

Česká zemědělská univerzita v Praze



Fakulta životního prostředí



Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Změny hydrologické bilance vlivem klimatické změny a možnosti adaptačních opatření

Climate change impacts on hydrological balance and options for adaptation

Dizertační práce

Vedoucí dizertační práce: Doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Doktorand: Ing. Adam Beran

2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem dizertační práci na téma Změny hydrologické bilance vlivem klimatické změny a možnosti adaptačních opatření vypracoval samostatně pod vedením Doc. Ing. Martina Hanela Ph.D.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 2. 4. 2019

Podpis:

Poděkování:

Děkuji mému školiteli Martinu Hanelovi za trpělivé vedení, rady a korekce, také děkuji kolegům z VÚV za spolupráci.

Děkuji rodině za podporu.

Abstrakt

Práce se zabývá vlivem klimatické změny na hydrologickou bilanci vybraných povodí i celé České republiky v posledních letech a jejím předpokládaným budoucím vývojem. Současně je řešen postup navrhování adaptačních opatření v sektoru vodního hospodářství, jež by dokázal eliminovat negativní dopady klimatické změny a pomohl zabezpečit dostatek vodních zdrojů. Z hlediska změn hydrologické bilance je detailně popsána problematika výparu z vodní hladiny, která je v posledních letech vlivem stoupajících teplot vzduchu stále aktuálnější. V práci byly odvozeny nové empirické vztahy pro výpočet výparu z vodní hladiny, jež zpřesňují celkovou hydrologickou bilanci povodí s vysokým zastoupením vodních ploch. Pro posouzení množství vodních zdrojů v České republice byla modelována hydrologická bilance modelem Bilan a jsou vyčísleny indexy definující oblasti, jež se potýkají s nedostatkem vody (jižní Morava, západní část Středočeského kraje). Modelování za pomoci scénářů klimatické změny ukazuje, že v budoucích časových horizontech se situace bude stále zhoršovat. Ve třetí části práce je podrobně popsána nová metodika pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody, jež byla vyvinuta v rámci dílčí studie pro Karlovarský kraj. Vyvinutá certifikovaná metodika poskytuje komplexní nástroj pro efektivní navrhování adaptačních opatření v oblastech potýkajících se sníženou dostupností vodních zdrojů.

Klíčová slova: hydrologická bilance, klimatická změna, model Bilan, scénáře klimatické změny, adaptační opatření, výpar z vodní hladiny

Abstract

The thesis describes the influence of climate change on the hydrological balance of selected river basins and the entire Czech Republic in recent years and their expected future development. From the point of view of changes in the hydrological balance, the issue of evaporation from the free water surface, which is due to rising air temperature becoming increasingly important water balance sink, is presented in detail. Within the thesis new empirical equations for evaporation from free water surface were derived. This improves the estimates of overall hydrological balance of the river basin with a high proportion of water bodies. To assess the amount of water resources in the Czech Republic, the hydrological balance was modelled by the Bilan model and the indices defining the areas facing water scarcity (South Moravia, the western part of the Central Bohemia Region) are quantified. Modelling with climate change scenarios shows that the situation will deteriorate in future time horizons. The third part of the thesis describes in detail the new methodology for designing adaptation measures to eliminate the effects of water scarcity, which was developed as part of a partial study for the Karlovy Vary district. Developed certified methodology provides a comprehensive tool for effectively designing adaptation measures in areas faced with reduced availability of water resources.

Key words: hydrological balance, climate change, model Bilan, climate change scenarios, adaptation measures, evaporation from the free water surface

Obsah

1	Úvod	8
2	Příspěvky autora	11
3	Modelování klimatické změny a návrh adaptačních opatření	14
3.1	Hydrologická bilance	16
3.2	Modelování dopadů klimatických změn na hydrologickou bilanci	18
3.2.1	Metody pro tvorbu scénářů změn klimatu.....	20
3.3	Změny klimatu v ČR.....	22
3.4	Generel vodního hospodářství krajiny České republiky	24
3.5	Adaptace.....	27
3.5.1	Adaptační opatření v ploše povodí.....	30
3.5.2	Adaptační opatření na vodních tocích a nivách	31
4	Metodika	36
4.1	Hydrologický model Bilan	36
4.1.1	Optimalizace modelu.....	37
4.1.2	Globální optimalizační algoritmus – SCDE.....	39
4.1.3	Váhy základního odtoku	39
4.1.4	Volné parametry modelu	39
4.2	Vyhodnocení trendů v pozorovaných řadách	40
4.3	Výparoměrná stanice Hlasivo	41
4.4	Scénáře změny klimatu, regionální klimatické modely	43
4.5	Prostorové měřítko	44
4.6	Modelování vodohospodářské bilance	44
4.6.1	Modelování zásobní funkce vodohospodářských soustav	45
4.6.2	Vyhodnocení zabezpečení požadavků na zdroje.....	48
4.6.3	Zajištění minimálních zůstatkových průtoků a stupeň ovlivnění hydrologického režimu 48	
4.6.4	Nejistoty vyhodnocení.....	48
4.6.5	Specifikace požadavků na odběry vody.....	49
4.6.6	Množství vypouštěných vod a srážkové vody	49
4.6.7	Vliv odběrů podzemní vody na povrchové vody	50
4.6.8	Podrobnost řešení	50
5	Zpřesnění metod odhadu výparu	52

5.1	Testování vztahu pro výpočet potenciální evapotranspirace pro možnost implementace v hydrologickém modelu Bilan	52
5.1.1	Empirický odhad výparu na základě vegetačních zón	53
5.1.2	Odvození výparu na základě teploty	54
5.1.3	Porovnání metod	55
5.2	Odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny a identifikace trendů ve vývoji měřených veličin ve výparoměrné stanici Hlasivo	60
5.2.1	Statistická analýza pozorovaných řad výparu a dalších meteorologických veličin ve stanici Hlasivo	60
5.2.2	Testování trendů v řadách průměrných hodnot výparu změřeného srovnávacím výparoměrem	62
5.2.3	Odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny na základě dat změřených srovnávacím výparoměrem	64
5.3	Aplikace odvozených rovnic pro výpočet výparu z volné hladiny	68
5.3.1	Porovnání měřeného výparu s výparem vypočítaným	68
5.3.2	Vliv rybníků na průtoky v období hydrologického sucha	72
5.4	Souhrn	74
6	Odhad dopadů klimatické změny v měřítku České republiky	75
6.1	Výpočet indexů určujících míru zranitelnosti povodí III. řádu z hlediska nedostatku vodních zdrojů 75	
6.1.1	Indexy zranitelnosti území nedostatkem vody	75
6.1.2	Výsledky modelování	76
6.2	Odvozování dotace podzemních vod na 53 hydrogeologických rajonech ČR	81
6.2.1	Příprava a zpracování meteorologických a hydrologických dat pro hydrologické modely 82	
6.2.2	Odvození základního odtoku	83
6.2.3	Simulace pro předpokládaný vývoj klimatu	84
6.2.4	Souhrn modelování pro 53 HGR	84
6.3	Modelování hydrologické bilance na území HGR 4231 Křída Ústecké synklinály	88
6.3.1	Popis hydrogeologického rajonu 4231 – Křída ústecké synklinály	88
6.3.2	Popis sady povodí a dostupných dat	89
6.3.3	Informace o míře oprav průtoků o užívání	90
6.3.4	Hydrologický model – postup a výsledky	92
6.3.5	Souhrnné charakteristiky hydrologické bilance	98
6.3.6	Posouzení vývoje průměrných veličin hydrologické bilance	99
6.3.7	Posouzení možných dopadů změn klimatu	102

6.4	Souhrn	103
7	Adaptační opatření.....	105
7.1	Změny hydrologické bilance způsobené klimatickými změnami na území Karlovarského kraje	105
7.1.1	Zájmové území - Karlovarský kraj.....	105
7.1.2	Zájmové území.....	107
7.1.3	Výsledky hydrologického modelování.....	109
7.2	Možná adaptační opatření na území Karlovarského kraje.....	117
7.2.1	Modelování potřeb a zdrojů vodohospodářské soustavy	117
7.2.2	Vymezení vodohospodářské soustavy a možné návrhy opatření	118
7.3	Postup navrhování adaptačních opatření	121
7.3.1	Definování požadavků na využití vodních zdrojů	122
7.3.2	Stanovení dostupnosti vodních zdrojů	122
7.3.3	Výběr adaptačních opatření	125
7.4	Souhrn	127
8	Diskuze.....	129
9	Závěr	132
10	Seznam zkratk.....	134
11	Seznam literatury a použitých zdrojů.....	135
12	Příloha 1.....	142

1 Úvod

V současné době se do popředí zájmu dostává klimatická změna, jejíž dopady mají dalekosáhlý vliv na různé oblasti lidských činností. Její poznání je prioritou vědců na celém světě, Českou republiku nevyjímaje. Vodní hospodářství České republiky, jež je závislé výlučně na srážkových vodách, je z tohoto hlediska dopady klimatické změny významně ohroženo a může být citelně zasaženo. Změny klimatických veličin mohou způsobovat projevy jako povodně nebo sucho. Tyto extrémy mají negativní vliv na zásobování obyvatelstva, průmyslu a energetiky vodou a tím pádem se týkají všech. Vzhledem k závažnosti tématu je zapotřebí v první řadě změny v hydrologickém cyklu probíhající vlivem klimatické změny poznat a odhadnout jejich vliv. Aktuálně se jako největší problém jeví zvyšování průměrné teploty vzduchu, které má vliv na zvýšení územního výparu a výparu z vodní plochy. Tyto ztráty vody z hydrologického systému nejsou dostatečně nahrazovány srážkovými úhrny, jež jsou na území České republiky nerovnoměrně rozloženy a tím pádem se v České republice vyskytují oblasti, kde celkový výpar převyšuje srážky a dochází k projevům sucha. Současně během poznávání dopadů klimatické změny je zapotřebí na její extrémní projevy reagovat buď přizpůsobením se, nebo bojovat za pomoci navrhování adaptačních opatření, jež dokáží negativní dopady klimatické změny eliminovat, nebo jim zabránit.

Základním dokumentem platným pro Českou republiku, jehož cílem je zmírnit dopady změny klimatu přizpůsobením se této změně v co největší míře a zachovat dobré životní podmínky je Národní akční plán na změnu klimatu. Jeho východiskem je Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR, která byla schválena usnesením Vlády ČR č. 861 ze dne 26. října 2015. Stejně významným podkladem pro zpracování Akčního plánu je Komplexní studie dopadů, zranitelnosti a zdrojů rizik souvisejících se změnou klimatu ČR, jež byla zpracována na základě zadání MŽP v roce 2015. Komplexní studie identifikuje hlavní projevy změny klimatu pro území ČR – dlouhodobé sucho, povodně a přívalové povodně, zvyšování teplot, extrémní meteorologické jevy a přírodní požáry. V souladu se Strategií přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR je Konceptce ochrany před následky sucha pro území ČR, jež rozebírá problematiku sucha a navrhuje možná východiska řešení návrhem opatření na ochranu před následky sucha a nedostatku vody.

Dizertační práce se věnuje popisu změn v členech hydrologické bilance na území České republiky, ke kterým dochází vlivem postupu klimatických změn a jež způsobují (nebo v budoucím časovém horizontu mohou způsobovat) problémy projevující se nedostatkem vody. Zároveň je v práci popsán postup navrhování adaptačních opatření, jež mají zabránit, či snížit dopady nedostatku vody.

Dizertační práce je syntézou výsledků autorovi výzkumné činnosti z let 2011 až 2019 v zaměstnání na Oddělení hydrologie Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v.v.i. (VÚV TGM, v.v.i.) a při studiu na Katedře vodního hospodářství a environmentálního modelování Fakulty životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze a zaměřené na vyhodnocení stavu hydrologické bilance v České republice, problémy spojené s nedostatkem vody a suchem, zohlednění dopadů klimatických změn na hydrologickou bilanci při managementu vodních zdrojů a proces navrhování adaptačních opatření na tyto změny.

Hlavními cíli práce jsou:

- popsat problematiku výparu z vodní plochy v souvislosti s klimatickou změnou a jejím vlivem na celkovou hydrologickou bilanci. Analyzovat změny v pozorovaných hodnotách výparu z vodní hladiny ve výparoměrné stanici Hlasivo, se způsoby aplikace a odvozování empirických rovnic pro výpočet výparu v podmínkách ČR.
- odhadnout dopady klimatické změny na jednotlivé složky hydrologické bilance ČR a identifikovat území ohrožená z hlediska nedostatku vodních zdrojů.
- vytvořit metodický postup pro navrhování adaptačních opatření vedoucích k eliminaci negativních dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu a ilustrovat tento postup na případové studii.

Úvodní část dizertační práce podává informace o dopadech klimatické změny na hydrologickou bilanci v České republice, postupech modelování těchto dopadů a adaptačních opatření k jejich zmírnění. Následuje syntéza původních prací autora zabývajících se inovací nástrojů a metod používaných pro modelování hydrologické bilance v České republice, aktualizací odhadů dopadů klimatické změny a konečně tvorbou metodiky pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody.

V souvislosti se změnami hydrologické bilance byl věnován prostor zejména problematice výparu z volné vodní hladiny a potenciální evapotranspirace, jež v posledních letech vlivem klimatické změny nabývá na důležitosti vzhledem ke zvyšující se teplotě vzduchu. S tím souvisí potřeba aktualizace metod výpočtu evapotranspirace pro využití v hydrologickém modelování. Za tímto účelem bylo provedeno testování metod výpočtu potenciální evapotranspirace a vybraný postup výpočtu byl implementován do struktury hydrologického modelu Bilan.

Pomocí takto aktualizované verze modelu Bilan byla vyhodnocena zranitelnost České republiky z hlediska nedostatku vody. Pro povodí III. řádu celé České republiky byla modelována hydrologická bilance pro období 1980-2010 a dále byl posouzen budoucí stav za využití scénářových klimatických dat pro několik časových období v průběhu 21. století. V této souvislosti bylo provedeno i modelování hydrologické bilance 53 hydrogeologických rajonů na území ČR s následným výpočtem dotace podzemních vod.

Pro území Karlovarského kraje byly odhadnuty změny hydrologické bilance a byla navržena konkrétní adaptační opatření zohledňující zjištěné problémy se zajištěním dostatku vodních zdrojů.

Závěr práce se věnuje zobecnění procesu navrhování adaptačních opatření pro eliminaci dopadů nedostatku vody. Tato syntéza je zároveň součástí Metodiky pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody (Beran a kol., 2019b), jež byla certifikována Ministerstvem Zemědělství ČR. Metodika představuje nástroj pro posouzení a doporučení výběru adaptačních opatření ke snížení nepříznivých účinků vlivu záporné vodohospodářské bilance na ploše zájmového území s uvážením očekávaných dopadů klimatických změn. Navržená opatření přispívají ke správnému hospodaření s povrchovými a

podzemními vodami, k udržitelnému užívání vody pro zajištění vodohospodářských služeb a ke zlepšování vodních poměrů. Metodika přispívá k zajištění dostatečné efektivity vybraných skupin opatření s ohledem na aktuální hydrologické podmínky i s ohledem na očekávané dopady klimatické změny. Využití sestává z postupného aplikování následujících kroků: definování požadavků na využití vodních zdrojů, stanovení dostupných vodních zdrojů, modelování vodohospodářské bilance a výběr vhodných adaptačních opatření. Cílem metodiky je poskytnout ucelený metodický postup pro navrhování adaptačních opatření potřebných při řešení problémů s nedostatkem vodních zdrojů na zájmovém území.

2 Příspěvky autora

J_{IMP} – článek v recenzovaném odborném periodiku, který je obsažen v databázi Web of Science

Beran, A., Hanel, M., Nesládková, M., Vizina, A., Kožíň, R. (2019) Climate change impacts on water balance in Western Bohemia and options for adaptation. Water Science and Technology: Water Supply, (2019) 19 (1): 323-335. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.080>

J_{SC} – článek v recenzovaném odborném periodiku, který je obsažen v databázi SCOPUS

Beran, A., Hanel, M., Nesládková, M., Vizina, A. (2016) Increasing water resources availability under climate change, Procedia Engineering, Volume 162, 2016, Pages 448-454, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.087>

Hanel, M., Kašpárek, L., Peláková, M., Beran, A., Vizina, A. (2013). Evaluation of changes in deficit volumes: support for protection of localities suitable for construction of reservoirs. Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management, edited by: Schumann, A., IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire, UK, 187-192.

J_{REC} – recenzovaný článek

Beran, A., Horáček, S. a Hanel, M. (2011) Zjednodušení metody výpočtu potenciální evapotranspirace v nové verzi modelu Bilan. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 53/III, příloha Vodního hospodářství č. 11/2011 s. 15 – 18. ISSN 0322 – 8916.

Beran, A., Vizina, A. (2013) Odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny a identifikace trendů ve vývoji měřených veličin ve výparoměrné stanici Hlasivo. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2013, roč. 55, č. 3. ISSN: 0322-8916.

Beran, A., Hanel, M., Peláková, M. (2014) Výpočet velikosti dotace podzemních vod za pomoci hydrologického modelování na vybraných hydrogeologických rajonech ČR. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2014, roč. 56, č. 5, s. 4-7. ISSN: 0322-8916.

Beran, A., Hanel, M. (2015) Definování zranitelných oblastí z hlediska nedostatku vody na území České republiky. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2015, roč. 57, č. 4-5, s. 21-24. ISSN: 0322-8916.

Beran, A. (2015) Pozorování výparu a dalších meteorologických veličin ve stanici Hlasivo. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 57, č. 4-5, ISSN 0322-8916. Informativní článek.

Beran, A., Hanel, M., Nesládková, M. (2016) Změny hydrologické bilance způsobené vlivem klimatických změn na území Karlovarského kraje. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, roč. 58, č. 5, str. 20–25. ISSN 0322-8916.

Hanel, M., Kožíň, R., Beran, A., Mrkvičková, M. (2011) Validace generátoru srážek a teplot pro simulaci hydrologické bilance na povodí Chrudimky, Vodohospodářské technicko-ekonomické informace 53(Mimořádné číslo 3), s. 12-15.

Beran, A., Němejcová, D., Straka, M., Krása, J. a David, V. Monitoring na povodí pro vyhodnocení vlivu realizací přírodně blízkých opatření. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2018, roč. 60, č. 5, str. 46–51. ISSN 0322-8916.

N_{MET} – certifikovaná metodika

Beran, A., Kašpárek, L., Vizina, A., Vyskoč, P., Svejkovský, V., Pail, T., Poledníček, P., Nesládková, M. (2019) Metodika pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody. Certifikovaná metodika. Ministerstvo zemědělství ČR.

Příspěvky na konferenci (prezentace autorem)

Beran A., Kožíň R., Melišová E., Fialová P. (2018) Derivation of regression equations for calculation of evaporation from a free water surface and identification of trends in measured variables in Hlasivo station. 17th Biennial Conference ERB2018, Innovative monitoring techniques and modelling approaches for analysing hydrological processes in small basins, Darmstadt / Germany, September 11 - 14, 2018, Book of Abstracts.

Beran A., Hanel M., Nesládková M., Vizina A., Vyskoč P. (2018) Changes in water balance in Western Bohemia and options for adaptation. Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-12878, Wien / Austria, April 8, 2018.

Beran A., Vyskoč, P., Hanel M., Vizina A., Nesládková M., Kožíň, R., Melišová, E. (2017) Water management system modelling in the Western Bohemia. International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment, Newcastle upon Tyne / United Kingdom, July 26-28, 2017.

Beran A., Hanel M., Nesládková M., Vizina A. (2016) Increasing water resources availability under climate change. International Conference on Efficient & Sustainable Water Systems Management toward Worth Living Development, 2nd EWaS 2016, Chania / Greece, June 1-4, 2016.

Kašpárek, L., Beran, A., Pistulka, J. (2016) O výparu z vodní hladiny v roce 2015. Seminář Adolfa Patery 2016 – Extrémní hydrologické jevy v povodích, Praha. Česká republika, 16. listopadu 2016.

Beran, A., Hanel, M. (2015) Modelování dotace podzemních vod za pomoci hydrologického koncepčního modelu Bilan na vybraných hydrogeologických rajonech ČR. HYDROMODE 2015, Kostelec nad Černými lesy / Česká republika, 14. - 15. 9. 2015.

Hanel M., Kašpárek L., Peláková M., Beran A., Vizina A. (2013) Evaluation of changes in deficit volumes: support for protection of localities suitable for construction of reservoirs. Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management Proceedings of H09, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg / Sweden, July 22, 2013.

Odborné zprávy

Beran, A., Vyskoč, P., Filippi, R., Hlušičková, E., a kol. (2019) Zajištění dostupnosti vodních zdrojů ve vybraných oblastech Karlovarského kraje – Pilotní řešení zájmových oblastí. Závěrečná zpráva projektu QJ152031, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Beran, A., Kašpárek, L., Vizina, A. (2018) Model průběhu meteorologických veličin pro oblast jezera Most do roku 2050. Výzkumná zpráva, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Beran, A., Vizina, A., Kašpárek, J., Hlom, J., Němejcová, D., Smelík, L., Tesař, P., Mičaník, T., Sýkora, F., Kristová, A. (2018) Činnosti k podpoře výkonu státní správy v problematice sucha – Závěrečná zpráva. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Datel, J. V., Beran, A., Jäger, O. (2016) Detailní matematický model proudění podzemní vody a transportu látek v lokalitě Dukovany – Hydrologická bilance užšího zájmového území. Závěrečná zpráva, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Beran, A., Datel, J. V. (2016) Posouzení současného a budoucího stavu toku Bečva v profilu ValMez z hlediska extrémních průtoků. Výzkumná zpráva, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Hanel, M., Beran, A., Kašpárek, L. (2015) Hydrologická bilance – Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Hanel, M., Beran, A., Kašpárek, L. (2015) Scénáře změny klimatu – Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Beran, A., Datel, J. V. (2015) Hydrologické aspekty intenzifikace výroby DPG (difenilguanidu) v areálu Kolín. Výzkumná zpráva, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Kašpárek, L., Hanel, M., Beran, A., Peláková, M., Hrdinka, T., Datel, J. V. (2014) Rebilance zásob podzemních vod Aktivita 6 Hydrologické modely. 53 x zpráva pro jednotlivé HGR. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Mrkvičková, M., Kožíň, R., Hanel, M., Beran, A., Brabec, J., Novický, O., Fridrichová, R., (2012) Navrhování adaptačních opatření pro snižování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Beran, A., Kašpárek, L., Poláková, A., Kašpárek, J., Lochovský, P. (2012) Studie možnosti odběru povrchových vod v povodí Úpy. Závěrečná zpráva, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

3 Modelování klimatické změny a návrh adaptačních opatření

Voda je nejdůležitější přírodní zdroj na světě, který nelze ničím nahradit. Lidé vodu spotřebovávají a zároveň jí současně musí chránit, jelikož by bez ní nemohli existovat, navíc musí chránit sami sebe před negativními účinky dopadů klimatických změn na vodní režim, jako jsou povodně a na druhé straně sucho. Tento vztah mezi lidmi a vodou je charakterizován odlišnými požadavky na různých místech Země a vyvíjí se s časem a v rámci společnosti (Brooks a kol., 2013).

Různé úrovně vývoje lidské společnosti byly vždy silně propojeny s problémy spojenými s vodou. V historii každého státu lze vyzorovat postupný vývoj v oblasti využívání vodních zdrojů od nejjednodušších způsobů základního využití vody z řek a jezer (pití, mytí...) k nejintenzivnějším přeměnám jejich hydraulických vlastností a režimů za pomoci různých hydraulických struktur, jako jsou závlahové systémy, odvodňovací kanály, vodní elektrárny, obrovské vodní přehrady a další vodní díla. Ekonomický vývoj a zvyšování požadavků na životní standard obecně navyšují nároky na spotřebu vody. Vzhledem k omezenému množství vody na planetě a její zranitelnosti, je voda stále omezujícím faktorem pro společensko-ekonomický růst mnoha států na celém světě. Výsledky mnoha studií hodnotících vodní zdroje indikují, že v následujících dekadách budou problémy se zásobováním vodou akutní pro většinu populace světa, zejména se zhoršením vlivu klimatických změn (Oki a kol., 2006).

Hydrologie je důležitá část věd o Zemi, protože voda je jedním z nejdůležitějších stavebních prvků celého globálního klimatického systému. Koloběh vody zahrnuje pohyb nejen vody, ale i ohromného množství sedimentů a nutrientů ze zemského povrchu do oceánu. Vodní zdroje jsou úzce propojeny s energetickou, průmyslovou i zemědělskou výrobou. Čistá voda je samozřejmě nepostradatelná pro život a pro celkové zdraví populace. Přístup k pitné vodě je klíčovou potřebou pro udržitelný rozvoj. V minulosti byly problémy s vodou pouze lokální, nicméně vzhledem k intenzifikaci mezinárodní spolupráce v posledních dekadách a globalizaci, je v současné době nutné problémy s dostupností vody řešit v celosvětovém měřítku. Sdílení hydrologických informací mezi sousedními státy dopomáhá snižovat riziko vzniku konfliktů mezi zeměmi.

Vědecký zájem o globální hydrologii se zvýšil zejména od 80. let 20. století, kdy se do povědomí dostaly informace o probíhajících globálních problémech spojených s antropogenními vlivy, projevujícími se pozorovanými klimatickými změnami. Důraz na hodnocení globálních vodních zdrojů byl zvyšován od konce 90. let 20. století a na začátku 21. století se už bavíme o hrozící globální vodní krizi. Již řadu let je potřeba hodnotit globální vodní zdroje nejen z důvodu možnosti předvídat oblasti světa, kde hrozí problémy s nedostatkem vodních zdrojů, nicméně také aby bylo možné potenciálně ohrožené státy varovat, aby mohly být zavedeny příslušná adaptační/mitigační opatření. Základní porozumění globálnímu hydrologickému cyklu je klíčové pro dosažení efektivních návrhů pro přípravu se na globální problémy s vodou v budoucnosti (Musy a Higy, 2011).

Hlavním problémem mnoha regionů světa je v posledních letech zvyšující se spotřeba vody na úkor snižující se dostupnosti vodních zdrojů. Na tento vývoj je zapotřebí reagovat urgentními opatřeními, jež zlepší efektivitu využití vody a dokáží tím ochránit globální vodní

zdroje. Je zapotřebí snížit spotřebu vody v každém odvětví globálního hospodářství a co nejvíce se přiblížit potřebám pro udržitelné vodní hospodářství.

Nedostatek vodních zdrojů může být způsoben buď přírodními poměry, nebo nadměrným užíváním. V budoucím časovém horizontu lze spíše očekávat změny přírodních poměrů, než zásadní změny ve velikosti užívání, nicméně pro některá odvětví může klimatická změna znamenat podstatné zvýšení nároků na vodní zdroje (např. závlahy, chladicí voda).

Následující opatření (Shiklomanov a Rodda, 2003) byly navrženy pro zvýšení dostupnosti vodních zdrojů a jejich efektivní ochranu:

- Dlouhodobá a sezónní kontrola odtoku z povodí – Vzhledem k proměnnému rozložení aktuálního odtoku v roce jsou vhodným řešením akumulací vodní nádrže, které dokáží vyrovnávat deficity a zabezpečit vodu pro potřebné odběry. Ideálně by měly být nádrže v horských oblastech, aby byly eliminovány ztráty výparem z vodní hladiny.
- Využití přírodních zásobáren vody – Jedná se např. o využití zvodní podzemní vody zhlubokých vrtů v aridních a semi-aridních oblastech.
- Odsolování – Využití procesu odsolení mořských a brakických vod. Toto opatření je možné skutečně zavést pouze v oblastech, kde je vážný nedostatek vodních zdrojů, vzhledem k jeho energetické (ekonomické) náročnosti.
- Převody vody – Je možné převádět vody mezi povodími pro posílení deficitního vodního zdroje v jiné oblasti.

Shiklomanov a Rodda (2003) dále uvádějí, že je možné využít průmyslového navýšení srážek, za jehož pomoci je ovšem možné zvýšit srážky na velkých plochách pouze o max. 5 %, navíc většina těchto průmyslových dešťů spadne v průběhu přírodních srážek, není tedy možné plánovat jejich využití pro lidské aktivity.

Společnou vlastností zmíněných metod pro adaptaci jsou vysoké pořizovací náklady, jež jsou většinou limitujícím faktorem v globálním měřítku.

Řešení nerovnováhy mezi dostupností vodních zdrojů a požadavky na jejich využívání řeší řízení vodních zdrojů (water resources management). Řízení vodních zdrojů je vědeckým a aplikovaným oborem, jež zajišťuje dostupnost vody v dostatečné kvantitě a kvalitě na správném místě ve správný čas (Szolgay a Gottschalk, 1987). Hraje významnou roli nejen v ekonomickém růstu, ale také v ekologickém směřování jednotlivých zemí. Hodnocení vody jako přírodního zdroje je charakterizováno body popsanými níže (Young a kol., 1994):

- Voda je obnovitelný zdroj. Pokud je vodní zdroj využit správně, může být poté obnoven a použit znovu k jinému účelu.
- Voda je mobilní a může se pohybovat vzduchem, po povrchu, nebo pod zemí. Ve srovnání se statickými přírodními zdroji, jako např. minerální zdroje, je vlastnictví vody značně komplikovanější.
- Vodní zdroje mohou být znovu využity na rozdíl od většiny přírodních zdrojů. Opětovné využití má více hledisek: a) voda má samočistící schopnost, b) voda může být použita opakovaně v případě nesnížení potřebné kvality, c) voda využitá v jednom

sektoru může být znovu využita v jiném sektoru, d) odpadní voda může být vyčištěna a znovu využita.

- Vodní zdroje jsou na různých místech a v různých časech dostupné v odlišném množství.
- Voda je formou života.
- Voda je základem pro veškeré lidské aktivity a je fundamentální prakticky pro všechny ekonomické aktivity.
- Voda je aktivním přírodním členem, transportující rozpuštěné látky, sedimenty a organismy a je potřebná pro udržení biofyzikálního prostředí.

Na vodní hospodářství je společností kladen stále větší tlak z důvodu identifikovaných problémů se současnou a výhledovou dostupností vodních zdrojů na Zemi. Je potřeba zavádět nové technologie, koncepty a metody, pro posílení zdrojů vody. Některé metody vodního hospodářství byly již zavedeny (integrované vodní hospodářství, udržitelné hospodaření s vodními zdroji, aj.), zatímco jiné jsou zatím ve formě konceptů připraveny pro budoucnost.

Pro poznání probíhající klimatické změny je důležité analyzování pozorovaných dat z minulosti, stejně tak je důležité definovat budoucí vývoj, aby bylo možné nastavit systém pro návrh opatření před možnými negativními dopady. Odhady výhledového stavu klimatu (scénářová data), jež jsou ovlivňovány zvýšenou koncentrací skleníkových plynů v atmosféře většinou vychází ze simulací (globálních či regionálních) klimatických modelů. Klimatický model se snaží matematicky popsat klimatický systém pomocí fyzikálních zákonů. Prostor je klimatickým modelem diskretizován do trojrozměrné výpočetní sítě s více jak deseti vertikálními vrstvami a s horizontálním rozlišením řádově stovek (globální klimatické modely) až desítek (regionální klimatické modely) kilometrů. V průběhu výpočtu se řeší toky mezi jednotlivými výpočetními buňkami a zároveň se zjišťuje jejich stav (např. teplota, srážky atp.), přičemž se vychází ze zákonů zachování hmoty, energie a hybnosti. Modely klimatu mohou být různě komplexní zejména pro potřeby rozsahu výpočetní náročnosti v jednotlivých úlohách. Globální a regionální klimatické modely jsou standardně používány pro modelování dopadů změn klimatu na hydrologickou bilanci. Globálním klimatickým modelem (GCM) je označován propojený model atmosféry a oceánu, většinou obsahující i model kryosféry, zemského povrchu ad., regionální klimatický model (RCM) se zaměřuje na menší doménu, kterou však modeluje v podrobnějším prostorovém měřítku (Hanel a kol. 2011).

3.1 Hydrologická bilance

Voda je podmínkou existence života na planetě Zemi. V průběhu nepřetržitého procesu se voda neustále přeměňuje na plyn, kapalinu a pevné skupenství. Tento proces přeměny vodní páry na vodu a vzápětí na sníh a led a stále dokola se nazývá hydrologický cyklus. Proces výskytu a pohybu vody na Zemi zkoumá věda Hydrologie.

Voda se ať už v jakémkoli množství vyskytuje všude na Zemi. Objevuje se v atmosféře jako vodní pára, mraky a srážková voda. Na zemském povrchu se objevuje v řekách, jezerech,

oceánech a ledovcích, pod zemským povrchem se vyskytují podzemní zdroje vody. Největší množství z celkové zásoby vody na Zemi se vyskytuje v oceánech, z nichž je voda kontinuálně vypařována. Část vypařené vody zkondenzuje a padá ve formě srážek zpět do oceánu a značná část vypařené vody je větry zanesena nad zemský povrch, kde padá ve formě dešťových srážek, sněhu, nebo např. krup, nebo kondensuje ve formě rosy a mrazíků na vegetaci, či jiných předmětech. Téměř veškerá vlhkost ve formě rosy a mrazíků se přímo vypaří, nebo je vstřebána vegetací a poté transpirována vegetačními póry. Část srážkových vod se vypaří, ještě než spadne na Zem. Část srážek je zachyceno vegetací, budovami a dalšími objekty a část z této vody se opět vypaří. Určitý podíl vody stéká po povrchu do řek a je navrácen do moře. Část vody prosákne do podzemních zdrojů. Část podzemní vody se dostává na povrch vlivem kapilarity a je odpařena, část vody je využita vegetací a transpirací navrácena do vzduchu, část vody vlivem proudění podzemní vody odchází do řek, což může trvat několik dní nebo i roků. Malá část podzemních vod odtéká do velkých hloubek, a objevuje se po velmi dlouhé době často na vzdáleném místě jako prameny, artézské vody a gejzíry (Wisler a Brater, 1959).

Z vody v řekách se pouze část dostává zpět do oceánu povrchovým odtokem. Část se odpařuje z povrchu řek, jezer a vodních nádrží, část je transpirována vegetací rostoucí na březích a v okolí, nebo se vrací do podzemí.

Vyčíslení množství vody obsažené v jednotlivých členech hydrologického cyklu se dá provádět pro různé velikosti zájmových lokalit od územních jednotek samostatných povodí, pro větší celky např. kraje, státy, či pro kontinenty, nebo celou Zemi. Při vyčíslení hydrologické bilance je v konkrétních úlohách věnována pozornost menším územním celkům, složených z povodí.

Povodí je základní územní hydrologická jednotka. Jedná se o hydrologicky uzavřenou oblast, ze které veškerá voda odtéká nejnižším místem nazývaným uzávěrový profil. Povodí je ohraničeno rozvodnicí, jež tvoří hranici a přes kterou voda nemůže přetéct.

Základní členy hydrologické bilance jsou:

Srážky – Hlavním vstupem do povodí z hlediska hydrologické bilance jsou srážky. Srážkami se rozumí veškerá voda ze vzduchu, která se dostane na povrch Země. Mohou se vyskytovat v kapalně formě (déšť, mrholení), v pevném skupenství (sníh, kroupy) i v dalších formách skupenství (např. zmrázky, rosa či jinozatka). Veškeré formy srážek vznikají na základě změn teploty a tlaku vzduchu.

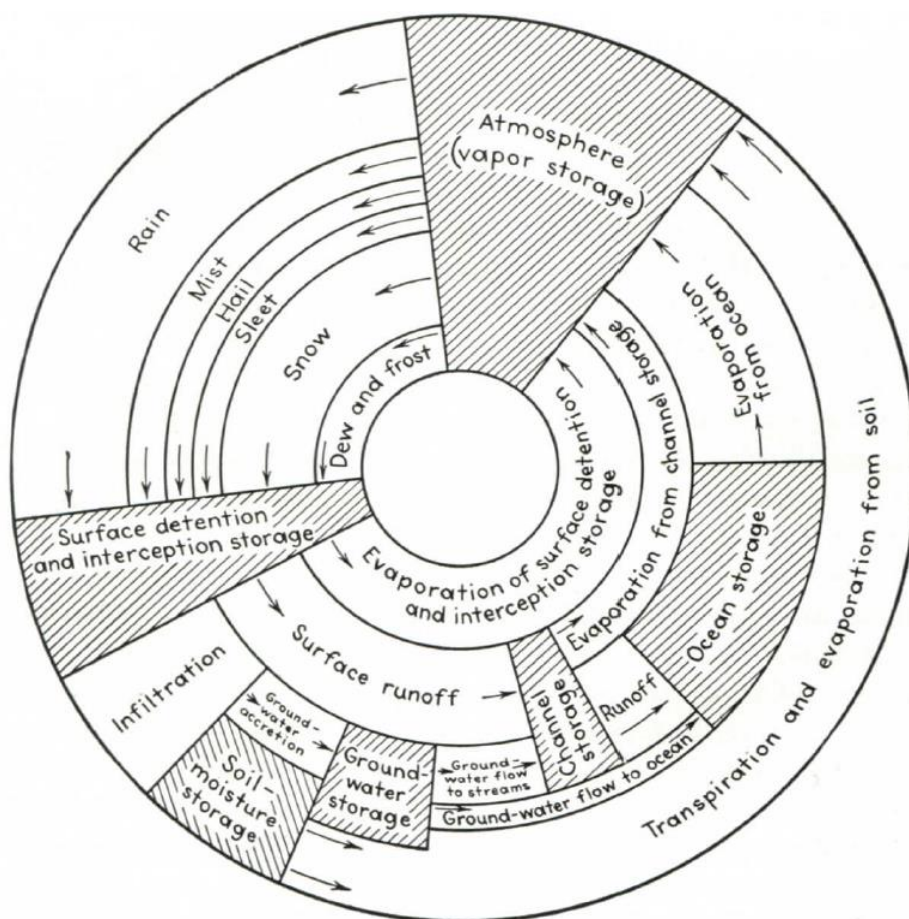
Výpar – Výparem vody se rozumí přeměna vody (ledu, sněhu) na plynné skupenství. Jedná se o ztráty vody z povodí, jež na území ČR na některých místech mohou v celkovém ročním součtu převyšovat sumu srážek (jedná se zejména o oblasti jižní Moravy, Polabí ale i další oblasti). Celkový výpar z povodí se dělí na výpar vegetací (transpirace), výpar složený z výparu vegetace a vodních ploch (evapotranspirace) a výpar z volné vodní hladiny (evaporace).

Odtok – Celkový odtok z povodí má tři složky a sice: povrchový odtok, hypodermický odtok a základní odtok. Povrchový odtok je voda odteklá korytem řeky nad povrchem, hypodermický odtok je odteklá voda infiltrovaná pod povrchem, nicméně nedosahující úrovně hladiny

podzemní vody, základní odtok představuje část odtoku, jež je dotovaný prouděním podzemní vody (v případě dlouhotrvajícího období sucha může být dosaženo stavu, kdy je celkový odtok z povodí složen pouze ze složky základního odtoku (Shaw a kol., 1994; Linsley a kol., 1982).

Podzemní odtok – Odtok vody z povodí v rámci proudění podzemní vody. Rychlost proudění vody je závislá především na horninovém prostředí, v kterém se podzemní zásoba vody nachází. Podzemní část lze rozdělit na zónu aerace a saturovanou zónu. V saturované zóně dochází k akumulaci podzemních zdrojů vody a k jejich výraznému zpomalení proudění. Mezi zónou saturace a zemským povrchem se nachází zóna aerace, kde voda proudí v horninovém prostředí (Brooks a kol., 2013; Musy a Higy, 2011).

Koloběh vody neboli hydrologický cyklus, popsany výše, je znázorněn na diagramu (Obr. 1).



Obr. 1 Hydrologický cyklus - diagram (Wisler a Brater, 1959).

3.2 Modelování dopadů klimatických změn na hydrologickou bilanci

Hydrologická bilance bývá modelována za pomoci hydrologických bilančních modelů. Hydrologický model je zjednodušená představa složitého hydrologického cyklu se vzájemnými vazbami mezi jednotlivými hydrologickými členy. Hydrologický systém je definován jako systém fyzikálních procesů, jedná se tedy vlastně o algoritmus řešení soustavy rovnic, kterými je popsáno chování systému na zájmové lokalitě (nejčastěji povodí) během srážkoodtokového procesu (Ludwig a kol., 2009). Hydrologické modely lze rozdělit na modely statistické (pravděpodobnostní, stochastické, korelační, regresní), deterministické (black-box, fyzikální, koncepční) a modely kombinované (smíšené).

Klimatické změny, jež ve velké míře ovlivňují celkovou hydrologickou bilanci jsou v současné době největším environmentálním rizikem, kterému světová populace čelí. Její dopady mají dalekosáhlý vliv na životní prostředí, což sebou nese problémy pro celou společnost.

Postup modelování změny klimatu na hydrologický režim je rozdělen do několika kroků. Nejprve je hydrologický model pro vybrané povodí nakalibrován pomocí pozorovaných dat. Poté jsou veličiny z globálního, popřípadě regionálního klimatického modelu převedeny na scénářové řady pro jednotlivá povodí a následně je pomocí nakalibrovaného hydrologického modelu a scénářových řad provedena simulace hydrologické bilance pro scénářové období. Tento postup je důkladně popsán např. v publikaci Hanel a kol. 2011. Schéma postupu hydrologického modelování dopadů změny klimatu je uvedeno na Obr. 2.

Vzhledem k systematickým chybám u výstupů klimatických modelů je jejich přímé použití pro modelování jejich dopadů vyloučeno. Současně je problémem nesoulad měřítka klimatických modelů (výpočetní síť desítky až stovky kilometrů) s požadovaným měřítkem (zájmová oblast často pouze bod, případně omezená plocha povodí) (Hanel a kol. 2014). Pro tvorbu scénářů změn klimatu je možné použít více metod (Hanel a Vizina, 2014; Hanel, 2014). Metody lze dle nároků na data rozdělit na metody nevyžadující informace z klimatických modelů (naivní metody), na metody založené na transformaci pozorovaných dat s využitím poznatků odvozených ze simulací klimatických modelů (přímé metody), metody využívající generátory počasí, regresní modely apod. (nepřímé metody) a metody využívající (transformované) simulace klimatických modelů. Metody se liší zejména množstvím předpokladů, které na změny klimatu kladou a výpočetní a odbornou náročností. Neexistuje proto pouze jedna správná metodika tvorby scénářů změn klimatu, ale jejich použití se vždy řídí účelem jejich aplikace.

Pro použití scénářů změny klimatu je zpravidla důležité zachovat jejich časové měřítko stejné s časovým měřítkem modelu posuzovaného systému pro současné podmínky. Ve většině případů se jedná o denní či měsíční krok, výjimečně o krok kratší (např. hodinový). I většina metod pro tvorbu scénářů je nejčastěji aplikována na denní případně měsíční data.

Měsíční a delší časové měřítko je typické pro řešení změn celkové vodní bilance, zásobování vodou a charakteristik sucha. Typickou metodou používanou v ČR je jednoduchá přírůstková metoda (nezohledňující změny variability), případně citlivostní analýza. Pro denní a vícedenní časová měřítká, která jsou relevantní pro vyhodnocení regionálních povodní, hydroenergetiku či hodnocení kvality vody, se zpravidla využívá korekce systematických chyb, nebo přírůstkové metody zahrnující korekce/změny průměru a variability.

3.2.1 Metody pro tvorbu scénářů změn klimatu

Naivní metody – berou v úvahu pouze minulé časové změny a variabilitu meteorologických veličin, popřípadě jejich prostorovou variabilitu. Patří mezi ně analýza trendů (pozorovaný trend je extrapolovaný do budoucího období), klimatické analogony (na základě informací o možných změnách klimatu je vybrán odpovídající analogon a časové řady z analogonu jsou použity pro modelování dopadů změny klimatu), citlivostní analýza (systematická změna vstupních veličin v určitém intervalu a následně vyhodnocení míry dopadů).

Přímé metody – pracují s pozorovanými daty, která transformují tak, aby výsledné změny odpovídaly změnám z klimatických modelů. Takto transformovány jsou buď celé řady (přírůstková metoda), nebo jen vybrané charakteristiky (např. návrhové parametry). Pomocí výstupů klimatických modelů je možno omezit rozpětí změn vstupních veličin při citlivostní analýze, případně i rámcově postihnout závislost mezi veličinami. Tyto metody jsou někdy kombinovány s korekcí systematických chyb, jelikož v případě nelineárních korekcí jsou změny závislé na chybě simulace. Mezi přímé metody patří:

- Řízená citlivostní analýza – změny vstupních veličin jsou omezeny změnami z výstupů klimatických modelů
- Přírůstková metoda – pozorované časové řady jsou transformovány tak, aby změny vybraných charakteristik odpovídaly změnám z klimatických modelů
- Změna navrhovaných parametrů – podobně jako přírůstková metoda, ale transformovány jsou přímo vybrané charakteristiky

Nepřímé metody – využívají informace z klimatických modelů jako vstupy do dalších metod, např. řídí parametry generátoru počasí, jsou prediktorem v regresní analýze nebo slouží jako zdroj informací o možném budoucím sledu synoptických situací. Mezi nepřímé metody patří:

- Generátory počasí – parametry nakalibrovaného generátoru počasí jsou vztaženy k veličinám z výstupů klimatických modelů. Změna těchto veličin pak přímo vede ke změnám parametrů generátoru počasí.
- Synoptické analogie – metoda se používá zejména při tvorbě scénářových řad srážek a je založena na klasifikaci synoptických situací. Klasifikace je provedena pro současné podmínky i pro simulaci klimatického modelu ve scénářovém období. Pro scénářovou řadu je pak dle identifikované synoptické události přiřazen pozorovaný srážkový úhrn ze dne se stejnou synoptickou situací.
- Regresní metody – identifikace vztahů mezi veličinami v lokálním měřítku a veličinami z výstupů klimatických modelů pro kontrolní období, aplikace těchto vztahů na období scénářové.

Jelikož přímé použití výstupů klimatických modelů je kvůli systematickým chybám vyloučeno, v praxi se často používají metody, které tyto chyby do jisté míry eliminují. Jednou z nejpoužívanějších metod je korekce systematických chyb. Jejím principem je, že pro kontrolní období jsou identifikovány systematické chyby v simulaci klimatického modelu. Na simulované veličiny je aplikována taková transformace, která zaručuje, že tyto chyby jsou minimalizovány. Stejná transformace je následně použita pro korekci simulace pro scénářové

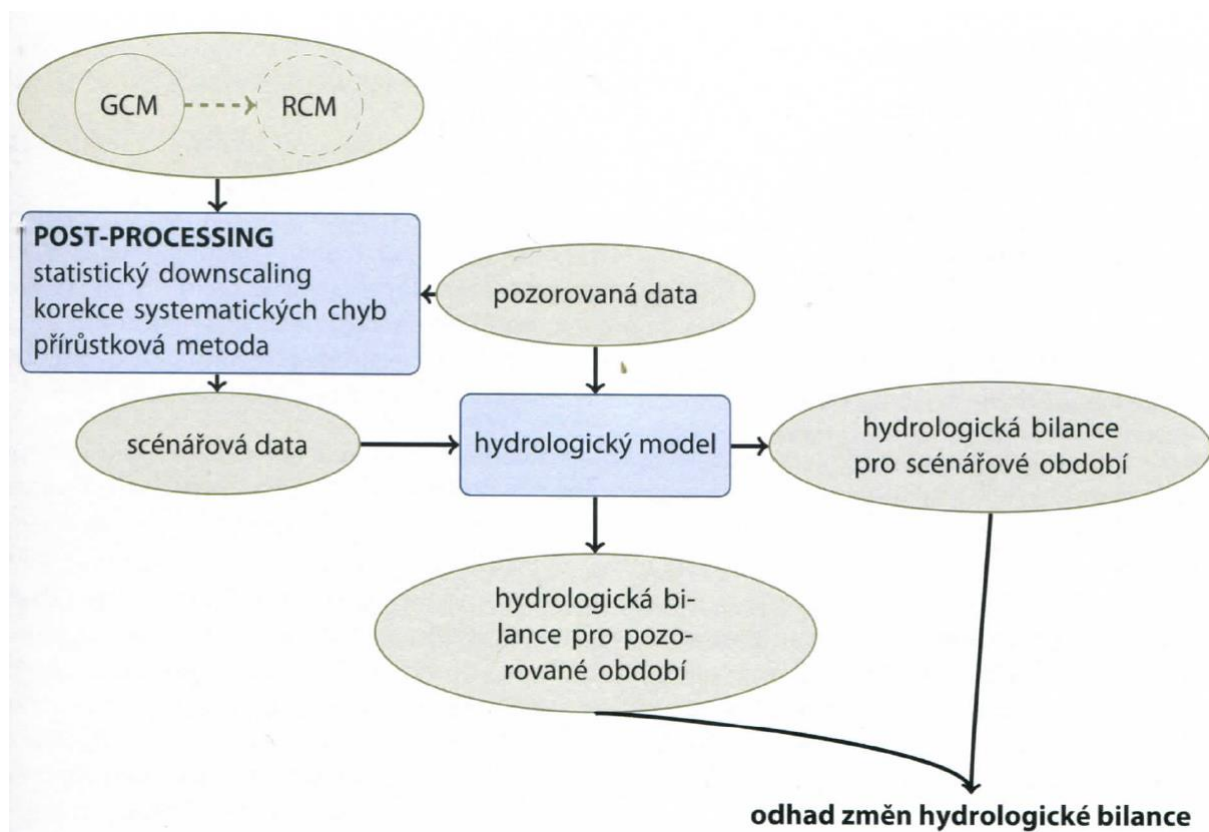
období. (Hanel a kol. 2014)

Limity pro použití pokročilých metod jsou zpravidla nedostatek pozorovaných dat, jež jsou nezbytná pro kalibraci jednotlivých postupů, dále speciální znalosti, programové vybavení apod., nejsou tak často vhodné pro běžnou vodohospodářskou praxi.

Mezi zásadní požadavky na scénář změny klimatu, které uvádí např. Smith a Hulme (1998) patří:

- Scénáře by měly být konzistentní s obecně přijímaným rozpětím změn (tj. neměly by, není-li k tomu zvláštní důvod, předpokládat oteplení o 10 °C apod.).
- Scénáře by měly být fyzikálně věrohodné, tj. například by neměly předpokládat, že změny srážek budou na celém kontinentě konstantní. Zároveň by měla být dodržena konzistentnost změny veličin.
- Scénáře by se měly zabývat všemi veličinami vstupujícími do modelu v odpovídajícím prostorovém a časovém rozlišení. Hydrologické modely např. často pracují se srážkami, teplotou a potenciální evapotranspirací. Všechny tyto veličiny by proto měly být součástí scénáře změny klimatu.

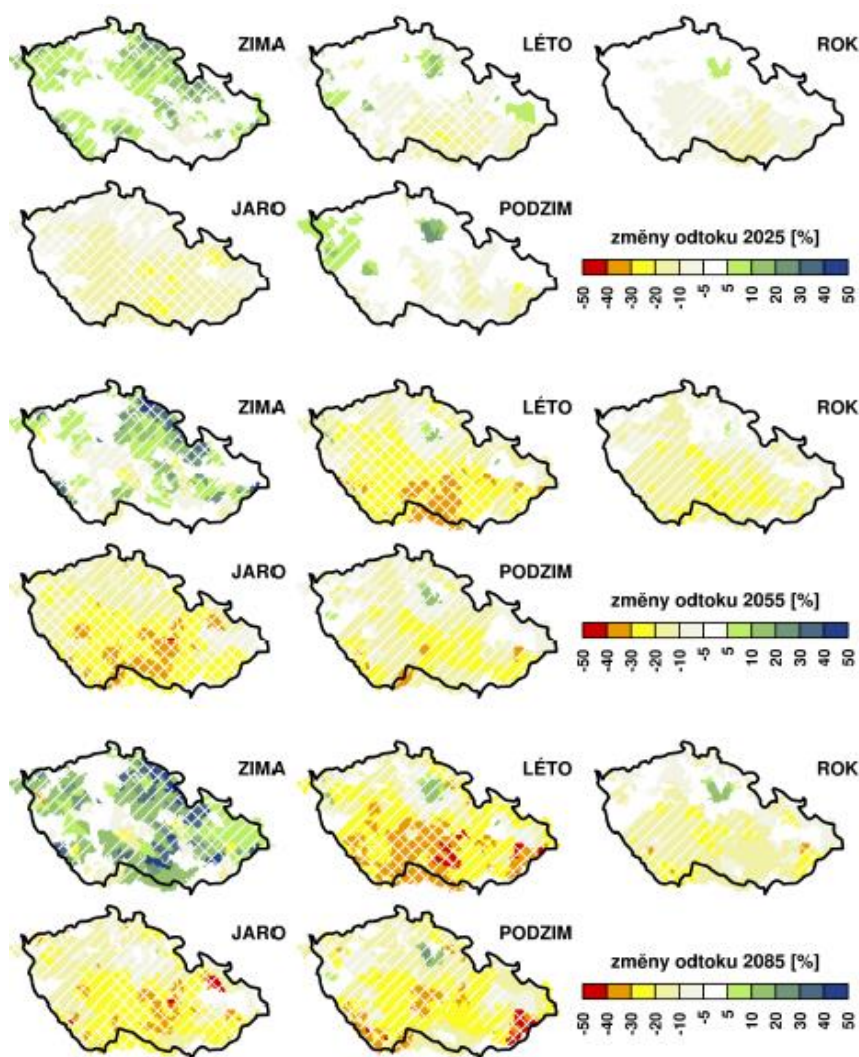
Vhodnost metody pro tvorbu scénáře klimatické změny lze rozhodovat vždy pouze v kontextu konkrétní aplikace, nejdůležitějšími faktory při volbě jsou časové a prostorové měřítko.



Obr. 2 Schéma hydrologického modelování dopadů změny klimatu. (Hanel a kol., 2011)

3.3 Změny klimatu v ČR

Dopady klimatických změn na hydrologickou bilanci jsou v některých oblastech České republiky pozorovány již řadu let. Nejvíce viditelné je zvyšování průměrných teplot vzduchu, což má za následek zvýšení potenciální evapotranspirace. Ze studií zaměřujících se na změny hydrologické bilance v podmínkách klimatických změn v České republice (Hanel a kol. 2011; Hanel a kol. 2012; Štěpánek a kol. 2016; Beranová a Kyselý 2017) vyplývá, že průměrná teplota vzduchu na území ČR se mezi pozorovanými obdobími 1961-1980 a 1981-2005 zvýšila v ročním průměru o cca 0,6-1,2 °C. Scénáře změny klimatu pak předpovídají růst teploty o 1, 2 a 3 °C pro uvažované časové horizonty 2010-2039, 2040-2069 a 2070-2099. Výsledky také indikují zvýšení odtoku v zimních měsících, naopak snížení odtoku během jara, léta a podzimu (Obr. 3). Projektované změny jednotlivých členů hydrologické bilance na území ČR vykazují především úbytek vody na povodích a snížení dostupnosti vody přinejmenším během druhé poloviny léta a během podzimu.



Obr. 3 Průměrné změny odtoku v souboru klimatických modelů pro časové horizonty 2025, 2055 a 2085: pomocí šrafování jsou znázorněny oblasti, pro které se 2/3 (jednoduché šrafování), respektive 90 % (dvojitě šrafování) simulací klimatických modelů shodne na znaménku změny. (Hanel a kol. 2011)

Kašpárek a kol. (2010) ve zprávě konstatoval, že zvyšování průměrné teploty vzduchu na území České republiky v posledních letech bylo většinou provázeno mírným zvýšením srážkových úhrnů, jež vyrovnávaly ztráty způsobené výparem. Nicméně např. ve Středočeském kraji dochází k úbytku, či stagnaci celkových srážek. Příkladem povodí s nízkými srážkovými úhrny je např. Rakovnický potok, kde je v posledních letech pozorován výrazně klesající trend průtoků, lokálně dochází i k vysychání. V kontrolním profilu Rakovník opakovaně nejsou splněny požadavky na zachování minimálních zůstatkových průtoků. Problémy způsobené dopady klimatických změn na vodní režim vodního toku Blšanka a možnostmi návrhu efektivních adaptačních opatření byly řešeny v rámci projektu Ministerstva zemědělství ČR s názvem Možnosti zmírnění současných dopadů klimatické změny zlepšením akumulací schopnosti v povodí Rakovnického potoka.

