



Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření

**Martin Hanel, Ladislav Kašpárek, Magdalena Mrkvičková,
Stanislav Horáček, Adam Vizina, Oldřich Novický, Renata Fridrichová**

Vydal Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.
Praha 2011

Vědecká redakce

Ing. Šárka Blažková, DrSc., prof. Ing. Alexander Grünwald, CSc., doc. Ing. Aleš Havlík, CSc., prof. Ing. Pavel Pitter, DrSc., prof. RNDr. Alena Sládečková, CSc., prof. Ing. Jiří Zezulák, DrSc.

Lektorovali

RNDr. Jan Pretel, CSc.
prof. Ing. Zdeněk Kos, DrSc.

Podstatná část poznatků prezentovaných v této publikaci byla získána v rámci řešení projektu vědy a výzkumu financovaného Ministerstvem životního prostředí SP/1a6/108/07 „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“.

© Martin Hanel, Ladislav Kašpárek, Magdalena Mrkvičková et al., 2011

ISBN 978-80-87402-22-1

Obsah

1	Úvod	5
	Odhad dopadů změny klimatu na hydrologický režim	7
2	Modelování klimatu	9
2.1	Globální klimatické modely	9
2.2	Emisní scénáře	10
2.3	Downscaling	13
3	Hydrologické modelování dopadů změny klimatu	15
3.1	Použití výstupů simulací klimatických modelů	15
3.2	Zdroje nejistot	18
3.3	Výběr reprezentativních simulací	18
4	Možné dopady změny klimatu na hydrologický režim v České republice	21
4.1	Probíhající změny	21
4.2	Scénáře změny klimatu	24
4.3	Projekce klimatických modelů	26
4.4	Validace výstupů klimatických modelů	38
	Možnosti zmírnění dopadů změny klimatu – adaptační opatření	41
5	Vodohospodářské plánování v kontextu změny klimatu	43
6	Rámcové vyhodnocení účinnosti vybraných adaptačních opatření	49
6.1	Opatření v krajině	55
6.2	Opatření na tocích a v nivách	58
6.3	Opatření v urbanizovaných územích	61
6.4	Vodohospodářská opatření	61
6.5	Zmenšování požadavků	63
6.6	Legislativní opatření	64

Vybrané studie	65
7 Studie dopadů změny klimatu a návrhy adaptačních opatření	67
8 Adaptační opatření pro zmírnění dopadů současné změny klimatu na povodí Rakovnického potoka	69
9 Možnost zlepšení hydrologických poměrů povodí horní Srpiny	75
10 Studie potřeb vody pro povodí Blšanky a Liboce	81
11 Kompenzace růstu deficitních objemů využitím lokalit vhodných pro akumulaci povrchových vod	87
12 Modelování dopadů klimatické změny na podzemní vody v povodí Metuje	93
13 Závěr	99

1 Úvod

Problematika změny klimatu je již řadu let v popředí společenského zájmu. Přestože existují názory zpochybňující projekce (negativních) dopadů antropogenní činnosti na podnebí, obecně uznávaná odborná literatura se víceméně shoduje na tom, že klimatický systém může být lidskou činností ovlivněn a že podle dlouhodobých odhadů vývoje a vlivu lidské společnosti na klima mohou být dopady této činnosti značně negativní, minimálně v některých oblastech či ve vztahu k vybraným aspektům lidské existence.

Odhady shrnuté ve Čtvrté hodnotící zprávě (Pachauri a Reisinger, 2007) Mezivládního panelu pro klimatickou změnu (IPCC) např. uvádějí, že od roku 1750 se lidská činnost s velkou pravděpodobností podílí na oteplování, přičemž efekt této činnosti je vyčíslen na $0,6\text{--}2,4 \text{ W m}^{-2}$, zatímco vliv změn intenzity slunečního záření za stejné období je odhadnut na $0,06\text{--}0,3 \text{ W m}^{-2}$ *. Současné změny jsou sice zpravidla obtížně statisticky prokazatelné (např. v případě srážkových či teplotních extrémů jsou samotné odhady doby opakování pozorovaných událostí obtížné), nicméně je pravděpodobné, že některé charakteristiky klimatu se mění (např. globálně klesá počet chladných a roste počet horkých dní a nocí).

Přijmeme-li hypotézu, že antropogenní činnost (zejména produkce skleníkových plynů) může mít vliv na podnebí, stojíme před problémem, jak zohlednit její potenciální vliv při návrhu dlouhodobých strategií. Jedním z nejvyužívanějších zdrojů informací o možném vývoji klimatu v měřítku několika desetiletí jsou v tomto případě simulace klimatických modelů. Klimatický model lze definovat jako matematický popis klimatického systému založený na fyzikálních zákonech a empirických vztazích. V principu je modelování vlivu antropogenní činnosti na podnebí možné, nicméně naráží na řadu limitů souvisejících zejména s chaotickou povahou klimatického systému, nutností diskretizace výpočtů (výpočet klimatického modelu probíhá v rámci jednotlivých výpočetních buněk s horizontálním rozlišením v řádu desítek až tisíců kilometrů čtverečních) a s tím související nutností zapojení empirických schémat pro některé důležité procesy (např. tvorba oblačnosti), nedokonalou znalostí současného klimatu, výpočetními nároky atd. Z těchto důvodů je většina závěrů odvozených z klimatických modelů značně nejistá.

Na druhé straně je evidentní, že v rámci dlouhodobého plánování, a specificky plánování vodohospodářského, je nutné (nebo přinejmenším vhodné) s možnými změnami klimatu a jejich dopady na hydrologický režim počítat. Příkladem může být situace vodoprávních úřadů při zvažování povolení nových (či zvýšení kapacity stávajících) odběrů vody, popřípadě budování nákladné vodohospodářské

*Tyto odhady jsou vyčísleny pomocí konceptu tzv. radiačního působení, tj. ukazatele vyjadřujícího vliv externího faktoru (zvýšování koncentrace skleníkových plynů, změna albeda atp.) na energetickou bilanci klimatického systému (ve W m^{-2}), zpravidla vzhledem k preindustriálním podmínkám (cca rok 1750).

infrastruktury s dlouhou životností. Z těchto důvodů se začínají studie dopadů změny klimatu na vybrané aspekty hydrologického režimu daných území řadit mezi standardně řešené úlohy.

Nutnost zahrnout změnu klimatu do vodohospodářských strategií vyplývá také ze současné národní i evropské legislativy a metodik. Proces plánování v oblasti vod v České republice se v současné době řídí vodním zákonem (254/2001 Sb.), jenž reflektuje ustanovení přijatá na evropské úrovni v Rámcové směrnici o vodní politice. V rámci tohoto plánování byl v roce 2007 schválen Plán hlavních povodí a následně v roce 2009 vypracovány Plány oblastí povodí. Vodní zákon ukládá aktualizaci Plánů povodí v šestiletých cyklech, aktuálně tedy k roku 2015. Nutnost zahrnutí vlivu klimatických změn do dlouhodobých vodohospodářských koncepcí, vyplývající zejména z požadavku na zodpovědné plánování ekonomicky a technicky efektivních adaptačních opatření, byla identifikována na úrovni Evropské unie a postupně se stává součástí strategických národních plánovacích dokumentů. V oblasti vodního hospodářství jsou nástrojem pro zavádění adaptačních opatření do praxe zejména programy opatření v plánech povodí, respektive plány pro zvládání povodňových rizik.

Z těchto důvodů v současné době v Evropě i v České republice kontinuálně probíhá výzkum zaměřený na zpřesňování odhadů možných dopadů klimatické změny na podnebí a hydrologický režim. Tyto odhady jsou dále vstupem do modelů simulujících vliv změny klimatu na různé socio-ekonomické sektory. V posledních letech byl výzkum změny klimatu v České republice, kromě výzkumu změn samotných hydrometeorologických veličin, zaměřen i na návrh možných adaptačních opatření, metodiku posouzení jejich efektivity a rovněž byly provedeny konkrétní studie návrhů adaptačních opatření v lokalitách již změnou klimatu postižených.

Předkládaná monografie shrnuje výsledky pětiletého řešení projektu „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“ financovaného Ministerstvem životního prostředí, konkrétně jeho dílčího projektu „Dopady změny klimatu na hydrologickou bilanci a vodní zdroje a návrhy adaptačních opatření v sektoru vodního hospodářství“. Jelikož je ale problematika změny klimatu řešena z různých úhlů pohledu v rámci řady projektů, bylo při přípravě publikace čerpáno i z projektů přímo zaměřených na návrhy konkrétních adaptačních opatření (projekt Ministerstva zemědělství „Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulací schopnosti v povodí Rakovnického potoka (pilotní projekt)“) či na vývoj metodiky posouzení jejich efektivity (projekt Ministerstva zemědělství „Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech ČR“) i jednotlivých studií řešených ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, v.v.i. (dále jen VÚV TGM). Předkládaná práce dále navazuje na předchozí výsledky modelování dopadů změny klimatu, které probíhá ve VÚV TGM již řadu let.

Monografie je rozdělena do tří částí. První se věnuje přiblížení podstaty modelování klimatu, zaměřuje se na nejistoty s ním spojené a metody jejich kvantifikace. Dále přibližuje probíhající změny klimatu a podrobně popisuje výsledky modelování dopadů změny klimatu na hydrologický režim v České republice během 21. století. Druhá část je zaměřena na výběr adaptačních opatření, zejména vzhledem k jejich potenciální účinnosti pro zmírnění dopadů extrémních srážek a sucha. Jednotlivá adaptační opatření jsou posouzena pomocí jednoduchých metod a navíc jsou shrnuty poznatky experimentálních studií dokladující jejich účinnost. Monografie je uzavřena souborem případových studií řešených ve VÚV TGM, jež se týkají tématu adaptací na klimatickou změnu, popřípadě modelování dopadů změny klimatu obecně.

Odhad dopadů změny klimatu na hydrologický režim

2 Modelování klimatu

Odhady budoucího vývoje klimatu v souvislosti se zvyšováním koncentrace skleníkových plynů většinou vycházejí ze simulací (globálních či regionálních) klimatických modelů. Klimatický model lze definovat jako matematický popis klimatického systému založený na fyzikálních zákonech. Klimatický model zpravidla diskretizuje prostor do trojrozměrné výpočetní sítě s deseti a více vertikálními vrstvami a s horizontálním rozlišením řádově tisíců až stovek (globální klimatické modely) či stovek až desítek (regionální klimatické modely) kilometrů. V průběhu simulace modelu se řeší toky mezi jednotlivými výpočetními buňkami a zároveň se zjišťuje jejich stav (např. teplota, množství vody dostupné pro srážky atp.), přičemž se vychází zejména ze zákonů zachování hmoty, energie a hybnosti. Modely klimatu mohou být různě komplexní (tj. zahrnují různé procesy, řeší vývoj klimatu v různém počtu dimenzí, mají různé prostorové rozlišení atp.). Použití jednoduchých klimatických modelů vyplývá zejména z potřeby snížit výpočetní náročnost v některých aplikacích (např. při odvozování emisních scénářů). Pro odhady dopadů změn klimatu na hydrologický režim jsou standardně využívány výstupy globálních a regionálních klimatických modelů. Těmto modelům je proto věnována tato kapitola.

2.1 Globální klimatické modely

Globálním klimatickým modelem je označován propojený (coupled) model atmosféry a oceánu, většinou obsahující i model kryosféry a zemského povrchu. Zkratka GCM je používána ambivalentně jako akronym pro globální klimatický model (Global climate model) a model globální cirkulace (Global circulation model). Pro zdůraznění, že se jedná o propojený model atmosféry a oceánu, se někdy používá zkratka AOGCM, tj. model cirkulace atmosféry a oceánu (Atmosphere-ocean general circulation model, ale někdy i Atmosphere-ocean global climate model).

Modely atmosférické cirkulace popisují vývoj atmosféry v čase a prostoru a často vycházejí z modelů používaných pro předpověď počasí. Horizontální rozlišení je v současnosti typicky několik stovek, výjimečně desítek kilometrů. Ve vertikálním směru bývá atmosféra rozdělena do deseti a více vrstev od hladiny moře po hranici troposféry (tj. cca 20 km), u některých modelů i podstatně výše. Vertikální rozlišení bývá tedy větší než rozlišení horizontální. Časový krok výpočtu je běžně v řádu desítek až jednotek minut. Přes relativně velké prostorové a časové rozlišení současných modelů musí být řada procesů parametrizována (tj. některé procesy se odehrávají v jiných časových a prostorových měřítcích, než je rozlišení klimatického modelu), a to zejména přenos krátkovlnného záření atmosférou, absorpce Zemí vyzařovaného dlouhovlnného záření atmosférou, tvorba stratů a kumulů, turbulentní jevy odehrávající se v mezní vrstvě atmosféry a vliv orografie uvnitř jednotlivých výpočetních buněk sousedících se zemským povrchem.

Spodní hranici atmosférického modelu v současných klimatických modelech tvoří model zemského povrchu. Ten popisuje jednak výměnu tepla mezi půdou a atmosférou, jednak hydrologickou bilanci části systému atmosféra-zemský povrch. Součástí modelu bývá i dynamický model vegetace ovlivňující velikost evapotranspirace, albedo, popřípadě bilanci uhlíku. Zahrnutí cyklu uhlíku umožňuje modelovat vliv zvýšení koncentrace CO₂ na biosféru. Hydrologické procesy jsou zpravidla popsány jednoduchým konceptuálním modelem, kdy srážky (kapalné/pevné) jsou částečně zachyceny vegetací, částečně dopadají na povrch, kde buď zůstávají ve formě sněhové pokrývky, infiltrují do půdy a dále k hladině podzemní vody nebo v případě intenzivních srážek dochází k povrchovému odtoku. Některé klimatické modely řeší i horizontální proudění vody v říčních korytech. Použití výstupů těchto modelů pro odhady změn hydrologické bilance je v současnosti předmětem intenzivního výzkumu.

Modely cirkulace oceánu mají většinou o něco větší prostorové rozlišení než modely cirkulace atmosféry, nicméně mají hodně společného (vycházejí ze stejných fyzikálních zákonů). Stejně jako v modelech atmosféry musí být i v modelech oceánu řada procesů parametrizována – např. turbulentní jevy na hranici mezi atmosférou a oceánem a vertikální promíchávání oceánu v malých měřítkách.

Každá z komponent globálního klimatického modelu pracuje s odlišným prostorovým a časovým rozlišením. K jejich propojení dochází řádově např. jedenkrát za 24 hodin. Jednotlivé komponenty si vyměňují relevantní stavové veličiny (např. model oceánu dostává informace o celkovém toku tepla, krátkovlnném záření, rychlosti větru a množství pevných a kapalných srážek, včetně odtoku z řek, a z modelu oceánu odchází do modelu atmosféry hodnoty teploty povrchu oceánu, množství ledu, výška vrstvy ledu a sněhu na ledu).

Energetická bilance Země je do značné míry určena intenzitou dopadajícího slunečního záření a složením atmosféry, přičemž efekt dlouhodobých změn intenzity slunečního záření je podle odhadů násobně nižší než vliv růstu emisí skleníkových plynů. Intenzita dopadajícího slunečního záření periodicky kolísá v cyklech různé délky. Zhruba jedenáctiletý sluneční cyklus způsobený fluktuacemi magnetického pole je znám již od poloviny devatenáctého století. Dlouhodobé změny množství dopadajícího záření souvisejí s excentricitou oběžné dráhy Země (tzv. Milankovičovy cykly), jež je patrně příčinou změny klimatu v minulosti (doby ledové). Koncentrace skleníkových plynů je jedním z nejdůležitějších faktorů určujících energetickou bilanci Země (určuje množství záření, jež je atmosféra schopna pojmout). Její nadměrné zvyšování může vést k zesílení skleníkového efektu. Dalším důležitým faktorem je koncentrace aerosolů a jiných polutantů, jež má vliv jednak na množství energie, které může být absorbováno atmosférou, jednak ovlivňuje proces formování srážek a oblačnosti, a zamezuje tedy průniku slunečního záření k zemskému povrchu. Koncentrace skleníkových plynů i aerosolů je ovlivněna přirozenými faktory i lidskou činností (např. průmyslové emise). Složení atmosféry a jeho změny (související zejména se změnami emisí skleníkových plynů) tvoří v podobě tzv. emisních scénářů klíčový vstup globálních klimatických modelů.

2.2 Emisní scénáře

Přesné množství emisí skleníkových plynů je ovlivněno globálním socio-ekonomickým vývojem (preferované zdroje energie, dostupnost těchto zdrojů, množství obyvatel atp.) a jeho přímá a jednoznačná předpověď není možná. Proto jsou vytvářeny tzv. emisní scénáře. Jde v podstatě o výstupy komplexních modelů (integrující jednoduchý klimatický model s modelem demografického vývoje, nabídky

a poptávky energie a zemědělských produktů a s tím související alokace pozemků atp.) popisujících možné varianty demografického, socio-ekonomického a technologického vývoje, někdy včetně iniciativ vedoucích ke snížení emisí skleníkových plynů.

V minulosti IPCC uvedl tři řady emisních scénářů, v současnosti se začíná používat řada čtvrtá. Řada emisních scénářů SA90 (Houghton et al., 1990) byla publikována v souvislosti s První hodnotící zprávou IPCC, obsahovala jeden scénář nepředpokládající žádná opáření směřující k snížení emisí (SA90-BaU – Business as usual) spolu s třemi dalšími, předpokládajícími různou míru těchto opatření. Emisní scénáře řady IS92 byly publikovány ve zvláštní zprávě IPCC (Leggett et al., 1992). Celkem obsahovaly šest variant budoucího vývoje emisí, dvě z nich (IS92a a IS92b) navazovaly a rozvíjely předchozí SA90-BaU scénář. První z nich se stal ve své době standardním scénářem při posouzení vlivu změny klimatu, přestože IPCC zdůrazňoval, že by v úvahu měly být brány všechny scénáře.

Emisní scénáře SRES

Do současnosti nejrozšířenější běžně používaná řada scénářů – scénáře SRES – vychází ze Zvláštní zprávy o emisních scénářích – Special report on emission scenarios (Nakicenovic a Swart, 2000). Scénáře SRES nezohledňují dodatečné iniciativy v oblasti klimatu, což znamená, že nejsou zahrnuty scénáře, které explicitně předpokládají implementaci Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu či emisních cílů Kjótského protokolu, tzn. pokud by se podařilo emise snížit podle vytyčených cílů, byly by např. odhady růstu teplot učiněné na základě těchto scénářů s velkou pravděpodobností nadhodnoceny. Nicméně současný vývoj koncentrací skleníkových plynů sleduje či převyšuje i pesimistické odhady tohoto vývoje. Tvorba jednotlivých variant scénářů SRES byla provedena na základě čtyř stejně pravděpodobných linií vývoje (storylines) společnosti. Pro každou linii byla provedena velká řada simulací a z ní pak vybrán reprezentativní zástupce. Jednotlivé linie popisuje IPCC následovně (Solomon et al., 2007; oficiální překlad Ministerstvo zemědělství ČR):

SRES A1

Tematická linie skupiny scénářů SRES A1 popisuje budoucí svět s velmi rychlým ekonomickým růstem, kde globální počet obyvatel dosáhne maxima v polovině století a poté klesá a kde jsou rychle zaváděny nové a výkonnější technologie. Důležitými hlavními znaky je globalizace, budování infrastruktur a zvýšená kulturní a sociální interakce, při významném snížení regionálních rozdílů v příjmu na jednoho obyvatele. Skupina scénářů A1 se dělí do tří podskupin, které popisují různý směr technologických změn v energetice. Tři podskupiny A1 se liší svým důrazem na technologie: intenzivní využívání energie z fosilních zdrojů (A1FI), nefosilní zdroje energie (A1T) a vyvážená kombinace všech zdrojů (A1B) – kde vyváženost je definována jako nespolehání se příliš na jeden konkrétní energetický zdroj za předpokladu, že všechny technologie v oblasti energetiky a konečné spotřeby se budou rozvíjet obdobným tempem.

SRES A2

Tematická linie skupiny scénářů SRES A2 popisuje velmi různorodý svět. Důležitým hlavním znakem je soběstačnost a zachování lokálních identit. Míry porodnosti v různých regionech se sblíží velmi pomalu, počet obyvatel však stále roste. Hospodářský rozvoj je orientován především regionálně, ekonomický růst na obyvatele a technologické změny jsou roztržitější a pomalejší než v jiných skupinách scénářů.

SRES B1

Tematická linie skupiny scénářů SRES B1 popisuje svět s trendem sblížení, s počtem obyvatel dosahujícím maxima v polovině století a dále klesajícím jako u skupiny A1, ale s rychlými změnami ekonomické struktury s vývojem směrem ke službám a informační ekonomice, se snižující se materiálovou náročností a zaváděním čistých a úsporných technologií. Důraz je kladen na globální řešení ekonomické, sociální a ekologické udržitelnosti, včetně zajištění rovnoprávnosti a snižování sociální nerovnosti, avšak bez dalších iniciativ v oblasti klimatu.

SRES B2

Tematická linie skupiny scénářů SRES B2 popisuje svět, ve kterém je důraz kladen na lokální řešení ekonomické, sociální a ekologické udržitelnosti. Je to svět, v němž globální počet obyvatel nadále roste, nicméně pomaleji než u skupiny A2, svět se středním tempem ekonomického rozvoje a vývojem v technologiích, který je pomalejší a různorodější než v případě skupin A1 a B1. Ačkoli se scénář zaměřuje také na ochranu životního prostředí a sociální spravedlnosti, soustřeďuje se na lokální a regionální úroveň.

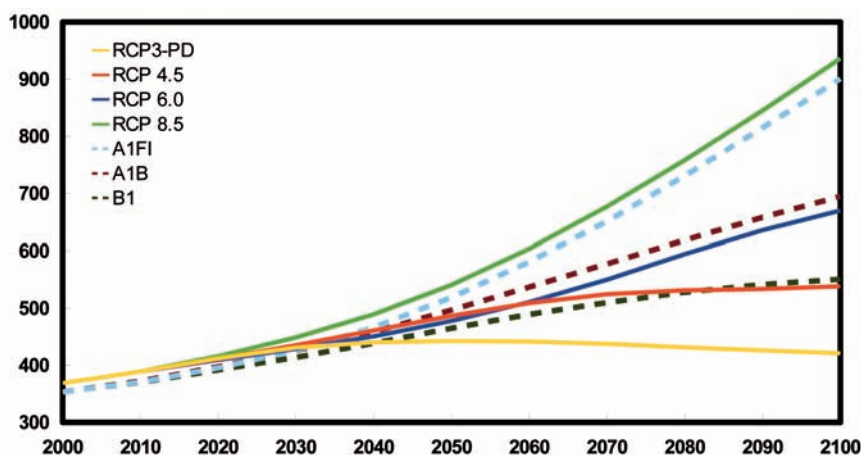
Scénáře SRES jsou v současnosti standardem a vyhodnocení možných změn hydrologické bilance, jež prezentujeme v následujících kapitolách, vychází z těchto scénářů. Nicméně zároveň intenzivně probíhá práce na nové řadě scénářů, které budou součástí Páté hodnotící zprávy IPCC. Z toho důvodu předkládáme stručnou informaci také o těchto scénářích.

Scénáře koncentrací RCP

V současnosti upouští IPCC od záměru koordinace tvorby emisních scénářů a tuto iniciativu přenechává vědecké komunitě s tím, že sám se snaží proces pouze stimulovat. I v minulosti existovala mimo „oficiálních“ emisních scénářů IPCC celá řada scénářů alternativních. Například IPCC AR4 (Solomon et al., 2007) zmiňuje více než 300 emisních scénářů publikovaných po zveřejnění scénářů SRES. Tyto scénáře se liší jednak metodikou vzniku, jednak projekcemi socio-ekonomického vývoje. Na druhou stranu, výsledné koncentrace skleníkových plynů se nutně často překrývají. Na tuto skutečnost navazuje řada scénářů RCP (representative concentration pathways – reprezentativní směry vývoje koncentrací), jež nepopisuje možné scénáře vývoje emisí (jako scénáře SRES), ale vývoje koncentrací. Ke každé z možných variant vývoje koncentrací je pak možno dojít různými způsoby.

V rámci tvorby RCP scénářů byly publikované scénáře na základě rešerše rozděleny do čtyř hlavních skupin a z každé skupiny byl vybrán reprezentativní zástupce. Základní požadavky na RCP scénáře byly (Moss et al., 2008):

- pokrytí rozpětí koncentrací publikovaných scénářů,
- malý sudý počet (za účelem zabránění preference středního scénáře jako nejlepší, průměrné alternativy),
- jasná odlišitelnost tvaru a úrovní koncentrace na konci 21. století.



Obr. 2.1 Porovnání koncentrací CO₂ [ppm] podle emisních scénářů SRES a RCP

Scénáře RCP (základní údaje viz tab. 2.1) obsahují i scénář předpokládající mírný růst koncentrací s vrcholem před rokem 2100 s následným poklesem (RCP3-PD), jenž umožňuje posouzení vlivu možného snižování emisí. Ostatní RCP scénáře víceméně pokrývají rozsah odhadovaných koncentrací pro scénáře SRES (obr. 2.1). Stejně jako v případě scénářů SRES není definována žádná pravděpodobnější varianta vývoje. V případě omezení výpočetních možností Moss et al. (2008) doporučuje primárně uvažovat scénáře s nejvyššími a nejnižšími koncentracemi (RCP8.5 a RCP3-PD), následně scénář RCP4.5 a na závěr scénář RCP6. Podrobnosti o tvorbě RCP scénářů rozvádí např. Moss et al. (2008) nebo Meinshausen et al. (2011).

2.3 Downscaling

Rozlišení globálních klimatických modelů (většinou stovky kilometrů) vede k tomu, že výsledky simulace pro vybranou výpočetní buňku reprezentují prostorový průměr, jenž není přímo srovnatelný s pozorováním z jednotlivých stanic ležících uvnitř výpočetní buňky klimatického modelu. I při pouhé analýze změn vybraných veličin v simulacích klimatického modelu (např. teploty, srážek) může být rozlišení globálních klimatických modelů příliš hrubé pro vystižení prostorového rozložení změn v reálném terénu (např. případnou závislost změn srážek nebo teploty na nadmořské výšce). Z toho důvodu se využívá tzv. downscalingu pro přechod k podrobnějším měřítkům či pro odvození vztahu k pozorovaným datům.

Tab. 2.1 Reprezentativní vývoj koncentrací

RCP	Radiační působení	Koncentrace	Tvar
RCP8.5	> 8,5 W m ⁻² v roce 2100	>≈ 1370 CO ₂ -eq v roce 2100	rostoucí
RCP6	≈ 6 W m ⁻² při stabilizaci po 2100	≈ 850 CO ₂ -eq při stabilizaci	postupná stabilizace
RCP4.5	≈ 4,5 W m ⁻² při stabilizaci po 2100	≈ 650 CO ₂ -eq při stabilizaci	postupná stabilizace
RCP3-PD*	≈ max 3 W m ⁻² před 2100, poté pokles	≈ max 490 CO ₂ -eq	pokles po maximu

* PD = peak and decline, tj. pokles po maximu

Statistický downscaling

Statistický downscaling je založen na hledání empirických vztahů mezi veličinami simulovanými globálními (popřípadě i regionálními) klimatickými modely v měřítku jednotlivých výpočetních buněk a bodovými hodnotami zájmových veličin (např. srážkový úhrn, teplota atp.). Použitelnost této metody je dána explicitním předpokladem stacionarity vztahu mezi veličinou simulovanou globálním klimatickým modelem a zájmovou veličinou. Někteří autoři přitom konstatují nestacionaritu v těchto vztazích (viz Ramage, 1983).

Dynamický downscaling

Dynamický downscaling je prováděn pomocí regionálních klimatických modelů. Jde zpravidla o atmosférické modely s detailnějším rozlišením, které jsou vnořené (nested) do globálních klimatických modelů a zahrnují menší oblast (např. Evropu). Díky podrobnějším měřítkům mohou být v modelech lépe zachyceny orografické detaily i fyzikální procesy (např. tvorba oblačnosti).

Obě metody jsou obecně rozšířené, obě jsou primárně závislé na fyzikální věrohodnosti výstupů globálního klimatického modelu a každá z nich má své výhody a nevýhody. Mezi výhody statistického downscalingu patří zejména možnost vztáhnout výstupy globálních klimatických modelů k jednotlivým stanicím a navíc i k veličinám, jež nebyly globálním klimatickým modelem simulovány, ale mají k simulovaným veličinám nějaký vztah (např. kvalita ovzduší, výška mořských vln atp.). Tato metoda je rovněž výpočetně velmi nenáročná. Nevýhodou statistického downscalingu je jednak subjektivní volba prediktorů a statistického modelu (tj. vnášení další nejistoty), jednak problémy s vystižením dlouhodobé variability klimatu. Dynamický downscaling poskytuje výsledky, jež jsou fyzikálně konzistentní v prostoru a čase. Nevýhodou této metody je zejména velká výpočetní náročnost a závislost na volbě struktury regionálního klimatického modelu. Pro modelování hydrologických dopadů změny klimatu v České republice je tradičně využíváno spíše výstupů globálních a regionálních klimatických modelů než statistického downscalingu.

3 Hydrologické modelování dopadů změny klimatu

3.1 Použití výstupů simulací klimatických modelů

V současnosti existuje řada studií využívajících výstupy klimatických modelů pro hydrologické modelování zejména v měsíčním a denním kroku. Pro přechod k podrobnějšímu časovému měřítku zatím neexistuje obecně přijímaná metodika, zejména kvůli pochybnostem o schopnosti klimatických modelů simulovat realisticky průběh meteorologických veličin v krátkých časových krocích, nicméně i přesto bylo publikováno několik studií zaměřených na změny krátkodobých srážkových a odtokových extrémů.

Scénáře změny klimatu je možno vytvářet řadou různých způsobů. Použitá metodika závisí na účelu modelování a mimo jiné i na časovém kroku modelované řady. Obecně modelování dopadů změny klimatu v kratším časovém kroku vyžaduje složitější metodiku.

Ani výstupy globálních a regionálních klimatických modelů v denním či měsíčním kroku nejsou kvůli systematickým chybám přímo použitelné pro hydrologické modelování (viz kapitolu 4). V zásadě je možné využít dvou přístupů k eliminaci těchto chyb: korekci systematických chyb (bias correction) a přírůstkovou metodu (delta change method).

Korekce systematických chyb spočívá v transformaci simulovaných dat způsobem, jenž zaručí, že vybrané charakteristiky simulovaných veličin pro současné klima se budou co nejvíce přibližovat charakteristikám pozorovaných veličin. Přírůstková metoda transformuje pozorovaná data tak, aby změny mezi pozorovanými a transformovanými daty odpovídaly změnám v klimatickém modelu. Použité transformace jsou zpravidla relativně komplexní (viz box 3.1), jelikož zejména pro hydrologické modelování v denním kroku je nutné zachytit odpovídajícím způsobem jak průměrný stav dané veličiny, tak její extrémy (obecně variabilitu).

Je známo, že jak systematické chyby, tak změny (zejména srážek a teploty) jsou proměnlivé během roku a liší se i pro jednotlivé oblasti statistického rozdělení těchto veličin. Na druhé straně, pro sumarizaci možných dopadů změny klimatu na hydrologický režim, zejména s vědomím nejistot v projekcích klimatických modelů, je dostatečný měsíční krok výpočtu a jednoduché postupy tvorby scénářů změny klimatu, např. přírůstková metoda. Podstata této metody spočívá v odvození měsíčních změn (tzv. přírůstkových faktorů) zvolených veličin (zpravidla srážek a teploty, popřípadě relativní vlhkosti vzduchu) pro každý měsíc pro každou ze zvolených simulací klimatických modelů a následné úpravě pozorovaných časových řad pomocí těchto faktorů.

BOX 3.1 HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ DOPADŮ ZMĚNY KLIMATU V DENNÍM KROKU POMOCÍ PŘÍRŮSTKOVÉ METODY

Podstatou přírůstkové metody je transformace pozorovaných dat způsobem, jenž zaručí, že změny mezi transformovanou a původní řadou jsou stejné jako změny odvozené z regionálního klimatického modelu. U srážek a teploty (zejména v denním kroku) je žádoucí, aby uvažované transformace zohledňovaly změny jak v průměru, tak ve variabilitě. Transformace vyhovující této podmínce použila Shabalova et al. (2003) v rámci přírůstkové metody, Leander a Buishand (2007) využili obdobné transformace pro korekci systematických chyb. Navržené transformace pro pozorované srážky (P), teploty (T) a relativní vlhkosti vzduchu (H) jsou následující:

$$P^* = a P^b$$
$$T^* = a + b(T - \bar{T}) + \bar{T}$$
$$H^* = 1 - a(1 - H)^b$$

V případě srážek a relativní vlhkosti je nejprve optimalizována hodnota parametru b tak, aby $cv(P^*) =$

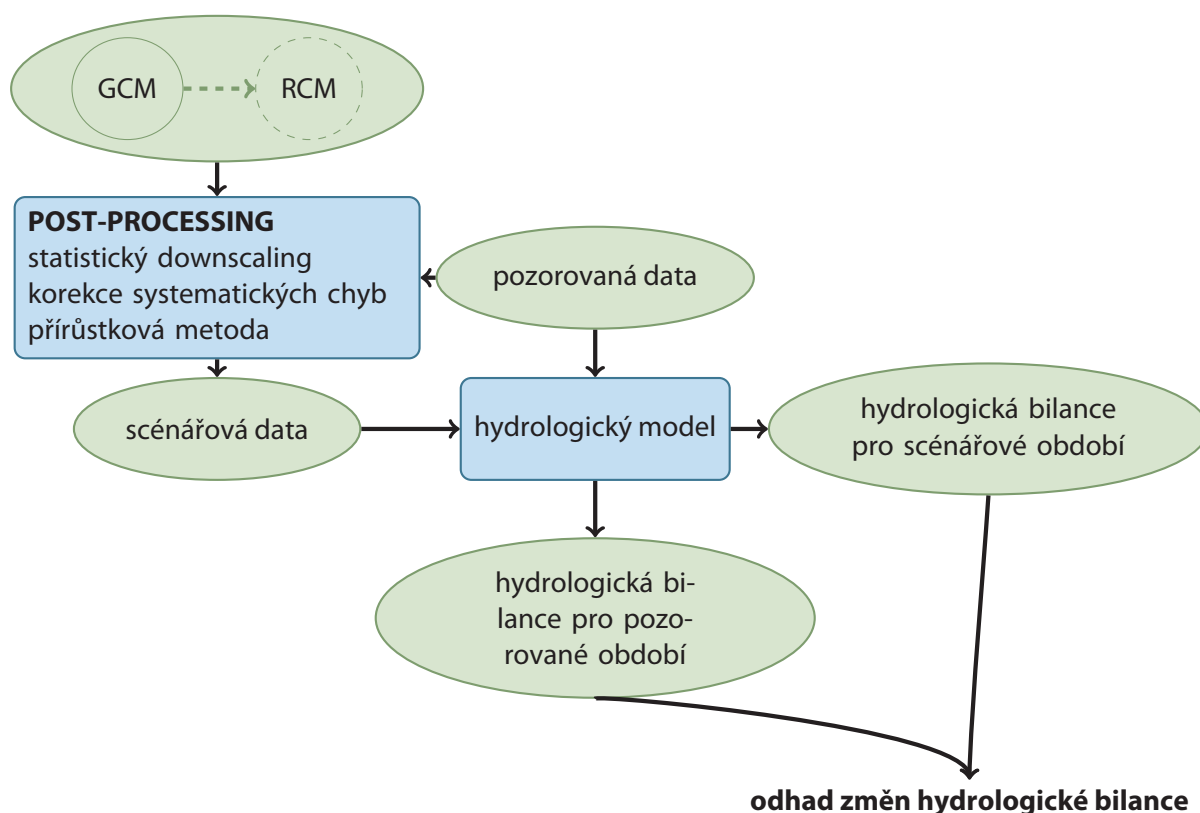
$= cv(P^b)$, respektive $cv(1 - H^*) = cv[(1 - H)^b]$, kde cv je koeficient variace. Následně je vypočítána hodnota parametru a , jako poměr \bar{P}^*/\bar{P}^b , respektive $(1 - \bar{H}^*)/(1 - \bar{H})^b$. V případě teploty jsou parametry a a b odvozeny přímo z rozdílu průměrů, respektive podílu směrodatných odchylek (sd) teploty, tedy $a = \bar{T}^* - \bar{T}$, $b = sd(T^*)/sd(T)$.

Jelikož nelze předpokládat, že by změny byly během roku konstantní, jsou parametry a a b pro všechny veličiny odvozeny pro každý den roku (podobně jako Shabalova et al., 2003; Leander a Buishand, 2007) z časového okna zahrnujícího předcházejících a následujících 30 kalendářních dní ze všech let v uvažovaném období (tedy např. v případě 9. 4. V případě období 1961–1990 byly parametry a a b odhadovány z dat zahrnujících časové okno 10. 3.–9. 5. pro roky 1961, 1962, ..., 1990). Více viz Hanel a Vizina (2010).

Obě metody jsou založeny na neověřitelných předpokladech – tj. systematické chyby jednotlivých simulací regionálních klimatických modelů mají stejný charakter pro současné a budoucí klima (korekce systematických chyb), respektive změny vybraných veličin nejsou na chybách závislé, popřípadě, že změny veličin jsou simulovány podstatně lépe než jejich absolutní hodnoty (přírůstková metoda). Při aplikaci těchto metod v rámci hydrologického modelování je proto nutné uvážit, které charakteristiky jsou použitými transformacemi ovlivněny a které zůstávají neopraveny/nezměněny a jaký to může mít dopad na výsledky modelování.

Samotný postup modelování dopadů změny klimatu na hydrologický režim (viz obr. 3.1) lze stručně shrnout následovně:

1. Zvolený hydrologický model je pro vybrané povodí nakalibrován pomocí pozorovaných dat. Hydrologický model by měl být fyzikálně založen, aby bylo zaručeno, že i pro nepozorované podmínky bude poskytovat fyzikálně přijatelné výsledky.
2. Vstupní veličiny z globálního, popřípadě vnořeného regionálního klimatického modelu jsou převedeny na scénářové řady pro jednotlivá povodí, a to
 - a) statistickým downscalingem,
 - b) „postprocessingem“ výstupů klimatického modelu, tj. využitím přírůstkové metody či korekce systematických chyb.



Obr. 3.1 Schéma hydrologického modelování dopadů změny klimatu

Často je nutné pomocí prostorové interpolace vztáhnout data z výpočetních buněk klimatického modelu k těžišti daného povodí. Pro korektní využití všech metod (a–b) je nezbytné mít k dispozici pozorovaná data.

3. Pomocí nakalibrovaného hydrologického modelu a scénářových řad je provedena simulace hydrologické bilance pro scénářové období.

Pro vyhodnocení možných změn hydrologické bilance (či obecně jakýchkoliv veličin) jsou zpravidla odděleně posuzovány časové řezy odpovídající současnému (kontrolní nebo referenční klima) a budoucímu (scénářovému) období. V klimatologii jsou jako standardní uvažována třicetiletá období, často je pro kontrolní klima voleno období 1961–1990. V rámci jednotlivých časových řezů se změny v charakteristikách jednotlivých veličin většinou přisuzují meziroční variabilitě (tj. případná nestacionarita v rámci jednotlivých řezů je ignorována). Existují i analýzy posuzující dlouhé transientní simulace klimatických modelů (např. pro období 1961–2099), nicméně tyto analýzy se zabývají spíše změnami vybraných charakteristik meteorologických veličin (např. srážkových extrémů, viz např. Hanel a Buishand, 2012) než hydrologickým modelováním.

3.2 Zdroje nejistot

Modelování klimatu samo o sobě zahrnuje řadu nejistot. Tyto nejistoty jsou spojeny zejména s počátečními a okrajovými podmínkami klimatických modelů a s jejich strukturou a parametry (např. Tebaldi a Knutti, 2007). Okrajovými podmínkami simulace globálních klimatických modelů je zejména množství dopadajícího slunečního záření a množství emisí skleníkových plynů, u modelů regionálních je okrajovou podmínkou průběh veličin simulovaných globálním klimatickým modelem. Nejistota spojená s počátečními podmínkami je dána tím, že pro inicializaci klimatického modelu nejsou k dispozici pozorování stavových veličin v dostatečném časovém a prostorovém rozlišení. Navíc, kvůli chaotické povaze klimatického systému jsou výsledky simulace závislé na počátečním stavu systému.

Při použití výstupů klimatických modelů pro hydrologické modelování se k těmto nejistotám přidávají další – zejména nejistoty spojené s volbou metody pro downscaling, výběrem transformací při korekci systematických chyb nebo přírůstkovou metodu, strukturou hydrologického modelu a jeho parametry. Ze studií porovnávajících podíl jednotlivých zdrojů nejistot na celkovou nejistotu v hydrologickém modelování (Kay et al., 2009) vyplývá, že nejistota pramenící z modelování budoucího klimatu (struktura modelů) značně převyšuje nejistotu svázanou s volbou emisního scénáře nebo nejistotu vyplývající z hydrologického modelování. Celková nejistota promítnutá do výsledků hydrologického modelování je značná. Přitom není zcela jednoduché tuto nejistotu kvantifikovat, jelikož její korektní vyhodnocení vyžaduje analýzu velkého množství výstupů klimatických modelů. V minulých letech tak byla ve světě financována řada projektů zabývajících se kvantifikací nejistot v modelování klimatu. Zmíňme například evropské projekty PRUDENCE (Christensen a Christensen, 2007) a ENSEMBLES (Hewitt a Griggs, 2004), v jejichž rámci vznikla řada simulací regionálních klimatických modelů pro Evropu. Začínající projekt CORDEX si podobně klade za cíl vytvořit řadu simulací regionálních klimatických modelů a zpřístupnit výsledky statistického downscalingu pro vybrané domény zhruba pokrývající celý svět. Široce využíván je i soubor simulací založený na klimatickém modelu HadCM3 s různými parametry (tzv. Perturbed physics ensemble) britského Hadley Centre (Collins et al., 2006). Nejrozsáhlejší soubor globálních klimatických modelů je dostupný díky iniciativě *climateprediction.net* (Allen, 1999). V rámci tohoto projektu jsou výpočty simulací klimatických modelů distribuovány mezi jednotlivé uživatele. Stále rozšiřující se soubor má již řádově tisíce simulací, tj. nesrovnatelně víc než v případě ostatních zmiňovaných projektů. Hodnotící zprávy IPCC jsou zpravidla spojeny s projektem CMIP (Climate Intercomparison Project), jenž shromažďuje aktuální simulace globálních modelů. Základní informace o jednotlivých souborech simulací klimatických modelů jsou uvedeny v boxu 3.2.

