



Program TransAdapt

Translace poznatků a transfer postupů pro adaptaci
na klimatickou změnu do zemědělské a lesnické praxe
a veřejné správy: co-creative přístup

Aktivita 1.7

Průběžná zpráva k dokončení aktivity 1.7 - Posouzení dopadů změny
klimatu a potenciálu adaptačních opatření pro celé povodí Želivky s
dopady na vodní nádrž i povodí

Obsah

1	Úvod a cíle etapy	3
2	Popis zájmové lokality	4
3	Strategie adaptace krajiny na klimatickou změnu	5
3.1	Vliv klimatické změny	5
3.2	Adaptace lesů	9
3.2.1	S1 Referenční scénář	10
3.2.2	S2 Lesnický scénář (optimalizace adaptace, produkce)	10
3.2.3	S3 Hydrologický scénář	11
3.3	Adaptace ekosystémů	11
3.3.1	BaU Scénář (Business as Usual = referenční scénář)	11
3.3.2	MaO scénář (Návrh potřebných a odpovídajících mitigačních a adaptačních opáření) 13	11
4	Metodika zavedení adaptačního do modelu MIKE SHE	15
4.1	Verifikace modelované ETa na základě měření Eddy Covariance na atmosférické věži Křešín	15
4.2	Určení vztahů ETa mezi existujícími ekosystémy	23
4.3	Vyjádření vztahů mezi ekosystémy modelovými parametry pro výpočet ETa	26
4.4	Zavedení změny využití území do modelu	27
4.5	Sestavení variantních scénářů	32
4.6	Koncept vyhodnocení efektu na zmírnění negativních dopadů klimatické změny na vodní bilanci	34
5	Závěr a další kroky	35
6	Seznam použitých zkratk	36
7	Literatura	36

1 Úvod a cíle etapy

Cílem této etapy bylo posoudit vliv klimatické změny na odtokové poměry a vodní bilanci povodí Želivky do roku 2100. Pro posuzování přímého vlivu klimatu na vodní bilanci byl zvolen simulační nástroj MIKE SHE, který byl sestaven podle metodiky Fischer et.al. 2023 v denním časovém kroku a v ortogonální výpočetní síti o prostorovém rozlišení 200 m. Klimatickou změnu v tomto pojetí popisuje soubor 26 scénářů sestávající ze 7 globálních cirkulačních modelů (GCM) a jejich hodnot ve 4 emisních scénářích (SSP 126, 245, 370, 585). Model budoucích klimatických podmínek má stejné nastavení parametrů řídicích rovnic jako model referenčního stavu. Jediným rozdílem mezi modelem budoucích scénářů a modelem referenčního stavu je série prostorově distribuovaných časových řad budoucích klimatických podmínek.

Navazujícím cílem bylo nalézt sadu potenciálně realizovatelných adaptačních opatření pro zmírnění zjištěných negativních dopadů klimatické změny na odtokové poměry v povodí Želivky včetně zlepšení predikované bilance vodárenské nádrže Švihov. Ze souboru možných adaptačních opatření byla vybrána pouze ta opatření, která dávají v daném území smysl a mají do určité míry realizační potenciál. Jedná se o adaptační opatření týkající se především změn hospodaření v lesích, které byly v nedávné době zasaženy disturbancí v podobě kůrovcové kalamity a celkových změn ve využití území (landuse).

Ve spolupráci s odborníky z IFER - Ústavu pro výzkum lesních ekosystémů, dále IFER, byly sestaveny 3 scénáře vývoje dřevinné skladby lesa za uvažování různých strategií lesního hospodářství. Scénáře zahrnují jak výsadbu nových porostů na lokalitách zasažených disturbancí, tak změnu stávající dřevinné skladby lesa.

Další soubor opatření vznikl ve spolupráci s oddělením analýz ekosystémových funkcí krajiny a týká se změny landuse v reakci na měnící se potřeby společnosti zatížené očekávaným demografickým a socioekonomickým vývojem v kontextu klimatické změny. Tato opatření byla aplikována v nejvíce zranitelných oblastech v povodí vytipovaných pomocí metodiky ESAI (Environmental Sensitivity Assessment Index), konceptuálního modelu pro hodnocení náchylnosti území k degradaci.

Cílem etapy bylo shromáždit podkladní data opatření a určit metodický přístup pro zavádění opatření do modelu MIKE SHE. Vztahy mezi jednotlivými porosty byly hodnoceny za pomocí dat DPZ, korigovaných pomocí měření eddy covariance z atmosférické věže Křešín.

V rámci této etapy vznikla pracovní linka převodu historicky zaznamenaných vztahů mezi jednotlivými porosty do kvantifikace změn aktuální evapotranspirace porostů navržených v rámci adaptačních opatření.

2 Popis zájmové lokality

Lesy v povodí řeky Želivky hrají klíčovou roli z hlediska hydrologické stability území, ochrany půdy, biodiverzity a kvality vody. Povodí se nachází převážně na území kraje Vysočina, částečně zasahuje do Středočeského a Jihočeského kraje. Z hlediska podmínek lesnického hospodaření leží povodí z převážné části v Přírodní lesní oblasti (PLO) 16 Českomoravská vrchovina (87 %) a z menší části v PLO 10 Středočeská pahorkatina (13 %). Krajina povodí je mírně zvlněná až pahorkatinná, nadmořská výška se pohybuje mezi 400-600 m n.m.

Podíl lesa na ploše povodí se pohybuje v průměru okolo 50-60 %, lesnatost je tedy vyšší, než je vykazováno pro území České republiky (34 %). Lesy v povodí mají zásadní význam pro ochranu kvality vody ve vodárenské nádrži Švihov – filtrují srážky, zadržují vodu v krajině, snižují riziko eroze a eutrofizace, tedy pomáhají chránit půdu před degradací a splachem živin do vodních toků.

Původně na území dominovaly smíšené porosty s převahou buku, dubu, jedle, případně javoru a lípy v nižších polohách. V důsledku intenzivního lesního hospodaření dnes v porostech dominují jehličnany - smrk ztepilý na vlhčích a živnějších stanovištích a borovice lesní na sušších a chudých stanovištích. Aktuální zastoupení dřevin připravené na základě dat DPZ ukázalo, že zastoupení smrku v povodí činí 48 %. Holiny a čerstvě zalesněné plochy dosahují téměř 19 %. Dále následuje skupina ostatních listnáčů (10 %), kdy podíl spolehlivě určeného buku dosahuje zhruba 4 % a dubu pouze 1 % plošného zastoupení lesa. Borovice je zastoupena necelými 5 procenty.

Lesnické hospodaření v povodí po roce 2015 silně zasáhla kůrovcová kalamita a období s nižším úhrnem srážek. V důsledku kalamity odumřela část dospělých smrkových porostů. Na jejich místě se v současné době nacházejí porosty ve stadiu mlazin, kultur a holin, což se v budoucnu projeví větší druhovou a věkovou diverzitou porostů. Lze očekávat, že dřevinná skladba porostů bude bližší přirozené skladbě.

Lesnické hospodaření v ochranných pásmech 1 a 2 vodního zdroje Švihov zohledňuje zpřísněné požadavky na vodohospodářskou funkci lesů - omezena je velikost těžebních ploch, ponechání odumřelé dřevní hmoty a těžebních zbytků v porostech a použití přípravků na ochranu lesa (pesticidy).

3 Strategie adaptace krajiny na klimatickou změnu

Opatření pro adaptaci krajiny na klimatickou změnu byly posouzena ve spolupráci s odborníky IFER a CzechGlobe oddělení analýz ekosystémových změn komplexně pro celé povodí. Nejedná se tedy o posuzování čistě hypotetických stavů, jako je zalesnění či zatrávnění celého území, ale o realistické návrhy lokálních změn s účelem posílit hydrologickou či jinou funkci krajiny v kontextu měnících se klimatických podmínek. Uvažovaná opatření lze rozdělit do dvou hlavních skupin. (1) Adaptace lesů, která detailně uvažuje vývoj lesního porostu včetně změny věkové struktury, vysazení nových dřevin v lokalitách zasažených těžbou v důsledku kůrovcové kalamity či snížení zápoje porostu v důsledku intenzivnější prořízky. (2) Změny ekosystémů, které lze zjednodušeně považovat za změny landuse v detailu cílí na zranitelné plochy z hlediska udržitelnosti.

V každé skupině návrhů opatření je několik realistických scénářů potenciálního vývoje lišící se podle míry intervence a podle účelu navrženého opatření. Scénáře byly zpracovány ve velkém prostorovém rozlišení (30-50 m) a pro účely modelování hydrologickým systémem MIKE SHE byly převedeny do požadovaného modelového rozlišení (40-200 m, podle oblasti).

3.1 Vliv klimatické změny

Aby bylo možné zhodnotit přímý vliv klimatické změny na vodní bilanci a odtokový proces v povodí Želivky, bylo zapotřebí nejprve určit srovnávací „referenční“ stav, vycházející z historických dat relevantně popisujících skutečnost a aplikovat model MIKE SHE s identickým nastavením parametrů pro posouzení vodní bilance v tomto referenčním stavu. Model referenčního stavu zahrnuje zjednodušení a aproximace se výsledky mohou lišit od měřených dat, přestože jsou platné pro stejné období se známými hodnotami. Modelované scénáře budoucího vývoje je potom vždy zapotřebí srovnávat s modelem referenčního stavu, nikoli přímo s měřenými daty. Vliv klimatické změny je potom zapotřebí uvažovat jeho změnu složek vodní bilance mezi budoucím a referenčním stavem, nikoliv v absolutních hodnotách.

Pro model referenčního stavu, který slouží jako srovnávací stav reprezentující současné podmínky vodní bilance v povodí, bylo zvoleno období 1981-2010. Hlavním důvodem tohoto výběru bylo, že období nezahrnuje významnou suchou periodu 2015-2018, která významným stylem ovlivnila průměrné charakteristiky dekády 2010-2020. V budoucnu se sice předpokládá nárůst pravděpodobnosti výskytu suchých period, avšak toto výrazné sucho je považováno za extrémní a výjimečnou událost

Pro modelování vývoje klimatických podmínek byly použity klimatické projekce GCM z CMIP6. Konkrétně byly použity 4 varianty různých směrů socioekonomického vývoje (SSP):

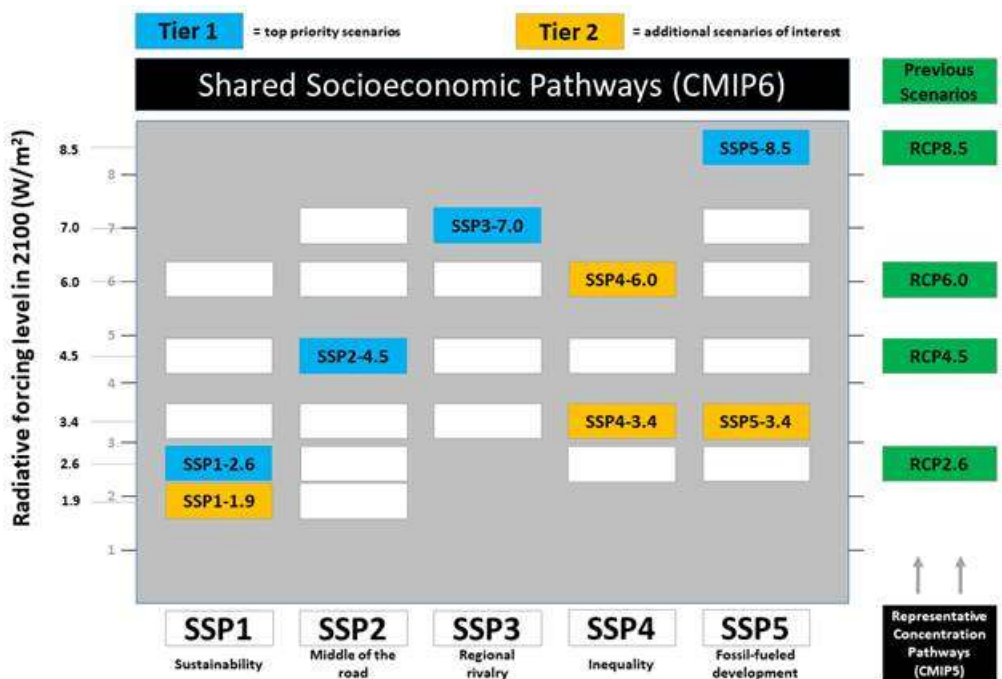
- 1: „Udržitelná“ cesta
- 2: „Střední“ cesta: Degradace environmentálních systémů a zlepšení využití zdrojů a energie
- 3: „Regionální rivalita“ umožňující malý ekonomický rozvoj
- 5: „Rozvoj založený na fosilních palivech“,

a 4 různé směry budoucího vývoje antropogenních emisí skleníkových plynů a aerosolů - Representative Concentration Pathways (RCP):

- RCP2.6 – nárůst radiačního působení v roce 2100 o max 2.6 W/m² v porovnání s rokem 1750
- RCP4.5 – nárůst radiačního působení v roce 2100 o max 4.5 W/m² v porovnání s rokem 1750
- RCP7.0 – nárůst radiačního působení v roce 2100 o max 7.0 W/m² v porovnání s rokem 1750
- RCP8.5 – nárůst radiačního působení v roce 2100 o max 8.5 W/m² v porovnání s rokem 1750.

Dále bylo použito 7 klimatických modelů GCM:

- TaiESM1: Taiwan Earth System Model version 1
- MRI-ESM2: Meteorological Research Institute - Earth System Model version 2.0
- MPI-ESM1-2-HR: Max Planck Institute for Meteorology - Earth System Model
- GFDL-ESM4: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model version 4.1
- EC-EARTH3: European community - Earth System Model
- CNRM-CM6-1-HR: Centre National de Recherches Météorologiques - Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
- CMCC-ESM2: Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici - Earth System Model version 2.0.

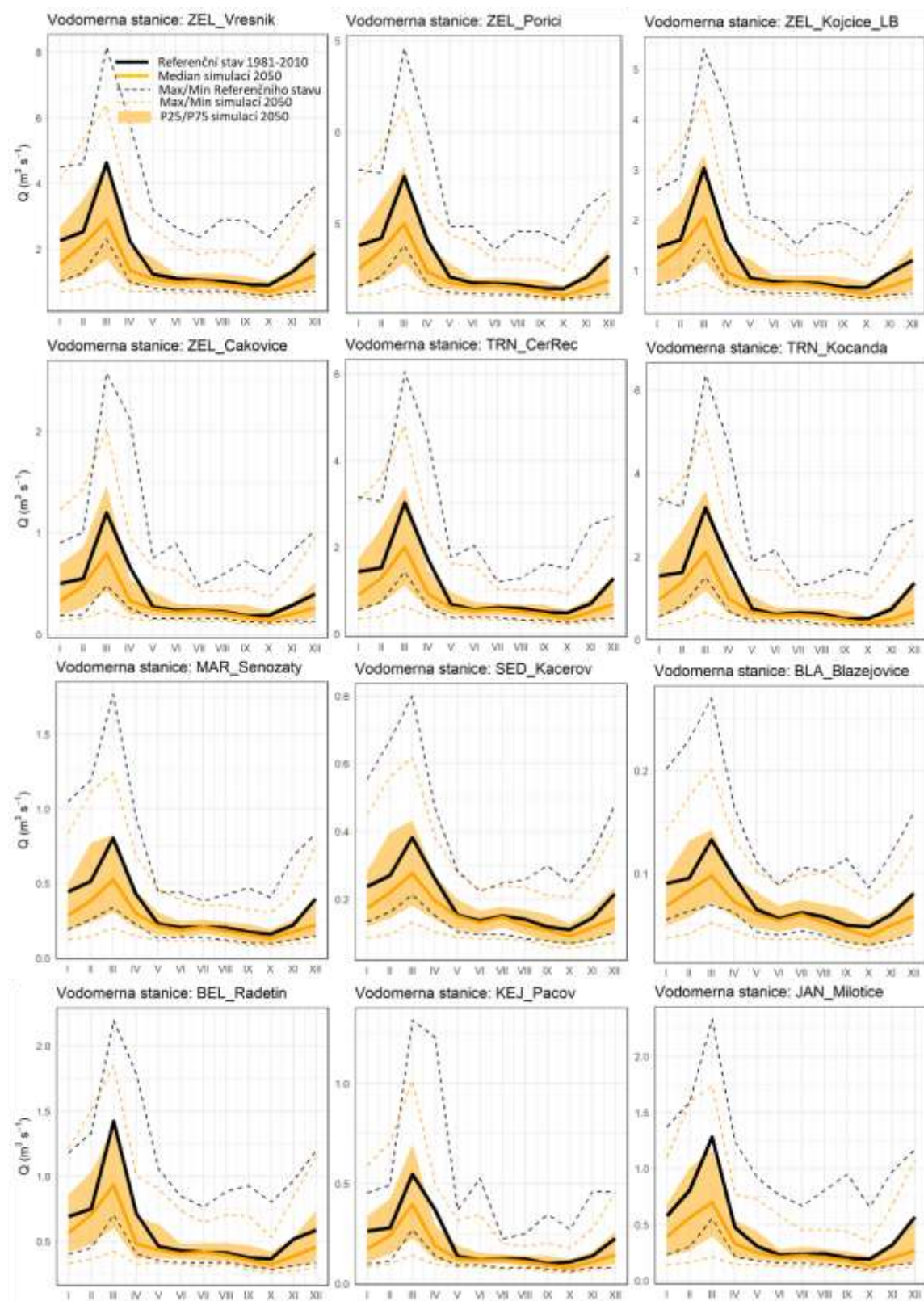


Obr. 1 Výběr použitých směrů socioekonomického vývoje a vývoje antropogenních emisí.

