

SS02030018 Centrum pro krajinu a biodiverzitu

WP B1 Odezva lesních ekosystémů na změnu klimatu

WA B1.3 Hydrologická bilance lesa

Modelové změny vývoje hydrologického režimu lesních povodí (1961-2050)

SS02030018-V18

Anna Lamačová¹, Jan Svoboda^{1,3}, Ondřej Ledvinka^{2,3}

¹Česká geologická služba

²Český hydrometeorologický ústav

³Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova

2025

**T A
Č R**

Tento projekt je spolufinancován se státní podporou
Technologické agentury ČR a Ministerstva životního
prostředí v rámci Programu Prostředí pro život.

www.tacr.cz www.mzp.cz

OBSAH

1. Úvod.....	1
2. Metody.....	2
2.1. Sít povodí GEOMON a vstupní data.....	2
2.2. Klimatická data a klimatické scénáře.....	4
2.3. Lesní porosty a varianty lesní skladby	4
2.4. Stanovení podkorunových srážek.....	5
2.5. Regresní model evapotranspirace a potenciální evapotranspirace	5
2.6. Výpočet odtoku a hodnocení hydrologické bilance	6
3. Výsledky	6
3.1. Vztah ročního THF a srážek na volné ploše	6
3.2. Výpočet aktuální evapotranspirace	7
3.3. Hydrologická odezva lesních ploch na klimatickou změnu při zachování lesní skladby.....	9
3.4. Hydrologická odezva lesních ploch na klimatickou změnu při změně lesní skladby	15
4. Shrnutí.....	21
5. Literatura.....	22

MODELOVÉ ZMĚNY VÝVOJE HYDROLOGICKÉHO REŽIMU LESNÍCH POVODÍ (1961-2050)

SS02030018-V18

Ostatní výsledky

1. ÚVOD

Ve střední Evropě pokrývají lesy významnou část povodí pramenných oblastí a tvoří aktivní součást hydrologicko-klimatického systému (Ellison et al., 2017). Lesy ovlivňují vodní bilanci prostřednictvím evapotranspirace, intercepce srážek, infiltrace a odtoku na lokální i regionální úrovni. Změna klimatu modifikuje tyto procesy a představuje zásadní faktor pro budoucí vývoj vodního režimu lesních povodí. Dlouhodobý nárůst teploty vzduchu, změny sezónního rozdělení srážek a častější výskyt extrémních epizod sucha vedou k intenzivnější evapotranspiraci a ke změnám dostupnosti vody pro povrchový i podpovrchový odtok (IPCC, 2021; Teuling et al., 2019).

Středoevropské lesy procházejí v posledním desetiletí rozsáhlými změnami druhové skladby v důsledku kůrovcové kalamity, která postihla rozsáhlé plochy smrkových monokultur (Senf & Seidl, 2021). Změna klimatu představuje narůstající hrozbu pro lesní ekosystémy (Williams a Liebhold, 2002; Bentz et al., 2010). Vlny veder, jako byly ty, které zasáhly Evropu v letech 2018–2019, vedly ke snížení růstu jak listnatých, tak jehličnatých lesů a k rozsáhlé mortalitě stromů. V letech následujících po suchých epizodách se zvýšila zranitelnost lesních porostů vůči hmyzím škůdcům a houbovým patogenům, což dále přispělo ke zhoršení stavu lesních porostů (Scharnweber et al., 2020; Schuldt et al., 2020; Hlásný et al., 2021; Obladen et al., 2021).

V České republice došlo k významnému nárůstu teploty vzduchu, přičemž zvláště výrazné oteplení bylo zaznamenáno v období 2011–2019 (Zahradníček et al., 2021). Současně se od roku 2015 vyskytly bezprecedentní letní epizody sucha, které překračují přirozenou variabilitu klimatu v rámci běžného holocenního pozadí (Büntgen et al., 2021). Kombinace nárůstu teploty vzduchu a podnormálních srážkových úhrnů vedla k rozvoji hydrologického sucha v České republice, které přetrvávalo od roku 2015 až do jara 2020 (Trnka et al. 2020).

Rozsáhlý rozpad smrkových porostů vytváří mozaiku holin, raných sukcesních společenstev a obnov s různou druhovou skladbou, což vede k významným změnám hydrologického chování povodí. Jehličnaté a listnaté porosty se liší v míře intercepce srážek, fenologii, délce vegetační sezóny, hloubce kořenového systému i transpirační strategii, což se odráží v rozdílech roční evapotranspirace a odtoku (např. Launiainen et al., 2019).

Jehličnaté porosty vykazují vyšší intercepční ztráty a delší období transpirace, zatímco listnaté porosty jsou charakteristické výraznější sezónností a odlišnou reakcí na extrémní klimatické podmínky. Výsledná hydrologická odezva povodí je dána kombinací druhové skladby lesa, struktury porostu, nadmořské výšky a klimatických podmínek, jejichž vzájemné působení může vést k odlišným trendům evapotranspirace a odtoku (McDonnell et al., 2007; Teuling et al., 2019).

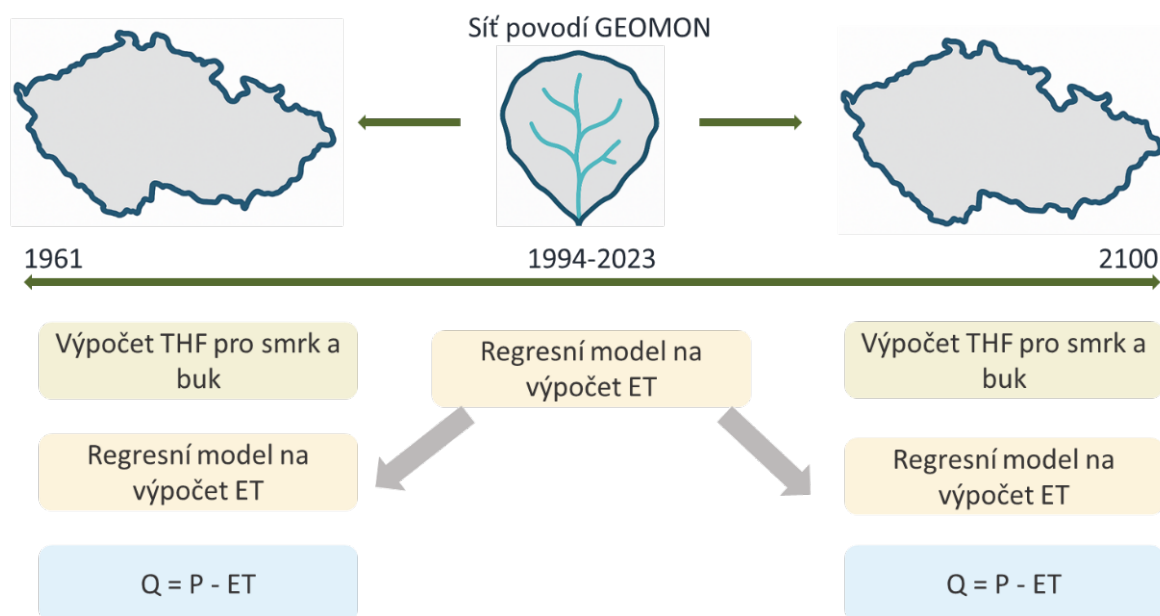
Popis těchto procesů vyžaduje dlouhodobé řady sledování na experimentálních povodí, která umožňují oddělit vliv klimatu a vegetace na hydrologickou odezvu. Síť malých lesních povodí GEOMON, s měřeními od 90. let 20. století, představuje v českém kontextu cenný datový základ pro hodnocení změn hydrologického režimu ve vazbě na změny lesní vegetace. Kombinace měření srážek, podkorunových srážek, odtoku a klimatických

veličin v jednotném metodickém rámci umožňuje vyhodnocení vlivu druhové skladby lesa na vodní bilanci a poskytuje podklady pro adaptační opatření v lesním hospodářství.

Hlavním cílem výsledku bylo stanovit odtok a celkový hydrologický režim v minulosti, současnosti i budoucnosti a vyhodnotit dopady změny klimatu na vodní bilanci lesních povodí s ohledem na druhovou skladbu lesa. Koncepční schéma metodického postupu, zachycující návaznost jednotlivých dílčích kroků výpočtu, je uvedeno na Obr. 1.

Konkrétní dílčí cíle byly následující:

- Odvodit regresní model aktuální evapotranspirace (ET) založený na hydrologické bilanci ($ET = P - Q$), který zohledňuje rozdílné chování listnatých a jehličnatých lesních porostů, zejména prostřednictvím podkorunových srážek (THF), který vychází z hydrologické bilance malých lesních povodí sítě GEOMON.
- Aplikovat odvozené regresní vztahy do minulosti (1961–1990) s využitím historických klimatických dat a vytvořit referenční obraz hydrologického režimu lesních povodí před výrazným nástupem současné klimatické změny. Extrapolovat je na lesní porosty na území ČR v referenčním období 1991–2020.
- Provést projekce hydrologického režimu do budoucnosti (2021–2100) na základě regionálních klimatických scénářů (SSP2-4.5 a SSP5-8.5) a vyhodnotit očekávané změny odtoku.
- Posoudit citlivost hydrologické odezvy lesních povodí na změny klimatu a závislosti v různých variantách zastoupení jehličnatých a listnatých porostů.
- Vytvořit podklad pro adaptační opatření v lesním hospodářství, zejména pro rozhodování o budoucí druhové skladbě lesů z hlediska hydrologických funkcí krajiny.



Obrázek 1. Schéma metodického postupu, znázorňující jednotlivé dílčí cíle.

2. METODY

2.1. Síť povodí GEOMON a vstupní data

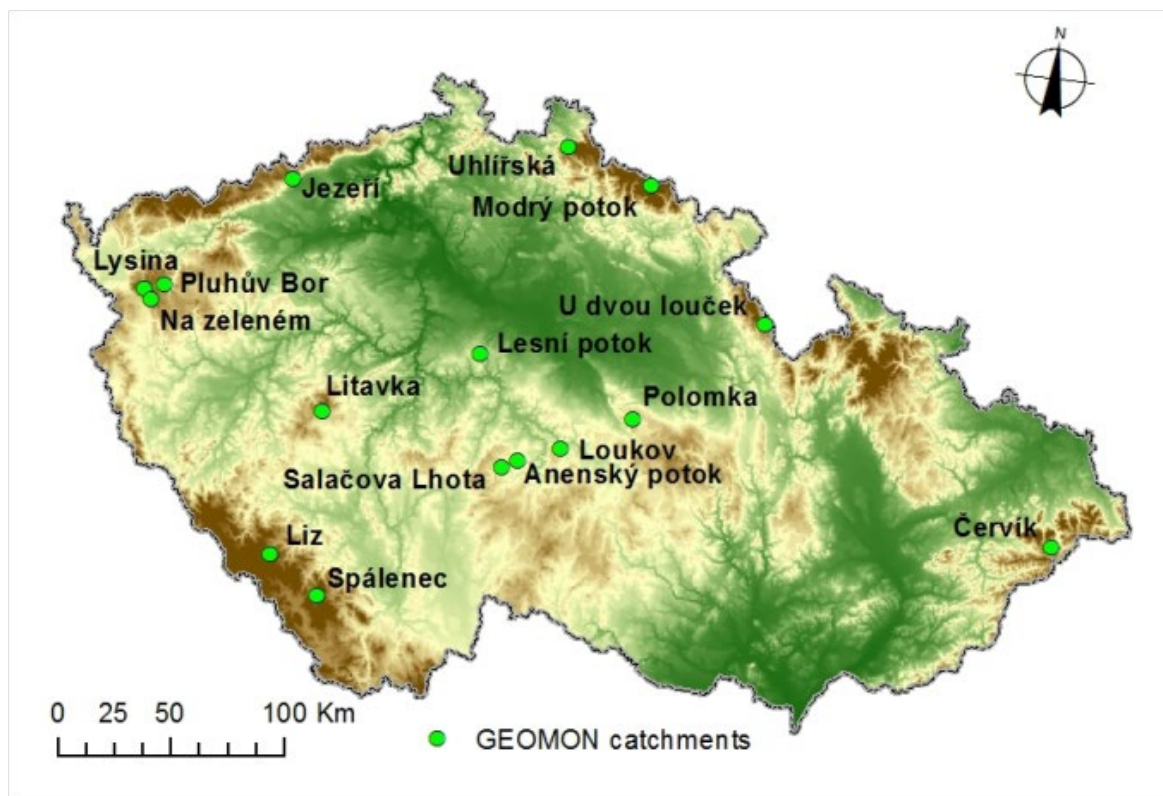
Pro analýzu hydrologické bilance lesních ekosystémů byla využita data ze sítě malých lesních povodí GEOMON, která byla založena v roce 1994 jako dlouhodobý monitorovací systém zaměřený na sledování hydrologických a biogeochemických procesů v lesních ekosystémech České republiky (Oulehle et al., 2021). Síť zahrnuje 16 malých lesních povodí, která pokrývají široké spektrum přírodních podmínek a reprezentují hlavní lesní oblasti České republiky (Obr. 2).

