

Model vlivu klimatické změny na hydrologický
režim v povodí Roklanského/Modravského
potoka v NP Šumava

Anna Lamačová, Jakub Hruška

Praha, březen 2018

Obsah

2.	Úvod	1
3.	Popis povodí	1
4.	Popis modelu Brook90	3
4.1.	Vstupní data	3
5.	Popis scénářů	4
6.	Výsledky	4
6.1.	Kalibrace a validace modelu Brook 90	4
6.2.	Teploty	5
6.3.	Srážky	10
	Model CNRM-CN5 ALADIN53	13
	Model EC-EARTH RACMO22E	14
	Model EC-EARTH RCA4	15
	Model MPI-ESM-LR CCLM4-8-17	16
6.4.	Odtoky	17
	Model CNRM-CM5 ALADIN53	17
	Model EC-EARTH RACMO22E	19
	Model EC-EARTH RCA4	21
	Model MPI-ESM-LR CCLM4-8-17	24
6.5.	Evapotranspirace	28
6.6.	Dlouhodobé roční odtoky a srážkoodtokové poměry	29
7.	Shrnutí	33
8.	Seznam citací	34

1. Úvod

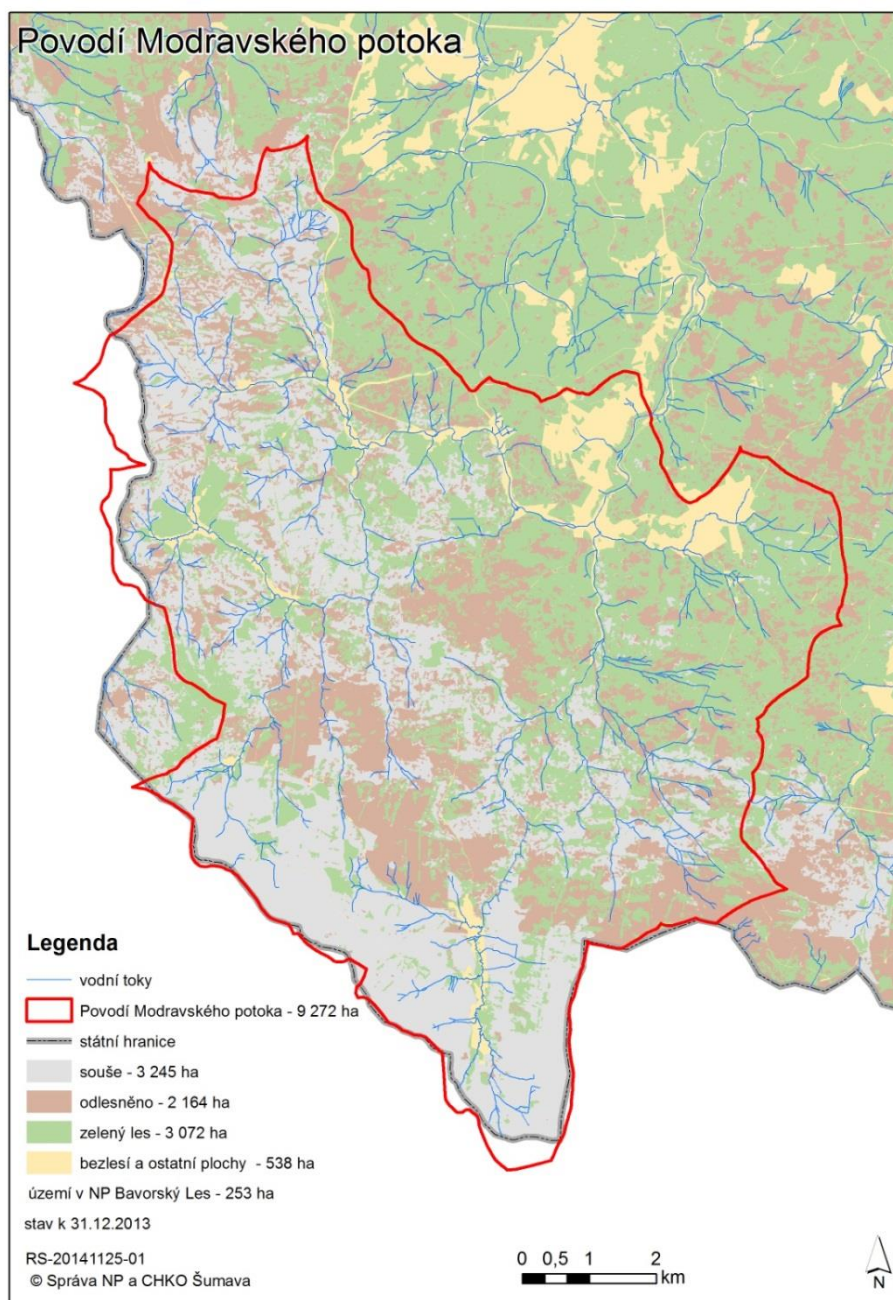
Předkládaná studie provádí simulaci vlivu očekávané klimatické změny v povodí Roklanského/Modravského potoka na hydrologický režim ve dvou obdobích 2021–2050 a 2071–2100. Jedná se o jednu z projektových aktivit realizovaných v rámci projektu č. 26B1CZ SILVA GABRETA – přeshraniční monitoring biodiversity a vodního režimu.

Výsledkem jsou predikované měsíční srážky a odtoky pro různé scénáře nárůstu emisí skleníkových plynů, a tedy různých nárůstů teploty a změn množství a intenzity srážek. Tyto změny jsou pak pomocí hydrologického modelu Brook90 promítnuty do výpočtů průtoků ve sledovaném povodí, které velmi dobře reprezentuje současný stav centrální části Šumavy, a která je jádrovou zónou národního parku Šumava.

Předkládané výsledky mohou posloužit ke kvalifikovaným strategickým úvahám o budoucím managementu tohoto přírodovědně velmi cenného území.

2. Popis povodí

Jedná se o jedno z největších šumavských povodí s mozaikou odumřelých, vytěžených a živých dospělých stromů. Rozloha povodí je 92,7 ha a leží na severní straně hlavního šumavského hřebenu. Limnigraf je umístěn pod soutokem Modravského a Roklanského potoka (viz mapa. 1), hydrologicky vlastně již na Vydře, která vzniká soutokem těchto dvou potoků. Tradičně je ale nazýván tento limnigraf Modravským potokem a proto v celé studii budeme tohoto názvu používat. Kontinuální odtok z povodí je sledován od roku 1948 Českých hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ). Máme tedy k dispozici dostatečně dlouhou řadu, která pokrývá jak původní stav, tak i celý průběh částečného odlesnění až do současného částečně bezzásahového režimu povodí.



Mapa 1. Povodí Modravského potoka

Z plochy povodí zaujímají holé seče 21,6 km² (23 %) a smrčiny, kde dospělý porost podlehl kůrovcové gradaci 32,5 km² (35 %). „Zelený les“, tedy jak zachovalé dospělé porosty, tak i dostatečně vysoké nové zmlazení, tvoří přesně třetinu povodí. V případě holin se nemusí nutně jednat pouze o holiny vzniklé v souvislosti s kůrovcem. Povodí je tedy prakticky na třetiny rozděleno mezi „zelený les“, sežraný les“ a vykácené a ostatní plochy. V povodí je i významný podíl mokřadů, zejména rašelinišť, které tvoří zhruba 8 % povodí. Tyto lokality byl částečně po vzniku NP Šumava v roce 1992 revitalizovány přehrážkováním, aby byl postupně obnoven přirozený vodní režim.

V povodí se vyskytly dvě vlny gradace kůrovce – první, která přešla z NP Bavorský les po roce 1994. Část ploch byla ponechána samovolnému vývoji, část byla ha frontě postupu kůrovcové vlny asanována, a vznikly zde holiny. Tato gradace probíhala v jižní a jihozápadní části povodí podél hranice

s Bavorskem. Druhá vlna gradace vznikla po orkánu Kyrill v roce 2007, a i zde vznikla mozaika porostů ponechaných přirozenému vývoji a vytěžených asanovaných ploch ve střední a východní části povodí v oblasti zvané Na ztraceném nebo Ptačí potok (synonyma pro stejnou oblast).

Geologicky je povodí poměrně homogenní, a je tvořeno hlavně metamorfovanými horninami, převážně rulami. Půdy jsou zejména podzoly a kambizemě, místy se jedná o rašelinné gleje a rašelinné půdy.

Povodí je zalesněno zcela dominantně smrkem ztepilým (*Picea abies*) v různém věkovém a strukturním složení. Malý podíl tvoří jeřáb ptačí (*Sorbus aucuparia*). Rašeliniště jsou pokryty borovicí blatkou (*Pinus uncinata*) a borovicí klečí (*Pinus mugo*).

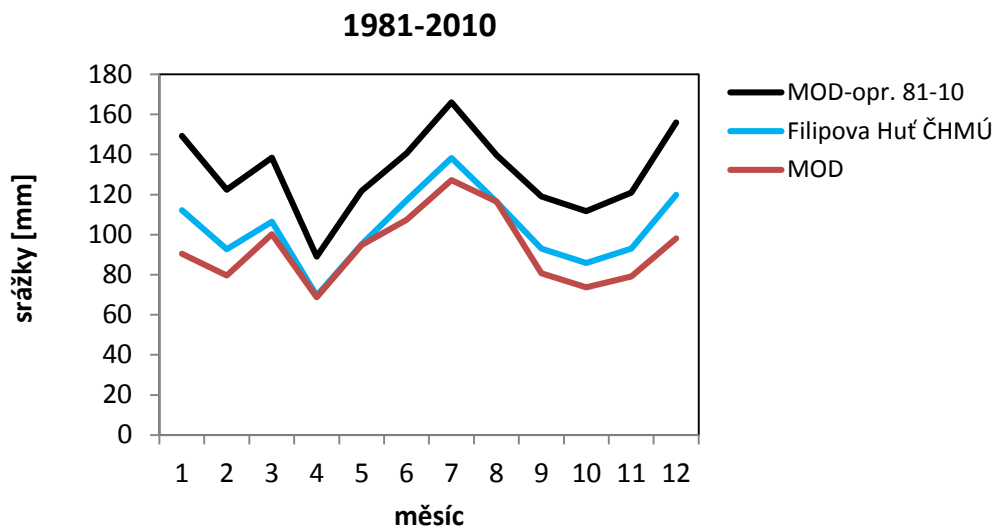
3. Popis modelu Brook90

Pro simulaci budoucích odtoků z povodí byl použit hydrologický model Brook90 (Federer 2002). Jedná se o konceptuální parameterický model pracující s časovými řadami meteorologických a hydrologických dat v denním kroku. Brook90 simuluje bilanční procesy na povodí, řeší jednotlivé složky odtoku (přímý a podpovrchový), složky evapotranspirace – výpar z půdy, transpiraci z intercepční kapacity a ze sněhové pokrývky. Evapotranspirace je počítána pomocí metody Penman-Monteith dle schématu Shuttleworth-Wallace (1985). Tání sněhu je řešeno empirickou metodou stupeň-den (Linsley 1949). Kalibrace modelu probíhá na základě úpravy celé řady parametrů zahrnujících charakteristiky vegetačního pokryvu (např. index listové plochy, výška porostu, míra transpirace, hustotu kořenového systému a jiné), vlastnosti půdních vrstev (výška, půdní druhy) sklon a další parametry, které významně ovlivňují výše uvedené procesy (Benčoková et al. 2011).

3.1. Vstupní data

Vstupní data do modelu představovala, denní úhrny srážek, minimální a maximální denní teploty, dále průměrné denní rychlosti větru, suma globální radiace a průměrný tlak nasycených vodních par (tlak nasycených vodních par nebyl k dispozici a byl dopočítán modelem z minimální teploty). Pro účely modelování byla použita klimatická data interpolovaná na plochu povodí z takzvaných technických řad klimatických dat, které vznikly interpolací měřených dat ze sítě ČHMÚ (Štěpánek et al. 2016). Tyto řady byly rovněž použity pro korekci budoucích klimatických scénářů (viz.kapitola 4.).

Teplotní data, globální radiace, a rychlost větru byla přejata beze změny, nicméně v případě srážek se ukázalo, že průměrná hodnota ročních srážkových úhrnů za období 1981–2010 (1116,7 mm) je příliš nízká. Prostorovou interpolací dlouhodobých (1981–2010) hodnot z totalizátorů a klimatických stanic, které se nachází na hřebeni povodí a v oblastech přilehlých povodí, Březník, Rokytská slat', Knížecí pláň, Poledník, Kvilda, Filipova Huť, spravovaných ČHMÚ (detaily o jednotlivých stanicích a průměrné srážkové úhrny jsou dostupné v článku Starostové M. (2012)) byla průměrná hodnota srážek za období 1981–2010 na povodí Modravý stanovená na hodnotu 1574,6 mm. Na základě srovnání ročního chodu interpolovaných dat pro povodí (z „technických“ řad) a chodu srážek na stanici Filipova Huť, byly stanoveny lokální gradienty pro jednotlivé měsíce, které byly extrapolovány, tak aby opravená průměrná roční hodnota za srovnávací období 1981–2010 odpovídala hodnotě stanovené interpolací dat z totalizátorů. Srovnání ročního chodu srážek z „technických“ řad ČHMÚ, Filipovy Hutě a následně chod po korekci je znázorněn na Obr. 1. Stejná korekce pak byla použita i v případě budoucích srážkových dat.



Obr. 1 Průměrné měsíční srážky za období 1981–2010. Interpolovaná „technická“ řada dat ČHMÚ (MOD), měřená data ze stanice ČHMÚ Filipova Huť, srážky opravené na průměrnou hodnotu srážek na povodí získanou interpolací dat měřených v totalizátorech na povodí povodí Modravského potoka (MOD-opr 81–10).

4. Popis scénářů

V předložené studii jsou prezentovány výsledky simulací regionálních klimatických modelů (RCM), které vznikly v rámci evropské části globálně koordinovaného regionálního klimatického modelování Euro-CORDEX (www.eurocordex.net). Klimatické scénáře jsou rozlišeny podle reprezentativního směru vývoje budoucích koncentrací tzv. RCP (Representative Concentration Pathway) (Moss et al. 2008). Tyto scénáře uvažují jako řídící proměnou radiační působení (W m^{-2}) namísto dříve používané koncentrace ekvivaletního CO_2 (ppm). RCP reprezentují široké rozpětí budoucích možných změn antropogenních skleníkových plynů. Zde jsou použity 3 varianty RCP: 2,6, 4,5 a 8,5.

RCP 2,6 uvažuje, že roční globální emise skleníkových plynů dosáhnou svého maxima v období 2010–2020 a po té začnou klesat. Maximum emisí a následný pokles u scénářů **RCP 4,5** je očekáván okolo roku 2040. V případě scénářů **RCP 8,5** by docházelo ke kontinuálnímu nárůstu emisí po celé 21. století (Meinshausen et al. 2011).

V této studii byly použity následující regionální klimatické modely ALADIN53 (v textu dále uváděný jako ALADIN), CCLM4-8-17 (v textu dále uváděný jako CCLM), RACMO22E (v textu dále uváděný jako RACMO) a RCA4 (v textu dále uváděný jako RCA) s rozlišením $0,11^\circ$, které využily jako řídící modely globální klimatické modely CNRM-CM5, EC-EARTH, MPI-ESM-LR. Na výsledných datech byla následně provedna korekce odchylek metodou úpravy distribuce pomocí percentilů (Štěpánek et al. 2016).

