-1694. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.047>>.
- ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní záákon) ze dne 25.7.2001. In *Sbírka zákonů*, částka 98/2001. 2001. s. 5617–5756.
- VIZINA, A. – HANEL, M. Eliminace ovlivnění průtoků pomocí propojeného modelu hydrologické a vodohospodářské bilance. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2011, roč 53, 3, s. 20–22. <http://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2015/08/vtei_2011_mimoradne_03.pdf>. ISSN 1805-6555.
- VIZINA, A. – HORÁČEK, S. Zpřesnění odhadů dopadů klimatické změny na vodní zdroje s využitím scénářů založených na simulacích modelem ALADIN-Climate/CZ. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2009, roč 51, mimořádné číslo, s. 5–8. ISSN 1805-6555.
- WICKHAM, H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2009. Dostupné z: <<http://ggplot2.org/book/>>. ISBN 978-0-387-98140-6.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Calculation of monthly and annual 30-year standard normals*. World Meteorological Organization, 1989.

Seznam obrázků

3.1	Průběh teplotní odchylky na severní polokouli v průběhu posledního tisíciletí . . .	16
3.2	Teplotní odchylka roku 2015 od průměru 1981–2010	19
3.3	SRES scénáře a jejich důraz na řešení environmentálních problémů	20
3.4	Schéma modelu globální cirkulace	22
3.5	Rozdělení metod tvorby scénářů změny klimatu	23
3.6	Schéma hydrologického modelování dopadů změny klimatu	23
3.7	Schéma modelu hydrologické bilance Bilan	24
3.8	Schéma propojení modelu Bilan s modelem vodohospodářské bilance	25
4.1	Přehled vodních toků v povodí Hačky	32
5.1	Denní úhrny srážek z meteorologických stanic v okolí povodí Hačky	34
5.2	Průměrné denní teploty vzduchu z meteorologických stanic v okolí povodí Hačky	34
5.3	Průměrné denní průtoky vodních toků Hačka a Chomutovka	34
5.4	Hydrologická a meteorologická data pořízená z VÚV TGM	35
5.5	Vytvarovaná síť souřadnic podle zadaných bodových dat	36
5.6	Rastr hodnot srážkového úhrnu v určitý den na dolní části povodí Hačky	37
5.7	Plochy jednotlivých Thiessnových polygonů	37
5.8	Odvození změn pomocí dat z klimatického modelu	41
5.9	Postup tvorby odtoků z horní části povodí Hačky	41
5.10	Postup tvorby odtoků z dolní části povodí Hačky	42
6.1	Trendy v průměrných ročních srážkových úhrnech pro jednotlivé meteorologické stanice v širším okolí povodí Hačky	43
6.2	Roční srážkové úhrny v povodí Hačky	44
6.3	Trendy četnosti srážek větších než 50 mm / měsíc v povodí Hačky	44
6.4	Trendy v průměrných ročních teplotách vzduchu pro meteorologické stanice v šir- ším okolí povodí Hačky	45
6.5	Průměrná roční teplota v povodí Hačky	45
6.6	Změny meteorologických veličin během pozorovaného období v povodí Hačky . . .	46
6.7	Porovnání průměrných měsíčních teplot vzduchu a srážkových úhrnů z období 1962–1988 a 1989–2015 v povodí Hačky	47
6.8	Kompenzace nárůstu teploty vzduchu nárůstem srážkové činnosti	47
6.9	Měsíční naměřené průtoky Hačky, klouzavý průměr (12 měsíců) a lineární trend .	48
6.10	Měsíční rekonstruované průtoky Hačky, klouzavý průměr (12 měsíců) a lineární trend	48
6.11	Velikost průměrných denních průtoků Hačky ve sledovaném období dle jednotli- vých měsíců	49
6.12	Vypouštění do povrchových vod v povodí Hačky	50
6.13	Počet bezdeštných dní s vysokou teplotou v období červen–srpen	50
6.14	Identifikované změny meteorologických veličin v jednotlivých měsících mezi ob- dobími 1984–2014 a 2035–2065	51

6.15	Identifikované změny meteorologických veličin v jednotlivých měsících mezi obdobími 1984–2014 a 2068–2098	52
6.16	Identifikované změny ve výskytu měsíčních srážkových úhrnů větších než 50 mm	52
6.17	Změny v ročních srážkových úhrnech a ročních průměrných teplotách v povodí Hačky	53
6.18	Podíl odtoku ve scénářovém období 2035–2065 ku odtoku v kontrolním období – horní část povodí Hačky	54
6.19	Podíl odtoku ve scénářovém období 2068–2098 ku odtoku v kontrolním období – horní část povodí Hačky	54
6.20	Podíl odtoku ve scénářovém období 2035–2065 ku odtoku v kontrolním období – dolní část povodí Hačky	55
6.21	Podíl odtoku ve scénářovém období 2068–2098 ku odtoku v kontrolním období – dolní část povodí Hačky	55
6.22	Porovnání průměrného ročního odtoku pozorovaného s ročními odtoky scénářovými z povodí Hačky	56
6.23	Změna základních složek hydrologické bilance ve výhledovém období 2035–2065 – horní část povodí Hačky	57
6.24	Změna základních složek hydrologické bilance ve výhledovém období 2068–2098 – horní část povodí Hačky	57
6.25	Změna základních složek hydrologické bilance ve výhledovém období 2035–2065 – dolní část povodí Hačky	58
6.26	Změna základních složek hydrologické bilance ve výhledovém období 2068–2098 – dolní část povodí Hačky	58
6.27	Četnost a velikost nedostatkových průtoků v horní části povodí Hačky	59
6.28	Četnost a velikost nedostatkových průtoků v dolní části povodí Hačky	60
6.29	Porovnání současných a scénářových absolutních minim v horní části povodí Hačky	61
6.30	Porovnání současných a scénářových absolutních minim v dolní části povodí Hačky	61
6.31	Vzestupně seřazené modelované minimální odtoky v kontrolním období dle jednotlivých scénářů odběru povrchové vody	62
6.32	Porovnání průměrných měsíčních odtoků s ohledem na scénáře odběru vody	62

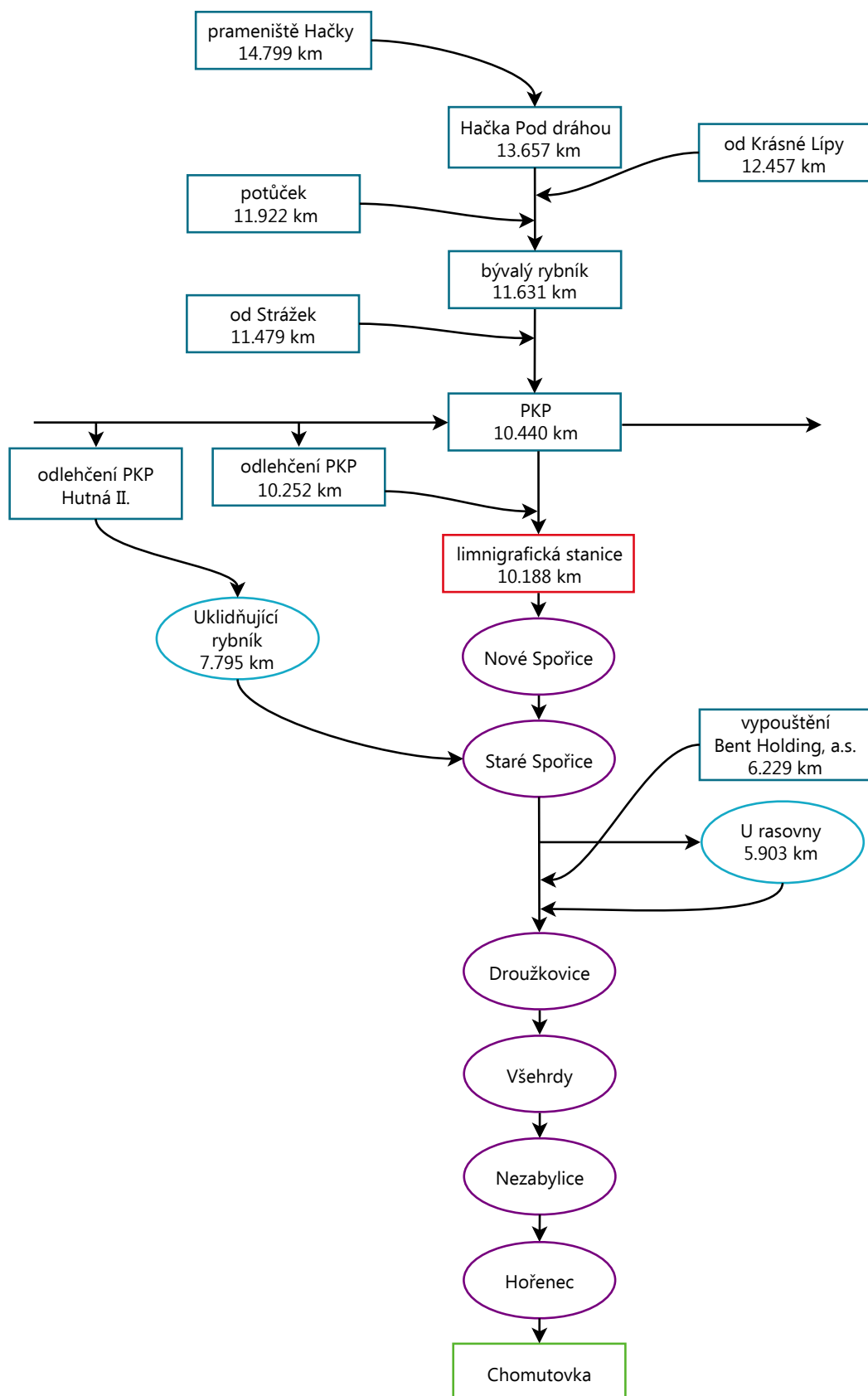
Seznam tabulek

4.1	Přehled vodních toků v povodí Hačky	31
5.1	Varianty scénářů odběru povrchové vody	39
6.1	Základní statistické hodnoty pozorovaných a rekonstruovaných průtoků Hačky ve sledovaném období	49
6.2	Průměrné měsíční průtoky Hačky ve sledovaném období dle jednotlivých měsíců	49
6.3	Přehled průměrných změn meteorologických veličin dle použitých modelů	51