Na základě zprávy Hanel a kol. (2007) byla vyhodnocena ohroženost vodního toku Srpina nacházejícího se v oblasti Podkrušnohoří. Z analyzování charakteristik odtoků vyplývá, že zde dochází k zachycení velké části vody v povodí a jejímu odpaření. Vzhledem k nízkému úhrnu srážek na povodí Srpiny je toto povodí extrémně citlivé na dlouhodobě probíhající zvyšování teploty vzduchu a jím způsobené zvětšení potenciálního i skutečného výparu. Lze proto očekávat, že se četnost period, kdy dojde k úplnému vyschnutí potoka, bude zvyšovat, a délky suchých období prodlužovat. Již v současnosti se na povodí vyskytly období, kdy nebylo možné zabezpečit dostatečné množství vody pro odběry.

Nedostatek povrchové vody způsobující zhoršení kvality vody hlavně během letních měsíců dlouhodobě sužuje také povodí Blšanky a Liboce. Povodí jsou stejně jako povodí Srpiny ve stínu Krušných hor a tudíž vlivem orografie jsou celkové roční úhrny srážek na jejich území nižší než ve zbytku republiky. V letních měsících se tak stává, že dochází k významnému poklesu hladiny vody v tocích, případně k úplnému vysychání. V takovém případě vodní toky neplní svou ekologickou funkci a nemůže docházet k obecnému ani povolenému nakládání s povrchovými vodami, není k dispozici dostatečné množství vody pro ředění vypouštěných vod z čistíren, dochází tak k výraznému zhoršení kvality vody ve vodních tocích. Možnosti opatření vedoucích ke zlepšení hydrologických poměrů povodí Blšanky a Liboce byly řešeny na základě objednávky Povodí Ohře, s.p. a jsou popsány v závěrečné zprávě Kašpárek a Mrkvičková (2008).

Podle Brázdila, Trnky a kol. (2015) jsou z hlediska sucha v rámci ČR nejvíce ohroženy kromě pohří, oblasti jižní Moravy, dále pak polabí a jižní Čechy. Nicméně nutno zdůraznit, že lokálně se sucho může vyskytovat na celém území ČR. Podle simulací budoucího vývoje klimatu se bude zvyšovat četnost výskytu a intenzita suchých období (Vlnas a kol. 2010; Hanel a kol. 2013). Období sucha mohou mít dalekosáhlé důsledky na zemědělskou a průmyslovou výrobu, dále na turismus a v neposlední řadě zásobování pitnou vodou měst a obcí v celé ČR.

Odvětví vodního hospodářství musí v současnosti čelit spoustě nových výzev. Je také zvýšený důraz na řešení témat přímo spojených s klimatickou změnou jako např. modelování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci, vývoj scénářů klimatických změn,

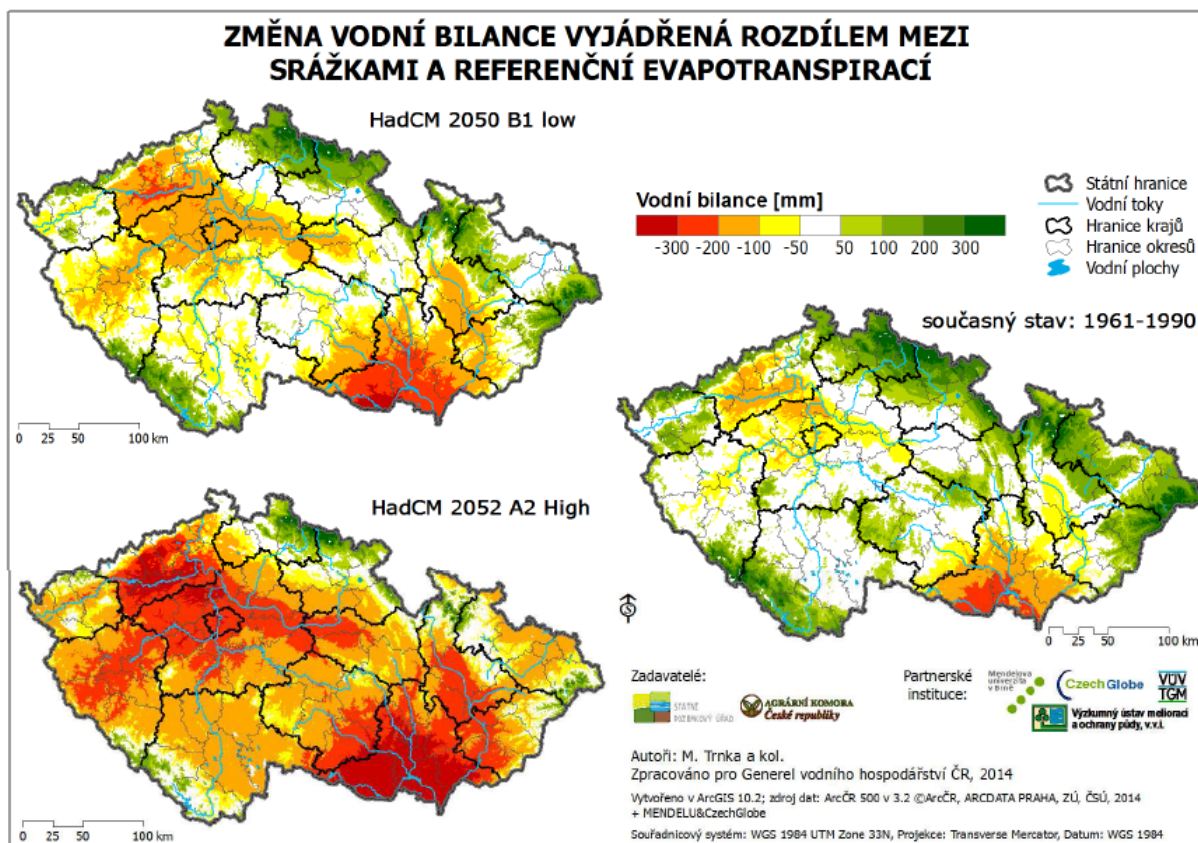
navrhování adaptačních opatření, atd.

3.4 Generel vodního hospodářství krajiny České republiky

Pro návrh ochranných a adaptačních opatření pro zmírnění negativních účinků extrémních hydrologických jevů a půdního resp. hydrologického sucha ve vazbě na výhledové požadavky uživatelů vody vznikl Generel vodního hospodářství krajiny ČR (Trnka a kol. 2017). Účelem Generelu bylo navrhnout soustavu opatření vedoucí ke koncepčnímu hospodaření s vodou v krajině.

První část generelu se zaměřuje na shrnutí existujících poznatků a s jejich pomocí vymezuje nejvíce ohrožené regiony. V pilotních studiích jsou pak pro vybraná ohrožená území zpracovány návrhy možných adaptačních opatření a současně navržen způsob jejich realizace. Generel bude v pravidelných cyklech aktualizován s tím, jak se bude dařit získávat nové poznatky a zkušenosti. Každá z kapitol v úvodní části generelu je uvedena shrnutím klíčových informací, po níž následuje podrobnější popis včetně mapové a obrazové dokumentace. Na závěr každé kapitoly jsou nejprve uvedeny související části generelu, které přímo na danou kapitolu navazují. Následně jsou identifikovány výzkumné i aplikační priority, jimž je nutné věnovat pozornost. Druhou část generelu tvoří případové studie jednotlivých pilotních farem.

Podle autorů Generelu lze v budoucnu očekávat častější výskyt meteorologických extrémů, jako malá či žádná sněhová pokrývka a výskyt silných holomrazů a především častější výskyt všech druhů sucha. Obdobně lze očekávat nárůst ploch s negativní vodní bilancí (Obr. 4).



Obr. 4 Změna vodní bilance jako rozdíl mezi srážkami a referenční evapotranspirací pro současné klima (1961-2000) – nahoře, pro zvýšení teploty o 1 °C - vlevo dole, a zvýšení teploty o 2 °C vpravo dole pro území ČR. Záporné hodnoty ukazují na oblasti s negativní roční vodní bilancí (Trnka a kol. 2017)

Součástí Generelu (Trnka a kol., 2017) je syntéza studií zaměřených na dopad klimatické změny na vodohospodářskou soustavu v dílčích povodích. Vstupem do vodohospodářského simulačního modelu byla současná hydrologie, která je založená na pozorovaných datech a na výhledech, které byly modelovány modelem Bilan dle vybraných klimatických modelů a emisních scénářů. U použitého scénáře (RCAO B2), který bylo možno označit za blízký střed rozsahu používaných scénářů, se projevují zřetelné změny hydrologického režimu, zejména pokles průměrných průtoků o 15-20 %. Důležitou změnou je rozkolísanost průtoků, hlavně minimálních, které často nebudou dosahovat potřebných ekologických minimálních hodnot. Tyto průtoky přinesou vážné problémy v oblasti ochrany kvality vod způsobené především zhoršením podmínek pro ředění zbytkového znečištění vypouštěného z čistíren odpadních vod.

Níže jsou uvedeny výsledky modelování vlivu klimatické změny na vodohospodářskou soustavu z Generelu (Trnka a kol., 2017).

Povodí Moravy

V oblasti povodí Moravy, v dílčím povodí Dřevnice, se na připravených průtocích dotčených klimatickými změnami výrazně snižuje kapacita vodárenské nádrže Slušovice, která by nepokryla ani relativně nízké požadavky na vodu realizované v roce 2005. Další vodárenské

nádrže, Karolinka na Stanovnici a Opatovice na Malé Hané, by i ve výhledovém období požadavky na vodu z roku 2005 těsně zvládly (Drbal a kol., 2008).

Povodí Labe

Změny hydrologického režimu se projeví zmenšením možnosti celkového nadlepšení průtoků při zachování zásobních objemů stávajících nádrží o cca 10 až 40 %. Pokles bude v relativním měřítku mírnější v horských povodích, významnější v povodích střední nadmořské výšky a největší v povodí s nejmenší průměrnou nadmořskou výškou. Z výsledků studií dále vyplývá, že zatímco za současných podmínek jsou požadavky na užívání vody a zachování minimálních průtoků dostatečně zabezpečeny, pro varianty řad průtoků vycházejících ze scénářů klimatických změn dojde ke značnému dopadu na zásobní funkci vodohospodářské soustavy. Z uvedených poznatků je zřejmé, že nepříznivé dopady klimatické změny na hydrologický režim v povodí Labe nebude v dostatečné míře možné vyřešit případnou změnou manipulačních pravidel pro řízení odtoku. Pokud taková situace nastane, bude ji možné řešit nebo zmírnit její dopady pouze realizací dalších opatření, při samozřejmém předpokladu racionalizace ve sféře užívání vody a vytvoření podmínek pro optimalizaci vodního režimu krajiny. Všechny posuzované odběry vody zajišťované vodními nádržemi jsou dostatečně zabezpečeny. Určitý problém může nicméně představovat odběr pro elektrárnu Opatovice, kdy v profilu Opatovice na Labi nejsou dostatečně zajištěny požadované minimální průtoky v Labi a v Opatovickém kanálu. Průtok v profilu Opatovice je nadlepšován z nádrže Rozkoš. Naopak u odběrů z vodních toků je zajištěn pouze odběr Kárané (Jizera). Dostatečně není zabezpečen zejména odběr pro ÚV Příkrý (Kašpárek a kol., 2008).

Povodí Odry

Odhady změn klimatu a na ně navazující modelová šetření naznačují, že by se zvládnutí dosavadní zabezpečení neobešlo bez nutnosti zřízení nových umělých akumulací, zachycujících vody z doby jejich přebytku do dob nedostatku. Možné klimatické změny, pokud by nastaly, by se dotkly poměrů v celé oblasti povodí a svými důsledky by se - pokud jde o zásobování vodou - jejich účinky více negativně projevily v podoblasti ležící mimo dosah působnosti vodohospodářské soustavy povodí Odry. Územně lze tedy čekat, že nejmarkantněji by se jejich nepříznivé ovlivnění projevilo na Jablunkovsku, ale rovněž i dále na Jesenicku a nejspíše i v povodí střední Odry nad Ostravou, které leží mimo dosah vlivu vodohospodářské soustavy. I v podoblasti ovládané soustavou se předpokládá, že by klimatické změny byly provázeny negativními dopady. Z namodelované 500leté umělé hydrologické řady průměrných měsíčních průtoků v síti příslušných relevantních stanic v oblasti, při ovlivnění předpokládanými klimatickými změnami, při fungování celé vodohospodářské soustavy v podobě, jak dnes existuje, a při scénáři dnešních nároků na vodu plyne, že tyto změny by i zde vyvolaly poměrně vážné poruchy. Docházelo by k nim i přesto, že jinak bez vlivu klimatických změn by (podle modelových simulací) do roku 2050 dnešní soustava zvládla i hypoteticky předpokládaný nárůst odběrů vody o 20 %, aniž by bylo třeba jejího dalšího doplnění o nové akumulace. Při změně hydrologie oblasti povodí v důsledku změny klimatu a při stagnaci odběrů na současných hodnotách by podle toho do roku 2050 mělo dojít k narušení některých funkcí údolních nádrží v soustavě. Narušena by byla i možnost jejich spolupráce v soustavě (POPOd, 2010).

Povodí Ohře

Možný nepříznivý dopad klimatické změny na vodní zdroje je patrný zejména v dolním povodí Teplé, včetně zajištění vodárenských odběrů z vodní nádrže Stanovice, částečně v povodí levobřežních přítoků Ohře v západní části oblasti povodí (Rolava, Svatava), v povodí Blšanky a Liboce a u pravobřežních přítoků Labe (Ploučnice, Liběchovka, Kamenice, Pšovka), včetně zajištění vodárenských odběrů z vodní nádrže Chřibská (Chřibská Kamenice). Naopak dostatečně jsou zajištěny požadavky na odběry a minimální průtoky v profilech vodních nádrží Mariánské Lázně, Jesenice, Horka, Myslivny, v nádržích vodohospodářské soustavy SHP, v nádržích Kadaň a Nechanice, ve vodohospodářské soustavě NOD, v nádrži Všechlapy a na samotném toku Ohře (Vyskoč a kol., 2010).

Povodí Vltavy

Za současných hydrologických podmínek jsou požadavky na užívání vody a zachování minimálních průtoků dostatečně zabezpečeny s výjimkou menších problémů u aktivit zajišťovaných vodními nádržemi Pilská a Obecnice v oblasti povodí Berounky. Varianty vycházející ze scénářů klimatických změn ukazují, že mohou nastat situace, které by byly stávajícími zdroji vody neřešitelné. Požadavky na užívání vody a zajištění minimálních průtoků nejsou zajištěny u 24 % hodnocených profilů pro variantu RCO-B2, u 51 % profilů pro variantu RCO-A2, u 63 % profilů pro variantu HIRHAM-B2 a 73 % profilů pro nejnejpříznivější variantu HIRHAM-A2. Z dalších významných nádrží je na tom nejlépe vodní nádrž Lipno I, nejhůře vodní nádrž Švihov. Nádrže Orlík a Slapy jsou v tomto ohledu přibližně rovnocenné (Kašpárek a kol., 2007).

3.5 Adaptace

Veškeré vodstvo v Evropě bylo po staletí ovlivňováno důsledky často nepromyšleného využívání přírodních zdrojů, mezi které patří např. změny ve využití půdy, odběry vody nebo znečišťování vlivem rozvíjejícího se průmyslu a zemědělství. Bez zavedení efektivních opatření pro nápravu přírodního ekosystému mohou být vodní útvary kontinentu dále ničeny rostoucími tlaky vyplývajícími z přímých a nepřímých vlivů proměnlivosti klimatu a postupující klimatické změny. Předpokládá se, že změna klimatu povede k významným změnám v ročních a sezónních srážkách a průtoku vody, což bude mít za následek zvýšení četnosti výskytu povodní, sucha a eroze, dále bude způsobovat zhoršení kvality vody. V regionálním měřítku bude docházet ke značně různorodým projevům. Tyto změny budou s největší pravděpodobností významné v druhé polovině tohoto století.

Obecně lze říci, že existují dva hlavní způsoby, jak naložit s problémy způsobenými klimatickou změnou (IPCC, 2007). První možností je zaměřit se na snižování skleníkových plynů, které způsobují globální změny v životním prostředí. Hlavním cílem těchto akcí je zmírnění dopadů klimatických změn (mitigace). Druhou volbou je pak adaptování se na projevy škodlivých dopadů globálních změn. Jakýkoli zásah, který vede ke snížení zranitelnosti umělého nebo přirozeného systému na předem stanovenou úroveň, lze považovat za adaptační opatření.

Strategický dokument White Paper (White Paper, 2009) od Evropské komise vyzývá ke strategičtějším přístupům k přizpůsobení se změně klimatu napříč různými odvětvími a úrovněmi státní správy. Dále vyzývá k tomu, aby adaptování se změně klimatu bylo

implementováno do vodní politiky Evropské Unie, což je také doporučeno hlavními představiteli jednotlivých členských zemí. Adaptování se na změny způsobené klimatickými změnami v odvětví vodního hospodářství je v posledních letech relevantní pro celý svět. Pro implementaci vhodných adaptačních opatření bylo již na mezinárodní úrovni vydáno několik doporučujících dokumentů. Tyto dokumenty stanovují vhodné postupy pro zajištění včasné a přiměřené připravenosti na dopady změn klimatu.

Nejdůležitějšími dokumenty řešící otázky vodního hospodářství ve vazbě na změnu klimatu jsou Rámcová směrnice o vodě EU (WFD, 2000) a její dceřiné směrnice: směrnice EU o povodních a strategie EU týkající se nedostatku vody a sucha. Tyto dokumenty poskytují právní nástroje na ochranu a obnovu vodního prostředí, jakož i kroky, které mohou být přijaty ke snížení rizik pro lidské zdraví, kulturní dědictví a hospodářskou činnost. Ačkoli změna klimatu není výslovně zahrnuta v textu rámcové směrnice o vodě, postupný a cyklický přístup procesu plánování v oblastech povodí je pro přizpůsobení se dopadům změny klimatu vhodný.

Důležitým dokumentem vydaný Evropskou ekonomickou komisí je Guidance zabývající se adaptací na klimatickou změnu (ECE, 2009). Jedno z nejdůležitějších sdělení dokumentu Guidance (ECE, 2009) je, že svět se musí neprodleně začít zabývat adaptováním sektoru vodního hospodářství na klimatické změny. Hlavní dopady klimatických změn jsou zvýšení četnosti a intenzity povodní a suchých období, nedostatek vodních zdrojů, eroze půdy, snížení zásob vody v ledovcích a sněhové pokrývky, zvyšování hladiny moře, salinizace, degradace půd, ubývání vodních ekosystémů a dopady na lidské zdraví. V současné době již mnoho zemí vynakládá nemalé finanční prostředky na boj s dopady klimatických změn na životní prostředí.

Podle páté hodnotící zprávy mezinárodního panelu na klimatické změny (IPCC, 2014) jsou dopady klimatických změn na přírodní a antropogenní systémy pozorované na všech kontinentech a světových oceánech. Většina dopadů klimatických změn se projevuje změnami v hydrologickém cyklu. Nejdůležitějším sdělením tohoto dokumentu je, že je potřeba snižovat produkci skleníkových plynů. Adaptace a mitigace na změnu klimatu jsou vhodnými strategiemi pro snižování rizik změny klimatu. Podstatné snížení emisí v průběhu několika příštích desetiletí může snížit rizika v oblasti klimatu v 21. století, zlepšit vyhlídky na účinné adaptování se změně klimatu, sníží náklady a přispěje k odolnosti klimatu a podpoří udržitelný rozvoj. Bez snahy o zmírnění dopadů klimatické změny a návrhu a realizace efektivních adaptačních opatření se bude planeta ve 21. století dále oteplovat, což povede k vysokému a velmi vysokému riziku vážných, dalekosáhlých a nevratných dopadů na přírodní ekosystémy po celém světě.

Doplňkem k dokumentu Guidance (ECE, 2009) je dokument obsahující získané zkušenosti a zaručené postupy pro boj s klimatickou změnou ve vodním hospodářství (Water and climate change adaptation in transboundary basins: Lessons learned and good practices; ECE, 2014). Publikace má za cíl sestavit, analyzovat a šířit zkušenosti, a tím ukázat a ilustrovat důležité kroky a získané poznatky, jakož i osvědčené postupy, které je třeba vzít v úvahu při vypracovávání strategie pro přizpůsobení se změně klimatu v oblasti vodního hospodářství v povodí nebo v přeshraničním kontextu.

Podle Guidance document No. 24 (2009) je proces plánování v oblastech povodí mechanismus, jímž lze vyvážit dostupné množství vodních zdrojů a požadavky na ně a

zabránit tak dlouhodobému nedostatku vody. Hlavním účelem Guidance documet no. 24 (2009) je ukázat způsoby, jakými mohou být připravovány plány povodí v rámci druhého a třetího cyklu plánování, včetně opatření proti povodním a suchu. To bude nicméně vyžadovat, aby členské státy jasně prokázaly, jak zohlednily prognózy týkající se změny klimatu při posuzování jejího vlivů a dopadů na vodní hospodářství jednotlivých zemí.

Nedostatek vody a projevy sucha se v minulosti nevyhnuly ani území České republiky. Nejzávažnější případy sucha na našem území v novodobé historii jsou připisovány letům 1904, 1911, 1921, 1947, 1976, začátkem 90. let 20. století se sucho objevilo ve více letech, a nedávná sucha v roce 2003 a v roce 2015 (toto sucho trvá lokálně až do roku 2019). Poslední dvě zmíněné epizody sucha iniciovaly činnosti zaměřené na přípravu dokumentu obsahujícího soubor opatření pro zvýšení připravenosti a prevence následků sucha na společnost a životní prostředí. Dokument vyšel v roce 2017 pod názvem Koncepce ochrany před následky sucha pro území České republiky a jeho vydání bylo řízeno Ministerstvy Zemědělství a Životního Prostředí ČR.

Koncepce podrobně rozebírá problematiku sucha, strategické směřování vodního hospodářství v oblasti ochrany před následky sucha, v další z hlavních částí jsou uvedeny návrhy opatření na ochranu před následky sucha a nedostatku vody, následně se vyjadřuje k implementaci popsaných opatření.

Strategickými cíli zmíněné Koncepce jsou zvýšení informovanosti o riziku sucha prostřednictvím monitoringu a predikce výskytu sucha, zajistit připravenost na události sucha pomocí plánů pro zvládání sucha a všeobecné osvěty, dále zabezpečit udržení rovnováhy mezi vodními zdroji a potřebou vody napříč sektory i v měnících se klimatických a socioekonomických podmínkách a také zmírňovat dopady sucha na akvatické i terestrické ekosystémy prostřednictvím obnovy přirozeného vodního režimu kvality. Pro naplnění strategických cílů Koncepce jsou vyjmenovány možné způsoby adaptačních opatření. Jednotlivá opatření jsou rozdělena na *Opatření pro vytvoření informační platformy o suchu a nedostatku vody* – opatření preventivního charakteru, jež jsou implementována v předstihu suchých období a vytváří podklady pro rozhodování o přijímání nebo ukončování operativních opatření (opatření přijímána až v průběhu sucha). Patří mezi ně revize a doplnění stávající monitorovací sítě, rozvoj a propojení monitoringů sucha, vznik varovného systému na sucho, program hospodaření s omezenými vodními zdroji, předpověď vývoje stavu vodních zdrojů. Druhou skupinou jsou opatření pro *Rozvoj a posilování vodních zdrojů* – strategická opatření, která směřují ke zvyšování spolehlivosti stávajících vodních zdrojů a k zajištění nových vodních zdrojů. Mezi tuto skupinu opatření patří opatření pro podporu rozvoje vodárenské infrastruktury, jako jsou:

- Úprava ochranných pásem zdrojů povrchových a podzemních vod pro hromadné zásobování obyvatelstva pitnou vodou
- Podpora využívání moderních technologií ve vodárenství
- Propojování skupinových vodovodů do vodárenských soustav
- Uplatnění technologií umělé infiltrace a břehové infiltrace pro zvýšení zdrojů podzemní vody
- Návrhy nových víceúčelových přehradních nádrží

- Převody vody mezi povodími a zvýšení integrace vodohospodářských soustav
- Podpora modernizace a rozvoje zemědělských závlah
- Obnova stávajících a výstavba nových závlahových nádrží
- Podpora obnovy a výstavba nových zdrojů požární vody v lesních ekosystémech

Dále se Koncepce zabývá návrhy a popisem možných opatření pro posílení vodních zdrojů pro zemědělství, zvýšení retenční a akumulární schopnosti krajiny a podporou principů zodpovědného hospodaření s vodou napříč sektory.

Zmírnit dopady změny klimatu přizpůsobením se této změně v co největší míře, zachovat dobré životní podmínky a uchovat a případně vylepšit hospodářský potenciál pro příští generace má za cíl Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR (2015). Dokument zpracovalo Ministerstvo životního prostředí v meziresortní spolupráci s resorty zemědělství, průmyslu a obchodu, pro místní rozvoj, zdravotnictví a vnitra. Dokument odděluje dva základní typy opatření, a sice mitigační opatření (přímá či nepřímá opatření vedoucí ke snížení emisí skleníkových plynů) a adaptační opatření (opatření k přizpůsobení přírodního nebo antropogenního systému skutečné nebo předpokládané změně klimatu vč. Jejich dopadů).

Dokument Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR:

- Uceleně prezentuje pozorovanou změnu klimatu, projekce dalšího vývoje a předpokládané dopady
- Identifikuje prioritní oblasti hospodářství, veřejné správy a životního prostředí ve vztahu k předpokládaným dopadům změny klimatu a určuje prioritní oblasti realizace
- Definuje vhodná adaptační opatření v návaznosti na předpokládané projevy změny klimatu
- Identifikuje překážky bránící realizaci adaptačních opatření v potřebné míře a s požadovaným efektem a navrhuje způsoby jejich odstranění
- Definuje cílený výzkum a analytické potřeby
- Identifikuje možné zdroje finančních prostředků.

Podle Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR jsou adaptační opatření ve vodním sektoru rozdělena na opatření v ploše povodí a opatření na vodních tocích.

3.5.1 Adaptační opatření v ploše povodí

Cílem těchto opatření je co nejvíce prodloužit dobu, než se voda dostane do vodoteče, aby se na povodí zdržela co nejdéle, případně aby se vsákla.

Jedná se o:

- Opatření pro zajištění stability vodního režimu v krajině – cílem je v maximální možné míře snížit a zpomalit povrchový odtok vody, zvýšit retenci vody v krajině a zajistit doplňování podzemních vod. Doporučováno je zejména správné hospodaření na zemědělské a lesní půdě, minimalizace negativního vlivu odvodňovacích zařízení na zrychlený odtok vody z krajiny a vhodné uspořádání krajiny. Významnou úlohu hraje systém malých vodních nádrží a mokřadů, které podle Strategie stabilizují hladinu podzemních vod a také ovlivňují mikroklíma ve svém okolí.
- Systémy hospodaření se srážkovými vodami a opětovného využití vody – je nutné nenapojovat nové srážkové vody na stávající odvodňovací systémy a snižovat množství v současnosti již napojených nepropustných ploch. Základem tohoto řešení je decentralizovaný systém hospodaření se srážkovými vodami, který podporuje však, retenci, případně využití srážkové vody přímo na pozemku stavebníka. Dále je vhodné zavádět systémy přírodě blízkého odvodnění i na dopravních plochách, a to pomocí zatravněných pásů, propustných povrchů, systémů povrchového odvádění srážkových vod do retenčních a vsakovacích objektů, navíc je důležitá podpora zřizování vsakovacích technologií na dešťové kanalizaci.
- Plány povodí a plány pro zvládnutí povodňových rizik – věnovat v rámci přípravy plánů pro zvládnutí povodňových rizik zvýšenou pozornost ochraně před přívalovými povodněmi.
- Plány rozvoje vodovodů a kanalizací – bude potřeba umožnit zvýšení spolehlivosti funkce vodárenských systémů jejich vzájemným propojením do odolnějších vodárenských soustav, aby bylo možné během mimořádné události dočasně vzájemně kompenzovat nedostatečné vodní zdroje.
- Opatření na vodárenských systémech – jako vhodné adaptační opatření se jeví zavádění metod řízení rizika v rámci procesu výroby a distribuce pitné vody. Cílem je zajistit bezpečnost distribuované vody pomocí preventivních opatření.
- Opatření na čistírnách odpadních vod a kanalizacích – jedná se o podporu decentralizovaných způsobů řešení odvádění odpadních vod vedoucích k minimalizaci produkce odpadních vod vypouštěných nebo odvážených mimo místo vzniku, a dále zpřísnění a zefektivnění kontroly provozu stávajících zařízení.

3.5.2 Adaptační opatření na vodních tocích a nivách

Cílem těchto opatření je zajistit zpomalení odtoku vody z povodí formou přírodě blízkých úprav koryt vodních toků se zajištěním kontaktu toku s prostorem říční nivy, výstavbou ochranných retenčních nádrží a dalších opatření. Jednotlivá adaptační opatření jsou:

- Optimalizace funkce stávajících nádrží a vodohospodářských soustav – přehodnocení stávajícího využití vodních nádrží a vodohospodářských soustav a optimalizace jejich řízení tak, aby co nejlépe plnily nově definované požadavky na jejich funkci, i s výhledem do budoucna.
- Obnova malých vodních nádrží a zvyšování jejich spolehlivosti – obnovit vodohospodářskou funkci malých vodních nádrží, které tuto funkci ztratily.

- Úprava vodních koryt a nivy – komplexní revitalizace vodních toků, obnova niv a jejich využití k přirozeným nebo řízeným rozlivům.
- Racionalizace stávajících a výhledových vodních zdrojů – zachovat a podporovat ochranná pásma vodních zdrojů, chráněných oblastí přirozené akumulace vod a území chráněných pro akumulaci povrchových vod.
- Infiltrace povrchových vod do vod podzemních – převádění povrchové vody do vod podzemních, tvorba mokřadů v infiltračních zónách.
- Převody vody – do míst, kde nejsou možná jiná opatření, pro zajištění vyšší odolnosti vůči suchu a nedostatku vody, zavést převod vody z oblastí, kde je vody přebytek.
- Vodní nádrže v lokalitě chráněné pro akumulaci povrchových vod – pokud nastane nerovnováha mezi dostupnými vodními zdroji a na ně kladenými požadavky, bude třeba prověřit realizaci nového vodního zdroje
- Hydrické využití důlních děl a lomů – při likvidaci a rekultivaci důlních děl a lomů prověřit možnosti jejich hydrického využití k akumulaci vod a tento způsob využití posoudit.

Pro racionální výběr adaptačních opatření je rozhodující znalost toho, jaký je jejich reálný účinek vzhledem k požadovaným cílům. Pro rámcové posouzení účinků různých typů adaptačních opatření byly sestaveny (Hanel a kol. 2011) tabulky na Obr. 5 až Obr. 7. Symbolem + je zde vyznačeno, že adaptační opatření zmenšuje dopady v uvedeném členění. Symbol 0 značí, že účinek adaptačního opatření je nulový nebo zanedbatelný, symbol – upozorňuje, že adaptační opatření může příslušný dopad klimatické změny zesílit.

Adaptační opatření		Dopady v krajině					Dopady na průtoky				Dopady na odběry	Dopady na kvalitu vod	*
		sucho		přivalové srážky			sucho			přival. povodně			
		vegetace	půda	obce	půda								
		Zhoršení mikroklimatu	Stres stávajících společenstev	Zvětšení větrné eroze	Zvětšení přímého odtoku	Zvětšení vodní eroze	Pokles průměru	Pokles minimálních průtoků	Zánik průtoků	Zvětšení maxim			
Krajina	Organizační	+	0	+	+	+	0	0	0	+	0	0	1
	Pozemkové úpravy	+	0	+	+	+	0(-)	0(-)	0(-)	+	0	+	2
	Využití pozemků	0	+	+	+	+	0	0	0	+	0	+	3
	Agrotechnická	0	0	+	+	+	0	0	0	+	0	+	4
	Biotechnická	+	0	0	0	+	0	0	0	+	0	0	5
Rozšíření mokřadů	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	
Toky a niva	Revitalizace toků	0	0	0	0	0	0	(+)	0	+	0	+	7
	Uvolnění nivy pro rozlivy	0	0	0	0	0	0	(+)	0	+	0	0	8
Urbanizovaná území	Zvětšení infiltrace srážkové vod	0	0	0	+	+	0	0	0	+	0	0	9
	Využití srážkových vod	0	+	0	+	0	0	0	0	+	+	0	10
Obnova a zřízení vodních nádrží	Jen zásobní	+	+	0	0	0	+	+	+	0	+	+	11
	Jen retenční	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	12
	Zásobní i retenční	+	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	13
Hospodaření s vodními zdroji	Převody vody mezi povodími a vodárenskými soustavami	0	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	14
	Zpětné převody vody uvnitř povodí	0	0	0	0	0	+	+	+	0	0	0	15
	Dočasné využití statických zásob podzemní vody	0	0	0	0	0	0	+	+	0	+	+	16
	Umělé infiltrace	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	17
	Řízené vícenásobné využití vody	0	0	0	0	0	0	+	+	0	+	0	18
Zhodnocení a přerozdělení kapacit	0	0	0	0	0	0	0	+	0	+	0	19	
Zmenšování spotřeby vody	Minimalizace ztrát vody ve vodárenských soustavách	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	20
	Využití ekonomických nástrojů	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	21
	Inovace závlahových systémů	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	22
Legislativní opatření	Racionalizace systému povolování odběrů vody	0	0	0	0	0	0	+	+	0	+	0	23
	Racionalizace stanovení min. průtoků	0	0	0	0	0	0	+	+	0	+	0	24
	Stanovení priorit pro kritické situace nedostatku vody	0	0	0	0	0	0	+	+	0	+	0	25
Dokonalejší čištění odpadních vod		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	

Obr. 5 Přehled adaptačních opatření. Jednotlivá adaptační opatření (řádky a arabské číslice) a dopady změny klimatu (sloupce, římské číslice) jsou rozvedeny níže

Adaptační opatření		
1	Organizační	Rozmístění, tvar a velikost pozemků uspořádat tak, aby podporovaly plošnou rozmanitost, nevytvářely dlouhé souvislé svahy, umožňovaly infiltraci vody do půdy a nevytvářely podmínky pro soustředěný odtok.
2		Zvětšení rozsahu pozemků zatravněných a zalesněných, vyloučení kukuřice a plodin, pod nimiž se vytváří nepropustná kůra.
3	Agrotechnická	Střídání plodin, osevní postupy zvětšující infiltraci a zmenšující erozi, vhodné lesnické pěstební postupy.
4	Biotechnická	Protierozní účelová opatření – travnaté pásy, průlehy, terasy.
5	Rozšíření mokřadů	Obnova mokřadů v lokalitách, kde byla voda v minulosti drenáží odvedena.
6	Revitalizace toků	Úpravy řečišť, které zpomalí odtok vody a zlepší podmínky pro průsak vody z řečiště do přípovrchové zvodně a zpět (pokud zvodně existuje).
7	Uvolnění nivy pro rozlivy	V potenciálně zaplavovaných území omezit aktivity, které jsou záplavou ohroženy, ponechat prostor pro rozlivy povodní a vsak vody z nivy do přípovrchové zvodně (tam, kde je vyvinutá niva a přípovrchová zvodně).
8	Zvětšení infiltrace srážek. vod	Propustné úpravy povrchu – zatravněné pásy, retenční a vsakovací objekty.
9	Využití srážkových vod	Zachycení srážkových vod pro lokální zavlažování a další účely.
10	Zásobní vodní nádrže	Obnova/výstavba nádrží s dominantní zásobní funkcí, využití existujících nádrží jako zásobních.
11	Retenční vodní nádrže	Zřizování suchých nádrží (poldrů) a řízených rozlivů.
12	Zásobní i retenční vodní nádrže	Zřizování víceúčelových vodních nádrží, přizpůsobení manipulačních řádů stávajících nádrží změněným podmínkám.
13	Převody vody mezi povodími a vodárenskými soustavami	Převody vody z povodí, kde je jí dostatek, do místa, kde je jí nedostatek, nebo odvedení části povodňového průtoku do toku nádrže, kde neškodí a může sloužit pro nadlepšování průtoků/zásobování. Propojení vodárenských soustav umožňující v kritických situacích převod vody.
14	Zpětné převody vody uvnitř povodí	Převod vody z níže ležícího úseku toku do výše ležícího úseku (recyklace vody) pro zajištění minimálních průtoků a obecného užívání vody.
15	Dočasné využití statických zásob podzemní vody	Dočasné využití statických zásob podzemní vody (pokud existují) pro odběr nebo i zajištění min. průtoků, lze použít jen v krátkém kritickém období hydrologického sucha, aby se zásoba mohla po jeho ukončení doplnit.
16	Umělé infiltrace	Posílení zdrojů podzemní vody technicky zajištěným zvětšením infiltrace.
17	Vícenásobné využití vody	Vícenásobné využití vody, například vyčištěné odpadní vody pro závlahy.
18	Zhodnocení a přerozdělení kapacit vodních zdrojů	Vodohospodářská řešení zásobních nádrží a vodohospodářských soustav pro měnící se hydrologické poměry, identifikace volných kapacit a možností jimi posílit deficitní oblasti.
19	Minimalizace ztrát vody ve vodárenských soustavách	Zmenšování ztrát vody rekonstrukcí trubních řadů a pomocí dalších opatření.
20	Využití ekonomických nástrojů	Úpravy ceny vody směřující ke zmenšení spotřeby vody, při rozlišení typu zdrojů, odběratelů i stavu vodohospodářské bilance a respektování vztahu poptávky a nabídky.
21	Inovace závlahových systémů	Využití moderních způsobů závlahy, které zmenšují nároky na množství odebrané vody, např. kapkové závlahy.
22	Racionalizace systému povolování odběrů vody	Stávající systém povolování odběrů vody nezaručuje, aby velikost povoleného odběru nebyla u některých odběratelů podstatně větší, než skutečný a potřebný odběr. Tím se administrativně omezuje povolení a uskutečnění jiných odběrů. Tento rozpor je třeba účinně vyřešit pomocí legislativních a ekonomických nástrojů.
23	Racionalizace stanovení min. průtoků	Stávající přístup ke stanovení minimálních zůstatkových průtoků nevede vždy k hodnotám, které odpovídají požadovaným efektům. V případě toků, na nichž průtoky vlivem změny klimatu již významně poklesly, někdy není reálné je dodržet. Je nutné změnit přístup i metodiku výpočtu.
24	Stanovení priorit pro kritické situace nedostatku vody	V kritických fázích hydrologického sucha může nastat stav, kdy nelze splnit všechny požadavky na odběry a zachování minimálních průtoků. Je třeba stanovit priority podle míry nebezpečných dopadů na obyvatelstvo, životní prostředí, energetiku, průmysl, zemědělství a další odběratele.
25	Dokonalejší čištění odpadních vod	Účinnější čištění odpadních vod a další opatření by přispěly k menším nárokům na jejich ředění.

Obr. 6 Stručná specifikace adaptačních opatření

Dopady klimatické změny		
I	Zhoršení mikroklimatu	Zvýšení teploty vzduchu spolu se zmenšením srážek v letním období zejména v oblastech s podprůměrnými ročními úhrny srážek a nadprůměrnými teplotami vzduchu zhorší klimatické podmínky pro stávající vegetační kryt. Adaptační opatření nemohou změnit klimatické poměry, ale mohou ovlivnit lokální mikroklima.
II	Stres stávajících společenstev	Vlivem změn popsaných v bodě I se v obdobích agronomického sucha zhorší podmínky pro stávající vegetaci, u některých plodin poklesnou výnosy, pro některé rostliny a typy lesních společenstev nebudou optimální klimatické podmínky. V extrémních případech může dojít k významné změně struktury společenstev. Nepříznivé dopady lze očekávat v aridnějších oblastech.
III	Zvětšení větrné eroze	Zvětšení větrné eroze půdy při horším stavu vegetačního krytu – více povrchu půdy bude vystaveno větru.
IV	Zvětšení přímého odtoku	Zvětšení přímého odtoku z méně pokrytého povrchu půdy (zmenšená schopnost průsaku do půdy, zvětšená pravděpodobnost vytvoření téměř nepropustné krusty). Následkem bude větší ohrožení obcí odtokem z přívalových dešťů z polí a malých toků.
V	Zvětšení vodní eroze	Zvětšení vodní eroze půdy při horším stavu vegetačního krytu – více povrchu půdy vystaveno účinkům přívalových dešťů.
VI	Pokles průměrných průtoků	Při dlouhodobě zvětšeném územním výparu vlivem zvýšených teplot vzduchu poklesne průměrná výška odtoku a tedy i průměrný průtok i v případě nezměněných dlouhodobých srážek.
VII	Pokles minimálních průtoků	Vlivem poklesu srážek v letním období a dřívějšího počátku poklesu výtoky vody ze zásob podzemní vody poklesnou minimální průtoky v letním a na začátku podzimního období podstatně více, než průměrné průtoky. Průtok pak poklesne pod historicky zaznamenané minimální hodnoty, pod rybníky a nádržemi nebude možné zajistit stanovené minimální ekologické průtoky.
VIII	Zánik průtoků	Proces popsaný v bodě VII povede na malých a středních tocích, v jejichž povodí nejsou významné zásoby podzemní vody, k tomu, že přírodní odtok z povodí i na dobu několika měsíců zanikne.
IX	Zvýšení maximálních průtoků	Jevy popsané v bodě IV při současném zasažení většího území vedou ke zvětšení kulminačních průtoků i na větších tocích.
X	Dopady na odběry vody	Pokles průměrných průtoků a změna ročního chodu průtoků zmenší kapacitu vodních zdrojů povrchové vody u odběrů z toků i vodních nádrží. Poklesy odtoku podzemní vody jsou obdobné jako poklesy průtoků, v hydrogeologických systémech s velkou akumulací lze očekávat jisté zpoždění. Pokles zdrojů podzemní vody je tedy obdobný poklesu u zdrojů vody povrchové.
XI	Dopady na kvalitu vody	Zvýšení teploty vody a menší ředění odpadních vod v období malých průtoků povede ke zhoršení kvality vody. V situacích popsaných v bodě VIII poteče v některých úsecích toku jen vypouštěná odpadní voda. Dojde ke zrychlení procesu eutrofizace vody v nádržích.

Obr. 7 Stručná specifikace dopadů změny klimatu

4 Metodika

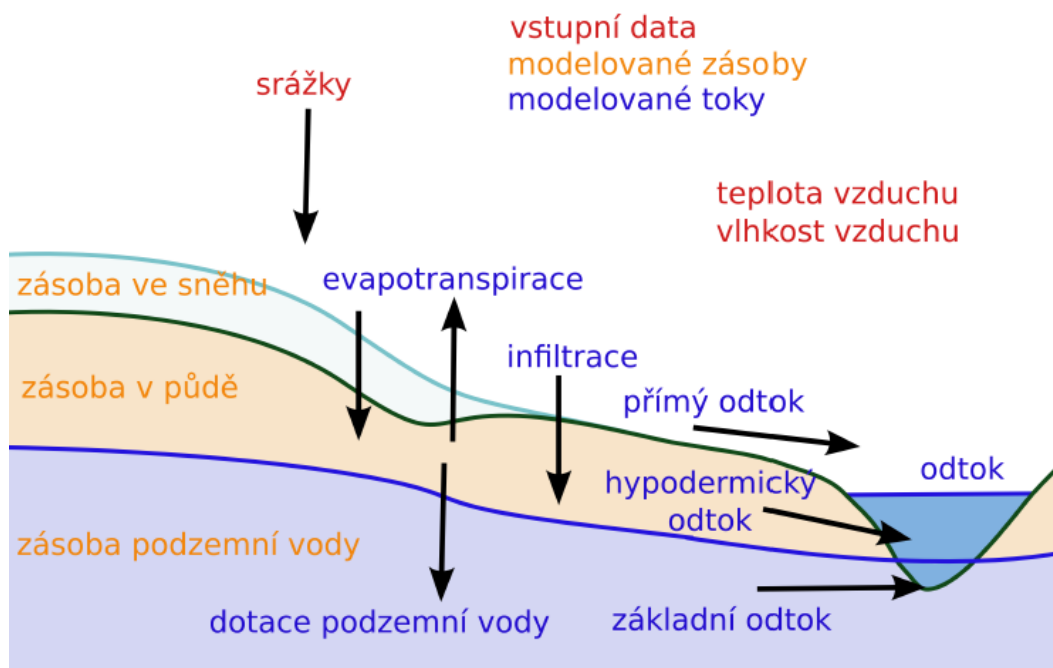
V této kapitole jsou uvedeny obecné postupy modelování dopadů změny klimatu a data využitá ve většině studií následujících dále v práci. Příslušné kapitoly níže uvádějí další detaily týkající se specifických metodických postupů a dat. Je tomu tak zejména pro přehlednost a snadnější pochopení textu. Metodika podrobně představuje hydrologický model Bilan, jenž je využíván ve všech dalších kapitolách. Dále je popsán statistický program CTPA, za jehož pomoci proběhla identifikace trendů v pozorovaných klimatických veličinách z výparoměrné stanice Hlasivo i trendy v posuzovaných hydrogeologických rajonech. V následující části je představena výparoměrná stanice Hlasivo, její historie a současně měřené veličiny. Součástí metodiky je také obecný postup tvorby scénářů klimatické změny a popis regionálních klimatických modelů používaných v případových studiích dizertační práce. Pro zasazení kapitoly Adaptace do kontextu jsou uvedeny obecné postupy modelování vodohospodářské bilance. Zmíněno je také prostorové měřítko řešených studií. V následujících kapitolách zaměřených na problematiku výparu, modelování dopadů klimatické změny na území ČR a kapitole věnující se navrhování adaptačních opatření je na obecné metodické postupy odkazováno a současně jsou tyto postupy doplňovány.

4.1 Hydrologický model Bilan

K modelování hydrologické bilance byl využit konceptuální hydrologický model Bilan (Vizina a kol. 2015). Model Bilan simuluje pro dané povodí složky hydrologické bilance. Struktura modelu je dána vztahy, které popisují základní principy hydrologické bilance na povrchu, v půdní zóně, která je ovlivněna vegetačním pokryvem, a v zóně podzemní vody. Pro stanovení energetické bilance, která má na složky hydrologické bilance významný vliv, slouží teplota vzduchu. Časové rozlišení modelu je jeden den nebo jeden měsíc.

Vstupními daty pro výpočet hydrologické bilance jsou denní nebo měsíční řady srážek na povodí, teploty vzduchu a volitelně relativní vlhkosti vzduchu. Ke kalibraci parametrů modelu (prováděné optimalizačním algoritmem) jsou používány simulované a pozorované denní nebo měsíční řady odtoku z uzávěrového profilu povodí.

Model simuluje časové řady denní nebo měsíční potenciální evapotranspirace, územního výparu, infiltrace do půdy a dotace podzemní vody. Pro každý časový krok je také simulováno množství vody obsažené ve sněhové pokrývce, v půdě a v zásobě podzemní vody. Všechny tyto hydrologické veličiny se vztahují k celému povodí. Celkový odtok se skládá ze dvou nebo tří součástí, jimiž jsou přímý, hypodermický (pouze pro měsíční krok) a základní odtok. Schéma modelu je uvedeno na Obr. 8.



Obr. 8 Schéma hydrologického modelu Bilan

Model má šest (denní časový krok) nebo osm (měsíční časový krok) volných parametrů a k jejich kalibraci na pozorovaných povodích používá optimalizační algoritmus. Cílem optimalizace je dosáhnout co nejlepší shody mezi pozorovanými a simulovanými řadami odtoku. K dispozici je několik optimalizačních kritérií. K dispozici jsou dva optimalizační algoritmy, jeden lokální a jeden globální.

4.1.1 Optimalizace modelu

Při standardní optimalizační proceduře je odhadnutá chyba rovna standardní odchylce mezi pozorovanou a modelovanou časovou řadou, tato chyba může být použita jako optimalizační kritérium (Horáček a kol. 2009). Nevýhodou volby tohoto relativně jednoduchého kritéria je fakt, že nedokáže dobře fitovat (reprodukovat) hodnoty průtoků v oblasti nízkých průtoků. Tento problém se částečně vyřeší tím, že se použijí relativní odchylky pozorované a modelované časové řady. Relativní v tomto případě znamená, že odchylky jsou rozděleny dle průměrného odtoku v jednotlivých měsících. Tento přístup vyřeší problém nízkých průtoků, avšak dochází k nezanedbatelné chybě v oblasti středních hodnot. Z těchto důvodů byla vyvinuta optimalizace, která kombinuje oba přístupy a probíhá ve dvou krocích, kdy každý krok lze nastavit individuálně (Horáček a kol., 2009).

Při klasické optimalizační proceduře je v prvním kroku použita hodnota průměrné (střední) kvadratické chyby (MSE, mean square error) nebo hodnota průměrné absolutní chyby (MAE, mean absolute error). Tyto kalibrační kritéria jsou použity pro odhad parametrů D_{gw} , D_{gm} , S_{pa} a A_{lf} (parametry jsou popsány níže), které reprezentují hodnoty průměrného odtoku.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RM_{(i)} - R_{(i)})^2$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |RM_{(i)} - R_{(i)}|$$

kde: RM – modelovaný odtok

R – pozorovaný odtok

Zbývající parametry modelu Wic, Mec, Soc a Grd ovlivňující distribuci odtoku do jednotlivých komponent modelu jsou kalibrovány pomocí kritéria absolutních hodnot relativních odchylek. Tento postup byl testován a přináší lepší výsledky při kalibraci modelu, jak pro nízké hodnoty průtoků, které jsou ovlivněné především hodnotou základního odtoku, tak pro střední hodnoty odtoku (Horáček a kol., 2009). Průměrná výsledná absolutní hodnota relativních odchylek je vyhodnocena pomocí optimalizačního kritéria MAPE:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|RM_{(i)} - R_{(i)}|}{R_{(i)}}$$

Jako optimalizační kritérium lze také použít Nash-Sutcliffe efficiency (NS) nebo logarithmic Nash-Sutcliffe (LNNS).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (RM_{(i)} - R_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{(i)} - \bar{R})^2}$$

$$LNNS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln RM_{(i)} - \ln R_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (\ln R_{(i)} - \overline{\ln R})^2}$$

kde: \bar{R} – průměrný pozorovaný odtok

$\overline{\ln R}$ – průměrný logaritmovaný odtok

$$\overline{\ln R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln R_{(i)}$$

Model umožňuje nastavení počtu iterací, kdy je standardně přednastavená hodnota 500, Tato hodnota byla definována expertním odhadem na základě zkušeností uživatelů.

4.1.2 Globální optimalizační algoritmus – SCDE

Dále je možno použít pro optimalizaci parametrů modelu Bilan globální algoritmus SCDE – Shuffled Complex Differential Evolution. Metoda je odvozena z algoritmu publikovaného a testovaného v rámci studií (Mariani et al., 2011). Použitý algoritmus pracuje s populací modelů, které prostřednictvím vzájemné interakce prohledávají parametrický prostor a nacházejí v něm optimální hodnoty parametrů.

Algoritmus SCDE spojuje evoluční metodu diferenciální evoluce (Storn a Price, 1997) s algoritmem promíchávání, který tvoří podstatnou část známého široce používaného algoritmu SCE-UA (Duan et al., 1994). Populace modelů je složena z jedinců. Každý z nich je reprezentován jednou sadou parametrů a hodnotou kritériální funkce. Pro tyto jedince je iterativně hledána optimální hodnota kritériální funkce (Máca et al., 2013).

4.1.3 Váhy základního odtoku

Standardně je optimalizační kritérium počítáno z časových řad pozorovaného a modelovaného odtoku. V modelu Bilan je možno nastavit váhu základního odtoku w_{BF} na 0-1, která nastaví optimalizaci modelu tak, aby byl v případě pozorovaného odtoku, tento odtok respektován při optimalizaci. Toto kombinované kritérium se poté vypočítá:

$$crit = (1 - w_{BF}) * crit(R, RM) + w_{BF} * crit(B, BF)$$

kde: B – pozorovaný odtok

BF – modelovaný základní odtok

R – pozorovaný odtok

RM – modelovaný odtok

w_{BF} – váha základního odtoku

4.1.4 Volné parametry modelu

Model je kalibrován na řadu neovlivněných průtoků a neřeší ovlivnění hydrologické bilance vodohospodářskými operacemi v povodí. Pro tyto potřeby je možno aplikovat simulační model vodohospodářských soustav a jako jeho vstupy využít výsledné neovlivněné řady z Bilanu nebo propojený model vodohospodářské a hydrologické bilance Bilan (Vizina a Hanel, 2011).

Volné parametry modelu Bilan:

Spa kapacita zásoby půdní vlhkosti [mm]

Dgm koeficient mezi teplotou a táním sněhu

Dgw koeficient pro výpočet množství kapalné vody dostupné na povrchu za zimních

podmínek

Alf parameter vztahu mezi srážkou a odtokem (přímý odtok)

Soc parametr rozdělující perkolaci na hypodermický odtok a na dotaci podzemní vody pro letní podmínky

Mec parametr rozdělující perkolaci na hypodermický odtok a na dotaci podzemní vody pro podmínky tání sněhu

Wic parametr rozdělující perkolaci na hypodermický odtok a na dotaci podzemní vody pro zimní podmínky

Grd parametr určující odtok ze zásoby podzemní vody (základní odtok)

Teplota, případně v kombinaci s relativní vlhkostí vzduchu slouží pro výpočet potenciální evapotranspirace. Teplota se také používá k odlišení zimních a letních podmínek (typ režimu). Při výskytu sněhové pokrývky se uplatňují algoritmy pro ukládání vody ve sněhu a pro tání sněhu. Voda z roztáleného sněhu a srážková voda infiltrují do půdy. Infiltrovaná voda se může z půdy dostávat k zemědělským plodinám nebo jiné vegetaci. Výpar a transpirace z půdy probíhá v míře odpovídající potenciální evapotranspiraci, a to jen tehdy, pokud je v půdě dostatek vody. Při nedostatku vody v půdě se územní výpar sníží pod potenciální míru. Za deštivých období, kdy srážky převyšují potenciální evapotranspiraci, se z přebytku zvětšuje zásoba půdní vody. Pokud při tom zásoba půdní vody překročí maximální kapacitu, dochází k perkolaci. Perkolace z půdy může rychle dosáhnout vodního toku jako hypodermický odtok (pouze měsíční typ), nebo může dotovat zásobu podzemní vody. K povrchovému odtoku, tj. třetí (v případě denní varianty modelu druhé) složce odtoku, dochází při vysokých srážkových úhrnech (Horáček a kol., 2009).

4.2 Vyhodnocení trendů v pozorovaných řadách

Detekci náhlých nebo postupných změn (trendů) v analyzovaných řadách byla provedena pomocí nástroje CTPA, který byl vyvinut na ČHMÚ. Základními testovanými charakteristikami jsou střední hodnota a rozptyl. Program zahrnuje širokou škálu nástrojů pro testování časových řad (Procházka a kol., 2001).

Použité byly testy:

- Test přítomnosti trendu – tento test přítomnosti trendu zjišťuje, zda je směrnice (parametr b_1) v modelu jednoduché lineární regrese ($y = b_1 + b_2 x$) rovna nule ($b_1 = 0$) proti alternativě, že je směrnice různá od nuly ($b_1 \neq 0$). Vychází se tedy z hypotézy, že se střední hodnota řady v čase nemění oproti alternativě existence lineárního trendu.
- Test vzniku trendu – (test vzniku záporného nebo kladného trendu za předpokladu spojitosti) - v tomto testu je nulovou hypotézou předpoklad řady s neměnnou střední hodnotou, který se testuje oproti alternativě vzniku trendu v bodě, jehož polohu test odhaduje. Přitom se v bodě vzniku trendu předpokládá spojitost trendových křivek.

- Test změny směrnice trendu – (test změny směrnice trendu za předpokladu spojitosti) - testuje se nulová hypotéza, že v řadě existuje konstantní trend oproti alternativě změny směrnice trendu, tj. vzniku zlomu v trendové přímce v odhadnutém bodě.
- Test změny trendu – (obecný test změny trendu bez předpokladu spojitosti) - testuje se nulová hypotéza, že v řadě existuje konstantní trend, oproti alternativě obecné změny parametrů trendové přímky v odhadnutém bodě.

4.3 Výparoměrná stanice Hlasivo

Výparoměrná stanice v Hlasivu u Tábora byla vybudována v roce 1957 v místech původní výzkumné meteorologické stanice a nyní je jedinou nezrušenou základní výparoměrnou stanicí na území ČR. Zaznamenává data o výparu z volné hladiny (Obr. 9) spolu s dalšími meteorologickými prvky (Tab. 1) pro potřeby Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v.v.i.. Výpar z volné hladiny je jedním ze základních prvků vodní bilance. Jeho průměrná hodnota se v průběhu let mění vlivem postupující klimatické změny, stejně jako je tomu u dalších prvků hydrologické bilance. Data ze stanice v Hlasivu jsou přínosná pro studie posuzující vliv klimatické změny na hydrologickou bilanci, stejně tak pro stanovování rovnic pro jeho výpočet a obecně pro bližší poznání hydrologického cyklu. Význam pozorování je zvětšen potřebou kvantifikovat změny výparu vlivem probíhající změny klimatu. Současný systém financování výzkumu dlouhodobé úkoly nepodporuje, takže pokračování této v ČR jediné výparoměrné stanice s velkoplošným výparoměrem je ohroženo.

