

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2020**

**Kamila OTIPKOVÁ**

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A  
ENVIROMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**

**Vliv změny klimatu na povodí Vltavy**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

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

**Diplomant: Bc. Kamila Otipková**

**2020**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Kamila Otipková

Krajinné inženýrství  
Regionální environmentální správa

Název práce

**Vliv změny klimatu na povodí Vltavy**

Název anglicky

**Climate change impacts on Vltava basin**

---

### Cíle práce

Cílem práce je

- vyhodnotit dopady změny klimatu na meteorologické veličiny (srážky, teplota, potenciální evapotranspirace), hydrologické veličiny (odtok, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody)
- vyhodnotit změny charakteristik sucha

### Metodika

Na základě korigovaných simulací regionálních klimatických modelů z projektu CORDEX budou vytvořeny scénáře změny klimatu pro jednotlivá subpovodí povodí Vltavy. Zájmové území odpovídá úseku Vltavy od Českých Budějovic po hráz vodního díla Vrané. Bude provedena simulace hydrologické bilance vybraným hydrologickým modelem a bude provedeno vyhodnocení změn vybraných veličin.

Rámcově bude posouzena možnost kompenzace poklesu zásoby vody v půdě prostřednictvím vodních nádrží Vltavské kaskády.

**Doporučený rozsah práce**

40 stran textu

**Klíčová slova**

změna klimatu, scénáře změny klimatu, dopady klimatické změny, povodí Vltavy

---

**Doporučené zdroje informací**

- Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K., & Liebert, J. (2012). HESS Opinions" Should we apply bias correction to global and regional climate model data?". *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3391-3404.
- Hanel, M., Hánová, K., Daňhelka, J., Mrkvičková, M., Tomek, M., Tolasz, R., Ledvinka, O. (2014) Vyhodnocení možných dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství a při plánování v oblasti vod. Certifikovaná metodika
- Hanel, M., Kašpárek, L., Mrkvičková, M., Horáček, S., Vizina, A., Novický, O., & Fridrichová, R. (2011). Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření. VÚV T. G. Masaryka, v.v.i.
- Maraun, D., Shepherd, T. G., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J. M., ... & Mearns, L. O. (2017). Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change*, 7(11), 764.
- Maraun, D. (2016). Bias correcting climate change simulations-a critical review. *Current Climate Change Reports*, 2(4), 211-220.
- Van Pelt, S. C., Beersma, J. J., Buishand, T. A., Van den Hurk, B. J. J. M., & Kabat, P. (2012). Future changes in extreme precipitation in the Rhine basin based on global and regional climate model simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(12), 4517-4530.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2019/20 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

---

Elektronicky schváleno dne 14. 1. 2020

**doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 11. 2. 2020

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 09. 03. 2020

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Vliv změny klimatu na povodí Vltavy vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze 18.2.2020

.....

## Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Martinu Hanelovi, Ph. D. za příjemnou spolupráci, ochotu, čas a rady, které mi věnoval, a kontrolu diplomové práce. V neposlední řadě děkuji také mojí rodině a přátelům za obrovskou podporu během celého studia.

V Praze 18.2.2020

## **Abstrakt**

Diplomová práce „Vliv klimatické změny na povodí Vltavy“ se zabývá analýzou meteorologických a hydrologických veličin. Cílem práce je vyhodnocení dopadů změny klimatu dle simulací globálních klimatických modelů na základě scénářů koncentrací skleníkových plynů (RCP). V první části diplomové práce jsou popsány teoretické informace o Vltavské kaskádě, klimatické změně, modelování změn klimatu a jejich dopadů na hydrologický režim, nebo adaptačních opatření. V neposlední řadě jsou zde shrnuty i existující studie týkající se analyzovaného území. Praktická část diplomové práce se zabývá analýzou získaných dat, popisem metod zpracování a prezentováním výsledků získaných z analýz. V závěru práce je uvedeno srovnání jednotlivých analyzovaných povodí vzhledem k meteorologickým a hydrologickým veličinám a vyhodnocení dopadů klimatické změny v období vzdálenější budoucnosti (2070-2100).

**Klíčová slova:** změna klimatu, scénáře změny klimatu, dopady klimatické změny, povodí Vltavy

## **Abstract**

Diploma thesis „Impact of climate changes on Vltava river basin“ deals with analysis of meteorological and hydrological variables. The aim of this thesis is to evaluate the impacts of climate change considering RCP scenarios and global climate models. The theoretical information about Vltava river basin, climate change, climate modeling including its projection or adaptation measures are described in the first part of the thesis. The practical part of the thesis deals with the analysis of data, describing the methods of processing and presenting the obtained results. The conclusion of the thesis is dedicated to the comparison of analyzed river basins and evaluation of climate changes impacts in a far future (2070-2100).

**Key words:** climate change, climate change scenarios, impacts of climate change, Vltava river basin

# OBSAH

|  |    |
|--|----|
| 1. ÚVOD.....   | 10 |
| 2. CÍLE PRÁCE.....   | 11 |
| 3. LITERÁRNÍ REŠERŠE .....   | 11 |
| 3.1 Vltavská kaskáda .....   | 11 |
| 3.1.1 Vodní dílo Lipno I.....  | 15 |
| 3.1.2 Vodní dílo Lipno II .....  | 16 |
| 3.1.3 Vodní dílo Hněvkovice .....  | 16 |
| 3.1.4 Vodní dílo Kořensko .....  | 17 |
| 3.1.5 Vodní dílo Orlík .....   | 18 |
| 3.1.6 Vodní dílo Kamýk.....  | 18 |
| 3.1.7 Vodní dílo Slapy .....   | 18 |
| 3.1.8 Vodní dílo Štěchovice .....  | 19 |
| 3.1.9 Vodní dílo Vrané.....  | 20 |
| 3.2 Klimatická změna.....  | 21 |
| 3.2.1 IPCC – Mezivládní panel pro změnu klimatu.....                           | 22 |
| 3.2.2 Významné dokumenty související s klimatickou změnou.....                 | 22 |
| 3.2.3 Historický vývoj.....  | 25 |
| 3.2.4 Vývoj klimatu za poslední tisíciletí.....                                | 25 |
| 3.3 Modelování klimatu .....   | 26 |
| 3.3.1 Klimatický systém.....   | 26 |
| 3.3.2 Klimatické modely .....  | 28 |
| 3.3.3 Hydrologické modelování.....   | 29 |
| 3.3.4 Možné dopady změny klimatu na hydrologický režim v České republice<br>30 |    |
| 3.3.5 Scénáře klimatických změn.....   | 31 |
| 3.4 Projekce klimatických modelů .....   | 33 |
| 3.4.1 Srážky a teplota .....   | 34 |
| 3.4.2 Hydrologický cyklus .....  | 34 |
| 3.5 Modelování dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství.....                | 35 |
| 3.6 Adaptační opatření – možnosti zmírnění dopadů změny klimatu.....           | 36 |
| 3.6.1 Opatření v tocích a nivách.....  | 37 |
| 3.6.2 Opatření v urbanizovaných územích.....                                   | 38 |
| 3.6.3 Vodohospodářská opatření.....  | 38 |



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.6.4 | Legislativní opatření.....                                      | 39 |
| 3.7   | Existující studie dopadů klimatické změny na zájmové území..... | 40 |
| 4.    | PRAKTICKÁ ČÁST .....  | 42 |
| 4.1   | METODIKA.....   | 42 |
| 4.1.1 | Vymezení analyzovaného území.....                               | 42 |
| 4.1.2 | Analyzovaná data .....  | 43 |
| 4.1.3 | Metody vyhodnocení analyzovaných dat.....                       | 44 |
| 4.1.4 | Program R .....   | 47 |
| 5.    | VÝSLEDKY .....  | 48 |
| 6.    | DISKUZE .....   | 65 |
| 7.    | ZÁVĚR .....   | 69 |
| 8.    | LITERATURA .....  | 70 |

# 1. ÚVOD

Klimatická změna a její dopady na různé oblasti lidských činností a příprava adaptačních a zmírňujících opatření se stávají důležitým předmětem celosvětové politiky, tudíž i politiky České republiky. Podle výsledků výzkumů je vodní hospodářství jednou z oblastí, která může být nejvíce zasažena, a proto je důležité věnovat jí prvořadou pozornost (NOVICKÝ et al, 2008).

Vzhledem k aktuální klimatické změně je nejčastěji uvažován globální nárůst teploty vzduchu, která se projevuje víceméně ve všech regionech Země. Některé projevy současné globální klimatické změny jsou již v dnešní době velmi dobře pozorovatelné. Mezi tyto projevy řadíme růst hladiny světových oceánů, měnící se rozlohy ledovců nebo rostoucí globální teplotu vzduchu.

Do budoucna se předpokládá zvýšení výskytu jevů jako jsou extrémní horka, vlny vysokých teplot nebo silné srážky. Dojde také ke zvýšení srážek ve vyšších zeměpisných šířkách, a naopak snížení srážek v subtropických oblastech. Jak už je nyní pozorovatelné, dochází také je zmenšování sněhové pokrývky a zmenšování objemu mořského ledu.

Nejdůležitějšími nástroji pro vytváření projekcí budoucího klimatu jsou v současné době globální a regionální klimatické modely. Díky těmto modelům a scénářovým předpovědím dokážeme odhadnout, jak budou vypadat srážky, teploty či odtoky v budoucnosti (např. do roku 2100).

Tato práce se zabývá analýzou pozorovaných dat získaných z projektu TAČR TA02020320 „Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu“ a jeho metodiky „Vyhodnocení možných dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství a při vodohospodářském plánování“ a projektu TA01020508 „Udržitelné využívání vodních zdrojů v podmínkách klimatických změn“. Zaměřila jsem se na veličiny teplotu, srážky a odtok pro 13 povodí. Pro teplotu a srážky byly vytvořeny scénáře změn na základě simulací globálních klimatických modelů řízených tzv. RCP scénáři vývoje koncentrací a pro odhad změn odtoku byl použit model Bilan, který se používá k simulacím hydrologické bilance na českých a evropských povodích.

V literární rešerši této práce jsou uvedeny základní informace o Vltavské kaskádě, klimatické změně, modelování klimatu a dopadů jeho změn. Praktická část

následně popisuje analyzovaná data a jejich zpracování. Diskuze a závěr shrnují výsledky analýzy meteorologických a hydrologických dat.

## **2. CÍLE PRÁCE**

Cílem práce je vyhodnocení dopadů změny klimatu na povodí Vltavy z hlediska meteorologických veličin, mezi které řadíme srážky a teplotu, a hydrologických veličin, jako je odtok. Pro vyhodnocení meteorologických i hydrologických veličin byla použita pozorovaná data za období 1961-2018 získaná od Českého hydrometeorologického ústavu. Dále byly vytvořeny scénáře vývoje meteorologických veličin (srážek a teploty) na základě simulací globálních klimatických modelů, které jsou řízeny RCP scénáři vývoje koncentrací. Odhad odtoku pro současné období byl porovnán s odhadem dle globálních klimatických modelů CMIP5 na základě, kterých došlo k vyhodnocení klimatických změn pro období vzdálenější budoucnosti (2070-2100).

Získaná data jsou zpracována pomocí programu R.

## **3. LITERÁRNÍ REŠERŠE**

Tato kapitola diplomové práce poskytuje základní teoretické informace o jednotlivých vodních dílech Vltavské kaskády, klimatické změně včetně jejího vývoje, charakterizuje modelování klimatu a také dopady jeho změn. V neposlední řadě jsou zde také vysvětleny adaptační opatření a popsány existující studie dopadů klimatické změny na zájmové území.

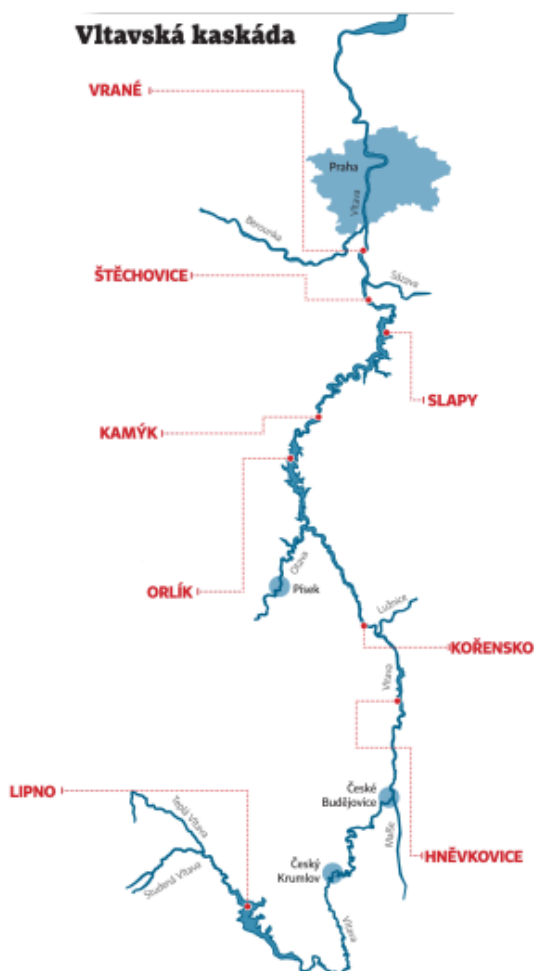
### **3.1 Vltavská kaskáda**

Vodní kaskádou nazýváme systém po sobě jdoucích uměle vytvořených vodních děl, turbín a ventilů, přítoků, které jsou rozprostřeny na vodním toku a tvoří tak ucelenou vodohospodářskou či energetickou soustavu. Aby vodní soustava splňovala vodohospodářské, energetické, ekologické i ochranné požadavky, musí

respektovat omezení, která jsou reprezentována omezením výšek hladin a velikosti toků na specifikovaných místech vodní kaskády (NOVOTNÝ, 2019).

V této práci se budeme věnovat kaskádě Vltavské.

Vltavská kaskáda (Obr. 1) je vodohospodářská soustava vodních děl na řece Vltavě, která se skládá celkem z 9 přehrad. Hlavním účelem výstavby Vltavské kaskády byla výroba elektrické energie (DUCHÁČEK, 2006). Kromě výroby elektrické energie slouží kaskáda také k akumulaci vody, zlepšování průtoku dolního toku Vltavy, rekreačním činnostem a také k ochraně před povodněmi díky snižování povodňových průtoků. Vlastníkem všech elektráren je firma ČEZ a provoz na jednotlivých elektrárnách je zautomatizován a řízen z centrálního dispečinku ve Štěchovicích. Samostatná vodní díla následně spravuje Povodí Vltavy, které je státním podnikem. Přehrady Vltavské kaskády tak spojuje řeka Vltava, která je díky tomu rozdělena na 8 dosahů (NOVOTNÝ, 2019).



Obr. 1 Vltavská vodní kaskáda (NOVOTNÝ, 2019)

Pokusy a návrhy na splavnění řeky Vltavy se datují již od Středověku. Již Karel IV. se zabýval myšlenkou propojení Vltavy a Dunaje, aby tím pozdvihнул Prahu na středisko evropského obchodu. První ucelený projekt na splavnění Vltavy z Českých Budějovic do Mělníka byl ale vypracován až v roce 1894 firmou Lanna-Vering. Tento projekt se zabýval splavněním toku 33 nízkými stupni, tedy jezy o výšce 2 až 4 m s plavebními komorami pro lodi nosnosti 600 až 700 t. V roce 1901 se úsilí o splavnění Vltavy ještě zesílilo, jelikož byl vydán „Vodocestný zákon“ (Vltavská kaskáda, 2020). Další návrh úpravy Vltavy přichází v roce 1922 od inženýrů Hromas a Štěpánek, kteří navrhovali vybudovat mezi Prahou a Českými Budějovicemi 10 stupňů, z nichž nejvyšší by byla hráz vysoká asi 70 m v poloze 1 km nad nynějším štěchovickým zdymadlem. Společnost postupně měnila základní účel navrhované Vltavské kaskády ve prospěch energetického využití a docházelo tak k dlouhým sporům o zachování jejího plavebního účelu, a proto byla většina vodních děl Vltavské kaskády vybavena současně plavebními zařízeními (ČVUT, 2020).

Na konci druhé světové války odborníci ale docházejí k závěru, že je potřebné na Vltavě vybudovat co největší vodní díla, která by mohla akumulovat vodu především pro hydroenergetiku. Z tohoto důvodu jsou všechna díla této doby budována již jako víceúčelová a voda tak může současně sloužit pro další hospodářské využití a ke zlepšení vodohospodářských poměrů na Vltavě (ČVUT, 2020).

Od roku 1954 Vltavská kaskáda významněji ovlivňuje odtokový režim, kdy byla zachycena část povodně na Vltavě tehdy ještě nedokončenou nádrží Slapy. Největší vliv má ale nádrž Orlík, která byla uvedena do provozu v roce 1968. Vliv kaskády se zatím projevoval jen při relativně malých povodních, do roku 2001 byl na celé Vltavě dosažen v přirozeném režimu maximálně 20letý průtok. Extrémní zátěží byla až povodeň v srpnu roku 2002, kdy objem vody, který přešel přes povodí Vltavy ještě nad soutokem Sázavy a Berounky, byl třikrát větší, než je objem všech vodních děl Vltavské kaskády v případě, že budou všechny nádrže zcela vypuštěny (DUCHÁČEK, 2006). Vltavskou kaskádu tak považujeme za nejvýznamnější vodohospodářskou soustavu v povodí Vltavy. Její role během povodňových událostí je zcela zásadní, jelikož realizované manipulace vedly k částečnému snížení kulminačního průtoku a poskytly tak čas pro přípravu protipovodňových opatření v Praze, na dolní trati Vltavy (FOŠUMPAUR, KENDÍK, & BŘEZINA, 2014).

Současné nastavení strategických parametrů a funkčních objektů přehrad Vltavské kaskády vychází z původního komplexního manipulačního řádu

podloženého vodohospodářským řešením z roku 1964. Nádrže Hněvkovice a Kořensko jsou podloženy vodohospodářským řešením z roku 1989 a tvoří tak výjimku (ČVUT, 2020).

Vltavská kaskáda podle současného komplexního manipulačního řádu obsahuje rozdělení nádržních prostorů jednotlivých nádrží dle Tab. 1 a zajišťuje následující účely:

- Zajištění minimálního průtoku na Vltavě v profilu Vrané 40 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> ve spolupráci při hospodaření s vodou s vodními díly Lipno I, Slapy a Orlická a v součinnosti s ostatními vodními díly Vltavské kaskády,
- Využití odtoku z nádrží k výrobě elektrické energie ve vodních elektrárnách, které jsou součástí vodních děl,
- Snížení velkých vod na Vltavě a částečnou ochranu území pod přehradou před účinky povodní (se zvláštním zřetelem na ochranu Prahy),
- Dodávku povrchové vody pro odběratele,
- Nadlepšování průtoků ve Vltavě a příp. v Labi pro zlepšení plavební podmínek,
- Vypouštění zvýšených průtoků ke zlepšení hygienických podmínek a kvality vody ve Vltavě (zejména v oblasti Prahy) a k likvidaci následků čistotářských havárií,
- Ovlivňování zimního průtokového režimu pod přehradou a omezení nežádoucích ledových jevů,
- Rekreace a vodní sporty,
- Plavba v nádrži,
- Extenzivní rybní hospodářství (FOŠUMPAUR, KENDÍK, & BŘEZINA, 2014).

Tab. 1 Rozdělení nádržních prostorů nádrží Vltavské kaskády (ČVUT, 2020)

|                   | Vs                    | Vz                 | Vr                  | Vcelk            |
|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|------------------|
|                   | Stálé<br>nádržení     | Zásobní<br>prostor | Ochranný<br>prostor | Celkový<br>objem |
|                   | [mil.m <sup>3</sup> ] |                    |                     |                  |
| <b>Lipno I</b>    | 23,354                | 252,991            | 33,156              | 309,501          |
| <b>Lipno II</b>   | 0,222                 | 1,442*)            | 0                   | 1,664            |
| <b>Hněvkovice</b> | 8,940                 | 12,155             | 0                   | 21,095           |
| <b>Kořensko</b>   | 1,070                 | 1,730*)            | 0                   | 2,800            |
| <b>Orlík</b>      | 280,000               | 374,428            | 62,072              | 716,500          |
| <b>Kamýk</b>      | 8,324                 | 4,652*)            | 0                   | 12,976           |
| <b>Slapy</b>      | 68,800                | 200,500            | 0                   | 269,300          |
| <b>Štěchovice</b> | 7,100                 | 3,344*)            | 0                   | 10,444           |
| <b>Vrané</b>      | 8,578                 | 2,523*)            | 0                   | 11,101           |
| <b>Celkem</b>     | 406,388               | 853,765            | 95,228              | 1355,381         |

Legenda: \*) jedná se pouze o vyrovnávací prostor pro energetické účely

### 3.1.1 Vodní dílo Lipno I

Vodní dílo Lipno I (Obr. 2) je devátým, a tedy posledním stupněm Vltavské kaskády, které bylo vybudované v letech 1952-1959 (NOVOTNÝ, 2019).

Jedná se o největší uměle vybudované vodní dílo v České republice (LUKÁŠOVÁ, 2013). I když má Lipenská přehrada největší vodní hladinu v ČR, objemem zadržené vody ale už nedomnuje, protože byla postavena nad soutěskou v Lipně uzavírající ploché území Volarské doliny. Základním účelem nádrže je využití jako zdroje elektrické energie (DUCHÁČEK, 2006). Představuje tak výrobu levné, ekologicky čisté a špičkové elektrické energie a využití pro regulaci výkonu celostátní energetické soustavy (NOVOTNÝ, 2019). Mezi další využití řadíme ochranu před povodněmi, ovlivnění zimního průtokového režimu, zlepšení hygienických podmínek v řece pod vodním dílem, dodávka vody pro obec Loučovice a papírnu Loučovice a v neposlední řadě využití vodní nádrže Lipno I k rekreaci, rybolovu a lodní dopravě (DUCHÁČEK, 2006).

Vodní dílo se skládá ze dvou objektů, přehrady a špičkové vodní elektrárny, která se nachází v hloubce 160 m a je vybavena dvěma Francisovými turbínami (NOVOTNÝ, 2019).



Obr. 2 Vodní dílo Lipno I (Vodní elektrárna Lipno I, 2020)

### 3.1.2 Vodní dílo Lipno II

Vodní dílo Lipno II je osmým stupněm Vltavské kaskády, které bylo vybudováno současně s vodním dílem Lipno I, tedy v období 1952-1959 (LUKÁŠOVÁ, 2013). S výše položeným Lipnem I je přehrada spojena tunelem o průměru 7,5 m a délce 3,6 km (DUCHÁČEK, 2006). Funkce nádrže je zejména k vyrovnání odtoku z vodní elektrárny vodního díla Lipno I. Díky trvalé výrobě elektrické energie z vyrovnávaného průtoku vodní dílo Lipno I umožňuje pomocí vlastní produkce elektrické energie zabezpečit vlastní spotřebu, což je hlavní energetický význam nádrže (NOVOTNÝ, 2019).

### 3.1.3 Vodní dílo Hněvkovice

Vodní dílo Hněvkovice (Obr. 3) je sedmá část Vltavské kaskády. Byla postavena spolu s vodním dílem Kořensko v období 1986-1991 a jedná se tak o nejnovější část (LUKÁŠOVÁ, 2013). Po první světové válce se bezprostředně uvažovalo o výstavbě, ale až ve chvíli rozhodnutí vybudovat jadernou elektrárnu u Temelína bylo potřebné zabezpečit technologickou vodu výstavbou nádrže na Vltavě (VD Hněvkovice, 2020).