3.3 Výběr reprezentativních simulací

V souvislosti s existencí řady simulací klimatických modelů vyvstává otázka výběru reprezentativních simulací, popřípadě kombinace modelových výstupů. Je známo, že jedna či malý počet simulací mohou poskytovat zavádějící výsledky. Obecně je možno věrohodnost jednotlivé projekce klimatického modelu hodnotit ze dvou různých hledisek (Giorgi a Mearns, 2001): (1) podle schopnosti simulovat kontrolní klima a (2) podle odchylky projekcí daného klimatického modelu od projekcí ostatních klimatických modelů pro budoucí klima. V návaznosti na takové hodnocení věrohodnosti je možno použít řadu technik kombinace simulací klimatických modelů od prostého průměrování přes průměrování

BOX 3.2 NEJZNÁMĚJŠÍ SOUBORY SIMULACÍ KLIMATICKÝCH MODELŮ

IPCC AR4 modely

Jde o soubor globálních klimatických modelů, jenž byl použit při tvorbě Čtvrté hodnotící zprávy IPCC (Solomon et al., 2007). Pod souhrnným označením IPCC AR4 modely je dostupná (<http://www2-pcmdi.llnl.gov/>) řada simulací globálních klimatických modelů pro kontrolní klima, pro různé budoucí časové horizonty podle emisních scénářů SRES i pro stabilizační experimenty (tj. za předpokladu dalšího nezvyšování emisí skleníkových plynů). Některé globální klimatické modely byly uvažovány v různých verzích. Celkem jsou dostupné simulace 24 globálních klimatických modelů za použití osmi scénářů změn emisí (SRES A1B, SRES A2, SRES B1, předindustriální emise, emise 20. století, stabilizace emisí na úrovni roku 2000, 1% a 2% růst emisí CO₂). Celkem se jedná o více než 150 simulací.

CMIP (Coupled Model Intercomparison Project, v současnosti v páté fázi, tj. CMIP5)

CMIP5 byl zahájen roku 2008 a je cílen na vytvoření rámce pro koordinaci experimentů s klimatickým modelováním, zejména se zaměřením na 5. hodnotící zprávu IPCC, jež by měla být vydána v září 2013. Řada výstupů globálních klimatických modelů (zpravidla s použitím RCP scénářů) je již k dispozici na <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>. Deklarovaným cílem projektu je vytvoření multimodelového kontextu sloužícího zejména (1) k hodnocení mechanismů zodpovědných za rozdíly v simulacích zpětných vazeb spojených zejména s cyklem uhlíku a tvorbou oblačnosti, (2) k prověření schopnosti modelů predikovat klima v měřítku desetiletí a (3) k nalezení důvodů odlišností projekcí stejně řízených modelů.

Hadley Centre PPE

Jedná se o soubor simulací založený na změně parametrů klimatických modelů řady Had. Využity byly jak globální, tak i regionální klimatické modely i model se zjednodušenou reprezentací oceánu (slab ocean). Celkem bylo provedeno 280 běhů modelu, které byly dále využity pro vytvoření statistického emulátoru sloužícího k postizení kombinací parametrů, jež nemohly být (z důvodu výpočetní náročnosti) prozkoumány pomocí klimatického modelu (více viz Collins et al., 2006). Na výstupy navazují i pravděpodobnostní sezonní projekce změny kli-

matu pro Evropu (jednotlivé výpočetní oblasti o velikosti cca 300 km × 300 km) pro srážky a teploty pro desetileté časové řezy do konce 21. století (Harris et al., 2010).

Climateprediction.net (Allen, 1999)

Pomocí systému BOINC (distribuce výpočtu na pozadí spořičů jednotlivých zapojených uživatelů internetu) jsou tvořeny simulace velkého počtu klimatických modelů zaměřených na výzkum různých částí klimatického systému. V současnosti je provedeno přes milion let simulací. Simulace jsou volně dostupné.

Projekt PRUDENCE (Christensen a Christensen, 2007)

Tento projekt byl zaměřen na snížení nejistoty v projekcích regionálních klimatických modelů. V jeho rámci jsou dostupné simulace regionálních klimatických modelů pro Evropu pro kontrolní (1961–1990) a scénářové (2070–2099) období podle emisních scénářů SRES A2 a B2. K řízení (řádově patnácti) regionálních klimatických modelů byly použity modely HadCM, HadAM, ECHAM a ARPEGE. Celkem je dostupných cca 70 simulací.

Projekt ENSEMBLES (Hewitt a Griggs, 2004)

Tento projekt byl významným projektem, na němž participovaly desítky zejména evropských institucí. V rámci projektu byla provedena řada simulací globálních a regionálních klimatických modelů, většinou pro Evropu, ale i pro západní Afriku. Simulace regionálních klimatických modelů jsou dostupné jednak jako čtyřicetileté časové řezy řízené reanalýzou ERA-40 a tzv. transientní simulace řízené globálními klimatickými modely pro období 1950–2050 nebo i 1950–2100. Data regionálních klimatických modelů jsou ke stažení na <http://ensemblesrt3.dmi.dk/>.

Projekt CORDEX (A COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment)

CORDEX navazuje na regionální projekty zaměřené na modelování klimatu a klade si za cíl zpřístupnění kvalitních výstupů regionálních klimatických modelů a statistického downscalingu s globálním pokrytím v jednotném formátu řízené reanalýzami minulého klimatu i různými globálními klimatickými modely (CMIP5) a scénáři koncentrací RCP. V současnosti jsou již dostupné první simulace.

vážené (na základě věrohodnosti jednotlivých simulací) až po odvození pravděpodobnostních scénářů změny klimatu.

Příkladem může být systém vah pro soubor regionálních klimatických modelů vytvořený v rámci projektu ENSEMBLES (Christensen et al., 2010). Tento systém je založen na rozsáhlém hodnocení věrohodnosti jednotlivých simulací podle řady metrik hodnotících chyby v popisu atmosférické cirkulace, sezonních průměrů teploty a srážek, rozdělení pravděpodobnosti denních a měsíčních srážek a teploty, srážkových a teplotních extrémů, dlouhodobých teplotních trendů a ročního cyklu teploty a srážek. Samotní autoři tohoto systému konstatují, že vážení simulací klimatických modelů vede při validaci k obdobným výsledkům jako při použití prostého průměru. Déqué a Somot (2010) dospěli ke stejnému závěru dokonce i s použitím vah náhodných. Navíc, jelikož váhy přiřazené jednotlivým simulacím klimatických modelů je možné validovat pouze pro současné klima (budoucí neznáme), je pravděpodobně bezpečnější používat jednoduchý průměr ze souboru simulací (Weigel et al., 2010). K možnosti odvození pravděpodobnostních scénářů změny klimatu je třeba podotknout, že tvorbě korektních regionálních pravděpodobnostních projekcí stále brání nesplnění některých klíčových předpokladů, zejména vzájemná závislost simulací regionálních klimatických modelů, jež je důsledkem stejných okrajových podmínek (řídící globální klimatický model) a sdílením některých komponent různými klimatickými modely. Nicméně tyto nedostatky je možno obejít pomocí pokročilých statistických technik (Collins et al., 2006; Harris et al., 2010).

V případě, že není možné provést požadovaný výpočet pro rozsáhlý soubor simulací klimatických modelů, vyvstává otázka, které z dostupných simulací považovat za reprezentativní. Z poznatků o výsledcích experimentů s vážením souborů simulací vyplývá, že s velkou pravděpodobností nelze nalézt dostatečně robustní metriku, podle které by bylo možno identifikovat simulace klimatických modelů obecně úspěšnější v simulaci současného klimatu. Co se týče projekcí budoucího klimatu, nezaručuje úspěšnost klimatického modelu při simulaci současného klimatu úspěšnost také při simulaci budoucího klimatu (např. Reifen a Toumi, 2009). Výběr simulací klimatických modelů pouze na základě zvolených jednoduchých charakteristik, jako je např. průměr či zvolený ukazatel variability, může být značně zavádějící, jelikož samotné chyby jsou zatíženy značnou nejistotou a (ne)úspěšnost některých modelů může být víceméně náhodná. Kyselý a Plavcová (2012) například zmiňují, že model, jenž nejlépe reprezentuje rozpětí denních teplot (RegCM_EH5 – označení viz tab. 4.2) je zároveň modelem s nejhůřší reprezentací oblačnosti. Důvodem k zavržení některé z projekcí klimatických modelů by neměly proto být ani tak odchylky od pozorovaných charakteristik srážek a teplot, ale spíše nedostatky v simulaci důležitých procesů (např. nerealistická atmosférická cirkulace atp.), popřípadě posouzení podle komplexnějších měřítek – např. na základě porovnání celých rozdělení pravděpodobnosti srážek a teploty (Johnson a Sharma, 2011) nebo vybraných hydrologických charakteristik – např. bilance fiktivních nádrží (Johnson et al., 2011) nebo hydrologické bilance obecně.

Vyloučíme-li fyzikálně nerealistické projekce, je vhodné volit dále takové simulace, aby výsledná variabilita změn podstatných veličin zůstala zachována, tj. aby nedošlo k podhodnocení nejistot odhadů.

4 Možné dopady změny klimatu na hydrologický režim v České republice

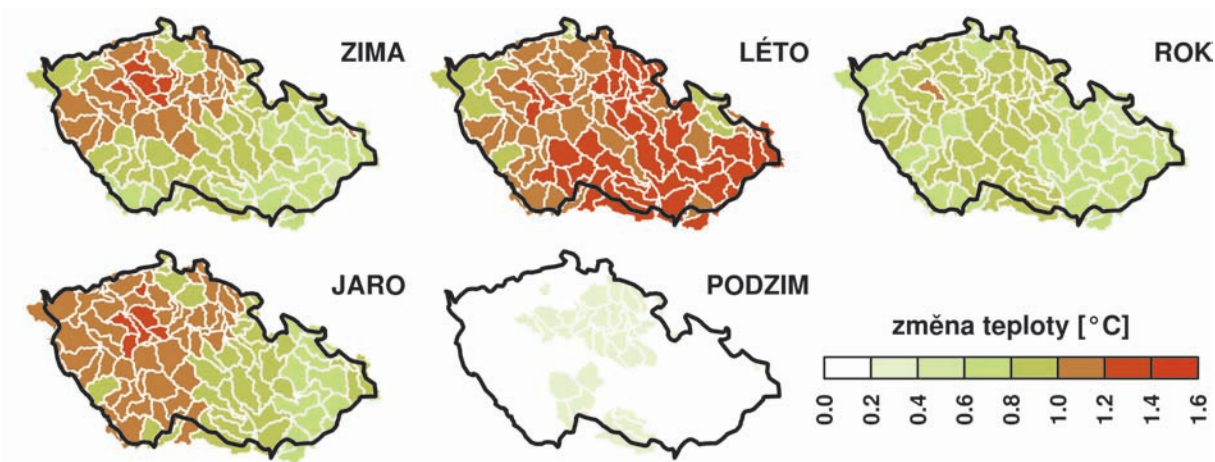
4.1 Probíhající změny

Změnu klimatu ovlivňující hydrologický režim lze v České republice pozorovat již řadu let. Nejmarkantněji jsou změny patrné* na teplotách vzduchu, které např. mezi obdobími 1961–1980 a 1981–2005 vzrostly v ročním průměru o cca 0,6–1,2 °C (obr. 4.1). Tyto změny jsou nejvíce zřejmé v letním období zejména na jihu a jihovýchodě, v zimě a na jaře pak v západní části republiky. Naopak na podzim dochází pouze k minimálním změnám.

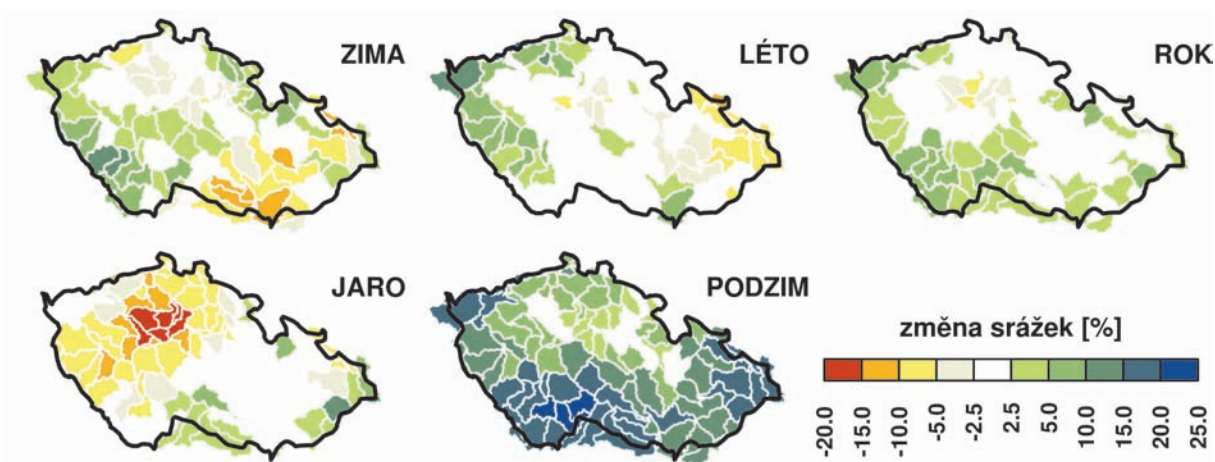
Teplota je zásadní faktor ovlivňující hydrologickou bilanci zejména z toho důvodu, že s rostoucí teplotou roste potenciální evapotranspirace (a pokud je v povodí dostupná voda, i územní výpar). Dochází tedy k rychlejšímu úbytku vody z povodí. Pozorovaný růst teplot vede k růstu potenciální evapotranspirace v ročním průměru o řádově 5–10 %, stejný růst lze konstatovat i pro jaro a léto. K nejvýraznějšímu růstu evapotranspirace dochází v zimě, a to až o více než 20 %, což je způsobeno větším počtem dní s kladnými teplotami vzduchu. Naopak na podzim k zásadním změnám potenciální evapotranspirace nedochází, jelikož není pozorováno zvyšování teplot vzduchu.

Růst potenciální evapotranspirace je nicméně na velké části našeho území kompenzován růstem srážek (obr. 4.2). V roční bilanci činí tento nárůst až 10 %. V ročním chodu můžeme konstatovat výraznější nárůst u podzimních srážek (až 20 %, zejména v jižní části ČR). Výjimkou je oblast středních Čech, kde namísto zmiňovaného růstu srážek dochází k jejich poklesu, na jaře až o 20 %. Z rozdílu změn srážek a potenciální evapotranspirace (obr. 4.3) je zřejmé, že v roční bilanci dochází na velké části našeho území k účinné kompenzaci růstu potenciální evapotranspirace zvýšenými srážkami. Nicméně ve střední části ČR jsou povodí, pro která toto neplatí, což vede k dlouhodobě pasivní hydrologické bilanci. Právě v těchto oblastech se vyskytují povodí, ve kterých lze již v současnosti pozorovat negativní dopady změny klimatu v podobě nedostatku vodních zdrojů v některých letech. Příkladem mohou být povodí Rakovnického potoka, Srpiny, Blšanky a další. V současnosti jde zejména o povodí přirozeně chudá na srážky, nicméně v budoucnu (naplní-li se projekce klimatických modelů) můžeme očekávat podobné problémy i v jiných oblastech České republiky.

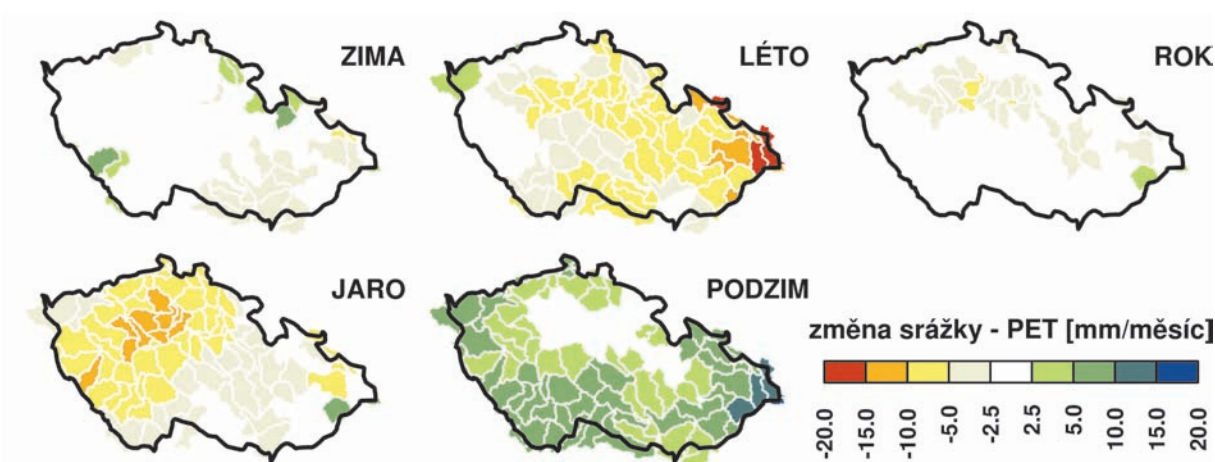
*Pozorované srážky a teploty pro Českou republiku a jejich změny byly odvozeny z datové sady pozorovaných srážek a teploty interpolovaných ze stanic do sítě podobné výpočetní síti klimatických modelů. K tvorbě datové sady bylo použito velké množství stanic, byly provedeny testy homogenity a korekce na nadmořskou výšku. Datová sada pokrývá období 1961–2007; více viz Štěpánek et al. (2011).



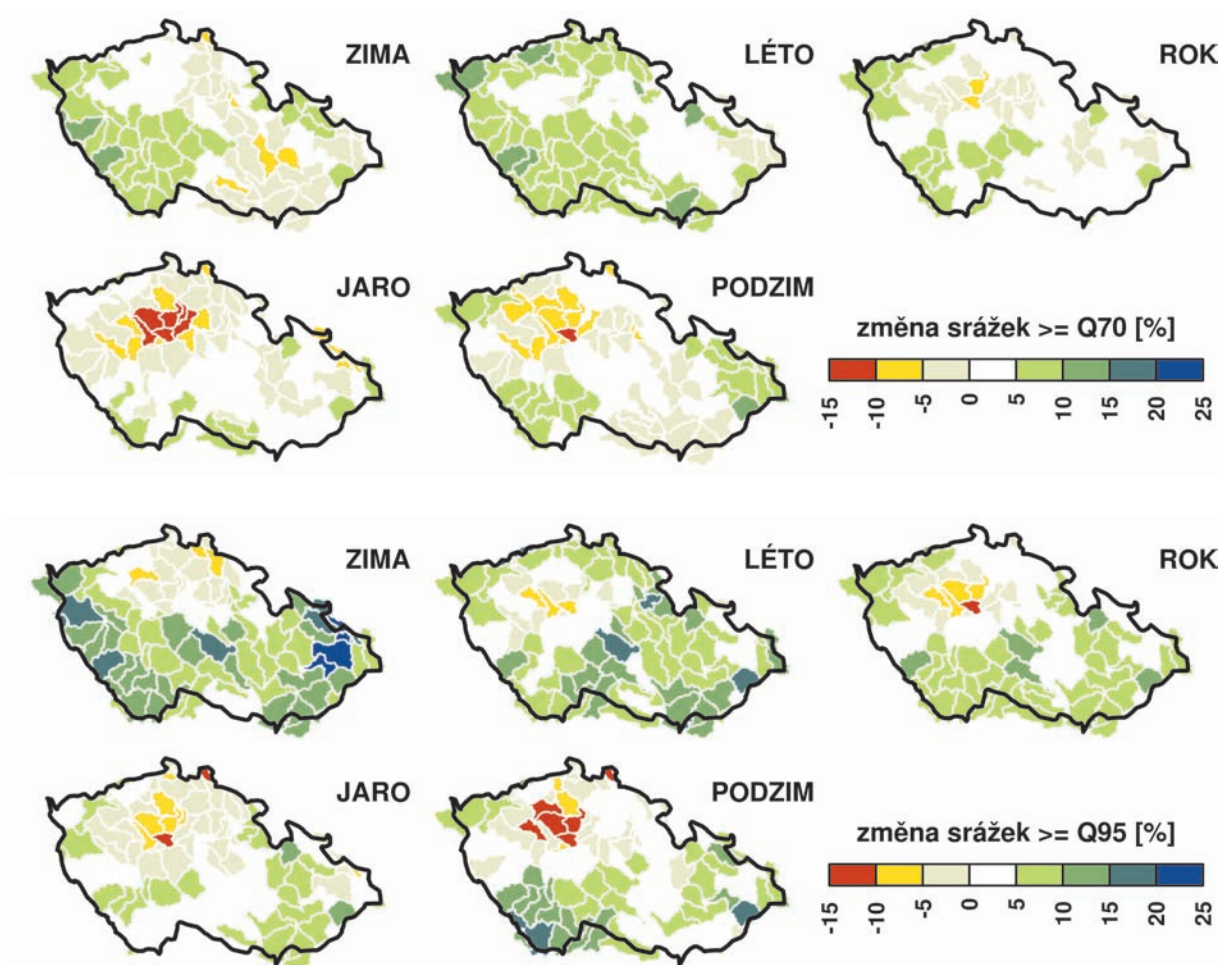
Obr. 4.1 Pozorované změny teplot mezi obdobími 1961–1980 a 1981–2005



Obr. 4.2 Pozorované změny srážek mezi obdobími 1961–1980 a 1981–2005



Obr. 4.3 Pozorované změny rozdílu srážek a potenciální evapotranspirace (PET) mezi obdobími 1961–1980 a 1981–2005



Obr. 4.4 Pozorované změny srážek vyšších nebo rovných 70% (Q70 – nahoře) a 95% (Q95 – dole) kvantilu srážek mezi obdobími 1961–1980 a 1981–2005 pro jednotlivá roční období

Kromě změn rozložení průměrných srážek mají zásadní vliv i změny v jejich intenzitě, a to zejména proto, že v případě srážek s nízkým úhrnem dochází z velké části k jejich odpaření a tyto srážky tak nepřispějí k doplnění zásob vody v povodí. Změna četnosti intenzivních srážek může být vyjádřena např. změnou průměrných srážkových úhrnů nad vybraným prahem. Na obr. 4.4 jsou uvedeny relativní změny průměrů srážkových úhrnů nad 70% a 95% kvantilem denních srážkových úhrnů mezi obdobími 1961–1980 a 1981–2005 pro jednotlivá roční období. Ve všech ročních obdobích pro obě zvolené meze dochází na našem území k růstu i poklesu této statistiky. K výrazným poklesům vyšších srážkových úhrnů dochází zejména na jaře a na podzim ve střední a severní části naší republiky, v případě 70% kvantilu i na střední a jižní Moravě. V roční bilanci lze konstatovat pokles zejména v oblasti středních Čech, tj. opět v oblasti vykazující pokles průměrných srážek. K růstu vyšších srážkových úhrnů dochází na velké části území zejména v zimě a v létě, pro 95% kvantil v zimě spíše v jižní polovině naší republiky, v létě pak na celém území mimo střední Čechy.

I v případě vyššího prahu (95% kvantilu) se nejedná o srážkové extrémny, jak je běžně chápeme – 95% kvantil denních srážek pro sezonu má průměrnou dobu opakování menší než jeden rok. Probíhající

	Labe a Vltava	Morava a Odry
ZIMA	+++	+
JARO	--	--
LÉTO	++	+
PODZIM	-	+/-

Tab. 4.1 Shrnutí pozorovaných trendů extrémních srážek pro povodí Labe a Vltavy a povodí Moravy a Odry pro jednotlivá roční období (Kyselý, 2009)

+++ (– – –) rostoucí (klesající) trend na 75% stanic, ++ (– –) rostoucí (klesající) trend na 60% stanic, + (–) nevýznamný trend

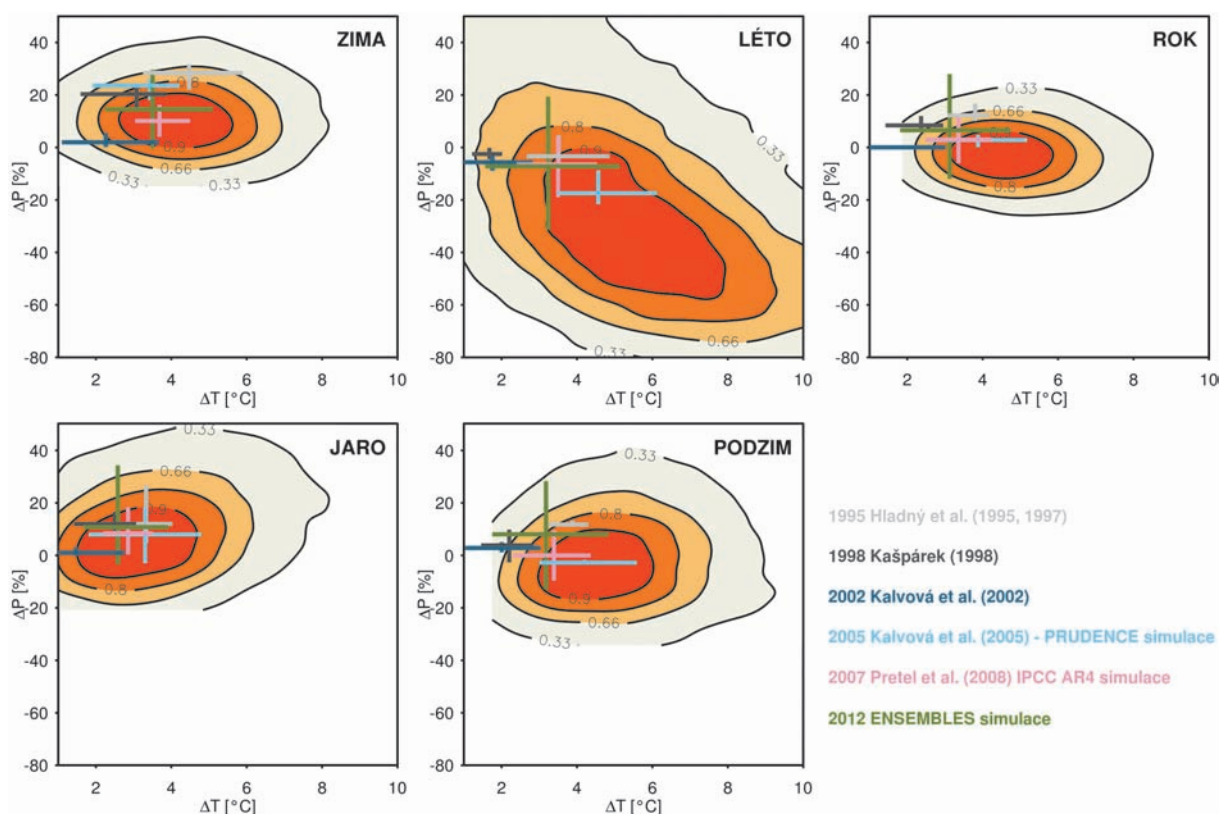
změny srážkových extrémů (tj. ročních či sezonních maxim) studoval např. Kyselý (2009). K růstu srážkových maxim dochází zejména v povodí Labe a Vltavy především v zimě a v létě, pro povodí Moravy a Odry je růst nevýznamný. Na jaře dochází k poklesu srážkových maxim pro celé území ČR (viz tab. 4.1).

4.2 Scénáře změny klimatu

V rámci hydrologického modelování dopadů změny klimatu v České republice, jež probíhá již od devadesátých let, byla připravena řada scénářů změny klimatu* reflektujících aktuální míru poznání v oblasti modelování klimatu. Tyto scénáře byly zpravidla založeny na simulacích globálních či regionálních klimatických modelů. Kromě využití různých simulací klimatických modelů v jednotlivých studiích (Hladný et al., 1995, 1997; Kašpárek, 1998) tak byla postupně vytvořena řada scénářů změny klimatu vycházejících z globálních klimatických modelů (Kalvová et al., 2002), ze simulací regionálních klimatických modelů z projektu PRUDENCE (Kalvová et al., 2005). V současnosti byla provedena řada studií využívajících globální klimatické modely IPCC AR4 (Pretel, 2008), simulace regionálních klimatických modelů z projektu ENSEMBLES (tato monografie) či simulace modelu ALADIN-CLIMATE/CZ vytvořené v ČHMÚ. V rámci evropských projektů byly posuzovány simulace vycházející z projektů Cecilia a WATCH. Rovněž existuje řada projekcí, jež nebyly pro hydrologické modelování v České republice doposud uvažovány – např. pravděpodobnostní scénáře britského Hadley Centre (Harris et al., 2010), rozsáhlý soubor simulací globálních klimatických modelů vycházející z projektu *climateprediction.net* apod. V souvislosti s přípravou páté hodnotící zprávy IPCC, jež uvažuje novou řadu scénářů vývoje koncentrací RCP a v rámci rozvíjejících se projektů (např. CORDEX) lze očekávat i v budoucnu řadu nových projekcí klimatických modelů a návazných scénářů změny klimatu.

Analýzy prezentované dále v této publikaci z velké části využívají simulací regionálních klimatických modelů (tab. 4.2) pocházejících z projektu ENSEMBLES v kombinaci se simulací regionálního klimatického modelu ALADIN-CLIMATE/CZ (provedena na ČHMÚ), jež mají srovnatelné horizontální rozlišení a pokrývají podobné časové období. Všechny tyto simulace byly řízeny globálními klimatickými modely s využitím emisního scénáře SRES A1B. Pro věrnější postižení nejistot spojených s modelováním klimatu by bylo vhodné uvažovat i ostatní emisní scénáře. Na druhé straně, jak už bylo zmíněno, nejistota pramenící z modelování budoucího klimatu do jisté míry převyšuje nejistotu svázanou s volbou emisního scénáře. Pro odvození scénářů změny klimatu byla (není-li uvedeno jinak) využita jednoduchá

*Scénářem změny klimatu obecně rozumíme jakýmkoliv způsobem provedený odhad budoucího klimatu ke zvolenému časovému horizontu. Oproti tomu, pojem „projekce klimatického modelu“ označuje simulaci klimatického modelu pro budoucí klima. Scénáře změny klimatu jsou často založeny na projekcích klimatických modelů, ale mohou např. vycházet z analýzy pozorovaných trendů apod.



Obr. 4.5 Změny srážek a teploty a jejich rozsah podle vybraných scénářů změny klimatu ke konci 21. století používaných pro studie dopadů změny klimatu v České republice; izoliniemi jsou zobrazeny pravděpodobnostní scénáře změny klimatu britského Hadley Centre (Harris et al., 2010)

přírůstková metoda (viz box 4.1), jež navazuje na předchozí studie, je jednoduše interpretovatelná a hodnotí dopady změny klimatu v duchu klasické citlivostní analýzy.

Jako referenční období bylo standardně uvažováno období 1961–1990, pro odhady budoucích změn byla použita období 2010–2039, 2040–2069 a 2070–2099. Tyto časové horizonty jsou dále označovány pomocí jejich středů jako 2025, 2055 a 2085. Vzhledem k tomu, že je analyzován velký počet simulací, je nutné výsledky vhodným způsobem zjednodušit. Proto se v dalších analýzách primárně soustředíme zejména na průměry (popřípadě mediány) výsledků všech simulací regionálních klimatických modelů (průměr/medián souboru modelů), zároveň budeme diskutovat variabilitu výsledků mezi jednotlivými simulacemi a nejistoty závěrů z ní pramenící.

Porovnání rozpětí sezonních a ročních změn srážek a teplot podle různých scénářů změny klimatu používaných v minulosti pro modelování dopadů změny klimatu v České republice udává obr. 4.5 společně se scénáři používanými při analýzách dokumentovaných v této publikaci (tab. 4.2 – ENSEMBLES simulace). Pro porovnání jsou zobrazeny i pravděpodobnostní scénáře změny klimatu britského Hadley Centre (Harris et al., 2010). Tyto pravděpodobnostní scénáře jsou výsledkem rozsáhlého experimentu (Collins et al., 2006) a dá se předpokládat, že celkem věrně popisují nejistoty spojené s modelováním klimatu. Nicméně jsou založeny na analýze jednoho klimatického modelu řízeného emisním scénářem SRES A1B. Výsledky by byly pravděpodobně částečně odlišné při použití jiného klimatického modelu a emisního scénáře. Je vidět, že používané scénáře změny klimatu zvláště nevybočují z variability dané

Tab. 4.2 Uvažované simulace regionálních klimatických modelů

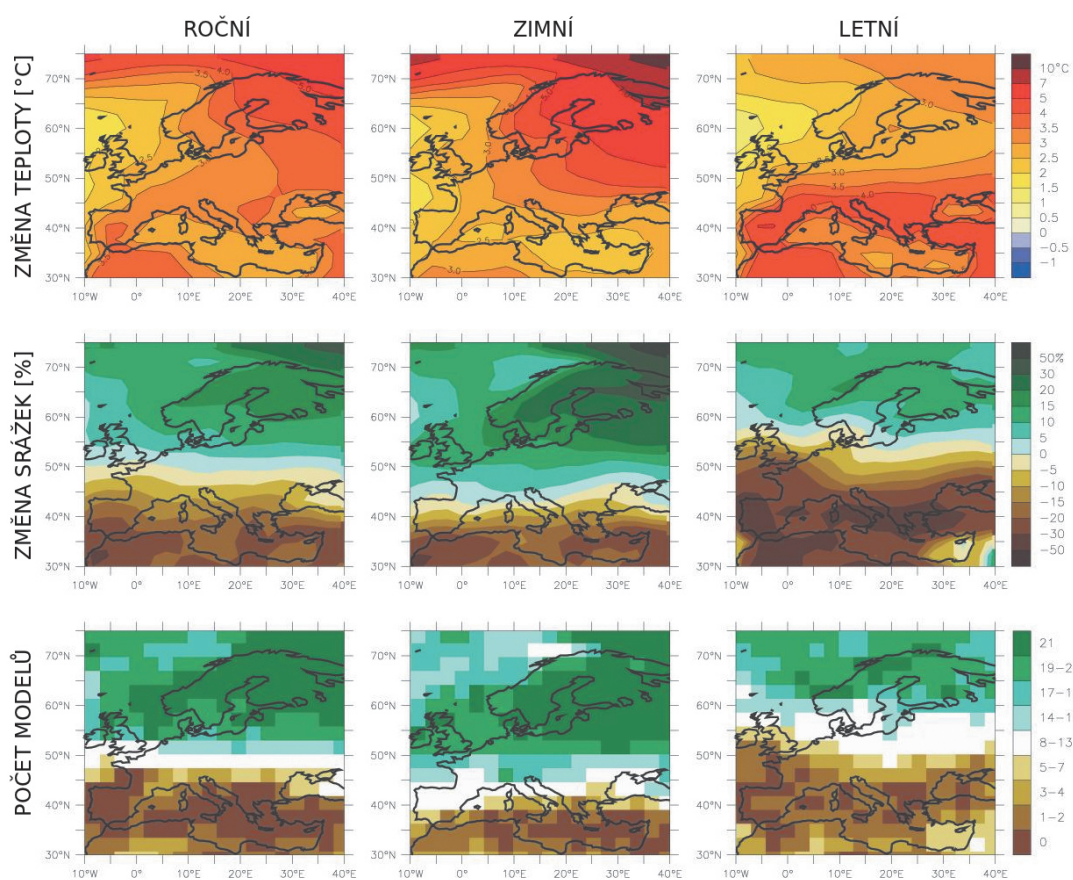
Model	Akronym	Zdroj
řízené modelem ECHAM5		
RACMO	RACMO_EH5	Královský nizozemský meteorologický institut (KNMI)
REMO	REMO_EH5	Max-Planck Institut (MPI), Německo
RCA	RCA_EH5	Švédský hydrometeorologický institut (SMHI)
RegCM	RegCM_EH5	Mezinárodní centrum pro teoretickou fyziku (ICTP), Itálie
HIRHAM	HIR_EH5	Dánský meteorologický institut (DMI)
řízené modely HadCM3Q0, HadCM3Q3, HadCM3Q16		
HadRM	HadRM_Q0	Hadley Centre, Velká Británie
CLM	CLM_Q0	Federální švýcarský technologický institut (ETHZ)
HadRM	HadRM_Q3	Hadley Centre, Velká Británie
RCA	RCA_Q3	Švédský hydrometeorologický institut (SMHI)
HadRM	HadRM_Q16	Hadley Centre, Velká Británie
RCA	RCA_Q16	Komunitní sdružení pro klimatickou změnu (C4I), Irsko
řízené modelem ARPEGE		
HIRHAM	HIR_ARP	Dánský meteorologický institut (DMI)
CNRM-RM	CNRM_ARP	Národní centrum pro meteorologický výzkum (CNRM), Francie
ALADIN-CLIMATE/CZ	ALA_ARP	Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ), Česká republika
řízené modelem BCM		
RCA	RCA_BCM	Švédský hydrometeorologický institut (SMHI)

volbou struktury a parametrů klimatického modelu (v podobě pravděpodobnostních scénářů). Ve srovnání s pravděpodobnostními scénáři lze konstatovat, že u nás používané scénáře patří ve většině případů ke scénářům předpokládajícím nižší růst teplot a nižší pokles (či vyšší růst) srážek. Scénáře používané v této publikaci vycházejí z většího počtu modelů než scénáře uvažované v předchozích studiích, což vede k většímu rozpětí předpokládaných změn (obr. 4.5). Toto rozpětí shodou okolností zároveň zhruba pokrývá rozpětí změn podle scénářů používaných v minulosti.

Zpřesňování scénářů změny klimatu spočívá především v analýze fyzikálně realističtějších klimatických modelů, zpravidla s větším prostorovým rozlišením, jež umožňuje lepší zachycení orografie a jejího vlivu. Samo o sobě zpravidla nevede ke zužování rozpětí projekcí klimatických modelů, ale spíše k lepšímu popisu nejistot. Při tvorbě jednotlivých scénářů změny klimatu pro Českou republiku byly uvažovány různé emisní scénáře, pravděpodobnostní scénáře vycházejí z emisního scénáře SRES A1B. Je zřejmé, že uvážíme-li nejistoty spojené s modelováním klimatu, není vliv emisního scénáře klíčový.

4.3 Projekce klimatických modelů

Možné změny hydrologického režimu do značné míry souvisejí se změnami srážek a teploty. V širším kontextu můžeme konstatovat, že v celé Evropě se simulace klimatických modelů shodují na růstu teploty (obr. 4.6), v ročním průměru a v zimě spíše na severu a severozápadě Evropy (do cca 5 až 6 °C), v létě spíše v Evropě jižní (do cca 5 °C). Klimatické modely se obecně shodují na růstu srážek na severu Evropy a jejich poklesu na jihu Evropy (obr. 4.6). Co se týče roční bilance srážek, prochází hranice mezi zvyšováním a snižováním srážek po cca 50° severní šířky, tj. přes Českou republiku, takže klimatické modely nepočítají (v průměru) s výraznými změnami v ročních srážkových úhrnech. Výraznější změny lze pozorovat v sezóním rozložení srážek, kdy se zmiňovaná hranice přechodu mezi růstem v severní



Obr. 4.6 Změny teploty a srážek pro Evropu podle IPCC AR4 modelů: (nahore) průměrná roční, zimní a letní změna teploty mezi 1980–1999 a 2080–2099, (uprostřed) průměrná roční, zimní a letní relativní změna srážek, (dole) počet modelů (z 21) indikující růst srážek (Christensen et al., 2007)

části Evropy a poklesem v jižní Evropě přesouvá k jihu (zima) či k severu (léto). Pásmo přechodu je zároveň charakterizováno značnou nejistotou v projekcích modelů (obr. 4.6 dole). Tato nejistota se dále propaguje do hydrologického modelování.

Teplota a srážky

Scénáře změny klimatu pro Českou republiku počítají s růstem teploty během celého roku. Nejnižší růst teploty lze zpravidla konstatovat v jarním období (obr. 4.7), naopak nejvyšší v zimě, pro některé časové horizonty i na podzim (2025 a 2085) a na části území také v létě (2085). V průměru teplota roste zjednodušeně o něco málo více než 1, 2, a 3 °C pro uvažované časové horizonty 2025, 2055 a 2085. Změny teploty pro jednotlivá roční období a časové horizonty udává tab. 4.3. Prostorové rozložení změn teploty je víceméně homogenní – rozdíly mezi odhadovanými změnami pro různé části České republiky jsou většinou nižší než 0,2 °C. Výjimkou jsou změny teploty v letním období pro časový horizont 2085 s nejvyšším růstem teploty na jihu republiky a prostorovými rozdíly vyššími než 0,5 °C. Simulace klimatických modelů předpokládají mírný růst srážek během celého roku kromě letního období (obr. 4.8). Výjimkou je časový horizont 2025, pro který v průměru srážky rostou během celého

Tab. 4.3 Průměrné změny teploty [°C] a srážek [%] pro ČR v souboru klimatických modelů projektu ENSEMBLES

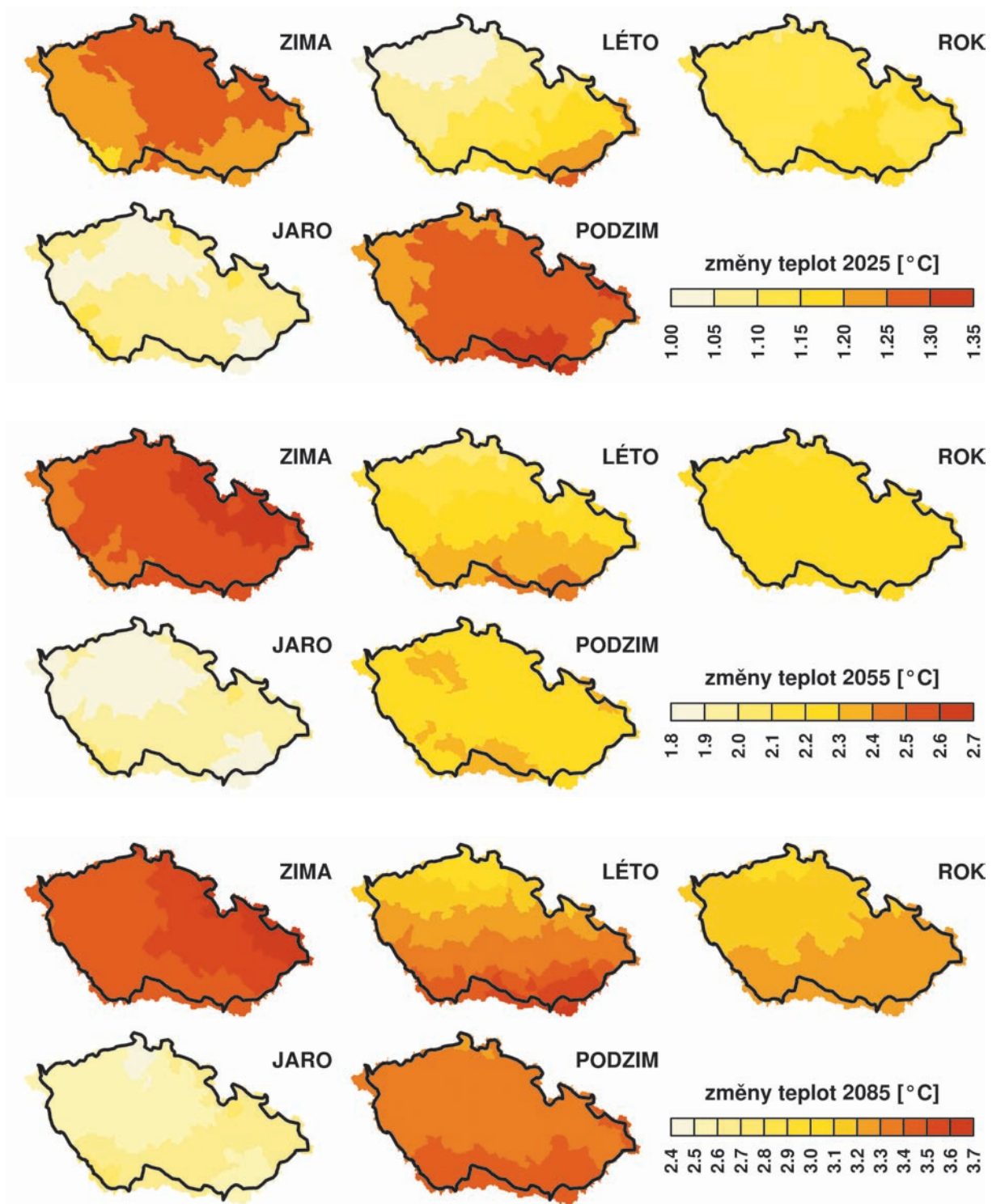
Teplota	Zima	Jaro	Léto	Podzim	ROK	Srážky	Zima	Jaro	Léto	Podzim	ROK
2025	1,3	1,06	1,1	1,27	1,18	2025	4,83	1,32	2,79	5,75	3,35
2055	2,56	1,91	2,23	2,28	2,24	2055	8,05	5,21	-1,9	6,19	3,94
2085	3,5	2,58	3,26	3,37	3,18	2085	13,74	9,71	-6,61	7,51	5,49

roku kromě jarního období, kdy modely projektují růst srážek jen pro severní část České republiky. Růst průměrných srážek je většinou řádově do 10 % pro časové horizonty 2025 a 2055, pro časový horizont 2085 zpravidla do 20 %, v zimě na některých povodích až 25 %. V roční bilanci dochází k růstu srážek pro všechny horizonty zpravidla do 10 %. Změny teploty vzduchu a srážek pro jednotlivá roční období a časové horizonty udává tab. 4.3. Obecně je možno vyšší růst srážek předpokládat spíše v zimním období. Pokles srážek v letním období je nejmarkantnější pro časový horizont 2085. Vyšší poklesy jsou předpokládány na jihu a východě našeho území (většinou 5–10 %, na východě i 15 %), ale prostorové rozložení změn srážek je nejasné. Na obr. 4.8 jsou dále pomocí šrafování znázorněny oblasti, pro které se 2/3 (jednoduché šrafování), resp. 90 % (dvojitě šrafování) simulací klimatických modelů shodne na znaménku změny. Lze konstatovat, že závěry jsou z hlediska znaménka změny většinou robustní – na růstu podzimních, zimních a ročních srážek se většina modelů shoduje pro velké části území. Naopak letní pokles srážek je relativně nejistý.