Jednotlivá povodí se vyznačují rozlohou v rozmezí cca 20–260 ha, a relativně homogenním charakterem lesního porostu, který je zpravidla tvořen smrkovými, bukovými nebo smíšenými porosty. Nadmořská výška povodí se pohybuje přibližně od 400 do 1300 m n. m., což odpovídá zhruba třem čtvrtinám lesních ploch v České republice. Celkem byla použita data z 15 povodí. Povodí Spálenec (SPA) bylo vyřazeno z důvodu výrazně odlišného vztahu mezi srážkami na volné ploše a podkorunovými srážkami oproti ostatním povodím se smrkovým porostem, což by vedlo k nekonzistentnímu odhadu intercepčních procesů. Povodí Modrý potok (MOD) nebylo zahrnuto do výpočtu aktuální evapotranspirace kvůli dlouhodobě nekonzistentní vodní bilanci, kdy pozorovaný

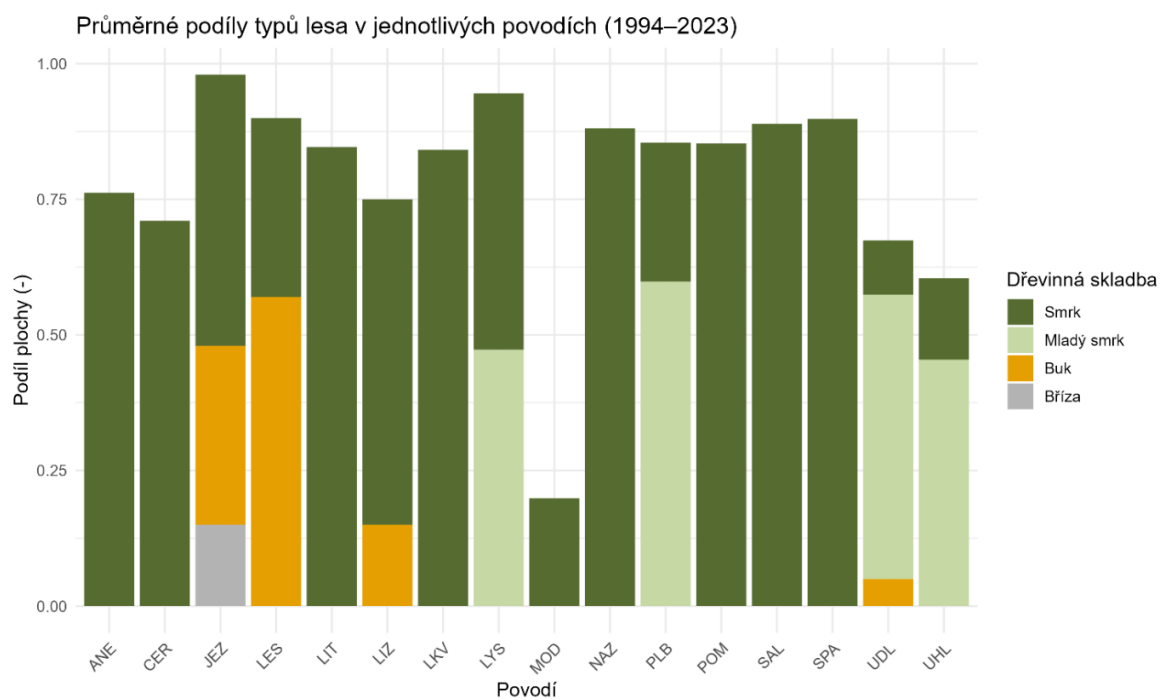
odtok systematicky převyšuje měřené srážkové úhrny v důsledku akumulace a následného tání větrem navátého sněhu, který není zachycen standardními srážkoměrnými měřeními.

Základní vstupní data použitá v této studii zahrnují dlouhodobá měření veličin dostupná ve všech hodnocených povodích. Patří sem měření srážek na volné ploše, která jsou k dispozici v měsíčním časovém kroku na většině povodí od roku 1994, a měření podkorunových srážek pod smrkovými a bukovými porosty, rovněž prováděná v pravidelném měsíčním intervalu. Tato data umožňují odvozovat intercepční ztráty a hodnotit dostupnost vody pro lesní porosty.

Součástí sledovaných veličin jsou časové řady průměrných denních průtoků, které umožňují sestavení vodních bilancí na roční bázi. Průměrné roční teploty byly pro jednotlivá povodí odvozeny z kontrolovaných a interpolovaných dat klimatických stanic Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ, Štěpánek et al., 2011, 2013). Informace o lesním porostu, včetně podílu zastoupení dřevin na povodí (Obr. 3), byly využity k interpretaci rozdílů v hydrologické odezvě mezi jednotlivými povodími.



Obrázek 2. Lokalizace sítě malých lesních povodí GEOMON.



Obrázek 3. Průměrné podíly hlavních typů lesních porostů v jednotlivých povodích sítě GEOMON za období 1994–2023.

2.2. Klimatická data a klimatické scénáře

Vstupní klimatická data pro území ČR pocházející z tzv. technických řad klimatických dat ČHMÚ (Štěpánek 2011, 2013). Tyto řady vznikly interpolací měřených dat ze sítě klimatologických a srážkoměrných stanic ČHMÚ. Data zahrnovala roční úhrny srážek a průměrné roční teploty vzduchu. Prostorová interpolace klimatických dat byla provedena metodou regresního krigingu a výsledná klimatická pole byla připravena v prostorovém rozlišení 500 × 500 m. Tato gridová klimatická data byla použita pro plošnou extrapolaci vypočtených vztahů mimo území povodí sítě GEOMON.

Klimatická data dostupná v gridové podobě (1961–1990 a 1991–2020) byla zpracována v kalendářních rocích, zatímco hydrologická bilance na povodích GEOMON v hydrologických letech (1. 11. – 31. 10.). Hydrologické roky lépe reprezentují sněhovou bilanci v malých povodích s lokálním měřením srážek v jednotlivých letech. Pro gridová data a třicetiletá období jsou rozdíly mezi oběma přístupy zanedbatelné.

Pro účely stanovení budoucí vodní bilance byly použity průměrné roční srážkové úhrny a teploty, které vycházely z regionální klimatické projekce založené na modelu ALADIN-CLIMATE/CZ, který je provozován v konfiguraci přizpůsobené podmínkám střední Evropy. Model pracuje v horizontálním rozlišení 2,3 × 2,3 km a poskytuje budoucí odhady teploty, srážek a dalších meteorologických prvků pro území ČR. Výstupy modelu procházejí bias korekcí, aby simulované hodnoty odpovídaly statistickému chování současného klimatu.

Klimatické projekce byly připraveny pro několik dvacetiletých období do roku 2100 a zahrnují dva socio-ekonomické emisní scénáře: SSP2-4.5 (optimističtější scénář), představující střední trajektorii vývoje emisí při zavedení mírných opatření ke zmírňování

změny klimatu, a SSP5-8.5 (pesimističtější scénář), který reprezentuje vývoj s vysokými emisemi spojenými s intenzivním využíváním fosilních paliv a rychlým socio-ekonomickým růstem bez účinných klimatických opatření. Tyto scénáře umožňují kvantifikovat rozsah možných budoucích změn klimatu a jejich dopady na hydrologii lesních povodí.

2.3. Lesní porosty a varianty lesní skladby

Základním zdrojem informací o lesní vegetaci na území ČR byla vrstva geoportálu Lesních dřevin z Národního lesnického institutu pro rok 2022 (soubor lesni_dreviny_2022__5514.tif, <https://geoportal.uhul.cz/mapy/mapyDpz.html>). Tato vrstva byla pro účely hydrologického modelování zjednodušena do dvou kategorií – jehličnaté a listnaté porosty, přičemž ostatní typy ploch byly označeny jako bezlesí. Převod původních kategorií lesních dřevin na tyto dvě skupiny byl proveden následovně, kategorie: smrk, borovice, ostatní jehličnaté – směs, byly považovány za jehličnaté porosty. Původní kategorie buk, dub a ostatní listnaté porosty, byly sloučeny do kategorie listnaté porosty.

Kategorie „kultura“ a „těžba“ byly v základním scénáři považovány za jehličnatý porost. Tento předpoklad vychází ze skutečnosti, že vrstvy „kultura“ a „těžba“ ve vrstvě lesních dřevin pro rok 2022 reprezentují převážně plochy postižené suchem a kůrovcovými kalamitami v předchozích letech. Pro referenční období 1991–2020 se proto předpokládá, že tyto plochy byly původně pokryty jehličnatým lesem. Zároveň se předpokládá, že v období 2021–2050 budou tyto plochy v základním scénáři opět obnovovány převážně jehličnatými dřevinami.

Vedle současné lesní skladby byly definovány také dvě alternativní varianty lesní skladby, které reflektují možný posun druhové skladby směrem k listnatým porostům v nižších a středních polohách. V případě alternativního porostu 1 byly plochy označené jako „kultura“ a „těžba“ do nadmořské výšky 600 m n. m.

považovány za listnatý porost, zatímco nad touto hranicí zůstaly nadále klasifikovány jako porost jehličnatý. Ostatní porosty nad 600 m n. m. byly ponechány beze změny. V případě alternativního porostu 2 byly všechny porosty do nadmořské výšky 600 m n. m. považovány za listnaté. Pixely s kategorií „kultura“ a „těžba“ v nadmořském intervalu 600–800 m n. m. byly rovněž považovány za listnatý porost, zatímco porosty nad 800 m n. m. zůstaly beze změny.

Pro každou z připravených porostních variant byla následně odvozena vrstva plošných podílů jehličnatých a listnatých porostů v jednotlivých buňkách gridu. Tyto podíly vyjadřují míru smíšenosti porostu a byly použity jako vstup pro výpočet podkorunových srážek a pro aplikaci regresního modelu evapotranspirace. Prostorové zpracování lesní vegetace bylo provedeno v jednotné mřížce o rozlišení 500 × 500 m, která odpovídá prostorovému rozlišení klimatických vstupních dat (historické a scénářové srážky a teploty).

2.4. Stanovení podkorunových srážek

Podkorunové srážky (throughfall, THF) vyjadřují množství srážek, které po průchodu korunovým patrem dopadá na půdní povrch a je potenciálně k dispozici pro infiltraci, půdní zásobu vody a následnou evapotranspiraci. V této studii byly podkorunové srážky využity jako vstupní proměnná pro odhad aktuální evapotranspirace a pro rozlišení hydrologického chování jehličnatých a listnatých porostů. Intercepční ztráta byla v této studii chápána implicitně jako rozdíl mezi srážkami na volné ploše a vypočtenými podkorunovými srážkami.

Základní vztahy mezi srážkami na volné ploše a podkorunovými srážkami ve smrkových a bukových porostech byly odvozeny z dlouhodobých ročních srážkových úhrnů změřených na povodích sítě GEOMON. Na základě těchto měření byly stanoveny lineární regresí empirické vztahy popisující podíl srážek zachycených korunovým patrem a míru

intercepčních ztrát pro oba základní typy porostů.

Pro plošné výpočty byla hodnota podkorunových srážek v jednotlivých buňkách gridu stanovena jako vážený průměr podkorunových srážek odpovídajících jehličnatému a listnatému porostu, přičemž váhy odpovídaly plošnému zastoupení obou typů porostů v dané buňce. Tento přístup umožňuje zohlednit různou míru smíšenosti porostů a plynule přecházet mezi čistě jehličnatými a čistě listnatými stanovišti.

U bukových porostů byl THF navýšen o faktor 1,2 jako aproximace vlivu kmenového stoku (stemflow), přičemž výsledná hodnota byla fyzikálně omezena podmínkou $THF \leq P$.

2.5. Regresní model evapotranspirace a potenciální evapotranspirace

Na základě hydrologické bilance za období 1994–2023 na 14 malých lesních povodích sítě GEOMON byl sestaven empirický regresní model pro odhad roční aktuální evapotranspirace (ET). Model vychází z předpokladu, že evapotranspirace lesních porostů je v ročním měřítku primárně řízena kombinací klimatických podmínek a typem porostu.

Finální forma modelu vychází z vícenásobné lineární regrese, ve kterém je roční evapotranspirace vyjádřena jako funkce klimatických vstupů a dostupnosti srážkové vody v porostu:

$$ET = \alpha + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot P + \beta_3 \cdot THF$$

ET je roční evapotranspirace (mm), T je průměrná roční teplota vzduchu (°C), P je roční úhrn srážek na volné ploše (mm), THF jsou podkorunové srážky (mm), α je absolutní člen regresního vztahu, β_1 , β_2 , β_3 jsou regresní koeficienty odvozené kalibrací modelu.

Zařazení podkorunových srážek do modelu umožňuje zohlednit rozdíly v intercepčních

procesech mezi jehličnatými a listnatými porosty a tím nepřímo zachytit vliv druhové skladby lesa na evapotranspiraci. Model byl kalibrován na ročních hodnotách a popisuje průměrné bilanční chování povodí, nikoli krátkodobou dynamiku evapotranspirace. Konkrétní parametrizace regresního vztahu a jeho statistické vlastnosti jsou uvedeny v kapitole výsledků.

Kalibrovaný regresní model evapotranspirace byl následně aplikován na území ČR v současnosti (1991–2020) a minulosti (1961–1990) a jako vstupní proměnné byly použity roční průměrné roční teploty a srážkové úhrny a dopočítané THF v gridech o rozlišení 500 × 500 m.

