

Klimatická změna a vodní zdroje v povodí Vltavy

Ing. Oldřich Novický, Ing. Petr Vyskoč, Bc. Adam Vizina,
Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., Ing. Jiří Pícek

Tato publikace byla zpracována Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, v. v. i., z výsledků výzkumných úkolů financovaných Ministerstvem zemědělství a Ministerstvem životního prostředí. Byly použity informace a podklady poskytnuté státním podnikem Povodí Vltavy.

Lektoroval: Ing. Libor Ansorge

© Oldřich Novický a kolektiv, 2008

ISBN 978-80-85900-79-8

Obsah

Úvod	3
Globální klimatická změna	3
Pozorované změny klimatu	5
Příčiny změn	5
Předpokládané změny klimatu a jejich dopady	5
Možnosti přizpůsobení (adaptace) a zmírnění (mitigace)	6
Vývoj klimatu a odtokových poměrů v ČR	8
Hydrologické modelování dopadů klimatických změn	11
Scénáře klimatických změn pro Českou republiku	11
Model Bilan	12
Postup modelování dopadů klimatické změny na složky hydrologické bilance	13
Postup modelování vodohospodářské bilance	14
Dopady klimatických změn na vodní režim v České republice	16
Příkladová studie – povodí Vltavy	16
Dopady klimatické změny na složky hydrologické bilance	17
Dopady klimatické změny na vodohospodářskou soustavu	22
Závěr	26
Současné projekty řešené ve VÚV T. G. M., v. v. i.	27
Literatura	28

Úvod

Klimatická změna, její dopady na různé oblasti lidských činností a příprava zmírňujících a adaptačních opatření se stávají důležitým předmětem celosvětové politiky, a tedy i politiky v České republice. Vodní hospodářství je podle výsledků výzkumu jednou z oblastí, která může být nejvíce zasažena, a proto by mu měla být věnována prvořadá pozornost.

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka se této problematice dlouhodobě věnuje. S tím, jak jsou postupně zdokonalovány scénáře klimatické změny založené na výsledcích modelování globální cirkulace atmosféry v propojení s modely oceánů, jsou postupně zpracovávána odpovídající modelová řešení hydrologické bilance, odhady změn hydrologického režimu a jeho dopady na vodní zdroje a vodní hospodářství, zejména na zásobování vodou.

V současné době jsou k dispozici regionální scénáře klimatické změny, které jsou zpracovány pro podstatně jemnější plošné rozlišení než předchozí scénáře globální. Ve Výzkumném ústavu vodohospodářském se používají scénáře založené na simulacích regionálními modely HIRHAM a RCOA v rozlišení 50 km x 50 km.

Předložená publikace nejprve stručně shrnuje významné výsledky studií dopadů klimatické změny zpracovaných v rámci činností Mezivládního panelu změny klimatu (IPCC), který byl založen v roce 1988 Světovou meteorologickou organizací (WMO) a organizací Program OSN pro otázky životního prostředí (UNEP). V následujících kapitolách je pozornost věnována shrnutí výsledků studií možných dopadů klimatické změny na hydrologický režim v České republice, jsou uvedeny ukázky již se projevujících dopadů klimatické změny v oblasti meteorologických a hydrologických veličin a na příkladě povodí Vltavy a její vodohospodářské soustavy je ukázán postup a výsledky simulací dopadů klimatické změny na vodní zdroje.

Pro zpracování této publikace byly využity výsledky projektu MZP 0002071101 Posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu povodí Vltavy financovaného Ministerstvem zemědělství a výzkumného záměru Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů, jež je sponzorován Ministerstvem životního prostředí.

Globální klimatická změna

Mezivládní panel změny klimatu (IPCC) je nezávislý vědecko-technický orgán zaměřený na podporu poznání podstaty klimatické změny a hodnocení jejích environmentálních a sociálních důsledků. Tři pracovní skupiny IPCC jsou zaměřené na otázky vědecké podstaty problému, na dopady klimatické změny a na analýzy strategií vedoucích ke zmírnění následků, čtvrtá skupina sleduje přípravu inventur emisí skleníkových plynů. Každá pracovní skupina shrnuje svoje výsledky v dílčích zprávách, které jsou dále zpracovány do výsledné hodnotící zprávy IPCC.

Jedním z činitelů, které se podílí na současné změně klimatu, je zvyšování koncentrace skleníkových plynů. Jejich antropogenní produkce je ovlivněna širokou škálou faktorů – zejména technologickými změnami a socioekonomickým a demografickým vývojem společnosti. Jelikož předpověď vývoje takto komplexního systému je prakticky nemožná, byly Mezivládním panelem pro klimatickou změnu v rámci Speciální zprávy o emisních scénářích (*Special Report on Emissions Scenarios – SRES, 2000*) vytvořeny scénáře produkce skleníkových plynů založené na různých variantách vývoje společnosti. Systém scénářů má čtyři hlavní skupiny označené jako A1, B1, A2, B2 (**obrázek 1**). Základní charakteristiky těchto skupin scénářů jsou následující:

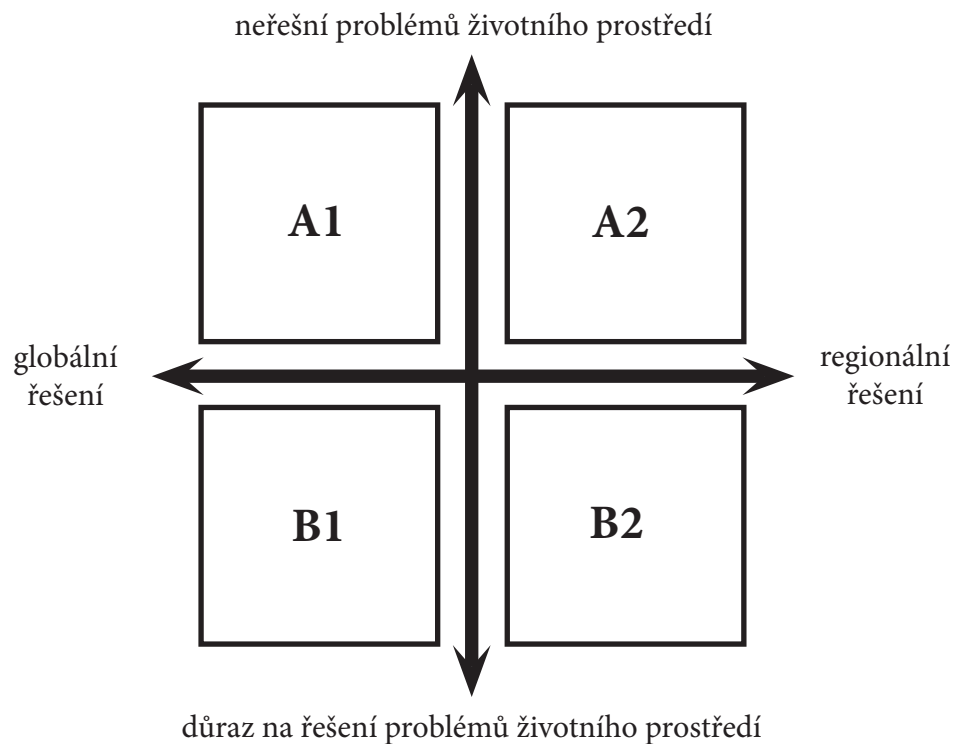
SRES A1 – popisuje svět s velmi rychlým růstem ekonomiky a vývojem nových technologií. Země dosáhne maxima počtu obyvatel v polovině tohoto století.

SRES A2 – scénář uvažující růst populace během celého jednadvacátého století na počet 15 miliard, ekonomiku zaměřenou spíše regionálně a bez většího důrazu na řešení problémů životního prostředí, základní ideou je spoléhat se sám na sebe a zachovat místní identitu.



SRES B1 – má v pozadí ideu konvergentního, stmelujícího se světa, počet obyvatel dosáhne maxima v polovině 21. století (8,7 miliard) a poté bude pozvolna klesat na 7 miliard, předpokládá se rychlý rozvoj informatiky, služeb, zavádění čistých technologií, důraz se klade na globální řešení ekonomických a sociálních problémů a ochranu životního prostředí, růst hrubého domácího produktu není ústřední záležitostí.

SRES B2 – scénář uvažující mírnější růst populace než scénář A2 s důrazem na udržitelný rozvoj společnosti, pomalejší je i ekonomický rozvoj a změny v technologiích jsou různorodější než v A1 a B1.



Obrázek 1 Regionální a globální charakter SRES scénářů a jejich důraz na řešení problémů životního prostředí

V každé skupině scénářů najdeme řadu variant, které popisují a zachycují široké spektrum demografických, ekonomických a technologických možností vývoje společnosti. Žádná skupina scénářů není více ani méně pravděpodobná než ostatní. Na tyto scénáře navazuje velká část v Evropě i jinde ve světě používaných klimatických modelů.

K predikcím slouží tzv. globální klimatické modely (GCM). V mnoha ohledech jsou analogií numerických modelů používaných v předpovědi počasí. Počítačový globální klimatický model je matematickým popisem dějů, které v klimatickém systému probíhají. Zahrnuje nejrůznější jevy ovlivňující klima, chemické a fyzikální procesy, které probíhají v atmosféře, oceánech a krysféře (ledovcích). Rozlišení globálních klimatických modelů je většinou 200–300 km horizontálně, vertikálně je členěn na přibližně 30 vrstev. Menší detaily jsou pod jeho rozlišovací schopností, proto jsou modely schopny zachytit základní rysy klimatu na velkých územích. Na tyto modely navazují regionální klimatické modely (RCM), které mají vyšší rozlišení. Jsou v nich zahrnuty regionální okolnosti ovlivňující klima.

V roce 2007 vydal Mezivládní panel změny klimatu svou Čtvrtou hodnotící zprávu, jejíž obsah lze rozdělit na několik témat, zahrnujících pozorované změny klimatu, příčiny změn, předpokládané změny klimatu a jejich dopady a možnosti přizpůsobení (adaptace) a zmírnění (mitigace).





Pozorované změny klimatu

Jak je v současné době z pozorování globálních průměrných teplot vzduchu a oceánů, rozsáhlého tání sněhu a ledu a zvyšování globální průměrné výšky mořské hladiny zřejmé, klimatický systém se jednoznačně otepluje.

Jedenáct z dvanácti let období 1995–2006 se řadí mezi dvanáct nejteplejších let v záznamech z přístrojových pozorování globální teploty vzduchu. K nárůstu teplot dochází na celé planetě, ve vyšších severních šířkách je tento nárůst větší. Pevninské oblasti se oteplují rychleji než oceány. Oteplování odpovídá i zvyšování hladiny moře cca o 2–3 mm za rok. Též je pozorováno ubývání sněhu a ledu. Družicové údaje ukazují, že se průměrná plocha mořského ledu zmenšila za období deseti let o 2,1–3,3 %. Horské ledovce a sněhová pokrývka se v průměru zmenšily na obou polokoulích. V období let 1900 až 2005 významně vzrostlo množství srážek ve východních částech Severní a Jižní Ameriky, v severní Evropě a severní a střední Asii. V oblasti Sahelu, oblastech Středoziemního moře, jižní Africe a částech jižní Asie naopak množství srážek pokleslo.

Příčiny změn

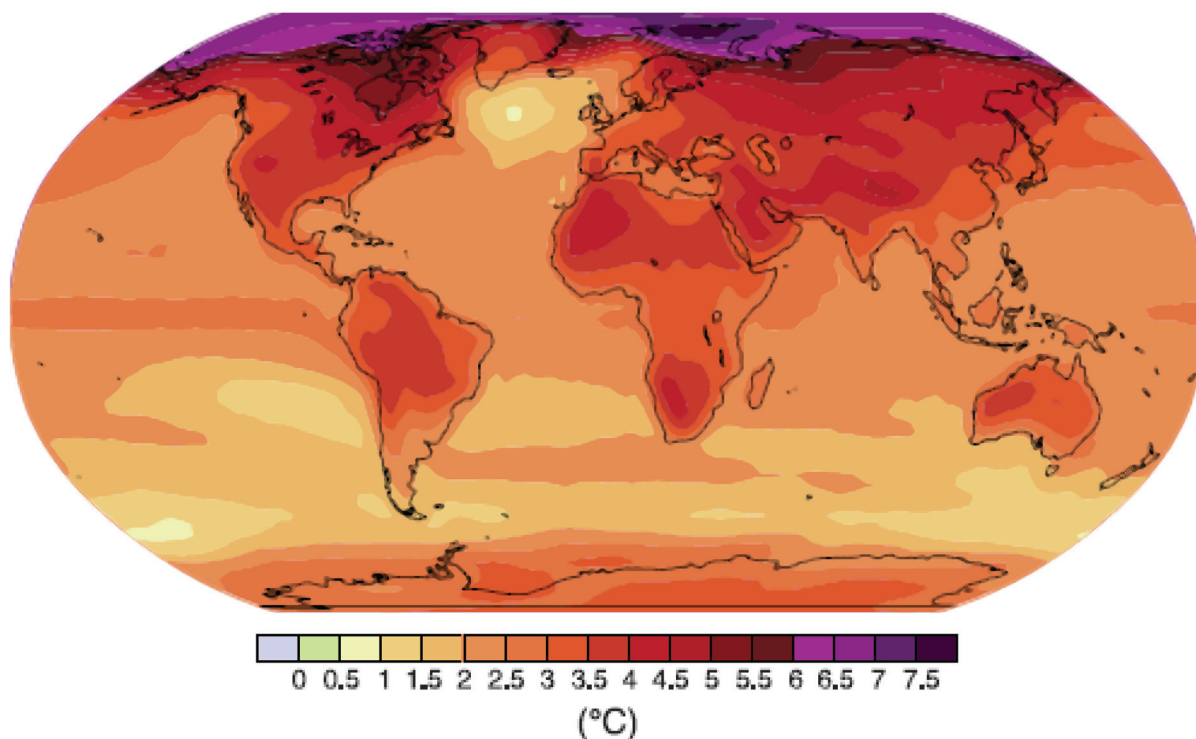
Změny koncentrací skleníkových plynů a aerosolů v atmosféře, krajinného pokryvu a intenzity slunečního záření mění energetickou bilanci klimatického systému. Celosvětově se emise skleníkových plynů způsobené lidskou činností od předindustriální éry zvýšily, v období 1970–2004 vzrostly o 70 %. Za posledních padesát let došlo v průměru na každém kontinentu k významnému oteplení. Nárůst globálně zprůměrovaných teplot kromě Antarktidy pozorovaných od poloviny 20. století je většinou velmi pravděpodobně vyvolán pozorovaným nárůstem koncentrací skleníkových plynů.