Vodní dílo se skládá ze čtyř částí: přehrady, plavebního zařízení, elektrárny a čerpací stanice (NOVOTNÝ, 2016). Současně s výstavbou vodního díla Hněvkovice se začala stavět čerpací stanice na levém břehu Vltavy v těsném sousedství hráze,



včetně přivodního potrubí technologické vody do areálu jaderné elektrárny Temelín a jedná se tak o prioritní účel nádrže (VD Hněvkovice, 2020).



Obr. 3 Vodní dílo Hněvkovice (Vodní elektrárna Hněvkovice, 2020)

#### **3.1.4 Vodní dílo Kořensko**

Vodní dílo Kořensko lze charakterizovat jako šestý stupeň Vltavské kaskády a výstavba probíhala v letech 1986-1992 společně s vodním dílem Hněvkovice (NOVOTNÝ, 2019). Jedná se o jezové těleso, které je dlouhé 80 m a 5 m vysoké a nalezneme ho 2 km od pod ústím řeky Lužnice, zároveň je v rozsahu nádrže vodního díla Orlík. Díky tomu je zde voda zadržována pouze tehdy, když hladina nádrže Orlík nebude dosahovat maxima (DUCHÁČEK, 2006). Hlavním úkolem vodního díla Kořensko je udržení stálé hladiny vody a tím odstranit hygienické a estetické závady v městě Týn nad Vltavou, které vznikají kolísáním hladiny ve vodním díle Orlík (NOVOTNÝ, 2019). Dalším využitím vodního díla je energetické využití, kdy ve vybudovaném tlumícím objektu je využíván spád vypouštěným odpadních vod z jaderné elektrárny Temelín. Právě toto technické řešení následně umožňuje v maximální míře homogenizaci tuhých tekutých odpadů s říční vodou v celém profilu říčního koryta a je tím omezena možnost jejich stratifikace v nádrži vodního díla Orlík (VD Kořensko, 2020).

### **3.1.5 Vodní dílo Orlík**

Vodní dílo Orlík řadíme na páté místo Vltavské kaskády. Jedná se o největší vodní dílo v České republice a zároveň o nejvýznamnější článek celé kaskády. V součinnosti s vodní dílem Lipno I rozhoduje o víceletém řízení průtoku na Vltavě i na dolním Labi (NOVOTNÝ, 2016). Vodní dílo bylo vybudováno v letech 1954-1960 a až do roku 1966 byly dokončovány rekultivační práce (VD Orlík, 2020).

Hlavním účelem vodního díla Orlík je akumulace vody pro nadlepšení průtoků na spodní části Vltavy a Labe, dále pak částečná ochrana před velkými vodami a výroba elektrické energie. Mezi další využití můžeme řadit rekreaci, vodní sporty, rybí hospodářství a plavbu v nádrži (VD Orlík, 2020).

### **3.1.6 Vodní dílo Kamýk**

Vodní dílo Kamýk je čtvrtým stupněm Vltavské kaskády, jehož výstavba probíhala v letech 1957-1962 (NOVOTNÝ, 2019). Nalezneme ho na konci vzduší Slapského jezera a místo stavby bylo zvoleno přímo nad městem nesoucí tentýž název (VD Kamýk, 2020). Skládá se ze tří objektů a to přehrady, plavebního zařízení a průtočné vodní elektrárny, která je osazena čtyřmi Kaplovými turbínami (NOVOTNÝ, 2019).

Provoz vodního díla plně řídí centrální dispečink, aby tak bylo umožněno operativního provozu elektrárny vodního díla Orlík (NOVOTNÝ, 2019). Hlavní účele přehrady je vyrovnávat špičkové odtoky z elektrárny Orlík a využití průtoku a spádu k výrobě špičkové elektrické energie a k odběru pitné a průmyslové vody. Jelikož je Orlickou elektrárnou do Kamýckého jezera přiváděna především spodní, chladná a na kyslík chudá voda, nádrž je tak málo zarybněná, rekreačně slabě využita a slouží proto hlavně k plavebním účelům (VD Kamýk, 2020).

### **3.1.7 Vodní dílo Slapy**

Vodní dílo Slapy (Obr. 4) se řadí na třetí místo Vltavské kaskády a zároveň je i třetí největší přehradou (NOVOTNÝ, 2016). Výstavba Slapské přehrady se začala realizovat již po druhé světové válce a byla ukončena v roce 1955. Než došlo k zaplavení byly vytipovány památkové objekty, které se přenesly nad hladinu budoucího jezera, jedná se například o sloup a sochu sv. Jana v bývalých

Svatojánských proudech. Zajímavostí je napuštění nádrže, které neproběhlo klasickou cestou, ale díky povodni v roce 1954, kdy byla nádrž zaplavena během několika dní (VD Slapy, 2020).

Nejdůležitějším účelem Slapské přehrady je využití jejího průtoku a spádu řeky k výrobě špičkové elektrické energie, zlepšení průtoku na dolní vltavsko-labské plavební trati a k odběrům průmyslové a pitné vody. Nemůže opomenout i ochranu území pod vodním dílem, a především Prahy před velkými vodami, sportovní využití a rekreaci, využití pro rybní hospodářství (VD Slapy, 2020).



Obr. 4 Vodní dílo Slapy (Vodní elektrárna Slapy, 2020)

### 3.1.8 Vodní dílo Štěchovice

Vodní dílo Štěchovice (Obr. 5) je druhým stupněm Vltavské kaskády, kdy výstavba probíhala v období druhé světové války. Skládá se ze tří objektů a to přehrady, plavební komory a středotlakové elektrárny, kdy během stavby byla přidána ještě elektrárna vysokotlaká (NOVOTNÝ, 2016). Výstavba probíhala v letech 1937-1945. Stavba byla poznamenána II. světovou válkou, a právě válečné poměry zpomalily práce a první turbína byla uvedena do provozu až v roce 1943. Nyní je podle některých Štěchovická přehrada považována za jednu z nejkrásnějších z Vltavské kaskády, možná i proto, že je celá obložená kamenem (VD Štěchovice, 2020).

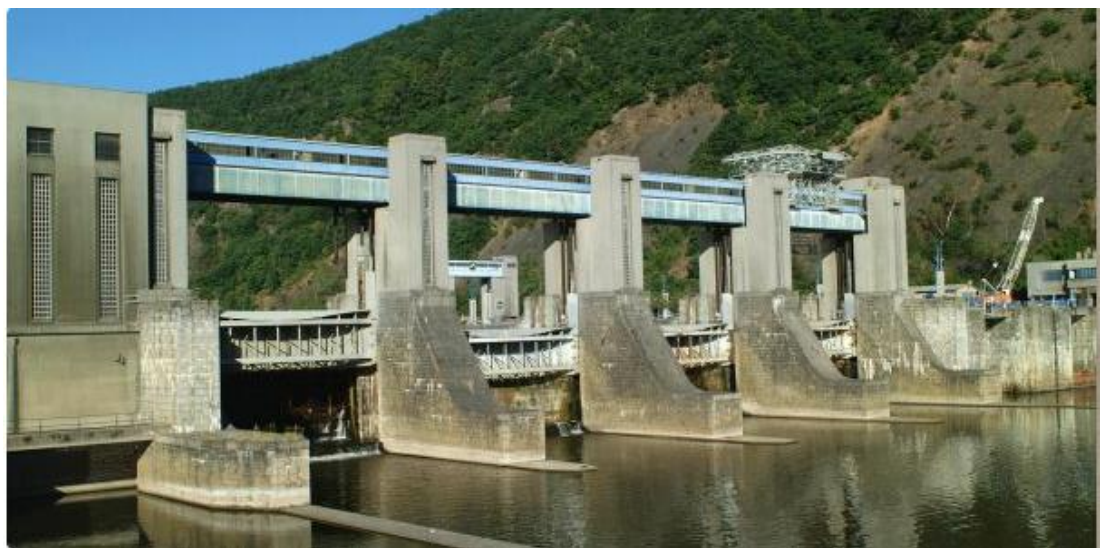
Hlavním účelem Štěchovického vodního díla je vyrovnávání špičkových odtoků z vodních elektráren Slapy a Orlík a jejich následného energetického využití (VD Štěchovice, 2020).



Obr. 5 Vodní dílo Štěchovice (Vodní elektrárna Štěchovice, 2020)

### 3.1.9 Vodní dílo Vrané

Vodní dílo Vrané nad Vltavou (Obr. 6) je prvním a zároveň nejstarším postaveným stupněm Vltavské kaskády a jako poslední může upravovat průtok z výše položených děl (DUCHÁČEK, 2006). Když byl v roce 1931 zřízen státní fond na stavbu vodních děl, první z něj bylo financováno právě toto vodní dílo, které mělo za hlavní úkol sloužit pro plavební účely. V současné době slouží vodní dílo pro vyrovnávání špičkových odtoků hydrocentrál Slapy a Štěchovice a jejich následného využití v průběžné elektrárně a zajištění minimálního průtoku v korytě pod vodním dílem (VD Vrané nad Vltavou, 2020).



Obr. 6 Vodní dílo Vrané nad Vltavou (Vodní elektrárna Vrané, 2020)

## 3.2 Klimatická změna

Změnou klimatu rozumíme změnu klimatického systému, kterou lze identifikovat prostřednictvím změn průměrů klimatických prvků, charakteristik variability a dalších deskriptorů klimatu trvajících po několik desetiletí, případně i století, tisíciletí či miliony let. Typická je identifikace těchto změn pomocí statistických testů. V odborné literatuře má termín „změna klimatu“ několik významů, obecně se ale pod změnou klimatu rozumí změna vyvolaná jakýmkoliv vnějším či vnitřním faktorem, včetně změn vyvolaných lidskou činností (BRANIŠ & HŮNOVÁ, 2009). Člověk mění klima na globální úrovni a z dlouhodobého hlediska a globální změny jsou tak jedním ze silících faktorů budoucí podoby české i evropské krajiny. Globální klimatické změny řadíme mezi další škály jiných osobních hodnot (zdraví, peníze, rodina), kde ale samozřejmě zaujímají nižší preferenční místa. Konkrétní výsledky však ukazují rostoucí závažnost jejich sociálních důsledků (LAPKA & CUDLÍNOVÁ, 2006).

Změny klimatu, se kterými úzce souvisí i globální oteplování, řadíme mezi problémy celosvětového významu. Zabývá se jimi Mezivládní panel pro změnu klimatu – IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (KYNCL & LANGAROVÁ, 2012). Z hlediska dopadů klimatické změny jsou možné v zásadě dvě strategie, a to buď mitigace neboli zmírňování změny klimatu, nebo adaptace čili přizpůsobení se této změně. V poslední době se přidává další možnost, která představuje aktivní zasahování do klimatu neboli geoengineering (BOLOM, DOČKAL, KOS, & LIPTÁK, 2013).

Když se zaměříme na předpokládaný dopad možné klimatické změny na jednotlivé oblasti našeho hospodářství zjistíme, že ke změnám dochází napříč obory a dopady tak pocítí každý. V zemědělství lze předpokládat vliv větších extrémů počasí a bude to tak větší nároky na pěstované rostliny, ať už větší nároky na závlahu nebo škody způsobené erozí při extrémních srážkách. U obytné výstavby budeme řešit izolaci a udržení teplotního optima uvnitř budov kvůli extrémním teplotám. Na urbanizovaných plochách je zapotřebí přehodnotit systém odtoku dešťové vody při extrémních srážkových událostech. V případě liniových dopravních staveb, můžeme očekávat poškození vozovek či kolejnic od extrémní teploty (BOLOM, DOČKAL, KOS, & LIPTÁK, 2013). Klimatické změny mají vliv na kvalitu a množství povrchových a podzemních vod. Kvůli nedostatku srážek dochází k poklesu

povrchového odtoku, tím se zmenšuje i míra dotace podzemních vod. Díky tomu se sníží hladina podzemní vody a poklesne i odtok. Výsledkem je pokles hladiny v tocích a nádržích, je nižší vydatnost pramenů, a vede to k hydrologickému suchu. Naopak zvyšování teplot vzduchu má za následek zvyšování teploty vody, a to má vliv na biologické a chemické procesy ve vodě. Z těchto důvodů se řada států zaměřuje na monitorování sucha (KYNCL & LANGAROVÁ, 2012).

### **3.2.1 IPCC – Mezivládní panel pro změnu klimatu**

Mezivládní panel pro změnu klimatu (IPCC) je nezávislý vědecko-technický orgán, který se zaměřuje na podporu poznání klimatické změny a hodnocení jejích environmentálních a sociálních důsledků (NOVICKÝ et al, 2008). IPCC založili dvě instituce OSN: Světová meteorologická organizace (World Meteorological Organization, WMO) a Program spojených národů pro životní prostředí (United Nations Environmental Programme, UNEP) v roce 1988 (HANEL & VIZINA, 2014).

Cílem IPCC je poskytovat vládám na všech úrovních vědecké informace, které mohou použít k rozvoji politik v oblasti klimatu. Zprávy IPCC jsou klíčovým vstupem do mezinárodních jednání o změně klimatu (IPPC, 2020).

Jedná se o organizaci vlád, které jsou členy OSN nebo WMO, a v současné době má 195 členů. K práci IPCC přispívají tisíce lidí z celého světa. V rámci hodnotících zpráv se vědci IPCC dobrovolně věnují hodnocení tisíců vědeckých prací, které jsou zveřejňované každý rok, aby poskytli komplexní shrnutí toho, co je známo o hybatelích změny klimatu, jejích dopadech a budoucích rizicích, a jak adaptace a zmírnění mohou snížit rizika dopadů (IPPC, 2020).

### **3.2.2 Významné dokumenty související s klimatickou změnou**

#### **3.2.2.1 Rámcová úmluva OSN o změně klimatu**

V roce 1992 se v Rio de Janeiro konala Konference Organizace spojených národů pro rozvoj životní prostředí (UNCED). Výsledkem konference bylo přijetí Rámcové konvence o klimatu (UNFCCC), kterou se zúčastnění zavázali k omezení antropogenního poškozování klimatického systému, aby došlo k zpomalení globálního oteplování a zmírnily se jeho důsledky (QUASCHNING, 2010). Rámcová úmluva vstoupila v platnost 21. března 1994 po uložení padesáté ratifikační listiny, listiny o

přijetí, schválení a přístupu. Aktuálně existuje 197 (196 států a 1 organizace pro regionální hospodářskou integraci) smluvních stran Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu (UNFCCC, 2020).

Rámcová úmluva OSN o změně klimatu je založena na čtyřech principech:

- Principu mezigenerační spravedlivosti, tj. chránit klimatický systém ve prospěch nejen současné, ale i příští generace,
- Principu společné, ale diferencované odpovědnosti, který říká, že ekonomicky vyspělé země nesou hlavní odpovědnost za rostoucí koncentrace skleníkových plynů v atmosféře, přičemž jejich povinností je i poskytovat pomoc rozvojovým zemím,
- Principu potřeby chránit zejména ty části planety, které jsou více náchylné na negativní dopady změn klimatického systému, tj. především těch zemí, které jsou v rámci svého hospodářského vývoje a geografického umístění zranitelnější,
- Principu tzv. předběžné opatrnosti, tedy nutnosti neodkládat řešení problému, a to ani v tom případě, že doposud nelze některé důsledky změny klimatu přesně kvantifikovat (Rámcová úmluva OSN o změně klimatu, 2020).

### **3.2.2.2 Kjótský protokol**

11. prosince roku 1997 byl na 3. Konferenci smluvních stran Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu, která se konala v Kjótu v Japonsku, přijat protokol k úmluvě, který byl opakovaně označován jako Kjótský protokol. Dokument stanovuje povinné snížení množství skleníkových plynů pro skupinu průmyslových zemí. Po velmi dlouhém ratifikačním procesu vstoupil v platnost 16. února 2005 (GERDEN, 2018). Česká republika podepsala Protokol 23.11.1998 na základě usnesení vlády č. 669/1998 a byl ratifikován 15.11.2001 (č. 81/2005 Sb.m.s.) (Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu, 2020). Tato smlouva zavazuje všechny průmyslové státy, aby nejpozději do roku 2012 snížily emise skleníkových plynů o 5,2 % (GERDEN, 2018). Přitom ale platí různá omezení pro jednotlivé státy. Některým státům, jako je například Španělsko nebo Portugalsko, dovoluje protokol dokonce i přírůstek emisí, jelikož státy EU smějí dosáhnout daných cílů společně. Znamená to

tedy, že pokud některé státy EU způsobí příliš vysoké překročení emisí, jiné státy EU to směji kompenzovat (QUASCHNING, 2010).

Redukce se dotýká emisí oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>), methanu (CH<sub>4</sub>), oxidu dusného (N<sub>2</sub>O), fluoridu dusitého (NF<sub>3</sub>), polyfluorovodíku (PFC<sub>5</sub>), fluoridu sírového (SF<sub>6</sub>) a hydrogenovaných fluorovodíku (HFC<sub>5</sub>). Pro každý skleníkový plyn je definován tzv. potenciál globálního ohřevu v závislosti na jeho schopnosti ovlivňovat klima. Protokol bere v úvahu i dopady emisí skleníkových plynů, tj. absorpci vyvolanou změnami ve využívání krajiny (odlesňování nebo zalesňování) (Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu, 2020).

### **3.2.2.3 Nairobi Work Programme**

Nairobi work programme byl schválen v roce 2006 při dvanácté konferenci smluvních stran UNFCCC. Hlavním cílem je snaha pomoci všem stranám, zejména rozvojovým zemím, včetně nejméně rozvinutých zemí a malých ostrovních rozvojových států, zlepšit jejich porozumění a hodnocení dopadů, zranitelnosti a přizpůsobení se změnám klimatu. Dále činit informovaná rozhodnutí o praktických realizacích adaptačních opatření, které reagují na změnu klimatu na zdravém, vědeckém, technickém a sociálně-ekonomickém základě s přihlédnutím ke stávající a budoucí změně a variabilitě změny klimatu (Nairobi work programme, 2020).

### **3.2.2.4 Pařížská dohoda**

Pařížská dohoda vstoupila v platnost 4. listopadu 2016. Staví na rámcové úmluvě OSN a poprvé spojuje všechny národy ve společné věci, aby podnikly ambiciózní úsilí v boji proti změně klimatu a přizpůsobily se jeho účinkům, a to se zvýšenou podporou, která pomůže rozvojovým zemím (The Paris Agreement, 2020).

Hlavním cílem Pařížské dohody je posílit globální reakci na hrozbu změny klimatu udržováním globálního nárustu teploty v tomto století výrazně pod 2 °C nad industriálními úrovněmi a usilovat o omezení nárustu teploty ještě dále na 1,5 °C. Cílem dohody je dále posílit schopnost zemí vypořádat se s dopady změny klimatu. K dosažení těchto cílů budou zavedeny odpovídající finanční toky, nový technologický rámec a posílený rámec pro budování kapacit, čímž bude podpořena



činnost rozvojových zemí a nejzranitelnějších zemí v souladu s jejich vnitrostátními cíli (The Paris Agreement, 2020).

### **3.2.3 Historický vývoj**

Podnebí se v minulosti měnilo vždy, přirozené změny probíhají a budou probíhat i nadále. Rekonstrukcí podnebí před začátkem přístrojových měření se zabývá historická klimatologie a paleoklimatologie, přispívají tak k poznání stavu a chování klimatického systému v dobách, kdy ještě výrazně převažoval vliv přírodních faktorů (změny orbitální dráhy Země, sluneční činnost, rozložení pevnin, oceánů a vegetace, sopečná činnost). Přímá data z měření počasí máme k dispozici asi 150 let nazpět. Během celé geologické historie se s největší pravděpodobností vždy střídala období teplejší a chladnější, sušší i vlhčí, ale srovnání tehdejšího klimatu a dnešního je značně problematické. Je to ovlivněno nedostatkem kvalitních a spolehlivých dat k přesné rekonstrukci klimatu a také tím, že geologické podmínky na Zemi se výrazně změnily od těch dnešních. Dříve bylo jiné rozložení pevniny a oceánů, a to mělo za následek i jiné proudění vody v oceánu a od toho se odvíjí i jiné podmínky pro přenos tepelné energie z tropických oblastí do vyšších zeměpisných šířek (METELKA & TOLASZ, 2009).

V roce 2006 byla globální roční průměrná teplota vzduchu při zemském povrchu o 0,42 °C vyšší, než byl průměr za období 1961-1990. Celkově teploty nad pevninami rostly během posledních dvou desetiletí přibližně dvakrát rychleji než nad oceány. Rychlost, jakou oteplování ve 20. století probíhalo, je s největší pravděpodobností větší než v jakémkoli jiném období za posledních tisíc let. Od 50. let 20. století dochází ke zvyšování teploty vody (do hloubky přibližně 700 m) v některých oblastech světového oceánu (BRANIŠ & HŮNOVÁ, 2009).

### **3.2.4 Vývoj klimatu za poslední tisíciletí**

Podrobné informace o klimatu posledního tisíciletí získáváme především z vrtů v horských ledovcích, letokruhů stromů a mořských korálů (růst je ovlivněn teplotou a salinitou oceánu). Další variantou zisku informací jsou záznamy z kronik nebo lodních deníků a data z posledních století, především z Evropy, máme z přístrojových měření (HANEL & VIZINA, 2014).

V klimatu posledního tisíciletí rozeznáváme tři období: středověké teplé období, malou dobu ledovou v 16.-19. století a po ní následující období globálního oteplování. Určení středověkého teplého období se zdá značně nejisté. Teploty měly být v některých oblastech vyšší než v dalších stoletích ne o víc jak 1-2 °C, a v měřítku polokouli nebyly vyšší než ve druhé polovině 20. století. Nové výzkumy také naznačují, že teplé období nezasáhlo celou planetu zároveň, ale jednalo se spíše o lokální nebo regionální oteplení, které přišlo do různých oblastí v různém čase. Malou dobou ledovou bylo původně označováno období, kdy se horské ledovce na celém světě rozšířily. Nástup a ústup ledovců je nejčastěji spojován s kolísáním teploty vzduchu, ale jejich změn ovlivňují i různé další meteorologické faktory, například změny režimu srážek (METELKA & TOLASZ, 2009). Na celé severní polokouli byly nejnižší teploty zejména v letech 1600-1609 a během 19. století. U nás byly průměrné roční teploty kolem roku 1540 o 1 °C až 1,3 °C vyšší než v současnosti. Velmi chladné období 1811-1860 bylo zřejmě příčinou opětovného nástupu ledovců v Alpách (BRANIŠ & HŮNOVÁ, 2009).