Seznam příloh

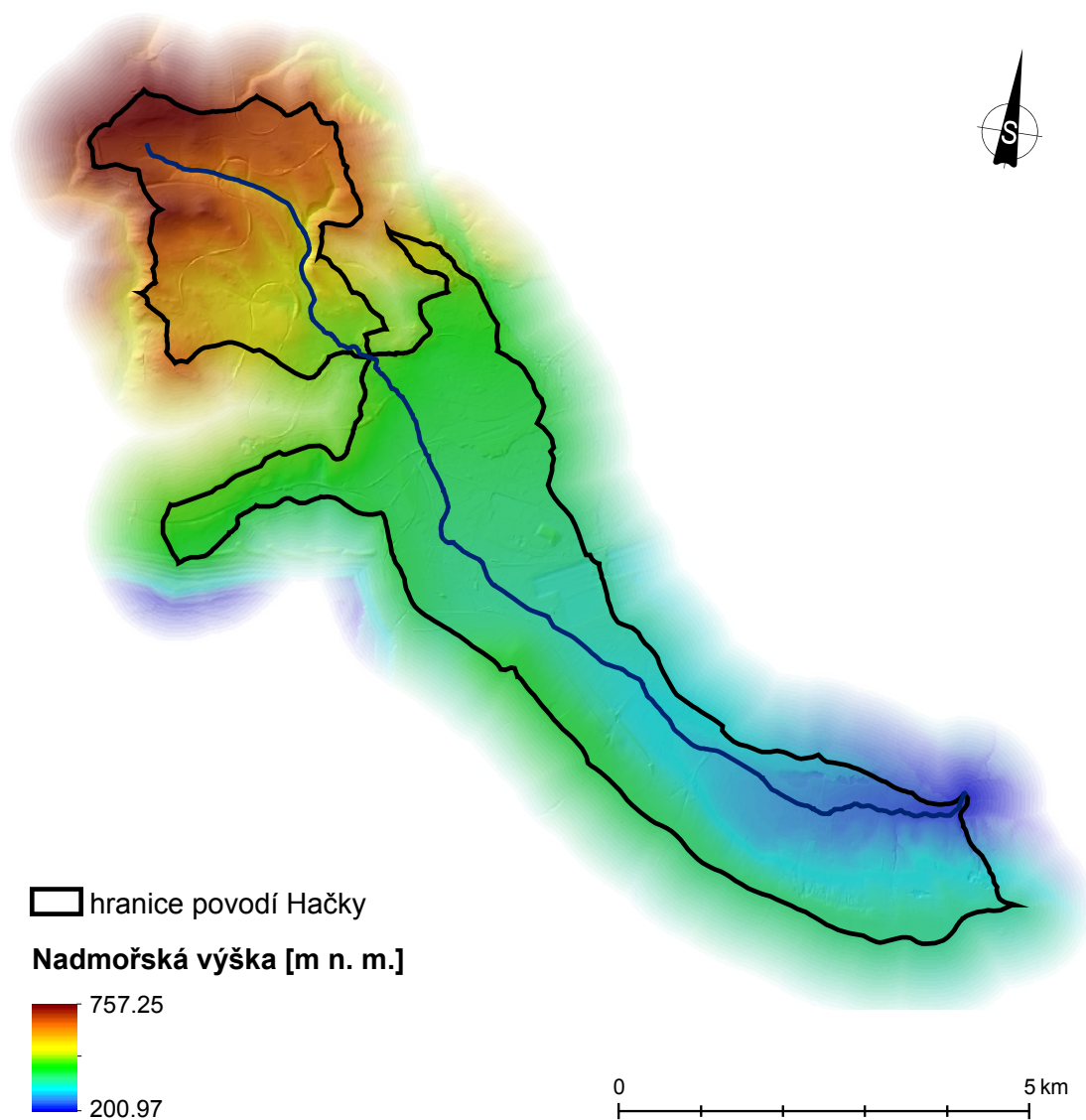
Příloha A: Schéma skladby průtoků Hačky	77
Příloha B: Nadmořská výška v povodí Hačky	78
Příloha C: Sklonové poměry v povodí Hačky	79
Příloha D: Krajinný kryt povodí Hačky	80
Příloha E: Přehledná mapa povodí Hačky	81
Příloha F: Měsíční úhrny srážek	82
Příloha G: Průměrné měsíční teploty vzduchu	85
Příloha H: Průměrné měsíční odtoky z horní části povodí	88
Příloha CH: Průměrné měsíční odtoky z dolní části povodí	89
Příloha I: Krabicové grafy měsíčních odtoků - horní část povodí Hačky	90
Příloha J: Krabicové grafy měsíčních odtoků - dolní část povodí Hačky	92