Pro hodnocení budoucího vývoje byla evapotranspirace modelována pro následující třicetiletí 2021–2050, 2051–2080 a 2071–2100 s využitím regionálních klimatických projekcí založených na modelu ALADIN-CLIMATE/CZ. Byly použity dva emisní scénáře: SSP2-4.5 a SSP5-8.5.

2.6. Výpočet odtoku a hodnocení hydrologické bilance

Roční odtok z lesních povodí byl v této studii stanoven jako reziduální složka hydrologické bilance na základě vztahu mezi srážkami a evapotranspirací. Pro každé hodnocené období, scénář klimatu a variantu lesní skladby byl odtok vypočten podle jednoduché bilanční rovnice:

$$Q = P - ET$$

kde Q je roční odtok (mm), P roční úhrn srážek na volné ploše (mm) a ET roční evapotranspirace (mm) odhadnutá regresním modelem.

Tento přístup vychází z předpokladu, že v dlouhodobém ročním měřítku jsou změny zásob vody v povodí zanedbatelné a že ostatní bilanční složky (např. hluboký odtok nebo

změny půdní zásoby) se v průměru vyruší. Výpočet odtoku jako zbytkové složky tak umožňuje konzistentní porovnání hydrologické odezvy mezi jednotlivými obdobími, klimatickými scénáři a variantami lesní skladby.

Vypočtené hodnoty odtoku byly následně použity pro hodnocení změn hydrologického režimu lesních povodí, zejména z hlediska změn průměrného ročního odtoku a jeho prostorové variability. Tento bilanční přístup umožňuje interpretovat změny odtoku jako odezvu kombinovaného působení klimatických změn a změn druhové skladby lesa.

Dále byla vypočtena potenciální evapotranspirace (PET) pomocí teplotního modelu podle Oudin et al. (2005), která reprezentuje maximální evapotranspiraci při neomezené dostupnosti půdní vody. Porovnání regresního odhadu aktuální evapotranspirace a potenciální evapotranspirace (PET) bylo provedeno na základě absolutních odchylek mezi odhadnutou evapotranspirací a pozorovanou evapotranspirací, definovanou jako rozdíl ročních srážek a měřeného odtoku ($ET = P - Q$). Rozdíly absolutních chyb obou přístupů byly vyhodnoceny pomocí párového t-testu.

3. VÝSLEDKY

3.1. Vztah ročního THF a srážek na volné ploše

Dlouhodobé průměry z jednotlivých povodí ukazují silnou lineární závislost ročních THF na úhrnu srážek na volné ploše (P) u obou dřevin (Obr. 4). U smrkových porostů byl zjištěn vztah ve tvaru:

$$THF = -175,7 + 0,90 P (R^2 = 0,95),$$

a u bukových porostů:

$$THF = -219,1 + 1,03 P (R^2 = 0,99).$$

Zatímco u smrku zůstává THF systematicky nižší než srážky na volné ploše, u buku dosahuje srovnatelných, případně vyšších hodnot. Smrk vykazuje průměrné intercepční ztráty ($268 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$), což odpovídá přibližně 30 % ročního úhrnu srážek. Průměrná roční intercepční ztráta: 201 mm u buku, odpovídá přibližně 20 % ročních úhrnů srážek na volné ploše.

3.2. Výpočet aktuální evapotranspirace

Finální regresní model evapotranspirace zahrnuje průměrnou roční teplotu vzduchu (T), roční úhrn srážek na volné ploše (P) a podkorunové srážky (THF) jako vysvětlující proměnné a má následující tvar:

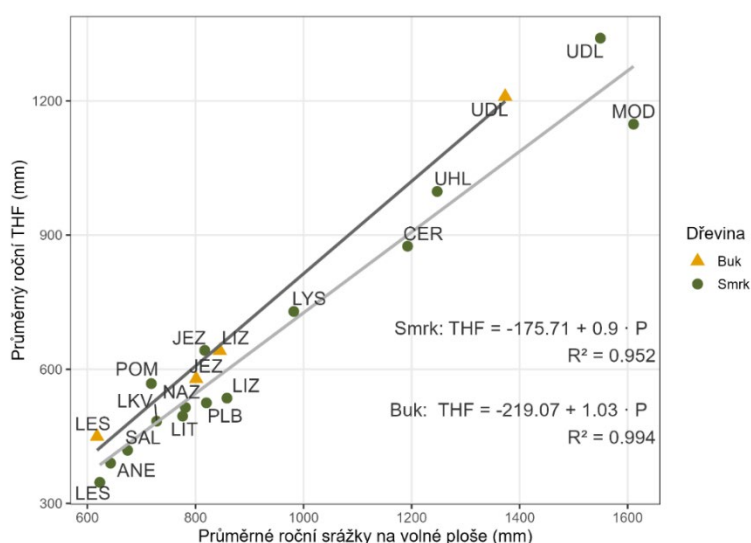
$$ET = -177,20 - 0,6212 \cdot THF + 0,7598 \cdot P + 60,61 \cdot T$$

ET – modelovaná roční evapotranspirace [mm/rok], P – roční úhrn srážek v gridu (mm/rok), THF – throughfallu smrku, buku, nebo smíšeného lesa pro daný gridový pixel.

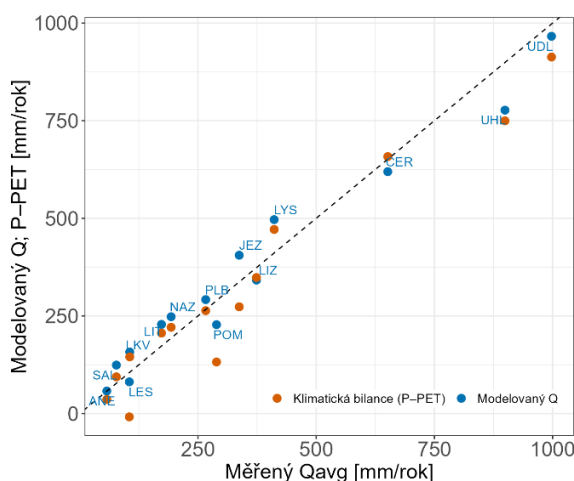
Model byl kalibrován na souboru 370 ročních pozorování a je aplikován jako jeden společný regresní vztah pro všechna hodnocená povodí. Všechny zahrnuté prediktory jsou statisticky významné při hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Model vysvětluje přibližně 34 % variability

roční evapotranspirace ($R^2 = 0,34$; adjusted $R^2 = 0,33$). Přestože hodnota R^2 odpovídá střední míře vysvětlené variability, globální metriky výkonnosti modelu naznačují dobrou shodu mezi modelovanými a bilančně odvozenými hodnotami v dlouhodobém měřítku. Hodnota Nash–Sutcliffeova koeficientu ($NSE = 0,82$) ukazuje na vysokou schopnost modelu reprodukovat pozorované hodnoty, přičemž globální chyba modelu vyjádřená pomocí RMSE (root mean square error) dosahuje přibližně $142 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$.

Model reprodukuje dlouhodobé průměry odtoku konzistentně jak u povodí s nízkými, tak s vysokými hodnotami odtoku. Menší odchylky od ideální shody jsou patrné u jednotlivých povodí, avšak bez výrazného systematického trendu v závislosti na velikosti odtoku. Celkově výsledky potvrzují, že regresně odvozená evapotranspirace poskytuje realistický základ pro bilanční výpočet odtoku na úrovni dlouhodobých průměrů. Oproti tomu klimatická bilance založená na potenciální evapotranspiraci vykazuje výraznější odchylky, zejména u povodí v nižších nadmořských výškách a větším zastoupení buku (LES), kde dochází k systematickému podhodnocení odtoku (Obr. 5).



Obrázek 4. Vztah mezi průměrnými ročními srážkami na volné ploše (P) a průměrnými ročními podkorunovými srážkami (THF) na povodích sítě GEOMON pro smrkové a bukové porosty.



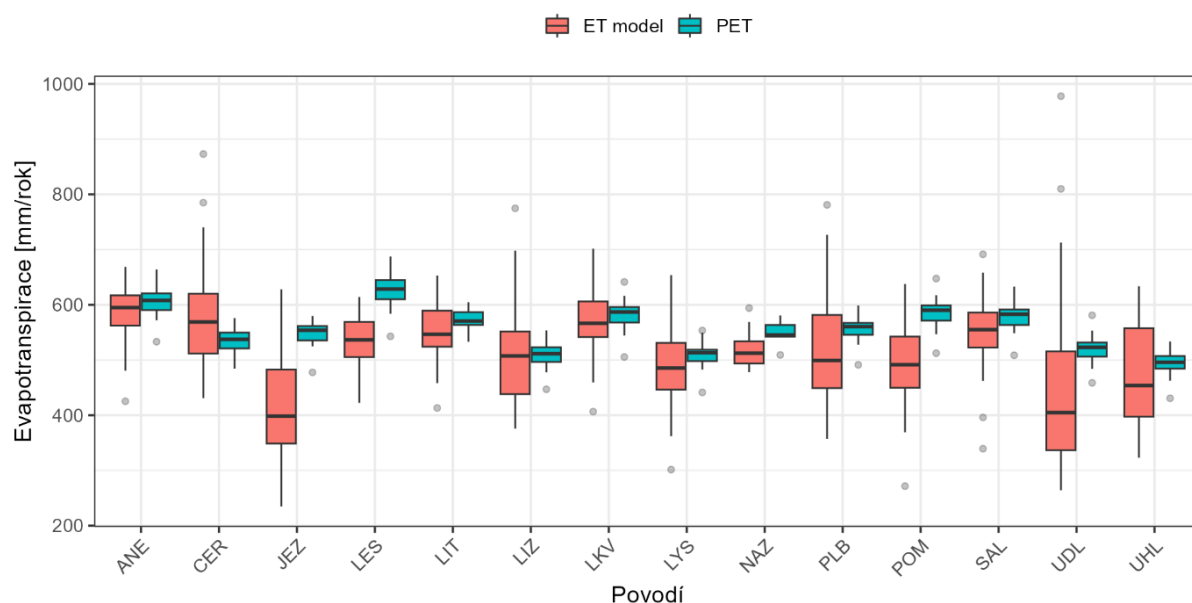
Obrázek 5. Porovnání dlouhodobých průměrů měřeného ročního odtoku (Q_{avg}) a modelovaného ročního odtoku vypočteného z regresně odvozené evapotranspirace ($Q = P - ET$) a klimatické vodní bilance ($Q = P - PET$) na jednotlivých povodích sítě GEOMON. Přerušovaná čára znázorňuje ideální shodu (1 : 1). PET – potenciální evapotranspirace.

Hodnoty ET odvozené regresním modelem jsou ve srovnání s PET systematicky nižší a vykazují větší meziroční variabilitu napříč povodími (Obr. 6).

Na úrovni jednotlivých povodí dosahuje model založený na aktuální evapotranspiraci nižších hodnot chyby než klimatická bilance založená na potenciální evapotranspiraci. Hodnoty RMSE modelovaného odtoku ($Q = P - ET$) se pohybují v rozmezí přibližně 77–267 $\text{mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ s průměrnou hodnotou 126 $\text{mm} \cdot \text{rok}^{-1}$, zatímco u klimatické bilance ($Q = P - PET$) dosahuje RMSE vyšších hodnot v rozmezí 95–302 $\text{mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ s průměrem 161 $\text{mm} \cdot \text{rok}^{-1}$.

Párový t-test ukázal, že regresní model evapotranspirace poskytuje statisticky významně nižší absolutní chybu vůči bilančně odvozené evapotranspiraci než PET (průměrný rozdíl $-31,7 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$; $p < 0,001$).

Výsledky potvrzují, že zahrnutí aktuální evapotranspirace do bilančního výpočtu představuje vhodnější základ pro odhad dlouhodobého ročního odtoku než jednoduchý přístup založený výhradně na potenciální evapotranspiraci.



Obrázek 6. Boxploty roční evapotranspirace vypočtené regresním modelem (ET model) a potenciální evapotranspirace (PET) pro jednotlivá povodí sítě GEOMON (1994–2023).

3.3. Hydrologická odezva lesních ploch na klimatickou změnu při zachování lesní skladby.

Modelové výsledky ukazují, že průměrný roční odtok z lesních ploch na území ČR zůstal mezi referenčními obdobími 1961–1990 a 1991–2020 relativně stabilní (Obr. 7 a Obr. 8). V období 1961–1990 dosahoval průměrný odtok $143 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$, zatímco v období 1991–2020 činil $157 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$.

Výraznější změny se objevují v projekcích budoucího klimatu. V období 2021–2050 modelové výstupy ukazují jednoznačný pokles průměrného odtoku při předpokladu zachování současné skladby lesních ploch, přičemž rozdíly mezi klimatickými scénáři jsou již patrné (Obr. 9 a Obr. 10). Ve scénáři SSP2-4.5 klesá průměrný odtok na $94 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$, ve scénáři SSP5-8.5 na $74 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$. Prostorové výstupy zároveň dokumentují, že pokles odtoku se projevuje zejména v nižších nadmořských výškách, kde dochází v důsledku vysoké evapotranspirace k prohlubování deficitu vodní bilance (Obr. 9 a Obr. 10). V modelových výstupech se tento deficit projevuje jako záporné hodnoty odtoku (evapotranspirace převyšuje srážkový příjem).