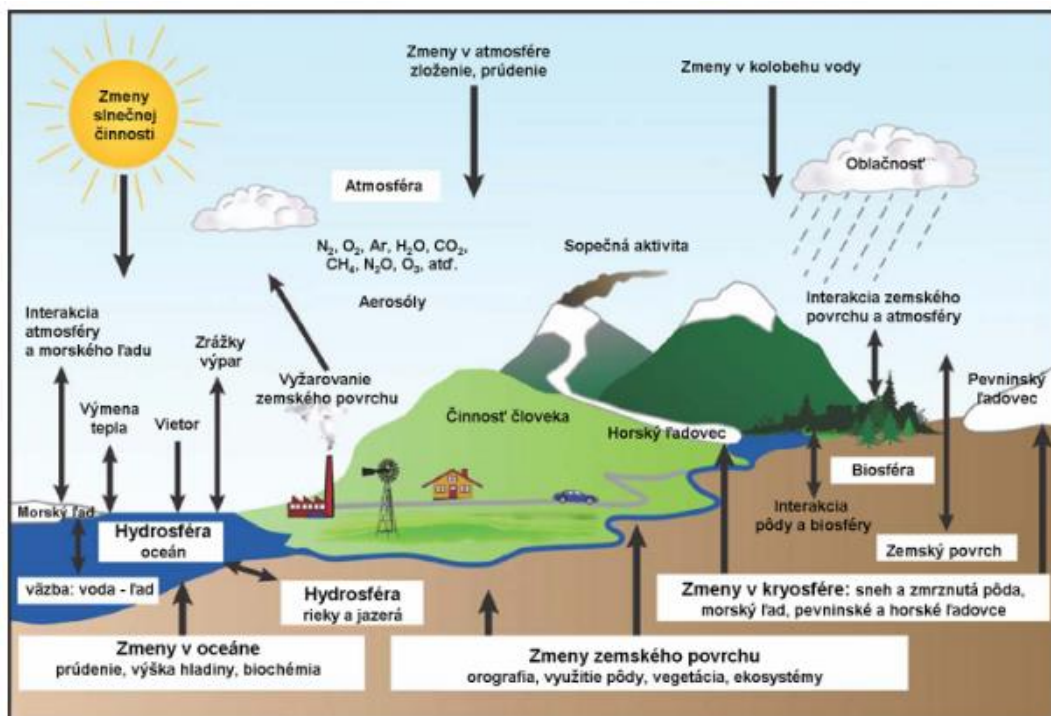
### **3.3 Modelování klimatu**

#### **3.3.1 Klimatický systém**

Klima neboli podnebí definujeme jako dlouhodobý charakteristický stav počasí, který je podmíněný a ovlivněný energetickou bilancí, cirkulací atmosféry, charakterem aktivního povrchu a lidskou činností. Je charakteristické pro dané místo, oblast nebo region v závislosti na geografické poloze. Na změnách energetické bilance celého klimatického systému se přímo nebo nepřímo podílí lidská činnost. Nejedná se jen o emise skleníkových plynů do atmosféry, ale i o jeho působení na ostatní složky systému (PRETEL, 2012). Veličiny, které jsou nejčastěji spojované s klimatem jsou teplota vzduchu, srážky a vítr (HANEL & VIZINA, 2014).

Do klimatického systému zahrnujeme atmosféru, hydrosféru, kryosféru, zemský povrch a biosféru a jejich vzájemné interakce. Klimatický systém se vyvíjí v čase v důsledku vlastní dynamiky a v důsledku působení externích faktorů, jako jsou například vulkanické erupce, proměnlivost přísunu sluneční energie, vliv lidské činnosti, změna složení atmosféry nebo změna využívání krajiny (HANEL & VIZINA, 2014).

Mezi jednotlivými složkami klimatického systému (Obr. 7) dochází k nepřetržité výměně hmoty a energie, příkladem můžou být globální cykly: hydrologický a uhlíkový cyklus. Fyzikální, chemické a biologické procesy, které probíhají v jedné části klimatického systému jsou vzájemně provázané s procesy v ostatních složkách a navzájem se ovlivňují. Klimatický systém ovlivňují i vnější vlivy. Pod vnějším působením si můžeme představit změnu množství dopadající slunečního záření na horní hranici atmosféry (solární konstanta), změnu v množství skleníkových plynů obsažených v atmosféře nebo změnu typu zemského povrchu (zemědělské využívání, odlesňování či zástavba). Pokud změna v jedné části klimatického systému, která je způsobena vnějšími vlivy, vyvolá změnu v jiné části systému a tato pak zpětně působí na první část, charakterizujeme toto jako zpětnou vazbu v klimatickém systému. Pokud je zpětnou vazbou původní působení zesílenou, hovoříme o pozitivní zpětné vazbě, pokud je zeslabeno, zpětná vazba je negativní (PRETEL, 2012).



Obr. 7 Klimatický systém (Klimatický systém Zeme, 2020)

### 3.3.2 Klimatické modely

Porozumění klimatickému systému je problémem celého vědeckého zájmu. V posledních letech vzrostl pocit důležitosti výzkumu modelování klimatického systému. Pohled lidské činnosti měnící atmosférické složení, která ovlivňuje globální a regionální podnebí a přírodní ekosystémy, stimuluje vývoj klimatického systému. Důležitým konceptem při modelování klimatických systémů je pojem hierarchie modelů různých úrovní složitosti, rozměrnosti a prostorového rozlišení (HOUGHTON et al, 1997).

Modely by měly prostřednictvím matematických rovnic dostatečně reálně popsat základní fyzikální a chemické procesy, které probíhají v klimatickém systému. Používají se zejména trojrozměrné cirkulační modely (GCM) (RAIDL & KALVOVÁ, 1998).

Klimatické modely mají dodnes mnoho společného s předpovědními modely počasí a také z nich historicky vycházejí. Na počátku dvacátého století položil Vilhelm Bjerknes teoretické základy modelování klimatu. Zdůraznil, že pokud platí, že přechod stavů atmosféry mezi dvěma časovými okamžiky se řídí fyzikálními zákony, jsou potřeba pouze dvě postačující a nutné podmínky racionálního řešení problematiky předpovědi počasí (klimatu) a to: dostatečně přesná znalost současného stavu atmosféry a dostatečně přesná znalost fyzikálních zákonů, který řídí přechod atmosféry z jednoho stavu do druhého (HANEL & VIZINA, 2014).

V dnešní době se provádějí dva základní druhy experimentů s globálními klimatickými modely. Modely se směřovací vrstvou v oceánu poskytují tzv. rovnovážné výstupy, tedy kdy klimatické charakteristiky se počítají z několikaletých časových řad až po dosažení kvazirovnovážného stavu, a to jak pro kontrolní (1 x CO<sub>2</sub>) klima, tak pro jednorázové zvýšení CO<sub>2</sub> (2 x CO<sub>2</sub>). Při výpočtech se spřaženými modely atmosféry a oceánu se koncentrace CO<sub>2</sub> mění plynule, obvyklý je růst o 1 % ročně (RAIDL & KALVOVÁ, 1998).

Doposud zpracované klimatické modely předpokládají celosvětový růst teploty s celou řadou negativních dopadů, mezi kterými jsou i významné klimatické změny a výskyt v období sucha. Nelze s určitostí říci, zda se tyto modely naplní, ale je potřeba připravit opatření pro řešení zásobování v suchých obdobích (KYNCL & LANGAROVÁ, 2012).

Klimatické modely dělíme podle několika kritérií: počet prostorových dimenzí, počet pospaných fyzikálních procesů, výpočtová složitost a úroveň, na které dochází k zapojení empirických schémat (HANEL & VIZINA, 2014).

### 3.3.2.1 Globální klimatické modely

Globální klimatický model (Global Climate Model) lze charakterizovat jako propojený model oceánu a atmosféry. Zkratka GCM může být zavádějící, jelikož se používá i pro simulace aspektů počasí a dynamiku oceánu (BADER et al, 2008). Hlavním účelem konstrukce klimatických modelů je odhad vlivu možných změn energetické bilance Země na klimatický systém. Hlavním požadavkem na klimatický model je věrohodná simulace jevů důležitých pro lidstvo, tedy simulace srážek, teplot vzduchu nebo směru a síly větru. Je nezbytné reprezentovat přirozenou variabilitu a extrémy řady jevů pro simulaci průměrných charakteristik klimatu. Dále je důležité, aby klimatický model byl schopný vystihnout změny charakteristik klíčových veličin vyvolaných změnami energetické bilance Země (HANEL & VIZINA, 2014).

### 3.3.3 Hydrologické modelování

Zjednodušenou představou složitého hydrologického systému se vzájemnými vazbami mezi proměnlivými veličinami je matematický model srážko-odtokového procesu. Hydrologický systém definujeme jako systém především fyzikálních procesů, které působí na vstupní proměnné za účelem transformace ve výstupní proměnné. Pod hydrologickým matematickým modelem si můžeme představit algoritmus řešení soustavy rovnic, kterou lze popsat strukturu nebo chování povodí (případně lze i obojí) během srážko-odtokového procesu (KULHAVÝ & KOVÁŘ, 2000).

Výpočetní modely a metody dělíme podle celé řady kritérií. Matematických modelů, které lze využít v hydrologii, bylo odvozeno mnoho, a obecně je můžeme rozdělit do tří základních skupin:

- Modely statistické: pravděpodobnostní, stochastické, korelační, regresní
- Modely deterministické: kybernetické (black-box), fyzikálně založené a koncepční

- Modely smíšené – obsahují submodely statistického i deterministického charakteru (Hydrologické modely, 2020).

### 3.3.4 Možné dopady změny klimatu na hydrologický režim v České republice

Výsledky studií, které se zaměřují na klimatickou změnu a její dopady v České republice ukazují, že změny teploty odvozené z regionálních modelů klimatické změny (časový horizont 2085) jsou během roku velmi proměnlivé. Všechny uvažované scénáře se ale shodují v maximální oteplení v srpnu (rozmezí 5-7 °C) a minimální oteplení připadá na období leden až březen (1-4 °C) (NOVICKÝ et al, 2008). Teplota je podstatný faktor ovlivňující hydrologickou bilanci, protože s rostoucí teplotou roste potenciální evapotranspirace. Díky tomu dochází k rychlejšímu úbytku vody z povodí. Pozorovaný růst teplot vede k růstu potenciální evapotranspirace v ročním průměru řádově o 5-10 %, stejné je to pro jarní i letní období. Největší růst evapotranspirace je v zimním období, a to až o více jak 20 % a způsobuje to větší počet dní s kladnými teplotami vzduchu (HANEL et al, 2011).

Na území České republiky se dle různých klimatických modelů nepředpokládá zásadní změna v ročních srážkových úhrnech. Významnou skutečností z hlediska odtoku je předpokládaná změna ročního chodu srážek. Pro odhad změny srážkových úhrnů na našem území je typické výrazné zvýšení srážkových úhrnů v zimních měsících (prosinec až březen) o 20-50 % a naopak výrazné snížení v letních měsících (červen až září) také o 20-50 % (NOVICKÝ et al, 2008).

Průtok poklesne v průběhu roku podle scénářů s výjimkou období prosinec-únor, což je kvůli prosincovému zvýšení srážkových úhrnů a zvýšení teplot do té míry, že na většině modelovaných stanic je záporná teplota (nebo neklesne pod bod mrazu) pouze v lednu nebo únoru. K výraznému zadržení vody ve sněhové pokrývce tak nedojde a projeví se to ve zvýšení odtoku nad současné hodnoty, případně nebude pokles tak výrazný. Z důvodu zvýšené teploty vzduchu, změnou teploty rosného bodu, poklesem srážkového úhrnu a nárůstem evapotranspirace klesá odtok výrazně v období duben až listopad (NOVICKÝ et al, 2008).

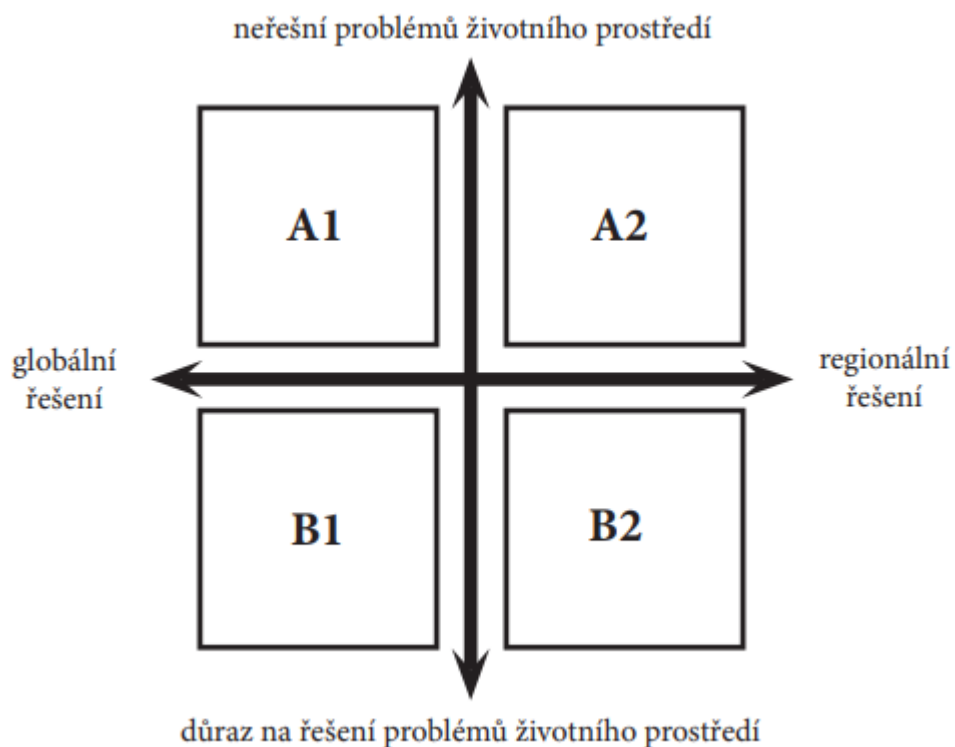
### 3.3.5 Scénáře klimatických změn

Scénáře změny klimatu představují ucelené, systematické a vnitřně stálé popisy měnícího se klimatu. Tyto scénáře budou obvykle použity jako vstup pro hodnocení náchylnosti, dopadů nebo přizpůsobení se změně klimatu. Scénáře změny klimatu jsou nejčastěji, i když ne vždy, konstruovány na základě výsledků z experimentů globálních klimatických modelů (GCM/RCM) (HULME & JENKINS, 1998).

Scénáře klimatických změn čerpají ve většině z pokladů dlouhodobých pozorování a analýz současného stavu. K plánování vodního hospodářství významně přispívá modelování hydrologických procesů v měnících se klimatických podmínkách. Význam takového modelování můžeme uplatnit v oblastech, jako jsou například prognózy sucha nebo dopady klimatických změn na hydrologické procesy v krajině (KYNCL & LANGAROVÁ, 2012).

Jelikož předpověď vývoje komplexního systému je téměř nemožná, byly Mezivládním panelem pro klimatickou změnu v rámci Speciální zprávy o emisních scénářích vytvořeny scénáře produkce skleníkových plynů, které jsou založeny na různých variantách vývoje společnosti. Systém scénářů se skládá ze čtyř hlavních skupin označených jako A1, B1, A2 a B2 (Obr. 8) a jsou charakterizovány následovně:

- SRES A1 – popisuje svět s velmi rychlým růstem ekonomiky a vývojem nových technologií. Země dosáhne maxima počtu obyvatel v polovině tohoto století
- SRES A2 – scénář, který uvažuje růst populace během celého 21. století na počet 15 miliard, ekonomiku zaměřenou spíše regionálně a bez většího důrazu na řešení problémů životního prostředí, základní ideou je spoléhat se sám na sebe a zachovat místní identitu
- SRES B1 – má ideu konvergentního, stmelujícího se světa, počet obyvatel dosáhne maxima v polovině 21. století (8,7 miliard) a poté bude pozvolně klesat na 7 miliard, předpokládá se rychlý rozvoj informatiky, služeb zavádění čistých technologií, klade se důraz na globální řešení ekonomických a sociálních problémů a ochranu životního prostředí, růst hrubého domácího produktu není ústřední záležitostí
- SRES B2 – scénář uvažuje mírnější růst populace než scénář A2 s důrazem na udržitelný rozvoj společnosti, pomalejší je i ekonomický rozvoj a změny v technologiích jsou různorodější než v A1 a B1 (NOVICKÝ et al, 2008).



Obr. 8 Regionální a globální charakter SRES scénářů a jejich důraz na řešení problémů životního prostředí (NOVICKÝ et al, 2008)

V současné době ale IPCC opouští od záměru koordinace emisních scénářů a přenechává to vědecké komunitě, ale sám se snaží proces stimulovat. Aktuálně jsou tak emisní scénáře nahrazeny konceptem scénářů koncentrací, které jsou ale opět založeny na analýze výstupů komplexních socio-ekonomicko-klimatických modelů. Scénáře ale spíše vybírají typické příklady vývoje koncentrací skleníkových plynů, bez přihlídnutí k socio-ekonomickým příčinám, než aby definovaly emise/koncentrace ve vztahu ke konkrétním socio-ekonomickým podmínkám. Tyto nové scénáře označujeme jako RCP (representative concentration pathways – reprezentativní směry vývoje koncentrací) (HANEL & VIZINA, 2014).

### 3.3.5.1 Scénáře RCP (Representative Concentration Pathways)

RCP jsou scénáře koncentrací skleníkových plynů založené na tzv. reprezentativních směrech vývoje koncentrací. Tyto scénáře jsou používané v IPCC AR5. Jedná se o možné směry vývoje koncentrací pro skleníkové plyny a koncentrace aerosolu spolu se změnou využití půdy, které jsou v souladu s širokou škálou výsledků z oblasti klimatu a využívá je komunita pro modelování klimatu. Reprezentativní



směry jsou charakterizované radiačním působením vyprodukovaného do konce 21. století. Radiační působení je teplo, které si spodní vrstva atmosféry uchovává jako důsledek skleníkových plynů, a měří se v jednotkách  $W/m^2$  (JUBB, CANADELL, & DIX, 2013).

Scénáře RCP se skládají z velkého množství čísel, kdy RCP data jsou uvedeny v tabulkách. Pro každou kategorii emisí obsahuje RCP sadu výchozích hodnot a odhadů emisí do roku 2100, definovaných na základě předpokladů o ekonomické aktivitě, zdrojích energie, růstu obyvatelstva a dalších socio-ekonomických faktorů (WAYNE, 2013). Scénáře RCP zkoumají dopady různých politik v oblasti klimatu s cílem umožnit hodnocení dlouhodobých klimatických cílů. Dále umožňují také podrobnější zkoumání role adaptace a dalších integrací vývoje scénářů napříč různými disciplínami, které jsou zapojené do výzkumu klimatu (JUBB, CANADELL, & DIX, 2013).

Pro Pátou hodnotící zprávu Mezivládního panelu pro změny klimatu IPPC byly nadefinovány scénáře vývoje koncentrací skleníkových plynů a využití povrchu, které nazýváme RCP. Označují se podle přibližného celkového radiačního působení v roce 2100 a 1750 a to následovně:

- RCP2.6 –  $2,6 W/m^2$  – výrazné snížení koncentrace  $CO_2$  v atmosféře
- RCP4.5 –  $4,5 W/m^2$  – stabilizace koncentrace  $CO_2$  na nižší úrovni
- RCP6.0 –  $6,0 W/m^2$  – stabilizace koncentrace  $CO_2$  na vyšší úrovni
- RCP8.5 –  $8,5 W/m^2$  – bez omezení emisí (BELDA, PIŠOFT, & ŽÁK, 2015).

### 3.4 Projekce klimatických modelů

Se změnami srážek a teploty do značné míry souvisejí možné změny hydrologického režimu. V širším kontextu můžeme říci, že se v celé Evropě simulace klimatických modelů shodují na růstu teploty, v ročním průměru a v zimě spíše na severu a severozápadě Evropy (do cca 5-6 °C), v létě spíše v jižní Evropě (do cca 5 °C). Pokud budeme uvažovat srážky, hranice mezi zvyšováním a snižováním srážek prochází po cca 50 ° s.š., tedy přes Českou republiku, tudíž klimatické modely nepočítají s výraznými změnami v ročních srážkových úhrnech. Výraznější změny můžeme pozorovat v sezonním rozložení srážek, kdy se zmiňovaná hranice přechodu mezi poklesem v jižní Evropě a růstem v severní Evropě přesouvá k jihu (v zimě) nebo

severu (v létě). Pásmo přechodu je zároveň definováno značnou nejistotou v projekcích modelů a tato nejistota se dále propaguje do hydrologického modelování (HANEL et al, 2011).

Pro projekce změny klimatu v regionálním nebo lokálním měřítku mají výstupy z globálních modelů příliš malou horizontální rozlišovací schopnost. Změny se proto vypočítávají statistickými metodami (RAIDL & KALVOVÁ, 1998).

### **3.4.1 Srážky a teplota**

Scénáře změny klimatu pro Českou republiku počítají s růstem teploty během celého roku. Nejnižší růst teploty je v jarním období, naopak nejvyšší je v zimě. Průměrně teplota roste o trochu více než 1,2 a 3 °C pro časové horizonty 2025, 2055 a 2085. Simulace klimatických modelů předpokládají mírný růst srážek během celého roku mimo letního období, výjimkou je ale horizont 2025, kdy v průměru srážky rostou během celého roku kromě jarního období (HANEL et al, 2011).

### **3.4.2 Hydrologický cyklus**

Pro odhad dopadů klimatické změny na hydrologický režim se používají jednoduché přírůstkové scénáře změn teploty, srážek a relativní vlhkosti vzduchu. Hydrologický model Bilan byl nastaven pro 250 povodí různých velikostí, následně byla modelována hydrologická bilance pro pozorování podmínky a pro podmínky, které jsou ovlivněné změnou klimatu. Základní podstata možných změn hydrologické bilance na našem území vyplývá z projekcí srážek a teplot pro Evropu, tedy postupné zvyšování teplot během celého roku a pokles letních, růst zimních a stagnace ročních srážek. Mezi jevy společné pro velkou řadu simulací klimatických modelů patří nerovnoměrné rozložení projektovaných změn srážek během roku (HANEL et al, 2011).

K růstu srážek dochází v období od začátku podzimu do začátku léta, který je doprovázen řádově stejným růstem územního výparu (díky růstu teploty). Naopak v letním období dochází k poklesu srážek, a to má za následek úbytek zásob vody v povodí. Důležitým faktorem, který ovlivňuje změny odtoku, je posun doby tání v důsledku vyšší teploty vzduchu, a to z března a dubna na leden až únor. Změny

odtoku v období leden až květen jsou dány odlišnou dynamikou sněhové zásoby, změny v letním období určují úbytky srážek (HANEL et al, 2011).

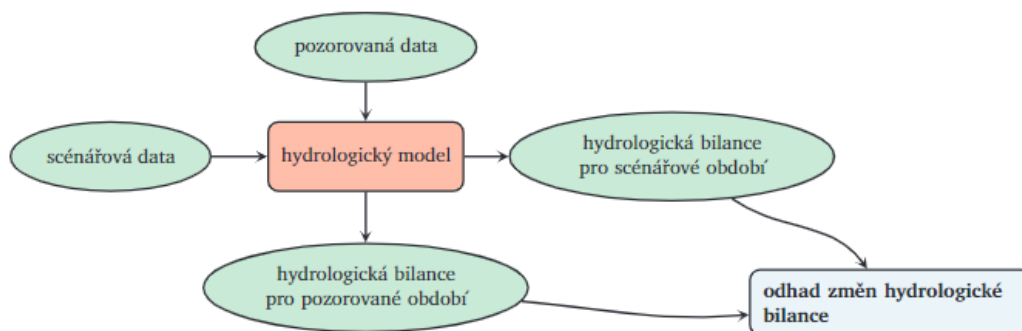
#### **3.4.2.1 Model Bilan**

Model Bilan se používá k simulacím hydrologické bilance na českých i evropských povodí v projektech aplikovaného výzkumu i hydrologických studií (VIZINA, HORÁČEK, & HANEL, 2015). Studie v současnosti využívají scénáře změny klimatu odvozené ze simulací regionálních klimatických modelů. Scénáře změny klimatu se odrážejí v meteorologické časové řadě po dané povodí a následně se používají pro simulaci složek vodního cyklu právě pomocí modelu vodní bilance Bilan. Výsledky studií obecně ukazují, že roční odtok by se mohl výrazně snížit. Zvýšení teplota v zimě by mohla způsobit snížení sněhové zásoby a díky tomu tak dojde ke snížení jarního a letního odtoku, může také dojít k výraznému snížení ukládání podzemní vody. Spolu s modelem Modflow lze model Bilan využít pro simulaci a hodnocení zdrojů podzemních vod (HORÁČEK, KAŠPÁREK, & NOVICKÝ, 2008).