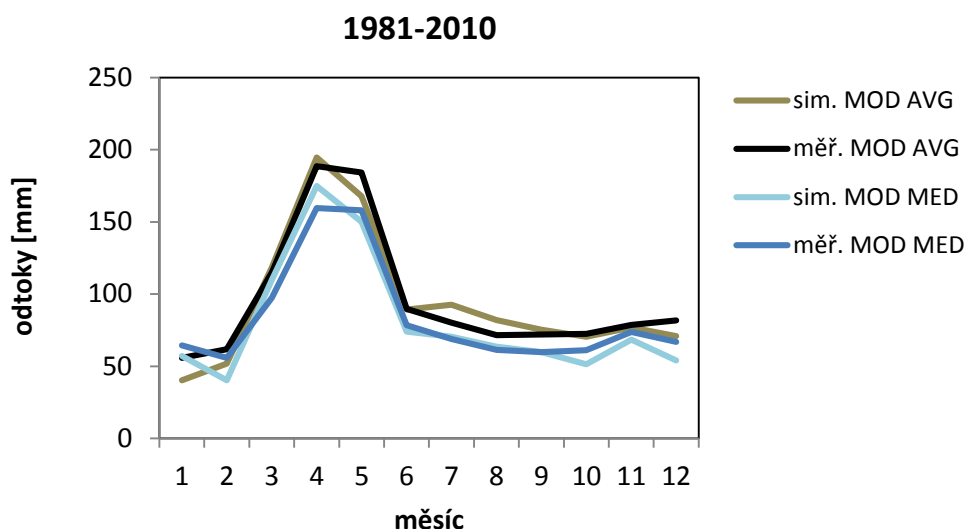
5. Výsledky

5.1. Kalibrace a validace modelu Brook 90

Období 1981–2010 bylo stanoveno jako srovnávací. Pro účely kalibrace modelu Brook90 bylo toto období rozděleno do dvou intervalů. Na prvním – 1981–1999 byl model, kalibrován a na období 2000–2010 byla následně provedena validace modelu. Pearsonův korelační koeficient pro denní data v

kalibrační období 1981–2010 dosáhl hodnoty $r = 0,72$ ($N = 6939$, $p = 0,05$), pro měsíční hodnoty $r = 0,80$ ($N = 228$, $p = 0,05$). Ve validačním období 2000–2010 byl Pearsonův korelační koeficient $r = 0,80$ ($N = 4018$, $p = 0,05$) pro denní hodnoty a $r = 0,89$ ($N = 132$, $p = 0,05$) pro hodnoty měsíční.

Srovnání ročního chodu měsíčních průměrných odtoků a mediánů měřených odtoků a odtoků simulovaných hydrologickým modelem Brook90 vykazuje uspokojivou shodu (Obr. 2).



Obr. 2. Měsíční měřené odtoky z povodí Modravského potoka za období 1981–2010. Průměry (měř. MOD AVG) a mediány (měř. MOD MED), simulované odtoky modelem Brook90 – průměry (sim MOD AVG) a mediány (sim MOD MED).

5.2. Teploty

Průměrná teplota kontrolního období 1980–2010 byla 4,2 °C (Tab. 1). Nejnižší teplota byla v souladu se střeoevropským chodem počasí měřena v lednu (−4,2 °C), nejvyšší v červenci (13,2 °C). Pro roky 2021–2050 pak jednotlivé modely a emisní scénáře (Tab. 2) vypočítávají vyšší teploty, a to pro roční průměr v rozmezí 5,0–6,0 °C, tedy o 0,8–1,8 °C oproti současným hodnotám. Distribuce teplot v průběhu roku se příliš nemění, leden a únor zůstávají v průměru záporné, stejně jako v kontrolním období. Březnové teploty jsou vyšší než nula pouze ve dvou případech (současnost −1,1 °C), ale ve čtyřech případech jsou průměry rovny nule. Začátek zimy se ale již otepluje, protože listopadové teploty nejsou v tomto období, na rozdíl od kontrolního, modelovány záporné ani v jednom případě. V létě pak dochází k nárůstu teploty (červenec) o 0,8–3,1 °C. Ke znatelně vyššímu růstu teplot dochází v období let 2071–2100 (Tab. 2), kdy oproti průměru 4,2 °C pro kontrolní období jsou modelované teploty mezi 5,4–8,6 °C. Jedná se tedy o nárůst mezi 1,4–4,9 °C. Ve čtyřech scénářích již dokonce ani v jednom měsíci neklesá průměrná teplota pod bod mrazu, stejně jako v žádném scénáři není záporná listopadová a březnová teplota. Nárůst červencových teplot pak v tomto intervalu kolísá mezi 1,4–6,5 °C oproti současnosti, kdy je průměrná teplota 13,2 °C (Tab. 2).

Tab. 1 Průměrné měsíční teploty na povodí Modrava v období 1981–2010 a v období 2021–2050.

Model	MOD	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50
T	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	–4.2	–3.0	–2.8	–2.8	–3.1	–2.9	–2.9	–1.9	–3.4	–3.5
2	–4.0	–2.6	–1.5	–2.3	–2.5	–2.8	–2.6	–0.9	–2.8	–2.8
3	–1.1	0.0	0.0	–0.3	0.1	–0.9	0.0	0.2	–0.8	0.0
4	3.0	3.8	4.6	5.2	5.2	3.9	4.6	4.8	3.6	4.0
5	8.4	8.7	8.8	9.2	9.0	9.3	9.7	9.6	8.3	8.8
6	11.3	12.7	12.5	12.5	11.9	12.0	12.1	12.8	13.0	12.5
7	13.2	15.4	16.3	14.8	15.4	15.1	15.6	15.0	14.0	14.1
8	12.8	14.2	14.1	13.6	13.8	14.6	14.2	14.5	13.7	13.9
9	8.7	9.6	9.7	10.2	11.0	10.5	10.2	10.4	11.0	10.3
10	4.8	5.4	5.6	5.7	6.4	5.6	5.5	6.4	5.2	5.7
11	–0.2	–0.3	0.5	1.2	1.5	1.0	0.8	1.5	0.9	1.1
12	–3.3	–1.8	–2.6	–2.3	–2.2	–2.4	–1.8	–1.3	–2.5	–2.6
rok	4.2	5.2	5.5	5.4	5.6	5.3	5.5	6.0	5.0	5.2

Tab. 2 Průměrné měsíční teploty na povodí Modrava v období 1981–2010 a v období 2071–2100.

Model	MOD	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100
T	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	–4.2	–1.5	0.3	–1.7	0.4	–2.8	–1.2	1.5	–2.1	0.0
2	–4.0	–0.7	1.7	–1.1	0.8	–2.8	–0.4	1.3	–1.3	0.5
3	–1.1	1.6	3.3	1.2	2.6	0.4	1.7	3.9	–0.1	2.1
4	3.0	5.5	7.8	5.3	7.5	4.9	6.3	8.3	4.1	5.6
5	8.4	10.1	11.3	10.6	11.0	9.3	10.1	12.6	9.4	9.9
6	11.3	14.1	15.8	13.1	14.2	12.6	13.3	15.1	13.3	13.7
7	13.2	17.2	19.7	15.2	17.2	14.6	16.2	18.5	14.7	16.9
8	12.8	14.7	17.9	14.4	16.6	13.8	15.7	18.6	14.8	17.0
9	8.7	11.3	12.5	11.0	13.7	10.6	11.6	14.1	11.4	13.7
10	4.8	6.0	7.8	7.1	9.1	5.5	7.0	8.8	6.2	7.5
11	–0.2	1.6	3.5	1.9	4.1	1.2	2.1	4.3	1.1	3.5
12	–3.3	–0.8	0.9	–0.8	0.7	–2.4	–1.2	1.5	–2.1	0.8
rok	4.2	6.6	8.6	6.4	8.2	5.4	6.8	9.1	5.8	7.7

Obdobně se mění i průměrné maximální měsíční teploty pro období 2021–2050 (Tab. 3). Průměr z let 1981–2010 (9,2 °C) je podle predikcí vyšší o 0,7–1,7 °C, podobně jako u průměrných teplot. Všechny měsíce již mají průměrnou maximální teplotu vyšší než bod mrazu. Letní teploty (červenec) se pak zvyšují o 0,5–1,0 °C. Letní absolutní navýšení maximálních teplot je tedy nižší, než je tomu pro celoroční průměr či zimní měsíce, kde se lednové maximum zvyšuje o 0,6 – 2,1 °C. Pro období 2071–2100 je nárůst opět průměrné roční maximální teploty významně vyšší, a to na rozdíl 1,5–5,0 °C vůči kontrolnímu období (Tab. 4). Průměrná maxima ani v zimních měsících neklesají pod 1,0 °C. Lednové maximum je o 1,8–6,7 °C vyšší než pro kontrolní období. Červencová maxima jsou o 1,3–4,7 °C vyšší. Nárůsty jsou tedy opět absolutně nižší v létě než v zimě.

Tab. 3 Průměrné maximální měsíční teploty na povodí Modrava v období 1981–2010 a v období 2021–2050.

Model	MOD	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50
Tmax	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	−0.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	2.2	2.2	0.6	0.5
2	0.6	1.8	2.8	2.0	1.3	1.5	3.6	3.6	1.5	1.3
3	3.6	4.7	5.0	4.6	4.7	3.9	4.9	4.9	3.8	4.7
4	8.5	8.7	9.5	10.9	10.7	9.2	10.2	10.2	8.8	9.1
5	13.9	13.4	13.2	14.3	13.8	14.6	14.6	14.6	13.5	14.0
6	16.6	17.3	16.9	17.5	16.8	17.0	17.9	17.9	18.4	17.6
7	18.9	20.1	20.9	19.9	20.6	20.6	20.4	20.4	19.4	19.5
8	18.7	19.9	19.7	18.9	19.0	20.7	20.1	20.1	19.3	19.4
9	14.2	15.2	15.3	15.4	16.3	16.3	16.1	16.1	16.9	15.9
10	10.0	10.6	10.6	10.9	11.5	10.8	11.7	11.7	10.2	10.6
11	4.0	3.9	4.5	5.7	6.0	5.4	5.7	5.7	4.8	5.2
12	0.5	2.0	1.0	0.9	1.6	1.2	2.5	2.5	1.2	1.1
rok	9.2	9.9	10.1	10.2	10.3	10.2	10.9	10.9	9.9	10.0

Tab. 4 Průměrné maximální měsíční teploty na povodí Modrava v období 1981–2010 a v období 2021–2050.

Model	MOD	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100
Tmax	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	−0.1	2.4	4.5	1.9	4.0	1.0	6.8	6.8	1.9	4.4
2	0.6	3.8	5.7	3.3	5.4	1.5	6.5	6.5	3.0	5.1
3	3.6	6.2	7.5	6.3	7.7	5.5	9.2	9.2	4.5	7.1
4	8.5	10.3	11.8	10.8	13.0	10.3	13.4	13.4	9.3	10.7
5	13.9	14.3	15.3	15.6	15.6	14.3	17.3	17.3	14.6	15.0
6	16.6	18.3	20.0	18.0	19.1	17.7	20.0	20.0	18.6	18.7
7	18.9	21.6	23.8	20.2	22.2	19.9	23.8	23.8	20.2	22.4
8	18.7	20.2	23.0	19.7	22.0	19.3	24.4	24.4	20.7	22.8
9	14.2	17.0	18.2	16.0	19.1	16.1	20.1	20.1	17.3	19.7
10	10.0	11.1	12.9	12.2	14.2	10.4	13.9	13.9	11.3	12.7
11	4.0	6.0	7.9	6.3	8.2	5.2	8.9	8.9	5.3	8.1
12	0.5	2.9	4.8	2.8	4.2	1.3	5.7	5.7	1.6	5.0
rok	9.2	11.2	13.0	11.1	12.9	10.2	14.2	14.2	10.7	12.7

Menší změny lze pozorovat u průměrných měsíčních minim. Pro období 2021–2050 (Tab. 5) jsou roční průměry vyšší o $-0,2$ – $0,6$ °C oproti kontrolní periodě (průměrné měsíční minimum $1,5$ °C). Lednová minima jsou o $-0,1$ – $1,2$ °C vyšší, červencová $-0,3$ – $0,8$ °C vyšší. Pro období 2071–2100 (Tab. 6) dochází v průměru k nárůstu průměrné minimální roční teploty o $0,1$ – $2,4$ °C. V lednu je to o $0,3$ – $-3,7$ °C, v červenci o $-0,3$ – $4,4$ °C a rozdíl mezi letními a zimními nárůsty je méně zřetelný než pro předchozí období.

Tab. 5 Průměrné minimální měsíční teploty na povodí Modrava v období 1981–2010 a v období 2021–2050.

Model	MOD	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50
Tmin	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	–6.1	–6.2	–5.9	–6.0	–6.1	–6.0	–6.0	–4.9	–6.5	–6.6
2	–6.2	–5.8	–4.8	–5.6	–5.7	–6.0	–5.6	–4.1	–6.1	–5.9
3	–3.4	–3.3	–3.4	–4.0	–3.4	–4.3	–3.4	–3.1	–4.1	–3.4
4	0.1	–0.2	0.5	0.6	0.8	0.1	0.4	0.8	–0.3	0.0
5	4.8	3.8	4.1	4.4	4.5	4.3	4.7	5.0	3.6	4.0
6	7.5	7.6	7.7	7.8	7.4	7.2	7.5	8.0	8.0	7.7
7	9.7	10.1	10.9	10.1	10.4	9.7	10.5	9.8	9.4	9.6
8	9.6	9.6	9.7	9.3	9.5	9.3	9.3	9.5	9.1	9.5
9	6.3	5.8	6.0	6.4	7.3	6.6	6.3	6.6	6.7	6.3
10	2.6	2.0	2.3	2.2	2.9	2.3	2.2	3.1	1.9	2.4
11	–2.1	–3.1	–2.3	–1.8	–1.5	–1.9	–1.9	–1.3	–1.9	–1.8
12	–5.2	–4.9	–5.4	–5.0	–5.0	–5.2	–4.5	–4.0	–5.4	–5.5
rok	1.5	1.3	1.7	1.6	1.8	1.4	1.7	2.1	1.2	1.4

Tab. 6 Průměrné minimální měsíční teploty na povodí Modrava v období 1981–2010 a v období 2071–2100.

Model	MOD	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100
Tmin	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	–6.1	–4.4	–2.8	–4.7	–2.7	–5.8	–4.4	–1.8	–5.2	–3.0
2	–6.2	–3.9	–1.5	–4.5	–2.4	–6.1	–3.7	–2.2	–4.4	–2.5
3	–3.4	–1.8	–0.3	–2.4	–1.0	–3.1	–1.8	0.1	–3.4	–1.3
4	0.1	1.6	4.3	1.0	3.2	0.9	2.0	3.9	0.1	1.6
5	4.8	5.6	6.8	5.9	6.8	4.5	5.5	7.7	4.6	5.3
6	7.5	9.0	10.4	8.5	9.5	7.6	8.5	10.3	8.3	9.1
7	9.7	11.7	14.1	10.6	12.5	9.4	10.9	12.7	10.0	11.9
8	9.6	10.3	13.4	10.1	12.2	9.0	10.5	12.6	10.0	12.0
9	6.3	7.5	8.8	7.4	9.9	6.7	7.3	9.6	7.2	9.3
10	2.6	2.6	4.6	3.8	5.9	2.3	3.8	5.4	2.8	4.1
11	–2.1	–1.3	0.6	–0.9	1.4	–1.4	–0.6	1.4	–1.8	0.6
12	–5.2	–3.8	–2.1	–3.5	–2.2	–5.1	–3.9	–1.3	–5.0	–2.2
rok	1.5	2.8	4.7	2.6	4.4	1.6	2.9	4.9	2.0	3.8

5.3. Srážky

Všechny modely i emisní scénáře odhadují pro povodí Modravského potoka zvýšení srážek vůči současným hodnotám. Dnešní roční srážkový úhrn (průměr za období 1981–2010) opravený přímo na povodí, je 1575 mm (Tab. 7). Nejvyšší měsíční úhrn je v červenci, a to 166 mm, nejnižší v dubnu – 89 mm. Pro období 2021–2050 jsou simulované roční úhrny v rozmezí 1631–1910 mm, tedy o 56–345 mm vyšší. Zatímco nejnižší odhad je prakticky totožný, a je vyšší jen o ca. 4 %, nejvyšší odhad je vyšší o téměř 21 %. U tohoto nejvyššího odhadu k navýšení dochází ve všech měsících mimo března, kde je simulován mírný pokles (Tab. 7.). Nejvyšší je vzrůst v letních měsících (až o 60 %), nejnižší je nárůst v jarních (zanedbatelně) a podzimních měsících (10–15 %). Zimní srážky vzrůstají zhruba o čtvrtinu. Pro období 2071–2100 modelový odhad srážek ještě dále narůstá (Tab. 8). Nejnižší roční úhrn je odhadnut na 1669 mm, nejvyšší na 1996 mm. Rozdíl oproti současným 1575 mm je tedy 94–421 mm.

