

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ  
KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A  
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ

MODEL Y ZEMSKÉHO POVRCHU V KLIMATICKÝCH  
MODELECH  
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Pavel Kříž

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

2013

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**  
Katedra vodního hospodářství a environmentálního  
modelování

Fakulta životního prostředí

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Kříž Pavel

Regionální environmentální správa - kombinované Praha

Název práce

**Modely zemského povrchu v klimatických modelech**

Anglický název

**Land surface models**

## Cíle práce

Cílem práce je porovnání odhadů změn hydrologické bilance odvozených z modelů zemského povrchu (Land surface models – LSM) se změnami získanými na základě simulací hydrologického modelu. Práce ověří schopnost LSM simulovat hydrologickou bilanci a její změny.

## Metodika

budou použity výstupy LSM zveřejněné v rámci projektu WATCH a pozorované řady srážek, teploty a průtoků pro vybraná povodí v měsíčním kroku. K hydrologickému modelování bude použit konceptuální hydrologický model Bilan.

Osnova:

### a) TEORETICKÁ ČÁST

1. Modelování klimatu - klimatický systém - klimatické modely
2. Modely zemského povrchu (LSM) - popis vybraných modelů
3. Modelování dopadů změn klimatu na hydrologický režim (hydrologickým modelem)

### b) PRAKTICKÁ ČÁST

4. Data - z projektu WATCH: stručně popis projektu, dostupná data, použitá data;- pozorování
5. Změny hydrologické bilance dle LSM
6. Změny hydrologické bilance dle hydrologického modelu
- \*7. Hydrologická bilance dle LSM řízených GCM
- \*8. Hydrologická bilance dle hydrologického modelu a GCM
- \*9. Hydrologická bilance dle LSM řízeného WFD (Watch Forcing Data)
- \*10. Hydrologická bilance dle hydrologického modelu řízeného WFD (Watch Forcing Data)

## Harmonogram zpracování

## Rozsah textové části

cca 40 stran včetně obrázků

## Klíčová slova

modely zemského povrchu; globální klimatické modely; změny hydrologické bilance

---

## Doporučené zdroje informací

Hanel, M., Kašpárek, L. et al. (2012) Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření. VUV-TGM. V tisku.

Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuloc, A., et al. (2007) Regional Climate Projections. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, H. Miller, 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.

[www.eu-watch.org](http://www.eu-watch.org)

### DATA

databáze CEH

<https://gateway.ceh.ac.uk/>

výstupy globálních hydrologických modelů:

LSM řízené GCM <ftp://ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock6/>

\*LSM řízené WFD [ftp://ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock4/MultiModel\\_Extremes/](ftp://ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock4/MultiModel_Extremes/)

\*opravené GCM [ftp://ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock3/cncm3\\_bc\\_data\\_yearly/](ftp://ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock3/cncm3_bc_data_yearly/), [ftp://ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock3/echam\\_bc\\_data\\_yearly/](ftp://ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock3/echam_bc_data_yearly/), <ftp://ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock3/PSL/BC/>

Dokumentace jednotlivých LSM (viz metadata databáze CEH)

Data formát <http://www.eu-watch.org/watmip/data-format>

---

## Vedoucí práce

Hanel Martin, Ing., Ph.D.

**prof. Ing. Pavel Pech, CSc.**

Vedoucí katedry



**prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.**

Děkan fakulty

V Praze dne 1.10.2012

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Hanela, Ph.D., a že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

V Praze 15.4.2013

.....

### **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Hanelovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování této práce.

V Praze 15.4.2013

.....

## Obsah:

Abstrakt .....	8
Abstract .....	9
1. Úvod .....	11
2. Cíle práce .....	13
TEORETICKÁ ČÁST .....	14
3. Modelování klimatu .....	14
3.1 Klimatický systém Země .....	14
3.1.1 Faktory ovlivňující energetickou bilanci Země .....	16
3.1.2 Zpětné vazby v klimatickém systému .....	18
3.2 Klimatické modely .....	19
3.2.1 Modely atmosférické cirkulace (AGCM) .....	20
3.2.2 Modely oceánské cirkulace (OGCM) .....	21
3.2.3 Modely kryosféry .....	22
3.2.4 Modely zemského povrchu (LSM) .....	22
3.2.5 Propojení modelů .....	22
3.2.6 Emisní scénáře .....	23
4. Přímá vyhodnocení změn hydrologické bilance v simulacích klimatických modelů .....	25
4.1 Stručný popis a využití LSM .....	25
4.2 Typy LSM .....	26
4.3 Příklady současných LSM .....	29
4.3.1 Model JULES .....	30
4.3.2 MPI - HM .....	33
5. Modelování dopadů změn klimatu na hydrologický režim hydrologickým modelem .....	35
5.1 Využití simulací klimatických modelů .....	35
5.2 Postup modelování dopadů klimatických změn na hydrologický režim hydrologickým modelem .....	36
5.3 Bilan – model hydrologické bilance .....	37
6. Dostupná data .....	41
6.1 Projekt WATCH .....	41
6.2 Dostupné simulace klimatických modelů .....	41

PRAKTICKÁ ČÁST.....	45
7. Metodika .....	45
7.1 Zájmová povodí a jejich charakteristiky .....	45
7.1.1 Povodí Labe po město Děčín .....	45
7.1.2 Povodí Moravy po město Kroměříž.....	48
7.2 Přehled dostupných dat pro řešení projektu .....	49
7.3 Postup vyhodnocení změn hydrologické bilance .....	51
8. Výsledky .....	53
8.1 Odvození změn průtoku dle LSM .....	53
8.2 Odvození změn průtoku dle modelu Bilan.....	55
9. Diskuse.....	65
9.1 Simulace pro kontrolní období.....	65
9.1.1 Simulace pro kontrolní období v povodí Labe.....	65
9.1.2 Simulace pro kontrolní období v povodí Moravy .....	67
9.2 Simulace pro budoucí období .....	70
9.2.1 Simulace pro budoucí období v povodí Labe .....	70
9.2.2 Simulace pro budoucí období v povodí Moravy.....	74
10. Závěr .....	79
11. Literatura a použité zdroje .....	81
12. Přílohy.....	88

## Abstrakt

Problematika dostupnosti vodních zdrojů je jedním z témat, jež je ve společnosti stále častěji diskutováno. Prudký populační růst a rozmach průmyslu pozorovaný od počátku 19. století, klade stále větší nároky na světové vodní zdroje. Paradoxně právě antropogenní činnost je považována za jednu z hlavních příčin změny klimatu, jež se výrazněji projevila zejména v posledních desetiletích. Především teplotní růst, připisovaný zvyšujícím se koncentracím skleníkových plynů v atmosféře, způsobuje změny úhrnů srážek a intenzit dešťů v jednotlivých povodích. To vede již dnes v některých z nich k nedostatku vody dostupné nejen pro člověka, ale i další živé organismy. Pro odhad vývoje budoucích změn klimatu a jejich možných vlivů na hydrologický režim je často využíváno klimatických modelů. Ty nám poskytují možné výhledy změn do budoucnosti a umožňují tak přípravu, implementaci a hodnocení adaptačních opatření, která mají za cíl zmírnit negativní vlivy měnícího se klimatu. Jeho modelování však není nikterak jednoduchou záležitostí. Vždy je limitováno jeho aktuálním poznáním, a tudíž poskytuje pouze odhady možného vývoje. I přesto je dnes v této oblasti nejlepším dostupným zdrojem informací. Hlavním smyslem této práce bylo shrnout aktuální poznatky v oblasti modelování hydrologických veličin a porovnání odhadů změn hydrologické bilance získaných z modelů zemského povrchu (Land surface models – LSM) se změnami stanovenými pomocí hydrologického modelu Bilan. Cílem bylo především ověřit schopnost LSM objektivně simulovat hydrologickou bilanci. Vyhodnocením simulací celkem šesti LSM na dvou velikostně odlišných povodích ČR bylo zjištěno, že LSM jsou schopny alespoň rámcově zachytit pozorovanou sezónní proměnlivost odtoku z daných povodí. Z hlediska absolutních hodnot odtoku se však ve většině případů výrazně rozcházejí s pozorovanými daty a zpravidla udávají výrazně nižší hodnoty odtoku, než jaké byly na daných povodích pozorovány. Rovněž i z pohledu relativních změn indikují podstatně nižší pokles odtoku v budoucím období, než jaký byl stanoven s pomocí modelu Bilan. Z provedených srovnání vyplývá, že LSM z hlediska jejich současné úrovně, nejsou prozatím schopny simulovat hydrologickou bilanci a to minimálně na posuzovaných povodích v této práci.

**Klíčová slova:** Modelování klimatu, hydrologický režim, hydrologická bilance, povodí, srážky, evapotranspirace



## **Abstract**

Dilemma of water resources availability is one of the main topics, which are still more often discussed in the society. Spurt growth of the human society and boom in industry that was observed from the beginning of the 19<sup>th</sup> century continuously increase the demands on world water resources. It is paradox that anthropogenic activities are believed to be one of the main reasons of climate change observed in the last few decades. Above all, the temperature rises which are believed to be connected to the rise of greenhouse gases concentration in the atmosphere cause the changes in the precipitation amount and their intensity in the particular catchments. This leads at some catchments to the scarcity of water not only for human but also for another organism. For estimation of the future climate changes and their impacts on hydrological regime simulations of climate models are often used. These simulations give us the possible view of the future changes and enable us for the preparation of the implementation and evaluation of the adaptation steps, the main focus of which is to reduce negative influences of the climate change. But the climate modeling is not an easy thing at all. It is always limited by the actual experiences and hence can give us only estimation of the future evolution. Nevertheless the modeling of climate is the best source of the information today. The main objective of this work was to summarize the actual knowledge in the field of hydrological variables modeling and comparison of estimations of water balance changes obtained from the simulations of the Land surface models and from the simulations of hydrological model Bilan. The aim of this work was to verify the ability of the land surface models detachedly simulate the water balance. Based on evaluation of simulation in total of six land surface models on the two catchments in the Czech Republic it was found out that the land surface models are able at least in general simulate the seasonal variability of the runoff from the observed catchments. But in term of absolute runoff the simulations of land surface models are mostly out of observed values and in the majority of cases are the simulated values lower than the observed data. As well as for the relative changes the land surface models indicate considerably lower decline of runoff for the future period in comparison with decline rated with the Bilan. Based on the evaluations that were done it is evident that the Land surface models from the point of their actual level are not able simulate the water balance at least at the considered catchments.

**Key words:** Modeling of climate, hydrological regime, water balance, catchment, precipitation, evapotranspiration

## 1. Úvod

Země od svého vzniku prošla složitým vývojem, v jehož důsledku došlo k vytvoření křehké rovnováhy v rámci jednotlivých složek přírody. Za jednu z nejzranitelnějších složek lze považovat právě hydrosféru, na níž jsou vázány veškeré ekosystémy a život na Zemi. Jejich zranitelnost mimo jiné souvisí s pozvolným vzestupem průměrných globálních teplot, jež v uplynulém století vzrostly o 0,6°C (Kurc 2007). Tento vzestup je převážně připisován antropogenní činnosti, jejíž vliv se začal výrazněji projevovat s nástupem průmyslové revoluce. Zejména neustálé zvyšování koncentrací skleníkových plynů v popředí s CO<sub>2</sub> je považováno za jednu z hlavních příčin růstu globálních teplot. Předpokládá se, že tento teplotní vzestup a především pak změny rozložení teplot na Zemi mají určující vliv na globální proudění mořských a vzdušných mas a tedy i na hydrologický režim a složky vodní bilance. Především změny srážkových úhrnů a změny intenzit dešťů jsou hlavními faktory určujícími hydrologickou bilanci jednotlivých povodí. V některých z nich jsou tak již dnes patrně v důsledku těchto změn zaznamenávány poklesy hladin podzemní vody. Tyto poklesy jsou doprovázeny nedostatkem vody v některých povodích, kde mají za následek snížení stavu či dokonce v extrémních případech vysychání říčních koryt a nádrží (Hanel a kol. 2011). Tyto negativní dopady je tedy nutné vzít v úvahu a začlenit je do vodohospodářských strategií a rozhodování jak na úrovni národní, evropské tak i celosvětové. Z toho důvodu jsou v posledních letech prováděny výzkumy zabývající se zpřesněním možných důsledků způsobených změnami klimatu na hydrologický režim. Tyto výzkumy jsou kromě zkoumání možných důsledků klimatické změny rovněž zaměřeny na návrhy adaptačních opatření, jež by byla schopna zmírnit nepříznivé dopady těchto změn na hydrologický režim zejména v nejhůře postižených povodích. Jednou z potenciálních možností jak odhadnout pravděpodobný vývoj, na jehož základě je možno přijmout včas účinná adaptační opatření a reagovat tak na možné změny hydrologické bilance způsobené měnícím se klimatem, je využití výstupů klimatických modelů. Ty je následně možno porovnávat se simulacemi hydrologických modelů a pozorovanými veličinami hydrologické bilance v minulosti, což umožňuje částečné ověření kvality a správnosti jejich výstupních hodnot. Především pak modely zemského povrchu (LSMs) představují slibnou možnost simulace současné a budoucí hydrologické bilance bez podrobného hydrologického modelování pomocí hydrologických

modelů. Avšak vzhledem k pochybnostem o využitelnosti výstupů LSMs pro hydrologické modelování je nutno tuto možnost dále ověřit.

## **2. Cíle práce**

Cílem práce je porovnání odhadů změn hydrologické bilance odvozených z modelů zemského povrchu (Land surface models – LSM) se změnami získanými na základě simulací hydrologického modelu. Pro porovnání budou použity výstupy LSM zveřejněné v rámci projektu WATCH (Water and global change) a pozorované řady srážek, teploty a průtoků pro vybraná povodí České republiky v měsíčním kroku. Práce ověří schopnost LSM simulovat hydrologickou bilanci a její změny.

# TEORETICKÁ ČÁST

## 3. Modelování klimatu

### 3.1 Klimatický systém Země

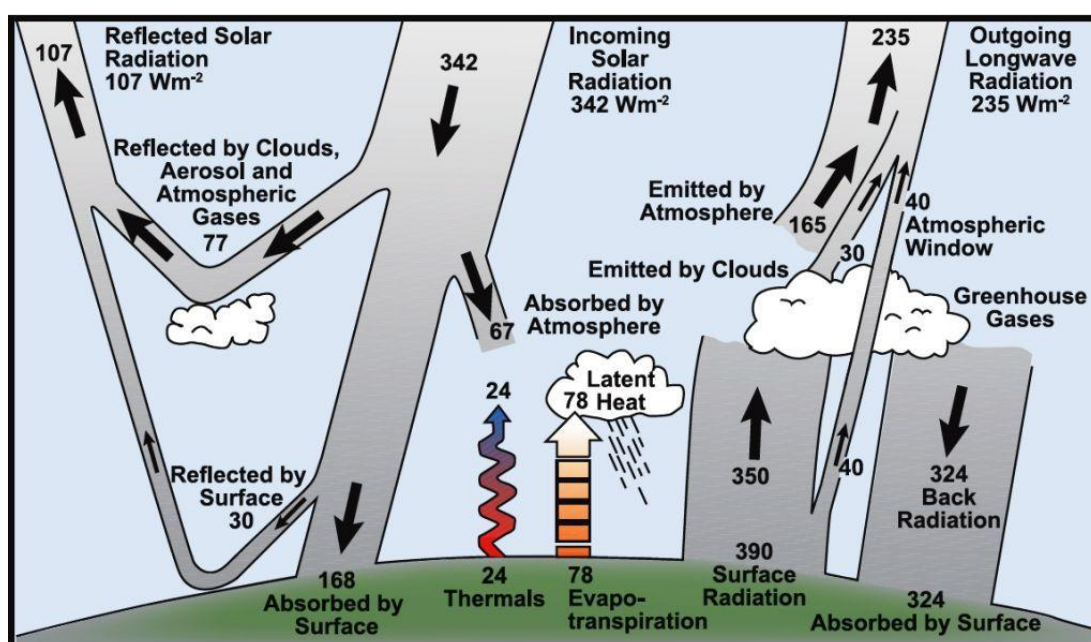
V souvislosti s výrazem klimatický systém se setkáváme se dvěma základními pojmy, kterými jsou *počasí* a *klima*. Baede a kol. (2001) definuje *počasí* jako neustále se měnící stav atmosféry, zahrnující zejména změny teplot, vzdušné proudění, tvorbu oblačnosti a srážky. Dynamika atmosféry je ovlivňována především množstvím sluneční energie dotující jednotlivé části zemského povrchu. Jeho zakřivení je příčinou nerovnoměrného zahřívání, které v atmosféře způsobuje tlakové rozdíly. Ty pak iniciují tzv. *globální proudění vzduchu* ve směru od rovníku k pólům a zpět. Proudění vzduchu však nemá přímý směr, nýbrž je stáčeno vlivem tzv. *Coriolisovy síly*, vyvolané účinky zemské rotace. Na severní polokouli je toto proudění stáčeno směrem na východ, naopak na jižní na západ (Jones a Wells 2006). Vzhledem ke složitosti a množství vlivů formujících počasí jsou možnosti jeho předpovědi pro delší časový horizont značně omezené. Jeho reálná předpověď se zpravidla omezuje jen na období několika dní (Baede a kol. 2001).

*Klima* lze vnímat jako průměrné počasí, charakteristické pro dané časové období a určitou oblast. Jeho podoba je ovlivňována celou řadou faktorů, jako jsou např. přítomnost pohoří, vzdálenosti oceánů či rozsáhlých vodních ploch, nebo typem vegetačního krytu. V chování klimatu lze rovněž pozorovat cyklický vývoj ať už nepatrný z roku na rok, či poměrně výrazný v řádech tisíců let související s tzv. Milankovičovými cykly (doby ledové), nebo dokonce v řádech milionů let v důsledku kontinentálního driftu (Baede a kol. 2001; Beaty 1978; Cílek 1995).

Klimatický systém Země je tvořen souborem pěti složek a to atmosférou, hydrosférou, kryosférou, zemským povrchem a biosférou. Mezi těmito složkami dochází stále k vzájemným interakcím. Ty jsou iniciovány a ovlivňovány jednak externími vlivy (změny složení atmosféry, vulkanické erupce, změny využití krajiny, oscilace sluneční aktivity atd.), tak i vlastní dynamikou. Hlavní hybnou silou celého systému je však krátkovlnné sluneční záření (*obr. 1*). Jeho množství dopadající každou vteřinou na horní vrstvu atmosféry přikloněné ke Slunci má velikost přibližně  $1370 \text{ W m}^{-2}$ . V průměru pro celou planetu je pak tato hodnota cca.  $342 \text{ W m}^{-2}$ . Téměř 31 % tohoto záření, je bezprostředně odraženo zpět do vesmíru. Tento odraz je

způsoben z větší části oblačností, aerosoly a plyny v atmosféře (cca 72 %). Zbytek tohoto záření je odražen převážně světlejšími částmi zemského povrchu (pouště, sněhový pokryv, ledovce atp.). Zbývající podíl energie (cca  $235 \text{ W m}^{-2}$ ), který není odražen, je z části pohlcen atmosférou (cca  $67 \text{ W m}^{-2}$ ), avšak jeho větší část (cca  $168 \text{ W m}^{-2}$ ) přispívá k zahřívání pevnin a oceánů (Baede a kol. 2001; Le Treut a kol. 2007).

Pro udržení rovnováhy celého klimatického systému, musí platit, že množství získané energie (cca  $235 \text{ W m}^{-2}$ ) musí odpovídat energii zpět vyzářené do vesmíru. Tato výměna naopak probíhá v režimu dlouhovlnného záření. Pokud však vezmeme v úvahu, že Země nazpět vyzáří množství energie odpovídající hodnotě  $235 \text{ W m}^{-2}$ , měla by být její teplota při zemském povrchu pouhých  $-19 \text{ }^\circ\text{C}$ . Současná průměrná teplota však dosahuje  $+14 \text{ }^\circ\text{C}$ . To je způsobeno tím, že dlouhovlnné záření emitované povrchem je absorbováno skleníkovými plyny v atmosféře a následně vyzářováno všemi směry, tedy i zpět k zemskému povrchu. Tento jev je označován pojmem skleníkový efekt. Množství energie uvolněné skleníkovými plyny zpět do vesmíru je odhadováno na  $165 \text{ W m}^{-2}$ . Další část (cca  $30 \text{ W m}^{-2}$ ) je zpět do vesmíru vyzářena oblačností a zbylé množství (cca  $40 \text{ W m}^{-2}$ ) transparentní složky dlouhovlnného záření opouští zemi přímo bez zachycení skleníkovými plyny. Tento jev je označován pojmem atmosférické okno (Baede a kol. 2001).



Obr. 1: Energetická bilance Země (ilustrace převzata z Le Treut a kol. 2007).

### 3.1.1 Faktory ovlivňující energetickou bilanci Země

Na energetickou bilanci Země působí celá řada faktorů. Ty udržují pozemské ekosystémy v rovnováze a i poměrně malá změna jejich vlastností může mít významný vliv na život na Zemi. Mezi nejdůležitější faktory lze zahrnout:

#### 1. Skleníkové plyny.

Bez skleníkových plynů v atmosféře by život na Zemi nebyl vůbec možný. Jejich přítomnost zde zajišťuje optimální teplotní podmínky. Mezi významné skleníkové plyny patří oxid uhličitý, metan, oxidy dusíku a ozón. Jejich poměr v suchém vzduchu činí pouhých 0,1% celkového objemu atmosféry. Nejhojnějším skleníkovým plynem je pak vodní pára. Její zastoupení v atmosféře je značně proměnlivé, v průměru však činí přibližně 1 % jejího celkového objemu. Křehká rovnováha udržovaná skleníkovými plyny je však v důsledku antropogenní činnosti stále více narušována (Baede a kol. 2001). V průběhu posledních sta let je zaznamenáván pozvolný růst globálních teplot. Ten je převážně přisuzován vlivu stoupajících koncentrací  $\text{CO}_2$ , které jsou do atmosféry uvolňovány v důsledku rostoucí spotřeby fosilních paliv (první kdo na tuto skutečnost upozornil, byl Callendar 1938). Na růstu koncentrací  $\text{CO}_2$  se rovněž v menší míře podílí intenzivní způsoby zemědělské výroby a odlesnění rozsáhlých ploch (Paustian a kol. 1998).

#### 2. Oblačnost.

Poměrně zajímavou úlohu v celé bilanci má i oblačnost, která však nemá zcela jednoznačný vliv. Na jedné straně odráží příchozí krátkovlnné záření a ochlazuje tak atmosféru a na druhé straně brání úniku dlouhovlnného záření, čímž přispívá k jejímu zahřívání. Vliv oblačnosti je pak do značné míry závislý na jejím vertikálním rozvrstvení. Nízká oblačnost vede převážně k ochlazení naopak vysoká k zahřívání Země (McGuffie a Henderson-Sellers 2001). NASA (2005) dále uvádí, že množství odražené energie oblačností je spíše závislé na její optické tloušťce než na její výšce v atmosféře. Souhrnně pak uvádí, že výsledný vliv oblačnosti na energetickou bilanci Země je dán plochou zastíněného povrchu, její optickou tloušťkou, výškou v atmosféře a velikostí a množstvím vodních a ledových částic v ní



obsažených. Le Treut a kol. (2007) uvádí, že ve výsledku má oblačnost spíše ochlazující charakter.

### 3. Aerosoly.

Dalším faktorem ovlivňujícím energetickou bilanci Země je množství aerosolů v atmosféře. Jejich výskyt zvyšuje např. množství kondenzačních jader nezbytných pro tvorbu srážek. Velikost těchto mikroskopických částic je řádově v setinách až desetinách mikrometrů. Původ aerosolů může být jednak přirozený (např. částičky mořské soli tvořící se nad oceány nebo v důsledku sopečné činnosti) nebo antropogenní (saze, sulfáty, organický uhlík, prach atp.) produkovaný např. průmyslovou a zemědělskou činností. Aerosoly jednak přímo odrážejí krátkovlnné záření, ale i jej absorbují a následně vyzařují. Jungwirth (2003) uvádí, že aerosoly v atmosféře mají podobně jako oblačnost spíše ochlazující charakter a jsou dle odhadů schopny v závislosti na jejich koncentraci kompenzovat až z 50 % účinky skleníkových plynů vyprodukovaných lidskou činností. Dále uvádí, že jejich zvýšené množství v atmosféře znamená i více kondenzačních jader. Ta při stejném množství vodních par vytvoří více vodních kapek s menší velikostí. Menší kapky pak mají tendenci setrvat v mracích, což má za následek úbytek srážek (Jungwirth 2003).

### 4. Využití krajiny.

Změny ve využití krajiny a jejich vliv jsou rovněž dávány do souvislosti se změnami energetické bilance a tedy i změnou klimatu. Významný vliv je připisován zejména zemědělské činnosti (tvorba velkých polních lánů), lesnické činnosti (velkoplošná odlesnění) a rovněž urbanizaci rozsáhlých území (městské horké ostrovy) či povrchové těžbě nerostů. Tyto zásahy související se změnou vegetačního krytu mění zemské albedo (odrazivost Země) (Baede a kol. 2001). Ray a kol. (2002) rovněž potvrzuje, že rozsáhlá odlesnění a zemědělská činnost způsobují změny toků energie mezi povrchem a atmosférou a ovlivňují tak významně regionální klima. Především horké stoupavé proudy vyskytující se v letních měsících nad polními lány a odlesněnými oblastmi způsobují vytlačení oblačnosti nad takto pozměněnou krajinou. To způsobuje rovněž změny v rozložení srážek v krajině. V letních

měsících se srážky vyskytují převážně v oblastech s přirozenou vegetací, naopak a zimních měsících převažují srážky nad zemědělskou a odlesněnou krajinou.

### 3.1.2 Zpětné vazby v klimatickém systému

Nedílnou součástí klimatického systému Země jsou tzv. *zpětné vazby*. Ty působí mezi jeho jednotlivými složkami a tvoří tak uzavřený a provázaný celek. Pokud však vlivem externích faktorů dojde k ovlivnění některé ze složek systému, působí dále tyto zpětné vazby na složky další. Jejich působením tak může dojít k zesílení počátečního vlivu (pozitivní zpětná vazba) nebo naopak k jeho oslabení (negativní zpětná vazba). Metelka a Tolasz (2009) uvádí, že zpětné vazby mohou být příčinou i nevratných klimatických změn, kdy se prakticky od určitého zlomového okamžiku začne celý systém samovolně a bez dalších podnětů přetvářet. Zároveň rychlost těchto změn může být velmi rychlá a to pravděpodobně jen v řádech desítek let. McGuffie a Henderson-Sellers (2001) uvádí následující rozdělení významných zpětných vazeb:

#### 1. Zpětná vazba povrchu.

Jedná se o reakci zemského povrchu pokrytého sněhem a ledem na změny v množství dopadající sluneční energie. Její nárůst dotující zemský povrch může být způsoben např. zvýšením koncentrací skleníkových plynů. Intenzivnější zahřívání zemského povrchu pak vede k rychlejšímu odtávání sněhové a ledové příkrývky, čímž dochází ke zmenšení její plochy. Tím se však mění i celková odrazivost zemského povrchu, protože tmavší podklad dříve pokrytý světlým sněhem a ledem odrazí méně energie. To následně vede k dalšímu zvyšování teploty a ještě rychlejšímu odtávání sněhu a ledu. Výše popsaná pozitivní zpětná vazba bývá rovněž implementována do klimatických modelů a je jednou z klíčových příčin jejich citlivosti.

#### 2. Zpětná vazba atmosféry.

Tato vazba zahrnuje např. vztah teploty a vodní páry, která je nejvlivnějším skleníkovým plynem v atmosféře. Celý efekt je pak následující. Se stoupající teplotou rovněž narůstá i množství vodních par v atmosféře. Ty umožňují zároveň absorbovat větší množství energie, čímž se atmosféra stává teplejší. Rovněž jako v předešlém případě jde o pozitivní zpětnou vazbu.

Další vztahem je vzájemná závislost oblačnosti a teploty. Tento vztah je však závislý na vlastnostech oblačnosti a jejím rozmístění (viz. kapitola 3.1.1) Právě oblačnost je jedním z hlavních pramenů nejistot vstupujících do klimatických modelů.

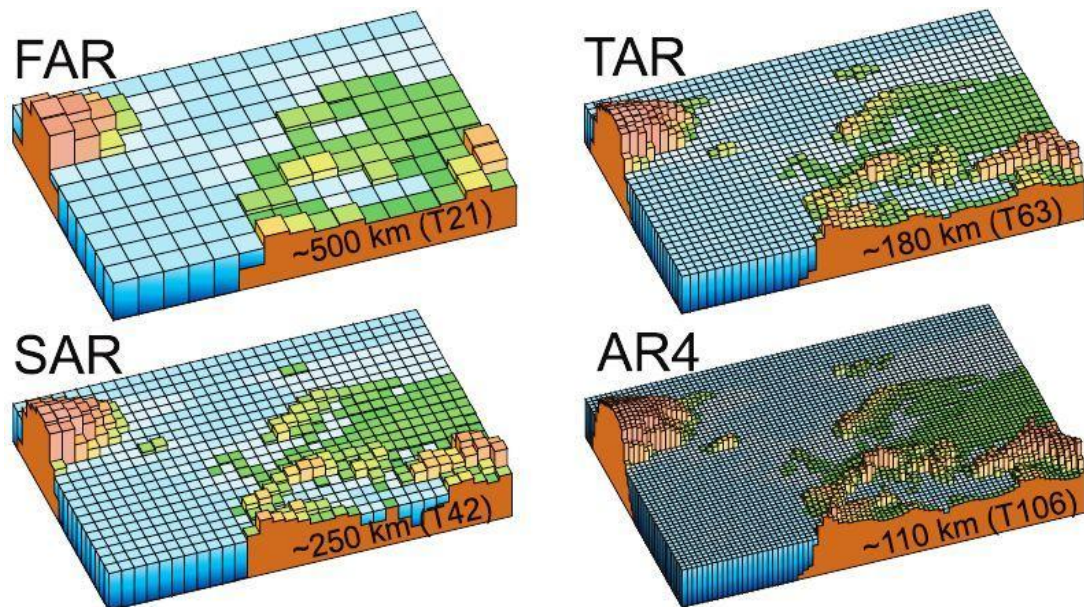
### 3. Biogenická zpětná vazba.

Růst koncentrací oxidu uhličitého a jím vyvolaný vzestup globálních teplot urychluje růst rostlin a zvětrávání silikátových hornin. Oba tyto procesy však zvyšují rychlost poutání uhlíku a působí tak protichůdným směrem. Jedná se tedy o negativní zpětnou vazbu.

## 3.2 Klimatické modely

Klimatický model lze chápat jako matematické vyjádření fyzikálních zákonitostí popisujících chování klimatického systému. Vývoj klimatických modelů je úzce spjat s modely pro předpověď počasí (Randall a kol. 2007). Klimatické modely jsou zpravidla tvořeny výpočetními buňkami tzv. *gridboxy*, v nichž se průběžně počítá např. teplota, tlak vzduchu, relativní vlhkost, množství dostupné vody v mracích pro srážky atp. V průběhu simulací těchto modelů jsou pak řešeny vzájemné výměny stavových veličin mezi jednotlivými výpočetními buňkami, jejichž velikost je dána vertikálním a horizontálním prostorovým rozlišením modelů (*obr. 2*). Toto rozlišení je zároveň jedním z faktorů omezujících jejich schopnost simulovat minulé a především pak budoucí klima. Prostorové rozlišení modelů je limitováno zejména úrovní počítačové techniky, neboť s rostoucím rozlišením narůstají i nároky na výpočetní výkon. Klimatické modely lze z hlediska velikosti řešené oblasti dělit na regionální klimatické modely (RCM) a Globální klimatické modely (GCM). Vzhledem k rozdílné velikosti řešeného území je i rozlišení těchto modelů rozdílné. Horizontální rozlišení současných GCM se pohybuje v rozmezí stovek až desítek a RCM v rozmezí desítek až jednotek kilometrů. Rozlišení ve vertikálním směru bývá u těchto modelů řádově větší. Termín globální klimatický model (GCM – Global climate model) nebo také (Global circulation model) je obvykle používán pro spojený model atmosféry a oceánu, zpravidla zahrnující i model zemského povrchu a kryosféry. Někdy se pro zdůraznění toho, že se jedná o propojený model atmosférické a oceánské cirkulace používá zkratka AOGCM

(Atmosphere-ocean GCM). Stěžejním prvkem těchto modelů jsou tzv. *základní rovnice* (primitive equations) případně rovnice z nich vycházející, dle kterých je řešena výměna energie a hmoty v klimatickém systému. V každé výpočetní buňce jsou tak řešeny procesy zachování hybnosti, hmoty a energie sledovaných veličin. Výpočet hodnot v těchto modelech je realizován řádově v desítkách až jednotkách minut. Důležitým prvkem klimatických modelů jsou tzv. *parametrizace procesů*. Nutnost jejich použití je dána vlastnostmi některých procesů. Ty jednak mohou probíhat v kratším čase, než v jakém je realizován časový krok výpočtu modelu, nebo se mohou projevovat v menším měřítku, než je prostorové rozlišení daného modelu. Tyto procesy je pak nutno parametrizovat (Bader a kol. 2008; Hanel a kol. 2011).



