

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Vyhodnocení historických simulací globálních klimatických
modelů

Diplomová práce

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

Vypracovala: Bc. Hanna Chakhouskaya

Praha 2018

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Hanna Chakhouskaya

Environmentální modelování

Název práce

Vyhodnocení historických simulací globálních klimatických modelů

Název anglicky

Assessment of historical simulations of global climate models

Cíle práce

Vyhodnocení simulací globálních klimatických modelů z hlediska simulace odtoku a půdní vlhkosti hydrologickým modelem a jejich porovnání s rekonstrukcí těchto veličin pro Evropu za období 1766-2015. Pozornost bude věnována základním charakteristikám veličin z hlediska vývoje dlouhodobých průměrů a variability, uvažovány budou standardní hydrologické indexy.

Metodika

Budou shromážděna následující data pro Evropu:

- historické simulace globálních klimatických modelů
- rekonstrukce klimatu
- simulace mHM (Mesoscale Hydrological Model) modelu

Data budou zpracována pomocí R. Pro jednotlivé výpočetní body mHM modelu budou z časových řad posuzovaných veličin (odtok, půdní vlhkost) vypočteny indikátory (např. indikátory sucha, vybrané kvantily, ukazatele variability apod.) a bude provedeno porovnání se simulací mHM založenou na rekonstruovaných časových řadách.

Doporučený rozsah práce

30-50 str

Klíčová slova

globální klimatické modely, Evropa, sucho, historické simulace, mHM

Doporučené zdroje informací

- Casty, C., Handorf, D., & Sempf, M. (2005). Combined winter climate regimes over the North Atlantic/European sector 1766–2000. *Geophysical research letters*, 32(13).
- Casty, C., Raible, C. C., Stocker, T. F., Wanner, H., & Luterbacher, J. (2007). A European pattern climatology 1766–2000. *Climate Dynamics*, 29(7-8), 791-805.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... & Midgley, P. M. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1535 pp.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Konzultant

Oldřich Rakovec

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2018

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2018

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 04. 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Vyhodnocení historických simulací globálních klimatických modelů“ vypracovala samostatně a použila jsem zdroje informací uvedené v seznamu použitých zdrojů.

V Praze 18.04.2018

.....

Poděkování

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D. a Dr. Oldřich Rakovec za jejich rady a čas, který mi věnovali při řešení dané problematiky.

.

Abstrakt

V této diplomové práci je provedeno vyhodnocení simulací čtyř globálních klimatických modelů GFDL-ESM2M, HadGEM-2, IPSL-CM5A-LR, MIROC5 z hlediska simulace odtoku a půdní vlhkosti hydrologickým modelem mHM (Mesoscale Hydrological Model) a jejich porovnání s (paleo-)rekonstrukcí těchto veličin pro Evropu za období 1766-2015. Pozornost je věnována základním charakteristikám veličin z hlediska vývoje dlouhodobých průměrů a variability, uvažovány jsou standardní hydrologické a meteorologické indexy sucha. Statistická analýza pro historické simulace globálních klimatických modelů, rekonstrukce klimatu, simulace mHM modelu byla zpracována pomocí programovacího jazyka R. Pro jednotlivé vstupní a výstupní veličiny mHM modelu (teplota, potenciální evapotranspirace, srážky, odtok, půdní vlhkost) byly vypočteny indikátory sucha (vybrané kvantily, ukazatele variability apod.). Jedním z výstupů diplomové práce je velká a názorná databáze grafů a velkého množství map hydroklimatických proměných a hydrologických a meteorologických indexů sucha, kterou můžeme snadno využít pro řešení konkrétních hydroklimatických otázek v různých zemích Evropy.

Klíčová slova: globální klimatické modely, Evropa, sucho, historické simulace, mHM

Abstract

This diploma thesis is focusing on the evaluation of four global climatic simulation models GFDL-ESM2M, HadGEM-2, IPSL-CM5A-LR, MIROC5 from the aspects of runoff simulation and soil moisture using Hydrological Model (mHM) and comparing the reconstruction of these values over Europe in the period 1766-2015. Emphasis is given on primary drought characteristics in the longterm perspective (average values and variability). Another data for Europe are historical simulations of global climatic models, restoration of climate. Drought analyses have been carried out using the programming language R. For grid of mHM model several indicators were calculated (chosen kvantils, variability indexes etc.) for temperature, potencial evapotranspiration, precipitation, runoff, soil moisture. The results of the thesis include a large database of graphs and maps of hydroclimatical variables and hydrological and meteorological drought indices, which we can easily use for solving specific hydroclimatic issues in different European countries.

Key words: global climate models, Europe, drought, historical simulations, mHM

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Literární rešerše	10
2.1. Rekonstrukce klimatu	10
2.2. Globální klimatický model	11
2.3. Hydrologického modelování dopadů klimatických změn	15
3. Metodika.....	19
3.1. mHM model.....	19
3.2. Klimatická data pro hydrologické modelování	21
3.3. Definice sucha.....	24
4. Metody	27
4.1. Standardizace	27
4.2. Proměnlivý prah.....	27
4.3. Vyhodnocení shody mezi pozorovanými a simulovanými daty	27
4.3.1. Rstudio a programovací jazyk R.....	27
4.3.2. Korelace	28
4.3.3. Klouzavý průměr.....	28
4.3.4. Ggplot2	29
4.3.5. Box-plot graf.....	29
5. Výsledky a diskuze	30
6. Závěr	46
7. Seznam literatury	48

1. Úvod

Poslední období sucha v Evropě jsou obecně považována za výjimečně závažná, (Hanel, et al., 2018), která značně ovlivnila širokou škálu sociálně-ekonomických odvětví, jako je zemědělství, hydrologie a vodní zdroje, ale také lidské zdraví a ekosystémy.

Sucho se šíří skrz všechny příslušné části hydrologického cyklu a zahrnuje nízký odtok, výrazné deficity vlhkosti půdy a srážek.

V poslední době nastávala v Evropě velká sucha (Ionita, 2017). Při srovnání s druhou polovinou 20. století, události sucha v letech 2003, 2010, 2013 a 2015 byly relativně závažné, když se ale podíváme hlouběji do minulosti, jejich extremita může být mnohem menší. Proto je třeba porovnávat sucho v dlouhodobějším měřítku.

V této diplomové práci je použita (paleo-)rekonstrukce klimatu za posledních 250 let (Casty, et al., 2005).

Tato práce navazuje na studii „Revisiting the recent European droughts from a long-term perspective“ (Hanel, et al., 2018). V dalších kapitolách bude uvedeno jak je použita (paleo-)rekonstrukce klimatu a simulace čtyř globálních klimatických modelů pro období 1766-2015 jako vstup do mesoscale Hydrological Modelu (mHM) (Samaniego, et al., 2010), (Kumar, et al., 2013), pro znázornění vlivu variability klimatu na hydrologické sucho v zemích Evropy kromě Skandinávie a Britských ostrovů, pro dva emisní scénáře, historický a preindustriální.

Práce je zaměřena na analýzu tří druhů sucha – hydrologického, zemědělského a meteorologického. Zároveň budou analyzovány meteorologické indexy sucha pro teploty a potenciální evapotranspiraci.

Závažnost sucha je největší v zemích s nedostatečnou vlhkostí půdy (Van Loon, 2013). Proto se v těchto zemích sucha vyskytují mnohem častěji a pokrývají mnohem větší plochy, např. v Itálii a ve Španělsku. Studie výskytu sucha je velmi důležitým tématem. Proto je v této práci položena základní otázka: *„Jaký globální klimatický model a scénář nejlépe popisuje klimatické podmínky daného regionu a jaký bude nevhodnější scénář, který by odpovídal klimatickému vývoji této oblasti?“* Na základě této diplomové práce se dá následně vyhodnotit, který z výbraných modelů a scénářů nejlépe popisuje historická sucha v dlouhodobém měřítku. Vzhledem k tomu, že se v budoucnu mohou objevit intenzivní a rozšířená sucha, tato studie pomůže vybrat správný model pro správné místo.

2. Literární řešerše

2.1. Rekonstrukce klimatu

Rekonstrukce historických klimatických podmínek mohou být odvozené na základě paleoklimatologických proxy dat a na základě statistických vztahů, které zahrnují rekonstrukce teplot, srážek, vegetace, atmosferického proudění a dalších klimatických podmínek.

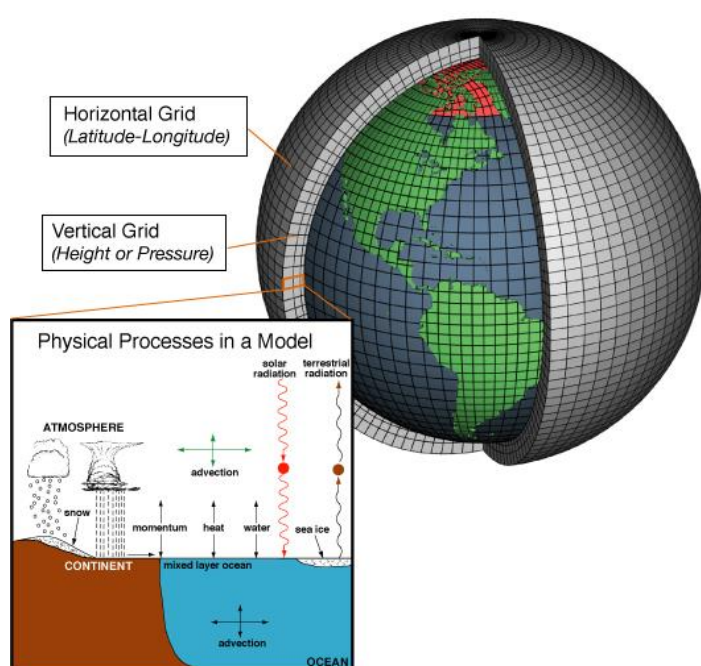
Proxy data jsou nepřímé údaje o klimatu, které se nacházejí v přírodních materiálech, jako jsou letokruhy stromů, stalagmity, ledovcová jádra, korály, mořské, oceánské nebo jezerní sedimenty a pyl (National Centers for Environmental Information (NCEI), nedatováno). Proxy data byla obvykle používána k rekonstrukci klimatu minulosti pro doby, kdy ještě neexistovaly instrumentální záznamy. Spolehlivé záznamy o klimatu jsou dochovány cca až od roku 1880. Analýza proxy dat se zakládá na skutečnosti, že rychlost růstu a depozice materiálu byly ovlivněny klimatickými podmínkami v době, ve které rostly nebo se usazovaly. Jako proxy data se také může použít množství jednotlivých izotopů v látkách. Některé proxy, jako například plynové bubliny uzavřené v ledu, umožňují zjišťovat složení dávné atmosféry a poskytnout tak svědectví o historickém kolísání složení Zemské atmosféry (Strom, 2007). Hlavní výhodou tohoto způsobu rekonstrukce klimatu je, že poskytuje informace daleko do minulosti. Nevýhodou zase je, že data jsou zpravidla v ročních anebo více ročních intervalech.

Rekonstrukce klimatu se dá také získat pomocí statistických vztahů a závislostí. Například práce, která byla provedena skupinou vědců (Casty, et al., 2005), vypočítala nezávisle rekonstrukci klimatu od roku 1766 v měsíčním časovém kroku. Odvozené klimatické proměnné byly teplota vzduchu, srážky, a pole geopotenciální výšky 500 hPa. Zásadní rozdíl je v tom, že tato metoda používá jen přímá měření, takže teplota je rekonstruována pouze z údajů o teplotě, rekonstrukce srážek se spoléhá pouze na záznamy o srážkách. Rekonstrukce klimatu (Casty, et al., 2005) je interpolována na pravidelné mřížkové pole pro celou Evropu. Myšlenka je taková, že historické údaje o záznamech ze stanic od roku 1766 je nutné přenést z těchto stanic a rekonstruovat je ve škále celé mřížky. Vztahy a závislosti mezi daty v každém bodu mřížky jsou odvozeny tak, že byly použity mapy časových řad zaznamů z různých stanic od roku 1901 do roku 2010 (kdy je stanic mnohem více) a jsou posazené za sebou v měsíčním kroku. Na základě daného množství stanic se dají odvodit vztahy k bodům této mřížky, tj. pokud jsou známé hodnoty ve většině bodů mřížky je možné najít vztahy mezi ostatními body. Tato metoda je kombinace pozorovacích dat a statistických metod, které jsou schopné generovat data pro celou mřížku. Předpokládají se stacionární vztahy mezi stanicemi, tj. vztahy a závislosti mezi stanicemi se časem nemění. Hlavní výhodou těchto dat je, že jsou zrekonstruovaná data v měsíčním kroku. Nevýhodou je v tom, že pro rekonstrukci potřebujeme přímá měřená data což omezuje délku rekonstrukce.

Také existují metody založené na kombinaci rekonstrukce z proxy dat a statistické rekonstrukce (Hanel & Vizina, 2014)

2.2. Globální klimatický model

Globální klimatický model (anglicky GCM – tedy *Global climate model* nebo *General circulation model*) je fyzikálně-matematický model proudění v oceánech a v atmosféře planety založený na fyzikálních zákonech a empirických vztazích (např. Navier-Stokesových rovnicích popisujících pohyb tekutiny integrované v závislosti na čase) aplikovaných na rotující kouli při daných zdrojích energie jako je záření a latentní teplo. Jeho rovnice jsou matematickým základem pro komplexní počítačový kód, který simuluje chování atmosféry nebo oceánů planety. Základní princip simulace klimatického modelu vypadá zjednodušeně následujícím způsobem: rozdělení planety na třírozměrnou mřížku, použití základních rovnic a vztahů a následné vyhodnocení výsledků modelu (National Ocean Service, 2017).



Obrázek 2.2.1: Rozdělení planety na třírozměrnou mřížku (National Ocean Service, 2017)

Klimatické modely jsou kombinované modely. Hlavními komponenty globálního klimatického modelu jsou:

- Atmosférické globální klimatické modely (neboli AGCM)
Atmosférické modely počítají větry, přenos tepla, záření, relativní vlhkost a hydrologii uvnitř každé bunky a vyhodnocují interakce se sousedními body sítě.
- Oceánické globální klimatické modely (neboli OGCM)
- Modely kontinentálního ledu, kontinentální povrchové modely, mořské biogeochemické modely, modely atmosférické chemie a další.

Přesnost předpovědi změny klimatu závisí na přesnosti chemických, fyzikálních a sociálních modelů a taky přesností jejich vstupních dat. V poslední době došlo k významnému pokroku při popisu fyzikálních a chemických jevů, ale stále existují významné nejistoty. Zejména pokud jde o předpovědi vývoje zemské populace,

průmyslu a technologie. Z těchto důvodů je většina závěrů odvozených ze simulací klimatických modelů značně nejistá.

V současné době se klimatické modely intenzivně rozvíjejí kvůli zlepšení počítačové techniky. To poskytuje možnost provádět výpočty pro různé modely najednou. Tento "paralelismus" ve vývoji je nezbytný pro pochopení mechanismů odpovědných za reprodukci různých klimatických charakteristik. Zpracování výsledků numerických experimentů pro vývoj moderních klimatických modelů v rámci mezinárodních programů ukázalo: že hlavní charakteristiky, získané prostřednictvím sady různých modelů a pak zprůměrovaných s ohledem na celou sadu modelů, jsou blíže ke skutečně pozorovaným hodnotám než výsledky získané pomocí jednotlivých a to i těch nejlepších modelů (Dymnikov, 2005).

V rámci mezinárodních programů AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project), CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) a dalších, je provedeno porovnání modelů vyvinutých skupinami výzkumných pracovníků z různých zemí světa, a to jak mezi sebou, tak s různými pozorovacími údaji. To umožňuje vyšetřit systematické chyby v simulaci moderního klimatu a odhadnout rozsah jeho možných změn.

Ve této práci jsem používala výsledky z projektu CMIP5. Coupled Model Intercomparison Project (CMIP, v současnosti v páté fázi, proto CMIP5) je projektem World Climate Research Programme (WCRP) založeným v roce 2008. (Taylor, et al., 2011) Deklarovaným cílem projektu je vytvoření multi-modelového kontextu sloužícího k

- 1 Hodnocení mechanismů zodpovědných za rozdíly v simulacích zpětných vazeb spojených zejména s cyklem uhlíku a tvorbou oblačnosti,
- 2 prověření schopnosti modelů predikovat klima v měřítku desetiletí,
- 3 nalezení důvodů odlišností projekcí stejně řízených modelů.

Pátá fáze tohoto projektu (poslední dokončená) spojila téměř 20 klimatických center z celého světa a téměř 50 klimatických modelů (Taylor, et al., 2011). Výsledky výzkumu založeného na těchto simulacích jsou zohledněny při hodnocení stavu klimatických znalostí ze strany mezivládního panelu pro změnu klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) (Solomon, et al., 2007).

Taylor et al. (2012) popisuje detaily experimentů CMIP5, popis toho, z čeho CMIP5 vychází a jak překračuje předchozí fáze CMIP, návrh experimentu, informace o tom, jak získat přístup k modelu výstupu CMIP5, úvodní diskusi o problémech relevantních pro interpretaci výsledků CMIP5 a jejich souhrn. Na *Obrázku č.2.2.2* je uveden Přehled CMIP5 experimentů.