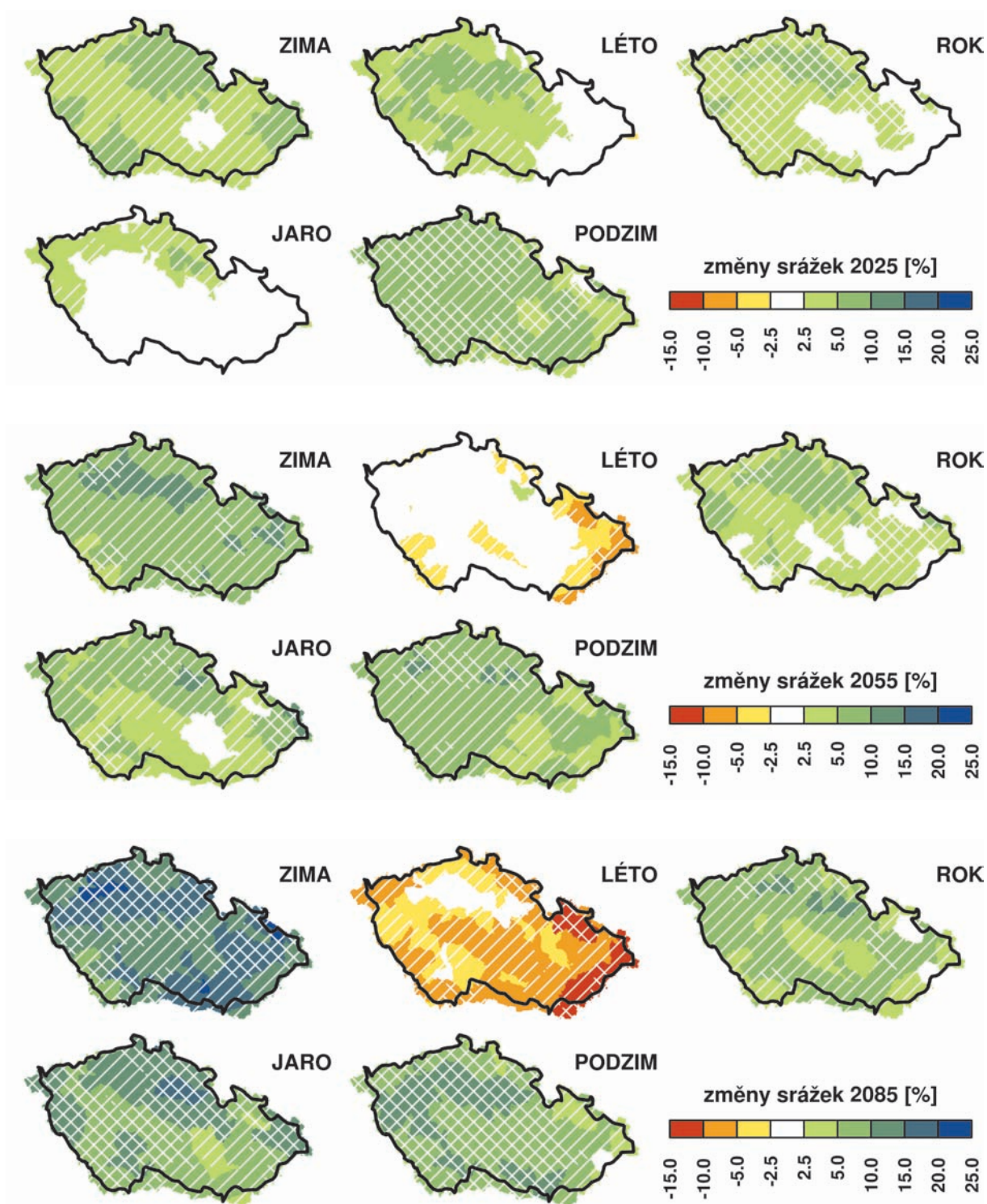
Obrázek 4.9 shrnuje rozdíly v odhadu sezonních a ročních změn teploty mezi jednotlivými simulacemi regionálních klimatických modelů pro časový horizont 2085. U jednotlivých projekcí teploty je opět patrná velmi malá prostorová variabilita změn (tj. rozpětí udané šedými čarami). Nicméně rozdíly mezi jednotlivými simulacemi regionálních klimatických modelů jsou značné, zejména v létě, kdy dosahují až 5 °C. Pro ostatní roční období jsou tyto rozdíly do 3 °C. U změn zimních teplot lze zřetelně pozorovat silný vliv řídicího globálního klimatického modelu.

U srážek (obr. 4.10) lze konstatovat značnou prostorovou heterogenitu změn očekávaných podle jednotlivých simulací, zejména v létě a na podzim (rozpětí kolem 30 %). Nicméně prostorové rozložení změn srážek u jednotlivých simulací není stejné a v případě průměru souboru modelů se do značné míry vyruší, takže průměrné změny srážek jsou prostorově relativně málo variabilní (obr. 4.8). Rozpětí odhadovaných změn mezi simulacemi regionálních klimatických modelů je řádově stejné jako prostorová heterogenita pro jednotlivé modely (tedy cca 30 %). Změny zimních a ročních srážek jsou do značné míry určeny globálním klimatickým modelem, a to zejména proto, že tyto změny souvisí se změnami atmosférické cirkulace (jedná se zpravidla o frontální srážky), zatímco změny letních srážek více souvisejí s konvektivními srážkami, a jsou tedy určeny spíše regionálním klimatickým modelem.

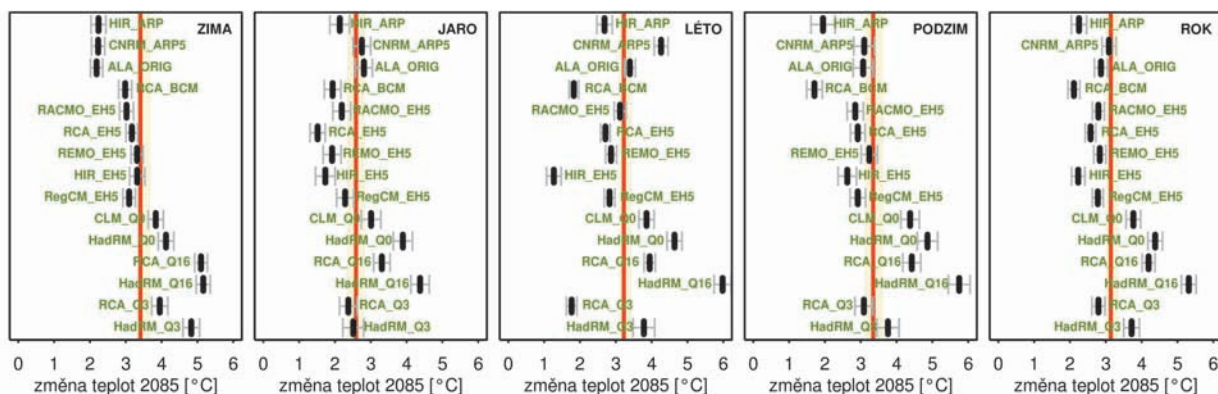
Změny sezonních a ročních 1 až 30denních srážkových extrémů pro doby opakování 2 až 50 let udává obr. 4.11 (Hanel a Buishand, 2012). Pro všechny uvažované doby trvání a opakování dochází k růstu srážkových extrémů ve všech ročních obdobích. Růst je nejvýraznější pro jednodenní srážkové extrémy (cca 20–30 %), zejména v létě a na podzim, a také pro roční srážkové extrémy. Pro extrémy delšího trvání jsou změny buď víceméně stejné (zima a jaro), nebo nižší (léto, podzim a roční maxima) než pro jednodenní extrémy. Kromě léta a krátkodobých srážkových extrémů na podzim není velký rozdíl mezi změnami srážkových extrémů pro různé doby opakování (tj. méně extrémní srážky rostou stejně jako velmi extrémní srážky). Nicméně nejistota odhadů změn srážkových extrémů je ještě vyšší než nejistota odhadů změn průměrných srážek, jelikož je nutno uvažovat i nejistoty spojené s odhadem extrémů.



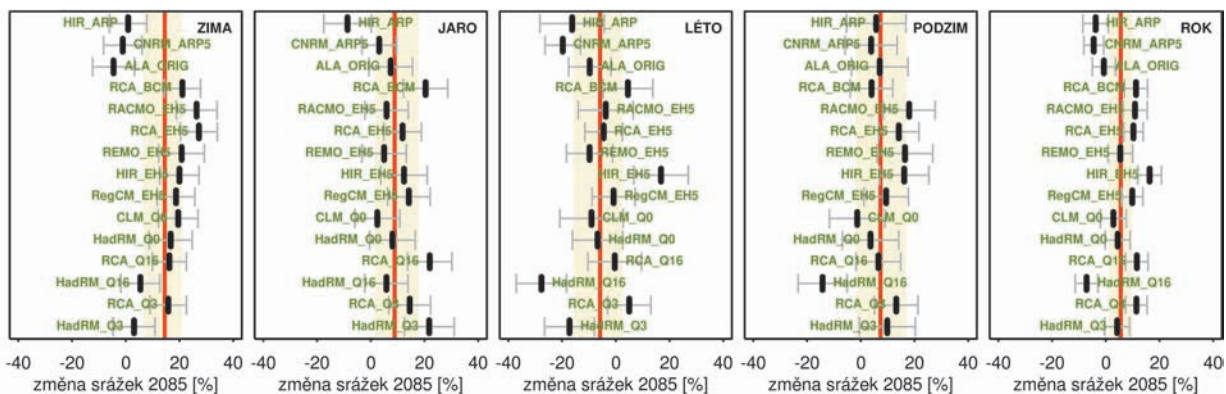
Obr. 4.7 Průměrné změny teplot v souboru klimatických modelů pro časové horizonty 2025, 2055 a 2085



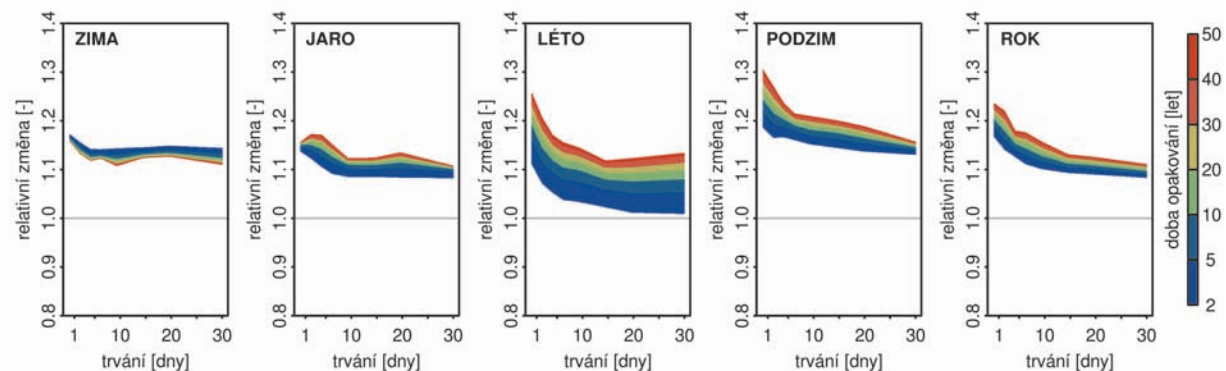
Obr. 4.8 Průměrné změny srážek v souboru klimatických modelů pro časové horizonty 2025, 2055 a 2085; pomocí šrafování jsou znázorněny oblasti, pro které se 2/3 (jednoduché šrafování), resp. 90 % (dvojitě šrafování) simulací klimatických modelů shodne na znaménku změny



Obr. 4.9 Změny teploty podle souboru modelů z projektu ENSEMBLES; červená čára udává průměr souboru, černě jsou vyznačeny průměrné projekce pro jednotlivé simulace regionálních klimatických modelů, šedou barvou je znázorněno rozmezí, ve kterém leží změny pro celou Českou republiku



Obr. 4.10 Změny srážek podle souboru modelů z projektu ENSEMBLES; červená čára udává průměr souboru modelů, černě jsou vyznačeny průměrné projekce pro jednotlivé simulace regionálních klimatických modelů, šedou barvou je znázorněno rozmezí, ve kterém leží změny pro celou Českou republiku



Obr. 4.11 Změny srážkových extrémů v souboru klimatických modelů pro sezónní a roční maxima trvání 1 až 30 dní; barevně jsou odlišeny změny pro různé doby opakování

BOX 4.1 MĚSÍČNÍ PŘÍRŮSTKOVÉ SCÉNÁŘE

Pro každý z modelů z tab. 4.2, každou výpočetní buňku (cca 130 buněk na území České republiky), každou veličinu (srážky P , teplota T , relativní vlhkost vzduchu H) a každý měsíc roku (m) byly odvozeny přírůstkové faktory (ΔP , ΔT , ΔH) odpovídající změnám mezi 30letými časovými řezy se středem v roce 1975 (tj. kontrolní období $_{ref}$) a stejně dlouhým obdobím se středem v roce $y = 1976, 1977, \dots, 2085$ (tj. scénářová období $_{sce}$).

$$\Delta P(y, m) = \frac{\bar{P}_{sce}(y, m)}{\bar{P}_{ref}(y, m)}$$
$$\Delta T(y, m) = \bar{T}_{sce}(y, m) - \bar{T}_{ref}(y, m)$$
$$\Delta H(y, m) = \frac{1 - \bar{H}_{sce}(y, m)}{1 - \bar{H}_{ref}(y, m)}$$

Pro každý model, veličinu, výpočetní buňku a měsíc roku tak vznikla časová řada přírůstkových faktorů od roku 1975 do roku 2085. Scénáře pro jednotlivá povodí a modely byly následně tvořeny tak,

že nejprve byl určen rok odpovídající středu pozorované řady; pokud vycházel střed řady před rok 1975, byl za něj dosazen rok 1975 (předpokládáme, že případný vliv změny klimatu v předchozích letech je minimální, navíc pro odvození přírůstkových faktorů před tímto obdobím nemáme data z klimatických modelů). Následně byly uvažovány změny mezi tímto rokem a roky 2025, 2055 a 2085. Změny z jednotlivých výpočetních buněk byly interpolovány na povodí na základě plochy výpočetních buněk pokrývajících dané povodí a pozorované řady byly o tyto změny opraveny.

Takto vytvořené scénáře počítají pouze se změnami průměrů uvažovaných veličin. Studie kvantifikující vliv zahrnutí změn variability měsíčních srážek, teploty a relativní vlhkosti vzduchu na změny složek hydrologické bilance v České republice doposud nebyla provedena a je možné, že případným zahrnutím změn variability by částečně bylo dosaženo odlišných výsledků.

Hydrologický cyklus

Pro odhad dopadů změny klimatu na hydrologický režim byly využity jednoduché přírůstkové scénáře (viz box 4.1) změn teploty, srážek a relativní vlhkosti vzduchu. Hydrologický model Bilan (viz box 4.2) byl nakalibrován pro 250 povodí různých velikostí. Následně byla modelována hydrologická bilance pro pozorované podmínky a pro podmínky ovlivněné změnou klimatu. Primárně byly analyzovány změny mezi obdobími 1961–1990 (referenční období) a 2010–2039 (dále 2025), 2040–2069 (dále 2055) a 2070–2099 (dále 2085).

Základní podstata možných změn hydrologické bilance na našem území je známa již řadu let. Vyplývá z projekcí srážek a teplot pro Evropu, tj. postupné zvyšování teplot během celého roku a pokles letních, růst zimních a stagnace ročních srážek (Christensen et al., 2007). Poloha České republiky v oblasti přechodu mezi předpokládaným růstem srážek na severu a jejich poklesem na jihu Evropy přispívá k nejistotě odhadu změn roční bilance srážek, respektive odtoku, a ostatních složek hydrologického cyklu. Nerovnoměrné rozložení projektovaných změn srážek během roku patří mezi jevy společné pro velkou řadu simulací klimatických modelů. Princip změn hydrologické bilance je demonstrován pro časový horizont 2085, jenž je reprezentativní i pro ostatní časové horizonty, na obr. 4.12.

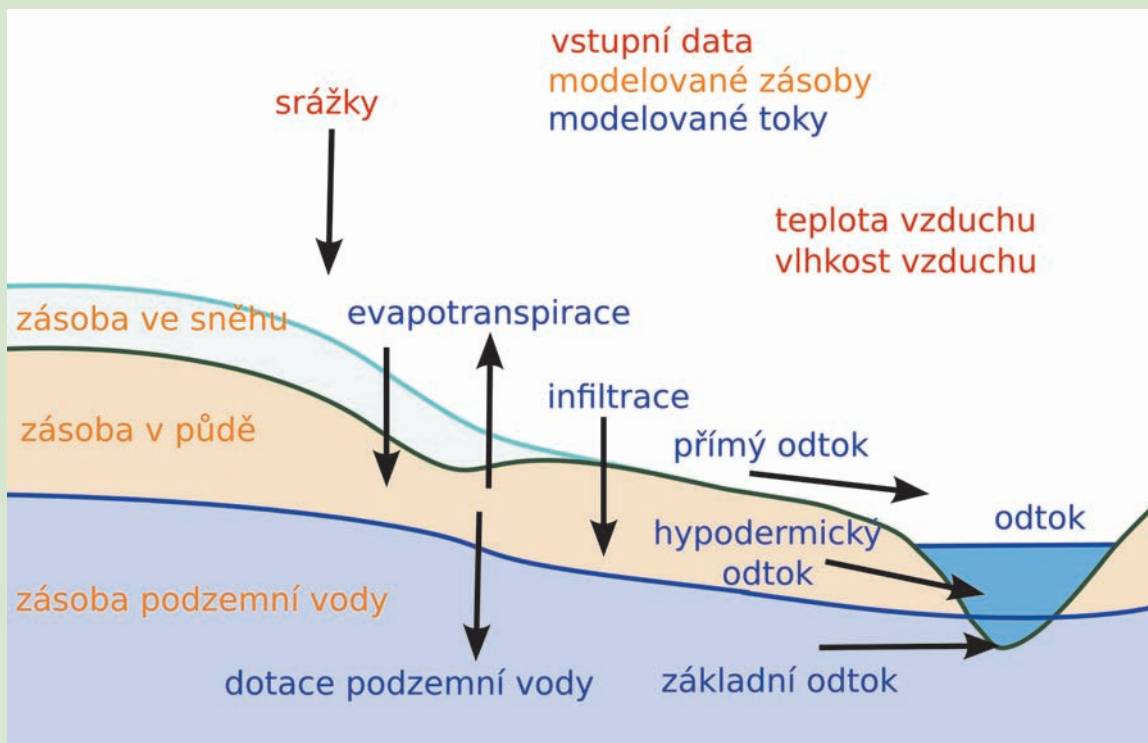
V období od začátku podzimu do začátku léta dochází k růstu srážek, jenž je doprovázen řádově stejným růstem územního výparu (důsledek růstu teploty). V letním období dochází k poklesu srážek a v důsledku úbytku zásob vody v povodí nevede zvyšování teploty k výraznému zvyšování územního výparu. Důležitým faktorem ovlivňujícím změny odtoku je posun doby tání v důsledku vyšší teploty

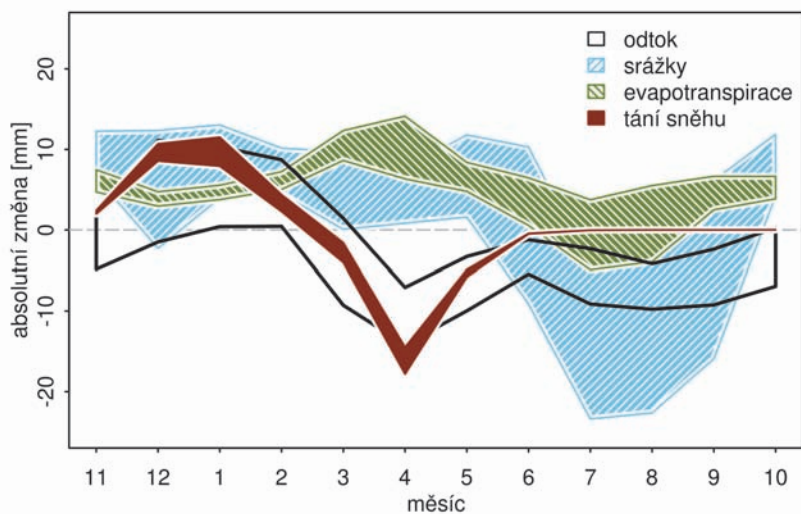
BOX 4.2 BILAN – MODEL CHRONOLOGICKÉ HYDROLOGICKÉ BILANCE

Hydrologický model Bilan (Horáček et al., 2009) schematizuje povodí na soustavu nádrží ve třech vertikálních úrovních – povrch, půdní zóna a zóna podzemní vody. Velikost toků mezi jednotlivými nádržemi je určována algoritmy modelu, které jsou řízeny v měsíční verzi osmi a v denní verzi šesti volnými parametry. Vstupem do modelu jsou pozorované časové řady srážek a teploty vzduchu. Potenciální evapotranspirace je vypočítána pomocí jednoduché metody (Beran et al., 2011) vycházející z teploty vzduchu a množství slunečního záření dopadajícího na horní vrstvu atmosféry (ovlivněno zeměpisnou šířkou a dnem v roce), popřípadě na základě metodiky (Gidrometeoizdat, 1976) vycházející z empirických vztahů (odvozených pro různé vegetační zóny) mezi potenciální evapotranspirací a sytostním doplňkem vypočteným z teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Bilance na povrchu půdy je určena vstupními srážkovými úhrny a územním výparem stanoveným na základě potenciální evapotranspirace a množství dostupné vody. V zimním období a při tání sněhu vstupuje do bilance na povrchu zásoba vody ve sněhu. Z povrchu voda

infiltruje do půdní zóny, kde plní nádrž s kapacitou, která je jedním z kalibrovaných parametrů. Při překročení této kapacity voda přetéká a následně je dělena do dvou lineárních nádrží. Odtoky z nich představují pomalou (základní odtok) a rychlou (přímý odtok) odezvu povodí, celkový odtok je pak dán jejich součtem (Horáček et al., 2009).

Hydrologický model Bilan je vyvíjen již řadu let pracovníky VÚV TGM. Během vývoje byl model odzkoušen na desítkách povodí v České republice a v rámci mezinárodních projektů, např. FRIEND (MHP UNECSO) nebo WATCH (Harding a Warnaars, 2011), i na řadě povodí z různých zemí Evropy, známé jsou i aplikace modelu z asijských a afrických zemí. Od roku 1992 je model Bilan v ČHMÚ používán pro výpočet hydrologické bilance zveřejňované v hydrologických ročenkách, od roku 2001 pro výpočty hydrologické bilance jako součásti vodní bilance (podle zákona č. 254/2001 Sb.). Ve VÚV TGM je model rutinně používán při studiích dopadů změny klimatu na hydrologickou bilanci.





Obr. 4.12 Změna základních složek hydrologického cyklu pro časový horizont 2085; polygony ohraničují oblast, v níž leží průměrné změny ze souboru regionálních klimatických modelů pro 90 % modelovaných povodí

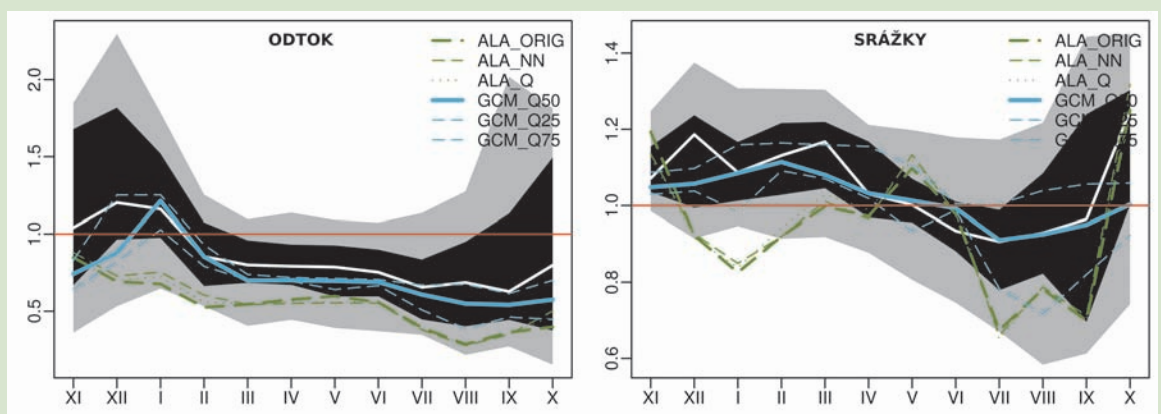
vzduchu přibližně z března a dubna na leden–únor. Změny odtoku v období leden–květen jsou tedy dominantně určeny právě odlišnou dynamikou sněhové zásoby, změny v letním období zejména úbytkem srážek.

Průměrné změny odtoku ze souboru regionálních klimatických modelů pro jednotlivá roční období a časové horizonty jsou uvedeny na obr. 4.13. Změny odtoků jsou konzistentní pro všechny časové horizonty – zpravidla můžeme konstatovat růst odtoků v zimním období a jejich pokles po zbytek roku a pro velkou část našeho území i v roční bilanci. K větším poklesům zpravidla dochází v jižní polovině našeho území. Mírně se vymyká nejbližší časový horizont (obr. 4.13 nahoře), pro který se i v letním období a na podzim vyskytují povodí, na kterých odtoky stagnují, popřípadě výjimečně dokonce rostou. V roční bilanci tak můžeme podle simulací regionálních klimatických modelů očekávat pro časový horizont 2025 stagnaci odtoků v severní a západní části našeho území a pokles (většinou do 10 %) v jižní a jihovýchodní části republiky. Nicméně je nutno konstatovat, že tyto odhady (zejména nízký pokles letních a podzimních odtoků) nejsou zcela v souladu s pozorovanými změnami. To může být způsobeno jednak nedokonalostí klimatických modelů, druhým vysvětlením je, že odhadované změny klimatu pro toto období nejsou natolik výrazné (růst ročních srážkových úhrnů kolem 3 % a teplot kolem 1 °C), aby nemohly být převáženy přirozenou variabilitou srážek a teploty. Pro časové horizonty 2055 a 2085 je možno jasně rozlišit období růstu odtoků v zimě (většinou 5–10 %, místy 20 % i více) a poklesu v ostatních obdobích, nejvíce v létě (20–40 %), v roční bilanci zpravidla 5–20 %. Rozdíly mezi horizonty 2055 a 2085 nejsou tak významné jako mezi horizonty 2025 a 2055, což je pravděpodobně způsobeno množstvím emisí odhadovaným podle použitého emisního scénáře. Na obr. 4.13 jsou zároveň šrafovaním vyznačena povodí, pro která se 2/3 (jednoduché šrafování), resp. 90 % (dvojitě šrafování) simulací regionálních klimatických modelů shodne na znaménku změny. Je evidentní, že zejména změny roční bilance odtoku jsou pro všechny časové horizonty na většině území relativně nejisté. V měřítku jednotlivých povodí je tato nejistota značná (viz box 4.3). Přestože změny roční bilance odtoků jsou relativně nejisté, nejistota v odhadu změn některých složek hydrologického cyklu je výrazně menší. Například pokles zásob podzemní vody v řádu 20 % a více indikují simulace většiny klimatických modelů na velké části našeho území (obr. 4.14). Podobně robustní je i odhad růstu územního výparu (zejména v zimě) ve všech ročních obdobích kromě léta, kdy naopak dochází k jeho stagnaci z důvodu nedostatku vody v povodích.

BOX 4.3 NEJISTOTA V ODHADECH DOPADŮ ZMĚNY KLIMATU V MĚŘÍTKU JEDNOTLIVÝCH POVODÍ

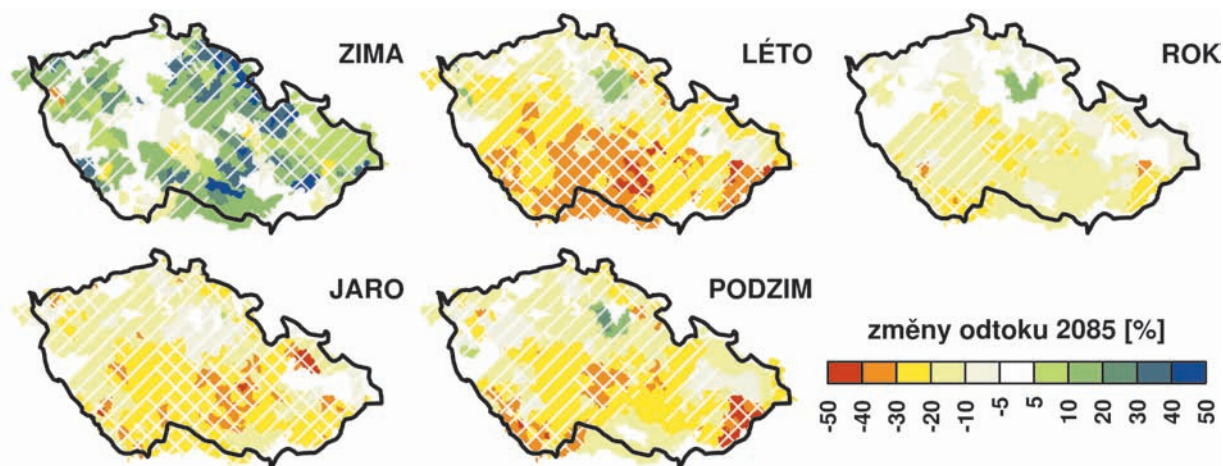
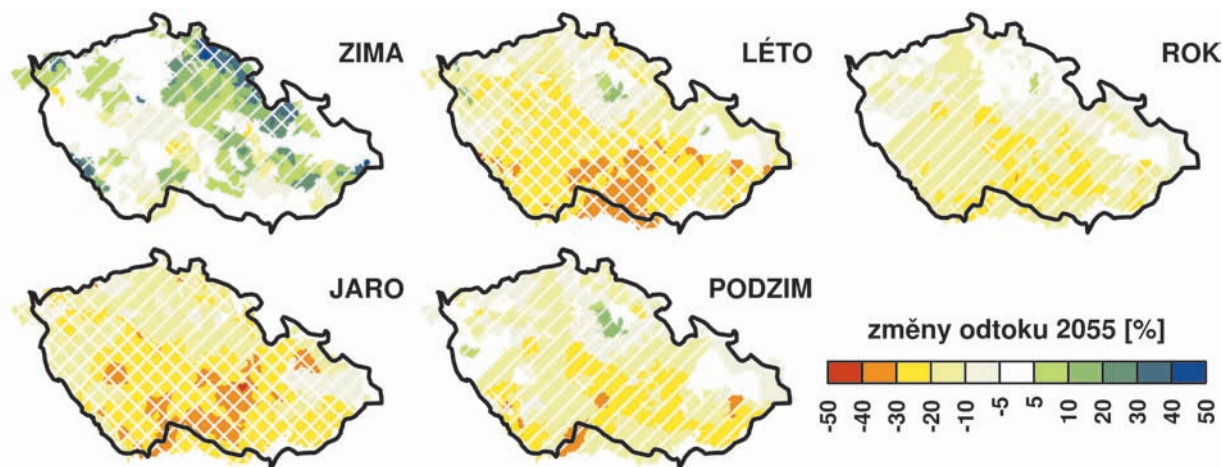
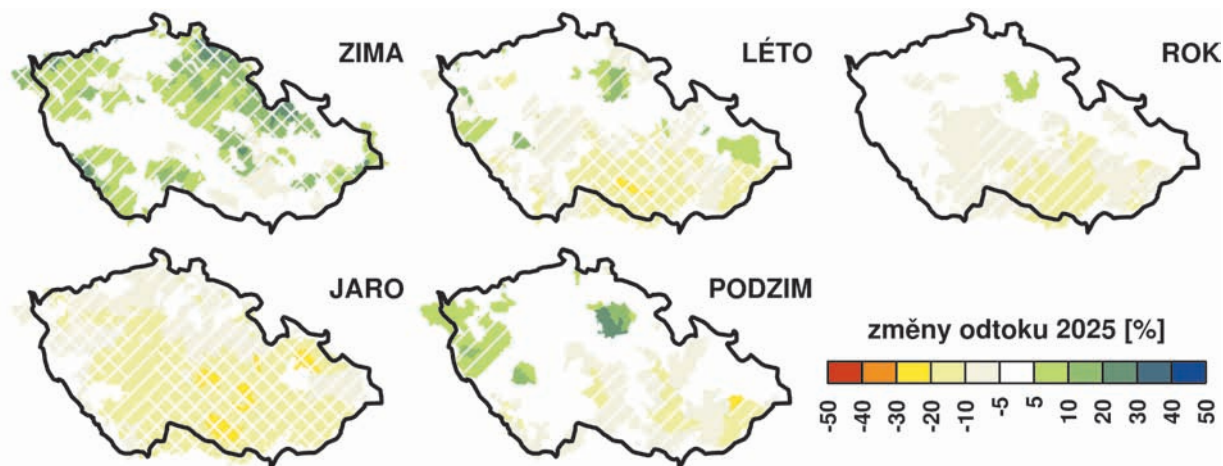
Na příkladu povodí Dyje po Znojmo (jenž vystihuje míru nejistot i pro většinu ostatních posuzovaných povodí) demonstrujeme rozpětí projekcí změn odtoku (vlevo) a srážek (vpravo). Grafy udávají relativní změny (tj. podíl odtoku ve scénářovém období ku odtoku pro kontrolní období) pro jednotlivé měsíce roku. V oblasti ohraničené šedým polygonem leží relativní změny podle 90 % regionálních klimatických modelů, v oblasti ohraničené černě leží projekce podle 50 % regionálních klimatických modelů a bílá čára odpovídá průměrné změně v souboru modelů. Na odtocích je dobře patrná větší nejistota zvýšení zimního odtoku, naproti tomu letní snížení můžeme konstatovat s větší jistotou. U srážek je zřetelně od-

lišitelné období zimního růstu a letního poklesu srážek. Na grafech jsou dále modře vyznačeny změny vycházející ze souboru globálních klimatických modelů (Pretel, 2008), silná čára odpovídá průměru modelů, mezi čárkovanými modrými čarami leží projekce 50 % posuzovaných globálních klimatických modelů. Zeleně je znázorněno, jak se mohou lišit projekce jednotlivých regionálních klimatických modelů na příkladu modelu ALADIN-CLIMATE/CZ v původní verzi (ALA_ORIG) a po korekci systematických chyb dvěma různými metodami (ALA_NN, ALA_Q). Z výsledků je evidentní, že hodnocení dopadů změny klimatu na hydrologický režim podle jednotlivé projekce může být značně zavádějící.

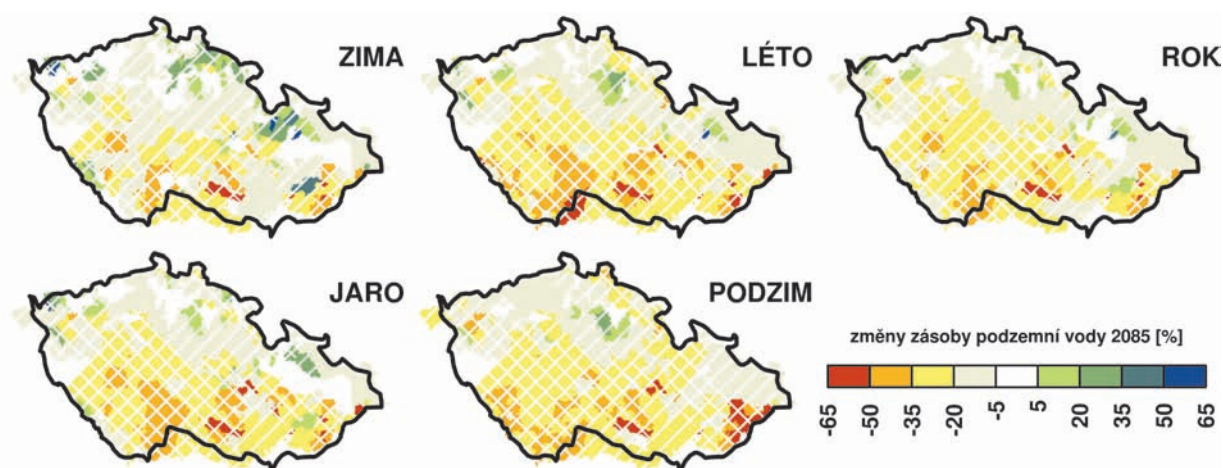


Nejistoty odhadu změn odtoku pro časový horizont 2085 jsou dále zobrazeny na obr. 4.15, jenž udává počet regionálních klimatických modelů předpokládajících (a) maximálně 20% pokles, (b) růst a (c) růst vyšší než 20 %. Povodí, pro která je tento počet významný (tj. modely souhlasí), jsou vyznačena černě (90 % modelů souhlasí), respektive šedě (2/3 modelů souhlasí). Pokles sezonních odtoků o více než 20 % (obr. 4.15a) není příliš pravděpodobný kromě několika povodí na jihozápadě České republiky. Nicméně i na jaře, na podzim a v roční bilanci klimatické modely tuto možnost nevyklučují. Pokles odtoků o více než 20 % je velmi nepravděpodobný v zimě.

Obrázek 4.15b vyjadřuje shodu na znaménku změny v souboru simulací regionálních klimatických modelů. Obecně lze konstatovat, že pro většinu ročních období je znaménko změny stejné pro většinu povodí. Nicméně míra nejistoty je proměnlivá. Na jaře a v létě se simulace shodují na poklesu odtoku v jižní části České republiky. Růst zimních odtoků je s menší nejistotou indikován na menším rozsahu území, změny v roční bilanci odtoků jsou nejisté. Pro několik povodí simulace regionálních klimatických modelů naznačují vyšší než 20% růst zimních odtoků (obr. 4.15c). Pro jiná roční období tato situace nenastává.