Za dobu existence prošlo zařízení výparoměrné stanice mnoha změnami. Byly postupně instalovány tyto přístroje: srovnávací výparoměr (od r. 1956), výparoměr Ronův (1954 – 1965), výparoměr Wildův (1956 - 1990), výparoměr GGI 3000 (od r. 1957), výparoměr 500 cm² (tzv. mikrovýparoměr) (1956 – 1961), výparoměr 1 m² hl. 100 cm (1958 – 1961), výparoměr 1 m² hl. 65 cm (1960 – 1965), výparoměr Class-A-Pan (od r. 1962), výparoměr 3 m² (1964 – 1965). Na blízkém rybníce byl také umístěn na voru plovoucí výparoměr o ploše 1 m², později 3 m². V současné době je tedy výpar měřen srovnávacím výparoměrem, výparoměrem GGI 3000 a Class-A-Pan.

Výpar se měří obvykle v období od dubna do října, kdy se teplota pohybuje většinou nad bodem mrazu a nedochází k zamrznání výparoměrného zařízení. Ve stanici Hlasivo se po mnohaletých zkušenostech omezila měřící perioda na měsíce květen až říjen. Pro statistické analýzy byla proto použita pouze sezónní data (od počátku května do konce října).

Tab. 1 Seznam v současnosti měřených veličin:

Výpar z volné hladiny (srovnávací výparoměr (obr. 1), GGI 3000, Class-A-Pan)	Teplota půdy v hloubce 30 cm
Teplota vzduchu ve výšce 2 m nad povrchem země	Teplota půdy v hloubce 50 cm
Relativní vlhkost vzduchu ve výšce 2 m nad povrchem země	Rychlost a směr větru 10 m nad povrchem země
Teplota půdy v hloubce 5 cm	Úhrn a intenzita srážek
Teplota půdy v hloubce 10 cm	Globální sluneční radiace
Teplota půdy v hloubce 20 cm	Teploty vody ve výparoměrech



Obr. 9 Srovnávací výparoměr v Hlasivu

4.4 Scénáře změny klimatu, regionální klimatické modely

K modelování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci bylo vybráno celkem 15 simulací regionálních klimatických modelů (RCM), které pokrývají časové období 1961–2099. RCM jsou výstupem projektu ENSEMBLES (Hewitt a Griggs, 2004). Všechny simulace byly řízené emisním scénářem SRES A1B s prostorovým rozlišením 25 x 25 km. Uvažováno bylo 15 RCM simulací řízených čtyřmi globálními klimatickými modely (Tab. 2). Jako výsledná hodnota změny hydrologické veličiny byl zpravidla brán průměr z těchto 15 simulací. Popis vybraných regionálních klimatických modelů je uveden ve zprávě Hanel a kol. (2015) nebo Hanel a Vizina (2010). K dispozici byla data za pozorované období 1961–2010. Změny bilančních prvků byly brány k průměru ze současného období 1981–2010.

Jako kontrolní období bylo uvažováno období 1981-2010, scénáře byly odvozeny pro různé budoucí časové horizonty, podle potřeb jednotlivých studií. Pro tvorbu scénářů byla využita přírůstková metoda. Podstatou metody je, že se ze simulace klimatického modelu odvodí změny měsíčních průměrů srážek a teploty mezi požadovanými obdobími (např. 2081-2100 a 1981-2010) – tzv. přírůstkové faktory – a těmito přírůstkovými faktory se upraví pozorovaná řada. Srážky jsou transformovány multiplikativně, teplota aditivně. Tedy například klimatický model simuluje pro kontrolní období lednové srážky 80 mm a lednové srážky pro období 2081-2100 160 mm, tj. přírůstkový faktor $dP(\text{leden}) = 2$. Scénář lednových srážek se pak vytvoří tak, že všechny lednové srážky se násobí $dP(\text{leden})$, tedy dvěma atp. Tato metoda tvorby scénářů je relativně robustní. Pro simulaci velmi dlouhých řad a hodnocení dlouhodobé variability je někdy doporučována tvorba scénářů klimatické změny pokročilými metodami zachovávajícími i změny v delších časových měřítcích. Rozdíly nicméně často nejsou příliš významné.

Jelikož v současnosti existuje celá řada dostupných simulací globálních a regionálních klimatických modelů, jež je možné pomocí řady metod transformovat do scénářů změn klimatu, byly využity referenční scénáře změn klimatu, jež byly odvozeny v rámci projektu „Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství i v kontextu změn klimatu“. Referenční scénáře byly odvozeny v podobě sady tří scénářů hlavně pro dobrou porovnatelnost jednotlivých studií dopadů změn klimatu. Záměrem nebylo vytvářet nové simulace, ale vybrat z dostupných simulací. Volba reprezentativních simulací se opírá o vyhodnocení měsíčních změn teploty a srážek a dopadů těchto změn na odtok, základní odtok, potenciální evapotranspiraci a územní výpar pro sadu 130 povodí pokrývajících ČR dle souboru 15 simulací regionálních klimatických modelů z projektu ENSEMBLES. Jako negativní scénář byla vybrána simulace ALADIN-CLIMATE/CZ, jež reprezentuje kategorii s nejméně výraznými dopady. Jako relativně pozitivní scénář byla vybrána simulace REMO_EH5, která reprezentuje skupinu simulací s méně negativními dopady a zároveň se v ní nevyskytují abnormálně vysoké či nízké změny srážek a teploty pro jednotlivé měsíce. Jako střední scénář byla vybrána simulace CLM_Q0. Každá ze simulací je řízena jiným globálním klimatickým modelem, jednotlivé scénáře tak reprezentují často velmi odlišné reakce klimatického systému na změnu emisí skleníkových plynů. Popis odvození referenčních scénářů je detailněji popsán v Hanel a kol. (2014).

Tab. 2 Přehled simulací regionálních klimatických modelů (RCM)

Akronym	RCM	Časové období	Zdroj
řízené modelem ECHAM5			¹ Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) ² Max Planck Institute for Meteorology (MPI), Germany ³ Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) ⁴ Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Italy ⁵ Danish Meteorological Institute (DMI) ⁶ Met Office Hadley Centre, UK ⁷ Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ) ⁸ Community Climate Change Consortium for Ireland (C4I) ⁹ National Centre of Meteorological Research (CNRM), France ¹⁰ Czech Hydrometeorological Institute (CHMI), Czech Republic
RACMO_EH5 ¹	RACMO2.1	1950–2100	
REMO_EH5 ²	REMO5.7 (rScen3)	1951–2100	
RCA_EH5 ³	RCA3.0	1951–2100	
RegCM_EH5 ⁴	RegCM3	1951–2100	
HIR_EH5 ⁵	HIRHAM5	1951–2100	
Řízené modely HadCM3Q0, HadCM3Q3, HadCM3Q16			
HadRM_Q0 ⁶	HadRM3.0	1951–2099	
CLM_Q0 ⁷	CLM2.4.6 (rScen2)	1951–2099	
HadRM_Q3 ⁶	HadRM3.0	1951–2099	
RCA_Q3 ³	RCA3.0	1951–2099	
HadRM_Q16 ⁶	HadRM3.0	1951–2099	
RCA_Q16 ⁸	RCA3.0	1951–2099	
řízené modelem ARPEGE4.5			
HIR_ARP ⁵	HIRHAM5	1951–2100	
CNRM5_ARP ⁹	CNRM-RM5.1	1951–2100	
CHMI_ARP ¹⁰	ALADIN-CLIMATE/CZ (rScen1)	1961–2100	
řízené modelem BCM2.0 driven			
RCA_BCM ³	RCA3.0	1961–2100	

4.5 Prostorové měřítko

Prostorové měřítko jednotlivých dílčích studií je rozdílné. V první části, která se zabývá výparem (potenciální evapotranspirace, výpar z vodní hladiny) je zaměřeno na bodová pozorování, zejména se jedná o určení vztahů pro výpar z výparoměrné stanice Hlasivo. V další části jsou jednotlivé členy hydrologické bilance počítány na větší územní celky, a sice se jedná o jednotlivé hydrogeologické rajony (cca 100-1000 km²), případně se pracuje v měřítku celého Karlovarského kraje. U modelování zranitelnosti ČR z hlediska zasažení nedostatkem vody jsou indexy počítány pro celou republiku, rozdělenou na povodí III. řádu.

4.6 Modelování vodohospodářské bilance

Pro posouzení dostupnosti vodních zdrojů je v Česku využíván institut vodní bilance, konkrétně vodohospodářské bilance množství povrchových a podzemních vod. Obsah a způsob sestavení vodní bilance určuje vyhláška č. 431/2001 Sb., postup zpracování vodohospodářské bilance dále podrobněji specifikuje příslušný metodický pokyn (MZe, 2002). Vodohospodářská bilance je definována ve třech časových úrovních jako bilance (a) minulého kalendářního roku a (b) současného a (c) výhledového stavu. Vzhledem ke stochastickému charakteru přírodních podmínek je využití bilance minulého roku k posouzení dostupnosti vodních zdrojů jen velmi omezené. Určitou indikaci problémových lokalit povrchových vod může poskytovat pouze při vyhodnocení jejích výsledků (bilančních stavů) za delší časové období a to za předpokladu, že v tomto období nedocházelo k významným změnám v užívání vod a pravidlech regulace odtoku na vodních dílech. Pro vyhodnocení dostupnosti vodních zdrojů z hlediska potřeb na jejich užívání jsou naopak vhodným nástrojem vodohospodářská bilance současného a výhledového stavu. Výstupem vodohospodářské bilance povrchových vod je vyhodnocení bilančních stavů a potažmo identifikace lokalit, které jsou nebo v budoucnu mohou být z hlediska zajištění potřeb užívání vody problémové (nacházejí se v pasivním nebo napjatém bilančním stavu). Metodický pokyn určuje postupy pro vyhodnocení vodohospodářské bilance současného a výhledového stavu pouze rámcově. Hodnocení vodohospodářské bilance množství podzemních vod je blíže specifikováno v širším rámci postupů hodnocení kvantitativního stavu podzemních vod pro potřeby zpracování plánů povodí (Prchalová, 2013). V případě vodohospodářské bilance množství povrchových vod současného a výhledového stavu je potřebné – zejména v případě zajištění požadavků na užívání pomocí vodohospodářských soustav – využít metod modelování. Jako vhodnou metodu lze aplikovat simulační modelování zásobní funkce vodohospodářské soustavy (Vyskoč a Zeman, 2008).

4.6.1 Modelování zásobní funkce vodohospodářských soustav

Princip aplikace simulačního modelu zásobní funkce vodohospodářské soustavy lze s určitou mírou zjednodušení popsat takto (Vyskoč a Zeman, 2008):

Na reálném povodí je vymezena vodohospodářská soustava povrchové vody, sestávající z prvků, které charakterizují chování soustavy z hlediska množství povrchových vod. Jedná se o prvky/profilu (a) plnící funkci regulace odtoku (vodní nádrže a převody vody), (b) s vlivem/požadavkem na zdroje vody (odběry a vypouštění vody, zajištění minimálních průtoků, hladin a dalších aktivit) a (c) plnící kontrolní funkci (hodnocení vlivu užívání vody na průtokový režim v bilančních profilech). V simulačním modelu je tak reálná soustava reprezentována pouze těmito významnými profilem. Vliv ostatních prvků je k profilům soustavy agregován. Síť vodních toků je, jako entita propojující prvky vodohospodářské soustavy, do modelu zavedena tzv. průtokovou cestou, určující sled prvků ve směru toku vody. Simulační model simuluje chování soustavy v diskrétních časových krocích na základě znalosti časových řad přirozených průtoků (tj. neovlivněných užíváním vody a regulací průtoku), požadavků užívání vody, technických parametrů prvků soustavy a do modelu zavedených pravidlech hospodaření na vodních dílech. Struktura prvků soustavy a nároků na užívání vody jsou v simulačním modelu považovány za konstantní a chování takto fixované soustavy je v rámci hydrologického podkladu prošetřeno v různých hydrologických situacích. K rozdělování vody ze zdrojů mezi uživatele dochází v každém časovém kroku podle manipulačních pravidel. V terminologii modelování se jedná o aplikaci statického popisného

simulačního modelu. Model simuluje zásobní funkci soustavy v průběhu délky hydrologického podkladu. Základem je rovnice vodní nádrže:

$$WK = WZ + OP - O - E$$

při omezení

$$0 \leq WK \leq Vz$$

kde

WK - obsah vody v nádrži na konci časového kroku,

WZ - obsah vody na začátku časového kroku,

OP - ovlivněný přítok vody do nádrže,

O - odtok vody z nádrže,

E - výpar z vodní plochy v nádrži

Vz - zásobní objem nádrže

a rovnice pro stanovení hodnoty ovlivněného přítoku do profilu soustavy

$$OP = PP + \Delta s + Xs$$

kde

OP - přítok do profilu ovlivněný činností vodních nádrží, resp. realizovanými odběry a vypouštěními v povodí nad profilem,

PP - přirozený (neovlivněný) průtok v profilu,

Δs - změna průtoků vlivem nádrží ($\Delta s = \Sigma(WZ - WK)$),

Xs - změna průtoků vlivem realizovaných odběrů *ODB* a vypouštění *VYP* ($Xs = \Sigma VYP - \Sigma ODB$).

Při vlastním výpočtu se v každém profilu soustavy (směrem po průtokové cestě) porovnává požadovaný průtok (obecně jako součet minimálního zůstatkového průtoku a odběru v profilu, resp. množství vody potřebného pro využití) s hodnotou (funkcí soustavy nad profilem ovlivněného) přítoku do profilu. Je-li profil v dosahu aktivního působení zdroje s možností nadlepšení, doplní se případný deficit ze zdroje/zdrojů (nádrží, případně prostřednictvím převodů vody v rámci daných manipulačních pravidel) s případným zavedením jejich spolupráce. V profilech soustavy jsou pak v každém kroku řešení vyhodnocovány aktivity prvků soustavy (obsah vody/hladiny v nádržích, realizované odběry a vypouštění, převáděná množství vody, přirozené a ovlivněné průtoky).

Používání simulačního modelu vyžaduje tato vstupní data:

- Údaje o struktuře polohy
 - identifikace sítě vodních toků,
 - lokalizace jevů/profilů (relevantních z hlediska bilance množství povrchových vod) vzhledem k říční síti.
- Hydrologické podklady
 - časové řady neovlivněných průměrných měsíčních průtoků ve všech profilech, které v modelu reprezentují vodohospodářskou soustavu (výstupy

hydrologické bilance ve vodoměrných stanicích a průtoky odvozené hydrologickou analogií),

- časové řady průměrného měsíčního výparu z volné hladiny vodních nádrží
- Požadavky užívání vody, tj.
 - měsíční hodnoty odběrů povrchových vod,
 - měsíční hodnoty vypouštění do povrchových vod,
 - měsíční hodnoty odběrů podzemních vod,
 - požadavky na režim hladin/průtoků (energie, plavba, rekreace apod.).
- Požadavky na zachování minimálních průtoků resp. na režim průtoků, vyplývající
- Technické parametry objektů v profilech soustavy
 - rozdělení objemů vodních nádrží,
 - charakteristiky vodních nádrží (čáry zatopených ploch a objemů),
 - technické kapacity převodů vody.
- Manipulační pravidla pro regulaci průtoku nádržemi a převody vody
 - pravidla hospodaření s vodou v zásobním prostoru vodních nádrží.

Při plnění vstupních dat simulačního modelu lze využít následující datové zdroje:

- Evidence vedené podle vyhlášky č. 252/2013 Sb., jako součást informačního systému veřejné správy a to konkrétně:
 - evidence vodních toků,
 - evidence hydrogeologických rajonů
 - evidence vodních nádrží,
 - evidence množství povrchových vod,
 - evidence odběrů povrchových vod,
 - evidence odběrů podzemních vod,
 - evidence vypouštění odpadních vod,
 - evidence vypouštění důlních vod,
 - evidence akumulace povrchových vod ve vodních nádržích.
- Manipulační řády vodních nádrží.
- Ohlašované údaje pro sestavení vodní bilance podle vyhlášky 431/2001 Sb.
- Vodoprávní rozhodnutí.
- Evidence vodních toků a hydrologických povodí vedená v Digitální bázi vodohospodářských dat (DIBAVOD), zejména geografická vrstva hydrologických úseků vodních toků.
- Majetkové a provozní evidence vodovodů a kanalizací vedené podle vyhlášky č. 428/2001 Sb.
- Plány rozvoje vodovodů a kanalizací krajů (PRVKÚK), případně další koncepční materiály rozvoje krajů.

4.6.2 Vyhodnocení zabezpečení požadavků na zdroje

Simulačním modelem vytvořené časové řady aktivit lze následně statisticky vyhodnotit, tj. např. určit pravděpodobnost zabezpečení požadavků na užívání vody a minimálních průtoků, pravděpodobnosti překročení hladin vody v nádržích, čáry překročení průměrných měsíčních průtoků apod.). Pro posouzení míry zajištění požadavků na užívání vody (odběrů, minimálních průtoků) a následné určení bilančních stavů lze aplikovat charakteristiky a kritéria uvedená v ČSN 75 2405, tj. jako určující charakteristiku vyhodnotit simulovanou zabezpečení podle trvání a porovnat ji s požadovanou hodnotou určenou podle významnosti požadavku na užívání.

4.6.3 Zajištění minimálních zůstatkových průtoků a stupeň ovlivnění hydrologického režimu

Užívání vod ovlivňuje resp. je limitováno požadavky na zachování ekologické funkce vod a obecného nakládání s vodami, tj. požadavky na zachování minimálních zůstatkových průtoků ve vodních tocích a hladin podzemních vod a obecněji potom požadavky na zachování či dosažení dobrého ekologického stavu nebo potenciálu povrchových vod a dobrého kvantitativního stavu podzemních vod (Směrnice 2000/60/ES). Součástí vyhodnocení dostupnosti vodních zdrojů by proto mělo být i posouzení zabezpečení minimálních zůstatkových průtoků (vyhodnocení zabezpečení podle trvání) a vyhodnocení dopadu užívání vod na přirozený hydrologický režim. Pro potřeby zpracování plánů povodí je specifikován pracovní postup určení významných vlivů na hydromorfologii, jehož součástí je i vyhodnocení stupně ovlivnění přirozeného hydrologického režimu (Kožený a kol., 2018). Postup vychází z ČSN EN 15 843 a je založen na porovnání přirozených a užíváním vody ovlivněných průtoků.

Uvedený postup simulačního modelování a vyhodnocení vodohospodářské bilance množství povrchových vod lze aplikovat při bilanci současného (tj. hodnocení současných požadavků na užívání vod při stávajících kapacitách vodních zdrojů a manipulačních pravidlech a stávajících hydrologických podmínkách) i výhledového stavu (tj. pro výhledové požadavky na užívání vod a při možných změnách hydrologických podmínek, např. v důsledku klimatické změny), včetně vyhodnocení možných efektů opatření (úpravy požadavků na užívání, úpravy manipulačních pravidel, rozšíření retenčních kapacit apod. – viz dále) v rizikových (bilančně pasivních či napjatých) lokalitách.

4.6.4 Nejistoty vyhodnocení

Pro aplikaci bilančních postupů je v Česku vytvořena rozsáhlá datová základna vedená na celostátní nebo regionální úrovni. Před jejím využitím je nicméně účelné vstupní data podrobněji analyzovat (vzhledem k jejich reprezentativnosti), aby byla vyhodnocena a případně i snížena (pokud jsou k dispozici podrobnější údaje) případná míra nejistot hodnocení (zejména v bilančně napjatých lokalitách). Analýza dat je účelná v následujících dílčích oblastech.

4.6.5 Specifikace požadavků na odběry vody

Bilance zdrojů a potřeb vody vyžaduje kvantifikaci požadavků na užívání vodních zdrojů, zejména odběry vody. Evidence odběrů povrchových a podzemních vod vedená pro potřeby vodní bilance podle příslušné vyhlášky 431/2001 Sb., obsahuje údaje o skutečných odběrech vody v měsíčním kroku a o hodnotách povoleného množství odběru. Skutečné odběry vody nicméně nemusí dostatečně přesně reprezentovat současné požadavky na odběry: odebrané množství se může měnit v závislosti na mnoha faktorech souvisejících např. s provozem průmyslových podniků (odstávky provozu apod.) nebo výskytem sucha (omezení odběrů v důsledku nedostatku vody ve vodních zdrojích, zvýšené nároky na odběry pro závlahy v důsledku nedostatku vody v půdě apod.). Problém s určením požadavků na odběry a příslušných zdrojů může nastávat rovněž v případě zásobování pitnou vodou vodárenskými systémy, kdy odběr může být uskutečněn z více zdrojů (vodních toků či nádrží), odebrané množství z určitého zdroje může být proměnlivé např. v závislosti na dalších pro provoz důležitých faktorech. Rovněž povolené množství odběru se v mnoha případech dlouhodobě liší (je často výrazně nižší) než skutečně odebírané množství. Při určení požadavků na odběry vody reprezentujících současnost či určitý výhledový stav je tedy účelné podrobněji vyhodnotit variabilitu skutečných odběrů za několikaleté období a rovněž jejich poměr k povoleným hodnotám. V případě požadavků na odběry pro zásobování pitnou vodou je před bilančním hodnocením (a později při návrhu zmírňujících opatření ke snížení rizika nedodávky) rovněž účelné znát strukturu vodárenských soustav. Při určení budoucích potřeb vody pro zpracování výhledové bilance lze v případě sektoru veřejných vodovodů a energetiky na obecné úrovni vycházet např. z případové studie scénářů pro období 2030-2050 (Ansorge a kol., 2015), v případě konkrétních lokalit zásobovaných z veřejných vodovodů potom z údajů Plánů rozvoje vodovodů a kanalizací území kraje ČR (PRVKÚK).

4.6.6 Množství vypouštěných vod a srážkové vody

Množství vypouštěné do povrchových vod v evidenci vedené pro potřeby vodní bilance v sobě zahrnuje i vody srážkové a balastní. To může v málovodných obdobích výsledky vodohospodářské bilance zkreslovat (z hlediska posouzení míry zajištění požadavků na užívání vod a zachování minimálních zůstatkových průtoků se výsledky mohou jevit jako příznivější) a zastírat identifikaci bilančně pasivních nebo napjatých lokalit. Pro korektní vyhodnocení vodohospodářské bilance je tedy účelné množství vypouštěných odpadních vod o srážkové a balastní vody očistit. Významný podíl srážkových a balastních vod ve vypouštění se týká zejména vypouštění z veřejných kanalizací a vypouštění důlních vod (kdy se často jedná o čerpání a vypouštění srážkových a podzemních vod). V případě vypouštění z veřejných kanalizací lze vypouštěné množství o srážkové vody „očistit“ pomocí dat Majetkové a provozní evidence vodovodů a kanalizací vedené podle vyhlášky č. 428/2001 Sb. (Údaje jsou vedeny pouze jako celoroční, při rozdělení do měsíčního kroku lze prostřednictvím Majetkové a provozní evidence dohledat odběr vody, z kterého je příslušná lokalita zásobována a následně pro vypouštění vod použít stejné měsíční rozdělení

vypouštěného množství jako u příslušného odběru podle měsíčních hodnot evidovaných pro potřebu vodní bilance podle vyhlášky 431/2001 Sb. Obecně nicméně platí, že odběry pro veřejné vodovody vykazují nízkou sezonní variabilitu a variabilita ve vypouštěném množství během roku je způsobena právě podílem srážkových vod. Určit a uvažovat v simulačním modelu sezonní variabilitu vypouštění může být účelné pouze při posuzování bilančně problémových lokalit.)

4.6.7 Vliv odběrů podzemní vody na povrchové vody

I když vodohospodářská bilance množství podzemních vod je hodnocena samostatně, vliv odběrů podzemních vod se započítává do vodohospodářské bilance množství povrchových vod. Vliv odběrů podzemních vod na průtoky (jejich ochuzení) je v dosud převažující praxi zjednodušeně v plném rozsahu odebraného množství projektován na nejbližší vodní tok v hydrologickém povodí, bez zohlednění hydrogeologické struktury. To může vést ke zkreslujícím výsledkům v případě hlubokých pánevních hydrogeologických struktur. V tomto ohledu je proto účelné odběry podzemní vody rozdělit na (a) odběry, jejichž vliv se projevuje v nejbližším vodním toku a na (b) ostatní odběry, pro které je před určením místa jejich vlivu na povrchové vody účelné zpracovat studii založenou na podrobnějších znalostech dané hydrogeologické struktury, současných a výhledových odběrech podzemní vody a požadavcích na ekologické průtoky, případně aplikovat matematické modelování proudění podzemních vod. Hydrogeologické rajony hlubokých pánevních hydrogeologických struktur představují rajony s vymezenými kolektory. Kolektory byly vymezeny v rámci hydrogeologické rajonizace v roce 2005.

4.6.8 Podrobnost řešení

Výše uvedené postupy vodohospodářské bilance a související datová základna, tj. evidence odběrů, vypouštění a akumulací vod vedená podle vyhlášky 431/2001 Sb., jsou určeny k celostátní aplikaci a odtud se odvíjí i odpovídající měřítko jejich podrobnosti: údaje o skutečných odběrech, vypouštění a akumulaci vod jsou ohlašovány a evidovány v měsíčním kroku, a to pouze pokud překračují stanovený množství limit. Tato podrobnost nemusí být lokálně dostatečná v případě kumulativního vlivu více „podlimitních“ odběrů, vypouštění a akumulací. Možný kumulativní vliv těchto odběrů byl např. zaznamenán v zemědělských oblastech (Kašpárek, Mrkvičková, 2008), v případě odběrů pro veřejné vodovody lze tento vliv částečně vyhodnotit podle dat Majetkové a provozní evidence vodovodů a kanalizací (kde je množství limit pro zařazení do evidence nižší). Z hlediska časového kroku může být řešení v měsíčním kroku nedostačující např. v případech kompenzačního nadlepšování průtoku dále pod vodními nádržemi nebo u odběrů vody s výraznou variabilitou v průběhu měsíce (např. odběr pouze v pracovních dnech apod.), které nejsou zajišťovány vodními nádržemi.

Finálním výstupem modelování vodohospodářské soustavy je uvedení míry zabezpečení pro jednotlivé odběry a modelované profily (vodní tok, nádrž).

Kapitola Modelování vodohospodářské bilance vychází zejména z certifikované metodiky Beran a kol. (2019b), dále ze zprávy Vyskoč a Zeman (2008).

5 Zpřesnění metod odhadu výparu

Evapotranspirace, souhrnné označení pro výpar vody ze zemského povrchu a výdej vody vegetací, je jedním ze základních procesů oběhu vody v přírodě, probíhá na všech vlhkých površích. Potenciální evapotranspirace udává, jaké množství vody by se z povrchu a vegetace dostalo do atmosféry, pokud by byl vody v půdě stálý dostatek. Její hodnota závisí na množství dostupné energie a stavu atmosféry, které mohou být vyjádřeny celou řadou faktorů, z nichž nejdůležitější jsou teplota, radiační bilance slunečního záření, vlhkost a proudění vzduchu (Beran a kol., 2011). Skutečně pozorovaná evapotranspirace (územní výpar) je pak limitovaná zásobou dostupné půdní vody. Velké množství faktorů, které územní výpar ovlivňují, má za důsledek velkou proměnlivost jeho reálných hodnot na větším území. Výpar je také velice málo měřená veličina, a proto musí proto být velmi často určován ze vzorců, které obsahují změřitelné meteorologické veličiny (Allen, 1998). Vzhledem k tomu, že průměrná teplota vzduchu se v posledních letech zvyšuje, dochází vlivem výparu k významným ztrátám vody z povodí. Výpar se tak stává stěžejním prvkem hydrologické bilance a jeho poznání je v rámci hydrologie klíčové.

Kapitola se zabývá rozбором problematiky potenciální evapotranspirace a výparu z vodní hladiny v podmínkách klimatické změny. Jsou popsány a definovány nové vztahy mezi výparem a ostatními klimatickými veličinami, jež jsou pozorovány na výparoměrné stanici v Hlasivu u Tábora, jejich dosavadní a předpokládaný vývoj. Problematika ztrát vody výparem z vodní hladiny vlivem zvyšující se teploty vzduchu je popsána detailněji na případě povodí Lužnice, kde je na území povodí vysoký podíl vodních ploch (oblast rybníků).

5.1 Testování vztahu pro výpočet potenciální evapotranspirace pro možnost implementace v hydrologickém modelu Bilan

Potenciální evapotranspirace je jedním ze základních podkladů pro určení hydrologické bilance povodí. Z důvodu značné obtížnosti přímého měření bývá často odhadována výpočtem na základě jiných meteorologických veličin. Vzhledem k relativně zastaralému způsobu výpočtu potenciální evapotranspirace modelem Bilan, který byl navíc vzhledem k aktuálním poznatkům (Oudin a kol., 2010) zbytečně náročný na data, vznikla v roce 2011 potřeba otestování metody odhadu potenciální evapotranspirace nenáročné na vstupní data. Níže je popsán postup testování metody pro výpočet potenciální evapotranspirace podle Oudina (Oudin a kol., 2010), jež jako vstupní data vyžaduje pouze pozorovanou teplotu vzduchu. Postupy a výsledky jsou uveřejněny v příspěvku Beran, Horáček a Hanel (2011).

Jako vstupní informace do modelů hydrologické bilance hraje časové a plošné rozdělení evapotranspirace nezastupitelnou roli při bilancování zásob vody v půdě (Knozová a kol., 2005), a proto je její stanovení pro hydrologii jedním ze stěžejních úkolů. Množství faktorů, které evapotranspiraci ovlivňuje, způsobuje složitost jejího přímého měření. Je proto zpravidla určována výpočtem na základě meteorologických veličin, které je možno snadněji změřit.

Cílem testování bylo porovnat výsledky výpočtu potenciální evapotranspirace metodou dle Oudina a kol. (2010), který vyžaduje jako vstupní data pouze teplotu vzduchu, s výsledky metody vycházející z vegetační zóny pro dané povodí a hodnot sytostního doplňku, která vyžaduje teplotu i vlhkost vzduchu. Tato druhá metoda je původní součástí modelu hydrologické bilance Bilan (Tallaksen, van Lanen, 2004). V případě úspěšného testování by bylo možno stávající metodu v modelu Bilan nahradit metodou podle Oudina, jejíž výhodou je menší náročnost na vstupní data.

5.1.1 Empirický odhad výparu na základě vegetačních zón

Tato metoda stanovuje hodnoty potenciální evapotranspirace na základě sytostního doplňku, vypočteného z pozorované teploty a relativní vlhkosti vzduchu. K tomu se využívá tabulkových hodnot odečtených z grafů uvedených v publikaci (Gidrometeoizdat, 1976), která uvádí měsíční hodnoty potenciální evapotranspirace (pro každý měsíc jiný graf) rozdílné pro vegetační (geobotanické) zóny – od tundry až po poušť. Ty jsou obecně charakterizovány rozmezím průměrných teplot vzduchu a průměrných ročních úhrnů srážek. V klimatických podmínkách ČR jsou určeny jen teplotou, srážky jsou všude větší, než mezní hodnota 400 mm. Při použití této metody v původní verzi je potřeba jednoznačně zadat bioklimatickou zónu, ve které se zkoumané povodí nachází.

Pro výpočty eliminující skokovou změnu evapotranspirace při přechodu z jedné zóny do druhé byla původní metoda modifikována tak, že výsledná hodnota evapotranspirace je interpolována mezi výsledky pro sousední vegetační zóny (Krejčová a kol., 1993). Každé vegetační zóně je přiřazena charakteristická (střední) průměrná roční teplota vzduchu. Podle průměrné roční teploty T , zjištěné podle pozorování na posuzovaném povodí se naleznou nejbližší nižší a nejbližší vyšší charakteristické teploty T_{ZD} a T_{ZH} , vypočtou se jim odpovídající hodnoty evapotranspirace z tabulek pro příslušné zóny

$$PE_{ZD}(i) = f_{ZD}(t(i), H(i))$$

$$PE_{ZH}(i) = f_{ZH}(t(i), H(i))$$

f_{ZD}, f_{ZH} ... tabelované hodnoty potenciální evapotranspirace odpovídající grafu pro danou zónu

i ... pořadí měsíce v řadě

$t(i)$... průměrná teplota na povodí v měsíci i

$H(i)$... průměrná relativní vlhkost na povodí v měsíci i

a provede se interpolace mezi údaji pro užití zóny:

$$PE(i) = PE_{ZD}(i) + (T - T_{ZD}) \frac{PE_{ZH}(i) - PE_{ZD}(i)}{T_{ZH} - T_{ZD}}$$

Denní hodnoty jsou poté zjišťovány jednoduše jako rovnoměrný podíl z měsíčních, protože rozdíl oproti interpolaci mezi jednotlivými měsíci se zachováním měsíčních průměrů se ukázal jako nevýznamný (Horáček a kol., 2009).

5.1.2 Odvození výparu na základě teploty

Použitý vzorec pro výpočet potenciální evapotranspirace PE je založený pouze na změřené teplotě vzduchu t .

$$PE = \frac{0,408R_e(t+5)}{100} \text{ pro } (t+5) > 0$$

$$PE = 0 \text{ pro } (t+5) \leq 0$$

Rovnice byla odvozena na základě studie, která porovnála více než 25 existujících vzorců pro výpočet potenciální evapotranspirace na více jak 300 povodích. Řady potenciální evapotranspirace pak byly použity s uspokojivým výsledkem jako vstupní data do čtyř odlišných hydrologických modelů (Oudin a kol., 2010).

R_e je extraterestrická radiace ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), množství dopadajícího slunečního záření, může být pro každý den v roce a pro danou zeměpisnou šířku odvozena ze sluneční konstanty, deklinace Slunce a období v roce (Allen a kol., 1998):

$$R_e = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_S \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_S)]$$

R_e ... extraterestrická radiace [$\text{MJ m}^{-2} \text{ den}^{-1}$]

G_{SC} ... sluneční konstanta = $0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$

d_r ... inverzní relativní vzdálenost Země – Slunce (4)

δ ... deklinace Slunce (úhlová vzdálenost Slunce od rovníku) [rad] (5)

ω_S ... hodinový úhel západu Slunce [rad] (6)

ϕ ... zeměpisná šířka [rad]

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right)$$

J ... číslo dnu v roce od 1 (1. leden) po 365 nebo 366 (31. prosinec)

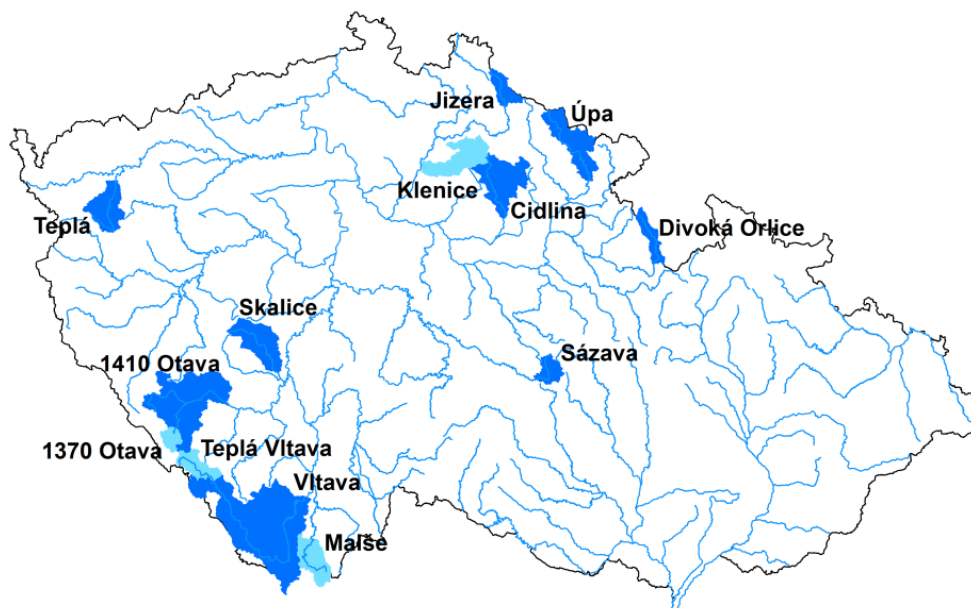
$$\omega_S = \arccos[-\tan(\phi)\tan(\delta)]$$

5.1.3 Porovnání metod

Jako vstupní data do modelu Bilan byly zvoleny hodnoty v denním kroku ze 13 povodí na území ČR (Obr. 10) o různé velikosti (130–1800 km²) a o různé délce trvání (10–45 let). Vstupními daty do modelu byly řady srážek, odtoků, teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu.

Modelem byly dopočteny hodnoty potenciální evapotranspirace, a to jednak metodou vycházející z vegetační zóny (s využitím teplot a vlhkostí) a jednak metodou podle Oudina (s využitím teploty). Následně byl model kalibrován na shodu měřených a modelovaných odtoků.

Obě modelované řady odtoků byly vzájemně porovnány mezi sebou a s měřenými hodnotami. Jako ukazatele pro srovnání byly použity střední absolutní chyba (MAE), která uvádí střední velikost absolutních reziduí, a průměrná relativní odchylka (MRE), která uvádí průměrnou hodnotu absolutních procentuálních rozdílů mezi hodnotami odtoku.

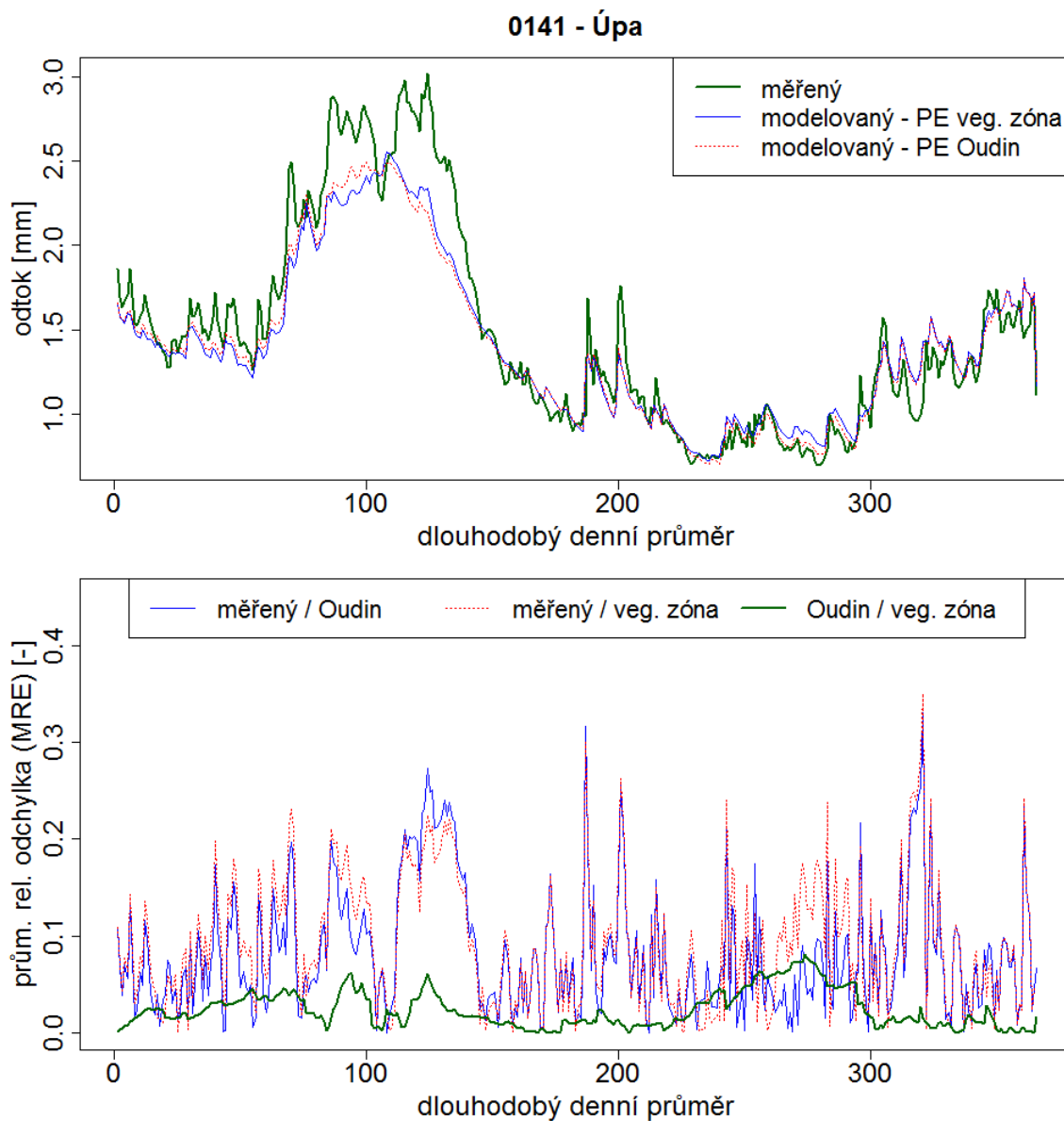


Obr. 10 Testovaná povodí

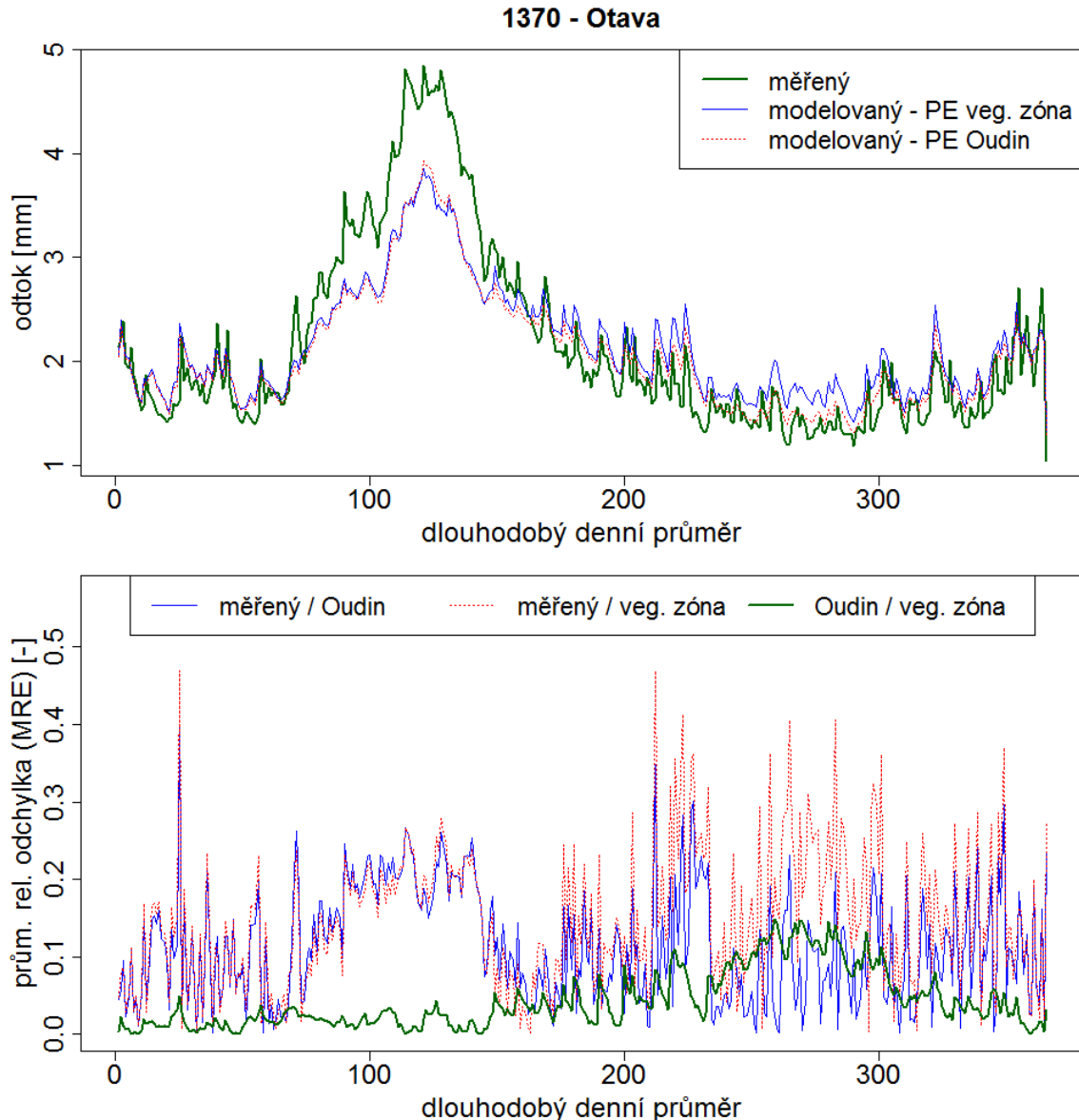
Průměrná relativní odchylka mezi modelovanými odtoky (s využitím různých metod výpočtu potenciální evapotranspirace) se pohybuje do 13 %, pro 7 ze 13 povodí je odchylka do 5 %. Srovnání modelovaných a pozorovaných odtoků ukázalo, že při použití metody dle Oudina byla střední absolutní chyba menší v 9 ze 13 případů, avšak průměrná střední absolutní chyba pro obě metody ze všech modelovaných povodí je téměř totožná. Průměrná relativní odchylka od měřených hodnot se pro obě metody pohybuje od 8 do 25 %, průměrná relativní odchylka mezi oběma metodami je výrazně menší, než odchylky od měřených hodnot. Celkový průměr relativních odchylek od měřených odtoků je 15 % pro metodu výpočtu potenciální evapotranspirace vycházející z vegetační zóny a 14 % pro metodu podle Oudina. Veškeré výsledky jsou shrnuté v Tab. 3, příklady dlouhodobých denních odtoků jsou zobrazeny na Obr. 11 a Obr. 12. Z obrázků je patrná vysoká shoda v modelování celkového odtoku z povodí při aplikaci obou metod pro výpočet potenciální evapotranspirace v modelu Bilan za využití vzorce závislého na teplotě vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu a vzorce využívajícího pouze teplotu vzduchu.

Tab. 3 Přehled výsledků porovnání průtoků měřených a dvěma metodami modelovaných. MAE – průměrná absolutní chyba, MRE – průměrná relativní chyba, max RE – maximální relativní chyba.

Vodoměrná stanice	MAE [mm]		MRE		max RE	MRE
	veg. zóna	Oudin	veg. zóna	Oudin	veg. zóna / Oudin	veg. zóna / Oudin
Úpa	0,151	0,139	9,30%	8,30%	8%	2,40%
Divoká Orlice	0,183	0,264	9,90%	14,10%	27%	9,40%
Cidlina	0,107	0,114	18,80%	20%	25%	8,70%
Jizera	0,396	0,487	13%	17%	58%	13%
Kaplice	0,137	0,118	21,20%	16,90%	15%	4,70%
Teplá Vltava	0,190	0,174	14%	12,30%	36%	8,30%
Vltava	0,156	0,151	14%	13,50%	16%	2,80%
Malše	0,165	0,126	25,10%	18%	19%	6,20%
Otava	0,322	0,273	14,70%	11,30%	14%	4,30%
Otava	0,225	0,196	12,70%	10,80%	28%	6,30%
Skalice	0,112	0,113	13,10%	14%	12%	2,90%
Sázava	0,131	0,125	16%	15,60%	13%	3,50%
Teplá	0,118	0,11	13,70%	12,50%	14%	3,30%
PRŮMĚR	0,184	0,184	15%	14%	22%	7,10%



Obr. 11 Vodoměrná stanice 0141 - Průběh měřeného a modelovaných průtoků s hodnotami průměrných středních absolutních chyb, v dolní části absolutní relativní odchylky namodelovaných hodnot od měřených (modře a zeleně) a červeně relativní odchylky mezi modelovanými hodnotami



Obr. 12 Vodoměrná stanice 1370 - Průběh měřeného a modelovaných průtoků s hodnotami průměrných středních absolutních chyb, v dolní části absolutní relativní odchylky namodelovaných hodnot od měřených (modře a zeleně) a červeně relativní odchylky mezi modelovanými hodnotami

Metoda výpočtu potenciální evapotranspirace dle Oudina, založená pouze na pozorované teplotě vzduchu, se ukázala být pro účely modelování denních odtoků na zvolených povodích podobně úspěšná jako metoda vycházející z vegetační zóny, která je založená na změřené teplotě a relativní vlhkosti vzduchu. Navíc při porovnání pozorovaných odtoků s odtoky modelovanými těmito dvěma metodami vycházejí při pohledu na střední absolutní chyby a průměrné relativní odchylky lepší výsledky pro metodu podle Oudina pro většinu povodí.

Na základě úspěšného testování byla metoda podle Oudina začleněna do nové verze modelu Bilan, oproti původní metodě vycházející z vegetační zóny je tedy možné modelovat

hydrologickou bilanci povodí s menšími nároky na vstupní data (nejsou potřeba relativní vlhkosti vzduchu). Zároveň byl model Bilan softwarově přepracován a vytvořeno pro něj grafické uživatelské rozhraní a balík pro prostředí R.

5.2 Odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny a identifikace trendů ve vývoji měřených veličin ve výparoměrné stanici Hlasivo

Na povodích s vysokým zastoupením vodních ploch (např. povodí Lužnice) hraje velkou roli v celkové hydrologické bilanci výpar z volné vodní hladiny, který roste v posledních letech vlivem zvyšující se průměrné teploty vzduchu. Na povodích, kde průměrný roční výpar převyšuje průměrnou roční sumu srážek, mohou rozsáhlé plochy vodních hladin paradoxně celkovou hydrologickou bilanci zhoršovat.

V této kapitole je prezentováno odvozování regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny na základě pozorovaného výparu ve stanici Hlasivo. Odvozené vzorce se staly platným nástrojem při řešení projektů na téma zpřesňování hydrologické bilance v podmínkách klimatické změny. Postup odvození rovnic je popsán v článku Beran a Vizina (2013).

Prvním cílem práce bylo zkompletovat a zdigitalizovat co největší množství dat, u těchto časových řad meteorologických veličin poté provést statistické analýzy, potvrdit či vyvrátit existenci trendů, případně další změny v jejich časových průbězích. V druhé části práce bylo cílem odvodit regresní vztahy nenáročné na počet měřených meteorologických veličin pro výpočet výparu z volné hladiny na základě dat změřených ve stanici Hlasivo a porovnat je se vztahy odvozenými ve VÚV TGM, v.v.i., které byly určeny na základě dat ze stanice Hlasivo z let 2001 až 2005 (Mrkvičková, 2007).

5.2.1 Statistická analýza pozorovaných řad výparu a dalších meteorologických veličin ve stanici Hlasivo

Pozorování ze stanice Hlasivo pro roky 1957 až 1992 byla k dispozici ve formě desetidenních průměrů. Tyto údaje byly zapsány ručně v meteorologických denících a pro další analýzu musely být převedeny do digitální formy. Od roku 1993 do roku 1998 byly hodnoty v denním intervalu a se zřízením automatické meteorologické stanice jsou veličiny měřeny nepřetržitě a vyhodnocovány každých patnáct minut. Statistická analýza se zabývá třiapadesátiletou řadou pro roky 1957 až 2012.

Hodnoty výparu a ostatních analyzovaných veličin byly zprůměrovány na řady dat o stejném denním (od roku 1993), měsíčním nebo ročním kroku. Takto připravené časové řady byly dále zkoumány za použití statistického programu CTPA (Change and Trend Problem Analysis).

Při statistické analýze trendů v naměřených sezónních hodnotách teplot, relativních vlhkostí a atmosférických srážek nebyl potvrzen žádný statisticky významný trend. Testy byly prováděny na zvolené hladině významnosti 0,05 a poté i 0,1. V průměrných hodnotách sezónních teplot ve výšce 2 m nad zemí nebyl nalezen téměř žádný trend. Trendová přímka má směrnici 0,005. Po provedení detailnější analýzy každého měsíce od května do října zvlášť, bylo zjištěno, že měsíce květen, červenec a srpen se v průběhu let oteplují. Pro zbylé měsíce byl určen statisticky nevýznamný klesající trend teplot vzduchu. Statisticky významný stoupající trend byl potvrzen pouze pro průměrné teploty vzduchu v měsíci srpnu a to se směrnici trendové přímky 0,024. Výsledky analýzy trendů v řadách průměrných teplot vzduchu jsou uvedeny v Tab. 4. Pro hodnoty průměrné relativní vlhkosti byl nalezen statisticky nevýznamný vznik trendu na začátku osmdesátých let. Do této doby je střední hodnota relativních vlhkostí konstantní a po roce 1980 se objevuje mírný stoupající trend v těchto hodnotách. Směrnice trendových přímek se pohybují od 0,089 do 0,283. Pro průměrné hodnoty za celé sezóny je pozorovatelný vznik trendu v roce 1981 se směrnici o velikosti 0,11. Celkový trend pro sezónní hodnoty relativní vlhkosti je mírně stoupající o směrnici 0,019. Když se hladina významnosti zvýšila z 0,05 na 0,1, byl určen statisticky významný trend v měsících červen, září a říjen. Přehled ukazuje Tab. 5. Vývoj průměrných sezónních hodnot je klesající o záporné směrnici trendové přímky -0,770. Pro měsíce květen, červen a říjen je směrnice záporná a pro zbylé měsíce naopak kladná. Statisticky významný trend (jak na hladině významnosti 0,05 tak 0,1) nebyl však pro průměrné hodnoty úhrnů srážek detekován. Pomocí testů vzniku trendu a změny sklonu trendu nebylo indikováno žádné významné trendové chování. Přehled výsledků statistické analýzy průměrných sezónních hodnot úhrnů srážek je uveden v Tab. 6.

Tab. 4 Přehled výsledků statistické analýzy testování trendů v průměrných sezónních hodnotách teploty vzduchu ve výšce 2 m nad zemí (v závorkách jsou uvedeny hodnoty trendu před a po změně)

Teplota	Testy trendu (I)			
průměr	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
sezóna	Ne 0,005	Ne	Ne	Ano (0,021) 1976 (0,017)
květen	Ne 0,017	Ne	Ne	Ano (0,093) 1977 (0,024)
červen	Ne -0,001	Ne	Ne	Ano (-0,017) 2002 (0,052)
červenec	Ne 0,009	Ne	Ne	Ano (0,002) 2004 (0,078)
srpen	Ano 0,024	Ne	Ne	Ano (0,033) 1977 (0,035)
září	Ne -0,007	Ne	Ne	Ano (-0,011) 1998 (0,072)
říjen	Ne -0,015	Ne	Ne	Ano (-0,007) 2000 (-0,076)

Tab. 5 Přehled výsledků statistické analýzy testování trendů v průměrných sezónních hodnotách relativní vlhkosti vzduchu. ANO – detekováno jako statisticky významné, NE – není statisticky významné.