CMIP5 je zaměřen na dvě časové škály (Taylor, 2009):

- dlouhodobou, do roku 2100. Poprvé v CMIP5 modely budou zahrnovat znázornění uhlíkového cyklu.
- krátkodobou, do roku 2035.

Program CMIP5 poskytuje komplexní srovnání všech stávajících klimatických modelů s reprodukcí minulosti, současnosti a budoucnosti. Numerické experimenty navržené CMIP5 jsou založeny na realistických a metodických výpočtech (Dymnikov, 2005). V reálných výpočtech je klima současnosti, minulosti nebo budoucnosti modelováno podle předepsaného scénáře. Na základě těchto výpočtů jsou sestaveny prognózy možných budoucích změn klimatu.

Důležitou okrajovou podmínkou klimatických modelů jsou koncentrace skleníkových plynů v podobě emisních scénářů či scénářů koncentrací.

EMISNÍ SCÉNÁŘE SRES (Special Report on Emissions Scenarios)

Scénáře SRES vychází ze Zvláštní zprávy o emisních scénářích (Nakicenovic & Swart, 2000). Jsou to donedávna nejpoužívanější řady scénářů. Scénáře SRES explicitně nezohledňují iniciativy v oblasti klimatu, které předpokládají implementaci Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu či emisních cílů Kjótského protokolu. (Hanel, et al., 2014) Na základě čtyř stejně pravděpodobných linií vývoje světové populace byla provedena tvorba jednotlivých variant scénáře. Byla provedena velká řada simulací pro každou linii vývoje. Pak z ní vybrán reprezentativní zástupce.

SCÉNÁŘE KONCENTRACÍ RCP

Koncepty emisních scénářů SRES jsou nahrazovány konceptem scénářů koncentrací RCP. Scénáře koncentrací RCP (ang. Representative Concentration Pathways – reprezentativní směry vývoje koncentrací) jsou scénáře, které jsou založeny na analýze výstupů komplexních socio-ekonomicko-klimatických modelů. Scénáře nicméně nedefinují emise skleníkových plynů ve vztahu ke konkrétním socio-ekonomickým podmínkám, ale spíše vybírají typické příklady vývoje koncentrací skleníkových plynů, bez přihlídnutí k socio-ekonomickým příčinám (Hanel, et al., 2014).

Shromážděné scénáře byly rozděleny do čtyř hlavních skupin a z každé skupiny byl vybrán reprezentativní zástupce. Při shromáždění a třídění scénářů byly použity další požadavky na RCP scénáře (Hanel, et al., 2014).

- pokrytí rozpětí koncentrací publikovaných scénářů,
- malý sudý počet (pro zabránění preference středního scénáře jako nejlepšího),
- odlišitelnost úrovní a tvarů koncentrace v roce 2100.

Pokud scénář splňoval podmínky, byl přiřazen do scénářů koncentrací, které byly následně rozděleny do 4 skupin. Z každé skupiny byl vybrán reprezentativní zástupce skupiny, který odráží hlavní vlastnosti této skupiny.

Scénář RCP2.6 předpokládá mírný růst koncentrací oxidu uhličitého s vrcholem před koncem 21. století a následným poklesem koncentrací, což umožňuje posouzení vlivu možného snižování emisí. (Hanel, et al., 2014) To je zásadní rozdíl mezi RCP scénáři a SRES scénáři, protože ostatní RCP (RCP8.5, RCP4, RCP6) scénáře víceméně pokrývají rozsah odhadovaných koncentrací pro emisní scénáře. Taky u scénáře koncentrací není definována pravděpodobnější varianta vývoje.

Climate & CO ₂ concentration scenarios	
picontrol	Pre-industrial climate and 286ppm CO ₂ concentration. The climate data for the entire period (1661-2299) are unique – no (or little) recycling of data has taken place.
historical	Historical climate and CO ₂ concentration.
rcp26	Future climate and CO ₂ concentration from RCP2.6
rcp60	Future climate and CO ₂ concentration from RCP6.0
Human influence and land-use scenarios	
1860soc	Pre-industrial land use and other human influences. Given the small effect of dams & reservoirs before 1900, modellers may apply the 1901 dam/reservoir configuration during the pre-industrial period and the 1861-1900 part of the historical period if that is significantly easier than applying the 1861 configuration.
histsoc	Varying historical land use and other human influences.
2005soc	Fixed year-2005 land use and other human influences.
rcp26soc	Varying land use (e.g. point source inputs of nutrients and operational changes of reservoirs), water abstraction and other human influences according to SSP2 and RCP2.6; fixed year-2005 dams and reservoirs. For models using fixed LU types, varying irrigation areas can also be considered as varying land use.
rcp60soc	Varying land use, water abstraction and other human influences according to SSP2 and RCP6.0, fixed year-2005 dams and reservoirs. For models using fixed LU types, varying irrigation areas can also be considered as varying land use.
2100rcp26soc	Land use and other human influences fixed at year 2100 levels according to RCP2.6.

Obrázek č.2.2.2: Přehled CMIP5 experimentů (Ostberg, et al., 2017)

2.3. Hydrologického modelování dopadů klimatických změn

Tato kapitola diplomové práce popisuje hydrologické modelování dopadů klimatických změn.

Jak je uvedeno v úvodu, existuje mnoho důvodů, proč je třeba použít hydrologické modelování. Hlavním důvodem je, že nejsme schopni měřit vše, co bychom chtěli vědět o hydrologických systémech. Ve skutečnosti máme pouze omezený rozsah měření v prostoru a čase. Proto potřebujeme způsob extrapolace z dostupných měření, zejména do budoucna a k posouzení pravděpodobného dopadu budoucích hydrologických změn. Modely různých typů poskytují prostředky pro kvantitativní extrapolaci nebo předpověď, které jsou užitečné při diskutování a zvolení adaptačních opatření (Hanel, et al., 2018).

Hydrologický model je zjednodušení reálného hydrologického systému, které pomáhá v pochopení a předpovídání chování systému a hospodaření s vodními zdroji. Je to matematický nástroj transformující vstupní veličiny (většinou srážky, teplotu, případně potenciální evapotranspiraci) na odtok nebo prvky hydrologické bilance (například přímý a základní odtok, zásoby vody v půdě a ve sněhu, zásobu podzemní vody apod.) (Hanel & Vizina, 2014).

V naší době existuje celá řada různě komplexních modelů: black-box nebo statistické modely jsou modely, které jsou založeny na empirických vztazích vstupních a výstupních veličin; konceptuální modely popisují děje v povodí pomocí fyzikálně založených schémat; deterministické a fyzikální modely vycházejí z detailního popisu procesů, které probíhají v povodí.

Dané schéma postupu vytváření fyzikálně založeného modelu (koncepčního modelu) je popsáno v knize Rainflow-Runoff Modeling (Keith, 2001).

Autor nejprve definuje pozorovací podmodel (v schématu z knihy to je „perceptual model“, viz *Obrázek č.2.3.1*), který je shrnutím našeho vnímání chování systému, jako například jakým způsobem povodí reaguje na srážky za různých podmínek. Pozorovací podmodel je zcela osobní, proto je posouzení pozorovacího podmodelu pro konkrétní povodí velmi důležité. Není totiž omezen matematickou teorií. Nicméně, matematický popis je první etapou formulování modelu, který bude sloužit pro kvantitativní předpovědi. Rovnice jsou následně přeloženy do programovacího kódu. Pokud však rovnice nelze analyticky analyzovat s ohledem na některé hraniční podmínky pro reálný systém (což je obvykle případ parciálních diferenciálních rovnic nacházejících se v hydrologických modelech), pak je nutná další aproximace pomocí numerické analýzy. Transformovaný koncepční podmodel na programovací kód je nazýván procedurální podmodel. Procedurální podmodel může přidat podstatnou chybu k řešení originální rovnice. Dále než bude možné použít kvantitativní předpovědi pro konkrétní oblast, je nutné provést kalibraci parametru modelu. Jakmile jsou zadány hodnoty parametrů, může být provedena simulace a kvantitativní předpovědi. Dalším krokem je validace aneb vyhodnocení těchto simulací na časově či prostorově nezávislých časových řadách.

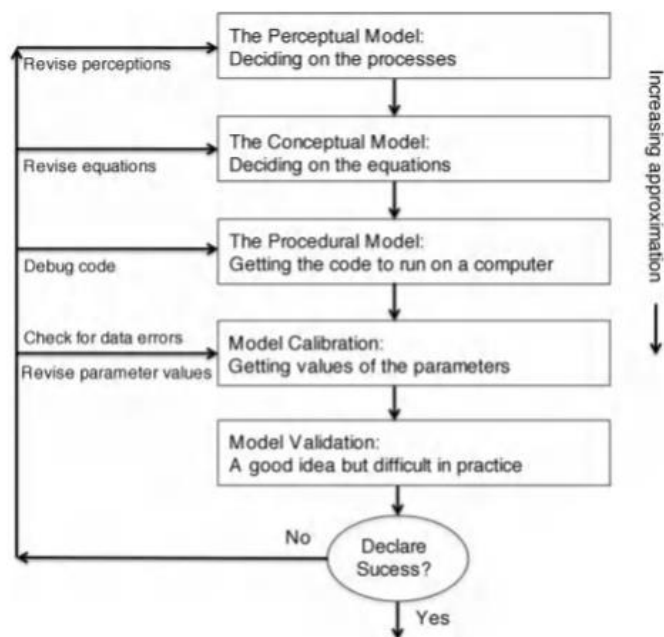


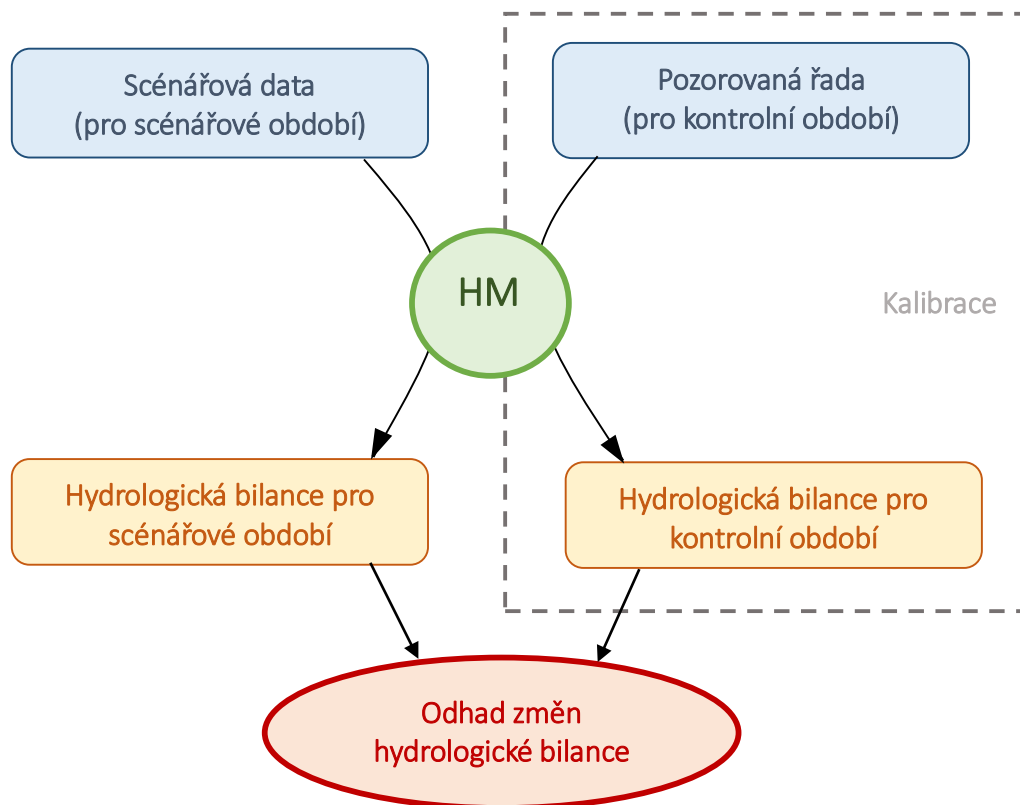
Figure 1.2 A schematic outline of the steps in the modelling process.

Obrázek č.2.3.1.: Schéma postupu vytvoření hydraulického modelu (Keith, 2001).

Dále se rozhodujeme, zda je model užitečný pro požadované účely. V případě že ne, hledáme chybu, snažíme se upřesnit model na každé úrovni nebo změnit matematické nebo programovací metody.

Typickým postupem použití vytvořeného modelu (modelování) je následující (Hanel, 2014):

1. Zvolený hydrologický model pro dané povodí nakalibrujeme pomocí pozorovaných dat z kontrolního období
2. Pomocí nakalibrovaného hydrologického modelu provedeme simulace hydrologické bilance pro kontrolní období.
3. Z globálních klimatických modelů jsou vytvořena scénářová data změny klimatu pro vybrané povodí.
4. Pomocí nakalibrovaného hydrologického modelu a scénářových řad je provedena simulace hydrologické bilance pro scénářové období.
5. Provedeme odhad změn hydrologické bilance.



Obrázek č.2.3.2: Scéma postupu vyhodnocení hydrologických dopadů klimatické změny

Postup při vyhodnocení dopadů změny klimatu lze stručně popsat následovně: (Hanel & Vizina, 2014)

1. Definice problému a výběr vhodné metody tvorby scénáře změny klimatu
2. Volba kontrolního a scénářového/scénářových období
3. Tvorba modelu systému
4. Rozhodnutí o podobě scénáře u hlediska délky řad pro jednotlivá období a z hlediska prostorového rozložení dle schématu
5. Rozhodnutí a strategii reprezentace nejistot v posouzení dopadů změny klimatu

Definovat problém většinou znamená odpovědět na řadu otázek. Každá odpověď nás směřuje k řešení řady praktických problémů při vyhodnocení.

Po definování problému je dalším krokem volba kontrolního a jednoho nebo více scénářových období. Kontrolní období je období, se kterým budeme srovnávat výsledky modelování změn klimatu (Hanel & Vizina, 2014). Je to většinou třicetileté období, kdy se neprojevují (nebo pouze slabě) vlivy klimatické změny. Například, období 1960-1990 je typické období používané jako kontrolní období. Ale také by mělo být reprezentativní tj. dostatečně dlouhé, aby se daly spolehlivě spočítat dlouhodobé charakteristiky.

Dále zvolíme scénářové období, které zcela vyplývá z účelu analýzy. Buď to jsou kratší (často třicetileté) úseky simulací (typická období jsou 2070-2100, 2020-2050) nebo dlouhé transientní simulace klimatických modelů (např. 1961-2100). Nicméně, dlouhé

analýzy se zabývají spíše změnami charakteristik meteorologických veličin než hydrologickým modelováním. Jak bylo již zmíněno, v této práci bylo hodnoceno období 1766-2100 a analyzovány byly změny charakteristik veličin jako jsou průtok a koeficient půdní vlhkosti (angl. Soil moisture index).

Dále následuje tvorba modelů pro kontrolní období. Na začátku bychom měli zajistit potřebná data, zpravidla se jedná o řady teploty, srážek a potenciální evapotranspirace. Možnými zdroji dat jsou pozorovaná data, výstupní data z generátorů počasí nebo reanalýzy klimatu. Následně pomocí dat z kontrolního období nakalibrujeme hydrologický model (jak bylo zmíněno na začátku kapitoly), tj. identifikujeme jeho parametry. Na nakalibrovaném modelu bude provedena simulace hydrologického procesu pro kontrolní a scénářové období.

V současnosti je zcela vyloučeno přímé použití výstupů klimatických modelů pro modelování dopadů změny klimatu kvůli systematickým chybám. Pro tvorbu scénářů změn klimatu se dá použít mnoho metod, například naivní metody, přímé nebo nepřímé metody apod. Jednotlivé metody jsou odlišené od sebe množstvím různých předpokladů. Ale neexistuje „správná“ metoda tvorby scénářů změn klimatu, protože jejich použití záleží na účelu jejich aplikace.

Další častou překážkou přímé aplikace výstupů klimatických modelů je mnohdy nesoulad požadovaného prostorového a časového měřítka a měřítka výstupů klimatických modelů.

Časové měřítko má zpravidla denní či měsíční krok, ale občas je nutné uvažovat hodinový časový krok (typický pro problematiku městské hydrologie). Simulace klimatických modelů v krátkých časových krocích jsou obtížně dostupná a často vykazují výrazné systematické chyby, takže analýza často probíhá pomocí disagregace z delších (měsíčních nebo denních) časových měřítek.

Prostorové měřítko dat z klimatických modelů má rozlišení v řádu jednotek a desítek kilometrů (např. regionální klimatické modely) nebo desítek až stovek km (např. globální klimatické modely). Je důležité upozornit, že výstupy klimatických modelů jsou vždy prostorové průměry hledané charakteristiky. Strategie tvorby scénářů změny klimatu pro prostorové průměry se odvíjí od velikosti uvažované plochy v porovnání s rozlišením klimatického modelu (Hanel & Vizina, 2014). Jestli jsou výstupy z klimatických modelů výpočítané na větší plochu než plocha námi potřebná, používají se postupy bodových scénářů. V opačném případě, jestli je zájmová plocha srovnatelná nebo větší než výpočetní bunka klimatického modelu, pro tvorbu jsou využívány informace ze všech relevantních buněk klimatického modelu.