Předpokládané změny klimatu a jejich dopady

Zvláštní zpráva IPCC o emisních scénářích (SRES, 2000) předpokládá v období let 2000–2030 vzrůst globálních emisí skleníkových plynů o 25–90 %, přičemž fosilní paliva si do roku 2030 a v dalších letech udrží v globální energetice svou dominantní pozici. Produkce emisí skleníkových plynů v současné či vyšší míře by v průběhu 21. století vyvolala v globálním klimatickém systému mnoho změn, které by byly velmi pravděpodobně větší než změny pozorované ve 20. století. Tyto změny zahrnují:

- oteplování – největší nad pevninou v severních šířkách a nejmenší nad jižním oceánem a částmi severního Atlantického oceánu (**obrázek 2**),
- zmenšování rozsahu sněhové pokrývky, tání do větších hloubek v oblastech permafrostu a zmenšování objemu mořského ledu,
- velmi pravděpodobné zvýšení výskytu jevů, jako jsou extrémní horka, vlny vysokých teplot a silné srážky,
- zvýšení intenzity tropických cyklon,
- zvýšení srážek ve vyšších zeměpisných šířkách a snížení srážek ve většině subtropických pevninských regionů, čímž budou pokračovat nyní pozorované trendy.

Prostorové rozložení nárůstu přízemních teplot vzduchu



Obrázek 2 Projekce změn povrchových teplot pro konec 21. století (2090–2099); mapa znázorňuje průměrnou projekci několika modelů, všechny teploty jsou brány oproti období 1980–1999 (IPCC, 2007)

Možnosti přizpůsobení (adaptace) a zmírnění (mitigace)

Je celá řada možností, jak lze na základě mezinárodní spolupráce snížit celosvětové emise skleníkových plynů. Významným úspěchem v této oblasti je Rámcová úmluva a její Kjótský protokol a na ni navazující celosvětová odezva na změnu klimatu, stimulování řady národních politik a vznik nového mezinárodního trhu pro obchod s emisními limity.

Existuje i široká škála možností přizpůsobení, ovšem ke snížení zranitelnosti vůči klimatické změně je zapotřebí rozsáhlejší adaptace, než jaká v současnosti probíhá. Existují určité bariéry, omezení a náklady, které nejsou snadno řešitelné. Schopnost adaptace úzce souvisí se sociálním a hospodářským rozvojem a je nerovnoměrně rozdělena mezi jednotlivými společnostmi i uvnitř nich samotných. V **tabulce 1** jsou uvedeny jednotlivé příklady plánovaného přizpůsobení pro jednotlivé sektory.

Tabulka 1 Vybrané příklady plánovaného přizpůsobení klimatické změně podle jednotlivých sektorů (Zdroj: IPCC, 2007)

Sektor	Možnost / strategie přizpůsobení	Základní rámec politiky	Klíčová omezení a příležitosti implementace
Voda	Rozšířené využívání dešťové vody; techniky skladování a ochrany vody; recyklace vody; odsolování vody; efektivita zavlažování a využívání vody.	Národní vodohospodářské politiky a integrovaný systém správy vodních zdrojů; řízení rizik spojených s vodou.	Finanční, personální a fyzické překážky; integrovaný systém správy vodních zdrojů; synergie s ostatními sektory.

Tabulka 1 Vybrané příklady plánovaného přizpůsobení klimatické změně podle jednotlivých sektorů (Zdroj: IPCC, 2007) – pokračování

Sektor	Možnost / strategie přizpůsobení	Základní rámec politiky	Klíčová omezení a příležitosti implementace
Zemědělství	Přizpůsobení termínů výsadby a odrůd plodin; přemísťování plodin; kvalitnější hospodaření, např. protierozní opatření a ochrana půdy výsadbou stromů.	Politiky výzkumu a vývoje; institucionální reforma; držba půdy a půdní reforma; vzdělávání; budování kapacit; pojištění plodin; finanční pobídky, např. dotace a daňové úlevy.	Technologická a finanční omezení; přístup k novým odrůdám; trhy; delší vegetační období ve vyšších zeměpisných šířkách; příjmy z „nových“ produktů.
Infrastruktura/ sídla (včetně pobřežních oblastí)	Přemísťování; mořské hráze a zábrany proti vysoké hladině během bouří; zpevnění dun; akvizice půdy a vytváření mokřadů coby nárazníkových pásem jako ochrany proti zvýšené hladině moře a záplavám; ochrana stávajících přírodních bariér.	Normy a předpisy, které berou ohledy na změnu klimatu při zpracování návrhů (infrastruktury/ sídel); politiky využití půdy; stavební zákony; pojištění.	Finanční a technologické překážky; dostupnost prostorů pro účely přemísťování; integrované politiky a řízení; synergie s cíli udržitelného rozvoje.
Lidské zdraví	Zdravotnické akční plány pro případ vln veder; pohotovostní lékařské služby; kvalitnější dohled v oblasti chorob reagujících na klimatické situace; nezávadná voda a zlepšená hygiena.	Politiky veřejného zdraví zohledňující klimatická rizika; posílení zdravotnických služeb; regionální a mezinárodní spolupráce.	Limity odolnosti lidského zdraví (zranitelné skupiny); omezené znalosti; finanční možnosti; kvalitnější zdravotnické služby; vyšší kvalita života.
Cestovní ruch	Diverzifikace turistických atrakcí a příjmů; posun lyžařských sjezdových tratí do vyšších nadmořských výšek a na ledovce; výroba umělého sněhu.	Integrované plánování (např. kapacita zatížení prostředí; vazby na jiné sektory); finanční pobídky, např. dotace a daňové úlevy.	Působivost/marketing nových atrakcí; finanční a logistická problematika; možné nepříznivé dopady na jiné sektory (např. umělé zasněžování může zvýšit spotřebu energie); příjmy z „nových“ atrakcí; zapojení širší skupiny zainteresovaných stran.
Doprava	Reorganizace/přesun; navrhování norem a plánování silniční, železniční a jiné infrastruktury s cílem zohlednit oteplování .	Zahrnutí aspektů klimatických změn do národní dopravní politiky; investice do výzkumu a vývoje pro účely zvláštních situací, např. oblastí věčně zmrzlé půdy.	Finanční a technologické překážky; existence méně zranitelných tras; kvalitnější technologie a harmonizace s klíčovými sektory (např. energetika).
Energetika	Posílení infrastruktury pro přenos a distribuci elektřiny; podzemní kabelové ozvody; efektivní využívání energie; využívání obnovitelných zdrojů; nižší závislost na jednotlivých zdrojích energie.	Národní energetické politiky a předpisy, daňové a finanční pobídky s cílem podpořit využívání alternativních zdrojů; zohlednění změny klimatu ve standardech pro design.	Přístup k realizovatelným alternativám; finanční a technologické překážky; přijímání nových technologií; stimulace nových technologií; využívání lokálních zdrojů.

Vývoj klimatu a odtokových poměrů v ČR

Vývoj klimatu a odtokových poměrů v České republice je v následujících odstavcích ukázán na příkladu hodnocení změn základních meteorologických veličin a prvků hydrologické bilance v období 1980–2006 pro povodí Vltavy po profil vodoměrné stanice Praha-Chuchle (plocha povodí 26 730,7 km²). Pro tento účel byly použity řady měsíčních hodnot, které vycházejí z pozorovaných údajů (průtoky, srážky, teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu), nebo – protože je nelze přímo měřit (výpar) – byly vypočteny pomocí modelu chronologické hydrologické bilance Bilan (Tallaksen, Van Lanen, 2004).

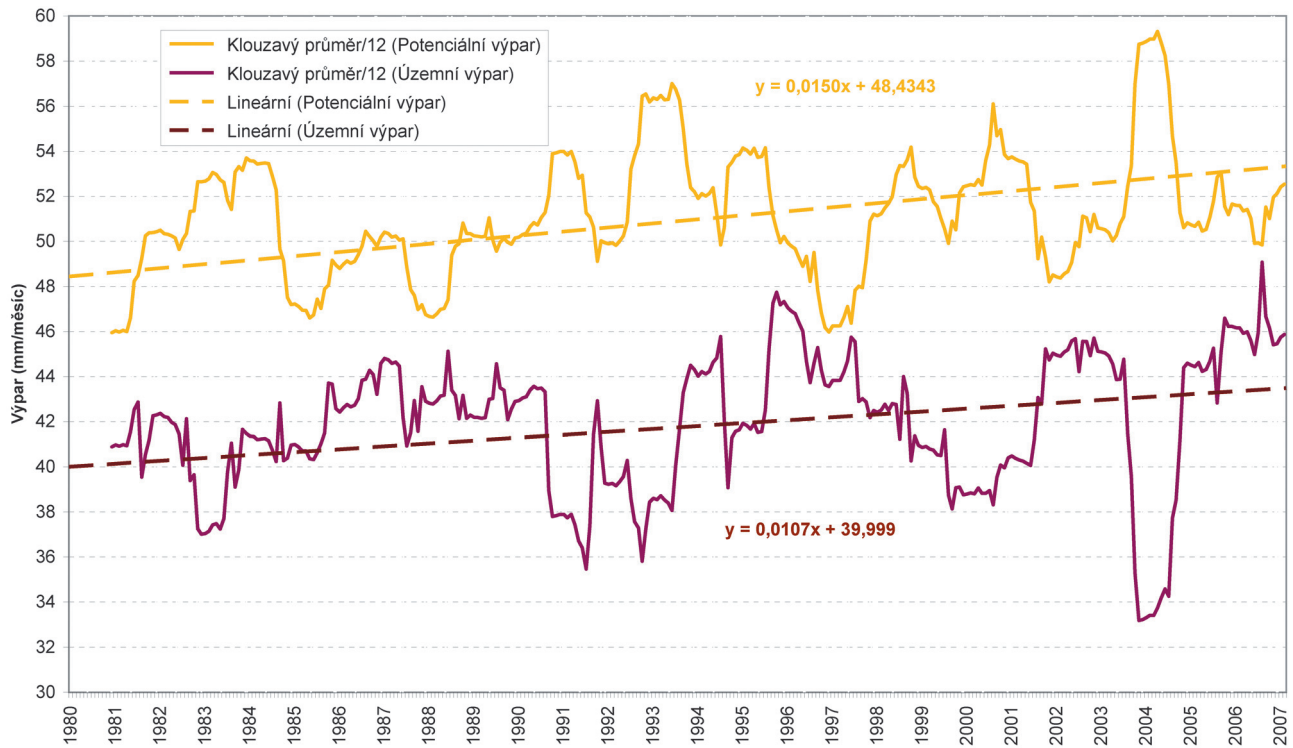
Posouzení vývoje klimatu bylo založeno na výpočtu lineárních trendů v uvažovaných časových řadách v období 1980–2006. Lineární trendy byly doplněny o časový průběh posuzované veličiny vyhlazený metodou klouzavých průměrů.

Nejpodstatnější změnou meteorologické veličiny je zvyšování průměrné teploty na povodí. Podle proloženého lineárního trendu by zvýšení teploty za posledních 27 let vyšlo na 1,42 °C. Při vyhlazení řady měsíčních teplot pomocí klouzavých průměrů za 10 let (120 měsíců) dospějeme k poznatku, že je zvýšení teploty v posledním desetiletí oproti prvnímu desetiletí posuzovaného období přibližně 0,8 °C (**obrázek 3**). Zvyšování průměrné teploty vzduchu je hlavní příčinou toho, že vzestupný trend má i potenciální výpar (většinou označovaný termínem potenciální evapotranspirace). Jednou z dalších meteorologických veličin, která jej ovlivňuje, je vlhkost vzduchu. Relativní vlhkost vzduchu se v posledních desetiletích mírně zmenšovala. Je zřejmé, že čím je vzduch sušší, tím více vody se může vypařit. Když posuzujeme povodí Vltavy jako celek, můžeme konstatovat, že ke zvětšení potenciálního výparu menší měrou přispívá také pokles vlhkosti vzduchu.