Tab. 7. Měsíční srážkové úhrny vypočtené různými klimatickými modely a emisními scénáři pro povodí Modravského potoka v období 2021–2050.

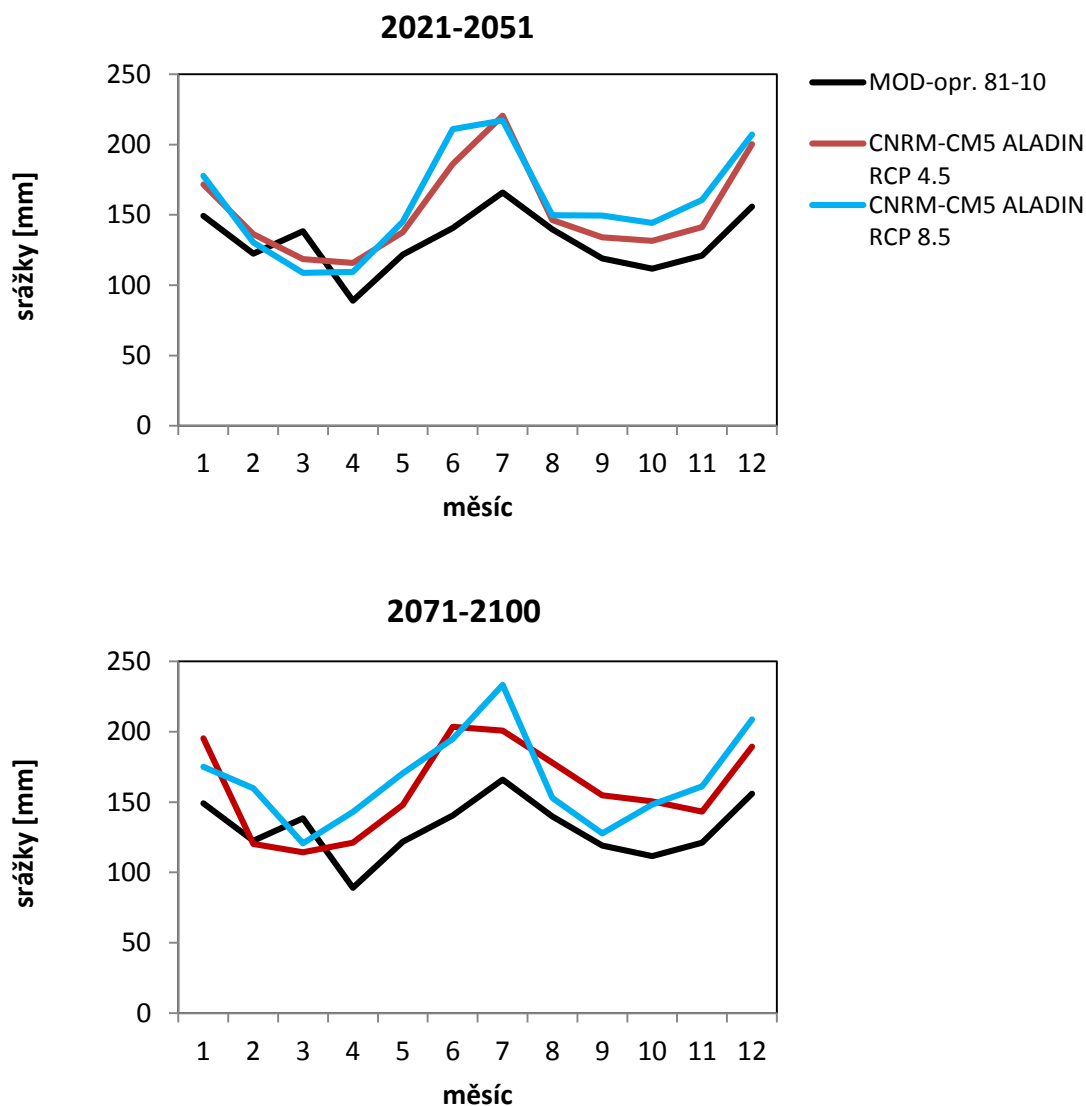
Model	MOD	Filipova Huť ČHMÚ	MOD- opr.	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář				RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	81–10	81–10	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50
P	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	90.5	112.2	149.2	171.7	177.7	165.0	155.8	228.1	172.1	231.7	170.1	162.1
2	79.6	92.7	122.4	136.2	130.4	111.4	145.2	120.6	130.4	116.6	147.8	125.7
3	100.2	106.4	138.4	118.5	108.7	107.3	110.6	107.8	106.4	104.2	149.8	128.0
4	68.7	69.5	89.0	115.8	109.5	96.8	108.1	112.6	94.5	113.8	110.4	123.0
5	94.8	95.1	121.8	137.6	145.2	121.4	153.2	164.6	156.4	164.5	139.6	130.2
6	107.4	117.1	140.6	186.2	210.9	155.0	157.2	166.4	169.7	165.2	150.9	165.2
7	127.3	138.3	166.0	220.6	217.1	161.1	139.7	173.1	210.8	155.5	168.8	169.4
8	116.5	116.4	139.7	146.2	149.6	143.6	160.8	117.9	121.1	130.2	119.4	130.2
9	80.8	93.0	119.1	133.9	149.4	151.6	143.2	138.1	121.2	139.5	113.3	149.3
10	73.8	85.9	111.6	131.6	144.2	100.2	120.1	117.6	113.6	124.3	146.2	183.9
11	79.1	93.1	121.0	141.4	160.6	137.5	126.7	142.9	156.9	164.0	175.9	162.9
12	98.2	119.9	155.9	200.3	207.1	185.2	167.5	168.0	185.1	218.5	215.3	172.5
rok	1116.7	1239.8	1574.6	1840.1	1910.4	1636.1	1688.2	1757.8	1738.4	1828.0	1807.5	1802.3

Tab. 8. Měsíční srážkové úhrny vypočtené různými klimatickými modely a emisními scénáři pro povodí Modravského potoka v období 2071–2100.

Model	MOD- opr.	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA	EC- EARTH RCA	EC- EARTH RCA	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81-10	71-100	71-100	71-100	71-100	71-100	71-100	71-100	71-100	71-100
P	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	149.2	195.4	175.2	190.5	198.5	190.0	199.2	221.6	204.2	220.9
2	122.4	120.1	159.7	126.5	107.7	141.1	146.6	124.8	131.0	173.0
3	138.4	114.4	120.8	106.5	134.9	99.8	122.3	131.1	151.9	134.3
4	89.0	121.0	142.9	103.2	106.1	98.2	95.7	128.6	118.2	137.1
5	121.8	148.0	170.4	129.8	169.0	144.0	164.2	154.4	142.9	159.0
6	140.6	203.4	194.9	151.2	160.9	154.5	178.9	160.9	127.4	147.7
7	166.0	200.8	233.4	177.1	165.5	162.8	203.5	172.0	153.3	120.1
8	139.7	177.9	153.1	138.3	130.9	142.4	123.7	112.0	110.6	99.5
9	119.1	154.9	127.8	144.5	122.3	140.2	122.9	104.2	139.9	145.0
10	111.6	150.4	148.2	125.4	130.9	116.9	145.7	142.2	127.8	167.6
11	121.0	143.1	161.1	120.0	164.2	153.0	132.8	163.4	190.4	177.7
12	155.9	189.5	208.8	156.1	180.8	183.4	216.2	217.8	214.5	231.3
rok	1574.6	1919.0	1996.4	1668.9	1771.7	1726.3	1851.8	1833.0	1811.9	1913.3

Model CNRM-CN5 ALADIN53

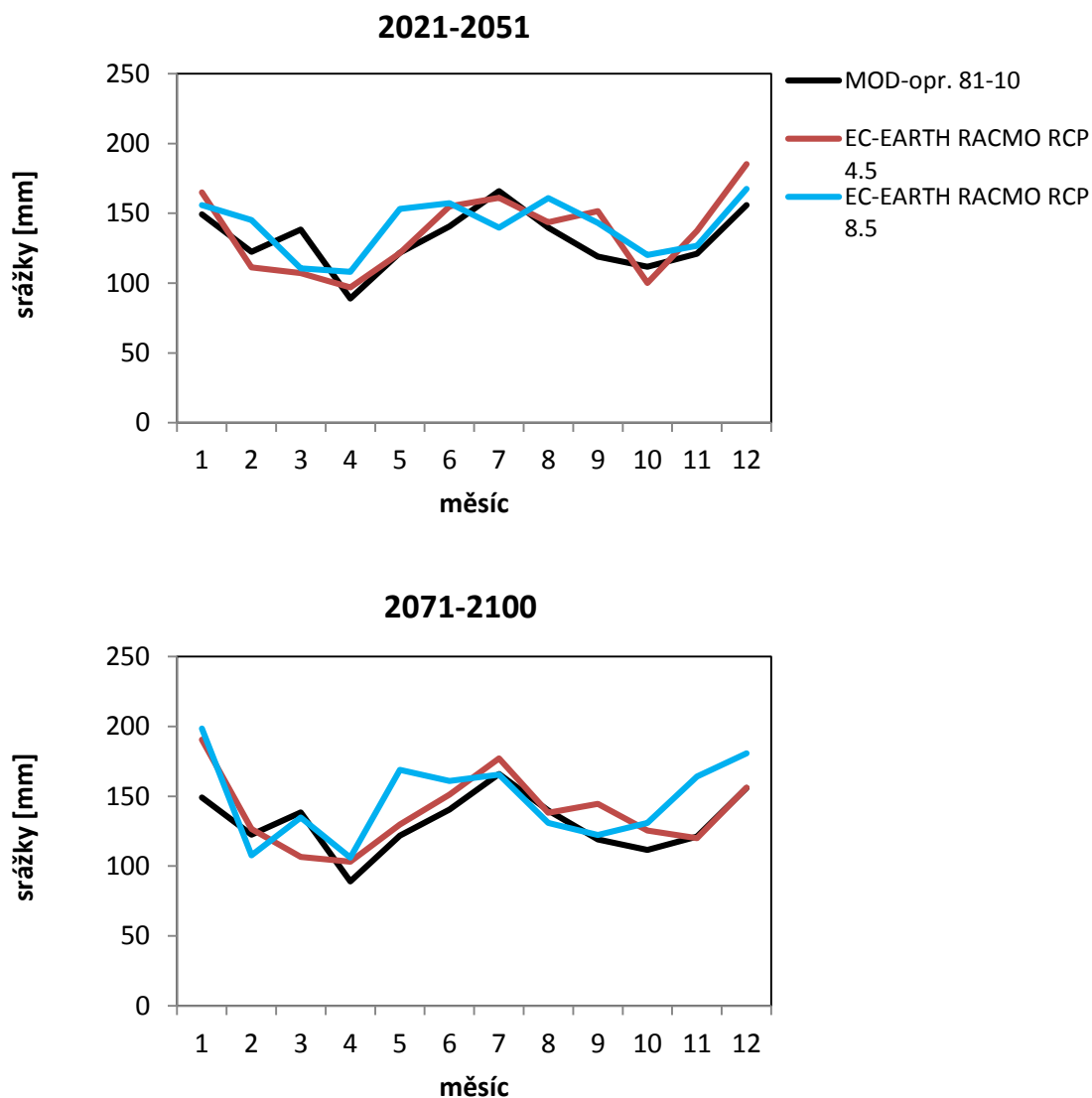
Pokud srovnáme navzájem jednotlivé modely a emisní scénáře, pak model CNRM-CN5 ALADIN53 odhaduje jak pro scénář RCP 4,5, tak pro RCP 8,5 nejvyšší navýšení srážek ve všech měsících mimo již zmiňovaného března (Obr. 3), a to pro obě predikovaná období. Pro 2021–2050 je to 1840 mm (RCP 4,5), a 1910 mm (RCP 8,5). Pro období 2071–2100 model odhaduje nárůst na 1910 mm (RCP 4,5) a 1996 mm (RCP 8,5). Nejvyšší nárůsty připadají na letní měsíce, nejnižší na jarní měsíce (Obr. 3).



Obr. 3. Měsíční srážky predikované klimatickým modelem CNRM-CN5 ALADIN53 pro dva emisní scénáře RCP 4,5 a 8,5 pro období 2021–2050 a 2071–2100 porovnané s aktuálními srážkami v kontrolním období 1981–2010.

Model EC-EARTH RACMO22E

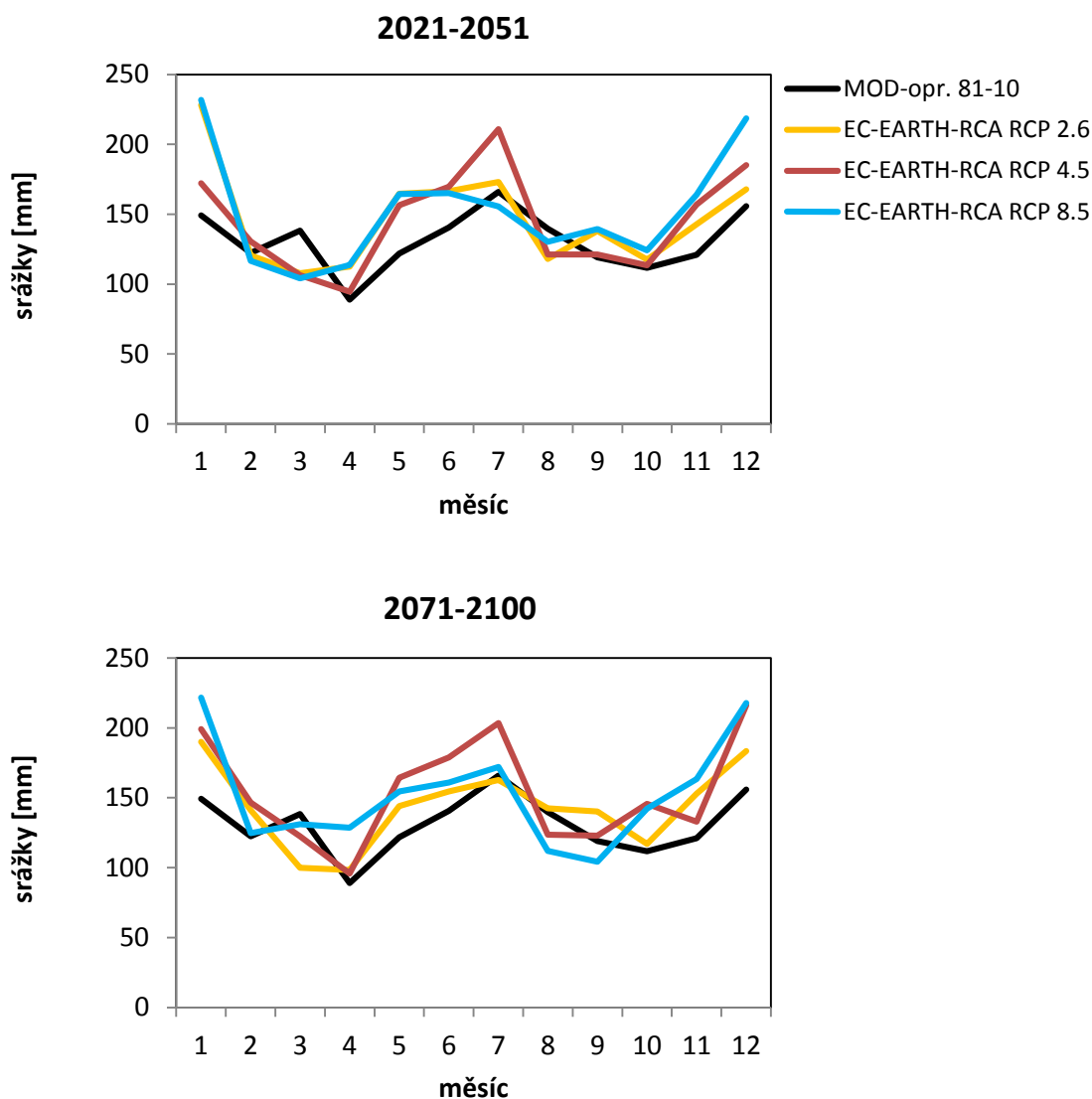
Poměrně nejnižší navýšení srážek predikuje model EC-EARTH RACMO22E (Obr. 4). Pro období 2021–2050 a RCP 4,5 je to 1636 mm ročního úhrnu, pro RCP 8,5 pak 1688 mm (současnost 1575 mm). Pro období 2071–2100 je predikce 1668 mm, respektive 1772 mm. Roční chod pro bližší období je velmi podobný dnešnímu pro oba scénáře zvýšení teplot. Pro období 2071–2100 pak dochází k relativnímu zvýšení zimních (listopad–leden) a květnových srážek.