Obr. 2: Vývoj prostorového rozlišení generací klimatických modelů použitých v hodnoticích zprávách IPCC (IPCC Assessment Report). FAR (první hodnotící zpráva IPCC 1990), SAR (druhá hodnotící zpráva IPCC 1996), TAR (třetí hodnotící zpráva IPCC 2001), AR4 (čtvrtá hodnotící zpráva IPCC 2007). Vertikální rozlišení, jež není na modelech znázorněno, se rovněž úměrně vyvíjelo s rozlišením horizontálním. Pro FAR bylo tvořeno pouze jednou vrstvou oceánu a deseti v atmosféře. AR4 již dělí oceán i atmosféru do třiceti vrstev. (ilustrace převzata z Le Treut a kol. 2007).

### 3.2.1 Modely atmosférické cirkulace (AGCM)

Modely atmosférické cirkulace řeší pomocí základních rovnic pro ideální plyny změny stavů atmosféry v prostoru a čase. Hlavními složkami vstupujícími do těchto modelů jsou teplota, vlhkost a tlak vzduchu, vzdušné proudění a množství vody a ledu obsažené v mracích. Bader a kol. (2008) uvádí, že obvyklé rozlišení AGCM v horizontálním směru je 200 km. Hanel a kol. (2011) pak uvádí rozlišení

menší v některých případech i v řádu jen desítek kilometrů. Ve vertikálním směru je hlavní důraz kladen na nejspodnější vrstvu atmosféry do dvaceti až třiceti kilometrů výšky, jenž obsahuje více jak 95% objemu všech složek vstupujících do modelu. Samotné rozvrstvení je pak zpravidla voleno dle atmosférického tlaku vztaženého k tlaku na hladině moře. I přesto, že je tato výšková hranice považována za optimální, současné výzkumy poukazují na vhodnost jejího rozšíření o vrstvu střední atmosféry. Např. Pawson a kol. (2000) uvádí, že význam této vrstvy je dán především přítomností stratosférického ozonu (jakožto skleníkového plynu) a vlivu jeho úbytku na globální cirkulaci. Pawson a kol. (2000) dále uvádí, že střední vrstva atmosféry má významný dopad na troposférickou cirkulaci v případě vulkanických erupcí, a že zahrnutím této vrstvy do modelů lze dosáhnout přesnějších simulací. Příkladem modelu obsahujícího střední oblast atmosféry je rozšířená verze modelu ECHAM5 s horní hranicí vertikálního rozlišení v tlakové výšce 0,01 hPa, což odpovídá přibližně horní hranici mezoféry tj. přibližně 80 km (Roeckner a kol. 2003). V modelech atmosférické cirkulace musejí být rovněž z důvodu časového kroku výpočtu a malého prostorového rozlišení některé procesy parametrizovány. Jedná se např. o vliv členitosti zemského povrchu na výpočetní buňky v jeho bezprostřední blízkosti, turbulentní jevy přítomné v mezní vrstvě atmosféry, průchod krátkovlnného záření atmosférou a její zpětná schopnost absorpce dlouhovlnného záření emitovaného zemským povrchem a tvorba oblačnosti (Hanel a kol. 2011).

### **3.2.2 Modely oceánské cirkulace (OGCM)**

Podobně jako atmosférické modely tak i modely oceánské cirkulace využívají pro své simulace základních rovnic v tomto případě pro proudění nestlačitelných kapalin. Prostorové rozlišení těchto modelů je zpravidla vyšší než u modelů atmosférické cirkulace. V horizontální rovině se pohybuje kolem 100 km. Vertikální rozlišení je stejně jako u modelů atmosférických v porovnání s horizontálním rozlišením podstatně vyšší. Členění do jednotlivých vrstev je pak realizováno např. dle hloubky nebo hustoty, která se jeví jako vhodnější. Podobně jako v modelech atmosférické cirkulace i zde je nutno některé procesy parametrizovat. Jedná se např. o vzájemné míšení oceánských vrstev probíhající v malých měřítcích nebo o turbulentní jevy probíhající na přechodu oceánu s atmosférou (Bader a kol. 2008).

### **3.2.3 Modely kryosféry**

Součástí globálních klimatických modelů zpravidla bývají i modely kryosféry. Cílem těchto modelů je zachycení procesů dynamiky (pohyby ledovců) a termodynamiky (přechody tepla, tání). Prostorové rozlišení těchto modelů bývá zpravidla shodné s modely oceánské cirkulace (Bader a kol. 2008). Modely kryosféry rovněž využívají parametrizací např. při zahrnutí vlivu albeda. Jeho hodnoty jsou parametrizovány v závislosti na tloušťce ledu, výšce sněhové pokrývky a jejich zhuštění. Současné modely kryosféry vstupující do AOGCM zpravidla předpovídají mocnost ledového příkrovu a jím pokrytou plochu, výšku sněhové pokrývky, vnitřní a povrchovou teplotu a horizontální rychlost pohybu. Některé modely rovněž řeší i slanost mořského ledu (Randall a kol. 2007).

### **3.2.4 Modely zemského povrchu (LSM)**

Modely zemského povrchu mají poměrně široké uplatnění. Jsou významnou součástí regionálních a středně velkých modelů atmosférické cirkulace, jež se používají např. pro regionální simulace klimatu, předpověď počasí nebo pro sledování čistoty ovzduší. Dále jsou důležitou částí současných modelů globální atmosférické cirkulace (Chen a Dudhia 2001). Pomocí LSM jsou simulovány procesy výměny tepla mezi povrchem a atmosférou a rovněž hydrologická bilance mezi těmito dvěma složkami. Ta je zpravidla charakterizována pomocí jednoduchého schématu, kdy srážky v pevném či kapalném skupenství jsou zachyceny zčásti vegetací a zčásti dopadají na zemský povrch. Zde buď setrvávají v podobě sněhu, nebo se infiltrují do půdy a následně při jejich dostatku doplňují rezervoáry spodních vod. V případě srážek o velké intenzitě rovněž odtékají po povrchu. Modely zemského povrchu též zahrnují do svých simulací účinky vegetace, která výrazně ovlivňuje zemské albedo, evapotranspiraci a celkovou bilanci uhlíku (Hanel a kol. 2011).

### **3.2.5 Propojení modelů**

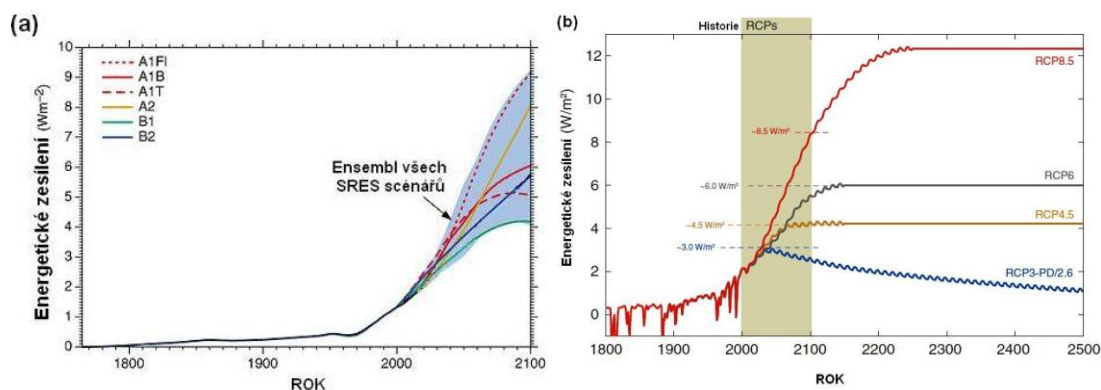
K vytvoření komplexního globálního modelu atmosférické a oceánské cirkulace je nutné, aby komponenty dílčích modelů byly vhodně v čase propojeny. Toto propojení je prováděno pomocí počítačových programů. Ty zjednodušeně v průběhu každého intervalu průměrují realizované toky energie a další proměnné, které jsou následně mezi modely sdíleny (Randall a kol. 2007). Např. z modelu

oceánské cirkulace jsou do modelu atmosféry přenášeny údaje o teplotě povrchu oceánu, množství a mocnosti ledu, výšce sněhové pokrývky a rychlosti povrchového toku. V opačném směru model atmosférické cirkulace předává modelu oceánské cirkulace např. údaje o tocích tepelné energie, množství srážek, rychlosti vzdušného proudění nebo množství krátkovlnného slunečního záření (Hanel a kol. 2011). Randall a kol. (2007) uvádí jako optimální interval propojení modelových komponent vždy jednou za 24 hodin. Při zvolení delšího intervalu mohou být některé nelineární procesy jako např. intenzita proudění větru a její vliv na mísení oceánu v důsledku nevhodného průměrování poddimenzovány. Naopak příliš krátký interval může u některých procesů znamenat nepatřičné odchylky od průměrných hodnot, jež je nutné korigovat.

### 3.2.6 Emisní scénáře

Energetická bilance Země je do značné míry ovlivňována množstvím skleníkových plynů v atmosféře. Pravděpodobně vliv antropogenní činnosti uplynulých desetiletí je hlavní příčinou jejich trvalého růstu. Pro reálnou simulaci budoucího vývoje klimatu a jeho jednotlivých složek (srážky, odtok, teplota atp.), je proto nezbytné zahrnout růst koncentrací těchto plynů do klimatického modelování. Samotný vývoj koncentrací skleníkových plynů však nelze jednoduše předpovědět a to z důvodu jeho závislosti na celosvětovém demografickém, socioekonomickém a technologickém rozvoji společnosti. Z tohoto důvodu jsou vytvářeny tzv. *emisní scénáře*, jež popisují možné varianty tohoto rozvoje a jeho vliv na vývoj koncentrací skleníkových plynů. Tyto scénáře následně vstupují do klimatických modelů a umožňují tak předvídat možné alternativy budoucího vývoje klimatu a jeho složek. Stejně jako klimatické modely tak i emisní scénáře procházejí neustálým vývojem, tak aby jejich použitím bylo dosaženo optimální predikce. V současné době je nejpoužívanější řadou emisních scénářů řada SRES (Special Report Emissions Scenarios). Ta obsahuje čtyři stejně pravděpodobné linie vývoje společnosti (*obr. 3*), označené jako A1, A2, B1, B2, na základě kterých jsou stanoveny možné varianty vývoje skleníkových plynů. Linie A1 se ještě dále dělí do tří podskupin dle typů energetických zdrojů s převažujícím využitím do budoucna. A1FI (intenzivní využívání fosilních paliv), A1B (vyvážené využití jak neobnovitelných tak obnovitelných zdrojů), a A1T (převažující využívání obnovitelných zdrojů). Řada scénářů SRES však nezohledňuje dodatečné aktivity v oblasti klimatu, jež byly

ujednány Rámcovou úmluvou OSN a Kjótským protokolem pro snížení emisí skleníkových plynů (Nakicenovic a kol 2000). I z tohoto důvodu je dnes připravována nová řada scénářů koncentrací RCP (Representative Concentration Pathways). Podobně jako v případě scénářů SRES tak i RCP budou tvořeny čtyřmi hlavními liniemi (*obr. 3*) a to: RCP8.5, RCP6, RCP4.5 a RCP3-PD (Moss a kol. 2008).



Obr. 3: Odhadované energetické zesílení způsobené vlivem změn skleníkových plynů v atmosféře dle: (a) scénářů SRES, (b) scénářů RCP. (ilustrace (a) převzata a upravena z IPCC 2001, ilustrace (b) převzata a upravena z Meinshausen a kol. 2011).

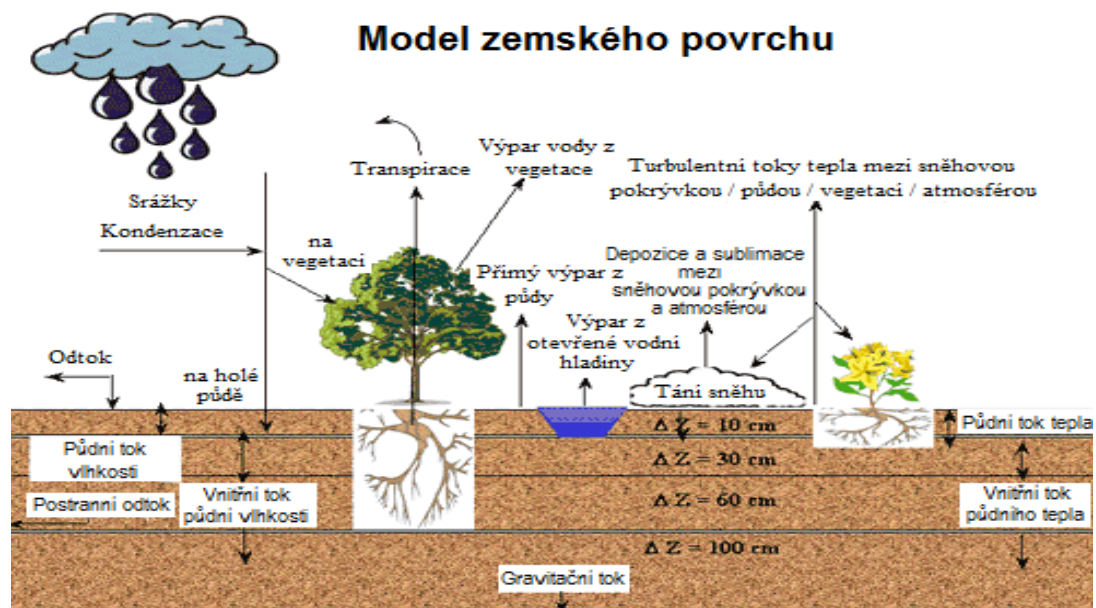


## **4. Přímá vyhodnocení změn hydrologické bilance v simulacích klimatických modelů**

### **4.1 Stručný popis a využití LSM**

Modely zemského povrchu mají v současné době poměrně široké spektrum uplatnění. Jejich rozvoj a postupné zdokonalování schopnosti jejich predikce bylo dáno poměrně rychlým vývojem kapacit výpočetní techniky, jenž umožnila aplikaci LSM pro větší plochy a delší časové úseky. Rovněž nová možnost získávání vstupních dat modelů pomocí dálkového průzkumu (remote sensing), umožnila jejich rozšíření do oblasti hydrologického modelování. V současné době nám tak poskytují cenné informace nejen v oblasti klimatu, ale rovněž umožňují simulovat procesy výměny tepla mezi zemským povrchem a nejspodnější vrstvou atmosféry (PBL - planetary boundary layer), včetně hydrologické bilance. Modely zemského povrchu též často do svých výpočtů implementují účinky vegetace ovlivňující celkovou bilanci uhlíku, zemské albedo a evapotranspiraci. Rovněž celá řada LSM zahrnuje kromě podrobného popisu vegetace i poměry v oblasti kořenové zóny rostlin a s ní související povrchový a podpovrchový odtok vody, vlhkostní poměry půdního profilu a tepelné toky energie v půdě (*obr. 4*). Tyto veličiny pak vstupují do LSM v podobě parametrů závislých na konkrétních podmínkách zkoumaných složek v místě aplikace modelu (Hanel a kol. 2011; Overgaard a kol. 2005).

Výstupními (simulovanými) hodnotami LSM pak mohou být proměnné jako je celkový odtok, povrchový odtok, podpovrchový odtok, vlhkost půdy, obsah vody ve sněhu, vlhkost povrchu, sněhové srážky, dešťové srážky, výpar, potenciální evapotranspirace, atp. (*tab. 6*). Tyto proměnné lze pak porovnávat se skutečnými hodnotami zjištěnými např. na základě přímých měření či pozorování, nebo se simulacemi jiných modelů. Jednou z možností jak hodnotit hydrologickou bilanci povodí, je porovnání hodnot celkového odtoku simulovaného pomocí LSM s odtokem simulovaným jinými modely nebo především s jeho pozorovanými hodnotami (Overgaard a kol. 2005). Velikost změn hydrologické bilance pak vyplývá z hodnocení rozdílů v simulacích jednotlivých modelů pro kontrolní a budoucí období.



Obr. 4: Typické schéma LSM znázorňující základní interakce mezi jednotlivými složkami modelu (ilustrace převzata a upravena z NCAR/RAL 2012).

## 4.2 Typy LSM

Základním prvkem LSM je řešení energetické bilance Země, kdy úhrnné množství sluneční energie dopadající na zemský povrch je opět emitováno v podobě dílčích toků energie, jako jsou toky dlouhodobného záření, latentního tepla spojeného s procesem evapotranspirace, ztrátou vlastního tepla nebo jeho difuzí do okolní půdy. Základním předpokladem pro dosažení správného výstupu modelu je jeho schopnost přesného rozdělení přicházející sluneční energie na tyto dílčí toky. Overgaard a kol. (2005) uvádí, že možnou interpretací LSM, je představa celého systému výměny energetických toků jako elektrického obvodu s řadou proměnlivých rezistencí regulujících jednotlivé toky. Vlastnosti jednotlivých rezistencí jsou pak dány místními klimatickými podmínkami, vlastnostmi zemského povrchu a strukturou vegetace. Jednotlivé LSM však neuvažují shodné množství a strukturu rezistencí.

Jedním z prvních autorů, jenž uvažoval existenci těchto rezistencí, byl Penman (1948). Ten uvažoval prozatím existenci pouze jedné ovlivňující výpar vody z mokrého zemského povrchu a její přestup do okolní atmosféry. Tato rezistence je dnes označována jako tzv. *atmosférická rezistence* (obr. 5a). Její proměnlivá velikost určuje schopnost vzduchu přenášet množství vodních par z povrchu do okolní atmosféry a je přímo závislá na aktuálních podmínkách. Pokud je zemský povrch silně zahříván, dochází k nárůstu vztlaku a tím i k výraznějšímu vertikálnímu proudění a tedy i poklesu atmosférické rezistence. Naopak při jeho chladnutí a nízké rychlosti větru dochází vlivem rovnoměrného rozvrstvení vzduchu blízko zemského

povrchu k růstu atmosférické rezistence a menšímu transportu. Tento přístup však prozatím neuvažoval změny intenzity výparu v důsledku vysychání zemského povrchu a rovněž nezahrnoval vliv vegetace regulující evapotranspirační proces v závislosti na uzavírání listových průduchů (Overgaard a kol. 2005).

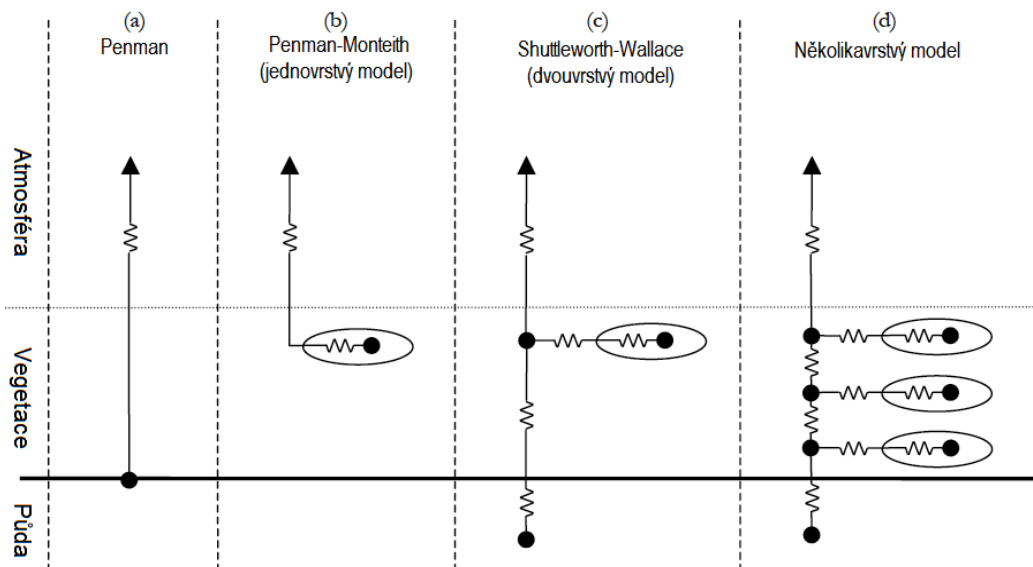
S cílem zachytit tyto změny vytvořil Monteith (1965) nový typ modelu, který rozšiřuje stávající koncepci o další povrchovou rezistenci, zahrnující vliv lokálního klimatu, vlhkostních podmínek půdy a typ vegetačního krytu. Tento model kombinující Penmanův a Monteithův přístup je označován jako „jednovrstvý model“, protože považuje zemský povrch za homogenní, kde není rozlišováno mezi výparem z volné půdy a transpirací rostlin (*obr. 5b*). Jak již bylo popsáno v kapitole 3.2, numerické modely GCM a RCM rozdělují zemský povrch pomocí mřížky na jednotlivé čtverce (grids) a právě uvnitř těchto čtverců jsou aplikovány modely zemského povrchu. Overgaard a kol. (2005) uvádí, že v důsledku toho, že jednovrstvé modely nerozlišují mezi výparem z volné půdy a transpirací rostlin bývají jejich výstupy v případě rozptýleného vegetačního pokryvu nepřesné.

Z tohoto důvodu Avissar a Pielke (1989) vyvinuli nový typ modelů, jež jsou označovány jako dlaždicové či mozaikové, které v rámci jednoho čtverce dělí tento prostor na menší části (subgrids) čistě pokryté vegetací či holou půdou. Pro jednotlivé druhy pokryvu (holá půda nebo vegetace) uvnitř těchto čtverců jsou pak použity jednovrstvé mikrometeorologické modely odhadující teplotu povrchu, vlhkost a toky tepla pro každý druh pokryvu zvlášť (Avissar a Pielke 1989). Tento typ modelů však neuvažuje vzájemnou interakci toků získaných z jednotlivých „dlaždic“. Navíc v případech, kdy se na povrchu nachází souvislá, avšak rozptýlená vegetace dochází mezi povrchem a touto vegetací k vzájemné výměně tepla a vody, jenž dlaždicový typ jednovrstvého modelu není schopen zachytit (Overgaard a kol. 2005).

Vzhledem k této skutečnosti byly vyvinuty tzv. dvouvrstvé modely, již zahrnující vliv interakcí mezi půdou a vegetačním krytem (*obr. 5c*). V současnosti běžně využívané schéma dvouvrstvého modelu navrhli Shuttleworth a Wallace (1985). Toto schéma uvažuje existenci povrchové rezistence řídící výpar z půdního horizontu a existenci rezistence závislé na schopnostech vegetace regulovat svou výměnu látek s okolní atmosférou pomocí změn velikosti průduchů listové plochy. Pro zachycení interakcí probíhajících mezi půdou a vegetací je pak u těchto modelů uvažována přítomnost jakéhosi středního proudění mezi těmito dvěma složkami tzv.

„mean canopy air-stream“. Overgaard a kol. (2005) uvádí, že modely tohoto typu zahrnují zpravidla navíc tři aerodynamické rezistence ovlivňující toky tepla a vody. První rezistence je uvažována mezi půdním povrchem a mean canopy air-stream, druhá pak mezi listovou plochou vegetace a mean canopy air-stream a poslední mezi mean canopy air-stream a okolní atmosférou.

Posledním typem LSM jsou několikavrstvé modely (*obr. 5d*). Tyto modely se od dvouvrstvých LSM liší propracovanou komplexní strukturou vertikálního členění vegetačního krytu. Ten je zpravidla dělen do několika vrstev v závislosti na patrech vegetace. Pro jednotlivá patra jsou počítány výměny tepla a vody, které jsou následně použity pro výpočet celkových hodnot toků pro celou výšku vegetačního krytu (Overgaard a kol. 2005). Komplexnost několikavrstvých modelů je však zpravidla rozdílná. Gu a kol. (1999) dělí tyto modely na tzv. kompletní a nekompletní. Nekompletní několikavrstvé modely zohledňují ve svých výpočtech rozdíly v množství slunečního záření a rychlosti vzdušného proudění v závislosti na vertikálním členění vegetace uvnitř vegetačního krytu, avšak složky jako jsou koncentrace CO<sub>2</sub>, teplota vzduchu nebo parciální tlak vodních par považují v rámci jednotlivých pater vegetace za konstantní. Kompletní modely pak v rámci jednotlivých pater rozlišují změny i těchto složek. Důvodem je přesnější popis procesů probíhajících uvnitř vegetačního krytu a tím i snaha o lepší přesnost odhadu modelu. Overgaard a kol. (2005) uvádí, že aplikace několikavrstvých LSM vyžaduje pro každou uvažovanou vrstvu modelu poměrně podrobný popis struktury vegetace, její fyziologie, proudění vzduchu atd. I přes snahy o neustálé zpřesňování predikce několikavrstvých LSM se tyto modely ukazují být pro účely hydrologického modelování nevhodné a to z několika důvodů. Jedním z nich je potřeba velkého množství parametrů vstupujících do modelu, jejichž získání je značně obtížné. Další překážkou v použití je i jejich vysoká výpočetní náročnost a jako poslední důvod lze uvést časté nepřesnosti v odhadech těchto modelů. Tyto nepřesnosti či dokonce selhání několikavrstvých modelů jsou způsobené právě rozčleněním vegetačního krytu na vrstvy, ve kterých jsou sledovány jednotlivé toky odděleně. Ve skutečnosti však probíhá výměna tepla a vody kontinuálně v celé výšce vegetačního krytu (Overgaard a kol. 2005).



Obr. 5: Typy modelů znázorněné pomocí rezistencí. (ilustrace převzata a upravena z Overgaard a kol. 2005).

### 4.3 Příklady současných LSM

Dnes již existuje celá řada modelů zemského povrchu. Jako příklad lze uvést (Clark a kol. 2009):

- JULES: Joint UK Land Environment Simulator,
- ORCHIDEE: ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms,
- VIC: Variable infiltration Capacity model
- MPI-HM: Max-Plank Institute Hydrology Model
- HTESSEL: Hydrology-Tiled ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Scheme for Surface Exchange over Land

Hlavním smyslem jejich vývoje se v průběhu posledních let stala snaha o zachycení vlivů antropogenní činnosti působících na globální hydrologický cyklus a s ním související dostupnost vodních zdrojů. Mezi významné antropogenní faktory poprvé implementované do modelu JULES patří např. vliv zavlažování nebo efekt přehradních nádrží a uměle vytvořených rezervoárů. Významnou možností vyvíjenou v rámci modelu VIC je rovněž začlenění vlivu teploty vody do schématu modelu. Tento prvek by měl v budoucnu umožnit simulaci vývoje teplot recipientů způsobené klimatickou změnou a předpovědět tak dopady těchto změn na ekologii a průmyslové využití vodních zdrojů (Polcher a kol. 2011).

### 4.3.1 Model JULES

Model JULES je tzv. dlaždicový typ LSM. Tento model umožňuje simulovat hydrologické podmínky pro celkem 9 typů zemského povrchu obsahujících i pět typů vegetace v rámci jedné modelové výpočetní buňky a to pro: opadavé lesy, jehličnaté lesy, travní porosty, tropické travní porosty, křovinné porosty, městskou zástavbu, vnitrozemské vodní útvary, holou půdu a ledový pokryv (JCHMR 2012; Polcher a kol. 2011). Rozlišení tohoto modelu je  $0,5^\circ$ . Vzhledem k tomu, že jde o dlaždicový typ modelu, je energetická bilance řešena pro každý typ zemského povrchu odděleně. Původní koncepce modelu uvažovala shodné množství půdní vlhkosti v rámci jedné výpočetní buňky, což neumožňovalo dostatečně přesnou simulaci v zemědělských oblastech s přítomností umělých závlah. Z toho důvodu byl model JULES rozšířen o zavlažovací model poskytující dvě odlišné sady zásob půdní vlhkosti v rámci jedné výpočetní buňky v závislosti na tom, zda jde o uměle zavlažovanou půdu či nikoliv. Každá sada pak zachycuje pohyby půdní vlhkosti ve čtyřech vrstvách. Modelování zásob půdní vlhkosti vychází z předpokladu, že v uměle zavlažovaných oblastech se půdní vlhkost pohybuje na horní hranici, kdy rostliny nejsou vystaveny nedostatku vody po dobu delší než jeden den. Výpar v uměle zavlažovaných oblastech tak dosahuje přibližně potenciálního výparu. Spolu s procesem zavlažování byl rovněž do modelu JULES implementován kalendář simulující předpokládaný růst zemědělských plodin v závislosti na dosažení určitého množství srážek a teplot. Tato funkce tak umožňuje přizpůsobit simulaci modelu aktuálním podmínkám v závislosti na měnícím se pokryvu zemského povrchu. Určitým omezením modelu je možnost simulace růstu pouze jedné sklizně během roku. Model JULES rovněž umožňuje simulovat průtok vody v říčních sítích a nově i funkci přehradních nádrží, kdy je dle účelu nádrže získaného z databáze Global Reservoir and Dam obsahující informace o celkem 6862 nádržích (Lehner a kol. 2011) kalkulována potřeba vody jak pro zadržení a následné závlahy, tak i pro dostatečný průtok pod přehradou (Polcher a kol. 2011). Množství vody potřebné pro zavlažování je v rámci každé výpočetní buňky jednou denně přepočítáváno s tím, že model přednostně využívá vodních zásob z říčního koryta a následně v případě nutnosti i z rezervoáru přehradní nádrže. Polcher a kol. (2011) uvádí, že zahrnutím procesu umělých závlah z vodních toků a přehradních nádrží je jednou z hlavních předností modelu JULES.

## Vegetace

Výměna  $\text{CO}_2$  a vodních par probíhající mezi vegetací a atmosférou je realizována prostřednictvím listových průduchů. V souvislosti s touto výměnou hovoříme o tzv. vodivosti listových průduchů. Tato vodivost je ovlivněna především potřebou vegetace doplnit zásoby vody či  $\text{CO}_2$  a je úměrná rozdílu obsahů obou látek v daných složkách. Mění se vodivost ovlivňuje rychlost výměny daných látek a tím i rychlost procesu fotosyntézy. Ta je dále limitována průměrným množstvím fotosynteticky aktivní radiace dosahující vegetačního krytu a maximálním poměrem karboxylace enzymu Rubisco. Velikost výměny  $\text{CO}_2$  a vodních par je pak úměrná velikosti vegetačního krytu a faktory limitující tento proces jsou v celé výšce vegetačního krytu považovány za konstantní. Výsledná vodivost vegetačního krytu a celková intenzita procesu fotosyntézy je v modelu přímo kalkulována dle indexu listové plochy vegetace LAI (leaf area index). Hodnota čisté fotosyntézy je pak získána jako rozdíl hrubé fotosyntézy vyjadřující množství  $\text{CO}_2$  zpracovaného enzymy při karboxylaci a dýchání rostlin při kterém dochází naopak k uvolňování  $\text{CO}_2$ . V rámci modelu JULES je dostupná i alternativa, kdy vegetační kryt je rozdělen do jednotlivých vrstev a vodivost listových průduchů a procesy fotosyntézy jsou kalkulovány pro dané vrstvy odděleně v závislosti na množství fotosynteticky aktivní radiace zachycené jednotlivými vrstvami vegetačního krytu. Uvažována je absorpce fotosynteticky aktivní radiace i její ztráty způsobené rozptylem jak pro přímo dopadající tak i difúzní záření odděleně. V modelu je rovněž zohledněn i úhel dopadu sluneční radiace v závislosti na zeměpisné šířce, převažujícím sklonu listové plochy a schopnosti vegetace zachytit fotosynteticky aktivní radiaci o různých vlnových délkách (400 – 700 nm). Velikost výměn  $\text{CO}_2$  mezi atmosférou a vegetací související s procesy fotosyntézy a dýcháním rostlin jsou obvykle aktualizovány jednou za půl hodiny, což představuje obvyklý krok modelu. Vývoj jednotlivých typů vegetace je pak v rámci JULES aktualizován v intervalu deset dní. Model JULES též zahrnuje parametry vyjadřující minimální a maximální možný index listové plochy (LAI) dle typu vegetace a tzv. vyvážený index listové plochy odpovídající stavu vegetace zcela pokryté listy. Aktuální index listové plochy je závislý na vyváženém indexu listové plochy a fenologickém stavu vegetace vycházejícího z poměru opadlých a nově přirostlých listů. Tento poměr je vyjádřen jako funkce teploty, kdy s jejím růstem stoupá i mortalita listů. Fenologický stav vegetace je pak denně aktualizován (JCHMR 2012).

## **Půdní procesy**

Model JULES využívá pro kalkulace toků tepla mezi jednotlivými půdními zónami tzv. difúzní rovnici doplněnou o půdní hydrologický modul. Ten zahrnuje fázové změny vody v půdě a s nimi související toky latentního tepla a termální vlastnosti půdy závislé na obsahu půdní vlhkosti v jejích všech skupenstvích.

Celkový obsah půdní vlhkosti v dané vrstvě je vždy zvyšován půdními toky z nadložní vrstvy. Toky vlhkosti jsou dány vlastnostmi půdního substrátu v jednotlivých vrstvách a jsou závislé na tzv. hydraulické vodivosti definované Darcyho rovnicí a schopností půdy pojmout určité množství této vlhkosti. Vlhkost jednotlivých vrstev je rovněž ovlivňována výparem z nejsvrchnější půdní vrstvy, jenž je závislý na množství dostupné vlhkosti a hustotě kořenů vegetace.