Finální krok je simulace pro scénářové období a vyhodnocení dopadů změny klimatu. Zpravidla vyhodnotíme dopad vyčíslením změn průměrů hledané veličiny mezi kontrolním a scénářovým obdobím. Méně často vyhodnotíme změny v rozdělení pravděpodobnosti posuzované veličiny.

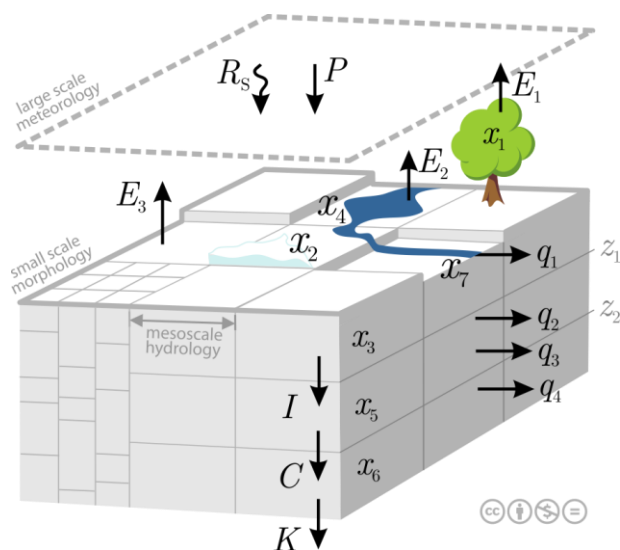
3. Metodika

3.1. mHM model

Přesné předpovídání regionálních bilančních toků a stavů zůstává náročným úkolem v současné hydrologii. Řešení tohoto velkého problému vyžaduje model, který umožňuje spolehlivé předpovědi (Rakovec, et al., 2016).

Pro výpočty měsíčních hodnot odtoku a půdní vlhkosti kořenové zóny na území Evropy od roku 1766 byl použit mesoscale Hydrological Model (mHM) (Samaniego, et al., 2010), (Kumar, et al., 2013). Model byl vyvinutý skupinou vědců v The Helmholtz-Centre for Environmental Research GmbH – UFZ v Lipsku a pokračuje ve vývoji až do dnes.

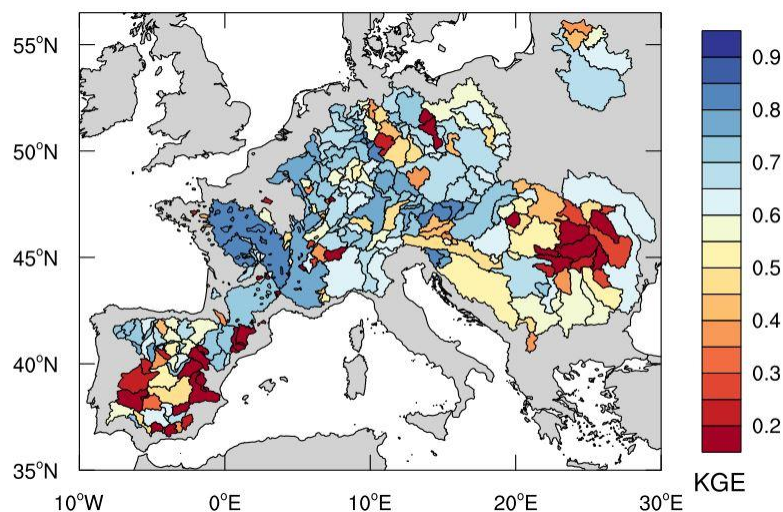
mHM model je parametrizován technikou Multiscale Parameter Regionalisation (MPR) v rámci 400 evropských povodí a umožňuje spolehlivé předpovědi v různých měřítcích (Rakovec, et al., 2016). mHM je prostorově explicitní distribuovaný konceptuální hydrologický model, který využívá mřížkové buňky jako primární hydrologickou jednotku a zahrnuje při výpočtu následující procesy: tání sněhu, změnu vlhkosti půdy, infiltraci a povrchový odtok, evapotranspiraci, akumulaci vody v půdě a infiltraci, podpovrchového odtoku a základního odtoku. Schéma modelu mHM je zobrazeno na Obrázek č. 3.1.1.



Obrázek č. 3.1.1: Schéma mesoscale Hydrological Model (mHM) (Samaniego, 2017)

Model pracuje s hodinovými nebo denními meteorologickými údaji (t.j., srážkami, teplotou a potencialní evapotranspirací) a využívá dostupné fyzikální charakteristiky povodí (t.j. půdní textura, vegetace a geologické vlastnosti). Výstupem modelu je odvození prostorové variability požadovaných parametrů. V současné době byl model úspěšně aplikován a otestován na povodích EU, a také byly provedeny testy v Indii a USA. Níže je znázorněna úspěšnost mHM modelu při simulaci povrchového odtoku na hlavních evropských řekách (Rakovec, 2016) pomocí hodnoty Kling-Gupta

efficiency (KGE) (Gupta, et al., 2009), , kterou je poslední dobou zvykem používat k výhodnocení efektivity modelů.



Obrazek č.3.1.2: Mapa úspěšnosti mHM simulovat povrchový odtok na hlavních evropských řekách pomocí hodnoty KGE. Vysoký KGE (modrá barva) odpovídá dobré shodě simulovaných výstupních dat s pozorováními. (Rakovec, 2016)

mHM model simuluje povrchový odtok v denním kroku pro evropská povodí s mediánem efektivity $KGE=0,56$. Výsledky validačních testů ukazují, že mHM model je schopen dostatečně dobře zachytit dynamiku proudění v celé řadě klimatických a fyziografických charakteristik. Model vykazuje obecně lepší výsledky (s nižším rozpětím modelových statistik) v povodích s vyšším úhrnem srážek (Rakovec, et al., 2016). Horší výkon modelu se vyskytuje zejména v antropogeně ovlivněných povodích (jižní Španělsko) a v místech s nižší hustotou meteorologických stanic (východní Evropa).

3.2. Klimatická data pro hydrologické modelování

Pro hydrologické výpočty pomocí mHM modelu byly použity GCM simulace z projektu ISIMIP2b o konstantních emisích CO₂. (Hanel, et al., 2018)

Projekt Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ISIMIP byl založen v Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) a International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).

Protokol ISIMIP pokrývá základní sadu scénářů, zajišťující minimální soubor simulací dopadů změny klimatu, které umožňují mezioborovou agregaci. Tento protokol řeší mezery v oblasti výzkumu: posouzení dopadů globálního oteplování na 1,5 a 2 °C na množství různých sektorů dopadů.

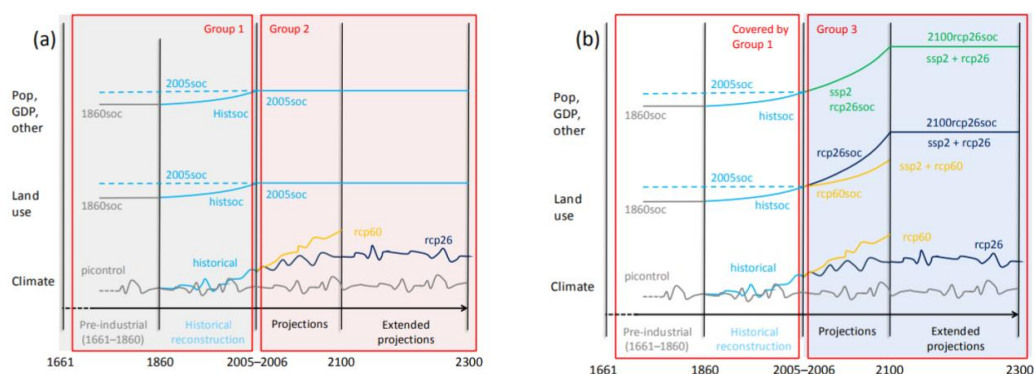
ISIMIP je navržen pro určování dalších bodů: (Ostberg, et al., 2017)

- (1) oddělení dopadů historického oteplování, které začalo v preindustriální době, od vlivů ostatních faktorů (například historické změny ve využívání půdy)
- (2) vyčíslení dopadů oteplování na 1,5 °C, včetně potenciálního překročení a dlouhodobých dopadů až do roku 2299, a porovnání s vyšší úrovní globální změny střední teploty, která byla zafixována při stanovených sociálně ekonomických podmínkách v roce 2005;
- (3) posouzení klimatických dopadů založených na klimatických scénářích a zároveň zohlednění současných změn socioekonomických podmínek, zejména požadavky na bioenergii spojené s transformací energetického systému tak, aby odpovídala RCP2.6 ve srovnání s RCP6.0.

Jako vstupní hodnoty do mHM modelu byla použita data z 2b verze Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (dále jen ISIMIP2b). ISIMIP2b je navržen tak, aby poskytoval plnou informaci o dopadech globálního oteplování o 1,5 °C a souvisejících snížení emisí, jak to vyžaduje zvláštní zpráva IPCC k tomuto tématu. (Potsdam Institute for Climate Impact Research, n.d.)

Protokol ISIMIP2b zahrnuje:

1. dlouhodobou předindustriální simulaci,
2. historické simulace zohledňující různé socioekonomické podmínky, ale za předpokladu předindustriálního klimatu
3. simulace historických dopadů, které zohledňují různé socioekonomické podmínky a změnu klimatu



Obrázek č.3.2.1: Schematické znázornění experimentů pro ISIMIP2b (Ostberg, et al., 2017).

Schematické znázornění experimentů ISIMIP2b je vidět na Obrázku č.3.2.1.

Na panelu (a) jsou zobrazené průběhy první a druhé skupiny. Skupina č. 1 zobrazuje skupinu simulací modelů, které zohledňují čistý účinek historické změny klimatu bez antropogenních vlivů. Tyto modely udržují faktory způsobující klimatické změny na úrovni roku 2005 (na obrázku jsou to 2005soc, přerušované čáry). Skupina simulací modelů č. 2 odhaduje účinek budoucí změny klimatu za předpokladu stávajícího počtu obyvatel, hospodářského rozvoje, užití půdy a socioekonomického řízení na úrovni roku 2005 (2005soc).

Panel (b) zobrazuje simulace skupiny 3. Skupina simulací modelů č.3 kvantifikuje účinky změn užití půdy a změny populace, Hrubý domácí produkt (HDP) a řízení od roku 2005 spojené s RCP6.0 a RCP2.6. Faktory způsobující klimatické změny, u kterých neexistuje žádný vývoj nebo změny v budoucnu, zůstávají po roce 2005 konstantní.

Ve této diplomové práci byla použita data historických a preindustriálních koncentračních scénářů. Paleo-rekonstrukce jsou od roku 1766 do roku 2015 (250 let). RCP scénáře pro budoucnost (od roku 2005 do roku 2099) zatím neanalyzuji, ale mohl by sloužit pro další výzkumné projekty.

Použité názvy v programovacím kódu a dokumentaci pro zmíněné scénáře jsou historical a piconrol.

Piconrol: Preindustriální klima s koncentrací CO₂ 286 ppm. Zadané vstupní údaje pokrývají celé období (1661-2299) částečně založené na recyklaci dat. Pořadí let by se nemělo měnit.

Historical: Historická klima a historická koncentrace CO₂ (1861-2099).

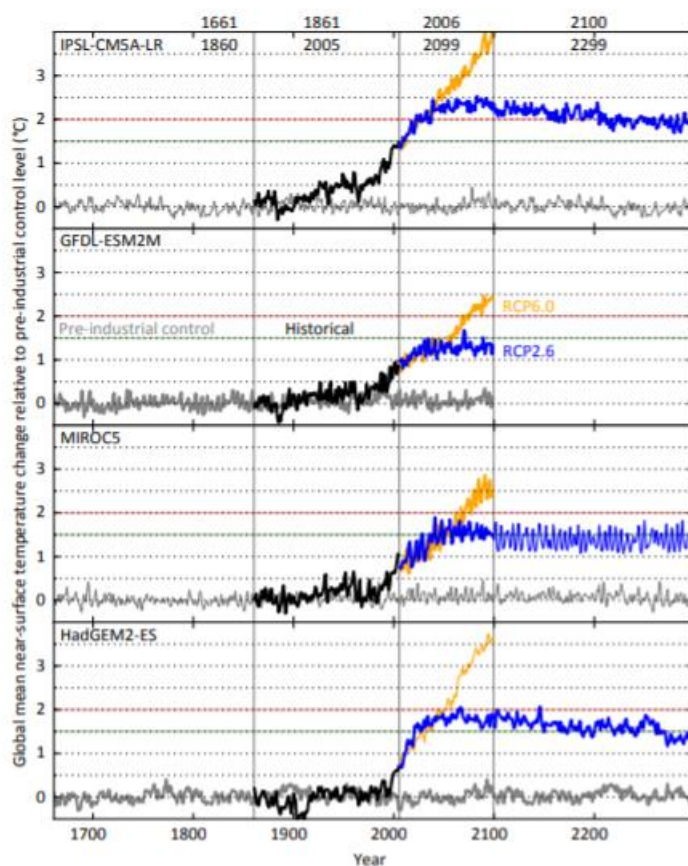
Tyto simulace jsou v následující práci označeny „NÁZEV MODELU_hist“ pokud jsou použita vstupní data s historického scénáře nebo „NÁZEV MODELU_piControl“ v případě použití preindustriálních dat.

Údaje o vstupních klimatických datech byly poskytnuty jako výstupy ze čtyř vybraných globálních klimatických modelů CMIP5. Jsou to modely GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES,

IPSL-CM5A-LR, a MIROC5. Výstupní data jsou opravená o bias v denním časovém kroku a s horizontálním rozlišením 0,5 stupně (=50km).

Obrazek č.3.2.2 znázorňuje jak vypadají výstupy u vybraných modelů CMIP5 v protokolu ISIMIP2b. Časové řady ročních změn teploty v porovnání s preindustriálními úrovněmi (1661-1860) simulované pomocí IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M, MIROC5 a HadGEM2-ES.

Pro vyhodnocení úspěšností simulací modelových meteorologických dat ze čtyř CMIP5 modelů byl použit pátý vstupní datový soubor historické (paleo-)rekonstrukci, která jsou dostupna od roku 1766 (Casty et al. 2005a). Tyto simulace jsou dále označeny jako „RECON_hist“.



Obrazek č.3.2.2: Časové řady ročních globálních změn teploty v porovnání s preindustriálními úrovněmi (1661-1860) simulované pomocí IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M, MIROC5 a HadGEM2-ES (Ostberg, et al., 2017). Barevné kódování označuje scénářové experimenty CMIP5 tj. šedá: preindustriální, černá: historická, modrá: RCP2.6, žlutá: RCP6.0. Odpovídající časová období jsou uvedena v dolní a horní části grafu.

3.3. Definice sucha

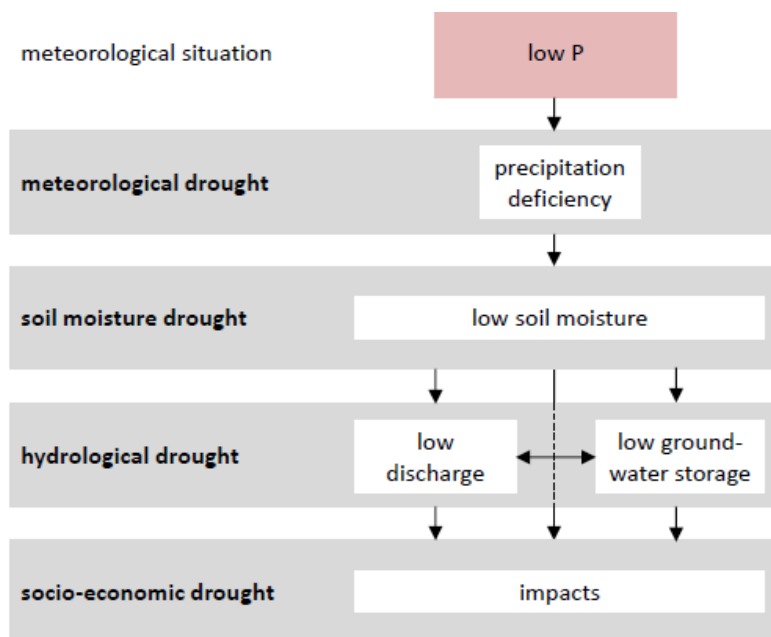
Sucho je komplexní fenomén, který může být definován různými způsoby. Nejjednodušší definicí sucha je „Nedostatek vody ve srovnání s normálním stavem“ (Sheffield & Wood, 2011) Při výzkumu sucha se obecně zaměřujeme na atmosférické proměnné a složky vodního cyklu a vazby mezi nimi, např. půdní vlhkost, množství srážek, tání sněhu, evapotranspirace, odtok atd.