Obr. 4.13 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), resp. 90 % (dvojitě šrafování) simulací klimatických modelů shodne na znaménku změny

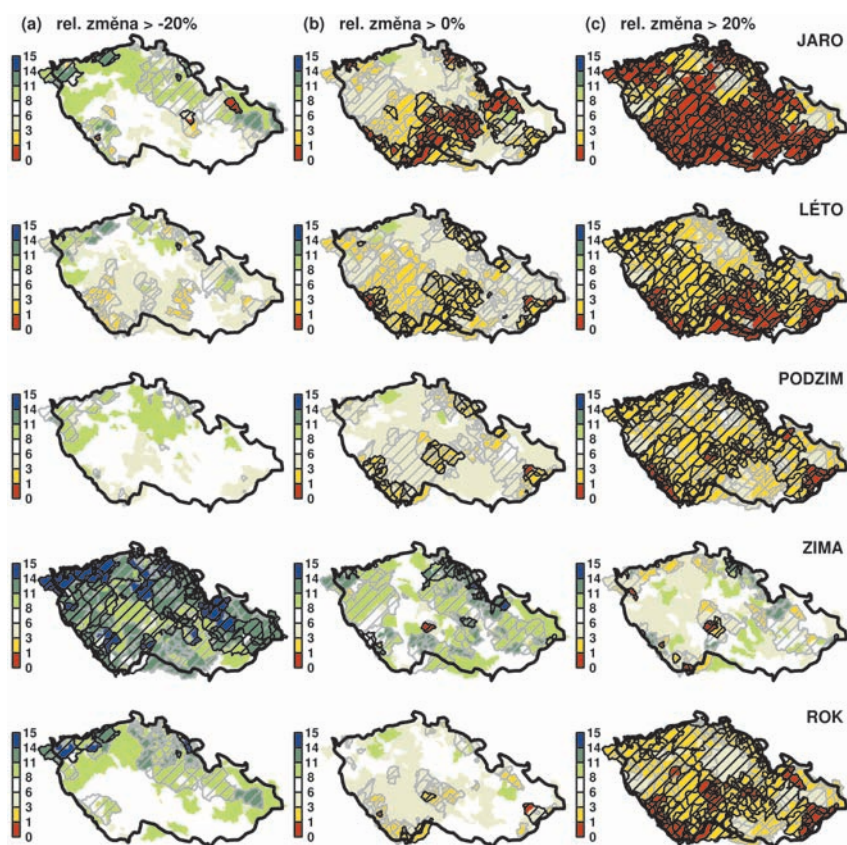


Obr. 4.14 Změny zásoby podzemní vody v souboru klimatických modelů pro časový horizont 2085; pomocí šrafovaní jsou znázorněny oblasti, pro které se 2/3 (jednoduché šrafovaní), resp. 90 % (dvojitě šrafovaní) simulací klimatických modelů shodne na znaménku změny

Oblast povodí	Srážky	Výpar	Odtok	Odtok [%]
horní a střední Labe	37,03	62,17	-24,08	-7,95
horní Vltava	24,59	69,18	-41,69	-16,59
Berounka	35,68	59,67	-22,92	-10,42
dolní Vltava	22,82	51,77	-26,54	-17,48
Ohře a dolní Labe	41,52	61,45	-19,09	-5,57
Odra	11,09	59,37	-47,46	-7,85
Morava	16,89	54,68	-36,77	-8,96
Dyje	22,49	49,98	-26,63	-11,19

Tab. 4.4 Změny základních složek hydrologické bilance [mm rok⁻¹] podle souboru klimatických modelů pro jednotlivé oblasti povodí

Pokusíme-li se kvantifikovat prostorové rozdíly ve změnách odtoku pro časový horizont 2085 v rámci jednotlivých oblastí povodí, můžeme konstatovat, že prostorová variabilita průměrných změn srážek není výrazná, přestože v případě jednotlivých klimatických modelů ji lze pozorovat. Pro všechny oblasti povodí platí, že srážky rostou zhruba v období říjen–(květen) červen podle většiny klimatických modelů. V ostatních měsících dochází k poklesu. Růst i pokles je řádově stejný (cca 10–20 %) pro všechny oblasti povodí. Prostorová heterogenita průměrných změn teploty je ještě méně výrazná než v případě srážek. U průměrných změn odtoku naopak lze určité rozdíly identifikovat, i když podstata změn zůstává stejná, a přihlédneme-li k nejistotám odhadu, nejsou rozdíly velké. Pro roční hydrologickou bilanci je podstatné, dochází-li v simulacích ke zvýšení zimních odtoků – pokud ano, nedochází zpravidla k výraznému poklesu ročních odtoků a naopak. Z tohoto hlediska lze rozdělit oblasti povodí do několika skupin: (1) oblast povodí Moravy a Dyje – výrazný růst zimních odtoků (až 40 %), který do značné míry kompenzuje relativně výrazný pokles letních a podzimních odtoků (roční pokles odtoků o cca 10 %), (2) oblasti povodí horního a středního Labe, Berounky, Ohře a dolního Labe a Odry – růst zimních odtoků řádově do 25 %, v kombinaci s nepříliš výrazným poklesem odtoku v letním a podzimním období vede k poklesu ročních odtoků o řádově 10 % a (3) oblasti povodí horní Vltavy a dolní Vltavy, kde k růstu zimních odtoků téměř nedochází, což v kombinaci s letním a podzimním poklesem odtoku vede v roční bilanci k poklesům blízkým 20 %. Letní a podzimní poklesy jsou zpravidla obdobné (v jednotlivých povodích do 40 %), nejnižší v oblasti povodí Ohře a dolního Labe, Berounky, nejvyšší v oblastech povodí horní Vltavy a dolní Vltavy a Odry.



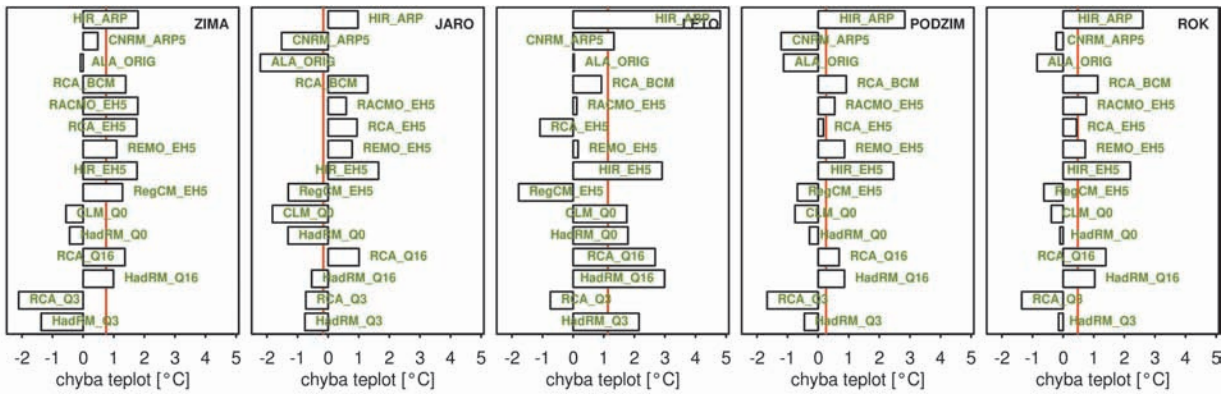
Obr. 4.15 Počet regionálních klimatických modelů předpokládajících (a) pokles o maximálně 20 %, (b) růst a (c) růst vyšší než 20 % – povodí, pro která je tento počet významný (tj. velký nebo malý) jsou vyznačena černě (90 % modelů souhlasí), respektive šedě (2/3 modelů souhlasí)

4.4 Validace výstupů klimatických modelů

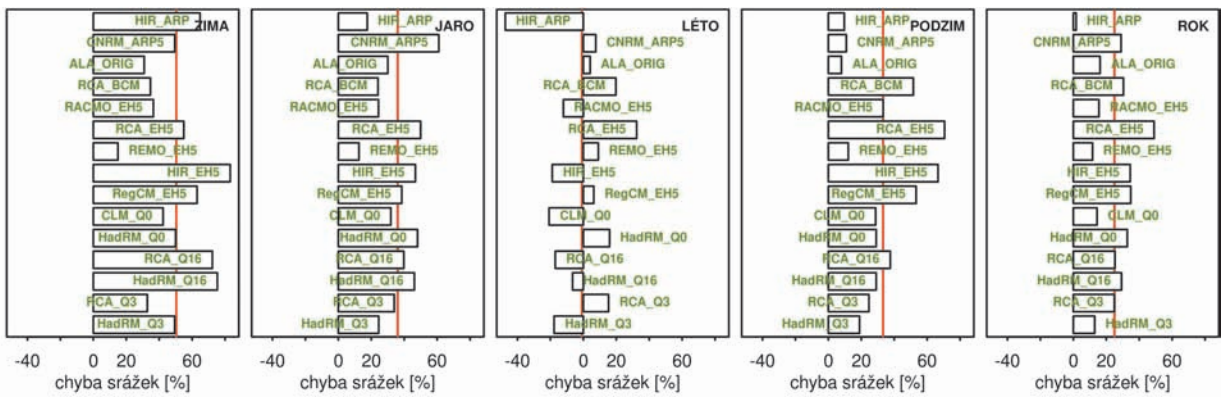
Systematickou chybu v odhadu teploty pro období 1961–1990 udává obr. 4.16. Jednotlivé projekce se od pozorované teploty během roku relativně výrazně odchyľují (až o 5 °C, většinou v rozmezí 1–2 °C). V průměru se nicméně chyby odhadu průměrné teploty vyruší a průměrná chyba v souboru modelů je tak v rozmezí cca 0–1 °C, nejvyšší v létě, nejnižší na jaře a na podzim. Co se týče projekcí srážek (obr. 4.17), je známa tendence klimatických modelů nadhodnocovat srážkové úhrny. Tato tendence je zvláště významná v zimním období, kdy i průměrná chyba v souboru modelů dosahuje cca 50 % (žádný z modelů srážky nepodhodnocuje). Na jaře a na podzim je průměrná chyba cca 20–30 %. V letním období, kdy jsou srážky nejméně předpověditelné, paradoxně vystihují klimatické modely pozorovanou klimatologii relativně dobře – průměrná chyba v souboru modelů je blízka nule.

Porovnány byly i trendy teploty a srážek projektované regionálními klimatickými modely pro období 1961–1980 a 1981–2005 s trendy pozorovanými (obr. 4.18 a 4.19). Pozorované trendy teploty se klimatickým modelům nedaří zcela reprodukovat. Kromě podzimu (prakticky žádný pozorovaný trend) jsou trendy pro všechna roční období podhodnoceny. Důvodem může být převážení signálu změny klimatu meziroční variabilitou.

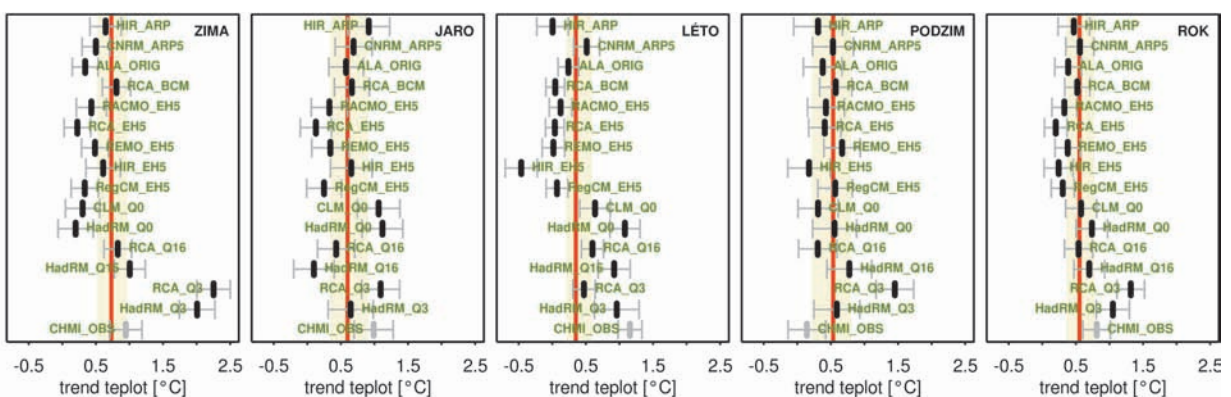
V případě srážek nelze nalézt systematický trend v žádném ročním období kromě podzimu. Stejně tak klimatické modely mezi uvažovanými obdobími (1961–1980 a 1981–2005) nepředpokládají žádné výrazné změny.



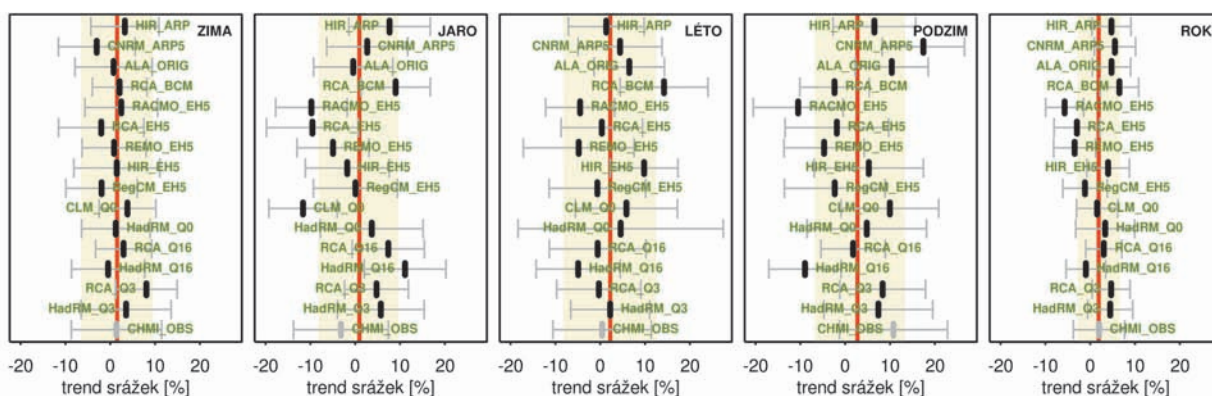
Obr. 4.16 Systematická chyba v projekcích teploty pro jednotlivé regionální klimatické modely pro období 1961–1990; červeně je vyznačen průměr souboru modelů



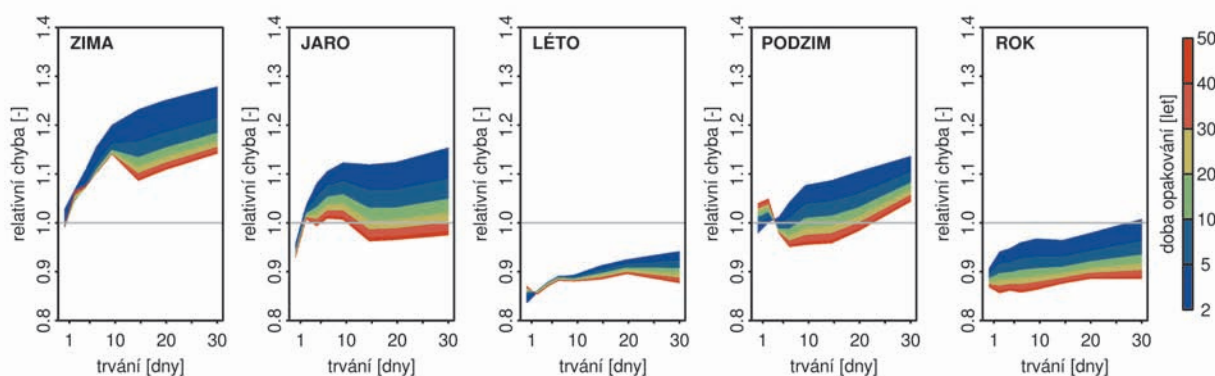
Obr. 4.17 Systematická chyba v projekcích srážek pro jednotlivé regionální klimatické modely pro období 1961–1990; červeně je vyznačen průměr souboru modelů



Obr. 4.18 Systematická chyba v projekcích trendů teploty mezi obdobími 1961–1980 a 1981–2005; červená čára udává průměr souboru modelů, černě jsou vyznačeny průměrné projekce pro jednotlivé simulace regionálních klimatických modelů, šedou barvou je znázorněno rozmezí, ve kterém leží změny pro celou Českou republiku



Obr. 4.19 Systematická chyba v projekcích trendů srážek mezi obdobími 1961–1980 a 1981–2005; červená čára udává průměr souboru modelů, černě jsou vyznačeny průměrné projekce pro jednotlivé simulace regionálních klimatických modelů, šedou barvou je znázorněno rozmezí, ve kterém leží změny pro celou Českou republiku



Obr. 4.20 Systematická chyba v projekcích srážkových extrémů v souboru klimatických modelů pro sezonní a roční maxima trvání 1 až 30 dní pro období 1961–1990; barevně jsou odlišeny změny pro různé doby opakování

Průměrné chyby sezonních a ročních 1 až 30denních srážkových maxim v souboru regionálních klimatických modelů pro doby opakování 2 až 50 let udává obr. 4.20 (Hanel a Buishand, 2012). Podzimní a jarní srážkové extrémů jsou relativně dobře zachyceny (chyba většinou do 10 %) pro všechny doby trvání. Pro zimní srážkové extrémů platí, že krátkodobé extrémů jsou dobře zachyceny, chyba roste s dobou trvání, více pro méně extrémní kvantily rozdělení srážkových extrémů. V letním období jsou extrémů podhodnoceny o 15–10 %, méně pro delší doby trvání. Denní roční srážková maxima jsou podhodnocena o cca 10 %, pro delší doby trvání méně, zejména v případě méně extrémních událostí. Chyba v simulaci srážkových extrémů je řádově nižší než v případě simulací průměrných srážek.

Jak bylo zmíněno v kapitole 3, nelze odchylky od pozorovaného klimatu popsané výše považovat za indikátor reprezentativnosti projekcí.

Možnosti zmírnění dopadů změny klimatu – adaptační opatření

5 Vodohospodářské plánování v kontextu změny klimatu

V současnosti se pozornost v oblasti výzkumu změny klimatu stále více posouvá od samotných projekcí možných změn klimatu a jejich zpřesňování k návrhu adaptačních opatření vedoucích k eliminaci či zmírnění negativních dopadů těchto změn. Důkazem může být publikace řady mezinárodních strategických dokumentů (viz např. ECE, 2009; White Paper, 2009; Guidance, 2009) i podněty k řešení projektů aplikovaného výzkumu zaměřených na adaptační opatření (viz např. projekt „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“ financovaný Ministerstvem životního prostředí – tj. projekt, z nějž převážně vychází tato publikace – či projekt „Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech ČR“ financovaný Ministerstvem zemědělství ČR).

Jedním z klíčových dokumentů upravujících vodohospodářské plánování na evropské úrovni je Rámcová směrnice o vodní politice, jejímž cílem je dosažení dobrého stavu vodních útvarů a zajištění jejich udržitelného využívání. Na národní úrovni jsou tyto cíle zakotveny ve vodním zákoně a promítají se do Plánů povodí v podobě programů opatření a v Plánech pro zvládání povodňových rizik.

Účelem adaptací na očekávané změny klimatu je předcházení a minimalizace nepříznivých dopadů těchto změn. Adaptace zároveň umožňují využít příležitosti, které se mohou v souvislosti s probíhajícími změnami objevit. Jednou z aktivit navržených v Bílé knize o adaptaci na klimatickou změnu v Evropě (White Paper, 2009) je zavádění principů adaptace do stávajících politik. Pro oblast vodního hospodářství tento požadavek znamená především uvážit vliv klimatické změny při plánování podle Rámcové směrnice o vodní politice a podle směrnice o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik.

V rámci Společné implementační strategie Rámcové směrnice o vodní politice byla vypracována metodika (Guidance, 2009), která doporučuje postupy, jak uvážit klimatickou změnu v následujícím cyklu aktualizace plánů povodí (jež má být dokončena roku 2015) a rovněž jak přistupovat k navrhování vhodných opatření do plánů pro zvládání povodňových rizik. Doporučuje také vhodné přístupy pro navrhování opatření pro zvládání sucha a nedostatku vody s uvážením dopadů změny klimatu. V dokumentu je zdůrazněno, že členské země budou podávat informaci o tom, jak byla uvážena klimatická změna při hodnocení vlivů a dopadů lidské činnosti na stav vodních útvarů, jak byl upraven program monitoringu, aby co nejlépe zachytil přímé a nepřímé vlivy dané klimatickou změnou, a jak byla ověřována účinnost navrhovaných postupů v programu opatření. Pro navrhování ekonomicky a technicky efektivních adaptačních opatření je nezbytné využívat všechny nejlepší dostupné informace o možném budoucím vývoji klimatu, které jsou k dispozici.

Změna klimatu vstupuje do vodohospodářského plánování na několika úrovních:

- Na povodích, jež jsou již v současnosti dopadem změny klimatu negativně zasažena, jsou akutně hledána opatření ke zmírnění těchto dopadů.
- Opatření navrhovaná v plánech povodí (či obecně jakákoliv vodohospodářská opatření s dlouhou životností) mohou a nemusí být účinná v podmínkách klimatické změny – tj. tato opatření by měla být prověřena z hlediska účinnosti při změně klimatu (tzv. climate-check).
- Případná změna klimatu v budoucnosti může vyžadovat další opatření k zajištění udržitelného využívání vodních zdrojů či zachování nebo zlepšení jejich stavu.

Zatímco dopady probíhajících změn klimatu mohou být pozorovány a jasně popsány (necháváme stranou, jde-li o projevy antropogenní změny klimatu či o efekt přirozené variability klimatu), v případě posouzení účinnosti navrhovaných/realizovaných opatření v budoucnosti, a tím spíše v případě budoucího zhoršení stavu vodních útvarů v důsledku změny klimatu, je nutno pracovat se značně nejistými odhady.

O adaptačních opatřeních lze pojednávat z mnoha pohledů, zejména se můžeme zabývat potenciálem jednotlivých adaptačních opatření ke zmírnění dopadů změny klimatu (nebo negativních jevů obecně), metodikou zahrnutí informací o změně klimatu do procesu návrhu a hodnocení účinnosti adaptačních opatření, popřípadě hodnocením účinnosti návrhů kombinací adaptačních opatření na konkrétních lokalitách.

Potenciál jednotlivých adaptačních opatření (zejména ke zmírnění dopadů povodní a sucha) je diskutován v následujících kapitolách. V následujícím textu se stručně věnujeme popisu základních principů zohlednění informací o změně klimatu při vodohospodářském plánování a vznikající metodice pro posouzení dopadů klimatické změny a pro návrh adaptačních opatření na vodních zdrojích na konkrétních lokalitách.

Informace o změně klimatu

Materiál ECE (2009) uvádí dva základní přístupy k navrhování adaptačních opatření na změnu klimatu na základě nejistých dat, jež jsou založené na (a) scénářích změny klimatu, (b) hodnocení rizika (risk assessment).

Scénáře změny klimatu

Posouzení účinnosti jednotlivých adaptačních opatření probíhá pomocí simulace budoucího stavu se zahrnutím uvažovaných opatření a bez nich. Charakteristiky budoucího klimatu jsou zpravidla odvozeny ze simulací (regionálních) klimatických modelů, většinou v několika (v extrému až v mnoha tisících) variantách. Výhodou je, že lze vytvořit komplexní scénáře změn víceméně libovolných charakteristik klimatu. Na druhé straně, přes značný pokrok vykazují současné klimatické modely značné nedostatky v simulaci i některých základních charakteristik klimatu (jde např. o sezonní srážkové úhrny) a odhady účinnosti (potřebnosti) posuzovaných adaptačních opatření jsou následně zatíženy značnou nejistotou.

Hodnocení rizika

Pragmatickým východiskem je akceptovat nejistotu spojenou s odhadem budoucího klimatu v rámci metod hodnocení rizika, kdy pravděpodobnost negativního dopadu změny klimatu je dána kombinací pravděpodobnosti výskytu negativního jevu (např. zvýšení teploty) a velikosti negativních následků (např. počet ztrát lidských životů, ekonomické škody). Jako nebezpečné jsou pak vyhodnoceny jevy, jež mají vysokou pravděpodobnost výskytu a zároveň nejzávažnější následky. Podobně, nejúčinnější adaptační opatření je takové, jež zmírňuje dopady nejpravděpodobnějších jevů s nejzávažnějšími dopady. Tento přístup zároveň v případě neexistence odhadů pravděpodobnosti změny klimatu umožňuje využití klasické citlivostní analýzy, kdy se uvažují stejně pravděpodobné změny charakteristik klimatu ve zvoleném rozmezí. Přestože v tomto případě je potřebná informace o odhadované změně klimatu minimální (pravděpodobný rozsah změn), může metoda poskytovat důležité závěry – zejména může vést k určení prioritních oblastí vyžadujících adaptační opatření či k rámcové kvantifikaci účinnosti variantních opatření ve vztahu k eliminaci posuzovaných rizik.

Oba přístupy mají své nedostatky – scénáře změny klimatu jsou nejisté, často se mění (zpřesňují), korektní odhady pravděpodobnosti změn zpravidla nejsou k dispozici. Odhad pravděpodobnosti výskytu negativních jevů v rámci hodnocení rizika může být značně komplexní (např. různé, vzájemně závislé změny během roku). Možnost propojení obou metodik navrhuje např. Prudhomme et al. (2010). Podstatou přístupu je využití simulací klimatických modelů k odhadu limitů a sezonního cyklu změn vybraných klimatických charakteristik a následné vyhodnocení míry dopadů.

Metodika pro posouzení dopadů klimatické změny a pro návrh adaptačních opatření na vodních zdrojích

Metodika je připravovaným výstupem projektu Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadů klimatické změny na vodní zdroje. Základní teze metodiky popisuje Mrkvičková a Kos (2010), metodika bude certifikována a následně podrobně pojednána v monografii připravované pro vydání v edici VÚV TGM. Metodika je založena na kombinaci přístupů hodnocení zranitelnosti a modelování dopadů klimatické změny pomocí scénářů. Je připravována tak, aby byla využitelná pro správce povodí a pro další subjekty hospodařící s vodními zdroji (vodárenské společnosti, obce, podniky aj.). Metodika zahrnuje fázi posouzení dopadů klimatické změny na základě dostupných studií a na základě znalosti zranitelných prvků v systému a dále fázi navrhování vhodných opatření a jejich výběr na základě hodnocení jejich účinnosti. Pro zpracování obou těchto fází aplikuje metody managementu rizika.

Formulace cíle

Prvním krokem při sestavování adaptační strategie je formulace rámcového cíle, který má být prostřednictvím strategie dosažen. Cílem sledovaným v připravované metodice je zajištění udržitelnosti stávajících vodních zdrojů, omezení dopadů změny klimatu na disponibilní vodní zdroje a předcházení střetům zájmů mezi odběrateli a rovněž mezi odběrateli a požadavky ekosystémů závislých na vodním prostředí.

Analýza rizika

Vlastní příprava adaptační strategie začíná analýzou rizik. Jedná se o aktivitu, která vede k identifikaci potenciálních nebezpečí a ke stanovení rizika pro sledovaný systém (povodí, vodárenskou soustavu

atd.). Riziko lze definovat různými způsoby, ale zpravidla se riziko vyjadřuje jako kombinace pravděpodobnosti výskytu nežádoucí události a jejích následků (ČSN IEC 300-3-9). Cílem analýzy rizika je získat odpověď na otázku, jaká konkrétní nebezpečí hrozí v zájmové oblasti na daném vodním zdroji v souvislosti s klimatickou změnou, jaká je jejich pravděpodobnost a možné následky.

Pro identifikaci nebezpečí spojených s dopady klimatické změny na vodní zdroje je vhodné na začátku vycházet ze znalosti krizových situací, které se vyskytly během fungování systému v souvislosti s krátkodobými projevy extrémního počasí nebo s dlouhodobými trendy ve vývoji klimatu v posledních desetiletích (Johnstone et al., 2009).

Dalším podkladem jsou výsledky modelování dopadů klimatické změny na klimatické a hydrologické poměry s výhledem do budoucnosti podle scénářů klimatické změny. Volba scénářů použitých pro studii dopadů závisí na časovém horizontu, pro který má být modelování provedeno, a na požadovaném časovém kroku výstupů. V rámci modelování dopadů by mělo být zahrnuto více scénářů, aby byla zachována informace o nejistotách, které jsou s výsledky spojeny (Guidance, 2009).

Nebezpečí, která je možné identifikovat na základě současných výsledků modelování dopadů klimatické změny na vodní režim krajiny a na vodní hospodářství, zahrnují možný pokles průtoků zejména v málo vodných obdobích, klesající míru dotace podzemních vod a s tím související ohrožení vydatnosti dostupných vodních zdrojů, zvýšení frekvence výskytu extrémních hydrologických jevů představující nebezpečí porušení funkce vodohospodářské infrastruktury a zvýšené nároky na odběry vody pro zemědělskou závlahu, které by mohly vést ke střetu zájmů mezi odběrateli (Novický et al., 2009a). Vyšší teplota vzduchu způsobuje vyšší teploty vody (Novický et al., 2009b), což indikuje nebezpečí urychlení procesu eutrofizace v tocích i ve vodních nádržích. Zhoršení kvality vod ve vodních tocích během málo vodných období nebo možný pokles hladiny v útvech podzemních vod indikuje nebezpečí nedosažení environmentálních cílů Rámcové směrnice o vodní politice.

Na identifikaci nebezpečí navazuje stanovení jejich pravděpodobnosti výskytu a možných následků. Pro stanovení pravděpodobnosti výskytu nebezpečí, které není ovlivněno vývojem klimatu, je možné vycházet z analýzy četnosti výskytu daného jevu v minulosti. Pokud se však jedná o nebezpečí spojené s klimatickou změnou, je vhodné využívat výsledky simulačního modelování pro scénáře klimatické změny. Pokud nejsou podobné výsledky simulačního modelování k dispozici, je možné využít zjednodušený postup metody předběžné analýzy rizika, která využívá kvalifikovaný odhad pravděpodobnosti výskytu dané nebezpečné události a rozsahu jejích následků. Postup zahrnuje sestavení stupnic pro hodnocení pravděpodobnosti a následků, přiřazení hodnot stupnice jednotlivým nebezpečím a sestavení rizikové matice.

Hodnocení rizika, návrh a výběr opatření

Při hodnocení rizika se stanoví míra přijatelného rizika pro daný systém. Případy s rizikem přijatelně malým už nejsou dále zpracovávány a jsou ponechány bez opatření. Rizika, která přesahují míru přijatelnosti, jsou seřazena do hierarchie podle závažnosti a v následujícím kroku jsou pro ně navrhována opatření. Na základě identifikace prioritních rizik je možné definovat konkrétní specifické cíle adaptační strategie. Příkladem takového cíle je např. minimalizace nákladů spojených s řešením škod způsobených přivalovou povodní nebo zabránění poklesu hladiny podzemní vody v konkrétním vodním útvaru pod stanovenou úroveň. Každý specifický cíl by měl být měřitelný pomocí určitého monitorovaného kritéria, aby bylo možné zpětně vyhodnocovat účinnost zaváděných opatření.

Klíčovým bodem při sestavování adaptační strategie je vlastní návrh různých variant opatření na minimalizaci prioritních rizik a výběr výsledných opatření, která se stanou součástí adaptační strategie.

Jde o aktivitu, která vyžaduje spolupráci zkušených provozovatelů a odborníků. Pro identifikaci vhodných adaptačních opatření je možné využívat různé přístupy. Je možné využívat zkušenosti s řešením problémů spojených s extrémní počasí, které se vyskytly během provozu, uspořádat brainstorming mezi pracovníky organizace, provést analýzu nově dostupných technologií a inovací nebo získat informace od organizací, které mají dlouholeté zkušenosti s řešením podobných problémů. Kromě opatření pro eliminaci zásadní příčiny prioritních rizik je možné hledat i opatření, která by umožnila redukovat míru dopadů nebo která by přesunula riziko na jiný subjekt, např. pojištění (Johnstone et al., 2009).

Téměř vždy existuje řada možností, jak se s daným problémem vypořádat. Pro výběr výsledné varianty opatření je klíčová jeho očekávaná účinnost, proveditelnost a celkové náklady. Účinnost technických opatření je možné ověřovat simulačním modelováním, jehož vstupy jsou ovlivněny pomocí scénářů klimatické změny. Účinnost opatření směřujících na změnu využití území lze zjednodušeně stanovovat na základě odhadu změny v rozdělení jednotlivých složek vodní bilance, které je daným opatřením dosaženo (Kašpárek et al., 2011a). Další porovnávání opatření je možno provést pomocí vícekritériální rozhodovací analýzy, rozboru zisků a nákladů (cost-benefit analysis) nebo metody řízení rizika (Novický et al., 2010).

Obecně platí pravidlo přednostně provádět taková opatření, která jsou užitečná již v současnosti (win-win), nebo taková, kterých nebudeme litovat ani v případě, že se očekávané dopady klimatické změny neuskuteční (no regret). Výsledná strategie by měla zahrnovat opatření různého charakteru (opatření v krajině, organizační opatření, legislativní opatření, technická opatření aj.). Neměla by být zaměřena jednostranně buď pouze na posilování vodních zdrojů, nebo pouze na omezování odběrů (Guidance, 2009).

Pro realizaci opatření, která mění fyzikální poměry na útvarech povrchových vod (nové nádrže, jezy aj.) nebo mění hladiny na útvarech podzemních vod, musí být splněna řada podmínek daných Rámcovou směrnicí. Proto je třeba nejprve ověřit možnosti jiných opatření pro eliminaci daného rizika, například přehodnotit funkci existujících hydrotechnických staveb a optimalizovat jejich funkci na změněné hydrologické poměry a požadavky odběratelů.

Hodnocení strategie

Adaptační strategie musí zůstat relevantní s měnícími se přírodními podmínkami a měnícími se požadavky. Proto je třeba, aby adaptační strategie měla dynamický charakter. Pro zajištění zpětné vazby se má provádět monitorování účinnosti opatření a jejich pravidelná revize (ECE, 2009). Revize adaptační strategie by měla následovat, především pokud došlo ke změně specifických cílů, které vyplynuly z prioritních rizik, v případě změny časového horizontu nebo harmonogramu implementace strategie, v případě nových poznatků o očekávaných dopadech klimatické změny nebo pokud výsledky monitorovaných kritérií ukazují na nízkou efektivitu zaváděných opatření (Johnstone et al., 2009).

6 Rámcové vyhodnocení účinnosti vybraných adaptačních opatření

Klimatická změna může způsobit nebo zvětšit potíže zejména v obou extrémech hydrologického režimu, v obdobích hydrologického sucha i při výskytu povodní. V obou případech se jedná o situaci, kdy nejsou splněny požadavky lidí, v případě sucha zejména na odběry vody a ředění vypouštěných odpadních vod, v případě povodní požadavky na ochranu lidí a všeho, co využívají (v dosahu účinku povodně). Oba extrémy mohou poškozovat ekosystémy jak v plošném měřítku krajiny, tak zejména ekosystémy přímo spojené s vodními toky.

Zmírnění účinků obou hydrologických extrémů je možné dosáhnout buď tím, že zmenšíme požadavky, nebo tím, že zajistíme opatření, která zmenší účinky extrémních jevů.

Adaptační opatření můžeme tedy rozdělit na dvě základní skupiny – na opatření pro zmenšování požadavků a na opatření pro zmenšování účinků extrémních klimatických jevů*. V obou skupinách lze použít další dělení podle typu extrémního jevu, ke kterému se požadavky nebo opatření vztahují – hydrologické sucho na straně jedné a extrémní přivalové deště a jimi vyvolané povodně na straně druhé.

Ve skupině opatření zaměřených na zmenšování účinků je účelné použít další rozčlenění – na opatření v ploše povodí (nebo také opatření v krajině) na straně jedné a opatření na tocích a nádržích na straně druhé.

Při návrhu adaptačních opatření je třeba vzít do úvahy:

- čeho chceme pomocí adaptačních opatření dosáhnout a v jakém časovém výhledu (formulace cílů),
- které typy adaptačních opatření jsou pro dosažení cíle účinná (výběr opatření),
- zda v posuzovaném území jsou přírodní podmínky pro zvolená adaptační opatření,
- jaké jsou reálné předpoklady pro realizaci opatření z hlediska nákladů a majetkoprávních vztahů.

*V pojetí managementu rizika se zpravidla adaptační opatření dělí na tři typy snižující (1) pravděpodobnost výskytu extrémního jevu, (2) dopady (škody) a (3) nároky na vodní hospodářství. Rozdělení uvažované v této publikaci je poněkud obecnější, jelikož zmenšování požadavků se týká jak nároků na vodní hospodářství, tak na zábor půdy atp., tedy zároveň vede k snížení dopadů.

Formulace cílů

Formulace cílů by měla vycházet z rozboru současného stavu a z posouzení výhledu vodohospodářské bilance posuzovaného území, tj. z porovnání zdrojů vody a požadavků na užívání vody, ve kterém jsou uváženy i požadavky na minimální ekologické průtoky. Obdobně je třeba posoudit významné zdroje podzemní vody vzhledem k požadavkům Metodického pokynu odboru ochrany vod Ministerstva životního prostředí ke stanovení minimální hladiny podzemních vod (k § 37 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů), jenž stanovuje mez snížení hladiny podzemní vody v důsledku jímání. V případech, kdy již nastaly problémy se zásobováním vodou, s dodržением minimálních průtoků a požadovaným ředěním odpadních vod, je třeba je při stanovení cílů uvážit. Při formulaci cílů je rovněž třeba vzít do úvahy časový rámec, ke kterému má adaptační opatření plnit svůj účel, a možné dopady klimatické změny na hydrologické poměry vztažené k danému období.

Podklady k formulaci cílů jsou částečně vytvářeny v rámci vodní bilance, jejíž zpracování je uloženo zákonem č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů, a navazujícími předpisy. Dopady klimatické změny tato agenda neřeší, proto jako další podklad pro návrhy opatření slouží studie, které posuzují hydrologickou a vodohospodářskou bilanci v dílčích povodích. Vlastní návrhy opatření se mohou stát součástí Plánů oblastí povodí, které budou aktualizovány k roku 2015. Dále mohou být adaptační opatření navrhována v rámci plánů pro zvládnání povodňových rizik připravovaných podle § 23 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů, nebo v rámci komplexních pozemkových úprav.

Výběr opatření

Při volbě adaptačních opatření je dále vhodné posuzovat, zda realizaci adaptačního opatření nedochází k výraznému upřednostňování potřeb jednoho konkrétního uživatele nad ostatními uživateli (včetně vodních a na vodu vázaných ekosystémů). Efekt opatření by měl být co nejvíce rovnoměrně rozdělen mezi uživatele a vodní ekosystémy (Adger et al., 2005). Měla by být vybírána především tzv. „win-win“ opatření, což jsou opatření, jejichž realizace je odůvodněná i bez očekávaných dopadů klimatické změny, a opatření splňující požadavky trvale udržitelného rozvoje.

Omezení přírodními podmínkami

Možnost uplatnit adaptační opatření (která jsou uvedena v tab. 6.2 a tab. 6.3) je v některých případech omezena geologickými, hydrogeologickými a morfologickými poměry v konkrétních oblastech nebo úsecích toků. Například pro opatření založená na revitalizaci toku a využití nivy je klíčová morfologie okolí toků. Mnoho menších toků, ale i dlouhé úseky větších toků se nacházejí v úzkých údolích bez vyvinuté nivy, takže s ní spojená opatření nejsou využitelná. Obdobně platí, že opatření, využívající akumulaci v podzemních vodách, popřípadě infiltraci do nich, mají smysl jen v menší části ČR tvořené hydrogeologickými strukturami schopnými značná množství vody akumulovat. Důležité je také brát do úvahy, jak velký efekt lze od adaptačního opatření očekávat vzhledem ke srážkovým a odtokovým poměrům posuzované oblasti, což souvisí i s rozdílnou relativní mírou dopadu klimatické změny v takto rozlišených oblastech.

Majetkoprávní vztahy

Ze zkušeností s přípravou protipovodňových opatření, například poldrů, se ukazuje, že realizace dobře zdůvodněného a připraveného opatření může být zásadně ztížena řešením majetkoprávních vztahů a střetem se zájmy dotčených subjektů. Tento činitel se týká nejen vodohospodářských staveb, ale i značné části opatření v krajině. Účinnost těchto opatření je pak zásadně omezena velikostí plochy povodí, na níž je možno opatření realizovat.

Pro racionální výběr adaptačních opatření je rozhodující znalost toho, jaký je jejich reálný účinek vzhledem k požadovaným cílům. Pro rámcové posouzení účinku různých typů adaptačních opatření byla sestavena tab. 6.1, ve které je symbolem + vyznačeno, že adaptační opatření zmenšuje dopady v uvedeném členění. Symbol o značí, že účinek adaptačního opatření je nulový nebo zanedbatelný, symbol – upozorňuje, že adaptační opatření může příslušný dopad klimatické změny zesílit. Stručný popis uvedených adaptačních opatření obsahuje tab. 6.2, stručný komentář k dopadům klimatické změny je v tab. 6.3.

Předpokládané dopady klimatické změny vycházejí z poznatků získaných z výsledků předcházejících studií, které zkoumaly vliv očekávaných změn na hydrologický režim a vodní hospodářství. Z nich vyplývá, že dopady klimatické změny se projeví zejména v extrémních fázích hydrologického procesu, tj. v případě sucha a povodní. Podstatné však je, že výskyt období s nedostatkem vody je podle dosud provedených výzkumů očekáván s podstatně větší pravděpodobností, než zvětšení intenzity a četnosti přívalových srážek, které jsou příčinou povodní.

Pro zmírnění účinku extrémních jevů lze využít jednak opatření v ploše povodí – v krajině, jednak opatření zaměřená na vodu, která již odtéká říční sítí.

Tab. 6.2 Stručná specifikace adaptačních opatření z tab. 6.1

Adaptační opatření		
1	Organizační	Rozmístění, tvar a velikost pozemků uspořádat tak, aby podporovaly plošnou rozmanitost, nevytvářely dlouhé souvislé svahy, umožňovaly infiltraci vody do plůdy a nevytvářely podmínky pro sousledný odtok.
2		Zvětšení rozsahu pozemků zatravněných a zalesněných, vyloučení kukurice a plodin, pod nimiž se vytváří nepropustná krušta.
3	Agrotechnická	Střídání plodin, osevní postupy zvěšující infiltraci a zmenšující erozi, vhodné lesnické péstební 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 přívrchové zvodně a zpět (pokud zvodně existuje). V potenciálně zaplavovaných územích omezit aktivity, které jsou záplavou ohroženy, ponechat prostor pro rozlivy povodní a vsak vody z nivy do přívrchové zvodně (tam, kde je vyvinutá niva a přívrchová zvodně).
7	Uvolnění nivy pro rozlivy	Propustné úpravy povrchu – zatravněné pásy, retenční a vsakovací objekty.
8	Zvětšení infiltrace srážek, vod	Zachycení srážkových vod pro lokální zavlazňování a další účely.
9	Využití srážkových vod	Obnova/výstavba nádrží s dominantní zásobní funkcí, využití existujících nádrží jako zásobních.
10	Zásobní vodní nádrže	Zřizování suchých nádrží (poldrů) a řízených rozlivů.
11	Retenční vodní nádrže	Zřizování víceúčelových vodních nádrží, přizpůsobení manipulačních řádů stávajících nádrží změněným podmínkám.
12	Zásobní i retenční vodní nádrže	Převody vody z povodí, kde je jí dostatek, do místa, kde je jí nedostatek, nebo odvedení části povodňového průtoku do toku nebo nádrže, kde neškodí a může sloužit pro nalepšování průtoků/zásobování. Propojení vodárenských soustav umožňující v kritických situacích převod vody.
13	Převody vody mezi povodími a vodárenskými soustavami	Převod vody z níže ležícího úseku toku do výše ležícího úseku (recyklace vody) pro zajištění minimálních průtoků a obecného užívání vody.
14	Zpětné převody vody uvnitř povodí	Dočasné využití statických zásob podzemní vody (pokud existují) pro odběr nebo i zajištění min. průtoků, lze použít jen v krátkém kritickém období podzemní vody
15	Umělé infiltrace	Posílení zdrojů podzemní vody technicky zajištěným zvětšením infiltrace.
16	Vícenásobné využití vody	Vícenásobné využití vody, například vyčištěné odpadní vody pro závlahy.
17	Zhodnocení a přerozdělení kapacit vodních zdrojů	Vodohospodářská řešení zásobních nádrží a vodohospodářských soustav pro měnění se hydrologické poměry, identifikace volných kapacit a možností jimi posílit deficitní oblasti.
18	Minimalizace ztrát vody ve vodárenských soustavách	Zmenšování ztrát vody rekonstrukcí trubních řádů a pomocí dalších opatření.
19	Využití ekonomických nástrojů	Úpravy ceny vody směřující ke zmenšení spotřeby vody, při rozlišení typu zdrojů, odběratelů i stavu vodohospodářské bilance a respektování vztahu poplatky a nabídky.
20	Inovace závlahových systémů	Využití moderních způsobů závlahy, které zmenšují nároky na množství odebrané vody, např. kapkové závlahy.
21	Racionalizace systému povolování odběru 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 legislačních a ekonomických nástrojů.
22	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 vítvem změny klimatu již významně poklesly, někdy není reálné je dodržet. Je nutné změnit přístup i metodu výpočtu.
23	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.
24	Dokonalejší čištění odpadních vod	Účinnější čištění odpadních vod a další opatření by přispěly k menším nárokům na jejich ředění.