Zásoba uhlíku v půdě je doplňována opadem rostlinných částí a naopak redukována mikrobiálními procesy probíhajícími v půdě. Intenzita těchto procesů je závislá na půdní vlhkosti. Svého maxima dosahuje v případě optimální hodnoty půdní vlhkosti. Naopak nedostatečná či nadměrná vlhkost tyto procesy zpomaluje. Celkový opad rostlinných částí dané plochy je pak vyjádřen jako vážený průměr dle jednotlivých funkčních typů vegetace (JCHMR 2012).

## **Hydrologie**

Hydrologie v rámci modelu JULES využívá schématu, kdy srážky dosahující zemského povrchu jsou zčásti zachyceny vegetací a zčásti dopadají na půdní povrch. Zde se infiltrují nebo v případě jejich nadbytku rovněž tvoří povrchový odtok. Hydrologický proces je v rámci JULES řešen pro jednotlivé dlaždice odděleně. Základem je předpoklad, že dešťové srážky jsou v dané ploše rozloženy exponenciálně a v případě konvekčních dešťů je předpokládáno, že pokrývají pouze tři desetiny plochy. Taková situace nastává například při slabém mrholení, kdy srážky dopadající na zemský povrch jsou zachyceny z velké části vegetací a následně odpařeny zpět do atmosféry (JCHMR 2012).

## **Zemské albedo**

Zemská odrazivost je v rámci JULES definována buď jako samostatná hodnota pro všechny skupiny povrchu nebo jako spektrální hodnota. V případě použití samostatných hodnot se hodnoty odrazivosti mění v závislosti na geografické poloze a zbarvení půdy. V případě sněhové pokrývky je uvažováno i její stárnutí, kdy se její



odrazivost snižuje při zvýšení teploty nad  $-2^{\circ}\text{C}$ . Pro určení hodnoty odrazivosti vegetace je pak uplatňován spektrální přístup, kdy pro každý typ vegetace je počítána hodnota odrazivosti jak pro přímo dopadající tak i difúzní záření (JCHMR 2012).

### **Energetická bilance**

Energetická bilance povrchové vrstvy pro jednotlivé dlaždice modelu zahrnuje toky vlastního tepla, vlhkosti a latentního tepla uvolňovaného při vypařování vody či sublimaci sněhu. Toky tepla směřující do svrchní půdní vrstvy, jenž jsou kombinací radiačních toků probíhajících pod vegetací a toků závislých na vodivosti v případě povrchu bez vegetace, jsou parametrizovány jako funkce teploty a mocnosti povrchové půdní vrstvy.

JULES rovněž využívá přístupu, založeném na přítomnosti resistencí. Pro toky vlastního a latentního tepla probíhající mezi zemským povrchem a atmosférou v rámci jednotlivých dlaždic kalkuluje hodnotu tzv. aerodynamické rezistence, která je funkcí teploty, měrné vlhkosti a rychlosti větru. Pro určení výparu je v modelu kalkulována hodnota tzv. povrchové rezistence. Povrchový výpar je určen zásobou vlhkosti v půdě, vegetaci a sněhu. V případě výparu z částí zemského povrchu nasycených vodou (např. sníh, mokrá vegetace, vodní plochy) je výpar závislý pouze na hodnotě aerodynamické rezistence. Výpar související s dýcháním vegetace je úměrný celkové vodivosti vegetačního krytu závislé na vodivosti listových průduchů, jež je dána intenzitou procesu fotosyntézy. Schopnost vegetace doplnit potřebné zásoby vody v různých vrstvách půdního profilu je pak závislá na hustotě a hloubce kořenů (JCHMR 2012).

### **4.3.2 MPI - HM**

Zajímavostí v rámci MPI-HM je zahrnutí vlivu dynamiky mokřadů do hydrologického schématu modelu. Mokřady mají poměrně značný vliv na hydrologický cyklus a to především díky jejich schopnosti zadržovat velká množství vody a regulovat tak průtok v říčních sítích. Dalším jejich podstatným vlivem je i zvýšení výparu v oblastech, ve kterých se nacházejí. Většina modelů zahrnující vliv mokřadů do svého hydrologického schématu však neuvažuje změny jejich rozlohy v závislosti na změnách klimatu. Z tohoto důvodu byl model MPI-HM doplněn o schéma zohledňující dynamiku změn rozloh mokřadů DWES (Dynamical wetland extent scheme). To umožňuje sledovat vliv klimatických změn na vývoj rozlohy

mokřadů a jejich následnou zpětnou vazbu ovlivňující klima. Pro oblast mokřadů byla do MPI-HM implementována nová kalkulace hydrologické bilance a rovněž nový přístup pro určení jejich rozlohy v závislosti na změně objemu vody a sklonu půdního povrchu. Sklon v rámci jednotlivých výpočetních buněk je určen pomocí topografických dat o velkém rozlišení. Pro přesný výstup modelu bylo rovněž nutné určit globální parametry rychlosti proudění vody v mokřadech jak pro přítok, tak i pro citlivost na změnu velikosti jejich rozlohy. Tyto parametry byly získány na základě porovnání statické verze MPI-HP uvažující neměnnou rozlohu mokřadů se čtyřmi sadami dat odlišných pozorování zachycujících jejich změny. Správnost výstupů nově vzniklé dynamické verze MPI-HM, zohledňující proměnlivost plochy mokřadů, byla ověřena na základě porovnání simulací a pozorovaných změn způsobených sezónními vlivy (Polcher a kol. 2011).

## **5. Modelování dopadů změn klimatu na hydrologický režim hydrologickým modelem**

### **5.1 Využití simulací klimatických modelů**

Výstupní hodnoty klimatických modelů jsou v současné době hojně využívaným zdrojem informací v oblasti hydrologického modelování. Na základě jejich zpracování jsou vytvářeny tzv. scénářové řady vývoje a změny klimatu. Hydrologické modelování je zpravidla realizováno v měsíčním nebo denním kroku. Simulace probíhající v kratším časovém kroku se již zpravidla zabývají otázkou srážkových a odtokových extrémů. Přesnost těchto simulací je však limitována schopností klimatických modelů spolehlivě predikovat klima v kratším než denním kroku a rovněž metodika postupu je s použitím kratších časových kroků komplikovanější (Hanel a kol. 2011).

Výstupní hodnoty klimatických modelů (GCM a RCM), jak v denním tak i měsíčním kroku, však nelze pro hydrologické modelování použít přímo a to z důvodu přítomnosti systematických chyb. Ty lze chápat jako kladné či záporné odchylky hodnot simulovaných veličin od hodnot pozorovaných. Jednotlivé projekce klimatických modelů se mohou poměrně značně odlišovat. Některé modely tak mají tendenci simulované veličiny nadhodnocovat či naopak. Hanel a kol. (2011) například uvádí, že některé klimatické modely mají tendenci nadhodnocovat srážkové úhrny a to především pro zimní období. K překonání těchto chyb lze využít dvou základních metod a to „přírůstkovou metodu“ nebo „korekci systematických chyb“, pomocí nichž jsou dané časové řady (GCM a RCM) požadovaným způsobem transformovány (Hanel a kol. 2011; Hanel a Vizina 2010).

Podstata přírůstkové metody spočívá v transformaci pozorovaných dat zkoumaných veličin (teplota, srážky, vlhkost) takovým způsobem, aby jejich změna odpovídala změnám odvozeným z klimatických modelů. Samotné transformace jednotlivých veličin pak vycházejí z porovnání jejich simulací pro kontrolní a budoucí období. Nejprve jsou stanoveny průměrné hodnoty zájmových veličin dle jednotlivých měsíců v roce, jak pro simulaci v celém kontrolním tak i pro simulaci v celém budoucím období (tzn. například průměrná hodnota lednových srážek za kontrolní období, průměrná hodnota lednových srážek za budoucí období, průměrná hodnota únorových srážek za kontrolní období, atd.) Z podílu průměrných měsíčních hodnot dané veličiny pro budoucí a kontrolní období jsou pak získány přírůstkové

faktory, s jejichž pomocí jsou upravena pozorovaná data (Hanel a Vizina 2010). Hanel a kol. (2011) uvádí, že pro celkový přehled možných dopadů klimatických změn na hydrologický režim, je dostačující měsíční krok výpočtu a to především s ohledem na nejistoty plynoucí ze simulací klimatických modelů. V případě přírůstkové metody jsou tak pro transformované veličiny zvolených simulací klimatického modelu odvozovány přírůstkové faktory pro jednotlivé měsíce, s jejichž použitím jsou pak následně upravovány pozorované časové řady (Hanel a kol. 2011). Podstatou přírůstkové metody je předpoklad, že přírůstkové faktory stanovené na základě realizované simulace jsou na chybách pramenících ze simulace klimatického modelu nezávislé (Hanel a Vizina 2010).

V případě korekce systematických chyb jsou naopak simulované veličiny pro kontrolní období porovnávány s daty veličin v tomto období pozorovanými a následně dle nich transformovány. Korekce systematických chyb tedy vychází z předpokladu, že transformace stanovené na základě porovnání simulovaných a pozorovaných veličin v kontrolním období budou platné i pro budoucí období (Hanel a Vizina 2010).

I přesto, že se prostorové rozlišení globálních klimatických modelů oproti minulosti výrazně zlepšilo, stále neumožňuje dostatečně podrobné zachycení některých zkoumaných veličin (srážky, rozložení teplot atp.) uvnitř jednotlivých výpočetních buněk. Průměrné hodnoty získané v rámci určité výpočetní buňky se pak zpravidla neshodují s hodnotami zaznamenanými jednotlivými měřicími stanicemi v jeho obvodu. V důsledku toho je rovněž nutné použít statistického downscalingu, jenž tento nedostatek umožní eliminovat. Tato technika je zaměřena na hledání vzájemných vztahů mezi průměrnými modelovými hodnotami v rámci jednotlivých výpočetních buněk a dílčími hodnotami veličin (srážky, teploty atd.) v jejich obvodu. Základním předpokladem použitelnosti statistického downscalingu je však určitá neměnnost vztahů mezi průměrnou hodnotou simulovanou v rámci výpočetních buněk a veličinami v nich sledovanými (Hanel a kol 2011).

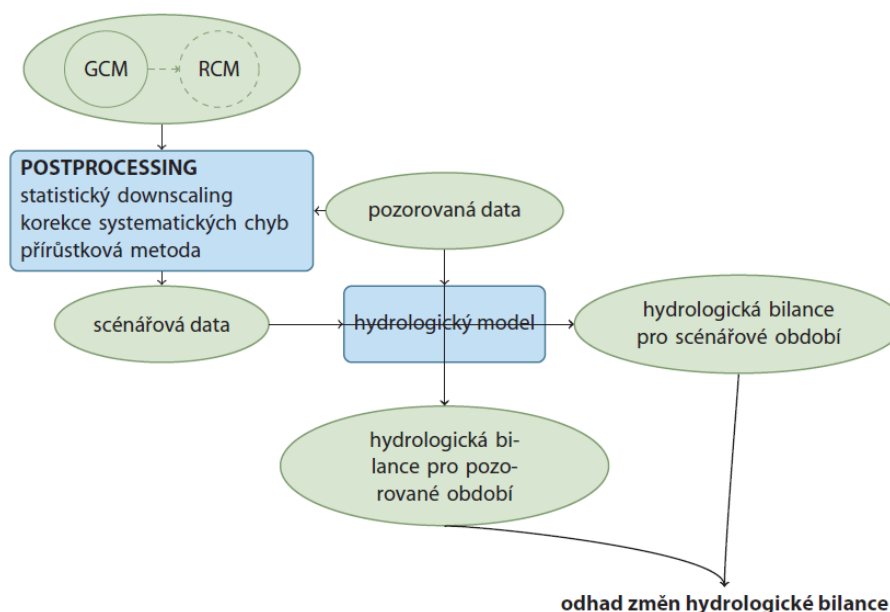
## **5.2 Postup modelování dopadů klimatických změn na hydrologický režim hydrologickým modelem**

Při modelování možných dopadů klimatických změn na hydrologický režim jsou obvykle posuzována třicetiletá časová období (tzv. časové řezy). Jako základní

časový řez charakterizující kontrolní klima, je v současnosti považováno rozmezí let 1961-1990. Jako budoucí časové řezy (scénářové období) pak mohou být dle potřeby uvažována např. období 2010-2039, 2040-2069 a 2070-2099.

Vlastní postup modelování dopadů klimatických změn na hydrologický režim hydrologickým modelem (*obr. 6*) shrnuje Hanel a kol. (2011) do následujících kroků:

1. Kalibrování zvoleného hydrologického modelu pozorovanými daty
2. Převedení výstupních veličin z použitého GCM nebo RCM na scénářové řady pro zájmová povodí pomocí:
  - a) statistického downscalingu
  - b) postprocessingu tzn. pomocí korekce systematických chyb nebo přírůstkovou metodou.
3. Provedení simulace hydrologické bilance zájmového povodí pro kontrolní i scénářové období s využitím kalibrovaného hydrologického modelu a scénářových řad.



Obr. 6: Postup modelování dopadů klimatických změn na hydrologický režim hydrologickým modelem. (ilustrace převzata z Hanel a kol. 2011).

### 5.3 Bilan – model hydrologické bilance

Bilan je vyvíjen a používán ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T.G. Masaryka (VÚV-TGM) již více než dvacet let. Jeho schopnost simulovat hydrologickou bilanci byla ověřena nejen na řadě povodí v České republice, ale např. i v Africe a Asii. Model byl rovněž odzkoušen v rámci mezinárodních projektů

FRIEND (UNESCO) a WATCH. V současnosti je používán pro výpočet hydrologické bilance v rámci vodní bilance (dle § 22 zákona č. 254/2001 sb. o vodách a o změně některých zákonů, v platném znění). Model je ve VÚV-TGM též běžně používán pro odhad dopadů klimatické změny na hydrologický režim zájmových povodí (Hanel a kol. 2011).

Základní prvky hydrologické bilance jsou v modelu řešeny ve třech základních úrovních a to na povrchu, v půdní zóně a zóně podzemní vody (*obr. 7*). Toky mezi jednotlivými zónami jsou určeny algoritmy modelu. Model je schopen simulovat hydrologickou bilanci jak v měsíčním tak denním kroku. Algoritmy modelu jsou pak v denním kroku řízeny šesti a v měsíčním kroku osmi volnými parametry. Vstupními daty modelu v závislosti na časovém kroku výpočtu jsou pozorované denní či měsíční časové řady srážek a teplot případně i relativní vlhkosti. Jednou ze simulovaných hodnot modelu je potenciální evapotranspirace, jež je základním prvkem pro stanovení hydrologické bilance zájmového povodí tedy i odtoku z povodí. Její stanovení pomocí přímého měření je velmi složité, a proto je určována pomocí jiných meteorologických veličin (teplota, vlhkost), jejichž získání je méně náročné. Evapotranspirace může být v modelu Bilan odvozena na základě dvou základních metod. Dle první z nich je potenciální evapotranspirace určována na základě měřené teploty vzduchu a množství slunečního záření dosahujícího horní vrstvy atmosféry v závislosti na zeměpisné šířce a dni v roce. Samotný výpočet je pak z hlediska vstupních veličin nenáročný. Jedinou měřenou veličinou vstupující do výpočtu je teplota vzduchu (Oudin a kol 2010). Potenciální evapotranspirace ( $PE$ ) je pak vypočtena jako:

$$PE = \frac{0,408R_e(T+5)}{100} \text{ pro } (T+5) > 0 \quad (1)$$

$$PE = 0 \text{ pro } (T+5) \leq 0, \text{ kde extraterestická radiace } (R_e) \text{ je vypočítána dle:} \quad (2)$$

$$R_e = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (3)$$

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

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

$d_r$  ... inverzní relativní vzdálenost Země – Slunce

$\delta$  ... deklinace Slunce (úhlová vzdálenost Slunce od rovníku) [rad]

$\omega_s$  ... hodinový úhel západu Slunce [rad]

$\varphi$  ... zeměpisná šířka [rad]

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (4)$$

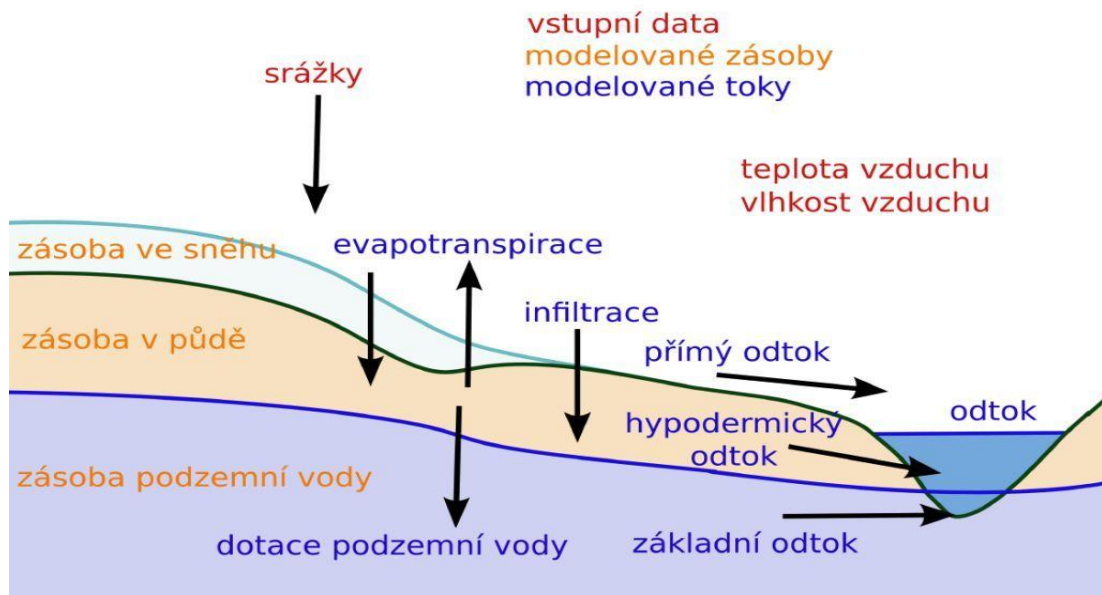
$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (5)$$

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

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (6)$$

Dle druhé metody může být potenciální evapotranspirace stanovena pomocí empirických vztahů platných pro jednotlivé vegetační zóny, kdy je pro výpočet použita měřená teplota vzduchu a měřená relativní vlhkost. Beran a kol. (2011) uvádí, že na základě porovnání obou metod na celkem třinácti povodích České republiky bylo zjištěno, že výsledky získané pomocí první a výpočetně méně náročné metody dle Oudina jsou srovnatelné a v některých parametrech i přesnější.

Dalšími simulovanými veličinami jsou infiltrace z povrchu do půdní zóny a odtok. Na povrchu půdy je bilance dána úhrnem srážek a územním výparem, jenž je závislý na množství vody dostupné v povodí a potenciální evapotranspiraci. Do celkové bilance rovněž vstupuje i zásoba vody obsažená ve sněhu. Z povrchové zóny se část vody ze srážek a tajícího sněhu infiltruje do půdní zóny, jejíž kapacita je kalibrováním parametrem. V případě překročení kapacity půdní zóny voda následně odtéká v podobě přímého a základního odtoku, jež představují rychlou a pomalou odezvu povodí. Zásoba vody ve sněhu, v půdě a kolektoru podzemní vody jsou rovněž simulovanými hodnotami modelu. V závislosti na teplotě vzduchu model rozlišuje tři typy pracovních režimů a to zima, tání sněhu a léto. V závislosti na typu režimu pak uplatňuje odlišný typ algoritmu (Horáček a kol. 2009; VÚV-TGM 2011).



Obr. 7: Schéma modelu Bilan. Vstupní data modelu jsou vyznačena červenou, modelované zásoby v půdě žlutou a modelované toky modrou barvou (ilustrace převzata z Hanel a kol. 2011).



## **6. Dostupná data**

### **6.1 Projekt WATCH**

WATCH (The Water and Global Change) byl integrovaným projektem založeným v rámci šestého rámcového programu Evropské unie. Projekt byl spuštěn v únoru 2007 a po dobu čtyř let spojil širokou vědeckou komunitu (celkem 25 vědeckých institucí) z oborů hydrologie a klimatologie. Jeho cílem bylo kvantifikovat dopady klimatické změny na jednotlivé složky globálního vodního cyklu a předpovědět jejich budoucí vývoj. Tato iniciativa měla rovněž přinést odborný podklad pro budoucí politická rozhodnutí ovlivňující globální vodní cyklus. Jako možné indikátory negativních dopadů klimatické změny jsou v rámci WATCH uváděny např. změny v rozložení srážek a jejich vliv na obsah vlhkosti v půdě, nebo četné extrémní události (záplavy a sucha), změny rozložení teplot vzduchu nebo čistota vodních zdrojů. V souvislosti s dostupností vodních zdrojů byly rovněž v závislosti na potřebě identifikovány oblasti s nedostatečným množstvím vody a naopak oblasti s dostatkem či přebytkem vody. Jako vážný problém je chápán pozvolný růst hladin světových oceánů, v jehož důsledku dochází k postupujícímu zasolování půdy v příbřežních oblastech a rovněž k znehodnocení zdrojů pitné vody. Všechny tyto negativní dopady, jejichž výčet není zdaleka kompletní, se již dnes pozvolna stávají limitujícím faktorem využití vodních zdrojů a potenciálním nebezpečím pro zajištění zdraví člověka, ekosystémů a bezpečnosti výroby potravinových zdrojů (Harding a Warnaars 2011).

### **6.2 Dostupné simulace klimatických modelů**

V rámci projektu WATCH byly vytvořeny dvě sady (Watch Forcing data a Watch Driving data) vstupních klimatických dat s prostorovým rozlišením  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  obsahujících osm základních klimatických veličin a to (Harding a Warnaars 2011):

1. Teplotu ve výšce dvou metrů nad zemským povrchem
2. Měrný tlak ve výšce deseti metrů nad zemským povrchem
3. Měrnou vlhkost ve výšce dvou metrů nad zemským povrchem
4. Rychlost vzdušného proudění ve výšce deseti metrů nad zemským povrchem
5. Toky dlouhovlnného (infračerveného) záření dopadajícího na zemský povrch
6. Toky krátkovlnného záření dopadajícího na zemský povrch

## 7. Dešťové srážky

## 8. Sněhové srážky

Prvních pět veličin bylo vytvořeno v šestihodinovém a zbývající tři ve tříhodinovém intervalu. První sada dat (tzv. Watch Forcing data) pokrývají období od roku 1901 do roku 2001. Jedná se o zpracovaná data získaná na základě přímých pozorování. Tato data mohou být použita např. jako vstup do hydrologických modelů pro vytvoření datové sady zachycující hydrologický cyklus. Nově vytvořená datová sada může být následně porovnávána s pozorovanými meteorologickými daty v dané oblasti. Možnost použití „Watch Forcing data“ jako vstupních dat pro hydrologické modelování byla již úspěšně ověřena na řadě povodí v rámci Evropy. Druhou sadou dat jsou tzv. Watch Driving data pokrývající období od roku 2001 do roku 2100. Tato sada byla vytvořena s použitím metody korekce systematických chyb (bias correction), na základě simulací tří nejběžněji používaných klimatických modelů, kdy každý z nich poskytuje data dle dvou emisních scénářů IPCC. Celkem bylo vytvořeno šest možných variant datových vstupů pro hydrologické modely pokrývajících období 2001 – 2100. Tento postup tvorby dat s sebou však přináší řadu nejistot souvisejících se srážkami, kdy dané modely tyto podhodnocují či nadhodnocují. To je dáno především nelineárním vztahem mezi srážkami a odtokem, kdy krátký vydatný déšť může vyvolat poměrně silnou odezvu povodí, avšak slabé dlouhotrvající mrholení či déšť nemusí být v odtoku vůbec patrný. Zmíněných šest možných variant datových vstupů tak umožňuje vyhodnocení nejistot v simulacích klimatických modelů a pokrývá rozsah možných budoucích změn. Všechny datové sady jsou v současnosti bezplatně přístupné, jako základ pro další vědecké projekty (Harding a Warnaars 2011).

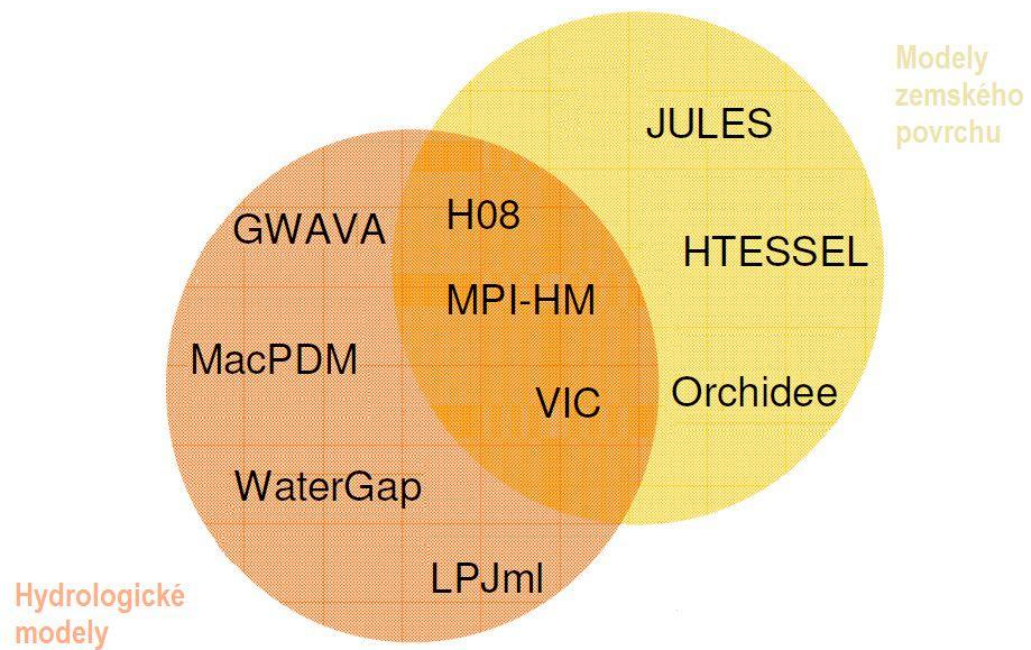
S ohledem na extrémní události byla rovněž v rámci WATCH z více než 400 měřicích stanic shromážděna data pozorovaných průtoků evropských řek (EWA/WATCH data set) pro období 1962 - 2004. Tato data se stala např. podkladem pro tvorbu atlasů mapujících záplavové oblasti a oblasti s dlouhodobými obdobími sucha. Datová sada je rovněž vhodná pro hodnocení výstupů klimatických modelů využívajících Watch Forcing Data. Zároveň napomohla k hlubšímu pochopení procesů vedoucích k extrémním událostem a posílila tak přesvědčení o možnosti jejich předpovědi.

Projekt WATCH rovněž potvrdil důležitost výparu v celém hydrologickém cyklu. Především díky satelitním datům byly shromážděny celosvětové hodnoty

výparu mezi roky 1984 až 2007. Předběžné analýzy těchto dat naznačují, že celosvětový výpar v posledním desetiletí s největší pravděpodobností poklesl, což je vzhledem k rostoucím světovým teplotám neočekávaný trend. V souvislosti s touto skutečností byly též posuzovány vlivy různých typů využití půdy na klimatický systém Země. Zvláštní pozornost byla věnována rozsáhlým odlesněním, jež dominovala především uplynulému století. Bylo prokázáno, že některé druhy využití půdy mohou mít vliv na snížení výparu a zvýšení průtoku v řekách, což by vysvětlovalo výše zmíněný trend. Např. zavlažování má však opačný efekt (Harding a Warnaars 2011)..

S použitím obou datových sad (Forcing a Driving data) byl rovněž dokončen projekt vzájemného porovnání modelů (Water MIP - Water Model intercomparison project), jenž se stal jedním z důležitých výstupů projektu WATCH. V průběhu let byla vyvinuta řada klimatických modelů zahrnujících do svých simulující hydrologické veličiny (srážky, odtok atp.). Tyto modely však byly zpravidla koncipovány pouze pro simulaci v daném povodí či území zahrnujícím jen několik tisíc kilometrů. Hlavním úkolem Water MIP se tedy stala snaha vytvořit takové podmínky, aby tyto modely byly schopny simulovat hydrologické veličiny na globální úrovni a vytvořila se tak možnost pro zmapování hydrologického cyklu na Zemi. Do projektu bylo vybráno několik modelů, na jejichž vývoji se nezávisle na sobě podíleli týmy odborníků z různých vědeckých institucí v Evropě. Projekt Water MIP byl realizován s použitím dvou základních typů modelů a to modelů zemského povrchu a hydrologických modelů (*obr. 8*). Oba tyto typy jsou mimo jiné schopny poskytovat odhady hodnot výparu a průtoků řek nezbytných pro určení hydrologické bilance. Způsob získání odhadů těchto veličin, se však v závislosti na typu modelu částečně liší. Modely zemského povrchu generují tyto veličiny zejména na základě porovnání aktuální energetické bilance daného místa, naproti tomu hydrologické modely jsou více zaměřeny na statistické zpracování hydrologických procesů a jejich vlastností. Pro vytvoření jednotného rámce a následné porovnávání modelů bylo nutné, aby všechny zúčastněné modely používaly shodné sady vstupních dat (Watch Forcing a Driving data), jednotné rozlišení ( $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ ) a stejnou říční síť. Ostatní datové vstupy (např. porostní mapy) již byly pro jednotlivé modely libovolné. V průběhu projektu byly rovněž modely upravovány s cílem zpřesnění jejich odhadů. Do většiny z nich tak byly zahrnuty např. vlivy antropogenní činnosti, jako jsou

umělé zavlažování nebo regulace vodních toků pomocí přehrad (Harding a Warnaars 2011).



Obr. 8: Modely použité v rámci projektu Water MIP. (ilustrace převzata a upravena z (Clark a kol. 2009).

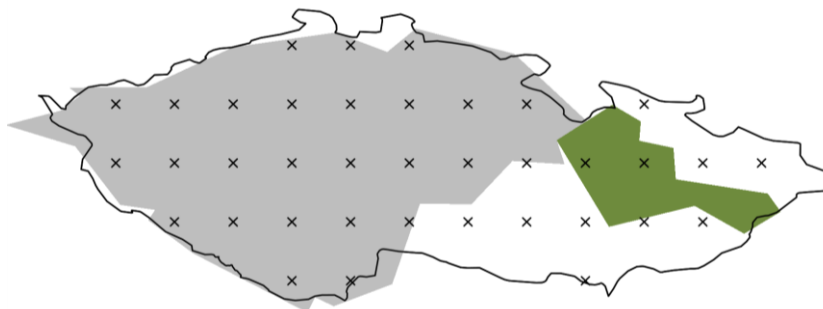
# PRAKTICKÁ ČÁST

## 7. Metodika

### 7.1 Zájmová povodí a jejich charakteristiky

Česká republika zaujímá z hydrologického hlediska poměrně zajímavou polohu. Na jejím území v pohoří Kralického Sněžníku na vrcholu hory Klepý (1423 m n. m) dochází k souběhu rozvodnic tří evropských povodí, a to povodí Labe, povodí Moravy (Dunaje) a povodí Odry. Největší část území ČR (téměř celé Čechy) spadá do povodí Labe. Nejvýznamnějšími toky tohoto povodí jsou Labe a Vltava a odtok z něj ústí do Severního moře. Druhým, a rozlohou výrazně menším, povodím nacházejícím se na našem území je povodí Moravy rozkládající se v příhraničí jižních Čech a na jižní a střední Moravě. Klíčovými toky v tomto povodí jsou Morava a Dyje a odtok z něj ústí do Černého moře. Nejmenší část našeho území (severní Morava a části severního příhraničí Čech) pak zabírá povodí Odry náležící k úmoří Baltského moře. Hlavními toky jsou zde Odra a Opava (Klímová a kol. 1999; MZe 2012).

Pro posouzení schopnosti LSM simulovat hydrologickou bilanci byly vybrány dvě povodí ČR a to povodí Labe po město Děčín a povodí Moravy po město Kroměříž (obr. 9).



Obr. 9: Na obrázku je schématický obrys České republiky. Šedý polygon znázorňuje zájmovou oblast povodí Labe po město Děčín a zelený polygon pak oblast povodí Moravy po město Kroměříž. Křížky uvnitř polygonů znázorňují jednotlivé výpočtové buňky na jejichž základě byly provedeny kalkulace a porovnání. Pro snížení výpočtové náročnosti byly rozvodnice povodí zjednodušeny.

#### 7.1.1 Povodí Labe po město Děčín

Povodí Labe je charakterizováno jednak naší nejvodnatější řekou s průměrným průtokem přesahujícím  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , kterou je Labe a rovněž naší nejdelší řekou (430 km), jenž je Vltava (tab. 1). Pramen řeky Labe se nachází na Labské louce v Krkonoších ve výšce 1389,5 m n. m. Řeka Labe protéká územím ČR v délce 368 km (MZe 2006; VÚV-TGM 2012). Největšími přítoky Labe z levé strany ve

směru od pramene jsou Úpa, Metuje, Orlice, Loučná, Chrudimka, Doubrava, Výrovka, Vltava, Ohře a Bílina. Z pravé strany jsou to pak Cidlina, Mrlina, Jizera, Pšovka a Ploučnice (CENIA 2007). V povodí se dále nachází ještě několik větších vodních toků (*tab. 1*).