Příloha A: Schéma skladby průtoků Hačky



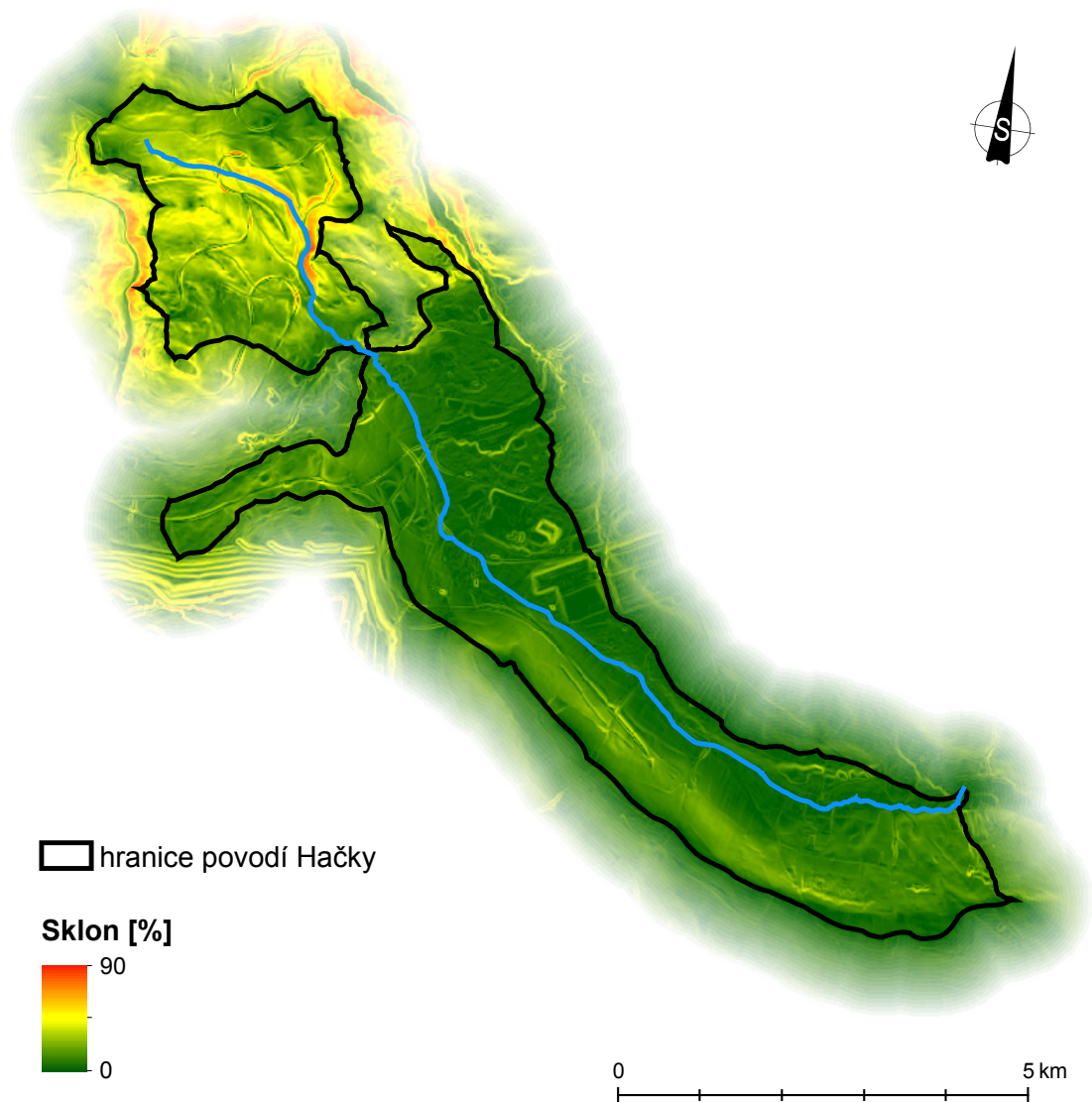
Zdroj: autor

Příloha B: Nadmořská výška v povodí Hačky



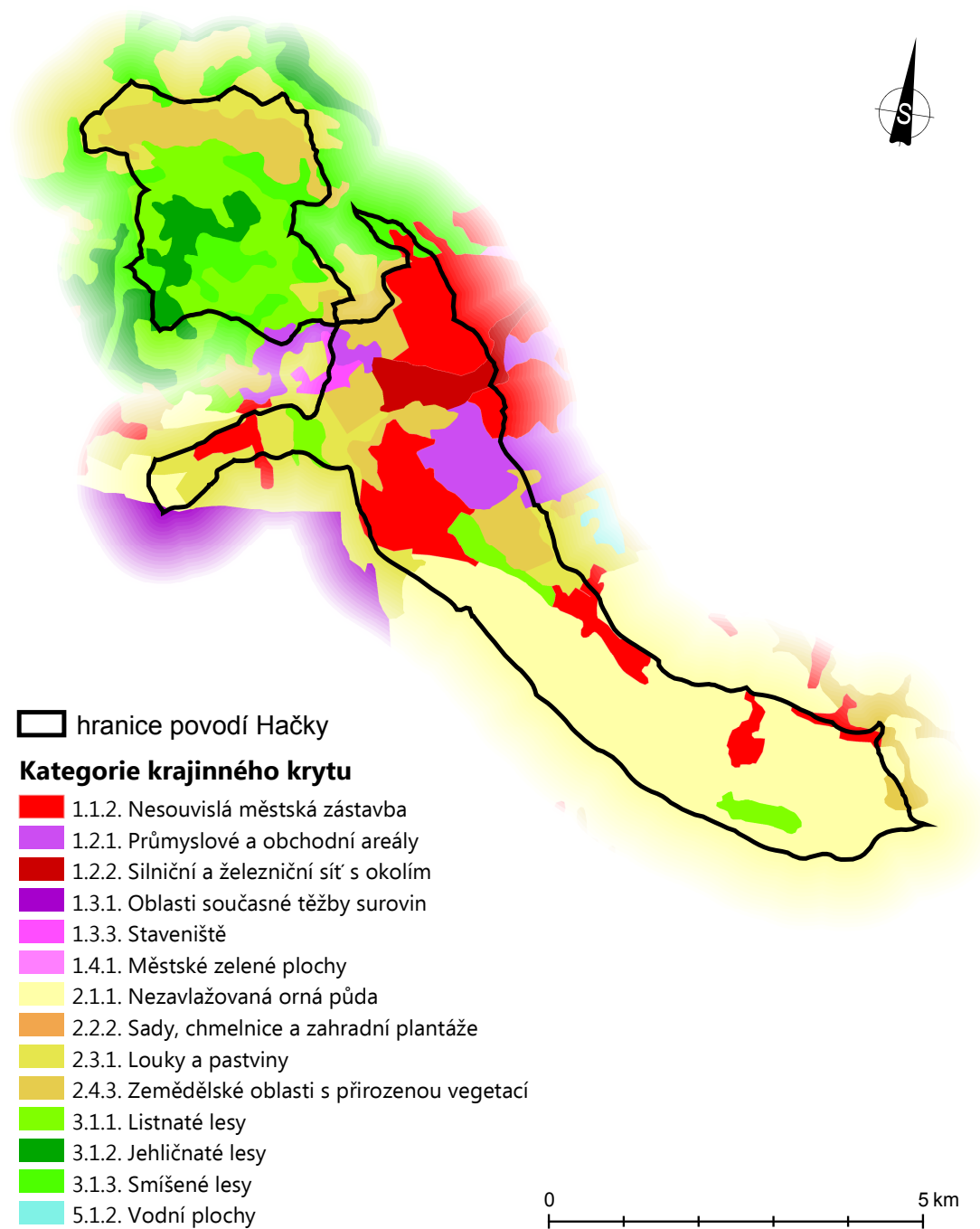
Zdroj: autor

Příloha C: Sklonové poměry v povodí Hačky



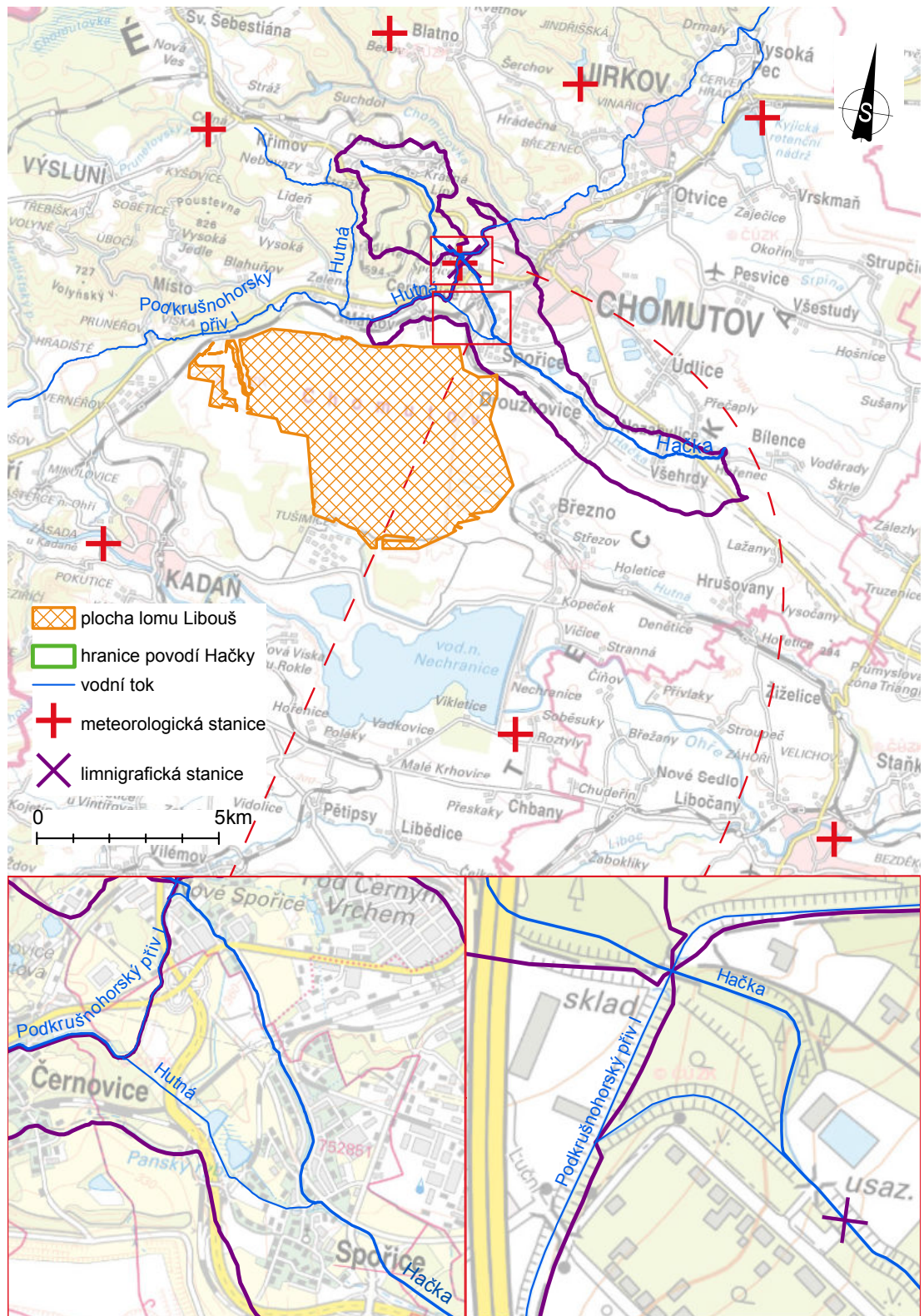
Zdroj: autor

Příloha D: Krajinný kryt povodí Hačky



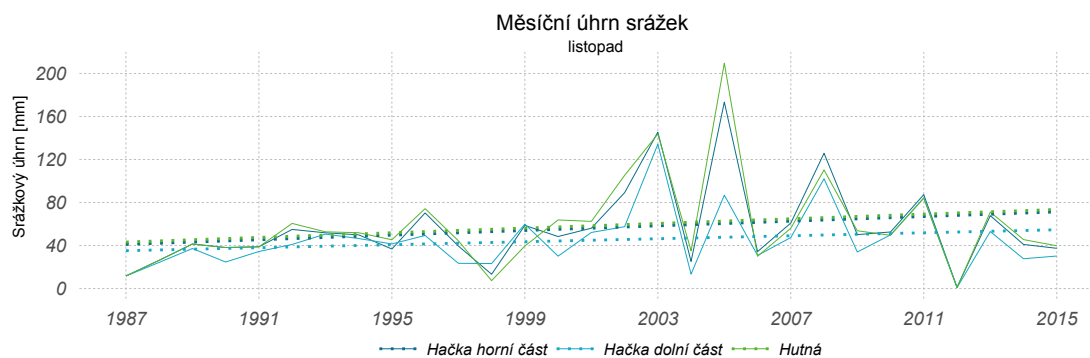
Zdroj: autor

Příloha E: Přehledná mapa povodí Hačky

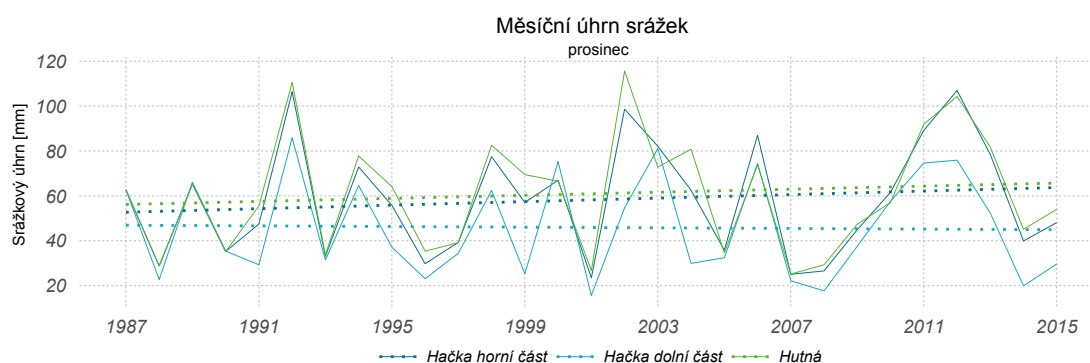


Zdroj: autor

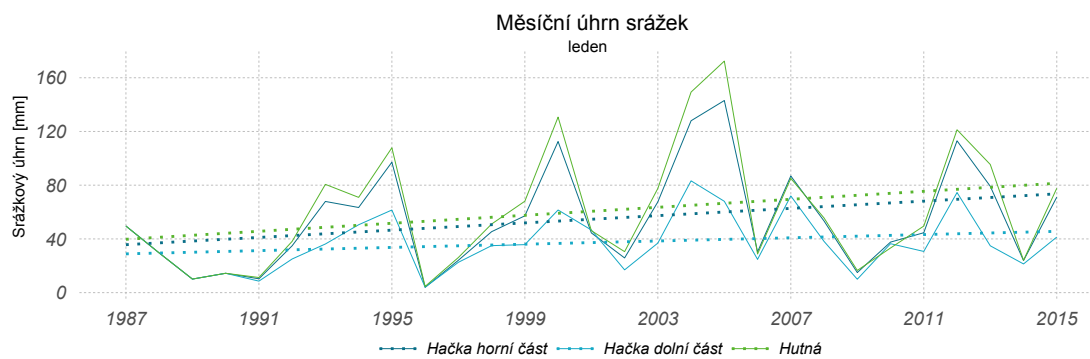