Tab. 6.3 Stručná specifikace dopadů změny klimatu z tab. 6.1

Dopady klimatické změny		
I	Zhoršení mikroklimatu	Zvýšení teploty vzduchu spolu se zmenšením srážek v letním období zejména v oblastech s podprůměrnými ročními úhmy srážek a nadprůměrnými teplotami vzduchu zhorší klimatické podmínky pro stávající vegetační kryt. Adaptační opatření nemožno 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 výtoků 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 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 odběru 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.

6.1 Opatření v krajině

Část odborné veřejnosti přisuzuje opatřením v krajině značný význam. Modelové výpočty i bilanční výpočty, při nichž se účinek opatření kvantifikuje, však ukazují, že v odtokovém procesu se podstatně projevují jen v případě přívalových povodní na malých povodích. Pro zmírnění hydrologického sucha, tj. zvětšení průtoků při výskytu minim, nemají praktický význam.

Zmírnění hydrologického sucha

Podle poznatků, které vyplývají z výsledků pozorování v experimentálních povodích a ze statistických analýz výsledků dlouhodobého systematického pozorování prvků hydrologické bilance, lze usuzovat, že změnami využití pozemků (pokud vyloučíme drastické zásahy jako trvalé odstranění vegetačního krytu, půdy nebo zřízení nepropustných ploch) prakticky nelze trvale znatelně změnit dlouhodobou průměrnou výšku odtoku z povodí (Kašpárek, 2007). I účinek tak drastického zásahu, jako je dočasné odlesnění podstatné části Krušných hor, se projevil jen mírným zvětšením odtoku. Účinek bylo možné identifikovat jen v několika letech po zásahu; jakmile povodí zarostla travním a náletovým porostem nebo byly vysazeny náhradní lesní porosty, vymizel. Zvětšení povodní se neprojevilo vůbec.

K poznání rozdílů hydrologické funkce lesa významně přispěly výsledky, získané na experimentálních mikropovodích Ústavu hydrologie SAV (Pekárová et al., 2005). Postupně zde bylo prováděno pozorování až v osmi dílčích povodích, která leží v povodí potoka Moštěník, jež je součástí Strážovské vrchoviny. Z rozsáhlých poznatků získaných v této oblasti jsou patrně nejpodstatnější závěry získané porovnáním tří dílčích povodí, z nichž jedno je pokryté listnatým lesem, druhé jehličnatým lesem a třetí je běžným způsobem zemědělsky využíváno. Z desetiletého pozorování v období 1981–1990 vyplývá, že největší dlouhodobý koeficient odtoku (31 %) vykazuje zemědělsky využívané povodí, následuje povodí s jehličnatým lesem (26 %) a nejmenší je u povodí pokrytého listnatým lesem (23 %). Z hlediska ročního chodu je však podstatné, že „v absolutních hodnotách je vo vegetačnom období z lesného i poľnohospodársky využívaného povodia rovnaký odtok. Lesný porast neakumuluje vodu v povodí, les výraznejšie nenalepší špecifické odtoky v letných mesiacoch, ale vodu spotrebuje (. . .). Les (ihličnatý i listnatý) v danom regióne hospodári s asi 120 mm vody ročne, ktoré naakumuluje zo srážok v jesennom a zimnom období a ktoré spolu s relevantnou časťou zrážok spotrebuje v jarnom a letnom období. Poľnohospodársky obrábané povodie je schopné v jesennom a zimnom období naakumulovať asi o čtvrtinu (o 30 mm) menej vodných zásob, (. . .). Lesné mikropovodie nenalepší výrazne prietoky v mesiacoch jún až október, kedy je nedostatok vody v povodiach.“

Podstatné také je, že změny využití pozemků, které vedou ke zvětšení retenční schopnosti krajiny (například zalesnění), jsou sice vhodné z hlediska zlepšení vodního režimu krajiny i pro zmenšení povodní z krátkodobých přívalových srážek, ale na povodích s menšími průměrnými srážkami se mohou projevit znatelným zmenšením celkového odtoku, a tedy i zmenšením množství vody dostupné pro zásobování nebo pro ekosystémy vázané na vodní prostředí.

Na malém povodí o ploše 3,52 km² zkoumal účinek redukce plochy orné půdy ve prospěch trvalých travních porostů Kovář (2008). Modeloval v denním kroku vegetační sezony během tříletého období 2001–2003. Účinkem zatravnění poklesl průměrný povrchový odtok v průměru o 19 %, celkový odtok o 5,7 %, základní odtok se zvětšil o 11,2 %. Zvětšení základního odtoku ve „srážkově průměrném“ roce 2001 bylo 1,7 mm, v roce 2002 s velkými srážkami dosáhlo 9,9 mm, v suchém roce 2003 však základní

BOX 6.1 ODHAD ÚČINKU ZMĚN VYUŽITÍ POZEMKŮ NA ZVÝŠENÍ INFILTRACE V POVODÍ RAKOVNICKÉHO POTOKA (Kašpárek et al., 2010)

Efekt zlepšení infiltrační schopnosti povrchu povodí má význam v případě větších intenzivních srážek. Za předpokladu, že jejich výskyt můžeme spojovat s denními úhrny alespoň 20 mm, spíše 30 mm, je roční úhrn těchto srážek na povodí Rakovnického potoka cca 90 mm rok⁻¹ (pro mez 20 mm den⁻¹), respektive jen 43 mm rok⁻¹ (pro mez 30 mm den⁻¹). Odtokové koeficienty povodňového odtoku i z velmi intenzivních a velkých srážek jsou blízké hodnotě 0,3. Za předpokladu, že je pomocí opatření na ploše povodí radikálně zmenšíme na třetinu, dosáhneme zvětšení infiltrace o 20 % uvedených srážek. Pro dělení infiltrace mezi hypodermický odtok a dotaci podzemních vod budeme předpokládat, že dvě třetiny připadnou na dotaci podzemních vod. Pro mez 20 mm den⁻¹ pak vyjde odhad zvětšení dotace pod-

zemních vod o 12 mm rok⁻¹, pro mez 30 mm den⁻¹ o 5,7 mm rok⁻¹, což jsou hodnoty nezanedbatelné vzhledem k průměrné roční výšce podzemního odtoku přibližně 40 mm.

Při uvážení skutečnosti, na jak velké části povodí lze posuzovaná opatření uskutečnit (orná půda zaujímá 58,8 % plochy povodí) a na kolika procentech z této plochy je reálné opatření prosadit, zjistíme, že efekt posuzovaných opatření při reálně odhadnutých možnostech změn užívání zemědělské půdy je velmi malý, řádově jen několik procent celkové dotace podzemních vod. Vztah mezi zvýšením dotace podzemních vod a podílem plochy povodí, na němž uvažujeme změnu využívání půdy, udává následující tabulka (Kašpárek et al., 2010, 2011a).

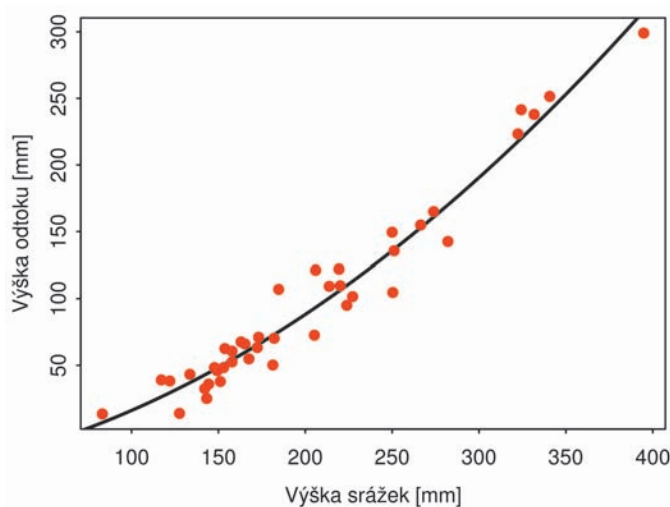
mezní úhrn srážek [mm]	celkem srážek nad mez [mm rok ⁻¹]	zvětšení infiltrace [mm rok ⁻¹]	max. zvětšení dotace podzemních vod [mm rok ⁻¹]	zvětšení dotace podz. vod [%]					
				podíl orné půdy [%]					
				100	50	40	30	20	10
20	90	18	12	17,6	8,8	7,1	5,3	3,5	1,8
30	43	8,6	5,7	8,4	4,2	3,4	2,5	1,7	0,8

odtok poklesl o 0,6 mm (údaje jsou za vegetační sezonu). Vliv uvažované změny na průtoky v období sucha je tedy prakticky zanedbatelný.

Pro posuzování účinku změny využití pozemků na zvětšení infiltrace do zóny podzemních vod, ze které je vytvářen odtok v období hydrologického sucha, je nezbytné posoudit, jaké množství vody a jak velké plochy povodí můžeme ovlivnit. Pro objasnění uvádíme příklad pro povodí Rakovnického potoka (viz box 6.1), které je vhodným reprezentantem oblastí s nízkými úhrny srážek a značným zemědělským využitím pozemků. Odhadnutý efekt posuzovaných opatření při reálně odhadnutých možnostech změn užívání zemědělské půdy je velmi malý, řádově jen několik procent celkové dotace podzemních vod (Kašpárek et al., 2010).

Reálné možnosti zvětšení odtoku vody z povodí v případě pokračující klimatické změny například pomocí omezení meliorací, hrazení stávajících odvodňovacích příkopů, vyloučením holosečí, obnovou přirozené druhové a věkové skladby lesa, omezením výstavby v horských oblastech jsou u větších povodí zanedbatelné. Počítat s nimi při nejistotách odhadů dopadu i rozsahu budoucích změn vegetačního krytu v důsledku oteplení a bez věrohodného odhadu plochy povodí, na které uvedená opatření bude možno provést, by bylo nezodpovědné.

Tento závěr však neznamená, že změny užívání pozemků a další opatření v povodí zmenšující povrchový odtok by se neměly používat. Racionální důvody pro ně však spočívají ve zmenšení eroze a zmenšení kulminačních průtoků zejména krátkodobých povodní, nikoliv ve zvětšení dotace podzemní vody, resp. zvětšení průtoků v období hydrologického sucha.



Obr. 6.1 Vztah výšky odtoku a výšky srážek při povodni v roce 2002 – pozorované hodnoty (červeně) jsou proloženy kvadratickým trendem

Účinek vhodného vegetačního pokryvu povodí a zejména mokřadů je často spojován s „malým hydrologickým oběhem“, tj. zvětšením lokálních srážek v důsledku zvětšení obsahu vody v atmosféře vlivem většího výparu z území. Tento efekt se v odborné literatuře (Bierkens a Hurk, 2008), charakterizuje recyklačním poměrem, což je poměr části průměrné roční srážky odpovídající posílením srážek vlivem lokálního výparu ke srážce celkové. Poměr je vztahován k ploše, jelikož výpar v určitém místě přispívá ke srážce v místech nezanedbatelné vzdálenosti. Pro plochu velikosti 500 km × 500 km je pro Evropu recyklační poměr udáván hodnotou 11 %. Z tohoto údaje můžeme usuzovat, že účinek posílení srážek vlivem zvětšeného lokálního výparu se uplatní ve vzdálenosti minimálně desítek, spíše stovek kilometrů, nejspíše na návětrných svazích. Zlepšení hydrologické bilance konkrétních povodí, o ploše o 2 až 4 řády menší než uvedený rozměr, vlivem většího výparu po změně vegetačního pokryvu povodí je zřejmě pod hranicí rozlišitelnosti měření srážek i odtoku.

Zmenšení povodní

Změny využití pozemků se projevují při povodních. U lokálních povodní z krátkodobých intenzivních srážek mají podstatný vliv. Ten se však zmenšuje u povodní z několikahodinových extrémních srážek, kdy výška srážky významně přesáhne retenční schopnost půdy. U povodní z extrémních regionálních srážek je pak vliv využití pozemků řádově slabší v porovnání s významem příčinné srážky. Z hlediska ochrany půdy před erozí je samozřejmě u všech povodní příznivější, když je povrch povodí pokryt travním nebo lesním porostem v porovnání se zemědělskými plodinami.

Zcela zásadní je, aby na svažitých pozemcích nebyly pěstovány širokořádkové plodiny, zejména kukuřice. Na nedostatečně pokrytém povrchu půdy se může vytvořit kůra, která má zcela minimální infiltrační schopnost (Vališ, 1973). Při následném výskytu přívalového deště nastane plošný povrchový odtok, retenční funkce půdy je podstatně omezena a vznikne nebezpečná lokální povodeň.

Výzkum účinků agrotechnických opatření na zmenšení kulminačních průtoků a objemů povodňových vln na výše uvedeném povodí Rakovnického potoka ukázal, že pro reálně proveditelná opatření na zemědělských pozemcích je účinek relativně malý, v řádu několika procent (viz box 6.2).

Míra vlivu různých faktorů na extrémní povodeň z několikadenních srážek byla zkoumána ve studii Kašpárek a Krátká (2004) na základě výsledků vyhodnocení srpnové povodně z roku 2002. Výsledky analýzy dat ze 42 povodí (s plochou povodí větší než 400 km², průměrně 1 473 km²) potvrdily, že při povodni v srpnu 2002 byl vliv srážkových úhrnů na výšku povodňového odtoku zcela dominantní (obr. 6.1). Další vlivy, které jsou prokazatelné, jsou zvětšení odtokových výšek u propustnějších povodí a zvětšení odtokových výšek vlivem většího podílu zemědělsky využívané půdy v povodí. Vliv podílu zemědělsky využívané půdy není zanedbatelný u povodní s menšími výškami odtoku, v případě povodně ze srpna 2002 byl tento vliv řádově slabší než vliv příčinné srážky.

Z výsledků regresní analýzy vyplynulo, že změně podílu zemědělské půdy o 100 % by při povodni v roce 2002 odpovídala změna výšky odtoku o 24,9 mm. Z hlediska akumulací kapacity půdy to je hodnota fyzikálně přijatelná. Zároveň ukazuje, že při odhadovaných reálných maximálních možnostech změny využití zemědělské půdy, například zmenšení jejího podílu na ploše povodí o 10 %, můžeme očekávat zmenšení odtokové výšky o 2,5 mm, což je 2,6 % z průměrné výšky odtoku za povodně 2002 v použitém souboru (96 mm).

Také velikost kulminačních průtoků je v naprosto rozhodující míře určena veličinami, které nemůžeme ovlivnit – příčinnou srážkou, stavem nasycenosti povodí, geologicky danou propustností povodí a plochou povodí. Výsledky byly ověřeny na nezávislém souboru expedičně zaměřených kulminačních průtoků v 56 profilech s plochou povodí od 1,35 km², průměrně 487 km². Odhad vlivu dalších charakteristik je podstatně méně spolehlivý než v případě odtokové výšky, jelikož v hromadném měřítku neznáme časový průběh srážky ani její maximální intenzitu. Z posuzovaných charakteristik využití půdy se podařilo prokázat tendenci ke zvětšování kulminačních průtoků u povodí s větší urbanizovanou plochou a u povodí s větším podílem zemědělsky využívané půdy. Tyto vlivy jsou řádově menší než vliv příčinné srážky. Například zmenšení podílu zemědělské půdy o 10 % odpovídá pokles kulminačního průtoků o 6 % (Kašpárek a Krátká, 2004).

Odhady získané podle modelových výpočtů se tedy dosti dobře shodují s výsledky získanými vyhodnocením průtoků pozorovaných při povodni v roce 2002. Tyto odhady ukazují, že na velmi malých povodích s převažujícím zemědělským využitím pozemků lze povodňové průtoky znatelně zmenšit. Na větších povodích, jejichž plocha je v řádu desítek nebo stovek kilometrů čtverečních, není obvykle zejména z důvodů ekonomických a majetkových radikální změna využití reálná. Změn povodňových průtoků, které by vybočily z přesnosti jejich vyhodnocení, zde prakticky nelze dosáhnout.

6.2 Opatření na tocích a v nivách

Základním opatřením týkajícím se vodních toků je jejich revitalizace. S mírným zjednodušením lze tvrdit, že jejím efektem by mělo být prodloužení délky toku, kterému odpovídá zmenšení sklonu toku, odstranění technických zpevnění svahů, popř. dna toku, a jejich nahrazení přírodě blízkou úpravou.

Z hlediska povodní vede taková změna morfologie toku k menší průtočné kapacitě, zmenšení postupové doby povodní a většímu rozlivu mimo řečiště. V úsecích toku, kde existuje údolní niva, způsobí rozliv zmenšení kulminačních průtoků. Tento efekt se však projevuje jen u povodní s rychlým vzestupem a krátkým trváním, u objemných povodní z několikadenních srážek nebo z několikadenního tání sněhu je nevýznamný. Revitalizace toků tedy mohou vést k adaptaci na přívalové povodně.

BOX 6.2 MOŽNOSTI AGROTECHNICKÝCH A PROTIEROZNÍCH OPATŘENÍ PRO ZMÍRNĚNÍ ÚČINKŮ POVODNÍ A EROZE PŮDY NA POVODÍ RAKOVNICKÉHO POTOKA (Kašpárek et al., 2010)

Na povodí Rakovnického potoka byla posouzena opatření vedoucí ke zvýšení vsakovací schopnosti povodí a ochraně půdy před erozí. Definováno bylo několik scénářů, jejichž efektivita byla vyhodnocena pomocí hydrologického modelování.

SCÉNÁŘ 1 reprezentuje zatravnění všech pozemků zemědělského půdního fondu, jejichž sklonitost je větší než 4 % (tj. cca 10 % celkové plochy povodí). Zatravněním by mělo být dosaženo zvýšení drsnosti povrchu terénu a zpomalení odtoku ze svahu a také zvýšení infiltračních schopností povodí.

SCÉNÁŘE 2 a 3 navrhuje orbu po vrstevnicích včetně aplikace posklizňových zbytků u SCÉNÁŘE 3 i realizaci průleहů na veškeré zemědělsky využívané ploše povodí (50 % celkové plochy povodí).

SCÉNÁŘE 4 a 5 navrhuje zatravnění (SCÉNÁŘ 4) či zalesnění (SCÉNÁŘ 5) veškeré půdy povodí.

SCÉNÁŘ 6 zahrnuje zatravnění orné půdy s horšími hydrologickými vlastnostmi (tj. půdami s nízkou rychlostí infiltrace – cca 4 % celkové plochy povodí).

SCÉNÁŘ 7 vychází z podrobné analýzy území, navrhuje zatravnění některých pozemků, jež jsou součástí nivy Rakovnického potoka, a také zatravnění na hranicích intravilánu Rakovníka (cca 4 % celkové plochy povodí).

Výsledky potvrdily, že se rozdílné využití pozemků při povodních projeví zejména u lokálních povodní z krátkodobých intenzivních dešťů. U několikahodinových extrémních srážek se vliv využití pozemků snižuje. Při extrémních zásazích do využití půdy v povodí lze (podle modelu) dosáhnout snížení kulminace povodňového odtoku i o 50–60 %. Nicméně, reálně proveditelná opatření naznačují možné snížení do 5 % (viz následující tabulku).

Scénář	1	2	3	4	5	6	7
snížení kulminace [%]	11,62	15,69	5,60	55,81	60,99	2,59	4,69
snížení objemu [%]	9,75	14,56	4,97	47,79	55,40	2,39	5,38

Výsledkem revitalizace je i zvětšení objemu vody akumulované v toku. Na praktických příkladech lze ukázat, že tato změna nemůže znatelně ovlivnit režim minimálních průtoků, navýšení objemu je v porovnání s objemy odtoku malé a voda z říční sítě vyteče během doby řádově menší, než je obvyklé trvání hydrologického sucha.

Efekt zvětšení plochy, kterou může voda prosakovat z geologického okolí do toku nebo naopak, a případný účinek odstranění nepropustného zpevnění dna a svahů řečiště není jednoznačný. Pokud je hladina podzemní vody na počátku hydrologického sucha výše než hladina v toku, její průsak do toku zvětšuje průtoky. V případě dlouhých období poklesu průtoků však nastává i opačná situace. Průtok navýšený v horní části toku zvýší hladinu v toku nad hladinu podzemní vody a je průsakem z toku zmenšován, zvýšená hladina vody v nivě pak umožňuje větší výpar. Celý popsany proces má význam jen v úsecích toků, kde existují v údolní nivě dostatečně rozsáhlé propustné vrstvy hornin.

Praktické zkušenosti ukazují, že i v technicky upravených úsecích toků komunikace mezi vodou v toku a v geologickém prostředí obvykle existuje. Tato komunikace může být u všech toků, upravených i neupravených, značně ovlivněna kolmatací průsakových cest a jejími změnami způsobenými kolísáním průtoků. Z hlediska adaptace na hydrologické sucho lze považovat revitalizaci vodních toků za vhodnou, nedostatek vody v toku v období minim na většině toků však zásadně neovlivní.

Opatření označené „uvolnit nivy pro rozlivy“ může v některých úsecích toků i podstatně přispět ke zmenšení kulminačních průtoků, dokonce i u regionálních povodní. Je však omezeno na úseky toků, kdy

BOX 6.3 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ PŘÍMÉHO ODTOKU POMOCÍ ZMĚN VYUŽITÍ PŮDY

Za účelem posouzení možných vlivů adaptačních opatření v ploše povodí byl rozvinut postup spočívající ve vyhodnocení limitů těchto opatření vzhledem k množství v povodí dostupné vody a vzhledem k ploše, na niž je možno tato opatření realizovat (Kašpárek et al., 2010). Uvažovaná opatření spočívala ve zlepšení odtokových poměrů pomocí změny využití půdy, tedy nahrazení zemědělské půdy, popřípadě luk, lesem tak, aby došlo ke snížení odtokového koeficientu – tj. tak, aby bylo více vody zadrženo v povodí a mohlo popřípadě dotovat zásoby podzemní vody.

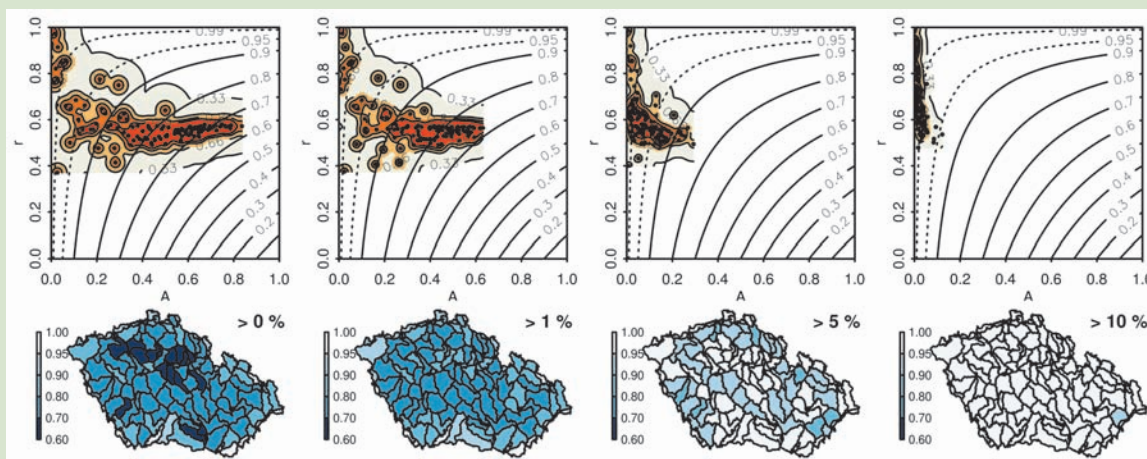
Hodnoty změn odtokového koeficientu byly získány z běžně dostupných tabulek a byly vždy voleny z udávaného rozmezí tak, aby efekt opatření byl co nejvyšší – účelem bylo posoudit horní mez efektivity opatření (viz tabulku níže). Současné využití půdy bylo získáno z databáze CORINE (EEA, 2007). Možné

změny využití půdy byly posouzeny v několika variantách pro všechna povodí 4. řádu – (a) zalesnění veškeré zemědělské půdy, dále zalesnění půdy na pozemcích se sklonitostí větší než (b) 1%, (c) 5% a (d) 10%. Výsledky byly následně agregovány na plochy povodí 3. řádu a oblasti povodí.

Výsledky jsou shrnuty na následujícím obrázku. Pomocí radikálních zásahů v povodí by bylo hypoteticky možno dosáhnout až 40% snížení přímého odtoku (viz následující obrázek), nicméně zpravidla pouze tam, kde je plocha povodí v současnosti značně zemědělsky využívaná, a je tedy potenciálně možné ovlivnit většinu plochy povodí (např. v Polabí), což je ale prakticky nereálné. Podle realističtější varianty (změna na pozemcích se sklonitostí nad 5%) by maximální hypotetické snížení přímého odtoku leželo v rozmezí 0–10%.

	Sklon [%]						použito
	< 2		2–6		> 6		
louka → les	0,50	0,57	0,49	0,50	0,47	0,50	0,47
pastvina → les	0,41	0,53	0,40	0,44	0,38	0,40	0,38
pole → les	0,57	0,63	0,61	0,69	0,61	0,64	0,57

Rozmezí relativních změn odtokového koeficientu pro různé sklonitosti pozemků a změny využití pozemků



Odhad možných změn odtokového koeficientu v důsledku změn využívání pozemků na všech zemědělsky využívaných pozemcích (vlevo) a při změně na pozemcích se sklonitostí větší než 1, 5 a 10%. Horní řádek udává vztah mezi plochou, na niž je možno realizovat opatření (A), změnou odtokového koeficientu na ovlivnitelných plochách před a po opatření (r) a relativní změnou odtoku (kontury). Tečky odpovídají jednotlivým povodím 3. řádu. Dolní řádek zobrazuje relativní změny přímého odtoku pro povodí 3. řádu.

rozsáhlé nivy existují a v minulosti byl rozliv do nich zamezen ohrázením. Záleží pak na ekonomickém zhodnocení a společenském stanovisku, zda uvolnění území například pro řízenou inundaci je účelné a přijatelné. Dosavadní vývoj i po extrémních povodních z roku 1997 a 2002 nenasvědčuje tomu, že toto řešení bude v našich podmínkách časté.

Část vody, která se do nivy rozlije, se infiltuje v horizontální ploše rozlivu do náplav, po poklesu hladiny vytéká podstatně menší plochou do toku. V období po povodni tedy přispívá ke zvětšení průtoků. Doba výtoku však není tak dlouhá, takže pravděpodobnost, že zlepší situaci v potenciálně následujícím hydrologickém suchu, je velmi malá. Ukazuje to například výskyt mimořádného sucha v roce 2003 po povodni z roku 2002.

Opatření na tocích a v nivách tedy na řadě úseků toků mohou být považována za adaptaci na důsledky klimatické změny v oblasti povodní (pokud se jejich zvětšení vůbec projeví), z hlediska adaptace na dopady klimatické změny v období hydrologického sucha mohou být účinné spíše v ojedinělých případech.

6.3 Opatření v urbanizovaných územích

Zvětšení infiltrační schopnosti části urbanizovaných území je vhodné pro zmenšení povodňového odtoku. Záleží však na technickém řešení, do jaké míry je účinné. Běžná praxe návrhu městského odvodnění s využitím propustných ploch, akumulčních a vsakovacích nádrží řeší jen případy srážek s relativně velkou četností. Zdánlivě se týká jen nově řešené zástavby, ve skutečnosti však některé typy existující zástavby rovněž umožňují infiltraci srážkové vody. Typickým představitelem je rodinný domek, z jehož střechy voda vytéká na zatravněnou část zahrady, která je oplocena tak, že voda z ní neodtéká.

Zvětšení infiltrační schopnosti části urbanizovaných území se zatím realizuje na relativně malé části urbanizovaných území, která z hlediska větších povodí, s výjimkou několika velkých měst, zabírají relativně malou část jejich plochy. Součin těchto faktorů vede k závěru, že jejich význam je jen lokální. Stejná úvaha platí o posílení dotace podzemní vody ze zvětšené infiltrace.

Z hlediska vodohospodářské bilance je podstatně účinnější srážkovou vodu zachytit a využít než nechat infiltrovat, někde jímat, dopravit zpět a využít. I v našich podmínkách není nezvyklé využití lokálních systémů pro akumulaci srážkové vody do nádrží na zavlažování zahrad. V malém měřítku existují i využití na splachování záchodů. Přístup označovaný „water harvesting“ je zřejmě jedním z opatření, které může znatelně přispět ke zmenšení nároků na odběry vody.

6.4 Vodohospodářská opatření

Oba hydrologické extrémy spočívají v tom, že se v nějakém místě nebo na nějakém území v určitém časovém intervalu vyskytne vody málo (popřípadě žádná), nebo příliš. Vodohospodářská opatření jsou zaměřena na to, aby změnila průběh odtoku v čase. Základní a efektivní způsoby jsou využití vody zadržené v nádržích a převody vody mezi povodími. Oba typy opatření byly používány již odpradáva v míře, která často převyšuje měřítka dnešních převodů vody např. při zřizování rybníčních soustav

v jižních Čechách (Zlatá stoka, převod Lužnice Novou řekou do Nežárky) i ve východních Čechách (Opatovický kanál). Oba typy opatření mohou sloužit pro zmenšení kulminačních průtoků, pro zabezpečení odběrů vody i pro zajištění minimálních ekologických průtoků. V případě víceúčelových nádrží s kombinací retenční a akumulární funkce se obě tyto funkce vzájemně doplňují. Vodu zachycenou při povodních lze zcela nebo částečně využít pro nalepšování průtoků v období hydrologického sucha i pro odběry. Při posuzování možností využít vodní nádrže pro adaptaci na dopady klimatické změny ve vodním hospodářství je vhodné rozlišit, o jaké nádrže jde. U stávajících nádrží, které jsou využívány pro nalepšování průtoků, zajištění odběrů vody, ochranu před povodněmi, energetické účely, rekreaci i další účely přichází do úvahy prověření jejich funkce vodohospodářským řešením na základě hydrologických podkladů ovlivněných klimatickou změnou a následná úprava manipulačních řádů. Přitom lze do určité míry upřednostnit nebo potlačit některou z funkcí nádrže.

Existují však i menší nádrže, zřízené jako zásobní (obvykle jako zdroj vody pro závlahy), které svou funkci neplní, jelikož jsou v současnosti využívány pro chov ryb, a tomu jsou podřízeny manipulace. Zejména v povodích, kde se nedostatek vody již projevil, je třeba obnovit jejich původní účel.

Třetí kategorií jsou nádrže plánované a zřizované v současné době. Převládají suché nádrže – označované termínem poldr, určené pouze pro protipovodňovou ochranu. Považujeme za chybu, že v případě, kdy by mohly plnit i zásobní funkci (zmírňovat dopady hydrologického sucha) a v případě pokračující klimatické změny působit i v této funkci jako adaptační opatření, je takovému řešení zabraňováno stanovisky orgánů ochrany přírody (příkladem je plánovaná nádrž Mělčany na Dědině).

Do poslední kategorie patří nádrže potenciální – tj. neexistující. Je třeba se jimi zabývat, jelikož dosud provedené studie ukázaly, že v případě významných změn hydrologického režimu, který indikují některé scénáře klimatické změny pro období konce 21. století, by některé zásobní vodohospodářské soustavy nebyly bez posílení novými zdroji schopny zásobování vodou s dostatečnou zabezpečeností zajistit. Proto je nezbytné lokality hájené pro zřízení povrchové akumulace vody chránit před znehodnocením.

Druhý typ vodohospodářských opatření zajišťuje přivedení vody z místa, kde je jí dostatek, do místa, kde se jí nedostává (při hydrologickém suchu), nebo odvedení části povodňového odtoku do toku nebo nádrže, kde neškodí. Jde jednak o převody vody umělými toky, kdy se převádí voda v říční síti (označované jako „kanály“ (Opatovický), „stoky“ (Zlatá stoka), „řeky“ (Nová řeka – Lužnice), přivaděče aj.), ale také o dálkové převody vodárenské (např. z povodí Želivky do Prahy). Základním předpokladem pro převod vody pro zajištění odběrů a nalepšení průtoků je, aby převod neovlivnil nepříznivě bilanci povodí, ze kterého je voda odváděna. Totéž platí o vodárenských soustavách. Ty by měly být propojeny a existující nevyužívaná propojení by měla být obnovena, aby soustava s příznivou bilancí mohla posílit sousední soustavu s nedostatkem vody. Řešením tedy může být i zřízení nádrže mimo povodí, ve kterém je vody nedostatek, a zajištění vody pro převod z této nádrže.

V tab. 6.1 jsou uvedeny i dosud neužívané možnosti hospodaření s vodními zdroji. Možností je například nalepšení průtoků za hydrologického sucha v úsecích toků se značnými nároky na obecné užívání vody přivedením části průtoků z níže ležícího úseku toku (čerpáním) do úseku toku ležícího výše po toku, tj. recyklací průtoků. V povodích, kde to velká akumulární kapacita podzemní vody umožňuje, přichází do úvahy i zajištění minimálního průtoků krátkodobým využitím statické zásoby podzemní vody (prakticky jejím čerpáním do toku) pro překlenutí kritické fáze hydrologického sucha. Takové opatření lze připustit, jen když existuje vysoká pravděpodobnost, že se v následujícím období statická zásoba podzemní vody doplní. K tomuto účelu a rovněž i k trvalejšímu využívání akumulární schopnosti některých hydrogeologických struktur může sloužit umělá infiltrace.

Opatření pro snižování požadavků na vodu označené dále jako „řízené vícenásobné využití vody“ je v ČR dosud neobvyklé, ale jedná se zároveň o opatření s vysokým potenciálem v budoucnosti. V první řadě jde o možnost využít vyčištěnou odpadní vodu pro závlahy. To je však možné pouze za předpokladu splnění hygienických požadavků na jakost přečištěné odpadní vody pro takové použití. Je pravděpodobné, že rychlý vývoj technologií na čištění odpadních vod recyklaci odpadní vody umožní. Kromě zmenšení odběrů pro závlahy z toků nebo podzemní vody by se zmenšily i požadavky na průtok potřebný pro ředění odpadních vod.

Návrh vodohospodářských opatření pro zmírnění dopadu klimatické změny bude třeba založit především na podrobné znalosti toho, jaké jsou pro konkrétní povodí možnosti využití stávajících nádrží, zřízení nových nádrží, převodů vody, využití zásob podzemní vody a dalších opatření vhodných pro dané přírodní poměry a navazující na současnou vodohospodářskou infrastrukturu.

Při návrhu konkrétních adaptačních opatření nebo jejich kombinací je nutné provést ekonomické porovnání investičních i provozních nákladů. Jako doplňující kritéria výběru je vhodné uvážit další hlediska. Například nádrže mohou být zřízeny jako víceúčelové a mohou být využity jako akumulární i pro ochranu před povodněmi. V porovnání s trubními převody vody zpravidla zaberou nádrže větší územní celky. Na druhou stranu však s realizací trubních převodů vody může být spojeno složitější řešení majetkových vztahů.

6.5 Zmenšování požadavků

Pro zmenšování požadavků na vodu se v případě odběrů vody jako základní nástroj využívá cenová politika. Vzhledem k transformaci ekonomiky ČR po roce 1989 došlo k výraznému poklesu spotřeby vody obyvatelstvem i v průmyslu, a tudíž se nepředpokládá, že by zde existoval velký prostor pro nová účinná cenová opatření. Dalšího podstatného zmenšení by patrně bylo možné dosáhnout jen dočasným omezováním dodávky vody, s odpovídajícími politickými a hospodářskými důsledky.

Z technických řešení může zmenšit nároky na odběry vody minimalizace ztrát vody ve vodárenských soustavách. S tím, jak se postupně inovují rozvodné soustavy, se prostor pro další snižování ztrát zmenšuje, takže nelze předpokládat, že by toto opatření podstatně kompenzovalo případný pokles zdrojů. Jistý prostor pro snížení odběrů vody v domácnostech představuje využívání efektivních elektrospotřebičů (praček, myček) a vodoinstalace (vodovodní baterie, hlavice sprch, splachovací systémy atd.).

V oblasti závlah se jako efektivní jeví zavádění progresivních závlahových technologií, které požadavky na velikost odběru zmenšují. Je otázkou, zda se potřeba vody pro závlahy nebude zvětšovat i při využití efektivních závlahových technologií, v důsledků případných negativních vlivů změny klimatu. V dosud běžně realizovaných studiích vodohospodářské bilance, až na několik výjimek, se nepočítá s nárůstem požadavků na odběry vody pro závlahy, ačkoliv je velmi pravděpodobný.

Požadavky na ředění odpadních vod by bylo možné snížit v případě, že by odpadní voda byla vyčištěna více, než požadují současné předpisy. Technologicky nicméně není možné čistit vodu lépe pouze dočasně v období hydrologického sucha, takže řešení by vyžadovalo značné jednorázové investiční a trvalé vyšší provozní náklady.

Zmenšení požadavků na ochranu před povodněmi lze uskutečnit tím, že tam, kde to je ekonomicky přijatelné, odstraníme objekty ležící v dosahu povodní a ponecháme záplavové území volné pro

průchod povodní. Pokud to přijatelné není, lze povodňové škody omezit způsobem využití objektů v záplavovém území. Oba uvedené směry zmenšování požadavků na ochranu před povodněmi se v ČR uplatňují, i když zatím nepříliš účinně.

6.6 Legislativní opatření

Pro řešení dopadů klimatické změny je důležité, aby byl racionalizován systém povolování odběrů vody i stanovení minimálních průtoků. Současný systém povolování odběrů vody nedostatečně zamezuje skutečnosti, že velikost povoleného odběru je u některých odběratelů podstatně větší než skutečný a potřebný odběr. Tím se administrativně omezuje povolení a uskutečnění jiných odběrů a vytváří se fiktivní nedostatek vody. Otázkou také je, zda v současné době platná velikost odběru povrchové vody nevyžadující povolení a evidenci odběrů by neměla souviset s velikostí minimálního ekologického průtoku v místě odběru. Podle poznatků z praxe soustředění „podlimitních“ odběrů může způsobit úplné vyschnutí toku v jeho dolní části. Obdobné jsou poznatky o důsledcích intenzivních odběrů pro zasněžování.

Inovaci vyžaduje i postup stanovení minimálních ekologických průtoků a jejich následné využití při řešení vodohospodářské bilance a různých typů vodohospodářských řešení. Aplikací nové metodiky stanovení minimálních ekologických průtoků může v řadě případů dojít nejen ke značně odlišnému hodnocení současného a výhledového stavu vodohospodářské bilance, ale se změnami těchto hodnot mohou souviset i významné ekonomické důsledky. V roce 2011 byla v rámci výzkumného záměru Ministerstva životního prostředí řešeného ve VÚV TGM navržena metodika popisující obecné zásady stanovení minimálních ekologických průtoků v ČR (Balvín a Mrkvičková, 2011), nicméně metodika odvození konkrétních hodnot minimálních ekologických průtoků v jednotlivých tocích vyžaduje další diskuzi.

Rovněž je třeba zpracovat systém sledování, předpovědi a návrhu operativních opatření při výskytu hydrologického sucha, jehož následkem je stav, kdy nelze splnit všechny požadavky na odběry vody a zároveň požadavky na zachování minimálních průtoků. Je třeba stanovit priority podle míry nebezpečných dopadů na obyvatelstvo, životní prostředí, energetiku, průmysl, zemědělství a další odběratele, stanovit postupy pro řešení střetu požadavků a postupy pro zmírnění důsledků nedostatku vody např. ve formě plánů pro zvládnutí sucha a nedostatku vody a povinnosti zpracovávat takové plány zakotvit v novele vodního zákona.

Vybrané studie

7 Studie dopadů změny klimatu a návrhy adaptačních opatření

V následující části předkládáme pro ilustraci výsledky několika případových studií, jež byly vytvořeny v rámci různých výzkumných úkolů i komerčních zakázek, provedených ve VÚV TGM. Polohu zájmových území řešených v jednotlivých studiích udává obr. 7.1.

Na začátek jsou zařazeny tři studie týkající se povodí, na kterých se již v současnosti projevují dopady změny klimatu – povodí Rakovnického potoka, Srpiny a Blšanky a Liboce. Podnětem k řešení těchto lokalit bylo vždy dlouhodobé zhoršení hydrologických podmínek, které vedlo k omezení možnosti užívání vody či k pochybnostem o udržitelnosti zvyšování v současnosti povolených odběrů vody. Všechny tři lokality leží v oblasti středních Čech, kde dochází v poslední době ke stagnaci či poklesu srážek, jenž je navíc podpořen průběžným zvyšováním teplot (viz kapitolu 4). Uvedená povodí navíc patří přirozeně k nejsušším oblastem České republiky, a jsou tak na probíhající změny velmi citlivá. Nicméně vyplní-li se odhady dopadů změny klimatu, je pravděpodobné, že k podobnými problémům začne docházet i na dalších povodích v České republice.

Povodí Rakovnického potoka bylo řešeno v rámci výzkumného projektu Ministerstva zemědělství „Možnosti zmírnění současných dopadů klimatické změny zlepšením akumulční schopnosti v povodí Rakovnického potoka (Pilotní projekt)“. Uvedené informace jsou čerpány zejména z periodických zpráv o řešení projektu (např. Kašpárek et al., 2010) a publikovaných článků (Kašpárek et al., 2011a). Podrobně je problematika pojednána v publikaci (Kašpárek et al., 2011b).

Studie povodí Srpiny (Hanel et al., 2007) a Blšanky a Liboce (Kašpárek a Mrkvičková, 2008) byly provedeny na základě objednávky Povodí Ohře, s.p. Všechny výše zmíněné práce se zabývají jak příčinami současného stavu, tak aspoň rámcově řeší možnosti adaptačních opatření vedoucích ke zlepšení hydrologických podmínek, z nichž některá jsou i postupně realizována.

Následuje studie zaměřená na posouzení možností kompenzace růstu deficitních objemů pro Českou republiku. Podstatou je porovnání objemů vody, o něž se pravděpodobně zvýší deficitní objemy v důsledku klimatické změny, s objemy potenciálních nádrží na lokalitách vhodných pro akumulaci povrchových vod podle Generelu území chráněných pro akumulaci povrchových vod. Uvedené posouzení bylo provedeno v rámci projektu vědy a výzkumu financovaného Ministerstvem životního prostředí „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“ (Pretel, 2010). Práce navazující na předchozí obdobnou studii (Peláková a Boersema, 2005) je rozšířena o současné projekce regionálních klimatických modelů a aktuální seznam lokalit z Generelu území chráněných pro akumulaci povrchových vod.