Obr. 2 znázorňuje výsledky porovnání modelu referenčního stavu se statistikami výsledků modelu budoucích podmínek pro horizont roku 2050. Pro porovnání byly použity výsledky všech

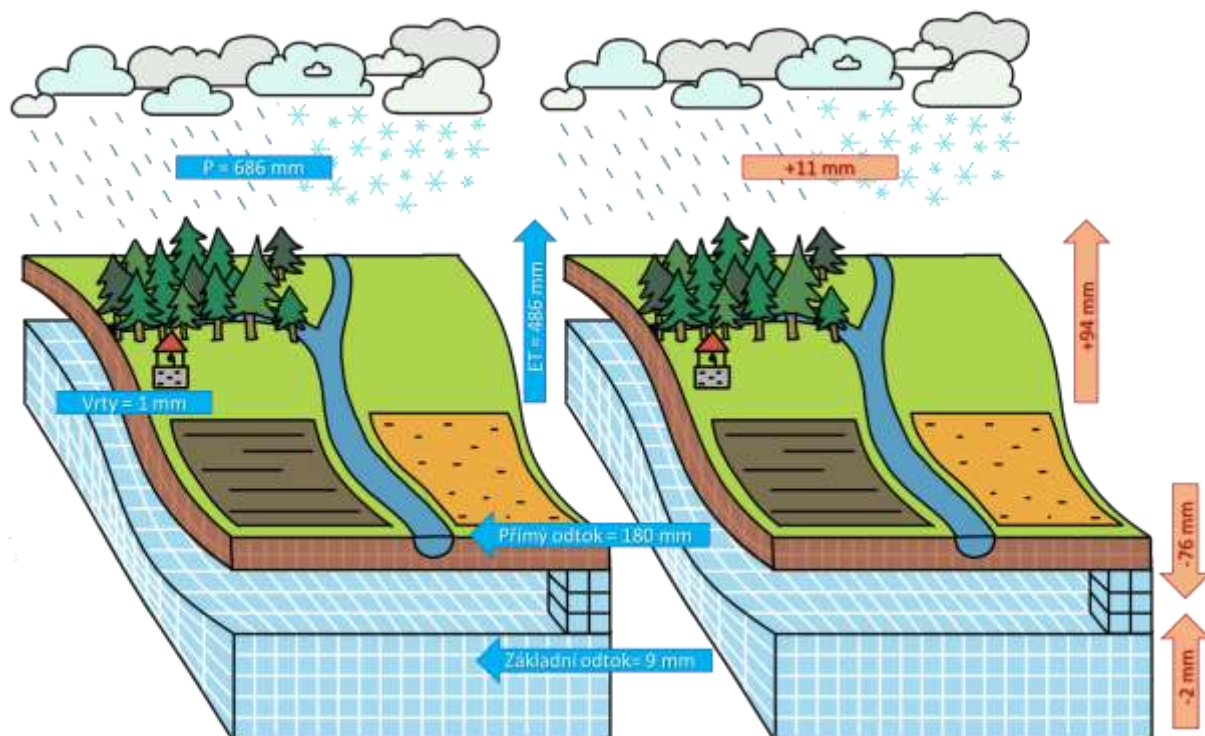
26 použitých scénářů možného klimatického vývoje. Výsledky vykazují signifikantní rozdíly v jednotlivých měsících. Z výsledků je zřejmé, že vlivem změny klimatu dochází k poklesu průtoku ve všech sledovaných stanicích. Při srovnání průměrného ročního průtoku vidíme veliký rozptyl sledovaných rozdílů v závislosti na použitém klimatickém modelu. Přesto můžeme říct, že až na výjimky dochází k poklesu průtoku, a to zpravidla v řádu několika málo desítek procent. Přestože v povodí Želivky jsou patrné místní rozdíly, obecné poklesové trendy byly vyhodnoceny na všech stanicích.

Na Sedlickém potoce, nejsevernějším přítoku nádrže Švihov, se bez adaptačních opatření do roku 2030 očekává snížení průměrného ročního průtoku o 9–31 %, v roce 2050 o 19–39 % a v roce 2085 o 17–49 %. U Blažejovického potoka je předpověď pro rok 2030 přibližně 30–48 %, pro rok 2050 40–54 % a pro rok 2085 39–63 %. Na Senožatském potoce činí snížení bez opatření v roce 2030 cca 12–38 %, v roce 2050 26–49 % a v roce 2085 25–65 %. Jižně, v povodí Želivka – Poříčí, se očekává snížení průtoku od 9–31 % v roce 2030, 21–42 % v roce 2050 a 19–62 % v roce 2085.



Obr. 2 Příklad výsledků porovnání modelu budoucích klimatických podmínek v horizontu roku 2050 s modelem referenčního stavu

Při uvažování středních emisních scénářů odpovídajících současnému socioekonomickému vývoji (SSP 245) je patrné, že na všech profilech v povodí řeky Želivky dojde ke zmenšení odtoků. Největší pokles je možné očekávat na menších tocích v západní části povodí (Sedlický potok, Blažejovický potok, Martinický potok). Východní část povodí (Janovský potok, Bělá) vykazují pokles menší. Nicméně tato povodí jsou zatížena největší mírou nejistoty. Z hlediska vyhodnocení vodní bilance agregované pro celé povodí řeky Želivky (Obr. 3) lze očekávat v horizontu 2050 mírné navýšení srážek (+1,5%), ale kvůli vyšším teplotám a vyšším hodnotám referenční evapotranspirace lze očekávat významný nárůst aktuální evapotranspirace, největší ztrátové položky vodní bilance v povodí řeky Želivky (+19%). Toto navýšení bude mít za následek snížení odtoků, a to jak rychlé složky přímého odtoku (Povrchový + hypodermický odtok) o 42%, tak pomalého základního odtoku (-20%). Absolutní hodnoty (Obr. 3) vycházejí z konkrétního scénáře EC-EARTH při středním emisním faktoru SSP245, který je z testovaných scénářů v emisním scénáři SSP 245 nejsušší.



Obr. 3 Vyhodnocení celkové bilance agregované v třicetiletém období referenčního stavu (1981-2010, vlevo) a změna v budoucím scénáři v třicetiletém období okolo roku 2050, emisní faktor SSP245, scénář EC-EARTH

3.2 Adaptace lesů

Hospodaření s lesními porosty umožňuje v dlouhodobé perspektivě ovlivnit jejich vývoj, a tedy i jejich úlohu při adaptaci krajiny na klimatickou změnu. S ohledem na aktuální stav porostů a konkrétní podmínky prostředí byly připraveny tři možné scénáře vývoje lesních porostů v oblasti povodí řeky Želivky do roku 2100.

1. Základní (referenční) scénář, S1, předpokládá pasivní lesnický přístup, který splňuje požadavky lesního zákona a mírně reflektuje adaptační potřeby lesa v důsledku dopadů extrémní kůrovcové kalamity v oblasti během posledních let
2. Lesnický-optimální scénář, S2, který předpokládá aktivnější adaptivní lesnický management s cílem optimálně využít produkční potenciál stanoviště při zachování stability produkce a ostatních funkcí lesa
3. Hydrologicky-optimální scénář, S3, který upřednostňuje požadavek optimální hydrologické bilance povodí, tj. minimalizovat evapotranspiraci a zajistit příznivé hydrologické poměry v povodí, s dlouhodobě minimalizovaným požárním rizikem a zachovalou protierozní funkcí lesa.

3.2.1 S1 Referenční scénář

Referenční scénář předpokládá, že pokračuje současný způsob lesnického produkčně zaměřeného hospodaření, který do určité míry zohledňuje zkušenosti z poslední suché a teplé periody a kůrovcové kalamity, která postihla cca 10 % rozlohy smrkových porostů v povodí. Rozloha holin totiž podle dostupných dat dosahuje cca 20 %, což je o cca 50 % více než odpovídá obvyklému plošnému rozsahu těžeb v porostech neovlivněných mimořádnými disturbancemi.

Lesnické hospodaření v oblasti bude v příštích 80 letech v souladu s vývojem klimatu a potřebou implementace adaptačních opatření usilovat o změnu druhové skladby – jedná se především o snižování zastoupení smrku ve prospěch nárůstu zastoupení listnatých dřevin – dubu, buku, habru a dalších hospodářsky méně významných listnáčů.

Pro referenční scénář je změna druhové skladby pouze retroaktivní, představuje pasivní postup lesnického hospodaření, ale v souladu s lesnickou legislativou. Změna bude realizována postupně výsadbou listnatých dřevin na plochách po těžbě smrku na vhodných stanovištích – v zájmové oblasti jsou to pro referenční scénář především polohy LVS 3 (Lesní vegetační stupeň 3). Podíl zastoupení borovice se v tomto scénáři prakticky nemění. Převládá pasečné hospodaření s využitím počátku obnovy od 81 let u smrku a borovice. V porostech středního věku a dospělých do věku 31 - 80 (100 u listnáčů) let se nemění druhová skladba, posouvá se věk porostu.

3.2.2 S2 Lesnický scénář (optimalizace adaptace, produkce)

Lesnický scénář představuje aktivní, moderní management zohledňující klimatickou změnu, orientovaný polyfunkčně s částečně optimalizovanou produkční funkcí a dlouhodobou stabilitou porostů.

Zásadní je výrazná změna způsobu hospodaření, tedy zvýšení podílu přírodě bližších způsobů hospodaření (podrovního a nepasečného) na úkor hospodaření pasečného. Změna způsobu hospodaření se projevuje i výraznější změnou druhové skladby. Mýtní porosty smrku a jehličnatých směrů se obnovují po prosvětlení porostů nebo v maloplošných těžebních prvcích. V obnově se uplatňují listnaté dřeviny ve všech vegetačních stupních (LVS 3, 4, 5, 6). V porostech ostatních dřevin zůstává dřevinná skladba beze změn, mimo posílení příměsí jedle a modřínu ve

smrkových příměsích pro zvýšení odolnost porostů vůči suchu (Vitasse et al., 2019; Vejpusťková et al., 2023).

V souvislosti se změnou způsobu hospodaření z pasečného na podroštní bude v porostech nižších a středních poloh (LVS 3,4) starších 80 let postupně těžbami snižováno zakmenění hodnoty kolem 7-8, tj. k limitu podle lesnické legislativy. To se projeví částečným snížením hodnoty zápoje (LAI).

Ve středních a vyšších polohách (LVS 5 a 6) bude v souvislosti s přechodem na výběrné hospodaření aktivně snižován zápoj porostů již ve věku od 60 do 80 let na rozmezí 70-80 %. Specificky ve středních polohách (LVS 5) bude zakmenění snižováno pro umožnění přechodu na podroštní hospodářství.

Obmýtlí je sníženo oproti hospodářským lesům v ČR cca o více než 10 let. Větší jednorázové snížení obmýtlí se nedoporučuje, protože vede k zásahům do mýtně (těžebně) nepřipravených porostů a v důsledku toho obvykle k destabilizaci lesa a nárůstu nahodilých těžeb.

3.2.3 S3 Hydrologický scénář

Scénář s preferencí hydrických funkcí lesa vychází z progresivního lesnického scénáře, ale je obecně upřednostněna hydrická funkce lesa. Tu lze ovlivnit změnou druhové skladby a obecně snížením zakmenění porostů. Při změně druhové skladby je oproti adaptační strategii lesnického scénáře navíc posílen podíl borovice a opadavého modřínu na úkor smrku. Při zachování progresivních postupů lesnického managementu při obnově, je hydrologický scénář zaměřen na výraznější snižování zápoje a pěstování více rozvolněných porostů oscilujících na úrovni zakmenění 0.7, nebo mírně pod touto hranicí. Toho lze dosáhnout prodloužením doby obnovy porostů a silnějšími zásahy během výchovy. Nižšímu zakmenění pak převážně odpovídá 2. kategorie zápoje – LAI, tj. rozvolněné.

3.3 Adaptace ekosystémů

Pro posuzování a navrhování změn ekosystémů je zapotřebí definovat současný stav a také prognózu budoucího vývoje podle současných trendů a tendencí vývoje společnosti. Poté je možné určit změny oproti tomuto referenčnímu scénáři.

3.3.1 BaU Scénář (Business as Usual = referenční scénář)

Tento scénář je v metodice označován jako BaU (Business as Usual) a extrapoluje historicky zaznamenaný vývoj společnosti a sídelních vzorců do budoucna s přihlédnutím ke klíčovým vlivům. Některé lokality jsou z dlouhodobého hlediska vůči změnám landuse perzistentní, v lokalitách s potenciálem ke změně byly vytvořeny dílčí přechodové matice a celkové trajektorie vývoje pro každý krajinný segment a hlavní trendy změny.

S ohledem na dynamiku společnosti a extrémní dopady lidské činnosti na vývoj krajiny po roce 1990, je v případě BaU přístupu, analyzován vývoj krajiny od roku cca 1990 po současnost a predikován do roku 2050.