Obr. 4. Měsíční srážky simulované klimatickým modelem EC-EARTH RACMO22E pro dva emisní scénáře RCP 4,5 a 8,5 pro období 2021–2050 a 2071–2100 porovnané s aktuálními srážkami v kontrolním období 1981–2010.

Model EC-EARTH RCA4

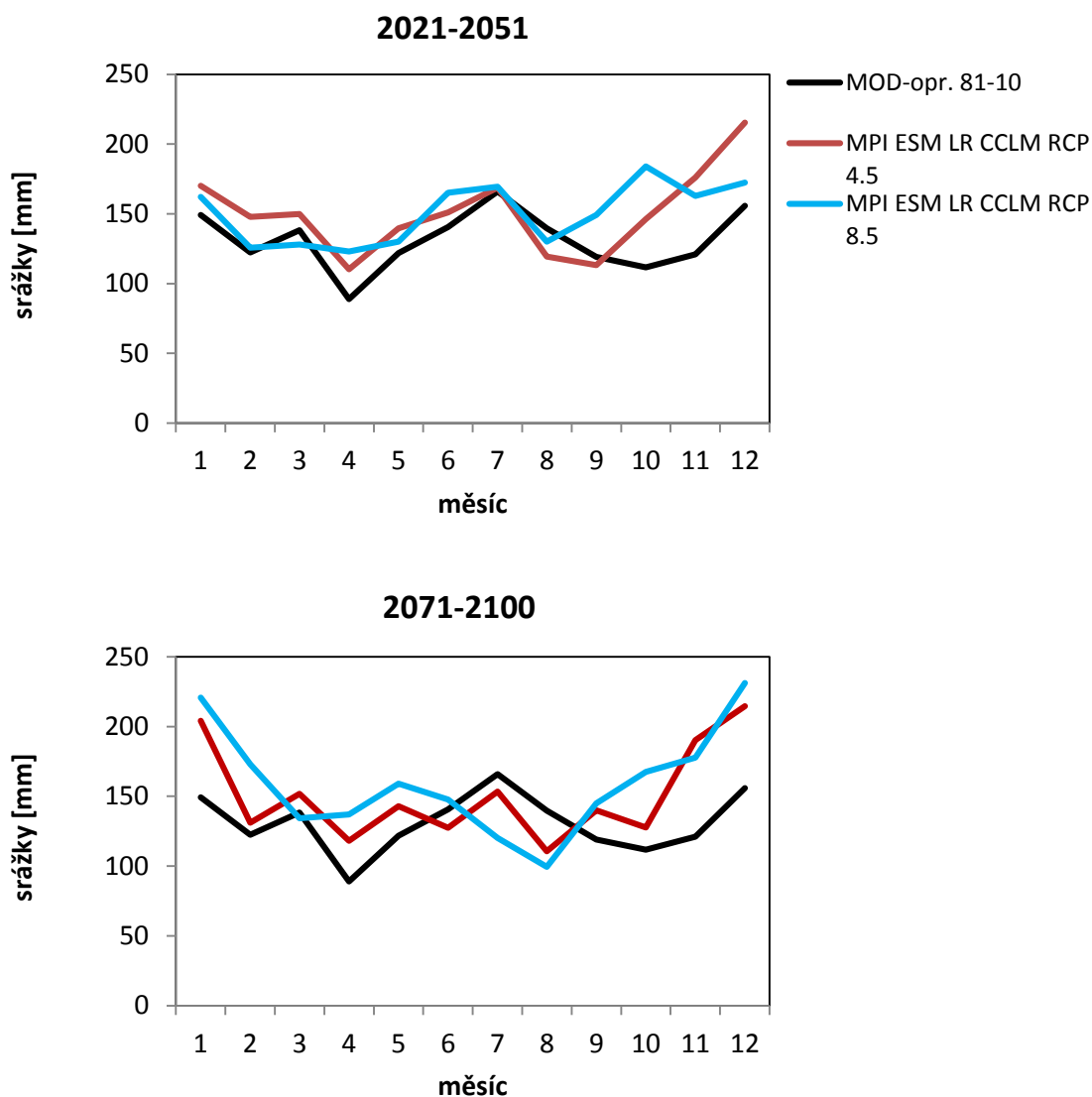
Model EC-EARTH RCA4 je k dispozici se třemi scénáři zvýšení teplot (RCP 2,6, 4,4 a 8,5, Obr. 5). Pro období 2021–2050 predikuje roční nárůsty na 1758, 1738 a 1828 mm, tedy méně než první, a více než druhý model. Rozdíl mezi oběma nižšími scénáři je velmi malý, a distribuce změn pro všechny tři scénáře během roku je také obdobná – dochází ke zvýšení srážek zejména v zimních měsících a na přelomu jara a léta (květen–červenec, Obr. 5.). V období 2071–2100 u tohoto modelu nedochází k výraznějšímu navýšení srážek u modelu RCP 2,6 a 8,5 oproti období 2021–2050 (1726, respektive 1833 mm). Výrazně vyšší je predikce pro RCP 4,5 – 1851 mm. Roční chody pro první dva případy jsou proto obdobné jako pro bližší období, zvýšený RCP 4,5 pak navyšuje srážky v letním a podzimním období (Obr. 5).



Obr. 5. Měsíční srážky simulované klimatickým modelem EC EARTH-RCA4 pro tři emisní scénáře RCP 2,6, 4,5 a 8,5 pro období 2021–2050 a 2071–2100 porovnané s aktuálními srážkami v kontrolním období 1981–2010.

Model MPI-ESM-LR CCLM4-8-17

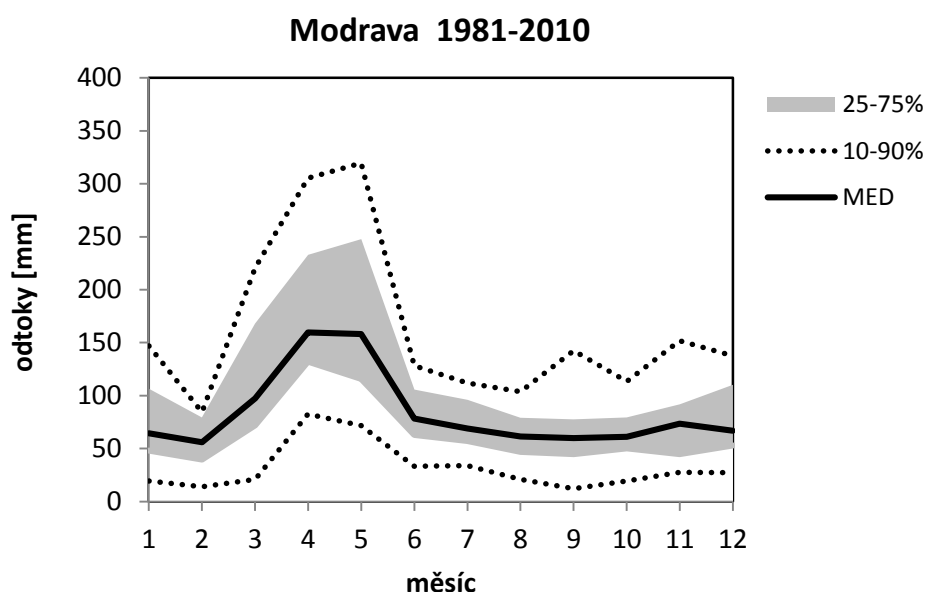
Poslední model MPI-ESM-LR CCLM4-8-17 (Obr. 6) odhaduje druhé nejvyšší navýšení srážek po CNRM-CM5 ALADIN53. Navýšení je na 1808 a 1802 mm (RCP 4,5 a 8,5 pro období 2021–2050). Oba scénáře jsou pro toto období prakticky stejné v celkové sumě srážek, ale liší se ročním chodem. Nižší vzrůst teploty navýšuje více srážky v zimě, zvýšení 8,5 °C predikuje viditelnější zvýšení na jaře a na podzim. V letních měsících je zvýšení oproti dnešnímu stavu minimální. Tento model ze všech použitých predikuje nejvyrovnanější roční chod srážek. Pro období 2071–2100 je predikce pro RCP 4,5 1811 mm, tedy prakticky stejná jako pro předchozí období. RCP 8,5 ale generuje zvýšení na 1913 mm. Roční chod pak je výrazně změněn zejména v podzimních a zimních měsících, kdy srážek výrazně přibude. V červnu a červenci srážek ale mírně ubude (Obr. 6).



Obr. 6. Měsíční srážky predikované klimatickým modelem MPI-ESM-LR CCLM4-8-17 pro dva emisní scénáře RCP 4,5 a 8,5 pro období 2021–2050 a 2071–2100 porovnané s aktuálními srážkami v kontrolním období 1981–2010.

5.4. Odtoky

Pro odhady do budoucna bylo použito zobrazení měsíčních odtoků s použitím mediánu (MED) a rozpětí kvantilu 25 a 75% a dále zobrazení extrémů odpovídajících 10% a 90% kvantilu (Obr. 7). Aktuální průběh odtoků má měsíční chod dosud typický pro horská povodí s bohatou zimní sněhovou pokrývkou – nízké průtoky během zimy, vysoké jarní průtoky dané postupným táním sněhové pokrývky a pak poměrně vyrovnané odtoky během léta a podzimu. Povodí v žádném měsíci nevysychá, a to ani v rámci 10% kvantilu, tedy extrémně suchého roku. Celkový roční odtok je v současnosti 1152 mm (Tab. 9), s maximem 189 mm v dubnu a minimem 56 mm v lednu. Velmi vyrovnané jsou měsíce červenec – listopad, s odtokem kolísajícím jen mezi 71,5–80 mm.

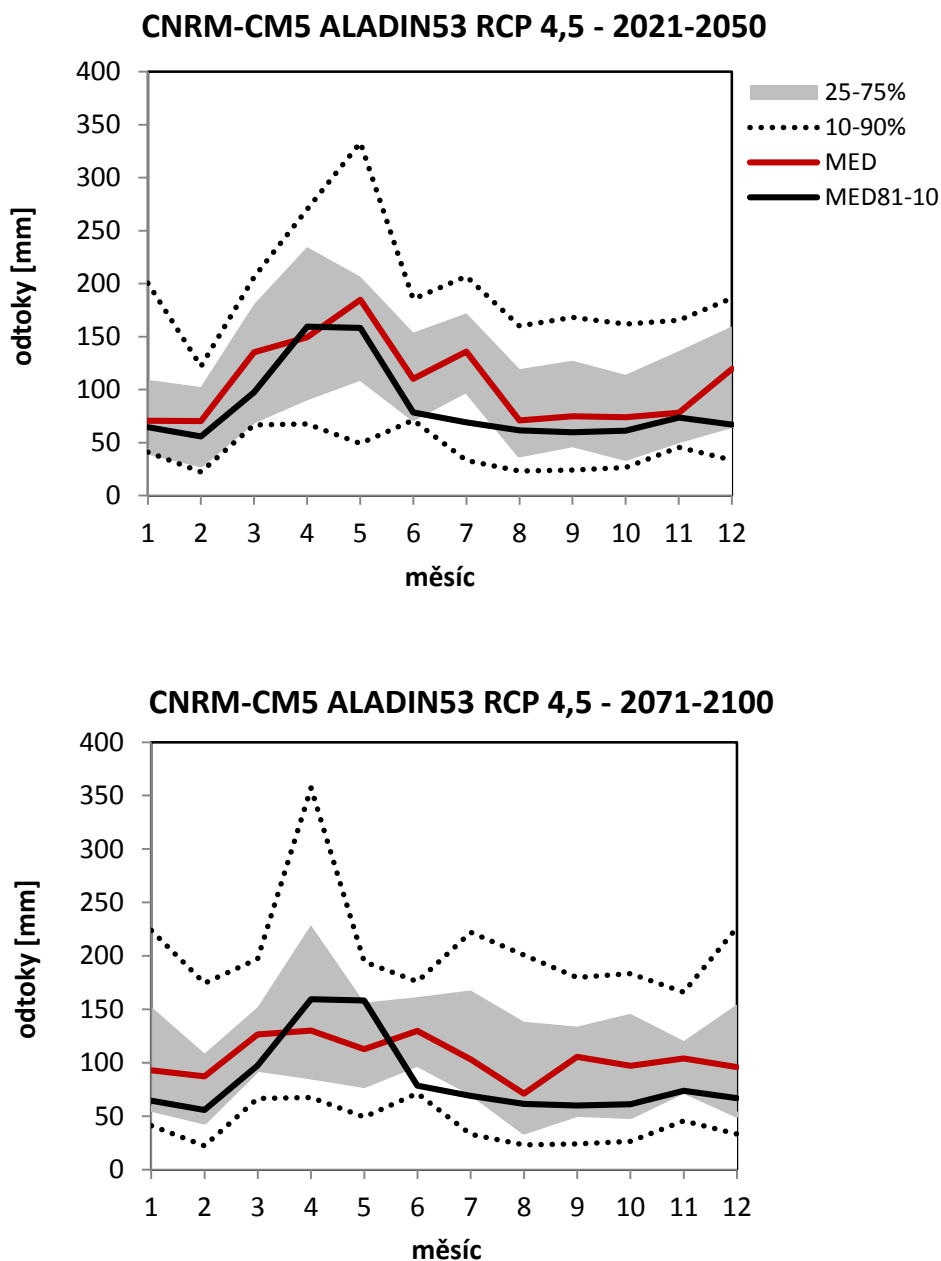


Obr. 7. Medián měsíčních odtoků (MED), interval 25-75% kvantilu, 10% a 90% kvantil odtoku z povodí Modravského potoka v období let 1981–2010.