Obr. 7.1 Přehled zájmových území řešených v jednotlivých studiích, jež jsou uvedeny v následujících kapitolách

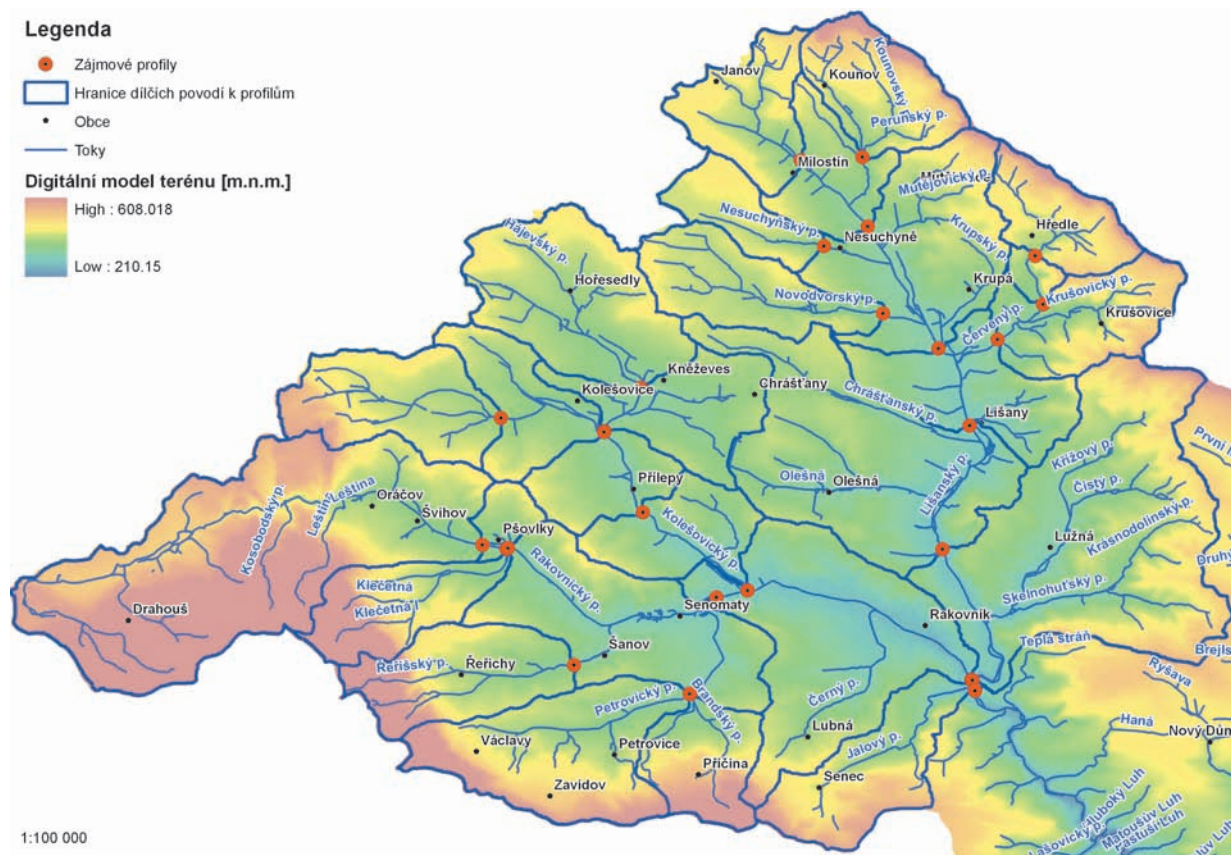
Část věnovaná případovým studiím je uzavřena hodnocením dopadů klimatické změny na poměry hladin a podzemního odtoku na povodí Metuje po Hronov (území polické, resp. vnitrosudetské pánve). Tato studie (Uhlík et al., 2008), na rozdíl od předchozích, neřeší návrh adaptačních opatření, ale soustředí se na podrobné hydraulické modelování zájmového území v současných podmínkách a podmínkách ovlivněných změnou klimatu, přičemž pozornost je věnována zejména drenáži podzemních vod do toků a doplňování zásob podzemní vody. Studie byla vypracována firmou ProGeo, s.r.o., na základě objednávky VÚV TGM v rámci řešení projektu Technologické agentury České republiky „Udržitelné využívání vodních zdrojů v podmínkách klimatických změn“.

8 Adaptační opatření pro zmírnění dopadů současné změny klimatu na povodí Rakovnického potoka

Vzestup teploty vzduchu, který se již projevil na celém území České republiky, byl na většině území doprovázen mírným zvětšením srážek, které postačily dotovat zvýšený výpar, a odtok z povodí se nezmenšoval. Na území Středočeského kraje nicméně srážky spíše stagnují či klesají. Z 12 let z období 1998–2009 jen ve dvou letech byly nad normálem. Ve většině let oblast s podprůměrnými srážkami zasahuje i část Ústeckého kraje, zejména dolní část povodí Ohře. Obecně se jedná o území charakterizované nejmenšími dlouhodobými úhrny srážek v Čechách. V této oblasti dochází v současnosti také ke snížení extrémních srážkových úhrnů, jak dokládá např. Kyselý (2008). Výsledky z několika vodoměrných pozorování na povodích v této oblasti pak ukazují výrazně klesající trend průtoků až do hodnot blízkých nule. Jedním z takových povodí je i povodí Rakovnického potoka, kde v kontrolním profilu Rakovník opakovaně nejsou splněny požadavky na zachování minimálního zůstatkového průtoku. Průtok Rakovnického potoka v Rakovníku poklesl například v letním období roku 2009 až na úroveň cca 10 l s^{-1} (ze 163 km^2), což je asi čtvrtina vypouštění vody z ČOV Rakovník. I když v profilu vypouštění je průtok zvětšen o příspěvek z Lišanského potoka, vypouštění z ČOV je v takové hydrologické situaci rovnocenné nebo i větší než průtok v potoce.

Na nepříznivý stav hydrologické bilance, která se v povodí Rakovnického potoka projevuje nejen v odtokových poměrech, ale i nedosahováním optimálních výnosů zemědělských plodin v důsledku sucha, upozornila představitelé Ministerstva zemědělství a následně i VÚV TGM Zemědělská agentura Rakovník. V návaznosti na uvedené skutečnosti byl pro povodí Rakovnického potoka (jako pilotní případ) zahájen výzkum vedoucí k návrhu opatření pro zlepšení nepříznivé vodní bilance, jež bude zároveň sloužit jako podklad ke vzniku metodiky pro tvorbu opatření směřujících primárně ke zvýšení akumulací schopnosti povodí a zabezpečujících požadavky na užívání vody. Výzkum je financován Národní agenturou pro zemědělský výzkum.

Povodí Rakovnického potoka nad Rakovníkem (obr. 8.1) leží v nadmořských výškách cca 315–600 m n. m., sklony terénu jsou na většině povodí malé, průměrně 7%. Významná je velká míra zemědělského využití povodí a nerovnoměrné rozmístění zalesněných částí povodí, 59% plochy povodí je využito jako orná půda, 18% je zalesněno. V povodí Rakovnického potoka nad Rakovníkem se nachází cca 85 malých vodních nádrží, jejich celková výměra je přibližně 143 ha. Z toho připadá 44 ha na Velký jesenický rybník, který však není běžně zcela napouštěn, odhad jeho skutečné rozlohy je asi 15 ha. Reálná plocha rybníků je tedy asi 114 ha, tj. 3,8% plochy povodí. Přibližně 70% rybníků má plochu menší než 1 ha. Rybníky, které vytvářejí na horním toku Rakovnického potoka jesenickou soustavu, jsou



Obr. 8.1 Posuzovaná část povodí Rakovníckého potoka

vypouštěny jednou či dvakrát za dva roky, většinou na podzim, popřípadě na jaře. Pokud vypouštění začne v září, může přispět ke zkrácení období minimálních průtoků na Rakovníckém potoce, při plnění rybníků je však vypouštěn jen předepsaný minimální průtok a přirozené průtoky jsou znatelně zmenšovány. Vzhledem k tomu, že jesenická rybníční soustava je spojena s odběry vody v Jesenici, není pro nalepšování průtoků Rakovníckého potoka vhodná. Zásobní objem několika dalších relativně významných malých vodních nádrží v povodí nad městem Rakovník je cca 250 tis. m³. Jejich teoretická schopnost navýšit průtoky při polovičním vypouštění je cca 24 l s⁻¹ po dobu dvou měsíců, účel nádrží je však jiný.

Plošná proměnlivost dlouhodobých úhrnů srážek není na povodí Rakovníckého potoka zanedbatelná. Rozmezí ročních úhrnů srážek je 484–584 mm. Srážkové úhrny jsou nejnižší pro subpovodí nacházející se v severozápadní části povodí, zejména na subpovodích Kolečovického potoka, na kterých jsou (kromě horní části Kolečovického potoka) úhrny srážek nižší než 500 mm za rok. Naopak v jižní části povodí dosahují srážky na jednotlivá subpovodí úhrnů nad 510 mm. Subpovodí s nejvyššími úhrny srážek jsou při severovýchodním okraji povodí (subpovodí Kounovského a Krusovického potoka) s ročními úhrny nad 530 mm.

Z provedeného porovnání charakteristik hydrologické bilance používaných pro reprezentativní období 1931–1960 a 1931–1980 s údaji pro období 1966–2008 a 1988–2008 vyplývá, že při relativně malém poklesu srážek je pokles průměrného průtoku extrémní; při porovnání období 1988–2008 oproti 1931–1980

poklesl průtok na 53 %. Je zřejmé, že dosud používané charakteristiky průměrných průtoků a m-denních průtoků nemohou odpovídat současným hydrologickým poměrům.

Z hlediska dlouhodobého kolísání srážek v období 1931–2008 není nepatrně klesající trend srážek podstatný a dlouhodobý režim je z hlediska průměru ročních úhrnů srážek stacionární. Ve stanici Kounov je nicméně klesající trend v období 1960–2008 natolik významný, že převáží nevýrazné trendy z ostatních stanic, takže trend průměrných výšek srážek na povodí je klesající průměrně o 0,68 mm za rok, tj. 33 mm za 49 let. Klesající trend v období 1960–2008 je výraznější než v řadě 1931–2008. Kolísání srážek po roce 1984 je odlišné od období 1961–1983, maxima jsou menší. Z porovnání čar překročení měsíčních výšek srážek z období 1960–1984 a 1985–2008 vyplývá, že v pozdějším období se zmenšila četnost i velikost srážek v oblasti hodnot větších než 50 mm za měsíc. V ročním chodu se největší pokles srážek projevuje v dubnu, patrný je však i v následujících měsících květnu a v červnu a také v říjnu. Největší vzestup srážek se vyskytuje v červenci, srážky mírně stoupají i v srpnu a v září. Od listopadu do března jsou změny srážek malé. V souhrnu tedy lze konstatovat, že i když roční úhrny srážek klesají jen velmi mírně, jejich rozdělení se změnilo. Podstatně ubylo srážek s velkými výškami na povodí, důležitý je také pokles srážek v tříměsíčním jarním období od dubna do června.

Rozbor meteorologických a hydrologických pozorování v povodí Rakovnického potoka ukázal, že i když roční úhrny srážek nijak významně nepoklesly, způsobilo významné oteplení, které nastalo zejména po roce 1980, spolu se zmenšením četnosti a velikosti vydatných srážek a zmenšením jarních srážek v období po roce 1981, velmi podstatné změny odtoků z povodí. Pokles průtoků o 40 až 60 % nastal v téměř celém jejich rozsahu. Největší poklesy se projeví v jarních měsících a také v srpnu, kdy je v tomto povodí nejčastější výskyt minimálních průtoků. Z dosud provedených rozborů a modelových výpočtů vyplývá, že pokles celkového odtoku (jenž je přibližně z poloviny tvořen základním odtokem) je způsoben z podstatné části poklesem základního odtoku vlivem klesající dotace podzemních vod. Dotace podzemní vody nastává obvykle v únoru a zejména v březnu. K jejímu poklesu přispívají dvě skutečnosti. První je, že se buď vůbec nevytváří, nebo je jen velmi malá zásoba vody ve sněhu, další spočívá v tom, že v lednu a zejména v únoru se zvětšuje územní výpar. Následkem těchto změn dochází častěji k tomu, že ani na konci zimy není půda zcela nasycena vodou a srážky neprosakují půdou, ale jen doplňují zásobu vody v půdě a nedoplňují zásoby podzemní vody. Pro vývoj hydrologické bilance v následujících měsících je nepříznivé, že zejména dubnové, ale i květnové a červnové srážky mají klesající trend. Výsledkem je, že dosud uvažované velikosti přírodních zásob podzemní vody, odvozené na základě dat z období 1971–1990, ukazují při použití dat z období 1988–2009 pokles o 23,5 %.

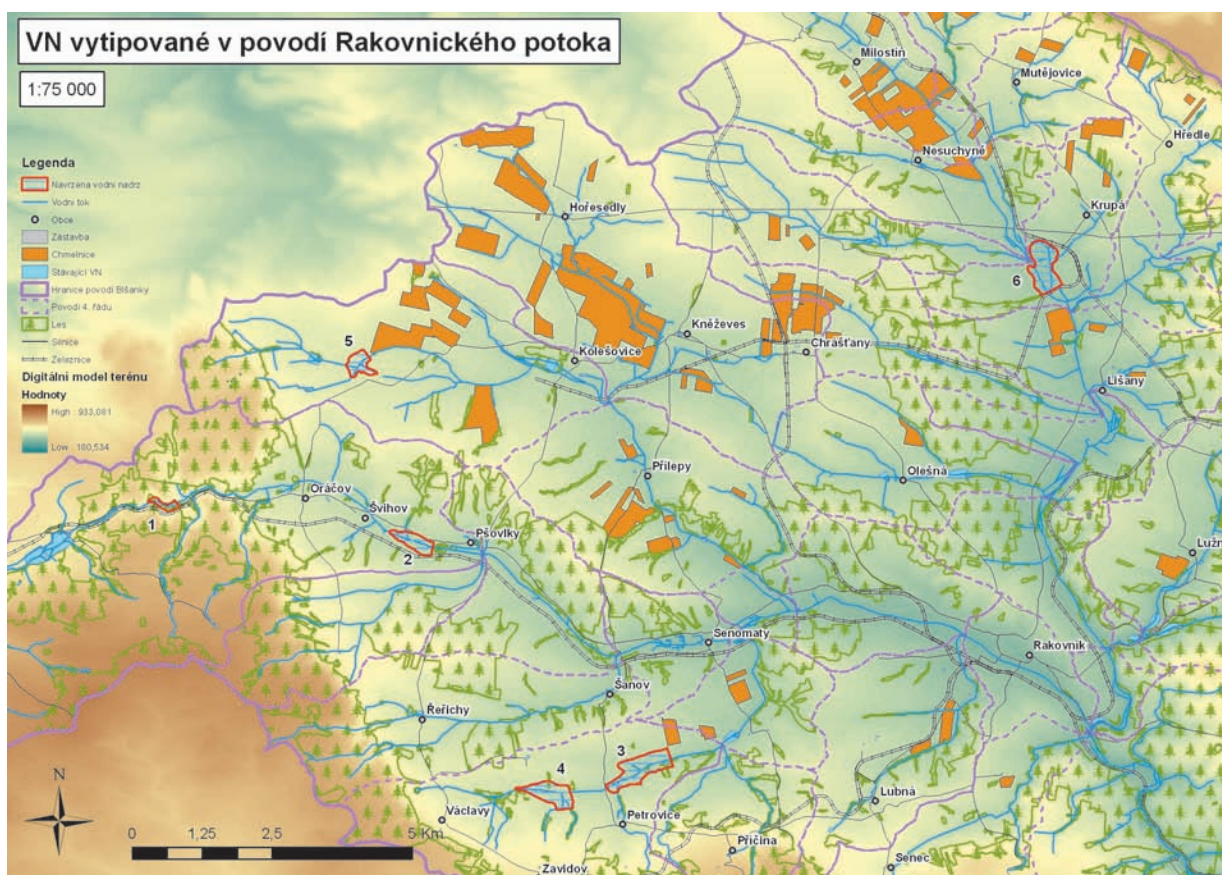
Možná adaptační opatření

Opatření v krajině

V předchozím textu jsme již demonstrovali odhady efektivity opatření v krajině ke snížení přímého odtoku (box 6.2) a zvýšení dotace podzemní vody (box 6.1). Zejména vzhledem k ploše povodí, na které je možné opatření realizovat, bylo konstatováno, že tato opatření nemají prakticky žádný vliv na změnu odtokových poměrů. Nicméně jejich smysl lze spatřovat v ochraně proti erozi a zvýšení ekologické stability daného území.

Možnosti akumulace vody v nádržích a nalepšování průtoků

Na základě publikace „Jak je to s rybníky na Rakovnicku“ z roku 1964 a s využitím historických map byly identifikovány lokality zrušených rybníků. Následně byl proveden terénní průzkum s cílem nalézt hráze



Obr. 8.2 Vytipované lokality vhodné ke zřízení vodních nádrží v povodí Rakovnického potoka

zrušených rybníků nebo jejich zbytky. Pro každou lokalitu byla posouzena možnost případné obnovy. Celkem bylo nalezeno 12 lokalit, v několika případech existují zachované hráze. Získané informace byly využity jako jeden z podkladů pro vyhledání možných lokalit pro akumulační prostory v povodí.

Podle informací Zemědělské vodohospodářské správy Rakovník jsou v povodí Rakovnického potoka čtyři nové malé vodní nádrže ve stavu projektové dokumentace, další dvě jsou naplánovány v dlouhodobém výhledu. Z projektovaných nádrží je největší v Kněževsi s objemem 19,7 tis. m³. Celkový objem všech čtyř nádrží je 26,6 tis. m³, takže jejich vodohospodářská a retenční funkce je minimální. Obě výhledové nádrže mají plochu menší než 2 ha, a proto o nich platí totéž.

Pomocí prostředků GIS byly vyhledány lokality potenciálně vhodné pro zřízení nových akumulačních nádrží (obr. 8.2). Výběr byl proveden pouze z hlediska morfologie terénu a využití území (v budoucích zátopách až na výjimky není zástavba, souvislý les, silnice, železnice). Na základě 171 hydrometrických měření provedených v závěrových profilech 18 dílčích povodí bylo posouzeno rozdělení odtoku na ploše povodí v hydrologickém roce 2009 a analogií k průtokům ve vodoměrné stanici Rakovník byly pro profily potenciálních nádrží odvozeny průtokové řady.

Na základě provedených průzkumů a posouzení zejména z hlediska velikostí průtoků bylo pro další úvahy a posuzování vybráno sedm lokalit, ve kterých přichází do úvahy výstavba malých vodních nádrží s akumulační funkcí. Nádrže jsou uvažovány na Rakovnickém potoce i jeho hlavních přítocích tak,

aby bylo možné ovlivňovat odtok z podstatné části celého povodí. Součet maximálních, morfologicky omezených objemů všech nádrží je cca 6 mil. m³. Pro akumulaci a nalepšování průtoků by bylo z tohoto objemu možné využít jen část, nádrže by měly mít i objem stálého nadržení. Do úvahy přichází i možnost využití části celkového objemu pro ochranu před povodněmi.

Součet nalepšení účinkem všech posuzovaných nádrží je 190 l s⁻¹. Předpokládat, že budou všechny uvažované nádrže současně zřízeny, není reálné. I při redukovaném výběru, např. když uvažujeme jen čtyři větší nádrže v povodí nad Rakovníkem, lze zajistit nalepšení Rakovnického potoka v Rakovníku o cca 80 l s⁻¹. Pro současné hydrologické podmínky tedy lze pomocí akumulačních nádrží podstatně zvětšit minimální průtoky Rakovnického potoka v Rakovníku. Nalepšení minimálních průtoků by také přibližně dvojnásobně zvětšilo minimální průtoky v profilu vypouštění odpadních vod z ČOV Rakovník, takže ředění odpadních vod by bylo podstatně příznivější.

Pokud by se klimatická změna v povodí Rakovnického potoka projevovala dalším oteplováním bez zvětšení atmosférických srážek, klesaly by dále přirozené i nádržemi ovlivněné minimální průtoky. Pro období, ve kterém by průměrná teplota stoupla proti výchozímu stavu o 2 °C, by pokleslo nalepšení o cca 37 %, tj. pro uvedenou redukovanou soustavu na 50 l s⁻¹, což by ještě znatelně režim minimálních průtoků zlepšovalo. Pro zvýšení teploty o 4 °C by uvažovaná sestava nádrží poskytla nalepšení jen 37 l s⁻¹. Když uvážíme značnou nejistotu všech použitých řešení, můžeme usuzovat, že pro tyto podmínky by již redukovaná soustava patrně nepostačovala a bylo by třeba ji posílit dalšími nádržemi nebo převodem vody z jiného povodí.

Uvedené poznatky vyplynuly ze studie změn hydrologické bilance s využitím scénářů klimatické změny. Nepočítalo se však s tím, že by se v povodí Rakovnického potoka podstatně zvětšovaly odběry vody pro závlahy. Pokud by tuto spotřebu vody další oteplení vyvolalo, byly by odhady zvětšení minimálních průtoků nepříznivější.

Další technická opatření

Jako další slibná varianta se jeví převod vody z Ohře (cca 30 km), jenž by pravděpodobně byl realizovatelný i v případě pokračující změny klimatu. Z hrubého ekonomického porovnání nákladů na realizaci a provoz jednotlivých opatření (za předpokladu stejného nalepšení průtoků) vyplývá, že náklady na převod vody jsou srovnatelné s náklady na vybudování části vodních nádrží (vodní nádrže cca 150 mil. Kč, převod vody cca 91 mil. Kč), přičemž spolehlivost zajištění vodních zdrojů pomocí převodu by mohla být vyšší než v případě nádrží. Jako alternativní možnost nahrazující či doplňující tato dvě základní opatření je dále uvažováno o převodu vody z ČOV Rakovník do vyšších částí povodí (do toku nebo vodní nádrže). Kvantifikace nákladů a účinnosti těchto opatření vyžaduje další výzkum.

Uvedené poznatky byly získány na základě řešení projektu Ministerstva zemědělství „Možnosti zmírnění současných dopadů klimatické změny zlepšením akumulační schopnosti v povodí Rakovnického potoka (Pilotní projekt)“. Informace jsou čerpány zejména z periodických zpráv o řešení projektu (např. Kašpárek et al., 2010) a publikovaných článků (Kašpárek et al., 2011a). Podrobně je problematika pojednána v publikaci (Kašpárek et al., 2011b).

9 Možnost zlepšení hydrologických poměrů povodí horní Srpiny

Srpina je přítok Bíliny pramenící mezi Mostem a Chomutovem v oblasti výrazně ovlivněné důlní činností. Povodí zájmového území (Srpina po zaústění Slatinického potoka) je možno charakterizovat jako přirozeně velmi suché zejména vzhledem k jeho poloze blízké centru srážkového stínu Krušných hor. Vzhledem k výšce průměrného ročního srážkového úhrnu se jedná o jedno z nejsušších povodí v naší republice (tab. 9.1). Navíc, jak vyplývá z charakteristik odtoku i jeho výšky, dochází k zachycení velké části vody v povodí a jejímu odpaření. Lze proto předpokládat, že i za původního stavu povodí docházelo v suchých letech k úplnému nebo téměř úplnému vyschnutí koryta horní Srpiny i Hošnického a Sušanského potoka. 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 územního výparu. Lze očekávat, že četnost výskytu období s poklesem průtoků k nulovým hodnotám se v tomto povodí bude zvyšovat a délky suchých period prodlužovat. Již v současnosti se vyskytly roky, ve kterých byl průtok Srpiny v obci Strupčice a v obcích ležících níže po toku tak malý, že znemožňoval obecné užívání vody. Tlak veřejnosti proto vedl Povodí Ohře, s.p., k zadání studie posuzující možnosti zlepšení hydrologických poměrů povodí.

Zájmové území je významně ovlivněno těžbou uhlí. Nejvíce je dotčeno povodí Srpiny po Hošnický potok. V tomto povodí byla rovněž vybudována přeložka Srpiny vedoucí kolem obce Hošnice, která se napojuje do původního koryta v Malém Březně. Původní koryto Srpiny končí pod Strupčicemi, kde je překryto Březanskou výsypkou. V důsledku navedení výsypky vznikla bezodtoká oblast tvořená z části plochou původního povodí, z části povrchem výsypky. Na Srpíně pod Strupčicemi se nachází čistírna odpadních vod, ze které odtéká voda do přílehlé nádrže. Do ní odtéká i případný odtok z původního toku Srpiny. Voda z nádrže je odvedena na severovýchod mimo povodí horní Srpiny (obr. 9.1–9.2).

Jedním z možných ovlivnění přirozených poměrů v povodí Srpiny je hydraulická clona, jež byla v minulosti provozována za účelem udržení úrovně hladiny podzemní vody tak, aby bylo možno bezpečně vydobýt uhlí v lomovém prostoru Vršany-Jan Šverma. Nicméně čerpání bylo prováděno z velkých hloubek, z vrstvy artésky zvodnělého kolektoru podložních písků, nad kterými se nacházejí uhelné sloje a střídající se vrstvy jílu a písků. Vzhledem k velké mocnosti jílových vrstev mezi povrchem povodí a artésky zvodnělým kolektorem podložních písků je oprávněný předpoklad, že

Tab. 9.1 Základní hydrologické charakteristiky zájmového území

Průměrný roční srážkový úhrn	484 mm	Odtokový součinitel	0,05
Specifický odtok	0,68 l s ⁻¹ km ⁻²	Průměrný průtok Srpiny v ústí	130 l s ⁻¹ / 22 mm



Obr. 9.1 Povodí Srpiny po Slatinický potok



Obr. 9.2 Srpina (vlevo) a Sušanský potok (vpravo) při hydrometrování v létě 2007

neexistuje hydraulická spojitost mezi zónou aerace, případným zvodněním přiléhajícím povrchu povodí a kolektorem, ze kterého byla voda čerpána. Čerpáním podzemní vody tedy s velkou pravděpodobností nebyl plošně ovlivněn hydrologický režim povodí horní Srpiny.

Nejvýznamnějším ovlivněním je zmenšení plochy odvodňované tokem, ke kterému došlo v důsledku technických zásahů v povodí. Nejvíce je dotčeno povodí Srpiny po Hošnický potok (číslo hydrologického pořadí 1-14-01-0260), jehož rozloha se v důsledku těžby zmenšila z 12,31 km² na 10,63 km², rozloha celého zájmového území se z původních 37,54 km² zmenšila na 33,62 km². Zmenšení plochy povodí negativně ovlivňuje průtoky v toku – odhadem podle hydrologické analogie by došlo v nejvíce dotčené části povodí (povodí Srpiny po Hošnický potok) k snížení ročního průměrného průtoku v důsledku odtěžení části povodí z 8,4 l s⁻¹ na 5,5 l s⁻¹ (tj. pokles o 2,9 l s⁻¹), a např. průtok Q₃₃₀ by se zmenšil z 2,59 l s⁻¹ na 1,68 l s⁻¹. Požadavek na realizaci opatření vedoucích k zlepšení průtoku v Srpíně se jeví jako oprávněný. Velikost průtoku, o který je průtok Srpiny ochuzen, je v rozmezí 1 až 3 l s⁻¹.

Možnosti zlepšení hydrologických poměrů

Primárně bylo posuzováno několik variant opatření vedoucích ke zlepšení hydrologických poměrů v povodí Srpiny:

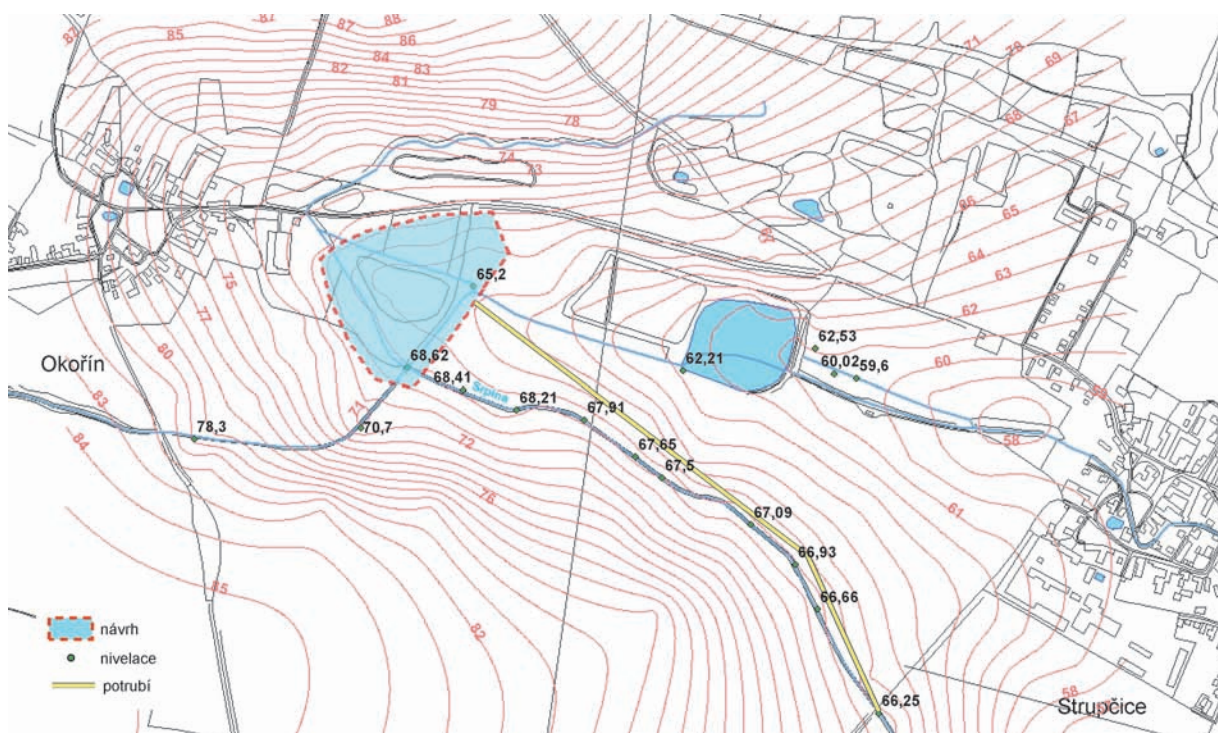
- výstavba nádrže pod Okořínem zajišující dotaci průtoku v přeložce Srpiny i průtoku obcí Strupčice,
- dotace Srpiny vodou z Průmyslového vodovodu Nechanice,
- dotace přeložky Srpiny pomocí obnovy čerpání z vrtu,
- převod vody z Hutního potoka.

Nádrž na Srpíně pod Okořínem

Území v těsné blízkosti východního okraje Okořína se jeví jako potenciálně vhodné pro výstavbu nádrže sloužící k zlepšení průtoku horního toku Srpiny. Na obr. 9.3 je vidět detail uvažovaného území. Na základě mapových podkladů byl odhadnut objem nádrže na 48 tis. m³, zatopená plocha 7,1 ha a plocha povodí nádrže byla 5,25 km².

Jelikož přeložka Srpiny je relativně vysoko v porovnání s údolnicí původního toku, je nutné uvažovat hráz co nejvýše (co nejblíže Okořínu), aby bylo vůbec možné vodu bez čerpání do přeložky dovést. Vzhledem k nepříznivým sklonovým poměrům se jeví jako vhodnější vodu z nádrže do přeložky převádět spíše potrubím než otevřeným korytem, popřípadě vodu odebírat v určité výšce nade dnem. Posunem hráze směrem k Okořínu lze za cenu snížení akumulovaného objemu zvýšit sklon mezi odběrem z nádrže a dnem přeložky, popřípadě zkrátit délku potrubí.

Z výsledků uvedených v předchozí části textu vyplývá, že roční průměrný průtok Srpiny po Hošnický potok je v důsledku činností spojených s těžbou snížen o cca 3 l s⁻¹ a Q₃₅₅ je snížen o necelý 1 l s⁻¹. Počítáme-li, že by průtok Srpiny byl zlepšován v období duben–říjen například o 3 l s⁻¹, musela by mít akumulace objem 55,2 tis. m³, navíc je třeba počítat s výparem z plochy nádrže – odhadem 200–300 mm za vegetační sezonu, tj. zhruba 18 tis. m³, celkem by tedy nádrž měla mít zásobní prostor minimálně cca 73,2 tis. m³. Tento objem by v navrhované nádrži nebyl k dispozici. V případě zlepšování průtoku



Obr. 9.3 Detail nádrže pod Okořínem

v Srpině po dobu sedmi měsíců o 2 l s^{-1} by byla nutná akumulace 36,3 tis. m^3 , při zahrnutí výparu 54,3 tis. m^3 . Pro nalepšování do původního toku za účelem zajištění průtoku obcí Strupčice by byl potřebný další objem, úměrný požadovanému nalepšení.

Jako kritické se jeví i možnosti naplnění zásobního prostoru v době zvýšených průtoků. Spolehlivost hydrologických dat je v daném případě velmi malá, pokoušet se o standardní vodohospodářské řešení nádrže na jejich základě by bylo zcela zbytečné. Můžeme provést jednoduchou úvahu: za předpokladu potřeby nalepšování průtoků cca po dobu sedmi měsíců je nezbytné ve zbývajících pěti měsících objem potřebný pro nalepšování naplnit (předpokládáme sezonní charakter funkce nádrže). Celkový objem ročního odtoku při průměrném průtoku 113,2 tis. m^3 můžeme rozdělit na část odpovídající celoročnímu průtoku 3 l s^{-1} , což je 94,6 tis. m^3 , a zbývajících 18,9 tis. m^3 , které shodou okolností přibližně odpovídají výparu z nádrže. Nalepšení 3 l s^{-1} bychom dosáhli jen za předpokladu, že všechny přebytky průtoku nad touto mezí může zásobní prostor zachytit. Uvedená úvaha se však vztahuje k teoretickému předpokladu roku s průměrným průtokem a je jisté, že v řadě let se vyskytují průtoky významně menší. Velikost průtoku je závislá na velikosti srážek. V suchých letech, např. v roce 1997 a 2003, klesá roční úhrn srážek na úroveň cca 420 mm. Výška odtoku pak musí být podstatně menší než v letech, kdy úhrn srážek je blízký dlouhodobému průměru. Lze tedy oprávněně předpokládat, že zabezpečení nalepšení průtoku na 3 l s^{-1} by byla malá, takže by bylo vhodné raději zajišovat menší průtok s větší zabezpečeností, popřípadě volit jiná řešení.

Využití Průmyslového vodovodu Nechanice

Zájmovým územím prochází Průmyslový vodovod Nechanice (PVN). Nabízí se možnost dotovat Srpinu vodou z něj. Délka potrubí vedoucího vodu z PVN do Srpiny by při vedení po vrstevnici v naznačeném místě nepřekročila 1 000 m, voda by byla přiváděna do přeložky Srpiny nad obcí Malé Březno. Vzhledem

k malé potřebné kapacitě přívodního potrubí (3 l s^{-1}) by náklady na jeho vybudování nebyly vysoké. Tato varianta sama o sobě neřeší zajištění průtoku Strupčicemi. V případě potřeby by bylo možno zajistit průtok v Strupčicích zvětšením kapacity stávajícího rybníka nad Strupčicemi, popřípadě vybudováním nové nádrže nad stávajícím rybníkem. Dalším možným řešením je dotovat Srpinu pod Okořínem a nalepšení dělit mezi původní koryto a přeložku Srpiny. Stejně tak v případě záměru nalepšit průtok Srpiny v katastru obce Hošnice (zejména kvůli ředění odpadních vod) by bylo možné vybudovat nádrž mezi obcemi Hošnice a Všestudy. Tato varianta by navíc byla účinná i v případě změny klimatu (což nemusí vždy platit pro vodní nádrže).

Dotace Srpiny pomocí obnovy čerpání z vrtu

Další možností jak dotovat průtok Srpiny je obnova čerpání vody z vrtů. K březnu 2007 byly funkční tři vrty s tím, že pouze jeden je zaústěn do odvodňovacího koryta, ostatní vrty je ještě třeba přečerpávat do koryta. Vzhledem ke stáří vrtů by bylo pravděpodobně nutné vrty modernizovat a přestrojít, což by si žádalo nemalé investice (odhadem cca 700 tis. Kč). Rovněž provoz vrtu je finančně náročný (při čerpání 5 l s^{-1} minimálně 100 tis. Kč za rok) a z hlediska provozu nebezpečný (havárie vrtu, poruchy na přívodu elektrické energie, krádeže).

Posouzení převodů z Hutního potoka

Posuzovány byly dvě varianty přívodu vody: s odběrem z Hutního potoka pod VD Zaječice (varianta 1), nebo s odběrem z Hutního potoka nad VD Zaječice (varianta 2). Předpokládaný odběr 5 až 10 l s^{-1} (i odběr cca 3 l s^{-1} doporučený podle hydrologického rozboru) překračují Q_{355} v místě odběru, průtok od místa odběru po nádrž Zaječice by přitom neměl vlivem odběru zanikat. Hydrologický režim přirozeného odtoku z povodí Hutního potoka je očividně obdobný a synchronní s režimem na horní Srpíně. Nelze tedy předpokládat, že v období hydrologického sucha bude v povodí Hutního potoka k dispozici nějaká voda pro dotaci průtoku v Srpíně kromě té, která je do povodí Hutního potoka přiváděna z Podkrušnohorského přivaděče. Průtok v přivaděči je však – zejména v období hydrologického sucha – zásobován především čerpáním vody z Ohře. Při zachování ostatních požadavků na užívání vody z Podkrušnohorského přivaděče by bylo nezbytné o množství vody, která by byla odebrána z Hutního potoka, zvětšit množství vody čerpané do Podkrušnohorského přivaděče. Obě varianty převodu vody z Hutního potoka tedy nevyžadují jen investiční, ale v konečných důsledcích i provozní náklady na čerpání vody. Při provozování převodu vody z Hutního potoka by bylo také třeba počítat s tím, že Podkrušnohorský přivaděč je v letních měsících občas mimo provoz – je nutné opravovat betonové konstrukce. Pravděpodobnost časové shody období hydrologického sucha s obdobím oprav je velká, opravy se provádějí právě v období malých průtoků, kdy lze snadněji řešit provizorní převody vody přítoků do přivaděče.

V souhrnu lze konstatovat, že řešení pomocí nádrže pod obcí Okořín by z hydrologického hlediska zřejmě neposkytlo dostatečnou zabezpečení v extrémně suchých letech a bylo by tak nezbytné je kombinovat s čerpáním podzemní vody. Nejistota hydrologických dat je v tomto případě tak velká, že by bylo nezodpovědné připravovat realizaci nádrže bez ověření hydrologických dat přímým pozorováním. Další potenciální prostor pro vybudování nádrže je mezi obcemi Hošnice a Vrskaň. Nicméně z hydrologického hlediska jsou zde poměry ještě nepříznivější než u nádrže pod obcí Okořín, lokalita proto nebyla podrobně posuzována.

Pro porovnání variant technických řešení nalepšení průtoků v horní Srpíně byly uváženy odhady investičních a provozních nákladů a informace o nejistotách odhadu efektivity opatření a rizika provozu opatření. Podstatné je, že všechny varianty kromě nalepšování ze zásobní nádrže, včetně převodu

z Hutního potoka, vyžadují čerpání vody na výšku cca 100 m. Základní složka provozních nákladů – spotřeby elektrické energie je pak rovnocenná. Investiční náklady varianty převodu z Hutního potoka jsou řádově větší než u varianty odběru z Průmyslového vodovodu Nechanice. Z tohoto hlediska, z hlediska vysoké spolehlivosti a také vzhledem k tomu, že tato varianta nevyžaduje žádné provozní zabezpečení, bylo jako základní řešení doporučeno využít nalepšení průtoků Srpiny odběrem 3 l s^{-1} z Průmyslového vodovodu Nechanice s převodem tlakovým potrubím do přeložky Srpiny nad obcí Malé Březno, popřípadě pod obec Okořín, a rozdělení dotace mezi původní koryto a přeložku Srpiny.

Ze zmíněných variant byla nakonec k realizaci zvolena varianta převodu vody z PVN pod Okořín (5 l s^{-1}) a následná dotace do přeložky Srpiny (3 l s^{-1}) a jejího původního koryta (2 l s^{-1}).

Uvedená studie byla provedena na základě objednávky Povodí Ohře, s.p. Informace byly čerpány a podrobnosti lze nalézt v závěrečné zprávě projektu (Hanel et al., 2007).

10 Studie potřeb vody pro povodí Blšanky a Liboce

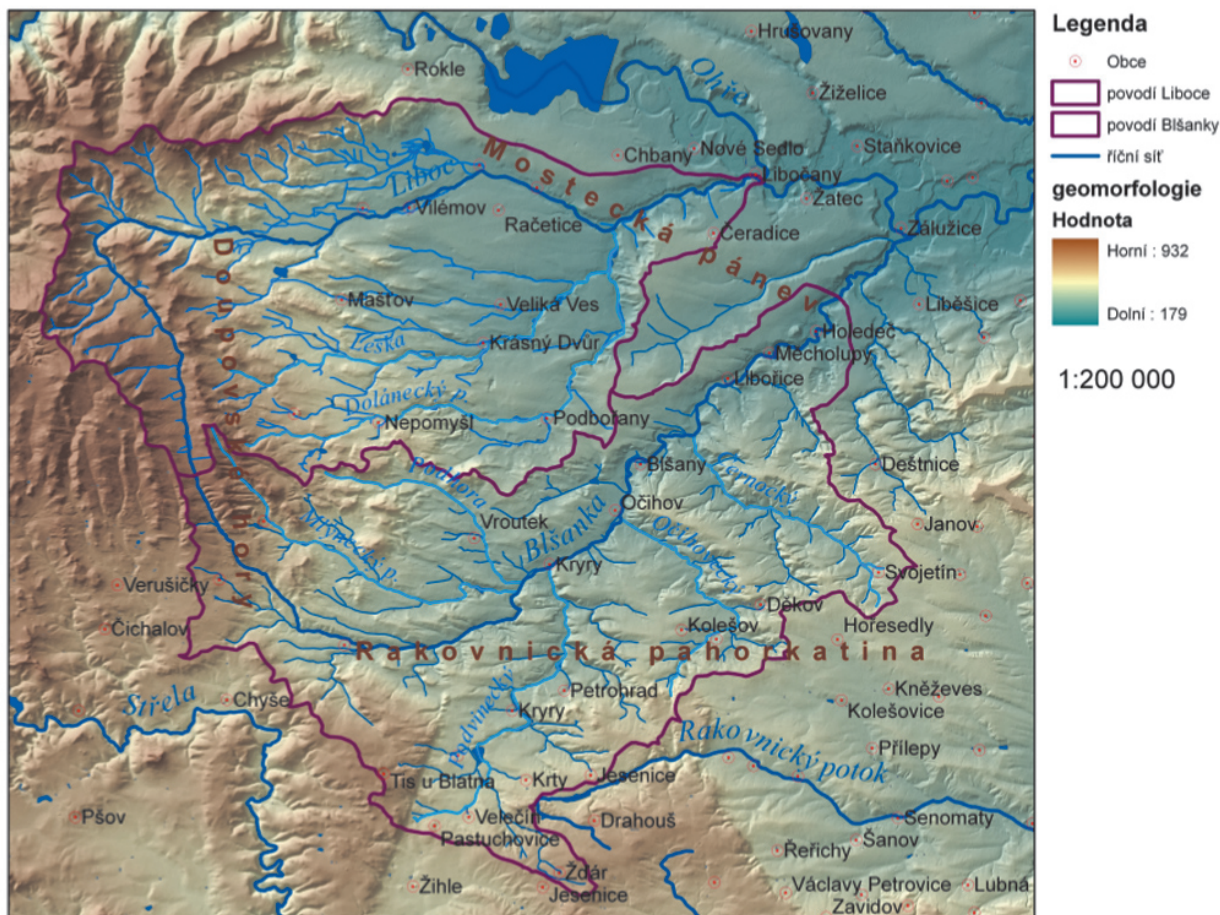
Říčky Blšanka a Liboc (obr. 10.1) pramení v jihovýchodním cípu Doupovských hor v nadmořské výšce 685 m n. m. Prameny jsou od sebe vzdáleny pouhých několik set metrů. Blšanka ústí do Ohře u Zálužic, kde nadmořská výška činí 189 m n. m, Liboc ústí do Ohře v Libočanech v nadmořské výšce 204 m n. m. Jejich ústí jsou od sebe vzdálena pouhých 10,5 km měřeno podél toku Ohře. Celková délka toku Blšanky činí 49,1 km s plochou povodí 482,5 km². Celková délka Liboce dosahuje 44,4 km, odvodňuje plochu 339,3 km² o průměrné nadmořské výšce 428 m n. m.