Je zvykem předpokládat, že sucho je trvalý a regionálně rozsáhlý jev, ačkoli tato vlastnost není snadno kvantifikována. Sucho je nejčasteji děleno na 4 skupiny (Van Loon, 2013), (Hisdal & Tallaksen, 2000):

- atmosférické sucho) se považuje za nedostatek (deficit) srážek, případně kombinovaný se zvýšenou potenciální evapotranspirací, která pokrývá rozsáhlé území a trvá delší dobu. V této práci je meteorologické sucho definováno jako deficit srážek. Deficit srážek v určitém čase je definován jako rozdíl mezi zvolenou úrovní prahu a pozorovanými srážkami. Celkový nedostatek je dán jako kumulovaná suma deficitu srážek za celkou dobu trvání sucha. Více o definici sucha v nestacionárních podmínkách pomocí metody proměnlivého prahu je v kapitole „Metody“.
- Půdní nebo zemědělské sucho je nedostatkem půdní vlhkosti (většinou v kořenové zóně), což snižuje množství vody dostupné pro vegetaci. Definice události použitá v této práci pro zemědělské sucho používá maximální odchylku nad předem zvolenou prahovou hodnotou (zde 20procentní kvantil).
- Hydrologické sucho je široký termín související s nedostatkem vody v rámci povrchového a podpovrchového odtoku. Například nižší než obvykle hladiny podzemních vod nebo hladiny vody v jezerech, snížení mokřadní plochy a odtoku z řek. Sucho podzemních vod a sucho spojené s celkovým odtokem jsou někdy definovány odděleně. Definice události použitá pro hydrologické sucho musí být relevantní pro porovnání s meteorologickým suchem a také umožňovat kvantitativní analýzu. Proto je v této práci uvažována metoda deficitních objemů. Pro měsíční nebo denní časový krok dat se doporučuje použít hodnotu thresholdu mezi 10. a 30. percentilem – zde je uvažován 20procentní kvantil.
- Socioekonomický druh sucha se projevuje spektrem dopadů tří výše uvedených typů sucha na potřeby lidstva.

Sucho obvykle začíná atmosférickým suchem a přechází do půdního sucha. Hydrologické sucho je posledním článkem řetězce sucha a naznačuje největší vyčerpání vodních zdrojů v určité oblasti. Pro přehlednost vztahů a závislostí mezi různými druhy sucha a jejich vývojem je uvedený *Obrázek č.3.3.1.*

Každé z výše uvedených období sucha může mít velmi odlišnou dobu trvání, ale v každém případě trvá týdny nebo dokonce měsíce. Během tohoto období nejsou pozorovány žádné nebo velice malé srážky. Teplota vzduchu je nejvyšší pro dané roční období a pouze na konci sucha může být výrazně snížena (Vladimirov, 2005) Sucho a jeho následky mají zásadní vliv přímo na člověka, omezují jeho spotřebu vody a spotřebu vody v zemědělství a průmyslu.



Obrázek č.3.3.1: Schéma vztahů a závislostí mezi různými druhy sucha a jejich vývojem (Van Loon, 2013)

V této diplomové práci jsou zkoumány pouze fyzikální procesy související se suchem, nebyly provedeny žádné sociálně-ekonomické analýzy.

Antropogenní vlivy jsou však někdy těžko zanedbatelné, protože ovlivňují pozorované hydrometeorologické vlastnosti. Antropogenní účinky na vodní cyklus související se suchem mohou být přímé i nepřímé. Přímé účinky jsou snížení dostupnosti vody například velké odběry z povrchových nebo podzemních vod, odklon vody a výstavba nádrží. Nepřímé účinky souvisejí se změnami v hydrologickém systému, což vede k poklesu dostupnosti vody. Změny ve využívání půdy mohou například vést k rychlejšímu odtoku a tím ke snížení hladiny podzemních vod.

Důvody výskytu hydrologického sucha jsou složité, protože jsou závislé nejen na atmosféře, ale také na hydrologických procesech, které přivádějí vlhkost do atmosféry, způsobují zadržení vody a odtok vody (Mishra & Singh, 2010).

Obecně platí, že dlouhodobý nedostatek srážek způsobuje menší zadržení vody v půdě. Zmenšení půdní vlhkosti závisí na předcházejícím stavu, odvodňování a evapotranspirace z holé půdy a zejména z rostlin. (Van Loon, 2013)

Většina vědeckých studií vyhodnocuje vlastnosti sucha v kontextu záznamů začínajících ve druhé polovině 20. století. Existují však náznaky toho, že hlavní důvody výskytu hydrologického sucha (srážky, deficit půdní vlhkosti a vysoká evapotranspirace, které jsou spojeny s vysokou teplotou) již dosáhly stejných úrovní již v daleké minulosti. Například nejvyšší denní teploty v některých částech střední Evropy v roce 1540 byly pravděpodobně vyšší než v roce 2003. Hodnoty vlastností rekonstruovaných meteorologických událostí sucha v letech 1616, 1893 a 1921

přesáhly nebo jsou alespoň srovnatelné s hodnotami nedávných pozorovaných událostí (Hanel, et al., 2018)

Ve své diplomové práci sucho definuji pomocí metody deficitních objemů neboli metody prahových hodnot. V tom případě sucho nastává, když hodnota vybrané proměnné (např. srážek nebo průtoku) je menší než předem daná prahová hodnota. Závažnost sucha je vyjádřena deficitním objemem, tj. kumulativním objemem pod předem definovanou prahovou hodnotou (Hanel, et al., 2018). V této diplomové práci jsou deficitní objemy vypočtené ze standardizovaných časových řad tříměsíčních srážek, měsíčních odtoků a měsíčních údajů o vlhkosti půdy a jsou dále označovány jako Index standardizované anomálie (zkratka SAI - Standardized Anomaly Index).

Index standardizované anomálie, který měří standardizovaný kumulativní objem pod předem zvolenou prahovou hodnotou (threshold 20 percentilu) -pro srážky a odtok, případně maximální odchylku pod tímto prahem (pro půdní vlhkost) nebo standardizovanou maximální odchylku nad předem zvolenou prahovou hodnotou (threshold 80 percentilu(q80))-pro teplotu a potenciální evapotranspiraci.

4. Metody

4.1. Standardizace

Standardizované skóre (též standartizace normalizace, anglicky: Standard score, z-score) je to měřítko relativního rozptylu pozorované nebo naměřené hodnoty, která ukazuje, kolik směrodatných odchylek je v jeho poměrném rozložení. Jedná se o bezrozměrný statistický ukazatel používaný ke srovnání hodnot různých rozměrů nebo škály měření.

Standardizované skóre hodnoty x se vypočte podle vzorce

$$z = \frac{x - \mu}{s} \quad (1)$$

Kde μ je střední hodnota a s směrodatná odchylka.

Využití standartizace zabraňuje velkým rozdílům mezi typy klimatu a odstraňuje vliv sezónnosti.

4.2. Proměnlivý prah

Nejčastěji používaná kvantitativní definice sucha vychází z definice prahové hodnoty q_{20} , pod níž se parametry považuje za sucho. (Hisdal & Tallaksen, 2000) Prahová hodnota může být zafixovaná nebo se může měnit v průběhu let. Proměnná prahová hodnota je práh, který se v průběhu např. roku liší - tj. práh je definován zvlášť pro jednotlivé měsíce nebo dny. Metoda proměnné prahové hodnoty je přizpůsobena ke zjištění odchylek od normálu během období s vysokým i nízkým průtokem.

V této práci je využit proměnlivý threshold.

Pro měsíční nebo denní časový krok dat se doporučuje použití hodnotu prahu mezi 10. percentilem (q_{10}) a 30. percentilem (q_{30}) pro proměnné jako srážky, odtok, půdní vlhkost. V této práci zároveň zkoumáme podmínky vedoucí potenciálně ke vzniku sucha, tj. vysoké teploty a evapotranspirace. Zde používáme rovněž prahovou metodu – tedy hodnoty těchto veličin nad 80. percentil. .

Na základě časově měnícího se prahu se bude v této práci odhadovat standardizovaný index anomálie (SAI) pro odtok, srážky, potenciální evapotranspirace, půdní vlhkost a teplotu.

4.3. Vyhodnocení shody mezi pozorovanými a simulovanými daty

4.3.1. Rstudio a programovací jazyk R

Veškerá kvantitativní analýza byla provedena v programu R (R: A language and environment for statistical computing., 2017). R je prostředí a programovací jazyk pro zpracování statistických dat a jejich grafické zobrazení.

Je implementací programovacího jazyka S a má silnější objektově orientované programování než většina statistických programovacích jazyků. Funkce prostředí R se rozšiřují pomocí knihoven nebo taky balíčků (packages) vytvořených uživateli a obsahující různé funkce, které jsou využitelné v určitých oblastech studia.

Další silnou stránkou R je grafika, která umí produkovat grafy vhodné do vědeckých publikací zahrnující i matematické symboly. Taky je dostupná dynamická a interaktivní grafika prostřednictvím různých dalších balíčků.

Prostředí, ve kterém byla zpracována diplomová práce bylo Rstudio. RStudio je prostředí pro vývoj softwaru s otevřeným zdrojovým kódem pro programovací jazyk R, který je určen pro statistické zpracování dat a efektivní práci s grafikou.

4.3.2. Korelace

Kovariace je číselné vyjádření síly lineární závislosti mezi 2 kvantitativními znaky. Ve standardizované formě závislosti je to korelace. V mé práci mne zajímají standardizované hodnoty, proto jsou použity korelace.

Vzorec pro výpočet koeficientu korelací je následovný

$$R = \text{cor}(x, y) = \frac{S_{x,y}}{S_x S_y} \quad (2)$$

tj. podíl kovariace

$$S_{x,y} = \text{cov}(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3)$$

a součinu směrodatných odchylek $S_x S_y$ pozorovaných hodnot x a y .

Korelační koeficient může nabývat hodnot od -1 do 1 tj. $\text{cor}(x, y) \in (-1; 1)$

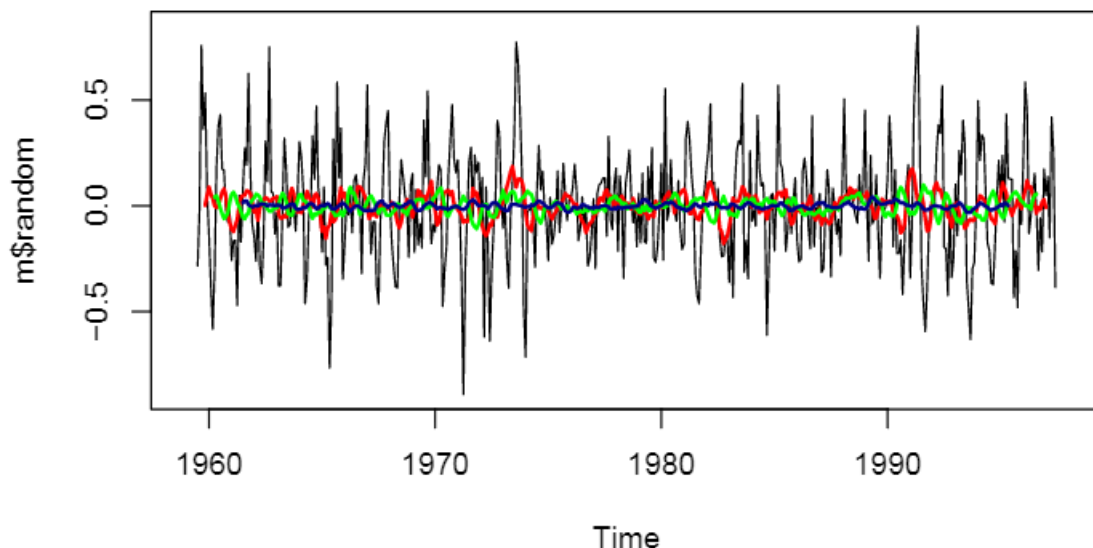
V programovacím kodu výpočet korelací byl realizován funkcí `cor`, kterou poskytuje balík „stats“.

```
cor(x, y = NULL, use = "everything", method = c("pearson",  
"kendall", "spearman"))
```

4.3.3. Klouzavý průměr

Je to skupina funkcí, jejichž hodnoty se v každém bodě definice rovnají průměrné hodnotě původní proměnné pro předchozí období, případně pro hodnoty z předem definovaného časového okna. Klouzavé průměry se obvykle používají s daty časových řad, aby se vyrovnaly krátkodobé výkyvy a stanovily se hlavní trendy nebo cykly.

V R prostředí se klouzavý průměr vypočítá pomocí funkcí `filter` nebo `rollmean`, kterou poskytuje balíček „zoo“ (Hanel, 2014). Pro znázornění vlivu různých časových kroků je uveden Graf klouzavých průměrů pro různé časové kroky.



Obrázek 4.3.3.1: Graf klouzavých průměrů pro různé časové kroky (Hanel, 2014)

4.3.4. Ggplot2

ggplot2 je systém vykreslování pro programovací jazyk R, založený na grafické gramatice. Ggplot se stará o všechny problematické podrobnosti (například kreslení legend) a také poskytuje výkonný model pro kreslení grafů, který zjednodušuje tvorbu složité vícevrstvé grafiky. (Wilkinson, 2006)

Vizualizace se skládá ze zobrazení datových komponent do vizuálních proměnných: rovinné souřadnice (xy), velikost, barva (odstín), nasycenost / průhlednost, textura, orientace a tvar.

Ggplot2 zvládá vykreslení jakýchkoliv grafů. V dané práci byl použit pro vykreslení časových řad, boxplotu a vykreslení statistických hodnot v mapě jako jsou například korelační mapy.

4.3.5. Box-plot graf

Box-plot nebo taky krabicový graf je grafickým znázorněním pětičíselné statistiky (Hanel, 2014).

Box plot je graf používaný v popisné statistice, kompaktně zobrazující jednorozměrné rozdělení pravděpodobnosti.

Tento typ schématu ve vhodné formě ukazuje median (nebo, pokud je to nutné, průměr), dolní a horní kvartil, minimální a maximální hodnoty vzorku (bez odlehlých hodnot). Několik takových krabic může být nakresleno vedle sebe, aby bylo možné vizuálně porovnat rozdělení více veličin. Tvar boxplotu umožňují určit stupeň rozptýlení (variabilitu) a asymetrie dat a identifikovat odchylky.

Jazyk programování R má funkci *boxplot* pro výpočet krabicových grafů

5. Výsledky a diskuze

První etapou vyhodnocení historických simulací globálních klimatických modelů je grafické znázornění časových řad hydroklimatických proměnných a dále jejich kvalitativní analýza. Taková analýza umožňuje na první pohled rychle a snadno pochopit, který model se lépe shoduje s naměřenými hodnotami, nadhodnocuje nebo je naopak podhodnocuje etc.

Grafy jsou vykresleny pouze pro odtok, půdní vlhkost, srážky, srážky agregované do tříměsíčního kroku, potenciální evapotranspirace a teplota. Popsány a rozebrány jsou primárně grafy pro odtok a půdní vlhkost, grafy ostatních proměnných jsou uvedeny pouze jako pomocný materiál a zdůvodnění pro chování výše zmíněných hydroklimatických veličin.

Dále je každý graf vykreslen pro historický a preindustriální koncentrační scénář. Oba scénáře jsou detailněji popsány v kapitole 3.2.

Doména modelu mHM (Evropa) byla rozdělena na Střední Evropu (CEU) a Středomoří (MED). Oblast MED je definována v souladu IPCC Special Report on Extremes a zbytek studované oblasti odpovídá oblasti CEU (s výjimkou Skandinávie a Britských ostrovů).



Obrázek 5.1.: Rozdělení Evropy na CEU a MED. Převzato u (Hanel, et al., 2018)

Všechny statistické parametry jsou odvozené pro oba regiony. První grafy znázorňuje střední hodnoty časových řad (me), 20% kvantil (q20) a Standard Anomaly Index (SAI) pro klouzáý průměr časové řady odtoku při použití preindustriálního scénáře.

Na Obrázku č. 5.2. jsou znázorněny grafy odtoku pro preindustriální koncentrační scénář se střední hodnotou modelů (první řádek), které se relativně dobře shodují s tvarem křivky časové řady historické (paleo-)rekonstrukce u CEU od roku 1850. Je ale zřejmé, že všechny modely podhodnocují rekonstrukci. Trend ve 20% kvantilu (q20) naznačuje použití časově proměnného prahu pro identifikaci událostí sucha. To odráží adaptabilitu regionu na měnící se podmínky klimatu (Hanel, et al., 2018). q20 kvantil

rekonstrukce (první sloupec, druhý řádek) je nejlépe popsán také od roku 1850 červenou čarou, což je GFDL-ESM2M model. U průběhu standardizovaného indexu anomálie (SAI) pro odtok dle simulací klimatických modelů není zřetelná shoda s RECON-hist pro oba regiony. Ve středomořském regionu rekonstrukce ukazuje rychlé navýšení závažnosti sucha za poslední dobu od roku 1970. 20% kvantil (druhý sloupec, druhý řádek) paleorekonstrukce ukazuje zvýšení (na grafu je otočena osa) odtoku z tohoto regionu. U střední hodnoty (me) pro MED jsou poměrně velké rozptyly a žádný model nezachycuje variabilitu střední hodnoty. Je patrné, že u obou, a obzvláště posledních 30-40 let dvacátého století, se střední hodnota klouzavého průměru odtoku zmenšila. Dynamika standardizovaných anomálií odtoku úzce souvisí s dynamikou srážek (grafy jsou uvedené v Příloze). Významný trend sucha je pozorován u odtoku v obou regionech.