Tab. 1: Seznam nejdelších vodních toků nacházejících se v povodí Labe po město Děčín (údaje převzaty z Klímová a kol. 1999).

Nejdelší řeky protékající povodím Labe po město Děčín					
Řeka	Délka (km)	Plocha povodí (km <sup>2</sup> )	Řeka	Délka (km)	Plocha povodí (km <sup>2</sup> )
Vltava	430	28090	Otava	136	3788
Labe	370	51392	Orlice	134	2037
Ohře	256	5614	Úhlava	109	919
Berounka	246	8861	Ploučnice	106	1194
Sázava	225	4349	Chrudimka	104	873
Jizera	165	2193	Blanice	93	861
Lužnice	153	4226	Cidlina	90	1177

Na horním toku Labe byla vybudována dvě velká vodní díla (*tab. 2*) a to přehradní nádrž Labská a přehradní nádrž Les Království (PLA 2012).

Řeka Vltava je tvořena soutokem dvou řek a to Studené a Teplé Vltavy na Šumavě ve výšce 715 m n. m. Jejimi nejvýznamnějšími přítoky zleva ve směru od pramene jsou řeky Malše, Lužnice, Brzina, Mastník, Sázava Botič a Rokytka. Z pravé strany jsou to pak řeky Otava, Kocába, Berounka a Bakovský potok (CENIA 2007; VÚV-TGM 2012). Na Vltavě bylo vybudováno devět velkých vodních děl (*tab. 3*). Ve směru od pramene jsou to vodní nádrže Lipno I, Lipno II, Hněvkovice, Kořensko, Orlík, Kamýk, Slapy, Štěchovice a Vrané (PVL 2012). Mezi další velké vodní nádrže v povodí Labe patří např. Římov na řece Malši, Nýrsko vybudované na Úhlavě, Hracholusky na Mži, Žlutice na Střele, Nechranice na Ohři, přehrada Seč na řece Chrudimce a vodní nádrž Švihov na řece Želivce (*tab. 2*).

Tab. 2: Seznam největších vodních nádrží nacházejících se v povodí Labe po město Děčín (údaje převzaty z Klímová a kol. 1999; PLA 2012; POH 2012; PVL 2012).

Největší vodní nádrže v povodí Labe po město Děčín							
Vodní nádrž	Řeka	Zatopená plocha (ha)	Celkový objem mil. m <sup>3</sup>	Vodní nádrž	Řeka	Zatopená plocha (ha)	Celkový objem mil. m <sup>3</sup>
Lipno	Vltava	4870,0	306,0	Vrchlice	Vrchlice	102,8	9,8
Orlík	Vltava	2732,0	716,6	Trnávka	Trnava	98,0	6,7
Švihov	Želivka	1670,0	298,3	Stěchovice	Vltava	95,7	10,4
Slapy	Vltava	1392,0	269,3	Podhora	Teplá	95,0	3,0
Nechranice	Ohře	1338,0	287,6	Pastviny	Divoká Orlice	92,0	10,8
Rozkoš	Rozkoš	1001,3	76,2	Lučina	Mže	86,2	5,8
Jesenice	Odrava	746,0	59,6	Souš	Černá Desná	85,9	7,6
Hracholusky	Mže	470,0	57,0	Les Království	Labe	85,0	9,2
Skalka	Ohře	385,0	19,6	Hamry	Chrudimka	80,6	3,6
Přísečnice	Přísečnice	364,0	548,0	Březová	Teplá	76,8	5,7
Hněvkovice	Vltava	321,0	22,2	Stráž p. Ralskem	Ploučnice	75,5	1,8
Střekov	Labe	310,0	9,0	Klíčava	Klíčava	71,4	10,4
Vrané	Vltava	251,0	11,1	Husinec	Blanice	60,9	6,6
Seč	Chrudimka	220,0	22,1	Hostivař	Botič	42,0	1,8
Římov	Malše	210,6	34,5	Sedlice	Želivka	38,3	2,3
Kamýk	Vltava	195,0	13,0	Kořensko	Vltava	-	2,8
Žlutice	Střela	167,4	15,6	Sedlec	Dubá	36,0	1,0
Fláje	Flájský p.	153,0	23,1	Lipno II	Vltava	32,5	1,7
České Údolí	Radbuza	151,5	5,3	Křížanovice	Chrudimka	31,8	2,0
Nýrsko	Úhlava	148,0	20,8	Pilská	Pilský potok	22,6	1,9
Stanovice	Lomnický p.	142,0	27,8	Labská	Labe	26,8	3,3
Josefův důl	Kamenice	138,1	22,1	Humenice	Stropnice	15,6	0,8
Klabava	Klabava	128,0	5,7	Suchomasty	Suchomastský p.	9,3	0,5

Dalšími velkými vodními plochami v tomto povodí jsou (tab. 3) např. v jižních Čechách rybníky Rožmberk, Horusický, Bezdrev, Dvořiště a Svět v a v severních Čechách Máchovo jezero (Klímová a kol. 1999).

Tab. 3: Seznam největších rybníků nacházejících se v povodí Labe po město Děčín (údaje převzaty z Klímová a kol. 1999).

Největší rybníky v povodí Labe po město Děčín					
Rybník	Plocha (ha)	Rybník	Plocha (ha)	Rybník	Plocha (ha)
Rožmberk	489	Velký Tisý	317	Velká Holná	230
Horusický	416	Záblatský	305	Velké Dářko	205
Bezdrev	394	Máchovo jezero	284	Svět	201
Dvořiště	337	Dehtář	246	Kačležský	176
Žehuňský	321	Staňkovský	241	Opatovický	161

Z hlediska využití krajiny v povodí Labe po město Děčín zaujímá dominantní postavení zemědělská krajina. Především v oblasti řeky Labe zemědělská krajina nejvýrazněji převládá. Další významnou složkou je zemědělsko-lesní krajina tvořená především polními a lesními celky a v menší míře loukami a lesy. Tato krajina má výraznější zastoupení např. v okolí Semil a Nové Paky na severu Čech a dále pak v okolí Mariánských Lázní a Tachova na západě Čech. V jižních Čechách je to například okolí Strakonice, Prachatic a Českého Krumlova a dále rovněž západní část Českomoravské Vrchoviny. Převážnou většinu lesních porostů v povodí Labe tvoří jehličnaté kultury. Největší celky se nacházejí např. na Rokycansku, Příbramsku, Hořovicku, v okolí Dobříše, na severu pak v okolí města Doksy a dále pak v

Krkonoších a na Šumavě. Výrazně menší plochu pak zaujímají smíšené lesy, nacházející se převážně v CHKO Křivoklátsko a dále pak v Krušných horách. Poměrně velmi malou plochu pak tvoří listnaté lesy v okolí Chlumce nad Cidlinou, Poděbrad a Žatce (Klímová a kol. 1999).

### 7.1.2 Povodí Moravy po město Kroměříž

Hlavním vodním tokem povodí Moravy po město Kroměříž je řeka Morava pramenící v nadmořské výšce 1370 m, v pohoří Kralického Sněžníku. Jejími hlavními přítoky (*tab. 4*) pro tento úsek jsou z levé strany ve směru od pramene Desná, Oskava, Bystřice, Bečva a Moštěnka. Z pravé strany jsou to pak řeky Moravská Sázava, Třebůvka, Blata a Haná (CENIA 2007; VÚV-TGM 2012).

Tab. 4: Seznam nejdelších vodních toků nacházejících se v povodí Moravy po město Kroměříž (údaje převzaty z Klímová a kol. 1999; VÚV-TGM 2012).

Nejdelší řeky protékající povodím Moravy po město Kroměříž					
Řeka	Délka (km)	Plocha povodí (km <sup>2</sup> )	Řeka	Délka (km)	Plocha povodí (km <sup>2</sup> )
Morava	246	24266	Oskava	50,29	569,2
Bečva	120	1626	Třebůvka	48,23	579,75
Haná	54	104,75	Moštěnka	45,57	354,59
Moravská Sázava	53,91	510,64	Blata	45,31	313,08
Bystřice	53,9	267,4	Desná	43,36	337,79

V tomto úseku povodí se nachází čtyři významnější vodní díla (*tab. 5*) a to přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně na řece Divoká Desná, nádrž Nemilka vybudovaná na stejnojmenné řece, Plumlov na řece Hloučele a vodárenská nádrž Opatovice na řece Malá Haná (Klímová a kol. 1999; PMO 2012).

Tab. 5: Seznam největších rybníků nacházejících se v povodí Labe po město Děčín (údaje převzaty z Klímová a kol. 1999; PMO 2012).

Největší vodní nádrže v povodí Moravy po město Kroměříž			
Vodní nádrž	Řeka	Zatopená plocha (ha)	Celkový objem mil m <sup>3</sup>
Dlouhé Stráně	Divoká Desná	-	6,126
Opatovice	Malá haná	70,50	10,062
Plumlov	Hloučela	68,00	5,566
Nemilka	Nemilka	20,68	1,551

Podobně jako v povodí Labe tak i v povodí Moravy po město Kroměříž zaujímá dominantní postavení zemědělská krajina. Ta se nachází především v oblasti Hornomoravského úvalu. Další významnou část zaujímá zemědělsko-lesní krajina tvořená v tomto případě převážně loukami a lesy nacházejícími se v okolí Šumperka



a směrem na sever od města Zábřeh. Z lesních porostů mírně převládají jehličnaté kultury nejvíce zastoupené v západní části Hrubého Jeseníku a na východ od Města Olomouc. Menší plochu pak zaujímají smíšené lesy, ležící západně a jižně od města Rýmařov, dále pak v okolí měst Zábřeh, Litovel, Mohelnice a Vyškov. Listnaté porosty zaujímající nejmenší část lesních ploch v této části povodí tvoří poměrně malé celky v blízkosti řeky Moravy ve směru od Litovle až po Kroměříž (Klímová a kol. 1999).

## **7.2 Přehled dostupných dat pro řešení projektu**

V rámci projektu WATCH byly jednotlivými modely (*obr. 8*) řízenými třemi globálními klimatickými modely (ECHAM5, CNRM, IPSL) vytvořeny simulace vybraných veličin jak pro kontrolní období tak i budoucí období a dva emisní scénáře (SRES – IPCC) A2 a B1 (*tab. 6*).

Tab. 6: Přehled dostupných dat vytvořených v rámci projektu WATCH. Ve sloupci úplně vlevo jsou uvedeny názvy jednotlivých LSM. V rádcích vedle těchto názvů jsou uvedeny proměnné (viz vysvětlivky), které byly s pomocí těchto LSM vytvořeny. Ve dvou rádcích hned nad proměnnými jsou vždy od shora uvedeny: Název řídicího modelu (ECHAM 5, CNRM, IPSL), období, pro které jsou simulace dle jednotlivých proměnných dostupné (CTRL, A2, B1) a přesné vymezení období pomocí roků, pro něž jsou simulace dle jednotlivých proměnných vytvořeny (např. 1971-2000). Modrá barva proměnných značí, že do těchto simulací nebyly zahrnuty některé vlivy antropogenní činnosti (např. účinky přehrad či zavlažování). Černá barva proměnných značí dostupnost dat s vlivem i bez vlivu antropogenní činnosti. Zelená barva proměnných značí, že u dat není určeno, zda jsou vlivy antropogenní činnosti zahrnuty či nikoliv. Vykřičníky u některých proměnných upozorňují na absenci dat viz vysvětlivky. V tabulce jsou rovněž uvedeny i simulace pro jednotlivé proměnné řízené pomocí Watch Forcing data (WFD), které však nebyly pro tuto práci využity. Tabulka byla vytvořena na základě dat dostupných z ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock6.

	ECHAM5			CNRM			IPSL			WFD
	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL
<b>GWAVA</b>	D, E, PET, QS, QB, SM, SW, GM			D, E, PET, QS, QB, SM, SW, GM			D, E, PET, QS, QB, SM, SW, GM			
	ECHAM5			CNRM			IPSL			WFD
	CTRL (1961-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1961-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1961-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL
<b>H08</b>	D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, SF			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, SF			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, SF			
	ECHAM5			CNRM			IPSL			WFD
	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1963-2000)
<b>HTESSEL</b>	E, P, QS, QB, SM, SW, SF		E, P, QS, QB, SM, SW, SF	E, P, QS, QB, SM, SW, SF	E, P, QS, QB, SM, SW, SF	E, P, QS, QB, SM, SW, SF				E, P, QS, QB, SM, SW, SF
	ECHAM5			CNRM			IPSL			WFD
	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1961-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL
<b>JULES</b>	D, E, P, QS, QB, SM, SW, SF			D, E, P, QS, QB, SM, SW, SF			D, E, P, QS, QB, SM, SW, SF			
	ECHAM5			CNRM			IPSL			WFD
	CTRL (1961-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1961-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1961-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1901-2000)
<b>LPJmL</b>	D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM, SF			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM, SF			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM, SF			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM, SF
	ECHAM5			CNRM			IPSL			WFD
	CTRL (1961-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1961-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1961-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1963-2000)
<b>MPI-HM</b>	D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW
	ECHAM5			CNRM			IPSL			WFD
	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)
<b>MAcPDM</b>	E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM, SF			E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM, SF			E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM, SF			E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM, SF
	ECHAM5			CNRM			IPSL			WFD
	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL
<b>Orchidee</b>										
	ECHAM5			CNRM			IPSL			WFD
	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1971-2000)
<b>VIC</b>	D, E, P, QS, QB, SM, SW, SF			D, E, P, QS, QB, SM, SW, SF			D, E, P, QS, QB, SM, SW, SF			D, E, P, QS, QB, SM, SW, SF
	ECHAM5			CNRM			IPSL			WFD
	CTRL (1965-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1965-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1965-2000)	A2 (2001-2100)	B1 (2001-2100)	CTRL (1906-2000)
<b>WaterGap</b>	D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM			D, E, PET, P, QS, QB, SM, SW, GM
<b>Vysvětlivky</b>										
<b>Proměnné:</b> D - celkový odtok, E - výpar, PET - potenciální evapotranspirace, P - srážky, QS - povrchový odtok, QB - podpovrchový odtok, SM - vlhkost půdy, SW - obsah vody ve sněhu, GM - vlhkost povrchu, SF - sněhové srážky										
Modrá barva proměnné = data s koncovkou nat, černá barva proměnné = data s koncovkou nat a hum, zelená barva proměnné = data bez koncovky										
P!, SM!, SW!, SF!: Chybí 2051-2060 a 2091-2100, QS!, QB!: Chybí 2091-2100										
Nevyplněná políčka u modelů signalizují, že data nebyla dostupná										

## 7.3 Postup vyhodnocení změn hydrologické bilance

### A. Odvození změn průtoku dle LSM

- 1) Stažení datových souborů z ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock6 ve formátu „ncdf“, obsahujících všechny proměnné, jež byly získány na základě simulací LSM (*tab. 6*).
- 2) Extrakce měsíčních průtoků pro období 1971 – 2000 a 2071 - 2100 pro emisní scénáře SRES A2 a B1 z jednotlivých souborů obsahujících desetileté časové řady vytvořené na základě simulací modelů GWAVA, H08, JULES, LPJmL, MPI-HM a WATER GAP a jejich spojení do třicetiletých časových řad pomocí vytvořeného skriptu (*příloha 1*) v programu „R“ (R-project 2012).
- 3) Výpočet průměrných změn [% , mm] mezi budoucími a kontrolními obdobími simulovaných dle jednotlivých LSM v závislosti na použitém emisním scénáři.

### B. Odvození změn průtoků dle modelu hydrologické bilance Bilan

- 1) Kalibrace hydrologického modelu s využitím pozorovaných dat na zájmových povodích a ponechání modelu v nastavení, jež poskytlo simulaci s nejlepší shodou mezi pozorovaným a simulovaným odtokem.
- 2) Stažení datových souborů z ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock6 ve formátu „ncdf“, obsahujících denní data srážek a teplot z řídicích modelů (ECHAM 5, CNRM a IPSL) pro kontrolní i budoucí období (tzv. forcing data shodná pro všechny porovnávané LSM) a následná extrakce dat ze souborů a jejich agregace na časové řady v měsíčním kroku pomocí vytvořeného skriptu (*příloha 2*) v programu „R“ (R-project 2012).
- 3) Výpočet průměrných hodnot dle jednotlivých měsíců z nově vytvořených časových řad srážek a teplot a odvození přírůstkových faktorů z těchto průměrných hodnot.
- 4) Úprava původních časových řad pozorovaných srážek a teplot na obou zájmových povodích pomocí přírůstkových faktorů.
- 5) Použití upravených časových řad pro modelování změn odtoku pomocí modelu Bilan pro oba emisní scénáře dle jednotlivých řídicích modelů (ECHAM 5, CNRM a IPSL).
- 6) Výpočet změn odtoku dle simulací modelu Bilan.

C. Vzájemné porovnání změn odtoku odvozených ze simulací LSM a modelu Bilan a srovnání simulací pro kontrolní období s pozorovanými daty.

## 8. Výsledky

### 8.1 Odvození změn průtoku dle LSM

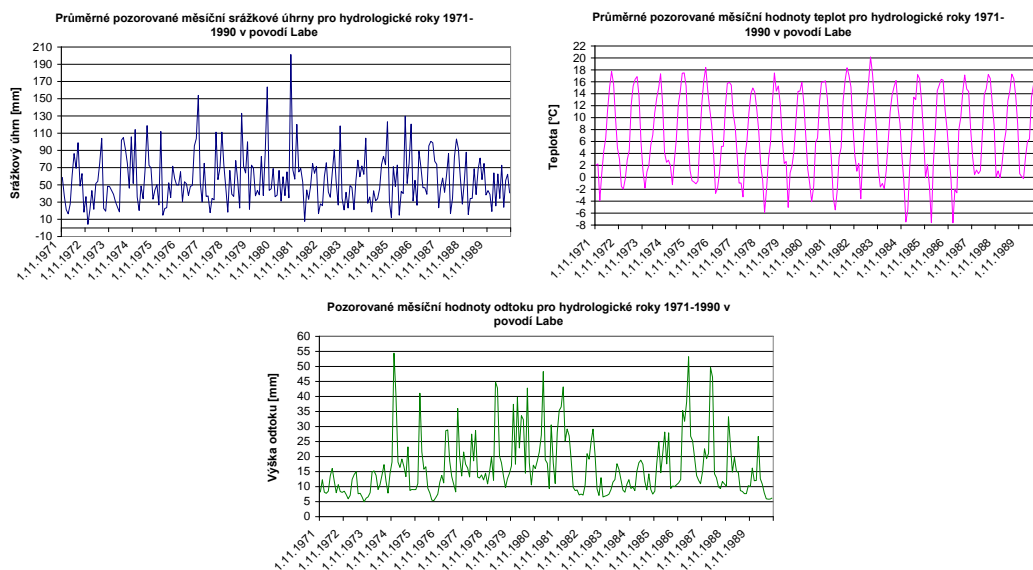
Pro porovnání odhadů změn hydrologické bilance odvozených na základě simulací hydrologického modelu Bilan se změnami odvozenými pomocí modelů zemského povrchu byly pro následné srovnání vybrány modely GWAVA, H08, JULES, LPJmL, MPI-HM a WATER GAP. Jako kontrolní období (CTRL) bylo zvoleno rozmezí let 1971-2000 a jako budoucí období pro oba emisní scénáře (A2 a B1) bylo zvoleno rozmezí let 2071-2100. Z posuzovaných modelů (*tab. 6*) byly vyloučeny modely s větším počtem neúplných simulací. Třicetiletá období a jejich stoletý odstup byl pak zvolen jednak s ohledem na zvyklosti při porovnávání obdobných simulací (Hanel a kol. 2011) a zároveň z hlediska dostupnosti dat shodných pro dané LSM a pozorovaná data pro kontrolní období na zájmových povodích.

Jako počáteční krok byly z [ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock6](ftp://ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock6) staženy soubory obsahující data průměrných měsíčních průtoků pro vybrané LSM (GWAVA, H08, JULES, LPJmL, MPI-HM a WATER GAP) daný řídicí globální klimatický model (CNRM, ECHAM 5 a IPSL) a zvolená období (CTRL 1971-2000, A2 2071-2100 a B1 2071-2100) ve formátu „ncdf“. Data z jednotlivých „ncdf“ souborů, obsahující vždy desetileté časové řady, byla pro zvolená časová období (CTRL 1971-2000, A2 2071-2100 a B1 2071-2100) extrahována a spojena v třicetileté časové řady měsíčních průtoků. Jednotky dat byly následně pro snazší orientaci převedeny z  $\text{m}^3/\text{s}$  na mm. Z takto vytvořených časových řad byly pro obě povodí, všechny vybrané LSM řízené GCM a všechna časová období a emisní scénáře vypočteny průměrné hodnoty odtoku (*tab. 7*, *tab. 8*) dle jednotlivých měsíců (např. lednový průměr za třicet let pro model zemského povrchu GWAVA řízený globálním klimatickým modelem CNRM pro kontrolní období). Z těchto průměrných hodnot pak byly vypočteny hodnoty průměrných simulovaných změn odtoku (A2/CTRL a B1/CTRL) dle jednotlivých LSM řízených GCM.

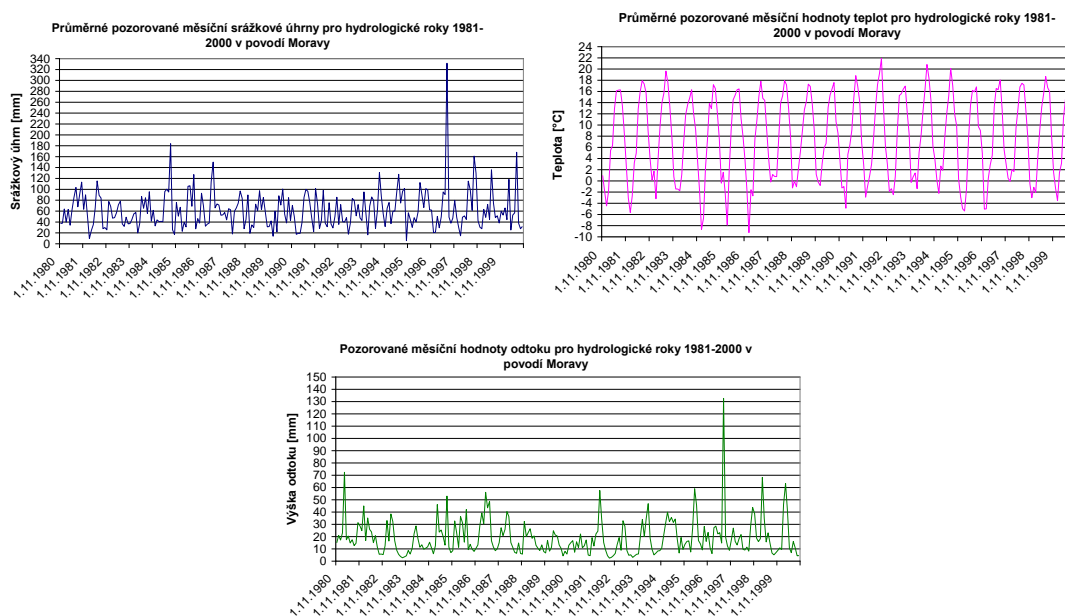




byla použita pozorovaná data mezi hydrologickými roky 1971-1990 (*obr. 10*) a pro povodí Moravy pak pro období mezi hydrologickými roky 1981-2000 (*obr 11*).



Obr. 10: Pozorovaná data na povodí Labe mezi hydrologickými roky 1971 – 1990. Vlevo nahoře je časová řada znázorňující průměrné pozorované měsíční srážkové úhny [mm]. Vpravo nahoře je časová řada znázorňující průměrné pozorované měsíční hodnoty teplot [°C]. Ve spodní části obrázku je pak znázorněna časová řada pozorovaných měsíčních hodnot odtoku [mm] (data poskytnutá VÚV TGM v Praze).

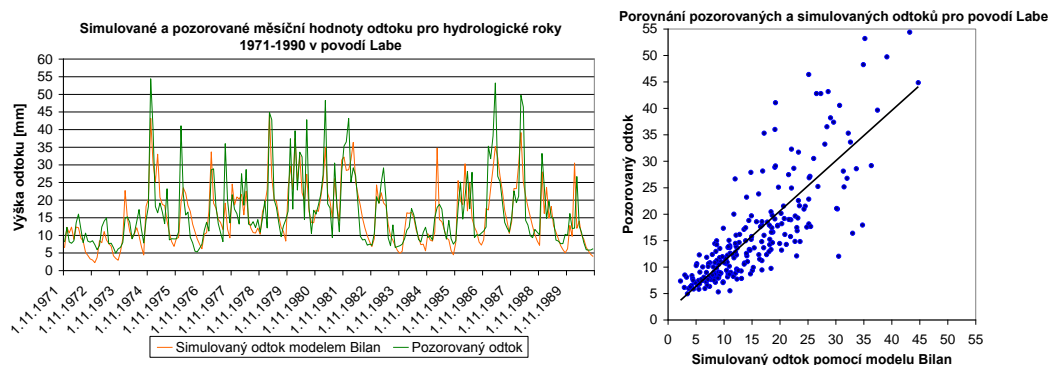


Obr. 11: Pozorovaná data na povodí Moravy mezi hydrologickými roky 1981 – 2000. Vlevo nahoře je časová řada znázorňující průměrné pozorované měsíční srážkové úhny [mm]. Vpravo nahoře je časová řada znázorňující průměrné pozorované měsíční hodnoty teplot [°C]. Ve spodní části obrázku je pak znázorněna časová řada pozorovaných měsíčních hodnot odtoku [mm] (data poskytnutá VÚV TGM v Praze).

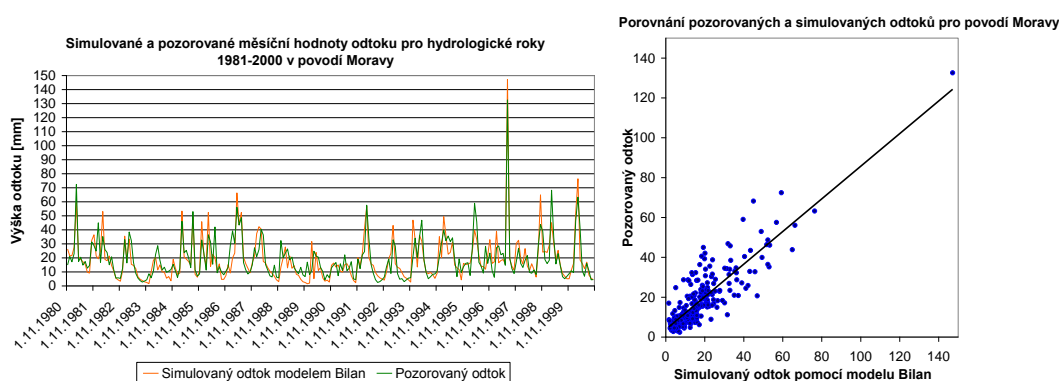
Počátečním krokem pro odvození změn průtoku dle modelu Bilan je jeho kalibrace pomocí dat pozorovaných na zájmových povodích. Vstupními daty do



modelu byly pozorované měsíční časové řady srážek a teplot (poskytnuté VÚV TGM v Praze), pomocí nichž bylo provedeno několik simulací odtokových poměrů v obou povodích pro kontrolní období. Model byl pro další použití ponechán v nastavení, jež poskytlo simulaci s nejlepší shodou mezi pozorovaným a simulovaným odtokem jak pro povodí Labe (obr. 12) tak i pro povodí Moravy (obr. 13).



Obr. 12: Na obrázku vlevo jsou znázorněny časové řady odtoku pro povodí Labe vytvořené na základě simulace modelu Bilan (oranžová křivka) a pozorovaných dat na povodí (zelená křivka). Na obrázku vpravo jsou stejné údaje, avšak znázorněné pomocí bodového grafu. V případě dokonalé shody pozorovaných a simulovaných dat by spojnice trendu procházela od nuly do protějšího rohu grafu v úhlu 45° a všechny body by ležely na této spojnici.



Obr. 13: Na obrázku vlevo jsou znázorněny časové řady odtoku pro povodí Moravy vytvořené na základě simulace modelu Bilan (oranžová křivka) a pozorovaných dat na povodí (zelená křivka). Na obrázku vpravo jsou stejné údaje, avšak znázorněné pomocí bodového grafu. V případě dokonalé shody pozorovaných a simulovaných dat by spojnice trendu procházela od nuly do protějšího rohu grafu v úhlu 45° a všechny body by ležely na této spojnici.

Následně byly pro obě povodí z [ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock6](http://ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock6) staženy „ncdf“ soubory denních dat srážek a teplot z jednotlivých řídicích modelů (ECHAM 5, CNRM a IPSL) jak pro kontrolní tak i budoucí období (tzv. forcing data). Tato data jsou pro všechny porovnávané LSM shodná. Data ze stažených souborů byla následně extrahována a agregována do měsíčních, tak aby je bylo možno použít pro požadované účely. Tento krok bylo nutno provést, protože datové soubory s měsíčními průměry srážek a teplot pro vybrané LSM (tab. 6) byly prázdné. Z nově

vytvořených časových řad srážek a teplot byly vypočítány průměrné hodnoty dle jednotlivých měsíců, s jejichž pomocí byly odvozeny přírůstkové faktory (tab. 9, tab. 10, tab. 11, tab. 12). Hodnoty srážek, byly pro snazší orientaci převedeny z [kg/m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>] na [mm].

Tab. 9: Povodí Labe – Průměrné hodnoty srážkových úhrnů v [mm] dle jednotlivých měsíců odvozené ze simulací GCM. Modrou barvou jsou označeny přírůstkové faktory stanovené na základě porovnání hodnot dle emisního scénáře A2 a hodnot pro kontrolní období. Zelenou barvou jsou označeny přírůstkové faktory stanovené na základě porovnání hodnot dle emisního scénáře B1 a hodnot pro kontrolní období. Úplně ve spodním řádku tabulky jsou pak uvedeny hodnoty průměrných srážkových úhrnů pozorovaných na povodí Labe mezi hydrologickými roky 1971-1990.

Povodí Labe po město Děčín - Simulované hodnoty průměrných srážek dle jednotlivých měsíců odvozené z GCM a stanovené přírůstkové faktory													
GCM a Období	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Průměr
CNRM Control	51,84	51,84	57,89	51,84	72,58	91,58	98,50	82,94	57,89	51,84	54,43	56,16	64,80
CNRM A2	68,26	67,39	82,08	64,80	58,75	68,26	57,02	60,48	39,74	44,93	55,30	75,17	62,21
CNRM B1	69,12	60,48	57,89	62,21	64,80	86,40	72,58	76,90	57,02	50,98	51,84	62,21	63,94
Přírůstkový faktor A2, Control	1,32	1,30	1,42	1,25	0,81	0,75	0,58	0,73	0,69	0,87	1,02	1,34	0,96
Přírůstkový faktor B1, Control	1,33	1,17	1,00	1,20	0,89	0,94	0,74	0,93	0,99	0,98	0,95	1,11	0,99
ECHAM5 Control	51,84	50,11	52,70	52,70	73,44	84,67	83,81	80,35	52,70	48,38	57,89	59,62	62,21
ECHAM5 A2	65,66	52,70	63,94	52,70	64,80	75,17	58,75	69,12	46,66	62,21	55,30	78,62	62,21
ECHAM5 B1	63,07	57,02	59,62	53,57	63,07	90,72	74,30	82,94	54,43	59,62	54,43	78,62	65,66
Přírůstkový faktor A2, Control	1,27	1,05	1,21	1,00	0,88	0,89	0,70	0,86	0,89	1,29	0,96	1,32	1,00
Přírůstkový faktor B1, Control	1,22	1,14	1,13	1,02	0,86	1,07	0,89	1,03	1,03	1,23	0,94	1,32	1,06
IPSL Control	53,57	47,52	56,16	51,84	76,03	89,86	91,58	81,22	55,30	47,52	57,02	56,16	63,94
IPSL A2	61,34	51,84	48,38	49,25	76,03	76,03	111,46	88,99	57,02	54,43	63,94	57,89	66,53
IPSL B1	50,11	41,47	48,38	50,11	90,72	80,35	101,95	88,99	65,66	50,98	66,53	66,53	66,53
Přírůstkový faktor A2, Control	1,15	1,09	0,86	0,95	1,00	0,85	1,22	1,10	1,03	1,15	1,12	1,03	1,04
Přírůstkový faktor B1, Control	0,94	0,87	0,86	0,97	1,19	0,89	1,11	1,10	1,19	1,07	1,17	1,18	1,04
Pozorované srážky Control	45,97	34,22	39,70	45,19	68,34	79,19	84,55	77,60	53,52	42,45	48,49	50,47	55,81

Tab. 10: Povodí Labe – Průměrné teploty ve [°C] dle jednotlivých měsíců odvozené ze simulací GCM. Modrou barvou jsou označeny přírůstkové faktory stanovené na základě porovnání hodnot dle emisního scénáře A2 a hodnot pro kontrolní období. Zelenou barvou jsou označeny přírůstkové faktory stanovené na základě porovnání hodnot dle emisního scénáře B1 a hodnot pro kontrolní období. Úplně ve spodním řádku tabulky jsou pak uvedeny hodnoty průměrných teplot pozorovaných na povodí Labe mezi hydrologickými roky 1971-1990.