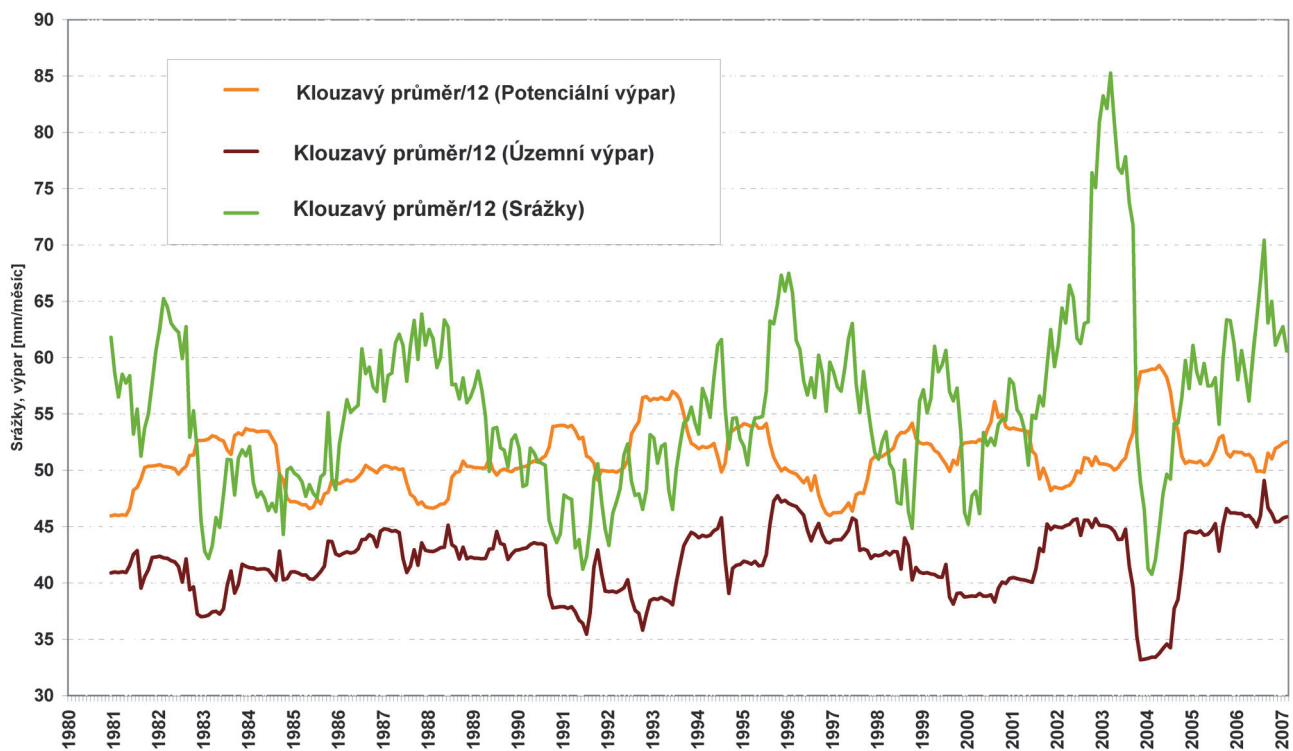


Obrázek 3 Klouzavé průměry za 10 let (120 měsíců) vypočtené z řady průměrných měsíčních teplot vzduchu na povodí Vltavy

Vzestupný trend potenciálního výparu ukazuje graf na **obrázku 4**. Skutečné množství vody, které se z povodí vypaří (územní výpar), je v průměru podstatně menší než potenciální výpar, což je způsobeno tím, že na podstatné části povodí není po poměrně dlouhé časové úseky pro výpar dostatek vody. Zásoba vody v půdě i voda zachycená vegetací je doplňována z atmosférických srážek. Výskyt atmosférických srážek na povodí je silně nerovnoměrný jak v čase, tak na ploše povodí.



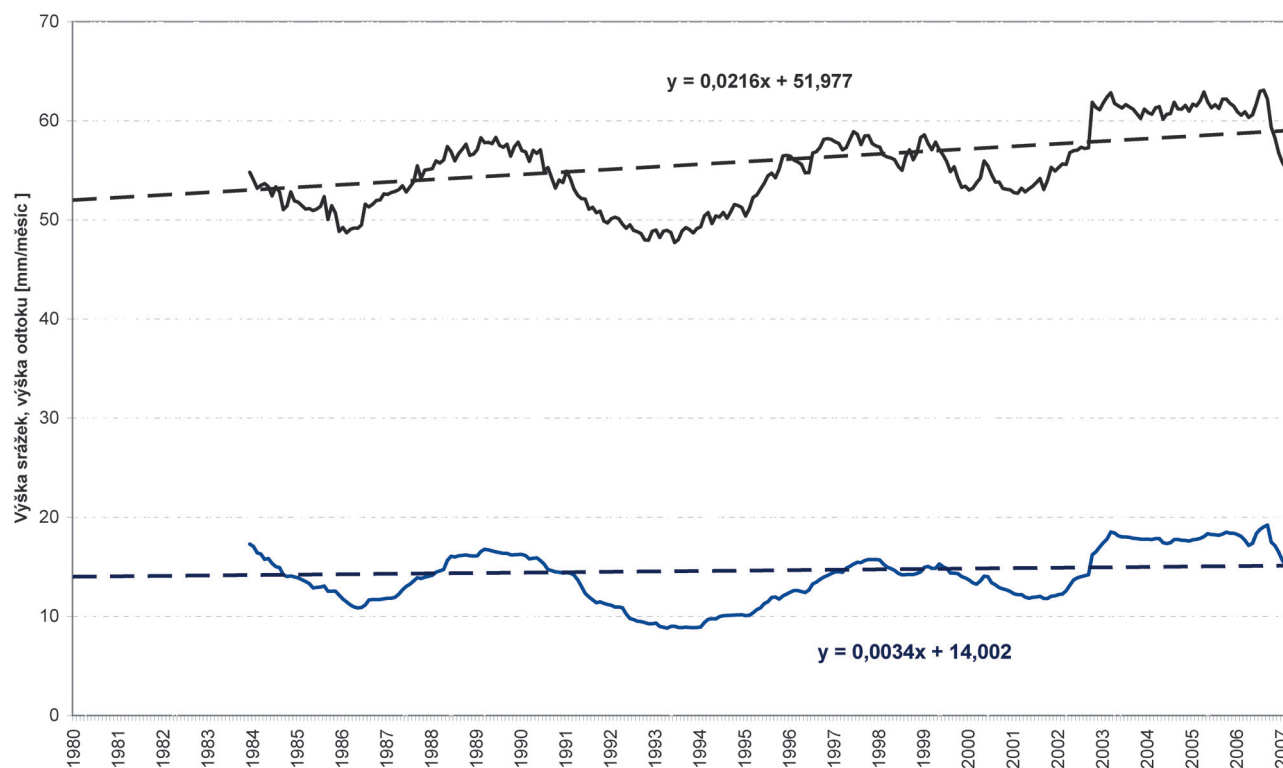
Obrázek 4 Klouzavé průměry za 10 let (120 měsíců) a lineární trend měsíčních řad potenciálního výparu a územního výparu na povodí Vltavy



Obrázek 5 Klouzavé průměry za 12 měsíců z měsíčních řad potenciálního výparu, územního výparu a srážek na povodí Vltavy

Časový průběh územního výparu je proto z podstatné míry závislý také na časovém průběhu srážek. Ukazuje to **obrázek 5**, na kterém jsou vyneseny klouzavé průměry za 12 měsíců z měsíčních řad potenciálního výparu, územního výparu a srážek. Časový průběh územního výparu je proto podstatně podobnější průběhu srážek, než průběhu potenciální evapotranspirace.

Není proto překvapením, že vliv zvyšování teploty se na průběhu územního výparu projevuje méně než na průběhu teoretického potenciálního výparu. Skutečný výpar je na většině plochy povodí limitován množstvím vody, které je pro něj k dispozici.



Obrázek 6 Lineární trend a klouzavé průměry za 48 měsíců z měsíčních řad srážek a odtoku pro povodí Vltavy

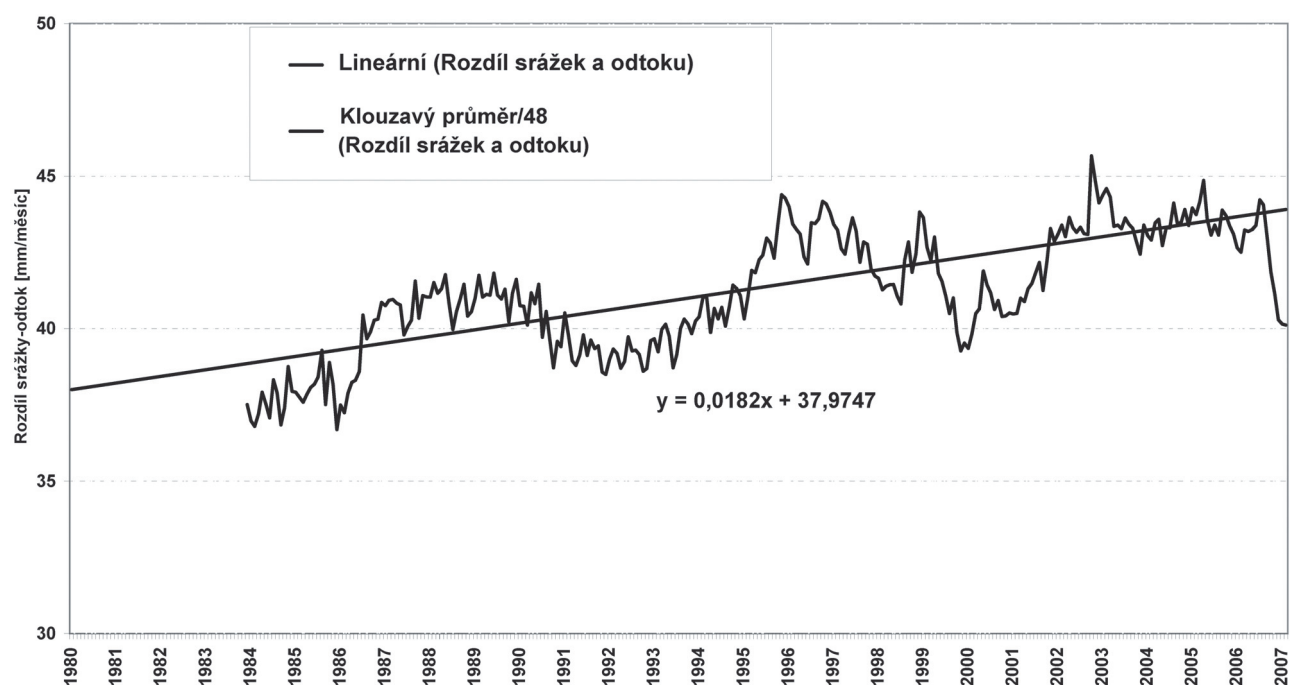
Pro vývoj odtoku je nejpodstatnější průběh srážek. Ty měly v posuzovaném období vzestupný trend. Dlouhodobý průběh odtoku je podobný průběhu srážek. Vliv zvyšující se teploty a jím způsobený vzestup potenciálního výparu byl přibližně rovnocenný vzestupu srážek, a proto se odtok významně nezvětšoval. Zřetelně to ukazuje **obrázek 6**, na kterém je vynesena časový průběh srážek a odtoků prostřednictvím klouzavých průměrů za 48 měsíců (4 roky).

Vlivem zvyšování teploty vzduchu se však očividně zvětšuje rozdíl srážek a odtoku. Když gradient uvedený na **obrázku 7** použijeme na odhad změny veličiny (srážky-odtok) pro oteplení o 1 °C, získáme hodnotu poklesu ročního odtoku přibližně 50 mm, což odpovídá zmenšení průměrné roční výšky odtoku o 28 %. Pokud pro obdobný výpočet použijeme průběh klouzavých průměrů, získáme poněkud menší odhad – zmenšení průměrné roční výšky odtoku o 22 %. Je pravděpodobné, že kdyby se nezvětšovaly srážky, byl by gradient nárůstu veličiny (srážky-odtok) ještě poněkud menší.

Výše uvedené výsledky ukazují, že v povodí Vltavy jako celku byl prozatím vliv oteplení kompenzován nárůstem srážek, a nenastal proto pokles průměrných průtoků. Pokud se však nebudou při předpokládaném pokračujícím oteplování srážky nadále zvětšovat, budou průtoky v důsledku oteplení významně klesat.

Je velmi pravděpodobné, že vliv oteplení na změnu hydrologické bilance se v některých dílčích částech povodí Vltavy projevil poněkud odlišně. Z hlediska poklesu odtoku jsou nejcitlivější oblasti

s malými dlouhodobými úhrny srážek. V povodí Vltavy lze jako příklad uvést povodí Rakovnického potoka, kde průtoky mají klesající tendenci.



Obrázek 7 Lineární trend a klouzavé průměry za 48 měsíců z měsíčních řad rozdílů mezi srážkami a odtokem pro povodí Vltavy

Hydrologické modelování dopadů klimatických změn

Scénáře klimatických změn pro Českou republiku

Významným evropským projektem pracujícím s emisními scénáři SRES (viz kapitolu Globální klimatická změna) je projekt PRUDENCE, jenž je společným projektem pětadvaceti evropských institucí zabývajících se modelováním klimatu a jeho změn, jehož cílem je zpřístupnit výsledky klimatických modelů s velkým prostorovým rozlišením a vypracovat metodiku odhadu nejistot klimatických modelů. V rámci tohoto projektu jsou k dispozici výsledky běhů většího množství modelů, z nichž dva byly podkladem k vytvoření scénářů pro Českou republiku pro období let 2071–2100.

Scénáře změny klimatu pro Českou republiku byly vytvořeny v roce 2005 na Matematicko-fyzikální fakultě Karlovy univerzity. Tyto scénáře vycházejí z výsledků běhů regionálních klimatických modelů HIRHAM a modelu RCAO pro roky 2071–2100 při uvažovaném vývoji podle emisních scénářů SRES A2 a SRES B2 a udávají v prostorovém rozlišení cca 50 x 50 km (tj. 51 bodů v případě modelu HIRHAM a 49 bodů pro RCAO) změny teploty, srážkových úhrnů a teploty rosného bodu v denním časovém kroku pro celou Českou republiku.

Model HIRHAM (Christensen and van Meijgaard, 1992; Christensen et al., 1996) odvozený z numerického predikčního modelu na omezené oblasti nazvaného HIRLAM (Machenbauer, 1988; Gustafsson, 1993) byl vyvinut v rámci společného projektu národních meteorologických služeb Dánska, Finska, Irska, Holandska, Norska, Švédska, Španělska a Islandu. Jako okrajové podmínky mu slouží výstupy globálního cirkulačního modelu ECHAM vyvíjeného v Max-Planck Institute v Hamburku.