Vstupem jsou vektorová data CLC (Corine Land Cover) pro roky 1990, 2000, 2006, 2012 a 2018. v měřítku 1:100 000. Data jsou stažena ze služby Land projektu Copernicus (<http://land.copernicus.eu>)

Originální kategorie CLC (3. úrovně) byly s ohledem na jejich prostorové zastoupení v zájmovém území a velmi podobný fyziotyp sloučeny do 14 kategorií (Tab. 1):

Tab. 1 Agregované kategorie využití území pro BaU scénář

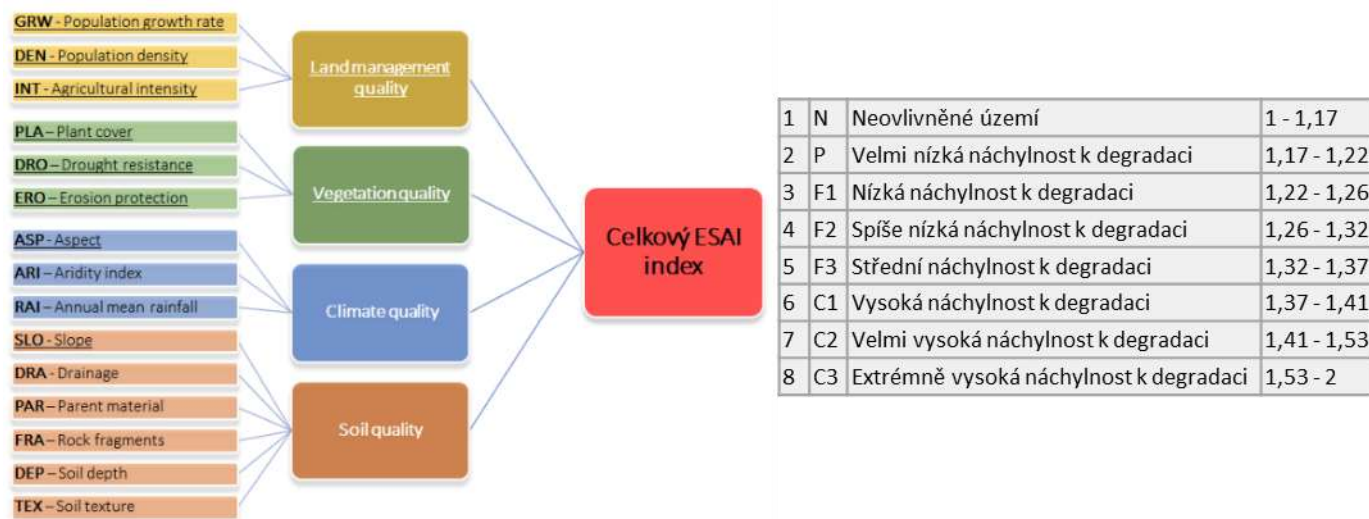
code_18	Kategorie	Sloučené kategorie	Značení
111	Souvislá městská zástavba	městská zástavba	LU1
112	Nesouvislá městská zástavba	městská zástavba	LU1
121	Průmyslové nebo obchodní jednotky	průmyslové a dopravní areály	LU2
122	Silniční a železniční sítě a související pozemky	průmyslové a dopravní areály	LU2
124	Letiště	průmyslové a dopravní areály	LU2
131	Místa těžby nerostných surovin	degradované plochy (bez vegetace)	LU3
132	Skládky	degradované plochy (bez vegetace)	LU3
133	Staveniště	degradované plochy (bez vegetace)	LU3
141	Zelené městské oblasti	městská zeleň	LU4
142	Sportovní a volnočasová zařízení	městská zeleň	LU4
211	Nezavlažovaná orná půda	orná půda	LU5
221	Vinice	sady a vinice	LU6
222	Ovocné stromy a plantáže bobulovin	sady a vinice	LU6
231	Pastviny	pastviny	LU7
242	Mozaika malých obdělávaných pozemků s různými typy obdělávání - jednoleté plodiny, pastviny a/nebo trvalé kultury - případně s rozptýlenými domy nebo zahradami.	Mozaika obdělávaných pozemků	LU8
243	Zemědělsky využívaná půda s významnými plochami přirozené vegetace	Mozaika obdělávaných pozemků	LU8
311	Listnatý les	Listnatý les	LU9
312	Jehličnatý les	Jehličnatý les	LU10
313	Smíšený les	Smíšený les	LU11
321	Přírodní travní porosty	Přechodná křovinná a bylinná vegetace přírodního charakteru	LU12
324	Přechodná křovinná a bylinná vegetace s občasnými roztroušenými stromy.	Přechodná křovinná a bylinná vegetace přírodního charakteru	LU12
333	Oblasti s řídkou vegetací pokrývající 10-50 % povrchu. Zahrnuje stepi, tundry, lišejníková vřesoviště, pustiny, krasové oblasti a rozptýlenou vysokohorskou vegetaci.	Přechodná křovinná a bylinná vegetace přírodního charakteru	LU12

411	Vnitrozemské mokřady	Trvale zamokřené plochy	LU13
511	Vodní toky	vodní plochy	LU14
512	Vodní plochy	vodní plochy	LU14

3.3.2 MaO scénář (Návrh potřebných a odpovídajících mitigačních a adaptačních opatření)

Sestavení scénáře vychází z inovativní metodiky ESAI+, která zahrnuje stanovení zranitelnosti území spolu se zacílením souboru opatření podle hlavních trajektorií do nejvíce zranitelných lokalit.

V prvním kroku bylo zapotřebí zacílit adaptační opatření na lokality, u kterých je vysoká pravděpodobnost budoucích změn. Tyto lokality byly označeny jako „zranitelné“ a byly vymezeny na základě metodiky ESAI (Hodnocení rizika zranitelnosti, funkčnosti a stability krajiny) (Obr. 4).



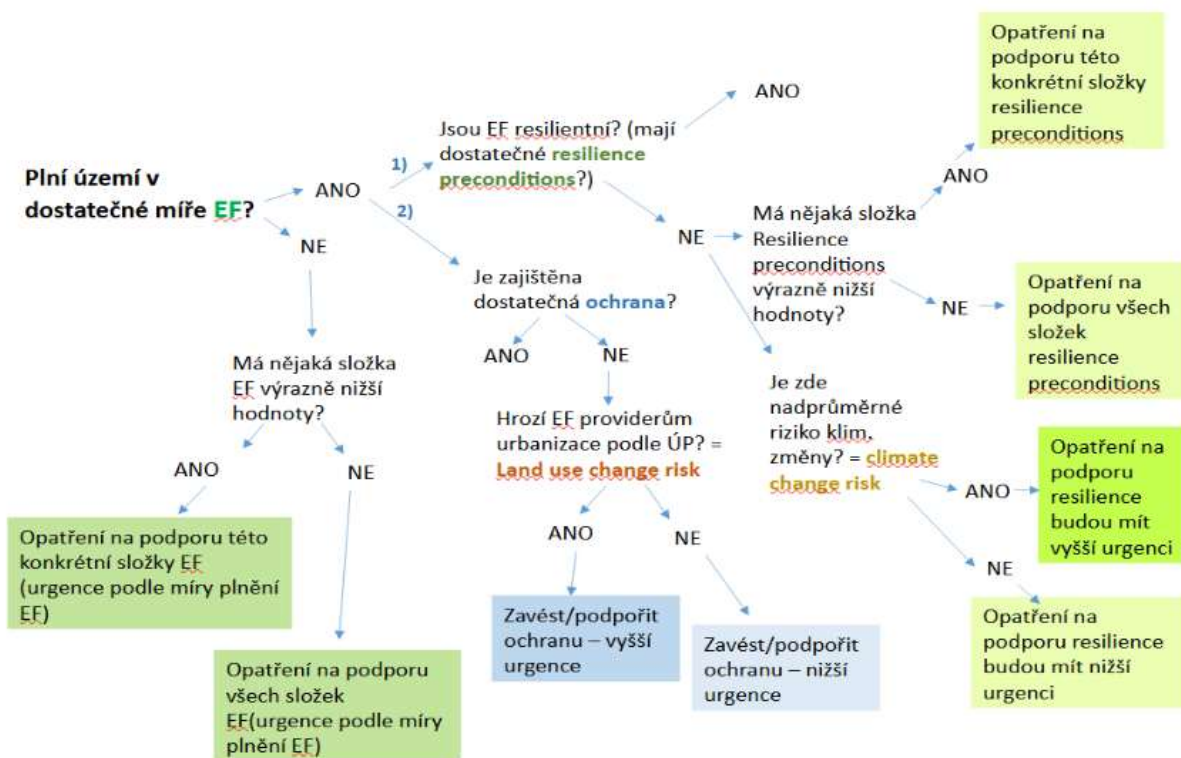
Obr. 4 Struktura indexu ESAI

Čím je segment náchylnější k degradaci (je zařazen do vyšší kategorie), tím vyžaduje zvážení provedení mitigačních a adaptačních opatření s vyšší prioritou. Výstupem je regionalizace území z pohledu zranitelnosti krajiny s identifikací nejnáchylnější / nejvíce ovlivněné složky krajiny/lidské činnosti.

Stavba scénáře sleduje složitý proces, který lze konceptuálně rozdělit do několika kroků.

1. Určení rizika (CCR) klimatické změny na základě dat Climrisk
2. Stanovení odolnosti vůči klimatické změně (= resilience, RP) z hlediska biodiverzity, konektivity a přírodních funkcí krajiny
3. Posouzení celkové stability ekosystému z hlediska institucionální ochrany (ekologická hodnota ekosystému, EF)
4. Stanovení hlavních hrozeb a opatření pro převažující negativní vliv – syntéza výsledků předešlých kroků 1-3. Každý čtverec se hodnotí samostatně. Cílem je najít místa, kde

je odolnost/stabilita krajiny poškozena, její hlavní příčinu a co je třeba v místě posílit (Obr. 5).



Obr. 5 Rozhodovací proces při navrhování opatření adaptace ekosystémů na klimatickou změnu

V této fázi se stanoví Typové Adaptační Opatření (TAO) a jeho urgency. TAO značí jakého typu má být navrhované krajinné opatření – tzn. co se má napravit (odolnost, stabilita, funkčnost). Urgency (hodnota 0-3), čím vyšší hodnota tím je naléhavost zavést opatření větší. Urgency ale bere v potaz dopad TAO a tak nejvyšší hodnota značí, kde bude mít zavedené opatření největší efekt pro stabilitu krajiny (tzn. lépe podpořit ještě částečně funkční krajinu drobnějším, společností přijatelnějším opatřením) a odolnost/stabilita se zvýší (než aplikovat opatření do území, které je „zničené“, a aby se projevil efekt zlepšení, bylo by třeba výrazně radikálnějšího a náročnějšího opatření).

Opatření se vybírá z připraveného Katalogu, kde se nejprve vybere skupina opatření podle stanoveného TAO, poté podle hodnot jednotlivých komponent. Následně se zúží výběr na konkrétnější opatření pro podporu nejvíce kritické komponenty a vybere se o jaký typ land-use se jedná. Někdy se jedná o změnu formy využití země, někdy o změnu managementu, někdy o změnu druhové skladby (taxon/biotop), příp. upřesnění, který typ biotopu by se měl nadále v daném místě podporovat.

4 Metodika zavedení adaptačního do modelu MIKE SHE

Model MIKE SHE v současné verzi pracuje s plně časově i prostorově distribuovanými daty LAI původem z dálkového průzkumu země (DPZ). Data jsou měřena senzorem MODIS umístěným na družici Terra a jsou ve správě agentury NASA. Do modelu MIKE SHE vstupují tato data v prostorovém rozlišení 500 m a v denním časovém kroku. Z důvodu přenosu prostorových informací do budoucích předpovědí, bylo přistoupeno k vytvoření průměrného roku, jehož každý den je charakterizován rastrem hodnot LAI. Vzniklo tedy 366 rastrů, které byly kopírovány do všech modelovaných roků. Hodnoty ostatních vegetačních parametrů (K_c = Crop coefficient, RD = hloubka kořenění) jsou odvozeny z LAI podle Mendiguren et.al, 2017.

Nicméně pro účely hodnocení dopadu místně specifických změn dřevinné skladby lesa na vodní bilanci povodí bylo zapotřebí vegetační parametry zpřesnit a přiřadit klasifikaci dřevinné skladby lesa poskytnutou IFER (2024), která se vztahuje k referenčnímu roku 2020. Klasifikace vychází ze stavu lesa v letech 2020-2021 a kategorizuje jednotlivé porosty v prostorovém rozlišení 30 m do 156 kategorií (Tab. 2). Míra zastoupení jednotlivých kategorií je různá a mění se v čase i v použitém scénáři budoucího vývoje. Kategorizace zahrnuje kromě Lesního vegetačního stupně, odpovídajícího nadmořské výšce, také informaci o převažující skupině dřevin, stupni zápoje (zakmenění) a věku porostu.

Tab. 2 Kategorizace porostů podle vrstev LVS, Skupiny dřevin, LAI – zápoje a Růstové fáze, včetně zvažovaného věkového rozpětí. Tab. zahrnuje číselný kód daného atributu.

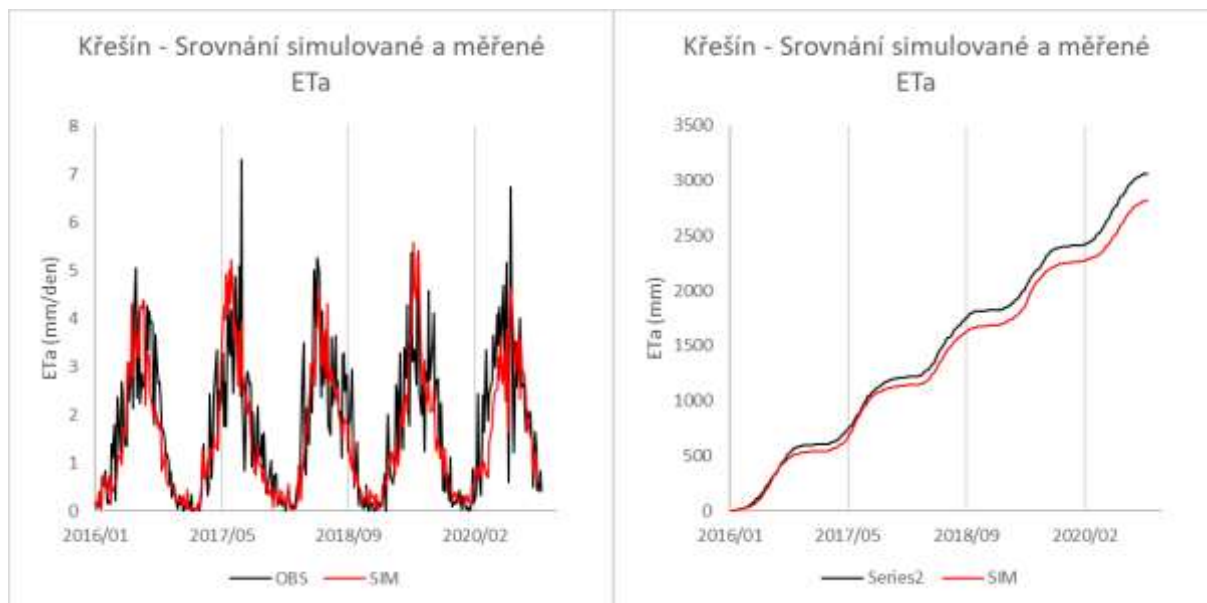
LVS	Skupina dřevin	LAI – zápoj	Růstová fáze (věk)
3 do LVS 3	1 Borovice	1 – řídké	1 Holina/mlazina (do 10 let)
4 LVS 4	2 Jehličnany	2 – rozvolněné	2 Tyčkoviny (11-30 let)
5 LVS 5	3 Listnáče a modřín	3 – zapojené	3 Tyčkoviny (31-60 let)
6 LVS 6 a 7	4 Kultura/holina		4 Kmenovina (nad 60 let)

Pro každou třídu byla odvozena časová řada LAI charakteristického roku na základě:

1. Statistického vyhodnocení časového průběhu LAI v produktu MODIS v lokalitách protnutých danou kategorií
2. Předpokladu nižšího LAI listnatých lesů v zimním období
3. Empiricky stanovených vztahů mezi ekosystémy odvozených z měření ETa na atmosférické věži Křešín a modelu ETa Metric verifikovaného na tato měřená data

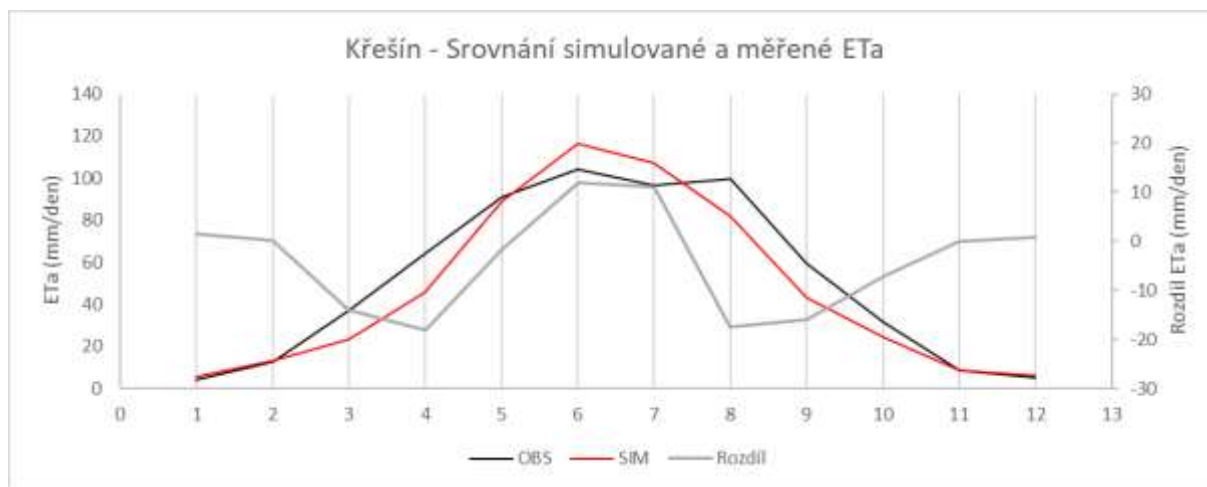
4.1 Verifikace modelované ETa na základě měření Eddy Covariance na atmosférické věži Křešín

V první řadě bylo potřeba srovnat hodnoty ETa odvozené z měření Eddy Covariance na atmosférické věži Křešín s výsledky ETa simulované modelem MIKE SHE (Obr. 6). Pozorované hodnoty bylo nutno korigovat k uzavření energetické bilance. Byla provedena korekce přičtením celkového energetického zbytku ke složce latentního tepla.