Z geomorfologického hlediska se zájmové území dělí na dvě oblasti. Povodí Liboce patří do Podkrušnohorské oblasti, převážná většina povodí Blšanky náleží geomorfologické oblasti Plzeňská pahorkatina. Území je rozčleněno na tři geomorfologické celky, nejvýše položené Doupovské hory s vrchy Pilíř (756 m n. m.), Prokopy (749 m n. m.), Jedliny (702 m n. m.), Mosteckou pánev a Rakovnickou pahorkatinu. Celá horní polovina povodí Liboce spadá do Doupovských hor, odkud je odtok odváděn směrem na východ. Dolní část povodí Liboce je svým charakterem již nížinná a spadá do Mostecké pánve. Pravostranné přítoky Blšanky odvodňují mírné svahy Rakovnické pahorkatiny. Niva Blšanky pak pokračuje severovýchodním směrem do Mostecké pánve.

Hydrologická studie potřeb vody na povodích Blšanky a Liboce byla zpracována pro potřeby správce vodních toků, státního podniku Povodí Ohře. Hlavním problémem, jenž danou oblast dlouhodobě sužuje, je nedostatek povrchové vody a následné zhoršení kvality vody především v letních měsících.

Náchylnost povodí k výskytu hydrologického sucha je dána především množstvím srážek, které na povodí průměrně spadnou. Je známo, že srážkový úhrn úzce souvisí s geomorfologií oblasti, kdy množství srážek roste s nadmořskou výškou. S vyšší nadmořskou výškou se více projevuje i vliv návětrných stran a srážkových stínů. Právě oblast Žatecka je velmi významně ovlivněna srážkovým stínem Krušných hor. Hřebeny s nadmořskou výškou přes 1 000 m n. m. (Klínovec 1 244 m n. m, Černá Skála 1 129 m n. m, Božídarský Špičák 1 115 m n.m.) zachytí srážky přicházející ze severozápadu, celé Podkrušnohoří je tak ochuzeno o významný podíl srážek.

Žatecko, kam povodí Blšanky a Liboce spadá, patří se svými 450 mm srážek ročně k nejsušším oblastem České republiky. Hřebeny Krušných hor zachytí velký podíl vláhy přicházející ze západu a zároveň relativně vysoké průměrné teploty vzduchu umožňují vysoké ztráty výparem. V letních měsících se tak stává, že dochází k významnému poklesu hladiny vody v tocích nebo dokonce k jejich úplnému vyschnutí. Za takové situace neplní vodní tok svou ekologickou funkci, nemůže docházet k obecnému ani k povolenému nakládání s povrchovými vodami. Není k dispozici dostatečné množství vody na ředění vod vypouštěných z čistíren odpadních vod a dalších provozů. Dochází tak k výraznému zhoršení



Obr. 10.1 Povodí Blšanky a Liboče

kvality zbývající vody v toku. Vážné problémy s nedostatkem vody v tocích a se suchem obecně se vyskytly v letech 2003, 2004 i v roce 2008.

V případě nedostatečného průtoku vydává vodoprávní úřad na žádost správce toku zákaz odběru povrchové vody z toků. Opakované zákazy odběrů povrchové vody komplikují především hospodaření na zemědělských plochách, které právě v období s nízkými srážkami vyžadují doplňkovou závlahu. V oblasti Zatecka se jedná především o chmelnice a v menším rozsahu ovocné sady a zeleninu. Současnou nevyhovující situaci je třeba řešit i z důvodu očekávaných negativních dopadů klimatické změny.

Otázka potřeby vody pro povodí Blšanky a Liboče byla řešena vzhledem k problému s nedostatkem povrchové vody v tocích Blšanka a Liboče v letních měsících. Cílem práce bylo stanovit, kdy a s jakou pravděpodobností se bude vyskytovat sucho, kolik vody je potřeba pro řešení vzniklého deficitu a jaká opatření je možné realizovat. Návrhy opatření musí vycházet ze znalosti geomorfologie, hydrogeologie a pedologie povodí. Dalšími nezbytnými podklady jsou informace o hydrologických poměrech a užívání vody na povodí. Hydrologické poměry na ploše povodí byly řešeny pro současný stav (období 1991–2006), dále pro stav s výhledem do budoucnosti (2070–2100) a byly porovnávány s poměry v letech 1969–1990. Výsledky modelování dopadů klimatické změny na výskyt hydrologického

sucha jsou zatížena nejistotou, která je dána jednak nejistotou ve vstupních datech a dále nejistotou v budoucím vývoji koncentrací skleníkových plynů v atmosféře. Tato nejistota je vyjádřena ve čtyřech různých variantách scénářů klimatické změny*. Z výsledků modelování vyplývá, že současné hydrologické poměry jsou již do jisté míry ovlivněny dopady klimatické změny. Tyto dopady se projevují nárůstem teploty vzduchu o 0,7 °C a především výrazným snížením odtokové výšky, která na Blšance poklesla o 35 % ve srovnání s obdobím 1969–1990. Scénáře klimatické změny se vyznačují výrazným rozptylem v predikci změny teploty vzduchu s výhledem k roku 2085. Zvýšení teploty vzduchu se podle scénářů pohybuje v rozmezí 2,5–5,1 °C vzhledem k období 1969–1990. V odhadech odtoku je variabilita výsledků ještě výraznější. Všechny scénáře však shodně predikují pokles odtoků. Pro podmínky podle nejmírnějšího scénáře vychází ztráta odtokové výšky 19 %, podle podmínek pesimistického scénáře dochází k poklesu až o 55 %. Výsledky souvisí se změnou ročního chodu srážek, kdy podle scénářů klimatické změny v zimních měsících srážky narůstají a naopak v letních měsících ubývají. Rovněž dochází ke zvětšení územního výparu vlivem vyšších teplot vzduchu.

Odpověď na otázku, kdy lze očekávat nejvyšší pravděpodobnost výskytu hydrologického sucha, byla řešena pomocí metody pravděpodobnostních polí. Vodnost Blšanky v jednotlivých měsících byla analyzována jednak pro současná data a dále pro odtokové řady ovlivněné klimatickou změnou. V první variantě byl požadavek na vodu stanoven na úrovni minimálního zůstatkového průtoku. Pro budoucnost bylo uvažováno zvýšení nároků o potřeby vody pro závlahu. Nejvyšší pravděpodobnost nedostatku vody během roku je v srpnovém období. Na základě dat za období 1991–2006 se pravděpodobnost překročení (zabezpečení) minimálního zůstatkového průtoku v srpnu pohybuje v rozmezí 80–90 %. Výsledky získané na základě odtokových řad ovlivněných klimatickou změnou vykazují zabezpečení minimálního zůstatkového průtoku v srpnu s pravděpodobností 60–90 %. Pokud by došlo k navýšení potřeb vody pro závlahu, odtoky během srpna s výhledem do budoucna by podle optimistického scénáře splnily dané požadavky s pravděpodobností 60–70 %, podle pesimistického scénáře s pravděpodobností pouze 30–40 %.

Objem vody, jenž by byl potřeba pro uspokojení požadavků na vodu, byl řešen pomocí metody nedostatkových objemů. Maximální deficit, který byl spočten pro Blšanku z řad pozorovaných průtoků, činí 0,51 mil. m³ a 0,38 mil. m³ pro Liboc. Pro průtoky ovlivněné scénáři klimatické změny se maximální hodnoty dosažených nedostatkových objemů pohybují od 0,87 do 1,93 mil. m³ při požadavku zachování minimálního zůstatkového průtoku. Ze statistické analýzy pravděpodobnosti překročení nedostatkových objemů vyplývá, že podle scénáře RCO B2 by zásobní objem 1,45 mil. m³ pomohl zabezpečit minimální zůstatkový průtok s pravděpodobností 95 %. Podle scénáře HIRHAM A2 by potřebný zásobní objem činil 2,47 mil. m³. Pokud by došlo ke zvýšení požadavků na průtok pro potřeby závlahy, pak by se hodnota potřebného zásobního objemu pohybovala v rozmezí 3,26 mil. m³ až 5,75 mil. m³ při zabezpečení 95 %.

* Použity byly scénáře vycházející z projektu PRUDENCE (Christensen a Christensen, 2007), viz kapitulu 4.2 a obr. 4.5.

Byla posuzována řada možných opatření vedoucích ke zlepšení hydrologických poměrů povodí Blšanky a Liboce. Zejména šlo o:

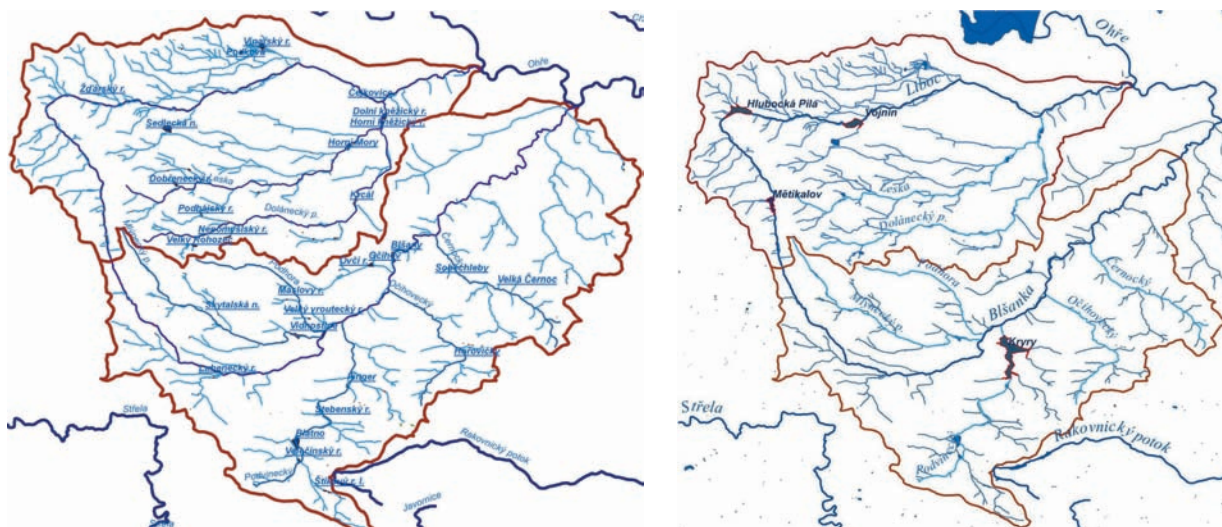
- akumulaci vody v nádržích (využití stávajících, popřípadě budování nových nádrží),
- revitalizaci zemědělské krajiny,
- možnosti posílení přirozené akumulace podzemních vod,
- převod vody z povodí Ohře.

Otázka akumulace vody byla v zájmové oblasti řešena už v minulosti, kdy bylo navrženo a realizováno několik nádrží s účelem akumulace vody pro závlahu. Podle informací Zemědělské vodohospodářské správy v Žatci a v Chomutově, které spravovaly přítoky Blšanky, respektive Liboce, současná opatření v období nedostatečných průtoků zahrnují nalepšování z vybraných závlahových nádrží. Pokud nevyhovující stav přetrvává, je ve spolupráci s obecními úřady vydán zákaz nakládání s povrchovými vodami, tedy především zákaz zalévání a zákaz odběrů pro zavlažování. Z podaných informací rovněž vyplývá, že větší míra nalepšování ze závlahových nádrží není možná, protože tyto nádrže jsou v současné době pronajaty a využívány pro chov ryb. Další důvod, jenž by mohl komplikovat využívání nádrží pro nalepšování toků, je technický stav uzávěrů spodních výpustí, který neumožňuje jednoduše regulovat množství odtékající vody.

Porovnáme-li celkový součet zásobních objemů pro celé povodí Liboce (0,74 mil. m³) a Blšanky (1,94 mil. m³) s hodnotami maximálních nedostatkových objemů (0,51 mil. m³ na Blšance a 0,38 mil. m³ na Liboci), bylo by teoreticky možné pokrýt tyto nedostatkové objemy ze zásobních objemů současných nádrží. Jako jedno z možných opatření při řešení problému s nedostatkem povrchové vody lze uvést obnovení vodohospodářské funkce závlahových nádrží, omezení chovu ryb a úpravu uzávěrů spodních výpustí, která by umožnila nejlépe automatické ovládání průtoku ve spodní výpusti. Stávající zásobní objem, který je na povodích k dispozici, však nebude dostatečný s výhledem do budoucnosti. Z výsledků analýzy nedostatkových objemů pro odtokové řady Blšanky ovlivněné scénáři klimatické změny vyplývá potřeba zásobního objemu 1,45 mil. m³ podle nejmírnějšího scénáře a až 2,47 mil. m³ podle nejpesimističtějšího scénáře. Pokud bychom chtěli zajistit dostatek vody i pro potřeby zavlažování s výhledem do budoucnosti, hodnota potřebného zásobního objemu by se měla pohybovat v rozpětí 3,3–5,75 mil. m³. Tak velkou zásobu vody by bylo možné zajistit pomocí nových nádrží nebo převodem vody z povodí Ohře.

Při úvahách o tom, kde by bylo vhodné zřídit nové zásobní nádrže, které by byly schopné v případech hydrologického sucha sloužit jako vodní zdroje, byly nejprve posouzeny relevantní potenciální nádrže uvedené v seznamu hájených lokalit ze Směrného vodohospodářského plánu, tj. lokality Mětikalov, Vojnín a Hlubocká Pila na Liboci a Kryry na Blšance (obr. 10.2). V současném seznamu lokalit vhodných pro akumulaci povrchových vod (viz kapitolu 11) jsou zahrnuty všechny lokality, kromě lokality Vojnín.

Z výsledků vodohospodářských řešení nádrží lze usuzovat, že průtokový režim toku Liboc lze spolehlivě nalepšovat jak z nádrže Hlubocká Pila, tak z nádrže Vojnín. Vzhledem k záboru zemědělské půdy se jeví jako vhodnější nádrž Hlubocká Pila. Profil Hlubocká Pila je vhodný rovněž z hlediska kvality vody, protože v oblasti nad plánovanou zátopou se nevyskytují žádné významné znečišovatelé. Nově vybudovaná nádrž by mohla v budoucnu rovněž sloužit jako vodárenský zdroj a bylo by možné do jisté míry nahradit zdroj pitné vody z vodárny v Holedeči. Tímto opatřením by se nastartoval proces



Obr. 10.2 Stávající nádrže (vlevo) a územně hájené lokality (vpravo) v zájmovém povodí

postupné obnovy zásob vody v podzemní zvodni v oblasti současného jímání. Nalepšování do toku Liboče však nezvětší průtoky v obou větších tocích v povodí Liboče, tj. v potoce Leska a v Doláneckém potoce. Posílení vodnosti Blšanky by rovněž muselo být řešeno převodem. Převod vody z Liboče do povodí potoku Leska je možný například do oblasti nad Krásným Dvorem (cca 10 km), do povodí Doláneckého potoka do okolí obce Buškovice je však vzdálenost ještě větší (cca 14 km). Převod vody až do povodí Blšanky přes povodí Valovského potoka, který ústí do Blšanky pod Očihovem, by byl dlouhý přibližně 19 km a nalepšil by průtoky jen v dolním úseku od Blšan po ústí do Ohře. Uvedené vzdálenosti byly odhadnuty velmi přibližně, pro předpoklad trasování přivaděče bez požadavků na čerpání vody.

Průtoky horní Blšanky by bylo možné nalepšovat převodem vody z nádrže Mětkalov. Vzdálenost od hráze k pramenu Blšanky je přibližně 5,7 km. Nadmořská výška profilu hráze je cca 638 m n. m., nadmořská výška počátku toku Blšanky je cca 680 m n. m., výška sedla mezi pramennými oblastmi obou toků je cca 685 m n. m. Vodu do povodí Blšanky by tedy bylo nutno čerpat s výškovým rozdílem přibližně 45 m. Vzhledem k poměrně malé ploše povodí nádrže Mětkalov je její nalepšovací účinek v absolutních hodnotách poměrně malý. Nádrž nad Kryry na Podvineckém potoce se jeví jako vhodná pro nalepšení průtoků Blšanky od obce Kryry až po ústí do Ohře.

Samotné doporučení opatření k realizaci se opírá o obnovení funkce současných nádrží v povodí tak, aby sloužily jak pro závlahy, tak pro nalepšování průtoků na úroveň minimálních ekologických průtoků v obdobích hydrologického sucha. Prakticky to znamená, že nádrže by v některých letech byly vypouštěny již v letních měsících, nikoliv až před výlovem ryb, což je současná praxe. Pro efektivní využití zásobní funkce nádrží bude třeba zajistit jejich řízení jako soustavy, ve spolupráci jejich provozovatelů a významných odběratelů. Zároveň bude nezbytné důsledně kontrolovat dodržování zákazu užívání vod, pokud byl vodoprávním orgánem vyhlášen, a věnovat zvýšenou pozornost dodržování pravidel evidence odběrů vody. V případě extrémně suchých let a zejména pokud bude pokračovat oteplování, nebude kapacita stávajících nádrží postačovat a zřízení dalších vodních nádrží s dominantní zásobní funkcí bude pravděpodobně nezbytné. V povodí toku Liboče se jeví jako nejvhodnější poměrně velká nádrž Hlubocká Pila, v povodí Blšanky doporučujeme zabývat se možností výstavby dvou menších nádrží – na Podvineckém potoce nad Kryry a na Blšance nad soutokem s Mlýneckým potozem. Uvedená

základní opatření je vhodné doplnit o úpravy v povodí, směřující ke zmenšení eroze a posílení infiltrace, jež však mohou přispět i ke zlepšení kvality vody a redukci zanášení nádrží.

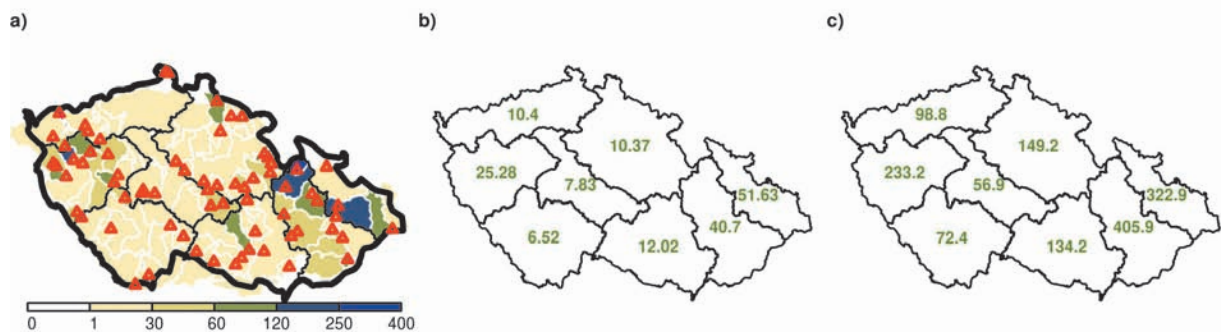
Uvedená studie byla provedena na základě objednávky Povodí Ohře, s.p. Informace byly čerpány a podrobnosti lze nalézt v závěrečné zprávě projektu (Kašpárek a Mrkvičková, 2008).

11 Kompenzace růstu deficitních objemů využitím lokalit vhodných pro akumulaci povrchových vod

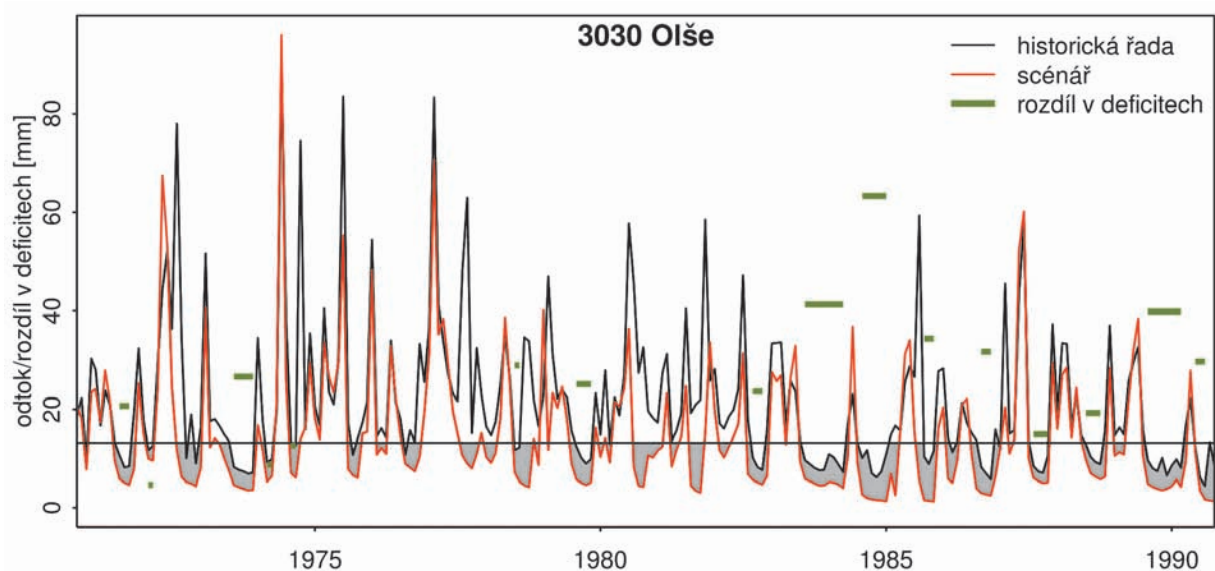
Tato studie se zabývala posouzením možnosti kompenzace nedostatkových objemů v budoucích deficitních obdobích využitím lokalit vhodných pro akumulaci povrchových vod (dále jen LAPV). Generel těchto lokalit (jehož pořízení je dáno zákonem) vychází ze seznamu výhledových vodních nádrží ze Směrného vodohospodářského plánu ČSR, jenž byl naposledy aktualizován roku 1988. Tato aktualizace uvažovala 210 územně hájených lokalit. V letech 2005–2007 byl zpracován Plán hlavních povodí České republiky, jehož součástí byl i seznam LAPV redukovaný na 186 územně hájených lokalit. Tento seznam se nicméně kvůli odporu veřejnosti nepodařilo odsouhlasit. Proto byl ve schváleném Plánu hlavních povodí České republiky přijat v závazné části úkol navrhnout legislativní postup v rámci vodního zákona k provedení výběru lokalit a při tomto výběru přihlídnout k environmentálním a socio-ekonomickým důsledkům územní ochrany, uskutečnit projednání s dotčenými kraji a obcemi a stanovit hlavní zásady využití těchto území (MZe a MŽP, 2011). V současné době byl Ministerstvem zemědělství a Ministerstvem životního prostředí schválen Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod (dále jen Generel; MZe a MŽP, 2011), v němž je uvažováno 65 lokalit. V předkládané studii je nicméně uvažován seznam 69 lokalit, jenž pochází z návrhu Generelu z roku 2010 (MZe a MŽP, 2010), který byl v době zpracování studie k dispozici. Vzhledem k tomu, že rozdíly v jednotlivých seznamech jsou obecně zanedbatelné, mohou být výsledky vztaženy i k aktuální schválené verzi Generelu.

Možnost využití LAPV pro zmírnění důsledků změny klimatu (zejména zajištění dostatku vodních zdrojů a zlepšení hydrologického režimu v krajině) v případě uskutečnění pesimističtějších scénářů změny klimatu je zřejmá a je zmíněna i v samotném generelu: „Generel LAPV stanoví soubor jedinečných lokalit, jejichž plochy jsou morfologicky, geologicky a hydrologicky vhodné pro akumulaci povrchových vod jako jednoho z adaptačních opatření pro případné řešení dopadů klimatické změny, především pro snížení nepříznivých účinků povodní a sucha, v dlouhodobém horizontu (v příštích padesáti až sto letech)” (MZe a MŽP, 2011). Nicméně množství vody, jež by případné nádrže na jednotlivých lokalitách za předpokladu pokračující klimatické změny byly schopné poskytnout, je nejisté a závisí (kromě geomorfologických charakteristik) zejména na míře oteplování a na budoucím plošném rozložení srážek.

Případné využití hájených lokalit k realizaci vodních nádrží by mělo nastoupit až tehdy, kdy budou vyčerpány možnosti ostatních opatření k zajištění vodohospodářských služeb a kdy dopady klimatické změny nebudou řešitelné jinými prostředky pro jejich neproveditelnost nebo pro jejich neúměrné



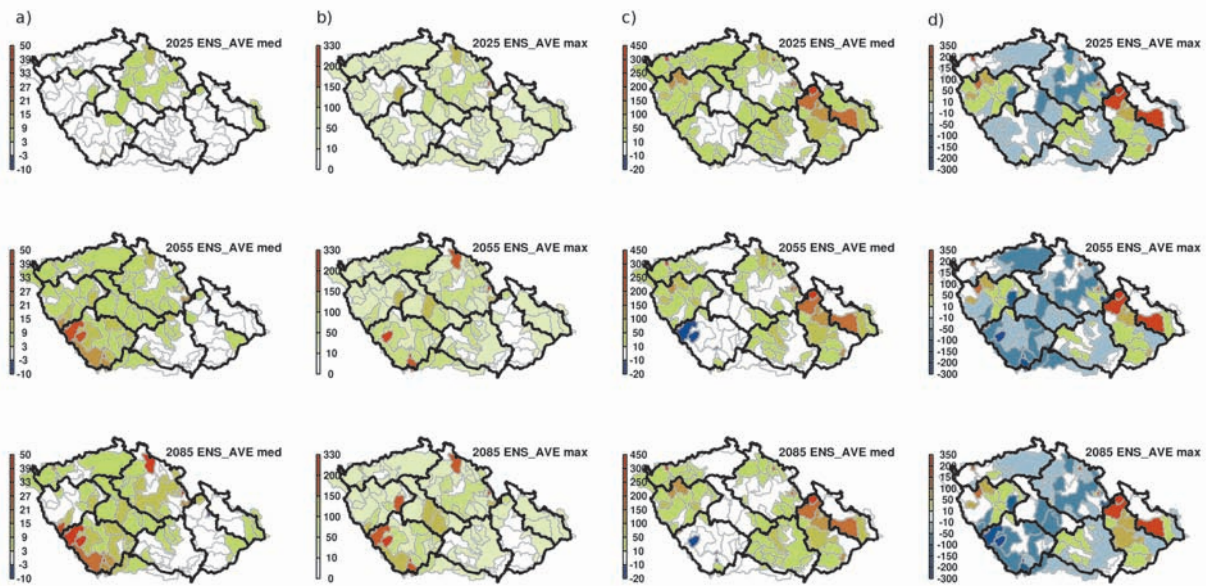
Obr. 11.1 (a) Lokality vhodné pro akumulaci povrchových vod (červeně) a potenciální objemy vody dostupné v případných nádržích v jednotlivých povodích, (b) potenciální objemy v mm na plochy oblastí povodí, (c) stejně jako (b) ale v mil. m³



Obr. 11.2 Příklad odvození rozdílů mezi deficity v pozorované a projektované řadě (šedé polygony) pro povodí Olše

náklady. S touto vizí by měly být Generelem LAPV vymezené lokality přejímány do všech stupňů územně plánovacích dokumentací, tj. přijímány jako územní rezervy se stanoveným kritériem pro převod do návrhu pouze v případě, kdy byla prokázána příslušnými studiemi potřeba tohoto kroku k řešení dopadů klimatické změny (MZe a MŽP, 2011).

V roce 2005 byl ve VÚV TGM proveden odhad objemu nádrží potřebný pro kompenzaci poklesu odtoku vlivem klimatické změny (Peláková a Boersema, 2005). Součástí tohoto vyhodnocení bylo i rámcové porovnání těchto odhadů s potenciálními objemy 210 nádrží na LAPV. Bylo konstatováno, že pro alespoň částečnou kompenzaci nedostatkových objemů by bylo nutno využít všechny lokality. Následující analýza vychází ze stejné metodiky, nicméně uvažuje aktuálně projednávaný seznam LAPV a nejnovější scénáře změny klimatu.

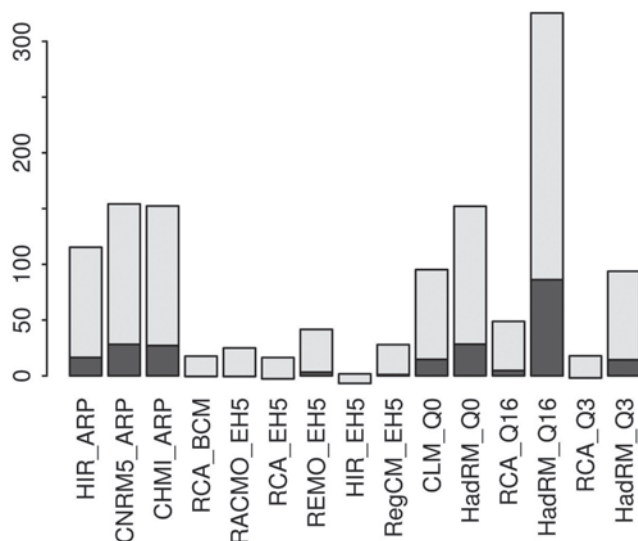


Obr. 11.3 Rozdíly (a) Δ_{MEDDEF} a (b) Δ_{MAXDEF} [mm] na modelovaných povodích podle průměru všech modelů pro časové horizonty 2025, 2055 a 2085 a rozdíly mezi dostupnou vodou v uvažovaných nádržích a vodou nutnou ke kompenzaci (c) Δ_{MEDDEF} a (d) Δ_{MAXDEF} podle průměru celého souboru klimatických modelů

Cílem studie je posouzení možnosti kompenzovat zvýšení deficitů průtoku v důsledku změny klimatu v suchých obdobích pomocí nádrží vybudovaných na LAPV. Pro hydrologické modelování bylo použito 100 povodí, na jejichž území by se projevil efekt těchto nádrží. Obrázek 11.1 znázorňuje vybraná povodí a dostupné objemy nádrží v jednotlivých oblastech povodí. Pro zvolená povodí byla pomocí modelu Bilan (box 4.2) modelována hydrologická bilance pro pozorované období. Na většině povodí byly k dispozici měsíční časové řady o délce minimálně 27 let, výjimkou je povodí Odry a některé profily povodí Moravy pouze s dvaceti lety pozorování.

Podobně jako Peláková a Boersema (2005) definujeme deficitní objem na základě poklesu průtoku pod 70% kvantil z čáry překročení měsíčních průtoků (Q_{70}). Deficity byly nejprve pro každé povodí vyčísleny v simulovaných řadách pro současné období. Následně byly vyhodnoceny deficity ve scénářových řadách, které byly získány pomocí přírůstkové metody pro období 2025, 2055 a 2085 na základě 15 RCM simulací (tab. 4.2). Deficity podle scénářové a historické řady byly poté odečteny a byl určen medián a maximum těchto rozdílů. Podstatu metody ilustruje obr. 11.2. Tento postup není náhradou vodohospodářského řešení jednotlivých nádrží. Nezkoumá se, v jak dlouhém období by bylo před nástupem kritického období hydrologického sucha nutno vodu akumulovat. Mezní průtok byl zvolen jako kvantil průměrných měsíčních průtoků s pravděpodobností překročení 70 %, takže lze oprávněně předpokládat, že pokud dopad klimatické změny nebude zcela katastrofální, bude reálné v sezoně nebo několikaletém období před začátkem kritického hydrologického sucha vodu potřebnou ke kompenzaci průtoků v nádržích akumulovat a při průtokové depresi nalepšit průtoky. Nejedná se o vyrovnání průtoků na Q_{70} , ale o zvětšení průtoků v období poklesu pod tuto mez na průběh odpovídající stavu před klimatickou změnou (Peláková a Boersema, 2005).

Ve dříve provedené studii (Peláková a Boersema, 2005) byla pozornost věnována možnosti kompenzace maximálního možného rozdílu v deficitech mezi pozorovaným a klimatickou změnou ovlivněným



Obr. 11.4 Rozdíly v průměrných Δ_{MEDDEF} a Δ_{MAXDEF} [mm] pro jednotlivé regionální klimatické modely

klimatem (dále jen Δ_{MAXDEF}). V předložené analýze navíc přinášíme porovnání i pro medián těchto rozdílů (dále Δ_{MEDDEF}). Možný obecnější postup analýzy změn deficitních objemů uvažující celé statistické rozdělení naznačuje box 11.1. Obrázek 11.3a–b zobrazuje Δ_{MEDDEF} a Δ_{MAXDEF} na modelovaných povodích podle průměru všech modelů pro časové horizonty 2025, 2055 a 2085. Na všech modelovaných povodích, pro všechny časové horizonty je scénářový mediánový a maximální deficit větší než deficit pozorovaný. Hodnoty pro horizonty 2055 a 2085 se příliš neliší, největší rozdíly v deficitech lze pozorovat na povodí Vltavy, Labe, Berounky a Ohře, naopak v povodí Moravy, Dyje a Odry jsou tyto rozdíly méně významné. Nicméně odhady jsou zatíženy značnou nejistotou, což je demonstrováno na obr. 11.4 udávajícím průměr Δ_{MEDDEF} a Δ_{MAXDEF} pro Českou republiku podle jednotlivých simulací pro časový horizont 2085. Pro některé simulace je mediánový deficit v budoucím období menší než v pozorovaném (např. HIR_EH5, RCA_Q3), nicméně pro valnou většinu simulací jsou deficity větší v budoucím období. Rozpětí Δ_{MEDDEF} v celém souboru je větší než 90 mm. V případě Δ_{MAXDEF} jsou rozdíly ještě podstatně výraznější (obr. 11.4).

Obrázek 11.3c–d ukazuje rozdíly mezi dostupnou vodou v uvažovaných nádržích a vodou nutnou ke kompenzaci Δ_{MEDDEF} a Δ_{MAXDEF} podle průměru celého souboru klimatických modelů. Až na výjimky

Tab. 11.1 Vyhodnocení možnosti kompenzace Δ_{MEDDEF} podle průměru souboru klimatických modelů [mil. m³]; zvýrazněny jsou oblasti povodí a časové horizonty s negativní bilancí

	Dostupný objem	2025		2055		2085	
		Δ_{MEDDEF}	bilance	Δ_{MEDDEF}	bilance	Δ_{MEDDEF}	bilance
Horní a střední Labe	149,20	41,84	107,34	133,19	16,01	144,70	4,50
Horní Vltava	72,40	45,09	27,31	209,22	-136,82	302,50	-230,10
Berounka	233,20	12,73	220,47	68,72	164,48	76,47	156,73
Dolní Vltava	56,90	18,60	38,30	74,26	-17,36	94,83	-37,93
Ohře a dolní Labe	98,80	29,55	69,25	118,29	-19,49	171,59	-72,79
Odra	322,90	9,94	312,96	34,90	288,00	57,79	265,11
Morava	405,90	9,07	396,83	48,66	357,24	45,57	360,33
Dyje	134,20	24,78	109,42	66,96	67,24	67,75	66,45

BOX 11.1 ZMĚNY DEFICITNÍCH OBJEMŮ

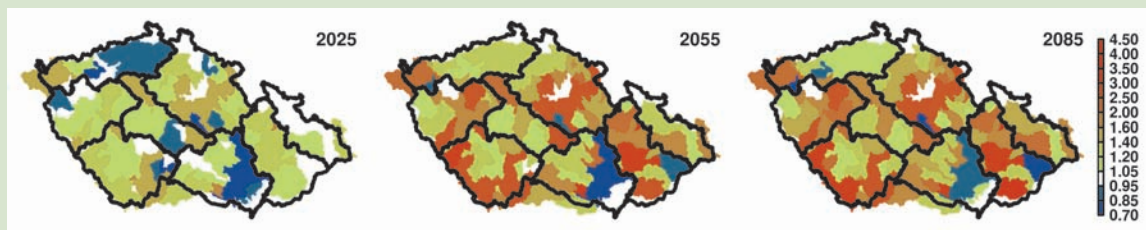
Kromě absolutních změn mediánových a maximálních deficitních objemů je možné hledat také vztahy popisující změny všech deficitních objemů. Za tímto účelem byla provedena jednoduchá regresní analýza změn deficitních objemů identifikovaných v pozorovaných a scénářových datech, tj. byl hledán regresní koeficient a z rovnice $DEF_{SCE} = a \cdot DEF_{HIST}$, kde DEF_{HIST} jsou pozorované a DEF_{SCE} simulované deficitní objemy, pro jednotlivá povodí a jednotlivé simulace regionálních klimatických modelů.

Tento jednoduchý lineární model poměrně dobře vystihuje vztahy předpokládaných budoucích deficitních objemů k deficitním objemům pozorovaným (koeficient determinace se pro 90 % odhadovaných regresních vztahů pohybuje v rozmezí 0,71–0,999 a koeficient a je statisticky významný na hladině významnosti 0,05 pro všechny regresní vztahy). Průměrné a mediánové změny deficitů vyjádřené koeficientem a pro jednotlivé časové horizonty spolu s mezikvartilovým rozpětím ze souboru modelů udává následující tabulka.

Kvantil	2025	2055	2085
25%	0,93	0,95	0,92
50%	1,07	1,40	1,17
75%	1,35	2,26	2,37
průměr	1,16	1,71	1,76

Pro všechny časové horizonty existují simulace regionálních klimatických modelů vykazující pokles deficitních objemů. Nicméně průměr i medián souboru klimatických modelů indikují jejich růst, v období 2025 do 20 %, pro vzdálenější období 20–40 % v případě mediánu a více než 70 % pro průměry.

Prostorové rozložení regresního koeficientu a je udáno na obrázku. Pro většinu povodí jsou hodnoty větší než 1, tzn. odhadované deficity jsou větší než pozorované. Nicméně izolovaně se vyskytují i povodí, pro která dochází k poklesu odhadovaných deficitů, zejména pro časový horizont 2025. Prostorové rozložení regresního koeficientu zhruba odpovídá rozložení změn mediánových a maximálních deficitů (obr. 11.3).



(v povodí horní Vltavy) lze konstatovat, že uvažované nádrže poskytují dostatečnou kapacitu pro pokrytí Δ_{MEDDEF} . Na druhou stranu uvažovaná kapacita je kromě povodí Odry a Moravy nedostatečná k pokrytí projektovaného Δ_{MAXDEF} . V případě jednotlivých RCM simulací může být situace podstatně horší i částečně lepší.

Tabulky 11.1 a 11.2 udávají dostupné objemy, rozdíly v deficitech a bilanci mezi dostupným objemem a objemem nutným k saturaci rozdílů v deficitech pro Δ_{MEDDEF} a Δ_{MAXDEF} pro jednotlivé oblasti povodí. Z hlediska saturace mediánových rozdílů se jeví jako problematická oblast povodí horní Vltavy s výrazně negativní bilancí pro horizonty 2055 a 2085. Méně negativně vychází bilance pro oblasti povodí dolní Vltavy a Ohře a dolního Labe pro stejné časové horizonty. V ostatních oblastech povodí by neměl být problém saturovat mediánový rozdíl v deficitech. V případě maximálních rozdílů v deficitech je situace podstatně horší – mimo oblasti povodí Berounky, Odry a Moravy pro časový horizont 2025 a oblasti povodí Odry a Moravy pro časové horizonty 2055 a 2085 je zřetelný významný nedostatek vody pro saturaci těchto rozdílů.

Tab. 11.2 Vyhodnocení možnosti kompenzace $\Delta_{MAX}DEF$ podle průměru souboru modelů [mil. m³]; zvýrazněny jsou oblasti povodí a časové horizonty s negativní bilancí

	Dostupný objem	2025		2055		2085	
		$\Delta_{MAX}DEF$	bilance	$\Delta_{MAX}DEF$	bilance	$\Delta_{MAX}DEF$	bilance
Horní a střední Labe	149,20	708,38	-559,18	1 112,70	-963,50	1 058,48	-909,28
Horní Vltava	72,40	413,55	-341,15	1 054,76	-982,36	1 174,47	-1 102,07
Berounka	233,20	207,64	25,56	394,80	-161,60	406,23	-173,03
Dolní Vltava	56,90	215,01	-158,11	480,60	-423,70	493,53	-436,63
Ohře a dolní Labe	98,80	367,70	-268,90	782,53	-683,73	723,15	-624,35
Odra	322,90	232,36	90,54	277,33	45,57	343,44	-20,54
Morava	405,90	151,07	254,83	294,17	111,73	321,39	84,51
Dyje	134,20	317,86	-183,66	566,63	-432,43	456,59	-322,39

Peláková a Boersema (2005) udávají součet $\Delta_{MAX}DEF$ pro časový horizont 2050 na povodí Labe 6 584 mil. m³, což je zhruba o 70 % více než podle naší studie (3 825 mil. m³). Rozdíly $\Delta_{MAX}DEF$ pro časový horizont 2050 pro povodí Moravy, Dyje a Odry udávají Peláková a Boersema (2005) 1 249 mil. m³, což je velmi blízko rozdílu odvozenému v této studii (1 138 mil. m³). Rozdíl ve výsledcích v těchto dvou studiích je dán zejména použitými scénáři změny klimatu. Oproti 6 214 mil. m³, jež uvažovali Peláková a Boersema (2005) jako dostupné pro saturaci $\Delta_{MAX}DEF$, je v současnosti možno uvažovat podle MZe a MŽP (2010) pouze objem cca 1 500 mil. m³. V důsledku toho, přestože projektované $\Delta_{MAX}DEF$ jsou podle naší studie obecně menší, možnosti kompenzace těchto rozdílů jsou omezené a celkové závěry pesimističtější.

Nedostatkem předkládaného přístupu je zejména nedostatečná délka posuzovaných časových řad. Pro přesnější vyhodnocení by proto bylo vhodné využitím statistických přístupů dostupné řady prodloužit (část B studie Pelákové a Boersemy, 2005, např. uvažuje 1 000leté řady), což by umožnilo provedení aspoň zjednodušeného vodohospodářského řešení vybraných nádrží. Zároveň by poté mohla být řešena zabezpečení saturace celého rozdělení rozdílů v deficitech a ne pouze mediánový a maximální rozdíl.