Na výstupech tohoto modelu se výrazně podílejí lokální geografické podmínky, velikost změn meteorologických veličin je zpravidla výrazně ovlivněna nadmořskou výškou.

Model RCAO (Döscher et al., 2002) je model Rossbyho centra ve Švédsku, skládá se z regionálního atmosférického modelu RCA (Rummukainen et al., 2001; Jones et al., 2004) a regionálního oceánického modelu RCO (Meier et al., 2003). Simulace modelu vycházejí z předpovědí globálního klimatického modelu HadAM3H britského Hadley centra. Chod tohoto modelu je řízen zejména prouděním mezi oceánem a kontinentem – meteorologické veličiny se zpravidla mění s gradienty procházejícími od západu k východu napříč naší republikou.

Kombinací dvou uvedených klimatických modelů a emisních scénářů SRES A2 a SRES B2 vznikly čtyři scénáře změny klimatu. Scénář označovaný HIRHAM-A2 odpovídá předpovídané nejvýraznější změně klimatu, scénáře HIRHAM-B2 a RCAO-A2 reprezentují zhruba střed klimatické změny a scénář RCAO-B2 reprezentuje v použitém výběru scénářů nejmenší změnu klimatu oproti současnosti. Příslušnost jednotlivých variant ke klimatickým modelům a emisním scénářům ukazuje **tabulka 2**.

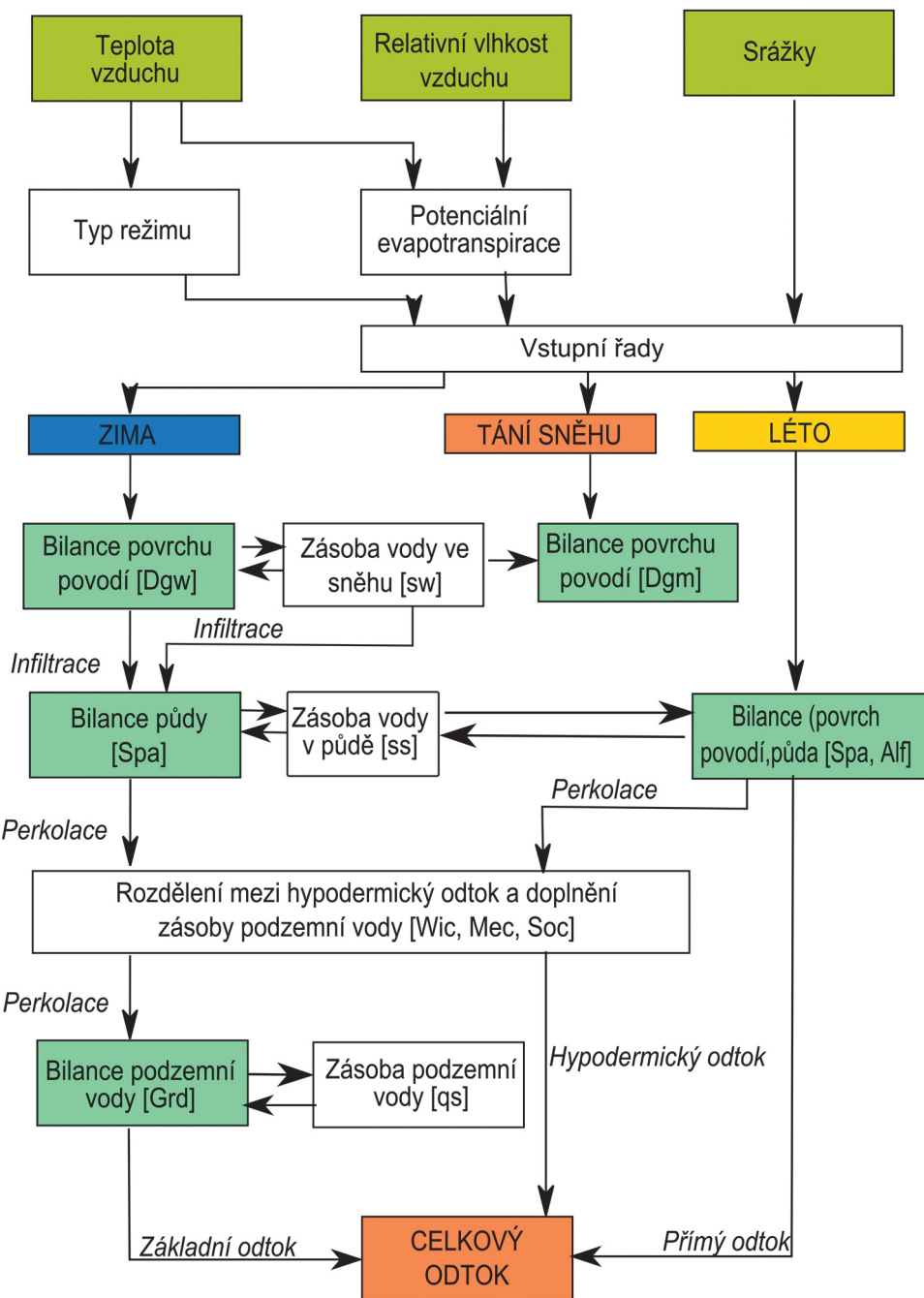
Tabulka 2 Scénáře klimatických změn pro Českou republiku

Scénář (2085)	Původ
HIRHAM-A2 pesimistický	Regionální klimatický model HIRHAM podle emisního scénáře SRES A2
HIRHAM-B2 střední	Regionální klimatický model HIRHAM podle emisního scénáře SRES B2
RCAO-A2 střední	Regionální klimatický model RCAO podle emisního scénáře SRES A2
RCAO-B2 optimistický	Regionální klimatický model RCAO podle emisního scénáře SRES B2

Model Bilan

K modelování hydrologické bilance se používá model Bilan vyvinutý podle dlouholetých zkušeností ve VÚV T. G. M. Model Bilan byl ověřen na desítkách povodí z ČR i dalších evropských států a používají jej i některá zahraniční pracoviště. Podrobně je popsán v publikaci Tallaksen and Lanen (2004), kde je k dispozici v elektronické podobě na CD.

Model počítá v měsíčním kroku chronologickou hydrologickou bilanci povodí či území. Vyjadřuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí, v zóně aerace, do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí, a v zóně podzemní vody. Jako ukazatel bilance energie, která hydrologickou bilanci významně ovlivňuje, je použita teplota vzduchu. Výpočtem se modeluje potenciální evapotranspirace, územní výpar, infiltrace do zóny aerace, průsak touto zónou, zásoba vody ve sněhu, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody. Odtok je modelován jako součet tří složek: dvě složky přímého odtoku (zahrnující i hypodermický odtok) a základní odtok. Vstupem do modelu jsou měsíční srážkové úhrny [mm], měsíční průměrné teploty [°C] a průměrné měsíční vlhkosti vzduchu [%]. Řada průměrných měsíčních výšek odtoku v závěrovém profilu povodí [mm] se používá pro kalibraci parametrů modelu. Schéma modelu Bilan je ukázáno na **obrázku 8**.



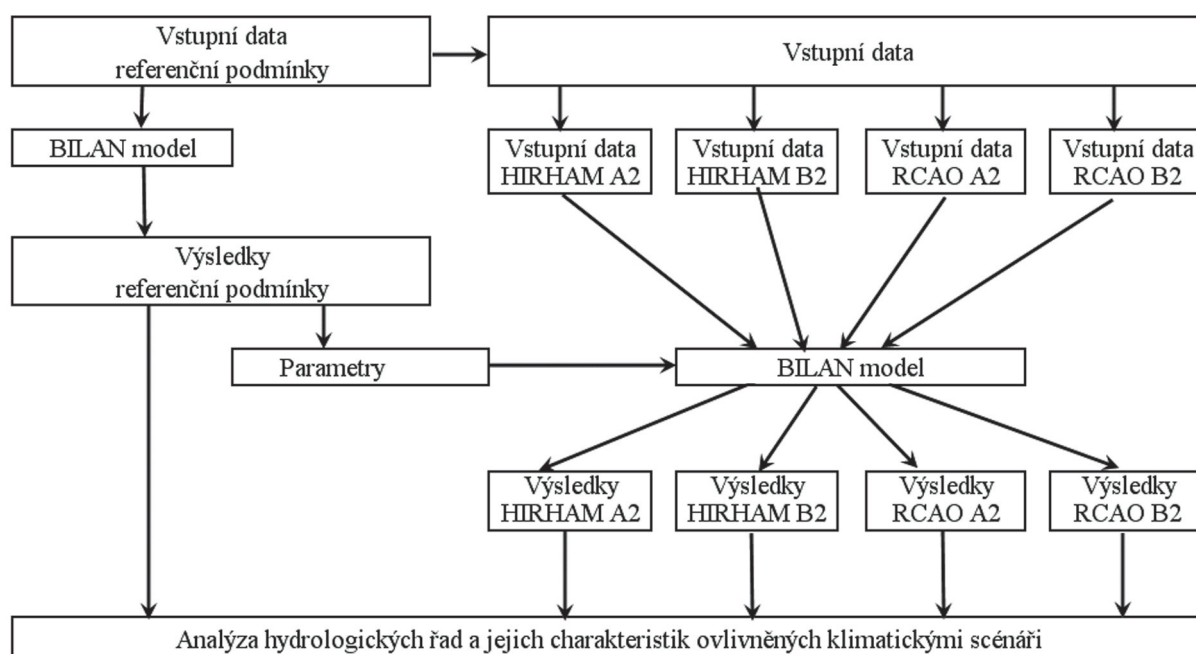
Obrázek 8 Schéma modelu chronologické hydrologické bilance Bilan (v měsíčním kroku)

Postup modelování dopadů klimatické změny na složky hydrologické bilance

Pro modelování hydrologické bilance ovlivněné změnou klimatu jsou vstupem do modelu Bilan časové řady meteorologických veličin (srážky, teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu), které se pro jednotlivá povodí vypočítají prostřednictvím klimatických scénářů. Předpokládá se, že se parametry modelu Bilan, které jsou odvozeny ze simulací pro nezměněné klimatické podmínky, nemění, a jsou tedy použity pro simulace hydrologické bilance pro meteorologické veličiny ovlivněné změnou klimatu. Tím získáme jednotlivé složky hydrologické bilance (potenciální evapotranspirace, územní výpar, doplňování zásob podzemní vody, zásoby vody ve sněhu, v půdě a v podzemní vodě a celkový odtok tvořený součtem povrchového odtoku, podpovrchového odtoku a odtoku podzemní vody do toků) pro uvažované scénáře klimatické změny, které pak můžeme porovnat s bilančními prvky

odvozenými pro nezměněné klimatické podmínky. Simulované řady celkového odtoku jsou pak vstupem do modelu vodohospodářské soustavy.

Postup výpočtu hydrologických řad ovlivněných klimatickou změnou je znázorněn na **obrázku 9**.



Obrázek 9 Schéma postupu výpočtu hydrologických řad ovlivněných klimatickou změnou

Postup modelování vodohospodářské bilance

Vodohospodářská bilance je složkou vodní bilance, jejímž účelem je porovnání požadavků na odběry povrchové a podzemní vody a vypouštění odpadních vod s využitelnou kapacitou vodních zdrojů z hledisek množství a jakosti vody a jejich ekologického stavu.

Pro účely zpracování vodohospodářské bilance výhledového stavu (tj. pro bilanci k určité výhledové časové úrovni) množství povrchových vod byla ve VÚV T. G. M., v. v. i., navržena a vyvinuta metoda simulačního modelování, konkrétně simulační model zásobní funkce vodohospodářské soustavy. Na reálné oblasti povodí je vymezena vodohospodářská soustava, tj. provede se výběr prvků, které charakterizují chování soustavy z hlediska množství povrchových vod.

Jde o prvky/profilu:

- plnicí funkci regulace odtoku (vodní nádrže a převody vody),
- s vlivem/požadavkem na zdroje vody (odběry a vypouštění vody, zajištění minimálních průtoků, hladin apod.),
- plnicí kontrolní funkci (hodnocení vlivu užívání vody na průtokový režim),
- s údaji o hydrologických hodnotách (vodoměrné stanice).

V simulačním modelu je reálná soustava reprezentována pouze významnými profily. Vliv ostatních prvků je přiřazen k profilům soustavy agregován.



Simulační model simuluje chování soustavy v diskrétních časových krocích na základě znalosti časových řad přirozených průtoků (neovlivněných regulací a odběry/vypouštění vody), požadavků užívání vody, technických parametrů prvků soustavy (kapacit vodních nádrží a převodů vody) a do modelu zavedených pravidel regulace odtoku (tzv. manipulačních pravidel). 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 jde o aplikaci statického popisného simulačního modelu. Model simuluje zásobní funkci soustavy v průběhu délky hydrologické řady.

Bezprostředními výstupy simulace jsou časové řady aktivit (tj. ovlivněných průtoků, odběrů a vypouštění, mezidobých zásob vody v nádržích) v profilech soustavy. Výstupní časové řady jsou dále statisticky zpracovány (pravděpodobnosti zabezpečení požadavků na užívání vody či minimálních průtoků, pravděpodobnostní pole překročení hladin v nádržích, čáry překročení přirozených a ovlivněných průtoků apod.) a následně je vyhodnocen bilanční stav v jednotlivých profilech soustavy.

Kritéria pro hodnocení zabezpečení požadavků na užívání vody a zachování minimálních průtoků vycházejí z ČSN 75 2405. Vzhledem k pravděpodobnostnímu charakteru přirozeného hydrologického režimu je jako základní ukazatel pro určení bilančních stavů uvažována zabezpečenosť podle trvání (délka období po kterou jsou požadavky zajištěny vyjádřená v procentech délky celého posuzovaného období). Doporučené hodnoty zabezpečenosť podle trvání dob závisí na třídě významnosti užívání (A až D) a jsou stanoveny v rozsahu 95,0 až 99,5 %.