Obr. 6 Výsledek srovnání měřených a simulovaných hodnot ETa v období současně pokrytém měřením a modelem referenčního stavu (2016-2020). Vlevo je časový průběh hodnot a vpravo je kumulativní pohled

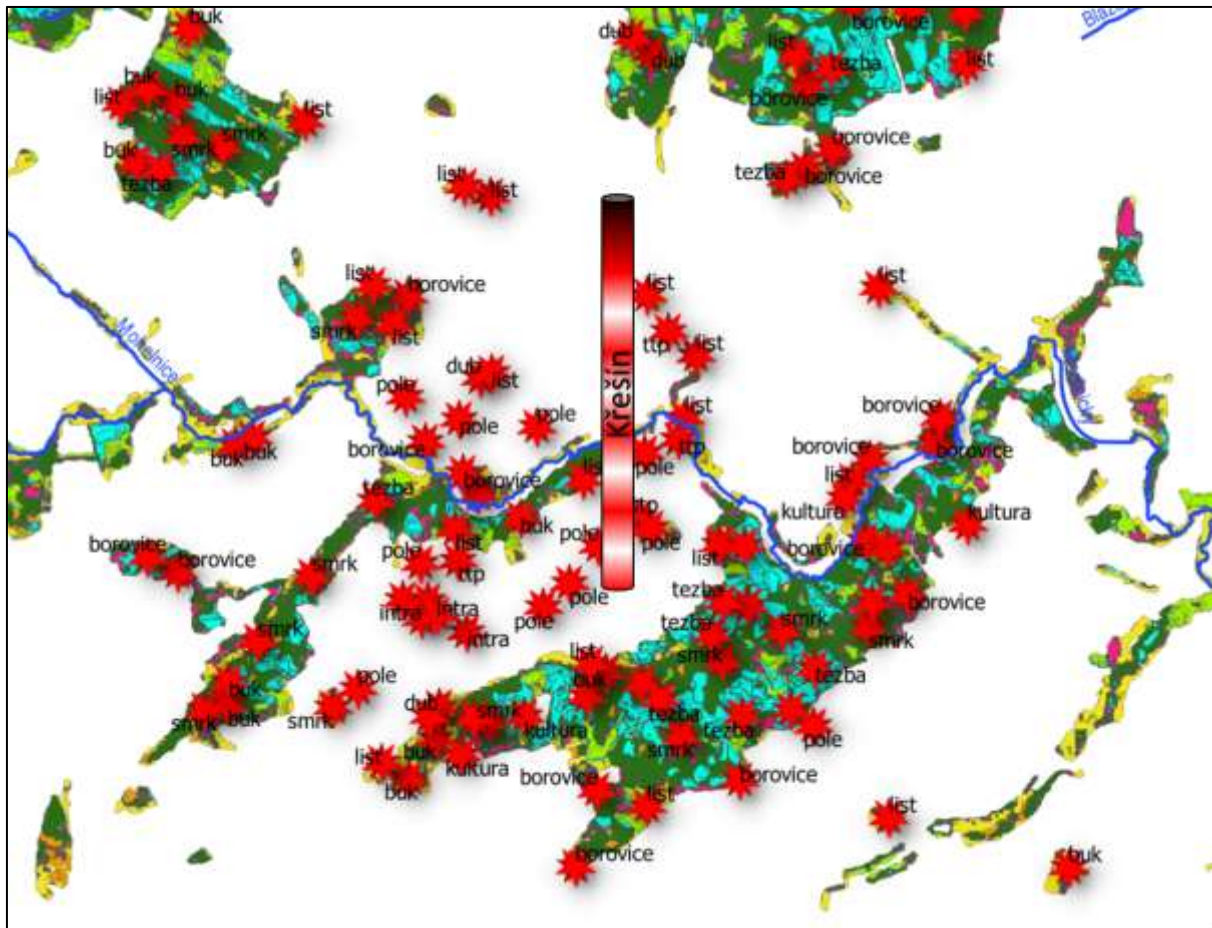
Obr. 6 ukazuje, že modelem stanovená ETa je uspokojivě srovnatelná s měřením s hodnotou objektivní funkce RMSE 0.0053 mm/den a s celkovou akumulovanou odchylkou -49 mm/rok, která odpovídá -8%. Model nejvíce podhodnocuje ETa v jarním období a v pozdním létě (Obr. 7). V červenci a srpnu model generuje mírně vyšší ETa zatímco zimní hodnoty jsou velmi podobné.



Obr. 7 Průměrný roční chod ETa a rozdíl mezi měřeními a simulovanými hodnotami

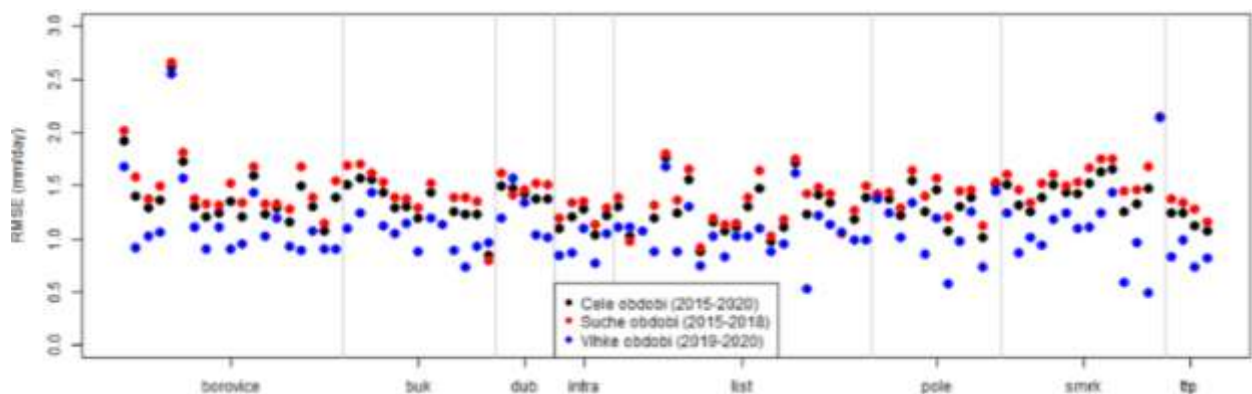
Přes tyto rozdíly byla shoda mezi měřeními a simulovanými hodnotami ETa považována za dobrou.

V druhém kroku byl určen soubor 112 charakteristických lokalit sledovaných lesních i mimolesních porostů (Obr. 8) a v těchto bodech byly srovnávány hodnoty ETa modelované MIKE SHE a odvozené z modelu Metric verifikovaného měřeními daty.



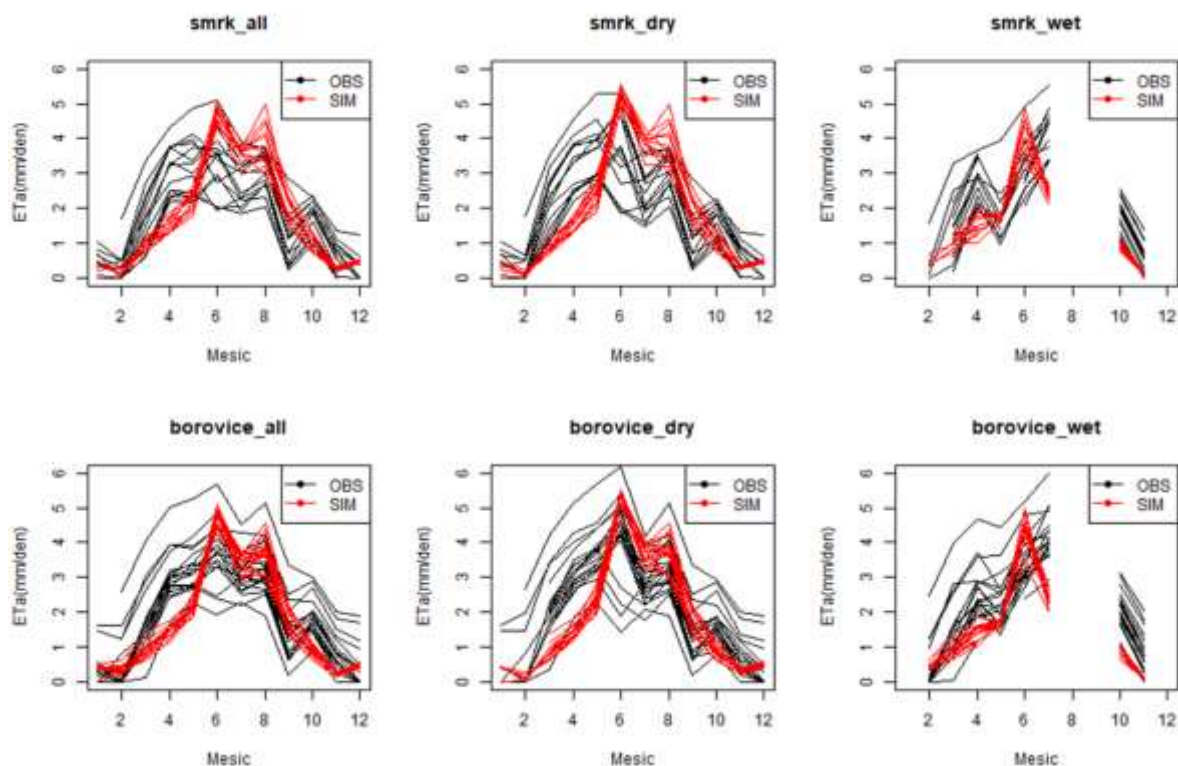
Obr. 8 Vymezení lokalit pro detailní průzkum vztahů ETa mezi porosty v povodí Martinického potoka a v blízkosti atmosférické věže Křešín

V případě uspokojivé shody simulovaných a měřených hodnot ETa lze do modelu přenášet pozorované vztahy a kontrolovat vliv vegetačních parametrů na výpočet ETa a odchylky od měření v konkrétních lokalitách daných porostů (Obr. 9). Tato fáze optimalizace modelových parametrů ETa pokračuje. S upřesňováním ostatních vegetačních parametrů bude vždy zapotřebí srovnat měřené a simulované hodnoty se snahou najít co největší možnou shodu. V současné chvíli lze tvrdit, že model má nejlepší shodu ve vlhkém období (2019-2020), ve kterém nebyla ETa tolik limitována vodou, jako v předešlém velmi suchém období (2015-2018). V případě výrazné limitace vodou se zvyšuje role modelových půdních parametrů, které nejsou v současné chvíli schopné popsat místní specifika jednotlivých lokalit.

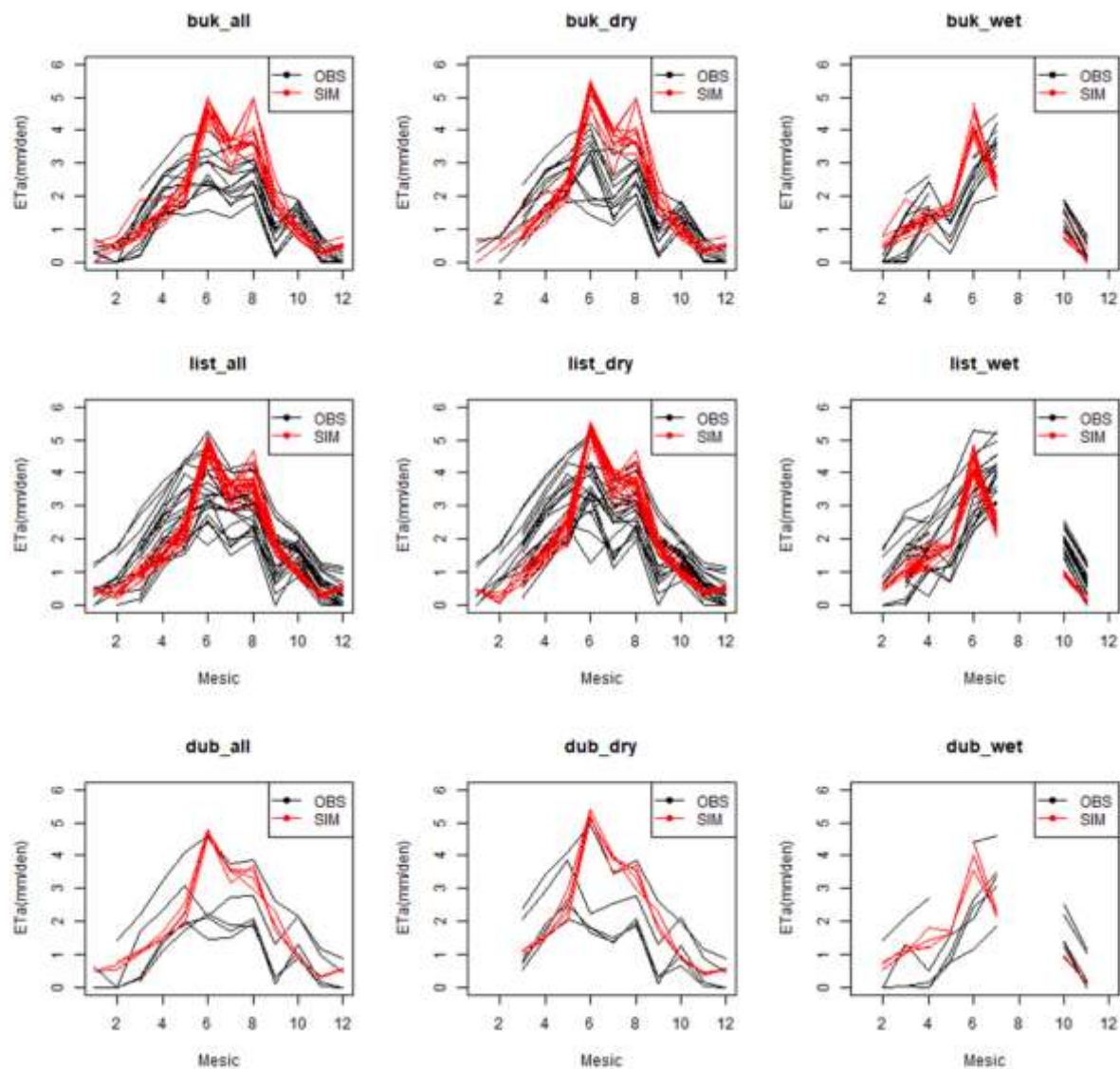


Obr. 9 Příklad optimalizace modelových parametrů pro výpočet ETa a porovnání modelovaných hodnot ETa a hodnot odvozených z modelu METRIC verifikovaného za pomoci měření Eddy Covariance na atmosférické věži Křešín