Vlhkost	Testy trendu (I)			
	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
průměr				
sezóna	Ne 0,019	Ne (1981) 0,11	Ne	Ano (-0,184) 1971 (0,130)
květen	Ne -0,001	Ne	Ne	Ne
červen	Ne 0,045	Ne (1975) 0,089	Ne	Ano (0,059) 2005 (-0,179)
červenec	Ne 0,019	Ne (1982) 0,156	Ne	Ano (-0,017) 1998 (-0,242)
srpen	Ne -0,068	Ne	Ne	Ano (-0,163) 1999 (-0,253)
září	Ne 0,042	Ne (1981) 0,147	Ne	Ano (0,020) 1999 (-0,177)
říjen	Ne 0,076	Ne (1982) 0,283	Ano (-0,320) 1982 (0,263)	Ano (-0,665) 1973 (0,204)

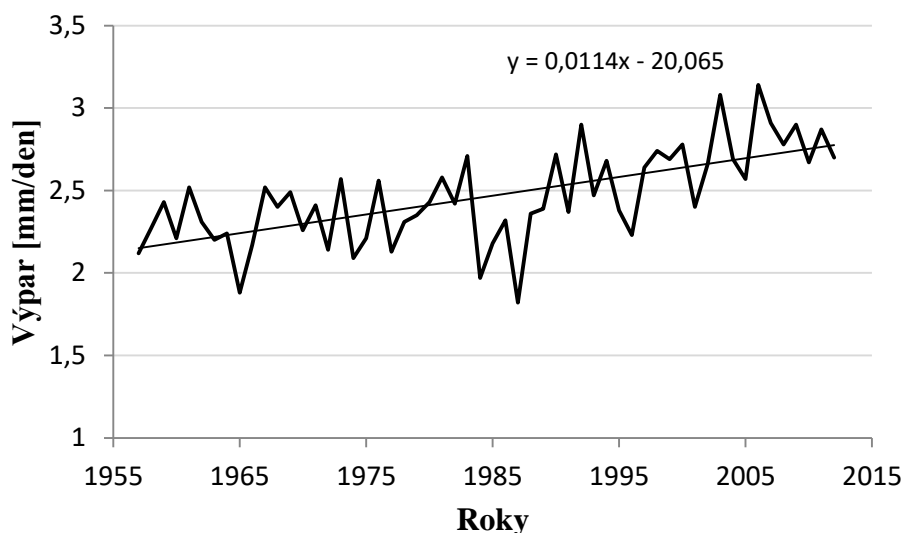
Tab. 6 Přehled výsledků statistické analýzy testování trendů v průměrných sezónních hodnotách úhrnů srážek

Srážky	Testy trendu (I)			
	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
průměr				
sezóna	Ne -0,770	Ne	Ne	Ano (-5,959) 1976 (0,951)
květen	Ne -0,440	Ne	Ne	Ano (-0,347) 1988 (1,320)
červen	Ne -0,188	Ne	Ne	Ano (-0,575) 1998 (1,386)
červenec	Ne 0,455	Ne (2002) 6,321	Ne	Ano (-0,728) 1995 (2,475)
srpen	Ne 0,042	Ne (1997) 1,885	Ne	Ne
září	Ne 0,046	Ne (2001) -1,809	Ne	Ano (0,113) 1993 (-1,128)
říjen	Ne -0,044	Ne	Ne	Ano (-0,437) 1997 (-1,125)

5.2.2 Testování trendů v řadách průměrných hodnot výparu změřeného srovnávacím výparoměrem

Hodnoty sezónního výparu změřené srovnávacím výparoměrem vykazují v průběhu let 1957 až 2012 stoupající trend (Obr. 13). Programem CTPA byl tento trend vyhodnocen jako statisticky významný se směrnici trendové přímky 0,011. Statisticky významný byl také test

vzniku trendu a test změny sklonu trendové přímky. Vznik trendu byl určen v roce 1985, od kterého je směrnice 0,026. Podle testu změny sklonu trendové přímky byl trend do roku 1984 mírnější, a sice 0,005 a po tomto roce začal stoupat strměji se směrnicí 0,023. Analýza trendů v hodnotách výparu pro jednotlivé měsíce je shrnuta v Tab. 7.



Obr. 13 Průběh průměrného sezónního výparu s vyznačenou trendovou přímkou

Tab. 7 Přehled výsledků statistické analýzy testování trendů v průměrných sezónních hodnotách výparu měřeného srovnávacím výparoměrem

Srovnávací výparoměr	Testy trendu (I)			
	existence	vznik	změna sklonu	změna trendu
průměr				
sezóna	Ano 0,011	Ano 1984 (0,026)	Ano (0,005) 1984 (0,023)	Ano (0,009) 1973 (0,017)
květen	Ano 0,014	Ano 1964 (0,016)	Ano (-0,008) 1964 (0,016)	Ano (0,019) 2000 (0,004)
červen	Ne 0,007	Ne 1987 (0,033)	Ne (-0,010) 1987 (0,025)	Ano (-0,009) 1974 (0,017)
červenec	Ano 0,011	Ne 1977 (0,017)	Ne	Ano (0,012) 1994 (0,032)
srpen	Ano 0,014	Ano 1978 (0,027)	Ano (-0,010) 1978 (0,023)	Ano (0,019) 1974 (0,027)
září	Ano 0,011	Ne 1986 (0,027)	Ano (0,002) 1986 (0,024)	Ano (0,000) 1996 (-0,005)
říjen	Ne 0,008	Ne	Ne	Ano (0,011) 1998 (0,032)

5.2.3 Odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny na základě dat změřených srovnávacím výparoměrem

Vztahy pro výpočet výparu z vodní hladiny byly odvozovány podle naměřených meteorologických dat z výzkumné stanice Hlasivo pro roky 2006 – 2012. Vzhledem k tomu, že naměřené denní hodnoty výparu bývají zatíženy značnou náhodnou chybou a vzhledem k tomu, že při řešení praktických úloh je potřeba ve většině případů stanovit velikost výparu za období jednoho měsíce, nebo ještě za delší období (Mrkvičková, 2007), byla k odvozování používána data v měsíčním kroku. K dispozici byly měsíční řady teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu, teploty vody ve výparoměru, globální sluneční radiace a rychlosti větru. Výpar byl měřen srovnávacím výparoměrem (viz výše).

Nejprve byly určeny párové závislosti výparu z vodní hladiny na jednotlivých meteorologických veličinách ve vybraném sedmiletém období 2006 - 2012. Nejtěsnější závislost výparu z vodní hladiny (mocninná) byla zjištěna na globální sluneční radiaci ($R^2 = 0,823$). Následovala lineární závislost na průměrné měsíční teplotě vody ($R^2 = 0,79$) a lineární závislost na teplotě vzduchu ($R^2 = 0,756$). Závislost výparu na měsíčních hodnotách relativní vlhkosti vzduchu a rychlosti větru není významná. Přehled nejvýznamnějších párových regresních vztahů je uveden v *Tab. 8*.

K odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny byly použity dvě metody. První metoda: Za pomoci rovnice párové regrese vybrané meteorologické veličiny na výparu byl vypočítán výpar a následně spočítány rozdíly (rezidua) mezi výparem měřeným a vypočteným. V dalším kroku byla vyjádřena závislost vypočítaných reziduí na ostatních měřených řadách meteorologických veličin a následně vybrána ta nejtěsnější. Kombinací těchto dvou regresních vztahů byla určena rovnice 4, kde je výpar vyjádřen za pomoci teploty vzduchu a rychlosti větru a rovnice 7, ve které je výpar počítán za pomoci teploty vody a rychlosti větru.

Druhá metoda zahrnovala použití doplňku programu MS Excel Optimiz.xla, který řeší nelineární regresi. Provádí iterativní fitování nelineární funkce pomocí metody nejmenších čtverců za použití Levenberg-Marquardt algoritmu (Lourakis, 2005). Vstupní proměnné jsou vektor vstupních dat, vektor nezávislých proměnných, počáteční hodnoty parametrů a vložení struktury vzorce. Touto metodou byly vyjádřeny rovnice 5 (výpar vyjádřen za pomoci teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu) a rovnice 6 (teplota vzduchu a teplota vody).

Nově odvozené vztahy pro výpočet výparu z volné hladiny byly porovnány se vztahy odvozenými v roce 2007 ve VÚV TGM, v.v.i.. Tyto vzorce byly určovány mnohonásobnou regresí podle dat ze stanice Hlasivo z roku 2001 až 2005. K vyjádření byl použit program NEREG, pro odvození nelineárních regresních vztahů (Mrkvičková, 2007).

Níže jsou uvedeny rovnice párových regresí ($E_1 - E_3$) a odvozené rovnice regrese ($E_4 - E_7$). Nově odvozené regresní vztahy nejsou náročné na vstupní data, vyžadují vždy pouze dvě měřené meteorologické veličiny, což je nesporná výhoda při řešení praktických úloh. Dvojice použitých veličin jsou teplota vzduchu – rychlost větru (E_4), teplota vzduchu – relativní vlhkost (E_5), teplota vzduchu – teplota vody (E_6) a teplota vody – rychlost větru (E_7). Dále jsou uvedeny rovnice odvozené ve VÚV TGM, v.v.i. v roce 2007 (Mrkvičková, 2007) ($E_8 - E_{11}$).

$$E_1 = 0,2157 \cdot T_{VZD} + 0,1133$$

$$E_2 = 0,1966 \cdot T_{VOD} - 0,4724$$

$$E_3 = 0,0011 \cdot R^{0,9235}$$

$$E_4 = 0,2157 \cdot T_{VZD} + 0,726 \cdot V - 1,2259$$

$$E_5 = 0,12733 \cdot T_{VZD}^{1,0813} - 0,0445 \cdot H + 4,2107$$

$$E_6 = -1496645 \cdot T_{VZD}^{-1,5E-7} + 0,1802 \cdot T_{VOD} + 1496644$$

$$E_7 = 0,1966 \cdot T_{VOD} + 0,6639 \cdot V - 1,4893$$

$$E_8 = 1,2061 \cdot T_{VZD}^{1,0712} - 1,3906 \cdot T_{VZD} + 1,7986$$

$$E_9 = -2,5976 \cdot T_{VZD}^{0,6608} + 0,7686 \cdot T_{VZD} + 2,0184 \cdot T_{VOD}^{0,6537} - 0,3749 \cdot T_{VOD} + 0,1917$$

$$E_{10} = 0,104 \cdot T_{VOD} + 0,206 \cdot H^{0,913} - 18,368 \cdot e^{H \cdot 5,63 \cdot 10^{-3}} - 2,101 \cdot e^{-2,92 \cdot 10^{-5} \cdot R} + 0,503 \cdot V + 19,913$$

$$E_{11} = 0,0837 \cdot T_{VZD} + 0,278 \cdot H^{0,768} - 12,146 \cdot e^{H \cdot 5,59 \cdot 10^{-3}} - 2,912 \cdot e^{-2,77 \cdot 10^{-5} \cdot R} + 0,453 \cdot V + 13,644$$

E – průměrná měsíční výška výparu z vodní hladiny [mm.den⁻¹]

T_{VZD} – průměrná měsíční teplota vzduchu [°C] ve výšce 2 m nad povrchem země

T_{VOD} – průměrná měsíční teplota vody ve výparoměru [°C]

H – průměrná měsíční hodnota relativní vlhkosti vzduchu [%]

R – měsíční suma globální sluneční radiace [kJ.m⁻²]

V – průměrná měsíční rychlost větru [m.s⁻¹]

Při použití všech výše uvedených vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny, se průměrná relativní odchylka mezi modelovanými a měřenými hodnotami výparu pohybuje do 27 %. Pro nově odvozené vztahy je odchylka od 12 do 14 %. Při použití prosté párové regrese jsou odchylky od 13,5 do 15 %. Nicméně průměrné relativní odchylky vycházející pro vzorce z roku 2007 se pohybují od 16 do 27 %. Srovnání změřených výparů s výparů vypočtenými výše uvedenými vzorci ukázalo, že střední absolutní chyba byla menší u nově odvozených vztahů, vyžadujících vždy jen dvě měřené veličiny, než při použití vzorců z roku 2007 vyžadujících buď jednu, dvě nebo 4 měřené meteorologické veličiny. Střední absolutní chyba pro nově odvozené vzorce se pohybuje od 0,28 mm do 0,35 mm. U vzorců z roku 2007 je od 0,36 mm do 0,88 mm. To jsou horší výsledky než při použití prosté párové regrese, při jejímž použití byla střední absolutní chyba od 0,33 mm do 0,36 mm.

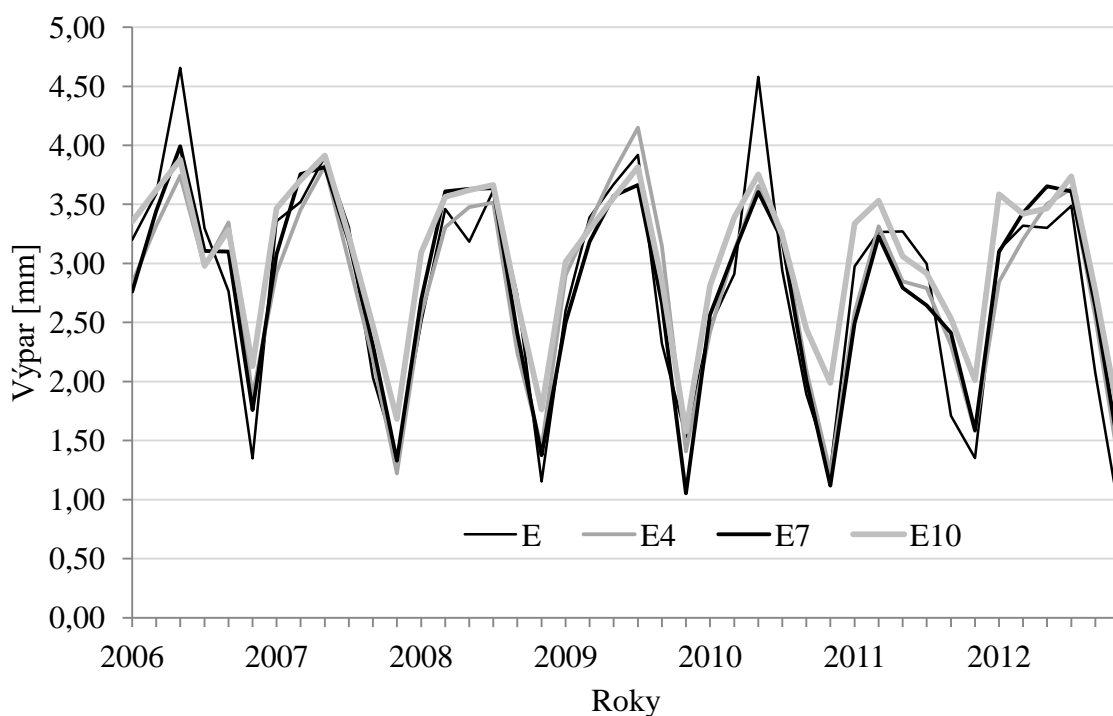
Z uvedených výsledků vyplývá, že nově odvozené vztahy pro výpočet výparu z volné hladiny dávají při použití měsíčních dat lepší výsledky. Nejlepší shody vypočtených a měřených výparů je dosaženo při použití nově odvozených vztahů se zastoupením měřených meteorologických veličin teplota vody ve výparoměru – rychlost větru, resp. teplota vzduchu – rychlost větru. Minimální relativní odchylka 14 % mezi modelovanými výparů je relativně malá, je tedy pro řešení praktických úloh možné použít vzorců vyžadujících měřené veličiny teplota vzduchu – teplota vody ve výparoměru resp. teplota vzduchu – relativní vlhkost vzduchu.

Jelikož byly regresní vztahy pro výpočet výparu odvozeny na základě dat měřených pouze v sezóně květen až říjen, znamená to, že platnost těchto vztahů je omezená. Při aplikaci rovnic ve dnech s nízkou teplotou vzduchu (blížící se nule) nebude dosaženo přesných výsledků.

Veškeré výsledky porovnání modelovaných výparů s měřenými výparů v období sezón (květen až říjen) v letech 2006 – 2012 jsou uvedeny v Tab. 8. Rozpětí průměrné absolutní chyby se pohybuje mezi 0,28-0,82 %, průměrné relativní chyby se pohybují mezi 11,9-27,2 %. Z grafu (Obr. 14) lze pozorovat schopnost vzorců odhadnout celkový výpar z vodní hladiny, nicméně lze současně pozorovat jisté neschody v extrémech, kdy jsou v maximech modelované hodnoty většinou podhodnocené a v minimech naopak navyšují změřené hodnoty.

Tab. 8 Porovnání výsledků jednotlivých rovnic; R² (koeficient determinace), MAE (střední absolutní chyba), MRE (střední relativní odchylka); (T_{vzd} – teplota vzduchu, T_{vod} - teplota vody ve výparoměru, R – globální sluneční radiace, V – rychlost větru, H – relativní vlhkost vzduchu)

Rovnice	Výpar	R ²	MAE [mm]	MRE
1	$f(T_{vzd})$	0,7562	0,361	14,9 %
2	$f(T_{vod})$	0,7895	0,327	14 %
3	$f(R)$	0,8226	0,331	13,5 %
4	$f(T_{vzd}, V)$	0,8434	0,295	12,1 %
5	$f(T_{vzd}, H)$	0,7947	0,346	14 %
6	$f(T_{vzd}, T_{vod})$	0,79	0,327	14 %
7	$f(T_{vod}, V)$	0,8612	0,28	11,9 %
8	$f(T_{vzd})$	0,7423	0,44	19 %
9	$f(T_{vzd}, T_{vod})$	0,7776	0,415	16 %
10	$f(T_{vod}, H, R, V)$	0,8807	0,357	17,6 %
11	$f(T_{vzd}, H, R, V)$	0,8571	0,821	27,2 %



Obr. 14 Průběh měřeného a vypočteného výparu. E (měřený výpar), E4, E7, E10 (výpar vypočtený podle rovnice 4, 7, resp. 10)

Na základě měřených dat (2006 - 2012) z výparoměrné stanice Hlasivo byly odvozeny čtyři nové vztahy pro výpočet výparu z volné hladiny. Každá z rovnic vyžaduje vždy pouze dvě měřené meteorologické veličiny (teplota vody ve výparoměru – rychlost větru, teplota vzduchu – rychlost větru, teplota vzduchu – teplota vody ve výparoměru, teplota vzduchu – relativní vlhkost vzduchu). Při srovnání se vzorci odvozenými ve VÚV TGM, v.v.i. v minulosti na základě měřených dat ze stanice Hlasivo z let 2001 – 2005, vychází v hlediska střední absolutní chyby a průměrné relativní odchylky lepší výsledky pro nově odvozené vztahy. Nespornou výhodou nově odvozených vzorců pro praktické použití je menší náročnost na vstupní data.

5.3 Aplikace odvozených rovnic pro výpočet výparu z volné hladiny

Mimořádný průběh meteorologických veličin v létě roku 2015 poskytl vhodnou příležitost pro porovnání toho, jak různé typy výparoměrů a postupy výpočtu výparu z vodní hladiny odpovídají průběhu výparu měřeného ve výparoměrné stanici Hlasivo u Tábora. Výsledky studie byly prezentovány na Semináři Adolfa Patery a formou článku jsou uvedeny ve sborníku z akce (Kašpárek, Beran, Pistulka, 2016).

Kapitola se zabývá ověřením empirických vzorců pro výpočet výparu odvozených v předešlých letech (Beran a Vizina, 2013). Je popsána míra shody vypočítaných hodnot výparu podle vzorců závislých na teplotě vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu s měřenými daty ve stanici Hlasivo v létě 2015, který je brán jako extrémní z hlediska velmi vysokých teplot v průběhu letního období.

Měřené hodnoty výparu z volné hladiny byly k dispozici v denním kroku pro měsíce květen až říjen ze čtyř výparoměrů: srovnávací výparoměr, výparoměr GGI 3000, výparoměr GGI 3000 izolovaný a výparoměr Class-A. Metody odvození vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny jsou popsány v předešlé kapitole. V předešlé kapitole jsou taktéž popsány použité rovnice využívající pro výpočet teploty vzduchu (E_1) a druhou rovnici využívající teplotu vzduchu spolu s relativní vlhkostí vzduchu (E_5).

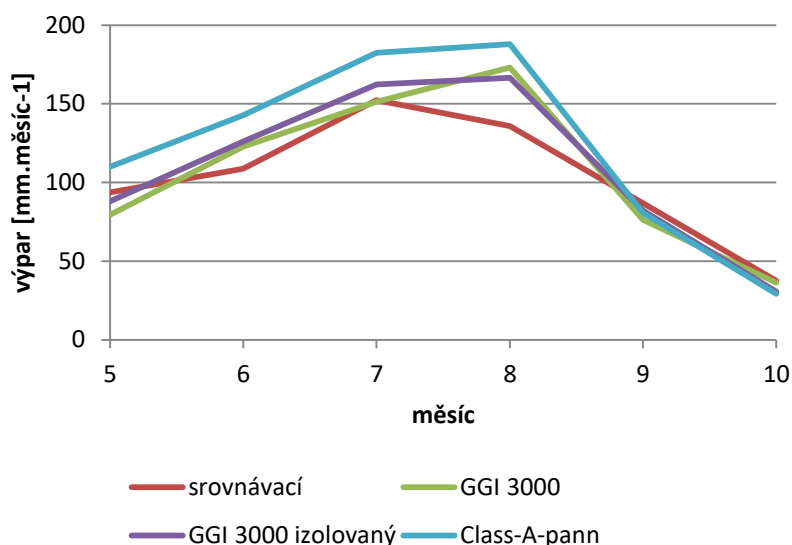
Metoda výpočtu rovnice (E_5) byla modifikována tím, že průměrná denní hodnota relativní vlhkosti vzduchu nebyla vypočtena standartním postupem, kdy se pro výpočet denního průměru údaj z 21. hodiny započítává s dvojnásobnou váhou, ale jen jako průměr hodnot ze 7. a 14. hodiny. Modifikace vychází z toho, že převážná část výparu se uskutečňuje v denních hodinách (kdy působí sluneční radiace).

Další řešenou úlohou bylo posoudit, jak dalece se liší v podmínkách extrémního sucha potenciální evapotranspirace od výparu z vodní hladiny. Pro výpočet potenciální evapotranspirace byly použity postupy, které zahrnuje model hydrologické bilance Bilan, tj. metoda vycházející z vegetační zóny pro dané povodí a hodnot sytostního doplňku, jež vyžaduje teplotu i vlhkost vzduchu (Tallaksen a van Lanen (eds.), 2004) s výpočtem metody Oudina ze studie (Oudin a kol., 2010), který vyžaduje jako vstupní hodnoty pouze měřené teploty vzduchu.

5.3.1 Porovnání měřeného výparu s výparem vypočítaným

Na Obr. 15 jsou porovnány časové průběhy výparu z vodní hladiny podle měření srovnávacím výparoměrem, výparoměrem GGI 3000, GGI 3000 izolovaným a Class-A-Pan. V měsících květen, září a říjen jsou výpary z GGI 3000 izolovaného poměrně blízké pozorování srovnávacího výparoměru, od června do srpna jsou větší, pozorování podle Class-A-Pan jsou od května až do srpna ještě větší. Rozdíly souhrnné velikosti výparu od pozorování srovnávacího výparoměru za měsíce květen až říjen a za měsíce červen až srpen jsou uvedeny v Tab. 9. Výparoměr GGI 3000 nadhodnotil výpar o cca 4 %, v měsících

červen až srpen o cca 8 %.

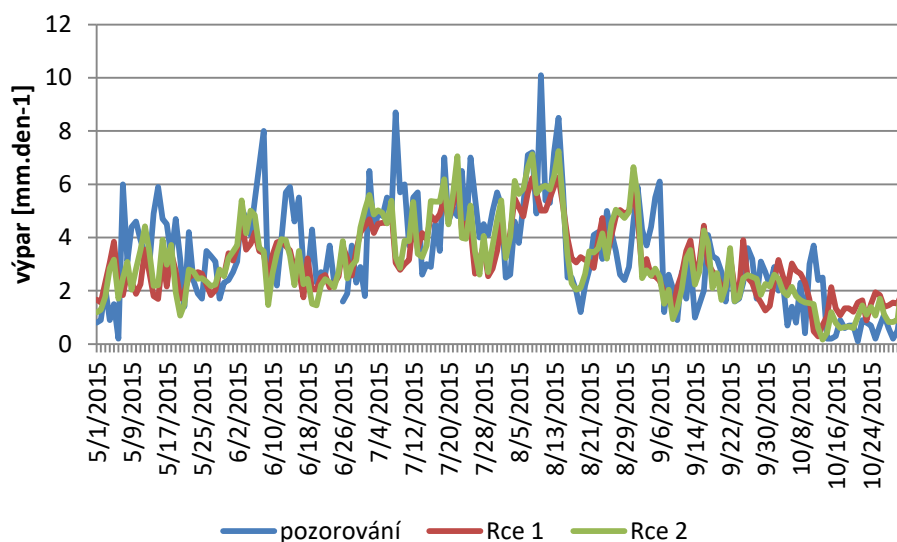


Obr. 15 Porovnání výparu měřeného: srovnávacím výparoměrem, výparoměrem GGI 3000, GGI 3000 izolovaným a Class-A-Pan v sezóně 2015.

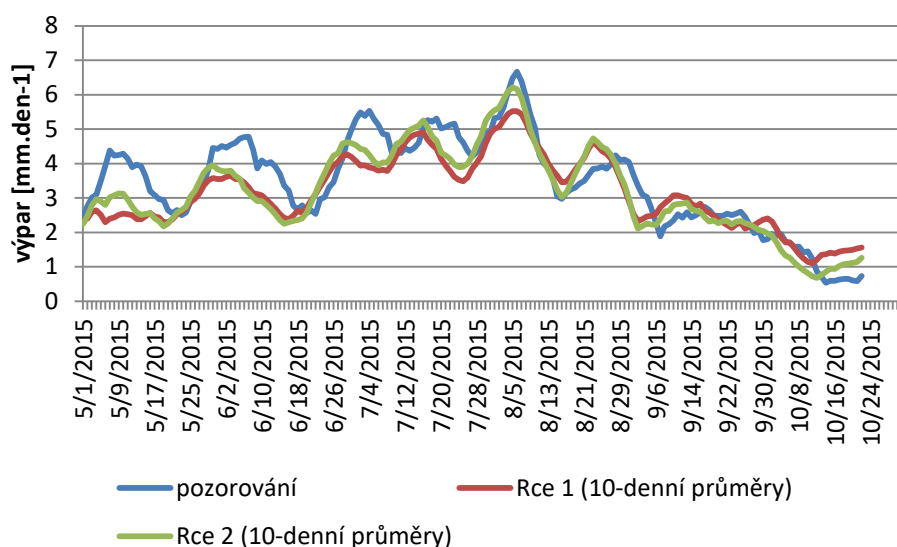
Tab. 9 Rozdíly souhrnné velikosti výparu od pozorování srovnávacím výparoměrem

Veličina	Srovnávací	GGI 3000	GGI izolovaný 3000	Class-A-Pan
Výpar květen-říjen [mm]	614,9	639,3	655,6	732,9
Rozdíl od údaje pro srovnávací výparoměr [mm]		24,4	40,7	118
%		4,0	6,6	19,2
Výpar červen-srpen [mm]	396,7	447,3	454,8	513
Rozdíl od údaje pro srovnávací výparoměr [mm]		50,6	58,1	116,3
%		8,2	9,4	18,9

Porovnání vypočítaných průběhů denních hodnot výparu s pozorováním srovnávacího výparoměru je na Obr. 16, na Obr. 17 jsou znázorněny desetidenní klouzavé průměry. Z obrázků je vidět, že v maximech obě varianty výpočtu velikost denního výparu podhodnocují. V součtu za měsíce květen až říjen je podhodnocení cca 6 až 7 %, viz Tab. 10. Při použití modifikované rovnice (2) se zlepší shoda vypočtených hodnot s pozorováním (Obr. 18), součet za měsíce květen až říjen je podhodnocen jen cca o 2 % (Tab. 10).



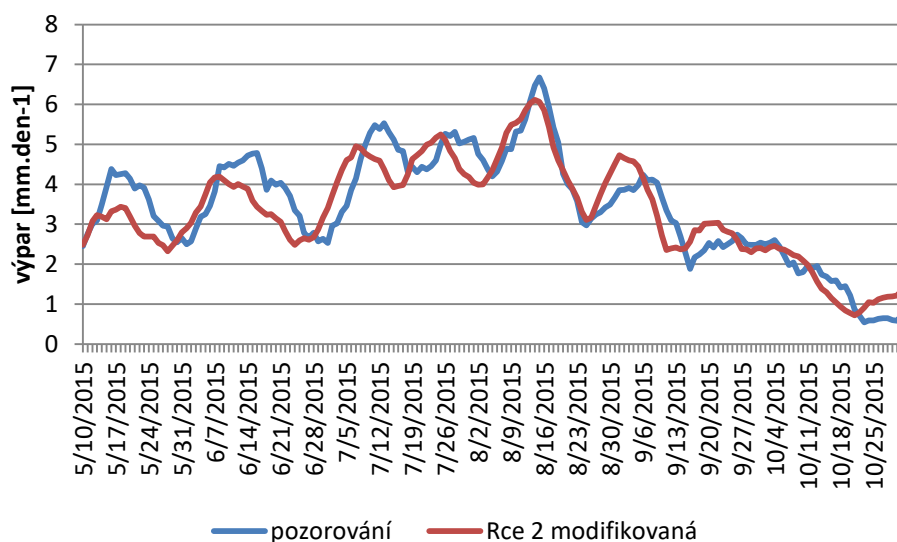
Obr. 16 Porovnání výparu měřeného a vypočítaného podle dvou použitých rovnic. Rce 1 – E_1 , Rce 2 – E_5 .



Obr. 17 Porovnání výparu měřeného a vypočítaného podle dvou použitých rovnic – 10-denní průměry. Rce 1 – E_1 , Rce 2 – E_5 .

Tab. 10 Rozdíly souhrnné velikosti výparu při použití různých vzorců od pozorování

Veličina	Pozorování	E_1	E_5 původní	E_5 modifikovaná
Výpar květen-říjen [mm]	614,9	571,0	575,8	603,0
Rozdíl od pozorování [mm]		-43,4	-38,6	-11,4
%		-7,1	-6,3	-1,9

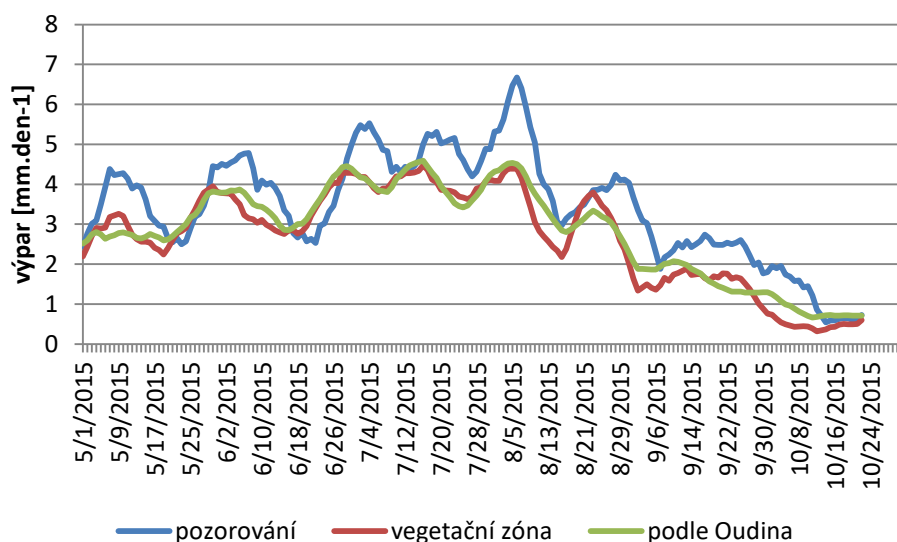


Obr. 18 Porovnání výparu měřeného a vypočítaného podle modifikované rovnice (2).

Dále jsme posoudili, v jakém vztahu jsou odhady potenciální evapotranspirace, vypočítané podle metodiky „vegetační zóny“ a podle metody Oudina (viz předchozí kapitola „Testování vztahu pro výpočet potenciální evapotranspirace pro možnost implementace v hydrologickém modelu Bilan“) k výparu z vodní hladiny při extrémním suchu. Na Obr. 19 je patrné, že obě použité metody výpočtu potenciální evapotranspirace poskytují velmi blízké výsledky, oproti pozorovanému výparu z vodní hladiny jsou průměry za sezónu podstatně menší, v průměru o cca 17 % až 21 % (Tab. 11).

Tab. 11 Rozdíly souhrnné velikosti výparu při použití metodiky „vegetační zóny“ a metody podle Oudina od pozorování

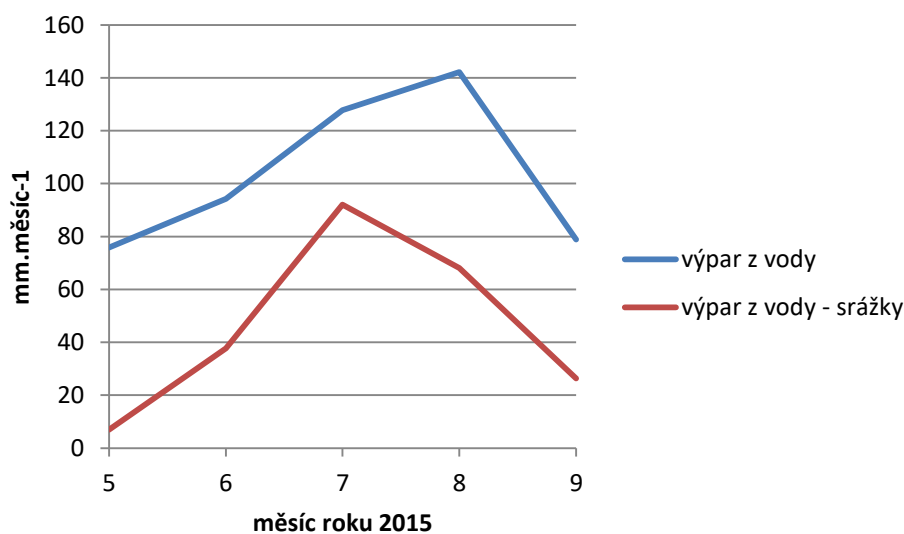
Veličina	Pozorování	Metoda „vegetační zóny“	Podle Oudina
Výpar květen-říjen [mm]	614,9	487,4	511,4
Rozdíl od pozorování [mm]		127,0	103,0
%		20,7	16,8



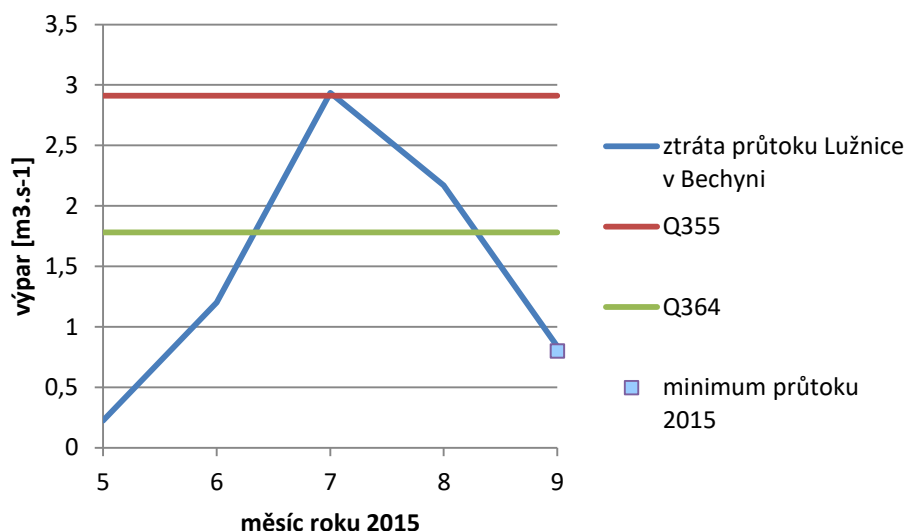
Obr. 19 Porovnání měřeného výparu s vypočítanou potenciální evapotranspirací metodami „vegetační zóna“ a dle Oudina.

5.3.2 Vliv rybníků na průtoky v období hydrologického sucha

Výpar z vodní hladiny může v povodích, kde je plocha vodních ploch relativně významná, podstatně ovlivnit průtok v závěrovém profilu povodí v období hydrologického sucha. Pro měsíce květen až říjen 2015 byla podle průběhu teploty vzduchu vypočítána ztráta výparem z celkové plochy rybníků v povodí Lužnice po vodoměrnou stanici Bechyně a redukována o srážky, viz Obr. 20. Po převodu do měřítka průtoků je i na takto velkém povodí vliv výparu z rybníků srovnatelný až s úrovní 355 denních průtoků a násobně převyšuje minimální průtok z roku 2015, viz Obr. 21.



Obr. 20 Výpar z vodní hladiny a výpar z vodní hladiny zmenšený o srážky v oblasti rybníčních soustav v povodí Lužnice



Obr. 21 Výpar z celkové plochy rybníků v povodí Lužnice nad Bechyní redukovaný o srážky převedený do měřítka průtoků v porovnání s Q_{355} a Q_{364} .

Výrok „chovné rybníky, např. v jižních Čechách hydrologické sucho naopak zvýraznily“ ze zprávy ČHMÚ o suchu 2015 (Daňhelka a kol., 2015) je provedenými výpočty potvrzen. Samozřejmě se jedná o přibližný odhad, jelikož všechny vodní plochy nejsou bilančně propojeny s říční sítí, ale také nebylo zahrnuto podstatné zvětšení výparu z části vodních ploch zarostlých vegetací.

Velikost celkového výparu měřená výparoměrem GGI 3000 v období extrémního sucha v létě 2015 je jen mírně nadhodnocená (4 %) v porovnání s měřením srovnávacího výparoměru. Příznivé je zjištění, že jednoduché empiricky odvozené rovnice, využívající pro výpočet výparu z vodní hladiny teplotu vzduchu, nebo i relativní vlhkost vzduchu poskytují použitelné sumární hodnoty (podhodnocení za letní sezónu 2 % až 7 %).

Potenciální evapotranspirace za měsíce květen až říjen, vypočtená použitými metodami, je oproti výparu z vodní hladiny na lokalitě Hlasivo o 17 % až 21 % menší.

Na povodích, kde vodní plochy pokrývají relativně velkou plochu povodí, může výpar z vodní hladiny v podmínkách hydrologického sucha významně zmenšovat minimální průtoky.

V současné době jsou předmětem zájmu opatření, která mají přispět ke zmírnění sucha. Pokud jde o hydrologické sucho, je třeba zásadně odlišovat nádrže, nejen laicky obecně nazývané „rybníky“, podle jejich funkce. Jen ojediněle jsou využívány pro akumulaci vody a nadlepšování průtoků v době sucha. Pokud slouží k chovu ryb, tuto funkci neplní a jejich vliv v epizodě sucha je závislý na tom, zda v bilanci vody převažuje výpar nebo srážky. V případech extrémního sucha převažuje výpar a nastává výše dokumentovaná situace, kdy rybníky hydrologické sucho zvýrazňují. Při záměrech rekonstrukce starých rybníků a zřizování nových mají větší naději, že tato situace nenastane, lokality, kde lze očekávat větší srážky a nižší teploty i menší výpar, tj. lokality ve větších nadmořských výškách.

5.4 Souhrn

Pro podmínky České republiky byly odvozeny nové empirické vztahy pro výpočet výparu z vodní hladiny, jež zpřesňují celkovou hydrologickou bilanci povodí s vysokým zastoupením vodních ploch, navíc se uplatní např. při řešení problematiky zatápění zbytkových jam po povrchové těžbě (např. jezero Most, Chabařovice a další plánované). Nespornou výhodou nově odvozených vzorců pro praktické použití je menší náročnost na vstupné data. Při aplikaci vzorců na povodí Lužnice v jižních Čechách bylo zjištěno, že budování malých vodních nádrží pro boj se suchem může být kontraproduktivní. Klíčová je funkce nádrží, v případě chovných rybníků nedochází k dotování minimálních zůstatkových průtoků a vlivem ztráty vody výparem se efekt sucha zhoršuje.

Navíc, začleněním metody výpočtu potenciální evapotranspirace na základě pozorované teploty vzduchu (vzorec dle Oudina) do hydrologického modelu Bilan došlo ke zjednodušení modelování celkové hydrologické bilance vzhledem k náročnosti na vstupní data modelu. Problematice výparu je nutné se dále věnovat a upřít pozornost na téma vhodnosti navrhování malých vodních nádrží vzhledem ke geografickým podmínkám v rámci ČR.

6 Odhad dopadů klimatické změny v měřítku České republiky

V kapitole je popsán postup při vyhodnocení ohroženosti České republiky z hlediska nedostatku vody. Pro každé povodí III. řádu byly spočítány indexy závislé na srážkách, potenciální evapotranspiraci, užívání vod na povodí a hodnotách minimálního zůstatkového průtoku. Vyhodnocení bylo provedeno pro pozorované období, stejně tak pro výhledové období. V dalších částech této kapitoly je seznámení s výsledky modelování hydrologické bilance na 53 hydrogeologických rajonech v rámci ČR. Modelování hydrologické bilance přispělo k celkové rebilanci zásob podzemních vod na části území ČR. Jako ukázka výpočtu souhrnné hydrologické bilance je uveden výpočet pro jeden vybraný hydrogeologický rajon, a sice 4231 Křída Ústecké synklinály.

6.1 Výpočet indexů určujících míru zranitelnosti povodí III. řádu z hlediska nedostatku vodních zdrojů

Indexy určující míru zranitelnosti povodí III. řádu byly počítány v rámci projektu Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice, který byl řešen ve VÚV TGM, v.v.i. v roce 2014 až 2015. Projekt byl řešen ve spolupráci s firmami Sweco Hydroprojekt a.s., Vodohospodářský rozvoj a výstavba a.s., WASTECH a.s. a SINDLAR Group s r.o.. Výsledky projektu byly popsány v článku Beran a Hanel, 2015.

V rámci projektu byla modelovaná hydrologická bilance pro povodí 3. řádu pro pozorované klimatické podmínky i scénáře klimatické změny. Dále bylo řešení zaměřeno na identifikaci zranitelných oblastí České republiky z hlediska nedostatku vodních zdrojů.

Pro sucho je charakteristický jeho pozvolný začátek, značný plošný rozsah a dlouhé trvání (Tallaksen a kol., 1997). Neudržitelný způsob hospodaření s vodou (včetně její nadměrné spotřeby a znečištění) a předpokládané dopady klimatické změny mohou vést k rozsáhlým dopadům na přírodní prostředí a na společnost. Dále v textu jsou identifikovány oblasti ČR, které jsou, a které budou s nejvyšší pravděpodobností k problémům s nedostatkem vody náchylné z hlediska předpokládaných klimatických změn.

6.1.1 Indexy zranitelnosti území nedostatkem vody

Pro posouzení míry zranitelnosti povodí III. řádu byly vybrány indexy vyjadřující informace o velikosti srážek, velikosti potenciální evapotranspirace, taktéž byly hodnoceny hlediska užívání vody na povodí, nebo velikost minimálních zůstatkových průtoků v uzávěrových profilech povodí.

Posuzované indexy byly následující:

$$PP = \frac{PET}{P}$$

$$WQ90 = \frac{POV + POD + MZP}{Q90}$$

$$WPP = \frac{POV + POD + MZP}{P - PET}$$

$$WQ90 = \frac{POV + POD - VYP + MZP}{Q90}$$

$$WPP = \frac{POV + POD - VYP + MZP}{P - PET}$$

prum = průměr indexů *PP*, *WPP_* a *WQ90_*

PET ... Potenciální evapotranspirace

P ... Srážky

POV ... Odběry z povrchových vod

POD ... Odběry z podzemních vod

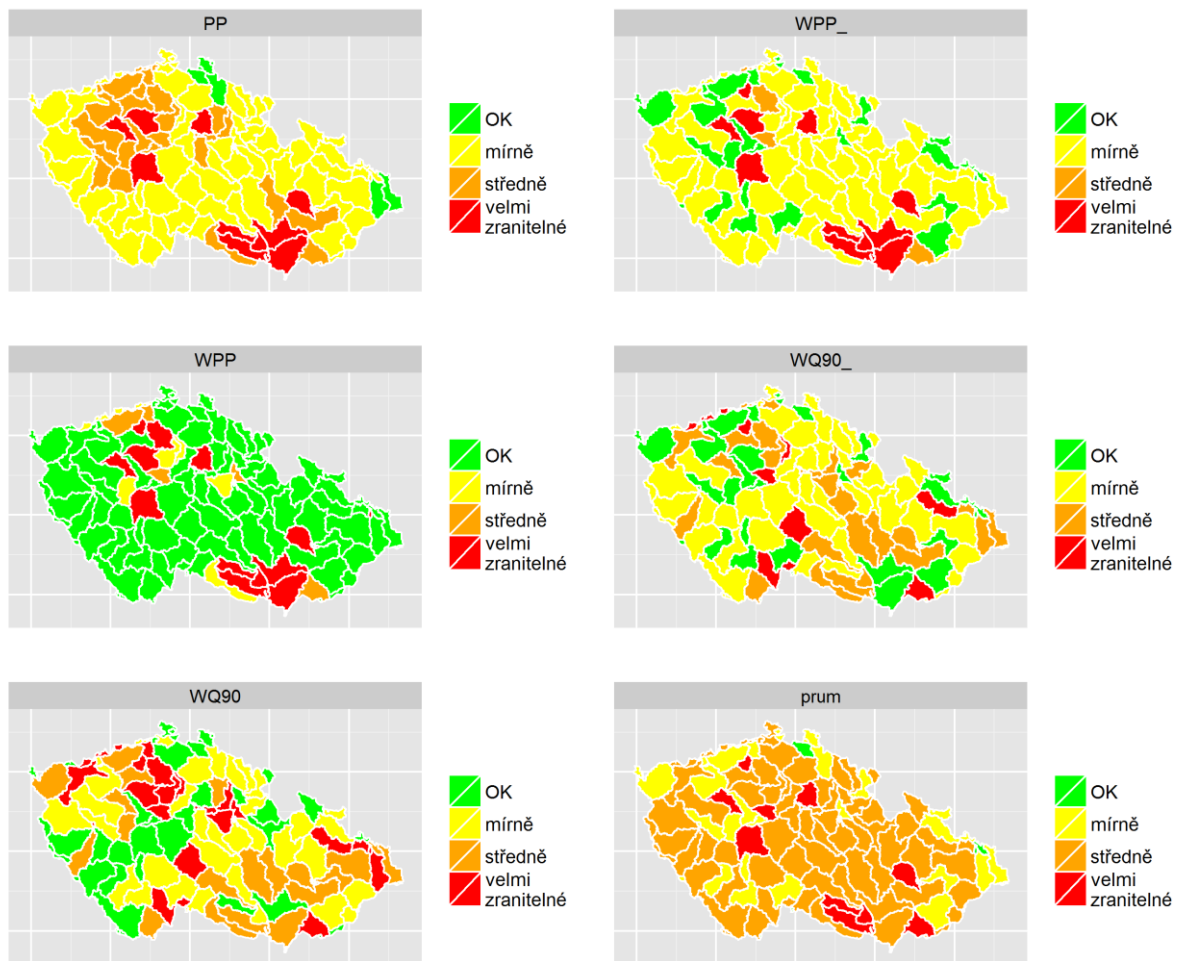
VYP ... Vypouštění (databáze VÚV TGM, v.v.i.)

MZP ... Minimální zůstatkový průtok

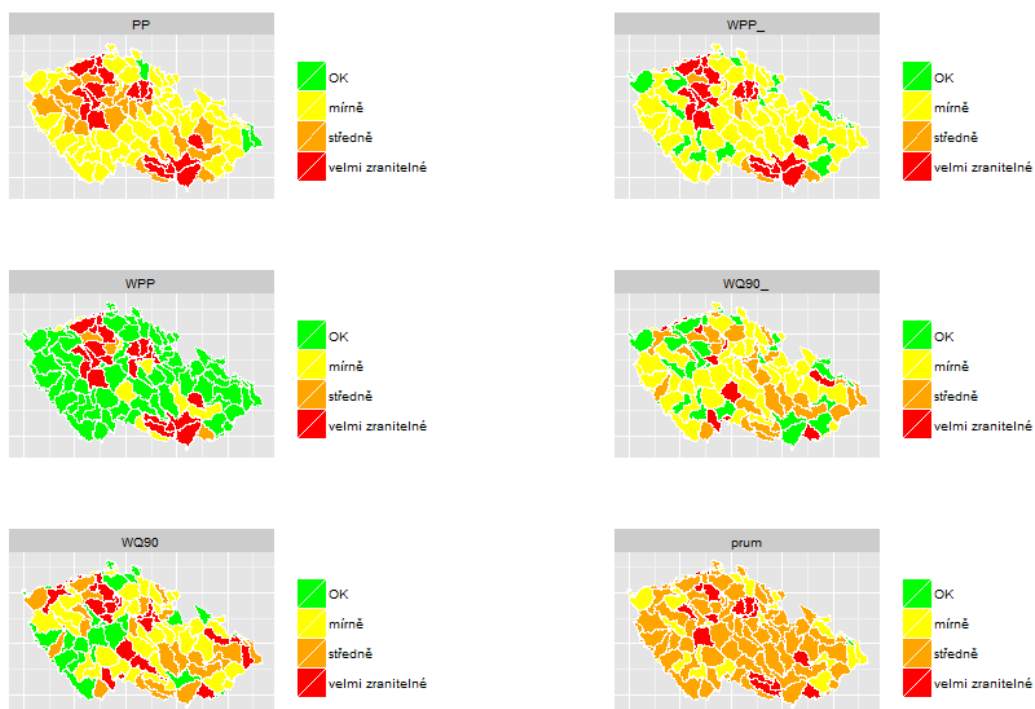
Q90 ... 90% kvantil průtoku (z měsíčních průměrných průtoků)

6.1.2 Výsledky modelování

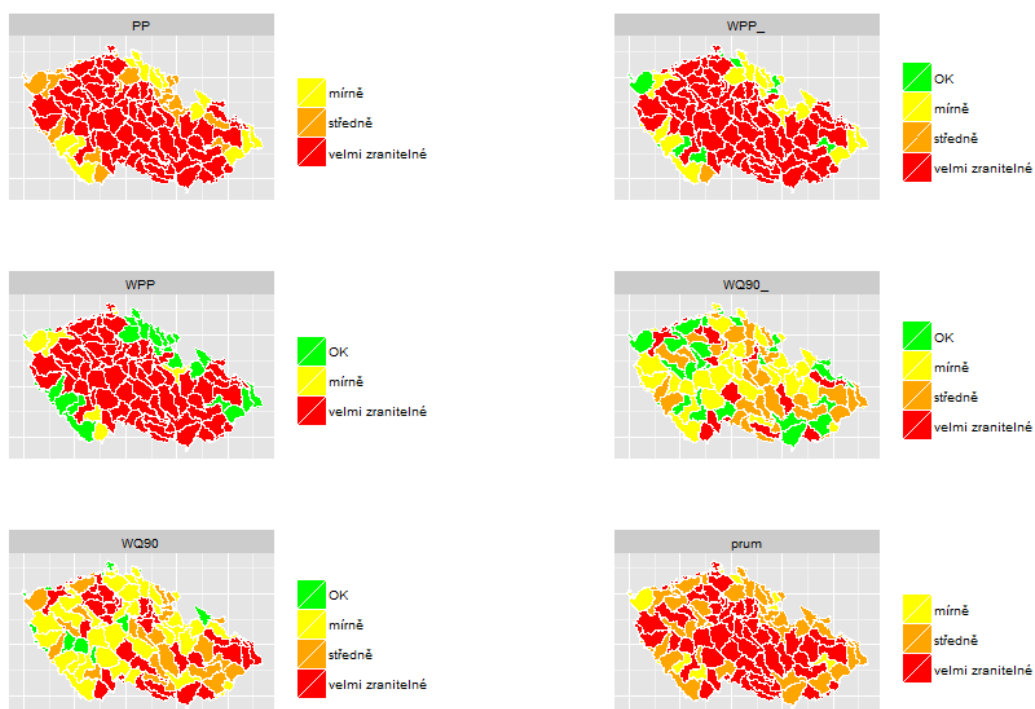
Výsledky modelování změn jednotlivých členů hydrologické bilance, vyjádřené indexy určujícími míru zranitelnosti povodí byly doplněny o průměrnou hodnotu z indexů *PP*, *WPP_* a *WQ90_* (sečteno a vyděleno třemi). Všech šest výsledných indexů bylo kategorizováno do 4 skupin na oblasti bezproblémové, mírně, středně a velmi zranitelné z hlediska dostupnosti vodních zdrojů. Výsledky pro pozorované období ukazují jako velmi zranitelné oblasti ČR jižní Moravu a západní část středočeského kraje. V těchto oblastech jsou nízké průměrné srážky a vysoká potenciální evapotranspirace. Výsledky z projekcí pro roky 2021-2050 a 2071-2100 tyto oblasti rozšiřují pro pesimistický scénář (rSCEN1) a zanechávají pro optimistický scénář klimatické změny (rSCEN3). Je tedy zřejmé, že volba scénáře je stěžejní, nicméně lze říci, že ke zlepšení neinklinuje ani neoptimističtější scénář. Na Obr. 22 až Obr. 28 lze vidět mapy indexů zranitelnosti povodí pro pozorované období 1981-2010 a modelovaná období 2021-2050 a 2071-2100 pro scénáře rSCEN1, rSCEN2 a rSCEN3. Výsledky vychází ze zprávy Hanel a kol., 2015. Tabulkový přehled je uveden v Příloze 1.



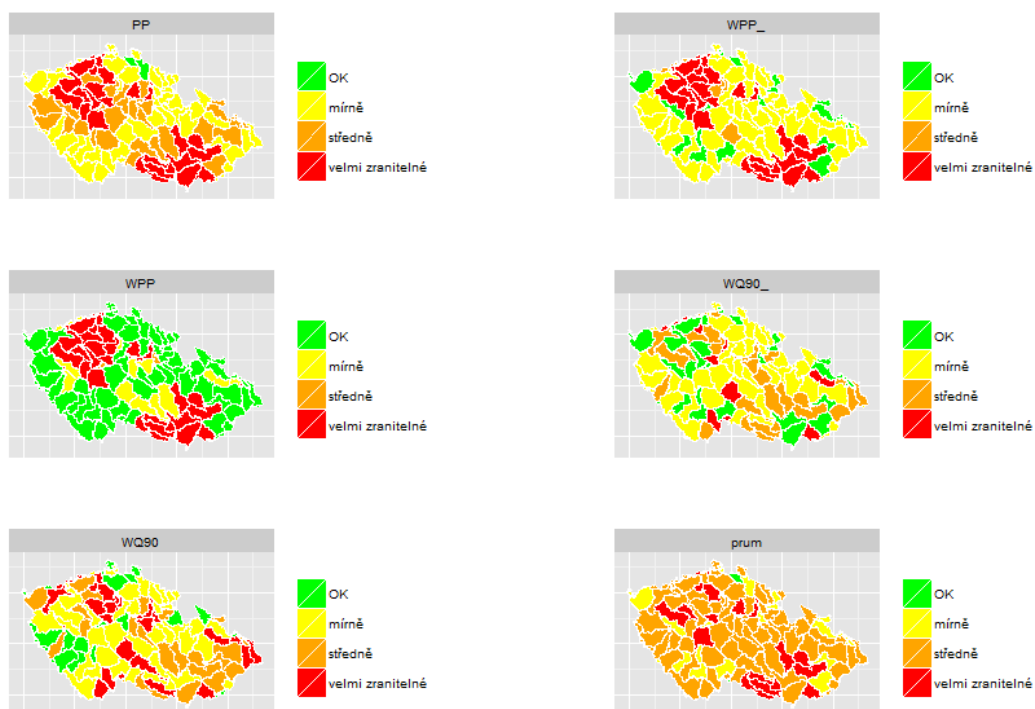
Obr. 22 Posouzení zranitelnosti povodí 3. řádu z hlediska nedostatku vody pomocí vybraných indexů pro pozorované období (1981-2010).



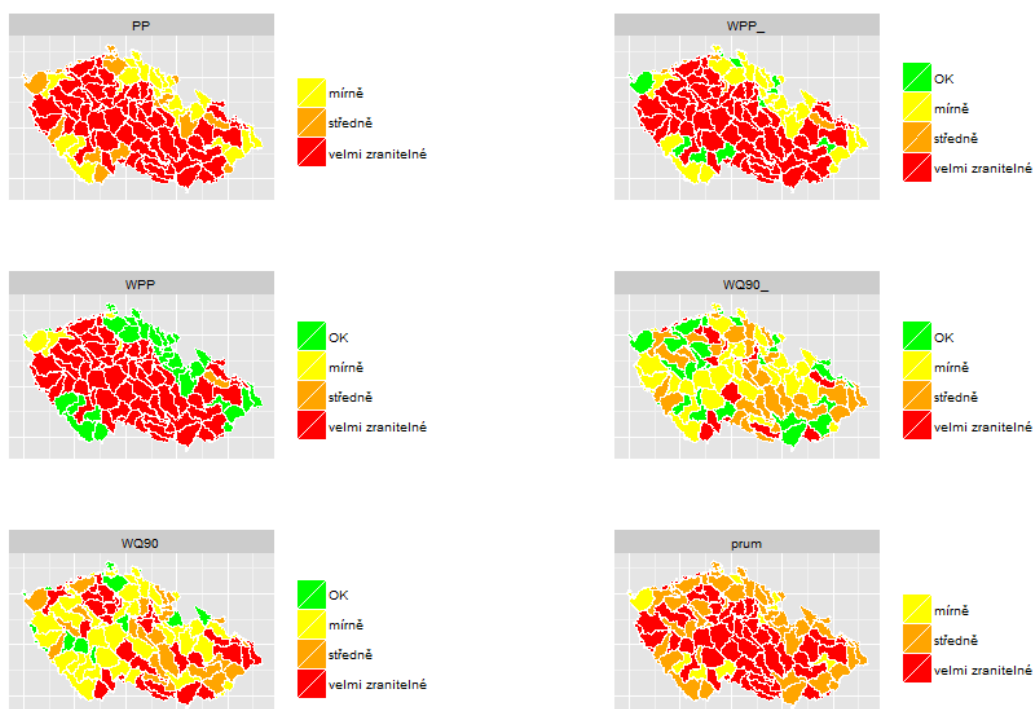
Obr. 23 Posouzení zranitelnosti povodí 3. řádu z hlediska nedostatku vody pomocí vybraných indexů pro výhledové období (2021-2050), scénář rSCEN1.