Povodí Labe po město Děčín - Simulované hodnoty průměrných teplot dle jednotlivých měsíců odvozené z GCM a stanovené přírůstkové faktory														
GCM	Období	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Průměr
CNRM	Control	-1,88	-0,54	3,04	7,58	12,14	16,11	17,69	17,09	12,98	8,06	3,20	-0,53	7,91
CNRM	A2	2,40	3,43	8,18	10,81	15,32	18,60	23,02	23,75	18,23	11,23	5,64	4,03	12,05
CNRM	B1	0,51	1,55	5,24	9,81	13,46	17,49	19,82	20,21	14,84	9,30	4,87	2,11	9,93
Přírůstkový faktor A2, Control		4,28	3,96	5,14	3,23	3,17	2,49	5,33	6,66	5,25	3,16	2,45	4,56	3,88
Přírůstkový faktor B1, Control		2,38	2,09	2,20	2,24	1,32	1,38	2,13	3,12	1,86	1,24	1,67	2,64	1,91
ECHAM5	Control	-2,06	-1,02	2,86	7,52	12,18	15,61	17,14	16,79	13,30	8,52	2,79	-0,97	7,72
ECHAM5	A2	1,72	3,53	6,59	10,70	15,37	18,81	21,80	21,46	17,16	11,86	5,22	2,25	11,73
ECHAM5	B1	0,77	1,80	4,81	9,92	13,97	18,12	20,29	20,08	16,21	10,53	5,16	1,59	10,27
Přírůstkový faktor A2, Control		3,78	4,55	3,73	3,18	3,20	3,20	4,66	4,67	3,86	3,34	2,43	3,22	3,42
Přírůstkový faktor B1, Control		2,83	2,82	1,95	2,39	1,79	2,51	3,15	3,30	2,91	2,00	2,38	2,55	2,40
IPSL	Control	-2,24	-0,77	3,03	7,33	12,08	15,55	17,77	16,93	13,06	8,11	2,65	-0,79	7,72
IPSL	A2	2,50	2,61	6,89	11,75	16,00	20,60	23,83	22,12	18,11	12,12	6,51	3,48	12,21
IPSL	B1	0,25	1,50	6,49	9,82	14,91	19,04	21,71	20,33	16,36	11,26	4,90	1,77	10,70
Přírůstkový faktor A2, Control		4,73	3,38	3,87	4,43	3,92	5,05	6,06	5,19	5,05	4,01	3,86	4,27	4,19
Přírůstkový faktor B1, Control		2,49	2,28	3,47	2,50	2,83	3,50	3,94	3,40	3,30	3,15	2,26	2,56	2,86
Pozorované teploty Control		-2,29	-1,11	2,81	6,54	12,19	14,93	16,69	16,32	12,39	7,48	2,23	-0,16	7,34

Tab. 11: Povodí Moravy – Průměrné hodnoty srážkových úhrnů v [mm] dle jednotlivých měsíců odvozené ze simulací GCM. Modrou barvou jsou označeny přírůstkové faktory stanovené na základě porovnání hodnot dle emisního scénáře A2 a hodnot pro kontrolní období. Zelenou barvou jsou označeny přírůstkové faktory stanovené na základě porovnání hodnot dle emisního scénáře B1 a hodnot pro kontrolní období. Úplně ve spodním řádku tabulky jsou pak uvedeny hodnoty průměrných srážkových úhrnů pozorovaných na povodí Moravy mezi hydrologickými roky 1981-2000.

Povodí Moravy po město Kroměříž - Simulované hodnoty průměrných srážek dle jednotlivých měsíců odvozené z GCM a stanovené přírůstkové faktory													
GCM a Období	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Průměr
CNRM Control	62,04	61,31	62,51	54,92	78,52	112,33	109,22	97,96	65,29	57,07	65,87	61,94	74,08
CNRM A2	74,21	78,04	77,86	59,12	54,69	77,88	50,78	57,30	37,01	55,80	52,65	69,91	62,32
CNRM B1	79,67	66,53	53,69	58,58	64,89	93,82	86,57	65,88	57,84	61,56	54,33	60,60	67,00
Přírůstkový faktor A2, Control	1,20	1,27	1,25	1,08	0,70	0,69	0,46	0,58	0,57	0,98	0,80	1,13	0,84
Přírůstkový faktor B1, Control	1,28	1,09	0,86	1,07	0,83	0,84	0,79	0,67	0,89	1,08	0,82	0,98	0,90
ECHAM5 Control	80,51	59,09	56,50	67,81	87,34	101,43	103,19	90,15	65,46	54,30	65,98	66,53	72,41
ECHAM5 A2	75,51	63,81	65,64	54,82	87,45	97,45	71,91	77,31	57,12	63,36	61,93	89,55	72,15
ECHAM5 B1	76,86	72,38	64,64	54,62	73,63	107,12	89,69	93,34	65,98	65,45	62,99	88,51	76,30
Přírůstkový faktor A2, Control	1,25	1,08	1,16	0,95	1,00	0,96	0,70	0,86	0,87	1,15	0,94	1,35	1,00
Přírůstkový faktor B1, Control	1,27	1,22	1,14	0,94	0,84	1,06	0,87	1,04	1,01	1,19	0,95	1,33	1,05
IPSL Control	63,74	56,13	59,07	58,56	86,85	102,52	111,35	92,81	63,47	53,03	67,32	63,06	73,16
IPSL A2	77,73	68,41	53,66	58,84	87,00	101,33	139,78	103,28	62,95	55,26	78,68	68,39	79,61
IPSL B1	66,50	50,87	54,98	60,29	97,62	97,20	117,84	105,00	79,92	52,52	76,98	73,92	77,80
Přírůstkový faktor A2, Control	1,22	1,22	0,91	1,00	1,00	0,99	1,26	1,11	0,99	1,04	1,17	1,08	1,09
Přírůstkový faktor B1, Control	1,04	0,91	0,93	1,03	1,12	0,95	1,06	1,13	1,26	0,99	1,14	1,17	1,06
Pozorované srážky Control	44,42	39,16	48,23	47,46	73,58	93,30	91,11	76,16	67,33	48,07	53,82	57,67	61,69

Tab. 12: Povodí Moravy – Průměrné teploty ve [°C] dle jednotlivých měsíců odvozené ze simulací GCM. Modrou barvou jsou označeny přírůstkové faktory stanovené na základě porovnání hodnot dle emisního scénáře A2 a hodnot pro kontrolní období. Zelenou barvou jsou označeny přírůstkové faktory stanovené na základě porovnání hodnot dle emisního scénáře B1 a hodnot pro kontrolní období. Úplně ve spodním řádku tabulky jsou pak uvedeny hodnoty průměrných teplot pozorovaných na povodí Moravy mezi hydrologickými roky 1981-2000.

Povodí Moravy po město Kroměříž - Simulované hodnoty průměrných teplot dle jednotlivých měsíců odvozené z GCM a stanovené přírůstkové faktory														
GCM	Období	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Průměr
CNRM	Control	-2,64	-1,11	2,99	7,40	12,09	15,97	17,49	16,87	12,57	7,93	2,98	-1,09	7,59
CNRM	A2	1,41	3,03	8,13	10,73	15,12	18,55	23,24	24,16	18,06	11,04	5,41	3,30	11,85
CNRM	B1	-0,38	1,04	4,91	9,73	13,32	17,45	19,88	20,47	14,68	9,18	4,72	1,49	9,71
Přírůstkový faktor A2	Control	4,06	4,14	5,54	3,34	3,02	2,58	5,75	7,29	5,49	3,11	2,43	4,39	4,02
Přírůstkový faktor B1	Control	2,26	2,15	2,32	2,33	1,22	1,48	2,38	3,60	2,12	1,25	1,74	2,58	2,02
ECHAM5	Control	-2,77	-1,73	2,39	7,32	12,08	15,41	16,83	16,50	12,95	8,16	2,63	-1,48	7,36
ECHAM5	A2	0,84	2,98	6,14	10,45	15,16	18,47	21,39	21,12	17,03	11,96	5,03	1,59	11,01
ECHAM5	B1	-0,05	1,26	4,29	9,60	13,82	17,90	19,87	19,76	16,00	10,55	4,89	1,23	9,93
Přírůstkový faktor A2	Control	3,61	4,70	3,75	3,13	3,08	3,06	4,56	4,62	4,08	3,79	2,41	3,07	3,44
Přírůstkový faktor B1	Control	2,72	2,99	1,90	2,28	1,74	2,49	3,04	3,26	3,06	2,38	2,26	2,71	2,43
IPSL	Control	-3,01	-1,42	2,47	7,06	11,91	15,47	17,46	16,66	12,68	7,93	2,35	-1,28	7,36
IPSL	A2	1,75	2,14	6,64	11,53	15,97	20,41	23,80	22,11	17,98	12,09	6,39	2,91	11,98
IPSL	B1	-0,36	1,04	6,15	9,69	15,00	18,93	21,60	20,31	16,13	11,18	4,83	1,23	10,48
Přírůstkový faktor A2	Control	4,76	3,56	4,18	4,46	4,06	4,95	6,34	5,45	5,30	4,13	4,04	4,19	4,32
Přírůstkový faktor B1	Control	2,65	2,46	3,68	2,63	3,09	3,47	4,14	3,65	3,45	3,25	2,48	2,51	2,99
Pozorované teploty	Control	-2,48	-1,42	2,63	7,73	12,99	15,54	17,54	17,26	12,93	8,18	2,28	-1,19	7,67

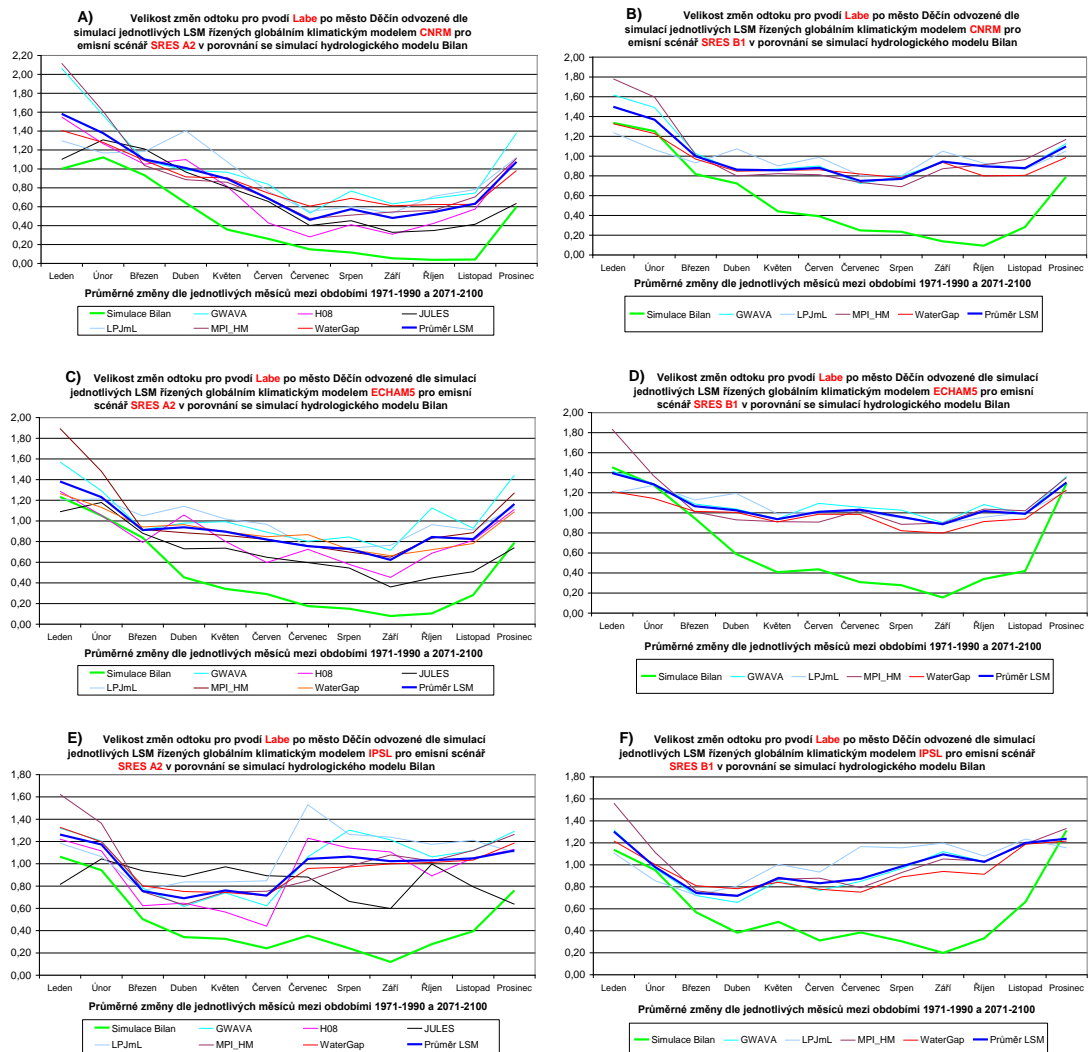
Pomocí těchto přírůstkových faktorů byly upraveny původní časové řady pozorovaných srážek a teplot na obou zájmových povodích, jež byly následně použity jako vstupní časové řady pro modelování změn odtoku pomocí modelu Bilan pro oba emisní scénáře dle jednotlivých řídicích modelů (ECHAM 5, CNRM a IPSL). Souhrnné relativní změny odtoku simulované pomocí modelu Bilan a jednotlivými LSM jsou pro povodí Labe uvedeny v (tab. 13) a pro povodí Moravy v (tab. 14). Grafické znázornění souhrnných relativních změn odtoku simulovaných pomocí modelu Bilan a jednotlivými LSM je pak znázorněno pro povodí Labe na (obr. 14) a pro povodí Moravy na (obr. 15).

Tab. 13: Povodí Labe – Průměrné relativní změny (změny mezi budoucím a kontrolním obdobím) odtokových výšek dle jednotlivých měsíců simulované pomocí LSM a modelu Bilan, jehož vstupní časové řady teplot a srážek pro budoucí období byly upraveny pomocí přírůstkových faktorů získaných z GCM. Šedým podbarvením jsou vyznačeny souhrnné velikosti relativních změn ze všech uplatněných LSM, v závislosti na použitém řídicím modelu a emisním scénáři. Žlutým podbarvením jsou vyznačeny velikosti relativních změn, získaných na základě srovnání simulací modelu Bilan pro budoucí období v závislosti na použitém řídicím modelu a emisním scénáři se simulací pro kontrolní období.

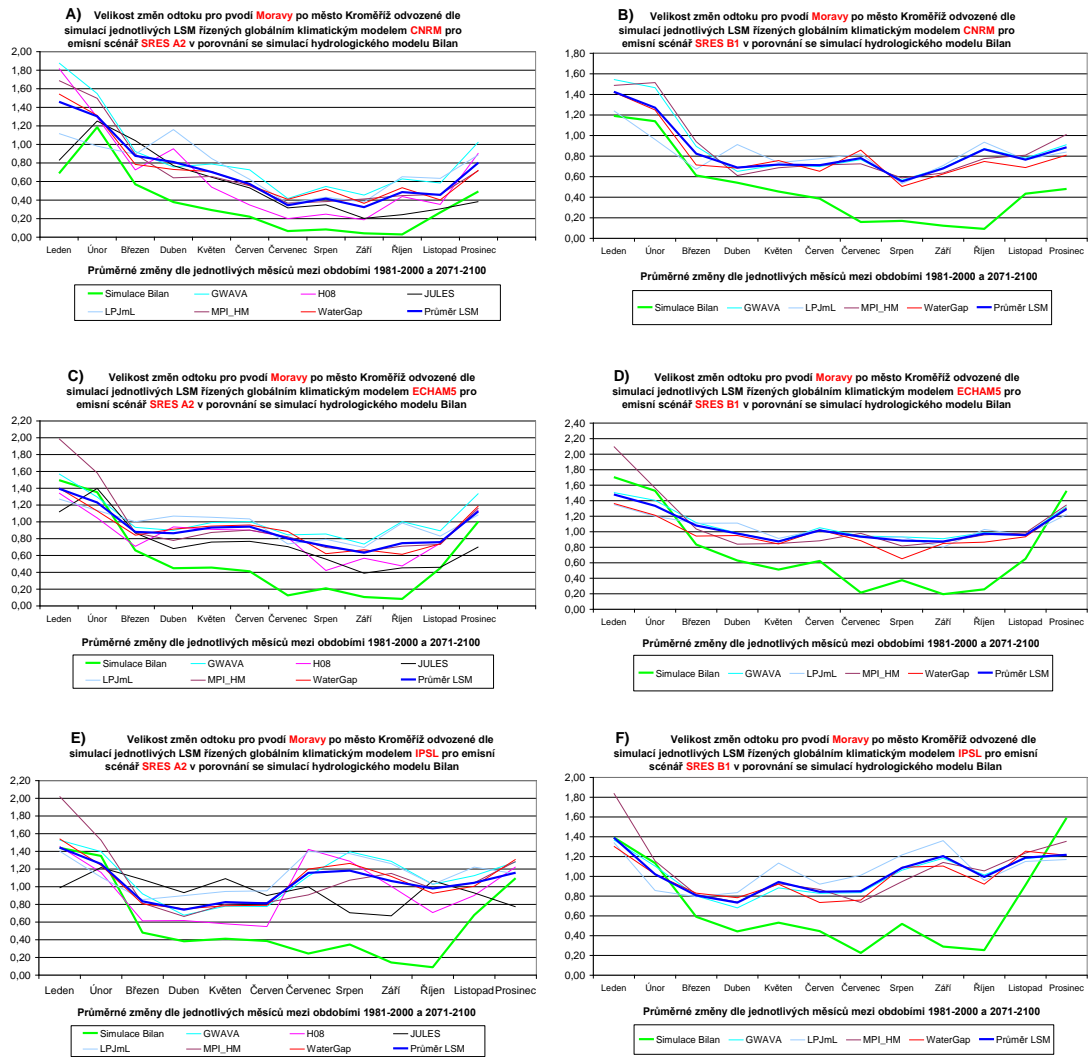
Povodí Labe po město Děčín - Porovnání relativních změn odtoku stanovených pomocí jednotlivých LSM a modelu Bilan															
	LSM	GCM	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Průměrná změna
Změna A2/Control	Gwava	CNRM	2,06	1,57	1,09	0,99	0,96	0,84	0,53	0,77	0,63	0,69	0,75	1,38	1,02
Změna A2/Control	H08	CNRM	1,55	1,27	1,05	1,10	0,81	0,43	0,28	0,41	0,31	0,42	0,57	1,12	0,85
Změna A2/Control	Jules	CNRM	1,10	1,31	1,21	0,97	0,81	0,65	0,40	0,45	0,33	0,35	0,41	0,63	0,75
Změna A2/Control	LPJmL	CNRM	1,30	1,17	1,18	1,40	1,08	0,76	0,55	0,60	0,53	0,71	0,78	1,12	0,99
Změna A2/Control	MPI_HM	CNRM	2,12	1,61	1,04	0,89	0,86	0,69	0,48	0,51	0,54	0,56	0,70	1,11	0,90
Změna A2/Control	Water Gap	CNRM	1,41	1,28	1,09	0,92	0,91	0,74	0,61	0,69	0,61	0,62	0,63	0,98	0,92
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,58	1,38	1,10	1,01	0,90	0,69	0,46	0,57	0,48	0,54	0,63	1,07	0,91
<b>Velikost změn dle simulací CNRM A2 Bilan/Control Bilan</b>			1,00	1,12	0,93	0,84	0,36	0,26	0,15	0,12	0,05	0,04	0,04	0,60	0,55
Změna B1/Control	Gwava	CNRM	1,62	1,49	1,03	0,85	0,87	0,80	0,72	0,80	0,94	0,90	0,87	1,13	1,00
Změna B1/Control	LPJmL	CNRM	1,29	1,05	0,75	1,07	0,90	0,99	0,80	0,80	1,05	0,93	0,87	1,05	0,98
Změna B1/Control	MPI_HM	CNRM	1,78	1,60	1,01	0,80	0,82	0,81	0,73	0,69	0,87	0,91	0,96	1,17	0,95
Změna B1/Control	Water Gap	CNRM	1,33	1,23	0,97	0,85	0,85	0,86	0,82	0,78	0,94	0,80	0,81	0,98	0,95
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,50	1,37	1,00	0,86	0,86	0,88	0,75	0,77	0,94	0,90	0,88	1,10	0,98
<b>Velikost změn dle simulací CNRM B1 Bilan/Control Bilan</b>			1,34	1,25	0,82	0,72	0,44	0,39	0,25	0,23	0,14	0,09	0,28	0,79	0,66
Změna A2/Control	Gwava	ECHAM5	1,57	1,29	0,91	0,98	0,99	0,89	0,80	0,84	0,71	1,13	0,93	1,44	1,05
Změna A2/Control	Jules	ECHAM5	1,09	1,18	0,88	0,73	0,74	0,65	0,60	0,54	0,36	0,45	0,51	0,74	0,76
Změna A2/Control	LPJmL	ECHAM5	1,20	1,21	1,05	1,14	1,02	0,97	0,75	0,74	0,76	0,96	0,91	1,13	1,03
Změna A2/Control	MPI_HM	ECHAM5	1,89	1,48	0,92	0,89	0,86	0,82	0,76	0,70	0,65	0,83	0,89	1,27	0,99
Změna A2/Control	Water Gap	ECHAM5	1,26	1,13	0,94	0,96	0,89	0,85	0,87	0,72	0,66	0,72	0,78	1,09	0,94
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,38	1,23	0,91	0,94	0,90	0,82	0,76	0,73	0,62	0,84	0,82	1,16	0,97
<b>Velikost změn dle simulací ECHAM5 A2 Bilan/Control Bilan</b>			1,23	1,05	0,84	0,45	0,34	0,29	0,18	0,15	0,08	0,10	0,28	0,79	0,57
Změna B1/Control	Gwava	ECHAM5	1,42	1,29	1,09	1,04	0,94	1,09	1,05	1,03	0,90	1,08	0,99	1,36	1,12
Změna B1/Control	LPJmL	ECHAM5	1,19	1,27	1,13	1,19	0,99	1,01	1,02	0,95	0,89	0,96	1,01	1,21	1,10
Změna B1/Control	MPI_HM	ECHAM5	1,83	1,37	1,01	0,93	0,91	0,91	1,02	0,89	0,90	1,04	1,02	1,35	1,07
Změna B1/Control	Water Gap	ECHAM5	1,21	1,14	1,01	1,00	0,91	0,99	0,98	0,82	0,80	0,91	0,94	1,23	1,02
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,40	1,29	1,07	1,03	0,94	1,01	1,03	0,96	0,89	1,02	0,99	1,30	1,09
<b>Velikost změn dle simulací ECHAM5 B1 Bilan/Control Bilan</b>			1,45	1,28	0,95	0,59	0,41	0,44	0,31	0,28	0,16	0,34	0,42	1,29	0,76
Změna A2/Control	Gwava	IPSL	1,32	1,21	0,78	0,82	0,74	0,62	1,06	1,30	1,21	1,06	1,12	1,29	0,98
Změna A2/Control	H08	IPSL	1,22	1,12	0,62	0,65	0,57	0,44	1,23	1,14	1,11	0,89	1,05	1,13	0,93
Změna A2/Control	Jules	IPSL	0,81	1,04	0,94	0,89	0,97	0,89	0,88	0,66	0,60	1,00	0,79	0,64	0,83
Změna A2/Control	LPJmL	IPSL	1,18	1,06	0,76	0,84	0,84	0,85	1,53	1,26	1,24	1,17	1,21	1,10	1,04
Změna A2/Control	MPI_HM	IPSL	1,62	1,36	0,75	0,63	0,75	0,75	0,85	0,98	1,08	1,02	1,12	1,26	0,92
Změna A2/Control	Water Gap	IPSL	1,33	1,20	0,80	0,75	0,74	0,72	0,96	0,97	1,00	1,01	1,03	1,19	0,96
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,25	1,17	0,75	0,69	0,74	0,71	1,08	1,25	1,19	1,03	1,05	1,12	0,95
<b>Velikost změn dle simulací IPSL A2 Bilan/Control Bilan</b>			1,06	0,94	0,50	0,34	0,33	0,24	0,35	0,24	0,12	0,28	0,39	0,76	0,52
Změna B1/Control	Gwava	IPSL	1,32	0,97	0,72	0,66	0,85	0,77	0,85	0,97	1,12	1,03	1,19	1,24	0,94
Změna B1/Control	LPJmL	IPSL	1,11	0,86	0,72	0,81	1,00	0,93	1,17	1,15	1,20	1,08	1,23	1,15	0,99
Změna B1/Control	MPI_HM	IPSL	1,56	1,11	0,76	0,72	0,87	0,88	0,79	0,93	1,05	1,03	1,19	1,33	0,94
Změna B1/Control	Water Gap	IPSL	1,22	1,00	0,81	0,78	0,84	0,78	0,75	0,89	0,94	0,91	1,19	1,22	0,93
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,30	0,98	0,74	0,72	0,88	0,83	0,87	0,99	1,10	1,03	1,20	1,24	0,95
<b>Velikost změn dle simulací IPSL B1 Bilan/Control Bilan</b>			1,14	0,85	0,57	0,38	0,48	0,31	0,38	0,30	0,20	0,33	0,66	1,31	0,64

Tab. 14: Povodí Moravy – Průměrné relativní změny (změny mezi budoucím a kontrolním obdobím) odtokových výšek dle jednotlivých měsíců simulované pomocí LSM a modelu Bilan, jehož vstupní časové řady teplot a srážek pro budoucí období byly upraveny pomocí přírůstkových faktorů získaných z GCM. Šedým podbarvením jsou vyznačeny souhrnné velikosti relativních změn ze všech uplatněných LSM, v závislosti na použitém řídicím modelu a emisním scénáři. Žlutým podbarvením jsou vyznačeny velikosti relativních změn, získaných na základě srovnání simulací modelu Bilan pro budoucí období v závislosti na použitém řídicím modelu a emisním scénáři se simulací pro kontrolní období.

Povodí Moravy po město Kroměříž - Porovnání relativních změn odtoku stanovených pomocí jednotlivých LSM a modelu Bilan															
	LSM	GCM	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Průměrná změna
Změna A2/Control	Gwava	CNRM	1,88	1,55	0,92	0,76	0,79	0,73	0,42	0,58	0,45	0,63	0,58	1,03	0,69
Změna A2/Control	H08	CNRM	1,82	1,29	0,72	0,95	0,54	0,35	0,20	0,25	0,19	0,44	0,35	0,91	0,69
Změna A2/Control	Jules	CNRM	0,83	1,25	1,04	0,77	0,63	0,53	0,32	0,35	0,30	0,24	0,30	0,38	0,58
Změna A2/Control	LPJmL	CNRM	1,12	0,98	0,89	1,16	0,85	0,62	0,36	0,43	0,38	0,69	0,63	0,89	0,78
Změna A2/Control	MPI_HM	CNRM	1,69	1,50	0,89	0,64	0,65	0,55	0,37	0,38	0,41	0,45	0,46	0,72	0,70
Změna A2/Control	Water Gap	CNRM	1,54	1,31	0,78	0,73	0,71	0,56	0,41	0,52	0,36	0,53	0,40	0,72	0,75
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,48	1,30	0,88	0,81	0,70	0,57	0,34	0,42	0,32	0,49	0,46	0,80	0,73
<b>Velikost změn dle simulací CNRM A2 Bilan/Control Bilan</b>			0,69	1,18	0,57	0,38	0,29	0,22	0,07	0,09	0,04	0,03	0,27	0,49	0,44
Změna B1/Control	Gwava	CNRM	1,54	1,46	0,89	0,65	0,71	0,70	0,77	0,57	0,69	0,87	0,78	0,91	0,85
Změna B1/Control	LPJmL	CNRM	1,24	1,05	0,71	0,94	0,91	0,90	0,82	0,42	0,57	0,48	0,75	1,14	0,91
Změna B1/Control	MPI_HM	CNRM	1,49	1,51	0,94	0,81	0,69	0,71	0,72	0,59	0,64	0,78	0,81	1,01	0,81
Změna B1/Control	Water Gap	CNRM	1,42	1,25	0,71	0,68	0,76	0,65	0,66	0,50	0,63	0,75	0,69	0,81	0,81
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,43	1,27	0,82	0,69	0,72	0,71	0,78	0,55	0,68	0,87	0,77	0,89	0,83
<b>Velikost změn dle simulací CNRM B1 Bilan/Control Bilan</b>			1,19	1,14	0,61	0,54	0,46	0,39	0,16	0,17	0,12	0,09	0,43	0,48	0,56
Změna A2/Control	Gwava	ECHAM5	1,57	1,29	0,93	0,90	0,99	1,00	0,84	0,85	0,74	1,00	0,89	1,34	1,03
Změna A2/Control	H08	ECHAM5	1,34	1,05	0,71	0,94	0,91	0,90	0,82	0,42	0,57	0,48	0,75	1,14	0,91
Změna A2/Control	Jules	ECHAM5	1,12	1,40	0,87	0,68	0,76	0,77	0,71	0,56	0,39	0,45	0,46	0,70	0,77
Změna A2/Control	LPJmL	ECHAM5	1,27	1,14	1,00	1,07	1,05	1,03	0,74	0,79	0,69	0,99	0,83	1,08	1,00
Změna A2/Control	MPI_HM	ECHAM5	1,99	1,58	0,87	0,78	0,87	0,90	0,82	0,69	0,65	0,71	0,73	1,16	0,96
Změna A2/Control	Water Gap	ECHAM5	1,40	1,13	0,84	0,91	0,95	0,96	0,89	0,62	0,67	0,61	0,74	1,19	0,93
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,39	1,23	0,88	0,85	0,93	0,94	0,80	0,71	0,63	0,75	0,76	1,12	0,95
<b>Velikost změn dle simulací ECHAM5 A2 Bilan/Control Bilan</b>			1,50	1,35	0,66	0,45	0,46	0,41	0,12	0,21	0,11	0,08	0,45	1,00	0,66
Změna B1/Control	Gwava	ECHAM5	1,50	1,40	1,12	0,98	0,87	1,05	0,94	0,93	0,91	0,99	0,96	1,32	1,09
Změna B1/Control	LPJmL	ECHAM5	1,35	1,20	1,11	1,11	0,91	1,03	0,92	0,93	0,90	1,03	0,96	1,22	1,08
Změna B1/Control	MPI_HM	ECHAM5	2,10	1,56	1,03	0,84	0,85	0,88	0,98	0,82	0,87	0,96	0,98	1,35	1,05
Změna B1/Control	Water Gap	ECHAM5	1,36	1,21	0,94	0,95	0,84	1,02	0,88	0,65	0,85	0,86	0,93	1,31	1,01
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,48	1,33	1,08	0,98	0,87	1,02	0,94	0,89	0,87	0,97	0,96	1,29	1,07
<b>Velikost změn dle simulací ECHAM5 B1 Bilan/Control Bilan</b>			1,70	1,53	0,83	0,63	0,51	0,62	0,21	0,37	0,19	0,26	0,65	1,53	0,85
Změna A2/Control	Gwava	IPSL	1,53	1,40	0,92	0,69	0,78	0,78	1,12	1,39	1,29	1,03	1,12	1,28	1,07
Změna A2/Control	H08	IPSL	1,46	1,16	0,61	0,62	0,58	0,55	1,42	1,28	1,00	0,71	0,90	1,22	0,99
Změna A2/Control	Jules	IPSL	0,99	1,22	1,08	0,93	1,09	0,90	1,00	0,71	0,67	1,07	0,93	0,77	0,93
Změna A2/Control	LPJmL	IPSL	1,40	1,11	0,85	0,90	0,95	0,95	1,40	1,37	1,26	1,03	1,22	1,15	1,11
Změna A2/Control	MPI_HM	IPSL	2,02	1,53	0,81	0,66	0,80	0,82	0,91	1,07	1,15	0,98	1,04	1,28	0,98
Změna A2/Control	Water Gap	IPSL	1,54	1,24	0,81	0,75	0,78	0,79	1,20	1,26	1,12	0,93	1,00	1,31	1,04
<b>Průměrná velikost změn simulovaná pomocí LSM</b>			1,44	1,26	0,83	0,74	0,83	0,81	1,16	1,18	1,06	0,96	1,04	1,16	1,03
<b>Velikost změn dle simulací IPSL A2 Bilan/Control Bilan</b>															



Obr. 14: Povodí Labe - Grafické znázornění souhrnných změn odtoku simulovaných pomocí modelu Bilan a jednotlivými LSM. Tučná zelená křivka na každém z šestic obrázků znázorňuje změny mezi kontrolním a budoucím obdobím stanovené na základě simulací hydrologického modelu Bilan. Tučná modrá křivka na každém z šestic obrázků pak znázorňuje změny mezi kontrolním a budoucím obdobím stanovené jako průměrná hodnota porovnávaných LSM. Slabě jsou pak znázorněny simulované změny mezi kontrolním a budoucím obdobím konkrétními LSM. **A)** simulace řízené CNRM dle SRES A2, **B)** simulace řízené CNRM dle SRES B1, **C)** simulace řízené ECHAM 5 dle SRES A2, **D)** simulace řízené ECHAM 5 dle SRES B1, **E)** simulace řízené IPSL dle SRES A2, **F)** simulace řízené IPSL dle SRES B1.