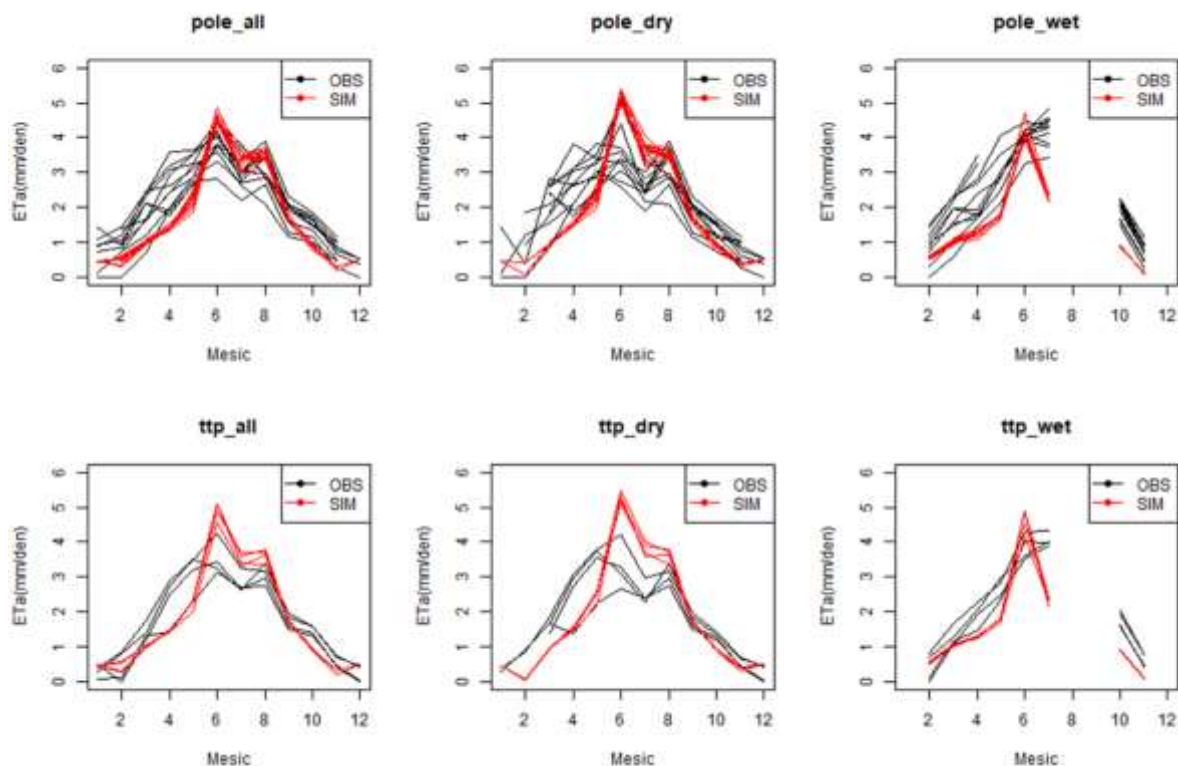
Dále bylo zjišťováno, ve kterých měsících bude zapotřebí modelové parametry pro výpočet ETa korigovat, aby byla nalezena větší shoda s odvozenými hodnotami z modelu Metric. Byl sestaven celkový pohled na roční chod v celém období 2016-2020 a také zvlášť pro suchou a vlhkou část období (Obr. 10, Obr. 11, Obr. 12). Hodnoty byly srovnávány pouze v bezoblačných dnech, ve kterých jsou odvozené hodnoty modelu Metric důvěryhodné. Z tohoto důvodu byla v případě vlhkého období 2019-2020 absence srovnatelných hodnot a je zde vidět výpadek. Průměrný roční chod ETa přináší Obr. 13, Obr. 14 a Obr. 15.



Obr. 10 Celková variabilita ročního chodu pozorovaných (odvozených z modelu Metric) a simulovaných hodnot ETa na pozorovaných lokalitách sdružených podle porostu - jehličnany

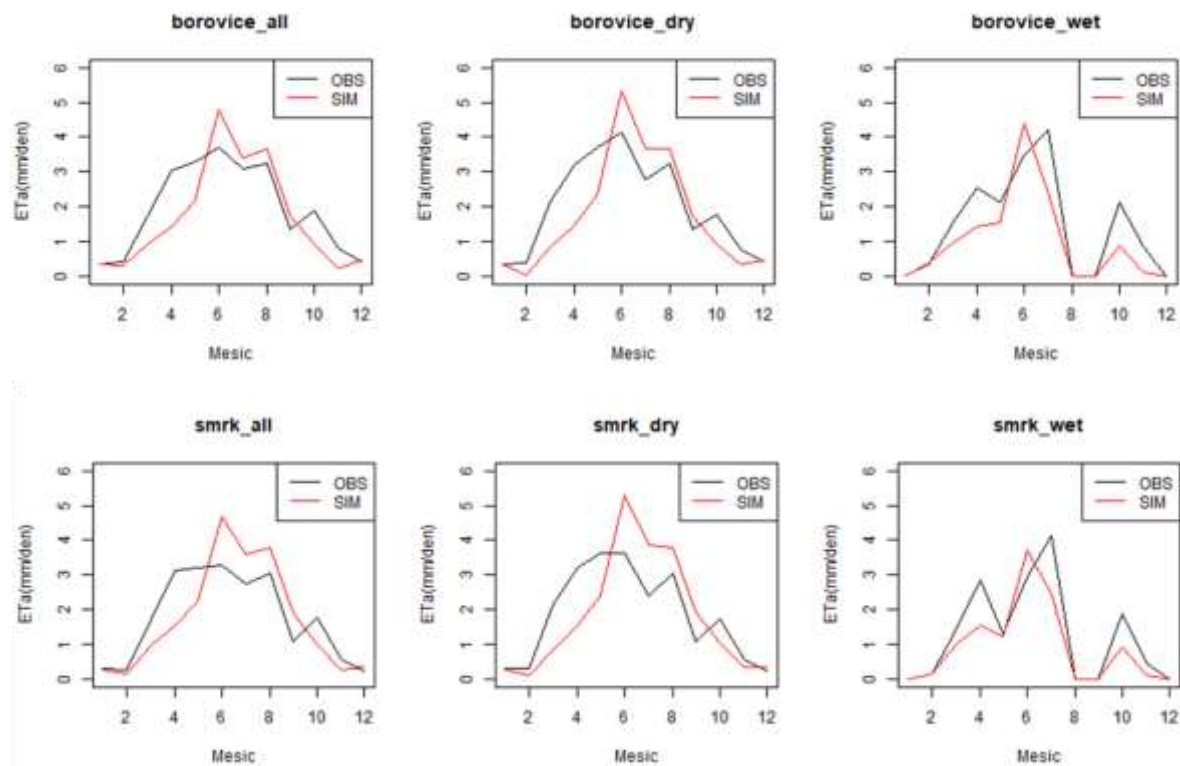


Obr. 11 Celková variabilita ročního chodu pozorovaných (odvozených z modelu Metric) a simulovaných hodnot ETa na pozorovaných lokalitách sdružených podle porostu – listnáče

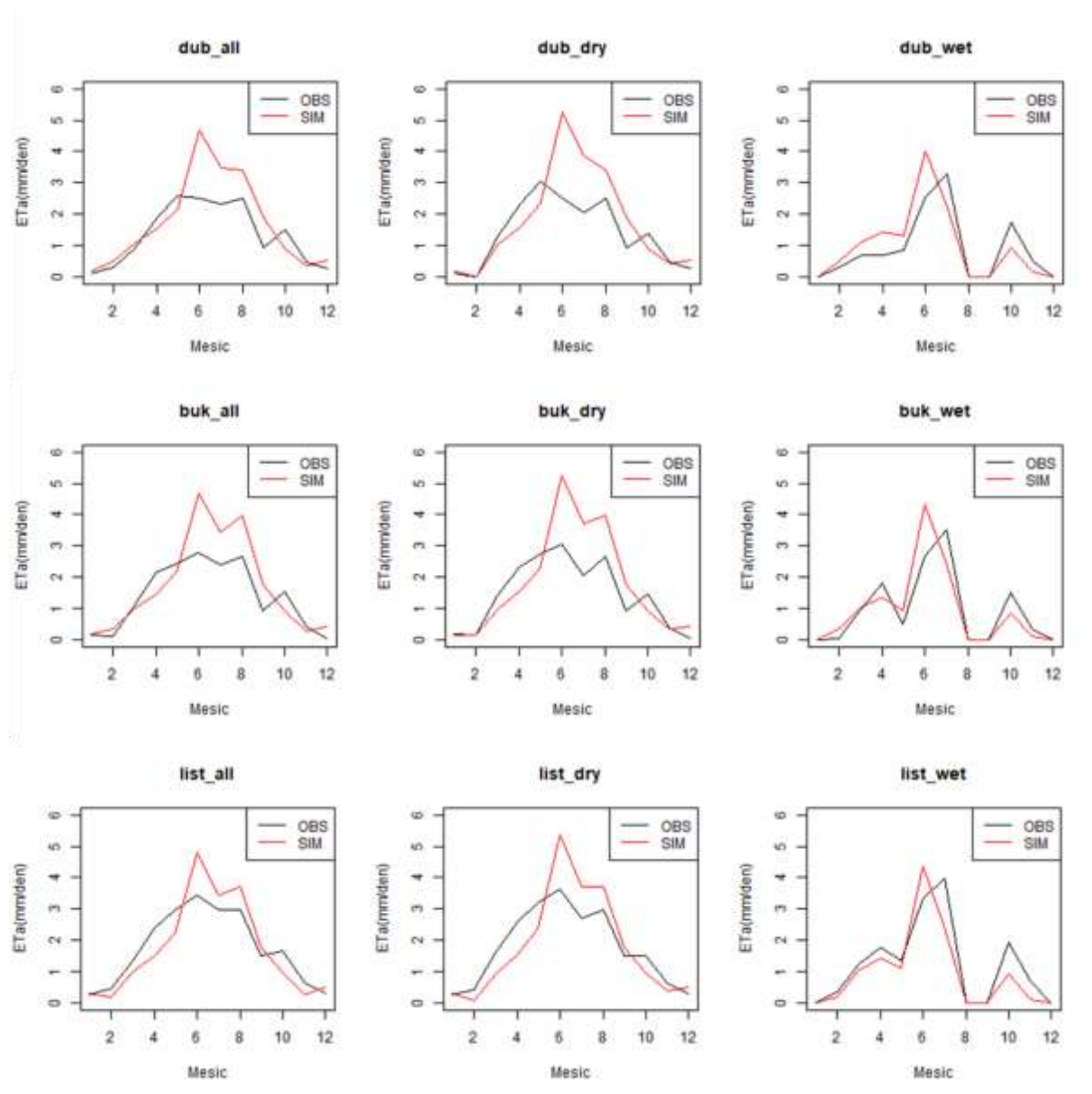


Obr. 12 Celková variabilita ročního chodu pozorovaných (odvozených z modelu Metric) a simulovaných hodnot ETa na pozorovaných lokalitách sdružených podle porostu – pastviny (ttp) a pole

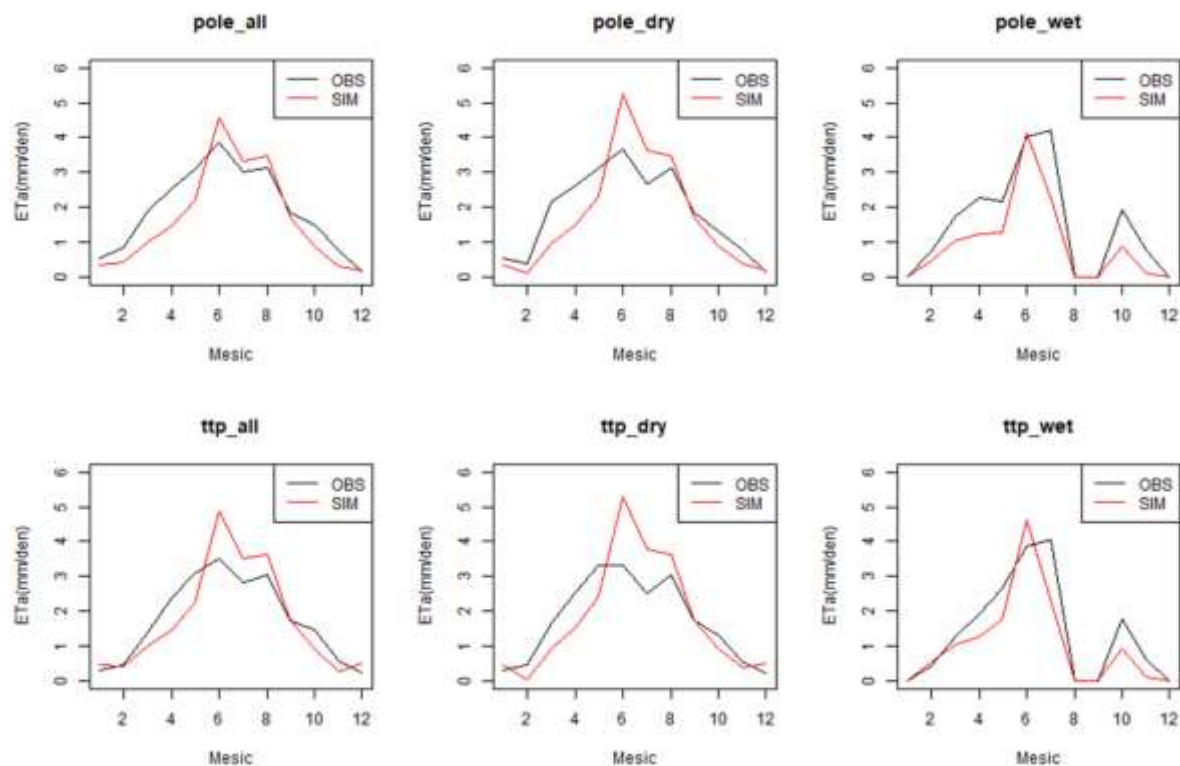
Obecně lze z analýzy usoudit, že rozdíly mezi jednotlivými lokalitami v modelu MIKE SHE jsou menší než v Metric. Je to způsobeno především vyhlazením místně specifických půdních charakteristik v modelu MIKE SHE. V případě jehličnanů model mírně podhodnocuje ETa na jaře a mírně nadhodnocuje v létě. ETa v lokalitách listnatých stromů je v modelu v letním období nadhodnocena. Polní lokality vycházejí ze srovnání nejlépe, zatímco zatravněné plochy jsou stejně, jako listnáče modelem v létě mírně nadhodnocené. Opět platí, že model MIKE SHE se lépe shoduje s daty Metric ve vlhkém období s menší limitací ETa vodou.