Pro vyjádření bilanční napjatosti (míry zajištění požadavků) jsou na základě výše uvedených kritérií definovány tři bilanční stavy, uvedené v **tabulce 3**.

Tabulka 3 Tři bilanční stavy podle kritérií míry zajištění požadavků

	Bilanční stav	Zajištění požadavků
	Aktivní	plné (bezporuchové) zajištění požadavků
	Vyvážený	požadavky nejsou zajištěny v plné míře, ale jsou zabezpečeny v souladu s ČSN 75 2405
	Pasivní	požadavky nejsou zabezpečeny v souladu s ČSN 75 2405

Vývoj metodických postupů a nástrojů pro sestavování vodohospodářské bilance a řešení vodohospodářských soustav má ve VÚV T. G. M., v. v. i., dlouholetou tradici. V současné době je rovněž součástí prací v rámci výzkumného záměru Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí financovaného Ministerstvem životního prostředí.

Simulační model zásobní funkce vodohospodářské soustavy byl v letech 2005–2006 aplikován při zpracování vodohospodářské bilance současného a výhledového stavu pro oblasti povodí horní Vltavy, Berounky a dolní Vltavy. V následujícím roce byl model rovněž využit pro posouzení dopadů klimatických změn na tyto oblasti povodí. Sem patří i projekt Posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu povodí Vltavy (objednavatelem bylo Ministerstvo zemědělství), jehož výsledky byly použity pro zpracování příkladové studie uvedené v této publikaci.



Dopady klimatických změn na vodní režim v České republice

Výsledky studií zaměřených na klimatickou změnu a její dopady v České republice ukázaly (Kašpárek aj., 2006), že změny teploty odvozené z regionálních modelů klimatické změny (časový horizont 2085) jsou během roku značně proměnlivé, nicméně všechny uvažované scénáře se shodují v maximálním oteplení v srpnu, a to v rozmezí 5–7 °C, minimální oteplení připadá na období leden–březen (1–4 °C). Liší se také rozdíly mezi odhadovanými maximálními a minimálními průměrnými měsíčními teplotami, které jsou v měsících leden a únor většinou přes 10 °C, zatímco v srpnu je tento rozdíl zpravidla do 5 °C.

Podle různých klimatických modelů se na našem území nepředpokládá zásadní změna v ročních srážkových úhrnech. Nicméně z hlediska odtoku je velmi významnou skutečností předpokládaná změna ročního chodu srážek. Pro odhad změny srážkových úhrnů na našem území je typické výrazné zvýšení srážkových úhrnů v zimních měsících (prosinec–březen) o 20 až 50 % a stejně tak jejich výrazné snížení v letních měsících (červen–září) v rozmezí 20 až 50 %.

Odtok pro referenční rok 2085 (referenční rok reprezentuje období 2071–2100, pro které byly simulovány scénáře klimatické změny) a jednotlivé scénáře je nejvíce ovlivněn rozložením srážek v průběhu roku, změnou teploty vzduchu a teploty rosného bodu. Průměrná roční výška odtoku je po klimatické změně nižší než v současnosti a liší se podle jednotlivých scénářů – u HIRHAM A2 (pesimistický) poklesne přibližně o 40 % a u RCAO B2 (optimistický) o 10–15 %.

V průběhu roku průtok poklesne podle všech scénářů s výjimkou období prosinec až únor, což je důsledkem prosincového zvýšení srážkových úhrnů a zvýšení teplot do té míry, že na většině modelovaných stanic je průměrná teplota záporná pouze v lednu nebo vůbec neklesne pod bod mrazu. Nedochozí tak k výraznějšímu zadržení vody ve sněhové pokrývce, což se projeví ve zvýšení odtoku nad současné hodnoty, nebo nebude pokles tak výrazný. S tím souvisí na některých modelovaných profilech výrazné snížení odtoku v dubnu, způsobené posunem období tání sněhu směrem k zimním měsícům. Vlivem zvýšené teploty vzduchu, změnou teploty rosného bodu, poklesem srážkového úhrnu a nárůstem evapotranspirace (výparu) klesá odtok drasticky v měsících duben až listopad pro všechny uvažované scénáře, zejména pro HIRHAM A2, kde jsou hodnoty měsíčních průměrů odtoku velmi často pod 50 % hodnot pro neovlivněné podmínky. Ale i u optimistického scénáře RCAO B2 v období duben–listopad jsou měsíční minima velmi nízká. Hrozí nebezpečí, že průtoky nebudou dosahovat minimálních zůstatkových průtoků, které jsou stanoveny vodoprávními úřady.

Příkladová studie – povodí Vltavy

V povodí Vltavy (Novický a kol., 2007) byla modelována hydrologická a vodohospodářská bilance pro období let 2071–2100 s referenčním rokem 2085 modelem Bilan a modelem vodohospodářské soustavy, a to pro 53 profilů vodoměrných stanic a 27 profilů vodních nádrží (**tabulky 4 a 5**) s použitím scénářů klimatické změny SRES A2 a SRES B2 (viz kapitolu Scénáře klimatických změn pro Českou republiku).

Pro přípravu průtokových a klimatologických řad v těchto profilech byla pro většinu z nich dostupná meteorologická i hydrologická data z období 1980–2006. Průtokové řady bylo možné pokládat za neovlivněné, neboť byly přepočítány na neovlivněný stav pomocí údajů o manipulacích na příslušných vodních nádržích, odběrech a vypouštění vody.

Chybějící řady byly dopočítány pomocí plošné korelace s ostatními srážkovými stanicemi v případě srážkových dat, lineární regresí v případě teploty a relativní vlhkosti vzduchu, popřípadě průtoků, a přepočtem podle dlouhodobých průměrů v případě průtoků na blízkých profilech – tzv. analogonech.

Dopady klimatické změny na složky hydrologické bilance

Výsledky simulací ukázaly, že modelovaný odtok poměrně výrazně ovlivňuje volba modelu a emisního scénáře, zpravidla nejpříznivější výsledky dává model RCAO podle optimistického emisního scénáře SRES B2, nejméně příznivé (dle odtokové výšky) jsou výsledky podle modelu HIRHAM a pesimistického emisního scénáře SRES A2.

V modelovaném období však dojde ke snížení průměrného ročního průtoku na všech profilech a všech nádržích (kromě tří výjimek) podle všech uvažovaných scénářů klimatické změny (tabulky 4 a 5).

Tabulka 4 Poměr průměrných ročních průtoků modelovaných pro scénáře klimatické změny a pro současnost v jednotlivých profilech

Profil	Vodní tok	Změna průměrných ročních průtoků oproti původním hodnotám			
		HIRHAM A2	HIRHAM B2	RCAO A2	RCAO B2
Chlum Volary	Teplá Vltava	0,66	0,76	0,77	0,86
Vyšší Brod	Vltava	0,59	0,73	0,71	0,84
Březí Kamenný Újezd	Vltava	0,56	0,73	0,66	0,81
Pořešín	Malše	0,57	0,72	0,71	0,91
Římov	Malše	0,40	0,61	0,53	0,82
Pašínovice Komařice	Stropnice	0,33	0,61	0,44	0,79
Roudné	Malše	0,50	0,70	0,60	0,83
České Budějovice	Vltava	0,47	0,74	0,57	0,80
Kazdovna Stará řeka	Lužnice	0,50	0,80	0,52	0,78
Frahelž Lomnice	Lužnice	0,63	0,87	0,63	0,88
Lásenice	Nežárka	0,71	0,86	0,82	1,04
Hamr	Nežárka	0,67	0,92	0,69	0,88
Klenovice	Lužnice	0,57	0,72	0,69	0,91
Bechyně	Lužnice	0,53	0,67	0,69	0,91
Sušice	Otava	0,70	0,78	0,83	0,89
Katovice	Otava	0,67	0,77	0,8	0,87
Nemětice	Volyňka	0,33	0,51	0,45	0,61
Husinec pod nádrží	Blanice	0,53	0,65	0,71	0,88
Heřmaň	Blanice	0,53	0,65	0,71	0,88
Písek	Otava	0,68	0,77	0,81	0,93
Dolní Ostrovec	Lomnice	0,38	0,54	0,67	0,69
Varvažov	Skalice	0,50	0,60	0,72	0,90
Chlístov	Sázava	0,48	0,66	0,71	0,91
Světlá nad Sázavou	Sázava	0,48	0,66	0,71	0,91
Zruč nad Sázavou	Sázava	0,55	0,71	0,78	0,99
Soutice	Želivka	0,50	0,64	0,74	0,96
Kácov	Sázava	0,51	0,69	0,78	0,97
Nespeky	Sázava	0,51	0,67	0,72	0,90
Zbraslav	Vltava	0,53	0,65	0,79	0,92
Praha-Chuchle	Vltava	0,56	0,64	0,79	0,92
Velvary	Bakovský potok	0,64	0,73	0,85	0,98
Vraňany	Vltava	0,64	0,73	0,85	0,98

Tabulka 4 Poměr průměrných ročních průtoků modelovaných pro scénáře klimatické změny a pro současnost v jednotlivých profilech – pokračování

Profil	Vodní tok	Změna průměrných ročních průtoků oproti původním hodnotám			
		HIRHAM A2	HIRHAM B2	RCAO A2	RCAO B2
Lučina	Mže	0,82	0,85	0,95	0,94
Svahy Třebel	Kosový potok	0,82	0,85	0,95	0,94
Stříbro	Mže	0,75	0,75	0,89	0,92
Hracholusky	Mže	0,75	0,75	0,89	0,92
Lhota	Radbuza	0,60	0,65	0,80	0,90
České Údolí	Radbuza	0,60	0,65	0,80	0,90
Stará Lhota	Úhlava	0,54	0,66	0,73	0,80
Klatovy	Úhlava	0,54	0,66	0,73	0,80
Štěnovice	Úhlava	0,58	0,67	0,75	0,83
Plzeň-Bílá Hora	Berounka	0,68	0,71	0,85	0,94
Plzeň-Koterov	Úslava	0,54	0,63	0,73	0,81
Nová Huť	Klabava	0,66	0,82	0,97	1,11
Žlutice	Střela	0,59	0,64	0,81	0,88
Plasy	Střela	0,59	0,64	0,81	0,88
Liblín	Berounka	0,61	0,66	0,80	0,88
Rakovník	Rakovnický potok	0,55	0,72	0,89	1,15
Lány Městečko	Klíčava	0,57	0,65	0,80	0,90
Zbečno	Berounka	0,57	0,65	0,80	0,90
Čenkov	Litavka	0,52	0,61	0,77	0,82
Beroun-Litavka	Litavka	0,52	0,61	0,77	0,82
Beroun	Berounka	0,61	0,67	0,86	1,00

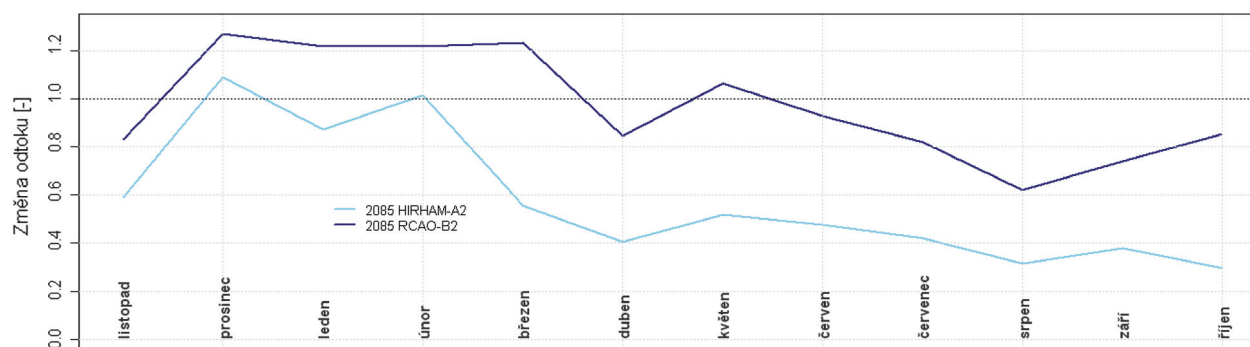
Tabulka 5 Poměr průměrných ročních průtoků modelovaných pro scénáře klimatické změny a pro současnost v jednotlivých vodních nádržích

Profil	Vodní tok	HIRHAM A2	HIRHAM B2	RCAO A2	RCAO B2
Římov	Malše	0,40	0,61	0,53	0,82
Karhov	Studentský potok	0,71	0,86	0,82	1,04
Husinec	Blanice	0,53	0,65	0,71	0,88
Lipno I, II	Vltava	0,59	0,73	0,71	0,84
Hněvkovice	Vltava	0,65	0,75	0,80	0,98
Jordán	Košínský potok	0,57	0,72	0,69	0,91
Staviště	Stavišský potok	0,48	0,66	0,71	0,91
Švihov	Želivka	0,50	0,64	0,74	0,96
Orlík	Vltava	0,53	0,65	0,70	0,87
Kamýk	Vltava	0,53	0,65	0,70	0,87
Slapy	Vltava	0,53	0,65	0,70	0,87
Štěchovice	Vltava	0,53	0,65	0,70	0,87

Tabulka 5 Poměr průměrných ročních průtoků modelovaných pro scénáře klimatické změny a pro současnost v jednotlivých vodních nádržích – pokračování