### **3.5 Modelování dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství**

Typický postup modelování dopadů klimatické změny na hydrologický režim povodí (Obr. 9) můžeme shrnout do následujících bodů:

- Zvolený hydrologický model je pro vybrané povodí nakalibrován pomocí pozorovaných dat
- Jsou vytvořeny scénáře změny klimatu pro dané povodí
- Pomocí nakalibrovaného hydrologického modelu a scénářových řad je provedena simulace hydrologické bilance pro scénářové období (HANEL & VIZINA, 2014).



Obr. 9 Schéma hydrologického modelování dopadů změn (HANEL & VIZINA, 2014)

Pokud nemáme k dispozici data pro kalibraci modelu, není možné tento postup sledovat. Je ale možné modelovat dopady změny klimatu pro více scénářů, za účelem postižení nejistot spojených s jejich tvorbou. Konkrétní podoba scénářů, včetně způsobu jejich začlenění do hydrologického modelu, a strategie postižení nejistot jsou do značné míry spojeny s analyzovaným problémem (HANEL & VIZINA, 2014).

### 3.6 Adaptační opatření – možnosti zmírnění dopadů změny klimatu

V souvislosti s nedávným výskytem hydrologických extrémních jevů, mezi které řadíme povodně až už regionální nebo přívalové (1997, 2002, 2009) nebo výrazná období sucha (2003, 2008), jsou otázky klimatických změn podstatnější a dostávají se do popředí, a to hlavně v souvislosti s plánováním potřebných adaptačních opatření (SLÁMOVÁ, MARTÍNKOVÁ, & KRYSANOVA, 2010). Důležitost adaptačních opatření v tomto směru roste právě vzhledem k předpovídání rozsáhlých společenských dopadů a také ve spojení s dlouhodobou politickou strategií Evropské unie. V minulosti byl většinou uplatňován z hlediska vodních zdrojů předpoklad neměnných a stabilních hydrologických podmínek. Pokud ale vezmeme v úvahu možnost klimatické změny, je tento předpoklad dlouhodobě neudržitelný a je potřeba do vodohospodářských metodik zapracovat i předpovídanou vyšší nejistotu včetně odpovídajících adaptačních opatření (MILLY et al, 2008). Otázkou pak zůstává, jak definovat adaptační strategii a konkrétní adaptační opatření na dopady klimatické změny. Nazvou se tak pouze nově definovaná opatření protipovodňové ochrany nebo se zahrnou i kombinace dosud běžně praktikovaných opatření? Je tak potřeba se zabývat otázkou adaptivity opatření důsledněji a zahrnout do nich i neočekávané situace. K řešení problémů v rámci návrhu strategie adaptace je nezbytné zajistit

integraci všech dotčených odvětví s to v rozsahu celého povodí jako nedělitelného celku (SLÁMOVÁ, MARTÍNKOVÁ, & KRYŠANOVÁ, 2010).

Zmírňující opatření, která mohou ovlivnit hydrologický režim a zemědělskou produkci, zahrnují především boj proti odlesňování a ochranu tropických deštných lesů. Jednou z vysoce efektivních cest ke snížení emisí skleníkových plynů je přitom právě zamezení odlesňování. Každý rok dojde k úbytku 36 milionů hektarů pralesů a na emise způsobené odlesňováním tak připadne více než 18 % světových emisí, což je větší podíl než u celosvětového odvětví dopravy. Význam by také měla redukce skotu, který sám přispívá k emisím methanu a spolu s tvorbou pastvin se podílí 15–20 % na celkových emisích skleníkových plynů (STEJSKAL, 2012).

Při návrhu adaptačního opatření je důležité se zaměřit na:

- čeho chceme pomocí adaptačních opatření dosáhnout v jakém časovém výhledu (formulace cílů),
- které typy adaptačních opatření jsou pro dosažení cíle účinná (výběr opatření),
- zda v posuzovaném území jsou přírodní podmínky pro zvolená adaptační opatření,
- jaké jsou reálné předpoklady pro realizaci opatření z hlediska nákladů a majetkoprávních vztahů (HANEL et al, 2011).

### **3.6.1 Opatření v tocích a nivách**

Souborem dílčích opatření jsou přírodě blízké úpravy vodních toků (revitalizace, renaturace) a jejich niv (realizace tůň, mokřadních ploch). Právě tyto opatření slouží v souvislosti s hydrologickým suchem ke třem účelům. Prvním je akumulace vody v podzemní vodě niv, druhým je vytvoření refugií pro vodní biotu a posledním je podpora samočištění (DZURÁKOVÁ et al, 2017).

Revitalizace jsou opatření, která vytváří vodním organismům operativní prostor pro únikovou migraci a refugia pro přežití při výskytu sucha. Dopad na zlepšení fyzikálně-chemických parametrů vodního prostředí se zvyšuje s délkou revitalizačních úprav. Realizace všech typů mokřadních biotopů v krajině má za následek zadržení vody, výpar v místě a rozšíření ploch ohrožených a cenných biotopů. Nejúčinnějším prvkem pro obnovu krátkého vodního cyklu v krajině jsou mokřady, a to z důvodu, že živiny a látky unášené vodou se zde využívají a usazují,

neodcházejí z povodí a recyklují se. Mokřady mají vyrovnávací funkci pro průtok vody a filtrační funkci pro sedimentaci, dále pak pomáhají zmírňovat dopady povodní, zlepšují kvalitu vody ve vodních tocích, zmírňují dopady sucha a redukují proces eroze (DZURÁKOVÁ et al, 2017).

### **3.6.2 Opatření v urbanizovaných územích**

Urbanizace neboli nahrazování přírodních povrchů stavbami způsobují rychlý odvod srážkové vody z měst, obcí a zastavěných ploch (silnice, parkoviště, výrobní a skladové areály). Celkový počet domů v České republice narostl od roku 1970 do roku 2011 o 22 % a tento neřízený proces má tak negativní dopad na rychlost odtoku a vysychání krajiny, ale i na výskyt povodní při extrémních srážkách (STEJSKAL, 2012).

Zvýšení infiltrační schopnosti části urbanizovaných území zatím probíhá jen na malé části urbanizovaných území, která z hlediska větších povodí zabírají jen relativně malou část jejich plochy. Součin těchto faktorů udává závěr, že jejich význam je jen lokální. Podstatně účinnější z hlediska vodohospodářské bilance je srážkovou vodu zachytit a využít než nechat infiltrovat, někde jímat a dopravit zpět a následně využít. V našich podmínkách je zvyklé využití lokálního systému pro akumulaci srážkové vody do nádrží na zavlažování zahrad, případně v menším měřítku na využití na splachování záchodů. Jedním z opatření, které může znatelně přispět ke zmenšení nároků na odběr vody, je přístup označovaný „water harvesting“ (HANEL et al, 2011).

### **3.6.3 Vodohospodářská opatření**

Soubor adaptačních opatření směřuje hlavně k přípravě na změnu hydrologického režimu a ochranu před rostoucím tlakem na vodohospodářství. Hlavní opatření, která jsou definována studiem dopadů klimatické změny nebo Plánem hlavních povodí ČR, jsou například:

- Zvýšení přirozené retenční schopnosti krajiny (podpora plošné rozmanitosti krajiny, zalesňování nebo zatravnění),
- Revitalizace vodních toků a přirozené zpomalení odtoku (včetně přirozeného rozlivu v říčních nivách),
- Intenzivní čištění a využití odpadních vod,

- Snížení spotřeby vody,
- Obnova a budování vodních nádrží (STEJSKAL, 2012).

Základním a efektivním způsobem je využití vody zadržené v nádržích a převody vody mezi povodími. Převody mezi povodími zajišťují přivedení vody z místa, kde je jí dostatek, do místa, kde se jí naopak nedostává (při hydrologickém suchu), nebo mohou také sloužit pro odvedení části povodňového odtoku do toku nebo nádrže, kde nemůže škodit. Převody jsou buď umělými toky, kdy je převáděna voda v říční síti (označujeme jako „kanály“ (Opatovický), „stoky“ (Zlatá stoka), „řeky“ (Nová řeka – Lužnice), nebo dálkové převody vodárenské (například z povodí Želivky do Prahy). Předpokladem pro převod vody pro zajištění odběrů a zlepšení průtoků je, aby převod neovlivnil nepříznivě bilanci povodí, ze kterého je voda odváděna. Řešením tak může být i zřízení nádrže mimo povodí, ve kterém je dostatek vody, a zajištění vody pro převod z této nádrže (HANEL et al, 2011).

#### **3.6.4 Legislativní opatření**

V roce 2002 byla přijata Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES, díky které došlo k přehodnocení uvažování nad hospodařením s vodou a byla zvolena cesta k dlouhodobému udržitelnému hospodaření s důrazem na ochranu vodních zdrojů, jejich jakosti a ochranu souvisejících ekosystémů (VOJÁČKOVÁ, 2019). Základním legislativním dokumentem pro oblast vod je zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), kdy poslední novelou do něj byl vložen i účel zákona přispívat k zajištění zásobování obyvatelstva pitnou vodou. Vodní zákon obecně ukládá povinnost osobám, které nakládají s povrchovými nebo podzemními vodami, dbát o jejich ochranu a zabezpečovat jejich hospodárné a účelné využívání podle podmínek vodního zákona. V případě mimořádné situace, pokud se jedná o přechodný nedostatek vody nebo nelze vodu ve vodní zdroji použít k zásobování, může zasáhnout vodoprávní úřad a na nezbytně nutnou dobu omezit nebo zakázat povolení nakládání s vodami (NIETSCHEOVÁ, 2013).

### 3.7 Existující studie dopadů klimatické změny na zájmové území

Aktuálně se změnám dopadů klimatické změny na zájmovém území věnuje Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., kterým byla provedena zhodnocení očekávaných dopadů scénářů klimatické změny pro oblasti Horní Vltavu, Dolní Vltavu a Berounku. Výsledky vycházejí především z řešení projektu TA02020320 „Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu“ a jeho metodiky „Vyhodnocení možných dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství a při vodohospodářském plánování“ a projektu TA01020508 „Udržitelné využívání vodních zdrojů v podmínkách klimatických změn“. Dále byly použity výsledky projektu „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“ (VIZINA et al, 2019).

Daný projekt se zaměřuje na vyhodnocení změn hydrologické bilance v důsledku změn klimatu modelovaného na základě regionálních klimatických modelů ENSEMBLES, pomocí globálních modelů z projektu CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) a simulací modelů ALADIN-CLIMATE/CZ. Podkladem pro scénáře změny klimatu byly emisní scénáře SRES a scénáře koncentrací RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 a RCP8.5).

Další studie, která se zabývá daným územím, je studie zpracovaná Českým vysokým učením technickým v Praze.

Předmětem je:

- vodohospodářské řešení zásobní funkce,
- prověření velikosti minimálního odtoku z Vltavské kaskády s ohledem na potřeby dolního toku Vltavy a toku Labe pod soutokem s Vltavou, tedy na povolené odběry a vypouštění,
- zhodnocení vlivu snížení hladin zásobního prostoru vodních děl Orlická a Slapy na vhodné plavební podmínky na Vltavské vodní cestě v úseku České Budějovice až VD Slapy,
- vodohospodářské řešení retenční funkce (transformace povodňových vln),
- syntéza všech výstupů – porovnání efektu transformace povodní a dopad snížení zabezpečení minimálního zůstatkového průtoku na režim toků pod Vltavskou kaskádou (ČVUT, 2020).



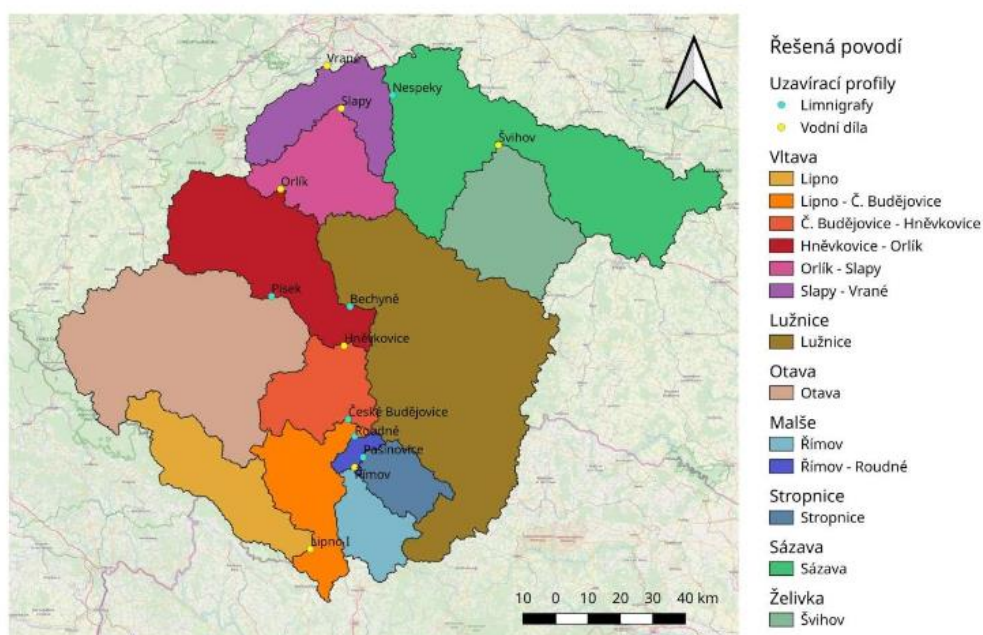
Hlavním cílem této studie je prověření možnosti posílení retenční funkce Vltavské kaskády pomocí variantního řešení strategického řízení (ČVUT, 2020).

## 4. PRAKTICKÁ ČÁST

### 4.1 METODIKA

#### 4.1.1 Vymezení analyzovaného území

Vltavská kaskáda je soubor vodních děl, který se skládá z Lipna I (říční kilometr 329,543), Lipna II (říční km 319,108), Hněvkovic (říční km 210,390), Kořenska (říční km 200,405), Orlíka (říční km 144,650), Kamýka (říční km 134,730), Slap (říční km 91,610), Štěchovic (říční km 84,318) a Vraného (říční km 71,325). Pojem kaskáda vodních děl se definuje pro soustavu vodních děl, kde konec vzduť nádrže nižšího vodního díla je u paty vodního díla vyššího. Toto platí pro vodní díla od Vraného po konec vzduť Hněvkovic. Mezi koncem vzduť Hněvkovic a patou VD Lipna II je přibližně 90 km toku, který je upraven jezy a až do Českých Budějovic (říční km 239,600) plní funkci vodní cesty, ale jezové zdrže na tomto úseku se za části Vltavské kaskády nepovažují. Za zájmové území tak považujeme úsek Vltavy od Českých Budějovic po hráz vodního díla Vrané (Obr. 10).



Obr. 10 Lokace zájmového území

#### 4.1.2 Analyzovaná data

Data byla získána od Českého hydrometeorologického ústavu pro projekt TAČR TA02020320 „Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu“ a jeho metodiky „Vyhodnocení možných dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství a při vodohospodářském plánování“ a projektu TA01020508 „Udržitelné využívání vodních zdrojů v podmínkách klimatických změn“. Jedná se o pozorovaná data v časovém horizontu 1961–2018.

Datový soubor obsahuje informace o průměrných srážkách a teplotách pro každý měsíc a pro celé časové období 1961-2018 pro jednotlivá řešená povodí.

U jednotlivých povodí byla následně provedena analýza vývoje srážek a teploty od roku 1961 po rok 2018. Byl také zanalyzován vývoj trendu a určení, zda vývoj je rostoucí nebo klesající a zda je statisticky významný či nevýznamný.

Pro veličiny průměr srážek, variabilita srážek, změna průměrné teploty a změna směrodatné odchylky byly vytvořeny scénáře RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) pro vzdálenější budoucnost (období 2070-2100) 5ti globálních klimatických modelů z projektu CMIP5 (CanESM2, GFDL-CM3, HadGEM2, MPI-ESM-LR, NorESM1-M) a výstupy byly analyzovány pro 7 denní periodu.

- CanESM2 je kanadský model, který se používá ke studiu změny klimatu a proměnlivosti a k pochopení různých procesů, kterými se řídí klimatický systém. Používá se také pro kvantitativní projekce budoucích dlouhodobých změn klimatu a stále častěji k vytváření inicializovaných předpovědí o klimatu v časovém měřítku ročních období po desetiletí (Climate Models, 2020).
- GFDL-CM3 jsou modely, které se používají ke zkoumání rozsahu, v jakém mohou pozorované změny klimatu být způsobeny přírodními příčinami (slunce, sopečná aktivita) nebo mohou být přičítány lidským činnostem (emise skleníkových plynů nebo využívání půdy). Podporují přesnější predikci jevů v atmosféře, oceánech a souši během sezonních, dekádních a stoletých výročích. Hlavní vývojové úsilí pro model CM3 bylo zaměřeno na složku atmosféry (GFDL Models, 2020).
- HadGEM2 je model systému Země, který byl použit Met Office Hadley Center pro stoleté simulace CMIP5. Unifikovaný model je používán

řadou institucí po celém světě pro operační předpovědi počasí i pro výzkum klimatu (HadGEM2, 2020).

- MPI-ESM-LR je tradiční model Meteorologického Institutu Max Planck. Spojuje atmosféru, oceán a povrch půdy výměnou energie, hybnosti vody a oxidu uhličitého. Je založen na složkách ECHAM6 pro atmosféru a MPIOM pro oceán (MPI-ESM, 2020).
- NorESM1-M je norský klimatický systém. Modely NorESM jsou založeny na modelu komunitního klimatického systému verze 4 (Community Climate System Model version 4 – CCSM4). NorESM1-M má horizontální rozlišení přibližně 2 ° pro složky atmosféry a půdy a 1 ° pro složky oceánu a ledu (BENTSEN et al, 2013).

Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) byl založen za účelem studie a vzájemného porovnávání klimatických simulací s globálními modely (MEEHL et al, 2000). Fáze CMIP5 byla zahájena v roce 2008 s cílem vytvoření rámce pro koordinaci experimentů s klimatickým modelováním a se zaměřením hlavně na Pátou hodnotící zprávu IPPC (STOCKER et al, 2013). CMIP5 modely využívají hlavně scénáře koncentrací RCP. Celý soubor modelů je jedinečný svou velikostí, skládá se z dat desítek GCM z mnoha institucí (HANEL, 2014).

Dále byla provedena analýza pozorovaných dat odtoků získaných z projektu TAČR a porovnána s globálními klimatickými modely CMIP5 a následně pomocí modelu Bilan vyhodnoceny potenciální změny hydrologického režimu pro období 2070-2100, tedy vzdálenější budoucnost.

Pomocí funkcí programu R, jeho doplňkových knihoven jako například data.table, ggplot2, bilan, byla data zpracována a upravena do publikovatelné podoby.

### **4.1.3 Metody vyhodnocení analyzovaných dat**

#### **4.1.3.1 Regresní analýza**

Metody regresní analýzy jsou používány v situacích, kdy se vyjadřuje závislost určité kvantitativní (spojité) proměnné na jedné nebo více dalších kvantitativních proměnných, tzv. regresorech. Popsání této závislosti pomocí vhodného matematického modelu je cílem regresní analýzy. Podstatou řešení regrese je stanovení statistické významnosti modelu. Statistická významnost byla určena na základě p-hodnoty.

Nejdříve je nutné stanovit hladinu významnosti, pro tuto práci byla zvolena  $\alpha = 0,1$ , na základě které může dojít ke dvěma situacím:

- p-hodnota je menší než hladina významnosti  $\alpha$ , hodnota je statisticky významná
- p-hodnota je větší než hladina významnosti  $\alpha$ , hodnota není statisticky významná

Procentuální změna byla počítána na základě získaných dat z programu R (slope a intercept) a to podle vzorce:

$$x = \frac{\text{slope} + \text{intercept}}{\text{intercept}} \cdot 100 [\%]$$

#### 4.1.3.2 Model Bilan

Model Bilan simuluje časové řady měsíční potenciální evapotranspirace pro dané povodí. Vstupními daty jsou pro vypočtení hydrologické bilance měsíční řady srážek na povodí a teploty vzduchu. Ke kalibraci modelu se používají simulované a pozorované měsíční řady odtoku (Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2015).

Model simuluje celkový odtok  $RM(i)$  jako součet tří složek:

$$RM(i) = DR(i) + I(i) + BF(i)$$

kde  $DR(i)$ ,  $I(i)$  a  $BF(i)$  jsou přímý odtok, hypodermický odtok a základní odtok.

Složka  $DR(i)$  celkové odtoku se skládá z letního povrchového odtoku a té části hypodermického odtoku, která spolu s povrchovým odtokem odtéká tak rychle, že neovlivňuje hydrologickou bilanci a ani není ve významnější míře dostupná pro výpar. Letní přímý odtok způsobují deště s velkou intenzitou.

Hypodermický odtok  $I(i)$  se tvoří ve všech ročních obdobích z přebývající vody v nenasycené zóně. Předpokládá se, že tato složka odtoku zahrnuje také povrchový odtok, pokud nastává v zimě nebo během období tání sněhu.

Základní odtok  $BF(i)$ , u kterého je doba zdržení na povodí delší než u ostatních složek odtoku, je tvořen odtokem ze zásoby podzemní vody (Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2015).

### 4.1.3.3 Pokročilá přírůstková metoda

Pro snadnou aplikaci pokročilé přírůstkové metody (ADC – Advanced Delta Change) se používají data a R skripty poskytnuté Královským nizozemským meteorologickým institutem (KNMI). Přírůstková metoda spočívá v transformaci pozorovaných řad tak, aby změna mezi transformovanou a původní časovou řadou odpovídala změně v klimatickém modelu mezi zvolenými obdobími. ADC metoda umožňuje zahrnout do transformace i změny variability, tedy že extrémny se mohou měnit jinak než průměr. Při odvození změn srážek z klimatického modelu ADC metoda uvažuje i systematické chyby simulace (HANEL, 2014).

Srážky jsou transformovány pomocí vztahu:

$$P^* = \begin{cases} aP^b & \text{pro } P^O < P_{90}^O \\ \frac{E^F}{E^C} (P^O - P_{90}^O) + a(P_{90}^O)^b & \text{pro } P^O > P_{90}^O \end{cases}$$

kde  $P^*$  jsou transformované srážky,  $P$  pozorované srážky,  $P_{90}$  je 90 % kvantil srážek, indexy  $O$ ,  $C$  a  $F$  indikují pozorovaná data, GCM data pro kontrolní období a GCM data pro scénářová období.  $a$  a  $b$  jsou transformační parametry, které jsou odvozeny pro 5denní bloky, což zaručuje sezónní variabilitu změn (HANEL, 2014).