Obr. 13 Průměrný roční chod podle porostu – srovnání pozorovaných (odvozených z modelu Metric) a simulovaných hodnot ETa - jehličnany



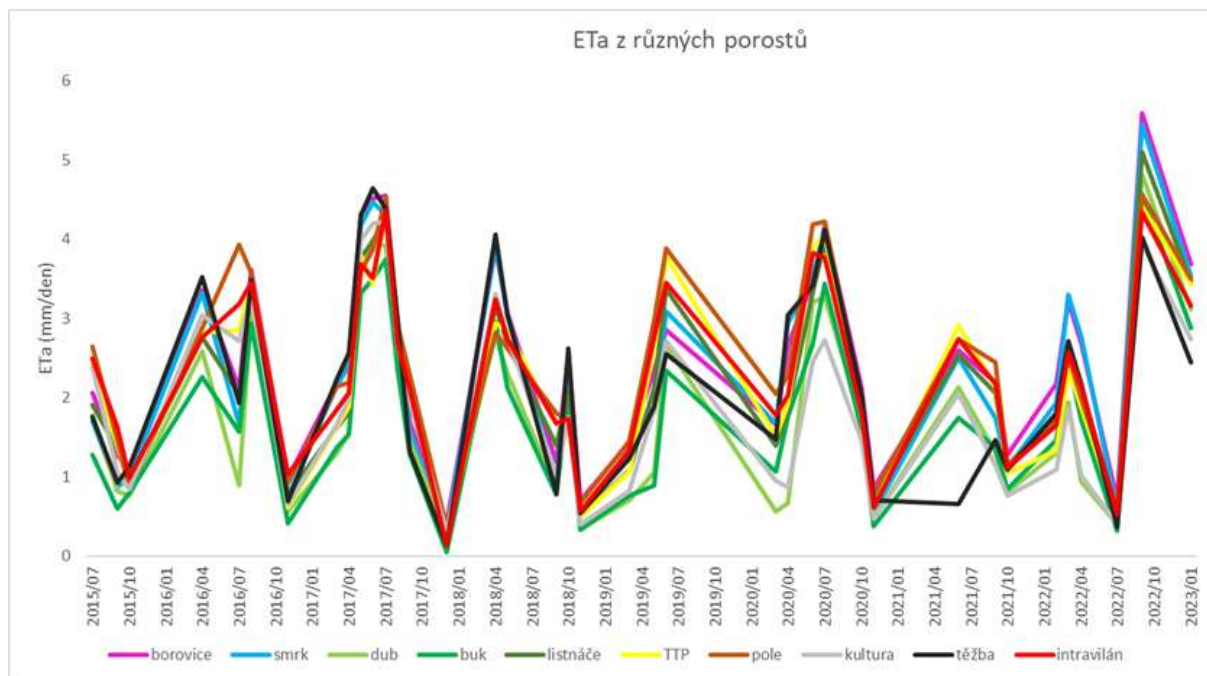
Obr. 14 Průměrný roční chod podle porostu – srovnání pozorovaných (odvozených z modelu Metric) a simulovaných hodnot ETa - listnáče



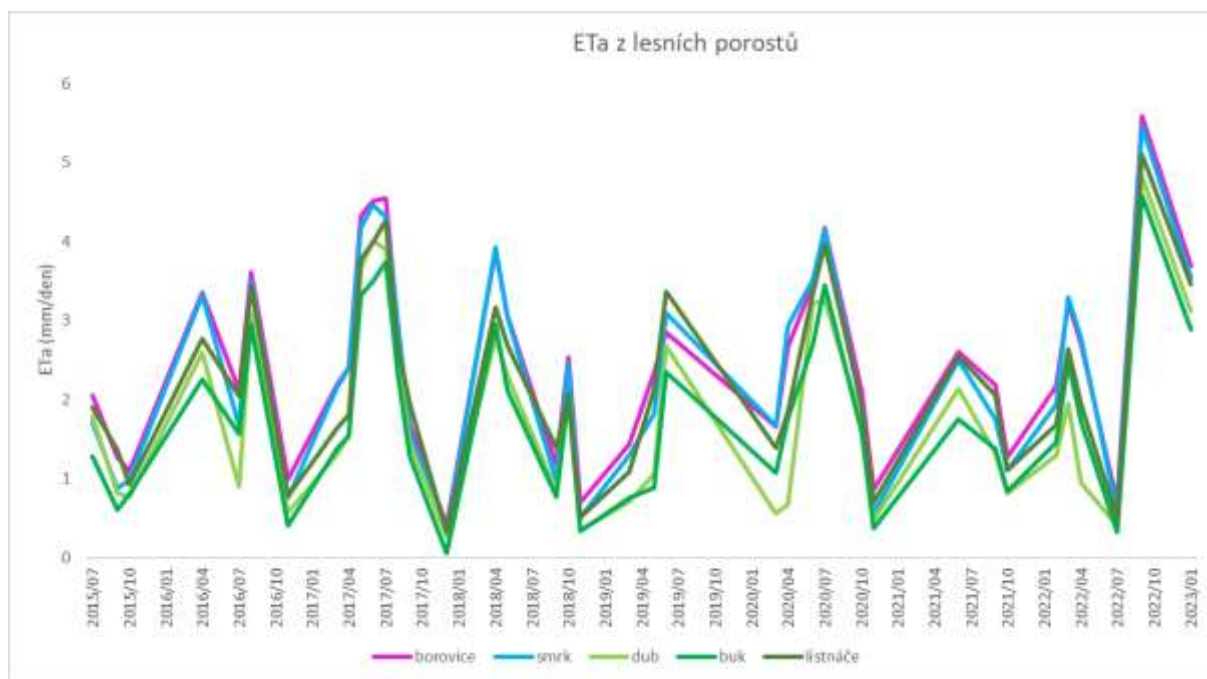
Obr. 15 Průměrný roční chod podle porostu – srovnání pozorovaných (odvozených z modelu Metric) a simulovaných hodnot ETa – Pastviny (ttp) a pole

4.2 Určení vztahů ETa mezi existujícími ekosystémy

Z MODIS byly určeny vztahy LAI mezi jednotlivými ekosystémy, zatímco data Metric posloužila pro celkové hodnocení mezi-ekosystémových vztahů ETa (Obr. 16, Obr. 17).



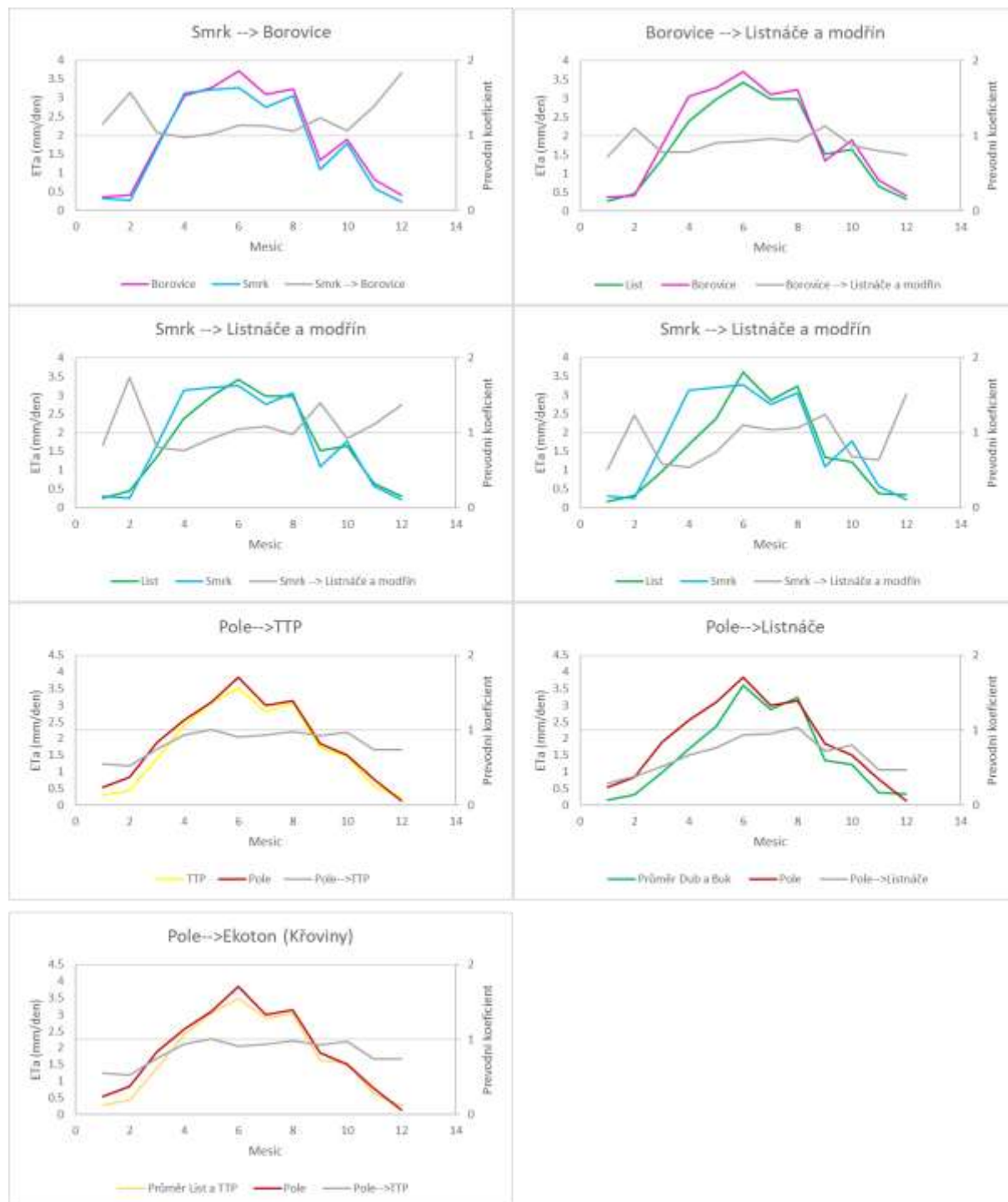
Obr. 16 Vztahy ETa mezi všemi sledovanými ekosystémy z Metric



Obr. 17 Vztahy ETa mezi všemi ekosystémy lesních porostů z Metric

Mezi jednotlivými porosty je velká meziroční ale také značná mezidruhová variabilita. Obecně lze usuzovat, že rozdíl mezi borovicí a smrkem je malý až zanedbatelný. Jehličnany vykazují v létě větší ETa než listnáče. Nejmenší ETa byla zaznamenána v lokalitách osazených dubem. Průměrný roční chod ETa odvozené modelem Metric byl srovnán mezi jednotlivými porosty, a tak byl stanoven očekávaný vliv zavedení adaptačního opatření. Srovnání bylo

provedeno pro všechny uvažované změny, jak pro změnu dřevinné skladby, tak pro změnu ekosystémů (Obr. 18).

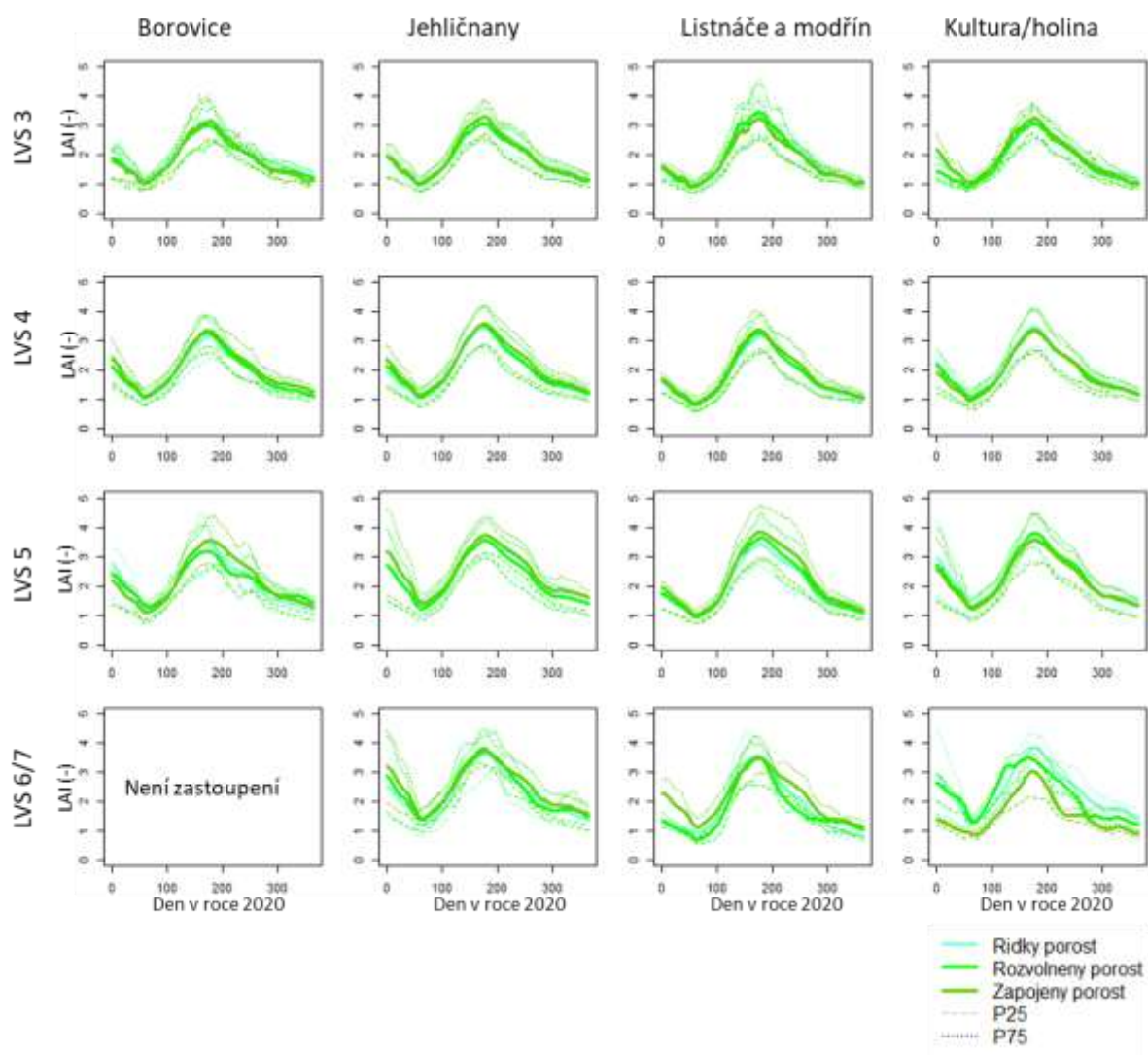


Obr. 18 Očekávaný vliv zavedení adaptačního opatření v dotčené lokalitě podle pozorování ETa v modelu Metric

4.3 Vyjádření vztahů mezi ekosystémy modelovými parametry pro výpočet ETa

V současné etapě byly rozdíly mezi ekosystémy zavedeny pomocí klasifikace a modifikace LAI. V navazujících etapách bude zapotřebí ladit vliv opatření na zasažených lokalitách i pomocí dalších parametrů (Kc, RD, případně parametrů popisujících intercepci) za účelem dosažení očekávaného vlivu na ETa (Popsaných v kapitole 4.2).

Pro kategorizaci dat LAI z MODIS byly využity první 3 číslice indexu podle IFER (Tab. 2) kombinující Lesní vegetační stupeň (LVS), skupinu dřevin a zápoj vegetace (Obr. 19). Pro každou ze 12 kategorií a pro každý den byly vypočteny základní statistiky napříč všemi zahrnutými pixely rastru MODIS. Obr. 19 zahrnuje roční chod průměrné hodnoty LAI pro vyhodnocovaný rok 2020.



Obr. 19 Charakteristické hodnoty LAI (průměr, P25 a P75) odvozené z DPZ (MODIS) podle dřevinné skladby, LVS (lesní vegetační stupeň) a stupně zapojení porostu

Bylo zjištěno, že s nadmořskou výškou roste hodnota i variabilita časového průběhu hodnoty LAI. Mezi jednotlivými dřevinami však nebyl zaznamenán výrazný rozdíl. Setření rozdílů pravděpodobně způsobuje rozlišení vstupních dat, kdy je hodnota LAI odvozena a agregována v rámci plochy 0,25 km² pokryté jedním pixelem rastru (500x500m). V důsledku tohoto zjištění byla provedena verifikace ETa simulované modelem MIKE SHE na charakteristických lokalitách jednotlivých porostů s modelem Metric verifikovaným pomocí měření Eddy Covariance umístěného na atmosférické věži Křešín. Srovnání proběhlo v povodí Martinického potoka, kde se atmosférická věž nachází. Je zřejmé, že hodnoty z MODIS nelze pro nastavení vlivu adaptačního opatření přímo využít – vliv by byl neúměrně malý.

Vzhledem k tomu, že data z MODIS jsou v prostorovém rozlišení 500x500 m, bylo zapotřebí hodnoty LAI pro jednotlivé lesní kategorie upravit tak, aby dostatečně reprezentovaly sezónní chod LAI.

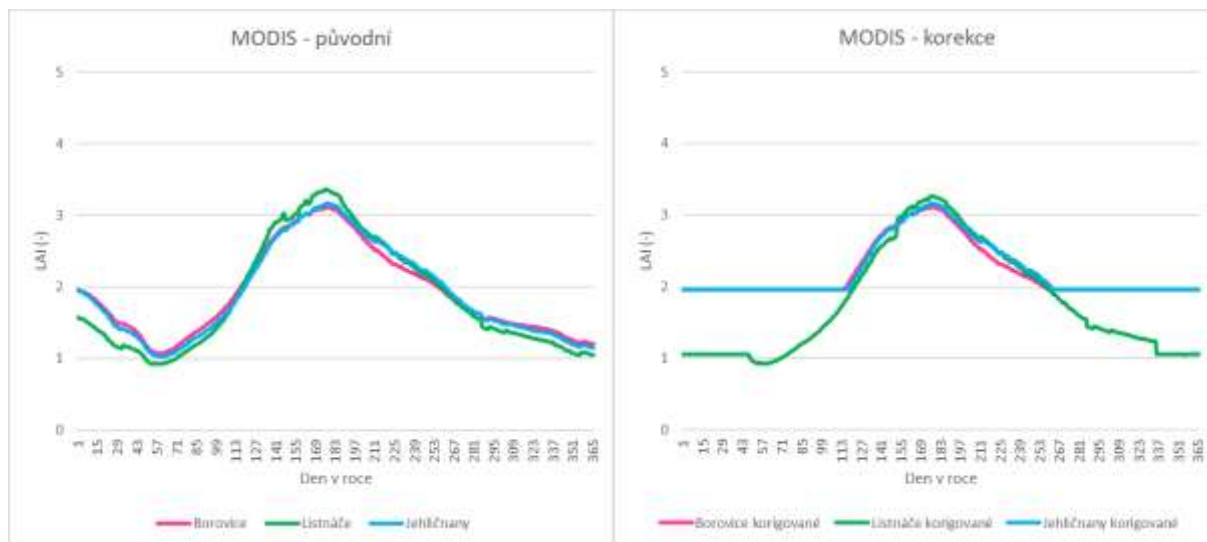
1. Korekce zimních hodnot LAI:
U jehličnanů byla zadána zimní hodnota LAI 2, zatímco u listnáčů byla tato hodnota stanovena 1
2. Korekce vztahu Smrk/Listnáč v letním období
Empiricky, na základě srovnání bylo zjištěno, že listnáče mají ETa v letním období větší o 3%. Bylo předpokládáno, že hodnota LAI listnáčů by neměla být výrazně vyšší než v případě jehličnanů.