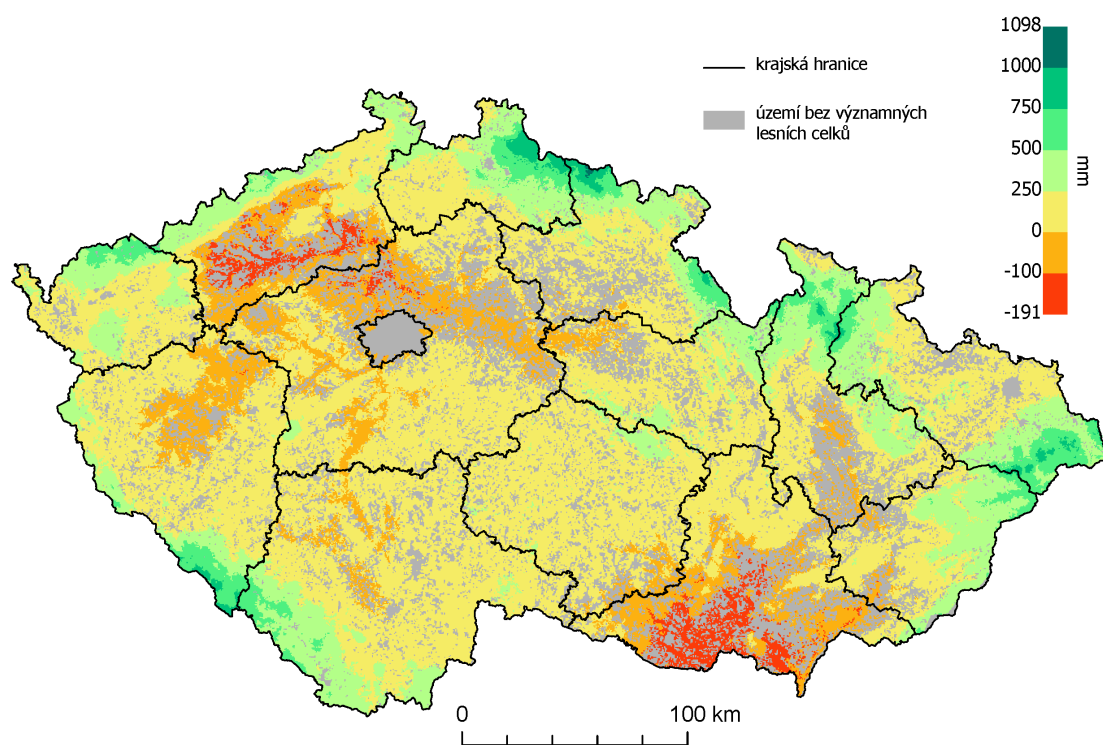
Z hlediska výškových pásem 200–600 m n. m., kde se nachází ~80 % plochy ČR, ukazují modelové výsledky výrazné zhoršení odtokových poměrů již v časovém horizontu 2021–2050. Nejnižší pásmo 201–300 m n. m. vykazuje snížení odtoku o 55–75 mm v závislosti na klimatickém scénáři, přičemž v tomto období zde již vzniká deficit vodní bilance. Pásma 301–400 m a 401–500 m n. m. zaznamenávají pokles odtoku o (55–80 mm, resp. 60–80 mm), přičemž záporné hodnoty se zde ještě plošně nevyskytují, bilance se však blíží nule, zejména ve scénáři SSP5-8.5. Výše položené pásmo 501–600 m n. m. vykazuje snížení odtoku o 70–90 mm, přičemž odtok zůstává kladný, ale výrazně redukován.

V závěru století (2071–2100) se deficit vodní bilance dále prohlubuje a rozšiřuje do vyšších nadmořských výšek (Obr. 11 a Obr. 12). Rozdíly mezi klimatickými scénáři jsou v tomto období mnohem výraznější než v časovém horizontu do roku 2050. Nejnižší pásmo 201–300 m n. m. vykazuje pokles odtoku o 95–120 mm, přičemž v obou scénářích zůstává v deficitu vodní bilance. Pásmo 301–400 m n. m. zaznamenává snížení o 110–155 mm, přičemž ve scénáři SSP5-8.5 zde dochází k přechodu do záporné bilance, zatímco ve scénáři SSP2-4.5 se bilance pohybuje těsně kolem nuly. Výše položené pásmo 401–500 m n. m. vykazuje pokles o 100–160 mm, přičemž ve scénáři SSP5-8.5 se odtok dostává do záporných hodnot, zatímco ve scénáři SSP2-4.5 zůstává ještě slabě kladný.

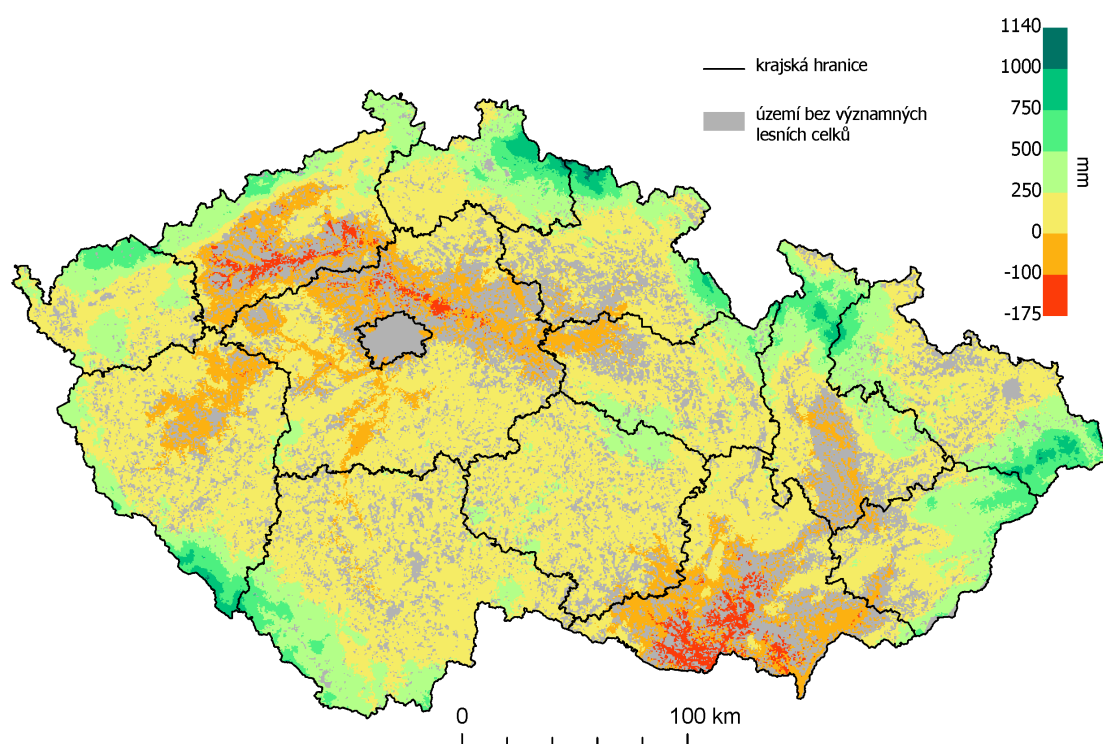
Pásmo 501–600 m n. m. zaznamenává snížení odtoku v rozmezí 95–165 mm oproti referenčnímu období 1991–2020. Odtok zde zůstává kladný i v závěru století (116 mm ve scénáři SSP2-4.5 a 47 mm ve scénáři SSP5-8.5), přestože dochází k výraznému poklesu.

Rozdílové mapy odtoku (Obr. 13 až Obr. 16) zobrazují změny vůči referenčnímu období 1991–2020 při zachování současné skladby lesních ploch. Mapy identifikují oblasti s nejvýraznějšími poklesy odtoku v obdobích 2021–2050 a 2071–2100, a tedy i lokality, kde budou lesní ekosystémy nejzranitelnější vůči dopadům změny klimatu na vodní režim.

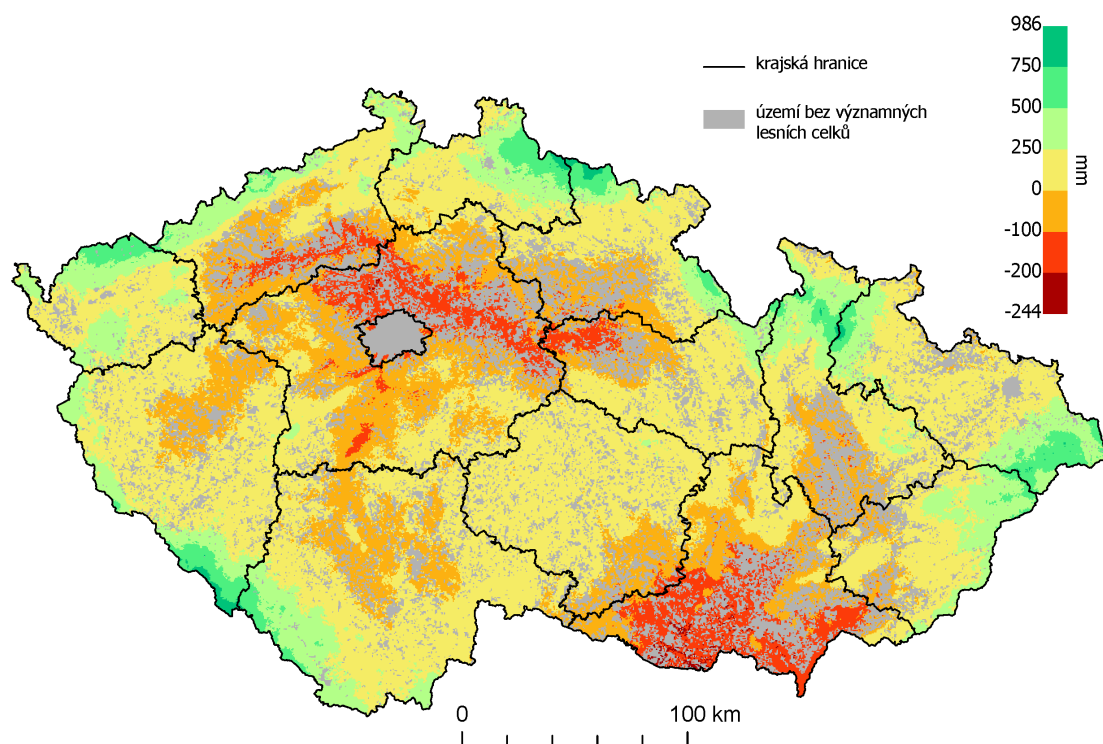
Prostorové výstupy modelových výpočtů jsou kromě map uvedených v této zprávě dostupné také v interaktivní podobě prostřednictvím platformy Google Earth Engine. Aplikace umožňuje přehledné zobrazení výsledků vodní bilance pro jednotlivá časová období, klimatické scénáře a varianty lesní skladby a jejich vzájemné porovnání v mapovém prostředí. Interaktivní vizualizace je dostupná na: <https://ee-centrumdivland.projects.earthengine.app/view/bilance>.



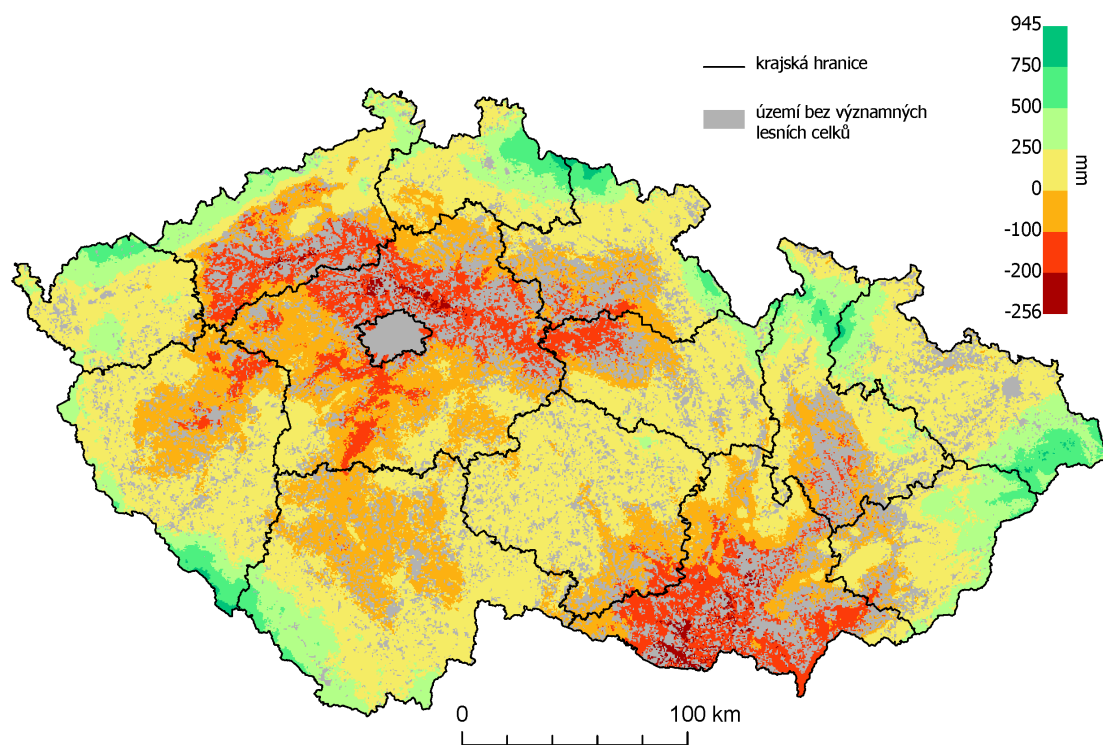
Obrázek 7. Modelovaný průměrný roční odtok v období 1961–1990.