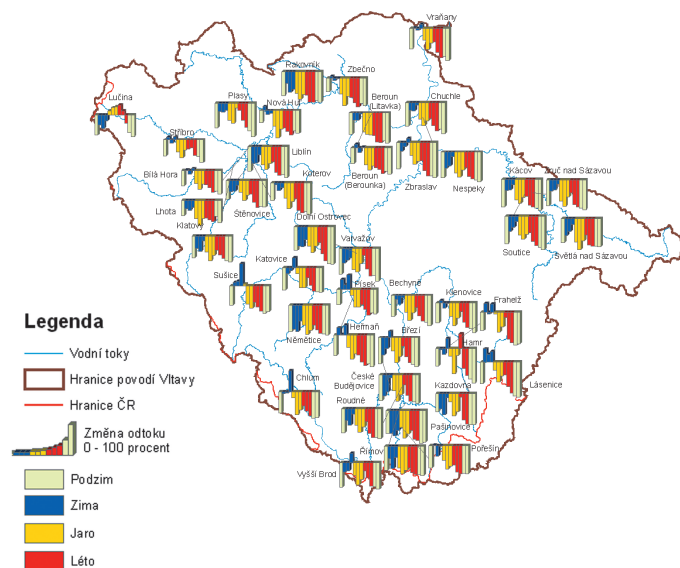
Profil	Vodní tok	HIRHAM A2	HIRHAM B2	RCAO A2	RCAO B2
Pilská	Sázava	0,48	0,66	0,71	0,91
Sedlice	Želivka	0,50	0,64	0,74	0,96
Trnávka	Trnávka	0,50	0,64	0,74	0,96
Vrané	Vltava	0,53	0,65	0,79	0,92
Hostivař	Botič	0,56	0,64	0,79	0,92
Lučina	Mže	0,82	0,85	0,95	0,94
Nýrsko	Úhlava	0,54	0,66	0,73	0,8
Žlutice	Střela	0,59	0,64	0,81	0,88
Klíčava	Klíčava	0,57	0,65	0,80	0,90
Litavka	Láz	0,52	0,61	0,77	0,82
Pilský p.	Pilská	0,52	0,61	0,77	0,82
Obecnický p.	Obecnice	0,52	0,61	0,77	0,82
Hracholusky	Mže	0,75	0,75	0,89	0,92
České Údolí	Radbuza	0,60	0,65	0,80	0,90
Klabava	Klabava	0,66	0,82	0,97	1,11

Rozložení změn průtoků během roku se pro modelované scénáře projevuje velmi výrazně (viz příklad na **obrázku 10** a **obrázek 11**). Lze rozlišit dvě období. V prvním období (listopad–březen) jsou změny výraznější zatímco v druhém období (duben–říjen) je proměnlivost hodnot průtoků malá, průměr nízký a jsou dosahována extrémní minima (ke konci tohoto období blízká nule). Hlavní příčinou takto rozložených změn průtoků je zejména změna rozložení srážek během roku, tedy jejich podstatné zvýšení v zimních měsících a snížení v letních měsících. Změna rozložení srážek je podpořena sezonním rozložením změn teploty. Nejvíce se oteplí v letních měsících, zejména v srpnu, což způsobí vzrůst potenciálního i územního výparu, zatímco zvýšení zimních teplot negativně ovlivní tvorbu sněhové pokrývky a posune její tání blíže k začátku roku. Rozdílná je i změna pravděpodobnosti extrémních hodnot – zatímco v zimním období zůstává četnost maximálních průtoků zhruba zachována, v případě letního období dochází k jejímu značnému snížení.

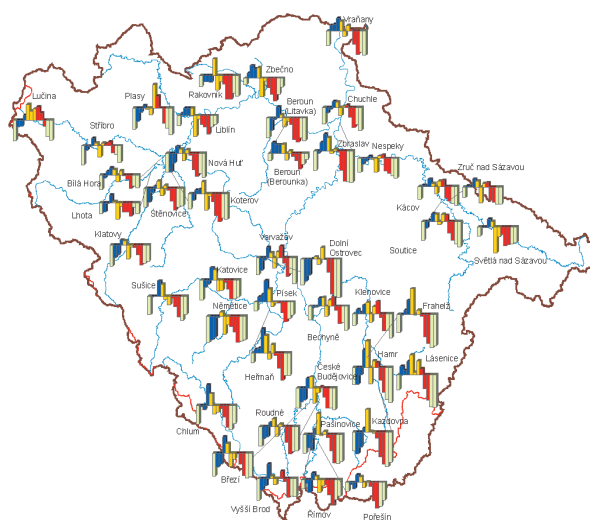


Obrázek 10 Relativní změny průměrných měsíčních průtoků pro rok 2085 v profilu Beroun na Berounce

a) HIRHAM A2

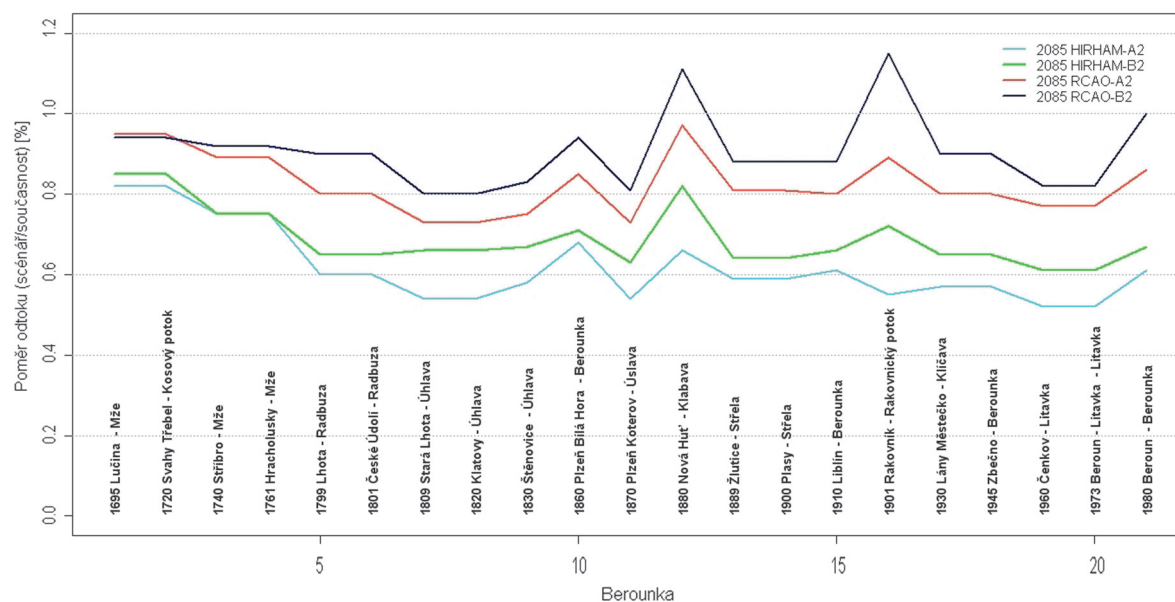


b) RCAO B2

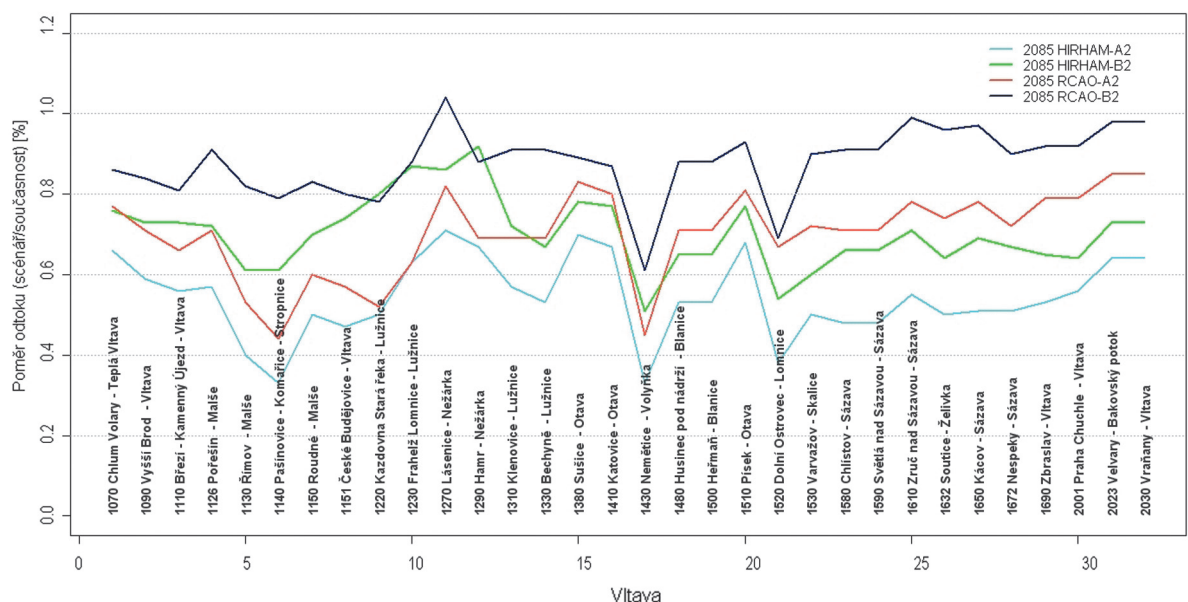


Obrázek 11 Změny průměrných měsíčních průtoků pro celé modelované území a scénáře HIRHAM A2 a RCAO B2

Odlišnosti poklesu průměrných průtoků, resp. průměrných výšek odtoků jsou znázorněny v grafech na **obrázcích 12 a 13** a v mapách na **obrázku 14**. Největší projevy klimatické změny lze pozorovat na malých vodních tocích, které se nacházejí v oblastech nižších a středních poloh, např. v Neměticích na Volyňce a v Dolním Ostrovci na Lomnici. Na horských vodních tocích je vliv klimatické změny na odtok menší než na tocích v nižších a středních polohách. Je to způsobeno rozdílem srážkového úhrnu a evapotranspirace. Rozdíl na horách je mnohem větší díky velkým srážkovým úhrnům i menšímu výparu. Na projevy klimatické změny má vliv i orografie terénu. Vliv orografie na zvětšení srážek se obecně projevuje výrazněji v zimě, takže na horách jsou zimní srážky i relativně (vzhledem k letním) významnější než v nížinách. Zvýšení srážek v zimních měsících, prognózované scénáři klimatické změny, se tedy v horských povodích uplatní podstatně významněji než v nížinách.



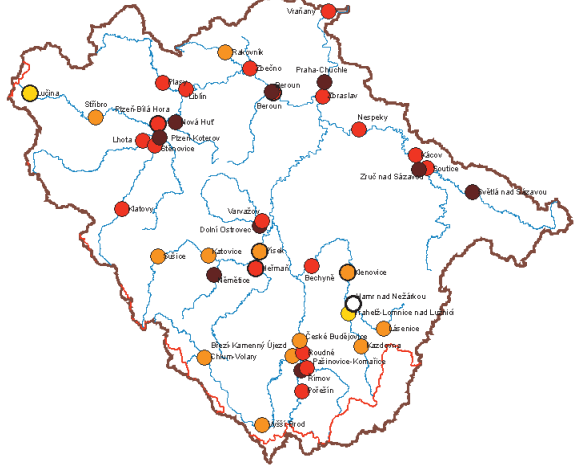
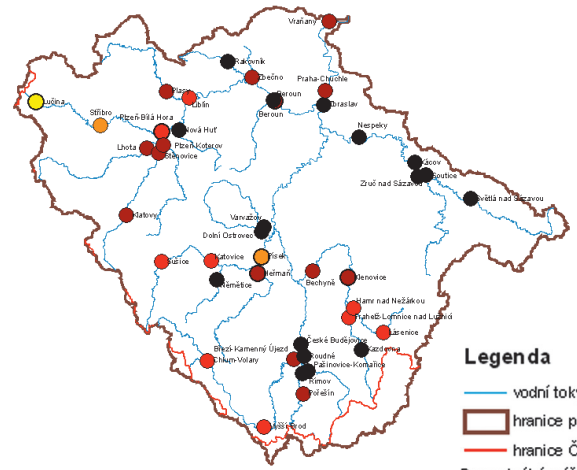
Obrázek 12 Relativní změny průměrných výšek odtoků v povodí Berounky



Obrázek 13 Relativní změny průměrných výšek odtoků v povodí Vltavy

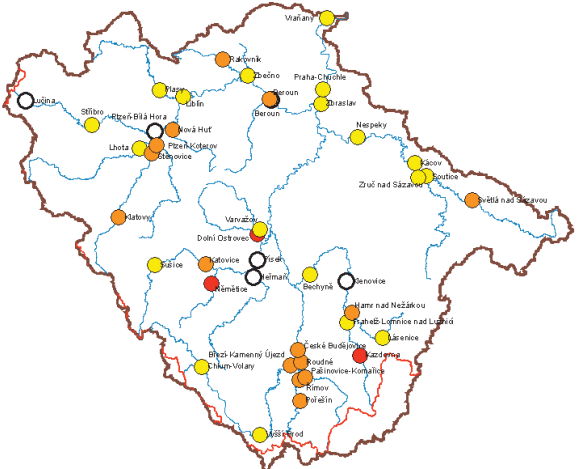
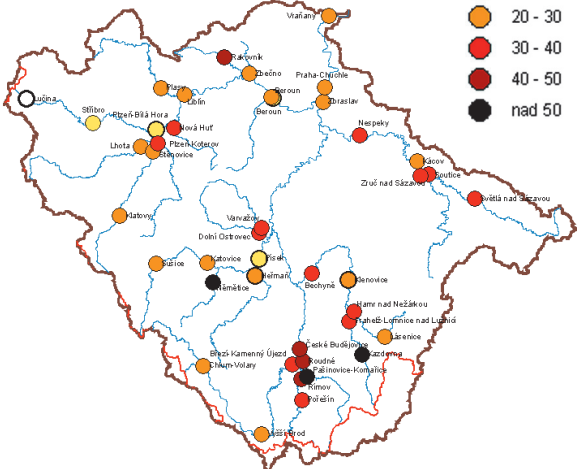
a) HIRHAM A2

b) HIRHAM B2



c) RCAO A2

d) RCAO B2



Obrázek 14 Plošné rozdělení snížení průměrných výšek odtoků v povodí Vltavy

Dopady klimatické změny na vodohospodářskou soustavu

Dopady klimatické změny na vodohospodářskou bilanci byly posouzeny pomocí simulačního modelu zásobní funkce vodohospodářské soustavy. Vyhodnocena byla zabezpečení významných odběrů vody a zachování minimálních průtoků v kontrolních profilech a pod vodními nádržemi. Vliv menších odběrů (včetně odběrů podzemní vody) a vypouštění vody byl souhrnně připočten k jednotlivým profilům soustavy. Vodohospodářská bilance byla vyhodnocena jak pro podmínky ovlivněné klimatickou změnou a předpokládaným vývojem požadavků na užívání vod (uvažován byl výhled k úrovni roku 2015), tak pro současné podmínky. Zásobní funkce soustavy byla simulována v měsíčním kroku při celkové délce hydrologického podkladu 27 let. Posuzované hodnoty odběrů vody a požadovaných minimálních průtoků jsou uvedeny v **tabulkách 6 a 7**. Zabezpečení odběrů vody a minimálních průtoků a bilanční stav v profilech soustavy jsou uvedeny v **tabulce 7** a na **obrázku 15**. Určení bilančních stavů vycházelo z kritérií uvedených v ČSN 75 2405 (viz kapitolu Postup modelování vodohospodářské bilance a vysvětlení k tabulce 3). Při plném (tzv. bezporuchovém) zajištění požadavků na odběry vody a minimální průtoky byl bilanční stav určen jako aktivní (zobrazen zeleně), při zabezpečení v souladu s hodnotami doporučenými ČSN 75 2405 byl bilanční stav určen jako vyvážený (zobrazen žlutě), při zabezpečení nižší než doporučené ČSN 75 2405 byl bilanční stav určen jako pasivní (zobrazen červeně).