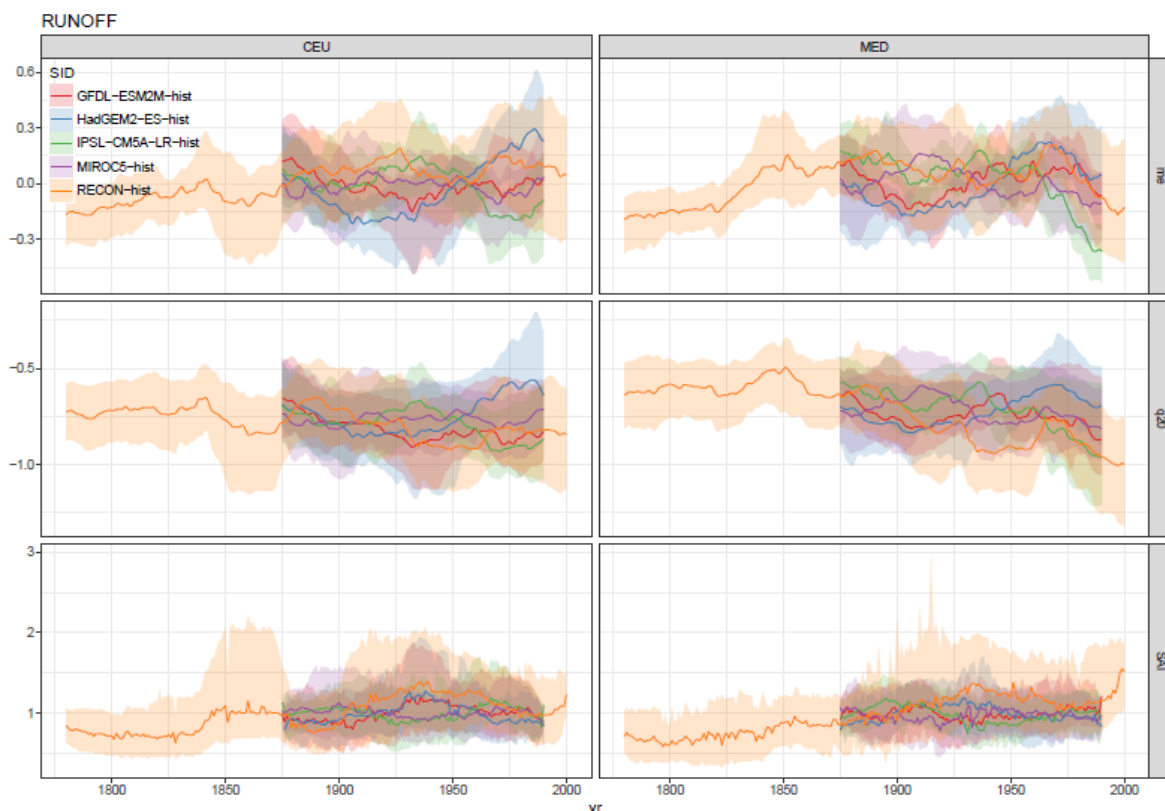
Na Obrázku č.5.3. jsou znázorněny průběhy charakteristik odtoku pro historický koncentrační scénář. Index SAI se nejlépe shoduje s čarou rekonstrukce modelu HadGEM-2 (modrá čára) u regionu CEU a MED. Křivky rekonstrukce me a q20 MED regionu stále stabilně podhodnocují simulační modely. Také u proměnných MED regionu je vidět, jak velký je pokles u střední hodnoty, výrazné zvětšení proměnného prahu a zvětšení nedostatkového objemu na konci sledovaného období. Což se dobře shoduje s grafy ostatních hydroklimatických parametrů, např. stejnou tendenci má průběh hodnot teploty (v Příloze), statistické hodnoty pro srážky se také zvětšují (v Příloze). Na základě toho, že hydroklimatické parametry jsou svázané mezi sebou, nám takové zdůvodnění ukazuje správnost tvrzení. Taky je třeba poznamenat, že simulační modely celkově podhodnocují odtok pro dva scénáře.

Na Obrázku č. 5.4 a Obrázku č. 5.5. jsou znázorněny průběhy charakteristik půdní vlhkosti.

Významný trend sucha je pozorován u půdní vlhkosti v obou regionech. Je vidět, jak index sucha výrazně roste od roku 1900 v regionu CEU i v regionu MED už od roku 1850. Dynamika středních hodnot u regionů má podobný charakter, avšak u Středomoří pokles střední hodnoty a růst q20 je výraznější a strmější. Modely alespoň z části zachycují rekonstrukce půdní vlhkosti u střední hodnoty a q20 u regionu CEU jen od roku 1900. Zbývající dobu a ostatní parametry čáry simulace modelů vůbec neodpovídají rekonstrukci. U historického koncentračního scénáře je ta shoda lepší: grafy střední hodnoty a q20 se nacházejí v rozmezí obálky čáry RECON. Dokonce i u regionu MED zelený model IPSL-CM5A-LR velmi dobře popisuje zmenšení u střední hodnoty a adaptační schopnost q20 v posledních letech. Trendy závažnosti sucha modely nezachytily. Nejsilnější klesající trend je zaznamenán u půdní vlhkosti, následované srážkami a teplotou (více Příloha), a nejméně v odtoku, a to jak v oblastech CEU, tak v oblasti MED.



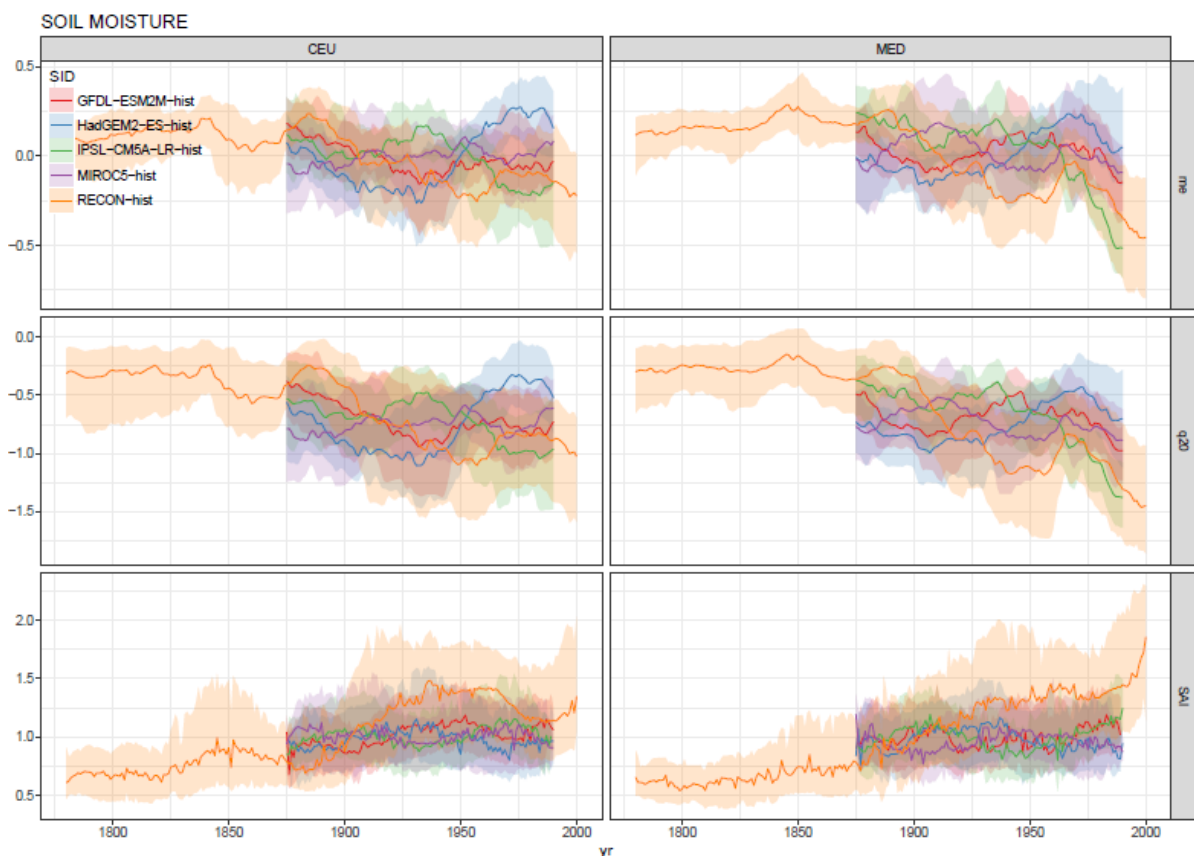
Obrázek 5.2: Odtok, přeindustriální scénář. Oranžově je označena historická rekonstrukce, se kterou srovnáme výstupy čtyř modelů. V řádcích je časová dynamika průměru třicetiletého klouzavého průměru proměnné (*me*, nahoře), 20% kvantilu (*q20*, uprostřed) a Index standardizované anomálie (*SAI*, dole) pro standartizované hodnoty odtoku. Hodnoty jsou zprůměrované podle rozdělení na CEU (vlevo) a MED (vpravo). Tlusté čáry odpovídají průměrným hodnotám a obálky zahrnují do 95% hodnoty buněk mřížky pro každou oblast.



Obrázek 4.3: Odtok, historický scénář Oranžově je označena historická rekonstrukce, se kterou srovnáme výstupy čtyř modelů. V řádcích je časová dynamika průměru třicetiletého klouzavého průměru proměnné (me, nahoře), 20% kvantilu (q20, uprostřed) a Index standardizované anomálie (SAI, dole) pro standartizované hodnoty odtoku. Hodnoty jsou zprůměrované podle rozdělení na CEU (vlevo) a MED (vpravo). Tlusté čáry odpovídají průměrným hodnotám a obálky zahrnují do 95% hodnoty buněk mřížky pro každou oblast.



Obrázek 4.4.: Půdní vlhkost, přeindustriální scénář . Oranžově je označena historická rekonstrukce, se kterou srovnáme výstupy čtyř modelů. V řádcích je časová dynamika průměru třicetiletého klouzavého průměru proměnné (*me*, nahoře), 20% kvantilu (*q20*, uprostřed) a Index standardizované anomálie (*SAI*, dole) pro standartizované hodnoty odtoku. Hodnoty jsou zprůměrované podle rozdělení na CEU (vlevo) a MED (vpravo). Tlusté čáry odpovídají průměrným hodnotám a obálky zahrnují do 95% hodnoty buněk mřížky pro každou oblast.



Obrázek 4.5.: Půdní vlhkost, historický scénář. Oranžově je označena historická rekonstrukce, se kterou srovnáme výstupy čtyř modelů. V řádcích je časová dynamika průměru třicetiletého klouzavého průměru proměnné (me, nahoře), 20% kvantilu (q20, uprostřed) a Index standardizované anomálie (SAI, dole) pro standartizované hodnoty odtoku. Hodnoty jsou zprůměrovány podle rozdělení na CEU (vlevo) a MED (vpravo). Tlusté čáry odpovídají průměrným hodnotám a obálky zahrnují do 95% hodnoty buněk mřížky pro každou oblast.

Na základě všech zpracovaných grafů časových řad lze dospět k závěru, že globální klimatické modely nejlépe popisují rekonstrukce pro historický koncentrační scénář. Z toho lze předpokládat, že nelze zanedbávat nebo podhodnocovat vliv antropogenní činnosti, zde v podobě koncentraci CO₂. Je vidět, jak rozlišné jsou výsledky při použití jednotlivých scénářů (historické vs. piControl).

Také značný pokles vlhkosti půdy během 20. století je pravděpodobně odrazem změny klimatu v tomto období, což vedlo ke zvýšení evaporace a ke snížení půdní vlhkosti (Hanel, et al., 2018).

Dále jsou uvedeny mapy prostorového rozdílu na území EU, které znázorňují rozdíl mezi středními hodnotami RECON a simulacemi modelů. Tyto mapy ukazují relativní odchylku, maximální nadhodnocení je modrá barva na mapě, maximální podhodnocení hnědá barva, v případě nejlepší shody má gridbox (mřížka) bílou barvu.

Takové znázornění dává možnost vyhodnocení hydroklimatických charakteristik s ohledem na jednotlivá území. Na začátku byla vytvořena tabulka s výpočtem relativních prostorových rozdílů (dif).

Tabulka 5.1.: Tabulka pro výpočet map prostových rozdílů

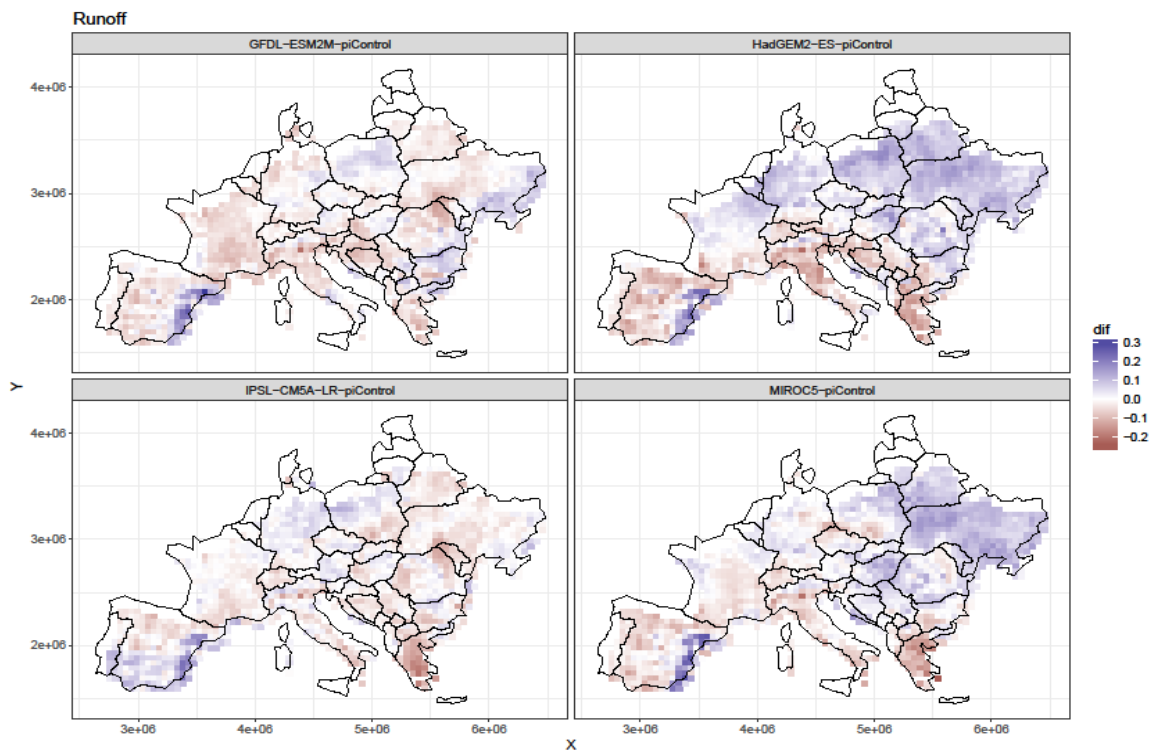
var	y	x	REG	variable	SID	dif	X	Y	
1:	p	39	2	MED	SAI	GFDL-ESM2M-piControl	0.01988395	2756369	1930347
2:	p	40	2	MED	SAI	GFDL-ESM2M-piControl	0.03586836	2756369	1882347
3:	p	41	2	MED	SAI	GFDL-ESM2M-piControl	0.03599179	2756369	1834347
4:	p	42	2	MED	SAI	GFDL-ESM2M-piControl	0.03021429	2756369	1786347
5:	p	44	2	MED	SAI	GFDL-ESM2M-piControl	0.03230520	2756369	1690347

116620:	p3	12	79	CEU	q80	MIROC5-piControl	-0.05452510	6452369	3226347
116621:	p3	13	79	CEU	q80	MIROC5-piControl	-0.06688062	6452369	3178347
116622:	p3	14	79	CEU	q80	MIROC5-piControl	-0.03886245	6452369	3130347
116623:	p3	15	79	CEU	q80	MIROC5-piControl	-0.01288200	6452369	3082347
116624:	p3	14	80	CEU	q80	MIROC5-piControl	-0.03104504	NA	3130347