Tyto základní korekce byly aplikovány na všechny lesní kategorie.

4.4 Zavedení změny využití území do modelu

Pro možnosti zavádění adaptačních opatření týkajících se změny dřevinné skladby lesa, která zahrnuje i vývoj porostu v čase, je zapotřebí nejprve pochopit chování jednotlivých porostů z hlediska LAI v dané oblasti a vztahy mezi jednotlivými porosty daného druhu a stáří. Stanovení charakteristických hodnot LAI pro danou třídu porostu vychází z prostorové kategorizace lesních porostů do 156 tříd vymezených jednoznačným identifikátorem podle Tab. 2.

Pro třídy vymezené prvními 2 číslicemi kódu (LVS, dřevina) byly spočítány prostorově agregované statistiky z LAI, vycházející z produktu MODIS pro rok 2020. Platnost vztahů mezi dřevinami byla korigována pomocí rozdílů LAI odvozených z měření v okolí atmosférické věže Křešín v kombinaci s modelem stanovení ETa Metric. Důvod ke korekci spočívá v tom, že data z MODIS jsou v prostorovém rozlišení 500x500 m a rozdíly mezi jednotlivými druhy dřevin jsou vyhlazeny. Dále data LAI z MODIS v zimním období ukazují velmi malé rozdíly mezi jednotlivými dřevinami. Proto bylo zapotřebí hodnoty LAI pro jednotlivé lesní kategorie upravit tak, aby dostatečně charakteristicky reprezentovaly sezónní chod LAI (Obr. 20).



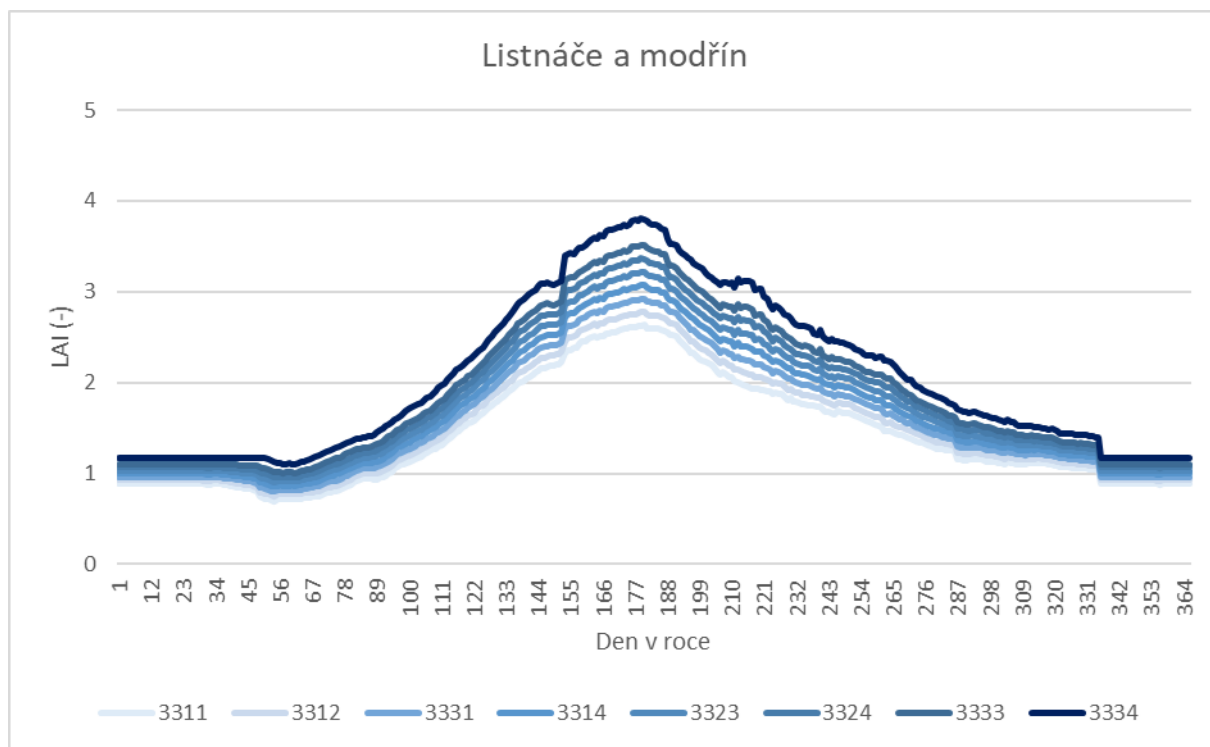
Obr. 20 Příklad zavedení korekcí dat LAI z produktu MODIS v zimním (jehličnany) a letním (listnáče) období

Aby byla co nejvíce podpořena možná změna věkové struktury a zakmenění (číslíce 3 a 4 v Tab. 2), bylo stanoveno rozmezí hodnot LAI v daném lesním vegetačním stupni mezi percentily P25 a P75. V rámci tohoto intervalu byly přiřazovány hodnoty LAI pro každý den v roce tak, že lokalitám s nejmenším stupněm zakmenění (hodnota indexu zakmenění = 1) a nejmenším stupněm LAI (hodnota indexu = 1) byla přiřazena časová řada LAI na spodní hranici intervalu (P25), lokalitám s kombinací nejvyšších hodnot indexů zakmenění a LAI (3,4) byla přiřazena časová řada LAI na horní hranici intervalu (P75) a zbytku kombinací byla přiřazena lineárně interpolovaná hodnota podle převodní tabulky (Tab. 3).

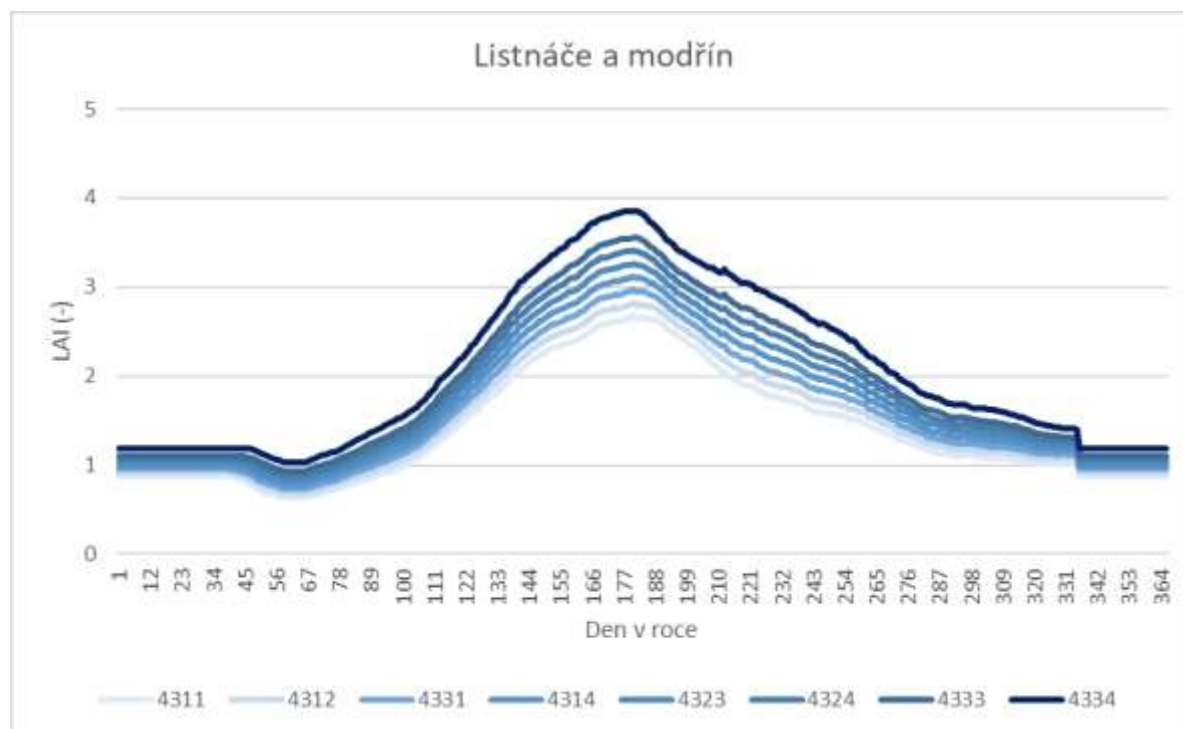
Tab. 3: Převodní tabulka přiřazení časové řady LAI pro danou lokalitu na základě kombinace indexu zakmenění a LAI definovaného IFER v rozmezí pozorovaných hodnot LAI z produktu MODIS v rámci LVS (Lesního vegetačního stupně)

Použitý percentil LAI dané lokality	Stupeň zakmenění	Stupeň LAI
P25	1	1
P32	1	2
P32	2	1
P39	3	1
P39	1	3
P46	1	4
P46	2	2
P54	2	3
P54	3	2
P61	2	4
P68	3	3
P75	3	4

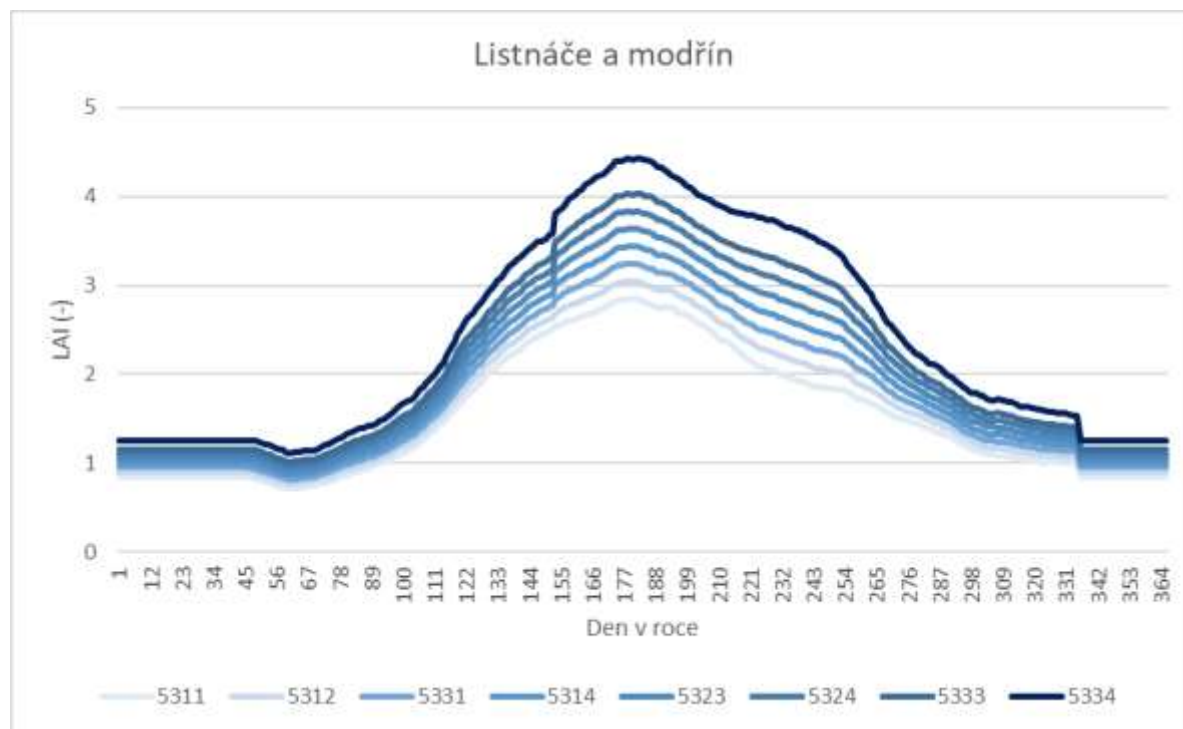
Jednotlivé časové řady LAI byly vypočteny pro každou třídu definovanou na základě dat z roku 2020 (Obr. 21, Obr. 22, Obr. 23, Obr. 24) a dále využity pro změny dřevinné skladby a vývoj lesa ve scénářích S1, S2, S3 (kapitola 3.2).



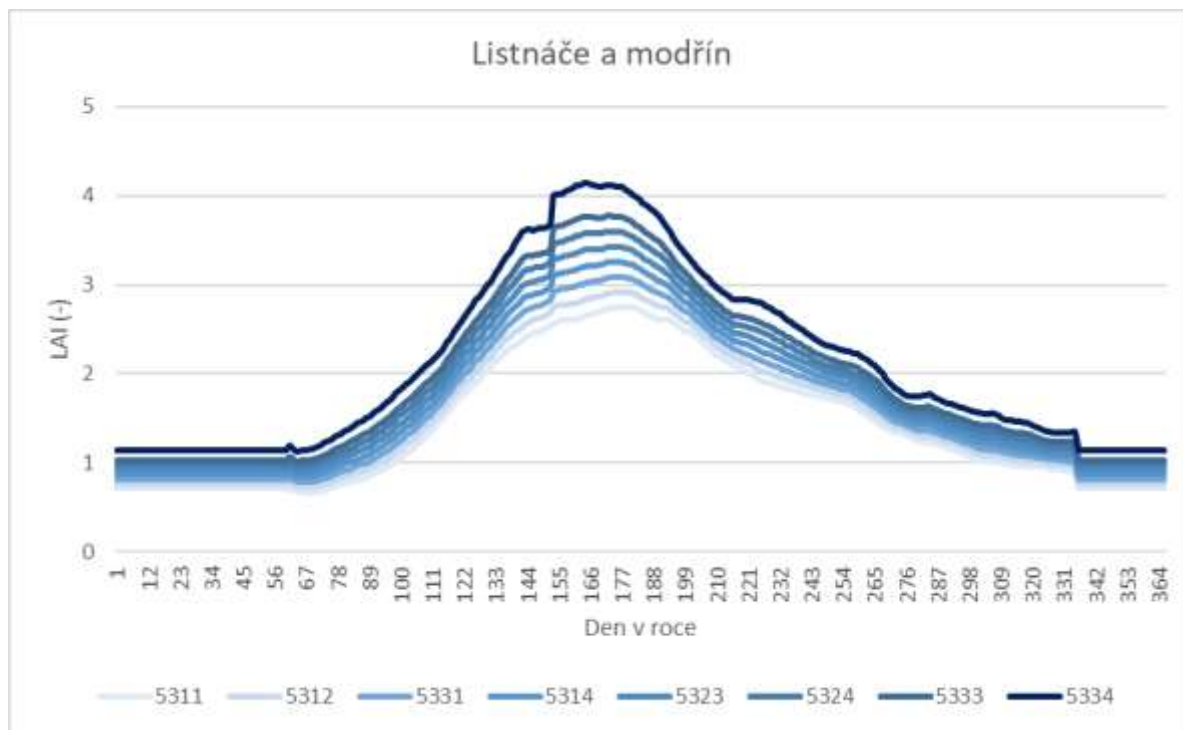
Obr. 21 Příklad stanovení hodnot LAI v kategorii Listnáče a modřín pro LVS 3, jednotlivé dny v roce a pro každou třídu definovanou dle IFER. V případě duplicitních čar je v legendě označena pouze 1 třída