Teploty jsou transformovány v ADC metodě následovně:

$$T^* = \frac{\sigma^F}{\sigma^C} (T - \bar{T}^O) + \bar{T}^O + \bar{T}^F + \bar{T}^C$$

kde  $T^*$  je transformovaná teploty,  $\bar{T}^O$ ,  $\bar{T}^F$  a  $\bar{T}^C$  je průměrná měsíční teplota pro pozorovaná data, GCM kontrolní a scénářová období a  $\sigma^C$  a  $\sigma^F$  jsou směrodatné odchylky denní teploty pro kontrolní a scénářové období v GCM (HANEL, 2014).

Následné výpočty jsou dle rovnic uvedených v publikaci HANEL (2014).

#### 4.1.4 Program R

Program R je prostředí a jazyk používaný pro statistické výpočty a grafiku. R poskytuje širokou škálu statistických (lineární a nelineární modelování, analýza časových řad, klasické statistické testy) a grafických metod. Silnou stránkou R je snadnost, s jakou lze vytvářet grafy (včetně matematických vzorů a symbolů, pokud je to třeba) (R Project, 2020).

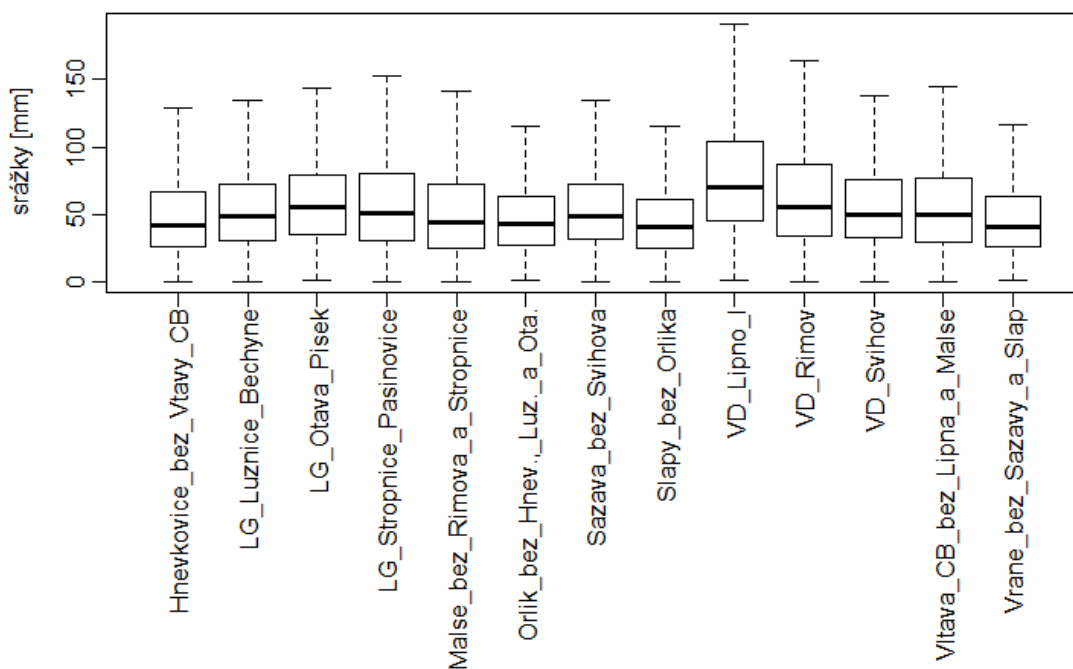
Prostředí R je integrovaná sada softwarových příslušenství sloužící pro manipulaci s daty, výpočty a grafické zobrazení. Mezi to se zahrnuje:

- efektivní možnosti pro zpracování a ukládání dat,
- sada operátorů pro práci s datovými poli, zejména maticemi,
- velká, ucelená a integrovaná sbírka dílčích nástrojů pro analýzu dat,
- grafická příslušenství pro analýzu dat a jejich zobrazení na obrazovce nebo v tištěné podobě,
- dobře vyvinutý, jednoduchý a efektivní programovací jazyk (R Project, 2020).

## 5. VÝSLEDKY

Analýzou dat za období 1961-2018 pro jednotlivé stanice byl získán přehled vývoje srážek a teploty. Pro lepší grafickou vizualizaci získaných dat byl zvolen typ grafu boxplot, který umožňuje posouzení dat pomocí kvartilů. Boxplot se skládá z dolního kvartilu a horního kvartilu a mezi nimi se nachází medián (široká čára). Medián je hodnota, která se nachází přesně uprostřed všech hodnot seřazených do neklesající posloupnosti.

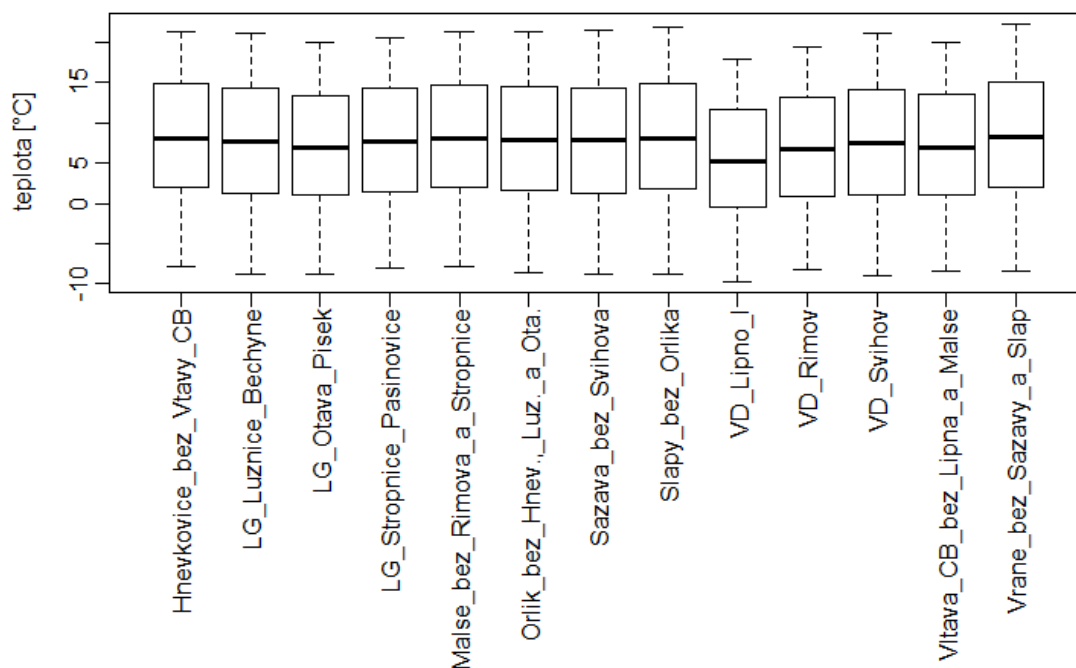
Na Obr. 11 je znázorněno porovnání režimu srážek pro jednotlivá povodí po celé analyzované období.



Obr. 11 Porovnání režimu srážek pro jednotlivá povodí

Na Obr. 12 naleznete porovnání režimu teplot pro jednotlivá povodí během celého analyzovaného období.





Obr. 12 Porovnání režimu teplot pro jednotlivá povodí

V Tab. 2 naleznete výsledky regresní analýzy dlouhodobých lineárních trendů procentuální změny měsíčních úhrnů srážek pro jednotlivé stanice analyzované pro každý měsíc a také za celý rok. V tabulce je vidět, zda se jedná o trend rostoucí (kladné hodnoty) nebo klesající (záporné hodnoty) a zda je statisticky významný či nevýznamný.

Také v Tab. 3 jsou znázorněny výsledky regresní analýzy trendů, ale v tomto případě se jedná o teploty pro jednotlivé stanice.

Tab. 2 Procentuální změna srážek pro jednotlivé stanice a významnost trendu (statisticky významný trend je podbarvený)

| Stanice                              | Měsíce |        |        |         |        |        |          |        |       |        |          |          | Celý rok |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|--------|-------|--------|----------|----------|----------|
|                                      | Leden  | Únor   | Březen | Duben   | Květen | Červen | Červenec | Srpen  | Září  | Říjen  | Listopad | Prosinec |          |
| Hněvkovice bez Vltavy CB             | 16,280 | -4,911 | 4,826  | -10,482 | 2,132  | -1,459 | 10,310   | 4,404  | 4,806 | 10,102 | -4,564   | 3,630    | 3,103    |
| LG Otava Pisek                       | 14,467 | -1,100 | 3,572  | -8,264  | 0,477  | -1,029 | 9,075    | 0,655  | 3,041 | 9,940  | -2,850   | 4,043    | 2,623    |
| LG Lužnice Bechyňe                   | 15,410 | -1,722 | 7,483  | -8,172  | -2,514 | -4,127 | 8,374    | 2,421  | 8,528 | 8,120  | -0,523   | 1,527    | 2,654    |
| LG Stropnice Pasinovice              | 20,476 | -1,845 | 9,544  | -10,408 | 2,325  | -4,435 | 7,372    | 2,080  | 7,711 | 11,733 | -2,866   | 4,842    | 3,076    |
| Malše bez Řimova a Stropnice         | 21,284 | -5,188 | 9,254  | -12,771 | 2,576  | 7,274  | 7,140    | 1,932  | 6,069 | 11,388 | -5,597   | 4,640    | 1,810    |
| Orlik bez Hněvkovic, Lužnice a Otavy | 16,354 | -4,634 | 4,804  | -10,391 | 3,479  | -1,893 | 11,554   | 4,039  | 1,976 | 8,950  | -0,124   | 4,214    | 3,512    |
| Sázava bez Švihova                   | 10,072 | -1,595 | 4,507  | -6,723  | -4,949 | -6,158 | 8,312    | 0,067  | 8,618 | 6,171  | -3,521   | 2,351    | 1,263    |
| Slapy bez Orlíka                     | 13,808 | -4,655 | 4,507  | -11,513 | -0,267 | -3,804 | 7,731    | 3,149  | 3,807 | 7,541  | -2,748   | 3,497    | 1,815    |
| VD Lipno I                           | 14,764 | -1,017 | 7,254  | -5,706  | 4,005  | -1,377 | 11,424   | 1,129  | 4,621 | 8,088  | -5,174   | -0,740   | 3,367    |
| VD Řimov                             | 14,790 | -6,890 | 5,043  | -11,429 | 1,241  | -6,663 | 6,681    | -0,806 | 5,527 | 8,382  | -5,093   | -0,031   | 0,633    |
| VD Švihov                            | 11,458 | -0,950 | 6,003  | -3,669  | -5,293 | -2,342 | 7,630    | 1,034  | 9,199 | 7,961  | -1,277   | 2,145    | 2,466    |
| Vltava CB bez Lipna a Malše          | 17,191 | -4,909 | 6,084  | -9,580  | 4,308  | -3,668 | 12,461   | 3,196  | 4,744 | 11,646 | -6,286   | 2,692    | 3,375    |
| Vrané bez Sázavy a Slap              | 12,408 | -2,325 | 3,343  | -12,652 | -3,852 | -2,816 | 7,989    | 1,614  | 2,125 | 7,943  | -1,663   | 7,590    | 1,435    |

Tab. 3 Změna teplot [ $^{\circ}\text{C}/10$  let] pro jednotlivé stanice a významnost trendu (statisticky významný trend je podbarvený)

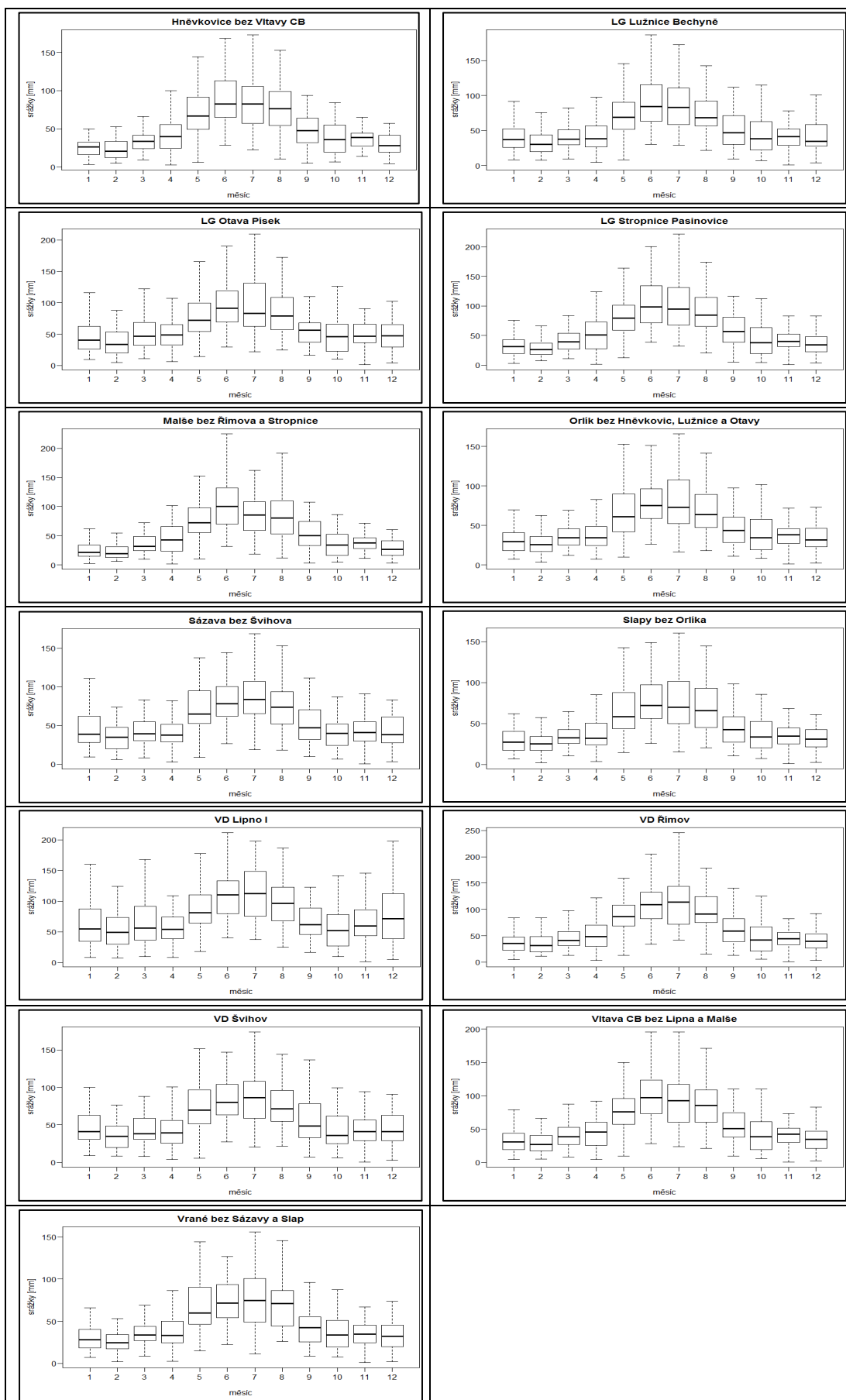
| Stanice                              | Měsíce |       |        |       |        |        |          |       |        |       |          |          | Celý rok |
|--------------------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|----------|-------|--------|-------|----------|----------|----------|
|                                      | Leden  | Únor  | Březen | Duben | Květen | Červen | Červenec | Srpen | Září   | Říjen | Listopad | Prosinec |          |
| Hněvkovice bez Vltavy CB             | 0,460  | 0,216 | 0,335  | 0,402 | 0,438  | 0,375  | 0,458    | 0,485 | 0,112  | 0,204 | 0,254    | 0,474    | 0,365    |
| LG Otava Písek                       | 0,486  | 0,216 | 0,351  | 0,415 | 0,444  | 0,363  | 0,489    | 0,553 | 0,144  | 0,184 | 0,297    | 0,462    | 0,330    |
| LG Lužnice Bechyně                   | 0,410  | 0,161 | 0,293  | 0,359 | 0,437  | 0,364  | 0,444    | 0,452 | 0,062  | 0,147 | 0,209    | 0,442    | 0,382    |
| LG Stropnice Pasinovice              | 0,420  | 0,189 | 0,300  | 0,377 | 0,448  | 0,376  | 0,456    | 0,454 | 0,058  | 0,169 | 0,219    | 0,450    | 0,341    |
| Malše bez Říмова a Stropnice         | 0,447  | 0,224 | 0,345  | 0,431 | 0,484  | 0,407  | 0,480    | 0,497 | 0,098  | 0,213 | 0,232    | 0,476    | 0,376    |
| Orlík bez Hněvkovic, Lužnice a Otavy | 0,518  | 0,203 | 0,332  | 0,376 | 0,423  | 0,341  | 0,448    | 0,458 | 0,101  | 0,168 | 0,266    | 0,457    | 0,356    |
| Sázava bez Švihova                   | 0,509  | 0,219 | 0,317  | 0,389 | 0,440  | 0,342  | 0,510    | 0,546 | 0,143  | 0,153 | 0,324    | 0,461    | 0,378    |
| Slapy bez Orlika                     | 0,502  | 0,209 | 0,306  | 0,370 | 0,410  | 0,315  | 0,410    | 0,458 | 0,075  | 0,126 | 0,259    | 0,429    | 0,338    |
| VD Lipno I                           | 0,244  | 0,048 | 0,181  | 0,256 | 0,396  | 0,311  | 0,338    | 0,297 | -0,092 | 0,058 | 0,143    | 0,332    | 0,225    |
| VD Římov                             | 0,287  | 0,079 | 0,191  | 0,266 | 0,389  | 0,337  | 0,400    | 0,339 | -0,073 | 0,049 | 0,135    | 0,349    | 0,244    |
| VD Švihov                            | 0,499  | 0,240 | 0,337  | 0,402 | 0,438  | 0,364  | 0,497    | 0,554 | 0,126  | 0,131 | 0,345    | 0,477    | 0,383    |
| Vltava CB bez Lipna a Malše          | 0,373  | 0,169 | 0,289  | 0,390 | 0,507  | 0,458  | 0,504    | 0,482 | 0,072  | 0,200 | 0,222    | 0,417    | 0,355    |
| Vrané bez Sázavy a Slap              | 0,521  | 0,234 | 0,332  | 0,411 | 0,451  | 0,344  | 0,474    | 0,491 | 0,104  | 0,140 | 0,281    | 0,465    | 0,369    |

Obr. 13 představuje souhrn jednotlivých stanic a přehled ročního chodu srážek pro jednotlivé měsíce v roce, tedy jedná se o všechny měsíce ledny, únorů atd., z pozorovaného období. Kdy opět široká čára v boxplot grafu představuje medián.

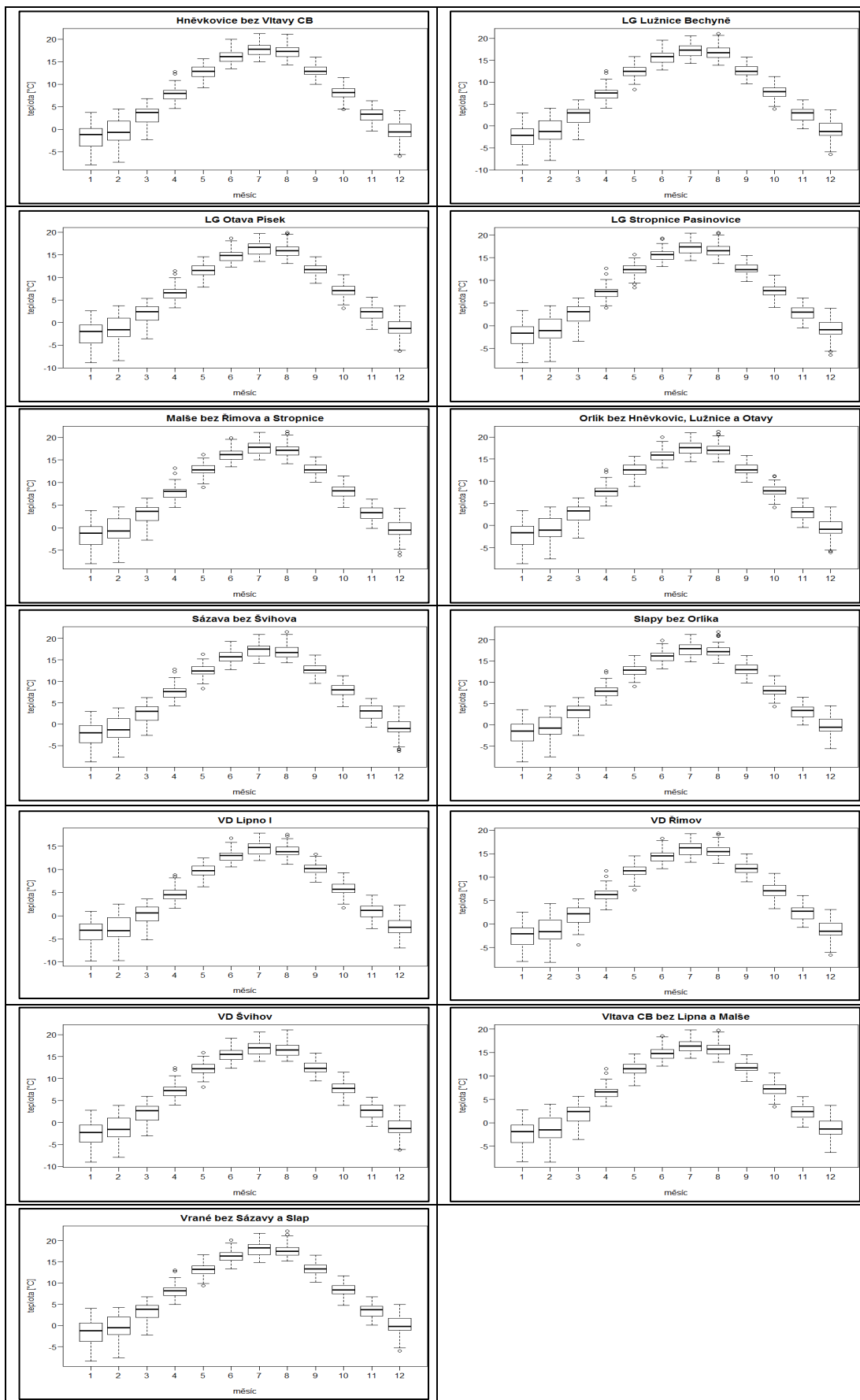
Oproti tomu Obr. 14 znázorňuje souhrn jednotlivých stanic a přehled chodu teplot pro jednotlivé měsíce v roce za celé pozorované období.

Na Obr. 15 je vidět vývoj srážek za pozorované období 1961-2018 pro jednotlivá analyzovaná stanice, zároveň jsou grafy proloženy křivkou trendu.