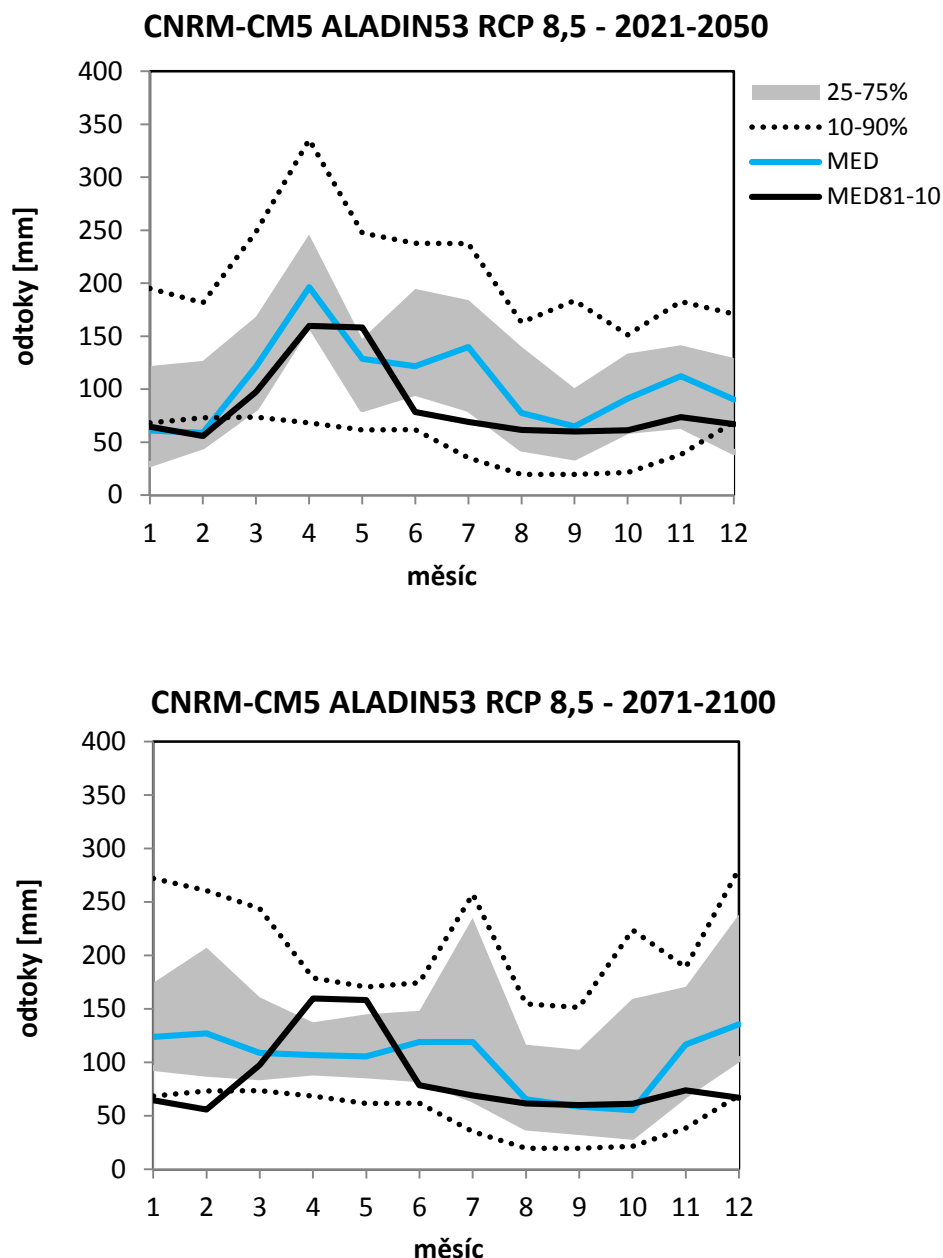
Model CNRM-CM5 ALADIN53

Predikce změny odtoků s použitím modelu CNRM-CM5 ALADIN53 zvyšuje značně roční odtoky. Pro RCP 4,5 a období 2021–2050 dojde ke zvýšení ročního odtoku na 1357 mm (Tab. 9), a v rámci ročního chodu (Obr. 8) se zvýší zejména letní průtoky (hlavně červenec) a pak se zvýší prosincový průtok (méně sněhu kvůli rostoucí teplotě). Pro období 2071–2100 pak dojde k dalšímu navýšení ročního odtoku na 1417 mm (vůbec nejvíce ze všech uvažovaných modelů, Tab. 10), měsíční odtoky (obr. 8) se velmi navzájem přiblíží. Prakticky zmizí maximum jarního tání a navýší se zimní odtoky. V případě emisního scénáře RCP 8,5 se celkový roční odtok pro období 2021–2050 zvýší na 1431 mm (Tab. 9) a průtoky se zvýší, anebo zůstanou stejné, ve všech měsících mimo května, kde dojde k mírnému poklesu. Značně se zvýší odtoky v létě (hlavně v červenci, téměř na dvojnásobek) a zvýší se podzimní a zimní odtoky (říjen–prosinec). Zůstane ale zachováno lednové a únorové minimum. Pro období 2071–2100 se pro RCP 8,5 zvýší roční odtoky na 1466 mm (vůbec nejvyšší modelovaný roční odtok ze všech modelů a scénářů, Tab. 10). Dojde ke značné redistribuci měsíčních odtoků – zhruba dvojnásobné budou zimní odtoky a zmizí jarní tání (Obr. 9). Nejvodnějšími měsíci budou prosinec – únor, nejsuššími srpen–říjen, ovšem odtoky budou prakticky stejné jako v současnosti. V žádném

z těchto scénářů a intervalů nedojde k vysychání toku ani v případě nevhodné kombinace srážek a teplot – i 10% kvantil vždy dosahuje hodnot alespoň 15–20 mm měsíčně, podobně jako je tomu v současnosti (Obr. 7). Také pravděpodobnost vysokých průtoků je podobná jako v dnešních podmínkách – 90% kvantil dosahuje měsíčních hodnot 300–350 mm.



Obr. 8. Medián měsíčních odtoků (MED), interval 25–75% kvantilu, 10% a 90% kvantil odtoku z povodí Modravského potoka vypočtený modelem Brook90 při použití dat z klimatického modelu CNRM-CM5 ALADIN53 s emisním scénářem RCP 4,5 pro období let 2021–2050 a 2071–2100. Černá čára je medián z kontrolního období let 1981–2010.

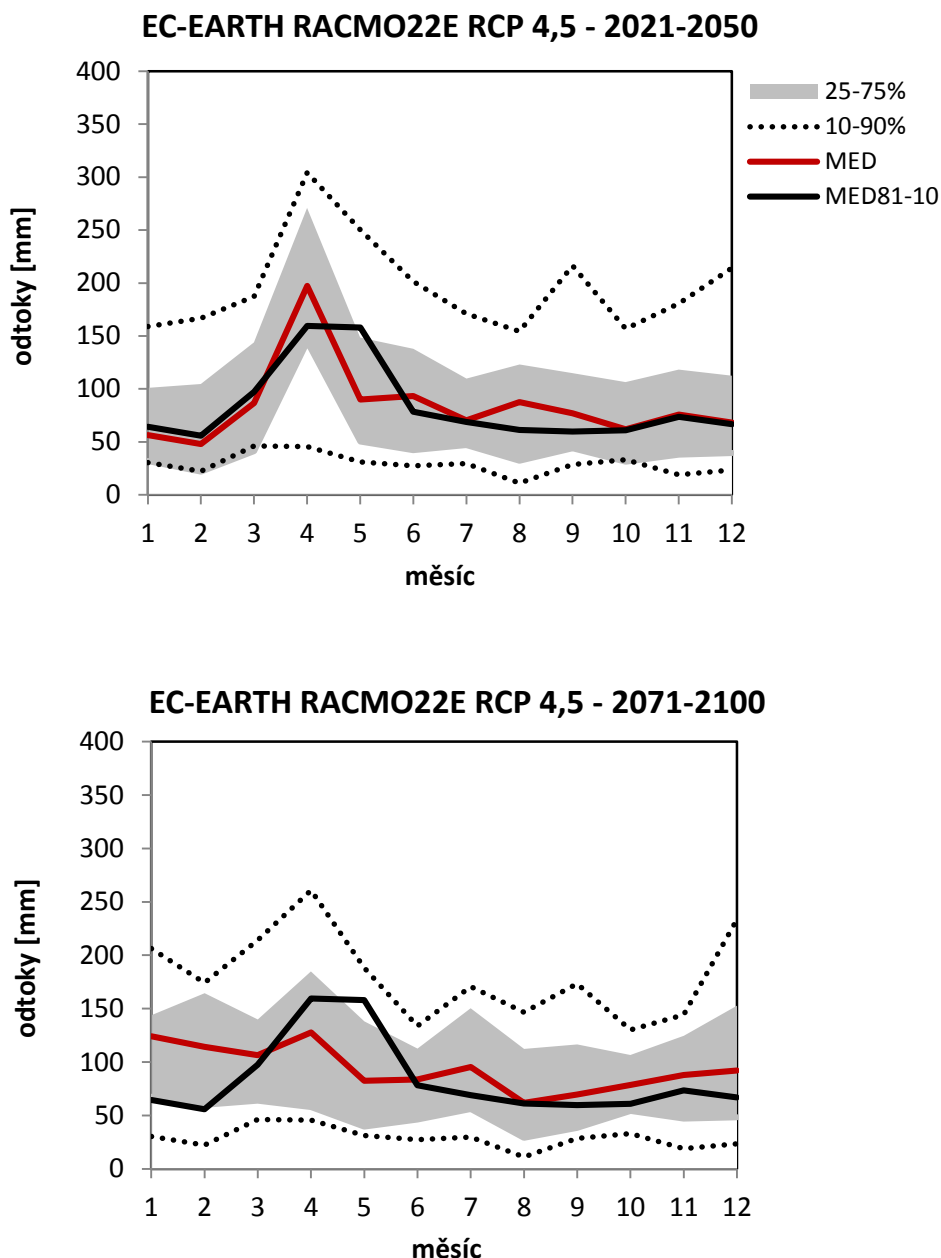


Obr. 9. Medián měsíčních odtoků (MED), interval 25–75% kvantilu, 10% a 90% kvantil odtoku z povodí Modravského potoka vypočtený modelem Brook90 při použití dat z klimatického modelu CNRM-CM5 ALADIN53 s emisním scénářem RCP 8,5 pro období let 2021–2050 a 2071–2100. Černá čára je medián z kontrolního období let 1981–2010.

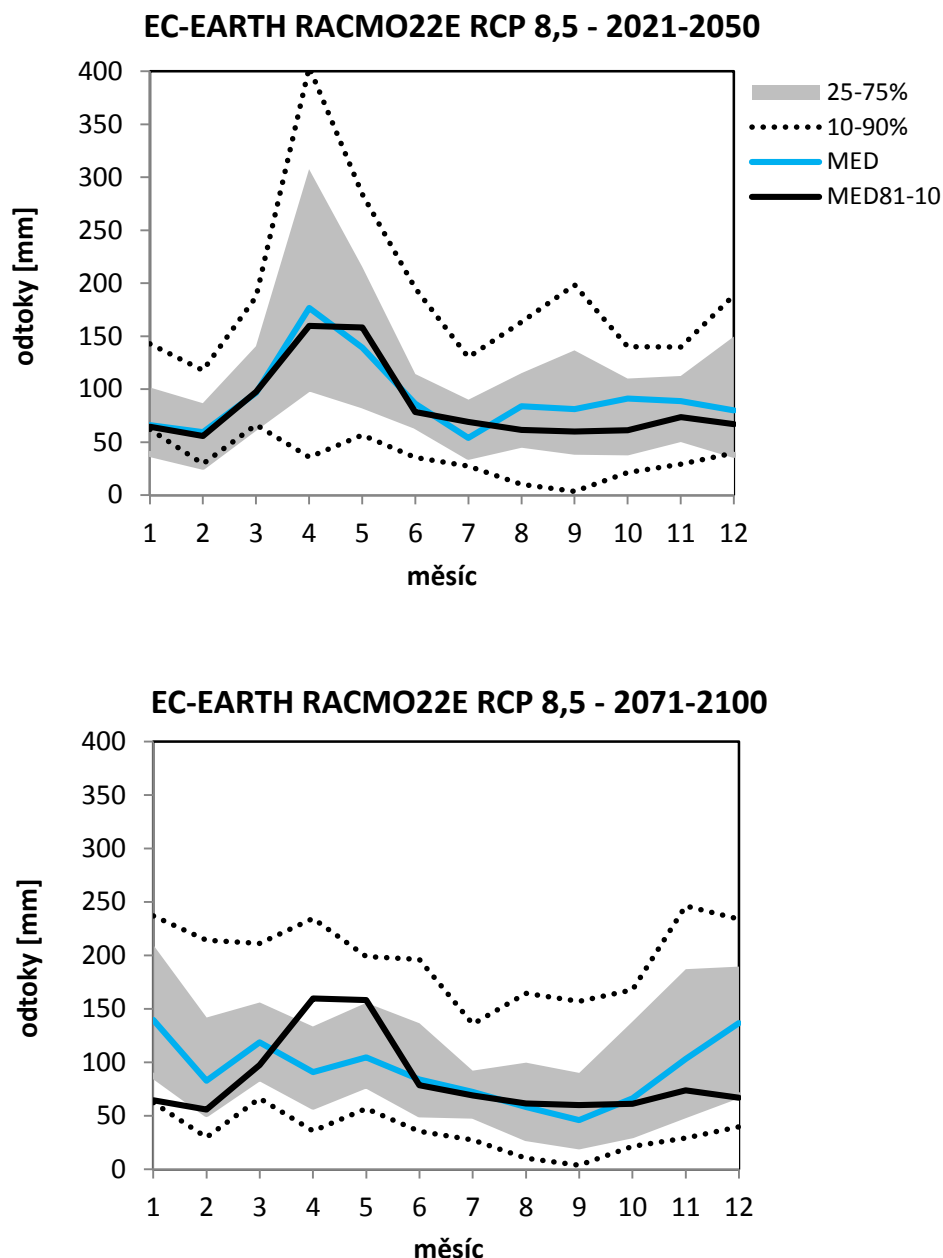
Model EC-EARTH RACMO22E

Predikce tohoto modelu pro RCP 4,5 jsou nejpodobnější dnešní situaci. Pro období 2012–2050 je roční odtok predikován 1197 mm (Tab. 9), pouze o 45 mm vyšší než dnešní stav. I distribuce maxim a minim měsíčních hodnot je podobná (Obr. 10), pouze duben má výrazně vyšší, a květen výrazně nižší odtok. Pro období 2071–2100 se celkový roční odtok mírně zvýší (1223 mm), měsíční distribuce se ale již výrazněji mění – opět prakticky mizí jarní tání, maximální odtoky se přesouvají do zimních měsíců leden–duben (Obr. 10). Extremita těchto predikcí je stále relativně příznivá – extrémní měsíční minima (10% kvantil) jsou nad 15 mm/měsíc, maxima (90% kvantil) dosahují hodnot 250–300 mm. Pro RCP 8,5 se zvyšují roční odtoky na 1197 mm (2021–2050) respektive 1297 mm (Tab. 9 a

10). Roční distribuce odtoků je pro období 2021–2050 velmi podobná současné, s mírným navýšením průtoků od srpna do prosince (Obr. 11). Dochází ale ke značné extremizaci maxim – 90% kvantil roste v dubnu na 400 mm, a 10% minimum se v září blíží k nule. Pro období 2071–2100 opět zcela mizí dosavadní roční chod a nejvyšší odtoky se koncentrují do zimních měsíců listopad–březen. V tomto scénáři nejsou vysoké 90% kvantily (maximálně 200–250 mm/měsíc), ale 10% minima se opět blíží k nule v časném podzimu (Obr. 11).



Obr. 10. Medián měsíčních odtoků (MED), interval 25–75% kvantilu, 10% a 90% kvantil odtoku z povodí Modravského potoka vypočtený modelem Brook90 při použití dat z klimatického modelu EC-EARTH RACMO22E s emisním scénářem RCP 4,5 pro období let 2021–2050 a 2071–2100. Černá čára je medián z kontrolního období let 1981–2010.