Tabulka 6 Významné odběry vody v povodí Vltavy

Profil	Vodní tok	Odběr	Roční odebrané množství, současnost (tis. m ³)	Roční odebrané množství, výhled 2015 (tis. m ³)
Lipno I	Vltava	ÚV Loučovice	142,0	143,2
Lipno I	Vltava	Papírny Vltavský mlýn Loučovice	2 313,6	2 200,0
Římov	Malše	ÚV Plav	19 364,9	19 801,9
Hněvkovice	Vltava	Jaderná elektrárna Temelín	33 630,6	37 000,0
Karhov	Studenský potok	ÚV Studená	378,6	390,8
Husinec	Blanice	ÚV Husinec	-	800,0
ŽĎAS Žďár nad Sázavou	Sázava	ŽĎAS Žďár nad Sázavou	1 082,0	1 200,0
Švihov	Želivka	ÚV Želivka	107 639,9	105 762,7
Lučina	Mže	ÚV Svobodka	1 448,5	1 626,0
ÚV Milíkov	Mže	ÚV Milíkov	814,9	1 066,1
Nýrsko	Úhlava	ÚV Milence	3 415,9	3 400,9
ÚV Homolka	Úhlava	ÚV Homolka	17 401,2	18 776,0
Žlutice	Střela	ÚV Žlutice	3 088,0	3 668,4
Klíčava	Klíčava	ÚV Klíčava	142,4	143,4
Láz	Litavka	ÚV Kozičín	541,5	568,6
Pilská	Pilský potok	ÚV Kozičín	1 109,2	1 164,7
Obecnice	Obecnický potok	ÚV Obecnice	1 328,0	1 638,6

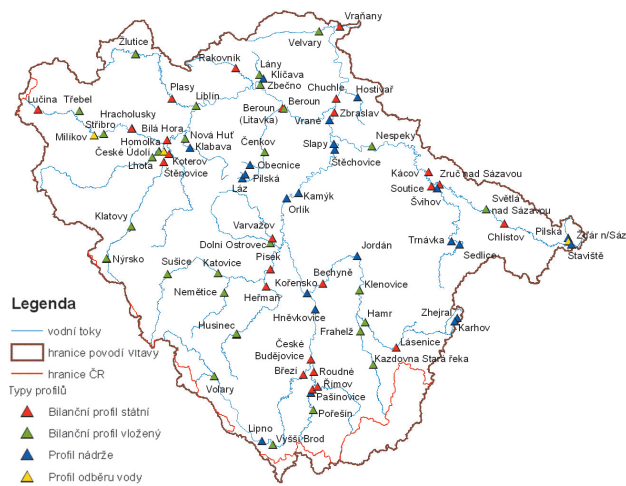
Tabulka 7 Zabezpečení požadavků a bilanční stavy v profilech vodohospodářské soustavy

Profil	Vodní tok	Minimální průtok (m ³ /s)	Současné podmínky	Scénář klimatické změny			
				RCAO-B2	RCAO-A2	HIRHAM-B2	HIRHAM-A2
Zabezpečení podle trvání (%) a bilanční stav							
Chlum Volary	Teplá Vltava	0,860	99,476	95,161	90,536	92,078	85,296
Lipno I	Vltava	1,500	97,445	97,445	97,445	97,445	97,626
Lipno II	Vltava	6,000	99,784	99,784	99,784	99,784	93,311
Vyšší Brod	Vltava	2,060	99,784	99,784	99,784	99,784	96,393
Březí Kamenný Újezd	Vltava	4,050	99,784	94,544	95,160	95,469	91,153
Pořešín	Malše	0,360	99,784	97,011	88,379	90,228	80,364
Římov (nádrž)	Malše	0,650	99,784	99,784	87,762	95,160	69,883
Římov (bil. profil)	Malše	0,647	99,784	99,784	88,070	95,160	70,191
Pašínovice Komařice	Stropnice	0,143	99,784	81,905	65,567	74,507	57,861
Roudné	Malše	1,200	99,784	99,784	60,635	67,417	55,086
České Budějovice	Vltava	4,230	99,784	93,619	89,303	95,544	80,980
Hněvkovice	Vltava	6,500	99,784	99,784	99,784	99,784	97,318
Karhov	Studenský potok	0,013	99,784	98,859	93,002	93,619	88,379
Lásenice	Nežárka	0,290	99,784	97,010	90,536	92,694	86,837
Hamr	Nežárka	0,570					
Klenovice	Lužnice	1,120	99,784	99,784	93,927	94,852	91,461
Jordán	Košínský potok	0,070	99,784	99,784	94,852	95,160	91,769
Bechyně	Lužnice	1,446	99,476	99,168	93,927	95,160	91,461
Kořensko	Vltava	9,500	99,784	99,784	99,784	99,784	97,318
Sušice	Otava	1,780	99,784	91,769	88,687	88,379	81,905
Katovice	Otava	2,340	99,784	96,393	94,852	93,927	88,070
Nemětic	Volyňka	0,260	99,784	88,070	77,281	84,371	66,184
Husinec (nádrž)	Blanice	0,400	99,784	93,311	85,604	83,138	70,499
Husinec (bil. profil)	Blanice	0,300	99,784	94,544	86,837	84,988	73,890
Heřmaň	Blanice	0,525	99,784	95,469	88,070	86,529	77,898
Písek	Otava	3,126	99,784	99,784	97,626	97,318	93,311
Dolní Ostrovec	Lomnice	0,013	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Varvažov	Skalice	0,030	99,476	99,784	98,859	99,168	98,243
Pílská	Sázava	0,052	99,784	99,784	98,243	96,085	85,604
ŽĎAS Žďár n. Sáz.	Sázava	0,086	99,784	99,476	93,311	92,386	71,732
Staviště	Staviště	0,010	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Chlístov	Sázava	0,399	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Světlá nad Sázavou	Sázava	1,100	99,476	99,784	98,859	97,626	85,912
Zruč nad Sázavou	Sázava	0,651	99,784	98,859	96,393	96,393	90,845
Sedlice	Želivka	0,120	99,784	99,784	98,243	98,243	93,311
Trnávka	Trnava	0,300	99,168	87,762	78,206	73,582	58,477
Švihov	Želivka	0,350	99,784	99,784	92,386	81,905	68,958
Soutice	Želivka	0,250	99,784	99,784	92,386	82,213	69,266
Kácov	Sázava	1,024	99,784	99,476	97,935	96,702	89,612
Nespeky	Sázava	3,480	97,935	92,694	83,755	80,055	69,266
Vrané	Vltava	40,000	99,784	99,476	94,852	88,677	80,980
Zbraslav	Vltava	20,630	99,784	99,784	96,393	92,694	85,912

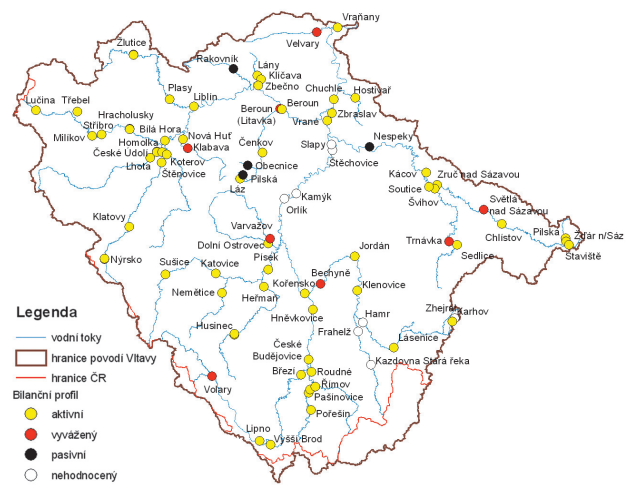
Tabulka 7 Zabezpečení požadavků a bilanční stavy v profilech vodohospodářské soustavy – pokr.

Profil	Vodní tok	Minimální průtok (m ³ /s)	Současné podmínky	Scénář klimatické změny			
				RCAO-B2	RCAO-A2	HIRHAM-B2	HIRHAM-A2
Zabezpečení podle trvání (%) a bilanční stav							
Lučina (nádrž)	Mže	0,200	99,784	99,784	99,476	99,168	98,243
Lučina (bil. profil)	Mže	0,197	99,784	99,784	99,476	99,168	98,859
Svahy Třebel	Kosový potok	0,130	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
ÚV Milíkov	Mže		99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Stříbro	Mže	0,970	99,784	99,784	98,859	97,626	97,01
Hracholusky (nádrž)	Mže	1,200	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Hracholusky (bil. prof.)	Mže	1,200	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Lhota	Radbuza	0,587	99,784	99,784	99,784	99,168	99,476
České Údolí (nádrž)	Radbuza	0,720	99,784	99,784	99,784	98,551	96,085
České Údolí (bil. prof.)	Radbuza	0,610	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Nýrsko	Úhlava	0,360	99,784	99,784	99,784	97,01	89,92
Stará Lhota	Úhlava	0,280	99,784	99,784	99,784	98,551	91,769
Klatovy	Úhlava	0,490	99,784	99,784	99,784	99,476	93,927
Štěnovice	Úhlava	0,460	99,784	99,784	99,784	99,168	96,393
ÚV Homolka	Úhlava	0,630	99,784	99,784	99,784	96,393	90,228
Plzeň-Bílá Hora	Berounka	2,200	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Plzeň-Koterov	Úslava	0,150	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Klabava	Klabava	0,390	98,859	88,995	81,905	74,507	64,642
Nová Huť	Klabava	0,140	99,784	96,702	94,544	91,461	86,529
Žlutice (nádrž)	Střela	0,220	99,784	98,859	98,243	95,469	91,769
Žlutice (bil. profil)	Střela	0,070	99,784	99,784	99,168	97,935	95,160
Plasy	Střela	0,156	99,784	99,476	98,243	96,085	93,311
Liblín	Berounka	3,000	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Rakovník	Rakovnický p.	0,030	97,010	99,784	97,626	89,920	79,131
Lány Městečko	Klíčava	0,010	99,784	99,784	99,784	97,626	95,777
Klíčava	Klíčava	0,037	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Zbečno	Berounka	3,420	99,784	99,784	99,784	99,168	99,476
Láz	Litavka	0,007	99,784	99,168	93,311	88,07	84,371
Pilská	Pilský potok	0,006	94,852	80,055	74,815	59,094	49,538
Obecnice	Obecnický potok	0,011	96,702	74,199	69,575	56,628	49,846
Čenkov	Litavka	0,073	99,784	99,784	99,784	99,784	99,784
Beroun-Litavka	Litavka	0,200	99,168	99,784	99,476	98,859	97,935
Beroun	Berounka	3,870	99,784	99,784	99,476	94,852	94,852
Praha-Chuchle	Vltava	20,200	99,784	99,784	96,702	93,619	89,612
Hostivař	Botič	0,066	99,784	99,784	99,784	99,168	98,551
Velvary	Bakovský potok	0,067	99,168	99,168	94,852	92,386	88,379
Vraňany	Vltava	20,300	99,784	99,784	98,243	95,469	93,619

a) Typy profilů



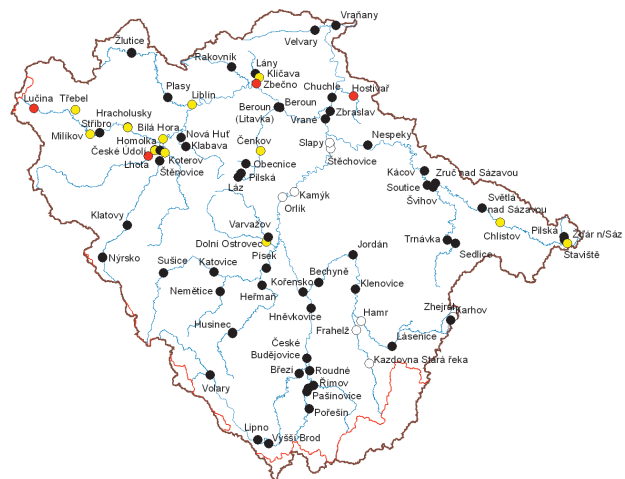
b) Současnost



c) HIRHAM A2



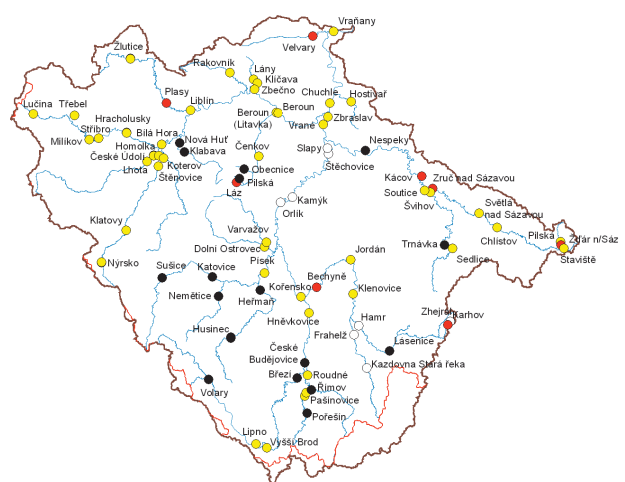
d) HIRHAM B2



e) RCAO A2



f) RCAO B2



Obrázek 15 Typy profilů (a) a zajištění požadavků na odběry vody a minimální průtoky (bilanční stav) v profilech povodí Vltavy (b, c, d, e, f)

Závěr

Přes značnou nejistotu odhadů budoucích změn meteorologických veličin, která je ovlivněna nejistotou prognóz vývoje společnosti odrážející se ve variantách řešení v podobě emisních scénářů, je možno na modelovaném povodí Vltavy ukázat značně negativní vliv změn klimatu na průtoky, a to v případě všech uvažovaných scénářů.