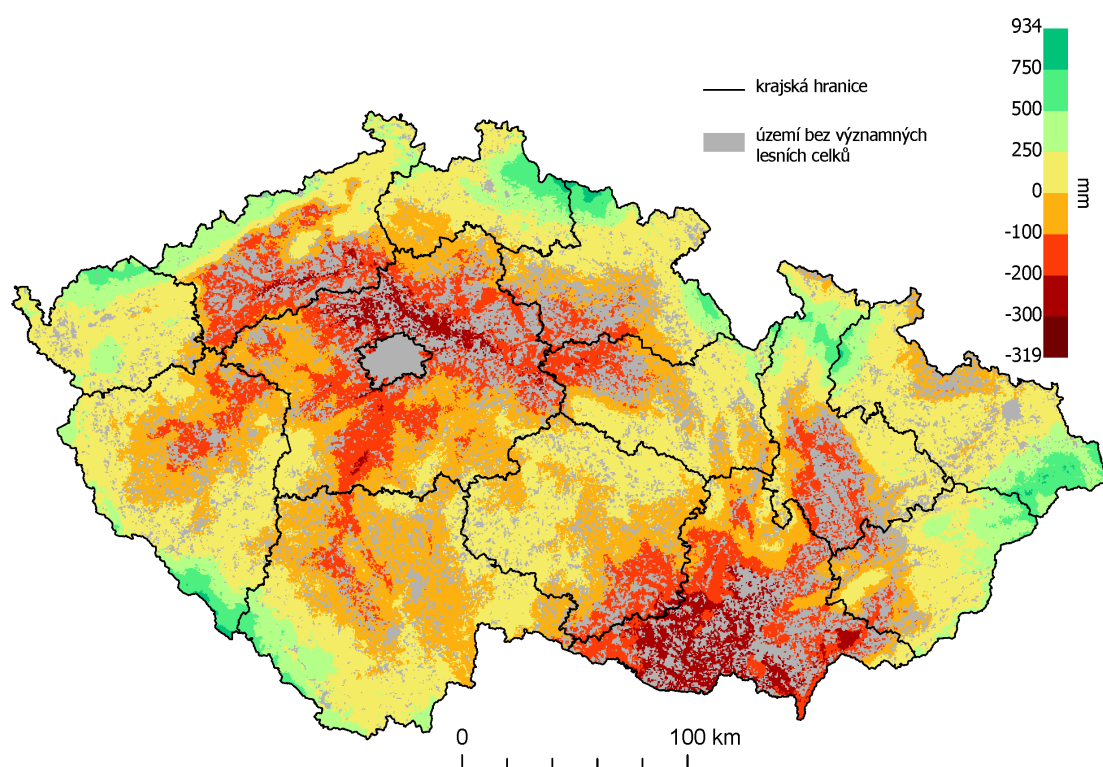
Obrázek 8. Modelovaný průměrný roční odtok v období 1991–2020.



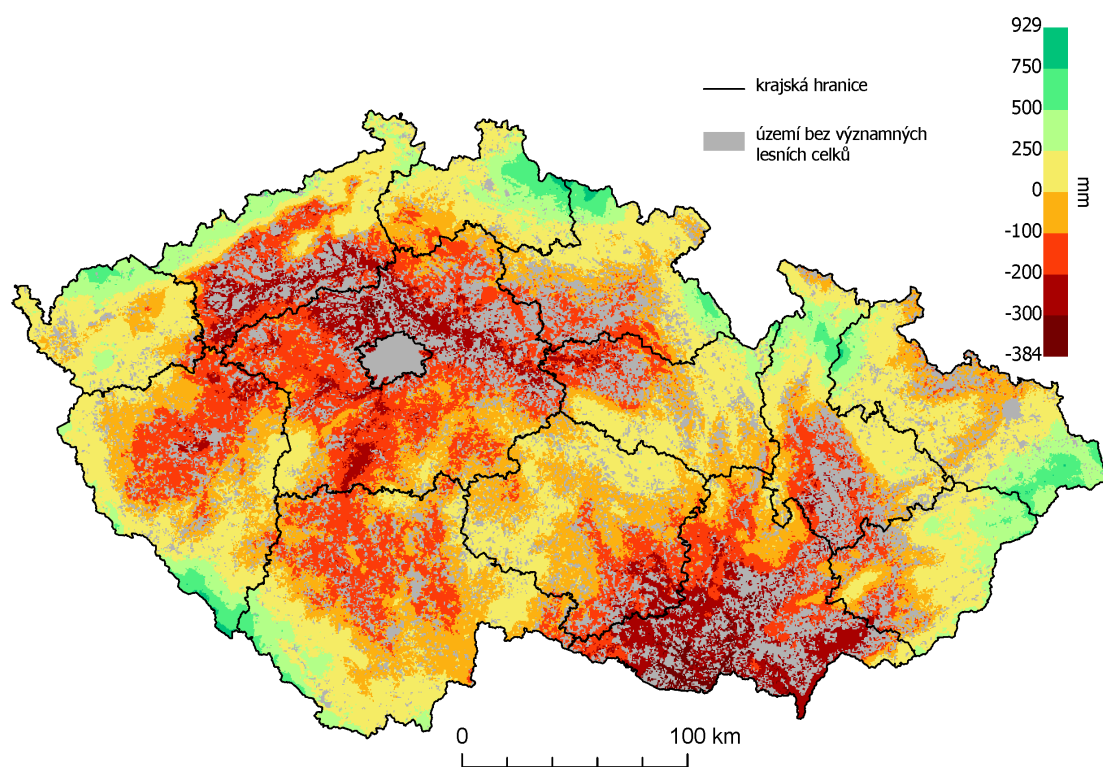
Obrázek 9. Modelovaný průměrný roční odtok v období 2021–2050 – scénář SSP2-4.5.



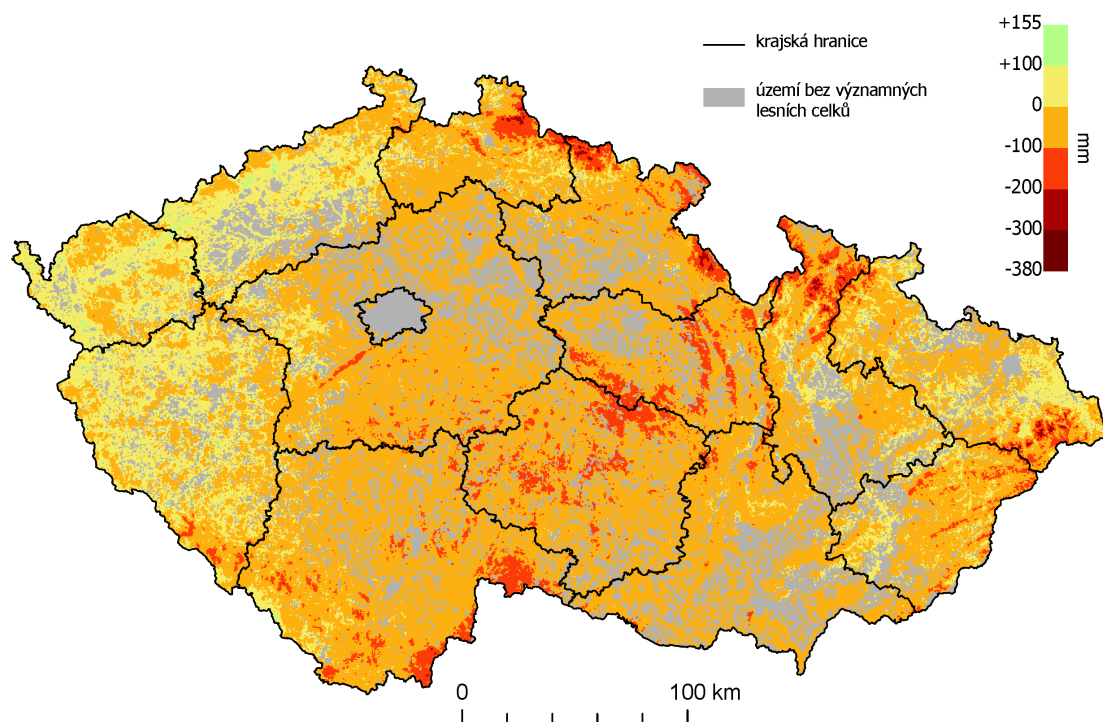
Obrázek 10. Modelovaný průměrný roční odtok v období 2021–2050 – scénář SSP5-8.5.



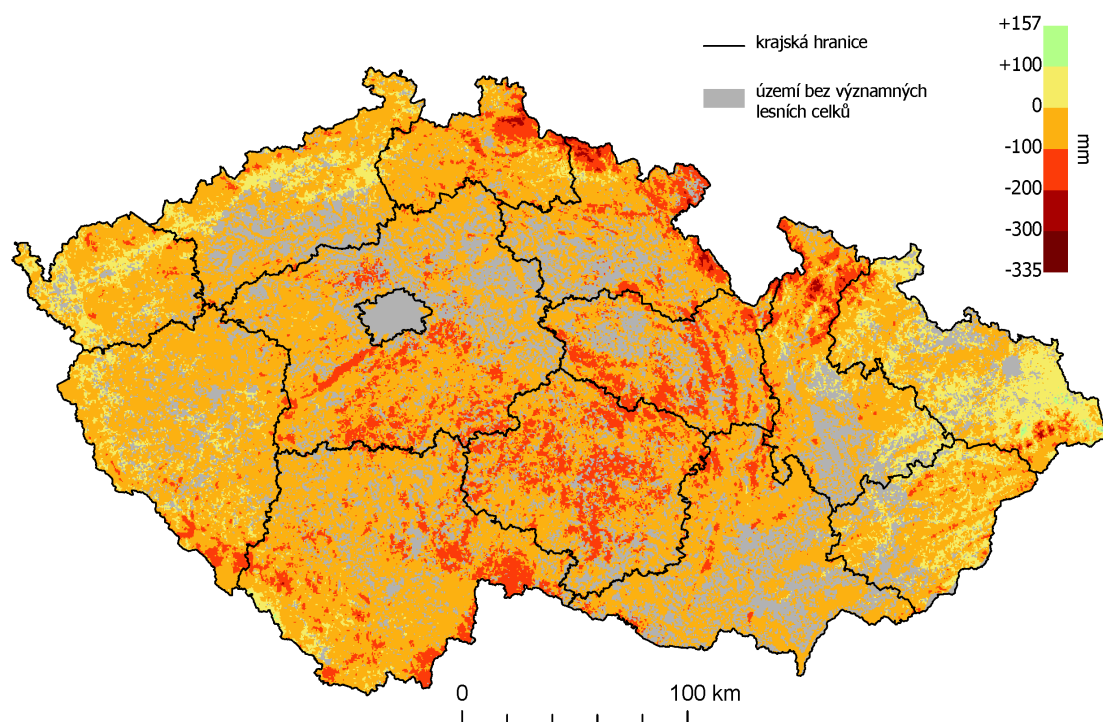
Obrázek 11. Modelovaný průměrný roční odtok v období 2071–2100 – scénář SSP2-4.5.



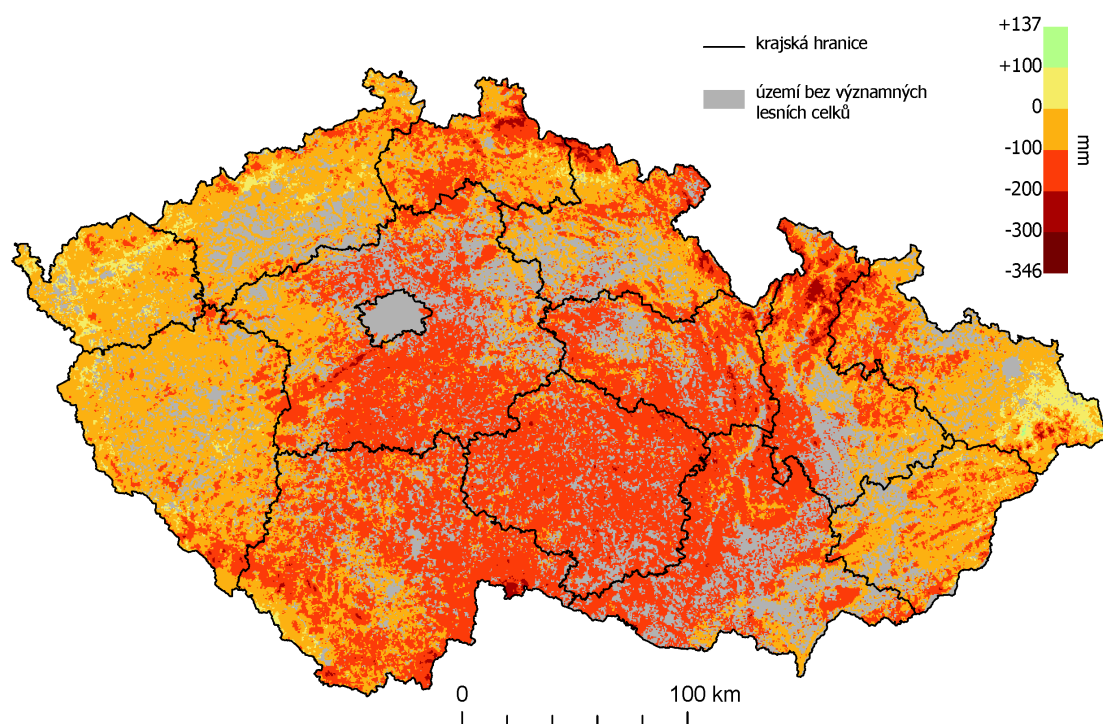
Obrázek 12. Modelovaný průměrný roční odtok v období 2071–2100 – scénář SSP5-8.5.