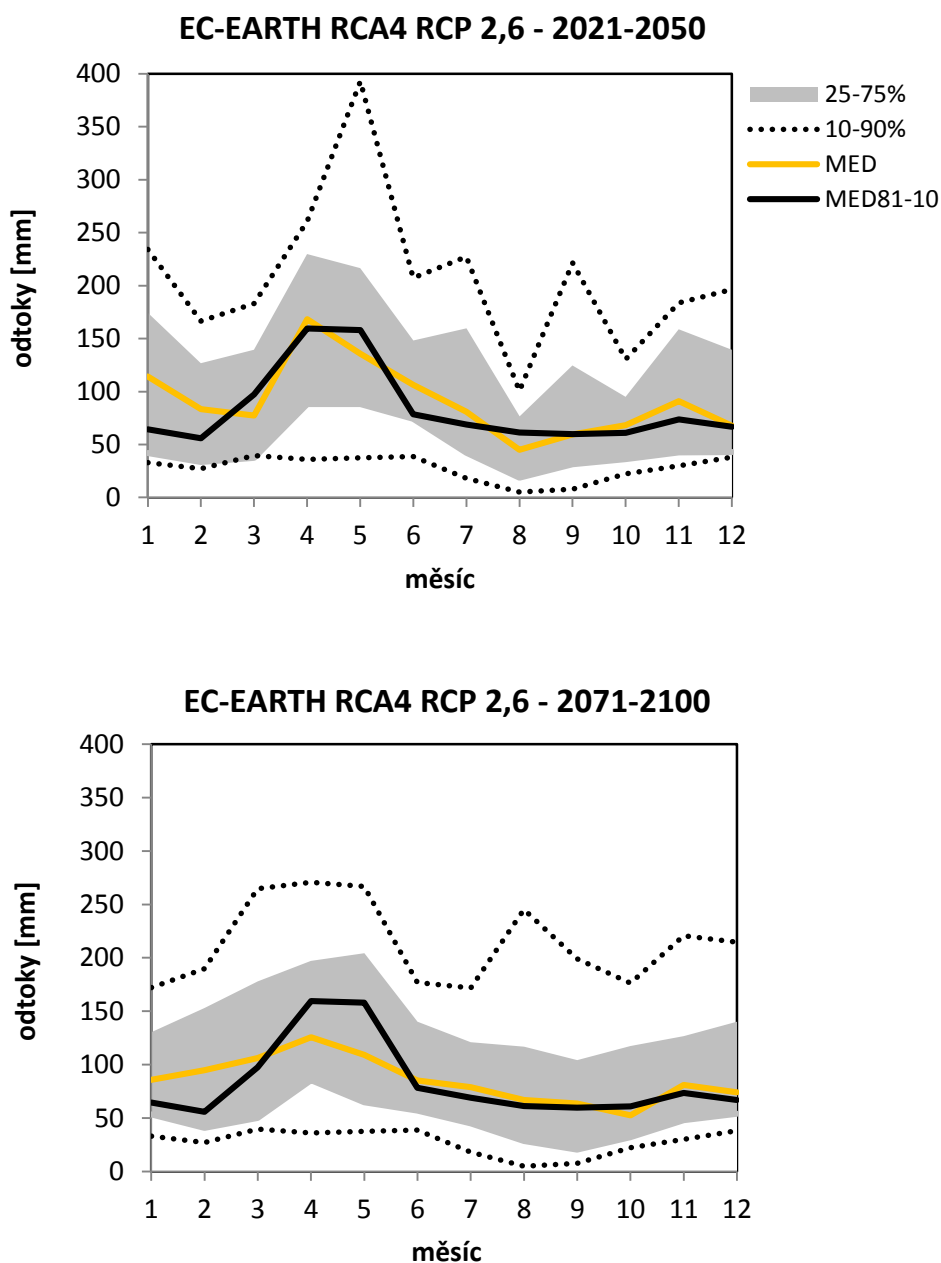


Obr. 11. Medián měsíčních odtoků (MED), interval 25–75% kvantilu, 10% a 90% kvantil odtoku z povodí Modravského potoka vypočtený modelem Brook90 při použití dat z klimatického modelu EC EARTH RACMO s emisním scénářem RCP 8,5 pro období let 2021–2050 a 2071–2100. Černá čára je medián z kontrolního období let 1981–2010.

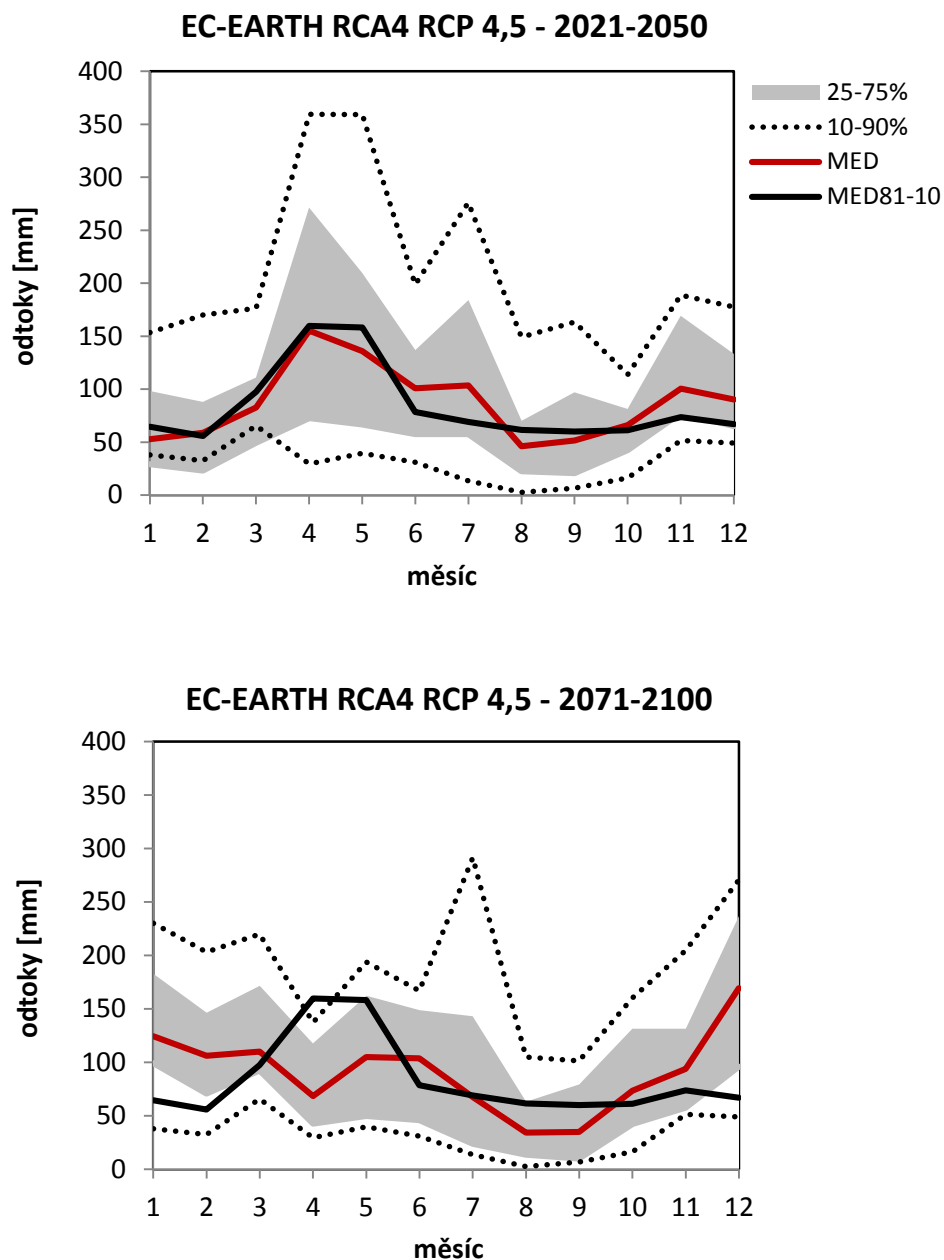
Model EC-EARTH RCA4

Tento model má tři emisní scénáře (RCP 2,6, 4,5 a 8,5). Ve všech také predikuje zvýšení ročních odtoků oproti současnosti. Pro RCP 2,6 to je na 1290 mm (2021–2050) a 1264 mm (2071–2100). První je, co se týče měsíčních průběhů velmi podobný dnešku, s výjimkou výrazného zvýšení lednových odtoků na zhruba dvojnásobek dnešních hodnot (Obr. 11). Vysoká je i extremita tohoto scénáře, kdy 90% kvantil dosahuje 400 mm v květnu a srpnové a zářijové hodnoty 10% kvantilu klesají pod 5 mm/měsíc. Pro roky 2071–2100 se velmi snižuje sezonalita odtoků, i když slabé maximum v březnu zůstává zachováno (Obr. 12). Potenciální maxima jsou mezi 250–300 mm měsíčně, 10% minima jsou prakticky identická jako pro předchozí období. Emisní scénář RCA 4,5 predikuje velmi podobné roční

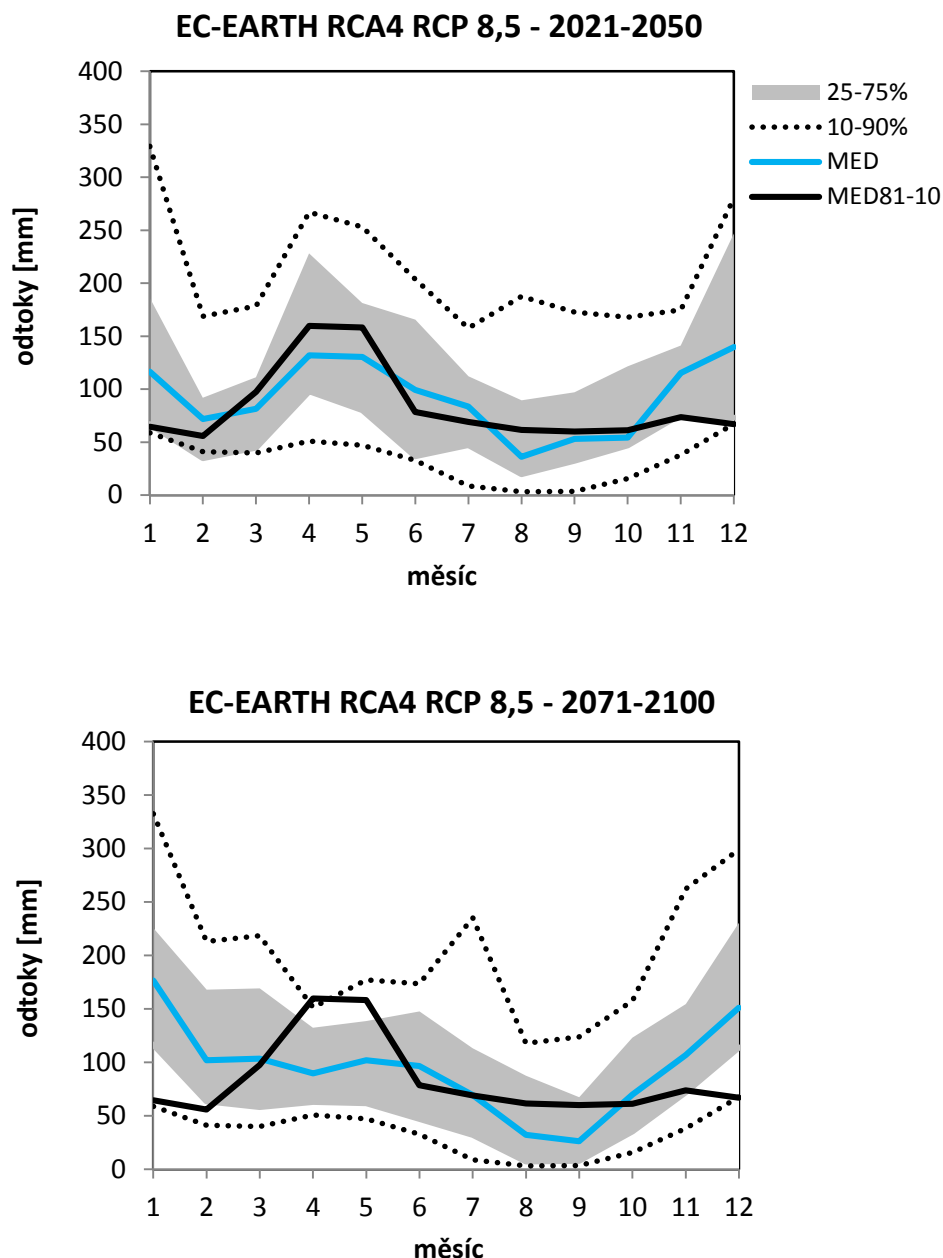
odtoky pro obě časová období – 1260 mm, respektive 1284 mm. Pro bližší období 2021–2050 je průběh odtoků podobný dnešku, stejně jako potenciální maxima (ca. 350 mm na jaře). Letní minima ale již jsou srpen–září velmi nízká (Obr. 13). Pro RCP 8,5 se zvyšují roční odtoky (1348 mm, respektive 1302 mm) a postupně mizí sezonalita odtoku. Pro období 2021–2050 se zvyšují zhruba na dvojnásobek prosincové a lednové odtoky (Obr. 14) a klesají původní dubnová a květnová maxima. Nejvodnějším měsícem je prosinec. Pro období 2071–2100 se měsíční maxima přesouvají ještě více do zimy do období listopad–leden. Minima pak do letních měsíců srpen–září. Potenciální extrémy (90% kvantil) jsou nejvyšší v lednu (300–350 mm) a 10% kvantil klesá pod 10 mm/měsíc pro období červenec – září pro obě časová období. Z hlediska potenciálních minim je tento model nejextrémnější.



Obr. 12. Medián měsíčních odtoků (MED), interval 25–75% kvantilu, 10% a 90% kvantil odtoku z povodí Modravského potoka vypočtený modelem Brook90 při použití dat z klimatického modelu EC-EARTH RCA4 s emisním scénářem RCP 2,6 pro období let 2021–2050 a 2071–2100. Černá čára je medián z kontrolního období let 1981–2010.



Obr. 13. Medián měsíčních odtoků (MED), interval 25–75% kvantilu, 10% a 90% kvantil odtoku z povodí Modravského potoka vypočtený modelem Brook90 při použití dat z klimatického modelu EC-EARTH RCA4 s emisním scénářem RCP 4,5 pro období let 2021–2050 a 2071–2100. Černá čára je medián z kontrolního období let 1981–2010.