Příloha F: Měsíční úhrny srážek



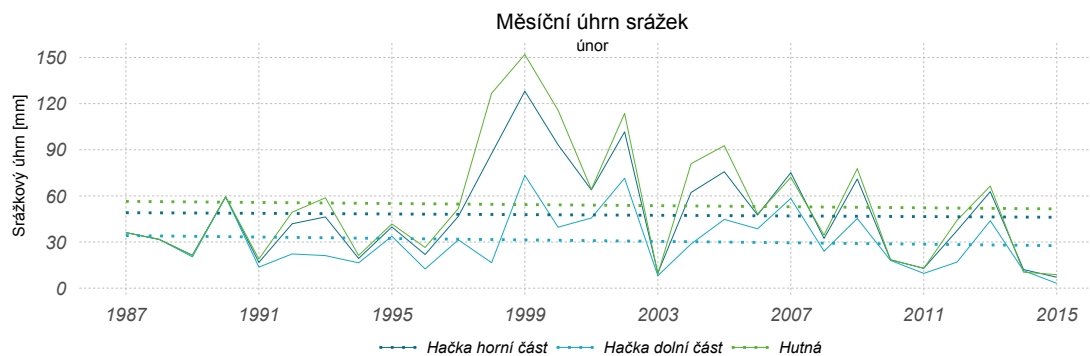
Zdroj: autor



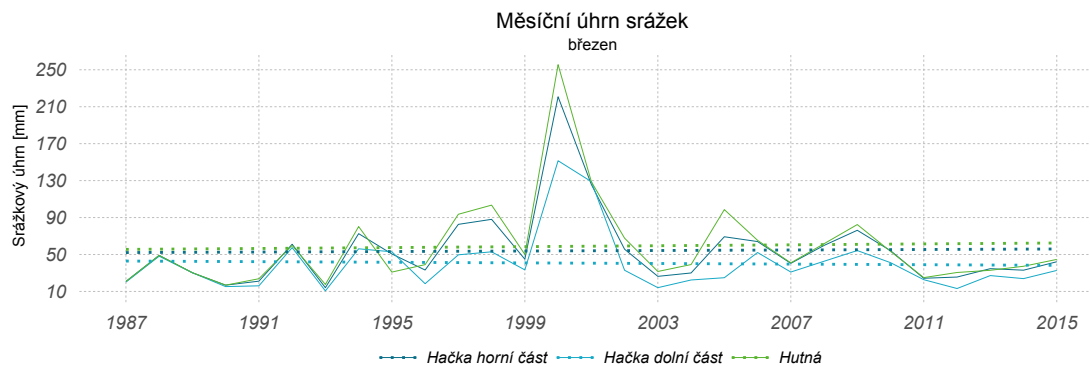
Zdroj: autor



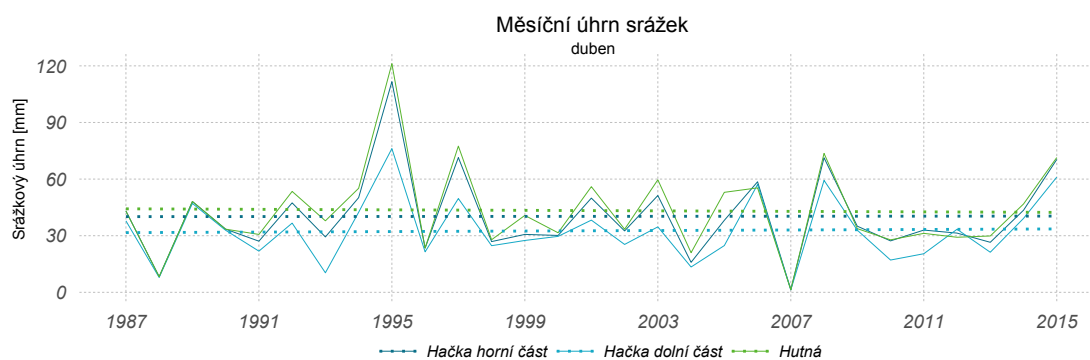
Zdroj: autor



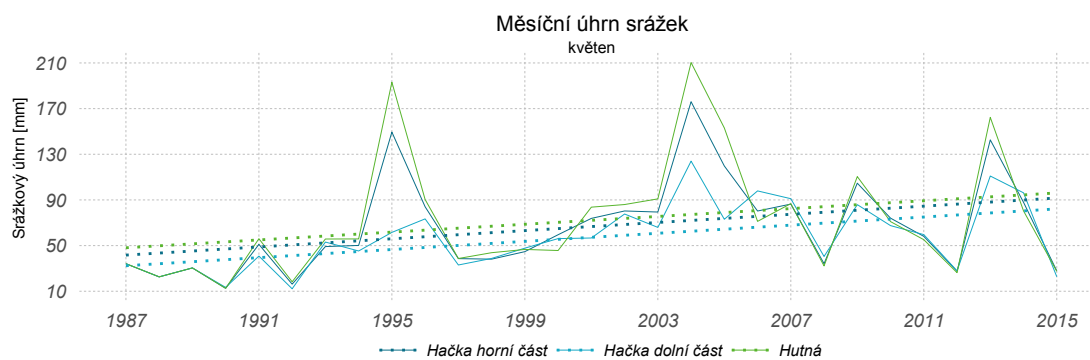
Zdroj: autor



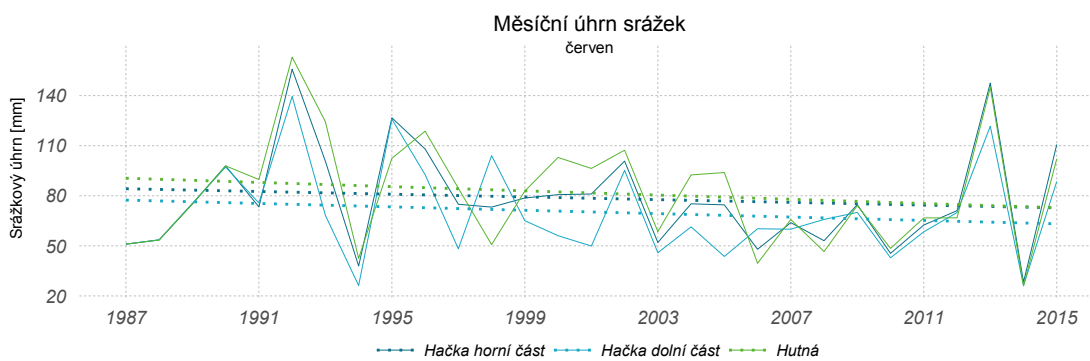
Zdroj: autor



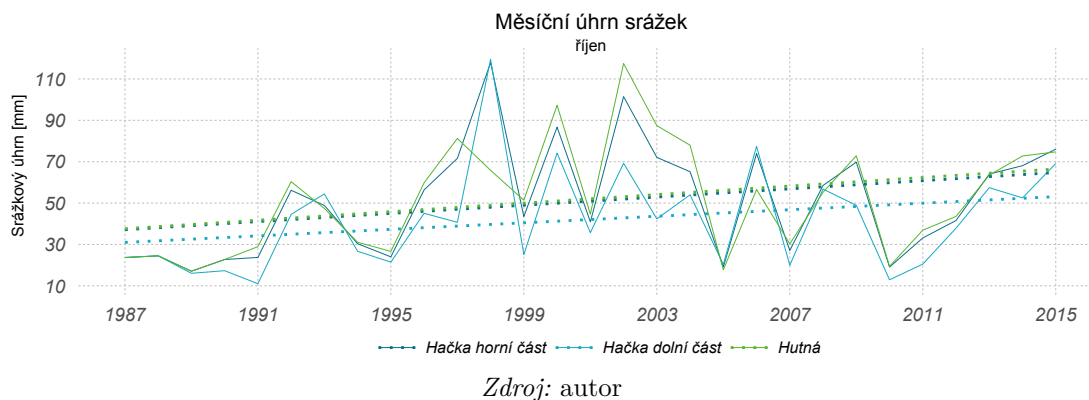
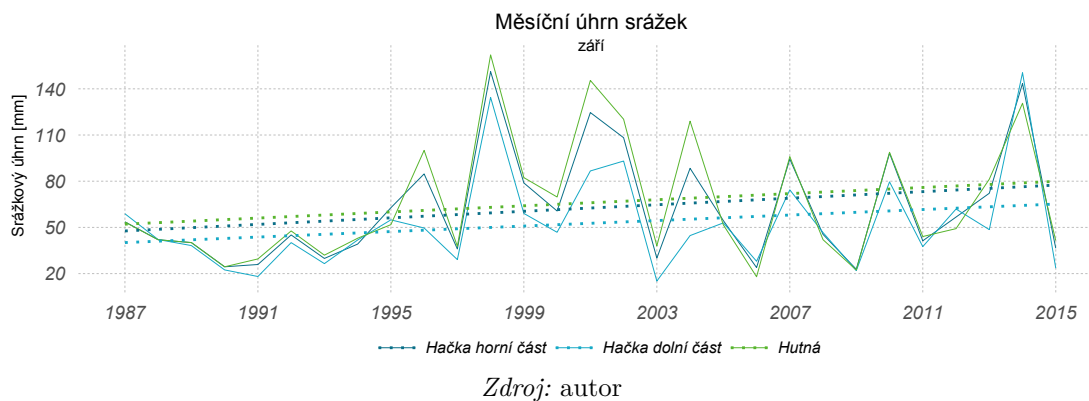
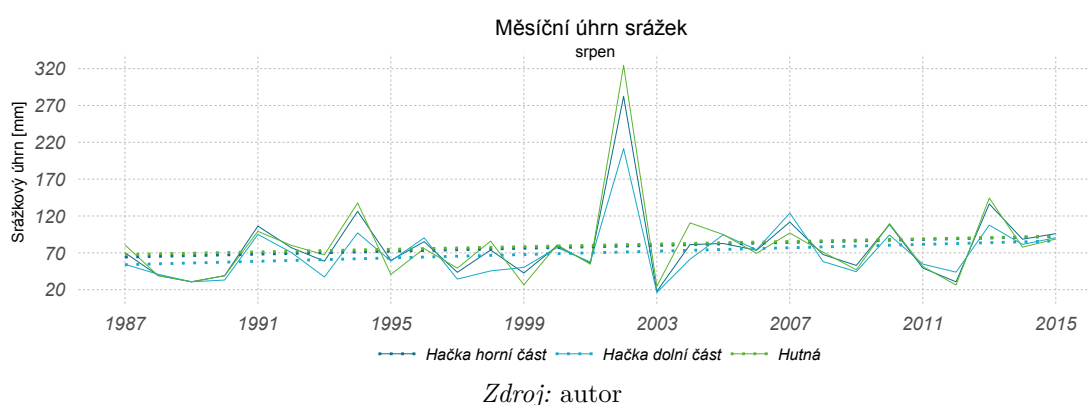
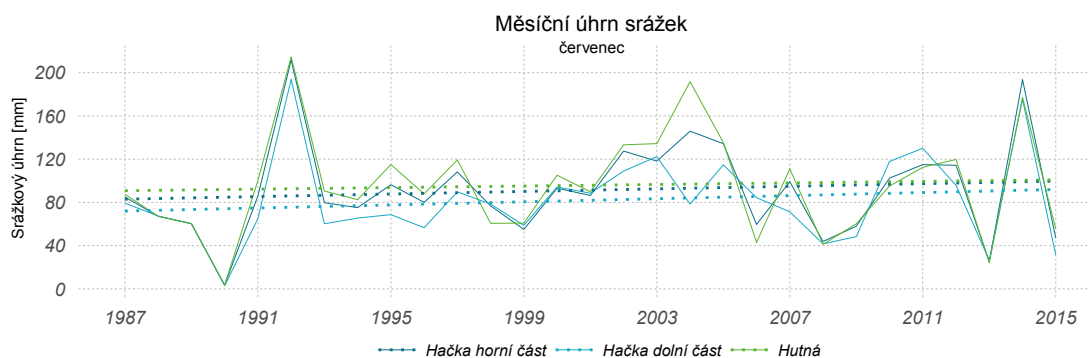
Zdroj: autor