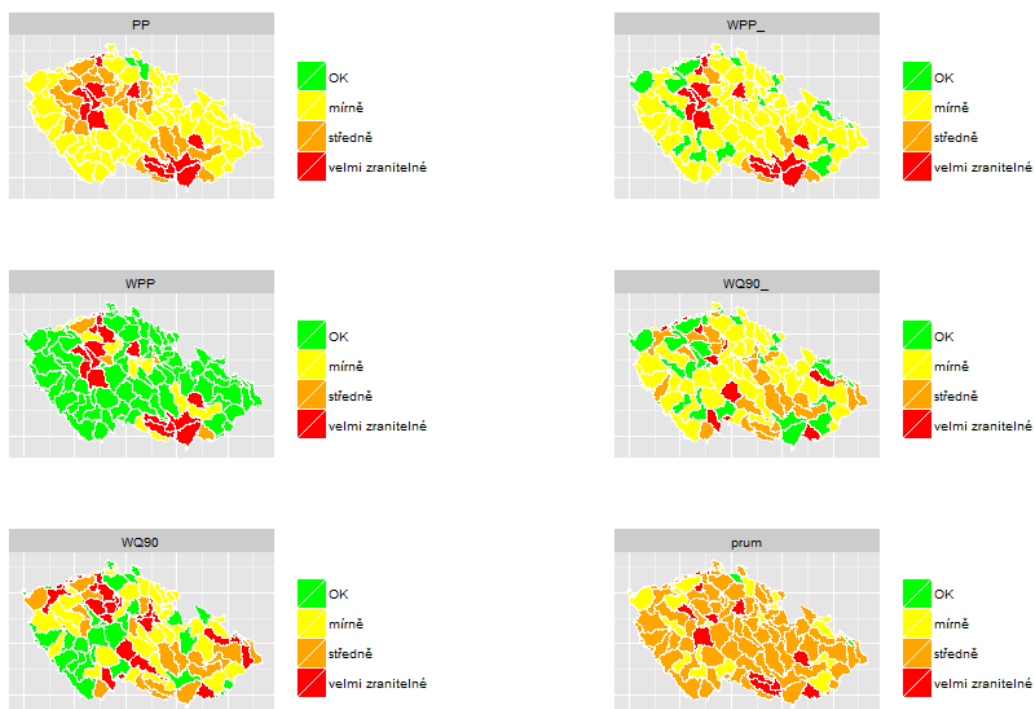
Obr. 24 Posouzení zranitelnosti povodí 3. řádu z hlediska nedostatku vody pomocí vybraných indexů pro výhledové období (2071-2100), scénář rSCEN1.



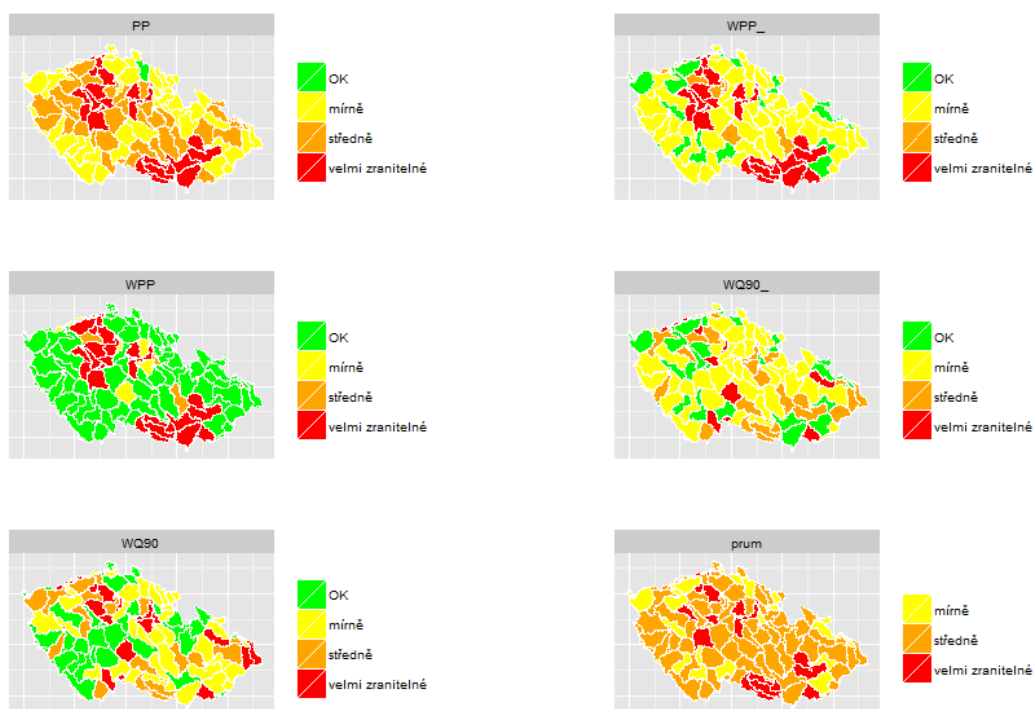
Obr. 25 Posouzení zranitelnosti povodí 3. řádu z hlediska nedostatku vody pomocí vybraných indexů pro výhledové období (2021-2050), scénář rSCEN2.



Obr. 26 Posouzení zranitelnosti povodí 3. řádu z hlediska nedostatku vody pomocí vybraných indexů pro výhledové období (2071-2100), scénář rSCEN2.



Obr. 27 Posouzení zranitelnosti povodí 3. řádu z hlediska nedostatku vody pomocí vybraných indexů pro výhledové období (2021-2050), scénář rSCEN3.



Obr. 28 Posouzení zranitelnosti povodí 3. řádu z hlediska nedostatku vody pomocí vybraných indexů pro výhledové období (2071-2100), scénář rSCEN3.

6.2 Odvozování dotace podzemních vod na 53 hydrogeologických rajonech ČR

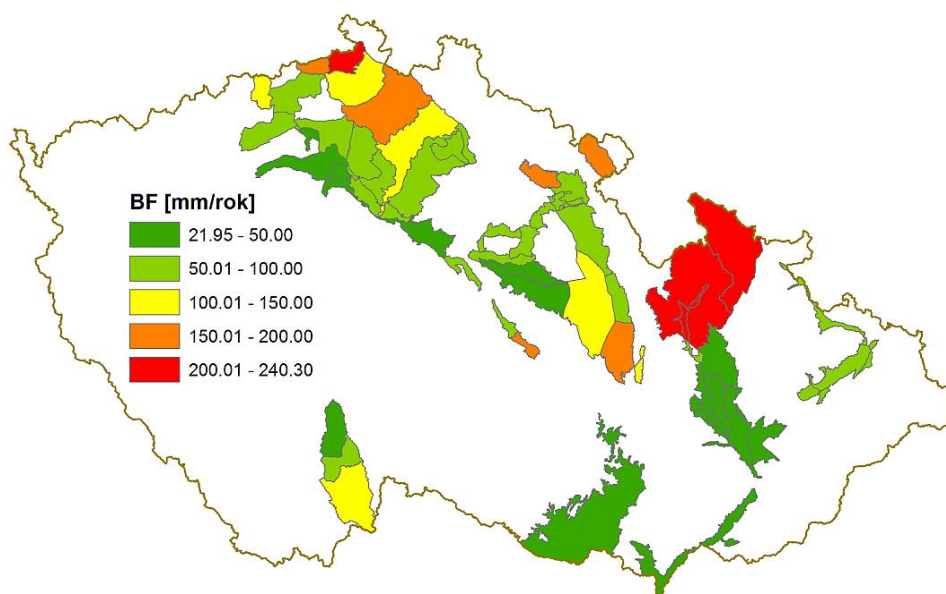
Na výzkum změn hydrologické bilance v současných a klimatickou změnou postižených oblastech bylo zaměřeno i v rámci projektu „Rebilance podzemních vod“. Na řešení se v letech 2012-2016 podílelo oddělení Hydrologie VÚV TGM, v.v.i.. Proběhlo vyčíslení dotace podzemních vod, jež je stěžejní úkol při výpočtu celkových zásob podzemních vod. Byly sestaveny hydrologické modely pro vyčíslení základního odtoku a dotace podzemních vod na území 53 hydrogeologických rajonů v rámci České republiky. Modely byly sestaveny za použití bilančního modelu Bilan, modelovaný byl i budoucí předpokládaný průběh hydrologických bilančních prvků ovlivněných změnou klimatu, zejména dotace podzemních vod. Výsledky hydrologického modelování s vyčíslením dotace podzemních vod jsou uvedeny v článku Beran, Hanel a Peláková (2014). Postup modelování hydrologické bilance aplikovaný na 53 HGR v rámci ČR s popisem odvození dotace podzemních vod je uveden níže na příkladě HGR 4231 Křída Ústecké synklinály. (Kapitola 6.3)

Stanovení dotace podzemních vod (perkolace srážkové vody do podzemních vod) je důležitým prvkem vodní bilance HGR. Dotace zásadním způsobem ovlivňuje přírodní zdroje podzemních vod, tj. veličinu, z které se vyčleňuje využitelné množství podzemních vod. Dotace podzemních vod je v průběhu roku proměnlivá, obvykle s podzimními minimy a jarními maximy.

Dotace se stanovuje jako proměnná hodnota časových řad v měsíčním kroku, což umožňuje vystihnout nepříznivé situace, ke kterým během roku dochází, např. delší období sucha, které může způsobit významné poklesy hladin podzemní vod, poklesy průtoků a v intenzivně využívaných HGR omezení jímání podzemních vod.

Stanovení přírodních zásob podzemních vod se standardně provádí zejména na základě srážko-odtokových poměrů a vyčleněním základního odtoku na podkladě analýzy hydrogramů příslušného toku s přihlédnutím ke kolísání hladin podzemních vod. Dotaci lze také stanovit pomocí hydrologických modelů, které simulují celou hydrologickou bilanci zahrnující srážky, výpar, podzemní a povrchový odtok a změnu zásob podzemní vody (kolísání hladin podzemních vod).

Hydrologické modely byly sestaveny pro 53 HGR o rozloze 50 až 1500 km², jejich přibližné umístění je vidět na Obr. 29.



Obr. 29 Rozložení HGR na území ČR s barevným vyznačením velikosti dotace podzemních vod

6.2.1 Příprava a zpracování meteorologických a hydrologických dat pro hydrologické modely

Základní veličinou, která ovlivňuje velikost celkového odtoku, základního odtoku a dotace podzemních vod, jsou atmosférické srážky. Teplota vzduchu je používána zejména jako hlavní činitel regulující velikost potenciální evapotranspirace a jako vstupní hodnota do sněhové komponenty hydrologického modelu. Plošné hodnoty pro jednotlivá povodí a HGR byly odvozeny z bodových měření na základě metod, zohledňujících proměnlivost vztahu srážek s nadmořskou výškou v ploše i v čase (Šercl, 2008). Pro výpočet srážek byla použita data ze srážkoměrných a klimatických stanic poskytnutá Českým hydrometeorologickým ústavem (dále jen ČHMÚ), standardně dostupná pro období po roce 1960. Pro výpočet teplot vzduchu byla použita data ze sítě klimatických stanic ČHMÚ.

Hydrologická data v podobě průměrných denních a měsíčních průtoků byla pro stanovení základního odtoku a pro kalibraci bilančního modelu vybrána z dostupných vyhodnocených pozorování ve vodoměrných stanicích ČHMÚ, databází dalších organizací (zejména podniky Povodí) i z vlastních pozorování.

Na základě konzultací s řešiteli bylo zadavatelem vybráno pro hydrologické modelování období 1981-2010 s tím, že pro hydraulické modelování časových změn bude použito jen období 2001-2010. Pro posuzování trendů a dlouhodobých změn meteorologických a hydrologických veličin byly použity řady 1961-2010.

Základní zpracování hydrologickým modelem bylo provedeno v měsíčním kroku výpočtu.

Výběr povodí nebo mezipovodí z kterých se odvozují informace o hydrologické bilanci pro bilanci hydrogeologického rajonu

Jelikož území hydrogeologického rajonu není obvykle totožné s povodím vodoměrné stanice, musela být při aplikaci hydrologického modelu pro dotaci podzemních vod řešena extrapolace hydrologických bilančních vztahů v prostoru.

Výběr vhodných povodí nebo mezipovodí reprezentujících odtok z HGR byl prováděn tak, aby území povodí odpovídala co nejlépe rozsahu HGR. V ideálním případě bylo nalezeno jedno nebo více povodí uvnitř plochy HGR. Pokud HGR není v pramenné oblasti pozorovaného toku, bylo zvoleno mezipovodí (nebo více mezipovodí) uvnitř plochy HGR. U některých HGR byla zvolena kombinace povodí a mezipovodí, jak předurčily přírodní podmínky. U malých HGR a u oblastí s malou hustotou stanic nebylo možné najít žádné povodí nebo mezipovodí uvnitř rajonu, proto bylo zvoleno takové, které se co nejvíce překrývá s plochou rajonu. Několik HGR se nachází v oblasti, kde je režim odtoku natolik ovlivněn užíváním vod a manipulacemi nádrží, že dostupná vodoměrná pozorování nelze použít. Také odtoky vypočítané pro malá mezipovodí na dolních tocích nejsou věrohodné. V takových případech bylo zvoleno povodí poblíž HGR s obdobným režimem.

6.2.2 Odvození základního odtoku

Pro výpočet hydrologické bilance vyrovnávající naměřené hodnoty byl použit model chronologické hydrologické bilance Bilan. Zvolený postup výpočtu pro hydrogeologický rajon spočívá v tom, že pro povodí vybrané vodoměrné stanice, nebo i několika stanic, případně mezipovodí mezi vodoměrnými stanicemi, je s využitím meteorologických vstupních veličin, pozorovaného odtoku v závěrovém profilu a pozorování podzemních vod, pokud existují, provedena kalibrace hydrologického modelu.

Simulace hydrologické bilance pro HGR vychází ze vstupních meteorologických veličin pro plochu rajonu. Základním přístupem k odvození časových řad bilančních veličin na plochu HGR je přenos parametrů z povodí vybrané vodoměrné stanice, tj. použijí se vstupní meteorologické veličiny pro hydrogeologický rajon a parametry modelu nakalibrovaného na povodí relevantní vodoměrné stanice. V případě, že je v rajonu takových stanic víc, jsou výsledné časové řady bilančních veličin vypočteny jako vážený průměr časových řad získaných dle sad parametrů z jednotlivých relevantních vodoměrných stanic, přičemž váhy odpovídají velikosti překryvu povodí dané stanice s rajonem.

V hydrogeologických rajonech, kde je dostatek kvalitních pozorování, byl použit i alternativní přístup, kdy nebyla hydrologická bilance modelována pro HGR jako celek, ale odděleně pro jednotlivá dílčí povodí rajonu, většinou na základě pozorování vodoměrných stanic. Kde nebyla pozorování k dispozici, byl pro modelování hydrologické bilance v dílčích (zpravidla malých) částech povodí využit přenos parametrů z přilehlých povodí vodoměrných stanic. Výsledné časové řady bilančních veličin byly pak získány váženým součtem výsledků pro dílčí povodí.

Předností tohoto způsobu extrapolace je, že plně respektuje meteorologické vstupy hydrologické bilance, zejména časový průběh srážek.

Pro jednotlivé HGR tak byla vytvořena sada hydrologických modelů vycházejících z věrohodných parametrických sad pro dílčí povodí relevantní pro příslušný HGR. Pro posouzení vhodnosti jednotlivých sad byly výsledky odhadů hydrologické bilance pro HGR porovnány s empirickými odhady ročních odtokových výšek a baseflow indexem získaným z okolních povodí. Sady parametrů vedoucí k nevěrohodným výsledkům byly vyloučeny.

6.2.3 Simulace pro předpokládaný vývoj klimatu

Pro simulace vývoje hydrologického režimu při předpokládaném vývoji klimatu byly využity metodické postupy a scénáře zpracované v úkolu Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a návrhy adaptačních opatření (Pretel a kol., 2009, 2010).

Posouzení vlivu změn klimatu na hydrologický režim bylo provedeno pomocí hydrologického modelu Bilan, na základě scénářových řad vstupních veličin (srážky, teploty). Scénářové řady v měsíčním kroku byly vytvořeny standardním postupem pomocí úpravy pozorovaných řad o měsíční změny odvozené ze simulací klimatických modelů (tzv. přírůstková metoda, viz kapitola 3.2.1), (Pretel a kol., 2009, 2010). Pro každé povodí byly změny vstupních veličin z výpočetní sítě klimatických modelů interpolovány k těžišti povodí.

Pro konstrukci scénářů byly využity výstupy souboru regionálních klimatických modelů, jako střední odhad byl uvažován průměr souboru simulací, zároveň byla posouzena nejistota odhadů změn hydrologického cyklu vyplývající z volby klimatického modelu.

Posouzení možných dopadů klimatické změny bylo provedeno na základě simulací 15 regionálních klimatických modelů (viz kapitola 4.4) pro časové horizonty 2025 (2011-2040), 2055 (2041-2070) a 2085 (2071-2100). Vzhledem k dostupným datům byly uvažovány změny oproti období 1961-1990, které je standardně používáno ve studiích dopadů změn klimatu.

Pro zasazení scénářů založených na simulacích klimatických modelů do kontextu pozorovaných dat byly vyhodnoceny pozorované trendy srážek a teploty. Pro všechny HGR byly spočítány průměrné roční odchylky od průměru za období 1981-2010 pro teplotu vzduchu a 1981-2009 pro srážky. K vyřazení roku 2010 došlo z důvodu relativně vysokého srážkového úhrnu v tomto roce, což ovlivňovalo výsledky následné extrapolace.

6.2.4 Souhrn modelování pro 53 HGR

Na Obr. 30 je příklad závislosti průměrného ročního základního odtoku na průměrné roční srážce pro všechny HGR (i všechny použité povodí a mezipovodí) s vyjádřením rovnice.

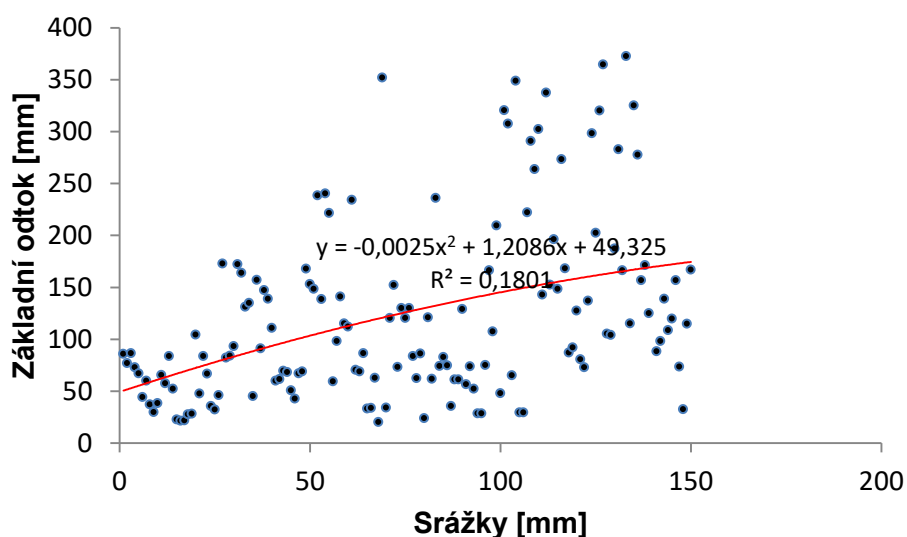
Pro vybrané HGR s větší rozlohou bylo vytvořeno grafické znázornění rozložení velikosti

dotace podzemních vod na základě proměnlivosti průměrné srážky na ploše. Obr. 31 znázorňuje prostorové znázornění velikosti dotace podzemních vod na území HGR 4222 Podorlická křída v povodí Orlice. Závislost dotace podzemních vod na průměrném srážkovém úhrnu byla odvozena z výsledků pro HGR a použitá povodí (mezipovodí).

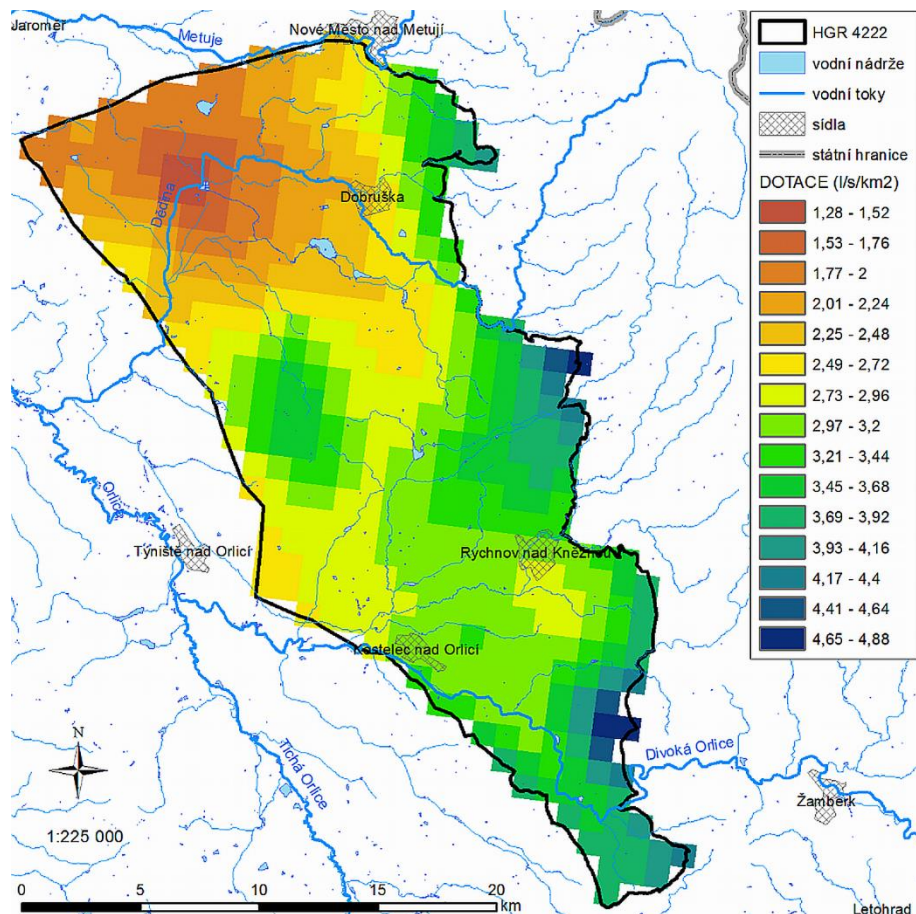
Na Obr. 32 je uvedeno souhrnné vyhodnocení pozorovaných trendů v hodnotách teploty vzduchu a srážkách společně s jejich extrapolací do roku 2020. Na základě extrapolace pozorovaného trendu je průměr srážek z období 2011-2020 o cca 5 % vyšší než průměr za období 1981-2010 a cca o 2 % vyšší než v období 2001-2010. V případě teploty jde o rozdíl 0,75 °C a 0,35 °C.

Uvažované změny srážek a teploty pro časové horizonty 2011-2040, 2041-2070 a 2071-2100 udává Obr. 33. Pro srážky předpokládají klimatické modely pokles v letních měsících (dle časového horizontu 5-25 %), po zbytek roku spíše růst. Teplota roste pro všechny tři časové horizonty po celý rok, v průměru cca o 1,5, 2,2 a 3,5 °C.

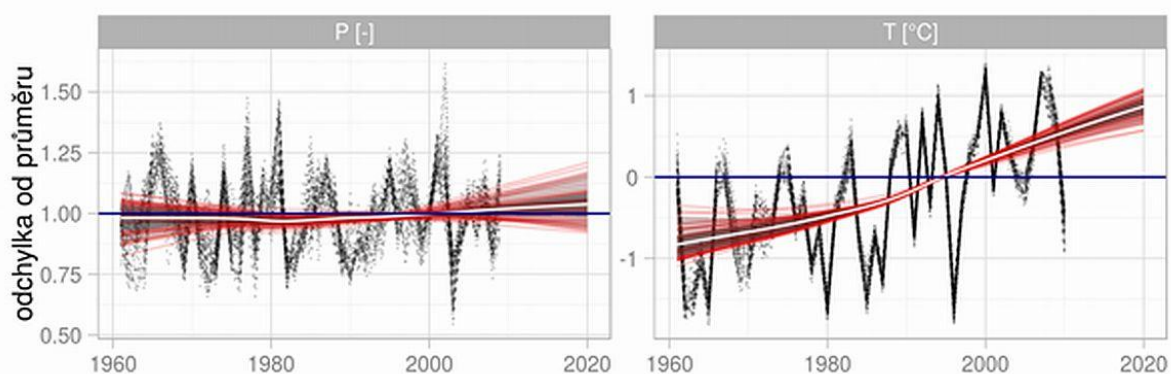
Výsledky modelování dopadů změny klimatu v podobě změn základního odtoku, dotace podzemních vod a celkového odtoku pro jednotlivé měsíce a pro časové horizonty 2011-2040, 2041-2070 a 2071-2100 jsou součástí jednotlivých dílčích zpráv.



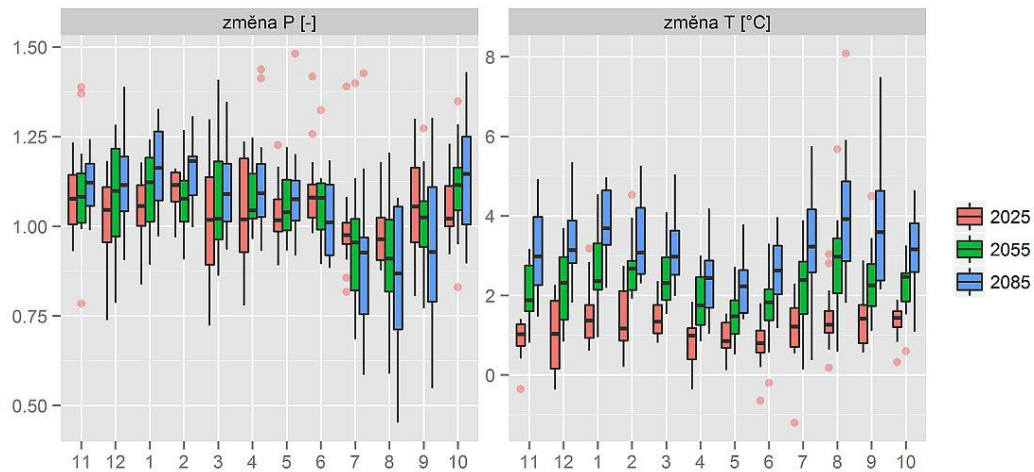
Obr. 30 Závislost velikosti základního odtoku na průměrné srážce pro území všech HGR, povodí a mezipovodí.



Obr. 31 Grafické znázornění prostorové variability velikosti dotace podzemních vod na území HGR 4222 (Podorlická křída v povodí Orlice) vypočtené na základě rozdílných průměrných srážkových úhrnů.



Obr. 32 Souhrnné vyhodnocení pozorovaných trendů a jejich extrapolace. Černé čáry znázorňují odchylky srážek a teploty od průměru pro jednotlivé HGR. Tyto odchylky jsou proloženy neparametrickou regresí (barevné čáry).



Obr. 33 Uvažované změny v průměrných srážkách a teplotě pro budoucí časové horizonty 2011-2040, 2041-2070 a 2071-2100.

V rámci projektu byla pro každý z 53 HGR zpracována průvodní zpráva informující o základních vlastnostech HGR, datech použitých pro zpracování a podrobných výsledcích modelování. Řešení projektu ukázalo, že hydrologický koncepční model Bilan patří mezi platné nástroje k určování velikosti dotace podzemních vod a základního odtoku. Výsledky velikosti dotace podzemních vod a velikosti základního odtoku byly předány k dalšímu zpracování a poslouží jako vstupní data do hydrogeologických modelů pro modelování proudění podzemní vody na území HGR.

6.3 Modelování hydrologické bilance na území HGR 4231 Křída Ústecké synklinály

Modelování hydrologické bilance s určením dotace podzemních vod proběhlo pro všech 53 hydrogeologických rajonů (znázorněno na Obr. 29). Níže jsou uvedeny výsledky modelování rajonu 4231 – Křída ústecké synklinály. V podobné struktuře byly připraveny i zprávy pro ostatních 53 hydrogeologických rajonů.

6.3.1 Popis hydrogeologického rajonu 4231 – Křída ústecké synklinály

Křída ústecké synklinály vyplňuje úzký protáhlý úval mezi potštejskou a litickou antiklinálou, ve kterém je tlakově výrazná artéská nádrž podzemní vody. V povodí Orlice se nádrž odvodňuje do Tiché Orlice, protékající napříč synklinálou. Jižní část, tzv. březovsko-svitavskou pánev, odvodňuje řeka Svitava. Podle proudových systémů podzemní vody je synklinála rozdělena do dvou rajonů:

4231 Ústecká synklinála v povodí Orlice

4232 Ústecká synklinála v povodí Svitavy

Křídová výplň ústecké synklinály má stratigrafické rozpětí cenoman až coniak, a tak je zde v rámci progradačních cyklů vyvinuto několik kolektorů. Bazální křídový kolektor A v perucko-korycanském souvrství je vodohospodářsky nevýznamný pro slabý oběh a špatnou kvalitu vody. Naopak kolektory B a C v horních částech bělohorského a jizerského souvrství ve facii prachovců a pískovců jsou velmi dobře puklinově propustné, s vysokou průtočností a intenzivním oběhem podzemní vody. Sedimentaci březenského souvrství u Svitav dokončuje písčité delta – kolektor D využitý k místnímu zásobování. Dolní pelitické části souvrství bělohorského a jizerského jsou nepropustná a tvoří izolátory mezi kolektory B a C. Oběh podzemní vody v kolektorech je oddělený, s výjimkou tektonických linií, které kolektory místně spojují.

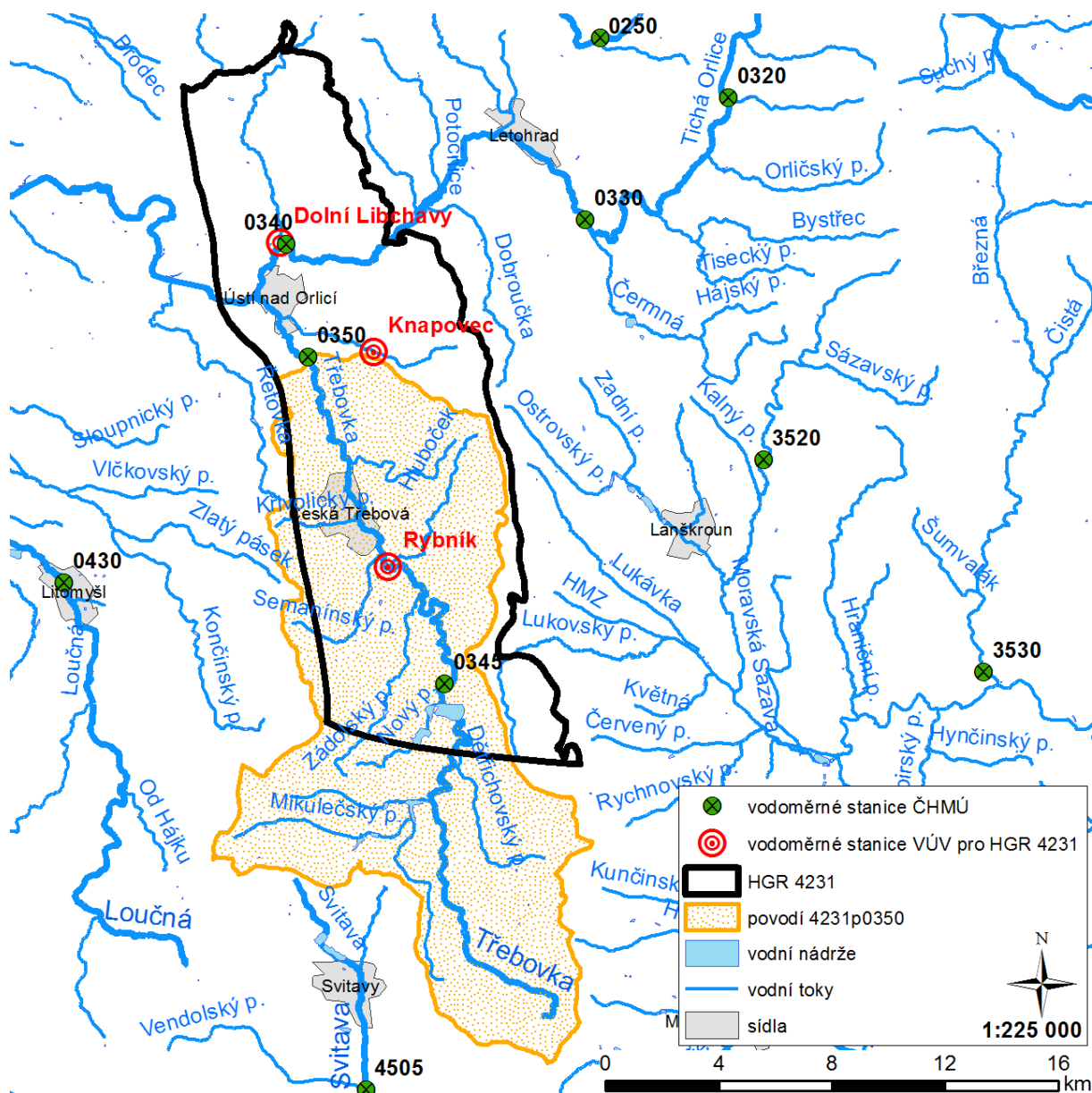
Nádrž podzemní vody je doplňována na výchozech kolektorů ve východním křídle synklinály a na potštejské antiklinále. Dotace influkcí z Tiché či Divoké Orlice nebyla prokázána. Velmi pravděpodobný je přítok podzemní vody z vysokomýtské synklinály. Rozvodnice podzemní vody mezi proudovým systémem drénovaným do Orlice (HGR 4231) a proudovým systémem drénovaným do Svitavy (HGR 4232) je pohyblivá podle stavu hladiny a velikosti odběrů.

Proudový systém v rajonu 4231 má výrazně tlakový charakter, piezometrická úroveň podzemní vody kolektoru B je v Dlouhé Třebové až 50 m nad terénem. Kolektor C má většinou volnou hladinu. Jeho oběh podzemní vody je však ovlivňován hydraulickou bariérou, kterou tvoří hluboké předmiocenní údolí vyplněné jíly. Sestupný proud podzemní vody od jihu je bariérou usměřován do přelivných pramenů Vrbovka a Javorka v České Třebové. Hlavní drenáž kolektoru B je v soutokové oblasti Tiché Orlice a Třebovky. V rajonu 4231 jsou významné místní vodárenské odběry pro Ústí nad Orlicí a Českou Třebovou.

6.3.2 Popis sady povodí a dostupných dat

Nevelkému rajonu 4231 dobře odpovídá povodí Třebovky, které pouze v jižní části vyčnívá za hranice rajonu. Odtok z povodí je měřen ve stanici Ústí nad Orlicí (0350). Průtok v profilu je dlouhodobě pozorovaný vodoměrnou stanicí ČHMÚ.

Poloha povodí v HGR je znázorněna na Obr. 34, základní charakteristiky a informace o dostupných datech obsahuje Tab. 12.



Obr. 34 Lokalizace zájmové oblasti s polohou relevantních vodoměrných stanic

Tab. 12 Přehled povodí – základní charakteristiky a dostupná data.

ID		DBC	ANALOG	P [mm]	Qa [m3/s]	NV [m n.m.]	A [km2]	IA [km2]	KALIB	SEP
4231p0350	povodí Třebovka (Ústí nad Orlicí)	0350		727,67	1,075	487,06	174,15	86,44	1971- 2010	x
HGR	HGR	-	TRANS	759,12	-	450,09	176,35	176,35	NE	

ID: Identifikace povodí nebo části HGR; DBC: databankové číslo povodí / postup odvození mezipovodí; ANALOG: ID vodoměrné stanice, použité jako analogon (SYN/TRANS pro HGR indikuje metodu odvození hydrologické bilance pro celý hydrogeologický rajon); P: průměrná dlouhodobá výška srážek mm/rok za období 1981-2010; Qa: průměrný dlouhodobý roční průtok za pozorované období; NV: průměrná nadmožská výška; A: plocha povodí nebo části HGR; IA: plocha z dílčího povodí ležící v HGR; KALIB: období, z kterého byla použita data pro kalibraci hydrologického modelu; SEP: označení povodí, pro která byla provedena separace základního odtoku.

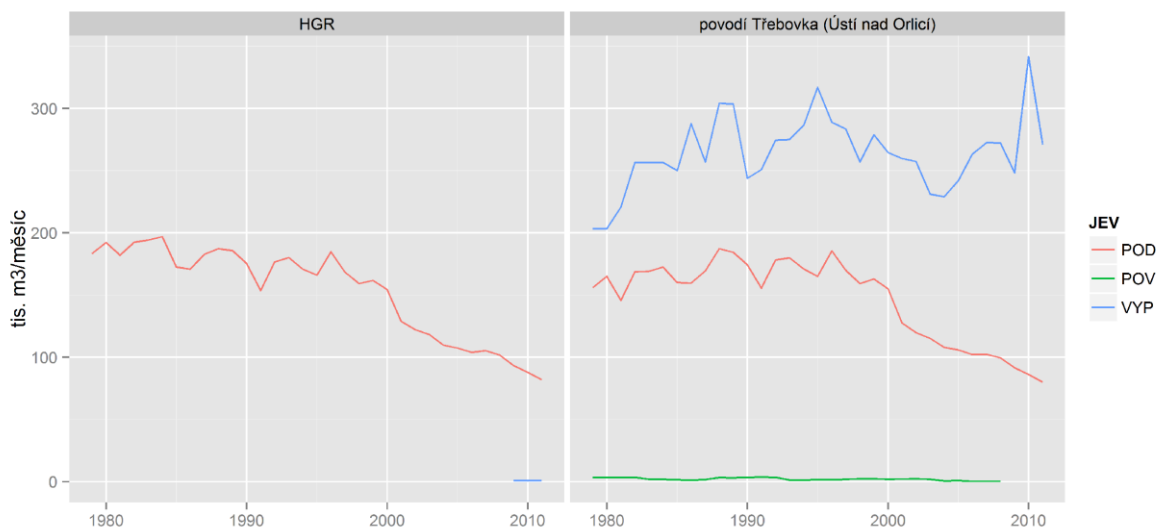
Informace o doplňkových měřeních na zájmové lokalitě v rámci úkolu:

- Libchavský potok (Dolní Libchavy)
- Knapovecký potok (Knapovec)
- Skuhrovský potok (Rybník)

Navržená sestava vodoměrných pozorování na menších tocích (s povodími z většiny uvnitř HGR) je určena ke zpřesnění údajů o odtoku podzemní vody z posuzovaného HGR. Na horní části povodí Třebovky je sice vodoměrná stanice ČHMÚ 0345, kterou lze ale částečně využít jen jako odtokový profil pro HGR 4232, navíc je silně dlouhodobě ovlivněn odběry vody, průtoky Třebovky jsou také ovlivněny nádrží Hvězda. I další pozorování ČHMÚ (0340, 0350) jsou využitelná jen částečně z důvodu umístění na větších tocích, a tedy zahrnující i vlivy mimo HGR.

6.3.3 Informace o míře oprav průtoků o užívání

Průtokové řady použité pro kalibraci hydrologických modelů dílčích povodí i pro separaci základního odtoku byly opraveny o užívání vod z důvodu vyšší relativní míry užívání. Obr. 35 poskytuje informace o souhrnném užívání vod v dílčích povodích. Míru ovlivnění vyjádřenou v % z celkového odtoku obsahuje Tab. 13.



Obr. 35 Souhrnné užívání vod v dílčích povodích. POV: povrchový odběr, POD: podzemní odběr, VYP: vypouštění.

Tab. 13 Míra ovlivnění průtoků ve vodoměrných stanicích v % z celkového odtoku, v tis. m3/rok a v mm/rok pro jednotlivá období.

JEV		% (1981- 2010)	% (2001- 2010)	tis. m3/měsíc (1981-2010)	tis. m3/měsíc (2001-2010)	mm/rok (1981- 2010)	mm/rok (2001- 2010)
POD	HGR	NaN	NaN	152,12	105,51	10,35	7,18
POD	povodí Třebovka (Ústí nad Orlicí)	13,58	10,87	147,75	103,41	10,18	7,13
POV	povodí Třebovka (Ústí nad Orlicí)	0,18	0,11	1,87	0,92	0,13	0,06
VYP	HGR	NaN	NaN	0,77	0,77	0,05	0,05
VYP	povodí Třebovka (Ústí nad Orlicí)	24,60	26,89	269,26	261,87	18,55	18,04

POV: povrchový odběr; POD: podzemní odběr; VYP: vypouštění; NaN: žádné evidované užívání.

6.3.4 Hydrologický model – postup a výsledky

Postup a výsledky stanovení podzemního odtoku a dotace podzemních vod

V případě hydrogeologických rajonů s menším počtem pozorovaných dat, což je případ HGR 4231 bylo nutno volit tento postup:

1. Pro všechna dílčí povodí a pro celý HGR byly vypočteny řady průměrných srážek a průměrných teplot v období 1981-2010.
2. Pro povodí s měsíčním pozorováním byl kalibrován model Bilan, s využitím pozorovaného odtoku.
3. Hydrologická bilance pro HGR byla modelována pomocí meteorologických dat pro HGR.

Výsledky ve formě datových řad měsíčních průměrů veličin hydrologické bilance, včetně základního odtoku a dotace zásob podzemní vody jsou předány odběrateli v elektronické formě spolu s výsledky pro dílčí povodí.

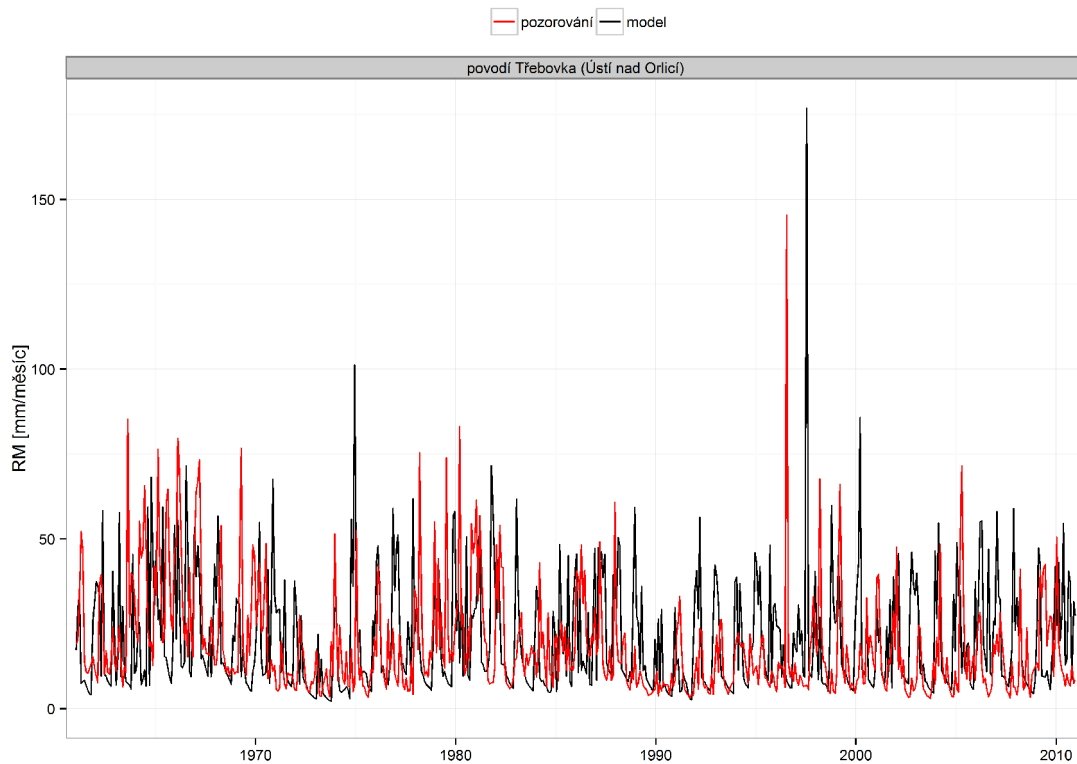
Pro rámcové posouzení dílčích i finálních výsledků jsou uvedeny na Obr. 36 průběhy měsíčních řad pozorovaného a modelovaného odtoku, na Obr. 37 průběhy základního odtoku stanovené modelováním.

Hodnota koeficientu Nash-Sutcliffe pro vyjádření shody průtoku simulovaného modelem Bilan a měřeného průtoku je pro povodí Třebovka (Ústí nad Orlicí) -0,46.

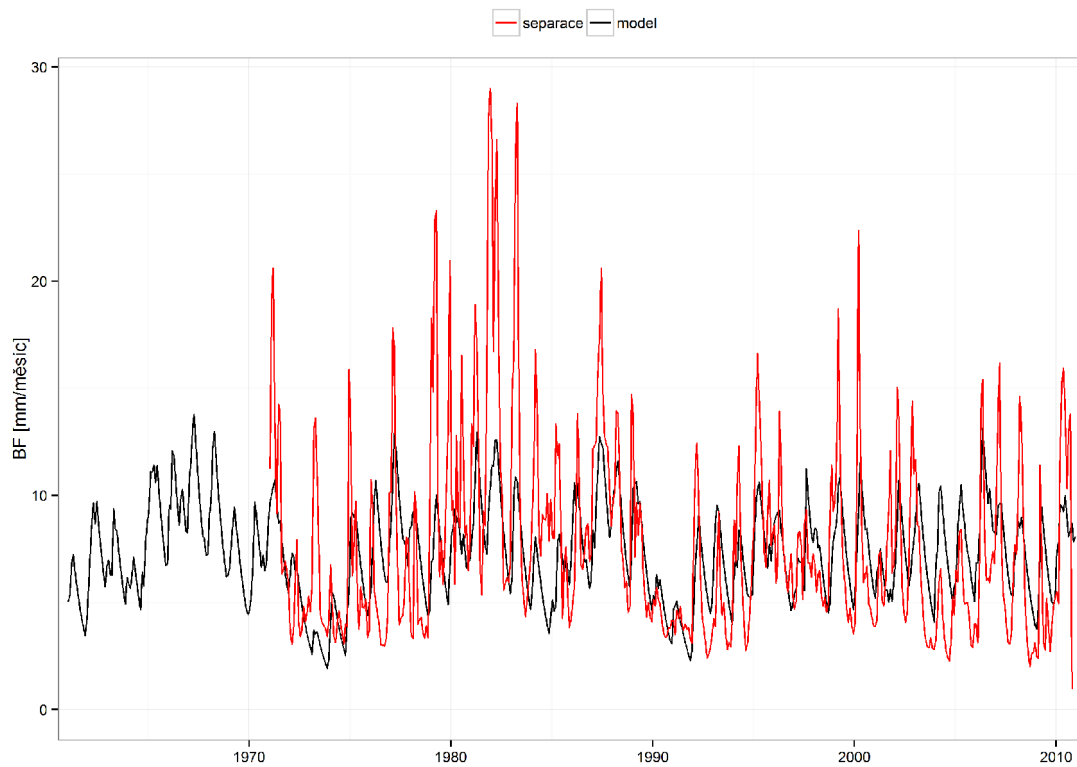
Sezónní průběh základního odtoku ve formě pravděpodobnostních polí, vyjádřený pro zužující se rozmezí kvantilů od nejširšího 10-90% po nejužší 40-60%, stanovený pro období 1981-2010 a 2001-2010 je na Obr. 38. Stejně charakteristiky jsou na Obr. 39 pro dotace podzemní vody.

Číselné hodnoty kvantilů pro základní odtok obsahují Tab. 14 a Tab. 15, pro dotace podzemní vody Tab. 16 a Tab. 17.

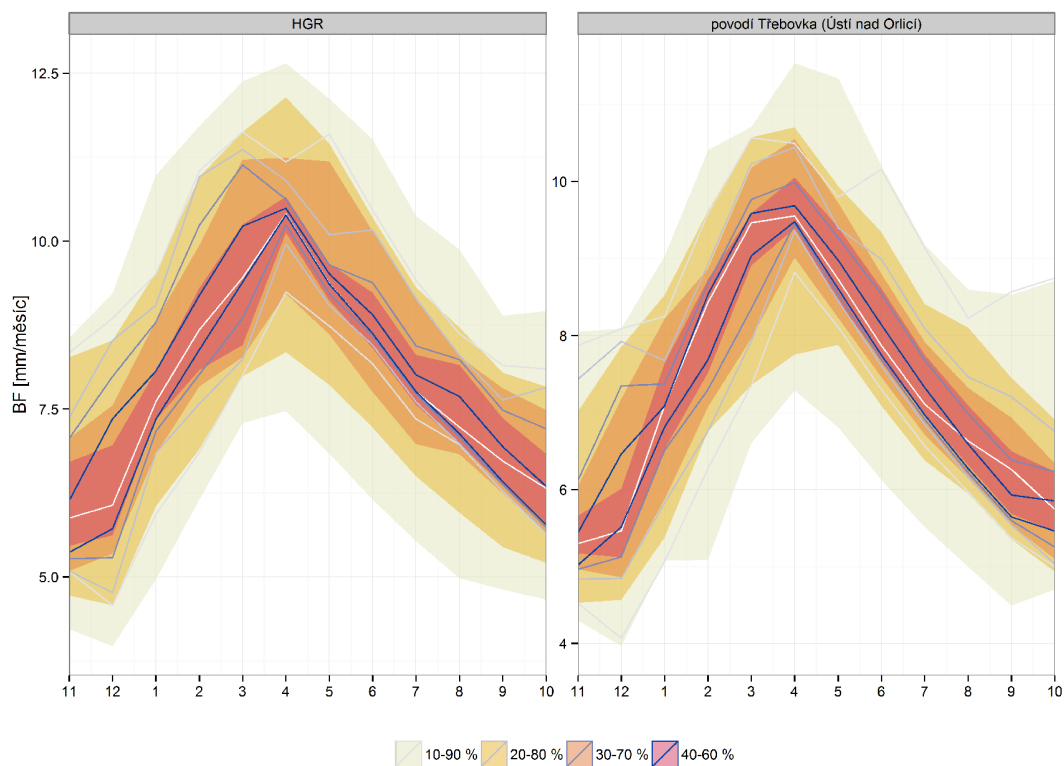
Na Obr. 40 pro základní odtok, na Obr. 41 pro dotace podzemní vody jsou čáry překročení zpracované z chronologických řad, tj. ze všech měsíců období 1981-2010 a 2001-2010.



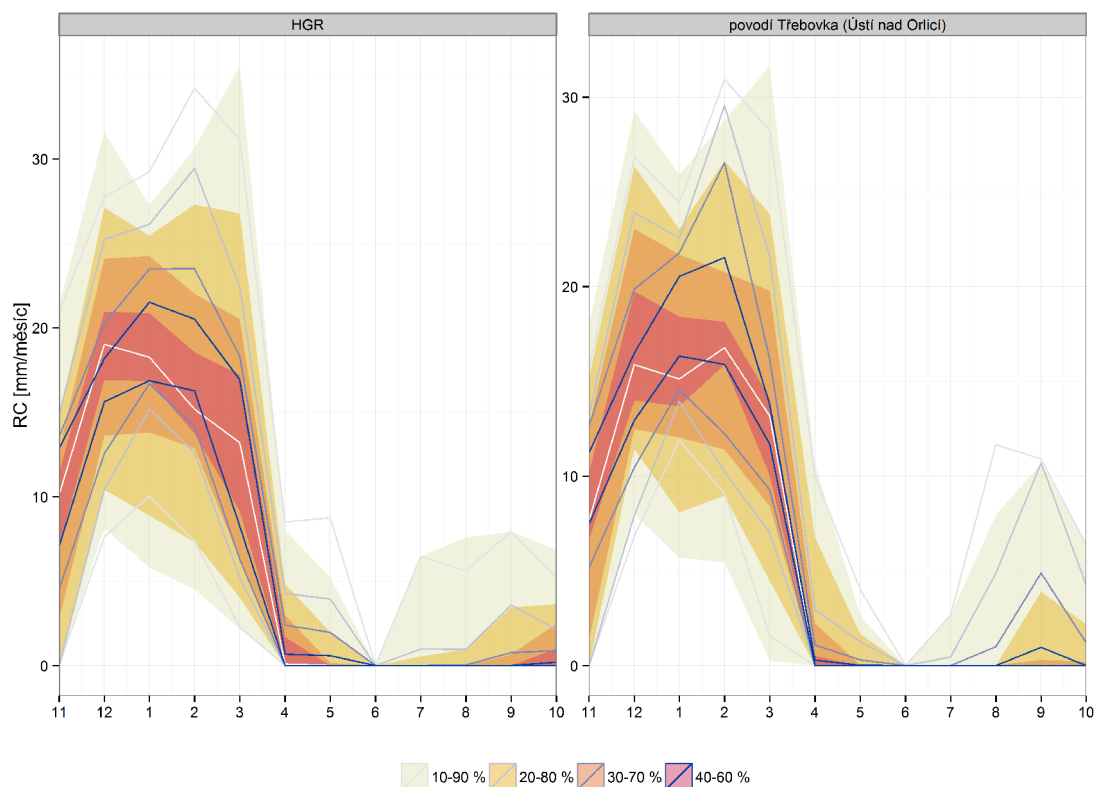
Obr. 36 Pozorovaný a modelovaný odtok [mm/měsíc]



Obr. 37 Povodí Třebovka (Ústí nad Orlicí). Základní odtok [mm/měsíc]



Obr. 38 Pravděpodobnostní pole – základní odtok [mm/měsíc]. Plné plochy odpovídají období 1981-2010, čáry období 2001-2010.



Obr. 39 Pravděpodobnostní pole – dotace podzemní vody. Plné plochy odpovídají období 1981-2010, čáry období 2001-2010.

Tab. 14 Pravděpodobnostní pole (po měsících) překročení základního odtoku [mm] pro HGR (1981-2010).

	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 %	4,22	3,97	4,96	6,15	7,29	7,47	6,84	6,15	5,53	4,98	4,81	4,66
20 %	4,72	4,58	6,05	6,90	7,99	8,35	7,86	7,22	6,50	5,96	5,45	5,21
30 %	5,09	5,35	6,83	7,84	8,27	9,22	8,61	7,75	6,98	6,83	6,25	5,65
40 %	5,46	5,62	7,34	8,08	8,45	10,13	9,11	8,41	7,56	6,98	6,36	5,77
50 %	5,88	6,07	7,61	8,68	9,46	10,40	9,37	8,62	7,76	7,23	6,73	6,32
60 %	6,71	6,96	8,06	9,30	10,25	10,66	9,66	9,23	8,30	8,16	7,36	6,83
70 %	7,07	7,55	8,81	9,94	11,22	11,24	11,19	10,14	9,13	8,28	7,81	7,48
80 %	8,27	8,52	9,53	10,96	11,63	12,14	11,45	10,35	9,31	8,71	8,04	7,83
90 %	8,56	9,22	10,98	11,71	12,38	12,65	12,12	11,51	10,37	9,88	8,89	8,96

Tab. 15 Pravděpodobnostní pole překročení základního odtoku [mm] pro HGR (2001-2010).