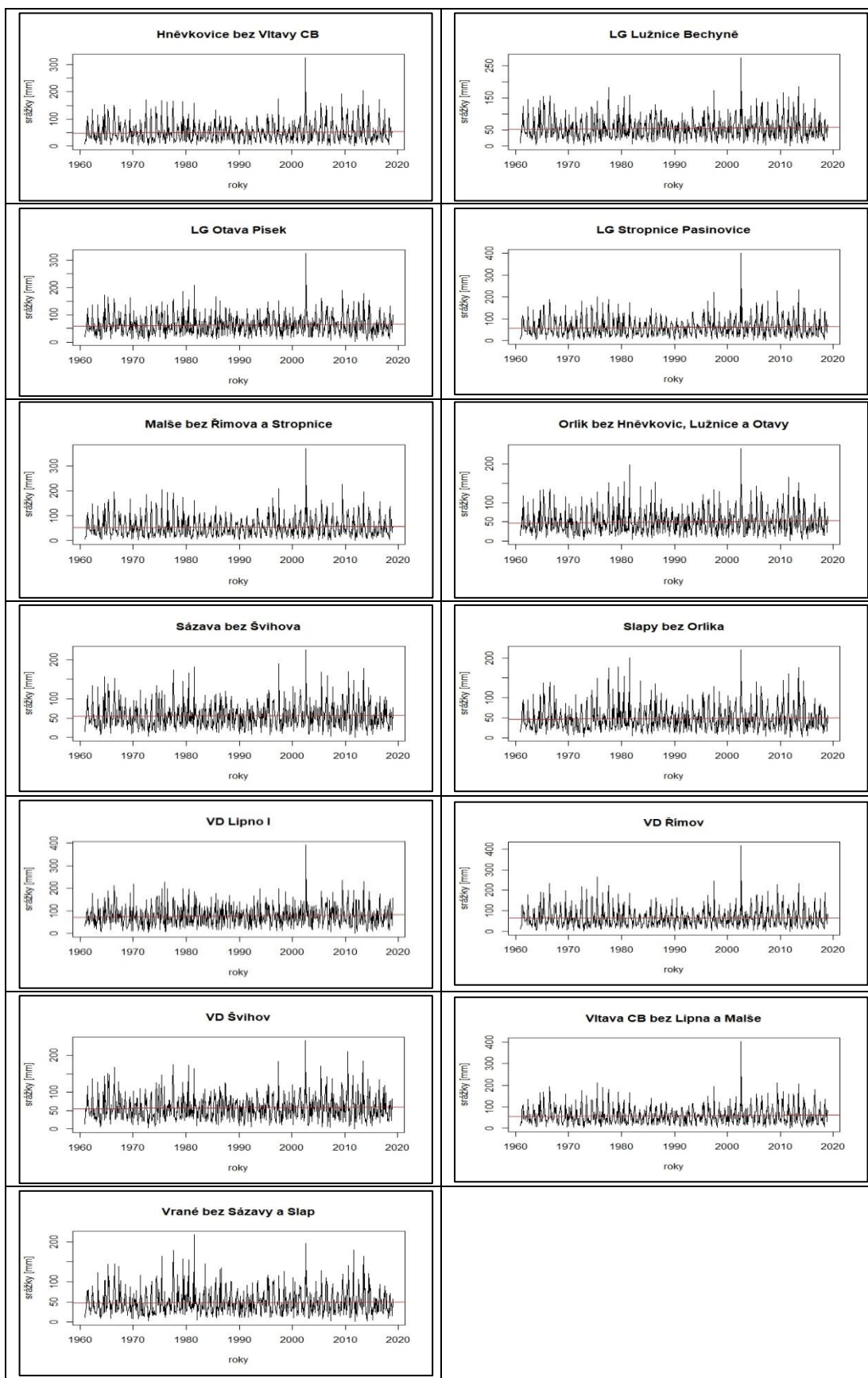
Vývoj teplot jednotlivých stanic pro období 1961-2018 je znázorněn na Obr. 16.



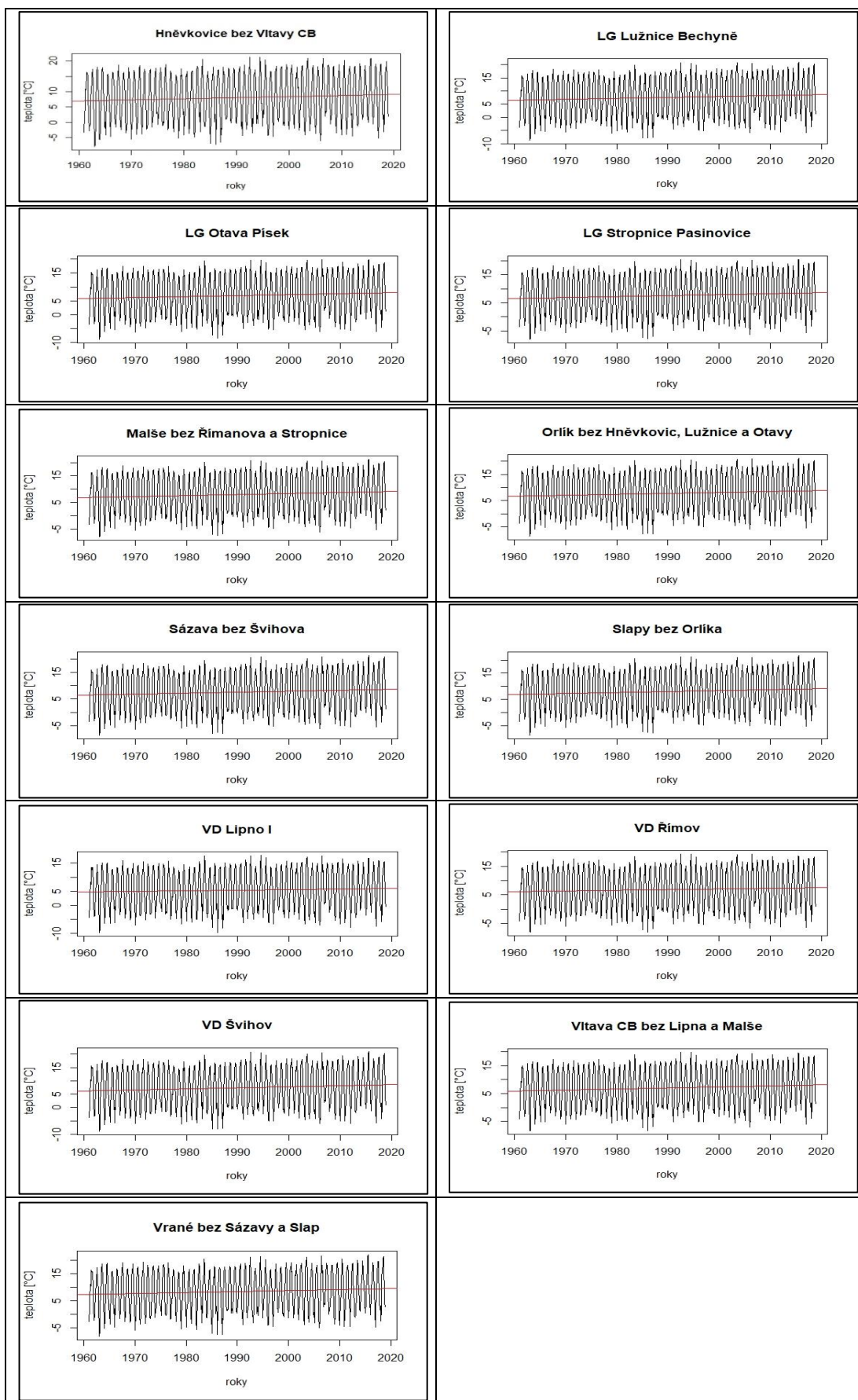
Obr. 13 Roční chod srážek (variabilita v jednotlivých měsících)



Obr. 14 Roční chod teplot (variabilita v jednotlivých měsících)

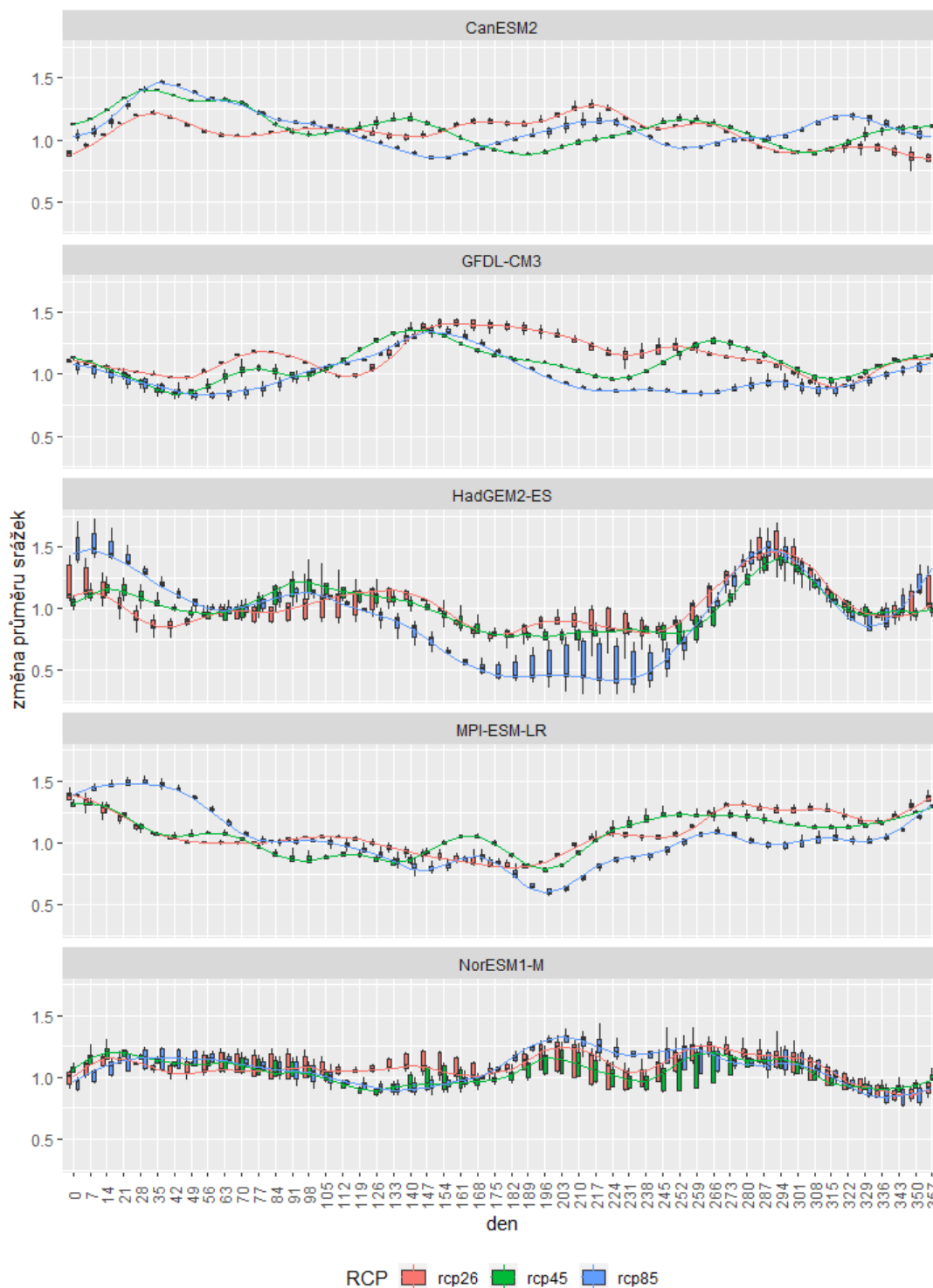


Obr. 15 Vývoj srážek za období 1961-2018

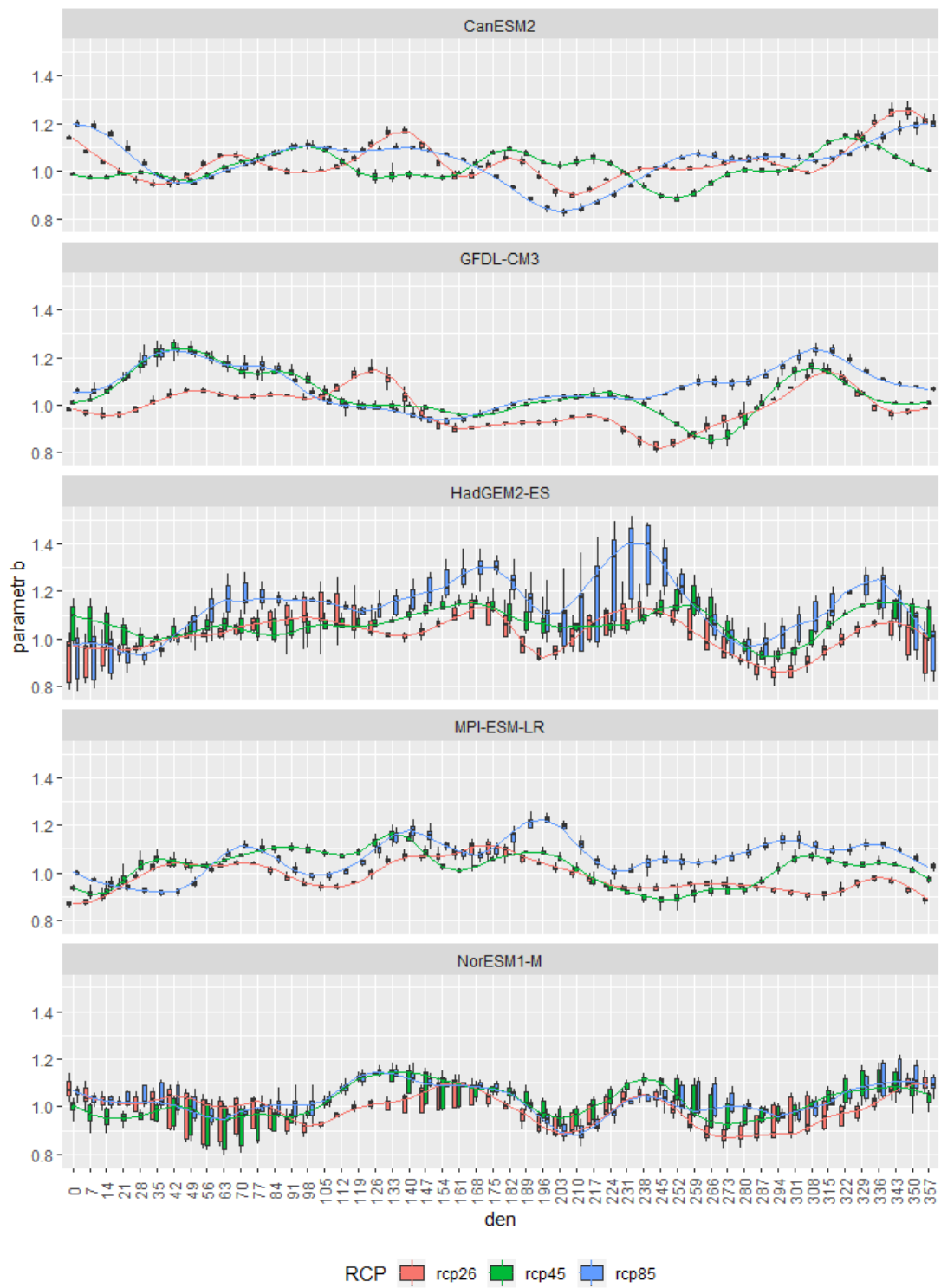


Obr. 16 Vývoj teploty za období 1961-2018

Scénáře RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.6) pro vzdálenější budoucnost (2070-2100) 5ti klimatických modelů (CanESM2, GFDL-CM3, HadGEM2, MPI-ESM-LR, NorESM1-M) byly vytvořeny pro veličiny změna průměru srážek (Obr. 17), variabilita srážek - parametr b z pokročilé přírůstkové metody – CMIP5 (Obr. 18), změna průměrné teploty (Obr. 19) a změna směrodatné odchylky (Obr. 20).

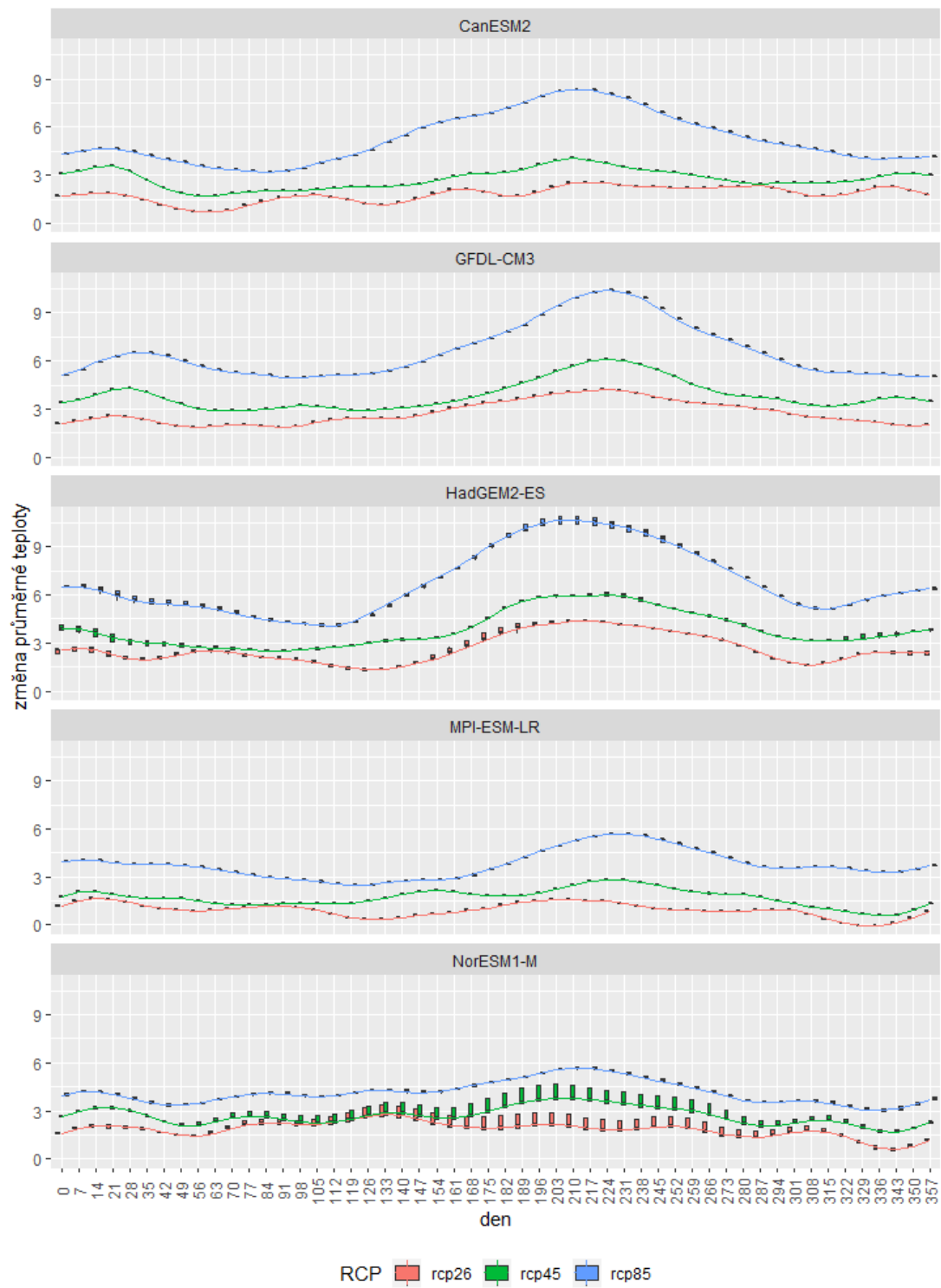


Obr. 17 Scénáře RCP klimatických modelů pro změnu průměrných srážek

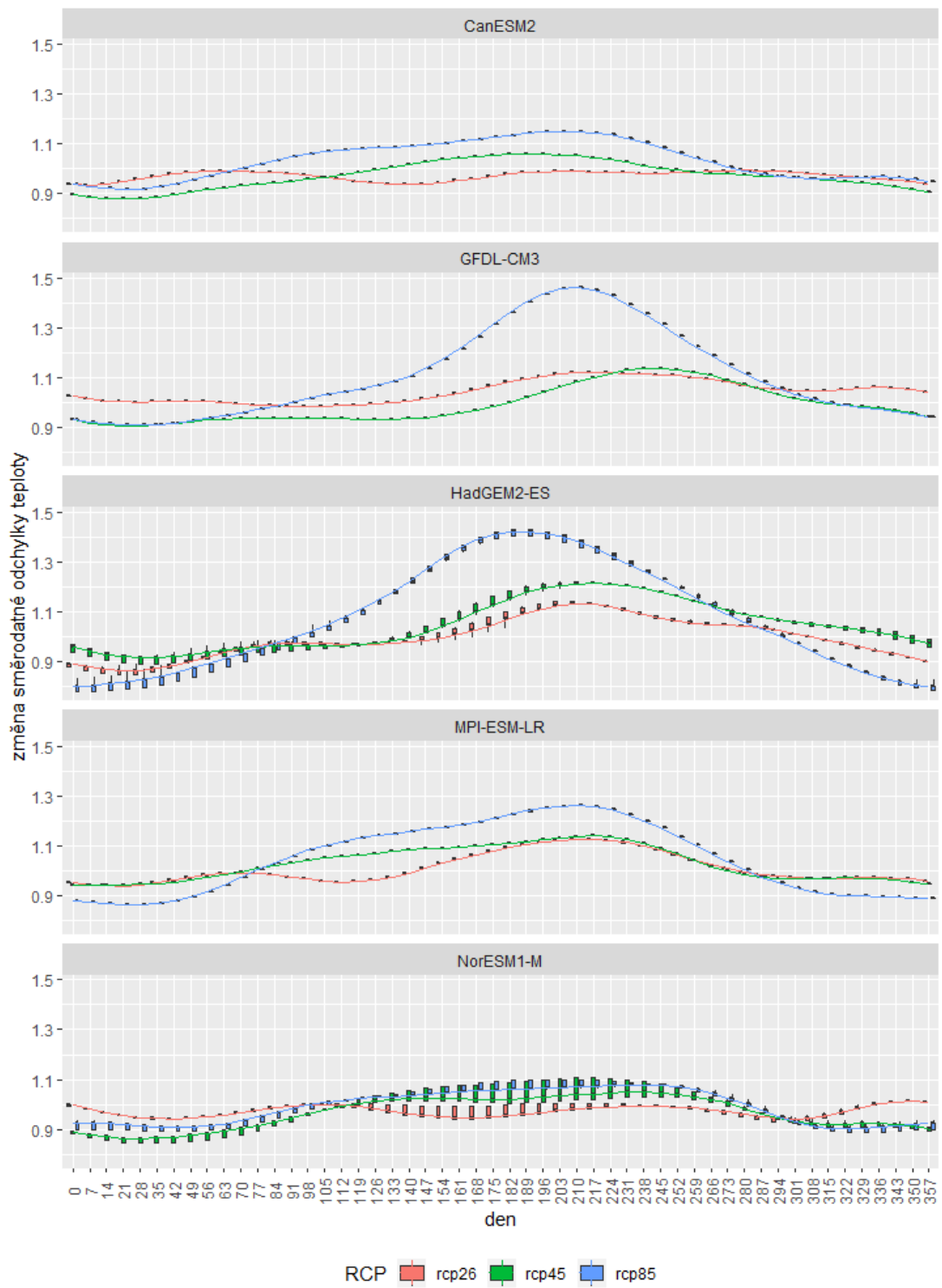


Obr. 18 Scénáře RCP klimatických modelů pro variabilitu srážek





Obr. 19 Scénáře RCP klimatických modelů pro změnu průměrné teploty



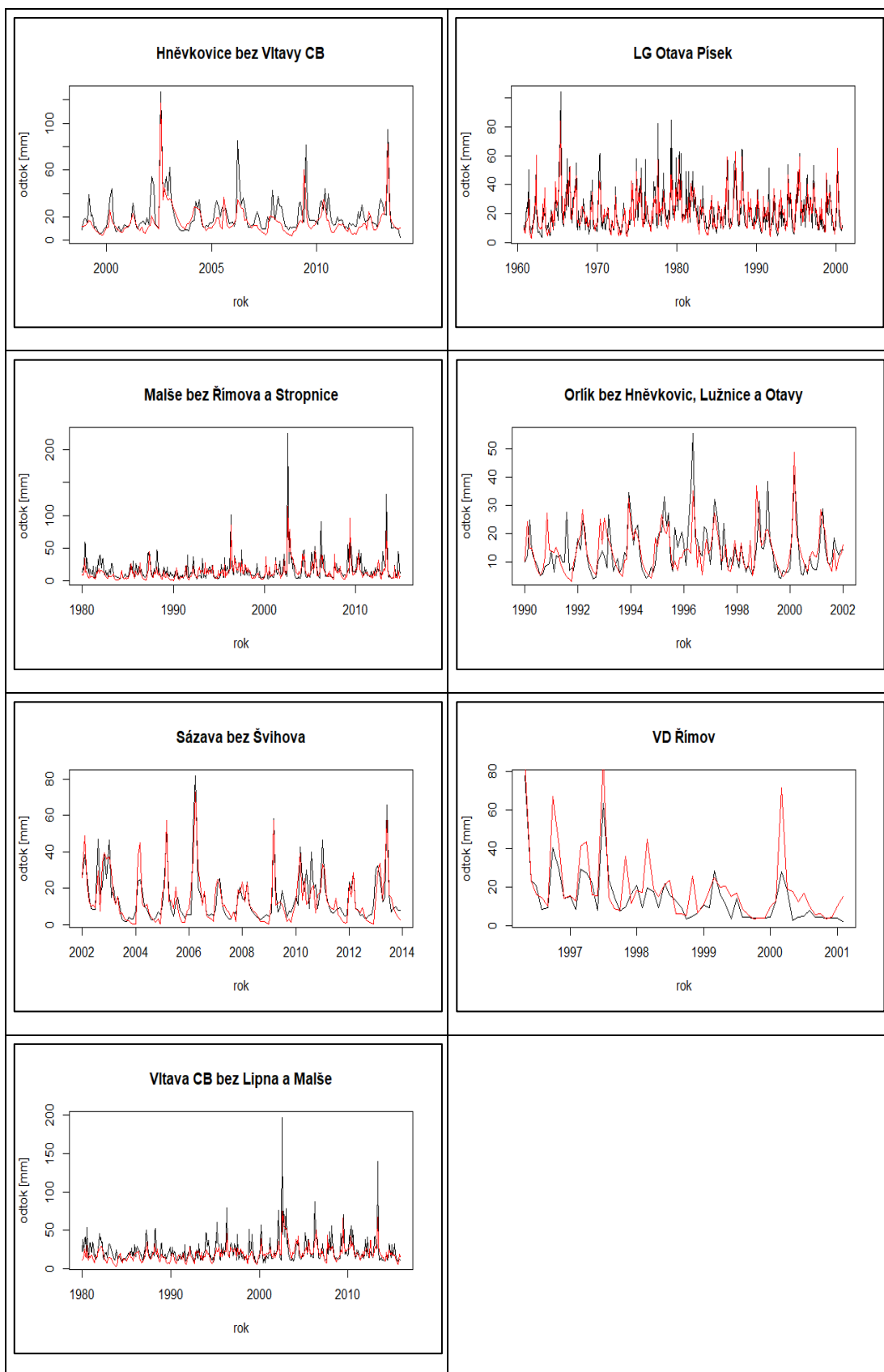
Obr. 20 Scénáře RCP klimatických modelů pro změnu směrodatné odchylky teploty