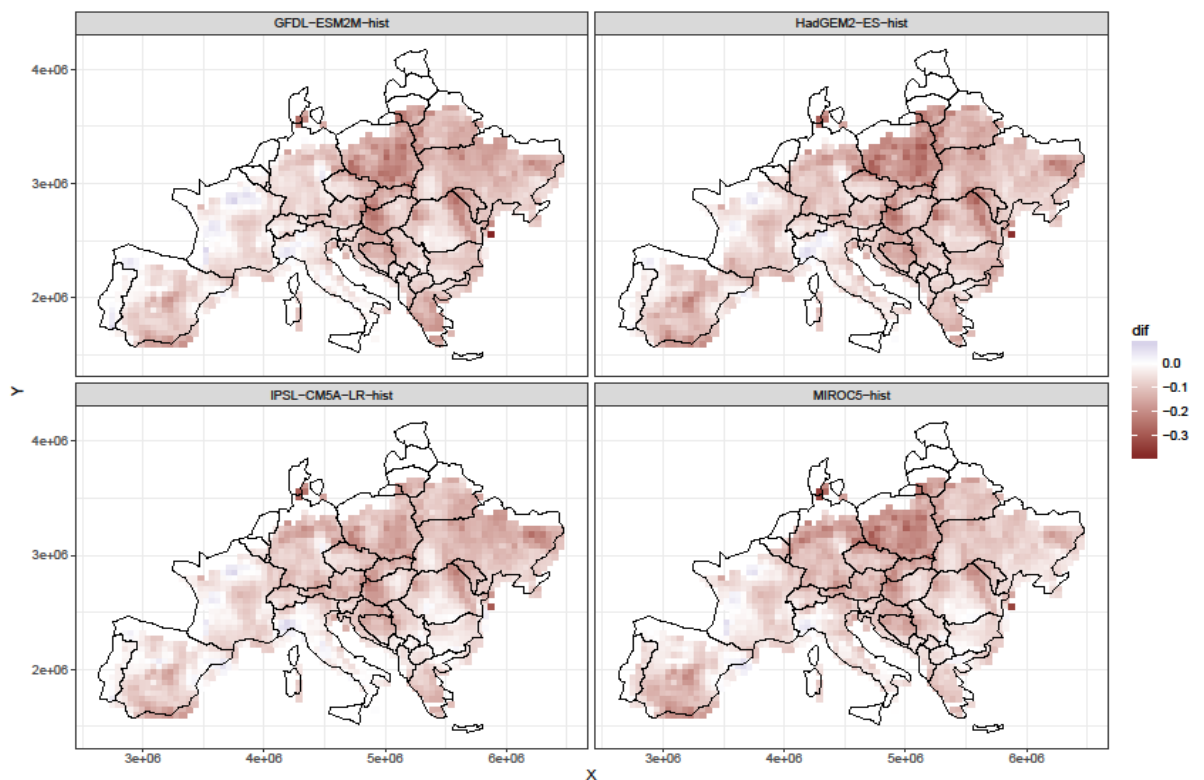
První popsaná hydroklimatická charakteristika je odtok – Obrázek č. 5.6. a Obrázek č. 5.7. Je vidět, že při simulaci pro historický scénář je velké podhodnocení - celá mapa je téměř hnědá. Nejvýraznější negativní systematická chyba je na území Polska a Rakouska.

Nejmenší hodnoty rozdílů jsou patrné na mapě pro preindustriální scénář, kde jsou patrné relativně malé chyby v oblasti jiho-východu Španělska a celého Řecka.

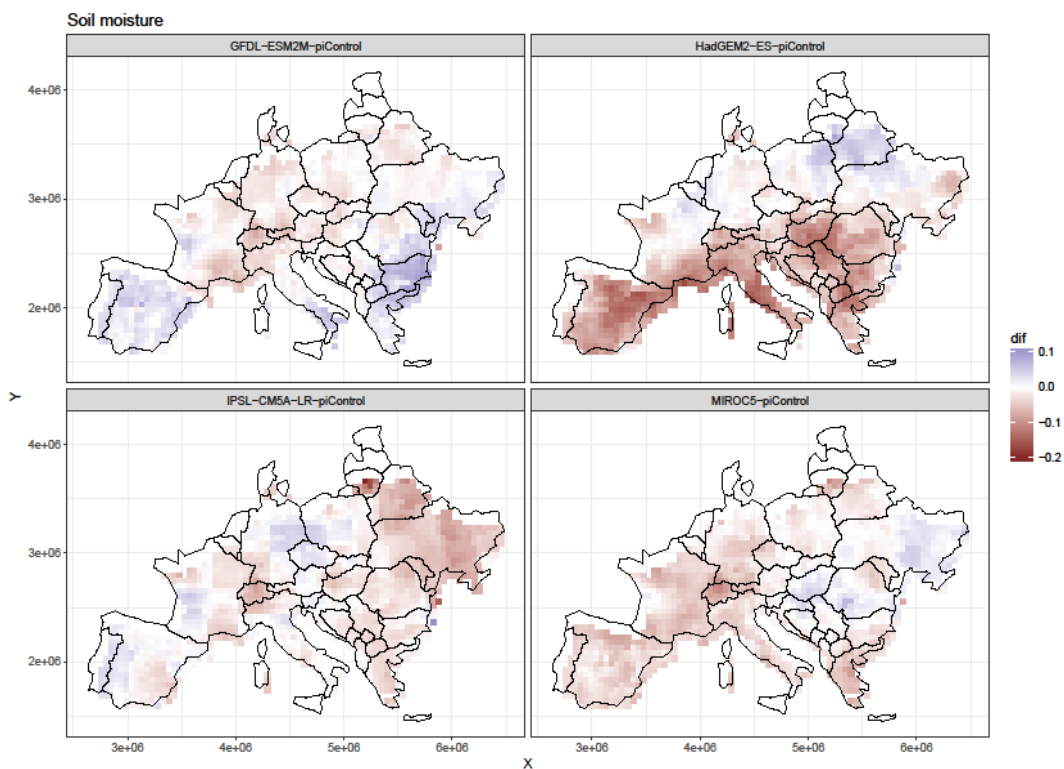
Další mapa je mapa odchylek v simulaci půdní vlhkosti- Obrázek č. 5.8. a Obrázek č. 4.9. Pro historický scénář (Obrázek č. 4.9) všechny modely vykazují pozitivní systematické chyby (modely nadhodnocují půdní vlhkosti), s výjimkou pro Polsko, Německo, Rakousko, a pro model MIROC5 i pro Česko, kde jsou relativní chyby negativní. Západ Španělska, Bulharsko, Rumunsko a sever Řecka mají sytější modrou barvu. Obrázek č. 5.8. pro preindustriální scénář je pestřejší situace. U modelu HadGEM2-ES je výrazně podhodnocen region Středomoří, rozdíl mezi simulovanou střední hodnotou a rekonstruovanou půdní vlhkostí dosahuje až -0,2. Celkově se dá říct, že modely nezachycují průměr v čase a také ani v prostorovém rozlišení u historického scénáře. Mapy rozdílů ostatních charakteristik jsou představené v Příloze.



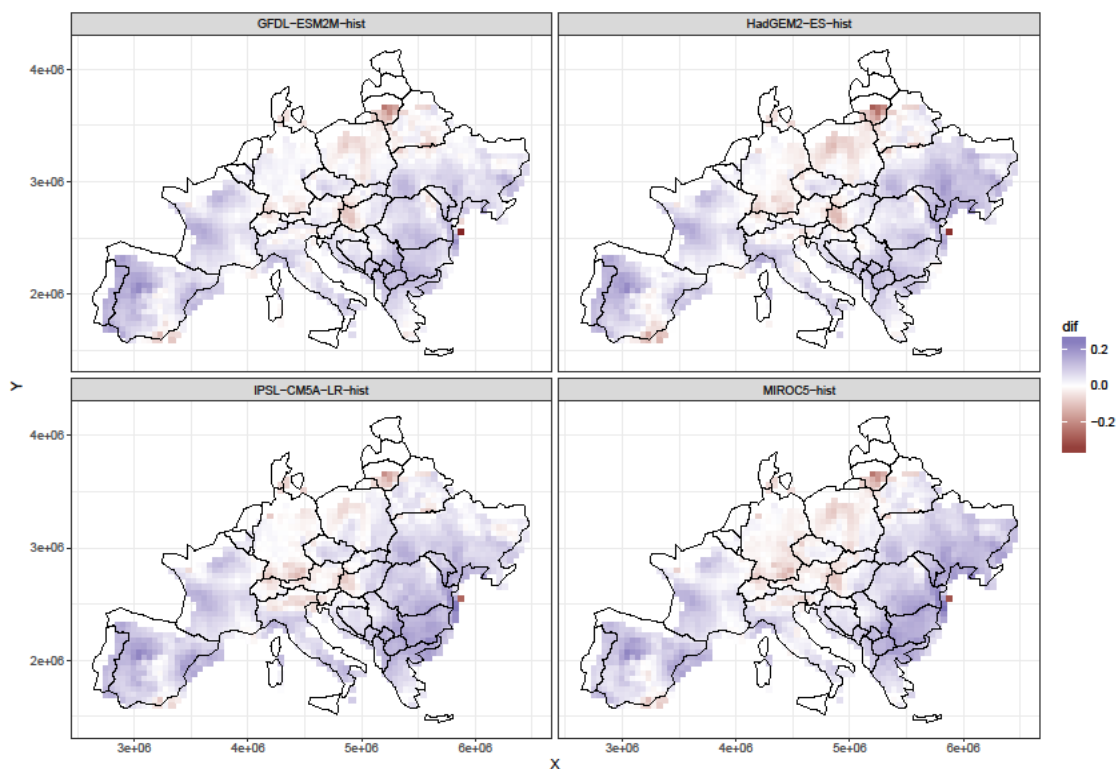
Obrázek 5.6.: Mapy rozdílů středních hodnot odtoků z rekonstrukce a nasimulovaných hodnot odtoku různých modelů pro přeindustriální scénář



Obrázek 5.7.: Mapy rozdílů středních hodnot odtoků z rekonstrukce a nasimulovaných hodnot odtoku různých modelů pro historický scénář



Obrázek 5.8.: Mapy rozdílů středních hodnot půdní vlhkosti z rekonstrukce a nasimulovaných hodnot půdní vlhkosti různých modelů , přeindustriální scénář



Obrázek 5.9.: Mapy rozdílů středních hodnot půdní vlhkosti z rekonstrukce a nasimulovaných hodnot půdní vlhkosti různých modelů , historický scénář.

Dalším krokem vyhodnocení byl výpočet prostorové korelace simulace hydroklimatických proměnných modelů a rekonstrukce pro Střední Evropu (CEU) a

Středomoří (MED). . boxplot znázorňuje charakteristiky všech modelů pro proměnnou a tím dovoluje snadně stanovit, který model koreluje, s jakým paramentrem.

Tabulka 5.2.: Tabulka pro výpočet korelačních map a box-plot grafů.

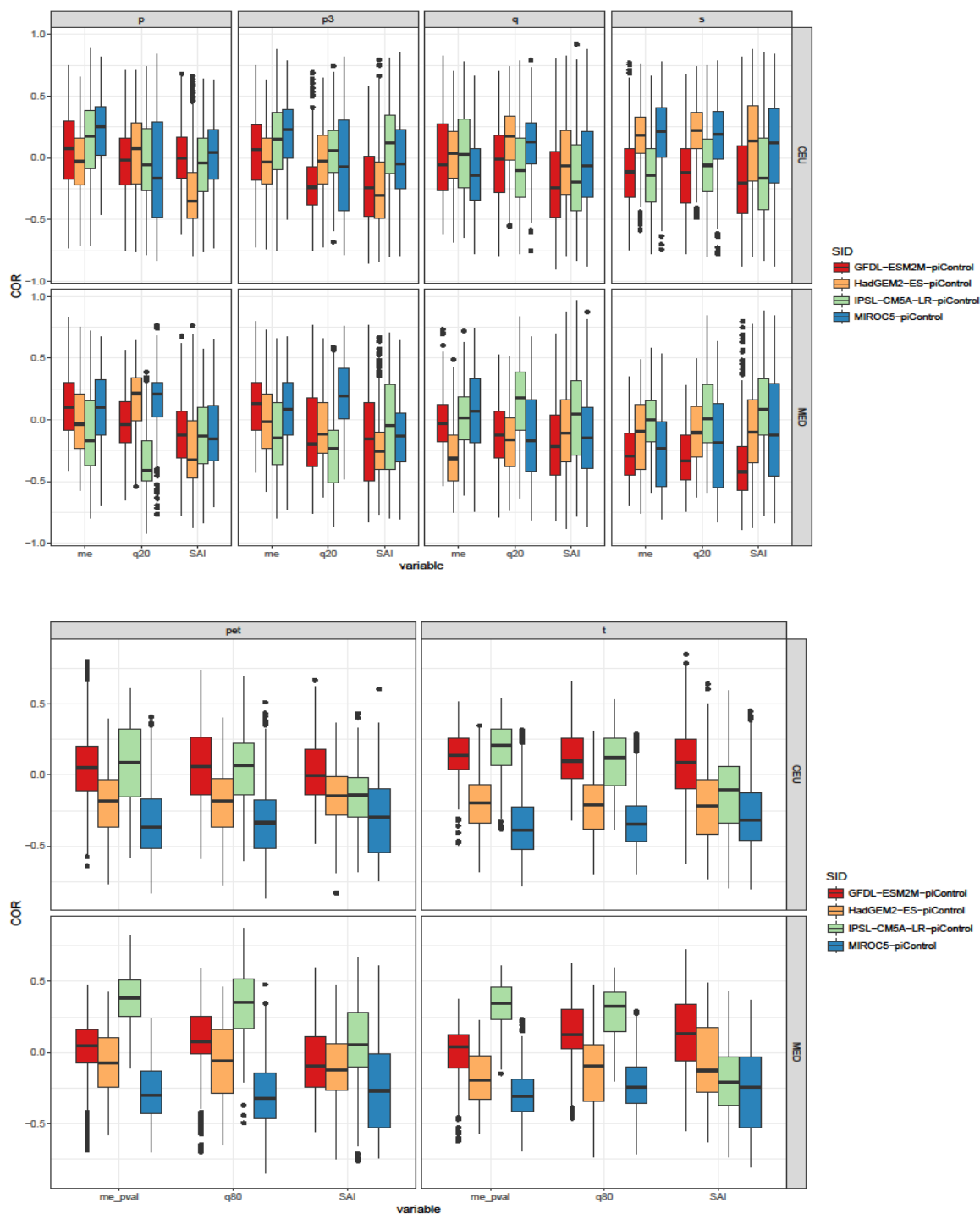
var	y	x	REG	variable	SID	COR	X	Y
1:	p 45	8	MED	SAI GFDL-ESM2M-piControl	0.267897065	3044369	1642347	
2:	p 46	8	MED	SAI GFDL-ESM2M-piControl	0.240332781	3044369	1594347	
3:	p 47	12	MED	SAI GFDL-ESM2M-piControl	0.286508000	3236369	NA	
4:	p 33	13	MED	SAI GFDL-ESM2M-piControl	0.090650360	3284369	2218347	
5:	p 36	13	MED	SAI GFDL-ESM2M-piControl	0.054614392	3284369	2074347	
120380:	p3 12	79	CEU	q80 MIROC5-piControl	-0.014909534	6452369	3226347	
120381:	p3 13	79	CEU	q80 MIROC5-piControl	0.064057726	6452369	3178347	
120382:	p3 14	79	CEU	q80 MIROC5-piControl	0.007497921	6452369	3130347	
120383:	p3 15	79	CEU	q80 MIROC5-piControl	0.007669518	6452369	3082347	
120384:	p3 14	80	CEU	q80 MIROC5-piControl	0.250061503	NA	3130347	

Obrázek č.5.10 je pro preindustriální scénář. Pro regiony Střední Evropy se srážkami rekonstrukce nejlépe korelují výstupy z MIROC5 modelu (modře), avšak u parametru q20 korelace nabývá hodnot (-0,5;0,25). U odtoku a půdní vlhkosti nejlépe koreluje „oranžový“ HadGEM2-ES model. Na dalším grafu teplotu a potenciální evapotranspirace jednoznačně lépe popisuje GFDL-ESM2M model (červená). Všechny box-ploty těchto modelů, které nejlépe korelují s rekonstrukcí, se nacházejí v rozmezí od 0 do 0,5, což není ideální situace.