	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 %	5,08	4,58	5,93	6,85	8,01	9,25	8,74	8,17	7,35	6,97	6,27	5,64
20 %	5,09	4,77	6,85	7,58	8,24	9,96	9,04	8,45	7,61	6,98	6,28	5,65
30 %	5,27	5,28	7,17	8,02	8,85	10,24	9,22	8,59	7,73	7,09	6,38	5,74
40 %	5,37	5,72	7,34	8,38	9,39	10,39	9,36	8,62	7,76	7,13	6,42	5,77
50 %	5,88	6,07	7,61	8,68	9,46	10,40	9,37	8,62	7,76	7,23	6,73	6,32
60 %	6,14	7,36	8,06	9,19	10,22	10,49	9,51	8,90	8,01	7,68	6,94	6,35
70 %	7,06	7,99	8,79	10,24	11,14	10,62	9,64	9,38	8,44	8,24	7,48	7,21
80 %	7,37	8,52	9,04	10,96	11,37	10,90	10,10	10,17	9,15	8,30	7,63	7,82
90 %	8,34	8,85	9,51	11,05	11,62	11,18	11,59	10,46	9,41	8,62	8,15	8,09

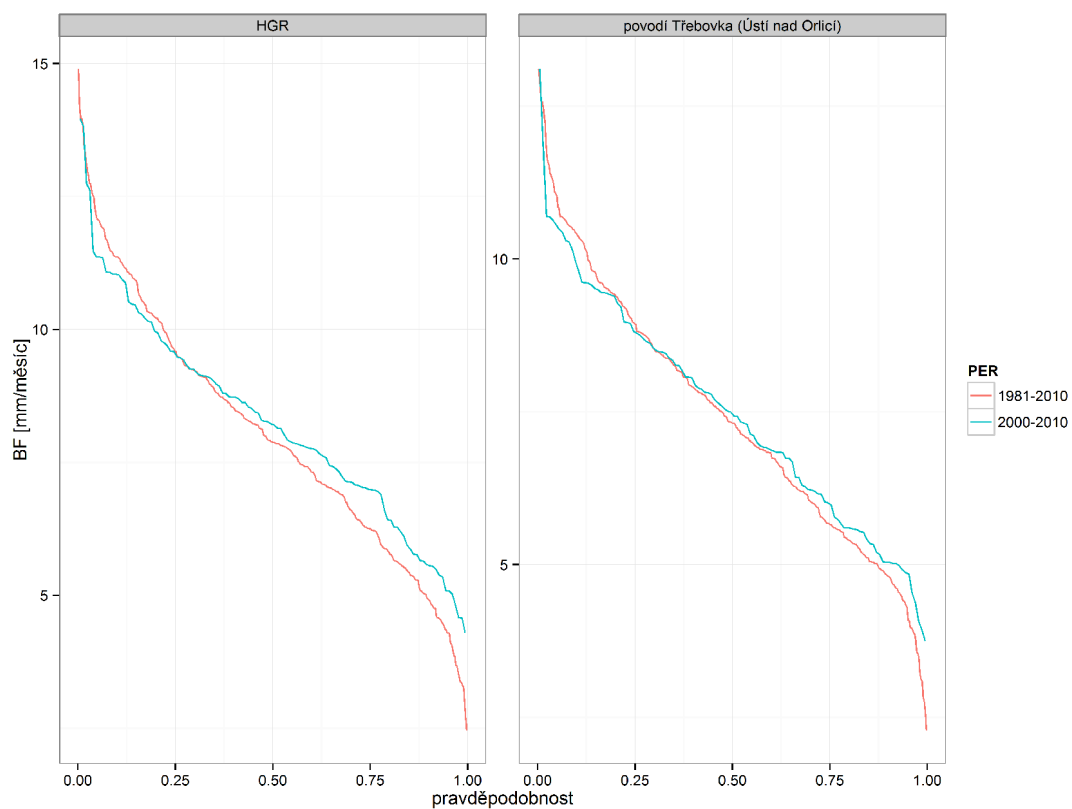
Tab. 16 Pravděpodobnostní pole překročení dotace podzemní vody [mm] pro HGR (1981-2010).

	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 %	0,00	8,13	5,82	4,52	2,20	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
20 %	0,00	10,41	8,89	7,32	4,02	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
30 %	2,73	13,62	13,80	12,89	6,29	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
40 %	7,07	16,91	16,85	13,75	9,15	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
50 %	10,09	19,02	18,26	15,18	13,20	0,10	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
60 %	11,45	20,98	20,87	18,55	17,22	1,69	0,00	0	0,00	0,00	0,00	1,02
70 %	12,75	24,10	24,25	22,01	20,52	3,00	0,16	0	0,00	0,00	0,65	2,48
80 %	14,60	27,11	25,47	27,30	26,77	4,84	1,99	0	0,53	0,97	3,46	3,63
90 %	21,27	31,60	27,26	30,62	35,54	8,01	5,23	0	6,47	7,58	7,95	6,86

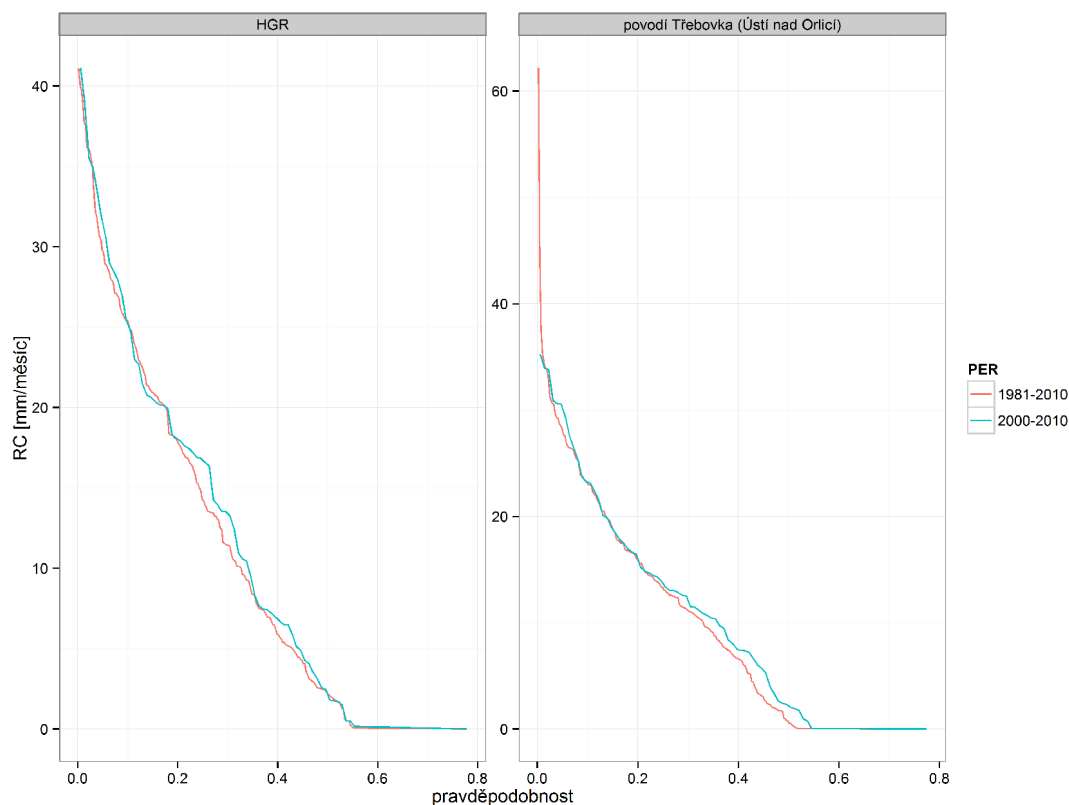
Tab. 17 Pravděpodobnostní pole překročení dotace podzemní vody [mm] pro HGR (2001-2010).

	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 %	0,00	7,61	10,05	7,37	2,26	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
20 %	0,00	10,41	15,18	12,63	5,17	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
30 %	4,53	12,56	16,69	14,16	6,29	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
40 %	7,07	15,63	16,87	16,28	8,26	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
50 %	10,09	19,02	18,26	15,18	13,20	0,10	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
60 %	12,86	18,17	21,52	20,52	16,92	0,68	0,59	0	0,00	0,00	0,00	0,20
70 %	13,52	20,25	23,49	23,51	18,32	2,40	1,97	0	0,00	0,05	0,77	0,89

	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
80 %	14,87	25,25	26,13	29,45	22,41	4,27	3,94	0	0,98	0,97	3,58	2,14
90 %	20,94	27,75	29,24	34,20	31,12	8,50	8,76	0	6,47	5,61	7,95	5,18



Obr. 40 Čára překročení měsíčního základního odtoku [mm/měsíc].



Obr. 41 Čára překročení měsíční dotace podzemních vod [mm/měsíc].

6.3.5 Souhrnné charakteristiky hydrologické bilance

Podle hydrologického modelování na území HGR činí za období 1981 až 2010 specifická dotace podzemních vod $3,05 \text{ l/s/km}^2$, celková dotace je pak $96,25 \text{ mm/rok}$.

Souhrnné charakteristiky hydrologické bilance za modelované mezipovodí a celý hydrogeologický rajon jsou uvedeny v Tab. 18 a Tab. 19.

Vypočtená specifická dotace podzemních vod pro HGR vyšla $3,05 \text{ l/s/km}^2$ (Tab. 18). Na nově zřízených vodoměrných stanicích byla v rámci aktivity 4 stanovena dotace podzemních vod: Libchavský potok (Dolní Libchavy) $4,47 \text{ l/s/km}^2$, Knapovecký potok (Knapovec) $2,83 \text{ l/s/km}^2$, Skuhrovský potok (Rybník) $2,87 \text{ l/s/km}^2$. Pozorování v souhrnu potvrzují výsledky hydrologického modelu, zároveň poskytují informace o plošné proměnlivosti odtoku podzemní vody z HGR.

Tab. 18 Shrnutí hydrologické bilance (1981-2010).

	P [mm]	R [mm]	RM [mm]	P - R [mm]	ET [mm]	RC [mm]	RC [l/s/km ²]

	P [mm]	R [mm]	RM [mm]	P - R [mm]	ET [mm]	RC [mm]	RC [l/s/km ²]
povodí Třebovka (Ústí nad Orlicí)	727,64	189,94	243,6	537,7	482,55	89,1	2,82
.HGR	763,72	NA	269,02	494,7	494,46	96,25	3,05

* nejsou k dispozici data pro celé období

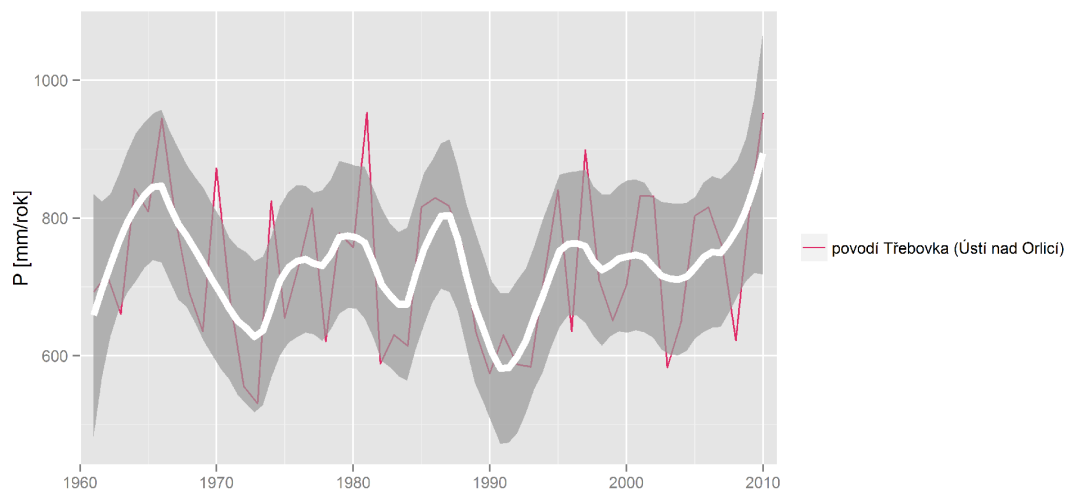
Tab. 19 Shrnutí hydrologické bilance (2001-2010).

	P [mm]	R [mm]	RM [mm]	P - R [mm]	ET [mm]	RC [mm]	RC [l/s/km ²]
povodí Třebovka (Ústí nad Orlicí)	765,54	181,63	253,36	583,91	505	93,2	2,95
.HGR	790	NA	276,96	513,04	511,18	100,17	3,17

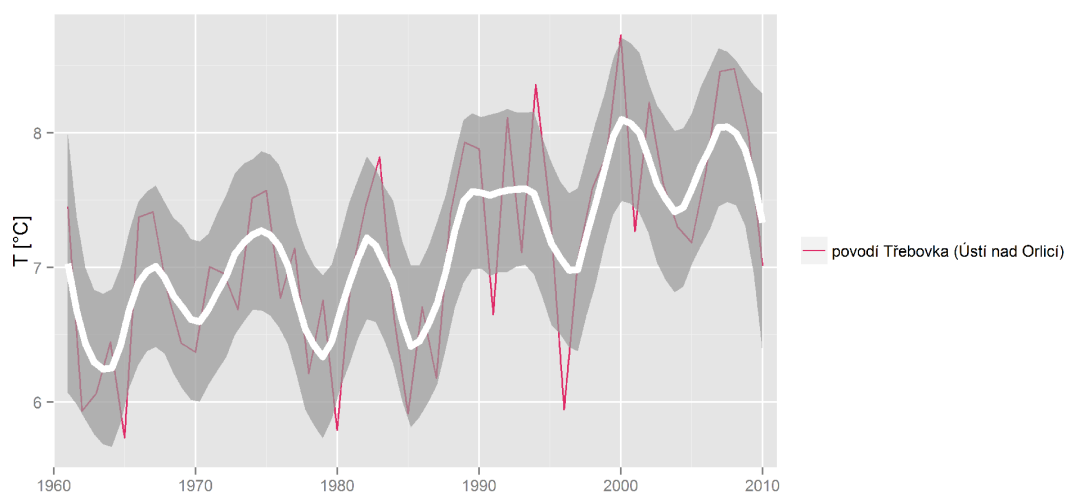
* nejsou k dispozici data pro celé období

6.3.6 Posouzení vývoje průměrných veličin hydrologické bilance

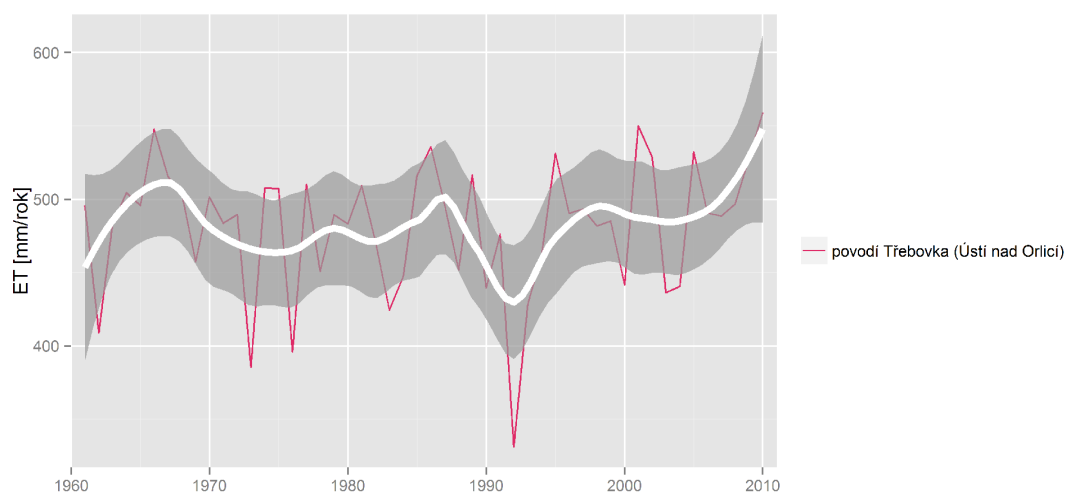
Na Obr. 42 až Obr. 47 jsou znázorněny průběhy ročních řad základních veličin hydrologické bilance za období 1961–2010 v jednotlivých dílčích povodích a částech HGR. Silnou čarou je vyznačen průměr vyhlazený lokální regresí (každý bod je stanoven na základě váženého lineárního modelu, váhy jsou kubickou funkcí převrácené hodnoty vzdálenosti), šedivý pás odpovídá 95% intervalu spolehlivosti odhadu průměru.



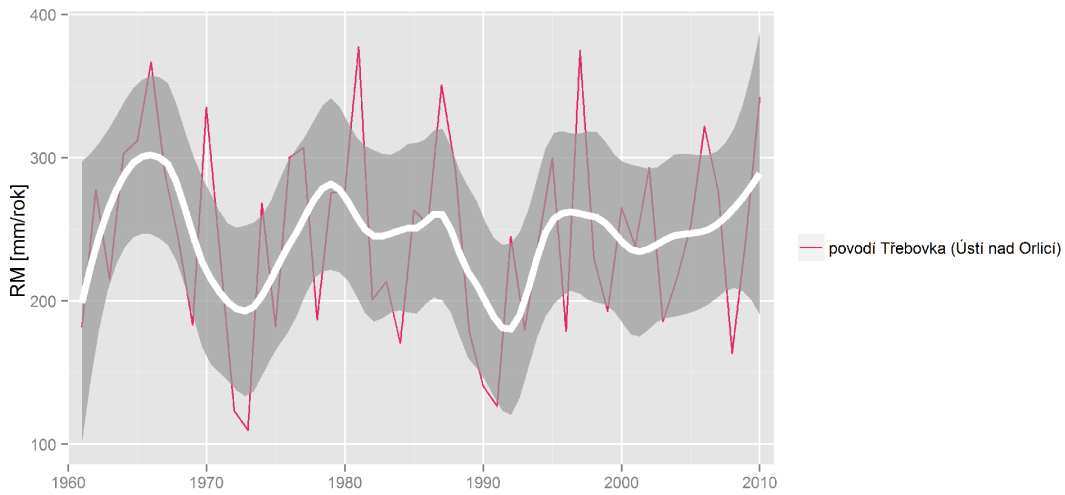
Obr. 42 Vývoj průměrných ročních srážek.



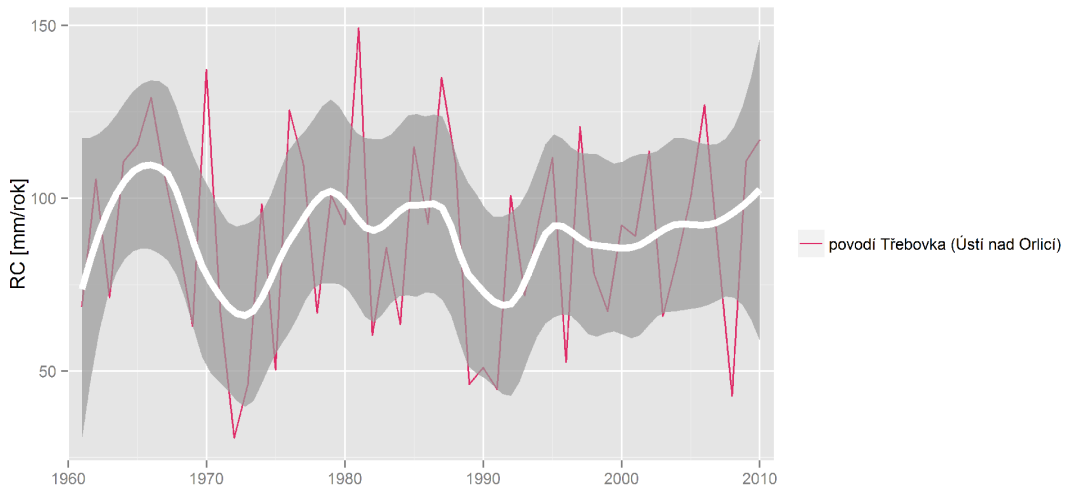
Obr. 43 Vývoj průměrné roční teploty.



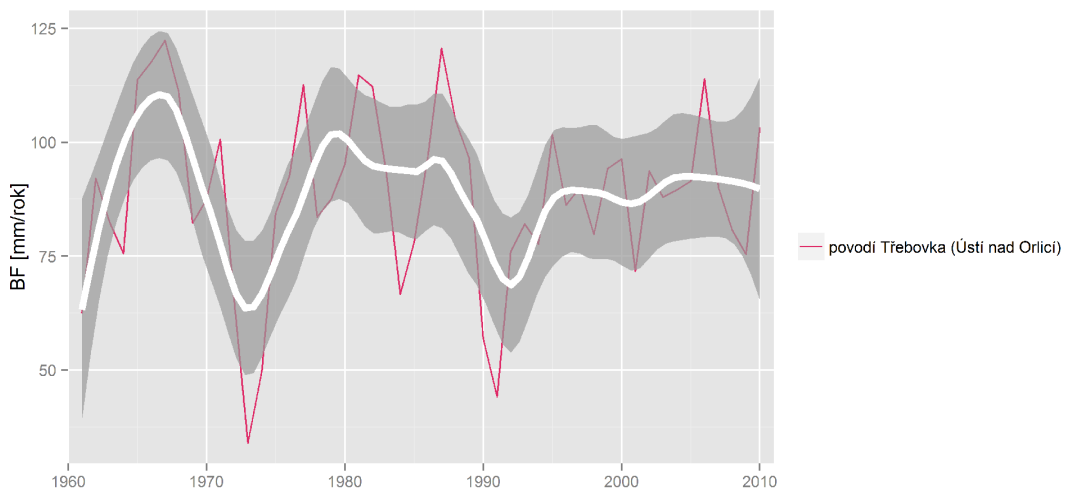
Obr. 44 Vývoj aktuální evapotranspirace (odhad z modelu Bilan).



Obr. 45 Vývoj průměrného ročního odtoku (odhad z modelu Bilan).



Obr. 46 Vývoj průměrné roční dotace zásob podzemní vody (odhad z modelu Bilan).



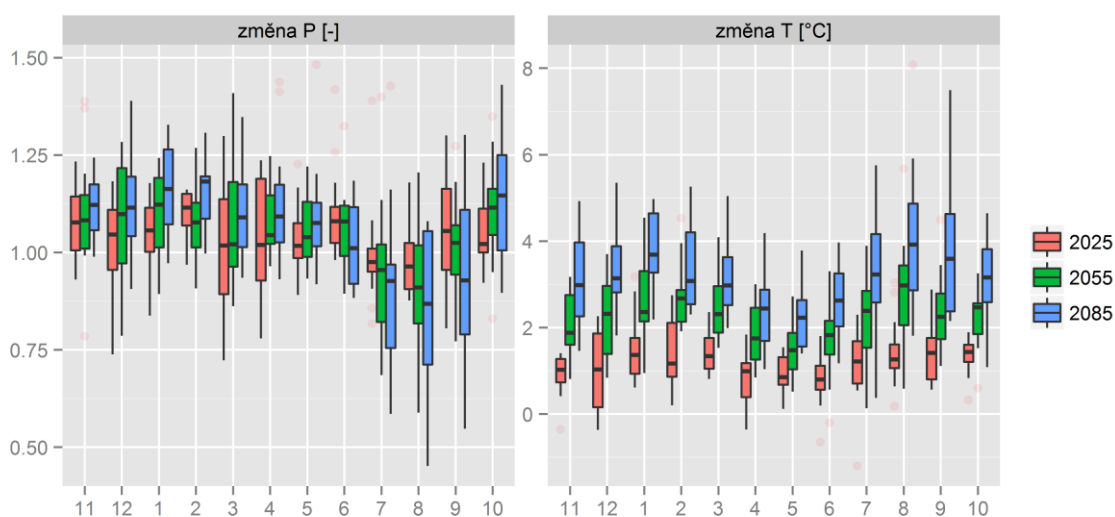
Obr. 47 Vývoj průměrného ročního základního odtoku (odhad z modelu Bilan).

6.3.7 Posouzení možných dopadů změn klimatu

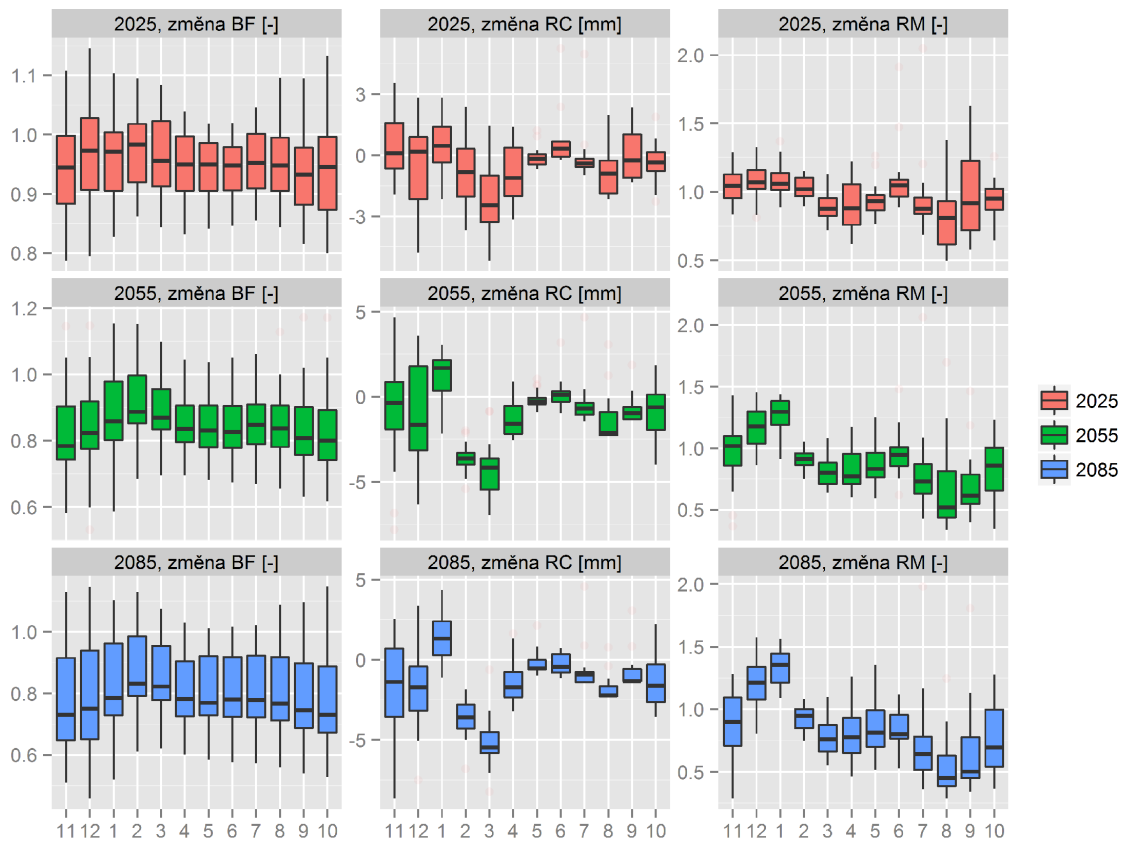
Posouzení možných dopadů klimatické změny bylo provedeno na základě simulací 15 regionálních klimatických modelů pro časové horizonty 2025 (2011-2040), 2055 (2041-2070) a 2085 (2071-2100). Vzhledem k dostupným datům jsou uvažovány změny oproti období 1961-1990, které je standardně uvažováno pro referenční klima ve studiích dopadů změn klimatu.

Uvažované změny srážek i teploty udává Obr. 48. Pro srážky předpokládají klimatické modely pokles v letních měsících (dle časového horizontu 5-25 %), po zbytek roku spíše růst. Teplota roste pro všechny tři časové horizonty po celý rok, v průměru cca o 1,5, 2,2 a 3,5 °C.

Dopady uvedených změn meteorologických veličin na základní odtok, dotaci podzemních vod a celkový odtok ukazuje Obr. 49. Z hlediska možných využití podzemních vod je podstatné, že zejména v časově vzdálenějších časových úrovních se základní odtok od května až do listopadu zmenšuje.



Obr. 48 Měsíční změny srážek (poměr) a teploty (rozdíl) dle RCM simulací pro jednotlivé měsíce. Krabicové grafy indikují 5%, 25%, 50%, 75% a 95% kvantil rozdělení měsíčních změn v souboru klimatických modelů.



Obr. 49 Měsíční změny základního odtoku [-], dotace zásob podzemní vody [mm] a odtoku dle RCM simulací pro jednotlivé měsíce. Krabicové grafy indikují 5%, 25%, 50%, 75% a 95% kvantil rozdělení měsíčních změn v souboru klimatických modelů.

6.4 Souhrn

Na základě modelování klimatické změny v rámci ČR je zřejmé, že změny v klimatickém systému, způsobené zvyšující se teplotou vzduchu a změnou rozložení srážek mají za následek významné změny v celé hydrologické bilanci, která je celistvá a propojená. Stejně tak se projevuje vysoká míra ohroženosti České republiky z hlediska nedostatku vody. Hlavním důvodem je to, že Česká republika jako „střecha Evropy“ je zcela závislá na srážkových úhrnech a jakýkoliv úbytek srážek má za následek deficit vody na našem území. Proto je postup klimatické změny na našem území velice závažným tématem.

Vzhledem ke zvyšujícímu se výparu, který není vyrovnán zvýšenými úhrny srážek, je ČR na základě výpočtu indexů určujících míru ohrožení nedostatkem vody velmi zranitelná. Nejvíce postižené oblasti jsou střední a jižní Morava a západní část Středočeského kraje. Nicméně na základě modelování výhledových časových horizontů, které předpokládají další zvyšování průměrné teploty, se tato míra ohrožení zvyšuje i v dalších oblastech země. V každém případě se míra ohroženosti dopady nedostatku vody nesnižuje. Negativní dopady klimatické změny byly detekovány i na 53 hydrogeologických rajonech, kde byla modelována

hydrologická bilance a lze také říci, že jedním z důsledků bude s nejvyšší pravděpodobností postupné zmenšování zásob podzemní vody.

7 Adaptační opatření

Způsob navrhování adaptačních opatření proti nedostatku vody způsobenému dopady klimatických změn je popsán nejprve na výsledcích případové studie pro Karlovarský kraj. Karlovarský kraj se dlouhodobě potýká s nedostatkem vodních zdrojů, proto byl v letech 2015-2018 řešen projekt Ministerstva zemědělství ČR (QJ1520318), který měl za cíl definovat deficitní oblasti z hlediska nedostatku vody na území kraje a navrhnout možná adaptační opatření pro boj s nimi. V rámci řešení projektu vznikla certifikovaná metodika pro navrhování adaptačních opatření na územích postižených zhoršenou dostupností vodních zdrojů (Beran a kol. 2019b), platná na pro celé území ČR. Popis procesu navrhování adaptačních opatření ve vodním sektoru je součástí této kapitoly.

7.1 Změny hydrologické bilance způsobené klimatickými změnami na území Karlovarského kraje

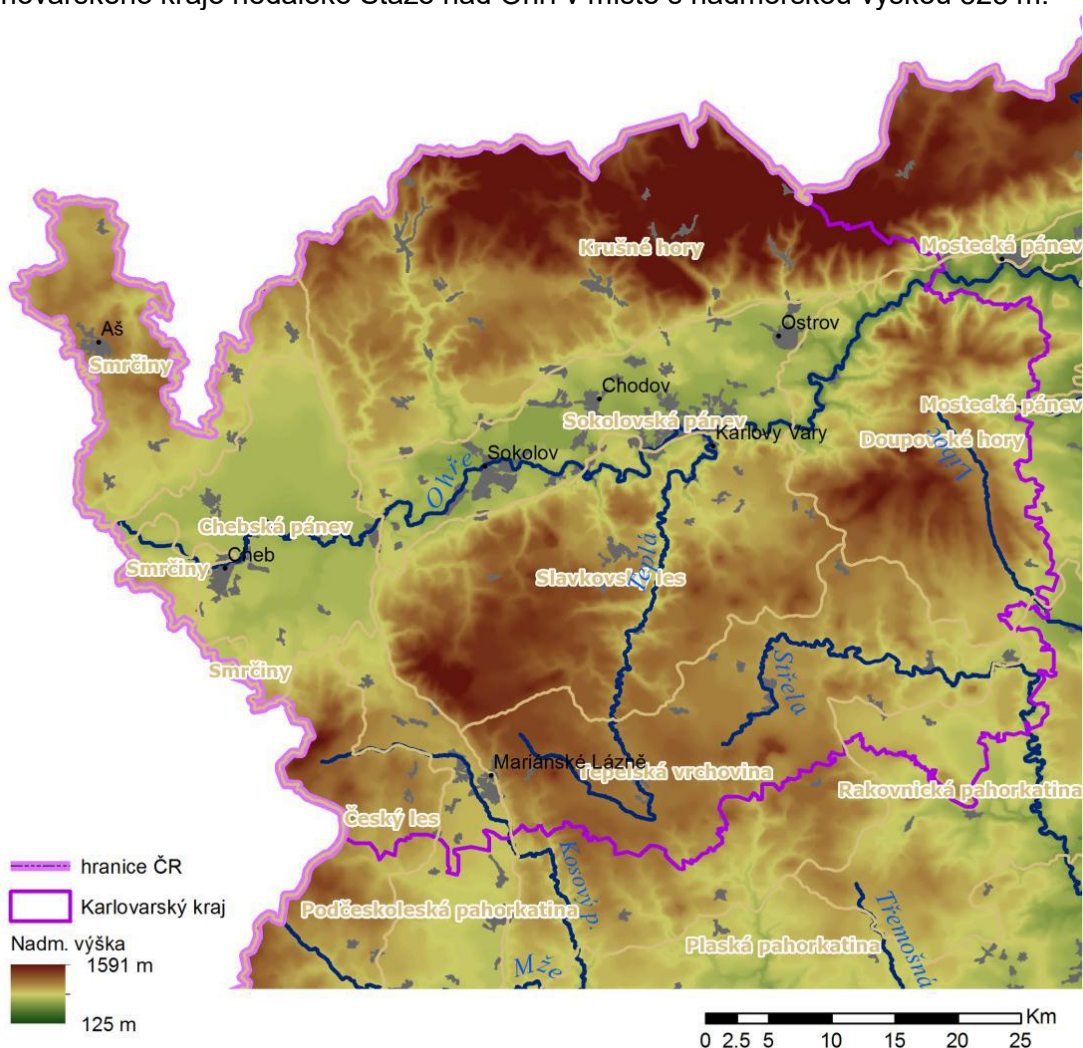
Detailní modelování hydrologické bilance a modelování změn jednotlivých členů bilance za pomoci scénářových dat k výhledovým časovým horizontům bylo provedeno v rámci projektu QJ1520318 „Zajištění dostupnosti vodních zdrojů ve vybraných oblastech Karlovarského kraje“ (program Komplexní udržitelné systémy Ministerstva Zemědělství), jehož byl autor v letech 2015 až 2018 hlavním řešitelem. Výsledky řešení projektu byly popsány ve člancích a zprávě Beran a kol. (2015), Beran a kol. (2016a), Beran a kol. (2016b), Beran a kol. (2018), Beran a kol. (2019a), Beran a kol. (2019c).

7.1.1 Zájmové území - Karlovarský kraj

Geomorfologie

Z hlediska geomorfologie náleží území Karlovarského kraje k provincii České vysočiny. Většina území náleží subprovincii Krušnohorská soustava, na jihozápadě v povodí Kosového potoka zabíhá soustava Šumavská, jihovýchodní cíp v povodí Střely náleží do Poberounské soustavy. Severní část je tvořena Krušnohorskou hornatinou, která se dále člení na geomorfologické celky Smrčiny a Krušné hory s nejvyšším vrcholem Karlovarského kraje Klínovcem s nadmořskou výškou 1244 m n. m. Ve Smrčinách na území Bavorska pramení řeka Ohře, která je levostranným přítokem Labe. V Krušných horách pramení levostranné přítoky Ohře - Libocký potok, Svatava, Chodovecký potok, Rolava, Vitický potok, Bystřice a další menší vodní toky. Vlastní niva Ohře náleží do Podkrušnohorské oblasti k celkům Chebské pánve a Sokolovské pánve. Na východě náleží k Podkrušnohorské oblasti Doupovské hory s nejvyšším vrcholem Hradiště o nadmořské výšce 934 m. Jižní část Karlovarského kraje náleží k Českoleské oblasti, kde pramení Kosový potok (Český les a Podčeskoleská pahorkatina) a Karlovarské vrchoviny, do které spadají geomorfologické celky Slavkovský les a Tepelská vrchovina. Nejvyšším vrcholem Karlovarské vrchoviny (Slavkovského lesa) je Lesný o nadmořské výšce 983 m. V Tepelské vrchovině pramení Teplá – pravostranný přítok Ohře a Střela – levostranný přítok Berounky. Mapa na Obr. 50

zachycuje zastoupení geomorfologických celků v zájmovém území. Ohře opouští území Karlovarského kraje nedaleko Stáže nad Ohří v místě s nadmořskou výškou 325 m.



Obr. 50 Geomorfologické celky na území Karlovarského kraje

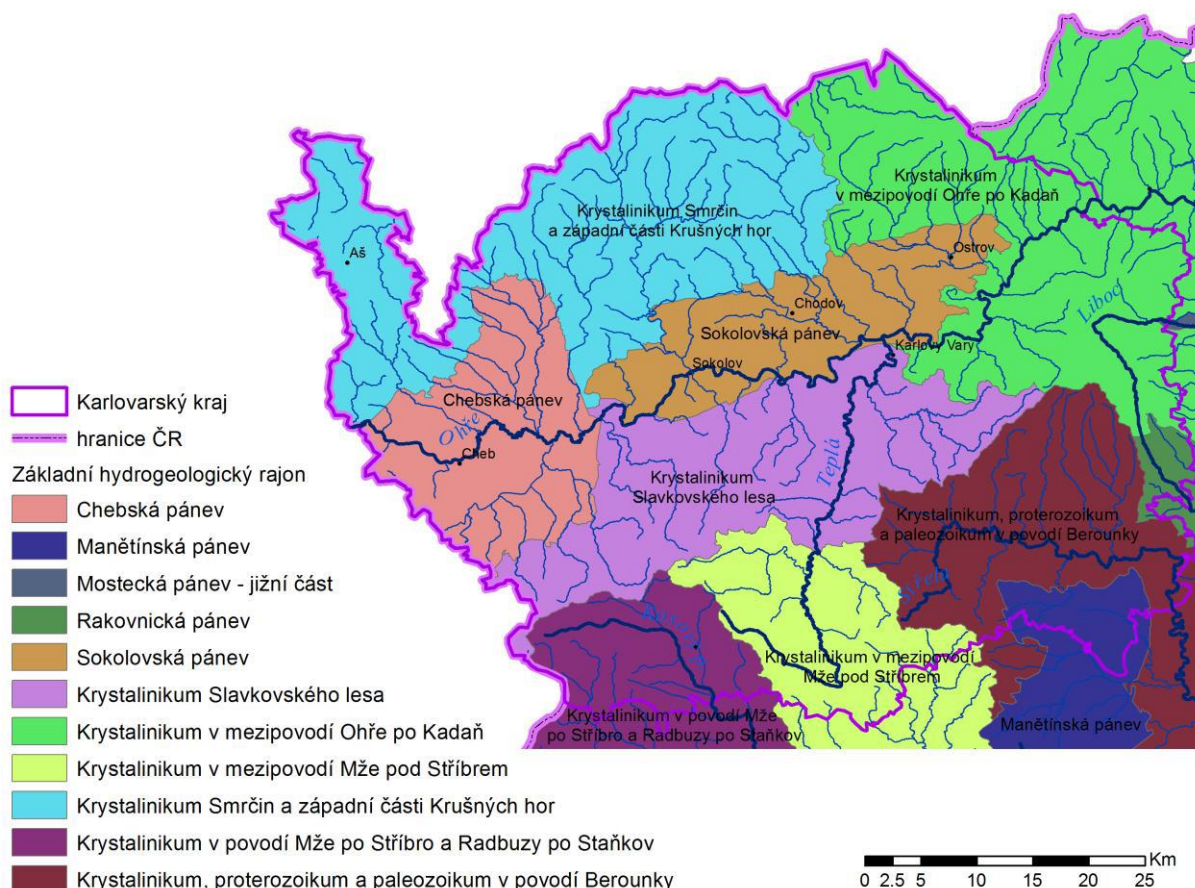
Hydrogeologické poměry

Geologické podloží Karlovarského kraje tvoří jak horniny metamorfované (krušnohorské, smrčinské, svatavské, chebsko-dyleňské, slavkovské a tepelské krystalinikum, Vogtlandsko-saské paleozoikum, apod.), tak plutonické (karlovarsko-nejdecko-eibenstocký masiv, smrčinský masiv, západočeské bazické magmatity, apod.), vulkanické (zejména neovulkanity Doupovských hor a roztroušené třetihorní vulkanity) a sedimentární (zejména třetihorní sedimenty chebské a sokolovské pánve, kvartérní sedimenty) (Mísař a kol., 1983).

Z hydrogeologického hlediska leží území v hydrogeologických rajónech krystalinika (zejména 6111 – Krystalinikum Smrčin a západní části Krušných hor, 6112 – Krystalinikum Slavkovského lesa, 6120 – Krystalinikum v mezipodí Ohře po Kadaň), a rajónech sedimentů (2110 – Chebská pánev, 2120 – Sokolovská pánev a rajon svrchní vrstvy 1190 – Kvartér a neogén oravské části Chebské pánve) (Olmer a kol., 2006). Mapa základních hydrogeologických rajónů je na Obr. 51. Ve většině zájmového území, které budují horniny krystalinika, je z hydrogeologického hlediska dominantní mělká zvedeň v kvartérních sedimentech a pásnu přípovrchového rozpojení puklin skalních hornin. Významnější jsou zdroje podzemních vod terciérních pánví a větších akumulací kvartérních fluvialních sedimentů (Kolářová a Hrkal, 1986). Velkou hydrogeologickou zajímavostí kraje jsou

minerální a proplyněné vody hlubšího oběhu, které jsou často vázány na tektonické struktury, velmi významné jsou v tomto směru oblasti Karlových Varů, Františkových a Mariánských Lázní a další (např. Kolářová a Myslíl, 1979).

Části zájmového kraje byly a jsou z hydrogeologického hlediska ovlivněny antropogenní činností, a to zejména těžbou nerostných surovin. Ovlivnění se týká jak oblasti krystalinika (zejména rudní ložiska jako například okolí Jáchymova, Horního Slavkova a další



Obr. 51 Základní hydrogeologické rajóny na území Karlovarského kraje

Klimatické a hydrologické podmínky

Karlovarský kraj má rozlohu 3 314 km². V severní části kraje leží Krušné hory s nejvyšší horou Klínovec (1 244 m n. m.). Páteřní řeka Ohře rozděluje kraj přibližně v polovině a odděluje Krušné hory na severu od Slavkovského lesa (Lesný, 983 m n. m.) na jihozápadě a Doupovských hor (Hradiště, 934 m n. m.) na jihovýchodě. Slavkovský les a Doupovské hory jsou od sebe oddělené největším přítokem Ohře řekou Teplou. Mezi další významné přítoky Ohře patří Rolava, Svatava, Libocký potok, Odrava a Bystřice.

7.1.2 Zájmové území

Plocha Karlovarského kraje byla pro účely hydrologického modelování rozdělena na 11 dílčích povodí o podobné rozloze, přehled se základními identifikačními údaji je uveden v Tab. 20. Pro analýzu současného stavu hydrologické bilance a pro kalibraci hydrologického modelu Bilan byla zvolena časová řada 1961–2010. K dispozici byly řady teplot, srážek a odtoku. V případech, kdy nebyly k dispozici hodnoty odtoku přímo pro vybraný uzávěrový profil, byly hodnoty dopočítány odečtením mezipovodí (uvedeno v Tab. 20 – sloupec výpočet odtoku). Pro modelování hydrologické bilance byl použit hydrologický model Bilan, jehož podrobný popis je uveden dále ve zprávě.

Tab. 20 Dílčí povodí na území Karlovarského kraje (DBČ – databázové číslo, ČHP – číslo hydrologického pořadí)

Dílčí povodí	DBČ uzávěrové vodom. stanice	ČHP	plocha povodí [km ²]	výpočet odtoku
Ohře Cheb	206000	1-13-01-0140	690	-
Odrava Jesenice	206500	1-13-01-0662	412	-
Ohře Citice	207300	1-13-01-0910	678	207300-206000-206500
Teplá Březová	212000	1-13-02-0212	309	-
Ohře Karlovy Vary	214000	1-13-02-0340	821	214000-212000-207300
Ohře Žatec most	216000	1-13-03-0280	1 172	216000-214000
Mže Stříbro	174000	1-10-01-1280	1 144	-
Střela Čichořice	189000	1-11-02-0330	393	-
Mže Hracholusky	176100	1-10-01-1742	465	176100-174000
Střela Plasy	190000	1-11-02-0690	388	190000-189000
Blšanka Holedeč	217000	1-13-03-0830	374	-

7.1.3 Výsledky hydrologického modelování

Pozorované období

Vzhledem k dostatečně dlouhým pozorovaným časovým řadám 1961–2010, byly spočítány průměrné hodnoty jednotlivých členů hydrologické bilance pro časové horizonty 1961–1990 a 1981–2010. V klimatologii jsou jako standardní uvažována třicetiletá období, často je pro kontrolní klima voleno období 1961–1990. Změny udávají pozorované změny hydrologické bilance. Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 21. Změny v těchto pozorovaných obdobích nejsou většinou významné, nicméně jsou již viditelné. Za zmínku stojí změna celkové průměrné teploty o přibližně 0,5 °C. Při bližším pohledu na výsledky je vidět největší oteplení v zimních měsících. S tímto souvisí zvýšený územní výpar během těchto měsíců. Vlivem popsanych změn se během jarního tání vsákne do podzemních zásob menší množství vod (vyšší výpar a povrchový odtok), které by měly dotovat povrchové toky během letních suchých období.

Průměrné roční srážkové úhrny se v období 1961–1990 pohybovaly v rozsahu 600–800 mm v povodí Ohře, v povodí Mže průměr nepřesahoval 650 mm, v povodí Střely 600 mm a v povodí Blšanky méně než 500 mm. V období 1981–2010 byl zaznamenán nárůst srážek v rozsahu 3–10 %. Nejvyšší srážkové úhrny jsou dosahovány především v horských oblastech Krušných hor a Smrčin (část Krušnohorské pahorkatiny) na severu a severozápadě území. Na jihovýchodním okraji území se již naopak na srážkovém úhrnu projevuje srážkový stín Krušných hor.

Na velikosti celkového odtoku se na území Karlovarského kraje významně projevuje vliv orografie. Odtoková výška v západní a severní části území přesahuje 300 mm ročně (povodí Ohře po Cheb, Ohře po Karlovy Vary). V povodí Teplé činil průměr přibližně 250 mm. V dolní části kraje v povodí Střely a v povodí Blšanky klesá průměrná odtoková výška díky vyšší teplotě vzduchu až pod 100 mm ročně.

Tab. 21 Základní klimatické a hydrologické charakteristiky dílčích povodí Karlovarského kraje; drobné rozdíly mezi srážkami a součtem územního výparu s celkovým odtokem jsou způsobeny změnou zásob podzemní vody

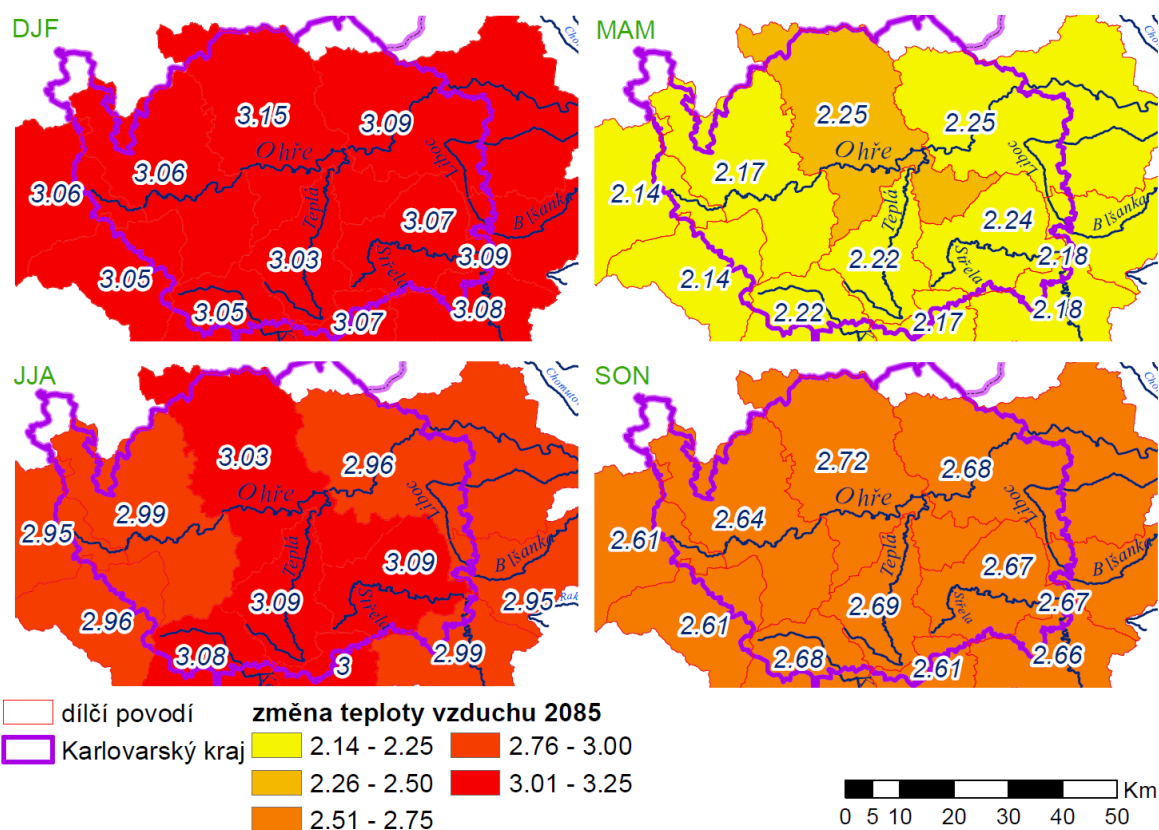
Dílčí povodí	Teplota vzduchu [°C]		Srážky [mm/rok]		Pot. evapotranspirace [mm/rok]		Územní výpar [mm/rok]		Celkový odtok [mm/rok]	
	1961–1990	1981–2010	1961–1990	1981–2010	1961–1990	1981–2010	1961–1990	1981–2010	1961–1990	1981–2010
Ohře Cheb	6,6	7,1	795	833	529	552	474	501	319	328
Odrava Jesenice	6,5	7,1	706	741	526	549	491	514	214	224
Ohře Citice	6,5	7,1	687	734	527	549	446	467	241	264
Teplá Březová	5,8	6,2	690	751	501	518	473	493	217	255

Ohře Karlovy Vary	6,1	6,6	742	822	509	531	436	460	305	359
Ohře Žatec most	6,9	7,5	614	656	542	566	475	494	140	159
Mže Stříbro	6,7	7,2	642	682	536	556	445	462	197	217
Střela Čichořice	6,2	6,7	601	619	518	538	441	454	161	164
Mže Hracholusky	6,7	7,2	560	590	534	556	445	464	115	125
Střela Plasy	6,9	7,5	528	546	543	567	458	477	72	66
Blšanka Holedeč	7,6	8,2	495	515	569	594	445	465	52	49

Budoucí změny v hydrologické bilanci

Teplota

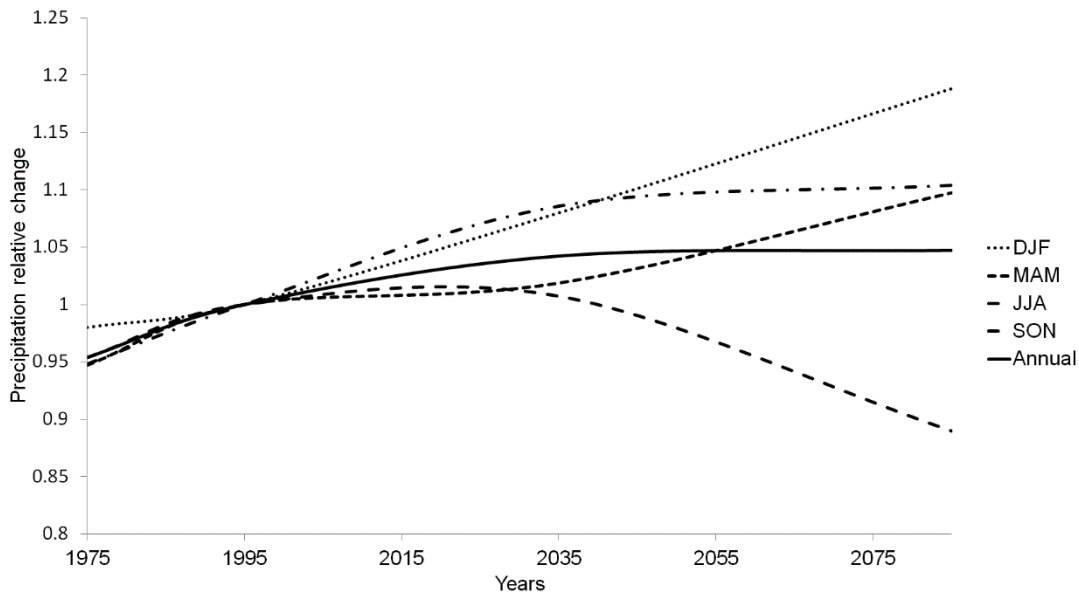
Podle modelování hydrologické bilance na základě dat ze simulací regionálních klimatických modelů se na území Karlovarského kraje zvýší průměrná teplota vzduchu v budoucím časovém horizontu 2021–2050 o přibližně 1 °C vzhledem k současnému měřenému průměru 1981–2010. Nejvíce se bude oteplovat v zimních měsících (o 1,2 °C), nejméně pak v jarních měsících (o 0,8 °C). Ve vzdálenějším časovém horizontu 2071–2099 ukazují modely zvýšení průměrné teploty o přibližně 2,7 °C vůči současnému období. Největší oteplení vykazují zimní (o 3,1 °C) a letní měsíce (o 3 °C). V podzimních měsících je nárůst průměrně o 2,7 °C, v jarních měsících je nárůst nejmenší o 2,2 °C. Změny průměrné teploty k časovému období 2071–2099 jsou znázorněny na Obr. 52.



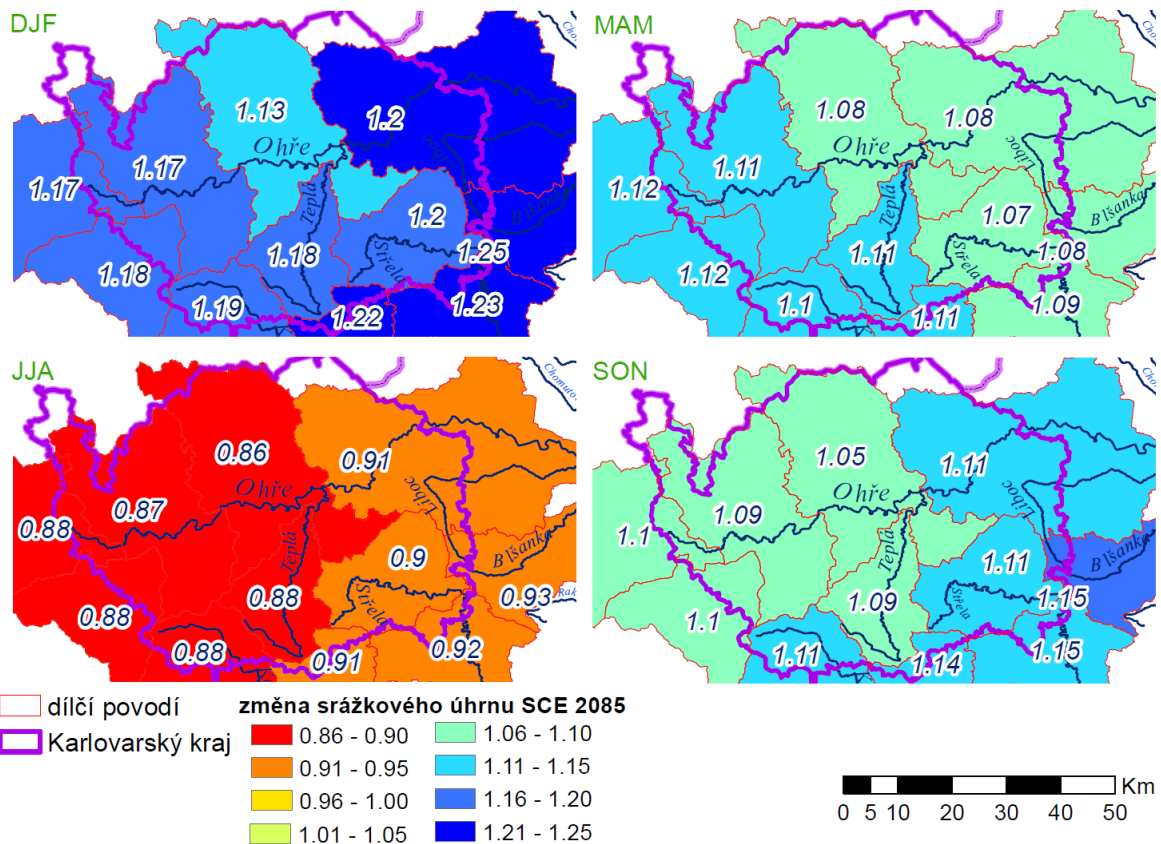
Obr. 52 Absolutní změny průměrné teploty vzduchu v časovém období 2071–2099 od současnosti 1981–2010; DJF – prosinec, leden, únor, MAM – březen, duben, květen, JJA – červen, červenec, srpen, SON – září, říjen, listopad

Srážky

Změny v průměrném ročním srážkovém úhrnu nejsou významné ani pro jeden budoucí časový horizont, v obou případech je změna do + 7 %. Pro dřívější časový horizont 2021–2050 vychází jarní a letní měsíce téměř beze změny, zimní a podzimní měsíce vykazují nárůst od 6 do 11 % vzhledem k časovému horizontu 1981–2010. Pro vzdálenější modelové období 2071–2099 je typický vyšší nárůst průměrných srážek během zimních měsíců (13–25 %), který vyvažuje pokles během letních měsíců (7–14 %). Změny průměrné srážky ve vzdálenějším časovém horizontu jsou znázorněny na Obr. 53 a detailněji na Obr. 54.