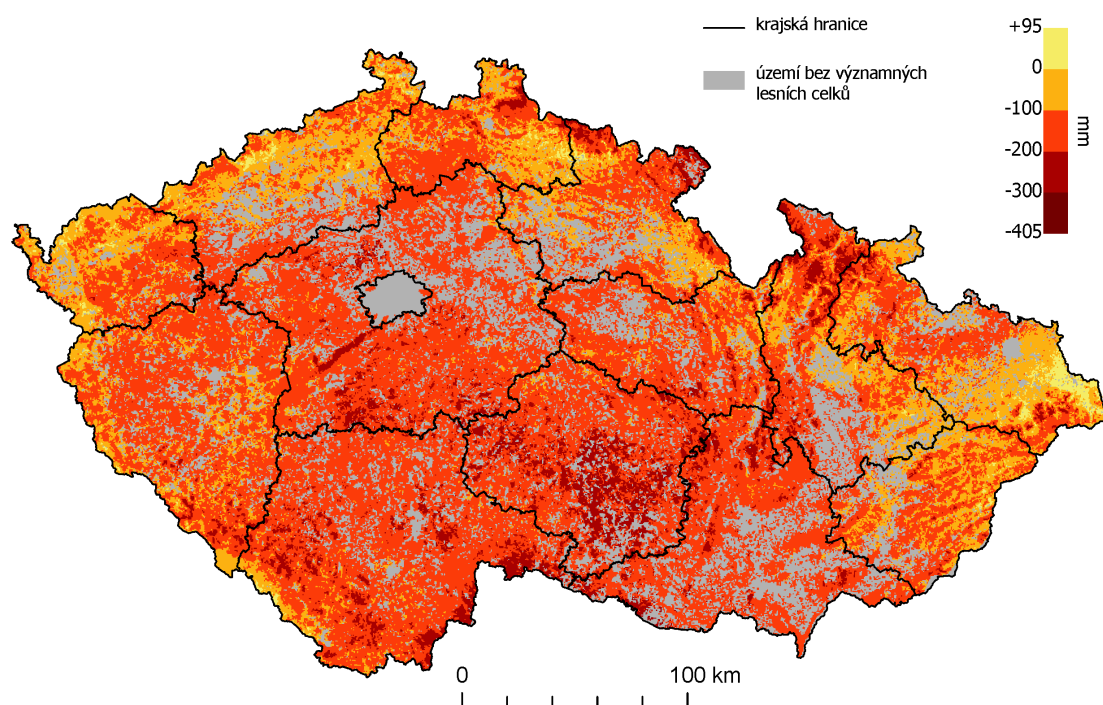
Obrázek 13. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) 2021–2050 – 1991–2020, SSP2-4.5.



Obrázek 14. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) 2021–2050 – 1991–2020, SSP5-8.5.



Obrázek 15. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) 2071–2100 – 1991–2020, SSP2-4.5.



Obrázek 16. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) 2071–2100 – 1991–2020, SSP5-8.5.

3.4. Hydrologická odezva lesních ploch na klimatickou změnu při změně lesní skladby

Modelové výsledky ukazují, že změna lesní skladby v nadmořských výškách do 800 m n. m. vede ve všech hodnocených obdobích ke zvýšení odtoku oproti referenční lesní skladbě (Tab. 1). Míra tohoto efektu se liší v závislosti na nadmořské výšce, časovém horizontu, klimatickém scénáři a rozsahu změny lesní skladby.

V období 2021–2050 je vliv změny lesní skladby nejvýraznější v nižších a středních nadmořských výškách. V pásnu 201–300 m n. m., kde při referenční lesní skladbě dochází k záporné vodní bilanci, vede rozsáhlejší změna lesní skladby (alternativa 2) k nárůstu odtoku o 20–25 mm, zatímco mírnější změna (alternativa 1) přináší pouze minimální zlepšení (+2–3 mm). Tento efekt nevede k úplnému odstranění deficitu, avšak v případě rozsáhlejší změny jej výrazně zmírňuje. V pásmech 301–400 m a 401–500 m n. m. se výraznější změna lesní skladby (alternativa 2) projevuje zvýšením odtoku o 30–50 mm, což významně oddaluje přechod bilance k nulovým či záporným hodnotám, zejména ve scénáři SSP5-8.5. Mírnější změna skladby (alternativa 1) má v těchto pásmech efekt pouze v řádu jednotek milimetrů. V pásnu 501–600 m n. m. zůstává odtok kladný i při referenční lesní skladbě, avšak rozsáhlejší změna porostu zvyšuje jeho hodnoty o 50–55 mm a přispívá ke zvýšení stability hydrologického režimu.

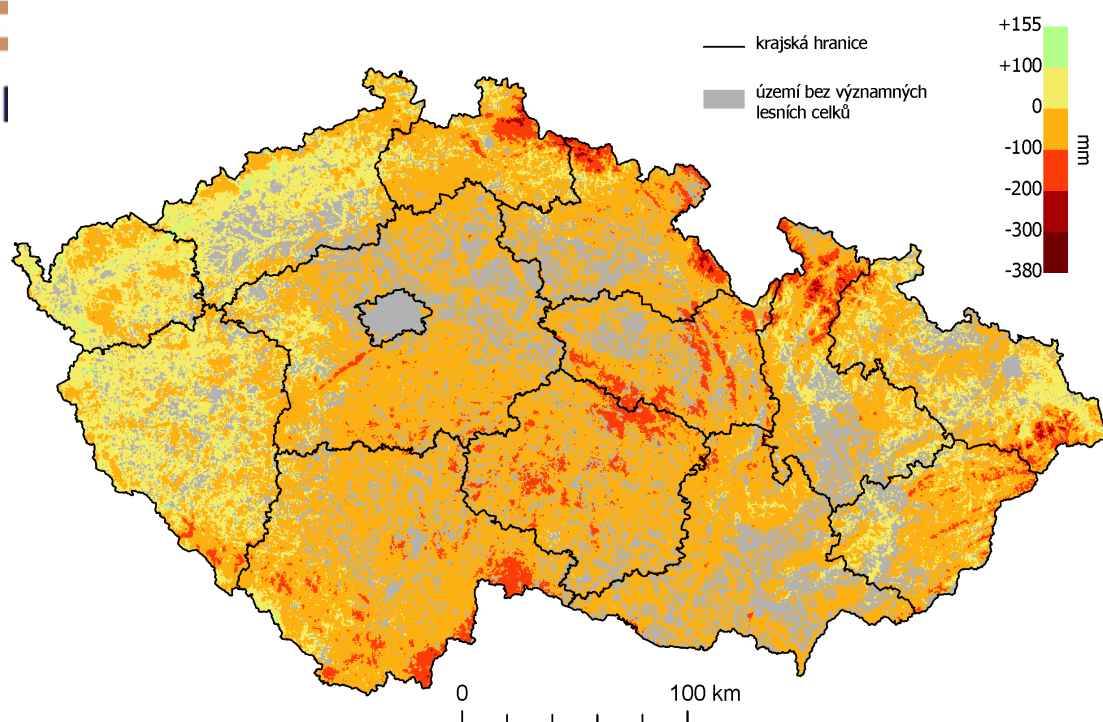
Ve výškových pásmech 601–800 m n. m. je vliv změny lesní skladby na odtok relativně menší. Absolutní hodnoty odtoku zde zůstávají vysoké a hydrologická odezva je výrazněji řízena klimatickými podmínkami než typem lesního porostu. Změna lesní skladby se zde projevuje spíše jako sekundární stabilizační faktor.

V závěru století, v období 2071–2100, zůstává pozitivní vliv rozsáhlejší změny lesní skladby patrný, jeho význam však ve srovnání s blízkým

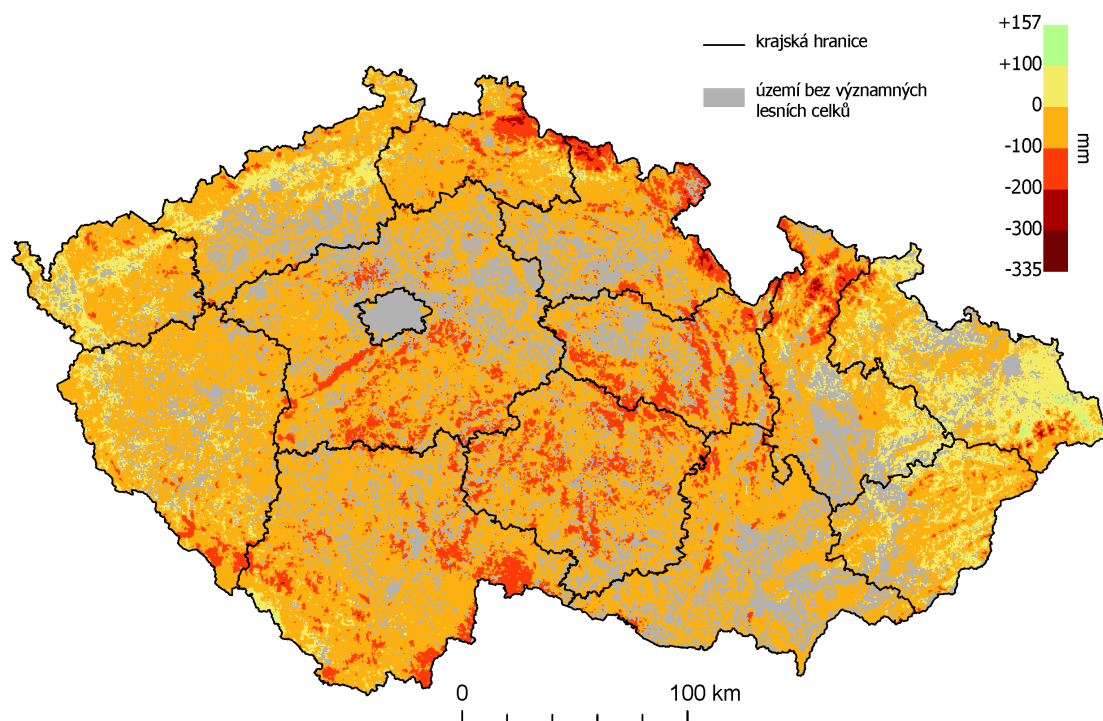
časovým horizontem klesá. V nejnižších pásmech 201–300 m n. m. i při změně lesní skladby přetrvává záporná vodní bilance, přestože deficit je při rozsáhlejší změně (alternativa 2) ve srovnání s referenční variantou výrazně menší (zlepšení o 25–30 mm). V pásnu 301–400 m n. m. pouze rozsáhlejší změna lesní skladby (alternativa 2) v mírnějším scénáři SSP2-4.5 dokáže udržet bilanci v mírně kladných hodnotách (+10 mm), zatímco mírnější změna (alternativa 1) je v tomto pásnu dokonce méně účinná než referenční skladba. Ve scénáři SSP5-8.5 již klimatický signál dominuje a deficit se projevuje i přes změnu porostní struktury. V pásnu 401–500 m n. m. je efekt rozsáhlejší změny lesní skladby stále patrný (+28 mm v SSP2-4.5), avšak ve vzdálenější budoucnosti nedokáže plně kompenzovat pokles odtoku vyvolaný změnou klimatu. Ve vyšších pásmech do 800 m n. m. se rozdíly mezi jednotlivými variantami lesní skladby dále zmenšují.

Rozdílové mapy odtoku (Obr. 17 až Obr. 24) zobrazují změny vůči referenčnímu období 1991–2020 ve dvou možných alternativách změny lesního porostu. Mapy identifikují oblasti s nejvýraznějšími poklesy odtoku v obdobích 2021–2050 a 2071–2100, a tedy i lokality, kde budou lesní ekosystémy nejzranitelnější vůči dopadům změny klimatu na vodní režim.