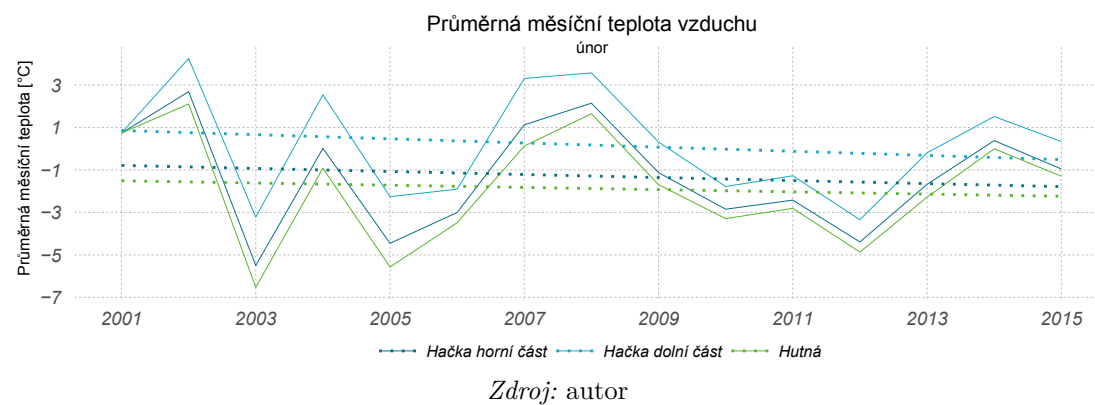
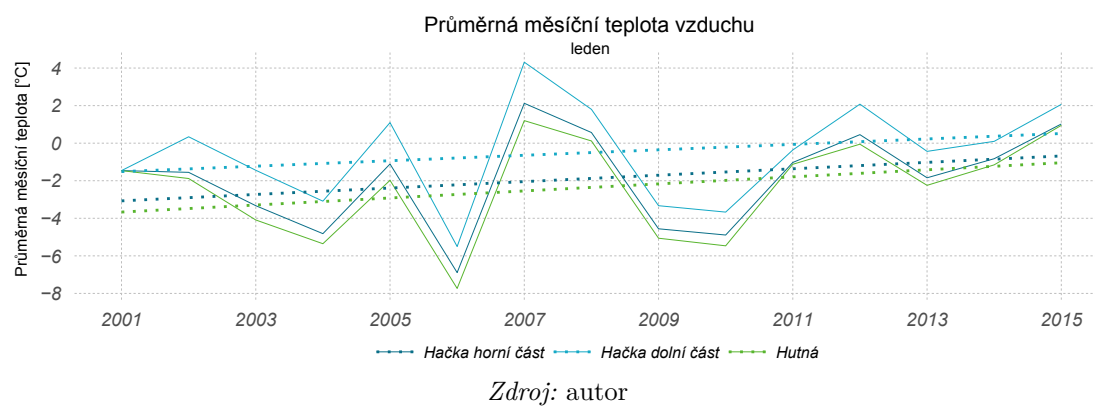
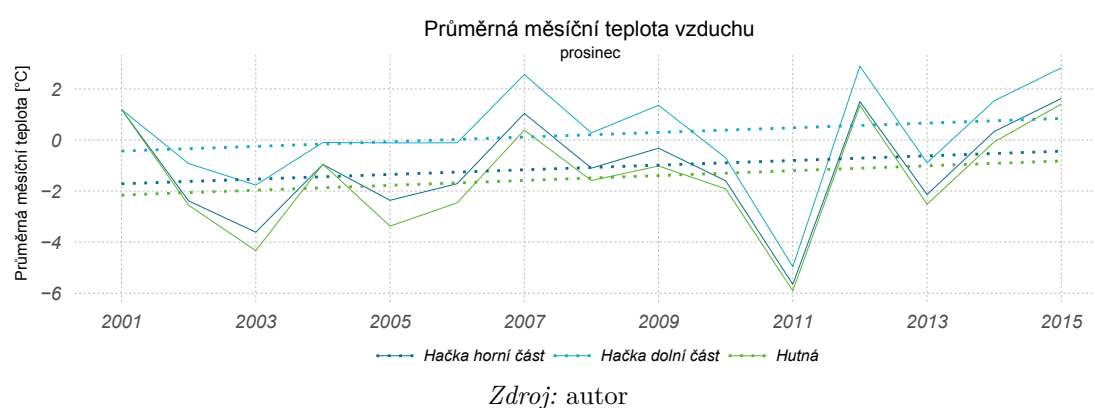
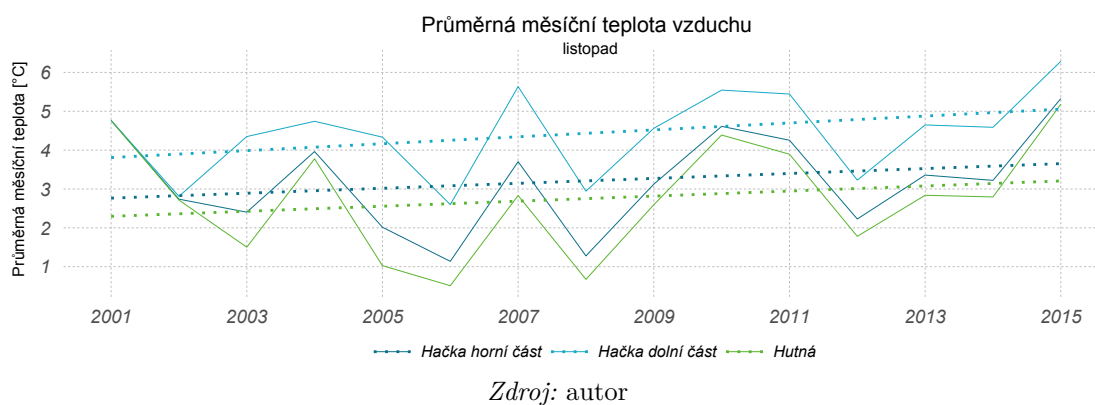
Zdroj: autor