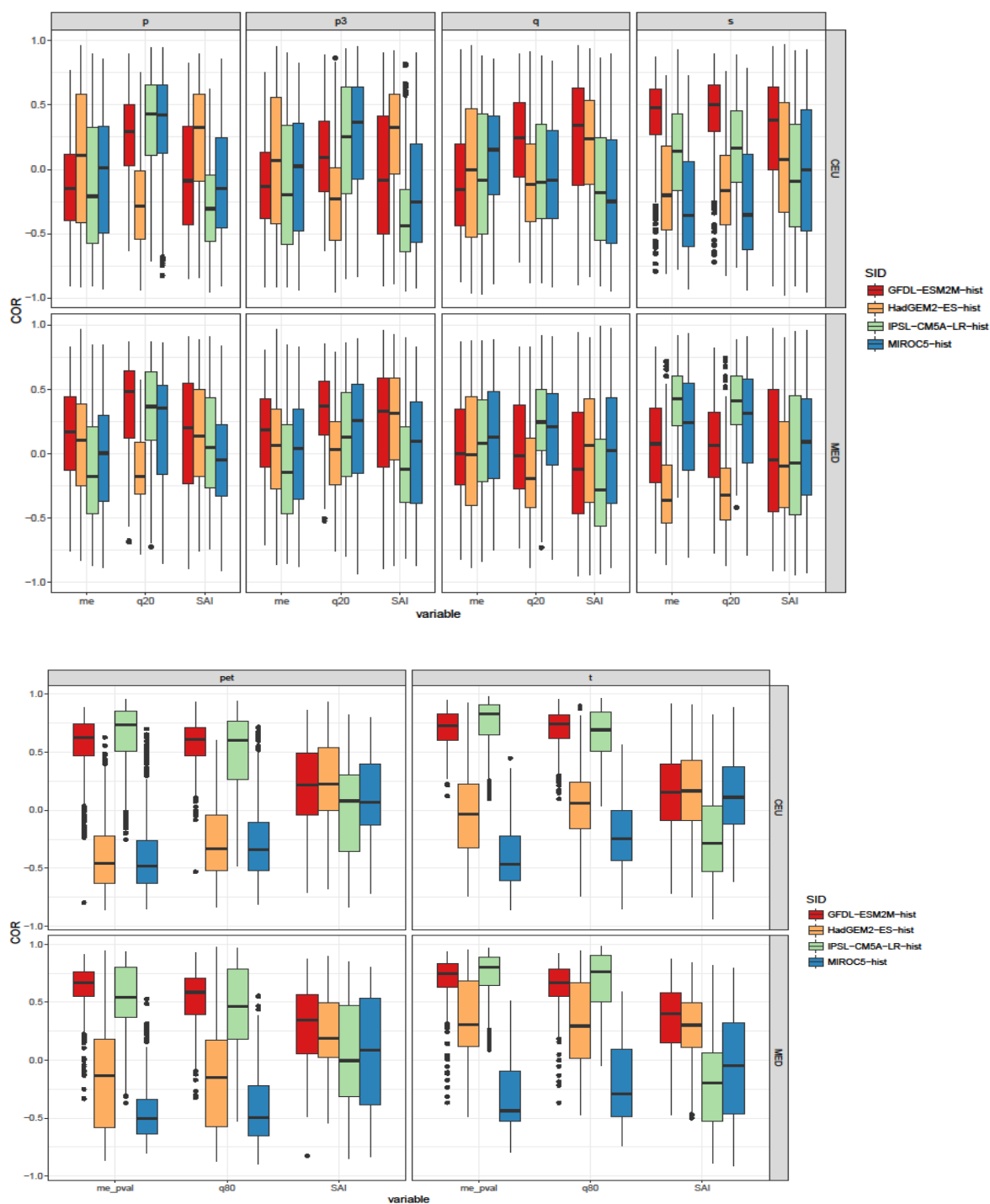
U regionu MED pro preindustriální scénář srážek, také nejlépe popisuje model MIROC5, ale u charakteristik půdní vlhkosti a odtoku je to IPSL-CM5A-LR model (zelená). U teploty a potenciální evapotranspirace je nejlepší korelace u modelu IPSL-CM5A-LR a je patrné, že u statistických parametrů střední hodnoty a q80 thresholdu box-plot znázorňuje relativně dobrou korelaci.

Dá se říct, že pro popis srážek je nejvhodnější model MIROC5, a pro teploty a potenciální evapotranspirace je nejlepší model IPSL-CM5A-LR u MED a GFDL-ESM2M u CEU regionu pro preindustriální scénář.

Pro historický scénář Obrázek č.5.11. jsou docela odlišné výsledky. Korelace u srážek, tří měsíčních srážek, odtoku a půdní vlhkosti mají velký rozsah v rozmezí od -0,5 do 0,5. Ale u teploty a potenciální evapotranspirace jsou viditelné velmi dobré výsledky u GFDL-ESM2M modelu (červeně), u parametru střední hodnoty a 80% kvantilu je box-plot v rozmezí od 0,5 až 0,8. U SAI boxplot ukazuje sice větší rozptyl, ale stále pozitivní hodnoty. Pro kontrolu provedeme srovnání zpětně časové řady. Tvzení o špatné korelaci srážek, tří měsíčních srážek, odtoku a půdní vlhkosti, potvrzují grafy časových řad.



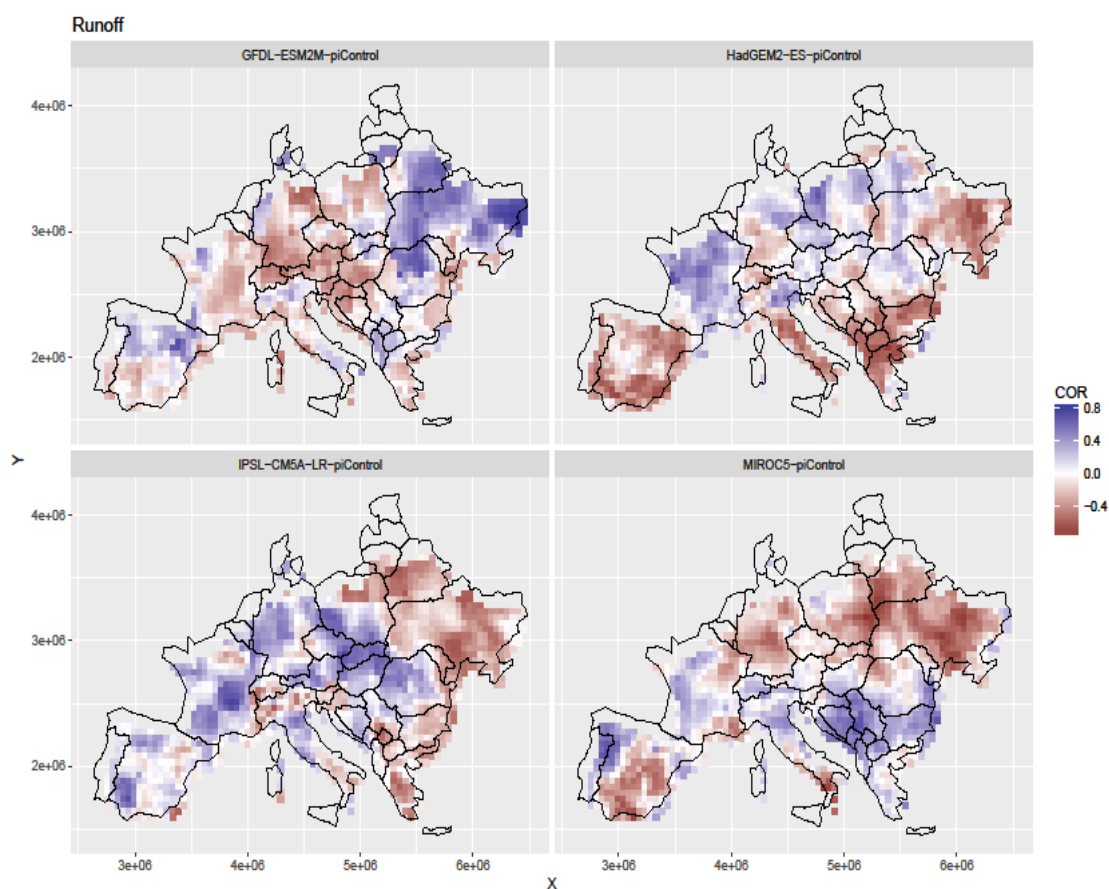
Obrázek 5.10.: Box-plot grafy odtoků (q), teplot (t), půdní vlhkosti (s), srážek (p), tří měsíční srážky ($p3$), potenciální evapotranspirace (pet) pro přeindustriální scénář. V řádcích jsou zobrazeny regiony, ve sloupcích hydroklimatické proměnné a horizontální osa je rozdělena na statistické proměnné. Zkratka SID znamená simulační modely.



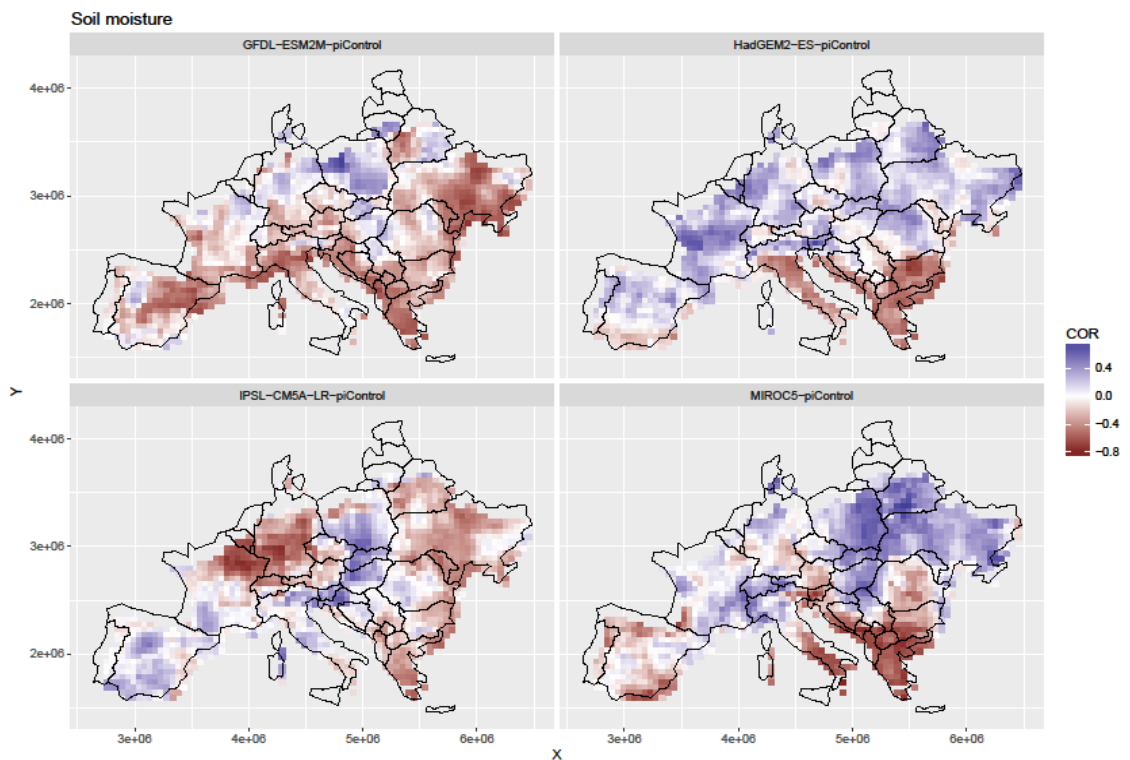
Obrázek 5.11.: Box-plot grafy odtoků (q), teplot (t), půdní vlhkosti (s), srážek (p), tří měsíční srážky ($p3$), potenciální evapotranspirace (pet) pro historický scénář. V řádcích jsou zobrazeny regiony, ve sloupcích hydroklimatické proměnné a horizontální osa je rozdělena na statistické proměnné. Zkratka SID znamená simulační modely.

Pro znázornění prostorového uspořádání korelační závislosti průměrů hydroklimatických proměnných jsou dále představeny korelační mapy Evropy. Grafy ukazují pestrá prostorová variabilita. Na Obrázku 5.12. a Obrázku 5.13. jsou představené odtok a půdní vlhkost pro preindustriální scénář. GFDL-ESM2M model má dobrou korelaci odtoku s rekonstrukcí jen na území Běloruska, Litvy a Ukrajiny, ale půdní vlhkost vůbec nekoreluje. IPSL-CM5A-LR model ukazuje zrcadlové výsledky oproti GFDL-ESM2M model u odtoku a špatnou korelaci u půdní vlhkosti. HadGEM2-ES model dobře koreluje pro region CEU, a to je vidět z mapy odtoku i půdní vlhkosti. MIROC5 model u odtoku má dobrou korelaci u MED regionu (výjimka je Španělsko), ale u půdní vlhkosti má špatnou korelaci se stejným regionem.

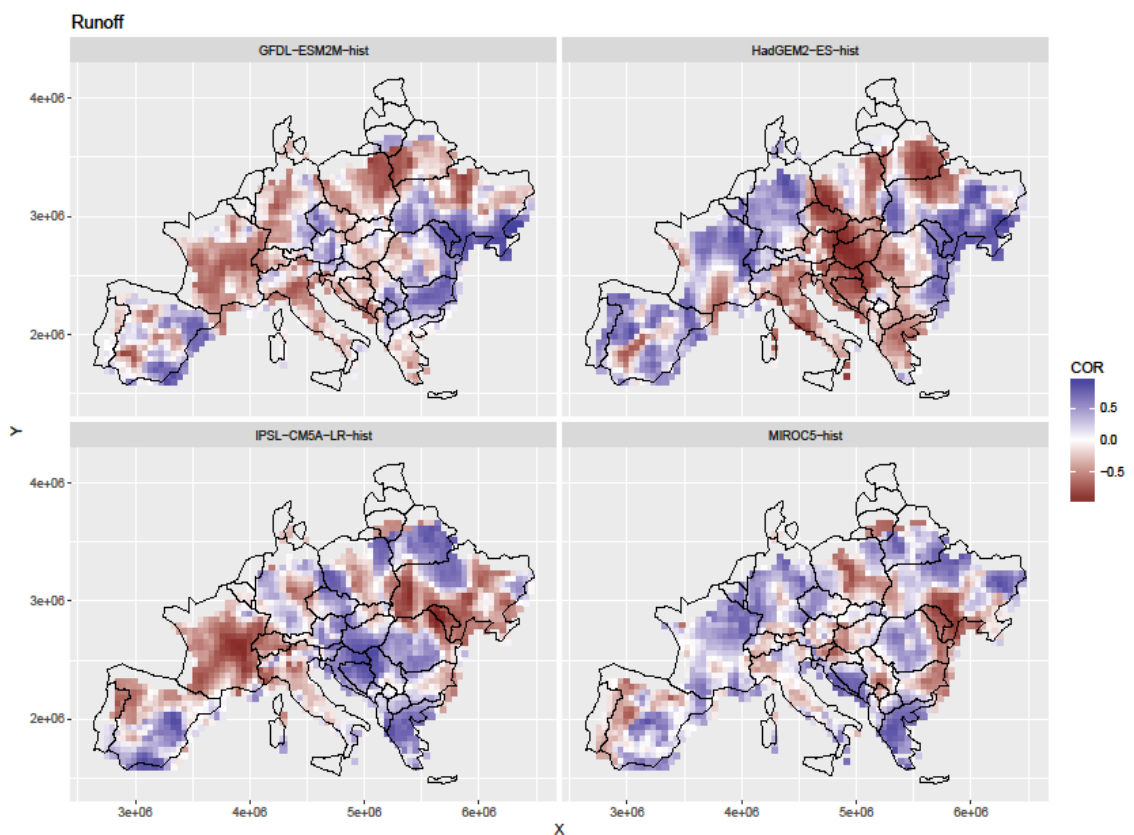
Na Obrázek 5.14. a Obrázek 5.15 jsou znázorněny korelační mapy odtoku a půdní vlhkosti pro historický koncentrační scénář. Korelační mapy pro odtok těžko nějakým způsobem vyhodnotit, protože prostorová korelace se významně mění dokonce v rámci jedné země. Půdní vlhkost rekonstrukce koreluje se simulací GFDL-ESM2M a IPSL-CM5A-LR modelů nejlépe.



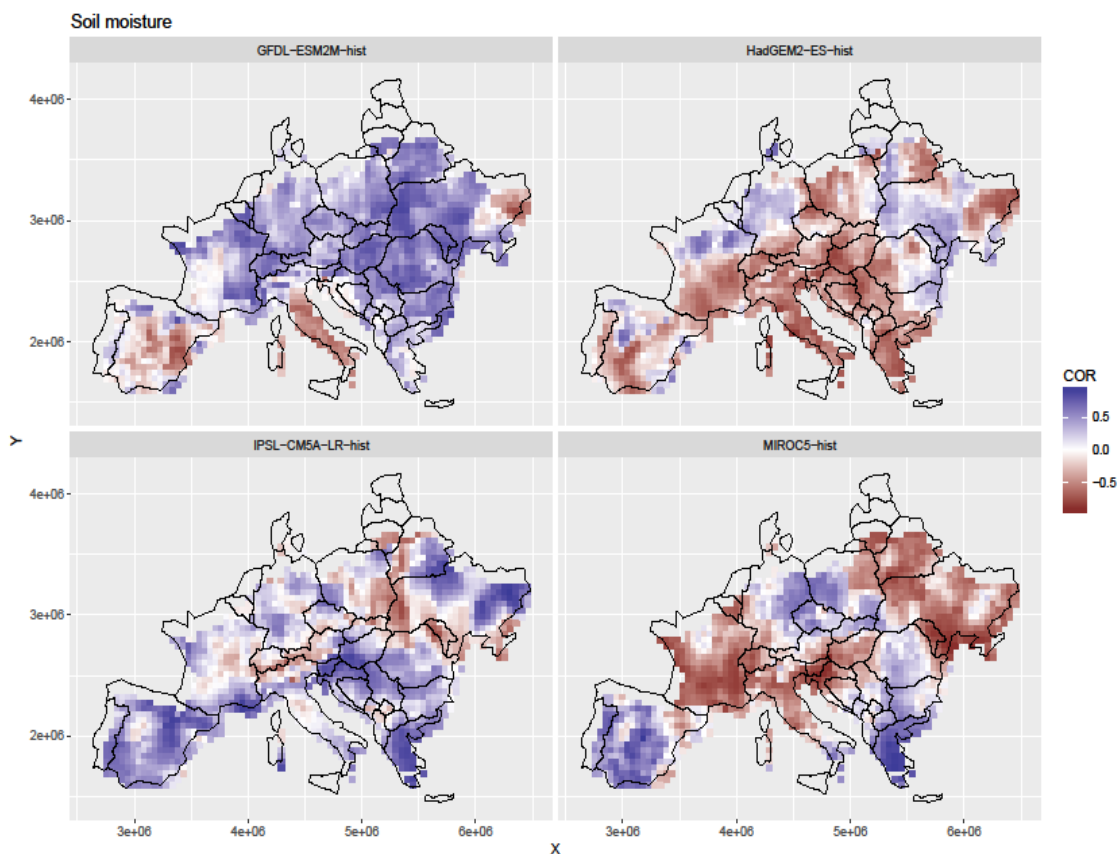
Obrázek 5.12.:Korelační mapa odtoků pro 4 klimatické modely, preindustriální scénář



Obrázek 5.13.: Korelační mapa půdní vlhkosti pro 4 klimatické modely pro preindustriální scénář.