Obr. 22 Příklad stanovení hodnot LAI v kategorii Listnáče a modřín pro LVS 4, jednotlivé dny v roce a pro každou třídu definovanou dle IFER. V případě duplicitních čar je v legendě označena pouze 1 třída

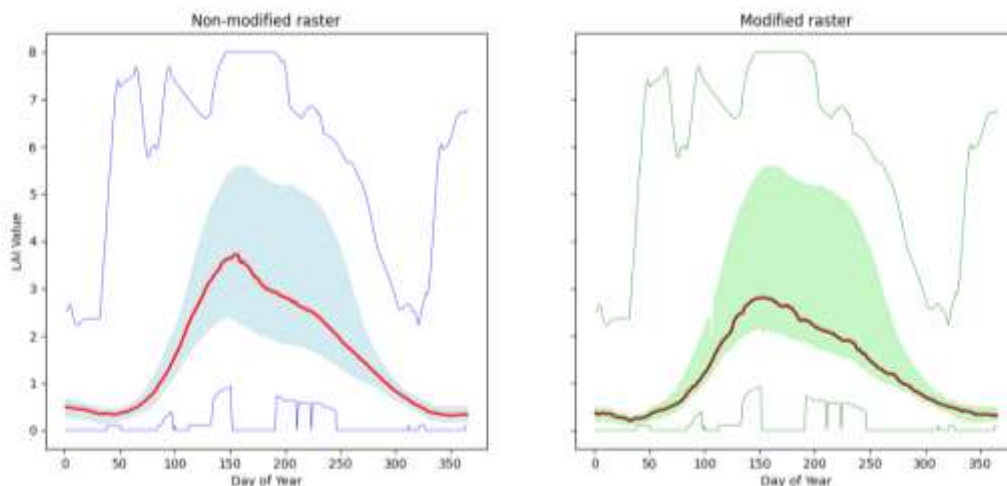


Obr. 23 Příklad stanovení hodnot LAI v kategorii Listnáče a modřín pro LVS 5, jednotlivé dny v roce a pro každou třídu definovanou dle IFER. V případě duplicitních čar je v legendě označena pouze 1 třída



Obr. 24 Příklad stanovení hodnot LAI v kategorii Listnáče a modřín pro LVS 6 a 7, jednotlivé dny v roce a pro každou třídu definovanou dle IFER. V případě duplicitních čar je v legendě označena pouze 1 třída

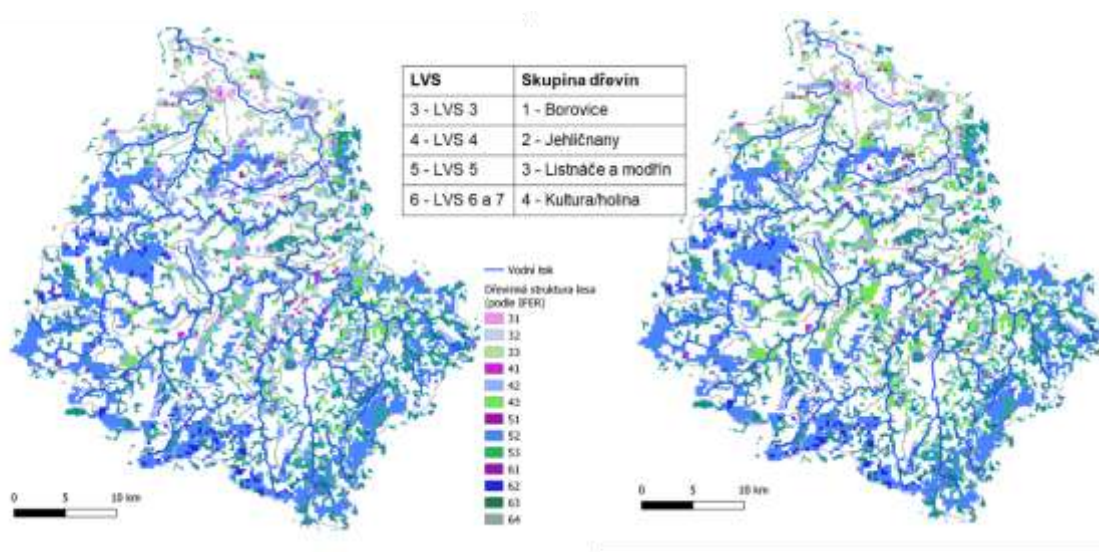
Opatření týkající se změny ekosystému jsou zaváděny do modelu přepočítáním stávajících hodnoty LAI z MODIS. Přepočet spočívá v nahrazení souboru hodnot LAI v daném dni pro současný ekosystém odpovídajícím souborem hodnot LAI pro stejný den v navrhovaném ekosystému. Převod je proveden pomocí převodního koeficientu, který je získán srovnáním základních popisných statistik současného a navrženého ekosystému (Obr. 25).



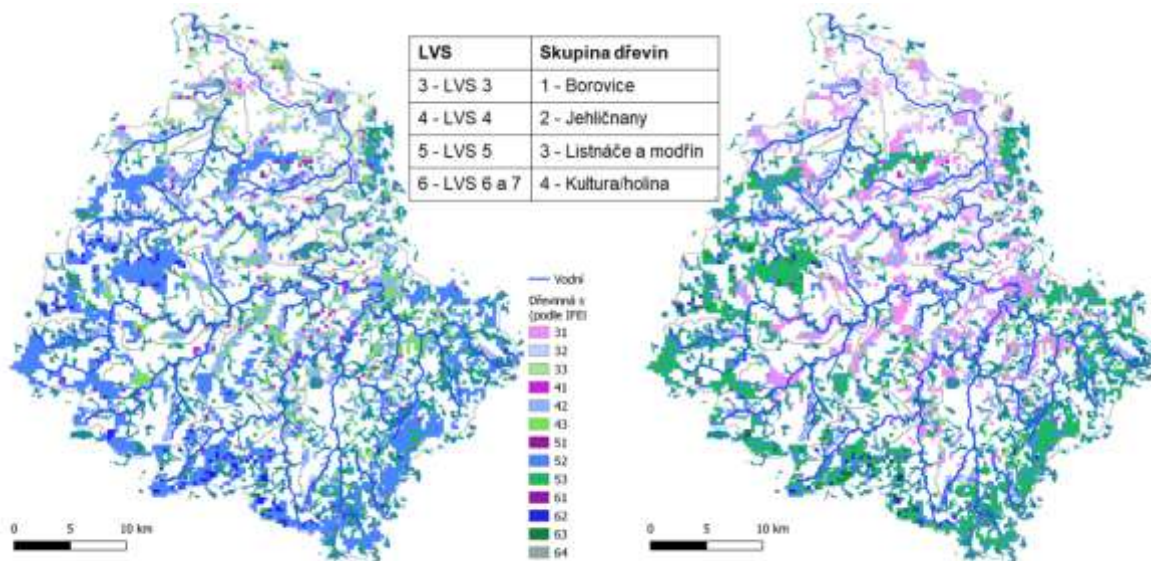
Obr. 25 Příklad zavedení změny LAI mezi ekosystémem v současném stavu (vlevo) a v navrženém stavu (vpravo). Červená čára medián všech hodnot v dané kategorii, modrá/zelená plocha zahrnuje percentil P25 až P75, modrá/zelená čára představuje minimální, resp. maximální hodnotu

4.5 Sestavení variantních scénářů

Pro simulace vlivu adaptačního opatření na vodní bilanci je zapotřebí upravit model referenčního stavu 1981 - 2010. LAI lesních porostů vychází z klasifikace platné pro rok 2020, avšak oblasti definované jako těžba a kultura byly osázeny jehličnany se stupněm zapojení 3 a v růstové fázi 4. V oblastech mimo les byly zachovány hodnoty LAI stejné jako v modelu referenčního stavu aplikovaném v předešlých etapách. S výstupy modelu referenčního stavu bude zapotřebí srovnávat všechny výstupy modelů předpokládaného budoucího vývoje pro časové horizonty 2030, 2050, 2070 a 2085. V prvním kroku bylo nutné stanovit místa a charakter navrhnuté změny (Obr. 26, Obr. 27)

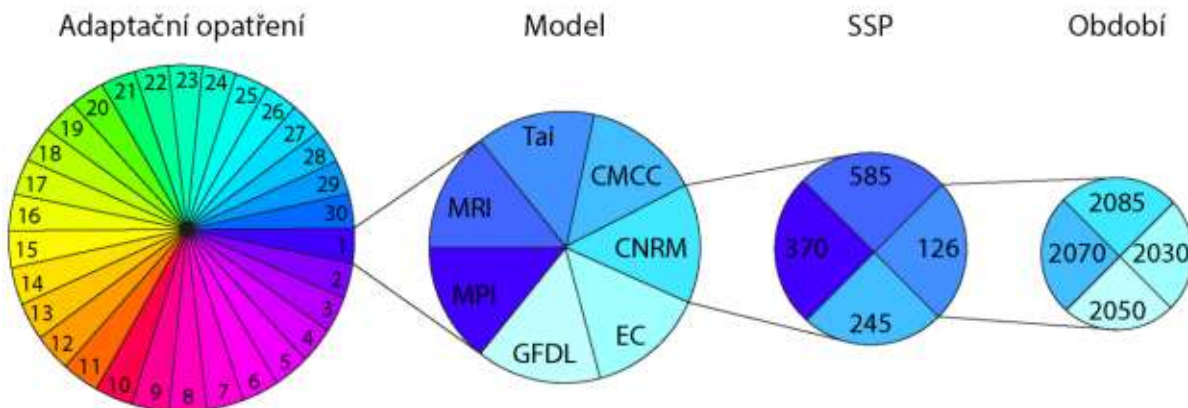


Obr. 26 Prostorové vymezení změny v lesnický optimálním scénáři (S2) v modelovém rozlišení 200x200 m v horizontu 2050. Pro zjednodušení jsou zobrazeny pouze první 2 číslice kódu. Vlevo je stav 2020 a vpravo adaptační scénář



Obr. 27 Prostorové vymezení změny v hydrologicky optimálním scénáři (S3) v modelovém rozlišení 200x200 m v horizontu 2050. Pro zjednodušení jsou zobrazeny pouze první 2 číslice kódu. Vlevo je stav 2020 a vpravo adaptační scénář

I když obrázky ukazují pouze první 2 číslice kódu podle IFER, pro přiřazení hodnot LAI bylo využito všech 156 kategorií. Dávkovým příkazem byly propojeny buňky dané třídy s hodnotami LAI, jejichž sestavení je popsáno v kapitole 4.4. Vzniklé adaptační scénáře budou v následující etapě zatíženy souborem okrajových podmínek předpokládaného vývoje klimatu v horizontech 2030, 2050, 2070 a 2085 (Obr. 28).



Obr. 28 Schéma zatížení modelu klimatickými scénáři (Fischer et.al., 2023)

4.6 Koncept vyhodnocení efektu na zmírnění negativních dopadů klimatické změny na vodní bilanci

Navržená opatření mají přímý dopad na změny ETa, hlavní ztrátový prvek ve vodní bilanci. Vzhledem k sezónnímu chodu ETa je zapotřebí prozkoumat proměnu sezonality budoucích odtokových podmínek a hodnotit změny podle ročních období, nikoliv pouze v pohledu dlouhodobého průměru, kde může protichůdný efekt opatření v různých měsících způsobit neutralizaci efektu navrženého opatření.

Výstupy budou hodnoceny především z hlediska změn celkové bilance. Vyhodnocení bude zahrnovat celý rozptyl variant klimatických scénářů a bude se zaměřovat na změnu odtokových poměrů v ploše povodí. Hlavním cílem následující etapy bude zjistit, kde v povodí klimatická změna negativně ovlivňuje generaci odtoku z ploch. Bude hodnocena zvlášť rychlá a pomalejší složka odtoku.

5 Závěr a další kroky

V rámci etapy byl vyhodnocen přímý vliv klimatické změny na vodní bilanci, její složky a odtokové procesy v povodí Želivky. Vliv klimatické změny byl stanoven jako rozdíl budoucího a referenčního stavu pro časové horizonty popisující období okolo roku 2030, 2050, 2070 a 2085. Vliv klimatické změny byl hodnocen v celém spektru modelovaných průtoků a v průběhu sezóny a míra nejistoty mezi jednotlivými GCM byla zahrnuta do vyhodnocení formou rozpětí očekávaných výsledků. Není možné určit jednu hodnotu, ale je zapotřebí vždy uvažovat celý interval očekávané změny vycházející z 26 modelovaných scénářů zahrnující vybrané modely GCM a jejich vývoj v rámci 4 emisních scénářů vycházejících z rozdílného socioekonomického vývoje. Bez adaptačních opatření v horizontech 2030 až 2085 prognózy ukazují výrazné snížení průměrného ročního průtoku od přibližně 9 % do více než 60 %, v závislosti na lokalitě a časovém horizontu. Tento pokles bude s časem zdůrazněn a průměrné průtoky mohou být ke konci století v důsledku klimatické změny redukovány až na polovinu referenčního stavu 1981-2010.

V této etapě byla následně stanovena komplexní metodika a scénáře pro zvýšení odolnosti krajiny a lesního hospodářství v povodí Želivky s cílem minimalizovat dopady klimatické změny na vodní bilanci a odtokové poměry. V rámci této práce byla identifikována a navržena opatření zaměřená především na změny v lesním hospodaření, zejména v regionech postižených kalamitou, a na reakci krajiny na měnící se klimatické podmínky. Připraveny byly tři scénáře vývoje lesů, které zahrnují udržení současného stavu, vědecky podložené optimalizace ve skladbě porostů, přičemž všechna směřují ke zlepšení hydrologické bilance nebo zachování stability ekosystému. Návrhy na změny landuse byly cíleny na nejzranitelnější oblasti povodí, hodnocené pomocí indexu ESAI, s cílem zvýšit odolnost krajiny vůči klimatickým extrémům. Data z dálkového průzkumu země a měření evapotranspirace (ETa) byla využita k verifikaci modelu MIKE SHE a k odvození vztahů mezi porosty a vodní bilancí. Implementace navržených adaptačních opatření a scénářů má potenciál významně přispět ke zmírnění dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v povodí, a tím zvýšit odolnost místní krajiny. Další etapa bude zahrnovat modelové posouzení specifických efektů těchto opatření na odtokové poměry.

V Brně dne 13.6.2025

doc. Ing. Evžen Zeman, CSc. a kolektiv

6 Seznam použitých zkratek

DPZ – dálkový průzkum země
DHI – Dánský hydraulický institut
DMR5G – Digitální model reliéfu České republiky 5. generace v S-JTSK, Bpv
ESAI - Environmental Sensitivity Assessment Index
ETa – aktuální evapotranspirace
ETo – referenční evapotranspirace
GCM – globální klimatické modely
HM – hydrologický model
IFER – Ústav pro výzkum lesních ekosystémů
Kc – vegetační koeficient
LAI – leaf area index – index listové plochy
MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
RD – root depth – hloubka kořenění
TA – TransAdapt
ÚVGZ – Ústav výzkumu globální změny, AV ČR v. v. i.
VD – vodní dílo

7 Literatura

Fischer, M., Zeman, E., Vizina, A., Hanel, M., Bernsteinová, J. et al (2023) Metodika pro stanovení hlavních poruch vodohospodářské bilance a optimalizace adaptačních opatření v podmínkách změny klimatu, Certifikovaná metodika, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. 2023, ISBN 978-80-87902-37-0

Fischer, M., Zeman, E., Bernsteinová, J., Vizina, A., Hanel, M., et al (2023) Metodika pro rychlé, komplexní, nezávislé rozhodování o potřebnosti, efektivitě a interakci adaptačních opatření v povodích v podmínkách změny klimatu, Certifikovaná metodika, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. 2023, ISBN 978-80-87902-38-7

Mendiguren, G., Koch, J., and Stisen, S.: Spatial pattern evaluation of a calibrated national hydrological model – a remote-sensing-based diagnostic approach, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 5987–6005, <https://doi.org/10.5194/hess-21-5987-2017>, 2017.