Obr. 15: Povodí Moravy - Grafické znázornění souhrnných změn odtoku simulovaných pomocí modelu Bilan a jednotlivými LSM. Tučná zelená křivka na každém z šestic obrázků znázorňuje změny mezi kontrolním a budoucím obdobím stanovené na základě simulací hydrologického modelu Bilan. Tučná modrá křivka na každém z šestic obrázků pak znázorňuje změny mezi kontrolním a budoucím obdobím stanovené jako průměrná hodnota porovnávaných LSM. Slabě jsou pak znázorněny simulované změny mezi kontrolním a budoucím obdobím konkrétními LSM. **A)** simulace řízené CNRM dle SRES A2, **B)** simulace řízené CNRM dle SRES B1, **C)** simulace řízené ECHAM 5 dle SRES A2, **D)** simulace řízené ECHAM 5 dle SRES B1, **E)** simulace řízené IPSL dle SRES A2, **F)** simulace řízené IPSL dle SRES B1.

Souhrnný přehled pozorovaných a simulovaných odtokových výšek [mm] pro kontrolní a budoucí období pomocí modelu Bilan a jednotlivými LSM je pro povodí Labe uveden v (tab. 15) a pro povodí Moravy v (tab. 16).

Tab. 15: Povodí Labe – Porovnání průměrných hodnot odtokových výšek v [mm] dle jednotlivých měsíců. V případě kontrolního období jsou hodnoty simulované pomocí LSM (řádky 1-6, 8-13 a 15-20) porovnávány jak s pozorovanými hodnotami (řádek 23), tak i se simulovanými hodnotami pro kontrolní období pomocí modelu Bilan (řádek 24). V řádcích 7, 14 a 21 jsou uvedeny průměrné hodnoty simulací LSM dle jednotlivých řídicích modelů. V řádku 22 jsou vypočteny průměrné hodnoty odtoku ze všech simulací LSM pro kontrolní období. V případě budoucích období jsou hodnoty simulované pomocí LSM porovnávány se simulacemi modelu Bilan v následujících kombinacích (řádky 25-30 s řádkem 32, řádky 33-38 s řádkem 40, řádky 41-46 s řádkem 48, řádky 51-54 s řádkem 56, řádky 57-60 s řádkem 62 a řádky 63-66 s řádkem 68). V řádcích 31, 39, 47, 55, 61 a 67 jsou vypočteny průměrné hodnoty odtoku ze všech simulací LSM vždy pro konkrétní emisní scénář a řídicí model. V řádku 49 jsou vypočteny průměrné hodnoty odtoku ze všech simulací LSM pro budoucí období dle emisního scénáře SRES A2 a v řádku 69 dle emisního scénáře SRES B1. V řádku 50 jsou vypočteny průměrné hodnoty odtoku ze všech simulací modelu Bilan pro budoucí období dle emisního scénáře SRES A2 a v řádku 70 dle emisního scénáře SRES B1. V posledním sloupci tabulky jsou pak uvedeny průměrné roční hodnoty odtokových výšek v daném období.

Povodí Labe po město Děčín - Pozorované průměrné hodnoty odtoku dle jednotlivých měsíců a simulované hodnoty průměrných odtoků dle jednotlivých měsíců pro daná období, emisní scénáře a řídicí modely dle LSM a modelu Bilan																	
	Model	Období	GCM	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Celkový součet	
Kontrolní období	1	Gwava	Control	CNRM	8,84	11,35	18,68	16,12	12,51	9,86	11,90	9,96	8,66	8,51	8,84	9,40	134,69
	2	H08	Control	CNRM	8,63	9,91	12,86	8,18	6,77	6,97	7,32	6,27	5,22	6,47	8,01	9,60	96,36
	3	JULES	Control	CNRM	7,71	7,13	9,32	10,14	8,42	6,67	8,41	7,30	6,67	6,53	6,76	7,79	92,83
	4	LPJmL	Control	CNRM	6,22	7,60	8,72	5,28	4,33	4,37	5,12	4,61	3,26	3,52	4,62	5,41	63,22
	5	MPI_HM	Control	CNRM	3,75	6,03	12,77	13,36	10,35	8,35	8,27	5,63	3,62	3,34	3,55	4,38	83,97
	6	WaterGap	Control	CNRM	2,84	3,46	4,86	4,10	3,05	2,65	2,56	2,14	1,80	1,93	2,36	2,80	34,61
	7	Průměr LSM pro control	CNRM		6,33	7,58	11,20	9,53	7,57	6,48	7,26	5,99	4,87	5,05	5,69	6,56	84,28
	8	Gwava	Control	ECHAM5	12,55	12,94	19,11	14,62	11,66	9,95	8,96	10,14	8,29	6,88	8,37	10,77	134,39
	9	H08	Control	ECHAM5	9,59	9,37	10,32	5,73	4,19	2,74	1,96	2,60	2,95	3,53	5,16	9,35	67,72
	10	JULES	Control	ECHAM5	6,90	6,60	9,11	9,46	6,64	5,12	3,97	3,75	3,65	3,84	4,27	6,08	69,49
	11	LPJmL	Control	ECHAM5	7,92	7,43	8,93	5,83	5,41	4,74	4,24	4,39	3,69	4,03	4,93	7,05	68,70
	12	MPI_HM	Control	ECHAM5	4,78	7,00	11,87	11,43	9,52	7,49	5,48	4,22	3,28	2,99	3,62	4,71	76,51
	13	WaterGap	Control	ECHAM5	3,99	4,14	5,33	4,09	3,51	2,78	2,39	2,39	2,31	2,54	3,00	3,79	40,34
	14	Průměr LSM pro control	ECHAM5		7,62	7,91	10,78	8,53	6,82	5,47	4,50	4,58	4,03	3,97	4,89	6,96	76,19
	15	Gwava	Control	IPSL	9,81	10,52	16,60	12,31	10,35	8,82	8,33	6,40	4,91	5,55	7,22	8,73	109,64
	16	H08	Control	IPSL	8,17	8,67	11,26	4,63	3,48	2,67	2,35	1,93	1,91	2,51	4,17	8,28	60,21
	17	JULES	Control	IPSL	3,62	3,11	4,49	4,52	3,72	4,32	4,64	4,39	4,15	4,18	4,99	4,90	50,98
	18	LPJmL	Control	IPSL	5,47	6,45	8,53	4,67	4,18	3,36	3,54	3,29	2,40	2,52	3,40	5,03	52,95
	19	MPI_HM	Control	IPSL	4,51	6,35	13,10	11,69	9,93	8,13	7,05	4,85	3,41	2,96	3,35	4,66	80,02
	20	WaterGap	Control	IPSL	2,90	3,35	5,09	3,77	3,22	2,40	2,11	1,67	1,43	1,52	1,96	2,73	32,21
	21	Průměr LSM pro control	IPSL		5,75	6,41	9,84	6,93	5,81	4,95	4,67	3,75	3,04	3,21	4,18	5,72	64,33
	22	Průměr LSM Control			6,57	7,30	10,61	8,33	6,73	5,63	5,48	4,77	3,98	4,08	4,92	6,42	74,93
	23	Pozorovaná data control			20,34	18,49	24,83	23,43	17,55	13,49	13,61	11,77	9,52	11,15	12,96	19,09	195,86
24	Simulovaná data Bilan control			18,22	22,38	24,12	19,40	17,70	15,21	13,28	10,72	8,56	8,94	12,46	17,31	188,30	
Budoucí období dle SRES A2	25	Gwava	A2	CNRM	18,24	17,81	20,33	15,91	12,07	8,25	6,33	7,62	5,46	5,86	6,59	12,97	137,82
	26	H08	A2	CNRM	13,37	12,56	13,49	8,99	5,51	2,98	2,05	2,57	1,61	2,74	4,60	10,71	81,51
	27	JULES	A2	CNRM	8,48	9,33	11,28	9,81	6,81	4,37	3,37	3,30	2,19	2,27	2,80	4,94	69,22
	28	LPJmL	A2	CNRM	8,07	8,88	10,32	7,40	4,66	3,33	2,82	2,77	1,73	2,50	3,61	6,06	62,39
	29	MPI_HM	A2	CNRM	7,95	9,71	13,24	11,84	8,88	5,76	3,93	2,88	1,97	1,87	2,50	4,87	75,68
	30	WaterGap	A2	CNRM	3,99	4,43	5,30	3,75	2,76	1,97	1,55	1,47	1,09	1,20	1,47	2,75	31,87
	31	Průměr LSM pro A2	CNRM		10,02	10,45	12,33	9,62	6,78	4,44	3,34	3,43	2,34	2,74	3,59	7,05	76,42
	32	Bilan	A2	CNRM	18,22	25,11	22,52	12,40	6,35	3,95	1,97	1,24	0,46	0,34	0,52	10,37	103,44
	33	Gwava	A2	ECHAM5	19,69	16,71	17,44	14,31	11,58	8,87	7,18	8,56	5,92	7,74	7,77	15,55	141,57
	34	H08	A2	ECHAM5	12,35	9,87	8,17	6,06	3,36	1,64	1,42	1,50	1,34	2,43	4,19	10,39	62,95
	35	JULES	A2	ECHAM5	7,51	7,77	8,01	6,90	4,89	3,32	2,37	2,04	1,32	1,72	2,17	4,51	52,76
	36	LPJmL	A2	ECHAM5	9,53	9,01	9,37	6,65	5,51	4,59	3,20	3,24	2,82	3,88	4,50	8,00	70,49
	37	MPI_HM	A2	ECHAM5	9,04	10,36	10,89	10,12	8,18	6,14	4,16	2,94	2,13	2,49	3,20	5,98	75,96
	38	WaterGap	A2	ECHAM5	5,05	4,68	5,01	3,94	3,14	2,36	2,07	1,73	1,53	1,83	2,35	4,13	37,91
	39	Průměr LSM pro A2	ECHAM5		10,53	9,73	9,82	8,00	6,11	4,48	3,40	3,33	2,51	3,35	4,03	8,09	73,61
	40	Bilan	A2	ECHAM5	22,45	23,51	20,18	8,79	6,05	4,43	2,32	1,60	0,68	0,93	3,51	13,66	108,12
	41	Gwava	A2	IPSL	12,94	12,68	12,98	7,60	7,64	5,48	8,84	8,33	5,96	5,89	8,07	11,27	107,82
	42	H08	A2	IPSL	9,96	9,67	7,02	2,99	1,97	1,17	2,89	2,20	2,11	2,24	4,38	9,35	56,23
43	JULES	A2	IPSL	2,95	3,24	4,20	4,01	3,61	3,86	4,08	2,91	2,48	4,17	3,95	3,12	42,56	
44	LPJmL	A2	IPSL	6,47	6,86	6,47	3,91	3,50	2,84	5,41	4,15	2,97	2,96	4,11	5,55	55,32	
45	MPI_HM	A2	IPSL	7,32	8,65	9,81	7,38	7,41	6,13	5,98	4,75	3,68	3,04	3,75	5,89	73,95	
46	WaterGap	A2	IPSL	3,85	4,01	4,08	2,83	2,39	1,72	2,02	1,62	1,43	1,54	2,03	3,24	30,84	
47	Průměr LSM pro A2	IPSL		7,25	7,52	7,43	4,79	4,42	3,53	4,87	3,99	3,11	3,31	4,38	6,40	61,12	
48	Bilan	A2	IPSL	19,37	21,09	12,13	6,63	5,78	3,67	4,71	2,59	1,02	2,49	4,92	13,18	97,58	
49	Průměr LSM A2			9,27	9,23	9,86	7,47	5,77	4,15	3,87	3,59	2,65	3,13	4,00	7,18	70,38	
50	Průměr Bilan A2			20,02	23,24	18,28	9,27	6,06	4,02	3,00	1,81	0,72	1,25	2,98	12,41	103,05	
Budoucí období dle SRES B1	51	Gwava	B1	CNRM	14,30	16,92	19,17	13,72	10,88	8,87	8,59	7,93	8,12	7,66	7,69	10,59	134,87
	52	LPJmL	B1	CNRM	7,70	8,10	8,13	5,66	3,89	4,32	4,12	3,70	3,42	3,27	4,00	5,68	62,19
	53	MPI_HM	B1	CNRM	6,69	9,63	12,93	10,67	8,50	6,77	6,06	3,89	3,15	3,05	3,42	5,12	80,15
	54	WaterGap	B1	CNRM	3,77	4,25	4,71	3,47	2,60	2,28	2,09	1,67	1,68	1,54	1,90	2,76	32,85
	55	Průměr LSM pro B1	CNRM		8,11	9,73	11,24	8,38	6,47	5,56	5,22	4,30	4,09	3,88	4,25	6,04	77,52
	56	Bilan	B1	CNRM	24,34	28,00	19,71	14,02	7,81	5,95	3,30	2,51	1,18	0,84	3,52	13,69	124,86
	57	Gwava	B1	ECHAM5	17,76	16,70	20,79	15,18	10,96	10,89	9,45	10,41	7,47	7,45	8,24	14,69	150,24
	58	LPJmL	B1	ECHAM5	9,47	9,47	10,07	6,96	5,36	4,78	4,31	4,17	3,30	3,85	4,95	8,56	75,44
	59	MPI_HM	B1	ECHAM5	8,76	9,60	11,98	10,64	8,68	6,80	5,60	3,73	2,95	3,10	3,69	6,36	82,11
	60	WaterGap	B1	ECHAM5	4,84	4,74	5,40	4,11	3,20	2,74	2,35	1,97	1,84	2,32	2,82	4,66	41,07
	61	Průměr LSM pro B1	ECHAM5		10,21	10,12	12,06	9,22	7,05	6,30	5,43	5,07	3,89	4,18	4,93	8,57	87,22
	62	Bilan	B1	ECHAM5	26,49	28,62	22,82	11,44	7,21	6,64	4,10	2,98	1,34	3,03	5,22	22,38	142,26
	63	Gwava	B1	IPSL	12,93	10,18	11,96	8,10	8,84	6,76	7,08	6,20	5,49	5,71	8,60	10,84	102,74
	64	LPJmL	B1	IPSL	6,06	5,52	6,17	3,77	4,20	3,14	4,13	3,79	2,88	2,72	4,19	5,81	52,40
	65	MPI_HM	B1	IPSL	7,04	7,07	10,00	8,44	8,62	7,14	5,58	4,52	3,59	3,06	3,98	6,21	75,32
	66	WaterGap	B1	IPSL	3,53	3,36	4,12	2,95	2,71	1,87	1,59	1,48	1,35	1,39	2,33	3,32	30,05
	67	Průměr LSM pro B1	IPSL		7,39	6,53	8,06	5,82	6,09	4,72	4,59	4,00	3,33	3,22	4,78	6,54	65,13
68	Bilan	B1	IPSL	20,71	21,34	13,69	7,42	8,52	4,74	5,10	3,26	1,70	2,96	8,27	22,74	120,44	
69	Průměr LSM B1			8,57	8,79	10,45	7,81	6,54	5,53	5,08	4,46	3,77	3,76	4,65	7,05	76,62	
70	Průměr Bilan B1			23,85	25,99	18,74	10,96	7,85	5,78	4,17	2,92	1,40	2,28	5,67	19,60	129,19	

Tab. 16: Povodí Moravy – Porovnání průměrných hodnot odtokových výšek v [mm] dle jednotlivých měsíců. V případě kontrolního období jsou hodnoty simulované pomocí LSM (řádky 1-6, 8-13 a 15-20) porovnávány jak s pozorovanými hodnotami (řádek 23), tak i se simulovanými hodnotami pro kontrolní období pomocí modelu Bilan (řádek 24). V řádcích 7, 14 a 21 jsou uvedeny průměrné hodnoty simulací LSM dle jednotlivých řídicích modelů. V řádku 22 jsou vypočteny průměrné hodnoty odtoku ze všech simulací LSM pro kontrolní období. V případě budoucích období jsou hodnoty simulované pomocí LSM porovnávány se simulacemi modelu Bilan v následujících kombinacích (řádky 25-30 s řádkem 32, řádky 33-38 s řádkem 40, řádky 41-46 s řádkem 48, řádky 51-54 s řádkem 56, řádky 57-60 s řádkem 62 a řádky 63-66 s řádkem 68). V řádcích 31, 39, 47, 55, 61 a 67 jsou vypočteny průměrné hodnoty odtoku ze všech simulací LSM vždy pro konkrétní emisní scénář a řídicí model. V řádku 49 jsou vypočteny průměrné hodnoty odtoku ze všech simulací LSM pro budoucí období dle emisního scénáře SRES A2 a v řádku 69 dle emisního scénáře SRES B1. V řádku 50 jsou vypočteny průměrné hodnoty odtoku ze všech simulací modelu Bilan pro budoucí období dle emisního scénáře SRES A2 a v řádku 70 dle emisního scénáře SRES B1. V posledním sloupci tabulky jsou pak uvedeny průměrné roční hodnoty odtokových výšek v daném období.

Povodí Moravy po město Kroměříž - Pozorované průměrné hodnoty odtoku dle jednotlivých měsíců a simulované hodnoty průměrných odtoků dle jednotlivých měsíců pro daná období, emisní scénáře a řídicí modely dle LSM a modelu Bilan																	
		Model	Období	GCM	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Celkový součet
Kontrolní období	1	Gwava	Control	CNRM	19,09	26,99	53,14	42,99	35,32	29,20	38,20	32,17	24,76	23,93	26,13	26,23	<b>377,89</b>
	2	H08	Control	CNRM	17,04	25,66	38,04	17,49	17,58	18,03	21,19	20,00	14,56	15,60	22,68	22,12	<b>250,29</b>
	3	JULES	Control	CNRM	17,13	16,21	25,13	27,60	21,44	17,79	26,00	22,34	18,71	17,60	18,21	19,65	<b>247,56</b>
	4	LPJmL	Control	CNRM	13,32	21,34	25,75	13,73	10,93	12,69	14,27	13,19	8,71	9,39	11,51	12,81	<b>168,16</b>
	5	MPI_HM	Control	CNRM	3,35	6,40	15,68	17,83	12,63	9,77	9,98	6,30	3,64	3,09	3,51	3,92	<b>96,84</b>
	6	WaterGap	Control	CNRM	6,13	9,46	15,61	10,57	7,36	7,09	6,94	5,92	5,04	4,58	6,75	7,40	<b>93,03</b>
	7	Průměr LSM pro control	CNRM		12,68	17,68	28,89	21,70	17,54	15,76	19,43	16,65	12,57	12,37	14,80	15,35	<b>205,63</b>
	8	Gwava	Control	ECHAM5	31,51	34,99	50,05	39,74	35,56	29,17	29,71	30,67	25,82	19,89	23,34	29,81	<b>380,58</b>
	9	H08	Control	ECHAM5	24,83	24,80	26,53	14,53	11,11	6,90	7,63	8,73	9,01	10,90	14,43	23,39	<b>183,31</b>
	10	JULES	Control	ECHAM5	17,10	16,49	25,68	26,76	18,51	14,13	12,87	13,14	12,09	11,53	12,24	16,02	<b>196,71</b>
	11	LPJmL	Control	ECHAM5	19,44	21,62	23,33	15,29	15,24	13,09	12,78	12,02	10,58	9,68	13,23	17,26	<b>184,02</b>
	12	MPI_HM	Control	ECHAM5	4,71	7,78	14,43	14,56	12,02	9,30	6,76	4,96	3,72	3,27	3,71	4,80	<b>90,15</b>
	13	WaterGap	Control	ECHAM5	10,04	11,30	14,30	9,84	8,63	6,87	6,70	7,22	6,45	7,27	8,99	9,86	<b>107,67</b>
	14	Průměr LSM pro control	ECHAM5		17,94	19,50	25,72	20,12	16,84	13,24	12,74	12,79	11,28	10,43	12,66	16,86	<b>190,41</b>
	15	Gwava	Control	IPSL	24,31	25,72	41,82	33,84	28,54	24,92	27,75	19,69	14,86	15,69	19,79	21,44	<b>298,49</b>
	16	H08	Control	IPSL	20,42	23,59	28,00	10,69	8,70	6,82	8,53	4,89	6,45	6,52	11,70	21,47	<b>158,33</b>
	17	JULES	Control	IPSL	10,96	9,30	12,02	12,50	10,33	13,84	14,22	12,96	11,79	11,07	12,05	14,45	<b>145,38</b>
	18	LPJmL	Control	IPSL	12,57	19,11	21,49	12,70	10,82	10,29	12,01	9,19	6,18	6,27	9,44	10,69	<b>141,29</b>
	19	MPI_HM	Control	IPSL	4,14	7,53	16,16	14,24	12,12	9,95	8,79	5,56	3,78	3,03	3,32	4,55	<b>93,21</b>
	20	WaterGap	Control	IPSL	8,05	10,21	14,09	9,35	7,84	5,91	6,08	3,84	3,79	3,87	6,00	7,70	<b>86,96</b>
	21	Průměr LSM pro control	IPSL		13,41	15,91	22,26	15,55	13,06	11,96	12,90	9,35	7,81	7,74	10,38	13,39	<b>153,94</b>
	22	Průměr LSM Control			14,67	17,69	25,62	19,13	15,81	13,65	15,02	12,93	10,55	10,18	12,61	15,20	<b>183,33</b>
	23	Pozorovaná data control			19,74	20,15	37,54	31,26	21,04	16,87	17,91	11,27	10,91	10,49	13,35	17,80	<b>228,33</b>
24	Simulovaná data Bilan control			19,28	26,39	36,27	22,56	18,71	18,31	18,86	11,54	8,25	10,11	14,34	19,37	<b>223,99</b>	
Budoucí období dle SRES A2	25	Gwava	A2	CNRM	35,83	41,76	49,01	32,54	27,86	21,20	15,91	17,60	11,22	15,01	15,26	26,89	<b>311,08</b>
	26	H08	A2	CNRM	30,98	33,18	27,55	18,66	9,49	6,25	4,24	4,96	2,73	6,83	7,99	20,05	<b>127,07</b>
	27	JULES	A2	CNRM	14,17	20,28	26,17	21,28	13,85	9,44	8,20	7,79	3,79	4,27	5,55	7,52	<b>142,99</b>
	28	LPJmL	A2	CNRM	14,87	20,95	22,99	15,92	9,27	7,90	5,21	5,67	3,30	6,12	7,29	11,37	<b>131,60</b>
	29	MPI_HM	A2	CNRM	5,66	9,58	14,00	11,40	8,27	5,41	3,66	2,41	1,50	1,38	1,62	2,81	<b>68,03</b>
	30	WaterGap	A2	CNRM	9,47	12,42	12,25	7,71	5,20	3,97	2,83	3,06	1,83	2,44	2,71	5,34	<b>69,70</b>
	31	Průměr LSM pro A2	CNRM		18,50	23,03	25,33	17,59	12,32	9,03	6,67	6,92	4,06	6,01	6,74	12,33	<b>149,24</b>
	32	Bilan	A2	CNRM	13,25	31,27	20,67	8,53	5,46	4,03	1,24	0,96	0,34	0,30	3,82	9,55	<b>99,43</b>
	33	Gwava	A2	ECHAM5	49,47	45,30	46,78	35,70	35,27	29,28	25,08	26,22	18,98	19,95	20,84	39,86	<b>393,35</b>
	34	H08	A2	ECHAM5	33,33	25,96	18,79	13,66	10,11	6,22	6,22	3,68	5,11	5,18	10,76	26,63	<b>166,29</b>
	35	JULES	A2	ECHAM5	19,08	23,04	22,26	18,25	14,06	10,85	9,08	7,30	4,70	5,22	6,22	11,25	<b>151,49</b>
	36	LPJmL	A2	ECHAM5	24,72	24,55	23,37	16,33	16,07	13,54	9,42	9,53	7,35	9,55	10,98	18,73	<b>184,72</b>
	37	MPI_HM	A2	ECHAM5	9,36	12,31	12,54	11,34	10,50	8,38	5,56	3,45	2,41	2,33	2,71	5,59	<b>86,89</b>
	38	WaterGap	A2	ECHAM5	14,07	12,75	12,04	8,99	8,20	6,61	5,94	4,49	4,30	4,46	6,64	11,73	<b>100,49</b>
	39	Průměr LSM pro A2	ECHAM5		25,00	23,99	22,63	17,38	15,70	12,48	10,22	9,11	7,14	7,78	9,59	18,96	<b>180,54</b>
	40	Bilan	A2	ECHAM5	28,84	35,70	23,97	10,12	8,54	7,54	2,36	2,42	0,88	0,84	6,44	19,45	<b>147,09</b>
	41	Gwava	A2	IPSL	37,12	35,93	38,43	22,93	22,24	19,33	31,07	27,46	19,13	16,11	22,26	27,43	<b>319,82</b>
	42	H08	A2	IPSL	29,72	27,40	17,18	6,60	5,04	3,74	12,13	6,30	6,47	4,61	10,53	26,26	<b>156,66</b>
	43	JULES	A2	IPSL	10,82	11,30	12,99	11,66	11,27	12,46	14,19	9,14	7,90	11,80	11,21	11,16	<b>135,91</b>
	44	LPJmL	A2	IPSL	17,61	21,16	18,35	11,42	10,23	9,82	16,79	12,62	7,78	6,43	11,53	12,25	<b>156,52</b>
45	MPI_HM	A2	IPSL	8,37	11,49	13,14	9,44	9,70	8,18	7,97	5,96	4,35	2,97	3,46	5,85	<b>91,16</b>	
46	WaterGap	A2	IPSL	12,41	12,68	11,35	7,00	6,15	4,66	7,29	4,85	4,23	3,58	6,03	10,09	<b>90,63</b>	
47	Průměr LSM pro A2	IPSL		19,34	20,00	18,57	11,51	10,77	9,70	14,91	11,06	8,31	7,58	10,84	15,51	<b>158,45</b>	
48	Bilan	A2	IPSL	27,73	35,58	17,42	8,62	7,69	7,05	4,60	3,99	1,18	0,90	9,73	21,23	<b>145,72</b>	
49	Průměr LSM A2			20,95	22,34	22,18	15,49	12,93	10,40	10,60	9,03	6,51	7,12	9,05	15,60	<b>162,74</b>	
50	Průměr Bilan A2			28,57	25,51	27,85	13,52	8,53	5,62	6,05	2,48	1,54	2,30	4,85	15,66	<b>130,75</b>	
Budoucí období dle SRES B1	51	Gwava	B1	CNRM	29,48	39,53	47,50	27,98	25,23	20,39	29,27	18,21	17,00	20,88	20,36	23,89	<b>320,52</b>
	52	LPJmL	B1	CNRM	16,53	20,51	17,31	12,52	8,06	9,82	11,71	7,02	6,16	8,78	8,82	10,75	<b>138,67</b>
	53	MPI_HM	B1	CNRM	4,98	9,69	14,74	10,89	8,68	6,97	7,23	3,70	2,32	2,39	2,84	3,96	<b>78,64</b>
	54	WaterGap	B1	CNRM	8,71	11,81	11,15	7,22	5,57	4,62	5,95	2,98	3,15	3,43	4,65	5,99	<b>75,65</b>
	55	Průměr LSM pro B1	CNRM		14,93	20,39	22,68	14,65	11,88	10,45	13,54	7,98	7,16	8,87	9,17	11,15	<b>153,37</b>
	56	Bilan	B1	CNRM	22,96	30,07	22,18	12,20	8,52	7,06	3,00	1,96	1,01	0,93	6,22	9,31	<b>125,42</b>
	57	Gwava	B1	ECHAM5	47,40	49,15	55,90	39,04	31,10	30,66	28,03	28,63	23,49	19,66	22,39	39,42	<b>415,82</b>
	58	LPJmL	B1	ECHAM5	26,25	25,91	25,86	18,98	13,91	13,43	11,81	11,21	8,47	9,97	12,67	21,06	<b>198,11</b>
	59	MPI_HM	B1	ECHAM5	9,88	12,16	14,93	12,22	10,19	8,21	6,62	4,05	3,22	3,14	3,65	6,46	<b>95,06</b>
	60	WaterGap	B1	ECHAM5	13,69	13,69	13,50	9,35	7,26	7,04	5,93	4,70	5,47	6,29	8,41	12,88	<b>108,54</b>
	61	Průměr LSM pro B1	ECHAM5		24,31	25,23	27,55	19,40	15,62	14,83	13,10	12,14	10,16	9,76	11,78	19,95	<b>204,38</b>
	62	Bilan	B1	ECHAM5	32,83	40,33	30,28	14,18	9,58	11,41	4,04	4,32	1,60	2,61	9,32	29,56	<b>190,06</b>
	63	Gwava	B1	IPSL	33,26	28,38	33,51	23,03	25,21	20,63	23,17	20,91	17,57	15,89	23,34	26,03	<b>291,14</b>



## 9. Diskuse

Odhady změn hydrologické bilance odvozené ze simulací vybraných modelů zemského povrchu zveřejněných v rámci projektu WATCH byly porovnány se změnami získanými na základě porovnání pozorovaných a simulovaných hodnot odtoku pomocí hydrologického modelu Bilan. Tyto změny byly vyjádřeny v podobě odtokových výšek [mm] ze zájmových povodí. Souhrnný přehled odtokových výšek dle pozorování na těchto povodích, jednotlivých simulací modelu Bilan a LSM jsou uvedeny v (*tab. 15 a tab. 16*).

### 9.1 Simulace pro kontrolní období

#### 9.1.1 Simulace pro kontrolní období v povodí Labe

V případě povodí Labe udávají všechny simulace LSM pro kontrolní období nižší hodnoty průměrných měsíčních i ročních odtoků, jak v porovnání s pozorovanými daty, tak i v porovnání se simulovanými daty pro kontrolní období pomocí modelu Bilan (*tab. 15*). Při porovnání celkové průměrné roční hodnoty odtoku získané ze simulací všech LSM pro kontrolní období s průměrným ročním pozorovaným odtokem (*tab. 15, řádky 22 a 23, sloupec „celkový součet“*) vyplývá, že LSM v povodí Labe podhodnocují odtok v průměru o 61,7 %. Tato hodnota pak odpovídá výšce odtoku nižší o 121 mm/rok, což je poměrně výrazný rozdíl. Při porovnání hodnot získaných jako průměr všech LSM dle jednotlivých měsíců pro kontrolní období s pozorovanými průměry dle jednotlivých měsíců (*tab. 15, řádky 22 a 23*) je zřejmé, že k největší průměrné chybě LSM v simulacích dochází v dubnu. V tomto měsíci dosáhla průměrná chyba simulací LSM 64,4 %, což odpovídá výšce odtoku 15,1 mm. Naopak nejmenší chyba (58,2 %) připadá na měsíc září, což odpovídá výšce odtoku 5,5 mm. Lze tedy konstatovat, že soubor simulací LSM pro povodí Labe poskytuje výsledky výrazně odlišné od skutečných hodnot.

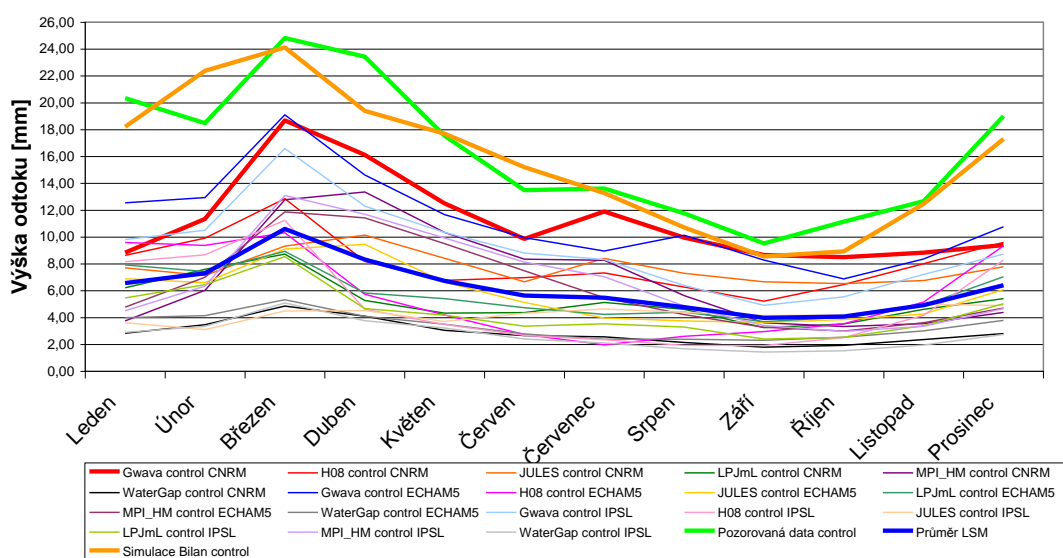
Z hlediska hodnocení vlivu použitých řídicích modelů na simulace jednotlivých LSM pro kontrolní období lze konstatovat, že rozdíly průměrných ročních odtokových výšek simulovaných pomocí konkrétních LSM v závislosti na použitém řídicím modelu nepřesahují v tomto případě hodnotu 42 mm. Zpravidla je však rozdíl v simulacích jednotlivých LSM způsobený řídicím modelem výrazně menší.