U scénáře, který můžeme označit za optimistický (RCAO B2), se projevují zřetelné změny hydrologického režimu, zejména pokles průměrných průtoků o 10–15 %. U pesimistického (HIRHAM A2) představují poklesy průměrných průtoků asi 40 %, což již znamená zásadní změnu hydrologického režimu. Důležitou změnou je rozkolísanost průtoků, hlavně minimálních, které často nebudou dosahovat potřebných ekologických minimálních hodnot, což přinese vážné problémy v oblasti ochrany kvality vod způsobené především zhoršením podmínek pro ředění zbytkového znečištění vypouštěného z čistíren odpadních vod.

Podle výsledků studie se také podstatně změní rozložení odtoků v ročním cyklu a bude nutno počítat s četnějším výskytem extrémních jevů na tocích – v zimě s povodněmi a v létě a na podzim s obdobími sucha. Vlivem vyšších teplot v zimním období se redukuje zásoba vody ve sněhové pokrývce a zvyšuje se výpar. Zvýšené průtoky v tocích se posunují z jara do konce zimy. V následujícím období od jara po podzim, kdy se většina srážek spotřebuje na územní výpar (pro který je dostatek energie vlivem vyšších teplot), již odtoky převážně klesají a na konci tohoto období dochází až k jejich drastickému poklesu.

Z výsledků studie dále vyplývá, že zatímco za současných podmínek jsou požadavky na užívání vody a zachování minimálních průtoků dostatečně zabezpečeny, pro varianty řad průtoků vycházející ze scénářů klimatických změn dojde ke značnému poklesu zásobní funkce vodohospodářské soustavy. Požadavky na užívání vody a zachování minimálních průtoků nejsou zajištěny u 24 % hodnocených profilů pro variantu RCAO-B2 (optimistický scénář), u 53 % profilů pro variantu RCAO-A2, u 63 % profilů pro variantu HIRHAM-B2 a u 77 % profilů pro variantu HIRHAM-A2 (pesimistický scénář).

Na rozdíl od značného dopadu klimatických změn na vodní zdroje se při výpočtech nepředpokládá výraznější změny. V požadavcích na užívání vody. Byl použit výhled k roku 2015.

Z uvedených poznatků je zřejmé, že nepříznivé dopady klimatické změny na hydrologický režim v povodí Vltavy nelze zmírnit případnou změnou manipulačních pravidel pro řízení odtoku. Pokud taková situace nastane, je možné ji řešit nebo zmírnit její dopady pouze realizací dalších opatření (včetně zvážení vytvoření nových zásobních prostorů v povodí) při samozřejmém předpokladu racionalizace ve sféře užívání vody a vytvoření podmínek pro optimalizaci vodního režimu krajiny.

Závěrem lze shrnout, že získané výstupy ukazují na nutnost sledovat problematiku výskytu klimatických změn se zvýšenou pozorností a včas se zabývat metodami umožňujícími zpřesnění výhledových potřeb vody (se zavedením předpokladu dosažení reálných úspor v oblasti užívání vody), zpřesnění odhadu možných klimatických změn a řešením zapojení výhledových zdrojů (obecně zvýšením akumulace vody v povodích) a jejich uplatněním za různých situací.

Současné projekty řešené ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, v. v. i. (VÚV T. G. M.)

Výzkum dopadů klimatické změny na vodní režim a vodní zdroje v současné době zahrnuje řadu disciplín a problémů, kterým je třeba věnovat patřičnou pozornost. Patří sem rozvoj metod přípravy a zpracování dat pro hodnocení dopadů klimatické změny, rozvoj modelů hydrologické a vodohospodářské bilance, rozvoj postupů a opatření pro hospodaření s vodou v krajině, rozvoj a využití postupů pro analýzu trendů v časových řadách, rozvoj postupů využití geografických informačních systémů. Je nutno soustředit se i na využití těchto nástrojů pro realizaci specifických studií, které zahrnují dopady klimatické změny na režim průměrných a extrémních průtoků, hodnocení suchých období, hodnocení vodních zdrojů ve vodohospodářských soustavách, hodnocení dopadů klimatických změn na režim podzemních vod (s využitím hydraulických modelů) a dílčí studie zaměřené např. na hodnocení změn z vodní hladiny nebo teplot vody v tocích. V následujících odstavcích je uveden stručný přehled projektů a výzkumných záměrů, které jsou v současnosti řešeny ve VÚV T. G. M.

Spolupráce VÚV T. G. M. ve výzkumném úkolu Ministerstva životního prostředí Zpřesnění dosa-
vadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření se zaměřuje na regionální zpracování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR na základě analýzy trendů základních prvků hydrologické bilance, na identifikaci povodí s největšími dopady na vodní režim a na přípravu hydrologických podkladů pro studie dopadů klimatické změny v sektorech zemědělství a lesnictví.

Dopady klimatické změny se řeší i v rámci výzkumného záměru Ministerstva životního prostředí Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů. Hydrologické studie ve výzkumném záměru jsou zaměřeny především na rozvoj metod a modelů pro přípravu meteorologických dat podle scénářů klimatických změn a simulaci složek vodní bilance v měsíčním a denním kroku. Součástí výzkumu jsou rovněž měření a pozorování potřebná pro ověření rozvíjených postupů a hypotéz a dále specifické studie zaměřené např. na testování trendů v časové řadě výparu, testování dopadů klimatické změny na teplotu vody v tocích nebo na dopady klimatické změny na zdroje podzemních vod ve vybraných regionech.

Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech ČR je financován Národní agenturou pro zemědělský výzkum (Ministerstvo zemědělství). V rámci tohoto projektu je připravována metodika pro posouzení dopadů klimatických změn na vodní zdroje povrchových a podzemních vod ve vodohospodářských soustavách, která bude následně využita pro řešení vybraných vodohospodářských soustav a návrh adaptačních opatření směřujících k minimalizaci poruch v zásobování vodou a k dlouhodobé udržitelnosti vodních zdrojů.

Ve výhledové studii potřeb a zdrojů vody v Karlovarském kraji jsou posuzovány zdroje vody vzhledem k současným požadavkům na jejich využití variantně pro hydrologický podklad v podmínkách nezměněného klimatu a na úrovni dlouhodobého výhledu v podmínkách klimatických změn. Výstupem studie, která je podporována z dotačního titulu Ministerstva zemědělství, bude návrh opatření pro střednědobý (20 let) a dlouhodobý výhled (po roce 2050) s ohledem na jednotlivé cykly plánování v oblasti povodí. Objednavatelem této studie je Karlovarský kraj.

Mezinárodní projekt WATCH – Water and Global Change si klade za cíl popsat současný oběh vody, analyzovat predikce pro 21. století, nalézt vztahy mezi hybnými silami a globální změnou, poskytnout podrobný odhad rizik spojených s klimatem a hydrologií, vyvinout nový konzistentní modelový rámec pro hodnocení vodních zdrojů, hydrologie a klimatu. Tento projekt je financován v rámci 6. rámcového programu Evropské unie.

Literatura

- AV ČR (4/2007) *Stanovisko Komise pro životní prostředí AV ČR k diskuzi o klimatických změnách.*
- Christensen, JH. and van Meijgaard, E. (1992) On the construction of a regional climate model. *Tech. Rep., 92–14*, DMI, Copenhagen, 22 p.
- Christensen, JH., Christensen, OB., Polec, P., van Meijgaard, E., and Botzet, M. (1996) The HIRHAM4 regional atmospheric Climate model. *Sci. Rep., 96–4*, DMI, Copenhagen, 51 p.
- ČHMÚ (1996) *Hydrologické charakteristiky vybraných vodoměrných stanic.* Praha : ČHMÚ, 134 s., ISBN 80-85813-40-8.
- Döscher, R., Willén, U., Jones, C., Rutgersson, A., Meier, HEM., Hansson, U., and Graham LP. (2002) The development of the coupled regional ocean-atmosphere model RCAO. *Boreal Env. Res. 7*, p. 183–192.
- Gustafsson, N. (1993) The HIRLAM 2 final report. *HIRLAM Techn. Report, No. 9*, Norrköping, 126 s.
- IPCC (2000) *Special Report on Emissions Scenarios – SRES.* <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>.
- IPCC (2007) *Souhrnná zpráva – Shrnutí pro politické představitele.* http://amper.ped.muni.cz/gw/ipcc_cz/Shrnujici.pdf.
- Jones, CG., Willén, U., Ullerstig, A., and Hansson, U. (2004) The Rosby Centre Regional Atmospheric Climate Model. Part I: Model Climatology and Performance for the Present Climate over Europe. *Ambio 33*: 4–5, p. 199–210.
- Kalvová, J. (2005) *Dopady klimatických a antropogenních změn na hydrologické a ekologické systémy.* Praha : VÚV T. G. M., 20 s.
- Kalvová, J. aj. (2005) *Vytvoření scénářů klimatické změny*, kap. 2.3 zprávy Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů. Oddíl A: Hydrologie, Výzkumný záměr MŽP 0002071101, Praha : VÚV T. G. M.
- Kašpárek, L. aj. (2006) *Hydrologie. Zpráva tematického oddílu A Výzkumného záměru 0002071101 Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů.* Praha : VÚV T. G. M., 270 s.
- Macháček, L. (1986) *Simulační model vodohospodářské soustavy.* Praha : VÚV.
- Machenhauer, B. (1988) *The HIRLAM final report. HIRLAM Techn. Report, No. 5*, Copenhagen, 116 p.
- Meier, HEM., Döscher, R., and Faxén, T. (2003) A multiprocessor coupled ice-ocean model for the Baltic Sea: Application to salt inflow. *J. Geophys. Res. 108*:C8, 3273, doi: 10.1029/2000JC000521.
- Novický, O. aj. (2007) *Posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu povodí Vltavy.* Praha : VÚV T. G. M., 156 s.
- Rummukainen, M., Räisänen, J., Bringfelt, B., Ullerstig, A., Omstedt, A., Willén, U., Hansson, U., and Jones, C. (2001) A regional climate model for northern Europe: model description and results from downscaling of two GCM kontrol simulations. *Clim. Dyn. 17*, p. 339–359.



Tallaksen, LM., van Lanen HAJ. (Eds) (2004) *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Amsterdam : Developments in Water Sciences 48, Elsevier B.V.

Vodohospodářská řešení vodních nádrží. ČSN 75 2405.

VÚV T. G. M. Praha (1985) *Metody navrhování vodohospodářských soustav, část 1 – Systém modelů pro navrhování vodohospodářských soustav*. Úkol SPZV II-5-6/1, Praha : VÚV.

VÚV T. G. M. Praha (2006) *Vodohospodářská bilance současného a výhledového stavu množství povrchových vod v oblasti povodí Berounky*. Praha : VÚV T. G. M.

VÚV T. G. M. Praha (2006) *Vodohospodářská bilance současného a výhledového stavu množství povrchových vod v oblasti povodí Dolní Vltavy*. Praha : VÚV T. G. M.

VÚV T. G. M. Praha (2006) *Vodohospodářská bilance současného a výhledového stavu množství povrchových vod v oblasti povodí Horní Vltavy*. Praha : VÚV T. G. M.

VÚV T. G. M. Praha (2007) *Posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu povodí Vltavy*. Praha : VÚV T. G. M.

Zeman, V. (1986) *Úlohy navrhování vodohospodářských soustav*. Praha : VÚV.



Klimatická změna a vodní zdroje v povodí Vltavy

Tato publikace byla zpracována Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, v. v. i., z výsledků výzkumných úkolů financovaných Ministerstvem zemědělství a Ministerstvem životního prostředí. Byly použity informace a podklady poskytnuté státním podnikem Povodí Vltavy.

Fotografie na obálce: přední strana – Vodňanská Blanice, zadní strana – Lužnice – Stará Řeka.

Autoři: Ing. Oldřich Novický, Ing. Petr Vyskoč, Bc. Adam Vizina, Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., Ing. Jiří Pícek, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

Lektoroval: Ing. Libor Ansorge, Ministerstvo zemědělství ČR

Grafická úprava: Martin Černohorský, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

Tisk: Gaudeo tiskárna, s. r. o.

Vydal: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., v roce 2008

ISBN 978-80-85900-79-8