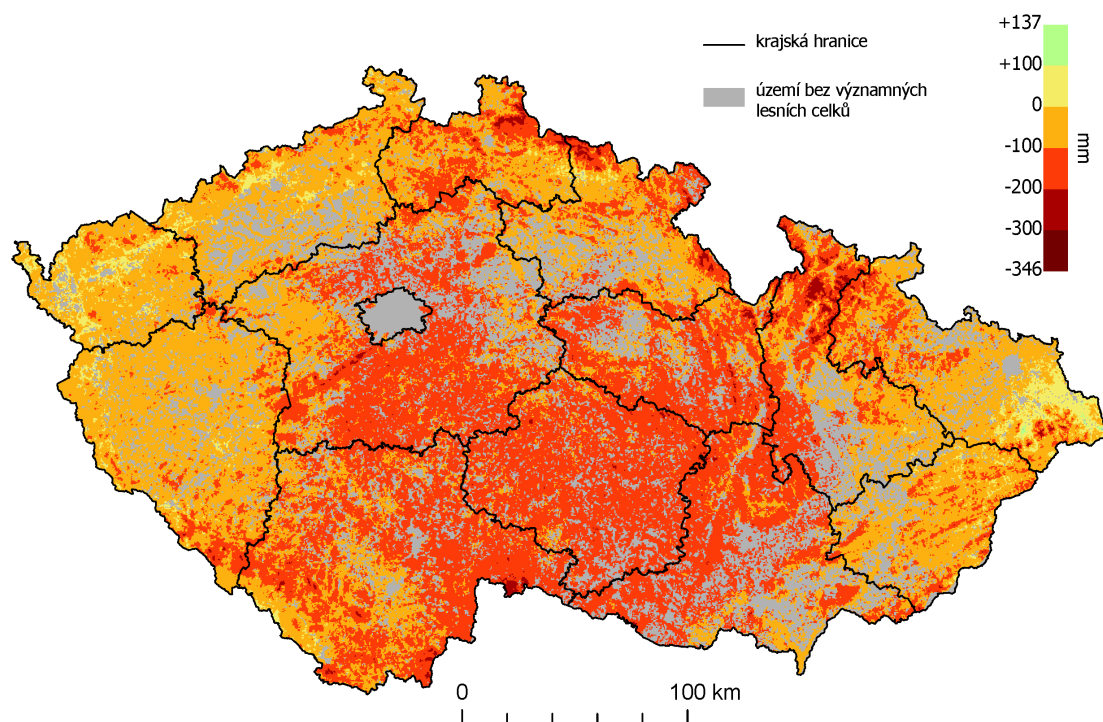
Prostorové výstupy modelových výpočtů jsou kromě map uvedených v této zprávě dostupné také v interaktivní podobě prostřednictvím platformy Google Earth Engine. Aplikace umožňuje přehledné zobrazení výsledků vodní bilance pro jednotlivá časová období, klimatické scénáře a varianty lesní skladby a jejich vzájemné porovnání v mapovém prostředí. Interaktivní vizualizace je dostupná na: <https://ee-centrumdivland.projects.earthengine.app/view/balance>.



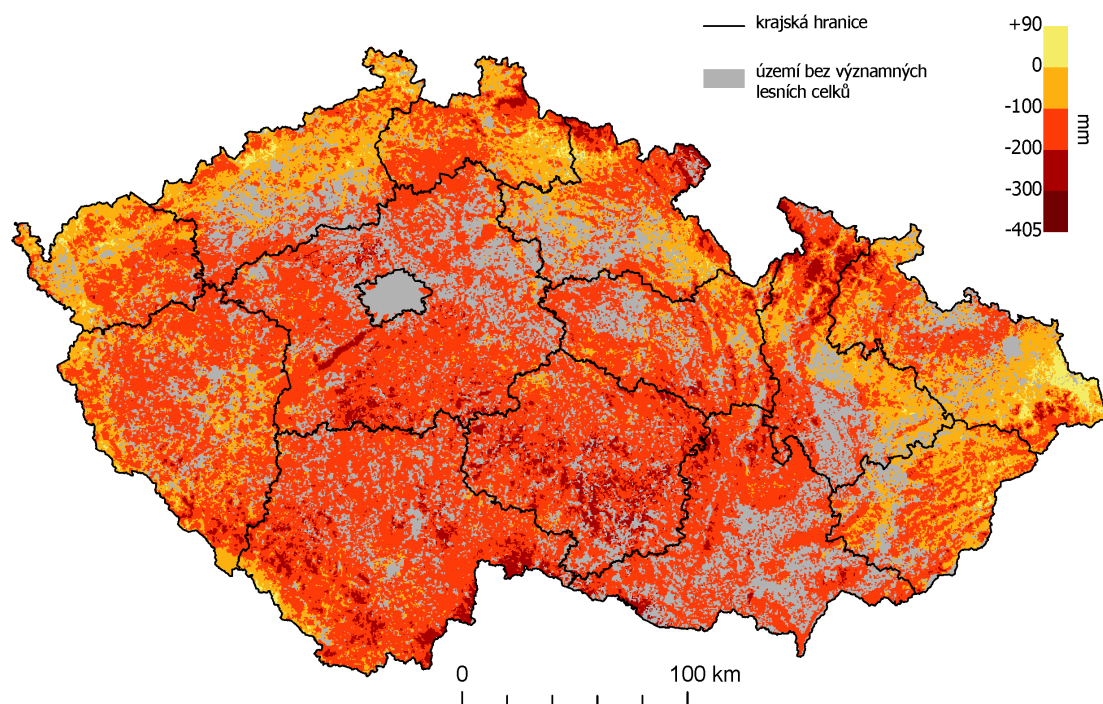
Obrázek 17. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) při alternativní lesní skladbě 1. 2021–2050 – 1991–2020, SSP2-4.5.



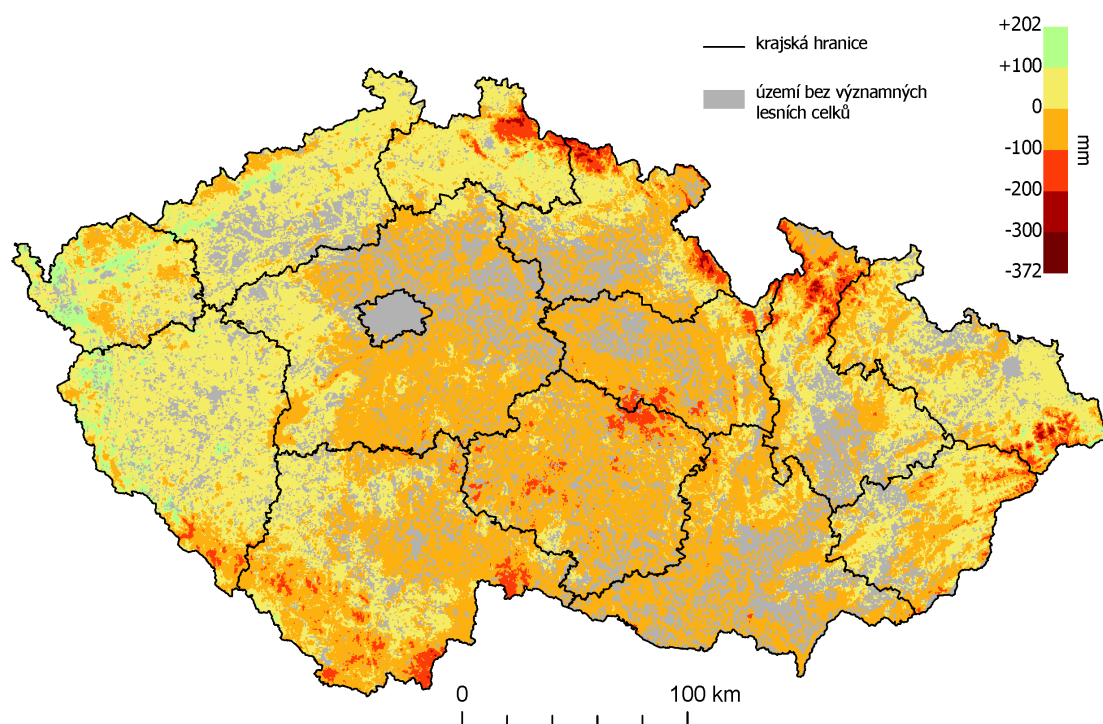
Obrázek 18. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) při alternativní lesní skladbě 1, 2021–2050 – 1991–2020, SSP5-8.5.



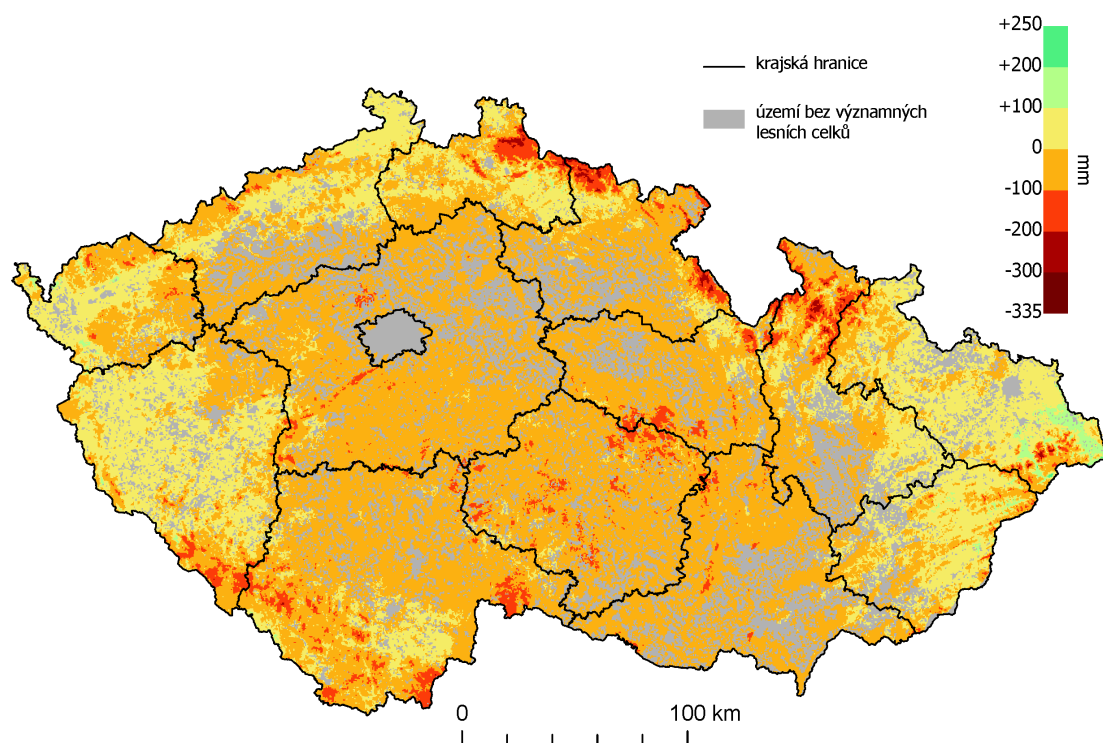
Obrázek 19. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) při alternativní lesní skladbě 1, 2071–2100 – 1991–2020, SSP2-4.5.



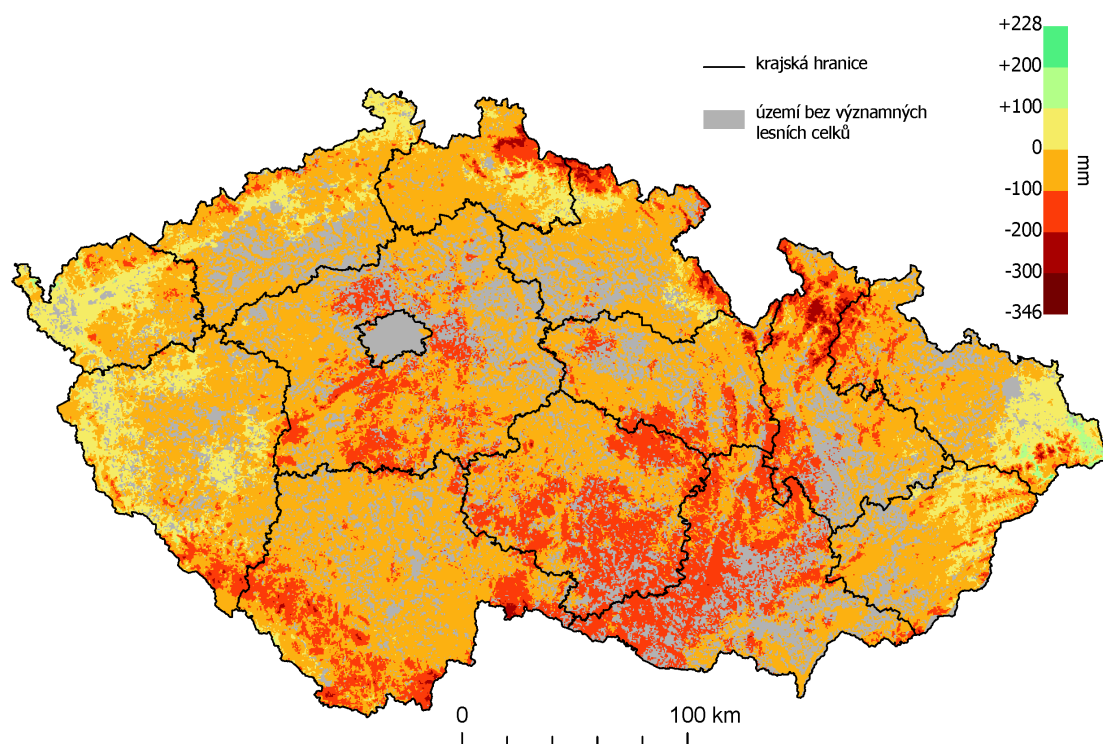
Obrázek 20. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) při alternativní lesní skladbě 1, 2071–2100 – 1991–2020, SSP5-8.5.