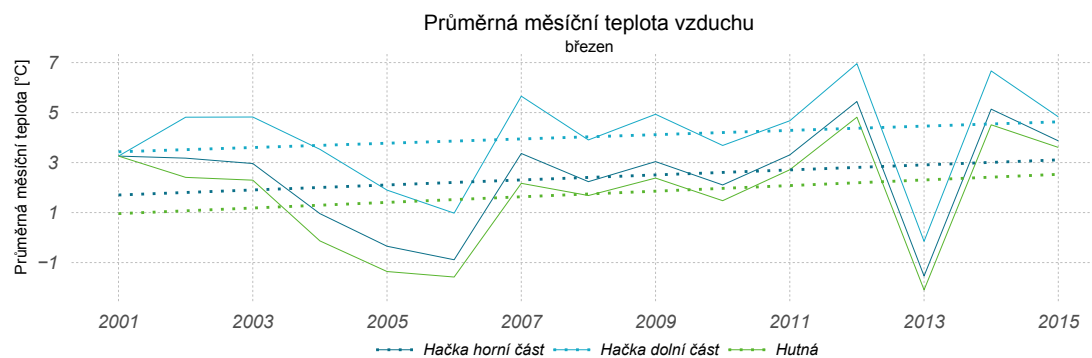


Zdroj: autor

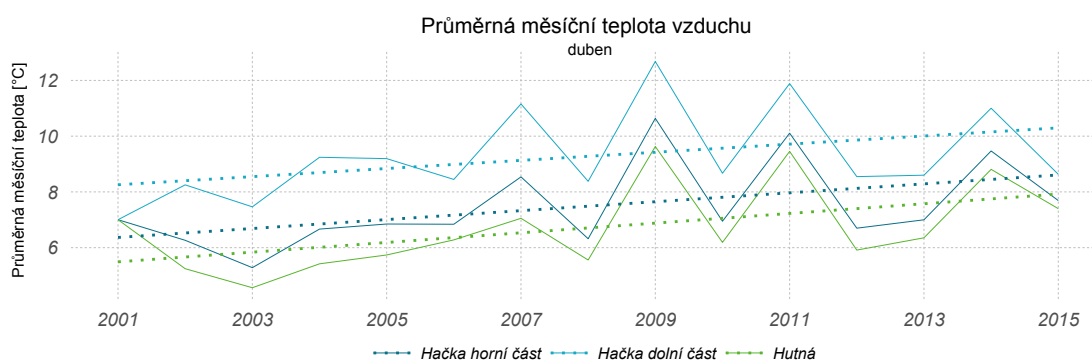


Příloha G: Průměrné měsíční teploty vzduchu

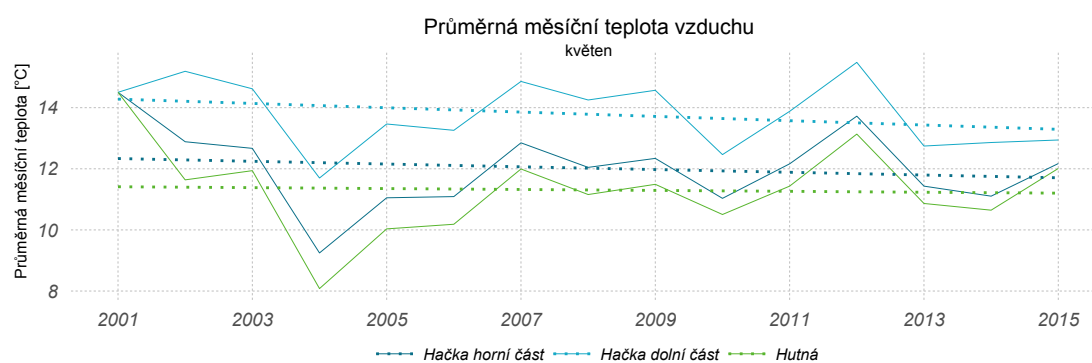




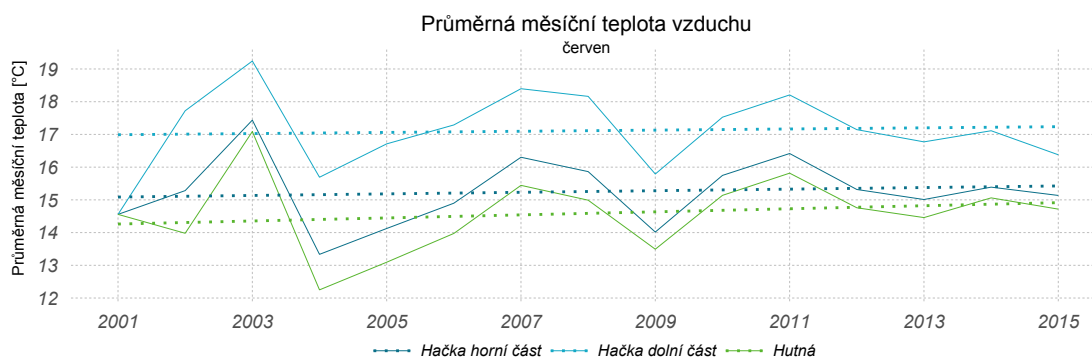
Zdroj: autor



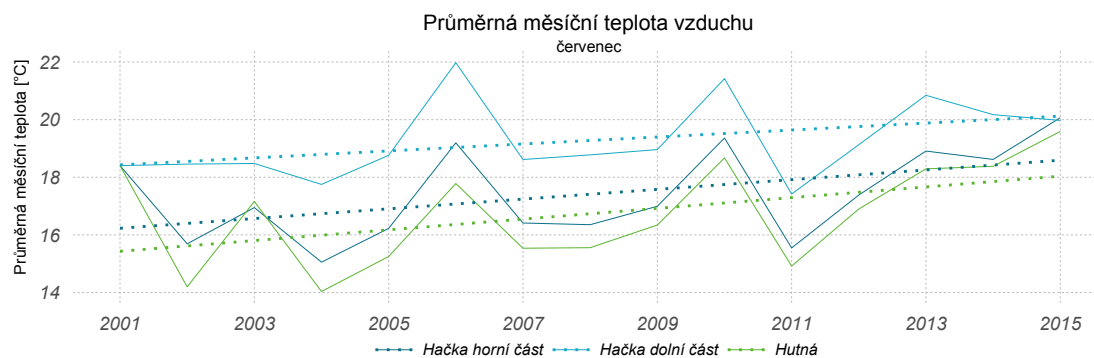
Zdroj: autor



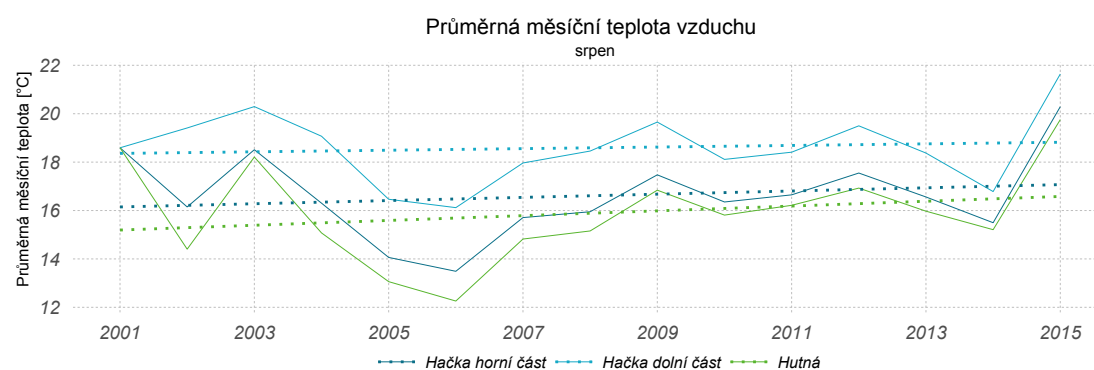
Zdroj: autor



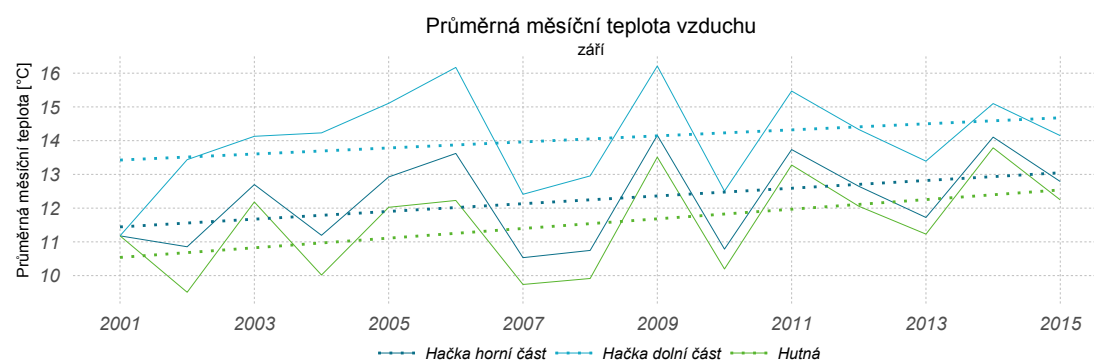
Zdroj: autor



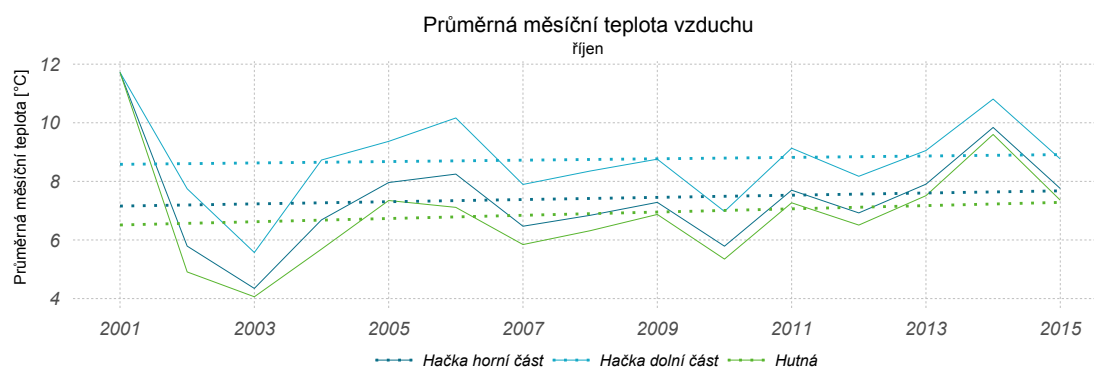
Zdroj: autor



Zdroj: autor



Zdroj: autor



Zdroj: autor

Příloha H: Průměrné měsíční odtoky z horní části povodí

Měsíční průměrné odtoky [mm] z horní části povodí dle jednotlivých scénářů

Měsíc	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Výchozí řada	18.34	23.45	29.94	36.41	39.69	23.59	18.59	10.89	8.96	7.81	6.39	7.83
2035-2065												
ARP	15.85	14.25	18.99	31.10	30.04	14.96	11.77	8.22	6.93	2.84	2.02	3.55
ARP_Hut	24.24	28.61	33.19	36.00	32.00	15.50	14.03	8.91	7.72	2.60	1.86	4.88
EH5	16.56	23.03	32.44	41.53	36.98	20.24	13.35	11.57	6.67	5.36	4.63	9.49
EH5_Hut	22.74	37.02	42.01	44.18	39.98	20.27	15.53	13.34	7.49	4.83	5.24	12.50
Q0	8.24	14.03	29.19	35.86	36.24	16.82	13.38	8.85	5.16	2.81	1.43	2.34
Q0_Hut	11.49	30.66	42.79	46.66	37.12	19.30	15.42	9.74	5.20	2.40	1.25	3.14
2068-2098												
ARP	11.20	10.41	23.17	31.50	28.19	11.89	12.69	8.47	4.91	2.22	1.59	3.10
ARP_Hut	17.77	26.06	35.66	39.88	30.23	14.13	15.62	9.50	5.07	1.87	1.37	4.66
EH5	22.09	27.60	42.79	47.15	48.66	23.07	15.20	11.30	5.96	4.43	4.96	7.41
EH5_Hut	31.15	41.13	52.69	52.22	52.01	24.74	17.13	12.20	6.23	3.80	6.26	10.09
Q0	11.03	17.11	32.35	45.27	40.45	18.62	12.94	6.68	4.71	2.34	1.37	1.82
Q0_Hut	16.05	35.57	47.29	55.45	43.07	20.95	15.00	7.15	4.15	2.18	1.37	2.56