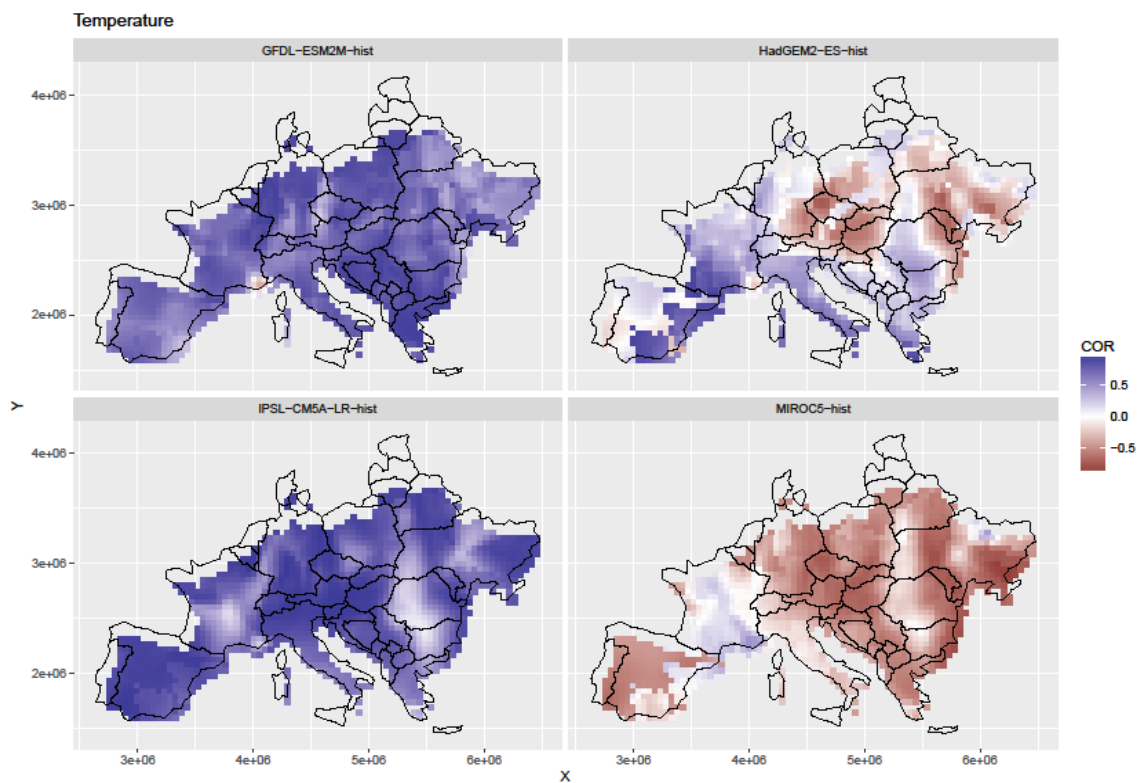
Obrázek 5.14.: Korelační mapa odtoků pro 4 klimatické modely pro historický scénář



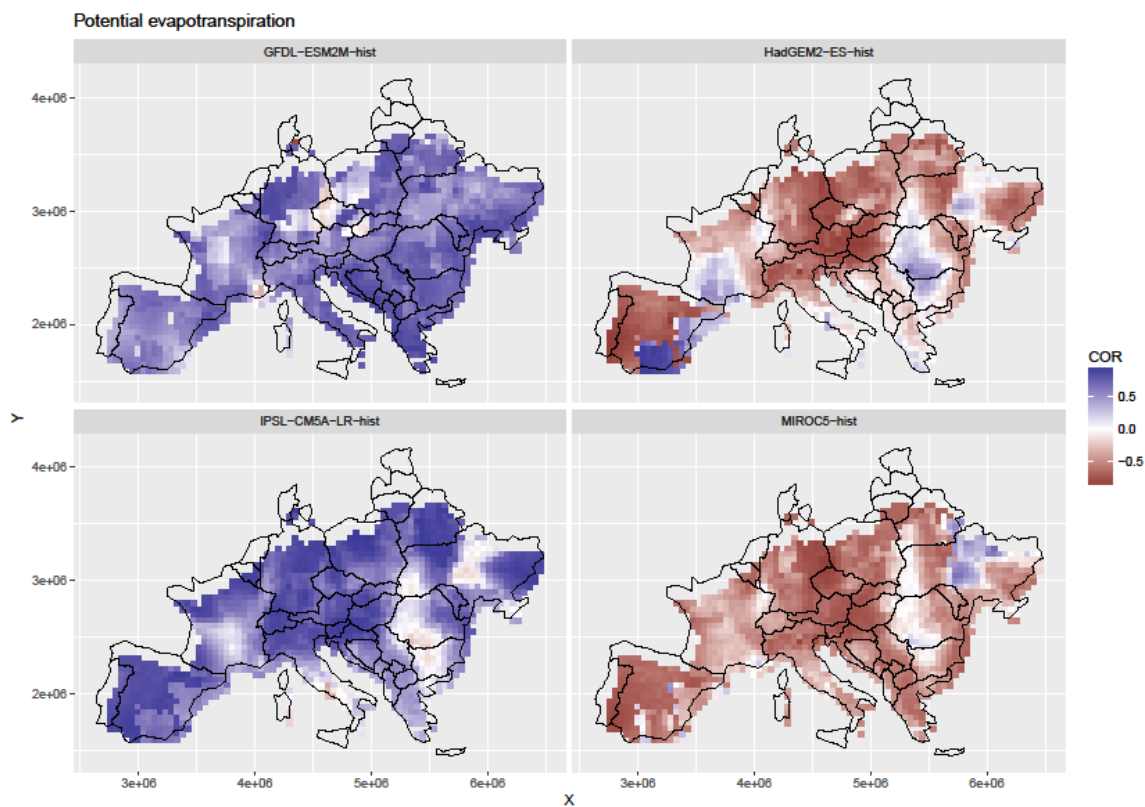
Obrázek 5.15.: Korelační mapa půdní vlhkosti pro 4 klimatické modely pro historický scénář

Oproti mapám korelace pro pozorované indexy, prostorové korelace pro teploty a potenciální evapotranspiraci vycházejí mnohem stabilněji a lépe. Zde se dá jednoznačně konstatovat, že pro účely popisu historických teplot a potenciální evapotranspirace jsou nejvhodnější modely GFDL-ESM2M (korelační koeficient nabývá hodnot (0; 0,8)) a IPSL-CM5A-LR (korelační koeficient nabývá hodnot (0,3; 0,8)). Což odpovídá výsledkům na Obrázek 5.11

Zajímavý fakt je ten, že model HadGEM2-ES popisuje relativně dobře teplotu a PET v jižním Španělsku.



Obrázek 5.16.: Korelační mapa teploty pro různé simulační modely, historický scénář



Obrázek 5.17.: Korelační mapa potenciální evapotranspiraci pro různé simulační modely pro historický scénář

6. Závěr

V této diplomové práci byla hlavní pozornost věnována základním charakteristikám z hlediska vývoje dlouhodobých průměrů a variability. Uvažovány jsou standardní hydrologické a meteorologické indexy sucha. Bylo provedeno vyhodnocení a porovnání (paleo-)rekonstrukcí (RECON-hist) simulací čtyř globálních klimatických modelů (GFDL-ESM2M, HadGEM-2, IPSL-CM5A-LR, MIROC5) z hlediska simulace půdní vlhkosti a odtoku hydrologickým modelem mHM (mesoscale Hydrological Model) pro území Evropy (kromě Skandinávie a Britských ostrovů) za období 1766-2015.

S využitím programovacího jazyka R byla zpracována následující data pro Evropu:

- historické simulace globálních klimatických modelů,
- (paleo-)rekonstrukce klimatu,
- simulace mHM modelu.

Pro jednotlivé výpočetní body (mřížka 50 km × 50 km) mHM modelu byly z časových řad posuzovaných hydroklimatických veličin (teplota, potenciální evapotranspirace, srážky, odtok, půdní vlhkost) vypočteny indikátory sucha, vybrané kvantily, ukazatele variability apod.) a bylo provedeno porovnání se simulací mHM založenou na historicky rekonstruovaných časových řadách.

První etapou této práce bylo vyhodnocení historických simulací globálních klimatických modelů bylo grafické znázornění časových řad statistických hodnot hydroklimatických proměnných a jejich vizuální analýza. Vizuální analýza umožnila rychle a snadno ukázat, který model se shoduje nebo neshoduje s rekonstruovanými hodnotami. Ale jednoznačná odpověď nebyla nalezena, protože jen některé statistické indexy každého simulačního modelu se shodují se statistickými proměnnými rekonstrukce buď na jednotlivých časových úsecích, nebo se neshodují vůbec. Ve většině případů se simulované časové průběhy nacházejí v rozmezí obálky čáry rekonstrukce a jen v polovině případů zachycují jen do obálky trendy pozorovaných indexů. Lepší shoda byla u časových řad pro historický koncentrační scénář než pro přeindustriální, což je zřejmé a ukazuje správnost výpočtů. Taky je třeba poznamenat, že klimatické modely celkově podhodnocují odtok pro dva scénáře. Na základě vizuální analýzy časových řad, se celkově dá udělat závěr, že vybrané globální klimatické modely nejsou schopny ve většině případů zachytit trend zkoumaného indexu hodnot historické rekonstrukce.

Dálší etapou bylo zpracování a vykreslení mapy rozdílů na území Evropy, které znázorňuje rozdíl mezi středními hodnotami rekonstrukce a simulacemi modelů. Tyto mapy ukazují systematickou chybu - nadhodnocení anebopodhodnocení v simulacích klimatických modelů. Při použití v simulacích historického scénáře je zřejmé, že klimatické modely podhodnocují odtoky a nadhodnocují půdní vlhkost pro oba regiony střední Evropy (CEU) a Středomoří (MED). GFDL-ESM2M a IPSL-CM5A-LR modely mají malé hodnoty rozdílů při uvážení preindustriálního scénáře (největších rozdílů nabývají na jihu Španělska). HadGEM-2 model má bezvýznamné rozdílů pro

CEU region a velké pro MED region, proto tento model může být použit pro popis střední Evropy.

Dalším krokem vyhodnocení byl výpočet prostorové korelace simulací hydroklimatických proměnných modelů a rekonstrukce. Následovné znázornění výsledků bylo provedeno pomocí korelačních map a box-plot grafů korelaci statistických indexů. Z grafů je vidět, že odtok a půdní vlhkost rekonstrukce v CEU regionu nejlépe koreluje s Had-GEM2-ES modelem, ale v MED je to IPSL-CM5A-LR pro preindustriální scénář. Pro historický scénář je to stejný model v MED, ale v CEU regionu je to GFDL-ESM2M pro odtok i půdní vlhkosti. Jednoznačně nejlepší výsledek korelace nabývá model GFDL-ESM2M u teploty a potenciální evapotranspirace pro oba regiony při historickém scénáři a koreluje s relativně malým rozptylem ve srovnání s ostatními korelacemi od 0,5 až do 0,8. Pro CEU region při použití preindustriálního scénáře stejný model koreluje nejlépe. Na základě analýzy všech korelačních map a box-plot korelace, lze tvrdit, že nejlepší model pro popis teploty, potenciální evapotranspirace, odtoku a půdní vlhkosti pro historický scénář v CEU regionu je GFDL-ESM2M model; Pro preindustriální scénář a MED regionu to je IPSL-CM5A-LR model.

Kvůli velice rozsahlým časovým a prostorovým datům, nejistotě v projekcích a velkému množství proměnných a indexů není možné udělat jednoznačný závěr této práce. Jedním z výsledků diplomové práce je, že máme velkou a názornou databázi průběhu indexů sucha řady grafů a velkého množství map jednotlivých proměnných a hydrologických a meteorologických indexů sucha, kterou snadno lze využít pro řešení konkrétních hydroklimatických otázek v různých zemích Evropy.

7. Seznam literatury

1. National Ocean Service, 2017. <https://celebrating200years.noaa.gov/about.html>. [Online]
Available at: https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/ [Přístup získán 12 04 2018].
2. Wilkinson, L., 2006. The grammar of graphics.. *Springer Science & Business Media*..
3. Casty, C., D. Handorf & M. Sempf, 2005. Combined winter climate regimes over the North Atlantic/European. *Combined winter climate regimes over the North Atlantic/European*, p. 5.
4. Dymnikov, V., 2005. Modelling climate change.
5. Gupta, H., Kling, H. & Yilmaz, K. K., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal Hydrology*.
6. Hanel, M., 2014. *Metody vyhodnocování vodohospodářských dat*. Praha: autor neznámý
7. Hanel, M. a další, 2014. *Vyhodnocení možných dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství a při plánování v oblasti vod. Certifikovaná metodika*.. Praha: VÚV T.G.Masaryka.
8. Hanel, M. a další, 2018. Revisiting the recent European droughts from a long-term perspective.
9. Hanel, M. & Vizina, A., 2014. *Hydrologické změny modelování dopadů klimatické změny*. Praha.
10. Hisdal, H. & Tallaksen, L., 2000. *Drought Event Definition. Technical Report to the ARIDE project No.6.*. Oslo, Norway: Department of Geophysics, University of Oslo.
11. Ionita, M., 2017. The European 2015 drought from a climatological perspective. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, p. 1397–1419.
12. Keith, B., 2001. *Rainfall-Runoff Modelling*. UK: Lancaster University.
13. Kumar, R., Samaniego, L. & Attinger, S., 2013. Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations. *Water Resour. Res.*
14. Mishra, A. & Singh, V., 2010. A review of drought concepts.
15. Nakicenovic, N. & Swart, R., 2000. *Emissions Scenarios*. UK: Cambridge University Press.
16. National Centers for Environmental Information (NCEI), nedatováno *What Are "Proxy" Data?*. [Online]
Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/news/what-are-proxy-data> [Přístup získán 17 4 2018].
17. Ostberg, S., Murakami, D., Lange, S. & Frieler, K., 2017. Assessing the impacts of 1.5 °C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). *Geosci. Model Dev.*
18. Potsdam Institute for Climate Impact Research, nedatováno *About ISIMIP*. [Online]
Available at: <https://www.isimip.org/about/#simulation-rounds> [Přístup získán 05 04 2018].
19. R: A language and environment for statistical computing., 2017. *R: A language and environment for statistical computing*.. Vienna, Austria.: <https://www.R-project.org/>.

20. Rakovec, O., 2016. *mHM Newsletter*. [Online]
Available at: <http://www.ufz.de/index.php?en=40779&nopagecache>
[Přístup získán 19 03 2018].
21. Rakovec, O. a další, 2016. Multiscale and Multivariate Evaluation of Water Fluxes and States over European River Basins.
22. Samaniego, L., 2017. *The mesoscale hydrologic model mHM*. [Online]
Available at: <http://www.ufz.de/index.php?en=40114>
[Přístup získán 19 03 2018].
23. Samaniego, L., Kumar, R. & Attinger, S., 2010. Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale.. *Water Resour. Res.*
24. Sheffield, J. & Wood, E., 2011. Past Problems and Future Scenarios.
25. Solomon, S. a další, 2007. IPCC. Fourth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change.. *Cambridge University Press, N.Y.*
26. Strom, R. G., 2007. *Hot house: global climate change and the human condition*. Copernicus Books.
27. Taylor, A. E., 2009. A summary of the CMIP5 experiment design. Issue http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_design.pdf.
28. Taylor, K., Ronald, J., Stouffer, A. & Gerald, A., 2011. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design.
29. Van Loon, A., 2013. *On the propagation of drought.: How climate and catchment characteristics influence hydrological drought development and recovery.* Wageningen, N: Wageningen University.
30. Vladimirov, A., 2005. *Classification of hydrological drought*. Moscow.