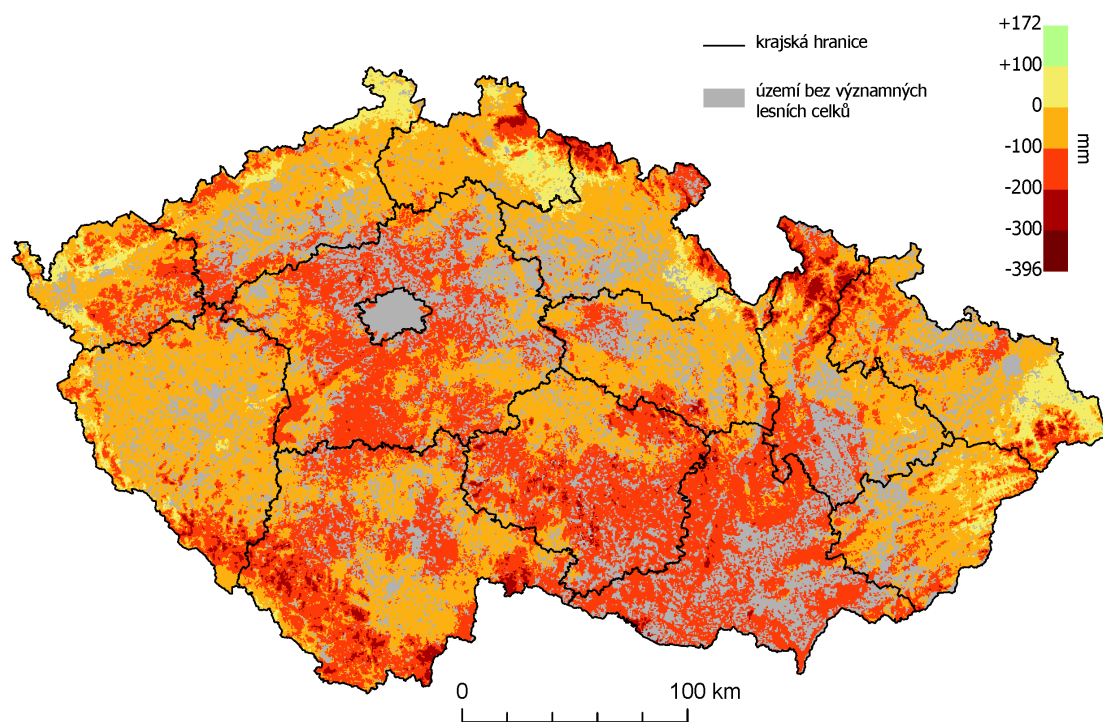
Obrázek 21. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) při alternativní lesní skladbě 2. 2021–2050 – 1991–2020, SSP2-4.5.



Obrázek 22. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) při alternativní lesní skladbě 2, 2021–2050 – 1991–2020, SSP5-8.5.



Obrázek 23. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) při alternativní lesní skladbě 2, 2071–2100 – 1991–2020, SSP2-4.5.



Obrázek 24. Změna průměrného ročního odtoku (ΔQ) při alternativní lesní skladbě 2, 2071–2100 – 1991–2020, SSP5-8.5.

Tabulka 1. Průměrný roční odtok (Q) z lesních ploch na území České republiky v jednotlivých nadmořských výškových pásmech pro referenční období a budoucí časové horizonty (2021–2050 a 2071–2100) při zachování referenční lesní skladby a při alternativních variantách změny lesní skladby, vypočtený pro klimatické scénáře SSP2-4.5 a SSP5-8.5. Odtok je stanoven jako z klimatické vodní bilance ($Q = P - ET$). Záporné hodnoty odtoku vyjadřují stav, kdy dlouhodobá evapotranspirace převyšuje srážky a vodní bilance lesních ploch je deficitní.

Výšková pásma	Rozloha	1961 – 1990	1991 – 2020	2021 – 2050 SSP 2-4.5, refer. les	2021 – 2050 SSP 5-8.5, refer. les	2021 – 2050 SSP 2-4.5, alter. les 1	2021 – 2050 SSP 5-8.5 alter. les 1	2021 – 2050 SSP 2-4.5 alter. les 2	2021 – 2050 SSP 5-8.5 alter. les 2	2071 – 2100 SSP 2-4.5 refer. les	2071 – 2100 SSP 5-8.5 refer. les	2071 – 2100 SSP 2-4.5 alter. les 1	2071 – 2100 SSP 5-8.5, alter. les 1	2071 – 2100 SSP 2-4.5, alter. les 2	2071 – 2100 SSP 5-8.5, alter. les 2
<i>m n.m.</i>	<i>ha</i>	<i>mm</i>													
45-100	277	-121	-95	-33	-93	13	-53	40	-29	-89	-177	-70	-121	-45	-89
101-200	365515	-85	-80	-130	-149	-127	-147	-112	-131	-218	-243	-192	-239	-177	-218
201-300	1525809	23	24	-32	-52	-30	-49	-10	-29	-97	-128	-91	-124	-70	-97
301-400	1371061	93	98	41	20	43	22	72	51	-16	-57	-19	-53	10	-16
401-500	1938896	123	135	75	53	79	57	122	100	32	-28	15	-24	60	32
501-600	1360472	195	213	146	127	151	133	199	181	116	47	89	55	139	116
601-700	698111	277	304	230	215	230	215	245	231	158	139	174	140	189	158
701-800	289891	391	428	353	340	353	340	360	347	278	270	306	270	313	278
801-900	165541	480	520	444	428	444	428	446	430	365	363	396	363	398	365
901-1000	87895	576	616	527	512	527	512	528	513	454	452	481	452	483	454
1001-1100	43305	660	705	603	587	603	587	604	588	532	532	555	532	556	532
1101-1200	24450	738	789	683	665	683	665	683	666	620	620	635	620	635	620
1201-1300	10422	812	871	737	722	737	722	737	723	682	682	693	682	693	682
1301-1400	3752	902	972	789	779	789	779	789	779	737	737	748	737	749	737
1401-1500	1080	1006	1042	856	843	856	843	856	844	807	806	824	806	824	807
1501-1600	124	1080	1072	878	858	878	858	879	858	830	830	860	830	861	830

4. SHRNU TÍ

Studie hodnotí dopady změny klimatu na vodní bilanci lesních ploch v České republice v období 1961–2100 s využitím dlouhodobých dat ze sítě experimentálních povodí GEOMON. Na základě regresního modelu aktuální evapotranspirace, který zohledňuje rozdíly mezi jehličnatými a listnatými porosty prostřednictvím podkorunových srážek, byla kvantifikována hydrologická odezva lesů na klimatickou změnu v různých nadmořských výškách a při různých variantách lesní skladby.

Výsledky ukazují, že průměrný roční odtok z lesních ploch zůstal mezi obdobími 1961–1990 a 1991–2020 relativně stabilní (143 vs. 157 mm·rok⁻¹). Výrazné změny se však projevují v projekcích budoucího klimatu. V období 2021–2050 klesá průměrný odtok na 74–94 mm·rok⁻¹ v závislosti na klimatickém scénáři, přičemž deficit vodní bilance (evapotranspirace převyšující srážky) se objevuje zejména v nižších nadmořských

výškách. V závěru století (2071–2100) se deficit prohlubuje a rozšiřuje do vyšších poloh, přičemž rozdíly mezi scénáři SSP2–4.5 a SSP5–8.5 jsou výrazně větší než v blízkém časovém horizontu.

Celkově výsledky ukazují, že rozsáhlejší změna lesní skladby (alternativa 2, tj. převod na listnaté porosty do 600 m n. m. a částečně do 800 m n. m.) představuje možný nástroj ke zmírnění poklesu odtoku a oddálení vzniku deficitu vodní bilance v nižších a středních nadmořských výškách, zatímco mírnější změna (alternativa 1, nahrazení ploch po těžbách listnatými porosty do 600 m n. m.) má efekt výrazně menší a v některých případech zanedbatelný. Účinnost těchto opatření je však časově omezená a v závěru století ani rozsáhlá změna skladby již nedokáže plně vyvážit dominantní vliv klimatické změny, zejména v pesimistickém scénáři SSP5–8.5.

Prostorové výstupy modelování jsou dostupné pro interaktivní prohlížení prostřednictvím webové aplikace na adrese [https://ee-centrum.](https://ee-centrum.divland.projects.earthengine.app/view/bilance)

5. LITERATURA

Bentz, B. J., Régnière, J., Fettig, C. J., Hansen, E. M., Hayes, J. L., Hicke, J. A., Kelsey, R. G., Negrón, J. F., & Seybold, S. J. (2010). Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: Direct and indirect effects. *BioScience*, 60(8), 602–613. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.8.6>

Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P. J., et al. (2021). Recent European drought extremes beyond common era background variability. *Nature Geoscience*, 14, 190–196. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00698-0>

Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarto, D., Gutierrez, V., van Noordwijk, M., Creed, I. F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D. V., Tobella, A. B., Ilstedt, U., Teuling, A. J., Gebrehiwot, S. G., Sands, D. C., Muys, B., Verbist, B., & Sullivan, C. A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>

Hlásny, T., Zimová, S., Merganičová, K., Štěpánek, P., Modlinger, R., & Turčáni, M. (2021). Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: Drivers, impacts, and management implications. *Forest Ecology and Management*, 490, 119075. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119075>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Launiainen, S., Guan, M., Salmivaara, A., & Kieloaho, A.-J. (2019). Modeling boreal forest evapotranspiration and water balance at stand and catchment scales: A spatial approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 3457–3480. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3457-2019>

McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Vaché, K., Dunn, S., Grant, G., Haggerty, R., Hinz, C., Hooper, R., Kirchner, J., Roderick, M. L., Selker, J., & Weiler, M. (2007). Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology.

Water Resources Research, 43(7), W07301. <https://doi.org/10.1029/2006WR005467>

Obladen, N., Dechering, P., Skiadaresis, G., et al. (2021). Tree mortality of European beech and Norway spruce induced by the 2018–2019 hot droughts in central Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 308–309, 108482. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108482>

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2: Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1–4), 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>

Oulehle, F., Fischer, M., Hruška, J., Cudlín, P., Krám, P., McDowell, W. H., & Evans, C. D. (2021). The GEOMON network of Czech catchments provides long-term insights into altered forest biogeochemistry: From acid atmospheric deposition to climate change. *Hydrological Processes*, 35(11), e14204. <https://doi.org/10.1002/hyp.14204>

Scharnweber, T., Smiljanić, M., Cruz-García, R., et al. (2020). Tree growth at the end of the 21st century: The extreme years 2018/19 as template for future growth conditions. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab865d>

Schuldt, B., Buras, A., Arend, M., et al. (2020). A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology*, 45, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.04.003>

Senf, C., & Seidl, R. (2021). Persistent impacts of the 2018 drought on forest disturbance regimes in Europe. *Biogeosciences*, 18(18), 5223–5230. <https://doi.org/10.5194/bg-18-5223-2021>

Štěpánek, P., Zahradníček, P., Huth, R. (2011). Interpolation techniques used for data quality control and calculation of technical series: an example of a Central European daily time series. *Idojaras* 115, 87–98.

Štěpánek, P., Zahradníček, P., Farda, A. (2013). Experiences with data quality control and homogenization of daily records of various meteorological elements in the Czech Republic in the period 1961–2010. *Idojaras* 117, 123–141.

Teuling, A. J., de Badts, E. A. G., Jansen, F. A., Fuchs, R., Buitink, J., van Dijke, A. J. H., & Sterling, S. M. (2019). Climate change, reforestation/afforestation, and urbanization impacts on evapotranspiration and streamflow in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(9), 3631–3652. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3631-2019>

Trnka, M., Hlavinka, P., Možný, M., Semerádová, D., Štěpánek, P., Balek, J., Bartošová, L., Zahradníček, P., Bláhová, M., Skalák, P., Farda, A., Hayes, M., Svoboda, M. D., Wagner, W., Eitzinger, J., Fischer,

M., & Žalud, Z. (2020). Czech Drought Monitor System for monitoring and forecasting agricultural drought and drought impacts. *International Journal of Climatology*, 40(14), 5834–5853. <https://doi.org/10.1002/joc.6557>

Williams, D. W., & Liebhold, A. M. (2002). Climate change and the outbreak ranges of two North American bark beetles. *Agricultural and Forest Entomology*, 4(2), 87–99. <https://doi.org/10.1046/j.1461-9563.2002.00124.x>

Zahradníček, P., Brázdil, R., Štěpánek, P., & Trnka, M. (2021). Reflections of global warming in trends of temperature characteristics in the Czech Republic, 1961–2019. *International Journal of Climatology*, 41(3), 1211–1229. <https://doi.org/10.1002/joc.6791>