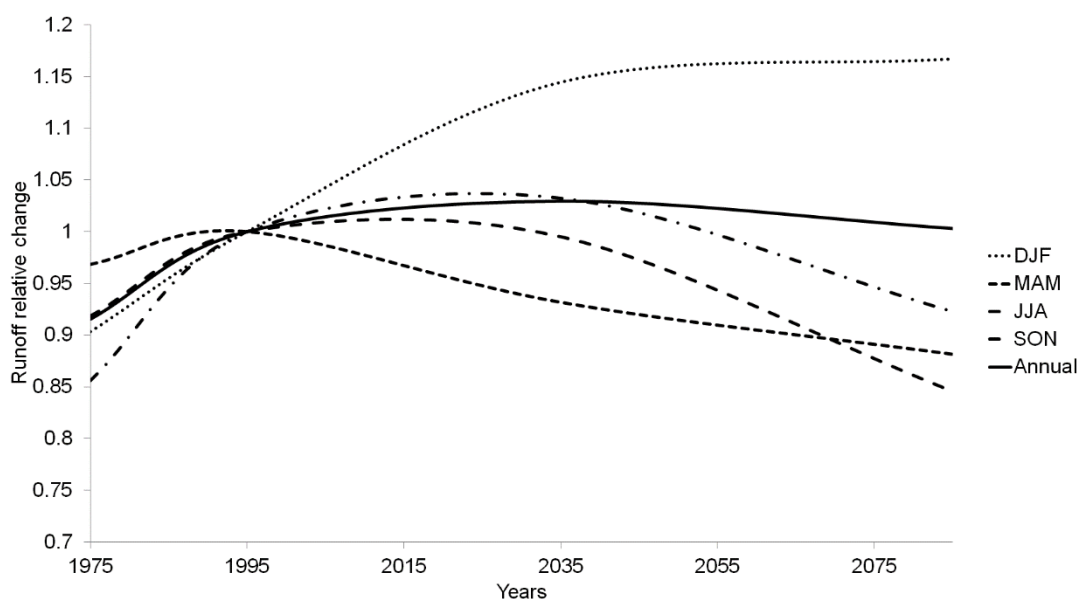
Obr. 53 Průměrná relativní změna srážek (průměr z 15 scénářů klimatické změny pro všechna zájmová povodí). Pozorované časové horizonty 1961-1990 a 1981-2010, změny k modelovaným výhledovým horizontům 2021-2050 a 2071-2100. (DJF – prosinec, leden, únor, MAM – březen, duben, květen, JJA – červen, červenec, srpen, SON – září, říjen, listopad). (Beran a kol., 2019a)



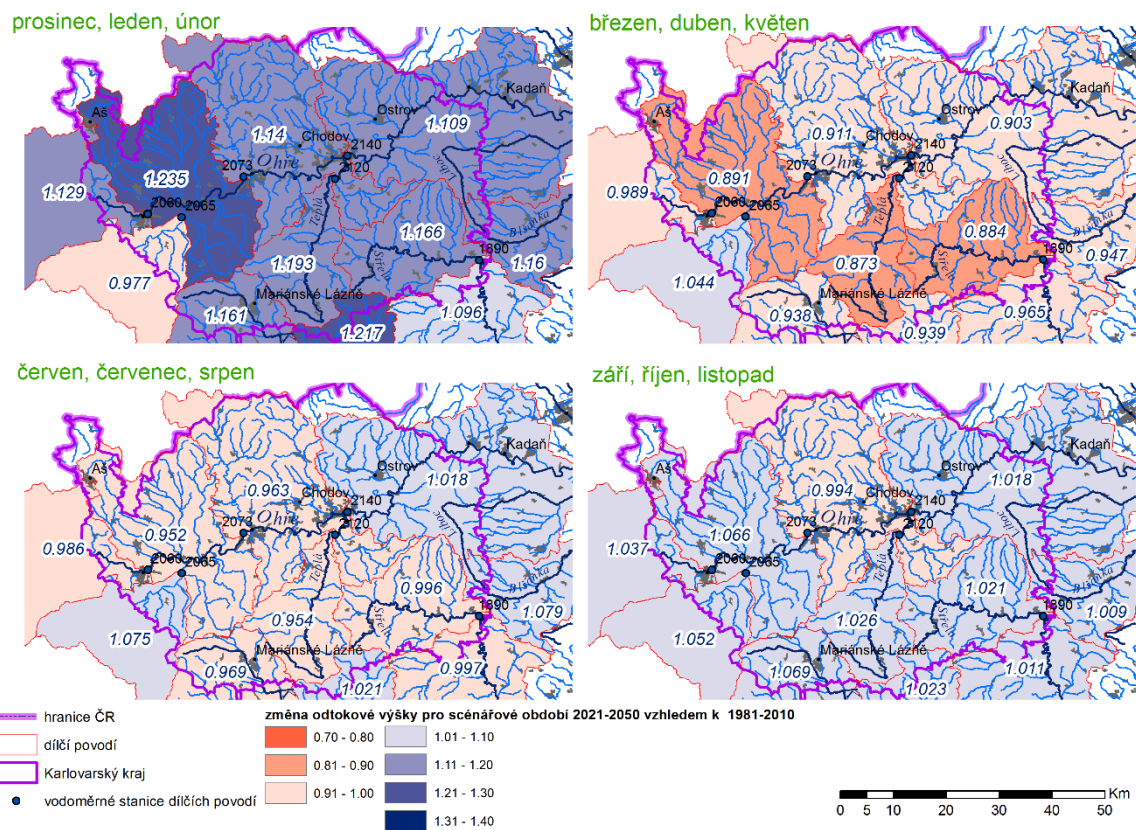
Obr. 54. Relativní změny průměrných srážkových úhrnů v časovém období 2071–2099 od současnosti 1981–2010; DJF – prosinec, leden, únor, MAM – březen, duben, květen, JJA – červen, červenec, srpen, SON – září, říjen, listopad

Odtoková výška

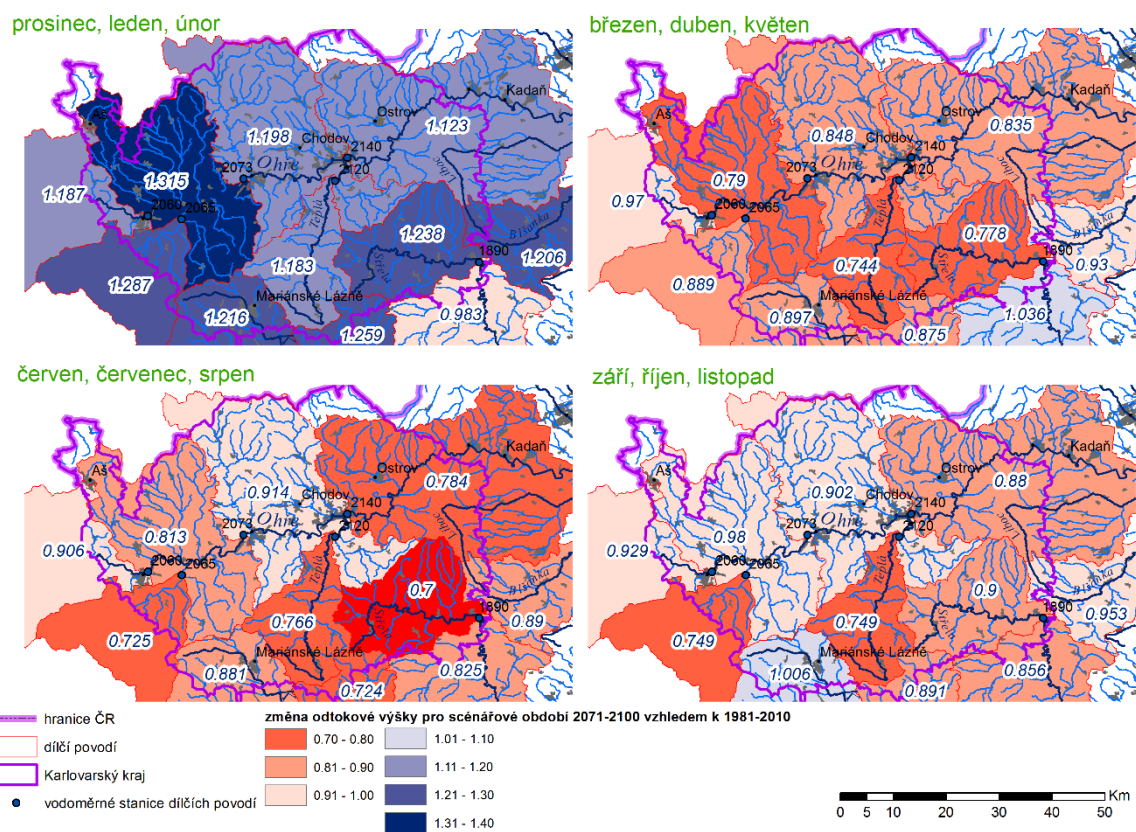
Průměrná roční odtoková výška se v časových horizontech 2021–2050 a 2071–2099 téměř nezmění (Obr. 55), průměrné změny jsou do 5 %. Pro sezonní změny je typické zvýšení odtokové výšky během zimních měsíců, pro bližší období 2021–2050 do 24 %, pro vzdálenější časový horizont do 32 %. V ostatních měsících v tomto období dochází k významnému snížení odtokové výšky, během letních měsíců až o 30 %. Změny odtokové výšky v budoucím časovém horizontu jsou znázorněny na Obr. 56 a Obr. 57. Pro změny základního odtoku na povodí je typický významný úbytek během letních a také podzimních měsíců.



Obr. 55 Průměrná relativní změna odtokové výšky (průměr z 15 scénářů klimatické změny pro všechna zájmová povodí). Pozorované časové horizonty 1961-1990 a 1981-2010, změny k modelovaným výhledovým horizontům 2021-2050 a 2071-2100. (DJF – prosinec, leden, únor, MAM – březen, duben, květen, JJA – červen, červenec, srpen, SON – září, říjen, listopad) . (Beran a kol., 2019a)



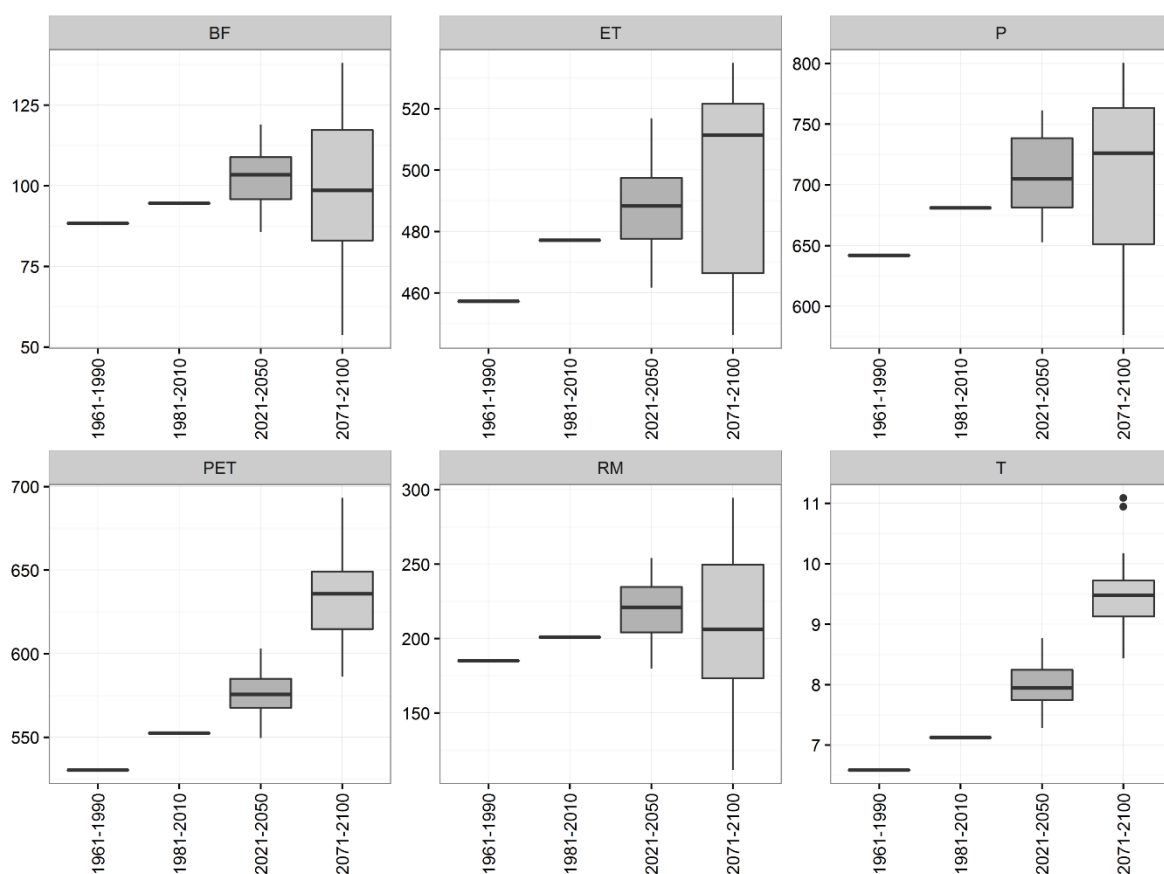
Obr. 56. Změna odtokové výšky pro výhledové období 2021-2050 vzhledem k pozorovanému období 1981-2010.



Obr. 57 Změna odtokové výšky pro výhledové období 2071-2100 vzhledem

k pozorovanému období 1981-2010.

Na Obr. 58 je vidět variabilita jednotlivých členů hydrologické bilance při použití různých simulací regionálních klimatických modelů. Pro každou proměnnou je v prvních dvou boxplotech uvedeno pozorované období a v druhých dvou pak rozptyl simulací různých regionálních klimatických modelů pro výhledové časové horizonty. Variability klimatických modelů je nejmenší u teploty vzduchu a potenciální evapotranspirace s rozptylem menším než 2 °C resp. 100 mm. Pro ostatní proměnné je rozptyl větší. Nejistota v modelovaných srážkách (odtokové výšce) v rámci 15 regionálních klimatických modelech je 7% (20%) v časovém horizontu 2021-2050 a do 20% (50%) v horizontu 2071-2100. Pro vzdálenější časové horizonty jsou nejistoty hydrologického modelování logicky vyšší.



Obr. 58 Průměrná roční suma základního odtoku (BF [mm]), srážek (P [mm]), odtokové výšky (RM [mm]), aktuální (ET [mm]), a potenciální evapotranspirace (PET [mm]), a roční průměrné teploty vzduchu (T [°C]) ze všech zájmových povodí pro 15 klimatických modelů. Pozorované časové horizonty 1961-1990 a 1981-2010, změny k modelovaným výhledovým horizontům 2021-2050 a 2071-2100. (Beran a kol., 2019a)

Na základě modelování změn hydrologické bilance se potvrdilo, že postup klimatické změny se Karlovarskému kraji v žádném případě nevyhýbá. Charakter probíhajících a modelovaných změn hydrologické bilance v Karlovarském kraji je srovnatelný se změnami probíhajícími v měřítku celé České republiky. Vliv vyšších teplot vzduchu v průběhu celého roku spolu se zvýšenými srážkovými úhrny během zimy zvyšuje odtokové výšky vodních

toků a zároveň zvyšuje územní výpar během tohoto období. To má za následek nedostatečnou akumulaci vody ve sněhové pokrývce, která by se během postupného jarního tání vsakovala do kolektorů podzemních vod. Dostatečné zásoby podzemních vod jsou důležité pro dotování povrchových toků základním odtokem během přelomu léta a podzimu (srpen, září), kdy je méně srážek. V případě delších bezdeštných období, jako tomu bylo například v roce 2015, se dostupnost vodních zdrojů o to zhoršuje.

7.2 Možná adaptační opatření na území Karlovarského kraje

Při vyhodnocení dostupnosti vodních zdrojů pro potřeby jejich užívání (zejména odběry vody) byly využity metody hydrologické bilance a vodohospodářské bilance popsané v kapitole Metodika dizertační práce. Metody vychází z metodického postupu Vyskoč, Zeman (2008), výsledky pro Karlovarský kraj pak ze zprávy k projektu QJ1520318 Beran, Vyskoč a kol. (2019). Autor dizertační práce se nezabýval přímo modelováním možností vodohospodářské bilance, pouze přípravou vstupních hydrologických dat pro chod modelu, kapitola je uvedena pro doplnění kontextu řešené problematiky Karlovarského kraje.

7.2.1 Modelování potřeb a zdrojů vodohospodářské soustavy

Postup lze rámcově rozdělit do souběžných či navazujících kroků. Pomocí metod hydrologické bilance byly vytvořeny (modelovány) časové řady přirozených průtoků (v měsíčním kroku). Řady reprezentují přirozené hydrologické podmínky. Souběžně lze analyzovat požadavky na užívání vodních zdrojů: zejména požadavky na odběry povrchové i podzemní vody, ale také zpětná vypouštění do povrchových vod a případně další požadavky týkající se např. rekreace, plavby, chovu ryb apod. Identifikovány jsou rovněž požadavky na minimální průtoky, parametry vodních nádrží a převodů vody, umožňující regulaci průtoku z hlediska plnění zásobní funkce. V navazujícím kroku potom výše uvedené údaje vstupují do vodohospodářské bilance, posuzující kapacitu vodních zdrojů a požadavků na jejich využívání. Aplikovány jsou nástroje simulačního modelování (simulační model zásobní funkce vodohospodářské soustavy). Podle vyhodnocení výsledků simulace je vyhodnocena zabezpečení požadavků na užívání a následně identifikovány problémové lokality (lokality s nízkou zabezpečeností a tudíž vyšším rizikem nedostatku vody v období sucha). V problémových lokalitách jsou navržena možná opatření (úpravy manipulačních pravidel na vodních dílech, úpravy požadavků na užívání vod, zvýšení akumulárního potenciálu povodí apod.) a stejným postupem (s pozměněnými vstupními údaji) potom vyhodnocen možný efekt těchto opatření.

Pro modelování scénářových dat hydrologické bilance byly využity tyto zdroje informací:

- regionální klimatické modely z projektu ENSEMBLES (rozlišení 25 km x 25 km, emisní scénář SRES A1B, projekt ukončen roku 2009). Tyto scénáře byly založeny na 15 simulacích regionálních klimatických modelů (RCM), které jsou výstupem projektu ENSEMBLES. Součástí tohoto souboru modelů jsou i referenční scénáře změny klimatu, které byly identifikovány v rámci projektu TA02020320 Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu. Tyto scénáře jsou dále označovány jako rScen1, rScen2 a rScen3.

Jako kontrolní období bylo uvažováno období 1981-2010, scénáře byly odvozeny pro období 2021-2040, 2041-2060, 2081-2100. Tato období byla zvolena zejména za účelem zajištění konzistence se scénáři Ústavu pro výzkum globální změny AV ČR, které jsou hojně využívány.

Pro tvorbu scénářů byla využita přírůstková metoda. Podstatou metody je, že se ze simulace klimatického modelu odvodí změny měsíčních průměrů srážek a teploty mezi požadovanými obdobími (např. 2081-2100 a 1981-2010) – tzv. přírůstkové faktory – a těmito přírůstkovými faktory se upraví pozorovaná řada. Srážky jsou transformovány multiplikativně, teplota aditivně. Tedy například klimatický model simuluje pro kontrolní období lednové srážky 80 mm a lednové srážky pro období 2081-2100 160 mm, tj. přírůstkový faktor $dP(\text{leden}) = 2$. Scénář lednových srážek se pak vytvoří tak, že všechny lednové srážky se násobí $dP(\text{leden})$, tedy dvěma atp. Tato metoda tvorby scénářů je relativně robustní. Pro simulaci velmi dlouhých řad a hodnocení dlouhodobé variability je někdy doporučována tvorba scénářů klimatické změny pokročilými metodami zachovávajícími i změny v delších časových měřítcích. Rozdíly nicméně často nejsou příliš významné.

Model Bilan byl nakalibrován pro oba profily. Scénářové řady pak byly vytvořeny tak, že kalibrováný model byl použit pro simulaci scénářových vstupů.

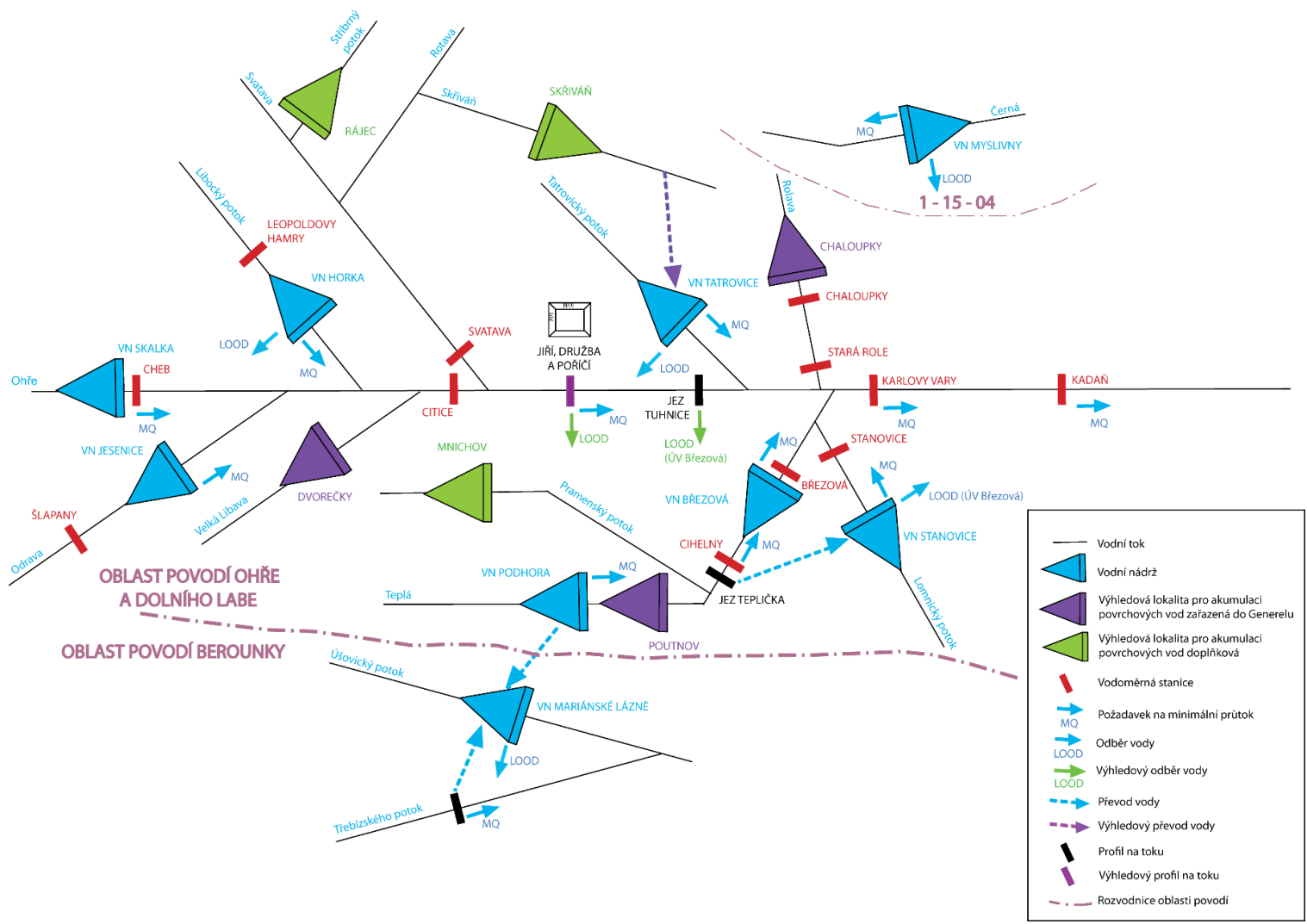
Pro potřeby našeho projektu byly vybrány 3 scénáře: (popis v Hanel a kol, 2015)

- REMO_EH5 (rScen3)
- CLM_Q0 (rScen2)
- ALADIN-CLIMATE/CZ (rScen1)

Výstupní časové řady vodohospodářské simulace jsou dále statisticky vyhodnoceny (pravděpodobnosti zabezpečení požadavků na užívání vody či minimálních ekologických průtoků, pravděpodobnostní pole překročení hladin ve vodních nádržích, čáry překročení přirozených a ovlivněných měsíčních průtoků apod.). Kritéria pro hodnocení zabezpečení požadavků na užívání vody a zachování minimálních průtoků vycházejí z ČSN 75 2405.

7.2.2 Vymezení vodohospodářské soustavy a možné návrhy opatření

Mezi (kontrolní) profily vodohospodářské soustavy v zájmové oblasti byly zařazeny profily, které jsou rozhodující z hlediska simulace její zásobní funkce a posouzení zabezpečení požadavků na užívání vody a zachování minimálních průtoků, a to jak pro posouzení současného, tak výhledového stavu, včetně zvažovaných opatření ke snížení rizika nedostatku vody. Jedná se o 8 profilů (hrází) vodních nádrží, 6 výhledových lokalit pro akumulaci povrchových vod, 3 profily odběrů do převodu vody, 2 místa výhledových odběrů vody (zatápění jámy po těžbě Jirí-Družba a Poříčí a nové odběrné místo pro ÚV Březová v profilu jezu Tuhnice na Ohři) a 6 profilů vodoměrných stanic. Schéma vodohospodářské soustavy je uvedeno na Obr. 59.



Obr. 59 Schéma vodohospodářské soustavy Karlovarského kraje (Beran a kol., 2019c)

Detailní popis stanovení a modelování vodohospodářské bilance je k dispozici u autora dizertační práce v závěrečné zprávě k projektu QJ1520318. Níže jsou stručně popsány nejhlavnější výstupy spojené s adaptačními opatřeními.

Simulované zabezpečení požadavků na odběry vody z vodních nádrží a minimální průtoky pod vodními nádržemi určené podle manipulačních řádů byly porovnány s hodnotami zabezpečení podle trvání doporučenými ČSN 75 2405. Jako nejproblémovější lokalita ve vodohospodářském systému Karlovarského kraje byla identifikována vodní nádrž Stanovice, jež funguje ve vodárenské soustavě s přilehlou vodní nádrží Březová na řece Teplé. Stanovice v modelování vodohospodářské bilance vykazují problémy se zabezpečením požadavků na odběry vody (ÚV Březová), stejně tak nesplňují zabezpečení požadavků na minimální průtoky podle manipulačních řádů. Jako dostačující řešení pro nápravu byly vyhodnoceny 2 návrhy adaptačních opatření. Prvním z nich je odběr vody do ÚV Březová z profilu jezu Tuhnice na Ohři, případně za předpokladu propojení vodovodních systémů využít volné kapacity nádrže Horka.

Pro vodárenskou soustavu Stanovice-Teplá se jeví jako nedostatečné opatření využít stávajícího převodu vody z profilu Teplička na Teplé do vodní nádrže Stanovice, tento odběr nedokáže pokrýt potřeby obou vodních nádrží, stejně tak jsou zde problémy s nižší kvalitou vody z povodí Teplé. Dostatečným adaptačním opatřením pro vodárenskou soustavu by bylo využití akumulčního potenciálu potenciálními vodními nádržemi Poutnov (Teplá), případně Mnichov (Pramenský potok). Obě tyto nádrže jsou obsaženy v generelu lokalit pro akumulaci povrchových vod. Tento seznam obsahuje lokality, jež jsou hájeny pro případné budoucí potřeby akumulace povrchových vod, jedná se o lokality potenciální.

Další lokality na území Karlovarského kraje, jež má problémy se zabezpečením odběrů vody a se zabezpečením požadavků na minimální zůstatkové průtoky. Zvýšení zmíněných zabezpečení by mohlo být podpořeno (stále nebude bez poruch) využitím stávajícího převodu vody z vodního toku Skřiváň. Tento převod není v současné době využíván, nicméně je k dispozici.

Dále bylo uvažováno zvětšení akumulčního potenciálu povodí levých přítoků Ohře vodními nádržemi v lokalitách Chaloupky na Rolavě, Rájec na Stříbrném potoce a Skřiváň na Skřivání. Levostranné přítoky Ohře se dlouhodobě potýkají s problémy zabezpečení minimálních zůstatkových průtoků při déletrvajících období nedostatku vody.

7.3 Postup navrhování adaptačních opatření

Na základě pilotní studie navrhování adaptačních opatření pro Karlovarský kraj byla sestavena certifikovaná metodika (Beran a kol., 2019b) definující postup pro zavádění adaptačních opatření v oblastech potýkajících se s nedostatkem vodních zdrojů. Metodika představuje funkční nástroj zobecnění pro použití na celém území ČR.

Navržený metodický postup pro navrhování adaptačních opatření na území se zápornou vodohospodářskou Bilancí je v souladu s hlavními dokumenty schválenými vládou ČR. Jedná se zejména o dokumenty: Koncepce ochrany před následky sucha pro území České republiky, Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR, Národní akční plán adaptace na změnu klimatu, Metodika pro přípravu Plánů pro zvládání sucha a stavu nedostatku vody, zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) č. 254/2001 Sb. (v úvahu brána i připravovaná část týkající se sucha a nedostatku vody). Navržené postupy pro zvládání situací nedostatku vody obsažené v metodice by měly sloužit jako podklad pro zpracování navrhovaných opatření obsažených v procesu plánování v oblasti vod podle § 23 vodního zákona. Součástí metodiky je i její příloha zpráva „Zajištění dostupnosti vodních zdrojů ve vybraných oblastech Karlovarského kraje – Pilotní řešení zájmových oblastí“, ve které jsou postupy uváděné v metodice řešeny na konkrétní pilotní studii pro území Karlovarského kraje.

Metodika poskytuje nástroj pro řešení nedostatku vody, tj. případu, kdy množství disponibilních vodních zdrojů není dostatečné pro uspokojení požadavků společnosti.

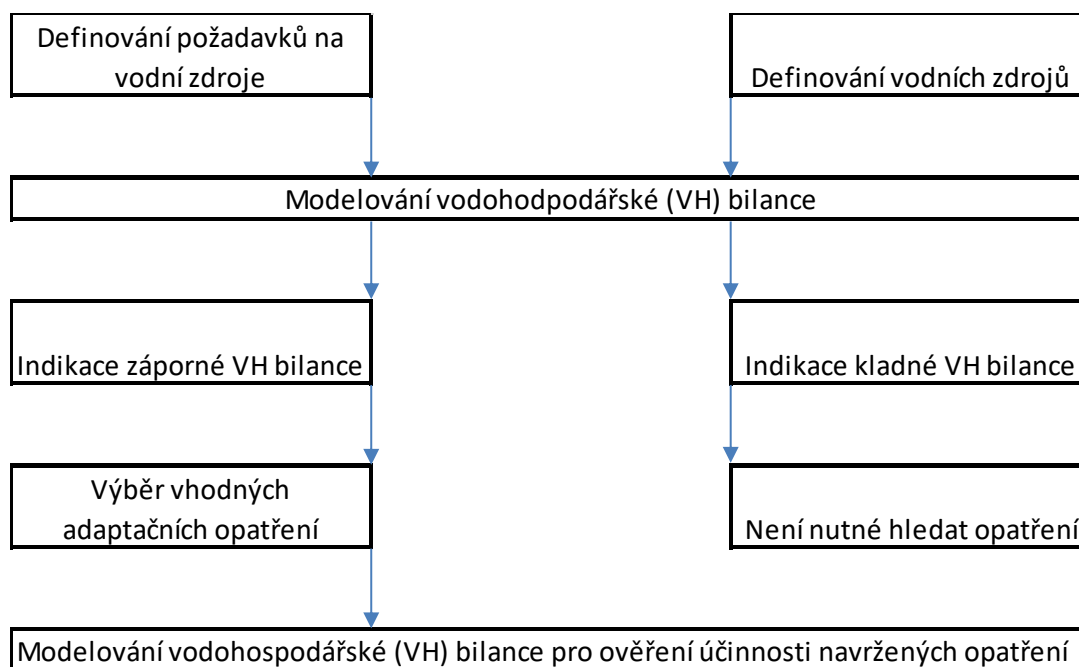
Zájmové území:

Zájmovým územím se rozumí např. hydrologicky uzavřené povodí, území kraje apod. Velikost zájmového území se nedoporučuje menší než 10 km². Na takto malém povodí je sice možné modelovat hydrologickou bilanci, nicméně možnosti takové vodohospodářské soustavy jsou značně omezené. Horní hranice rozlohy je bez omezení.

Časový horizont:

Stanovení hydrologické a vodohospodářské bilance předpokládá analyzování 30letých řad (minimálně) pro postihnutí přírodních variabilit hydrologických a klimatických veličin. Modelované řady scénářů je vhodné generovat v rozmezí 10-50 let do budoucna, delší výhledy se nedoporučují vzhledem k značným nejistotám spojeným s budoucím vývojem klimatu.

Schéma postupu:



7.3.1 Definování požadavků na využití vodních zdrojů

Výběr efektivních adaptačních opatření je řízen požadavky na využití vodních zdrojů, resp. zajištěním vodohospodářských funkcí. Nejdůležitější vodohospodářskou funkcí je zajištění kritické infrastruktury podle předpisů upravujících krizové řízení a dalších provozů poskytujících nezbytné služby, naopak nejméně závažnou vodohospodářskou funkcí je zajištění vodních zdrojů pro rekreační účely. Jednotlivé požadavky na vodní zdroje je třeba definovat jak pro současnost, tak pro výhledový časový horizont. Požadavky jsou charakterizovány mírou zabezpečení podle příslušných předpisů a charakterem omezení. Požadavky na využití vodních zdrojů by měly být ve formě požadovaných odběrů vod, např. tis m³/měsíc. Kromě množství by měla být uvedena požadovaná míra jejich zabezpečení.

Navržené pořadí důležitosti významu způsobu užití vody: (navržené pořadí je vnímáno v souladu s Plány pro zvládnutí sucha a stavu nedostatku vody)

- 1) Zajištění kritické infrastruktury podle předpisů upravujících krizové řízení a dalších provozů poskytujících nezbytné služby
- 2) Zásobování obyvatelstva pitnou vodou
- 3) Živočišná zemědělská výroba
- 4) Hospodářské využití a ekologická funkce vody
- 5) Ostatní využití

Priority způsobu využití vody je třeba posuzovat v jednotlivých případech podle konkrétních společenských potřeb, vždy tedy závisí na posouzení konkrétního případu.

7.3.2 Stanovení dostupnosti vodních zdrojů

Podle Zákona 254/2001 Sb. jsou vodním zdrojem povrchové nebo podzemní vody, které jsou využívány nebo které mohou být využívány pro uspokojení potřeb člověka, zejména pro pitné účely. Povrchové vody jsou vody přirozeně se vyskytující na zemském povrchu a podzemními vodami se rozumí vody přirozeně se vyskytující pod zemským povrchem v pásmu nasycení v přímém styku s horninami. Při definování dostupných vodních zdrojů se povrchové vody dělí na vodní toky a vodní nádrže, jelikož jejich možné využití má odlišné charakteristiky.

Časové řady charakterizující vodní toky a vodní nádrže jsou vhodné minimálně 20 let dlouhé od současnosti, jako hraniční je délka pozorování 10 let.

Pro využití vodního toku jako vodního zdroje jsou důležité tyto charakteristiky (databáze ČHMÚ úsek Hydrologie, případně databáze státních podniků Povodí, při neexistenci vodoměrných stanic je vhodné zavést vlastní monitoring na zájmové lokalitě – v koordinaci s podniky Povodí):

- Průměrný průtok – množství vody, které proteče průtočným profilem vodního toku za časovou jednotku (nejčastěji uváděno v m³/s, resp. l/s). Rozlišuje se průměrný denní průtok, měsíční průtok, roční průtok a dlouhodobý průměrný průtok.
- Čáry překročení – grafickou či tabulkovou formou sdělují informaci, kolikrát nebo po jakou dobu byla určitá hodnota znaku v určitém období dosažena nebo překročena. Při charakterizaci vodního toku se jedná o informaci o tom, kolikrát za pozorované období byla v daném místě dosažena, či překročena určitá hodnota průtoku vody. Z funkce překročení průměrných denních průtoků se počítají M-denní průtoky, jež jsou při určování dlouhodobé bilance na určitém území nezbytné.
- Sezónní variabilita průtoku – udává informaci o vodním toku - v jakých ročních obdobích (měsících) se v průtočném profilu vyskytuje více či méně vody (např. zda je vodní tok ovlivněn letním vysycháním, či je významně zasažen jarním táním apod.).
- Minimální zůstatkový průtok – průtok, který je nutno ponechat ve vodním toku v daném profilu nebo úseku pro udržení jeho ekologických funkcí a umožnění obecného nakládání s povrchovými vodami.

Pro využití vodní nádrže jako vodního zdroje jsou důležité tyto charakteristiky (databáze státních podniků Povodí, případně dalších správců/majitelů vodních nádrží):

- Zásobní objem – množství vody, které je možné využít jako zdroj vody pro uspokojení potřeb
- Okamžitý objem – zásoba vody, která se během roku podle potřeb a předpovědi počasí mění
- Čára zatopených ploch/čára objemů – průběh závislosti plochy hladiny/objemu vody v nádrži na výšce hladiny v nádrži
- Přítok a odtok do nádrže – pro dlouhodobé možnosti využití zásob vody ve vodní nádrži

- Minimální zůstatkový průtok – průtok, který je nutno ponechat ve vodním toku v daném profilu nebo úseku pro udržení jeho ekologických funkcí a umožnění obecného nakládání s povrchovými vodami..

Pro využití zdrojů podzemních vod jsou důležité tyto charakteristiky (Informativní hodnoty lze získat z Klasifikace území ČR z hlediska potřeby hodnocení zdrojů podzemních vod (Herrmann, 2008), a z výsledků projektu Rebilance (k dispozici od ČGS), pro reálné řešení je potřeba zadat samostatnou studii):

- Využitelné množství podzemních vod
- Omezující podmínky pro určení minimální hladiny podzemní vody

Při definování dostupných vodních zdrojů na zájmovém území lze vodní zdroje charakterizovat v denním, měsíčním, či ročním kroku. Při výpočtu bilance u velmi malých vodních nádrží či při návrzích převodů vody mezi vodními zdroji je vhodné využít nejpodrobnější denní krok. V ostatních případech postačí jednotlivé charakteristiky vyčíslit v měsíčním kroku, jenž dostatečně postihne sezónní variabilitu povrchových a podzemních zdrojů vody. Vyhodnocení v denním kroku se však nevyklučuje. Charakteristika jednotlivých vodních zdrojů by se měla zaměřit na tři časové roviny, a sice na charakterizování:

- současného stavu - zhodnocení stavu za posledních 30 let pro postihnutí možných variabilit v chodu jednotlivých veličin.
- trendů v pozorování - identifikace a popis pozorovaných trendů v hodnotách sledovaných veličin za celé období pozorování (minulost-současnost)
- výhledových období – na základě klimatických scénářů namodelovat předpokládaný chod sledovaných veličin ve výhledových časových horizontech. Jedná se o střednědobé budoucí časové horizonty (např. 10-50 let).

Součástí stanovení dostupných vodních zdrojů a zároveň součástí procesu navrhování adaptačních opatření je i jejich detailní monitoring, který může sloužit k zpřesnění vstupů pro hydrologické a vodohospodářské modelování. V případě, že se na zájmovém území nacházejí vodárenské nádrže, je vhodné zabývat se návrhem ochranných pásem těchto nádrží.

Zřízení monitoringu povrchových vod v zájmových oblastech

Na základě doplnění stávající monitorovací sítě (ČHMÚ, státní podniky Povodí) je možné přesněji vymezit problémové lokality v zájmových oblastech, jež jsou z hlediska celkového systému náchylnější k výskytu období nedostatku vody. Hydrologický monitoring by se měl skládat z měření vodních stavů, vyčíslení průtoků, případně z doplnění srážkoměrné sítě.

Ochranná pásma zdrojů povrchových a podzemních vod pro hromadné zásobování obyvatelstva pitnou vodou

Na základě seznámení se s lokalitou potenciálně ohroženou dopady sucha může být prospěšné provést analýzu současných ochranných pásem zdrojů povrchových a podzemních vod (dále jen „OPVZ“) a v případě konkrétní potřeby je možné navrhnout

rozšíření, případně zavedení OPVZ na zájmové lokalitě. Správně navrhnuté OPVZ dokáží ochránit jak jakost vod, tak mohou pomáhat se zadržováním vody v krajině.

7.3.3 Výběr adaptačních opatření

Postupy modelování vodohospodářské bilance jsou detailně popsány v Metodice dizertační práce.

Adaptační opatření jsou uvedena postupně, podle časové náročnosti a finanční nákladnosti při jejich případném zavádění. Nicméně při jejich aplikování není nutné postupovat od třídy I. postupně, ale podle zvážení konkrétního případu a jeho priority je nutné vybrat nejefektivnější opatření pro danou situaci. Je třeba kombinovat hlediska reálných možností realizace, ekonomického hlediska a spolehlivosti funkce i v dlouhodobém výhledu. Např. při dlouhodobých problémech se zajištěním vody pro pitné účely přímo přistoupit k nejefektivnějším opatřením z třídy III. (II.), jako je např. návrh nových vodních nádrží, případně návrh převodů vody mezi povodími.

Návrh adaptačních opatření je již výsledkem simulačního modelování zásobní funkce vodohospodářské soustavy, kdy je účinnost jednotlivých opatření testována na základě modelování. Návrh schématu vodohospodářské soustavy Karlovarského kraje s návrhem adaptačních opatření a modelování zásobní funkce systému jsou uvedeny v příloze (obr. 4.3, s. 41).

Míra účinnosti jednotlivých opatření musí být předmětem posouzení jednotlivých případů. Stejně tak je v případě potřeby např. možné zvážit změnu časového kroku výpočtů z měsíčního na denní.

Hodnocení účinnosti jednotlivých opatření.

Třídy opatření (vychází z Koncepce ochrany před následky sucha pro území ČR):

- I. Do první třídy adaptačních opatření se řadí preventivní adaptační opatření (Mrkvičková a kol., 2012). Mohou být zaváděna průběžně a jejich cílem je zabránit výskytu nežádoucího stavu nebo snížit následky nepříznivých stavů sucha.

Podpora využívání moderních technologií ve vodárenství

V suchých obdobích se zhoršuje kvalita povrchových vod zejména z důvodu nedostatečného mísení vod vzhledem k menším průtokům ve vodních tocích. Je potřeba zavádět nejmodernější způsoby čištění odpadních vod, jež napomohou zajistit výrobu pitné vody i z vody surové se zhoršenou kvalitou. Nicméně v první řadě je nutné usilovat o předcházení zhoršení kvalitativního stavu eliminací znečištění v povodí, pokud tato opatření nepostačí, přistoupit k dalšímu kroku, což může být zavedení modernějších technologií ve vodárenství.

Podpora modernizace a rozvoje zemědělských závlah

Současný systém závlah zemědělských pozemků se potýká s velkými ztrátami vody, například vlivem výparu při postřikování. Ztráty mohou být způsobené také opotřebením potrubí, jež vodu na pozemky přivádí. Investováním do efektivity využití vody pro závlahu, zejména využitím moderních způsobů závlahy (kapková závlaha), lze dosáhnout významného zmenšení množství odebírané vody.

- II. Ve druhé třídě se nacházejí opatření pro zvyšování odolnosti systému. Tato opatření vedou k posilování jednotlivých prvků vodohospodářské soustavy pro lepší odolnost proti suchu.

Převody vody mezi povodími a zvýšení integrace vodohospodářských soustav

Pokud se na lokalitě ohrožené dopady sucha nacházejí povrchové zdroje s přebytkovou pozitivní bilancí vodních zdrojů, lze uvažovat o převodu tohoto přebytkového množství do vodních toků, příp. vodních nádrží, kde je bilanční deficit vody. Jako velmi vhodné se jeví propojení stávajících přehradních nádrží do vodohospodářských soustav. Vhodnou manipulací na nádržích lze docílit efektivního hospodaření s vodními zdroji a zabezpečit odběr vody v místech postižených nedostatkem vodních zdrojů. Možnosti využití převodů vody by měly být hodnoceny na základě množství vody, jež dokáží zabezpečit spolu s ekonomickou náročností daného opatření. Výhodou je možnost převádění vody nejen v rámci povodí, ale i mezi povodími.

Připojování skupinových a lokálních vodovodů do vodárenských soustav

Při existenci více na sobě nezávislých sítí skupinových a lokálních vodovodů lze jako velice efektivní opatření zvolit jejich připojení do vodohospodářských soustav, které disponují dostatečnými zdroji. Zabezpečený skupinový vodovod dokáže posílit funkci vodovodní sítě, jež může mít problémy se zabezpečením dostatku vodních zdrojů. Opatření je složité zejména při řešení majetkoprávních vztahů daných sítí a při analyzování stávající vodovodní infrastruktury.

Propojování vodárenských soustav

Možnost propojení více na sobě nezávislých vodárenských soustav, které se mohou vzájemně dotovat v případě výskytu problematických období pro zabezpečení dostatku vody. Nutná je přesná identifikace dostupných vodárenských soustav.

Obnova stávajících a výstavba nových závlahových nádrží

Zřízení závlahové akumulární nádrže, ze které budou řešeny závlahy na zemědělských pozemcích, je řešením pro ty lokality, kde je možné předpokládat naplnění nádrže ze stávající vodoteče (v době dostatečných průtoků), nebo je možné uvažovat o převodu vody z blízkých vodních zdrojů (vodní nádrž, vodní tok).

Uplatnění technologií umělé infiltrace a břehové infiltrace pro zvýšení zdrojů podzemní vody

Technologie umělé infiltrace má v České republice dlouhou tradici a velký potenciál, nicméně je stále využívána jen v malé míře. Infiltrováním srážkové vody do horninového prostředí vzniká zásoba vody v podzemních zdrojích a zamezuje se tím rychlému povrchovému

odtoku bez užitku. Infiltrovaná voda je „uskladněna“ v podzemních kolektorech a připravena k využití.

- III. Při nemožnosti zavedení předešlých tříd opatření, nebo při jejich selhání je nutné přistoupit k nejnákladnějšímu a procesně nejsložitějšímu způsobu adaptačního opatření z poslední třetí třídy.

Nové víceúčelové přehradní nádrže

Výstavba nových přehradních nádrží je obvykle nejefektivnějším adaptačním opatřením pro řešení problému nedostatku vodních zdrojů jak pro zajištění odběrů pro pitné účely, tak pro zajištění minimálních ekologických průtoků. Vodní nádrže na vodních tocích dokáží zadržet velké objemy vody, které deficity ve vodohospodářské soustavě dokáží nejefektivněji doplnit.

Článek 4.7 Směrnice 2000/60/ES Evropského parlamentu a rady ze dne 23. října 2000 ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky říká, že členské státy neporuší tuto směrnici, když neúspěch při zamezení zhoršení z velmi dobrého na dobrý stav útvaru povrchové vody je důsledkem nových trvalých rozvojových činností člověka, pokud přínosy poskytované změnami vodního útvaru nemohou být, z důvodů technické neproveditelnosti nebo pro neúměrné náklady, rozumně dosaženy jinými prostředky, jež by byly významně lepší z hlediska životního prostředí. Z toho vyplývá, že součástí návrhu zřízení nádrže má být prokázání, že požadovaných cílů nelze dosáhnout jinými prostředky. Což znamená, že je třeba posoudit, zda je možné požadovaných přínosů dosáhnout pomocí jiných opatření při vynaložení úměrných nákladů.

Na území ČR je 65 lokalit územně chráněných pro akumulaci povrchových vod (dále jen LAPV), tyto lokality jsou uvedeny v dokumentu „Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod a základní zásady využití těchto území“, který byl v roce 2011 pořízen společně Ministerstvem životního prostředí ČR a Ministerstvem zemědělství ČR. Přítomnost LAPV v zájmových oblastech zasažených nedostatkem vodních zdrojů dává možnost pro jejich potenciální využití.

Nové významné zdroje podzemní vody

Významných nových zdrojů podzemních vod v posledních letech ubývá, nicméně se stále, byť v omezené míře, vyskytují. Při vymezování nového zdroje podzemní vody je nutné zvážit dotčení stávajících odběrů na povodí a také posoudit omezení z hlediska minimálních hladin a minimálních zůstatkových průtoků ve vodních tocích navazujících na tyto zdroje podzemních vod.

7.4 Souhrn

Na pilotní studii pro Karlovarský kraj byl navrhnout a aplikován celistvý postup pro navrhování adaptačních opatření. Tento postup zahrnuje nezbytné kroky jako identifikování potřeb a zdrojů vody na zájmové lokalitě, následuje sestavení a modelování vodohospodářské bilance a po vyhodnocení problémových lokalit ve vodohospodářském systému, kde se vyskytují

poruchy při zabezpečení vody pro užívání, nebo pro zabezpečení minimálních průtoků. V poslední fázi procesu jsou navrhovány konkrétní adaptační opatření, jejichž výběr je velice specifický pro každou lokalitu.

Na území Karlovarského kraje byla jako největší problémová lokalita vyhodnocena lokalita vodárenská soustava Březová-Stanovice. Na těchto nádržích bude docházet k výpadkům zabezpečení nasmlouvaných odběrů, stejně tak k problémům se zabezpečením minimálních zůstatkových průtoků. Jako vhodná adaptační opatření, která by těmto výpadkům dokázala předcházet, se jeví převody vody z řeky Ohře do VN Březová, případně posílení průtoků řeky Teplé vybudováním přehradní nádrže Mnichov, případně Poutnov, z generelu lokalit pro akumulaci vod.

8 Diskuze

Výsledky modelování globálních klimatických změn a vývoje klimatu v posledních dekádách potvrzují výrazné změny klimatických podmínek i v České republice. Tyto projevy byly potvrzeny nejaktuálnějším evropským projektem zaměřujícím se na studium vývoje klimatu na území Evropy EURO-CORDEX. Např. ve studii Potopová a kol. (2018) ukazují výsledky modelování budoucích četností suchých období k časovému horizontu 2071-2100 na zvýšení rizika sucha a změnám v jeho intenzitě. Negativní změny v jednotlivých členech hydrologické bilance pro budoucí časové horizonty jsou potvrzené i pro další evropské státy jako např. Polsko (Mezghani a kol., 2017), Německo (Dalelane a kol., 2018), Belgie (Hosseinzadehtalaei a kol., 2018) a další. Mezi hlavní projevy klimatických změn se řadí sucho a povodně. Sucho spolu s povodněmi patří k extrémním hydrologickým jevům, ke kterým dochází přirozeně a nahodile. S rostoucími dopady klimatické změny se však frekvence výskytu, časový a plošný rozsah extrémních hydrologických jevů může měnit. Výsledky modelování dopadů klimatické změny pro Českou republiku předpovídají četnější výskyt přívalových povodní a dlouhotrvajícího sucha (Hanel a kol., 2011). Tato skutečnost se v posledních letech potvrzuje na mnoha povodích v ČR (zejména Žatecko, oblast Podyjí, Polabí) (Kašpárek a kol., 2008).

Zmíněné studie tematicky doplňuje kapitola dizertační práce věnující se problematice výparu, především popisu minulého a budoucího vývoje výparu z vodní hladiny a klimatických veličin, na nichž je výpar závislý. V dizertační práci byl potvrzen stoupající trend v hodnotách výparu, jež jde ruku v ruce s popsáním i modelovaným zvyšováním průměrné teploty vzduchu. Případové studie napomohly k zpřesnění výpočtu potenciální evapotranspirace implementovaném v hydrologickém modelu Bilan. Nespornou výhodou nově použitého vzorce je zejména nenáročnost na vstupní data (potřeba pouze teplota vzduchu). Současně byly na základě nejnovějších pozorovaných dat z výparoměrné stanice Hlasivo odvozeny a otestovány empirické vzorce pro výpočet výparu z vodní hladiny, jež je vzhledem k dopadům klimatické změny pro celkovou hydrologickou bilanci klíčový. Ztráty vody z povodí vlivem výparu z vodní hladiny jsou problémem zejména na povodích s vysokým zastoupením vodních ploch (např. povodí Lužnice s množstvím rybníků). Problémy se vyskytují také např. v severních Čechách, kde jsou velké ztráty vody vlivem výparu z vodní hladiny jezer vzniklých zatápním lomů po povrchové těžbě (nap. Jezero Most, Chabařovice a další i plánované). V případě neexistence dostatečného přítoku do jezera, jež by deficit vzniklý výparem dotoval, se jejich zatápním stává nerentabilní a tím problematické. Problematice výparu je zapotřebí se dále věnovat, zejména k jejímu dalšímu poznání pomůže rozšíření měřicí sítě např. plovoucími výparoměry, jež dokáží přesně změřit aktuální výpar na konkrétních vodních plochách. Rozšíření měřické sítě by pomohlo při odvozování vzorců pro výpočet výparu z vodní hladiny, jež by měly širší platnost využití (např. vliv geografie), než vzorce odvozené na základě dat z jedné výparoměrné stanice.

Modelované změny hydrologické bilance pro Karlovarský kraj, stejně tak na území 53 hydrogeologických rajonů s těmito výsledky korespondují. Autoři předešlých studií potvrzují růst pozorované průměrné roční teploty vzduchu mezi časovými obdobími 1961-1980 a 1981-2005 o cca 0,6 - 1,2 °C, tento nárůst má vliv na zvyšování potenciální evapotranspirace, jež je nicméně částečně kompenzována nárůstem srážek. Vyskytují se problémy s nedostatkem povrchové vody, nepříznivá situace vede k ohrožení spolehlivosti

zásobování obyvatel pitnou vodou, jsou omezovány odběry vody pro závlahu v zemědělství, je omezena lodní doprava, potenciálně jsou postihnuty všechny sektory závislé na dostupnosti vody.

S problémy s dostupností povrchových vod úzce souvisí problémy s dostupností podzemních zdrojů, zejména zaklesávání hladin podzemní vody. Princip trvale udržitelného stavu podzemních vod vyžaduje zajištění rovnováhy mezi odběry podzemních vod a jejich doplňováním, při kterém je dosažen tzv. dobrý stav těchto vod. Zásoby podzemní vody jsou v čase a prostoru hydrogeologických struktur proměnlivé. Jejich ovlivnění v posledních letech vlivem klimatické změny má často negativní dopad na dostupnost zdrojů podzemních vod z těchto důvodů byl modelován stav podzemních vod v rámci projektu Rebalance zásob podzemních vod. V rámci projektu byla vypočtena potenciální dotace podzemních vod pomocí hydrologického modelu Bilan, zahrnující srážky, výpar, podzemní a povrchový odtok a změnu zásob podzemní vody. Bylo prokázáno, že přírodní zdroje podzemních vod a jejich využitelný podíl se mění jak v ročním, tak víceletém cyklu v závislosti na velikosti dotace ze srážek a jejím rozložení v průběhu roku, proto má jejich stanovení omezenou platnost. Výsledky jsou stěžejní pro Plán hlavních povodí České republiky, Plány oblastí povodí, pro Plán rozvoje vodovodů a kanalizací v oblastech s významnými zdroji podzemních vod. Skutečnost, že výzkum změn hydrologické bilance na území ČR, slouží jako podklad pro dokumenty celonárodního významu, svědčí o důležitosti tématu disertační práce.