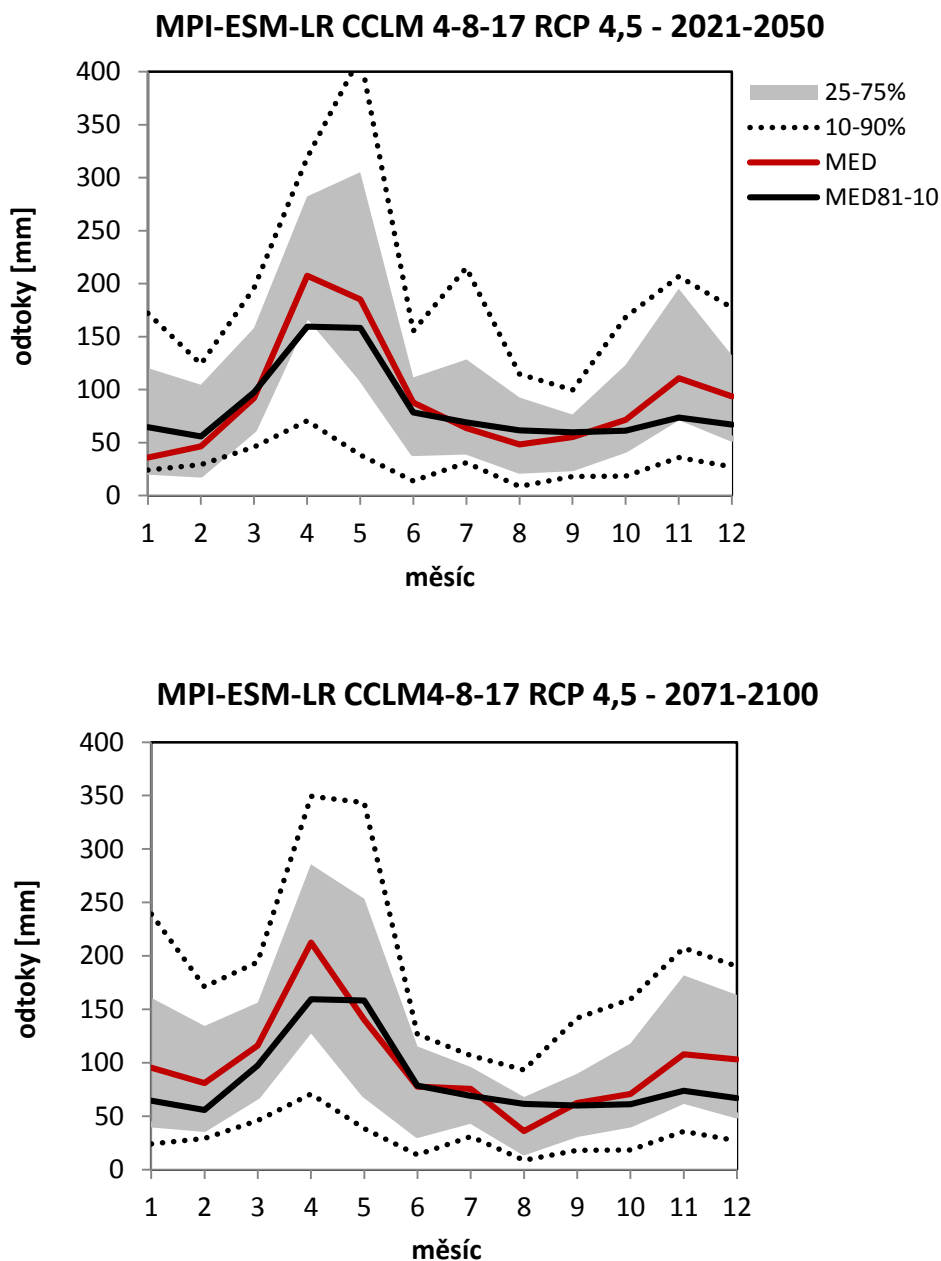


Obr. 14. Medián měsíčních odtoků (MED), interval 25–75% kvantilu, 10% a 90% kvantil odtoku z povodí Modravského potoka vypočtený modelem Brook90 při použití dat z klimatického modelu EC-EARTH RCA4 s emisním scénářem RCP 8,5 pro období let 2021–2050 a 2071–2100. Černá čára je medián z kontrolního období let 1981–2010.

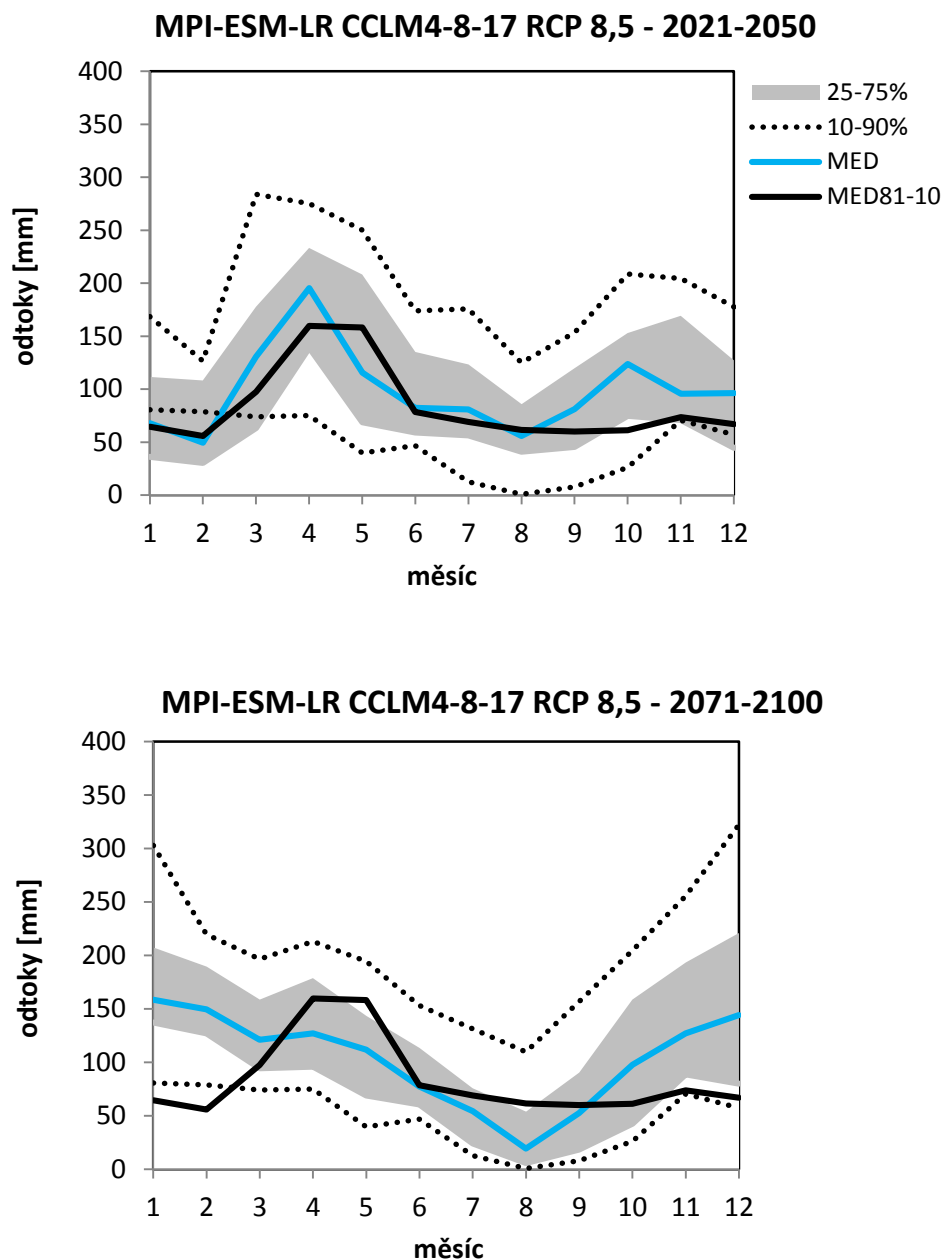
Model MPI-ESM-LR CCLM4-8-17

I tento model predikuje celkové zvýšení ročních odtoků. V případě RCP 4,5 je odhad téměř identický, je to 1322 mm, respektive 1321 mm pro obě po sobě následující časová období. Měsíční průběhy jsou opět podobné jako dnes, se zvýšením jarních průtoků pro první interval a zimních průtoků pro druhý interval (Obr. 15). 90% kvantil je pro první období velmi vysoký pro květen (ca. 410 mm/měsíčně), 10% kvantil neklesá pod 10 mm ani v letních měsících. Z tohoto pohledu je tento scénář relativně příznivý. Pro RCP 8,5 je roční odtok 1315 mm pro 2021–2050 velmi blízký předchozí variantě, pro 2071–2100 je simulováno 1392 mm (třetí nejvyšší hodnota celého souboru ročních predikcí). Průběh je pro první období podobný současnému, s výraznějším navýšením v podzimních měsících (září–prosinec, Obr. 16)

Pro období 2071–2100 se průběh opět zcela změní, maxima se přesunou do zimních měsíců (listopad – únor), jarní tání prakticky zmizí, a výrazné minimum bude v červenci–září. Extremizace maxim a minim se projeví zejména poklesem 10% kvantilu blízko k nule v srpnu (obě období, Obr. 16). 90% kvantil bude mezi 300–350 mm v prosinci a lednu.



Obr. 15. Medián měsíčních odtoků (MED), interval 25–75% kvantilu, 10% a 90% kvantil odtoku z povodí Modravského potoka vypočtený modelem Brook90 při použití dat z klimatického modelu MPI-ESM-LR CCLM4-8-17 s emisním scénářem RCP 4,5 pro období let 2021–2050 a 2071–2100. Černá čára je medián z kontrolního období let 1981–2010.



Obr. 16. Medián měsíčních odtoků (MED), interval 25–75% kvantilu, 10% a 90% kvantil odtoku z povodí Modravského potoka vypočtený modelem Brook90 při použití dat z klimatického modelu MPI-ESM-LR CCLM4-8-17 s emisním scénářem RCP 8,5 pro období let 2021–2050 a 2071–2100. Černá čára je medián z kontrolního období let 1981–2010.

Tab. 9. Průměrné měsíční odtoky a roční suma simulovaná modelem Brook90 v povodí Modravského potoka pro kontrolní období 1981–2010 a na základě různých klimatických modelů a emisních scénářů pro období 2051–2050.

Model	MOD	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50
Qavg	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	55.8	89.3	94.5	76.5	75.4	121.3	74.4	152.9	74.9	83.8
2	61.8	74.1	85.9	72.3	65.4	90.6	70.7	82.3	67.4	64.8
3	115.0	129.8	134.7	97.1	105.8	92.9	92.0	89.7	108.9	135.4
4	188.6	167.4	208.5	204.8	200.7	171.9	185.3	163.8	222.9	197.3
5	184.3	183.3	135.9	124.3	164.9	177.7	168.7	145.4	218.5	139.1
6	89.7	114.3	142.7	100.4	108.7	116.9	112.7	109.6	88.3	102.6
7	80.2	140.6	138.2	84.7	68.6	104.9	136.5	88.8	96.6	95.1
8	71.5	79.4	87.9	87.1	90.1	52.5	62.1	71.2	60.7	68.3
9	72.0	87.4	87.4	97.9	93.7	86.3	66.7	75.5	56.8	88.3
10	72.4	83.8	102.0	70.4	84.9	76.3	66.4	85.9	90.8	126.2
11	78.6	90.5	112.0	86.3	89.3	104.1	119.0	124.3	130.6	118.3
12	81.8	117.2	101.0	95.5	101.3	95.0	105.8	158.6	105.9	95.9
rok	1151.8	1357.2	1430.8	1197.4	1248.9	1290.4	1260.4	1348.0	1322.3	1315.1

Tab. 10. Průměrné měsíční odtoky a roční suma simulovaná modelem Brook90 v povodí Modravského potoka pro kontrolní období 1981–2010 a na základě různých klimatických modelů a emisních scénářů pro období 2071–2100.

Model	MOD	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100
Qavg	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	55.8	109.6	147.9	119.7	149.5	96.9	137.8	184.6	116.1	181.1
2	61.8	90.5	151.9	109.1	109.0	105.6	113.4	112.3	95.0	153.4
3	115.0	125.4	128.3	114.2	128.3	129.0	132.7	120.7	118.9	131.0
4	188.6	172.0	121.2	136.9	115.6	141.9	101.0	99.0	219.6	134.4
5	184.3	131.9	113.4	98.2	117.1	139.1	109.9	106.5	174.0	115.6
6	89.7	131.2	122.6	86.8	107.7	99.2	111.3	99.2	75.0	86.8
7	80.2	118.4	139.9	102.4	83.2	97.2	126.2	93.5	81.5	59.8
8	71.5	101.0	84.4	79.6	74.3	86.1	44.3	47.4	48.1	44.0
9	72.0	103.0	75.6	86.4	63.5	80.8	48.0	49.6	72.0	67.5
10	72.4	106.1	97.0	91.4	84.7	77.4	86.2	80.7	83.9	107.8
11	78.6	107.6	119.8	91.6	122.5	102.3	109.0	128.0	125.1	147.2
12	81.8	120.1	164.3	106.6	141.1	108.7	164.0	180.9	112.1	163.5
rok	1151.8	1416.7	1466.2	1223.0	1296.7	1264.1	1283.7	1302.3	1321.3	1392.2

5.5. Evapotranspirace

Vzhledem k předchozím výpočtům, kdy v povodí vzrůstá jak množství srážek, tak teplota, je zřejmé, že za těchto podmínek musí vzrůst i evapotranspirace. Aktuální evapotranspirace je 407 mm/rok (Tab. 11) a její hodnoty pro období 2021–2050 jsou 433–485 mm (o 26–78 mm vyšší než dnes). Pro druhé období let 2070–2100 jsou predikovány hodnoty v rozmezí 448–568 mm, tedy nárůst o 41–161 mm. Hodnoty pro jednotlivé měsíce jsou pro období 2021–2050 v Tab. 11 a pro období 2070–2100 v Tab. 12.

Tab. 11. Průměrné měsíční evapotranspirace a roční suma simulovaná modelem Brook90 v povodí Modravského potoka pro kontrolní období 1981–2010 a na základě různých klimatických modelů a emisních scénářů pro období 2051–2070.

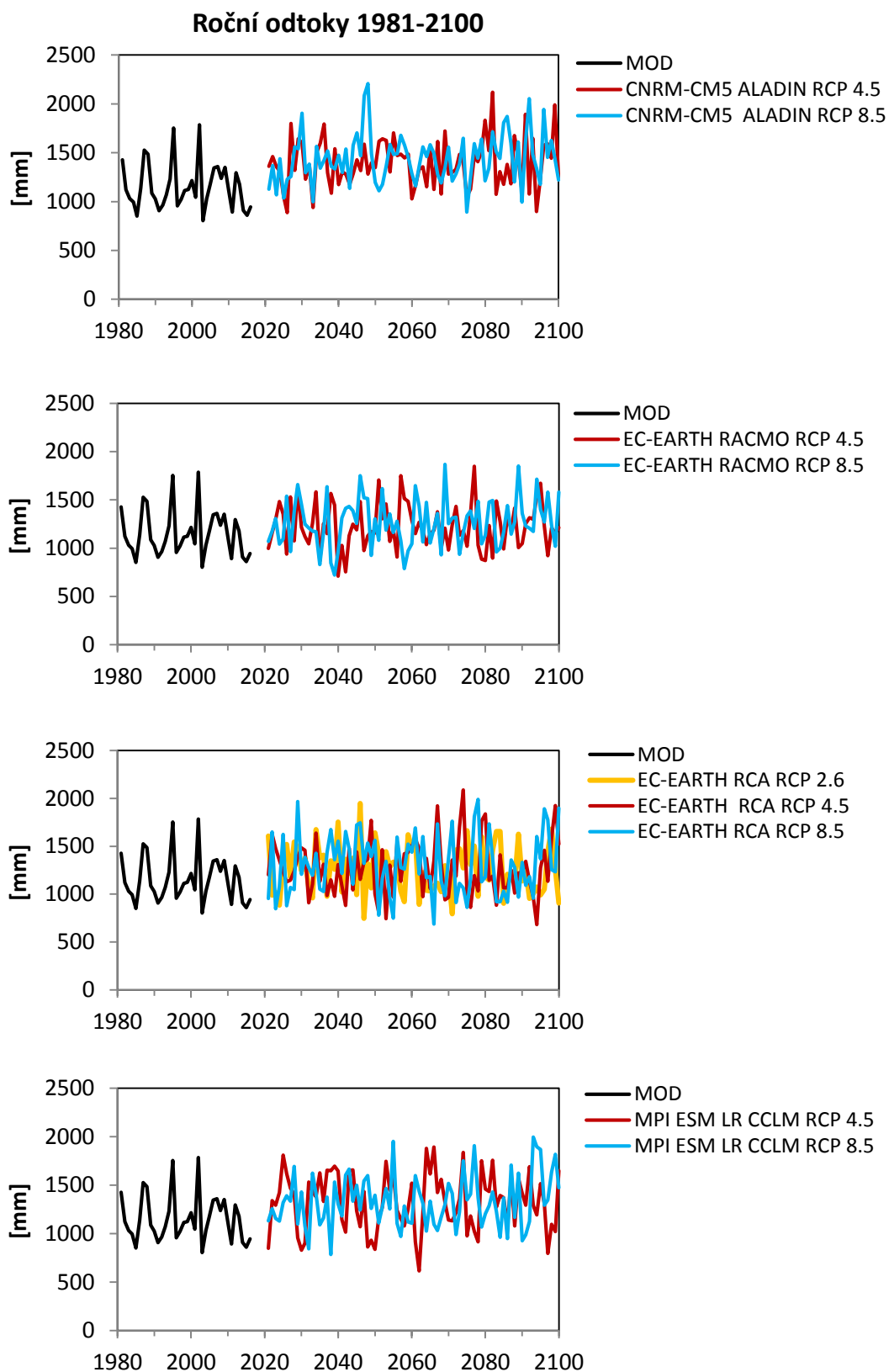
Model	MOD	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA	EC- EARTH RCA	EC- EARTH RCA	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50	21–50
EVAP	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	17.9	20.6	20.5	19.0	17.8	28.8	25.5	29.9	23.0	22.7
2	15.1	15.7	15.9	14.0	16.5	18.0	21.9	18.5	21.4	18.9
3	18.0	15.3	15.9	17.3	17.0	17.8	19.3	18.4	23.4	20.4
4	19.4	24.7	22.6	24.7	25.5	25.6	22.5	26.8	23.0	26.3
5	39.1	44.1	46.9	43.8	43.9	46.8	44.5	47.8	41.9	45.3
6	56.7	71.7	70.2	59.5	60.5	60.3	63.3	62.9	66.6	64.6
7	70.9	86.9	87.1	74.1	74.2	75.6	78.4	73.6	75.1	74.3
8	60.9	71.9	71.3	62.9	65.0	67.1	65.9	65.3	65.4	66.2
9	44.1	49.8	50.8	49.4	49.6	51.0	52.8	50.9	53.7	55.1
10	30.6	34.5	35.3	31.3	33.2	33.4	36.6	36.5	37.9	45.7
11	16.2	18.6	20.3	17.6	18.0	20.3	21.4	22.8	24.5	22.9
12	17.8	21.6	22.1	19.0	17.3	21.5	24.5	25.1	27.5	22.4
rok	406.5	475.5	479.0	432.5	438.3	466.3	476.7	478.6	483.6	484.8

Tab. 12. Průměrné měsíční evapotranspirace a roční suma simulovaná modelem Brook90 v povodí Modravského potoka pro kontrolní období 1981–2010 a na základě různých klimatických modelů a emisních scénářů pro období 2071–2100.