Byla provedena analýza a vyhodnocení pozorovaných dat odtoků získaných od Českého hydrometeorologického ústavu a následně byla pozorovaná data porovnána s hydrologickými daty.

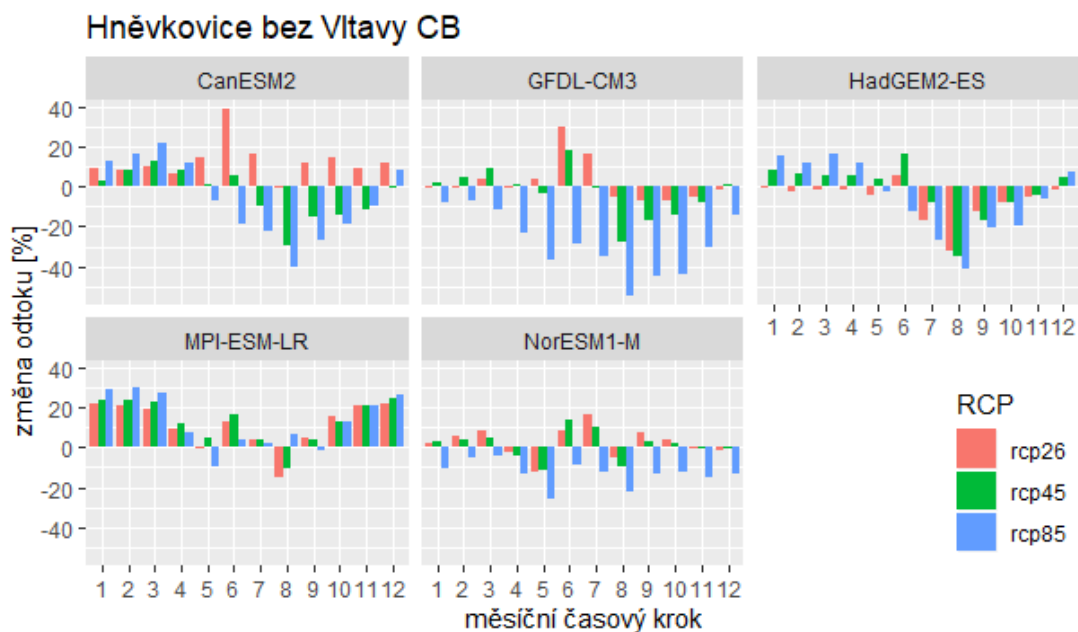
Obr. 21 znázorňuje grafy jednotlivých povodí znázorňující porovnání pozorovaných dat odtoků s hydrologickými daty. Černě je vždy znázorněn pozorovaný odtok a červeně hydrologická data.

Pomocí modelu Bilan byly vyhodnoceny potenciální změny hydrologického režimu pro vzdálenější budoucnost (období 2070-2100).

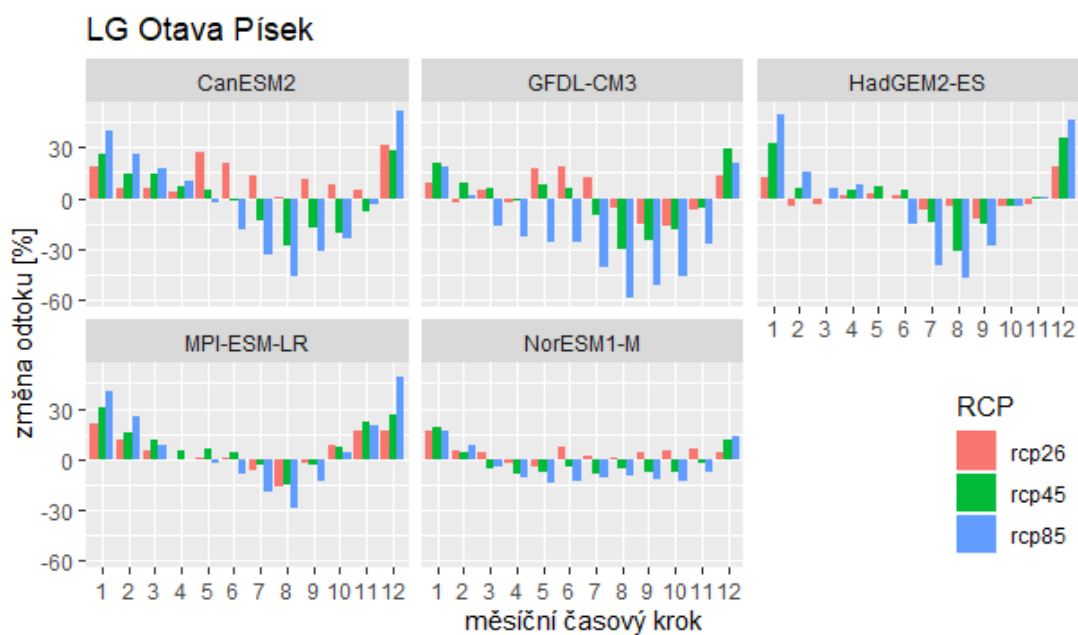
Obr. 22, Obr. 23, Obr. 24, Obr. 25, Obr. 26, Obr. 27 a Obr. 28 představují změnu odtoku [%] v měsíčním časovém kroku RCP scénářů 5ti globálních klimatických modelů.



Obr. 21 Porovnání pozorovaných dat (černě) s hydrologickými daty (červeně)

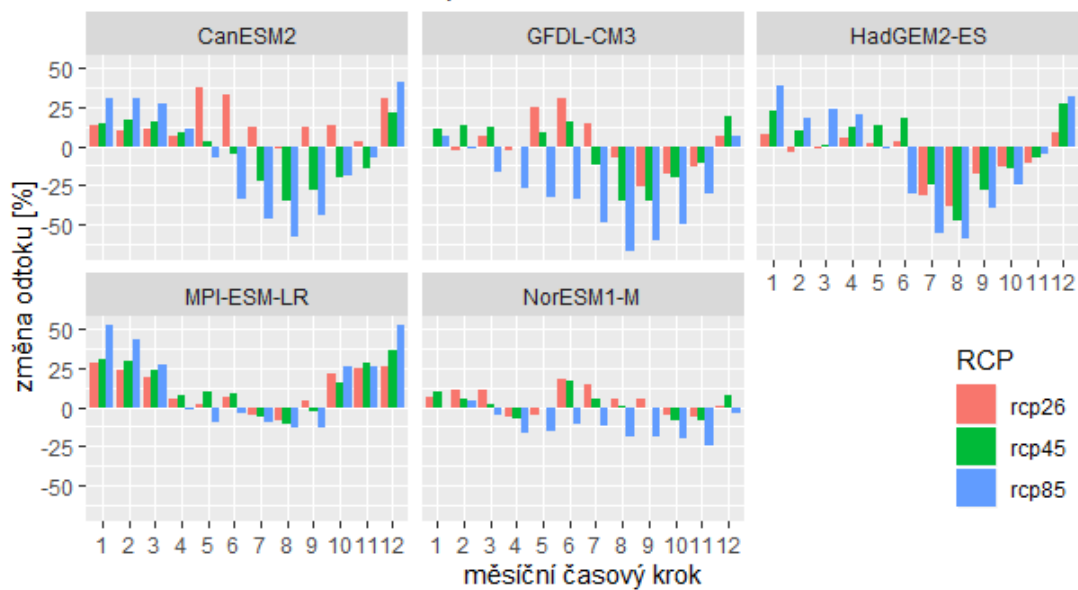


Obr. 22 Změnu odtoku [%] - Hněvkovice bez Vltavy CB



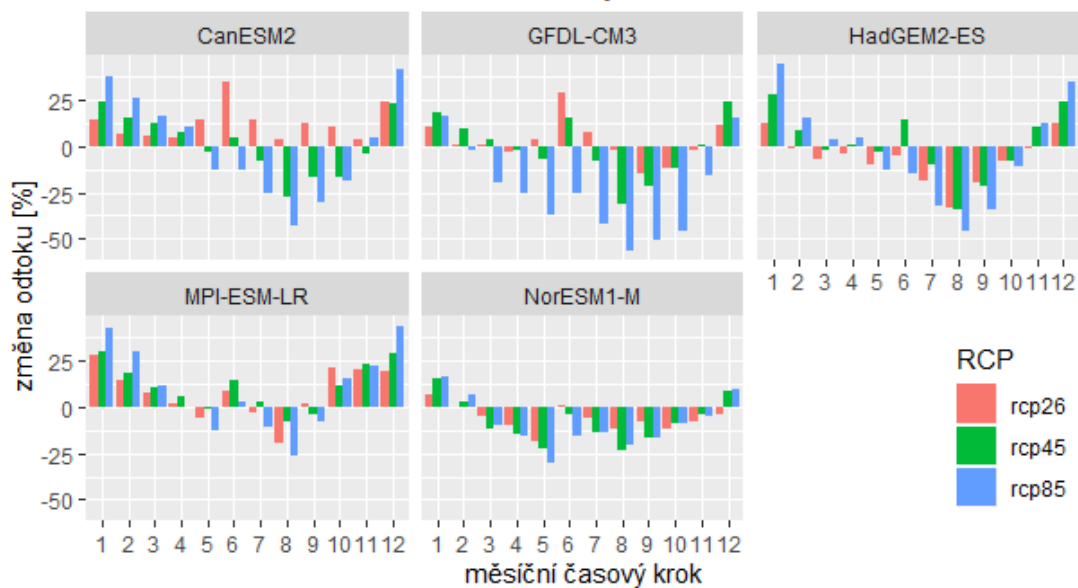
Obr. 23 Změnu odtoku [%] - LG Otava Písek

### Malše bez Říмова a Stropnice

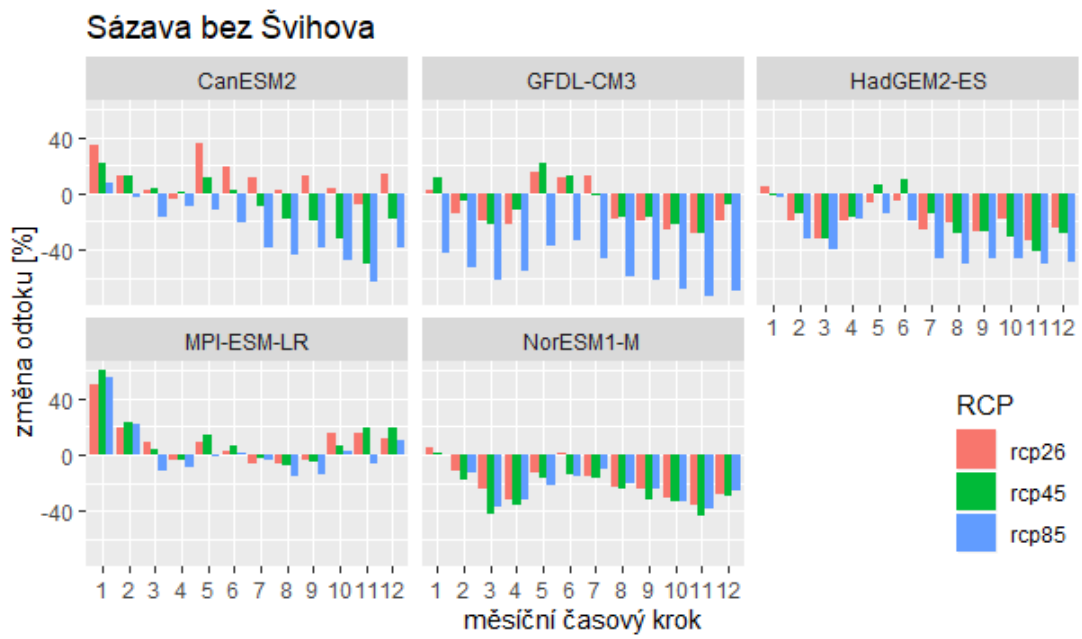


Obr. 24 Změnu odtoku [%] - Malše bez Říмова a Stropnice

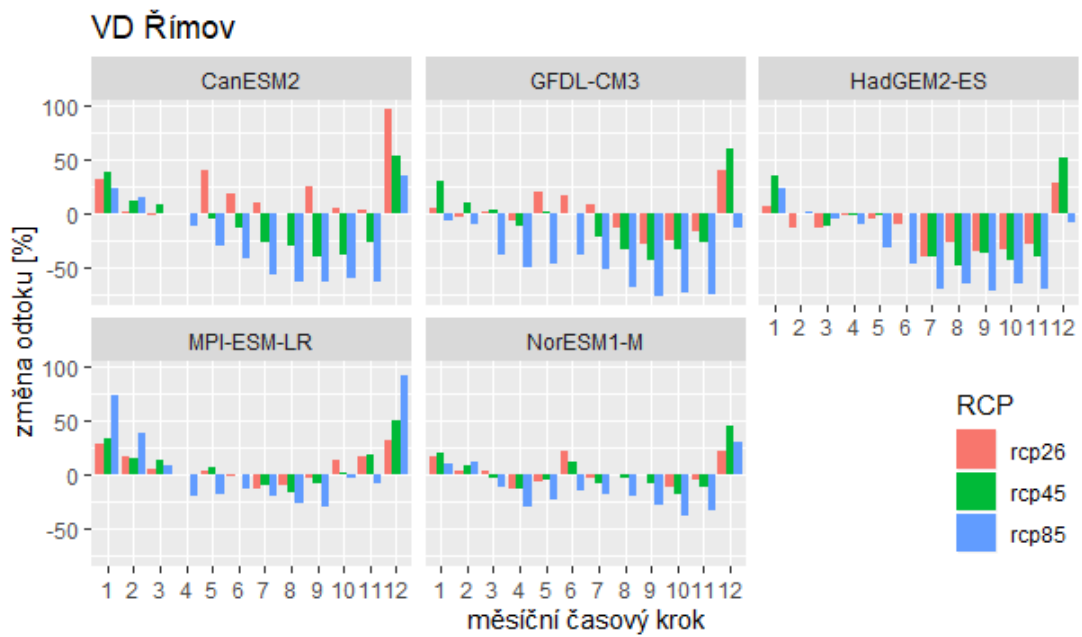
### Orlík bez Hněvkovic, Lužnice a Otavy



Obr. 25 Změnu odtoku [%] - Orlík bez Hněvkovic, Lužnice a Otavy

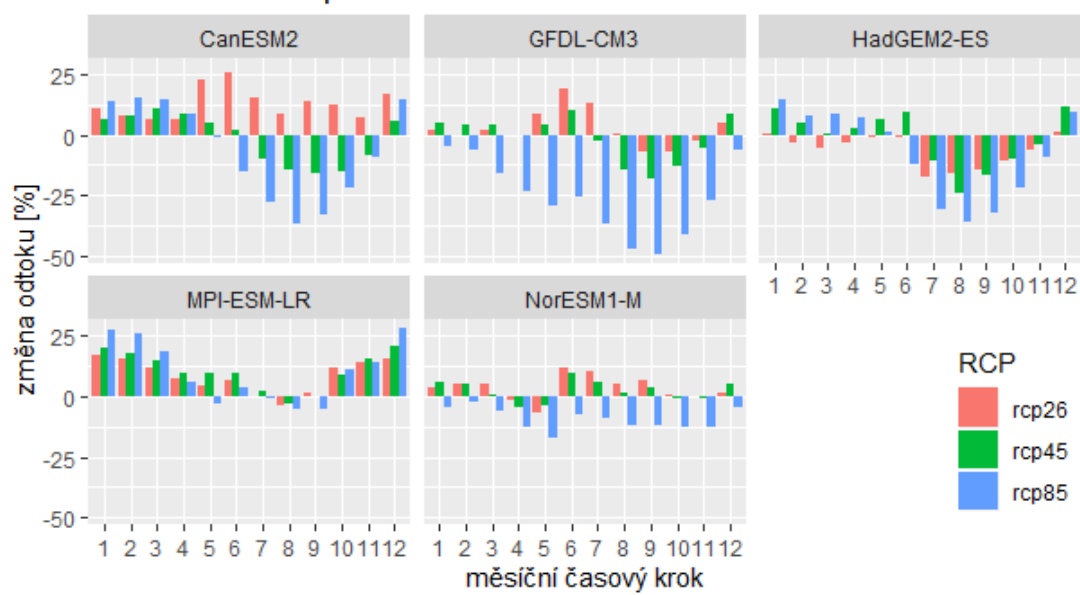


Obr. 26 Změnu odtoku [%] - Sázava bez Švihova



Obr. 27 Změnu odtoku [%] - VD Římov

### Vltava CB bez Lipna a Malše



Obr. 28 Změnu odtoku [%] - Vltava CB bez Lipna a Malše



## 6. DISKUZE

Tato práce se zabývá pozorovanými daty od Českého hydrometeorologického ústavu. Analýza meteorologických a hydrologických veličin byla zaměřena na vymezené území skládající se z 13ti povodí.

Jak je vidět na Obr. 11, který charakterizuje přehled jednotlivých stanic a vývoj srážek po celé analyzované období (tedy 1961-2018), medián srážek je na všech stanicích velmi podobný, jediný větší rozptyl je na stanici VD Lipno I. Oproti tomu na Obr. 12 je znázorněn přehled jednotlivých stanic a vývoj teploty během celého analyzovaného období a opět pro všechny stanice je vývoj velmi podobný, pouze medián stanice VD Lipno I je opět lehce pod průměrem oproti ostatním. Jak u grafů pro srážky, tak i u grafů po teplotu jsou vidět minimální a maximální hodnoty. Tyto hodnoty jsou zobrazeny pomocí tzv. vousů, které zobrazují právě variabilitu dat.

V Tab. 2 jsou uvedeny výsledky regresní analýzy procentuální změny srážek pro jednotlivé stanice postupně pro jednotlivé měsíce v roce a zároveň i souhrnné procentuální změny za celý rok. Podle toho, zda je hodnota kladná nebo záporná lze určit, zda trend je klesající nebo rostoucí. Ve chvíli, kdy se jednalo o statisticky významný trend, tyto hodnoty byly pro lepší přehlednost podbarveny šedivou barvou. Velká procentuální změna je patrná v měsíci lednu, kdy pro všechny stanice, s výjimkou stanic Sázava bez Švihova a VD Švihov, se jedná o rostoucí trend a je také statisticky významný. Zajímavý je i měsíc červenec, kdy dochází k velkému rostoucímu, statisticky významnému, trendu u 4 stanic (Hněvkovice bez Vltavy CB, Orlík bez Hněvkovic, Lužnice a Otavy, VD Lipno I a Vltava CB bez Lipna a Malše). V měsících prosinci a únoru není trend sice statisticky významný, ale jedná se o trend klesající, tedy dochází k úbytku srážek.

Jak je znázorněno v Tab. 3, změna teplot [ $^{\circ}\text{C}/10$  let] je statisticky významná pro většinu měsíců v roce a pro většinu zkoumaných stanic. Výjimku tvoří jen měsíce únor a září, které nejsou statisticky významné pro žádnou stanici. Hodnota za celý rok není statisticky významná akorát pro stanice VD Lipno I a VD Římov. Nicméně trend je rostoucí ve všech měsících, pouze dvě stanice VD Lipno I a VD Římov mají v měsíci září trend klesající.

Obr. 13 představuje rozptyl srážek jednotlivých stanic pro jednotlivé měsíce v roce. Jak je vidět na grafech, průběh je pro všechny stanice skoro totožný. Největší rozptyl je vždy v měsících červen, červenec a srpen, kdy maxima dosahují až 150 mm.

Na Obr. 14 je znázorněn rozptyl teplot jednotlivých měsíců analyzovaných stanic. Po všechny stanice je typický rozptyl pro zimní měsíce (leden a únor) od  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pro letní měsíce (červenec a srpen) od  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Obr. 15 vykresluje vývoj srážek jednotlivých stanic za celé analyzované období 1961-2018. Grafy jsou proloženy regresní křivkou (červeně). Regresní křivka znázorňuje vztah mezi dvěma veličinami, v tomto případě časem (nezávislá veličina) a množstvím srážek (závislá veličina). Jak ukazují grafy, v roce 2002 došlo k výraznému zvýšení srážek vzhledem k velkým srpnovým povodním.