Z pohledu vývoje sezónního cyklu lze konstatovat, že většina LSM alespoň rámcově zachycuje pozorovanou sezónní proměnlivost odtoku na povodí (*obr. 16*).

Je však nutné zdůraznit, že velikost meziměsíčních změn se ve většině simulací LSM odlišuje od pozorovaných meziměsíčních změn. Simulaci nejbližší pozorovaným hodnotám z hlediska průměrné roční výšky odtoku pak poskytl model GWAVA řízený globálním klimatickým modelem CNRM. Ten při porovnání ročních průměrných hodnot podhodnocuje odtok o 31,2 % (60 mm).

Při porovnání průměrné roční hodnoty odtoku simulované modelem Bilan pro kontrolní období s průměrnou roční hodnotou pozorovanou na povodí je výsledný rozdíl mezi oběma hodnotami 3,9 %. Z tohoto hlediska tak simulace modelu Bilan podhodnocuje průměrný roční odtok z povodí o 7,6 mm. K nejvýraznější odchylce v simulaci dochází podobně jako u LSM v dubnu, kdy simulace udává nižší hodnotu v porovnání s hodnotou pozorovanou o 4 mm. Naopak téměř nulová odchylka připadá na měsíc listopad, kdy simulace udává nižší hodnotu v porovnání s hodnotou pozorovanou o 0,2 mm. Simulaci modelu Bilan lze tak hodnotit jako velmi přesnou.

**Průměrné hodnoty odtoku z povodí Labe dle jednotlivých měsíců v kontrolním období**



Obr. 16: Průměrné hodnoty odtoku z povodí Labe dle jednotlivých měsíců v kontrolním období. Tučná zelená křivka znázorňuje pozorované odtokové výšky. Tučná modrá křivka znázorňuje průměrnou hodnotu vypočtenou ze simulací všech LSM. Tučná žlutá křivka znázorňuje simulaci modelu Bilan. Tučná červená křivka znázorňuje simulaci modelu GWAVA řízeného globálním klimatickým modelem CNRM, jehož simulace je z hlediska pozorovaných hodnot nejbližší skutečnosti. Slabě znázorněné křivky představují simulace ostatních LSM řízených GCM.

Z hlediska komplexního posouzení, byly rovněž vyhodnoceny chyby srážek a teplot vstupujících do LSM z GCM a dále byly stanoveny i chyby odtoku pro jednotlivé simulace LSM a simulaci modelu Bilan (tab. 17). Z tohoto hodnocení je patrné, že srážkové úhrny z GCM jsou v průměru nadhodnoceny o 14 %. Hodnoty teplot jsou pak v průměru nadhodnoceny o 0,45 °C. Simulované hodnoty odtoku

jednotlivými LSM jsou naopak podhodnoceny o 31 až 84 % (v průměru o 61,7 %). Výška odtoku stanovená pomocí modelu Bilan je pak podhodnocena o 3,9 %.

Tab. 17: Povodí Labe – Chyby simulací srážek, teplot a odtoku při porovnání s pozorovanými daty. V horní části tabulky jsou uvedeny průměrné měsíční a roční chyby srážek vstupujících do LSM z GCM. Hodnota 1,00 představuje nulovou chybu. Průměrná chyba srážek 1,14 (světle šedě podbarvený řádek) představuje nadhodnocení srážkových úhrnů o 14 %. Ve střední části tabulky jsou uvedeny průměrné měsíční a roční chyby teplot vstupujících do LSM z GCM. Hodnota 0,00 představuje nulovou chybu. Průměrná chyba teplot 0,45 (tmavě šedě podbarvený řádek) představuje nadhodnocení teplot o 0,45 °C. Ve spodní části tabulky jsou uvedeny průměrné měsíční a roční chyby odtoku. Hodnota 1,00 představuje nulovou chybu. Průměrná chyba odtoku 0,38 (fialově podbarvený řádek) představuje podhodnocení odtoku simulacemi LSM o přibližně 62 % (přesně 61,7 %). V posledním řádku tabulky jsou uvedeny chyby odtoku stanovené ze simulace modelu Bilan. Hodnota 1,00 představuje nulovou chybu. Průměrná chyba odtoku 0,96 (modře podbarvený řádek, poslední hodnota) představuje podhodnocení odtoku simulací Bilanu o přibližně 4 % (přesně 3,9 %).

Povodí Labe po město Děčín - Chyby simulací srážek, teplot, a odtoku při porovnání s pozorovanými daty															
Simulace pro kontrolní období / pozorovaná data		Leden	Unor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Ríjen	Listopad	Prosinec	Průměr	
Srážky	Srážky CNRM Control / pozorované srážky Control	1,13	1,51	1,46	1,15	1,06	1,16	1,16	1,07	1,08	1,22	1,12	1,11	1,16	
	Srážky ECHAM5 Control / pozorované srážky Control	1,13	1,46	1,33	1,17	1,07	1,07	0,99	1,04	0,98	1,14	1,19	1,18	1,11	
	Srážky IPSL Control / pozorované srážky Control	1,17	1,39	1,41	1,15	1,11	1,13	1,08	1,05	1,03	1,12	1,18	1,11	1,15	
															1,14
Teploty	Teploty CNRM Control - pozorované teploty Control	0,41	0,57	0,23	1,04	-0,05	1,18	1,00	0,77	0,59	0,58	0,97	-0,37	0,58	
	Teploty ECHAM5 Control - pozorované teploty Control	0,23	0,09	0,05	0,98	-0,01	0,68	0,45	0,47	0,91	1,04	0,56	-0,81	0,39	
	Teploty IPSL Control - pozorované teploty Control	0,05	0,34	0,22	0,79	-0,11	0,62	1,08	0,61	0,67	0,63	0,42	-0,63	0,39	
														0,45	
Odtok	Odtok GWAVA CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,43	0,61	0,75	0,69	0,71	0,73	0,87	0,85	0,91	0,76	0,70	0,49	0,69	
	Odtok GWAVA ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	0,62	0,70	0,77	0,62	0,66	0,74	0,66	0,86	0,87	0,62	0,66	0,57	0,69	
	Odtok GWAVA IPSL Control / pozorovaný odtok Control	0,48	0,57	0,67	0,53	0,59	0,65	0,61	0,54	0,52	0,50	0,57	0,46	0,56	
	Odtok H08 CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,42	0,54	0,52	0,35	0,39	0,52	0,54	0,53	0,55	0,58	0,63	0,51	0,49	
	Odtok H08 ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	0,47	0,51	0,42	0,24	0,24	0,20	0,14	0,22	0,31	0,32	0,41	0,49	0,35	
	Odtok H08 IPSL Control / pozorovaný odtok Control	0,40	0,47	0,45	0,20	0,20	0,20	0,17	0,16	0,20	0,23	0,33	0,44	0,31	
	Odtok JULES CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,38	0,39	0,38	0,43	0,48	0,49	0,62	0,62	0,70	0,59	0,53	0,41	0,47	
	Odtok JULES ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	0,34	0,36	0,37	0,40	0,38	0,38	0,29	0,32	0,38	0,34	0,34	0,32	0,35	
	Odtok JULES IPSL Control / pozorovaný odtok Control	0,18	0,17	0,18	0,19	0,21	0,32	0,34	0,37	0,44	0,38	0,39	0,26	0,26	
	Odtok LPJmL CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,31	0,41	0,35	0,23	0,25	0,32	0,38	0,39	0,34	0,32	0,36	0,28	0,32	
	Odtok LPJmL ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	0,39	0,40	0,36	0,25	0,31	0,35	0,31	0,37	0,39	0,36	0,39	0,37	0,35	
	Odtok LPJmL IPSL Control / pozorovaný odtok Control	0,27	0,35	0,34	0,20	0,24	0,25	0,26	0,28	0,25	0,23	0,27	0,26	0,27	
	Odtok MPI-HM CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,18	0,33	0,51	0,57	0,59	0,62	0,61	0,48	0,38	0,30	0,28	0,23	0,43	
	Odtok MPI-HM ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	0,23	0,38	0,48	0,49	0,54	0,56	0,40	0,36	0,34	0,27	0,29	0,25	0,39	
	Odtok MPI-HM IPSL Control / pozorovaný odtok Control	0,22	0,34	0,53	0,50	0,57	0,60	0,52	0,41	0,36	0,27	0,26	0,25	0,41	
	Odtok WaterGap CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,14	0,19	0,20	0,17	0,17	0,20	0,19	0,18	0,19	0,17	0,19	0,15	0,18	
	Odtok WaterGap ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	0,20	0,22	0,21	0,17	0,20	0,21	0,18	0,20	0,24	0,23	0,24	0,20	0,21	
	Odtok WaterGap IPSL Control / pozorovaný odtok Control	0,14	0,18	0,20	0,16	0,18	0,18	0,16	0,14	0,15	0,14	0,15	0,14	0,16	
															0,38
		Bilan simulovaný odtok / pozorovaný odtok control	0,90	1,21	0,97	0,83	1,01	1,13	0,98	0,91	0,90	0,80	0,98	0,91	0,96

### 9.1.2 Simulace pro kontrolní období v povodí Moravy

V případě povodí Moravy rovněž většina simulací LSM pro kontrolní období uvádí nižší průměrné roční hodnoty odtoku, jak v porovnání s pozorovanými daty, tak i v porovnání se simulovanými daty pro kontrolní období pomocí modelu Bilan. Na rozdíl od povodí Labe zde však pět z osmnácti simulací (tab. 16) nadhodnocuje průměrné roční hodnoty odtoku, a to o 8,4 - 65,5 %. Z porovnání celkové průměrné roční hodnoty odtoku získané ze simulací všech LSM pro kontrolní období s průměrným ročním pozorovaným odtokem (tab. 16, řádky 22 a 23, sloupec „celkový součet“) vyplývá, že LSM v povodí Moravy podhodnocují odtok v průměru o 19,7 %. Znamená to tedy nižší průměrnou výšku odtoku o 45 mm. Při bližším srovnání hodnot získaných jako průměr všech LSM dle jednotlivých měsíců pro kontrolní období s pozorovanými průměry dle jednotlivých měsíců (tab. 16, řádky 22 a 23) je patrné, že k největší průměrné chybě LSM v simulacích dochází shodně jako v případě povodí Labe v dubnu. V tomto měsíci dosáhla průměrná chyba simulací LSM 38,8 %, což odpovídá výšce odtoku 12,1 mm. Naopak nejmenší

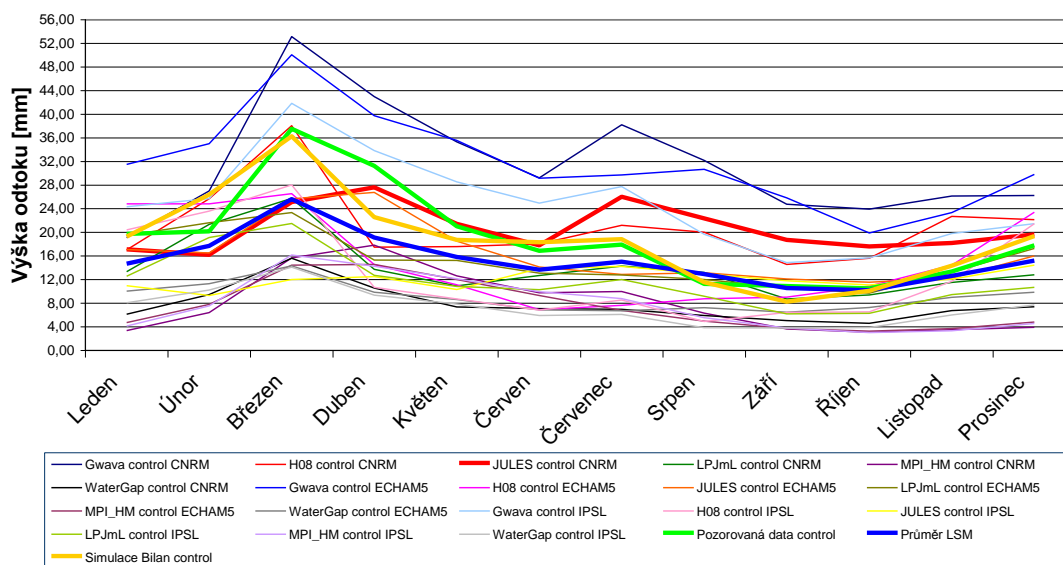
chyba (3%) připadá na měsíc říjen, což odpovídá výšce odtoku 0,3 mm. Lze tedy konstatovat, že soubor simulací LSM poskytuje v povodí Moravy poměrně dobré výsledky.

Z hlediska vlivu řídicích modelů na simulace jednotlivých LSM pro kontrolní období lze v povodí Moravy pozorovat výraznější ovlivnění než v povodí Labe. Průměrné roční výšky odtoku simulované pomocí jednotlivých LSM se zde v závislosti na použitém řídicím modelu liší až o 102 mm.

Podobně jako v povodí Labe, tak i v povodí Moravy většina LSM alespoň rámcově zachycuje pozorovanou sezónní proměnlivost odtoku na povodí (*obr. 17*). I zde se však velikost meziměsíčních změn odtoku ve většině simulací LSM odlišuje od pozorovaných meziměsíčních změn na povodí. Simulaci, jež je nejbližší pozorovaným hodnotám poskytl v případě povodí Moravy model JULES řízený globálním klimatickým modelem CNRM. Ten z hlediska ročních průměrných hodnot nadhodnocuje odtok v porovnání s pozorovanými daty o 8,4 % (19 mm). Z pohledu sezónní proměnlivosti se však tato simulace výrazně liší od pozorované sezónní proměnlivosti a nelze ji považovat za příliš dobrou.

Při porovnání průměrné roční hodnoty odtoku simulované modelem Bilan pro kontrolní období s průměrnou roční hodnotou pozorovanou na povodí je výsledný rozdíl mezi oběma hodnotami 1,9 %. Podobně jako v povodí Labe, tak i v povodí Moravy, simulace modelu Bilan podhodnocuje průměrný roční odtok z povodí, avšak pouze o 4,3 mm. K nejvýraznější odchylce v simulaci dochází podobně jako u LSM v dubnu, kdy simulace udává nižší hodnotu v porovnání s hodnotou pozorovanou o 8,7 mm. Téměř nulová odchylka pak připadá na měsíc srpen, kdy simulace naopak udává vyšší hodnotu v porovnání s hodnotou pozorovanou o 0,3 mm. Simulaci modelu Bilan lze tak stejně jako v případě povodí Labe, hodnotit jako velmi přesnou.

### Průměrné hodnoty odtoku z povodí Moravy dle jednotlivých měsíců v kontrolním období



Obr. 17: Průměrné hodnoty odtoku z povodí Moravy dle jednotlivých měsíců v kontrolním období. Tučná zelená křivka znázorňuje pozorované odtokové výšky. Tučná modrá křivka znázorňuje průměrnou hodnotu vypočtenou ze simulací všech LSM. Tučná žlutá křivka znázorňuje simulaci modelu Bilan. Tučná červená křivka znázorňuje simulaci modelu JULES řízeného globálním klimatickým modelem CNRM, jehož simulace je z hlediska pozorovaných hodnot nejbližší skutečnosti. Slabě znázorněné křivky představují simulace ostatních LSM řízených GCM.

Rovněž i v povodí Moravy byly z hlediska komplexního posouzení, vyhodnoceny chyby srážek a teplot vstupujících do LSM z GCM a dále pak též chyby odtoku pro jednotlivé simulace LSM a simulaci modelu Bilan (*tab. 18*). Z tohoto hodnocení vyplývá, že srážkové úhrny z GCM jsou v průměru nadhodnoceny o 19 %. Hodnoty teplot jsou pak na rozdíl od povodí Labe podhodnoceny v průměru o 0,23 °C. Simulované hodnoty odtoku jednotlivými LSM jsou v tomto povodí jak podhodnocovány tak i nadhodnocovány. V rámci celkového průměru všech simulací LSM je odtok v povodí Moravy podhodnocen o 19,7 %. Výška odtoku stanovená pomocí modelu Bilan je pak podhodnocena jen o 1,9 %.

Tab. 18: Povodí Moravy – Chyby simulací srážek, teplot a odtoku při porovnání s pozorovanými daty. V horní části tabulky jsou uvedeny průměrné měsíční a roční chyby srážek vstupujících do LSM z GCM. Hodnota 1,00 představuje nulovou chybu. Průměrná chyba srážek 1,19 (světle šedě podbarvený řádek) představuje nadhodnocení srážkových úhrnů o 19 %. Ve střední části tabulky jsou uvedeny průměrné měsíční a roční chyby teplot vstupujících do LSM z GCM. Hodnota 0,00 představuje nulovou chybu. Průměrná chyba teplot -0,23 (tmavě šedě podbarvený řádek) představuje podhodnocení teplot o 0,23 °C. Ve spodní části tabulky jsou uvedeny průměrné měsíční a roční chyby odtoku. Hodnota 1,00 představuje nulovou chybu. Průměrná chyba odtoku 0,80 (fialově podbarvený řádek) představuje podhodnocení odtoku simulacemi LSM o přibližně 20 % (přesně 19,7 %). V posledním řádku tabulky jsou uvedeny chyby odtoku stanovené ze simulace modelu Bilan. Hodnota 1,00 představuje nulovou chybu. Průměrná chyba odtoku 0,98 (modře podbarvený řádek, poslední hodnota) představuje podhodnocení odtoku simulací Bilanu o přibližně 2 % (přesně 1,9 %).

Povodí Moravy po město Kroměříž - Chyby simulací srážek, teplot, a odtoku při porovnání s pozorovanými daty														
Simulace pro kontrolní období / pozorovaná data		Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Ríjen	Listopad	Prosinec	Průměr
Srážky	Srážky CNRM Control / pozorované srážky Control	1,40	1,57	1,30	1,16	1,07	1,20	1,20	1,29	0,97	1,19	1,22	1,07	1,20
	Srážky ECHAM5 Control / pozorované srážky Control	1,36	1,51	1,17	1,22	1,19	1,09	1,13	1,18	0,97	1,14	1,23	1,15	1,17
	Srážky IPSL Control / pozorované srážky Control	1,43	1,43	1,22	1,23	1,18	1,10	1,22	1,22	0,94	1,10	1,25	1,09	1,19
Teploty	Teploty CNRM Control - pozorované teploty Control	-0,16	0,31	-0,04	-0,33	-0,90	0,43	-0,05	-0,39	-0,36	-0,25	0,70	0,10	-0,08
	Teploty ECHAM5 Control - pozorované teploty Control	-0,29	-0,31	-0,24	-0,41	-0,91	-0,13	-0,71	-0,76	0,02	-0,02	0,35	-0,29	-0,31
	Teploty IPSL Control - pozorované teploty Control	-0,53	0,00	-0,16	-0,67	-1,08	-0,07	-0,08	-0,60	-0,25	-0,25	0,07	-0,09	-0,31
														-0,23
Odtok	Odtok GWA VA CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,97	1,34	1,42	1,38	1,68	1,73	2,13	2,85	2,27	2,28	1,96	1,47	1,66
	Odtok GWA VA ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	1,60	1,74	1,33	1,27	1,69	1,73	1,66	2,72	2,37	1,90	1,75	1,67	1,67
	Odtok GWA VA IPSL Control / pozorovaný odtok Control	1,23	1,28	1,11	1,08	1,36	1,48	1,55	1,75	1,36	1,50	1,48	1,20	1,31
	Odtok H08 CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,86	1,27	1,01	0,56	0,84	1,07	1,18	1,77	1,33	1,49	1,70	1,24	1,10
	Odtok H08 ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	1,26	1,23	0,71	0,46	0,53	0,41	0,43	0,77	0,83	1,04	1,08	1,31	0,80
	Odtok H08 IPSL Control / pozorovaný odtok Control	1,03	1,17	0,75	0,34	0,41	0,40	0,48	0,43	0,59	0,62	0,88	1,21	0,69
	Odtok JULES CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,87	0,80	0,67	0,88	1,02	1,05	1,45	1,98	1,72	1,68	1,36	1,10	1,08
	Odtok JULES ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	0,87	0,82	0,68	0,86	0,88	0,84	0,72	1,17	1,11	1,10	0,92	0,90	0,86
	Odtok JULES IPSL Control / pozorovaný odtok Control	0,56	0,46	0,32	0,40	0,49	0,82	0,79	1,15	1,08	1,06	0,90	0,81	0,64
	Odtok LPJmL CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,67	1,06	0,69	0,44	0,52	0,75	0,80	1,17	0,80	0,89	0,86	0,72	0,74
	Odtok LPJmL ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	0,98	1,07	0,62	0,49	0,72	0,78	0,71	1,07	0,97	0,92	0,99	0,97	0,81
	Odtok LPJmL IPSL Control / pozorovaný odtok Control	0,64	0,95	0,57	0,41	0,51	0,61	0,67	0,82	0,57	0,60	0,71	0,60	0,62
	Odtok MPI-HM CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,17	0,32	0,42	0,57	0,60	0,58	0,56	0,33	0,29	0,26	0,26	0,22	0,42
	Odtok MPI-HM ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	0,24	0,39	0,38	0,47	0,57	0,55	0,38	0,44	0,34	0,31	0,28	0,27	0,39
	Odtok MPI-HM IPSL Control / pozorovaný odtok Control	0,21	0,37	0,43	0,46	0,58	0,59	0,49	0,49	0,35	0,29	0,25	0,26	0,41
	Odtok WaterGap CNRM Control / pozorovaný odtok Control	0,31	0,47	0,42	0,34	0,35	0,42	0,39	0,53	0,46	0,44	0,51	0,42	0,41
	Odtok WaterGap ECHAM5 Control / pozorovaný odtok Control	0,51	0,58	0,38	0,31	0,41	0,41	0,37	0,64	0,59	0,69	0,67	0,55	0,47
Odtok WaterGap IPSL Control / pozorovaný odtok Control	0,41	0,51	0,38	0,30	0,37	0,35	0,34	0,34	0,35	0,37	0,45	0,43	0,38	
														0,80
Bilan simulovaný odtok / pozorovaný odtok control		0,98	1,31	0,97	0,72	0,89	1,09	1,05	1,02	0,76	0,96	1,07	1,09	0,98

## 9.2 Simulace pro budoucí období

### 9.2.1 Simulace pro budoucí období v povodí Labe

Z hlediska budoucího období udává většina simulací LSM (dvacet pět z třiceti), v porovnání se simulacemi hydrologického modelu Bilan, nižší hodnoty odtokových výšek (*tab. 15*). Pro simulace dle emisního scénáře A2 je průměrná roční hodnota odtoku získaná ze simulací LSM v porovnání s průměrnou hodnotou získanou ze simulací modelu Bilan (*tab. 15, řádky 49 a 50, sloupec „celkový součet“*) nižší o 31,7 % (32,7 mm). Pro simulace dle emisního scénáře B1 je pak průměrná roční hodnota odtoku získaná ze simulací LSM v porovnání s průměrnou hodnotou získanou ze simulací modelu Bilan (*tab. 15, řádky 69 a 70, sloupec „celkový součet“*) nižší o 40,7 % (52,6 mm).

Z hlediska vlivu použitých řídicích modelů na simulace jednotlivých LSM dle emisního scénáře SRES A2 lze konstatovat, že rozdíly průměrných ročních odtokových výšek simulovaných pomocí jednotlivých LSM v závislosti na použitém řídicím modelu nepřesahují hodnotu 33,8 mm. V průměru pak maximální rozdíly v simulacích jednotlivých LSM způsobené řídicím modelem činí 18,3 mm. V případě emisního scénáře SRES B1 dosahují rozdíly průměrných ročních odtokových výšek simulovaných pomocí LSM v závislosti na použitém řídicím modelu hodnoty až 47,5

mm. V průměru pak maximální rozdíly v simulacích jednotlivých LSM způsobené řídicím modelem činí 22,1 mm.

V některých případech se simulace LSM z hlediska ročních průměrných odtokových výšek poměrně dobře shodují se simulacemi modelu Bilan. Průměrné roční rozdíly odtokových výšek se u těchto simulací s nejlepší shodou pohybují v rozmezí 8,0 až 33,5 mm. V případě simulací řízených globálním klimatickým modelem CNRM pro emisní scénář SRES A2 poskytl simulaci s největší shodou model zemského povrchu H08. Pro ostatní simulace LSM (dle CNRM B1, ECHAM5 A2 a B1, IPSL A2 a B1) poskytl vždy simulaci s nejlepší shodou průměrných ročních odtokových výšek, v porovnání s modelem Bilan, model GWAVA. Z pohledu vývoje sezónního cyklu lze konstatovat, že se simulace LSM a modelu Bilan alespoň rámcově podobají. Z pohledu meziměsíčních změn se však simulace značně rozcházejí.

Vzhledem ke skutečnosti, že přesnost simulací pro budoucí období nelze ověřit, je rovněž vhodné provést porovnání relativních změn odtoku (změn mezi kontrolním a budoucím obdobím) a posoudit tak reálnost simulací jednotlivých modelů. Z porovnání průměrných ročních hodnot relativních změn pro povodí Labe (*tab. 13*) vyplývá, že změny odtokových výšek mezi budoucím a kontrolním obdobím stanovené na základě simulací LSM jsou poměrně malé. Průměrné roční hodnoty změn stanovené vždy jako průměr všech použitých LSM se pohybuje v rozmezí od - 9 do +9 %. Největší průměrný roční pokles odtokových výšek (o 25%) pak udává model zemského povrchu JULES řízený globálním klimatickým modelem CNRM dle emisního scénáře SRES A2. Naopak největší nárůst průměrných ročních odtokových výšek (o 12%) udává model zemského povrchu GWAVA řízený globálním klimatickým modelem ECHAM5 dle emisního scénáře SRES B1. Průměrné roční hodnoty relativních změn odtokových výšek stanovené dle jednotlivých emisních scénářů a řídicích modelů, odvozené z rozdílů simulací modelu Bilan pro budoucí a kontrolní období, pak indikují oproti LSM pouze pokles odtoku o 24 - 48 %.

Z porovnání relativních změn odvozených ze simulací LSM a simulací modelu Bilan dále vyplývá, že simulace LSM ve sto procentech případů udávají nižší průměrný roční pokles odtoku, než je tomu v případě modelu Bilan.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem CNRM pro emisní scénář SRES A2 (*obr. 14 A*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc březen. V tomto případě je rozdíl 17 %. Naopak největší rozdíl (59 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je v měsíci listopadu. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 36 %.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem CNRM pro emisní scénář SRES B1 (*obr. 14 B*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc únor. V tomto případě je rozdíl jen 12 %. Naopak největší rozdíl (81 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je v měsíci září. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 32 %.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem ECHAM5 pro emisní scénář SRES A2 (*obr. 14 C*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc březen. V tomto případě je rozdíl jen 7 %. Naopak největší rozdíl (74 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je v měsíci říjnu. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 39 %.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem ECHAM5 pro emisní scénář SRES B1 (*obr. 14 D*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc únor. V tomto případě je rozdíl 1 %. Největší rozdíl (73 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je pak v měsíci září. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 33 %.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem IPSL pro emisní scénář SRES A2 (*obr. 14 E*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc leden. V tomto případě je rozdíl 20 %. Naopak největší rozdíl (90 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou



odvozenou pomocí modelu Bilan je v měsíci září. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 43 %.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem IPSL pro emisní scénář SRES B1 (*obr. 14 F*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc únor. V tomto případě je rozdíl jen 3 %. Naopak největší rozdíl (90 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je v měsíci září. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 31 %.

Souhrnné porovnání změn simulovaných jednotlivými LSM a modelem Bilan dle obou emisních scénářů a použitých řídicích modelů (*tab. 19*) ukazuje, že všechny změny odvozené pomocí modelu Bilan předpovídají poměrně výrazný pokles odtokových výšek pro budoucí období. Rovněž změny odvozené z LSM udávají ve 21 případech pokles odtokových výšek pro budoucí období. Pouze v 9 případech předpovídají změny odvozené z LSM nárůst odtokových výšek pro budoucí období. Na rozdíl od změn odvozených pomocí modelu Bilan jsou změny udávané LSM méně výrazné.

Tab. 19: Povodí Labe – Horní část tabulky udává průměrné roční rozdíly odtokových výšek [mm] mezi budoucím a kontrolním obdobím stanovené na základě simulací jednotlivých LSM a modelu Bilan dle emisních scénářů SRES A2 a B1 a použitých řídicích modelů. Modře vyznačené hodnoty uvádějí pokles odtoku [mm] v budoucím období. Červeně vyznačené hodnoty naopak uvádějí nárůst odtoku [mm] v budoucím období. Spodní část tabulky udává stejné hodnoty jako v horní části tabulky, avšak vyjádřené v procentech.

Povodí Labe po město Děčín - Průměrné roční rozdíly odtokových výšek mezi budoucím a kontrolním obdobím simulované jednotlivými LSM a modelem Bilan v závislosti na použitém řídicím modelu a emisním scénáři vyjádřené v milimetrech.							
	GWAVA	H08	JULES	LPJmL	MPI_HM	WaterGap	Bilan
CNRM A2/Control	3,13	-14,85	-23,61	-0,83	-8,29	-2,74	-84,85
CNRM B1/Control	0,17			-1,03	-3,82	-1,75	-63,44
ECHAM5 A2/Control	7,19	-4,77	-16,74	1,79	-0,54	-2,43	-80,18
ECHAM5 B1/Control	15,85			6,74	5,60	0,73	-46,04
IPSL A2/Control	-1,81	-3,97	-8,41	2,37	-6,06	-1,37	-90,72
IPSL B1/Control	-6,90			-0,55	-4,70	-2,16	-67,86
Povodí Labe po město Děčín - Průměrné roční rozdíly odtokových výšek mezi budoucím a kontrolním obdobím simulované jednotlivými LSM a modelem Bilan v závislosti na použitém řídicím modelu a emisním scénáři vyjádřené v procentech.							
	GWAVA	H08	JULES	LPJmL	MPI_HM	WaterGap	Bilan
CNRM A2/Control	2,32	-15,41	-25,43	-1,31	-9,87	-7,92	-45,06
CNRM B1/Control	0,13			-1,63	-4,55	-5,07	-33,69
ECHAM5 A2/Control	5,35	-7,04	-24,09	2,60	-0,71	-6,02	-42,58
ECHAM5 B1/Control	11,80			9,81	7,32	1,82	-24,45
IPSL A2/Control	-1,66	-6,60	-16,51	4,48	-7,58	-4,24	-48,18
IPSL B1/Control	-6,29			-1,03	-5,87	-6,70	-36,04

### 9.2.2 Simulace pro budoucí období v povodí Moravy

V povodí Moravy udává šestnáct z třiceti simulací LSM nižší hodnoty průměrných ročních odtoků pro budoucí období, v porovnání se simulacemi modelu Bilan (*tab. 16*). Na rozdíl od povodí Labe zde však některé simulace LSM předpovídají i více než dvojnásobně vyšší hodnoty průměrných ročních odtoků, než jaké vycházejí ze simulací modelu Bilan. Pro simulace dle emisního scénáře A2 je tak průměrná roční hodnota odtoku získaná ze simulací LSM v porovnání s průměrnou hodnotou získanou ze simulací modelu Bilan (*tab. 16, řádky 49 a 50, sloupec „celkový součet“*) vyšší o 24,5 % (32 mm). To je v porovnání s povodím Labe naprosto opačný výsledek. Pro simulace dle emisního scénáře B1 je pak průměrná roční hodnota odtoku získaná ze simulací LSM v porovnání s průměrnou hodnotou získanou ze simulací modelu Bilan (*tab. 16, řádky 69 a 70, sloupec „celkový součet“*) též vyšší o 6,1 % (9,8 mm), což je v porovnání s povodím Labe rovněž protichůdný výsledek.

Z hlediska vlivu použitých řídicích modelů na simulace jednotlivých LSM je patrné, že rozdíly průměrných ročních odtokových výšek simulovaných pomocí stejných LSM v závislosti na použitém řídicím modelu jsou v porovnání s povodím Labe i více než dvojnásobné. V případě emisního scénáře SRES A2 byl dosažen největší rozdíl (82,3 mm) způsobený vlivem řídicích modelů u simulací modelu GWAVA řízených modely CNRM a ECHAM5. V průměru pak maximální dosažené rozdíly v simulacích jednotlivých LSM dle SRES A2 způsobené řídicím modelem nepřesahují 36,7 mm. V případě emisního scénáře SRES B1 byl dosažen největší rozdíl (až 124,7 mm) způsobený vlivem řídicích modelů u simulací modelu GWAVA řízených modely ECHAM5 a IPSL. V průměru pak maximální dosažené rozdíly v simulacích jednotlivých LSM dle SRES B1 způsobené řídicím modelem nepřesahují 58,4 mm.