Zdroj: autor

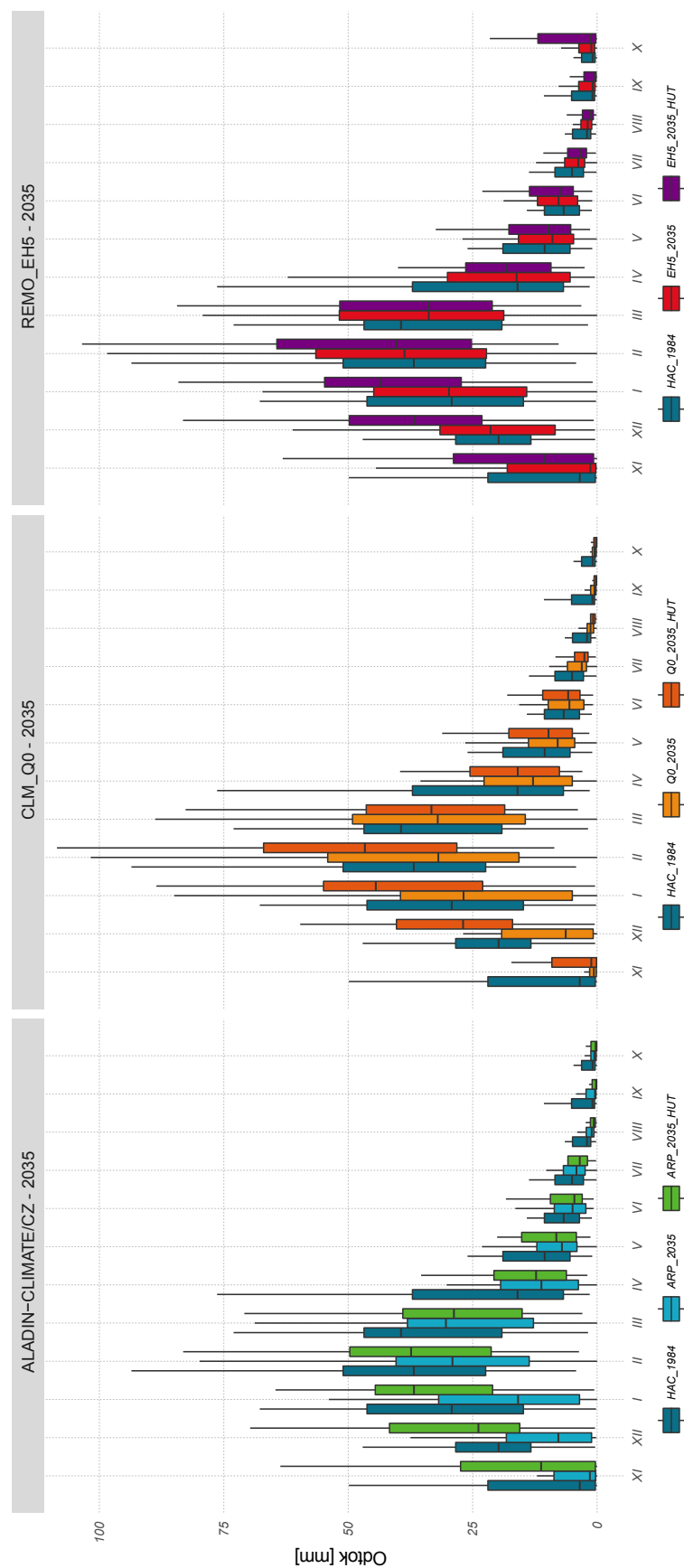
Příloha CH: Průměrné měsíční odtoky z dolní části povodí

Měsíční průměrné odtoky [mm] z horní části povodí dle jednotlivých scénářů

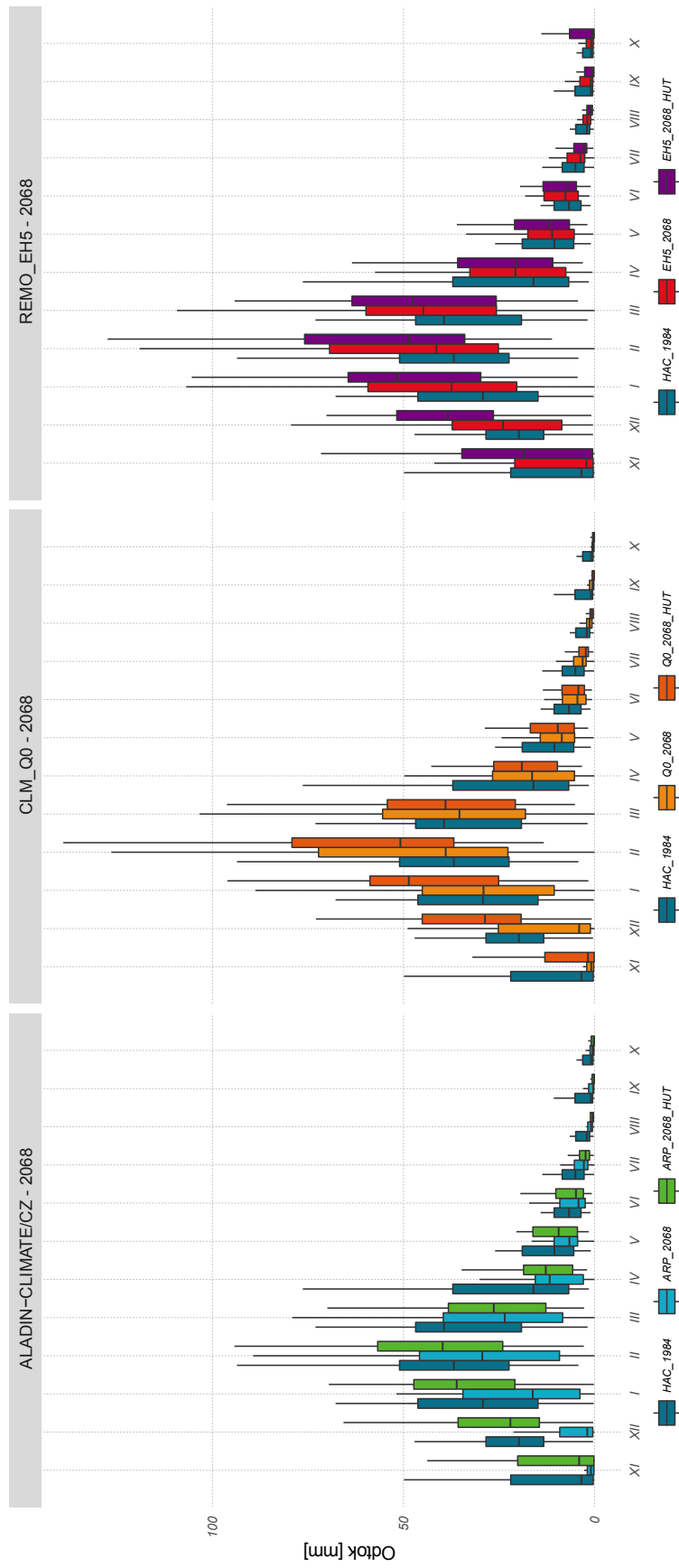
Měsíc	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Výchozí řada	11.92	13.35	20.45	23.80	29.66	15.34	15.71	9.80	7.47	4.77	5.43	5.64
2035-2065												
ARP_SC1	15.53	16.16	15.81	20.74	23.22	12.82	11.68	7.61	6.74	2.36	1.90	4.01
ARP_SC2	13.61	17.42	18.49	23.72	24.36	14.96	10.97	7.14	7.41	2.69	2.17	4.02
ARP_SC3	16.38	16.77	16.14	21.09	23.37	12.58	11.49	7.40	6.80	2.30	1.91	4.15
ARP_SCX1	16.06	16.49	16.29	21.59	22.12	11.55	10.88	7.37	6.67	2.57	2.12	4.17
ARP_SCX2	17.35	17.35	16.63	21.67	22.42	11.25	10.58	7.05	6.71	2.44	2.11	4.34
ARP_SCX3	17.53	17.01	16.43	21.51	22.11	10.83	10.94	7.37	6.87	2.48	2.11	4.41
EH5_SC1	13.46	21.28	25.07	27.23	24.91	15.07	12.85	10.52	7.59	2.82	3.93	8.80
EH5_SC2	13.27	20.76	27.37	30.18	25.68	17.45	12.62	9.12	7.48	3.26	3.98	8.56
EH5_SC3	14.02	22.24	25.30	27.21	24.96	14.77	12.64	10.26	7.59	2.73	4.00	9.13
EH5_SCX1	13.77	22.18	24.85	27.23	23.68	13.89	12.21	10.24	7.52	3.16	4.26	8.88
EH5_SCX2	14.61	23.52	25.82	27.52	23.34	13.63	11.94	9.88	7.48	3.03	4.35	9.34
EH5_SCX3	14.65	23.51	25.51	26.79	23.42	13.15	12.18	10.42	7.79	3.03	4.40	9.43
Q0_SC1	7.68	19.90	24.29	22.20	25.15	15.94	13.38	8.83	5.03	2.18	1.58	2.77
Q0_SC2	7.28	18.61	25.47	23.99	27.48	18.42	13.16	8.55	5.86	2.67	2.02	3.18
Q0_SC3	8.07	21.03	24.95	22.47	25.21	15.73	13.19	8.59	4.96	2.09	1.56	2.88
Q0_SCX1	7.98	20.75	24.73	21.92	24.03	14.69	12.71	8.69	5.22	2.50	1.86	3.03
Q0_SCX2	8.58	22.36	25.46	22.15	24.13	14.44	12.42	8.34	5.09	2.33	1.79	3.15
Q0_SCX3	8.57	22.41	25.43	21.90	23.72	14.08	12.74	8.67	5.13	2.35	1.81	3.17
2068-2098												
ARP_SC1	11.37	15.09	19.28	20.44	20.84	12.14	12.04	8.02	4.86	1.72	1.36	4.19
ARP_SC2	10.41	15.83	20.90	22.65	23.05	14.40	10.88	7.95	5.73	2.14	1.84	4.12
ARP_SC3	12.00	15.79	19.84	20.78	20.83	11.94	11.85	7.87	4.87	1.65	1.38	4.37
ARP_SCX1	11.81	15.59	19.77	20.70	19.46	11.19	11.34	7.91	4.96	1.98	1.62	4.35
ARP_SCX2	12.77	16.59	20.32	20.87	19.68	10.99	11.07	7.70	4.96	1.85	1.62	4.57
ARP_SCX3	12.79	16.35	20.24	20.72	19.09	10.61	11.60	7.92	5.00	1.87	1.58	4.65
EH5_SC1	20.37	24.52	31.37	29.33	35.04	17.31	14.34	10.17	6.94	2.72	4.66	7.25
EH5_SC2	18.46	24.07	32.22	31.62	35.25	21.11	14.97	9.70	7.68	3.38	4.56	7.70
EH5_SC3	21.33	25.42	31.95	29.47	35.28	16.87	14.03	9.81	6.95	2.59	4.76	7.43
EH5_SCX1	20.69	25.14	31.62	28.89	33.41	16.36	13.92	10.17	7.22	3.19	5.18	7.29
EH5_SCX2	22.07	26.43	32.35	29.01	33.72	15.86	13.48	9.66	7.18	2.99	5.31	7.48
EH5_SCX3	22.36	26.39	32.28	28.61	33.81	15.15	13.59	10.00	7.14	2.95	5.37	7.56
Q0_SC1	10.73	23.15	26.91	30.41	28.44	16.30	12.94	7.14	3.83	2.47	1.78	2.50
Q0_SC2	9.53	21.82	28.10	32.20	30.38	19.36	13.26	7.71	4.36	3.18	2.35	2.86
Q0_SC3	11.34	24.30	27.58	30.81	28.41	15.99	12.66	6.88	3.63	2.39	1.76	2.58
Q0_SCX1	11.31	23.76	27.27	30.31	26.75	15.15	12.42	7.23	4.12	2.81	2.08	2.75
Q0_SCX2	12.23	25.36	28.03	30.78	26.72	14.84	12.06	6.87	3.83	2.68	2.01	2.82
Q0_SCX3	12.17	25.54	27.99	30.74	26.21	14.33	12.22	6.91	3.88	2.67	2.03	2.86