Uvedené posouzení bylo provedeno v rámci projektu VaV financovaného Ministerstvem životního prostředí „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“.

12 Modelování dopadů klimatické změny na podzemní vody v povodí Metuje

Řeka Metuje pramení jižně od Adršpachu. Zájmové území je vymezeno závěrovými profily v Teplicích nad Metují (plocha povodí 22,1 km²) a Hronově (plocha povodí 248,1 km²). Základní charakteristiky zájmového území udává tab. 12.1. Povrch povodí je značně členitý. Jeho dominantou jsou pískovcové formace vytvářející skalní města. Nadmořská výška povrchu většiny pánve se pohybuje mezi 450 a 550 m n. m. Výrazným územním prvkem je hronovský příkop s výškami terénu kolem 370–400 m n. m. (Vizina et al., 2009).

Vnitrosudetská pánev je budována horninami karbonu, permu, triasu a křídly. Horniny křídly a triasu jsou na Broumovsku uloženy v osové části pánve. Pro soubor hornin křídly se vžil termín polická křídlová pánev. Vzhledem ke kolektorským vlastnostem je pojem polická pánev obvykle rozšířen i na sedimenty triasu (bohdašínské souvrství). Oběh podzemní vody v centrální části vnitrosudetské pánve intenzivně probíhá právě především v sedimentech křídly a v sedimentech triasu (Uhlík et al., 2008).

Polická pánev jako celek je vysoce aktivní uzavřenou hydrogeologickou strukturou s významnými využitelnými zásobami podzemních vod. Proudění podzemní vody v polické pánvi vytváří velmi komplikovaný trojrozměrný systém, spočívající v kombinaci převážně horizontálního proudění jednotlivými kolektory a vertikálního přetékání napříč mezilehlými izolátory. Míra vertikálního přetékání je dána mocností a mírou nepropustnosti izolátorů a piezometrickými poměry v sousedních kolektorech. V rámci tohoto trojrozměrného proudění dochází k vertikálnímu preferenčnímu proudění podél zlomů a zlomových zón. Podobný účinek mají i mnohé vrty propojující jednotlivé kolektory.

Cílem zde popsaných prací bylo pomocí hydraulického modelu simulovat vliv klimatické změny na poměry hladin a podzemního odtoku v zájmovém území povodí Metuje po Hronov (stanice MXX, území polické, resp. vnitrosudetské pánve) a povodí Metuje po Teplice nad Metují (stanice MXII). Vstupní data modelové infiltrace pro zadání jednotlivých scénářů klimatické změny jsou převzata z výstupů hydrologického modelu (model BILAN) zájmového území, uvažovány byly pouze scénáře změny klimatu vycházející z regionálního klimatického modelu ALADIN-CLIMATE/CZ (tab. 4.2). Pro kontrolní

Tab. 12.1 Základní hydrologické charakteristiky zájmového území

Průměrný roční srážkový úhrn	752 mm	Průtok Teplice nad Metují	0,86 m ³ s ⁻¹
Průměrná roční teplota	4–7 °C	Průtok Hronov	2,73 m ³ s ⁻¹

klima byla zároveň infiltrace odvozená na základě hydrologického modelu porovnána s infiltrací simulovanou hydraulickým modelem. Hydraulickým modelem byly provedeny simulace

- o. bez uvážení infiltrace odvozené z hydrologického modelu, tj. infiltrace byla odvozena z hydraulického modelu na základě známých odběrů podzemní vody a průtoků v říční síti,

dále pak simulace s využitím infiltrace odvozené z hydrologického modelu pro

1. pozorované klima,
2. referenční klima (tj. klima odpovídající období 1961–1990),
3. scénářové období 2025,
4. scénářové období 2055,
5. scénářové období 2085.

Simulace (1)–(5) byly provedeny pro obě dílčí povodí, simulace (o) pouze pro Metuji po Teplice nad Metují (MXII).

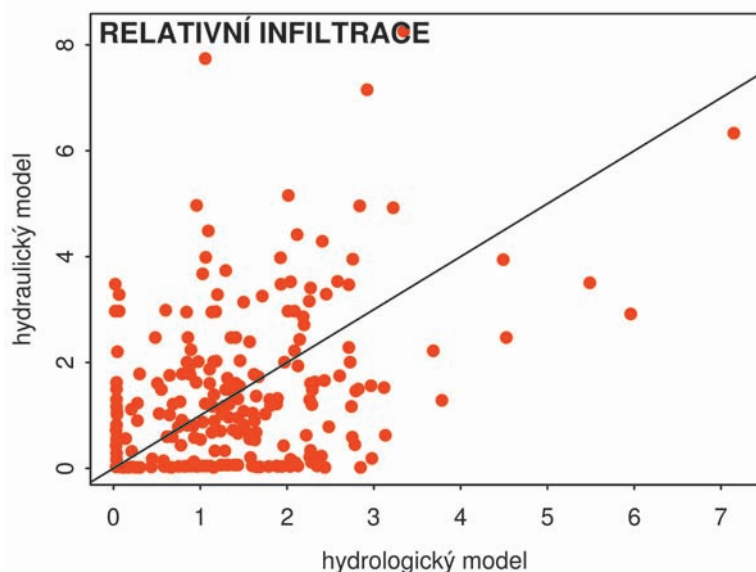
Porovnání odhadů infiltrace a hladin podle hydrologického a hydraulického modelu

Simulace hydrologického a hydraulického modelu jsou ze své podstaty odlišné. Princip výpočtu hydrologického modelu spočívá ve vyčíslení chronologické bilance v měsíčním kroku. Princip výpočtu hydraulického modelu vychází z fyzikálního popisu proudění podzemní vody pórovým prostředím (Darcyho pohybová rovnice) doplněného o rovnici kontinuity.

Vstupní data hydrologického modelu tvoří časové řady měsíčních výšek srážek na povodí, řady průměrných měsíčních teplot vzduchu a řady průměrných relativních vlhkostí vzduchu. Vstupní data hydraulického modelu popisují geometrii bází a stropů souvrství simulovaných v rámci modelových vrstev (matice hodnot báze a stropu v každém modelovém elementu). Soubor vstupních dat hydraulického modelu doplňují okrajové podmínky. Jejich zadáním je simulován přítok vody do modelované oblasti (srážková infiltrace) a drenáž podzemní vody (drenáž do toků, pramenů a jímacích vrtů). Vlastnosti horninového prostředí reprezentují v hydraulickém modelu koeficienty hydraulické vodivosti a koeficienty volné a napjaté storativity.

Kalibrace hydrologického modelu spočívá v optimalizaci osmi volných parametrů. Výsledkem ukončené kalibrace je optimální shoda měsíčních modelových a měřených hodnot odtoku v uzávěrovém profilu simulovaného povodí. Celkový odtok je dán součtem tří složek – povrchového, hypodermického a podzemního (resp. základního) odtoku. Hlavním výstupem hydrologického modelu je vyčíslení hydrologické bilance povodí v měsíčním časovém kroku.

Kalibrace hydraulického modelu spočívá v odladění optimálního množství efektivní srážkové infiltrace tak, aby pozorované hodnoty drenáže podzemní vody (určené jako průměr měsíčních minim



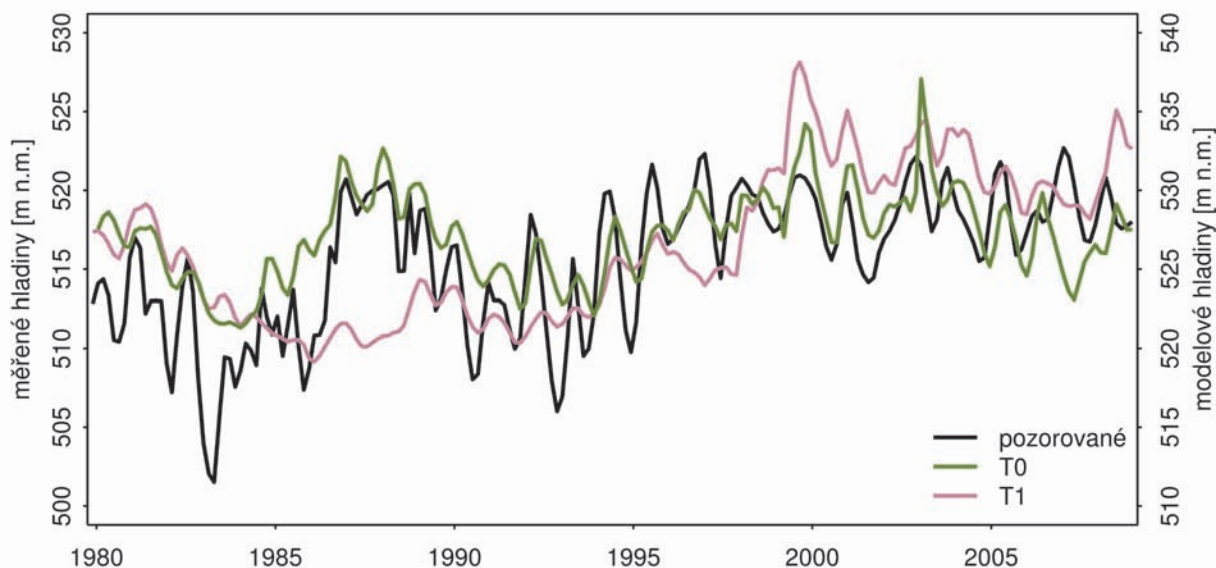
Obr. 12.1 Vztah relativních koeficientů měsíční srážkové infiltrace odvozených na základě hydrologického a hydraulického modelu

simulovaného období) odpovídaly modelové drenáži podzemních vod. Kalibrace množství je provázána s kalibrací hladin. Hydraulické parametry modelu jsou při kalibraci na hladinové kritérium optimalizovány tak, aby modelové hladiny odpovídaly hladinám měřeným. Cílem kalibrace hladin je (při zkalibrovaném správném množství obíhající podzemní vody) na celém území modelu dosáhnout shodný směr a rychlost proudu podzemní vody. Hlavním výstupem hydraulického modelu je vyčíslení směru a velikosti proudění a zásob podzemní vody v libovolné podoblasti modelového území, v libovolném čase.

Porovnání je provedeno pro období hydrologických let 1981–2007 a pro relativní hodnoty efektivní infiltrace do podzemních vod, jelikož hydrologický a hydraulický model nepracují se shodnou absolutní hodnotou infiltrace srážek do podzemních vod. Odvození srážkové infiltrace hydraulického modelu je založeno na manuální kalibraci s ohledem na kritérium dosažení optimální shody mezi modelovými a pozorovanými hladinami podzemní vody. Porovnání odhadnuté infiltrace udává obr. 12.1. Obě metody odvození srážkové infiltrace do podzemních vod uvažují výpadky infiltrace v letních měsících. Celkový počet porovnání zahrnuje 324 měsíců. Hydraulický model uvažuje s infiltrací ve 185 případech, ve zbylých měsících (celkem 139) je simulována nulová infiltrace. Hydrologický model uvažuje s infiltrací ve 216 případech, ve zbylých měsících (celkem 108) je simulována nulová infiltrace. Korelační koeficient mezi hydrologickým a hydraulickým odhadem infiltrace vychází 0,511, tj. závislost není příliš těsná (jak ostatně vyplývá i z obr. 12.1).

Hydraulický model je kalibrován podle bilančního a hladinového kritéria. Bilanční kritérium bylo docíleno v rámci stacionárních simulací, kdy průměrná srážková infiltrace v oblastech analyzovaných mezipodvívá odpovídá dlouhodobému odtoku podzemní vody. V rámci hladinového kritéria je řešena časová distribuce dotace podzemních vod s cílem minimalizovat odchylky modelových hladin od hladin měřených. Kalibrací bylo dosaženo dobré shody mezi modelovanými a pozorovanými daty.

Z hlediska roční amplitudy kolísání hladin jsou obě varianty zadání infiltrace rovnocenné. Nicméně se vyskytují období, pro která se odhad hladin na základě infiltrace odvozené hydrologickým modelem značně odlišuje od pozorovaných hodnot (viz období 1986–1988 na obr. 12.2). To může být způsobeno tím, že parametry hydrologického modelu byly optimalizovány na shodu celkového modelovaného



Obr. 12.2 Pozorovaná a modelovaná (T_0 – hydraulický model, T_1 – hydraulický model s infiltrací odvozenou z hydrologického modelu) výška hladiny ve vrtu V25 (vyhlazeno)

odtoku s celkovým pozorovaným odtokem. Celkový odtok, jakožto „souhrnná“ charakteristika hydrogeologické struktury, je pouze částečně ovlivňován odtokem podzemní vody; stanovení koeficientu doplňování zásob podzemní vody (RC) hydrologickým modelem závisí na míře úspěšnosti separace hydrogramu odtoku na odtok povrchový, hypodermický a podzemní.

Vliv změny klimatu na podzemní vody

Scénáře změny klimatu vstupují do hydraulického modelu v podobě časových řad infiltrace do podzemních vod, jež jsou odvozeny hydrologickým modelem BILAN na základě simulace regionálního klimatického modelu ALADIN-CLIMATE/CZ pro časové horizonty 2025, 2055 a 2085. Průměrné charakteristiky scénářů udává tab. 12.2. U obou profilů dochází ve scénářích více vzdálené budoucnosti k větším poklesům srážkové infiltrace. Pro oblast severního systému polické pánve (profil MXII) klesá odhadovaná infiltrace k časovému horizontu o cca 27 %, pro oblast celé polické pánve (profil MXX) o 41 %. Severní systém polické pánve je tak v jednotlivých klimatických scénářích uvažován jako klimaticky stabilnější při srovnání se zbývajícím územím povodí profilu MXX. Na povodí profilu MXII navíc dochází k větší infiltraci – průměrná měsíční infiltrace do podzemních vod na povodí MXII je 18,96 mm a na celém povodí profilu MXX 15,51 mm. Pozorované změny nicméně nejsou se scénáři změny klimatu konzistentní: zatímco dostupné časové řady hladin podzemní vody z oblasti severního zvodněného systému nasvědčují dlouhodobému poklesu zásob podzemní vody, v oblasti jižního zvodněného systému polické pánve k poklesovému trendu vývoje hladin a zásob podzemní vody podle dostupných dat nedochází.

Scénáře klimatické změny pro profil MXII (Teplice nad Metují) uvažují s menším poklesem srážkové infiltrace než v případě profilu MXX (Hronov). Největší pokles hladiny podzemní vody je hydraulickým modelem simulován v oblasti rozvodnic (obr. 12.3). Vzhledem k uložení vrstev v polické pánvi se

Povodí	Scénář	Srážky [mm měsíc ⁻¹]	RC [mm měsíc ⁻¹]	ΔRC [%]	max RC [mm měsíc ⁻¹]
MXII	1975	61,73	18,96	–	160,28
	2025	62,50	17,51	-7,65	128,70
	2055	58,87	14,33	-24,42	140,00
	2085	59,50	13,93	-26,53	138,71
MXX	1975	66,57	15,51	–	98,69
	2025	67,28	13,63	-12,16	97,01
	2055	63,42	9,68	-37,62	90,45
	2085	64,42	9,20	-40,69	92,94

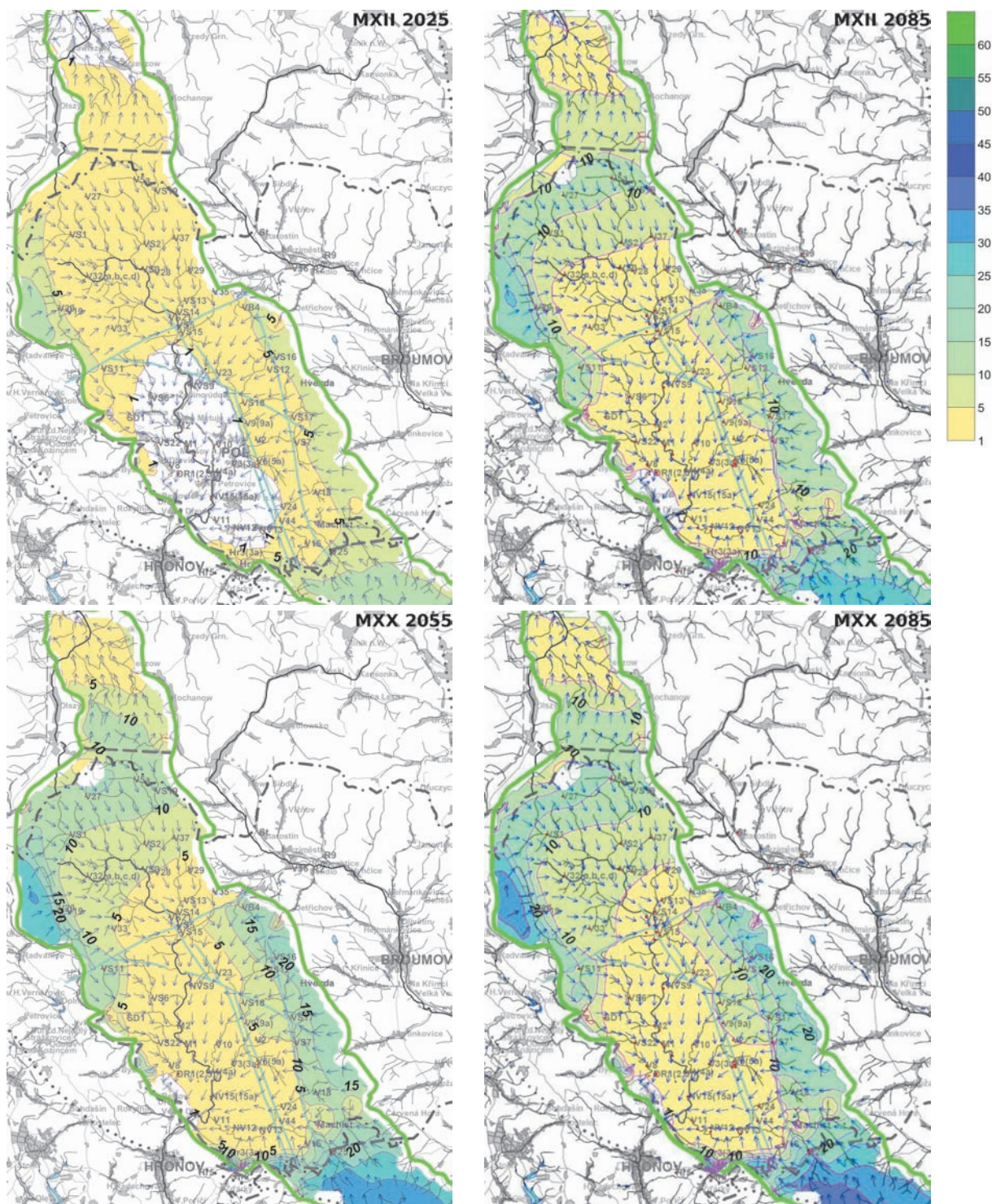
Tab. 12.2 Modelovaná infiltrace do podzemních vod (RC) pro současnost a scénáře změny klimatu

rozvodnice nachází podél okraje této hydrogeologické struktury. Naopak nejmenší poklesy hladiny podzemní vody jsou hydraulickým modelem simulovány v oblastech drenáže podzemní vody. V severním systému polické pánve dochází k regionální drenáži všech kolektorů v oblasti Teplic nad Metují. V oblasti jižní části polické pánve nastává regionální drenáž podzemní vody v oblasti výtoku Metuje ze struktury (mezi obcemi Bezděkov nad Metují, Velké Petrovice a Hronov). K podružné drenáži dochází na křížení Ledhuje, Pěkovského potoka a Židovky s bělským a polickým zlomem.

K reálnému poklesu hladiny podzemní vody bude docházet postupně – v závislosti na zvyšování teploty (a tedy evapotranspirace) a případném úbytku srážek a v závislosti na postupném prázdnění statických zásob podzemní vody. Vzhledem k zadání měsíčních hodnot infiltrace jednotlivých scénářů klimatu (sníženo je doplňování zásob již od začátku simulace) dojde ke snížení hladin ve struktuře v průběhu několika prvních měsíců od počátku simulací. Absolutní hodnoty poklesu hladin v oblastech jednotlivých vrtů je možné vyčíst z rozdílů úrovní os grafů průběhů hladin pro jednotlivé varianty (obr. 12.3).

Při poklesu srážkové infiltrace o 27 % (k časovému horizontu 2085) by absolutní poklesy hladiny podzemní vody v oblastech rozvodnic povodí Metuje po Hronov v bazálním kolektoru dosáhly až 25 m. Ve svrchním kolektoru křídly by byly poklesy hladiny podzemní vody zřejmě ještě větší. Absolutní poklesy hladiny podzemní vody by v oblastech rozvodnic tohoto povodí při poklesu srážkové infiltrace o 41 % (k časovému horizontu 2085) dosáhly v bazálním kolektoru až 35 m. Pokles doplňování zásob podzemní vody o 41 % dosavadní úrovně by v zájmovém území způsobil dramatické poklesy hladiny podzemní vody. K největším poklesům by mělo docházet v infiltračních oblastech (i desítky metrů). Naopak relativně stálou úroveň by si hladiny podzemní vody zachovaly v nejnižších místech drenáže podzemních vod (např. v oblasti křížení toku Metuje se skalským zlomem nebo v oblasti výtoku Metuje z křídových sedimentů polické pánve). V dlouhodobém výhledu by průtoky v tocích v uzávěrových profilech struktury poklesly úměrně ke snížení efektivní srážkové infiltrace. Rovněž by došlo k posunu pramenných oblastí toků i o několik kilometrů. Například povrchový tok Metuje by v suchých obdobích vysychal až do oblasti mezi obcemi Dolní Adršpach a Bučnice.

Informace byly čerpány především ze studie provedené firmou ProGeo, s.r.o. (více viz Uhlík et al., 2008), která vznikla v rámci řešení projektu Technologické agentury České republiky „Udržitelné využívání vodních zdrojů v podmínkách klimatických změn“.



Obr. 12.3 Pokles hladin podzemních vod [m] pro povodí MXII (nahore, časový horizont 2025 vlevo, 2085 vpravo) a MXX (dole, časový horizont 2055 vlevo, 2085 vpravo)

13 Závěr

Projekce klimatických modelů naznačují, že v budoucnosti můžeme počítat s jistou mírou negativních následků změn klimatu. Konkrétně bude s vysokou pravděpodobností pokračovat současný růst teplot, klimatické modely se rovněž shodují na změně sezonního rozložení srážek. Kombinace těchto změn vede ke změně dynamiky sněhové pokrývky a k růstu evapotranspirace v zimním období, jenž je však částečně kompenzován růstem srážek. V létě s vysokou pravděpodobností můžeme očekávat stagnaci či pokles srážkových úhrnů spojený s poklesem zásob vody v povodí. Z hlediska odtoku můžeme na většině našeho území očekávat růst v zimním období a stagnaci či pokles po zbytek roku. Nicméně změny roční bilance odtoku jsou značně nejisté, tzn. dostupná zásoba vody v povodí se podle řady simulací klimatických modelů v ročním průměru v porovnání se současností zásadně neliší, dochází jen k přesunům během roku. Pravděpodobně však můžeme rovněž počítat s vyšší četností výskytu extrémních jevů, tedy přívalových srážek a povodní a zejména období sucha.

V oblasti vodního hospodářství již změny (nebo variabilita) klimatu způsobují negativní následky, např. v podobě omezení obecného užívání vody nebo omezení povolování nových odběrů, a tedy i jako limitující faktor ekonomického rozvoje v dotčených regionech. Je zřejmé, že možné změny klimatu by měly být uváženy při dlouhodobém plánování. I přes značné nejistoty spojené s modelováním klimatu umožňují simulace klimatických modelů odhadnout pravděpodobné meze změn. Změna klimatu pak může být v rámci plánování opatření (např. v kontextu Rámcové směrnice o vodní politice, respektive v Plánech povodí) jednoduše uvážena formou klasické citlivostní analýzy, popřípadě ve spojení s analýzou rizika. To přinejmenším umožňuje posoudit jednotlivá navrhovaná opatření vzhledem k jejich citlivosti na změny klimatu.

Výběr samotných adaptačních opatření ke zmírnění dopadů změny klimatu je dán především účelem adaptací, jenž je zpravidla identifikován na základě analýzy zranitelnosti. Účel adaptace dále určuje, která ze skupin opatření by měla hrát stěžejní roli v navrhovaném opatření. Existuje celá řada možných adaptačních opatření. Z výsledků provedených studií vyplývá, že význam opatření v krajině spočívá zejména ve zlepšení vodního režimu krajiny a zmenšení povodňového odtoku z přívalových povodní a s tím spojených negativních jevů (např. eroze). Na druhé straně, lepší uplatnění vody v krajině vede ke zvětšení územní evapotranspirace, takže na odtok ze srážek v období sucha zůstane vody méně. Pro zvětšení průtoků a zásob podzemní vody v období hydrologického sucha nemají reálně proveditelná opatření v krajině (zejména vzhledem k rozloze pozemků, na nichž je možno tato opatření realizovat) tedy znatelný význam. Velký potenciál z hlediska opatření vedoucích ke zmírnění dopadů hydrologického sucha mají zejména vodohospodářská opatření různých typů, a to jak opatření již známá a využívaná (využití vodních nádrží, převodů vody), tak opatření, jejichž efekt je sice slibný, nicméně doposud nebyl komplexně kvantifikován (recyklace průtoků, řízené vícenásobné využití vody). Z hlediska snížení odtoku z urbanizovaných území nelze pominout potenciál jímání a následného

užití srážkových vod. Prostředky racionalizace využívání a ochrany vodních zdrojů je nutné spatřovat i v legislativních opatřeních a snižování požadavků na odběr vody.

Hypoteticky by bylo možné na základě regionální diverzifikace předpokládaných dopadů změny klimatu určit vhodná adaptační opatření pro dané oblasti, popřípadě identifikovat prioritní oblasti pro realizaci opatření. V klasické analýze rizika je riziko součinem pravděpodobnosti negativního jevu (např. povodní, hydrologického sucha) a zranitelnosti. Z hlediska projekcí klimatických modelů nelze regionálně vymezit oblasti s větší pravděpodobností zvýšení intenzity či četnosti extrémních srážek ani přívalových povodní. V případě hydrologického sucha je situace obdobná, nicméně simulace klimatických modelů naznačují, že poklesy odtoků budou vyšší a pravděpodobnější v jižní části republiky, spíše v Čechách než na Moravě. Pokud bude pokračovat dosavadní trend oteplování a stagnace srážek ve středních Čechách, lze v této oblasti v nejbližším období očekávat prohlubování a rozšiřování problémů s nedostatkem vody. Hydrologické sucho je nicméně jev plošný a v případě velkého sucha bude pravděpodobně zasažena významná část republiky. Rizika jsou tedy i pro budoucí období podstatnou měrou spíše určena zranitelností jednotlivých povodí než zvyšováním pravděpodobnosti negativních jevů. S tím souvisí i výběr adaptačních opatření.

Předkládaná monografie a v ní prezentovaný projekt navazují na několik desetiletí výzkumu změny klimatu v České republice. Přes společnou linii výzkumů, danou především „zpřesňováním“ odhadů dopadů změn klimatu, je vidět v posledních letech jasný posun k praktickým aplikacím, zejména tedy k návrhu adaptačních opatření vedoucích k eliminaci negativních dopadů klimatické změny. „Zpřesňování“ scénářů změny klimatu nespočívá ve zužování rozpětí hodnot odhadů, ale spíše v lepším popisu nejistot, a je doprovázeno následným použitím metod, které přímo zohledňují nejistoty v odhadech přítomné. Nicméně pouze budoucnost ukáže, do jaké míry byly naše odhady přesné a závěry správné.

Climate change impacts on the hydrological regime in the Czech Republic and possible adaptation measures

Summary

Present monograph summarizes the research that has been done by the Department of Hydrology of the T. G. Masaryk Water Research Institute (public research institution) during years 2007–2011 in the framework of the project "Refining of current estimates of impacts of climate change in sectors of water management, agriculture and forestry and proposals of adaptation measures" (project No. SP/1a6/108/07) sponsored by Ministry of the Environment of the Czech Republic.

The monograph consists of three parts. First part brings information on modelling of climate system. The specific aspects of the modelling of climate change impact on hydrological regime and water resources are also briefly addressed. Climate models' projections of precipitation and temperature are discussed and subsequently used to assess the changes in the hydrological cycle and run-off in particular. In the study, 15 simulations of regional climate models are used to simulate the water balance affected by climate change at 250 catchments. For the Czech Republic, the climate models typically project continuous warming during the 21st century followed by the increase in winter and decrease in summer precipitation. The annual changes in precipitation are not clear. The changes in run-off are strongly related to the changes in snow dynamics (shift of the snow-melt peak closer to the beginning of spring), increase in evapotranspiration (largest in winter) and decrease in precipitation in summer. This leads (in the most examined basins) to the increase in winter and decrease in summer run-off. However, the changes in annual run-off as well as their spatial distribution are not clear (similar with precipitation). Regional climate models indicate larger changes in the south (rather in Bohemia than Moravia) than in the north of the Czech Republic.

Especially in the central Bohemia there are catchments already experiencing problems with water scarcity. The climate change scenarios indicate that these problems could become more common during the 21st century. The second part of the monograph is aimed on the development of adaptation measures. It is argued that the most effective measures (with respect to the improvement of the water balance) are technical measures, mainly construction of new or reconstruction of old reservoirs, water transfers etc. Other types of measures (like land-use change) could be considered also, mainly due to their effect on soil protection, ecological stability etc.

The monograph is closed by the selected case studies conducted in the T. G. Masaryk Water Research Institute. Three of the case studies consider the areas experiencing problems with insufficient water resources already now. Further, the possible compensation of deficit volumes by new water reservoirs is presented and the section is closed by the assessment of climate change impacts on groundwater resources in the Metuje basin.

Literatura

- Adger, WN., Nigel, WA., Tompkins, EL. (2005) Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15, 77–86.
- Allen, M. (1999) Do it yourself climate prediction. *Nature*, 401, 642.
- Balvín, P., Mrkvičková, M. (2011) Stanovení minimálních zůstatkových průtoků. *VTEI*, 53(4), 1–3, příloha Vodního hospodářství 2011(8).
- Beran, A., Horáček, S., Hanel, M. (2011) Zjednodušení metody výpočtu potenciální evapotranspirace v nové verzi modelu BILAN. *VTEI*, 53(mimořádné číslo III), 15–18, příloha Vodního hospodářství 2011(11).
- Bierkens, M., Hurk, B. (2008) *Climate and the hydrological cycle*, IAHS Press, Kapitola Feedback mechanism: precipitation and soil moisture, 175–193. IAHS Special Publication 8, ISBN 978-1-901502-54-1.
- Christensen, JH., Christensen, OB. (2007) A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*, 81, 7–30.
- Christensen, JH., Hewitson, B., Busuioc, A., et al. (2007) Regional Climate Projections. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H., eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK a New York, USA.
- Christensen, JH., Kjellström, E., Giorgi, F., Lenderink, G., Rummukainen, M. (2010) Weight assignment in regional climate models. *Climate Research*, 44(2–3), 179–194.
- Collins, M., Booth, BBB., Harris, GR., et al. (2006) Towards quantifying uncertainty in transient climate change. *Climate Dynamics*, 27, 127–147.
- Déqué, M., Somot, S. (2010) Weighted frequency distributions express modelling uncertainties in the ENSEMBLES regional climate experiments. *Climate Research*, 44(2–3), 195–209.
- ECE (2009) *Guidance on Water and Adaptation to Climate Change*. Economic Commission for Europe, New York, Ženeva.
- EEA (2007) *CLC2006 technical guidelines*. European Environment Agency, Kodaň, Dánsko.
- Gidrometeoizdat (1976) *Rekomendacii po rasčotu isparenija s poverchnosti suši*. Hidrometeoizdat, Leningrad.

- Giorgi, F., Mearns, L. (2001) Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) Method. *Journal of Climate*, 15, 1141–1158.
- 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.
- Hanel, M., Buishand, TA. (2012) Multi-model analysis of RCM simulated 1-day to 30-day seasonal precipitation extremes in the Czech Republic. *Journal of Hydrology*, 412–413, 141–150.
- Hanel, M., Vizina, A. (2010) Hydrologické modelování dopadů změn klimatu v denním kroku: korekce systematických chyb a přírůstková metoda. *VTEI*, 52(mimořádné číslo II), 17–21, příloha Vodního hospodářství 2010(11).
- Hanel, M., Kašpárek, L., Horáček, S., et al. (2007) *Studie hydrologických poměrů v povodí Srpiny*. VÚV T. G. Masaryka, Praha.
- Harding, R.J., Warnaars, TA., eds. (2011) *Water and global change: The WATCH Project Outreach Report*. NERC Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK.
- Harris, GR., Collins, M., Sexton, DMH., Murphy, JM., Boot, BBB. (2010) Probabilistic projections for 21st century European climate. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 2009–2020.
- Hewitt, CD., Griggs, DJ. (2004) Ensembles-based Predictions of Climate Changes and their Impacts. *Eos*, 85, 566.
- Hladný, J., Buchtele, J., Doubková, M., et al. (1995) *Územní studie klimatické změny v České republice*. Národní klimatický program České republiky, Praha.
- Hladný, J., Buchtele, J., Doubková, M., et al. (1997) *Impacts of potential climate change on hydrology and water resources in the Czech Republic*. Národní klimatický program České republiky, Praha, svazek 26.
- Horáček, S., Rakovec, O., Kašpárek, L., Vizina, A. (2009) Vývoj modelu hydrologické bilance BILAN. *VTEI*, 51(mimořádné číslo I), 2–5, příloha Vodního hospodářství 2009(11).
- Houghton, JT., Jenkins, GJ., Ephraim, JJ. (1990) *Climate Change – The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Johnson, F., Sharma, A. (2011) Accounting for interannual variability: A comparison of options for water resources climate change impact assessments. *Water Resources Research*, 47, DOI: 10.1029/2010WR009272.
- Johnson, F., Westra, S., Sharma, A., Pitman, AJ. (2011) An Assessment of GCM Skill in Simulating Persistence across Multiple Time Scales. *Journal of Climate*, 24(14), 3609–3623, DOI:10.1175/2011JCLI3732.1.
- Johnstone, K., Brown, A., Goldthorpe, M. (2009) *Adapting to climate change: a guide to its management in organizations*. Institute of Environmental Management and Assessment, Lincoln.

- Kalvová, J., Kašpárek, L., Janouš, D., Žalud, Z., Kazmarová, H. (2002) *Scénáře změny klimatu na území České republiky a odhady dopadů klimatické změny na hydrologický režim, sektor zemědělství, sektor lesního hospodářství a na lidské zdraví v ČR*. Národní klimatický program České republiky, Praha, svazek 32.
- Kalvová, J., Pišoft, P., Chládková, Z., Mikšovský, J., Raidl, A. (2005) *Vytvoření scénářů změny klimatu pro Českou republiku*. VÚV T. G. Masaryka, Praha.
- Kay, AL., Davies, HN., Bell, VA., Jones, RG. (2009) Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change*, 92, 41–63.
- Kašpárek, L. (1998) *Regional study on impacts of climate change on hydrological conditions in the Czech Republic*. Výzkumný ústav vodohospodářský, Praha, edice Práce a studie, svazek 193.
- Kašpárek, L. (2007) Shrnutí poznatků o vlivu fyzicko-geografických charakteristik povodí na základní charakteristiky průtoků. In Š. Blažková., ed., *Vybrané výsledky projektu Labe IV 2003–2006, Hydrologická tematika se zaměřením na retenci vody v povodí*, ČSVTS, ISBN 978-80-02-01947-3.
- Kašpárek, L., Krátká, M. (2004) *Analýza vlivu fyzicko-geografických charakteristik na tvorbu povodňového odtoku a sestavení publikace o povodni 2002*. VÚV T. G. Masaryka, závěrečná zpráva.
- Kašpárek, L., Mrkvičková, M. (2008) *Studie potřeb vody pro povodí vodních toků Blišanka a Liboc*. VÚV T. G. Masaryka, Praha.
- Kašpárek, L., Eckhardt, P., Hanel, M., et al. (2010) *Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulací schopnosti v povodí Rakovnického potoka (pilotní projekt)*. VÚV T. G. Masaryka, periodická zpráva o řešení projektu.
- Kašpárek, L., Hanel, M., Máca, P., Pavlásek, J., Pech, P. (2011a) Adaptační opatření pro zmírnění dopadů současných změn klimatu na povodí Rakovnického potoka. *VTEI*, 53(2), 8–11, příloha Vodního hospodářství 2011(4).
- Kašpárek, L., Horáček, S., Pavlásek, J., et al. (2011b) *Možnosti zmírnění dopadů klimatické změny na hydrologický režim v povodí Rakovnického potoka*. VÚV T. G. Masaryka, Praha.
- Kovář, P. (2008) Modelování hydrologické bilance na experimentálním povodí Němčického potoka. In *Sborník příspěvků z konference Krajinné inženýrství 2008*, ČSSI, Praha, 34–43, ISBN 978-80-903258-7-6.
- Kyselý, J. (2008) Dlouhodobé změny četnosti povodní na Vltavě v Praze a na Labi v Děčíně ve vztahu k atmosférické cirkulaci a významným srážkám. *Meteorologické zprávy*, 61, 5–13.
- Kyselý, J. (2009) Trends in heavy precipitation in the Czech Republic over 1961-2005. *International Journal of Climatology*, 29(12), 1745–1758, DOI:10.1002/joc.1784.
- Kyselý, J., Plavcová, E. (2012) Biases in the diurnal temperature range in Central Europe in an ensemble of regional climate models and their possible causes. *Climate Dynamics*, in press.
- Leander, R., Buishand, TA. (2007) Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332, 487–496.

- Leggett, J., Pepper, WJ., Swart, R., et al. (1992) *Emissions Scenarios for the IPCC: an Update, Climate Change 1992: The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Meinshausen, M., Smith, SJ., Calvin, K., et al. (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, DOI:10.1007/s10584-011-0156-z.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., et al. (2008) *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, technical summary.
- Mrkvičková, M., Kos, Z. (2010) Metodika posouzení dopadů klimatické změny a návrhu adaptačních opatření na vodních zdrojích. *VTEI*, 52(mimořádné číslo II), 22–24, příloha Vodního hospodářství 2010(11).
- MZe a MŽP (2010) *Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod a základní zásady využití těchto území*. Návrh k projednání.
- MZe a MŽP (2011) *Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod a základní zásady využití těchto území*. Praha.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (2000) *Special report on emissions scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Novický, O., Mrkvičková, M., Horáček, S., et al. (2009a) *Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech České republiky*. VÚV T. G. Masaryka, Praha, příloha k periodické zprávě za rok 2008.
- Novický, O., Tremel, P., Kašpárek, L., et al. (2009b) *Teploty vody v tocích České republiky*. VÚV T. G. Masaryka, Praha, ISBN 978-80-85900-91-0.
- Novický, O., Mrkvičková, M., Kašpárek, L., et al. (2010) *Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech České republiky*. VÚV T. G. Masaryka, Praha, příloha k periodické zprávě za rok 2009.
- Pachauri, RK., Reisinger, A., eds. (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Cambridge University Press, IPCC, Geneva, Švýcarsko.
- Pekárová, P., Koníček, A., Milánek, P. (2005) *Vplyv využitia krajiny na režim odtoku v experimentálnych mikropovodiach ÚH SAV*. Veda, vydavateľstvo SAV, Bratislava.
- Peláková, M., Boersema, M. (2005) *Odhad objemu nádrží potřebného pro kompenzaci poklesu odtoku vlivem klimatické změny*. VÚV T. G. Masaryka, Praha.
- Pretel, J., ed. (2008) *Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření (II)*. ČHMÚ, závěrečná zpráva o řešení projektu VaV SP/1a6/108/07 za rok 2008.

- Pretel, J., ed. (2010) *Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření (IV)*. ČHMÚ, závěrečná zpráva o řešení projektu VaV SP/1a6/108/07 za rok 2010.
- Prudhomme, C., Wilby, R.L., Crooks, S., Kay, A.L., Reynard, N.S. (2010) Scenario-neutral approach to climate change impact studies: Application to flood risk. *Journal of Hydrology*, 390, 198–209.
- Ramage, C.S. (1983) Teleconnections and the siege of time. *Int. J. Climatol.*, 3, 223–231.
- Reifen, C., Toumi, R. (2009) Climate projections: Past performance no guarantee of future skill? *Geophys. Res. Lett.*, 36(L13704).
- Shabalova, M.V., van Deursen, W.P.A., Buishand, T.A. (2003) Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. *Climate Research*, 23, 233–246.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et al., eds. (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Štěpánek, P., Zahradníček, P., Huth, R. (2011) Interpolation techniques used for data quality control and calculation of technical series: an example of a Central European daily time series. *IDŐJÁRÁS - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 115(1–2), 87–98.
- Tebaldi, C., Knutti, R. (2007) The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 2053–2075.
- Uhlík, J., Milický, M., Šouta, M., Chaloupková, M. (2008) *Analýza klimatické změny v povodí Horní Metuje po Hronov*. ProGeo, s.r.o., Rostoky u Prahy.
- Vališ, S. (1973) Počátek povrchového odtoku. In *Soubor vědeckých pojednání katedry meliorací, VUT, Brno*, Knihovnice odborných a vědeckých spisů.
- Vizina, A., Kašpárek, L., Kněžek, M., et al. (2009) *Vodní bilance v podmínkách klimatické změny v povodí horní Metuje*. VÚV T. G. Masaryka, Praha, ISBN 9788085900941.
- Weigel, A.P., Knutti, R., Liniger, M.A., Appenzeller, C. (2010) Risks of Model Weighting in Multimodel Climate Projections. *Journal of Climate*, 23, 4175–4191.
- White Paper (2009) *WHITE PAPER: Adapting to climate change: Towards a European framework for action*. Commission of the European Communities, Brusel.

Redakční rada

RNDr. Dana Baudišová, Ph.D., Ing. Šárka Blažková, DrSc., Ing. Petr Bouška, Ph.D., RNDr. Blanka Desortová, CSc., Ing. Jana Hubáčková, CSc., RNDr. Josef Fuksa, CSc., Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., RNDr. Hana Mlejnková, Ph.D., Ing. Věra Očenášková, Mgr. Libuše Opatřilová, Ing. Eva Kajanová, Ing. Dagmar Širotková, RNDr. Přemysl Soldán, Ph.D., Ing. Václav Šastný, Ing. Nada Wannerová, Mgr. Aleš Zbořil

ODHAD DOPADŮ KLIMATICKÉ ZMĚNY NA HYDROLOGICKOU BILANCI V ČR A MOŽNÁ ADAPTAČNÍ OPATŘENÍ

Ing. Martin Hanel, Ph.D., Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., Ing. Magdalena Mrkvičková, Ing. Stanislav Horáček, Ing. Adam Vizina, Ing. Oldřich Novický, Ing. Renata Fridrichová

Vydal Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce, v roce 2011

Odpovědný redaktor: Mgr. Josef Smrťák

Vydání první

Počet stran: 108

6,6 AA (text), 1,1 AA (přílohy)

Náklad: 200

Tisk: Gaudeo tiskárna, s.r.o.

ISBN 978-80-87402-22-1