Ohroženost České republiky z hlediska hrozících dopadů nedostatku vody byla modelována na základě využití indexů obsahujících informaci o celkových srážkách na povodí, potenciální evapotranspiraci informace o užívání na povodí (pro výhledové horizonty se používají současné hodnoty užívání, což do výpočtu vnáší jistou nejistotu) a hodnoty minimálních zůstatkových průtoků. Na základě výpočtu pro všechna povodí III. řádu na území ČR byly identifikovány velmi ohrožené lokality z hlediska nedostatku vody. Výpočet indexů pro výhledové časové horizonty ukazuje, že v rámci ČR nedojde podle scénářů klimatické změny ke zlepšení situace a lokality velmi ohrožené nedostatkem vody se budou rozšiřovat.

Na pozorované a modelované změny v hydrologické bilance je potřeba reagovat. Návrhy opatření na ochranu před následky sucha a nedostatku vody jsou detailně popsány v „Koncepti na ochranu před následky sucha pro území České republiky“. Dokument byl zpracován na základě výstupů činnosti Mezirezortní komise VODA-SUCHO skupinou pracovníků Ministerstva zemědělství, Ministerstva životního prostředí a VÚV TGM, v.v.i. a byl schválen vládou ČR dne 24. července 2017 usnesením č. 528.

Podle Mrkvičkové a kol. (2012) je podstatným hlediskem při sestavování adaptační strategie její načasování uplatnění daného opatření. Podle tohoto hlediska je možné rozlišovat opatření preventivní (jsou zaváděna průběžně a jejich cílem je zabránit výskytu nežádoucího stavu nebo snížit následky nepříznivých stavů), opatření pro zvyšování odolnosti systému (jedná se o taková opatření, která vedou k posilování jednotlivých prvků systému, aby lépe odolávaly nepříznivým stavům), opatření přípravná a operativní (opatření, která jsou uskutečňována v krátkodobém předstihu před výskytem hrozby, nebo v jejím průběhu) a opatření obnovy (opatření realizovaná po skončení bezprostředního působení nepříznivé události). Návrh adaptačních opatření pro eliminaci dopadů nedostatku vodních zdrojů je v souladu s dokumentem Koncepte ochrany před následky sucha pro území České

republiky (2017) a klade důraz na kombinování adaptačních opatření podle časové působnosti a jejich účelu.

Na základě popsaných dokumentů bylo konáno v Karlovarském kraji, který se dlouhodobě potýká s problémy spojené se zabezpečením vodních zdrojů na svém území. V rámci samostatného projektu (projekt MZe QJ1520318) byly identifikovány problémové lokality, z hlediska zabezpečení vodních zdrojů pro užívání a z hlediska zabezpečení pro dodržení minimálních zůstatkových průtoků, a byla navržena možná adaptační opatření. Na základě modelování vodohospodářské soustavy byla jako nejúčinnější opatření pro posílení vodních zdrojů vyhodnocena opatření jako převody vody mezi povodími a využití akumulací množství nových vodních nádrží, jež jsou součástí národního dokumentu generel lokalit potenciálně vhodných pro akumulaci povrchové vody. Na základě zmíněného projektu řešícího Karlovarský kraj vznikla Metodika pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody (Beran a kol. 2019b). Ta byla certifikována Ministerstvem Zemědělství ČR a slouží k nastavení postupu pro navrhování adaptačních opatření pro posílení vodních zdrojů v oblastech postižených nedostatkem vodních zdrojů. Její platnost je pro celou ČR. Proces navrhování adaptačních opatření před dopady klimatické změny je nicméně pro každou postiženou lokalitu jiný, je tedy nutné přistupovat k této problematice individuálně. Jako téměř nutná se jeví spolupráce se zaměstnanci státních podniků Povodí, jež mají dostatečné vodohospodářské znalosti o konkrétních lokalitách.

Díličí výsledky případových studií popsané v dizertační práci korespondují s výsledky studií popsaných výše. Shodují se zejména na popisu charakteru probíhajících a modelovaných změn hydrologické bilance, jež Českou republiku v posledních letech postihují a budou s vysokou pravděpodobností provázet. S tím souvisí i potřeba nastavení procesu adaptace na probíhající změny z důvodu zabezpečení dostatku vodních zdrojů pro uspokojení předpokládaných potřeb na jednotlivých povodích.

9 Závěr

Na základě výzkumu v letech 2011 až 2019, který se týkal vývoje jednotlivých členů hydrologické bilance v posledních letech (obecně 1960 až 2018) lze konstatovat, že dochází ke změnám v hodnotách sledovaných klimatických veličin. Hlavní výsledky výzkumu pro dizertační práci jsou:

- Míra ohrožení území ČR z hlediska nedostupnosti vodních zdrojů se bude ve výhledových časových horizontech (2021-2050, 2071-2100) zhoršovat. Vzhledem k modelování pro povodí III. řádu pro celou ČR byly jako nejohroženější vyhodnoceny lokality jižní Morava a západní část středočeského kraje. Bylo potvrzeno, že ani v případě následování optimistického scénáře vývoje klimatu nebude docházet k výraznému zlepšení situace, co se týká ohroženosti vůči nedostatku vodních zdrojů.
- V rámci výzkumu potenciální evapotranspirace byly odvozeny nové vzorce pro její určení. Tyto vztahy jsou nenáročné na vstupní hodnoty, jelikož vyžadují pouze sledovanou teplotu vzduchu, nicméně i tak jsou věrohodné pro odhad potenciální evapotranspirace. Na základě testování metody dle Oudina byl vzorec implementován do nové verze modelu Bilan a v současné době je používán při určení potenciální evapotranspirace při modelování hydrologické bilance povodí. Hydrologický model Bilan se osvědčil při řešení úloh zaměřených na určení potenciální dotace podzemních vod.
- Zejména v obdobích hydrologického sucha je důležitým členem hydrologické bilance výpar z vodní hladiny. Byly odvozeny empirické rovnice pro jeho určení v podmínkách ČR. Úloha výparu z vodní hladiny se projevuje zejména na povodích s vysokým podílem vodních ploch. Také lze konstatovat, že rybníky, využívané pro chov ryb, v suchém roce 2015 zhoršovaly hydrologickou situaci právě vzhledem k vysokým ztrátám vody vlivem výparu z vodní hladiny.
- Změny jednotlivých členů hydrologické bilance na území Karlovarského kraje v pozorovaném období i ve výhledových časových obdobích na základě využití scénářových dat potvrzují trend zvyšování průměrné teploty vzduchu, naopak nedochází k významným změnám v hodnotách srážek a odtoků.
- Na většině území ČR jsou dlouhodobé úhrny srážek poměrně blízké velikosti potenciální evapotranspiraci. Kolik vody se vsákne do podloží, kolik vypaří a kolik přímo odteče, závisí zejména na časovém průběhu srážek a teplot vzduchu.
- Byly navrženy adaptační opatření pro území Karlovarského kraje, jež by pomohly vodohospodářské soustavě čelit problémům s nedostatkem vodních zdrojů z hlediska zabezpečení požadovaných odběrů a z hlediska zabezpečení minimálních zůstatkových průtoků. Navržená opatření využívají převody vody na povodí, propojování vodárenských soustav a využití nových akumulčních nádrží z generelu Lokalit pro akumulaci povrchových vod.
- Byla vyvinuta Metodika pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody. Metodika představuje nástroj pro posouzení a doporučení výběru adaptačních opatření ke snížení nepříznivých účinků vlivu záporné vodohospodářské

bilance na ploše zájmového území s uvážením očekávaných dopadů klimatických změn. Navržená opatření přispívají ke správnému hospodaření s povrchovými a podzemními vodami, k udržitelnému užívání vody pro zajištění vodohospodářských služeb a ke zlepšování vodních poměrů. Metodika přispívá k zajištění dostatečné efektivity vybraných skupin opatření s ohledem na aktuální hydrologické podmínky i s ohledem na očekávané dopady klimatické změny.

Výzkumu reakce hydrologického systému na dlouhodobé změny klimatických veličin je potřeba se dále věnovat s vyšší intenzitou vzhledem k důležitosti tématu, jakou dostupnost vodních zdrojů představuje pro obyvatelstvo. Výsledky hydrologického výzkumu značně přispívají v boji s nepříznivými projevy přírodních fenoménů, které přicházejí ať už z jakéhokoli důvodu a vzhledem k výsledkům nejen této dizertační práce je potřeba s nimi počítat i do budoucna.

10 Seznam zkratek

ČHP	Číslo hydrologického pořadí
BF	Základní odtok [mm]
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČZÚ	Česká zemědělská univerzita v Praze
DBČ	Databázové číslo
ET	Výpar [mm] (někdy označováno pouze E)
FŽP	Fakulta životního prostředí
GCM	Globální klimatický model
H	Relativní vlhkost vzduchu [%]
HGR	Hydrogeologický rajon
MAE	Mean absolute error – průměrná absolutní odchylka
MRE	Mean square error – průměrná relativní odchylka
MZe	Ministerstvo zemědělství ČR
MZP	Minimální zůstatkový průtok
MŽP	Ministerstvo životního prostředí ČR
P	Srážky [mm]
PET	Potenciální evapotranspirace [mm]
POD	Odběry z podzemních vod
POh	Povodí Ohře, státní podnik
POV	Odběry z povrchových vod
R	Odtok [mm]
RC	Dotace podzemních vod [mm]
RCM	Regionální klimatický model
RM	Modelovaný odtok [mm]
T	Teplota vzduchu [°C]
VÚV TGM, v.v.i.	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce

11 Seznam literatury a použitých zdrojů

Allen, R.G., Pereira, L.S., Reas, D. and Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. ISBN 92-5-104219-5.

Ansorge, L., Dlabal, J., Hanel, M., Kučera, J., Petružela, L., Zeman, M. (2015) Scénáře potřeb vody pro období 2030-50. Sektory veřejných vodovodů a energetiky. Případová studie. Praha: VÚV TGM, v.v.i. 59 s.

Beran, A. (2015) Pozorování výparu a dalších meteorologických veličin ve stanici Hlasivo. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 57, č. 4-5, ISSN 0322-8916. Informativní článek.

Beran, A., Hanel, M. (2015) Definování zranitelných oblastí z hlediska nedostatku vody na území České republiky. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2015, roč. 57, č. 4-5, s. 21-24. ISSN: 0322-8916.

Beran, A., Hanel, M., Nesládková, M. (2016) Změny hydrologické bilance způsobené vlivem klimatických změn na území Karlovarského kraje. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, roč. 58, č. 5, str. 20–25. ISSN 0322-8916.

Beran, A., Hanel, M., Nesládková, M., Vizina, A. (2016) Increasing water resources availability under climate change, Procedia Engineering, Volume 162, 2016, Pages 448-454, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.087>

Beran, A., Hanel, M., Nesládková, M., Vizina, A., Kožín, R. (2019) Climate change impacts on water balance in Western Bohemia and options for adaptation. Water Science and Technology: Water Supply, (2019) 19 (1): 323-335. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.080>

Beran, A., Hanel, M., Peláková, M. (2014) Výpočet velikosti dotace podzemních vod za pomoci hydrologického modelování na vybraných hydrogeologických rajonech ČR. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2014, roč. 56, č. 5, s. 4-7. ISSN: 0322-8916.

Beran, A., Horáček, S. a Hanel, M. (2011) Zjednodušení metody výpočtu potenciální evapotranspirace v nové verzi modelu Bilan. VTEI, 53/III, příloha Vodního hospodářství č. 11/2011 s. 15 – 18. ISSN 0322 – 8916.

Beran, A., Kašpárek, L., Vizina, A., Vyskoč, P., Svejkovský, V., Pail, T., Poledníček, P., Nesládková, M. (2019) Metodika pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody. Certifikovaná metodika. ISBN 978-80-87402-70-2.

Beran, A., Vizina, A. (2013) Odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny a identifikace trendů ve vývoji měřených veličin ve výparoměrné stanici Hlasivo. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2013, roč. 55, č. 3. ISSN: 0322-8916.

Beran, A., Vyskoč, P., Filippi, R, Vizina, A., Hlušíčková, E., Hanel, M., Nesládková, M., Pícek,

J., Prchalová, H., Dlabal, J., Ansorge, L., Svejkský, V., Poledníček, P., Pail, T. (2019) Zajištění dostupnosti vodních zdrojů ve vybraných oblastech Karlovarského kraje – Pilotní řešení zájmových oblastí, závěrečná zpráva projektu QJ1520318, MZe, KUS 2015-2018.

Beranová R, Kyselý J (2017) Trends of precipitation characteristics in the Czech Republic over 1961–2012, their spatial patterns and links to temperature and the North Atlantic Oscillation. *Int J Climatol* 38:e596–e606. <https://doi.org/10.1002/joc.5392>

Brázdil, R., Trnka, M. a kol. (2015) Sucho v českých zemích: minulost, současnost, budoucnost. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd ČR, v.v.i., Brno.

Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., Magner, J. A. (2013), *Hydrology and the Management of Watersheds* 4th ed., Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons, Inc., Iowa USA, Oxford UK.

ČSN 75 2405 Vodohospodářská řešení vodních nádrží.

ČSN EN 15 843 Jakost vod – Návod pro určení stupně hydromorfologie. Str. 22.

Daňhelka, J., Bercha, Š., Boháč, M. a kol. (2015) Vyhodnocení sucha na území České republiky v roce 2015. Výzkumná zpráva ČHMÚ.

Dalelane, C., Früh, B., Steger, C., Walter, A. (2018) A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO-CORDEX 8.5 ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57 (3), pp. 477-491.

Drbal, K. a kol. (2008): Studie posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu v povodí Moravy, závěrečná zpráva, VÚV TGM.

Duan, Q., Soroosh, S., Gupta V. K. (1994) Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology* 158: 265–284. doi:10.1016/0022-1694(94)90057-4.

Eddelbuettel, D. and Francois, R. (2011): Rcpp: Seamless R and C++ Integration. *Journal of Statistical Software*, 40(8), 1-18. URL <http://www.jstatsoft.org/v40/i08/>.

ECE (2009). *Guidance on Water and Adaptation to Climate Change*. Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.

ECE (2014). *Water and Climate Change Adaptation in Transboundary Basins: Lessons learned and Good Practices*. Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.

Hanel, M. (2014) Modelování dopadů změny klimatu a jeho nejistoty. Habilitační práce, Fakulta životního prostředí, ČZU v Praze.

Hanel, M., Beran, A., Kašpárek, L. (2015) Scénáře změny klimatu. Technická zpráva, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.

Hanel, M., Hánová, K., Daňhelka, J., Mrkvičková, M., Tomek, M., Tolasz, M., Ledvinka, O. (2014) Vyhodnocení možných dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství a při plánování v oblasti vod. Certifikovaná metodika, VÚV TGM.

Hanel, M., Kašpárek, L., Horáček, S. (2007) Studie hydrologických poměrů v povodí Srpiny. VÚV T. G. Masaryka, Praha.

Hanel M., Kašpárek L., Mrkvičková M., Horáček S., Vizina A., Novický O. & Fridrichová R. (2011) Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření (Estimation of climate change impacts on the hydrological balance of the Czech Republic and possible adaptation measures), Scientific publication, T.G. Masaryk Water Research Institute, p.r.i., Prague, Czech Republic.

Hanel M., Kašpárek L., Peláková M., Beran A. & Vizina A. (2013) Evaluation of changes in deficit volumes: support for protection of localities suitable for construction of reservoirs. In: Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management, Proceedings of H09, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013).

Hanel, M., Vizina, A. (2014) Hydrologické modelování dopadů klimatické změny. Skripta. Fakulta životního prostředí, ČZU v Praze.

Hanel, M. a Vizina, A. (2010) Hydrologické modelování dopadů změn klimatu v denním kroku: korekce systematických chyb a přírůstková metoda. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 52, mimoř. č. II, s. 17–21, ISSN 0322-8916, příloha Vodního hospodářství č. 11/2010.

Hanel M., Vizina A., Máca P. & Pavlásek J. (2012) A multi-model assessment of climate change impact on hydrological regime in the Czech Republic. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 60(3), 152-161.

Harding, R.J., Warnaars, T.A., eds. (2011) Water and global change: The WATCH Project Outreach Report. NERC Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK.

Hewitt, C. D., Griggs, D. J. (2004) Ensembles-based Predictions of Climate Changes and their Impacts. Eos, 85, 566.

Horáček, S., Rakovec, O., Kašpárek, L., Vizina, A. (2009) Vývoj modelu hydrologické bilance – Bilan, VTEI, 51, mimoř. č. I, příloha Vodního hospodářství č. 11/2009

Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., Willems, P. (2018) Precipitation intensity–duration–frequency curves for central Belgium with an ensemble of EURO-CORDEX simulations, and associated uncertainties. Atmospheric Research, 200, pp. 1-12.

Hydrogeologická rajonizace 2005. VÚUV TGM, ČGS, Aquatest a.s., GEOTest a.s., ČHMÚ. Dostupné na <heis.vuv.cz/projekty/hgr2005>.

Gidrometeoizdat (1976): Rekomendacii po rasčotu isparenija s poverchnosti suši. Leningrad.

Guidance (2009) Guidance document No. 24: River Basin Management in a Changing Climate. Common implementation strategy for Water Framework Directive (2000/60/EC), European Communities, technical report 2009-040.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom, and New York: Cambridge University Press. Available from: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/contents.html

Kašpárek, L. a kol. (2007): Posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu na povodí Vltavy, závěrečná zpráva, počet stran: 155, VÚV T.G.M.

Kašpárek, L. a kol. (2008): Posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu na povodí Labe, závěrečná zpráva, počet stran: 69, VÚV T.G.M.

Kašpárek, L., Beran, A., Pistulka, J. (2016) O výparu z vodní hladiny v roce 2015. Seminář Adolfa Patery 2016 Extrémní hydrologické jevy v povodích. 16. 11. 2016 Praha. ČSVTS.

Kašpárek, L., Eckhardt, P., Hanel, M. a kol. (2010) Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulární schopnosti v povodí Rakovnického potoka (pilotní projekt). VÚV T. G. Masaryka, závěrečná zpráva.

Kašpárek, L., Mrkvičková, M. (2008) Studie potřeb vody pro povodí vodních toků Blšanka a Liboc. Závěrečná zpráva. VÚV TGM, v.v.i., 2008. Str. 57.

Kašpárek, L., Novický, O., Peláková, M. (eds.), (2006) Climate Change and Water Regime in the Czech Republic, T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague, Czech Republic.

Knozová, G., Rožnovský, J. a Kohut, M. (2005): Srovnání časových řad výparu naměřeného výparoměrem GGI 3000 a vypočítaného podle metodiky FAO. In: (Rožnovský, J. a Litschman, T. ed.) Bioklimatologie současnosti a budoucnosti. Křtiny 12.-14.9. 2005. ISBN 80-86 690-31-08

Koncepce ochrany před následky sucha pro území České republiky, schválena vládou ČR 24. července 2017 usnesením 528, MZe ČR a MŽP ČR.

Kožený, P., Vyskoč, P., Makovcová, M., Uhlířová, K., Balvín, P., Prchalová, H. a kol. (2018) Pracovní postup určení významných vlivů na morfologii a hydrologický režim. Verze 2.0. VÚV TGM, v.v.i.. Str. 8-11.

Krejčová, K., Kašpárek, L., Polák, M., Řiřica, J. a Zahradníček, J. (1993): Vliv antropogenní činnosti na změny odtokového režimu a vydatnost zdrojů vody. Zpráva o výsledcích řešení resortního úkolu za rok 1993 Chronologická hydrologická bilance, dílčí část 01. Praha, listopad 1993. 154 s.

Linsley, Ray K., Kohler Max A. Jr., Paulhus, Joseph L.H., (1982) Hydrology for Engineers 3rd ed., McGraw-Hill, New York, USA.

Lourakis, M. I. (2005). A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar. Institute of Computer Science, Foundation for Research and Technology, 11.

Ludwig, F., Kabat, P., van Shaik, H., van der Valk, M. (eds.), (2009) Climate Change Adaptation in the Water Sector, Earthscan, London UK and Sterling, VA, USA.

Mariani, V.C., Luvizotto, L.G.J., Guerra, F.A., and Coelho, L.D. (2011) A hybrid shuffled complex evolution approach based on differential evolution for unconstrained optimization. Applied Mathematics and Computation, 217 (12), p. 5822–5829.

Máca, P., Vizina, A., Horáček, S. (2013) Optimalizace parametrů modelu Bilan metodou SCDE. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 55, 4/2013.

Metodický pokyn MZe pro sestavení vodohospodářské bilance oblasti povodí ze dne

28.8.2002. Dostupný na <<http://eagri.cz/public/web/mze/voda/legislativa/metodicke-pokyny/zakon-o-vodach>>.

Mezghani, A., Dobler, A., Erik Haugen, J., Benestad, R.E., Parding, K.M., Piniewski, M., Kardel, I., Kundzewicz, Z.W. (2017) CHASE-PL Climate Projection dataset over Poland - Bias adjustment of EURO-CORDEX simulations. *Earth System Science Data*, 9 (2), pp. 905-925.

Mrkvičková, M. (2007) Vyhodnocení měření na výparoměrné stanici Hlasivo. *VTEI*, 49/II, příloha Vodního hospodářství č 6/2007 s. 9—11. ISSN 0322 - 8916.

Mrkvičková, M., Kožíň, R., Hanel, M., Beran, A., Brabec, J., Novický, O., Fridrichová, R., (2012) Navrhování adaptačních opatření pro snižování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha, Česká republika.

Musy, A., Higy Ch. (2011) *Hydrology A Science of Nature*, Routledge, Taylor & Francis Group, Abingdon UK, New York USA.

Národní akční plán adaptace na změnu klimatu 2015 Implementační dokument Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR. Ministerstvo životního prostředí 2015.

Oki, T., Valeo, C., Heal, K. (eds.), (2006) *Hydrology 2020 An Integrated Science to Meet World Water Challenges*, IAHS Press, Wallingford UK.

Oudin, L., Moulin, L., Bendjoudi, H. & Ribstein, P. (2010) Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulation. *Hydrological Sciences Journal*, 55, 2, 209-222.

Plán pro zvládání sucha a nedostatku vody v ČR, v přípravě pro schválení vládou ČR, MZe ČR a MŽP ČR.

POPOd (2010): Plán oblasti povodí Odry 2010-2015.

Potopová, V., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Farda, A., Türkott, L., Soukup, J. (2018) Projected changes in the evolution of drought on various timescales over the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. *International Journal of Climatology*, Article in Press.

Pretel, J. eds. (2009) Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy opatření (II). Závěrečná zpráva o řešení projektu VaV SP/1a6/108/07 za rok 2008, ČHMÚ.

Prchalová H. a kol. (2013) *Metodiky hodnocení chemického a kvantitativního stavu útvarů podzemních vod pro druhý cyklus plánů povodí v ČR*. Praha: VÚV TGM, v.v.i..

Procházka, M., Deyl, M., Novický, O. (2001) *Uživatelský manuál k programu CTPA (Technology for detecting trends and changes in time series of hydrological and meteorological variables)*

R Development Core Team (2010): *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

Shaw, E. M., Beven, K. J., Chappell, N. A., Lamb, R., (2011) *Hydrology in Practice*, Spon Press, Abingdon UK, New York USA.

Shiklomanov, I. A., Rodda, J. C. (eds) (2003) *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ze dne 23. října 2000 ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky. Článek 4 a příloha V.

Smith, J., Hulme, M. (1998) *UNEP Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Studies*, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, and Institute for Environmental Studies, Amsterdam, chapter Climate change scenarios.

Storn, R., Price, K. (1997) Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *J. of Global Optimization* 11: 341–359. doi:10.1023/A:1008202821328.

Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR, schválena vládou ČR 26. října 2015 usnesením 861, MŽP ČR.

Szolgay, J. & Gottschalk, L. (1987) Hydrology versus water resources management. In: *Hydrology 2000* (ed. By Kundzewicz, Gottschalk & Webb), 63-70. IAHS Publ. 171 IAHS Press, Wallingford, UK.

Šercl, P. (2008) Hodnocení metod odhadu plošných srážek. *Meteorologické zprávy*, 61/2.

Štěpánek, P., Zahradníček, P., Farda, A., Skalák, P., Trnka, M., Meitner, J., Rajdl, K. (2016) Projection of drought-inducing climate conditions in the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. *Clim Res* 70:179-193. <https://doi.org/10.3354/cr01424>

Tallaksen, L.M., van Lanen, H.A.J., eds. (2004) *Hydrological drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Developments in water science, 48, Elsevier, Amsterdam, 579s.

Tallaksen, Lena M., Madsen, H., Clausen, B. (1997) On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*, 42:1, 15-33, DOI: 10.1080/02626669709492003.

Trnka, M., Drbal, K., Dumbrovský, M., Novotný, I., Žalud, Z., Vizina, A., Chuchma, F., Růžek, P., Trantinová, M. (2017) *Generel vodního hospodářství krajiny České republiky 2014-2017*.

Vizina, A., Horáček, S. a Hanel, M. (2015) Nové možnosti modelu Bilan. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, roč. 57, č. 4–5, str. 7–10. ISSN 0322-8916.

Vlnas, R. (2018) *Metodika pro přípravu Plánů pro zvládnutí sucha a stavu nedostatku vody. Metodický pokyn - v přípravě*.

Vlnas, R., Novický O., Kašpárek L., Hanslík E., Vizina A., Fiala T., Šimek P., Brzáková J., Ledvinka O. & Kourková H. (2010) Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky (Temporal and spatial hydrological drought variability in conditions of climate change in the area of the Czech Republic),

Scientific publication, T.G. Masaryk Water Research Institute, p.r.i., Prague, Czech Republic.

Vyhláška č. 431/2001 Sb., o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci.

Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích).

Vyskoč, P., Zeman, (2008) V. Metodický postup zpracování vodohospodářské bilance současného a výhledového stavu množství povrchových vod. Praha: VÚV TGM v.v.i.. 32 s.

Vyskoč, P. a kol. (2010): Výhledová studie potřeb a zdrojů vody v oblasti povodí Ohře a Dolního Labe, závěrečná zpráva, VÚV T.G.M.

Ward, A. D, Trimble, A. W., (2004) Environmental Hydrology 2nd ed., Lewis publishers CRC Press LLC, Boca Raton USA.

Webb, B., Arnell, N., Onof, C., MacIntyre, N., Gurney, R., Kirby, C. (eds.), (2004) Hydrology Science and practise for the 21st century, Proceedings of the British Hydrological Society International Conference Imperial College London July 2004, British Hydrological Society.

WFD (2000) Common implementation strategy for Water Framework Directive (2000/60/EC), European Communities, technical report.

White Paper (2009). WHITE PAPER: Adapting to climate change: Towards a European framework for action, Commission of the European Communities, Bruxelles, Belgium.

Wisler, C. O. and Brater, E. F. (1959) Hydrology, John Wiley & Sons, New York, USA.

Young, G. J., Dooge, J. C. I. & Rooda, J. C. (1994) Global Water Resource Issues. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

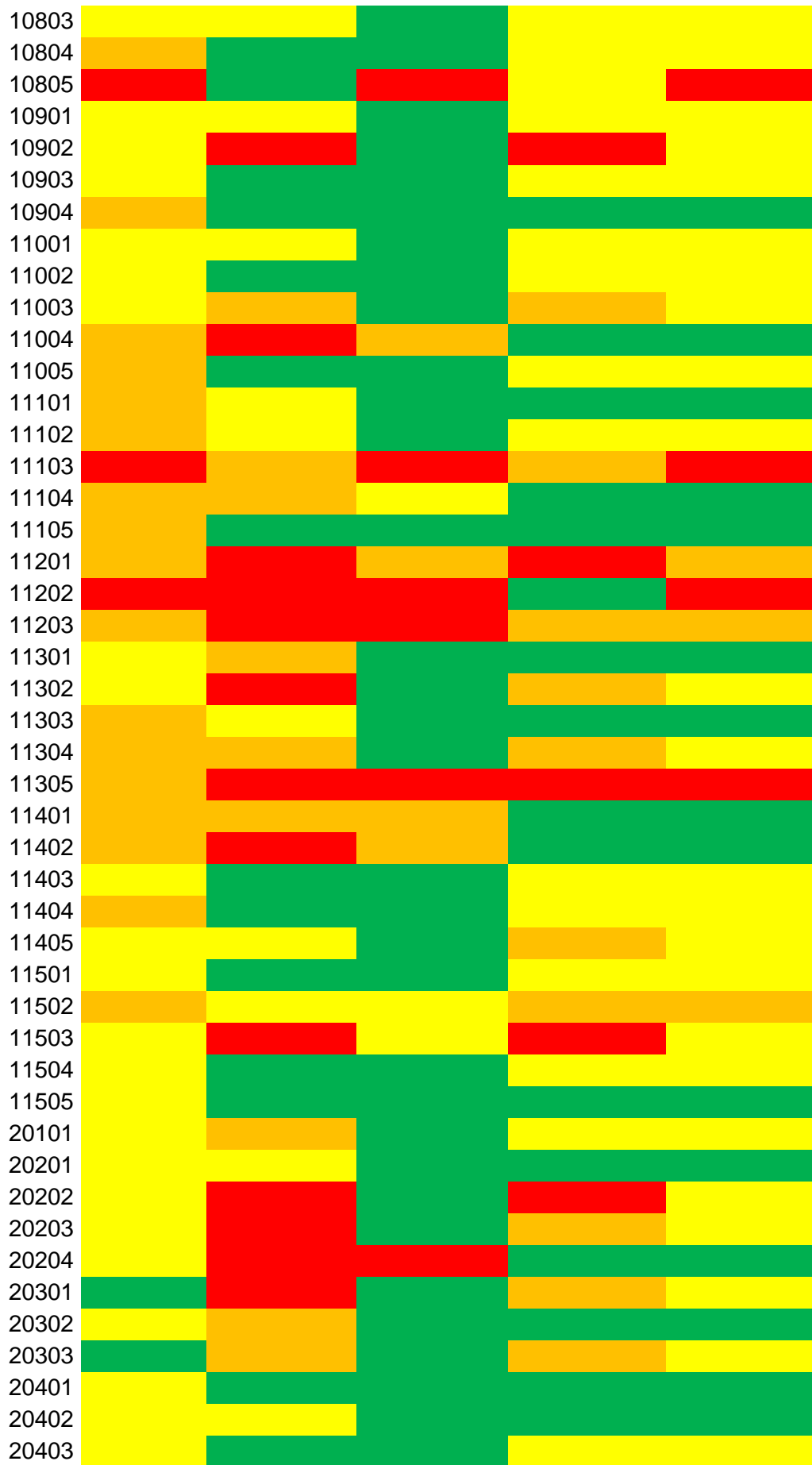
12 Příloha 1

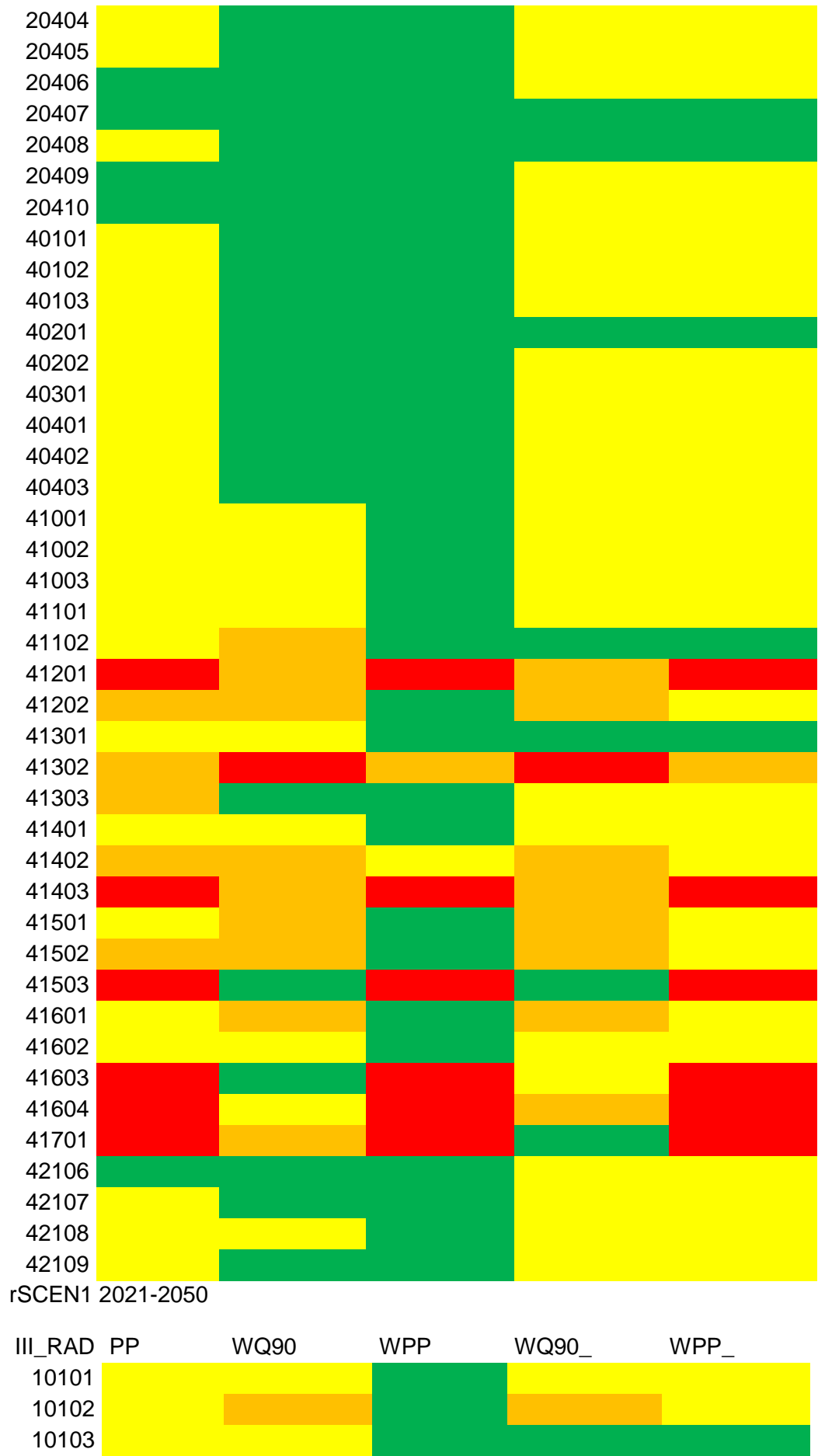
Legenda:

	OK
	mírně
	středně
	velmi zranitelné povodí

Pozorované období

III_RAD	PP	WQ90	WPP	WQ90_	WPP_
10101	OK	mírně	OK	mírně	mírně
10102	OK	OK	OK	OK	OK
10103	OK	OK	OK	OK	OK
10104	mírně	OK	OK	mírně	mírně
10201	OK	OK	OK	OK	OK
10202	OK	OK	OK	OK	OK
10203	OK	mírně	OK	středně	mírně
10301	OK	velmi zranitelné povodí	středně	OK	OK
10302	OK	mírně	OK	mírně	mírně
10303	OK	mírně	OK	středně	mírně
10304	OK	velmi zranitelné povodí	mírně	středně	mírně
10305	OK	mírně	OK	mírně	mírně
10401	středně	mírně	OK	mírně	mírně
10402	středně	středně	OK	mírně	mírně
10403	středně	velmi zranitelné povodí	OK	středně	mírně
10404	středně	velmi zranitelné povodí	OK	středně	mírně
10405	velmi zranitelné povodí	OK	velmi zranitelné povodí	mírně	velmi zranitelné povodí
10406	mírně	OK	OK	mírně	mírně
10407	mírně	mírně	OK	mírně	mírně
10501	OK	mírně	OK	mírně	mírně
10502	mírně	mírně	OK	mírně	mírně
10503	mírně	velmi zranitelné povodí	mírně	velmi zranitelné povodí	mírně
10504	středně	velmi zranitelné povodí	mírně	středně	mírně
10601	OK	OK	OK	mírně	mírně
10602	OK	středně	OK	středně	mírně
10603	OK	mírně	OK	OK	OK
10701	OK	mírně	OK	OK	OK
10702	OK	velmi zranitelné povodí	OK	velmi zranitelné povodí	mírně
10703	OK	mírně	OK	OK	OK
10704	OK	mírně	OK	mírně	mírně
10705	OK	OK	OK	OK	OK
10801	OK	OK	OK	mírně	mírně
10802	OK	OK	OK	OK	OK



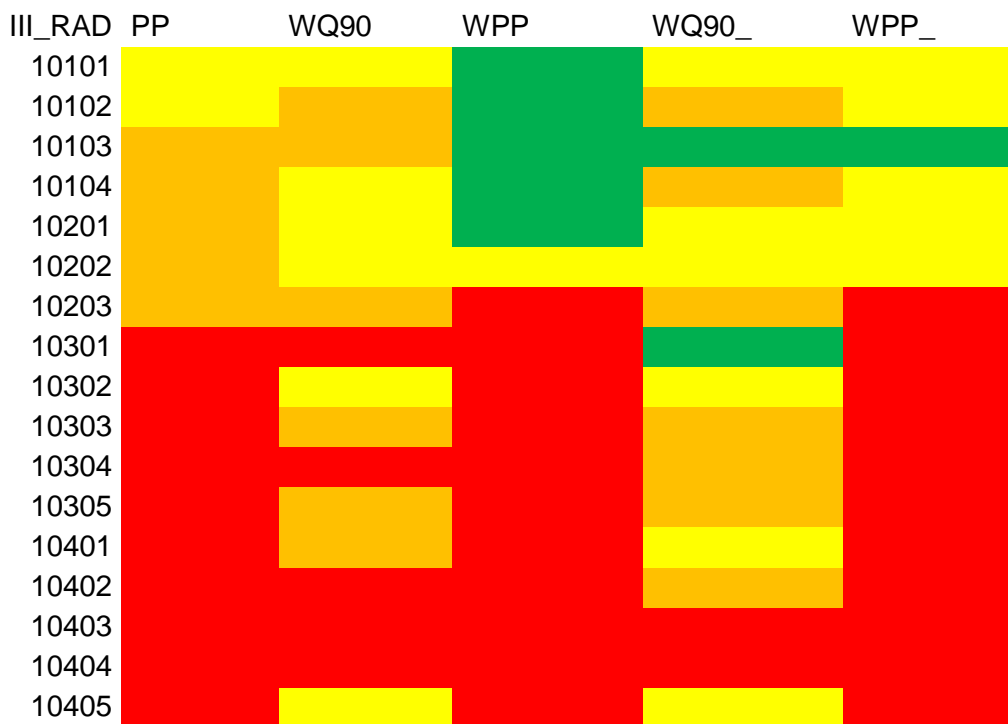






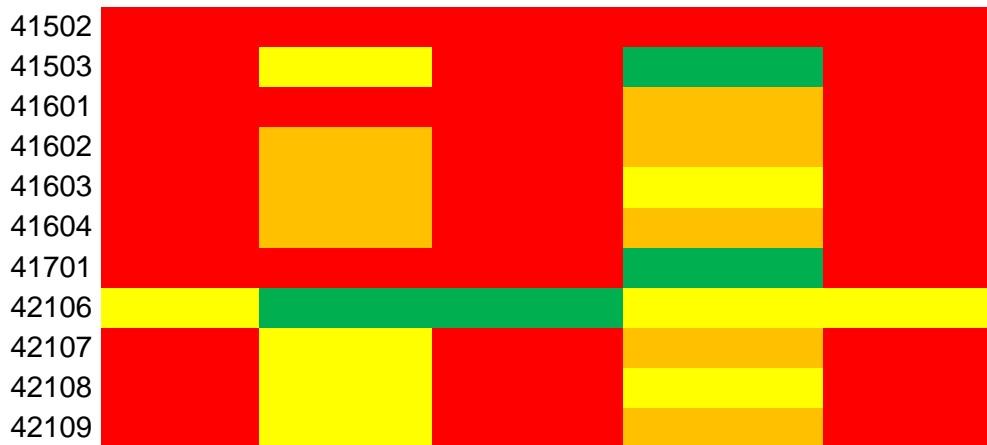


rSCEN1 2071-2100



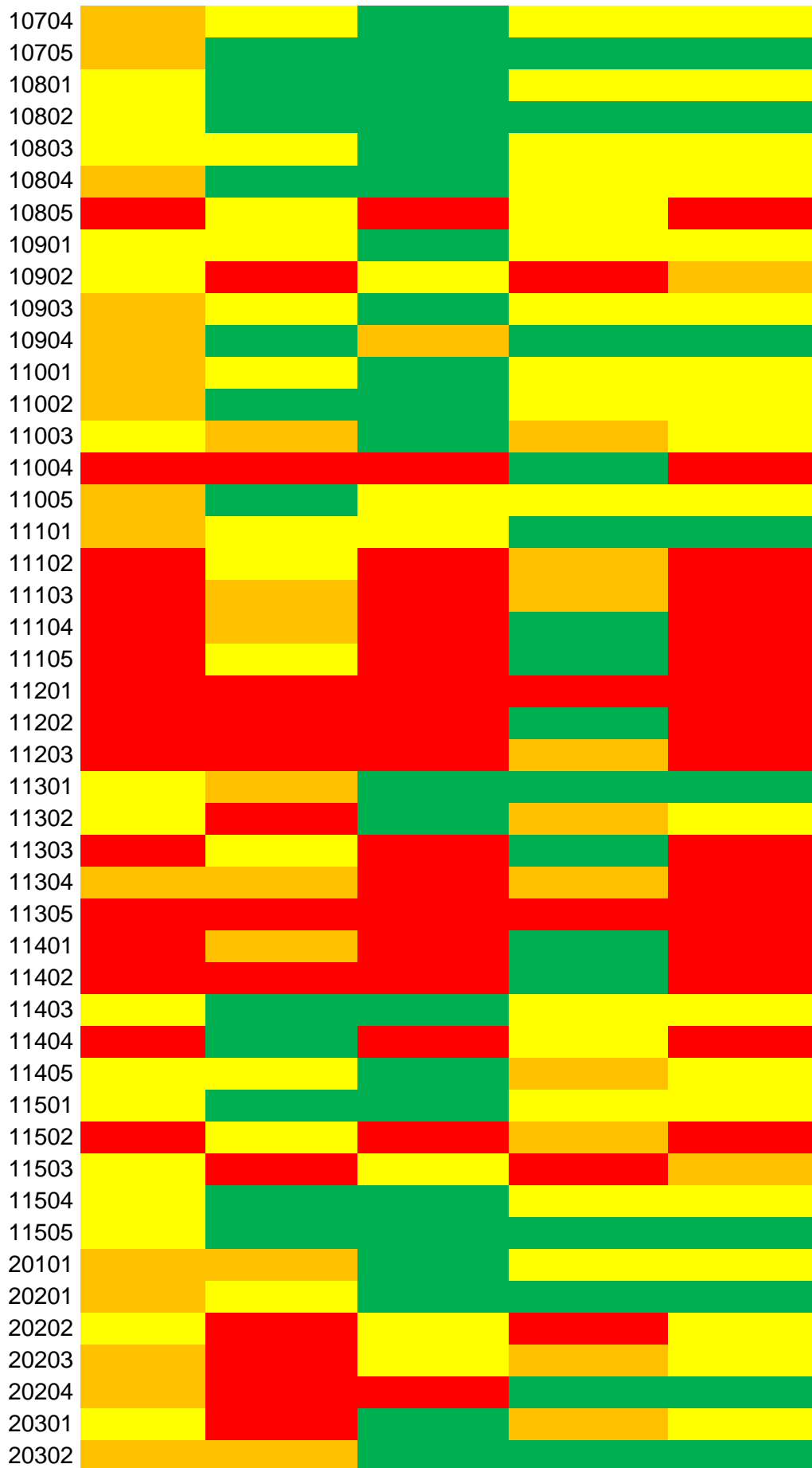






rSCEN2 2021-2050

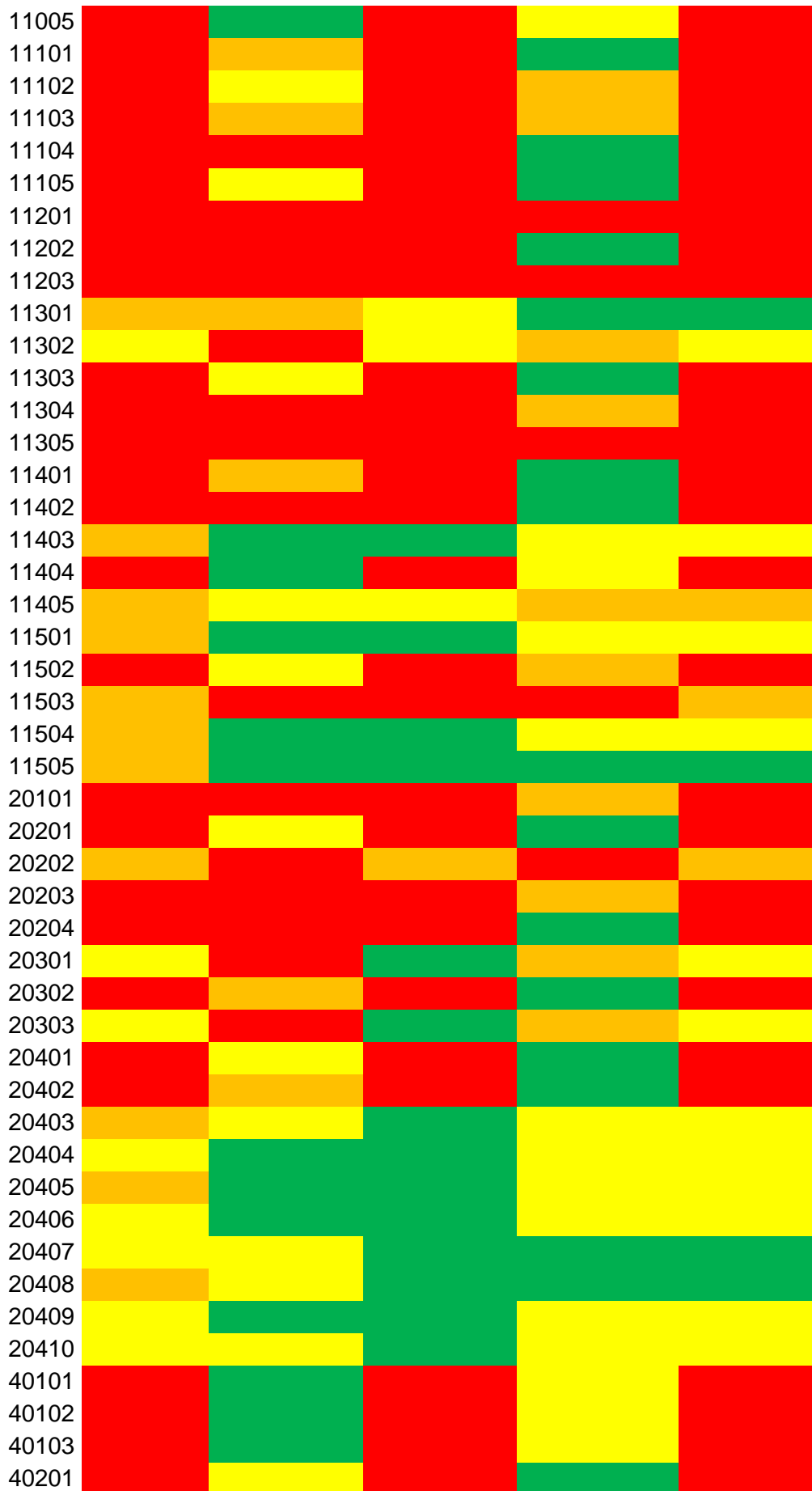






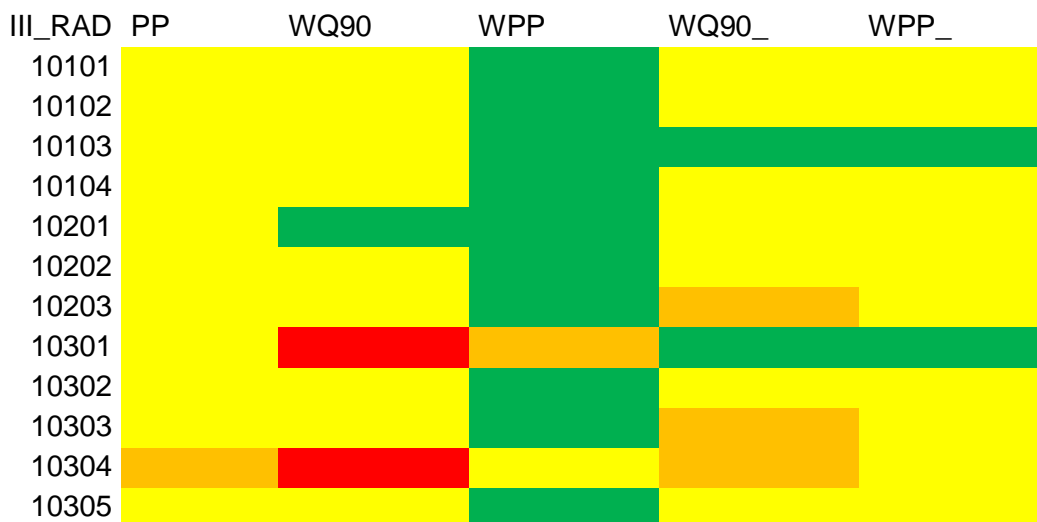
rSCEN2 2071-2100

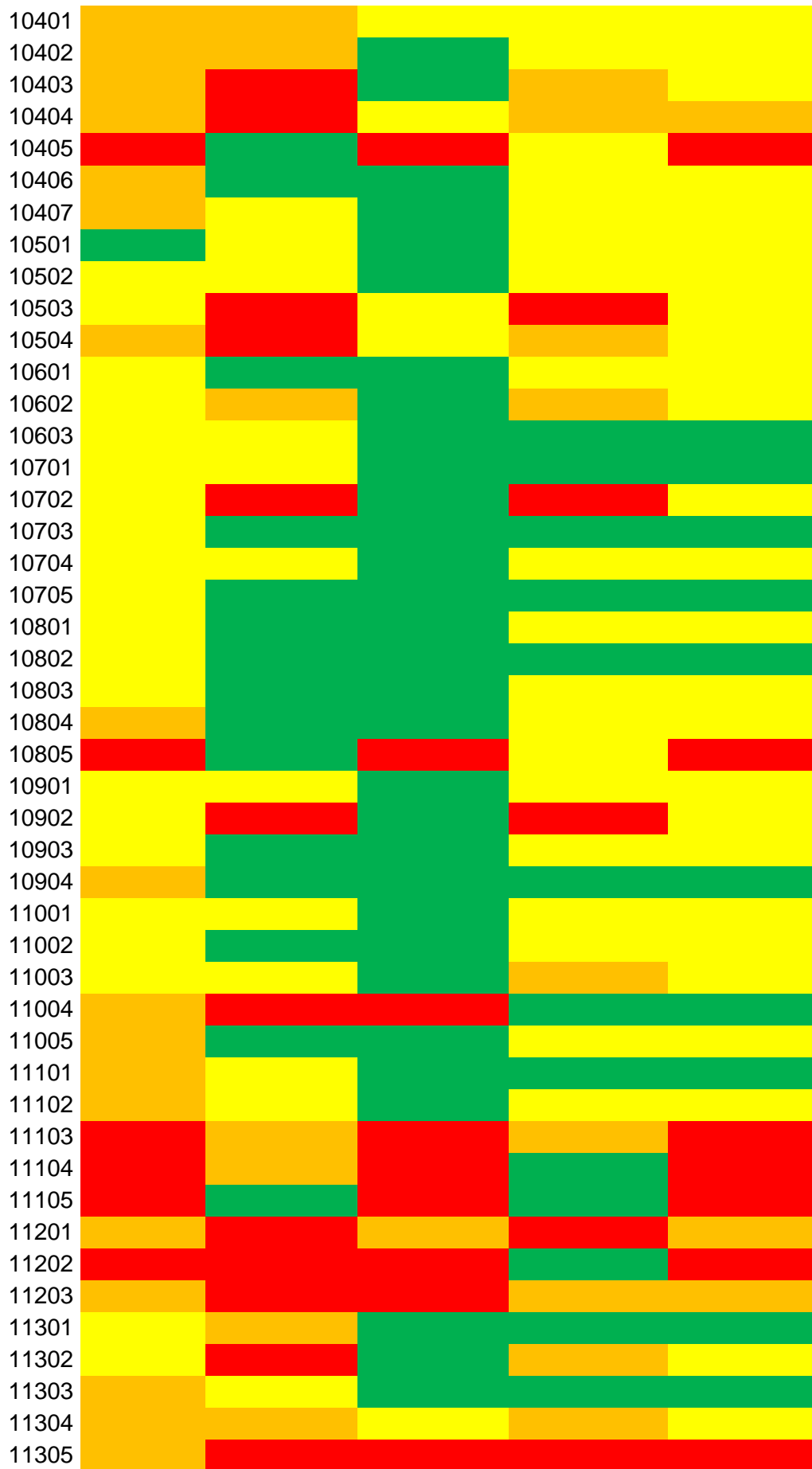






rSCEN3 2021-2050



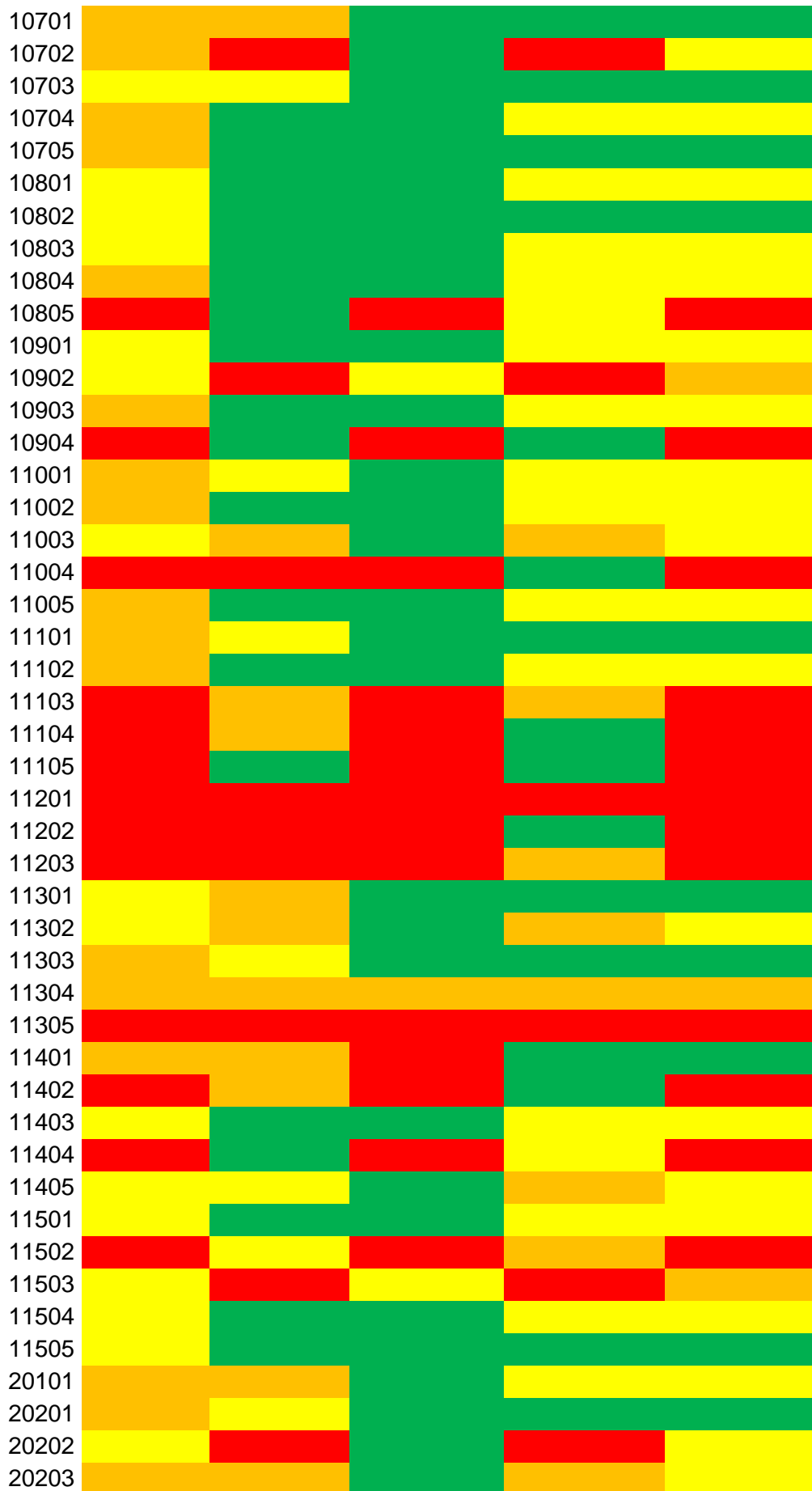






rSCEN3 2071-2100







42108

42109