Zdroj: autor

Příloha I: Krabicové grafy měsíčních odtoků - horní část povodí Hačky

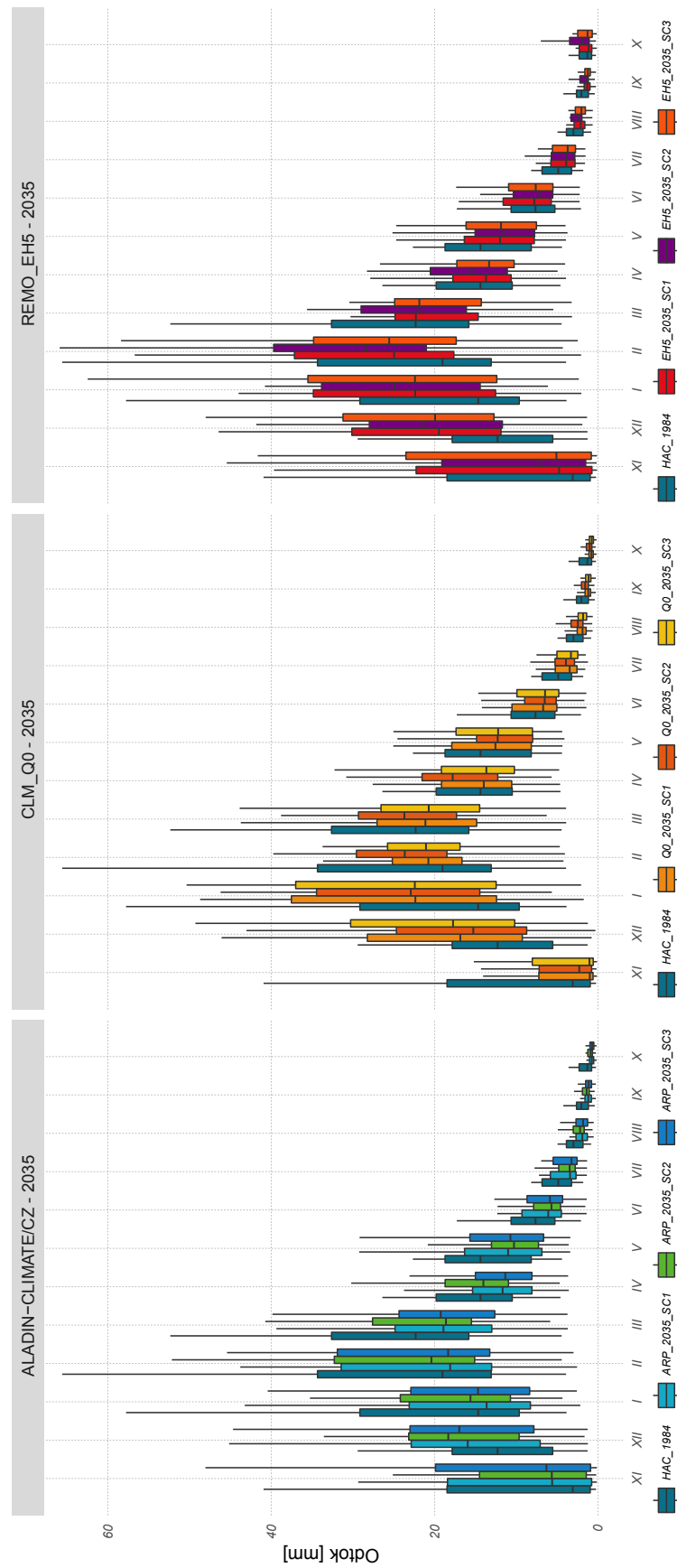


Zdroj: autor

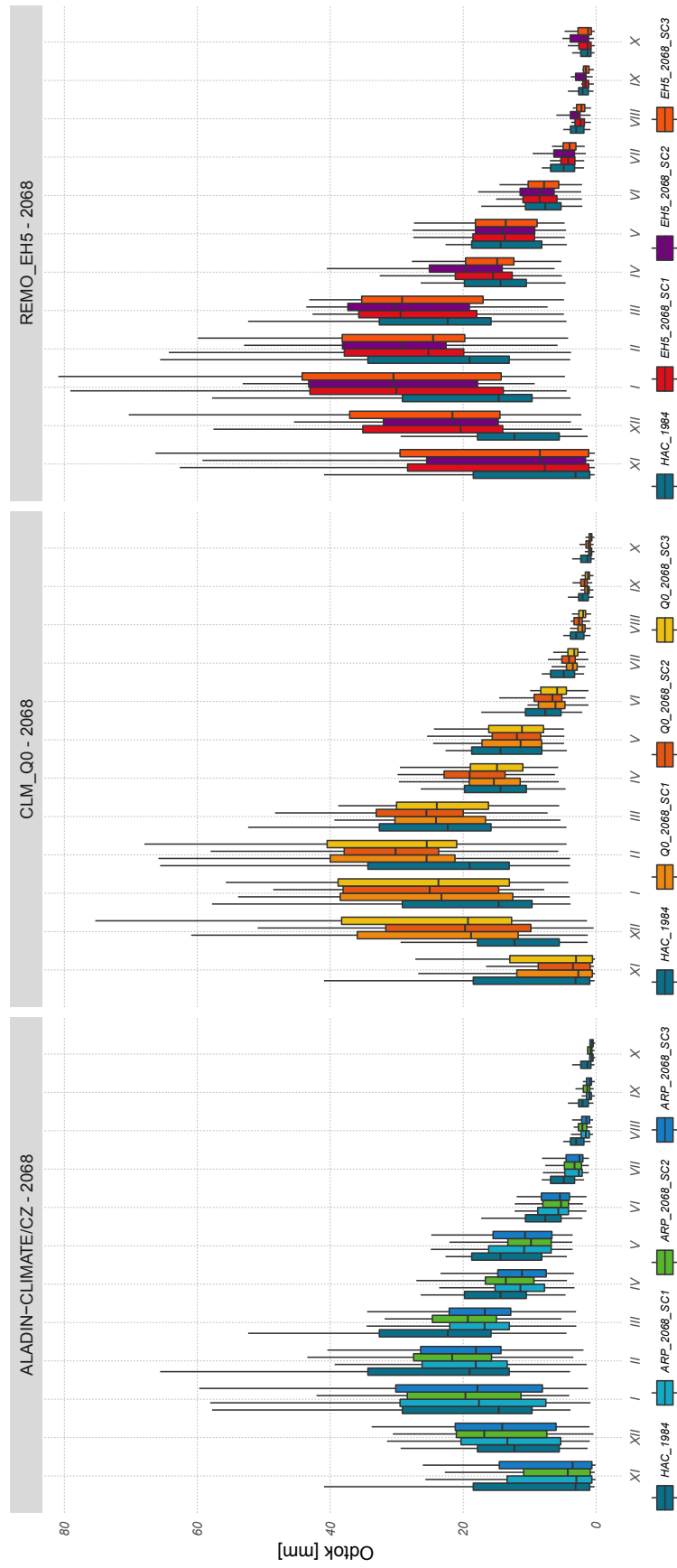


Zdroj: autor

Příloha J: Krabicové grafy měsíčních odtoků - dolní část povodí Hačky



Zdroj: autor



Zdroj: autor