Podobně jako v povodí Labe, tak i v povodí Moravy se v některých případech simulace LSM z hlediska ročních průměrných odtokových výšek poměrně dobře shodují se simulacemi modelu Bilan. Průměrné roční hodnoty odtokových výšek se u těchto simulací s nejlepší shodou pohybují v rozmezí 4,4 až 29,7 mm. Pro simulací řízenou globálním klimatickým modelem CNRM pro emisní scénář SRES A2 poskytl simulaci s největší shodou model WaterGap. V případě simulací řízených globálními klimatickými modely ECHAM5 a IPSL pro emisní scénář SRES A2 poskytl nejlepší simulace model JULES. Pro ostatní simulace LSM (dle CNRM B1,

ECHAM5 B1, IPSL B1) poskytl vždy simulaci s nejlepší shodou průměrných ročních odtokových výšek, v porovnání s modelem Bilan, model LPJmL. Z pohledu vývoje sezónního cyklu lze konstatovat, že se simulace LSM a modelu Bilan, stejně jako v povodí Labe, alespoň rámcově podobají. Z pohledu meziměsíčních změn se však simulace ve většině případů rozcházejí.

Z porovnání průměrných ročních hodnot relativních změn pro povodí Moravy (*tab. 14*) vyplývá, že změny odtokových výšek mezi budoucím a kontrolním obdobím stanovené na základě simulací LSM jsou v porovnání s obdobnými změnami v povodí Labe větší. Průměrné roční hodnoty změn, stanovené vždy jako průměr všech použitých LSM dle jednotlivých emisních scénářů a řídicích modelů, se pohybují v rozmezí od  $-27$  do  $+7$  %. Největší průměrný roční pokles odtokových výšek (o 42%) pak udává, stejně jako v povodí Labe, model zemského povrchu JULES řízený globálním klimatickým modelem CNRM dle emisního scénáře SRES A2. Naopak největší nárůst průměrných ročních odtokových výšek (o 11%) udává na rozdíl od povodí Labe model zemského povrchu LPJmL řízený globálním klimatickým modelem IPSL dle emisního scénáře SRES A2. Průměrné roční hodnoty relativních změn odtokových výšek určené dle jednotlivých emisních scénářů a řídicích modelů, stanovené z rozdílů simulací modelu Bilan pro budoucí a kontrolní období, pak naznačují oproti LSM pouze pokles odtoku 15 - 56 %.

Z porovnání relativních změn odvozených ze simulací LSM a simulací modelu Bilan dále vyplývá, že shodně jako v povodí Labe, tak i v povodí Moravy všechny simulace LSM indikují nižší průměrný roční pokles odtoku, než jaký je udáván modelem Bilan.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem CNRM pro emisní scénář SRES A2 (*obr. 15 A*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc únor. V tomto případě rozdíl činí 12 %. Naopak největší rozdíl (77 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je v měsíci lednu. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 28 %.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem CNRM pro emisní scénář SRES B1 (*obr. 15 B*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou

pomocí modelu Bilan na měsíc únor. V tomto případě je rozdíl 13 %. Naopak největší rozdíl (77 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je v měsíci říjnu. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 27 %.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem ECHAM5 pro emisní scénář SRES A2 (*obr. 15 C*) připadá nejmenší rozdíl mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc leden. V tomto případě je rozdíl jen 10 %. Naopak největší rozdíl (68 %) mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je v měsíci červenci. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 29 %.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem ECHAM5 pro emisní scénář SRES B1 (*obr. 15 D*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc únor. V tomto případě je rozdíl 19 %. Největší rozdíl (72 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je pak v měsíci červenci. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 22 %.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem IPSL pro emisní scénář SRES A2 (*obr. 15 E*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc leden. V tomto případě je rozdíl téměř 0 %. Naopak největší rozdíl (92 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je v měsíci září. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 38 %.

Při porovnání relativních změn řízených globálním klimatickým modelem IPSL pro emisní scénář SRES B1 (*obr. 15 F*) připadá nejmenší rozdíl mezi průměrnou relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan na měsíc leden. V tomto případě je rozdíl téměř 0 %. Naopak největší rozdíl (91 %) mezi relativní změnou odvozenou z LSM a změnou odvozenou pomocí modelu Bilan je v měsíci září. Průměrný rozdíl mezi relativními změnami v tomto případě činí 25 %.

Souhrnné porovnání změn simulovaných jednotlivými LSM a modelem Bilan dle obou emisních scénářů a použitých řídicích modelů (*tab. 20*) ukazuje, že všechny

změny odvozené pomocí modelu Bilan předpovídají, podobně jako v povodí Labe, poměrně výrazný pokles odtokových výšek pro budoucí období. Rovněž změny odvozené z LSM udávají ve dvaceti případech pokles odtokových výšek pro budoucí období. V deseti případech pak předpovídají nárůst odtokových výšek pro budoucí období. Podobně jako v povodí Labe, tak i v povodí Moravy, jsou změny udávané jednotlivými LSM, v porovnání se změnami indikovanými modelem Bilan méně výrazné.

Tab. 20: Povodí Moravy – Horní část tabulky udává průměrné roční rozdíly odtokových výšek [mm] mezi budoucím a kontrolním obdobím stanovené na základě simulací jednotlivých LSM a modelu Bilan dle emisních scénářů SRES A2 a B1 a použitých řídicích modelů. Modře vyznačené hodnoty uvádějí pokles odtoku [mm] v budoucím období. Červeně vyznačené hodnoty naopak uvádějí nárůst odtoku [mm] v budoucím období. Spodní část tabulky udává stejné hodnoty jako v horní části tabulky, avšak vyjádřené v procentech.

Povodí Moravy po město Kroměříž - Průměrné roční rozdíly odtokových výšek mezi budoucím a kontrolním obdobím simulované jednotlivými LSM a modelem Bilan v závislosti na použitém řídicím modelu a emisním scénáři vyjádřené v milimetrech.							
	GWAVA	H08	JULES	LPJmL	MPL_HM	WaterGap	Bilan
CNRM A2/Control	-66,81	-78,22	-104,57	-36,56	-28,81	-23,33	-124,56
CNRM B1/Control	-57,37			-29,49	-18,20	-17,38	-98,57
ECHAM5 A2/Control	12,77	-17,02	-45,23	0,70	-3,25	-7,18	-76,90
ECHAM5 B1/Control	35,24			14,09	4,92	0,88	-33,93
IPSL A2/Control	21,33	-1,68	-9,48	15,23	-2,05	3,67	-78,27
IPSL B1/Control	-7,34			2,67	-3,72	-1,82	-58,63

Povodí Moravy po město Kroměříž - Průměrné roční rozdíly odtokových výšek mezi budoucím a kontrolním obdobím simulované jednotlivými LSM a modelem Bilan v závislosti na použitém řídicím modelu a emisním scénáři vyjádřené v procentech.							
	GWAVA	H08	JULES	LPJmL	MPL_HM	WaterGap	Bilan
CNRM A2/Control	-17,68	-31,25	-42,24	-21,74	-29,75	-25,08	-55,61
CNRM B1/Control	-15,18			-17,54	-18,79	-18,69	-44,01
ECHAM5 A2/Control	3,36	-9,28	-22,99	0,38	-3,61	-6,67	-34,33
ECHAM5 B1/Control	9,26			7,66	5,45	0,81	-15,15
IPSL A2/Control	7,15	-1,06	-6,52	10,78	-2,20	4,21	-34,94
IPSL B1/Control	-2,46			1,89	-3,99	-2,09	-26,17

Při porovnání simulací z obou povodí lze pozorovat nejen vzájemnou podobnost, kdy například větší počet modelových simulací indikuje pokles odtokových výšek pro období 2071-2100, ale i patrné odlišnosti, kdy některé simulace LSM v povodí Moravy oproti povodí Labe i poměrně výrazně převyšují hodnoty jak pozorovaných, tak i simulovaných odtokových výšek. Díky velkým rozdílům na povodí Moravy, kdy některé simulace LSM výrazně podhodnocují, ale i nadhodnocují odtok, je průměrná hodnota relativních změn v tomto povodí, získaná na základě porovnání relativních změn z LSM a modelu Bilan, menší v průměru o 8 %. Odlišnost výsledků na obou povodích může být (kromě jiné geografické polohy) částečně způsobena velikostí zájmových území, kdy povodí Moravy po město Kroměříž je pokryto pouze dvěma výpočetními buňkami, zatím co povodí Labe po město Děčín je pokryto dvaceti pěti výpočetními buňkami (*obr. 9*). Je tedy možné, že i velikost povodí při použitém rozlišení klimatických modelů hraje v přesnosti

simulací LSM určitou roli. Lepší výsledky pro povodí Moravy by pak byly dílem přirozené variability. Tato hypotéza nicméně vyžaduje další výzkum.

Z hodnocení rozdílů jednotlivých simulací LSM pro daná období vyplývá, že přibližně dvě třetiny těchto simulací indikují pro období 2071-2100 pokles odtoku. Zbylé simulace pak naopak udávají nárůst. Oproti tomu však model hydrologické bilance Bilan předpovídá pouze pokles odtoku. Z porovnání simulací pro kontrolní období je zřejmé, že simulace modelu Bilan se poměrně dobře shodují s pozorovanými daty. Naproti tomu pouze malá část simulací LSM dává výsledek podobný pozorovaným hodnotám odtoku. Z tohoto pohledu lze konstatovat, že simulace LSM nedávají příliš dobrý výsledek a jejich použití pro stanovení hydrologické bilance není optimálním řešením. Zůstává však otázkou, proč se jednotlivé simulace LSM, nejen navzájem, ale i v porovnání s modelem Bilan tak výrazně odlišují. Kromě pravděpodobných vlivů udaných velikostí povodí, je jedním z možných vysvětlení odlišný způsob ve stanovení potenciální evapotranspirace použitý v jednotlivých LSM a modelu Bilan. Tato složka hydrologické bilance je zpravidla ovlivňována mnoha faktory, jako je například atmosférický tlak, rychlost a směr proudění vzduchu, nasycení půdy vodou, nasycení okolního vzduchu vodními parami nebo hustota a typ vegetačního krytu. Witte a kol. (2006), pak uvádí jako další vlivy teplotu vzduchu a koncentrace  $\text{CO}_2$  v atmosféře. Tyto dva faktory, jak dále uvádí, mají na velikost evapotranspirace protichůdný vliv. Zatímco rostoucí koncentrace  $\text{CO}_2$  v atmosféře způsobují pravděpodobně růst globálních teplot, jejichž zvyšování má za následek i růst evapotranspirace, tak na druhé straně způsobují redukci a uzavírání listových průduchů rostlin, což má naopak za následek její pokles. Výsledný efekt těchto dvou protichůdných faktorů je však prozatím jen odhadován. Witte a kol. (2006) například uvádí možný průměrný roční pokles evapotranspirace, způsobený zvýšením koncentrací  $\text{CO}_2$  o 385 ppm (předpokládaný nárůst do roku 2100), o 5 – 11 % a to v závislosti na typu vegetace. Metoda výpočtu potenciální evapotranspirace v modelu Bilan, však tyto předpokládané změny koncentrací  $\text{CO}_2$  neuvažuje. Je tedy pravděpodobné, že velikost negativních změn odtoku stanovená pomocí modelu Bilan může být nadhodnocena.

## 10. Závěr

V rámci této práce byla ověřena schopnost modelů zemského povrchu (LSM) simulovat hydrologickou bilanci a její změny. Toto ověření bylo provedeno na základě porovnání průměrných měsíčních a ročních odtokových výšek pro kontrolní a budoucí období na dvou velikostně odlišných povodích ČR (povodí Labe po město Děčín a povodí Moravy po město Kroměříž). Pro posouzení bylo vybráno celkem šest modelů zemského povrchu (GWAVA, H08, JULES, LPJmL, MPI-HM a WATER GAP), jejichž simulace byly řízeny globálními klimatickými modely (CNRM, ECHAM5 a IPSL). Simulace LSM pro kontrolní období byly porovnány přímo s pozorovanými hodnotami odtoku na zkoumaných povodích. Pro budoucí období, pak byly simulace LSM porovnávány se simulacemi hydrologického modelu Bilan, dle příslušných řídicích modelů a použitých emisních scénářů SRES A2 a SRES B1. Z hlediska komplexního zhodnocení schopností LSM a modelu Bilan simulovat hydrologickou bilanci, byla posouzena i velikost změn simulovaných jednotlivými modely v porovnání se změnami indikovanými modelem Bilan.

Z výsledného porovnání simulací LSM pro kontrolní období (1971 – 2000) vyplývá, že tyto modely alespoň rámcově zachycují sezónní proměnlivost pozorovanou na obou povodích, avšak absolutní hodnoty odtokových výšek jimi simulované se ve většině případů rozcházejí s pozorovanými daty. Zatímco na povodí Labe všechny použité LSM výrazně podhodnocují odtok v porovnání s odtokem pozorovaným, tak na povodí Moravy je tento v některých případech i poměrně výrazně nadhodnocen. Zpravidla je však ve většině simulací, shodně jako v povodí Labe, podhodnocen.

Rovněž i z pohledu relativních změn se předpovědi LSM příliš neshodují s prognózami modelu Bilan. Zatímco LSM indikují pro povodí Labe pokles odtokových výšek v průměru pouze o 4,0 % a pro povodí Moravy o 8,3 %, pak změny stanovené pro povodí Labe, s využitím modelu Bilan, indikují v průměru pokles odtokových výšek o 38,3 % a pro povodí Moravy pak o 35,0 %.

Na základě zhodnocených faktů a provedených srovnání lze konstatovat, že z hlediska současného stavu a úrovně LSM, nejsou tyto modely prozatím schopny objektivně simulovat hydrologickou bilanci, a to minimálně na povodích, jež byla v této práci hodnocena. Na druhé straně však nelze do budoucna vyloučit, že další

úpravy a vývoj těchto modelů dospěje do bodu, kdy nahradí stávající hydrologické modely jako je například model Bilan.



## 11. Literatura a použité zdroje

**Avissar R. a Pielke R. A., 1989:** A parameterization of heterogeneous land-surface for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology. *Monthly Weather Review*, 117, 1989/4: 2113–2136.

**Baede A. P. M., Ahlonsou E., Ding Y. a Schimel D., 2001:** The climate change 2001 - The Climate System: an Overview, IPCC, online:

[http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/pdf/tar-01.pdf](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/pdf/tar-01.pdf), cit. 5. 3. 2012.

**Bader D. C., Covey C., Gutowski J. W., Held M. I., Kunkel E. K., Miller L. R., Tokmakian T. R. a Zhang H. M., 2008:** Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations. A Report by the U. S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington, D. C., USA, 124 S.

**Beaty C., 1978:** Ice ages and continental drift. *New scientist* 1132, 1978/12: 776-777.

**Beran A., Horáček S. a Hanel M., 2011:** Zjednodušení výpočtu potenciální evapotranspirace v nové verzi modelu Bilan. *VTEI* 53 (Mimořádné číslo 3), 2011/3: 17–20.

**Callendar S. G., 1938:** The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 64, 1938/2: 223-240.

**CENIA, 2007:** Mapa - Hlavní vodní toky v České republice. Česká informační agentura životního prostředí, Praha, online: [http://vitejtenazemi.cenia.cz/archiv/voda\\_cs/002\\_mapa\\_vodni\\_toky\\_cr.pdf](http://vitejtenazemi.cenia.cz/archiv/voda_cs/002_mapa_vodni_toky_cr.pdf), cit. 22. 9. 2012.

**Cílek V., 1995:** Milankovičovy cykly. *Vesmír* 74, 1995/9: 488-492.

**Clark B. D., Haddeland I., Franssen W., Ludwig F. a Voss F., 2009:** WaterMIP: A multi-model estimate of the terrestrial water cycle. Experimental setup and first results. In: Royal Meteorological Society Conference 2009, Reading, 29 June - 3 July 2009, online:

<http://nora.nerc.ac.uk/view/year/2009.html>, cit. 6. 8. 2012.

**Gu L., Shugart H., Fuentes J., Black T., a Shewchuk, S., 1999:** Micrometeorology, biophysical exchanges and NEE decomposition in a two-storey boreal forest – development and test of an integrated model. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 94, 1999/4: 123–148.

**Hanel M., Kašpárek L., Mrkvičková M., Horáček S., Vizina A., Novický O. a Fridrichová R., 2011:** Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, 108 s.

**Hanel M. a Vizina A. 2010:** Hydrologické modelování dopadu změn klimatu v denním kroku: korekce systematických chyb a přírůstková metoda. *VTEI* 52 (Mimořádné číslo 2), 2010/2: 17–21.

**Harding R. a Warnaars T., 2011:** Water and global change: The WATCH Project Outreach Report. NERC Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK, 40 s.

**Horáček S., Rakovec O., Kašpárek L. a Vizina A. 2009:** Vývoj modelu hydrologické bilance BILAN. *VTEI* 51 (Mimořádné číslo 1), 2009/1: 2–5.

**Chen F. a Dudhia J., 2001:** Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Montly Weather Review*, Vol. 129, 2001/5: 569-585.

**IPCC 2001:** Climate Change 2001 The Scientific Basis. IPCC, online: [http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/), cit. 22. 3. 2012.

**JCHMR, 2012:** JULES-Joint UK Land environment Simulator. Joint Centre for Hydro-Meteorological Research, Wallingford, online:

<http://www.jchmr.org/jules/>. cit. 2. 8. 2012

**Jones P. a Wells G., 2006:** Velká encyklopedie zeměpisu s podrobným atlasem světa. Nakladatelství Svojtka & Co., s.r.o., Praha, 96-97.

**Jungwirth P., 2003:** Aerosoly a chemie atmosféry. Vesmír 82, 2003/4: 196-198.

**Klímová E., Habadová I., Hlaváček R., Jelínek R., Konfrštová L., Kučerová B. a Lebedová H., 1999:** Školní atlas České republiky. Nakladatelství Geodézie ČS a.s., Praha, 113 s.

**Kurc L., 2007:** Je příčinou globálního oteplování oxid uhličitý? Revue Politika, 2007/1: 18-19.

**Lehner B., Liermann R. C., Revenga C., Vörösmarty C., Fekete B., Crouzet P, Döll P., Endejan M., Frenken K., Magome J., Nilsson C., Robertson J., Rödel R., Sindorf N., a Wisser D., 2011:** High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. Froniers int Ecology and Environment 9, 2011/5: 494–502.

**Le Treut H., Somerville R., Cubasch U., Ding Y., Mauritzen C., Mokssit A., Peterson T. a Prather M., 2007:** Historical Overview of Climate Change. In: Solomon et al. 2007. Cambridge University Press, 95-127.

**McGuffie K. a Henderson-Sellers A., 2001:** Forty years of numerical climate modelling. International Journal of Climatology 21, 1067-1109.

**Meinshausen M., Smith J. S., Calvin K., Daniel S. J., Kainuma T. L. M. & Lamarque F.-J., Matsumoto K., Montzka A. S., Raper B. C. S., Riahi K., Thomson A., Velders M. J. G. a Van Vuuren P. P. D., 2011:** The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. Springer, online: [http://www.esrl.noaa.gov/search/publications/6622/1/The\\_RCP\\_greenhouse\\_gas\\_concentrations\\_-\\_Monzka,\\_2011.pdf](http://www.esrl.noaa.gov/search/publications/6622/1/The_RCP_greenhouse_gas_concentrations_-_Monzka,_2011.pdf), cit. 22. 3. 2012.

**Metelka L. a Tolasz R., 2009:** Klimatické změny: fakta bez mýtů. Univerzita Karlova v Praze, Praha 40 s.

**Monteith, J. L., 1965:** Evaporation and the environment, in: The State and Movement of Water in Living Organisms, 19th Symposium of the Society for Experimental Biology, Cambridge University Press, 205–234.

**Moss, R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J., Elgizouli I., Emori S., Erda L., Hibbard K., Jones R., Kainuma M., Kelleher J., Lamarque F. J., Manning M., Matthews B., Meehl J., Meyer L., Mitchell J., Nakicenovic N., O'Neill B., Pichs R., Riahi K., Rose S., Runci P., Stouffer R., Van Vuuren D., Weyant J., Wilbanks T., Van Ypersele P. J. a Zurek M., 2008:** Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 25 s.

**MZe, 2006:** Voda v ČR do kapsy. Ministerstvo zemědělství ČR, Praha, 97 S.

**MZe, 2012:** Voda. Ministerstvo zemědělství ČR, Praha, Online: <http://eagri.cz/public/web/mze/voda/>, cit. 18. 9. 2012.

**Nakicenovic N., Davidson O., Davis G., Grübler A., Kram T., Lebre E., Metz B., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Sankovski A., Shukla P., Swart R., Watson R. a Dadi Z., 2000:** IPCC Special Report Emissions Scenarios Summary for Policymakers, IPCC, online: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>, cit. 15. 3. 2012

**NASA, 2005:** The Balance of Power in the Earth-Sun System, NASA, online:  
[http://www.nasa.gov/pdf/135642main\\_balance\\_trifold21.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/135642main_balance_trifold21.pdf), cit. 6. 3. 2012.

**NCAR/RAL, 2012:** Unified Noah/OSU Land Surface Model, NCAR/RAL, online:  
<http://www.ral.ucar.edu/research/land/technology/lsm.php>, cit. 28. 6. 2012.

**Oudin L., Moulin L., Bendjoudi H. a Ribstein P., (2010):** Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulation. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 55, No. 2, 2010/3: 209-222.

**Overgaard J., Rosbjerg D. a Butts B. M., 2005:** Land-surface modelling in hydrological perspective. *Biogeosciences discussions*, Vol. 2, No. 6, 2005/12: 1815-1848.

**Paustian K., Cole C. V., Sauerbeck D. a Sampson N., 1998:** CO2 Mitigation by Agriculture: An Overview. *Climatic Change*, Vol. 40, No. 1, 1998/9: 135-162.

**Pawson, S., Kodera K., Hamilton K., Shepherd G. T., Beagley R. S., Boville A. B., Farrara D. J., Fairlie A. D. T., Kitoh A., Lahoz A. W., Langematz U., Manzini E., Rind H. D., Scaife A. A., Shibata K., Simon P., Swinbank R., Takacs L., Wilson J. R., Al-Saadi A. J., Amodei M., Chiba M., Coy L., De Grandpré J., Eckman S. R., Fiorino M., Grose L. W., Koide H., Koshyk N. J., Li D., Lerner J., Mahlman D. J., McFarlane A. N., Mechoso R. C., Molod A., O'Neill A., Pierce B. R., Randel J. W., Rood B. R., a Wu F., 2000:** The GCM-Reality Intercomparison Project for SPARC GRIPS): Scientific issues and initial results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 81, No. 4, 2000/4: 781–796.

**Penman H. L., 1948:** Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 193, No. 1032, 1948/4: 120-145

**PLA, 2012:** Vodní díla. Povodí Labe - státní podnik, online: <http://www.pla.cz/planet/webportal/internet/default.aspx>, cit. 22. 9. 2012.

**PMO, 2012:** Vodní díla. Povodí Moravy - státní podnik, online: <http://www.pmo.cz/cz/uzitecne/vodni-dila/>, cit. 29. 9. 2012.

**POH, 2012:** Vodní díla. Povodí Ohře - státní podnik, online: <http://www.poh.cz/vd/vd.htm>, cit. 29. 9. 2012.

**PVL, 2012:** Vodní díla a nádrže. Povodí Vltavy - státní podnik, online: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vodni-dila-a-nadrze>, cit. 27. 9. 2012.

**Polcher J., Bertrand N., Biemans H., Clark B. D., Floerke M., Gedney N., Gerten D., Stacke T., Vilet M. a Voss F., 2011:** WATCH Technical Report No. 34: Improvements in hydrological processes in general hydrological models and land surface models within WATCH, online: <http://www.eu-watch.org/publications/technical-reports/2>, cit. 1. 8. 2012.

**Randall D. A., Wood A. R., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer J. R., Sumi A. a Taylor E. K., 2007:** Climate Models and Their Evaluation. In: Solomon et al. 2007. Cambridge University Press, 591-648.

**Ray K. D., Nair S. U., Welch M. R., Su W. a Kikuchi T., 2002:** Influence of Land use on the Regional Climate of Southwest Australia. University of Alabama in Huntsville, online: <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/29880.pdf>, cit. 7. 3. 2012.

**Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornbluh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U. a Tompkins A., 2003:** The Atmospheric general circulation model ECHAM 5. Part I: Model description. Max Planck Institute for Meteorology, Report no. 349, 140 s.

**R-project, 2012:** The R Project for Statistical Computing, online:

<http://www.r-project.org/>, cit. 15. 8. 2012.

**Shuttleworth W. J. a Wallace, J. S., 1985:** Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 111, 1985/7: 839–855.

**VÚV-TGM (Výzkumný Ústav Vodohospodářský T. G. Masaryka) 2011:** Bilan water balance model manual. Praha, 22 s.

**VÚV-TGM (Výzkumný Ústav Vodohospodářský T. G. Masaryka) 2012:** Charakteristiky toků a povodí ČR, VÚV-TGM, Praha, online: <http://www.dibavod.cz/index.php?id=24>, cit. 21. 9. 2012.

**Witte J.P.M, Kruijt B. a Maas C., 2006:** The effects of rising CO2 levels on evapotranspiration. Kiwa Water Research, Nieuwegein, online:

[http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=evapotranspiration%20co2%20concentration&source=web&cd=5&cad=rja&ved=0CFsQFjAE&url=http%3A%2F%2Fpromise.klimaatvoorruijnte.nl%2Fpro1%2Fpublications%2Fshow\\_publication.asp%3Fdocumentid%3D1627%26GUID%3D98883abd-e57d-45cc-a32b-f41532b371b1&ei=GIwbUdLuDsik4ASK5oC4BQ&usg=AFQjCNFFBNaQEPiI\\_J\\_mx4zwKdFFiDDRg&bvm=bv.42261806](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=evapotranspiration%20co2%20concentration&source=web&cd=5&cad=rja&ved=0CFsQFjAE&url=http%3A%2F%2Fpromise.klimaatvoorruijnte.nl%2Fpro1%2Fpublications%2Fshow_publication.asp%3Fdocumentid%3D1627%26GUID%3D98883abd-e57d-45cc-a32b-f41532b371b1&ei=GIwbUdLuDsik4ASK5oC4BQ&usg=AFQjCNFFBNaQEPiI_J_mx4zwKdFFiDDRg&bvm=bv.42261806), cit. 22. 2. 2013.

**Zákon č. 254/2001 sb.,** o vodách a o změně některých zákonů, v platném znění.

## 12. Přílohy

```
require(ncdf)
require(maptools)
gpclibPermit()

# zvol cestu
dpath = 'E:/data/LSM' # adresar s LSM
opath = 'E:/data/LSM/EXT' # adresar na vystupy

setwd(dpath) #nacti geodata
cr = readShapePoly('scr')
p1 = readShapePoly('s2040')
p2 = readShapePoly('s4030')
cp1 = p1@polygons[[1]]@Polygons[[1]]@coords
cp2 = p2@polygons[[1]]@Polygons[[1]]@coords
ccr = cr@polygons[[1]]@Polygons[[1]]@coords

.lsm = 'Gwava'
.force = 'CNRM'
.run = 'Control'
.var = 'dis_monthly'
#.pref = 'gwava_cnrma2nat'
.pref = 'gwava_cnrconnat'
.suf = 'nc'

.per = c('1971_1980','1981_1990','1991_2000')
.oname = '1971-2000.txt'

#.per = c('2071_2080','2081_2090','2091_2100')
#.oname = '2071-2100.txt'

fnam = paste(paste(.pref, .var, .per, sep='_'), .suf, sep='.')
DD = list()

setwd(file.path(dpath, .lsm, .force, .run))
for (f in fnam) {

  nc = open.ncdf(f)
  lon = get.var.ncdf(nc,'lon')
  lat = get.var.ncdf(nc,'lat')
  tim = get.var.ncdf(nc,'Time')
  xy = expand.grid(lon,lat)
  ixy = expand.grid(1:length(lon), 1:length(lat))
  kde1 = point.in.polygon(xy[,1], xy[,2], cp1[,1], cp1[,2])
  kde2 = point.in.polygon(xy[,1], xy[,2], cp2[,1], cp2[,2])
  kdecr = point.in.polygon(xy[,1], xy[,2], ccr[,1], ccr[,2])

  kde = kdecr#switch(j, kde1, kde2, kdecr)
  kde = which(kde ==1)
  wh = ixy[kde,]
  map = cbind(xy[kde,], ixy[kde, ])
  map$po = 'C'
  map$po[kde%in%which(kde1==1)] = 'L'
  map$po[kde%in%which(kde2==1)] = 'M'
  D = array(NA, dim = c(length(tim), nrow(wh)))
  dimnames(D) = list(time = rep(1:12, length.out=length(tim)))

  for (p in 1:nrow(wh)){

    D[, p] = get.var.ncdf(nc, 'Dis',c(wh[p,1], wh[p,2], 1), c(1,1,-1))

  }

  DD[[f]] = D
}

setwd(opath)

write.table(round(rbind(DD[[1]], DD[[2]], DD[[3]]),2), paste(.lsm, .force, .run, .var, .oname, sep='_'), sep='\t', col.names=row.names(map))

write.table(map, paste(.lsm, '.', .force, '.map',sep=""), col.names=F)
```

Příloha. 1: Ukázka skriptu pro extrakci měsíčních hodnot odtoku dostupných z ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock6, které jsou zde uloženy ve formátu „ncdf“. Skript nejprve extrahuje hodnoty odtoku z celkem tří souborů obsahujících data odtoku vždy pro deset let (např. 1971 – 1980, 1981 – 1990, 1991 – 2000) a následně z nich vytvoří časovou řadu v délce třiceti let. Uvedená ukázka skriptu je v nastavení pro vytvoření třicetileté časové řady pro kontrolní období simulované modelem GWAVA, jehož simulace byla řízena globálním klimatickým modelem CNRM. Pomocí skriptu bude vytvořena časová řada pro obě zájmová povodí zároveň.



```

pdata = '/media/-DAM-/data/LSM/FORCING/'
pgeo = '/media/-DAM-/data/LSM/'
pout = '/media/-DAM-/data/LSM/EXT'

require(maptools)
require(ncdf)

setwd(pgeo)
cr = readShapePoly('scr')
p1 = readShapePoly('s2040')
p2 = readShapePoly('s4030')
cp1 = p1@polygons[[1]]@Polygons[[1]]@coords
cp2 = p2@polygons[[1]]@Polygons[[1]]@coords
ccr = cr@polygons[[1]]@Polygons[[1]]@coords

model = 'CNRM'
var = 'tair'
sim = 'Control'
roky = 1971:2000 #2071:2100

setwd(file.path(pdata, paste(model, 'rozbaleny', sep='_')))

fnams = paste(model, sim, var, roky, sep='_')
fnams = paste(fnams, '.nc', sep='')

D = array(NA, dim = c(length(roky)*12, nrow(wh)))
dimnames(D) = list(time = rep(1:12, length.out=length(roky)*12))

for (f in fnams) {

  setwd(file.path(pdata, paste(model, 'rozbaleny', sep='_')))
  cat(f, '\n')
  nc = open.ncdf(f)
  lon = get.var.ncdf(nc, 'lon')
  lat = get.var.ncdf(nc, 'lat')
  tim = get.var.ncdf(nc, 'time')
  xy = expand.grid(lon, lat)
  ixy = expand.grid(1:length(lon), 1:length(lat))
  kde1 = point.in.polygon(xy[,1], xy[,2], cp1[,1], cp1[,2])
  kde2 = point.in.polygon(xy[,1], xy[,2], cp2[,1], cp2[,2])
  kdecr = point.in.polygon(xy[,1], xy[,2], ccr[,1], ccr[,2])

  kde = kdecr#switch(j, kde1, kde2, kdecr)
  kde = which(kde == 1)
  wh = ixy[kde,]
  map = cbind(xy[kde,], ixy[kde,])
  map$spov = 'C'
  map$spov[kde%in%which(kde1==1)] = 'L'
  map$spov[kde%in%which(kde2==1)] = 'M'

  for (p in 1:nrow(wh)){

    d = get.var.ncdf(nc, 'Tair', c(wh[p,1], wh[p,2]), 1), c(1,1,-1))
    r = as.integer(substr(strsplit(f, '_')[[1]][4], 1, 4))
    osa = seq(as.Date(paste(r, '-01-01', sep='')), length=length(d), by='days')
    x = tapply(d, format(osa, '%m'), mean, na.rm = T) - 273.15 # pro teploty

    # x = tapply(d, format(osa, '%m'), sum, na.rm = T) # pro srážky

    D[(r-roky[1])*12+1:12, p] = x

  }

}

setwd(pout)
write.table(D, paste(model, '_', sim, '_', var, '.txt', sep=''), sep='\t', col.names=F)
write.table(map, paste(model, '_', sim, '_', var, '.map', sep=''), sep='\t', col.names=F)

```

Příloha. 2: Ukázka skriptu pro extrakci denních hodnot teplot a srážek dostupných z ftp.iiasa.ac.at/WorkBlock6, které jsou zde uloženy ve formátu „ncdf“. Skript nejprve extrahuje hodnoty odtoku z celkem třiceti souborů obsahujících data odtoku vždy v délce jednoho roku a následně z nich vytvoří třicetiletou časovou řadu. Tato konkrétní ukázka skriptu je nastavena tak, aby vytvořila třicetileté časové řady teplot (pro obě povodí zároveň) pro kontrolní období simulované globálním klimatickým modelem CNRM.