Obr. 16 zobrazuje vývoj teplot jednotlivých stanic celého analyzovaného období. Stejně jako u předchozích srážek byly grafy proloženy regresní přímkou (červeně). Vývoj teploty je pro všechny stanice velmi podobný a trend je rostoucí. V letech 1960-1990 se minimální průměrné teploty pohybovaly kolem  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , u některých stanic i u hranice  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (LG Lužnice Bechyně, LG Otava Písek, VD Lipno I, VD Švihov), naopak minimální teploty v letech 2016-2018 jsou nad hranicí  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Maximální průměrné teploty byly v roce 1960 u hranice  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , v roce 2018 je hranice  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

RCP scénáře 5ti globálních klimatických modelů pro veličinu změna průměru srážek jsou uvedeny na Obr. 17. Scénáře byly vytvořeny pro vzdálenější budoucnost, tedy období 2070-2100. Jak je vidět, každý model předpokládá jiný vývoj. U modelů HadGEM2-ES a NorESM1-M jsou vidět v grafech boxploty, což nám říká, že jsou rozdíly mezi jednotlivými analyzovanými povodími. Model HadGEM2-ES počítá pro všechny tři RCP s nejvyšší změnou okolo 300. dne, tedy v měsíci říjnu. Naopak nejmenší změna bude v letních měsících, ale hlavně pro RCP8.5. Naopak u modelu NorESM1-M není roční vývoj tolik kolísavý, jako u modelu HadGEM2-ES. Zbylé tři modely (CanESM2, GFDL-CM3, MPI-ESM-LR) nevykazují rozdíly mezi jednotlivými povodími.

Obr. 18 charakterizuje stejné globální klimatické modely a jejich RCP scénáře, ale pro parametr  $b$  z rovnice pro pokročilou přírůstkovou metodu, na základě které lze určit variabilitu srážek. Situace je v tomto případě podobná jako u veličiny změny průměru srážek, modely HadGEM2-ES a NorESM1-M vykazují změny mezi jednotlivými povodími. Podle modelu HadGEM2-ES a RCP8.5 nastane velká variabilita v letním období, následně dojde k poklesu v zimních měsících. Naopak model GFDL-CM3 předpokládá vyšší variabilitu srážek v podzimních měsících, a k poklesu dojde v letním období.

Změnu průměrné teploty ukazují RCP scénáře na Obr. 19. V tomto případě předpokládá rozdíly mezi jednotlivými povodími akorát globální klimatický model NorESM1-M. Největší změna průměrné teploty nastane v letních měsících a velký nárůst ukazují především modely HadGEM2-ES, GFDL-CM3 a CanESM2. Nicméně předpokládá se i mírný nárůst změny průměrné teploty v zimních měsících (prosinec, leden).

Poslední RCP scénáře pro změnu směrodatné odchylky teploty zobrazuje Obr. 20. Směrodatná odchylka nám určuje, jak moc jsou hodnoty rozptýleny od průměru hodnot. Mírné rozdíly mezi povodími ukazují modely HadGEM2-ES a NorESM1-M. Průběh ročního vývoje jednotlivých RCP je podobný u třech modelů (CanESM2, MPI-ESM-LR, NorESM1-M), u kterých je vidět vyšší změna směrodatné odchylky v letních měsících. Markantní změnu v letním období předpokládají modely GFDL-CM3 a HadGEM2-ES hlavně pro RCP8.5.

Model Bilan simuluje měsíční časové řady potenciální evapotranspirace pro dané povodí. Potenciální evapotranspirace je charakterizována jako celkový teoretický výpar na daném území. Pro zjištění změny odtoku jednotlivých povodí byla nejdříve porovnána pozorovaná data odtoků s hydrologickými daty a následně bylo zjištěno, zda jsou data odpovídající a zda je možné s nimi dále pracovat. Toto porovnání je zobrazeno na Obr. 21. Jak je vidět, nyní bude analyzováno jen 7 povodí (oproti původních 13), jelikož pro zbylá povodí nebyla k dispozici hydrologická data.

Změny odtoků na základě vyhodnocení pomocí modelu Bilan jsou uvedeny v obrázcích pro každé analyzované povodí.

U povodí Hněvkovice bez Vltavy CB (Obr. 22) předpokládá model MPI-ESM-LR pro celý rok kladné změny odtoků pro všechny RCP, výjimka je akorát měsíc srpen, kdy se očekává úbytek odtoku. Oproti tomu modely GFDL-CM3 a HadGEM2-ES předpokládají úbytek v letních měsících. Kanadský model CanESM2 vykazuje kladnou změnu odtoku v zimním a jarním období.

Pro povodí LG Otava Písek (Obr. 23) dojde ke kladné změně odtoku v zimních měsících u všech modelů. Naopak velkou změnu v úbytku odtoku v letních měsících předpokládají modely GFDL-CM3, CanESM2 a HadGEM2-ES hlavně pro RCP8.5.

Stejně jako u předchozího povodí, také u povodí Malše bez Římov a Stropnice (Obr. 24) dojde v letních a podzimních měsících k velkému poklesu odtoku, výjimkou jsou pouze modely MPI-ESM-LR a NorESM1-M, u kterých ztráta odtoku nebude tak značná. Více srážek, a tedy i více odtoku se předpokládá v zimních období.

Obr. 25 ukazuje vývoj změn odtoku pro povodí Orlík bez Hněvkovic, Lužnice a Otavy. Jak je vidět na jednotlivých grafech u všech globálních modelů dojde ke kladné změně odtoku v zimních a jarních měsících, naopak úbytek odtoku, a tudíž větší sucho bude v letních měsících. Jediný rozdíl mezi všemi modely je, jak velká procentuální změna to bude.

Pro povodí Sázava bez Švihova (Obr. 26) globální modely ukazují, že k poklesu odtoku dojde během celého roku. Výjimkou jsou akorát modely MPI-ESM-LR a CanESM2, které naopak v zimních měsících vykazují zvýšení odtoku.

U VD Římov (Obr. 27) modely ukazují kladnou změnu odtoku v měsících prosinec a leden. Naopak ve všech ostatních měsících dojde k poklesu odtoku a největší pokles předpokládají tři modely CanESM2, GFDL-CM3 a HadGEM2-ES hlavně pro RCP 8.5. Model CanESM2 vykazuje během pro měsíce duben, květen a srpen zvýšení odtoku, ale pouze pro RCP2.6.

Posledním analyzovaným povodím je Vltava CB bez Lipna a Malše (Obr. 28). Pro toto povodí model MPI-ESM-LR ukazuje zvýšení odtoku po celý rok. U ostatních modelů změna kolísá. Modely GFDL-CM3 a HadGEM2-ES vykazují úbytek odtoku v letních a podzimních měsících. Model CanESM2 ukazuje sice také úbytek odtoku v letním a podzimním období, ale pouze pro RCP4.5 a RCP8.5, RCP2.6 počítá se zvýšením odtoku.

## 7. ZÁVĚR

Teoretická část práce poskytuje přehled o Vltavské kaskádě, klimatické změně, modelování klimatu včetně projekce modelování klimatu, nebo adaptačních opatření. Praktická část práce se věnuje analýze dat a jejich grafickému zpracování.

Cílem diplomové práce byla analýza pozorovaných dat (období 1961-2018) získaných od Českého hydrometeorologického ústavu v rámci projektu TAČR. Došlo k analýze vývoje srážek a teplot a určení vývoje trendu, zda je klesající nebo rostoucí. Dále byly pro vzdálenější budoucnost (2070-2100) vytvořeny RCP scénáře pro 5 globálních klimatických modelů a pomocí modelu Bilan byla zjištěna procentuální změna pro odtok ve vybraných povodí.

Na základě analýzy pozorovaných dat dochází ke zvyšování teploty ve všech řešených povodích a trend je statisticky významný. Odpovídá to i skutečnosti, kdy pozorujeme méně chladných či mrazivých dnů v zimním období, a naopak více horkých dní v létě. Co se týká srážek, v tomto případě dochází k úbytku především v měsících únor, duben, červen a listopad. Výjimku představuje měsíc leden, kdy dochází k nárůstu srážek a trend je statisticky významný. Nicméně vzhledem ke zvyšující se teplotě již nelze očekávat sněhové srážky, ale srážky deštivé.

Podle modelovaných RCP scénářů globálních klimatických modelů se pro vzdálenější budoucnost (2070-2100) počítá s vyšším průměrem srážek v podzimním období, a naopak dojde k poklesu v letních měsících. Variabilita srážek neboli proměnlivost srážek, bude významná v letních období, k poklesu dojde v zimních měsících. Dochází také ke změně zastoupení srážek jednotlivých měsíců a stejně tak četnost extrémních úhrnů v jednotlivých měsících roku. Ke zvýšení průměrné teploty dojde během celého roku, ale v měsících červen, červenec a srpen bude toto zvýšení nejpatrnější.

Vzhledem k aktuální problematice sucha a změnám délek všech období, zima je kratší a dochází k prodlužování jara a podzimu, odtoky ve vzdálenější budoucnosti toto jen potvrzují. Dojde k úbytku odtoku, a tedy většímu suchu, v letním i podzimním období. Předpokládá se kladná změna odtoku v zimních měsících, nicméně se nebude jednat o velký přísun srážek.

## 8. LITERATURA

- BADER, D. C., & et al. (2008). *Climate models: an assessment of strengths and limitations*. U.S. Climate Change Science Program, Washington, D.C.
- BELDA, M., PIŠOFT, P., & ŽÁK, M. (2015). *Výstupy regionálních klimatických modelů na území ČR pro období 2015 až 2060*. Katedra fyziky atmosféry, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze.
- BENTSEN, M., & et al. (2013). The Norwegian earth system model, NorESM1-M—Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. *Geoscientific Model Development*, 6.3, 687-720.
- BOLOM, J., DOČKAL, M., KOS, Z., & LIPTÁK, M. (2013). Pozorované dopady změny klimatu v České republice. *STAVEBNÍ OBZOR*(48).
- BRANIŠ, M., & HŮNOVÁ, I. (2009). *Atmosféra a klima. Aktuální otázky znečištění ovzduší*. Univerzita Karlova v Praze, Nakladatelství Karolinum.
- Climate Models*. (24. Únor 2020). Načteno z Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/science-research-data/modeling-projections-analysis/centre-modelling-analysis/models.html>
- ČVUT, F. P. (21. Leden 2020). *Prověření strategického řízení Vltavské kaskády*. Načteno z Povodí Vltavy, státní podnik © 2013: [http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/studie-CVUT/VltavKas\\_popular\\_final.pdf](http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/studie-CVUT/VltavKas_popular_final.pdf)
- DUCHÁČEK, L. (2006). *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Funkce přehrad Vltavské kaskády v protipovodňové ochraně v České republice*. Univerzita Karlova v Praze.
- DZURÁKOVÁ, M., & et al. (2017). Potenciál aplikace přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině a zlepšení ekologického stavu vodních útvarů. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 59(4), 25-32.
- FOŠUMPAUR, P., KENDÍK, T., & BŘEZINA, K. (2014). Zodpovědný přístup při řešení možných změn strategického řízení nádrží. *XXXIV. Přehradné dni 2014*.
- GERDEN, T. (2018). The Adoption of the Kyoto Protocol of the United Nations Framework Convention on Climate Change. *Contributions to Contemporary History*, 58(2).
- GFDL Models*. (24. Únor 2020). Načteno z GFDL: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory: <https://www.gfdl.noaa.gov/model-development/>
- GREENE, L. A. (2000). EHPnet: United Nations Framework Convention on Climate Change. *Environmental Health Perspectives*, 108(8), A353.

- HadGEM2*. (24. Únor 2020). Načteno z ENES © ENES Portal 2011: <https://portal.enes.org/models/earthsystem-models/metoffice-hadley-centre/hadgem2-es>
- HANEL, M. (2014). *HABILITAČNÍ PRÁCE, Modelování dopadů změny klimatu a jeho nejistoty*. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- HANEL, M., & VIZINA, A. (2014). *Hydrologické modelování dopadů klimatické změny*. Praha: Česká zemědělská univerzita.
- HANEL, M., KAŠPÁREK, L., MRKVIČKOVÁ, M., & et al. (2011). *Odhad dopadu klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.
- HORÁČEK, S., KAŠPÁREK, L., & NOVICKÝ, O. (2008). Estimation of climate change impact on water resources by using Bilan water balance model. *IOP conference series: earth and environmental science*(1).
- HOUGHTON, J. T., & et al. (1997). *An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report*. WMO.
- HULME, M., & JENKINS, G. (1998). *Climate Change Scenarios for the United Kingdom. UK Climate Impacts Programme, Technical Report No. 1*.
- Hydrologické modely*. (24. Leden 2020). Načteno z HYDRO.upol.cz © 2009: [http://hydro.upol.cz/?page\\_id=15](http://hydro.upol.cz/?page_id=15)
- IPPC*. (11. Únor 2020). Načteno z The Intergovernmental Panel on Climate Change: <https://www.ipcc.ch/about/>
- JUBB, I., CANADELL, P., & DIX, M. (2013). *Representative concentration pathways (RCPs)*. Australian Government, Department of the Environment © Australian Climate Change Science Program.
- Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu*. (23. Leden 2020). Načteno z Ministerstvo životního prostředí © 2008–2019 : [https://www.mzp.cz/cz/kjotsky\\_protokol](https://www.mzp.cz/cz/kjotsky_protokol)
- Klimatický systém Zeme*. (10. Únor 2020). Načteno z Slovenský hydrometeorologický ústav © 2020: <http://www.shmu.sk/sk/?page=1070>
- KULHAVÝ, Z., & KOVÁŘ, P. (2000). *Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy.
- KYNCL, M., & LANGAROVÁ, S. (2012). Global changes of the climate and impacts on water supplies. *Proceedings of the International Conference*, (stránky 194-197). Bratislava.
- LAPKA, M., & CUDLÍNOVÁ, E. (2006). Globální klimatické změny a prvky globálního vědomí. *Životné prostredie*, 298-302.
- LUKÁŠOVÁ, L. (2013). *Krásy Povltaví - Vodní turistika*. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava.

- MEEHL, G. A., & et al. (2000). The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(2), stránky 313-318.
- METELKA, L., & TOLASZ, R. (2009). *Klimatické změny: fakta bez mýtů*. Univerzita Karlova v Praze, Centrum pro otázky životního prostředí.
- MILLY, P. C., & et al. (2008). Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science*, 319(5863), stránky 573-574.
- MPI-ESM. (24. Únor 2020). Načteno z Max Planck Institute for Meteorology: <https://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/>
- Nairobi work programme. (24. Březen 2020). Načteno z United Nations Framework Convention on Climate Change: <https://unfccc.int/topics/adaptation-and-resilience/workstreams/nairobi-work-programme-nwp/overview-of-the-nairobi-work-programme>
- NIETSCHEOVÁ, J. (2013). Právní nástroje k zvládnání sucha. *SUCHO A JAK MU ČELIT*, 33-35.
- NOVICKÝ, O., & et al. (2008). *Klimatická změna a vodní zdroje v povodí Vltavy*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.
- NOVOTNÝ, V. (2016). *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Řízení systému vodní kaskády*. Praha: České vysoké učení technické.
- NOVOTNÝ, V. (2019). *DIPLOMOVÁ PRÁCE Optimální řízení vodní kaskády*. Praha: České vysoké učení technické.
- PRETEL, J. (2012). *Klimatické změny a jejich dopady na život lidí*. Ostrava: Český hydrometeorologický ústav.
- QUASCHNING, V. (2010). *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: Grada Publishing s.r.o.
- R Project. (22. Březen 2020). Načteno z The R Project for Statistical Computing © The R Foundation: <https://www.r-project.org/>
- RAIDL, A., & KALVOVÁ, J. (1998). Čeká nás změna klimatu? *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 43(4), 278-293.
- Rámcová úmluva OSN o změně klimatu. (23. Leden 2020). Načteno z Ministerstvo životního prostředí © 2008–2019 : [https://www.mzp.cz/cz/ramcova\\_umluva\\_osn\\_zmena\\_klimatu](https://www.mzp.cz/cz/ramcova_umluva_osn_zmena_klimatu)
- SLÁMOVÁ, R., MARTÍNKOVÁ, M., & KRYSANOVA, V. (2010). Strategie adaptace na hydrologické dopady změny klimatu. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58(4), 233-244.
- STEJSKAL, L. (2012). Změna klimatu a její dopady: hlavní hrozba 21. století. *Trendy, rizika a scénáře bezpečnostního vývoje ve světě, Evropě a ČR – dopady na bezpečnostní politiku a bezpečnostní systém ČR*.



- STOCKER, T. F., & et al. (2013). Climate change 2013: The physical science basis. *Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5)*.
- The Paris Agreement*. (24. Březen 2020). Načteno z United Nations Framework Convention on Climate Change 2020: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- UNFCCC. (23. Leden 2020). Načteno z United Nations Framework Convention on Climate Change 2020 : <https://unfccc.int/process-and-meetings#:d8f74df9-0dbd-4932-bf3c-d8a37f8de70e>
- VD Hněvkovice. (21. Leden 2020). Načteno z Povodí Vltavy, státní podnik © 2013 : <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/hnevkovice.pdf>
- VD Kamýk. (22. Leden 2020). Načteno z Povodí Vltavy, státní podnik © 2013 : <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/kamyk.pdf>
- VD Kořensko. (22. Leden 2020). Načteno z Povodí Vltavy, státní podnik © 2013 : <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/korensko.pdf>
- VD Orlík. (22. Leden 2020). Načteno z Povodí Vltavy, státní podnik © 2013 : <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vodni-dila-a-nadrze>
- VD Slapy. (22. Leden 2020). Načteno z Povodí Vltavy, státní podnik © 2013: <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/slapy.pdf>
- VD Štěchovice. (22. Leden 2020). Načteno z Povodí Vltavy, státní podnik © 2013 : <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/stechovice.pdf>
- VD Vrané nad Vltavou. (22. Leden 2020). Načteno z Povodí Vltavy, státní podnik © 2013 : <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/vrane.pdf>
- VIZINA, A., & et al. (2019). *MODELOVÁNÍ HYDROLOGICKÉ BILANCE V PODMÍNKÁCH KLIMATICKÝCH ZMĚN*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.
- VIZINA, A., HORÁČEK, S., & HANEL, M. (2015). Nové možnosti modelu Bilan. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*(4-5), 7-10.
- Vltavská kaskáda*. (20. Leden 2020). Načteno z Povodí Vltavy, státní podnik © 2013: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vltavska-kaskada>
- Vodní elektrárna Hněvkovice*. (10. Únor 2020). Načteno z SVĚT ENERGIE ČEZ: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-cez/vodni-elektrarna-hnevkovice>

- Vodní elektrárna Lipno I.* (10. Únor 2020). Načteno z SVĚT ENERGIE ČEZ:  
[https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-  
cez/vodni-elektrarna-lipno-1](https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-cez/vodni-elektrarna-lipno-1)
- Vodní elektrárna Slapy.* (10. Únor 2020). Načteno z SVĚT ENERGIE ČEZ:  
[https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-  
cez/vodni-elektrarna-slapy](https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-cez/vodni-elektrarna-slapy)
- Vodní elektrárna Štěchovice.* (10. Únor 2020). Načteno z SVĚT ENERGIE ČEZ:  
[https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-  
cez/vodni-elektrarna-stechovice-1](https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-cez/vodni-elektrarna-stechovice-1)
- Vodní elektrárna Vrané.* (10. Únor 2020). Načteno z SVĚT ENERGIE ČEZ:  
[https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-  
cez/vodni-elektrarna-vrane](https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-cez/vodni-elektrarna-vrane)
- VOJÁČKOVÁ, M. (2019). *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE Legislativní opatření vedoucí ke zmírnění nedostatku vody vlivem sucha.* Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. (15. Březen 2015). *Příručka, Model hydrologické bilance Bilan.*
- WAYNE, G. (2013). Representative Concentration Pathways. *Skeptical Science.*

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1 Vltavská vodní kaskáda (NOVOTNÝ, 2019).....  | 12 |
| Obr. 2 Vodní dílo Lipno I (Vodní elektrárna Lipno I, 2020).....   | 16 |
| Obr. 3 Vodní dílo Hněvkovice (Vodní elektrárna Hněvkovice, 2020).....   | 17 |
| Obr. 4 Vodní dílo Slapy (Vodní elektrárna Slapy, 2020) .....  | 19 |
| Obr. 5 Vodní dílo Štěchovice (Vodní elektrárna Štěchovice, 2020).....   | 20 |
| Obr. 6 Vodní dílo Vrané nad Vltavou (Vodní elektrárna Vrané, 2020) .....  | 20 |
| Obr. 7 Klimatický systém (Klimatický systém Zeme, 2020).....  | 27 |
| Obr. 8 Regionální a globální charakter SRES scénářů a jejich důraz na řešení problémů<br>životního prostředí (NOVICKÝ et al, 2008)..... | 32 |
| Obr. 9 Schéma hydrologického modelování dopadů změn (HANEL & VIZINA, 2014)<br>.....   | 36 |
| Obr. 10 Lokace zájmového území .....  | 42 |
| Obr. 11 Porovnání režimu srážek pro jednotlivá povodí .....   | 48 |
| Obr. 12 Porovnání režimu teplot pro jednotlivá povodí .....   | 49 |
| Obr. 13 Roční chod srážek (variabilita v jednotlivých měsících).....  | 51 |
| Obr. 14 Roční chod teplot (variabilita v jednotlivých měsících).....  | 52 |
| Obr. 15 Vývoj srážek za období 1961-2018 .....  | 53 |
| Obr. 16 Vývoj teploty za období 1961-2018 .....   | 54 |
| Obr. 17 Scénáře RCP klimatických modelů pro změnu průměrných srážek.....  | 55 |
| Obr. 18 Scénáře RCP klimatických modelů pro variabilitu srážek .....  | 56 |
| Obr. 19 Scénáře RCP klimatických modelů pro změnu průměrné teploty .....  | 57 |
| Obr. 20 Scénáře RCP klimatických modelů pro změnu směrodatné odchylky teploty<br>.....  | 58 |
| Obr. 21 Porovnání pozorovaných dat (černě) s hydrologickými daty (červeně) .....  | 60 |
| Obr. 22 Změnu odtoku [%] - Hněvkovice bez Vltavy CB.....  | 61 |
| Obr. 23 Změnu odtoku [%] - LG Otava Písek .....   | 61 |
| Obr. 24 Změnu odtoku [%] - Malše bez Říмова a Stropnice.....  | 62 |
| Obr. 25 Změnu odtoku [%] - Orlík bez Hněvkovic, Lužnice a Otavy.....  | 62 |
| Obr. 26 Změnu odtoku [%] - Sázava bez Švihova.....  | 63 |
| Obr. 27 Změnu odtoku [%] - VD Římov .....   | 63 |
| Obr. 28 Změnu odtoku [%] - Vltava CB bez Lipna a Malše .....  | 64 |

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1 Rozdělení nádržních prostorů nádrží Vltavské kaskády (ČVUT, 2020) .....  | 15 |
| Tab. 2 Procentuální změna srážek pro jednotlivé stanice a významnost trendu (statisticky významný trend je podbarvený) .....                | 49 |
| Tab. 3 Změna teplot [ $^{\circ}\text{C}/10$ let] pro jednotlivé stanice a významnost trendu (statisticky významný trend je podbarvený)..... | 50 |