Model	MOD	CNRM- CM5 ALADIN	CNRM- CM5 ALADIN	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RACMO	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	EC- EARTH RCA4	MPI ESM LR CCLM	MPI ESM LR CCLM
Emisní scénář		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Období	81–10	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100	71–100
EVAP	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	17.9	22.5	20.8	20.0	19.3	25.5	28.8	31.2	27.0	26.8
2	15.1	15.3	16.6	15.0	13.3	20.1	21.9	20.3	19.8	23.4
3	18.0	16.8	18.1	18.0	21.5	17.3	22.6	24.3	24.9	23.9
4	19.4	26.7	33.4	27.6	32.4	25.9	31.3	35.7	25.1	32.9
5	39.1	50.1	55.0	46.7	49.4	44.4	56.5	53.1	45.1	49.5
6	56.7	75.7	77.8	62.5	63.6	61.5	72.4	62.9	63.2	63.7
7	70.9	89.6	95.7	75.5	78.1	74.6	90.2	83.9	73.4	74.4
8	60.9	74.4	75.8	65.1	69.4	63.9	85.2	75.7	65.8	67.6
9	44.1	55.2	55.4	50.7	52.1	50.0	64.6	53.7	56.3	59.8
10	30.6	37.5	39.6	33.5	37.1	33.7	44.2	39.5	38.2	43.3
11	16.2	19.4	21.8	17.5	21.2	21.3	21.7	25.3	26.9	27.4
12	17.8	21.1	21.8	15.6	19.1	22.6	28.5	26.6	26.9	29.9
rok	406.5	504.3	531.9	447.7	476.5	460.7	567.8	532.3	492.7	522.4

5.6. Dlouhodobé roční odtoky a srážkoodtokové poměry

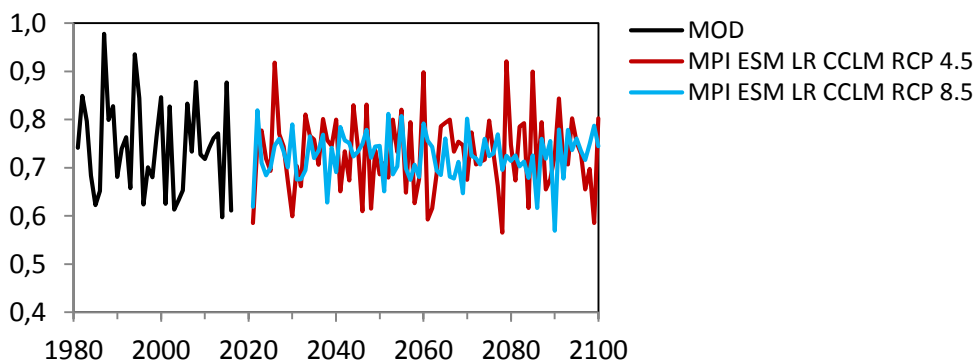
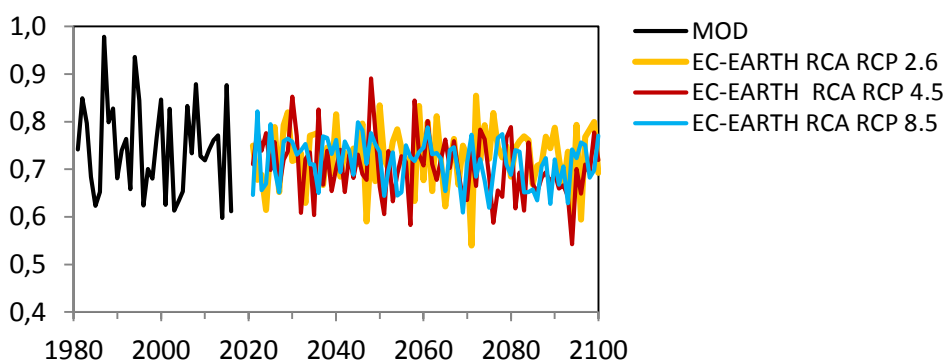
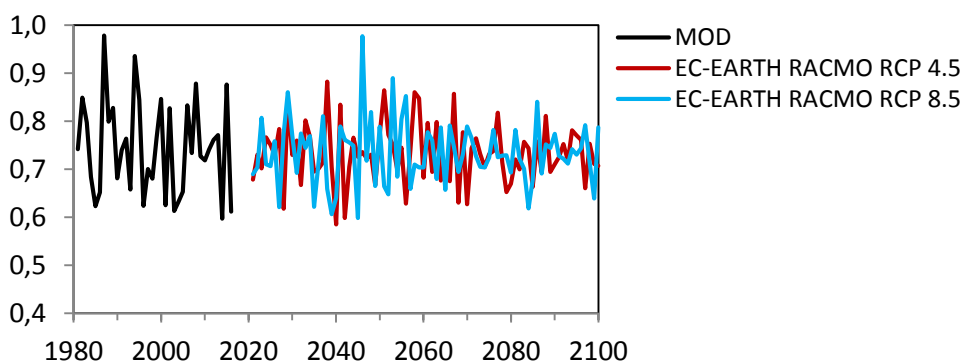
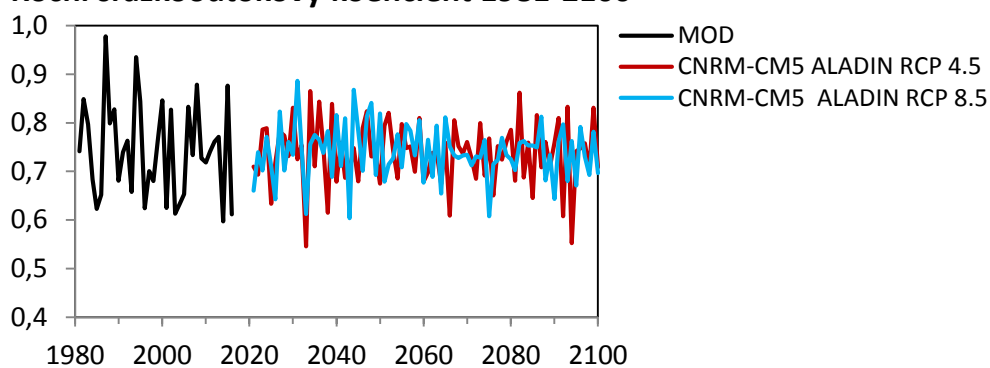
Pro lepší představu o dlouhodobých změnách je zajímavé porovnat časovou řadu predikcí včetně srovnávacího období. Jak již bylo konstatováno v předchozích částech, roční odtoky z povodí v průměru po celou dobu a pro všechny scénáře rostou. Je to dáno zejména predikovanými, často výrazně vyššími srážkami do povodí. Ani vzrůstající teploty nedokáží tento trend zvrátit. Vizualně nejlépe patrný je vzrůst odtoků pro model CNRM–CM5 ALADIN53 (Obr. 17). Je patrné navýšení průměru, ale i maxim, které v některých letech přesáhnou i odtok 2000 mm. Roční minima ale nejsou predikována nižší než v současnosti. U modelu EC-EARTH-RACMO22E je podoba mezi modelovaným a kontrolním obdobím značná, tento model také predikuje průměrné odtoky nejbližší současnému stavu. U modelu EC-EARTH RCA4 je nejbližší současnému stavu jeho RCP 2,6 (Obr. 17). Ostatní RCP tohoto modelu již predikují zvýšení extremity, kdy jednotlivé roky mají občas vyšší či nižší odtok než jsou maxima a minima v kontrolním období, ovšem celkový trend je v průměru sále více odtoku než ve srovnávacím období (Tab. 9 a 10).



Obr. 17. Roční odtoky z povodí Modravského potoka v letech 1981–2100. Roky 1981–2010 jsou měřená data (MOD), odtoky z let 2021–2100 jsou simulace modelu Brook90 vypočtené na základě různých klimatických modelů a příslušných emisních scénářů.

Viditelná změna hydrologických poměrů se projeví (alespoň u některých modelů) vyjádříme-li hodnotou srážkoodtokového koeficientu (Obr. 18). V jeho hodnotě se projeví vyšší evapotranspirace daná zvýšením teploty a současně pořád dobrou dostupností vody v povodí. Prakticky stejný srážkoodtokový koeficient (zhruba mezi 0,7–0,8) zůstane v povodí zachován při použití modelu CNRM-CMS ALADIN53, který predikuje nejvyšší nárůst srážek v povodí (kapitola 5.2.). K mírnému snížení tohoto poměru dojde až při použití modelu RC-EARTH RCA4, která predikuje nejnižší nárůst srážek, a kde se zvýšená teplota projeví mírným poklesem koeficientu na hodnoty mezi 0,6–0,7 po roce 2070.

Roční srážkoodtokový koeficient 1981-2100



Obr. 18 Roční srážkoodtokové koeficienty z povodí Modravského potoka v letech 1981–2100. Roky 1981–2010 jsou měřená data (MOD), odtoky z let 2021–2100 jsou simulace modelu Brook90 vypočtené na základě různých klimatických modelů a příslušných emisních scénářů.

6. Shrnutí

Na povodí Modravského potoka byl aplikován hydrologický model Brook90 pomocí kterého byly vypočteny odtoky z povodí pro časová období let 2021–2050 a 2070–2100. Jako vstupní údaje do modelu byly použity srážky a teploty vypočtené přímo pro toto povodí pomocí čtyř klimatických modelů a dvou až tří emisních scénářů skleníkových plynů. Všechny klimatické modely předpověděly vzrůst teplot, a to v rozmezí vypočítávají vyšší teploty oproti srovnávacímu období 1981–2010, která byla 4,2 °C. Pro období 2021–2050 vrostl roční průměr na 5,0–6,0 °C, zvýšil se tedy o 0,8–1,8 °C. Ke znatelně vyššímu růstu teplot dochází v období let 2071–2100, kdy oproti průměru 4,2 °C pro kontrolní období jsou modelované teploty mezi 5,4–8,6 °C. Jedná se tedy o nárůst mezi 1,4–4,9 °C.

Všechny modely i emisní scénáře predikují pro povodí Modravského potoka zvýšení srážek vůči současným hodnotám. Dnešní roční srážkový úhrn (průměr za období 1980–2010) je 1575 mm. Pro období 2021–2050 jsou predikované roční úhrny v rozmezí 1631–1910 mm, tedy o 56–345 mm vyšší. Zatímco nejnížší odhad je prakticky totožný, a je vyšší jen o ca. 4%, nejvyšší odhad je vyšší o téměř 21%. Nejvyšší je vzrůst v letních měsících (až o 60%), nejnížší je nárůst v jarních (zanedbatelně) a podzimních měsících (10–15%). Zimní srážky vzrůstají zhruba o čtvrtinu. Pro období 2071–2100 modelový odhad srážek ještě dále narůstá. Nejnížší roční úhrn je odhadnut na 1669 mm, nejvyšší na 1996 mm. Rozdíl oproti současným 1575 mm je tedy 94–421 mm.

Odtoky simulované modelem Brook90 byly nejprve úspěšně kalibrovány na měřené kontrolní období let 1981–2010. Všechny výpočty ukazují zvýšení ročních odtoků z povodí oproti průměrné současné hodnotě 1152 mm. Hodnoty pro období 2021–2050 kolísají mezi 1198 mm až 1431 mm, jedná se tedy o navýšení o 46–279 mm ročně. Roční distribuce odtoků se v tomto období mění jen zvolna – zůstává zachováno jarní maximum tání sněhu, i když jeho hodnota se mírně snižuje. Navyšují se ale zimní odtoky, protože při vyšších teplotách se méně srážek udrží ve formě sněhu. Letní odtoky se příliš nemění.

Pro období 2070–2100 se predikované roční odtoky ještě zvyšují, a to na průměrné roční hodnoty 1223–1466 mm. Jedná se o zvýšení 71–314 mm ročně. Velmi se v tomto období mění roční distribuce průtoků. Mizí jarní tání, a maxima se přesunují do zimních měsíců, protože srážky padají zejména ve formě deště a sníh se neakumuluje v povodí. Nejnížší odtoky jsou v letním období.

V obou obdobích dochází k extremizaci potenciálních maxim a minim odtoků vyjádřených jako 10% a 90% kvantil dlouhodobých měsíčních odtoků. V některých scénářích se 90% kvantil dostává nad hodnoty měřené pro srovnávací období 1981–2010. Také minimální 10% kvantil klesá u některých scénářů pod hodnoty srovnávacího období. Lze tedy předpokládat vyšší frekvenci vysokých stavů (povodní), stejně tak jako zvýšení období nízkých průtoků (sucha) vůči srovnávacímu období let 1981–2010.

7. Seznam citací

- Benčoková A, Krám P, Hruška J (2011) Future climate and changes in flow patterns in Czech headwater catchments. *Clim Res* 49: 1–15
- Federer CA, Vörösmarty C, Fekete B (2003) Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J Hydrometeorol* 4: 1276–1290
- Linsley RK (1949) *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York
- Meinshausen M, Smith SJ, Calvin K, Daniel JS, Kainuma MLT, Lamarque JF, Matsumoto K, Montzka SA, Raper SCB, Riahi K, Thomson A, Velders GJM, van Vuuren DPP (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim Change* 109: 213–241
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747–756
- Shuttleworth WJ, Wallace JS (1985) Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. *Quart J Royal Meteorol Soc* 111: 839–855
- Starostová M (2012) Měření srážek totalizátory na Šumavě. *Meteorologické zprávy* 65 č.6: 180–183
- Štěpánek P, Zahradníček P, Farda A, Skalák P, Trnka M, Meitner J, Rajdl K (2016) Projection of drought-inducing climate conditions in the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. *Clim Res* 70: 179–193